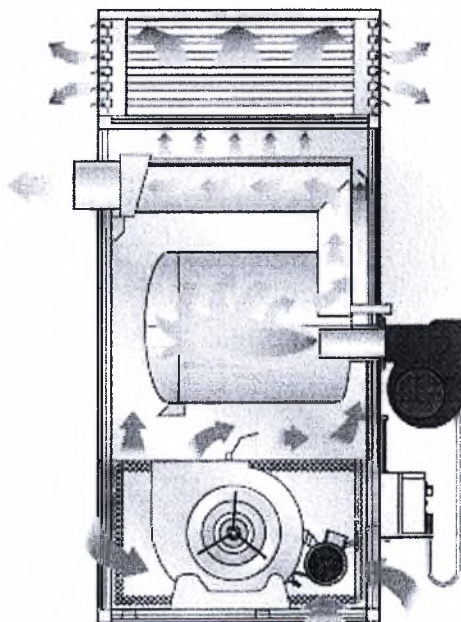


	<p>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Λ. Αθηνών - Πεδίον Αρεώς, 383 34 ΒΟΛΟΣ http://www.mie.uth.gr/labs/lte/info.htm</p>	
<p>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ Διευθυντής: Καθηγητής Α.Μ. Σταματέλλος</p>		

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση ροής και μετάδοσης θερμότητας σε αερολέβητα με υπέρυθρη θερμογραφία και CFD



Συντάκτης:
Δημήτριος Τζιουρτζιούμης

Επιβλέπων Καθηγητής:
Αναστάσιος Σταματέλλος

Βόλος Ιούνιος 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6387/1
Ημερ. Εισ.: 07-07-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2008
ΤΖΙ

© 2008 Δημήτριος Τζιουρτζιούμης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Σταματέλλος Αναστάσιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Σταπουντζής Ερρίκος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πελεκάσης Νικόλαος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Στη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία ξεκίνησε το 2008, σημαντικός αριθμός ανθρώπων συνεργάστηκαν και πρόσφεραν τη βοήθειά τους. Είμαι ευγνώμων σε όλους. Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή μου να απευθύνω τις πιο θερμές ευχαριστίες μου στους παρακάτω:

Πρώτο, δικαιωματικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Δρ. Αναστάσιο Σταματέλλο για την εμπιστοσύνη την οποία έδειξε στο άτομο μου με την ανάθεση αυτής της εργασίας. Του είμαι ευγνώμων για την αμέριστη επιστημονική και ανθρώπινη καθοδήγηση που μου προσέφερε στην αντιμετώπιση των πάσης φύσεως ζητημάτων που ανέκυψαν στις διάφορες φάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή του Εργαστηρίου Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών για την παροχή διευκολύνσεων με τον υπολογιστικό εξοπλισμό και την άδεια χρήσης του λογισμικού ANSYS - CFX, καθώς και για τις πολύτιμες υποδείξεις του στην πειραματική διάταξη, στην ερμηνεία και στις βελτιώσεις των αποτελεσμάτων των ρευστομηχανικών υπολογισμών. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω και για την παραχώρηση του οργάνου MRU Vario Plus Industrial.

Ευχαριστίες ακόμη οφείλω στον καθηγητή κ. Νικόλαο Πελεκάση του Εργαστηρίου Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών από τον οποίο απέκτησα τις βασικές γνώσεις στο τομέα της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Επίσης, εκ των υπολοίπων συνεργατών του Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών, οφείλω θερμές ευχαριστίες στον Δρα Γεώργιο Ποντικάκη για την παραχώρηση του πρωτοτύπου και των κατασκευαστικών σχεδίων του αερολέβητα και την εν γένει συνεργασία στην βελτιστοποίηση, καθώς επίσης και στον φίλο, πέρα από συνεργάτη, Τελειόφοιτο Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Λουκά Δημητριάδη για την πολύτιμη συμβολή του στο εργαστηριακό μέρος.

Περιεχόμενα

Περίληψη	8
1 Εισαγωγή	9
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	12
2.1 Θέρμανση και καύση	12
2.1.1 Θέρμανση και ποιότητα ζωής	12
2.1.2 Καύση	13
2.2 Εγκαταστάσεις Θέρμανσης – Κλιματισμού	15
2.2.1 Είδη λεβήτων	15
2.2.2 Καυστήρες πετρελαίου	16
2.2.2.1 Περιγραφή δομής και τρόπου λειτουργίας	16
2.2.3 Σταγονιδιοποίηση υψηλής πίεσης	20
2.2.3.1 Ακροφύσιο	20
2.2.3.1.1 Το απλό ακροφύσιο	20
2.2.4 Αντλία καυσίμου	21
2.2.5 Ο ανεμιστήρας του καυστήρα	21
2.2.6 Το κέλυφος του καυστήρα	23
2.2.7 Διάταξη ανάμιξης	23
2.2.8 Διάταξη έναυσης	23
2.2.9 Ηλεκτροκινητήρας	24
2.3 Αερολέβητες	25
2.3.1 Συστήματα θέρμανσης με θερμό αέρα	25
2.3.2 Αερολέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα	26
2.3.3 Αερολέβητες με ατμοσφαιρικό καυστήρα αερίου	26
2.3.4 Σχεδιαστικές τροποποιήσεις αερολεβήτων	26
2.3.5 Αμερικάνικοι αερολέβητες	29
2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας με ακτινοβολία	30
2.4.1 Απορρόφηση, ανάκλαση και διάδοση ακτινοβολίας	32
2.4.2 Ακτινοβολία μέλανος σώματος	32
2.4.3 Ο νόμος του Stefan Boltzmann	33
2.4.4 Μεταβολή της ακτινοβολούμενης θερμορροής με το μήκος κύματος	33
2.4.5 Νόμος μετατόπισης του Wien	34
2.5 Βασικές Αρχές Υπέρυθρης Θερμογραφίας	35
2.5.1 Εισαγωγή	35
2.5.1.1 Ικανότητα Εκπομπής (emissivity)	36
2.5.1.2 Απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της θερμοκάμερας	36
2.5.1.3 Αντανακλώμενη θερμοκρασία	36
2.5.1.4 Ατμοσφαιρική θερμοκρασία, υγρασία και απόσταση	37
2.5.2 Σύντομη αναφορά στην Ιστορία της Υπέρυθρης Θερμογραφίας	37
2.5.3 Θεωρία της θερμογραφίας	38
2.6 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics)	39
2.6.1 Η Ιστορία του CFD	39
2.6.2 Η Μαθηματική βάση του CFD	40
2.6.3 Η μεθοδολογία επίλυσης του κώδικα CFD	41
2.6.4 Άωση (Buoyancy)	43
2.6.5 Εξισώσεις Επίλυσης	44
2.6.6 Μοντέλα Τύρβης (Turbulence Models)	46
2.6.7 Μοντελοποίηση ακτινοβολίας	46
3 Μεθοδολογία επίλυσης του βασικού προβλήματος (reference case)	47
3.1 Πειραματικό μέρος επίλυσης	48

3.1.1	Διεξαγωγή μετρήσεων βαθμού απόδοσης και λόγου αέρα.....	48
3.1.2	Μετρήσεις με υπέρυθη θερμογραφία.....	50
3.1.3	Μετρήσεις στο στόμιο με ανεμόμετρο θερμού σύρματος	55
3.1.4	Μετρήσεις στο εσωτερικό του αερολέβητα.....	63
3.1.5	Μετρήσεις θερμοκρασιών και στατικής πίεσης στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό	64
3.2	Υπολογιστικό μέρος επίλυσης.....	65
3.2.1	Solid modeling.....	65
3.2.2	Υπολογιστικό πλέγμα	66
3.2.3	Διαδικασία προσδιορισμού οριακών συνθηκών.....	68
3.2.3.1	Οριακές συνθήκες εισόδου, εξόδου, plenum, cover.....	68
3.2.3.2	Οριακές συνθήκες επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας λέβητα	69
3.2.4	Επίλυση των εξισώσεων	71
3.2.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	74
3.2.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	76
3.3	Ισοζύγια μάζας και ενέργειας	77
4	Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών – Επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού παροχής αέρα.....	81
5	Έλεγχος πιθανών σχεδιαστικών βελτιώσεων	82
5.1	Μετατόπιση της θέσης του ανεμιστήρα με χρήση του θερμογραφήματος της reference case.....	82
5.1.1	Επίλυση εξισώσεων	83
5.1.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	85
5.1.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων – Σύγκριση των δύο μοντελοποιήσεων ..	88
5.1.4	Ισοζύγια μάζας και ενέργειας	88
5.1.5	Συμπεράσματα	89
5.2	Μεθοδολογία επίλυσης της shifted case.....	90
5.2.1	Πειραματικό μέρος επίλυσης.....	92
5.2.1.1	Διεξαγωγή μετρήσεων βαθμού απόδοσης και λόγου αέρα	92
5.2.1.2	Μετρήσεις με υπέρυθη θερμογραφία	92
5.2.1.3	Μετρήσεις θερμοκρασιών και στατικής πίεσης στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό.	98
5.2.2	Υπολογιστικό μέρος επίλυσης.....	99
5.2.2.1	Solid modeling.....	99
5.2.2.2	Υπολογιστικό πλέγμα	99
5.2.2.3	Διαδικασία προσδιορισμού οριακών συνθηκών.....	100
5.2.2.3.1	Οριακές συνθήκες εισόδου, εξόδου, plenum, cover	100
5.2.2.3.2	Οριακές συνθήκες επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας λέβητα	100
5.2.2.4	Επίλυση εξισώσεων.....	101
5.2.2.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	103
5.2.2.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	106
5.2.3	Ισοζύγια μάζας και ενέργειας	107
5.2.4	Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών.....	108
5.2.5	Σύγκριση των δύο τελευταίων μοντελοποιήσεων	108
6	Σύνοψη μεθοδολογίας επίλυσης και βελτιστοποίησης σχεδιασμού	109
7	Συμπεράσματα	111
8	Προτάσεις για το μέλλον	112
9	Βιβλιογραφία	113
10	Παραρτήματα.....	115
10.1	Πρωτόκολλα μετρήσεων.....	115

10.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά οργάνων μέτρησης	117
10.2.1	Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot wire anemometer).....	117
10.2.2	Κάμερα Υπέρυθρης Θερμογραφίας, ThermaCAM P45	119
10.2.3	Αναλυτής καυσαερίων MRU Vario plus industrial	123
10.2.4	Χαρακτηριστική ανεμιστήρα, tecnifan	125
10.2.5	Καρτέλα τιμών δείκτη αιθάλης.....	126
10.3	Ισοζύγια μάζας και ενέργειας	127

Περίληψη

Ο σχεδιασμός αερολεβήτων οι οποίοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο πετρέλαιο ή φυσικό αέριο συνήθως πραγματοποιείται με την εφαρμογή παραδοσιακών μεθόδων. Από την άλλη η εφαρμογή σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων μπορεί να υποσχεθεί πολλά σε αυτή την κατηγορία εξοπλισμού, ειδικά αν συνοδεύεται από σύγχρονες χαμηλού λειτουργικού κόστους πειραματικές διατάξεις. Η παρούσα εργασία, αναφέρεται στην εφαρμογή εμπορικού λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics), συνοδευόμενου από υπέρυθρη θερμογραφία (infrared thermography), με σκοπό την παρουσίαση και βελτιστοποίηση της ροής και της μετάδοσης θερμότητας σε ένα αερολέβητα ονομαστικής ισχύος 30,000 kcal/h. Η υπέρυθρη θερμογραφία συνέβαλε στον προσδιορισμό των θερμοκρασιακών οριακών συνθηκών στις επιφάνειες του εναλλάκτη θερμότητας φλόγας – καυσαερίων / αέρα αεροθέρμανσης. Το τρισδιάστατο (3D) ροϊκό πεδίο και η μετάδοση θερμότητας στον όγκο ελέγχου του αερολέβητα, σε μόνιμες συνθήκες (βέλτιστο σημείο λειτουργίας), υπολογίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού και παρουσιάζονται κυρίως σε μορφή τρισδιάστατων ροϊκών γραμμών και πεδίων κατανομής θερμοκρασιών και ταχυτήτων σε χαρακτηριστικές διατομές του όγκου ελέγχου. Τα αριθμητικά αποτελέσματα ελέγχονται μέσω των ισοζυγίων ενέργειας στις διατομές εισόδου και εξόδου του όγκου ελέγχου, όπου γίνονται επίσης ενδεικτικές μετρήσεις θερμοκρασιών και ταχυτήτων. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογισθεί και ο βαθμός απόδοσης του αερολέβητα, ο οποίος επαληθεύεται με βάση τις μετρήσεις με τον εξειδικευμένο αναλυτή καυσαερίων. Σημαντικές βελτιώσεις στο σχεδιασμό των αερολεβήτων καταδεικνύονται με τη βοήθεια αυτής της διαδικασίας. Έτσι καταλήγουμε σε μια ελπιδοφόρα μεθοδολογία σχεδιασμού αερολεβήτων, η οποία υποστηρίζεται από σύγχρονα υπολογιστικά και πειραματικά εργαλεία.

1 Εισαγωγή

Μεταπολεμικά ο σχεδιασμός των λεβήτων κεντρικής θέρμανσης με καύσιμο πετρέλαιο βασίστηκε σε συναρμολόγηση τυποποιημένων χυτοσιδηρών τεμαχίων (φέτες). Παράλληλα όμως αναπτύχθηκαν και οι χαλύβδινοι συγκολλητοί λέβητες με αυλούς που επέτρεπαν περισσότερη ελευθερία στο σχεδιασμό. Από την εποχή της πρώτης ενεργειακής κρίσης - δεκαετία του 70 - οι κατασκευαστές βελτιστοποιούν το σχεδιασμό των λεβήτων ανάλογα με το τύπο καυσίμου (λιθάνθρακας, υπολείμματα ξυλείας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κτλ) έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες καυσαερίων, ακτινοβολίας, κελύφους και διακοπτόμενης λειτουργίας [1]. Η θερμοκρασία λειτουργίας των υδραυλικών λεβήτων μειώνεται σταδιακά, με κατάλληλο όμως σχεδιασμό έτσι ώστε να αποφεύγεται η συμπύκνωση υδρατμών στην εξαγωγή τους, ενώ πολύ σημαντικές βελτιώσεις έχουν επιτευχθεί με τους λέβητες συμπύκνωσης (έως και 109% με βάση τη κατώτερο θερμογόνο δύναμη). Παράλληλα με την ανάπτυξη των επιμέρους στοιχείων τους (λέβητας, καυστήρας, ρυθμιστικά όργανα) αξιοποιούνται πλέον οι δυνατότητες των σύγχρονων μικροεπεξεργαστών για βέλτιστο έλεγχο του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία θα επιδείξουμε κάποιες δυνατότητες βελτιστοποίησης σχεδιασμού μίας ειδικής κατηγορίας λεβήτων, των αερολεβήτων, οι οποίοι παράγουν θερμό αέρα για αεροθέρμανση – κλιματισμό (**Εικόνα 1**).

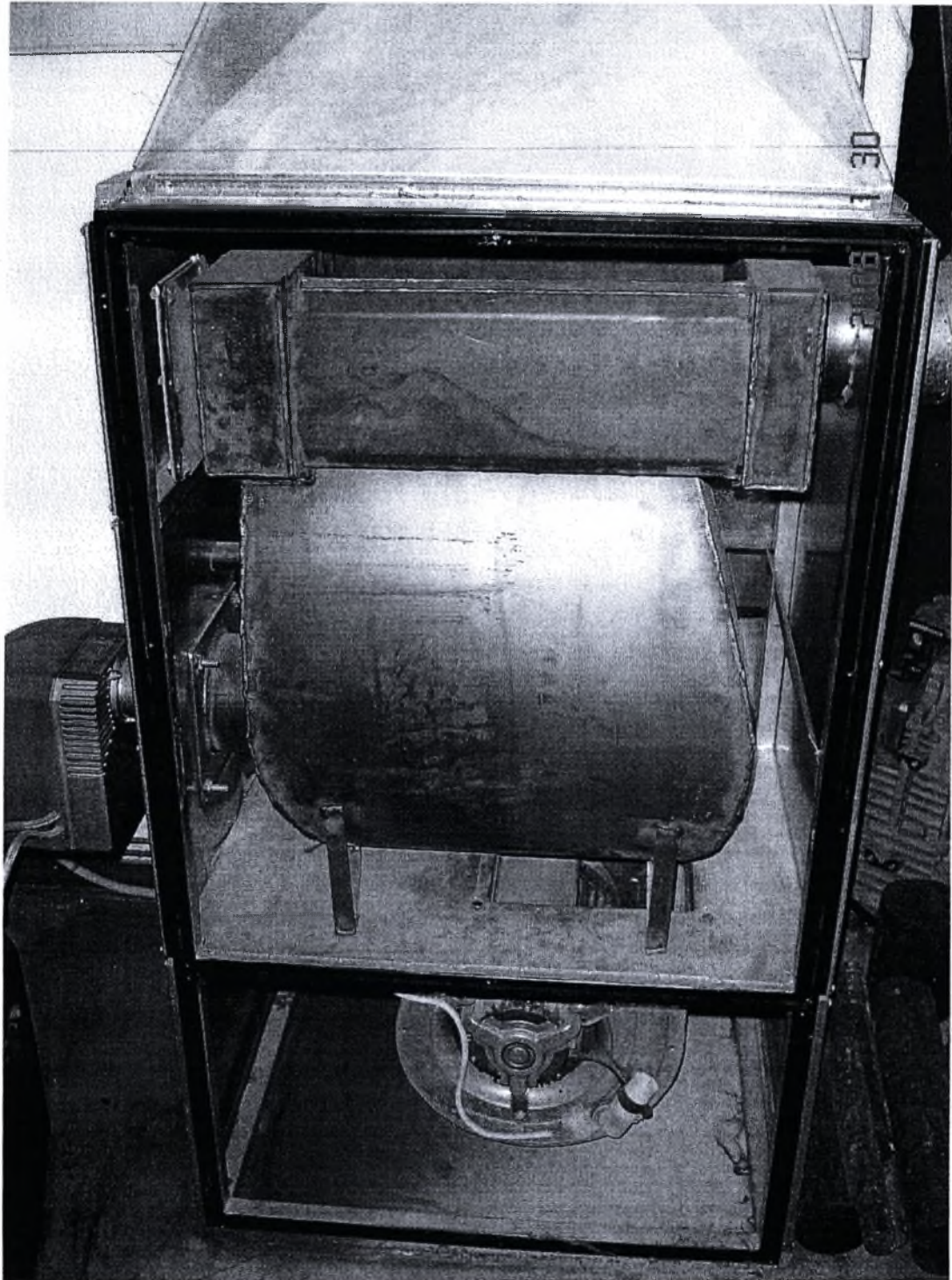


Εικόνα 1 Σχεδιαστικές παραλλαγές αερολεβήτων Ευρωπαϊκού και Αμερικάνικου τύπου.

Στην κατηγορία αυτή έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες για την βελτίωση του βαθμού απόδοσης με τα συμβατικά εργαλεία σχεδιασμού, από την δεκαετία του 80 [2, 3], ενώ τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες επικεντρώνονται σε βελτιώσεις στο σύστημα ελέγχου της καύσης [4], μείωσης των εκπομπών και αύξησης του βαθμού απόδοσης με συμπύκνωση των υδρατμών του καυσαερίου [5, 6]. Από την άλλη μεριά, οι σύγχρονοι εμπορικοί κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) βρίσκουν σήμερα ολοένα αυξανόμενη εφαρμογή στο σχεδιασμό βιομηχανικού εξοπλισμού, μετά από τις σημαντικές βελτιώσεις που έχουν γίνει στα σχετικά υπολογιστικά εργαλεία την τελευταία 20ετία. Οι εφαρμογές σε βιομηχανικούς λέβητες έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα για μελέτη υψηλής ισχύος εξοπλισμού, της τάξης των εκατοντάδων MW [7-11]. Στις περιπτώσεις αυτές η έμφαση δίδεται κυρίως στην πλευρά του θαλάμου καύσης, με μελέτη των φαινομένων έναυσης σε τεχνολογίες όπως η καύση

άνθρακα σε ρευστοποιημένες κλίνες [12], η καύση πετρελαίου και φυσικού αερίου κτλ. Όμως, όπως προκύπτει τουλάχιστον από τη βιβλιογραφική έρευνα, οι δυνατότητες των σχετικών υπολογιστικών εργαλείων για υποστήριξη σχεδιασμού μικρότερων μονάδων, δεν αξιοποιούνται ακόμη σε σημαντικό βαθμό, ενδεχόμενα επειδή η διείσδυση των δεξιοτήτων χρήσης λογισμικού CFD στους μηχανικούς δεν έχει φτάσει ακόμη στον απαιτούμενο βαθμό, και απαιτούνται σημαντικές ανθρωποώρες υπολογιστικής εργασίας που δεν μπορούν να επενδυθούν από μικρότερες κατασκευαστικές επιχειρήσεις. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθεί να δαπανάται διεθνώς σημαντική προσπάθεια για σχεδιαστικές βελτιώσεις και επινοήσεις στην κατηγορία αυτή του εξοπλισμού θέρμανσης. Όμως οι μικρής ισχύος λέβητες εξακολουθούν να κατασκευάζονται και να σχεδιάζονται με τον παραδοσιακό τρόπο, φροντίζοντας απλά να ακολουθούνται οι ισχύουσες τεχνικές οδηγίες [13-16], με εμπειρικά μόνο βήματα βελτιώσεων στο σχεδιασμό. Αυτή η πρακτική όμως, ενώ δίνει εν γένει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση των υδραυλικών λεβήτων κεντρικής θέρμανσης, φαίνεται ότι αφήνει ακόμη αρκετά περιθώρια βελτίωσης στην περίπτωση των αερολεβήτων, όπου οι συντελεστές συναγωγής θερμότητας από την πλευρά του θερμαινόμενου αέρα είναι γενικά χαμηλοί, και μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με βελτιώσεις στο ροϊκό πεδίο γύρω από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Η συγκεκριμένη εργασία έγινε μετά από παρακίνηση κατασκευαστή [17], ο οποίος επιθυμεί να βελτιώσει το σχεδιασμό της σειράς μικρών αερολεβήτων που παράγει (**Εικόνα 2**).



Εικόνα 2 Ο αερολέβητας 30,000 kcal/h (μετά την αφαίρεση του πρόσθιου καλύμματος του εναλλάκτη και της σχάρας εισόδου του ανεμιστήρα). Διαστάσεις ορθογώνιου πλαισίου: $L = 775 \text{ mm}$ $W = 600 \text{ mm}$ $H = 1320 \text{ mm}$

Οι επιθυμητές βελτιώσεις επικεντρώνονται στη γεωμετρία του θαλάμου καύσης και των επιφανειών εναλλαγής θερμότητας μεταξύ καυσαερίων – αέρα αεροθέρμανσης. Συγκεκριμένα, ενδιαφέρει να διερευνηθεί εάν μπορεί να βελτιστοποιηθεί η θέση και οι διαστάσεις του στομίου εξόδου του ανεμιστήρα που παρέχει τον αέρα για την

αεροθέρμανση, οι διαστάσεις του αναπτύγματος του κεντρικού θαλάμου καύσης και των αυλών και συλλεκτών μέχρι την καπνοδόχο κτλ.

Κατά κανόνα, η εφαρμογή του CFD απαιτείται να υποστηρίζεται από κάποιες μετρήσεις αναφοράς, οι οποίες απαιτούν τον εξοπλισμό ενός πρωτοτύπου με αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, ταχύτητας αέρα κτλ. Όμως στη συγκεκριμένη εργασία διευκολύνεται σημαντικά η διεξαγωγή των σχετικών μετρήσεων από την αξιοποίηση των δυνατοτήτων θερμογραφικής κάμερας υπέρυθρων τύπου FLIR Theramacam P45. Όπως αναλύεται στην εργασία αυτή, ο συνδυασμός εμπορικού κώδικα CFD [18] με την τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας, στην συγκεκριμένη περίπτωση, έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα που βοηθούν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των αερολεβήτων της συγκεκριμένης σειράς.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Θέρμανση και καύση

2.1.1 Θέρμανση και ποιότητα ζωής

Από τα προϊστορικά χρόνια ο άνθρωπος αισθάνθηκε την ανάγκη να ζει και να εργάζεται σε περιβάλλον υπό θερμοκρασίες οι οποίες του δημιουργούσαν το αίσθημα της άνεσης, του έδιναν τη δυνατότητα να εργάζεται αποδοτικότερα και τον καθιστούσαν λιγότερο ευαίσθητο σε προσβολές ασθενειών. Έτσι προσπαθούσε να θερμαίνει το χώρο παραμονής του, αν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος ήταν χαμηλές λόγω τόπου ή και εποχής.

Έχει αποδειχτεί ότι η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης, μεταξύ των οποίων και της θέρμανσης, οδήγησε στην αύξηση του ορίου ζωής του ανθρώπου, παράλληλα προς τα επιτεύγματα της Ιατρικής. Η θέρμανση του χώρου παραμονής, εκτός από το αίσθημα της άνεσης αύξησε και το μέσο όρο ζωής του, προφυλάσσοντας τον από προσβολές ασθενειών αλλά και μειώνοντας τις καταπονήσεις από τις καιρικές επιδράσεις.

Σήμερα είναι πλέον απαραίτητο οι άνθρωποι [19] να εργάζονται σε χώρους με θερμοκρασία τουλάχιστον 18 °C και να κατοικούν σε χώρους με θερμοκρασία τουλάχιστον 20 °C. Βέβαια, το αίσθημα της άνεσης εξαρτάται από πολυπλοκότερους συνδυασμούς περιβαλλοντικών όρων, όπως η υγρασία του χώρου, η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και η θερμοκρασία των επιφανειών των περιβαλλόντων τοίχων.

Η θέρμανση των χώρων, φυσικά απαιτεί δαπάνες, αφενός πάγιες για την κατασκευή των εγκαταστάσεων θέρμανσης και αφετέρου λειτουργικές για την προμήθεια της ενέργειας και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων. Επειδή τίποτε πλέον δεν είναι φθηνό ο μηχανικός, ο οποίος σχεδιάζει και κατασκευάζει εγκαταστάσεις θέρμανσης, πρέπει να τις διαστασιολογεί έτσι ώστε να καλύπτουν μεν τις ανάγκες θέρμανσης αλλά και να μην επιβαρύνουν τον χρήστη περισσότερο από το αναγκαίο.

Οι απαιτήσεις για τους λέβητες και καυστήρες δεν αφορούν μόνο την απόδοση τους και την κατασκευή τους αλλά και περιορισμούς για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους τους οποίους εκπέμπουν. Σήμερα είναι παραδεκτό ότι η ποιότητα ζωής εξαρτάται,

πλην των άλλων, και από την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Οι διάφοροι ατμοσφαιρικοί ρύποι επιβαρύνουν την υγεία, και κυρίως το αναπνευστικό σύστημα.

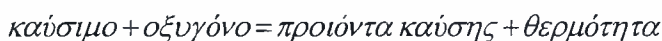
Ο μηχανολόγος μηχανικός ο οποίος ασχολείται με τις εγκαταστάσεις θέρμανσης, πρέπει να έχει καλή γνώση περί των καυστήρων και λεβήτων.

Τέλος, ο μηχανολόγος μηχανικός δεν πρέπει να υπερδιαστασιολογεί τους λέβητες και τους καυστήρες πέρα από το αναγκαίο ποσοστό της ανασφάλειας των υπολογισμών, το οποίο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%, διότι υπερδιαστασιολογημένοι λέβητες και καυστήρες, εκτός από την αυξημένη επιβάρυνση του πελάτη για την αγορά, σημαίνει συνήθως διακοπτόμενη λειτουργία σε οριακές περιοχές του πεδίου λειτουργίας τους, με αποτέλεσμα μειωμένο βαθμό απόδοσης, αυξημένη παραγωγή ρύπων και ταχύτερη γήρανση του λέβητα.

2.1.2 Καύση

Καύση χαρακτηρίζεται η χημική αντίδραση καύσιμων ουσιών με το οξυγόνο. Η καύση συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας και άρα υψηλές θερμοκρασίες και διατηρείται όσο υπάρχουν επαρκείς ποσότητες καυσίμου και οξυγόνου.

Η εξίσωση της καύσης στην γενική μορφή της είναι η ακόλουθη:



Στις εγκαταστάσεις θέρμανσης το απαραίτητο οξυγόνο για την καύση λαμβάνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Τα καύσιμα συστατικά των καυσίμων είναι κυρίως το υδρογόνο H_2 και ο άνθρακας C και δευτερευόντως το θείο S , το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Στα καύσιμα μπορεί να περιέχεται οξυγόνο, υδρατμοί, άζωτο αλλά και ορυκτές προσμίξεις τα λεγόμενα, αδρανή.

Τα αέρια καύσιμα, σε σύγκριση με τα υγρά και στερεά καύσιμα, έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται καμία διαδικασία προετοιμασίας. Γνωρίζουμε ότι τα στερεά χρειάζονται άλεση και τα υγρά σταγονιδιοποίηση. Τα αέρια χρειάζονται απλώς καλή ανάμιξη με τον αέρα καύσης.

Τα αέρια προϊόντα της καύσης ονομάζονται καυσαέρια.

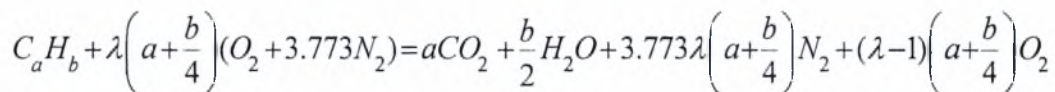
Αν τα συστατικά καούν με την σωστά υπολογιζόμενη ποσότητα οξυγόνου, χωρίς περίσσεια ή έλλειμμα, τότε η καύση ονομάζεται στοιχειομετρική. Αν τα συστατικά σε μια στοιχειομετρική καύση μετατραπούν πλήρως σε CO_2 και H_2O , οπότε στα καυσαέρια δεν περιέχεται καύσιμο ή οξυγόνο, τότε η καύση χαρακτηρίζεται ως τέλεια και πλήρης. Η περίπτωση της στοιχειομετρικής τέλει καύσης έχει μόνο θεωρητική σημασία. Η πλήρης καύση συνήθως απαιτεί περίσσεια οξυγόνου. Αν στο καύσιμο προσαχθεί οξυγόνο λιγότερο από το στοιχειομετρικά απαιτούμενο, τότε η καύση είναι μη πλήρης. Η καύση χαρακτηρίζεται ατελής όταν παρά ότι παρέχεται το στοιχειομετρικά απαιτούμενο οξυγόνο, δεν καταναλίσκεται όλο το καύσιμο.

Στην δική μας εφαρμογή εξετάζουμε την καύση με περίσσεια αέρα.

Η καύση με στοιχειομετρική ποσότητα αέρα δεν μπορεί να είναι τέλεια λόγω τεχνολογικών προβλημάτων. Για να ήταν τέλεια η καύση με στοιχειομετρική ποσότητα αέρα, θα έπρεπε να είναι τέλεια η ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα, στις εφαρμογές, παρέχουμε αυξημένες ποσότητες αέρα καύσης.

Στην συνέχεια ακολουθούν οι βασικές εξισώσεις [20] που ισχύουν στην καύση με περίσσεια αέρα, $\lambda > 1$:

Η χημική αντίδραση που περιγράφει την καύση με περίσσεια αέρα είναι η ακόλουθη:



Οι στοιχειομετρικές αναλογίες αέρα καυσίμου προσδιορίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$(A/F)_{st} = \frac{34.56(4+y)}{12.011+1.008y}, \text{ όπου } y = \frac{b}{a}$$

Ο λόγος αέρα καυσίμου προς το στοιχειομετρικό περιγράφεται με το ακόλουθο πηλίκο, και συμβολίζεται με λ :

$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_{st}}$$

Στις βιομηχανικές εφαρμογές ο λόγος αέρα, λ , παίρνει τιμές:

Για υγρά καύσιμα: 1.15 έως 1.50

Για αέρια καύσιμα: 1.08 έως 1.40

Στις εγκαταστάσεις θέρμανσης, σε εφαρμογές που χρησιμοποιείται και ο αερολέβητας των μετρήσεων μας, ο λόγος αέρα πρέπει να έχει ελάχιστη τιμή 1.15 για λόγους ασφαλείας. Πρέπει πάντοτε να έχουμε περίσσεια αέρα τουλάχιστον 15% διότι διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων εξαιτίας της ατελούς καύσης.

Καύση μπορεί να λάβει χώρα και για τιμές του λόγου αέρα μικρότερες από $\lambda < 1$, αλλά και μεγαλύτερες από $\lambda > 2$. Γενικά η καύση είναι δυνατή για τιμές του λόγου αέρα περίπου $0.6 < \lambda < 3$

Η βασική πηγή για την θέρμανση χώρων είναι η καύση ορυκτών κυρίως καυσίμων.

Ο άνθρωπος ξεκίνησε καίγοντας ξύλα, αργότερα χρησιμοποίησε τον άνθρακα, και τελικά τους δυο τελευταίους αιώνες διαδόθηκε η καύση υγρών και αέριων καυσίμων. Στα αέρια καύσιμα περιλαμβάνονται και τα υγραέρια, τα οποία μεταφέρονται μεν σε υγροποιημένη μορφή, αλλά προσάγονται στον καυστήρα σε αέρια μορφή.

Τα στερεά καύσιμα στις εγκαταστάσεις θέρμανσης καίονται συνήθως σε μεγάλα τεμάχια (και όχι αλεσμένα, όπως στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς). Τα υγρά καύσιμα καίονται αφού σταγονιδιοποιηθούν και εξατμιστούν. Τα αέρια καύσιμα είναι ήδη έτοιμα να αναμιχθούν με τον αέρα καύσης. Προφανώς ανάλογη είναι σε κάθε περίπτωση η κατασκευαστική διαμόρφωση του καυστήρα.

Στις μέρες μας έχει επικρατήσει η θέρμανση με καύση υγρών και αέριων καυσίμων, με προοπτική τη συνεχή αύξηση του μεριδίου των αέριων καυσίμων. Τα υγρά και αέρια καύσιμα, τα διανεμόμενα μέσω δικτύου σωληνώσεων, έχουν επί πλέον το πλεονέκτημα της μη ανάγκης αποθηκευτικού χώρου.

Στη χώρα μας η πλειονότητα των θερμάνσεων χρησιμοποιεί ως καύσιμο το πετρέλαιο θέρμανσης. Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει στη χώρα μας η διανομή του φυσικού αερίου και η εφαρμογή του στα συστήματα θέρμανσης των κτιρίων.

Η καλή καύση των καυσίμων, η οποία επιτυγχάνεται με καλό καυστήρα και λέβητα έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης και άρα είναι οικονομικότερη, ενώ μειώνει την επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

2.2 Εγκαταστάσεις Θέρμανσης – Κλιματισμού

2.2.1 Είδη λεβήτων

Η κατασκευαστική διαμόρφωση του λέβητα εξαρτάται [19] από το είδος του καυσίμου, το είδος του καυστήρα, από τα υλικά κατασκευής και από το μέσο μετάδοσης της θερμότητας.

Οι λέβητες, σύμφωνα με το καύσιμο διακρίνονται σε:

- ειδικούς λέβητες
- λέβητες μετατρέπομενης καύσης και
- λέβητες εναλλακτικής καύσης

Από την άποψη του καυστήρα διακρίνονται επίσης τρία είδη:

- λέβητες με καυστήρα χωρίς ανεμιστήρα (ατμοσφαιρικούς)
- λέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα χωρίς υπερπίεση
- λέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα υπερπίεσης

Από την άποψη των υλικών κατασκευής σε:

- χαλύβδινους λέβητες
- χυτοσιδήρους λέβητες

Από την άποψη του μέσου μετάδοσης θερμότητας διακρίνονται σε:

- λέβητες θερμού νερού προσαγωγής μέχρι 100 °C
- λέβητες υπέρθερμου νερού με θερμοκρασία προσαγωγής άνω των 100 °C
- ατμολέβητες και
- αερολέβητες

2.2.2 Καυστήρες πετρελαίου

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις θέρμανσης στη χώρα μας χρησιμοποιούν ως καύσιμο το πετρέλαιο. Οι καυστήρες πετρελαίου είναι εξελιγμένα βιομηχανικά προϊόντα, παράγονται σε σειρά και υπόκεινται σε διεθνή τυποποίηση. Η τυποποίηση αυτή αφορά και τη συνεργασία τους με τους αντίστοιχους λέβητες.

2.2.2.1 Περιγραφή δομής και τρόπου λειτουργίας

Το πετρέλαιο για να καεί απαιτεί προετοιμασία σε αέρια μορφή ή σε σταγονίδια. Μόνο τότε μπορεί να αναμιχθεί καλά με τον αέρα και να καεί πλήρως.

Σε όλα τα είδη καυστήρων σταγονιδιοποίησης το καύσιμο σταγονιδιοποιείται μηχανικά σε λεπτότατα σταγονίδια. Το μέγεθος των σταγονιδίων εξαρτάται από τη μέθοδο παραγωγής τους και το ιξώδες του καυσίμου και είναι περίπου 40 έως 200 μμ. Όσο μικρότερα είναι τα σταγονίδια, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνολική επιφάνεια εξάτμισης των υδρογονανθράκων υπό την επίδραση της θερμοκρασίας της φλόγας και των τοιχωμάτων του λέβητα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί καλή ανάμιξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα καύσης, ο οποίος προσάγεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα.

Αν η ανάμιξη με τον αέρα καύσης γίνει σε συνδυασμό με πλήρη εξάτμιση του καυσίμου μέσω πρόσθετης θέρμανσης, τότε λαμβάνεται μια γαλάζια φλόγα. Αν η ανάμιξη του αέρα καύσης γίνει με σταγονίδια πετρελαίου, τότε λαμβάνεται μια κίτρινη φλόγα με έντονη ακτινοβολία, οφειλόμενη σε διάπυρους σκελετούς άνθρακα των υδρογονανθράκων.

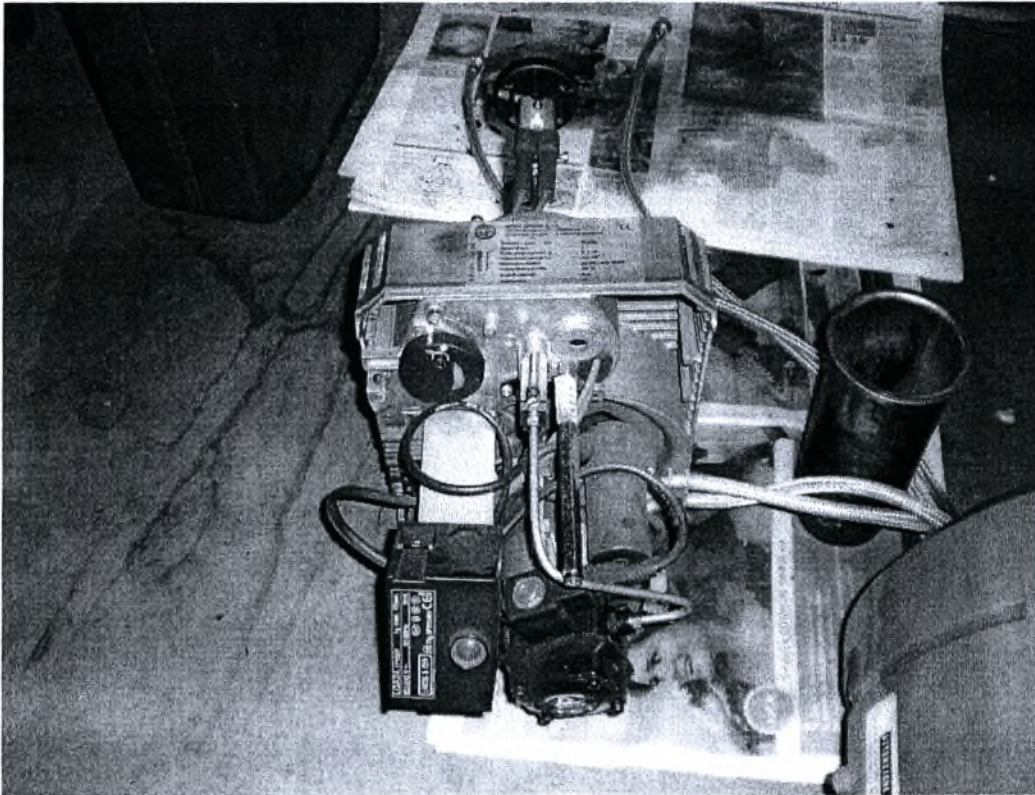
Μικρότερο μέγεθος σταγονιδίων σημαίνει καλύτερη καύση και μικρότερη παραγωγή αιθάλης. Όμως τα σταγονίδια δεν μπορούν να είναι μικρότερα από ένα οριακό μέγεθος, διότι σε αυτή την περίπτωση το νέφος καυσίμου δεν θα μπορεί να διεισδύσει στη ροή του αέρα καύσης, γεγονός που ευνοεί το σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου, NO_x.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ο καυστήρας είναι τα ακόλουθα:

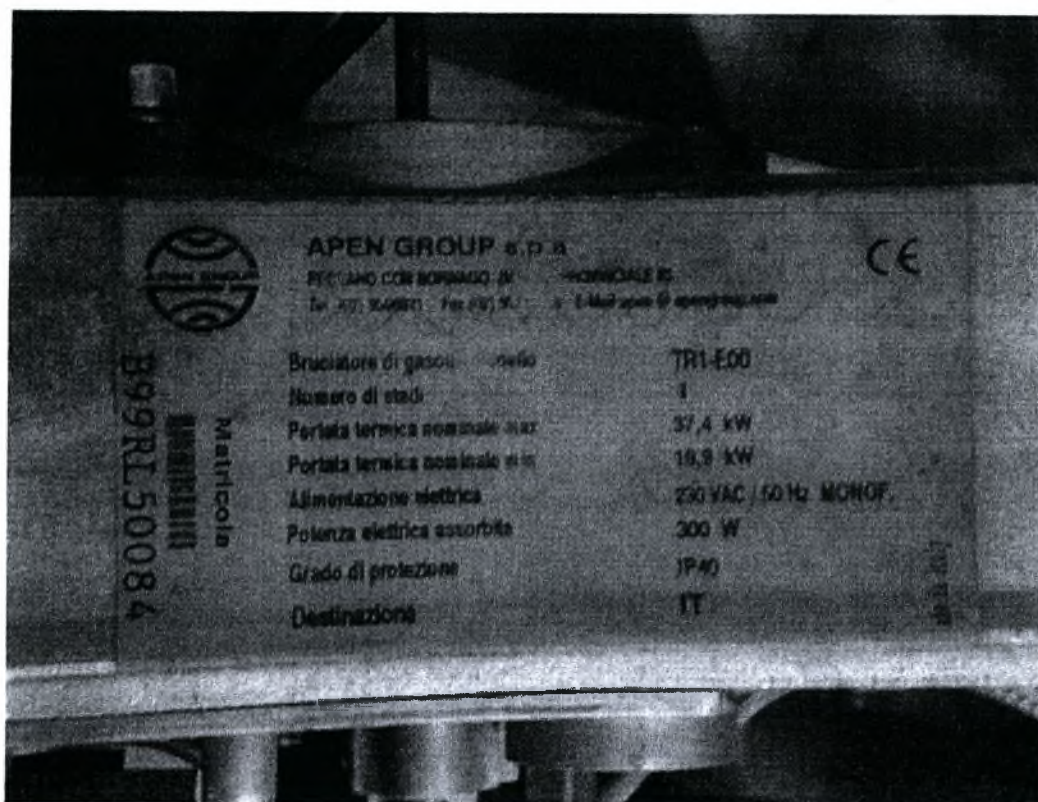
- κινητήρας
- ανεμιστήρας
- αντλία καυσίμου
- ακροφύσια καυσίμου
- διάταξη ανάμιξης
- διάταξη ρύθμισης της παροχής αέρα

- ηλεκτρόδια έναυσης
- μετασχηματιστής
- μαγνητικές βαλβίδες
- διάταξη επιτήρησης της φλόγας
- όργανο ρύθμισης και ελέγχου (αυτοματισμός)

Ο καυστήρας των μετρήσεων μας κατασκευάζεται από την Ιταλική εταιρία APEN GROUP [21]. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται καθώς επίσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



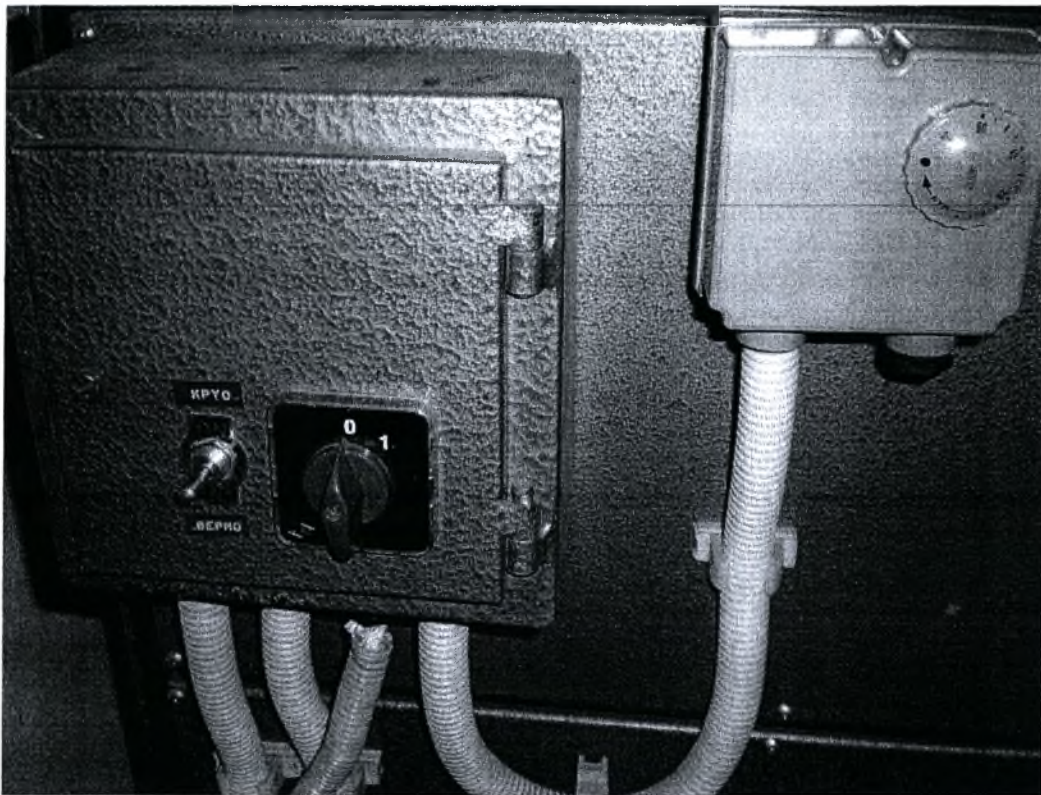
Εικόνα 3 Καυστήρας APEN GROUP



Εικόνα 4 Τεχνικά χαρακτηριστικά καυστήρα

Η λειτουργία του καυστήρα περιγράφεται παρακάτω:

Κλείνοντας τον κύριο διακόπτη, ο οποίος φαίνεται στην **Εικόνα 5**, ξεκινά ο κινητήρας του καυστήρα. Συγχρόνως ο μετασχηματιστής έναυσης αποκτά τάση και στα ηλεκτρόδια δημιουργείται σπινθήρας. Ο ανεμιστήρας που κινείται από τον κινητήρα στέλνει αέρα μέσω του φλογοσωλήνα στον θάλαμο καύσης του λέβητα. Ο φλογοσωλήνας φαίνεται στην **Εικόνα 6** που ακολουθεί. Στη συνέχεια η αντλία καυσίμου προωθεί καύσιμο, το οποίο δεν μπορεί να φθάσει στο ακροφύσιο, επειδή είναι κλειστή η μαγνητική βαλβίδα. Μετά από περίπου 20 με 30 sec λειτουργίας του ανεμιστήρα ανοίγει η μαγνητική βαλβίδα για το ακροφύσιο. Το καύσιμο σταγονιδιοποιείται στο ακροφύσιο και αναμιγνύεται με τον αέρα σε ένα ευανάφλεκτο μίγμα. Η φλόγα δημιουργείται από τις εκκενώσεις υψηλής τάσης.



Εικόνα 5 Διάταξη ελέγχου αερολέβητα



Εικόνα 6 Φλογοσωλήνας

2.2.3 Σταγονιδιοποίηση υψηλής πίεσης

2.2.3.1 Ακροφύσιο

Το ακροφύσιο είναι βασικό στοιχείο του καυστήρα με σταγονιδιοποίηση υψηλής πίεσης. Από την ακρίβεια και την ποιότητα κατασκευής του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ποιότητα της καύσης και η ασφαλής λειτουργία.

Το ακροφύσιο σταγονιδιοποίησης εκτελεί τις ακόλουθες εργασίες:

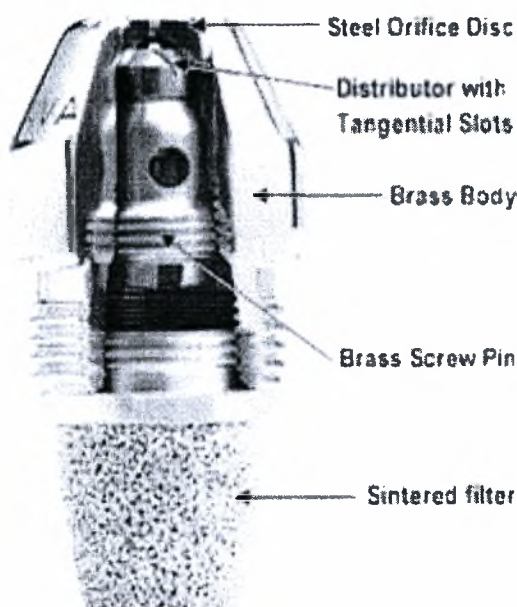
- Σταγονιδιοποίηση του καυσίμου σε λεπτότατα σταγονίδια ως πρώτο βήμα για την ανάμιξη με τον αέρα καύσης
- Καθορισμός μιας ορισμένης μορφής της φλόγας σε συνδυασμό με τη διάταξη οδήγησης του αέρα
- Καθορισμός της ισχύος του καυστήρα με τον καθορισμό της παροχής καυσίμου

Η βασική διάκριση των ακροφυσίων είναι σε απλό ακροφύσιο και ακροφύσιο αντεπιστροφής καυσίμου.

Ο καυστήρας των μετρήσεων μας έχει απλό ακροφύσιο, οπότε δεν θα μας απασχολήσει το ακροφύσιο αντεπιστροφής καυσίμου.

2.2.3.1.1 Το απλό ακροφύσιο

Τα απλά ακροφύσια χρησιμοποιούνται σε μονοβάθμιους μικρούς καυστήρες ισχύος μέχρι 500 kW και εργάζονται με υπερπίεσεις 6 έως 16 bar. Η **Εικόνα 7** δείχνει την τομή ενός απλού ακροφυσίου.



Εικόνα 7 Απλό ακροφύσιο ψεκασμού

Τα μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν ένα ακροφύσιο: είναι η γωνία ανοίγματος, η γωνία ψεκασμού και η παροχή του καυσίμου.

Τα ακροφύσια κατασκευάζονται με γωνίες ψεκασμού 30°, 45°, 60°, 80° και 90°, έτσι ώστε η φλόγα να μπορεί να προσαρμοσθεί στον εκάστοτε χώρο καύσης. Γενικά με μεγαλύτερες γωνίες ψεκασμού επιτυγχάνουμε καλύτερη ανάμιξη καυσίμου-αέρα. Επίσης με μεγαλύτερες γωνίες ψεκασμού επιτυγχάνουμε μικρότερα σταγονίδια. Ομοίως μια κατανομή σταγονιδίων κοίλου κώνου θα ενεργούσε καλύτερα. Συνήθως χρησιμοποιούνται ακροφύσια με γωνίες ψεκασμού 45° και 60°. Στο ακροφύσιο του καυστήρα των μετρήσεων αναγράφονται τα ακόλουθα:
0.75 gal/h , S 60°

Για τα ακροφύσια υπάρχει γερμανική και αμερικάνικη τυποποίηση.

2.2.4 Αντλία καυσίμου

Οι απαιτούμενες για τη σταγονιδιοποίηση του καυσίμου αντλίες υψηλής πίεσης είναι επί το πλείστον αντλίες οδοντωτών τροχών με εξωτερική ή εσωτερική οδόντωση. Πλεονέκτημα των αντλιών οδοντωτών τροχών είναι ο ογκομετρικός τρόπος λειτουργίας τους, ο οποίος εξασφαλίζει σταθερή παροχή. Για μεγάλη ισχύ χρησιμοποιούνται κοχλιωτές και φυγοκεντρικές αντλίες. Στους μικρούς και μεσαίους καυστήρες η αντλία καυσίμου κινείται μαζί με τον ανεμιστήρα από τον ίδιο κινητήρα. Στην **Εικόνα 8** που ακολουθεί φαίνεται μια τέτοια αντλία.



Εικόνα 8 Αντλία καυσίμου

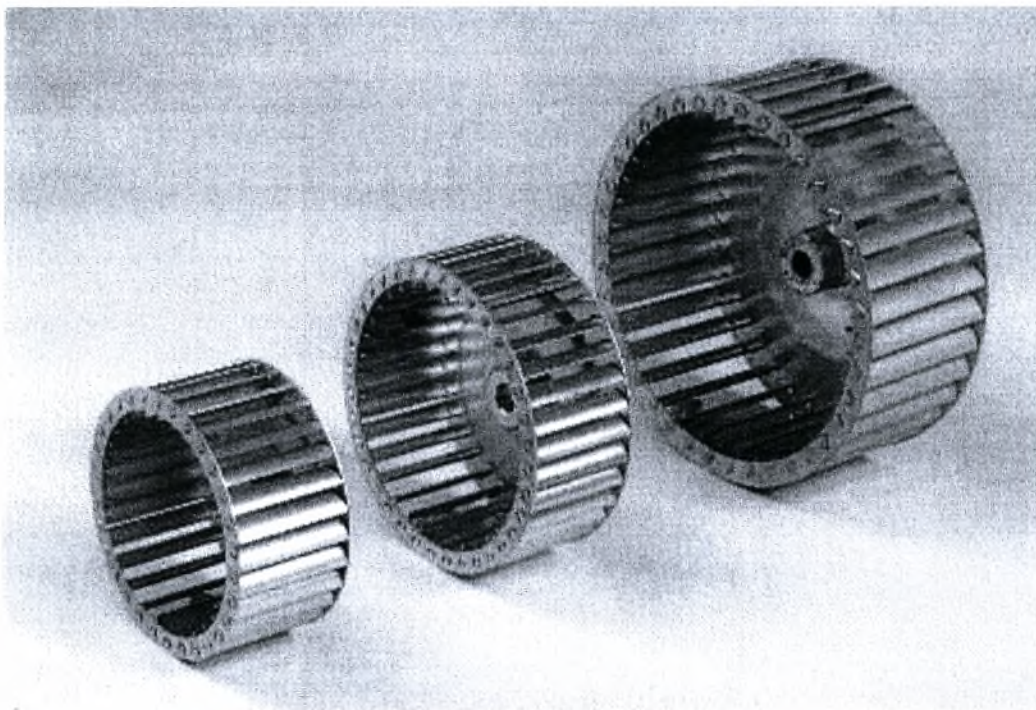
2.2.5 Ο ανεμιστήρας του καυστήρα

Ο ανεμιστήρας του καυστήρα είναι στοιχείο μεγάλης σημασίας για την ποιότητα της καύσης. Στους μικρούς και μεσαίους καυστήρες είναι ενσωματωμένος μέσα στο κέλυφος του καυστήρα, ενώ στους μεγάλους βιομηχανικούς καυστήρες είναι εξωτερικός. Η εξωτερική εγκατάσταση επιτρέπει ευκολότερη προσαρμογή στις συνθήκες πίεσης.

Το συνηθέστερο χρησιμοποιούμενο είδος ανεμιστήρα είναι ο ακτινικός ανεμιστήρας με δρομέα τυμπάνου. Ο δρομέας παλιά κατασκευαζόταν στραντζαριστός από χαλύβδινα ελάσματα. Σήμερα συνήθως είναι χυτός από ελαφρό μέταλλο ή συνθετικό υλικό. Τα πτερύγια είναι ακτινικά με κλίση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω.

Στους λέβητες θερμάνσεων, όπως είναι και ο δικός μας (με ενσωματωμένους ανεμιστήρες) οι δρομείς έχουν πτερύγια προς τα εμπρός. Αυτοί παρουσιάζουν σε μικρές παροχές κάποια αστάθεια. Δίνουν όμως μεγαλύτερες ταχύτητες στην περίμετρο του δρομέα, οι οποίες μετατρέπονται σε στατικές πιέσεις λόγω της μορφής του κελύφους του ανεμιστήρα. Με κατάλληλη μορφή επιτυγχάνεται χαμηλός θόρυβος και υψηλός βαθμός απόδοσης, μέχρι 80%.

Οι στροφές του ανεμιστήρα κυμαίνονται από 1400 έως 2800 rpm. Συνήθως είναι 2800 rpm διότι στις υψηλές στροφές έχουμε καλύτερη ανάμιξη καυσίμου-αέρα, όμως δημιουργείται μεγαλύτερος θόρυβος και καταπονείται περισσότερο η αντλία καυσίμου. Η **Εικόνα 9** δείχνει διαφόρων μεγεθών τύμπανα.



Εικόνα 9 Τύμπανο ανεμιστήρα καυστήρα

Η ρύθμιση της παροχής του αέρα μπορεί να γίνεται είτε με τη βοήθεια της διάταξης ανάμιξης είτε με τη βοήθεια κατάλληλου κλαπέτου.

Η ρύθμιση της παροχής του αέρα μέσω της διάταξης ανάμιξης γίνεται με ρύθμιση της πτώσης πίεσης σε αυτήν. Όμως η βέλτιστη ρύθμιση με αυτόν τον τρόπο είναι δύσκολη και απαιτεί δοκιμές.

Η ρύθμιση της παροχής του αέρα συνήθως γίνεται στην πλευρά της αναρρόφησης με κατάλληλο κλαπέτο ή άλλη διάταξη στραγγαλισμού αλλά μπορεί να γίνει και στην κατάθλιψη του ανεμιστήρα μέσα στο κέλυφος.

2.2.6 Το κέλυφος του καυστήρα

Το κέλυφος του καυστήρα περιβάλλει ορισμένα από τα στοιχεία του, ενώ ορισμένα είναι εξωτερικά. Μπορεί χονδρικά να διαιρεθεί στο τμήμα του ανεμιστήρα (με τον κινητήρα, την αντλία καυσίμου κλπ) και στο φλογοσωλήνα (με τα ακροφύσια, τα ηλεκτρόδια έναυσης, τη διάταξη ανάμιξης κλπ).

Η μορφή του καθορίζεται από τη σχετική θέση της ατράκτου του ανεμιστήρα ως προς τον άξονα του φλογοσωλήνα, η οποία μπορεί να είναι κάθετη ή παράλληλη.

Η βάση του κελύφους είναι συνήθως από χυτό μέταλλο, ενώ κάποια μέρη του καλύμματος σε μικρούς καυστήρες μπορούν να είναι κατασκευασμένα από πλαστικό.

Η στερέωση του καυστήρα στο λέβητα γίνεται συνήθως μέσω φλάντζας.

2.2.7 Διάταξη ανάμιξης

Η διάταξη ανάμιξης αποτελείται από το φλογοσωλήνα, τα ακροφύσια και την κεφαλή του καυστήρα με τα στοιχεία οδήγησης και ανακοπής του αέρα. Η διάταξη αυτή έχει σκοπό την κατά το δυνατό καλύτερη ανάμιξη του νέφους του καυσίμου με τον αέρα καύσης με ελάχιστη περίσσεια. Από αυτήν εξαρτάται η ποιότητα του μίγματος, η μορφή και το μήκος της φλόγας, ο βαθμός απόδοσης και η καλή καύση χωρίς άκαυστα. Εκτός από την καλή ανάμιξη η διάταξη αυτή πρέπει να σταθεροποιεί τη φλόγα, ώστε να αποφεύγονται οι διακυμάνσεις.

2.2.8 Διάταξη έναυσης

Η έναυση του μίγματος καυσίμου – αέρα γίνεται με ηλεκτρικό σπινθήρα, ο οποίος δημιουργείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Ο απαραίτητος μετασχηματιστής ανυψώνει τη τάση μέχρι τα 10-15 kV.

Σημαντική είναι η σωστή διάταξη των ηλεκτροδίων σε σχέση με το ακροφύσιο. Η απόσταση των άκρων των ηλεκτροδίων είναι περίπου 2 έως 5 mm.

Πρέπει η απόσταση των ηλεκτροδίων από το δίσκο και την κεφαλή του ακροφυσίου να είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους. Τα ηλεκτρόδια δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με τη δέσμη καυσίμου, επειδή τότε μπορεί να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα, από αγωγή απανθρακωμένα σταγονίδια, και να σβήσει η φλόγα. Τα ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν τέτοια θέση, ώστε με τη βοήθεια της ροής του αέρα να εισέρχεται ο σπινθήρας με μορφή τόξου μέσα στο νέφος και να το ανάβει.

Στην ακόλουθη **Εικόνα** παρουσιάζεται η διάταξη έναυσης του καυστήρα του APEN GROUP.



Εικόνα 10 Η διάταξη έναυσης του καυστήρα δίπλα στο μπέκ

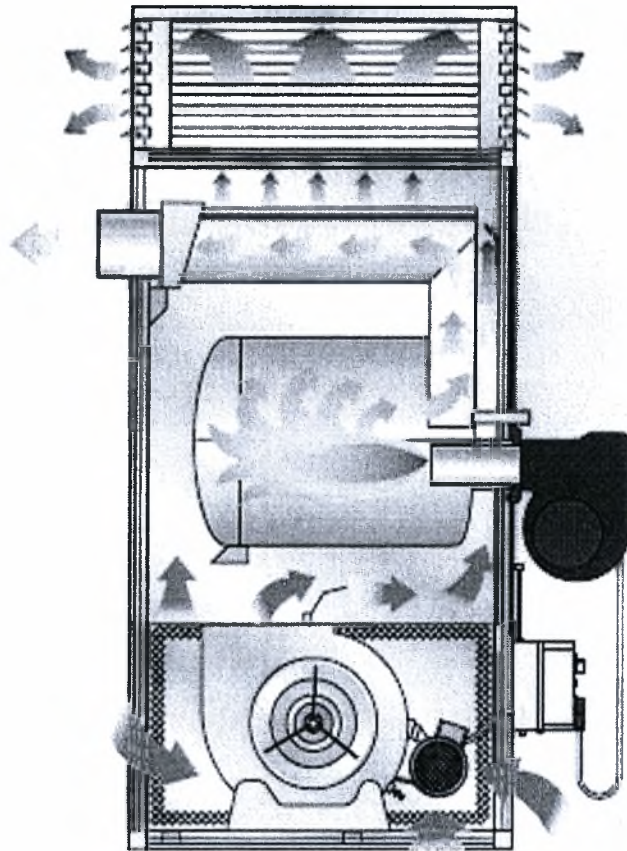
2.2.9 Ηλεκτροκινητήρας

Στους καυστήρες με ενσωματωμένο ανεμιστήρα ο ηλεκτροκινητήρας κινεί μέσω ελαστικής σύνδεσης από κοινού τον ανεμιστήρα και την αντλία καυσίμου. Οι μικροί ηλεκτροκινητήρες είναι μονοφασικοί διπολικοί με πυκνωτή. Οι μεγαλύτεροι είναι τριφασικοί, συνηθέστερα διπολικοί. Σε μεγάλους καυστήρες ο ανεμιστήρας και η αντλία έχουν συχνά χωριστή κίνηση.

2.3 Αερολέβητες

2.3.1 Συστήματα θέρμανσης με θερμό αέρα

Ο αερολέβητας είναι συσκευή θέρμανσης με θερμό αέρα. Ο θερμός αέρας διανέμεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα (fan) στο θερμαινόμενο χώρο μέσω αεραγωγών. Στην **Εικόνα 11** φαίνεται η αρχή λειτουργίας του αερολέβητα.



Εικόνα 11 Αρχή λειτουργίας αερολέβητα

Συστήματα θέρμανσης με θερμό αέρα σε κατοικίες δεν έχουν διάδοση στη χώρα μας, επειδή για τις κατοικίες, όπου η διάρκεια θέρμανσης είναι μεγάλη, τα συστήματα θέρμανσης με θερμό νερό είναι καταλληλότερα.

Τα συστήματα θέρμανσης με θερμό αέρα χρησιμοποιούνται στη χώρα μας σε εργοστασιακούς και επαγγελματικούς χώρους, χώρους εκθέσεων και συγκεντρώσεων, εκκλησίες, γυμναστήρια, κλπ.

Ως καύσιμα στους αερολέβητες χρησιμοποιούνται το πετρέλαιο θέρμανσης και το φυσικό αέριο.

Οι συσκευές πετρελαίου, σαν τη δικιά μας, είναι συσκευές δαπέδου, ενώ οι συσκευές αερίου είναι είτε δαπέδου είτε τοίχου, σε ύψος 2.5 – 3 m. Έχουν ισχύ 10 έως 200 kW ή και μεγαλύτερη.

2.3.2 Αερολέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα

Στους αερολέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα ο καυστήρας, ο κινητήρας, ο ανεμιστήρας προώθησης του θερμού αέρα και ο εναλλάκτης θερμότητας είναι συναρμολογημένοι σε μια ενιαία μονάδα.

Ο καυστήρας είναι ένας κοινός καυστήρας με ανεμιστήρα πετρελαίου ή αερίου, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στους λέβητες

Ο εναλλάκτης θερμότητας κατά κανόνα περιβάλλει τον καυστήρα. Αποτελείται από σωλήνες ή θήκες μέσα από τις οποίες ρέουν τα θερμά καυσαέρια, ενώ ο θερμαινόμενος αέρας ρέει εγκάρσια προς τους σωλήνες. Υπάρχουν, επίσης και κατασκευές από χυτοσίδηρο κατά στοιχεία (φέτες) με πτερύγια, επίπεδα, βελονοειδή, εσωτερικά και εξωτερικά, για βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας.

Οι συσκευές είναι κατάλληλες τόσο για άμεση διανομή θερμού αέρα, όσο και για έμμεση διανομή μέσω αεραγωγών.

2.3.3 Αερολέβητες με ατμοσφαιρικό καυστήρα αερίου

Στους αερολέβητες αερίου με ατμοσφαιρικό καυστήρα ο εναλλάκτης θερμότητας, ο καυστήρας και ο ανεμιστήρας καθώς και η ασφάλεια ροής είναι συναρμολογημένοι σε μια συμπαγή μονάδα. Η μονάδα περιλαμβάνει στόμιο διανομής του θερμού αέρα με ρυθμιζόμενα πτερύγια. Ο καυστήρας συνήθως είναι καυστήρας όλων των οικογενειών.

Ο εναλλάκτης θερμότητας, εναλλάκτης αερίου-αερίου (καυσαέρια-αέρας) σταυρωτής ροής, αποτελείται από στοιχεία τύπου θήκης, τούμπα. Είναι κατασκευασμένος από χάλυβα με προστατευτική επίστρωση π.χ. αλουμινίου ή από ανοξείδωτο χάλυβα.

Περιλαμβάνουν κιβώτιο συλλογής των καυσαερίων με ασφάλεια ροής και το περιστόμιο για τη σύνδεση με το σύστημα απαγωγής καυσαερίων. Τα καυσαέρια μπορούν να απάγονται είτε μέσω καπνοδόχου είτε με καπναγωγό από εξωτερικό τοίχο.

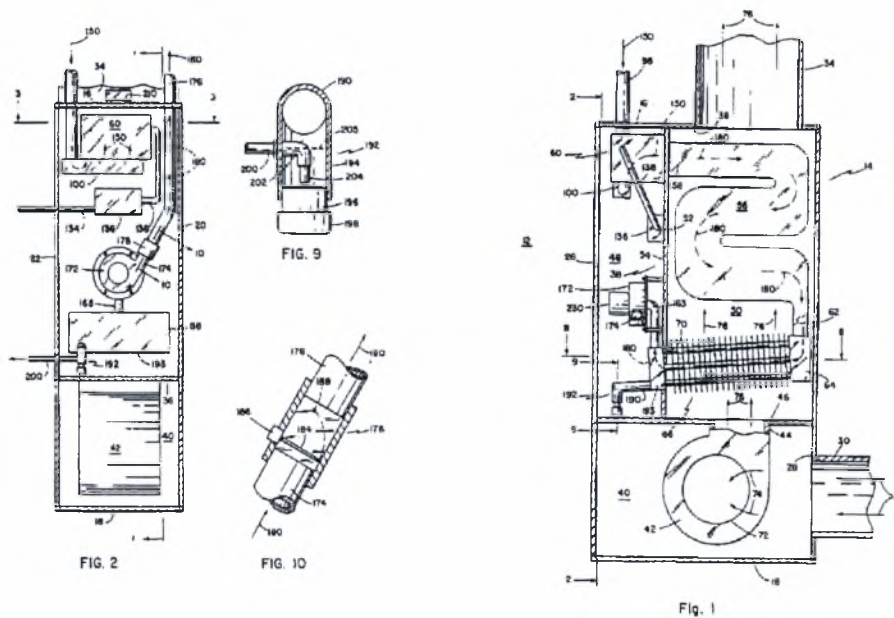
2.3.4 Σχεδιαστικές τροποποιήσεις αερολεβήτων

Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζονται και σχολιάζονται σχέδια αερολεβήτων τα οποία έχουν καταχωρηθεί ως ευρεσιτεχνίες.

Οι τροποποιήσεις οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν στο σχέδιο ενός αερολέβητα επικεντρώνονται στη γεωμετρία και τη θέση του θαλάμου καύσης και του εναλλάκτη αέρα - καυσαερίων καθώς επίσης στη θέση και τις διαστάσεις της διατομής εξόδου του αέρα από τον ανεμιστήρα.

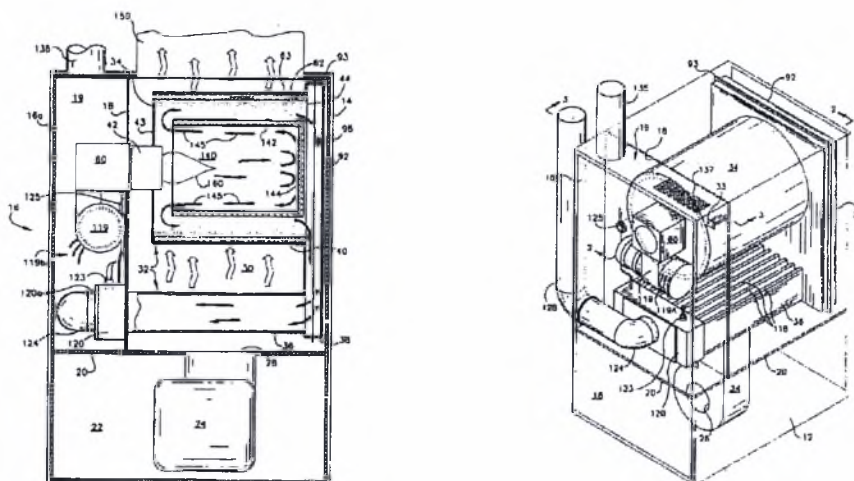
Έπειτα, από έρευνα εντοπίστηκαν μόνο τρεις ευρεσιτεχνίες, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια με χρονολογική σειρά καταχώρησης.

Σύμφωνα με τα σχέδια του Tallman, τα οποία φαίνονται στην **Εικόνα 12**, ο θάλαμος καύσης έχει σχήμα κυλινδρικό και ο εναλλάκτης αέρα – καυσαερίων τοποθετείται κάτω από αυτόν έχοντας μια ελαφρά κλίση με σκοπό την απομάκρυνση των συμπυκνωμάτων σε περίπτωση συμπίκνωσης των υδρατμών των καυσαερίων. Ο εναλλάκτης αποτελείται από 12 τούμπα πάνω στα οποία έχουν τοποθετηθεί πτερύγια για να αυξηθεί, με τον τρόπο αυτό, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. Τέλος, τα καλύμματα του αερολέβητα δεν περικλείουν μόνο τις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας αλλά και τον καυστήρα.



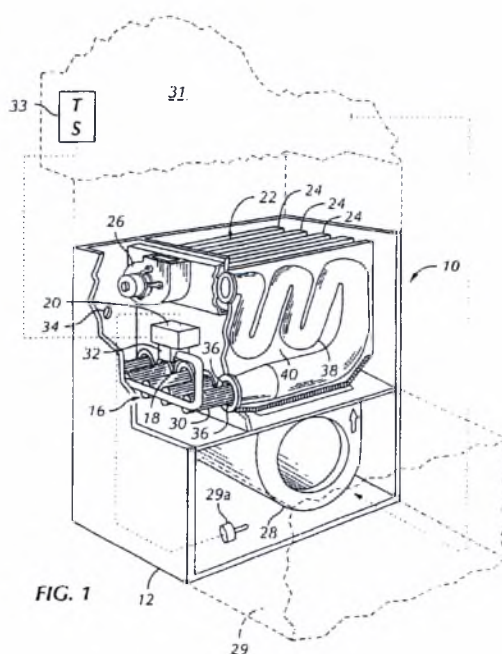
Εικόνα 12 Ο σχεδιασμός του Tallman στην ευρεσιτεχνία US Patent 4,515,145

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα σχέδια του Schonberger, **Εικόνα 13**, με τη μόνη διαφορά ότι σε αυτά ο εναλλάκτης αποτελείται από 10 τούμπα, δεν έχει κλίση και δεν έχουν τοποθετηθεί πτερύγια πάνω σε αυτά.



Εικόνα 13 Ο σχεδιασμός του Schonberger στην ευρεσιτεχνία US Patent 6,923,173

Τέλος, ο σχεδιασμός του Huggins εμφανίζει σημαντικές διαφορές, σε σχέση με τους άλλους δύο, όχι στη γεωμετρία του θαλάμου καύσης αλλά στη γεωμετρία του εναλλάκτη καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα τα τούμπα δεν είναι ορθογώνια παράλληλα στη ροή του αέρα θέρμανσης αλλά είναι κυματοειδείς αγωγοί μεταξύ των οποίων τοποθετούνται περύγια. Πρόκειται για κατευθυντές ροής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.



Εικόνα 14 Ο σχεδιασμός του Huggins στην ευρεσιτεχνία US Patent 6,925,999

Συγκρίνοντας τα σχέδια των ευρεσιτεχνιών με το σχέδιο του αερολέβητα της εργασίας, **Εικόνα 2**, υπάρχουν διαφορές στη γεωμετρία του θαλάμου καύσης και στη γεωμετρία και στη θέση του εναλλάκτη αέρα - καυσαερίων. Ο τελευταίος δεν είναι τοποθετημένος κάτω αλλά πάνω από τον θάλαμο καύσης, ο οποίος δεν έχει κυλινδρικό σχήμα. Το σχήμα του θαλάμου καύσης είναι ιδιόμορφο

Η θέση του εναλλάκτη αέρα - καυσαερίων επηρεάζει την ανάπτυξη της ροής στο εσωτερικό του αερολέβητα με αποτέλεσμα να επηρεάζονται και οι κατανομές ταχυτήτων και θερμοκρασιών σε χαρακτηριστικές περιοχές, διατομές, όπως είναι η διατομή εξόδου του plenum προς τον αεραγωγό.

2.3.5 Αμερικάνικοι αερολέβητες

Στην Αμερική, σε αντίθεση με όσα συμβαίνουν στη χώρα μας, οι αερολέβητες δεν χρησιμοποιούνται μόνο για τη θέρμανση βιομηχανικών και εκθεσιακών χώρων αλλά και για τη θέρμανση κατοικιών. Από εκεί ξεκίνησε η ευρεία παραγωγή και εφαρμογή του αερολέβητα με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές εταιρίες οι οποίες να ασχολούνται με την κατασκευή και το σχεδιασμό μονάδων θέρμανσης με αέρα, air furnaces. Τα τελευταία χρόνια οι εταιρίες έχουν επικεντρωθεί στην κατασκευή αυξημένου βαθμού απόδοσης αερολεβήτων. Αυτό το επιτυγχάνουν με κατάλληλο σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας, με χρήση του φυσικού αερίου και με συμπύκνωση των υδρατμών των καυσαερίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αερολέβητες των εταιριών Goodman [22] Freedom [23] και Bryant [24]. Η απόδοση αυτών κυμαίνεται από 92.1 % μέχρι 95 % και 96 %. Οι αερολέβητες πετρελαίου εμφανίζουν απόδοση από 82 % μέχρι 90 %. Η **Εικόνα 15** δείχνει το εσωτερικό του αερολέβητα φυσικού αερίου της εταιρίας Bryant.

FURNACE COMPONENTS

1. Combustion-air intake connection to ensure contaminant-free air (right or left side).
2. Burner sight glass for viewing burner flame.
3. Burner assembly (inside). Operates with energy-saving inshot burners and hot surface igniter for safe, dependable heating.
4. Redundant gas valve. Safe and efficient. Features 1 gas control with 2 internal shutoff valves. Valve appearance varies with furnace model.
5. Vent outlet. Uses PVC pipe to carry flue gas from the furnace's combustion system (right or left side).
6. Inducer motor. Pulls hot flue gases through the heat exchangers, maintaining negative pressure for added safety.
7. Blower access panel safety interlock switch.
8. Air filter and retainer (location in furnace may vary).
9. Condensate drain connection. Collects moisture condensed from burned gases for disposal into home drain system. (Location in furnace varies.)
10. Heavy-duty blower. Circulates air across the heat exchangers to transfer heat into the home.
11. Secondary condensing heat exchanger (inside). Wings out more heat through condensation. Constructed with polypropylene-laminated steel to ensure durability.
12. Primary serpentine heat exchanger (inside). Stretches fuel dollars with the S-shaped heat-flow design. Solid construction of corrosion-resistant aluminum steel means

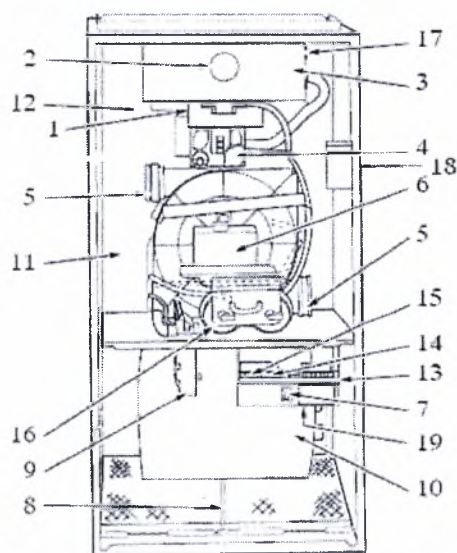


Fig. 2 - Model 355BAV Furnace (Upflow Only)

A02264

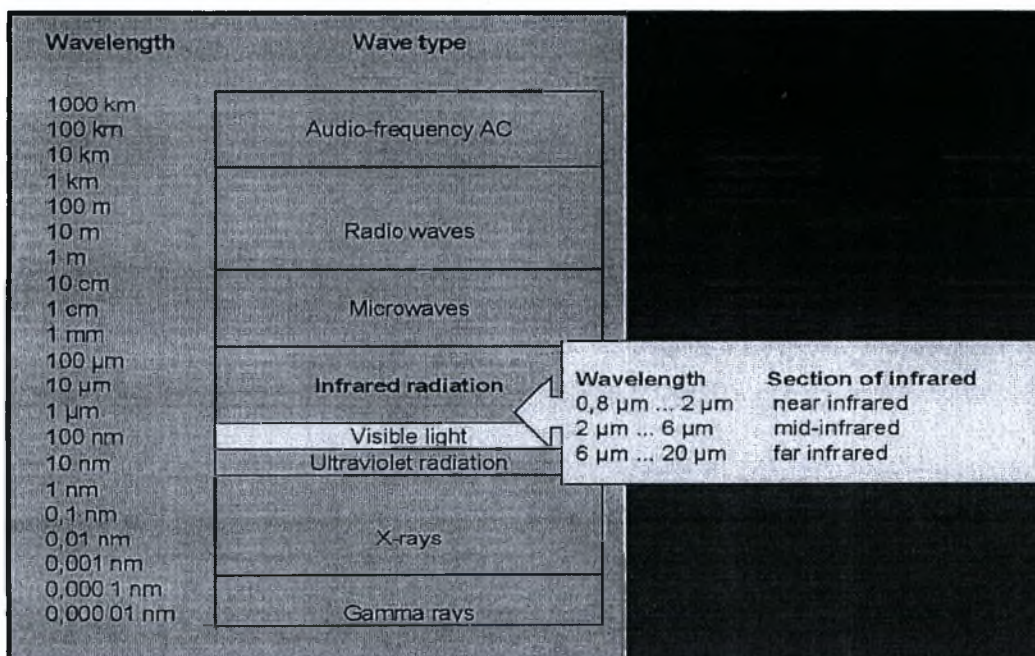
Εικόνα 15 Αερολέβητας φυσικού αερίου με συμπύκνωση, της εταιρίας Bryant

2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας με ακτινοβολία

Ακτινοβολία λέγεται η μετάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αλλά και η ενέργεια που ακτινοβολείται έτσι, λέγεται πολλές φορές ακτινοβολία. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ή τη συχνότητα τους, όπου η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος. Το μήκος κύματος είναι αυτό που χρησιμοποιείται συνήθως στην ανάλυση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία.

Η **Εικόνα 16** δείχνει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και τα ονόματα που δίνουμε στην ακτινοβολία στις διάφορες περιοχές του. Η φύση της ακτινοβολίας και της μεταφοράς της, δεν μπορούμε να πούμε ότι είναι πλήρως κατανοητές ακόμη και σήμερα, αλλά μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά είτε με την κυματική, είτε με την κβαντομηχανική. Με απλά λόγια, η ακτινοβολία ταξιδεύει στο διάστημα με την ταχύτητα του φωτός (ταχύτητα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών), και δεν απαιτεί κανένα μέσον για να μπορέσει να διαδοθεί. Η ταχύτητα του φωτός c , είναι η σταθερά αναλογίας που συσχετίζει το μήκος κύματος (λ) με τη συχνότητα (ν):

$$\lambda = c / \nu$$



Εικόνα 16 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το φως είναι απλώς το ορατό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που κυμαίνεται μεταξύ 0.40 και 0.76 μm. Το φως δε διαφέρει σημαντικά από τις άλλες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες εκτός του ότι τυχαίνει να ερεθίζει την όραση του ανθρώπινου ματιού. Το φως ή το ορατό φάσμα αποτελείται από στενές ζώνες χρώματος, από το ιώδες (0.40 – 0.44 μm) μέχρι το κόκκινο (0.63 – 0.76 μm), σύμφωνα με τον **πίνακα 1** που ακολουθεί.

Πίνακας 1 Ζώνες ορατού φάσματος

Χρώμα	Τιμές μήκους κύματος [μm]
Ιώδες (βιολετί)	0.40 – 0.44
Μπλε	0.44 – 0.49
Πράσινο	0.49 – 0.54
Κίτρινο	0.54 – 0.60
Πορτοκαλί	0.60 – 0.63
Κόκκινο	0.63 – 0.76

Το χρώμα μιας επιφάνειας εξαρτάται από την ικανότητα της να ανακλά συγκεκριμένα μήκη κύματος. Για παράδειγμα, μια επιφάνεια που ανακλά ακτινοβολία σε τιμές μήκους κύματος 0.63 – 0.76 μm , ενώ απορροφά την υπόλοιπη ορατή ακτινοβολία, εμφανίζεται στο ανθρώπινο μάτι ως κόκκινη. Μια επιφάνεια που ανακλά όλο το φως εμφανίζεται ως λευκή, ενώ μια επιφάνεια που απορροφά όλο το φως που προσπίπτει σε αυτή εμφανίζεται ως μαύρη.

Η ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος 0.1 έως 100 μm (μικρά), όταν πέσει πάνω σε ένα σώμα, το θερμαίνει, και γι' αυτό λέγεται θερμική ακτινοβολία. Και αντιστρόφως, θερμική ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σώμα σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασίας του. Η θερμική ακτινοβολία περιλαμβάνει ολόκληρη την ορατή και υπέρυθρη (IR) ακτινοβολία και ένα μέρος της υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας. Διαφοροποιείται από άλλους τύπους ακτινοβολίας, όπως οι ακτίνες X, τα ραδιοκύματα κλπ. που δεν εκπέμπονται σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασίας.

Η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος, που εκτείνεται από 0.76 μέχρι 100 μm .

Επιπρόσθετα, επειδή η ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος από 0.38 έως 0.76 μm ερεθίζει το οπτικό νεύρο, μπορούμε να δούμε τη θερμική ακτινοβολία σε αυτή τη ζώνη σαν φως. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να δούμε τη θερμική ακτινοβολία από ένα σώμα θερμοκρασίας κάτω από 500°C, αλλά μπορούμε να αισθανθούμε τη θερμότητα που μας ακτινοβολεί.

Επίσης, η θερμική ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί ότι διαδίδεται σε ευθείες γραμμές όπως και όλες οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες, οπότε ένα σώμα μπορεί να δέχεται θερμική ακτινοβολία μόνο από σώματα τα οποία "βλέπει".

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία και συνεπώς χάνουν ενέργεια. Εάν ήταν δυνατόν να απομονώσουμε ένα σώμα εντελώς στο κενό, αυτό θα συνέχιζε να ακτινοβολεί και να χάνει ενέργεια, μέχρι να πέσει η θερμοκρασία του στο απόλυτο μηδέν. Όμως η τέλεια απομόνωση δεν είναι δυνατή, κι έτσι το σώμα θερμαίνεται από το περιβάλλον του (με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία). Εάν ένα σώμα τοποθετηθεί σε περιβάλλον ίδιας θερμοκρασίας με τη δική του, η θερμοκρασία του δεν πρόκειται να μεταβληθεί, αφού θα δέχεται από το περιβάλλον του ακριβώς όση ενέργεια ακτινοβολεί (αρχή ανταλλαγής του Prevost).

2.4.1 Απορρόφηση, ανάκλαση και διάδοση ακτινοβολίας

Όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω σε ένα σώμα, (στερεό, υγρό ή αέριο), ένα κλάσμα (α) της απορροφάται, ένα άλλο κλάσμα της (ρ) ανακλάται, και το υπόλοιπο (τ) διαπερνά το σώμα:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

όπου,

α : συντελεστής απορρόφησης

ρ : συντελεστής ανάκλασης

τ : συντελεστής διάδοσης

Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1 mm. Για αυτά τα αδιαφανή υλικά, $\tau = 0$ και ισχύει: $\alpha + \rho = 1$

Ορισμένα στερεά και υγρά μεταδίδουν την ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, εκτός κι αν είναι πολύ μεγάλου πάχους. Τα υλικά αυτά (γυαλί, κρύσταλλοι ανόργανων ουσιών κτλ), είναι διαφανή στην ακτινοβολία της συγκεκριμένης περιοχής μήκους κύματος. Σε άλλα μήκη κύματος είναι αδιαφανή. Έτσι, το κοινό καθαρό γυαλί είναι διαφανές στην ορατή περιοχή του φάσματος καθώς και στην υπέρυθρη μέχρι τα 2.5 μm , ενώ πολύ λεπτές στρώσεις ημιαγωγών υλικών όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, είναι αδιαφανείς στην ορατή περιοχή αλλά διαφανείς σε τμήματα της υπέρυθρης πέρα από το 1.0 και 1.8 μm αντίστοιχα.

Η επιφάνεια ενός στερεού που είναι πολύ καλά λειασμένη και ομαλή, συμπεριφέρεται σαν κάτοπτρο στη θερμική ακτινοβολία, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Στην περίπτωση αυτή, μιλάμε για κανονική ή κατοπτρική ανάκλαση. Τα περισσότερα βιομηχανικά υλικά, έχουν τραχείες επιφάνειες, δηλαδή οι επιφανειακές ανωμαλίες τους έχουν μεγάλο μέγεθος σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ανάκλαση ακτινοβολίας από αυτό το είδος επιφάνειας συμβαίνει αδιακρίτως σε όλες τις διευθύνσεις και λέγεται διάχυτη.

2.4.2 Ακτινοβολία μέλανος σώματος

Μια μαύρη ματ επιφάνεια, απορροφά όλο το φως που προσπίπτει πάνω της. Κατά αναλογία, μια επιφάνεια που απορροφά όλη τη θερμική ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε αυτήν, καλείται μαύρη επιφάνεια, και αντίστοιχα ένα σώμα που απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία λέγεται μέλαν σώμα. Στην πράξη, το απολύτως μέλαν σώμα ή επιφάνεια δεν υπάρχει, αλλά υπάρχουν σώματα που προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του μέλανος σώματος.

Για παράδειγμα, η επιφάνεια ενός σώματος μπορεί να βαφεί με κάρβουνο, κι έτσι να προκύψει μια μαύρη εξωτερική επιφάνεια όσον αφορά τη θερμική ακτινοβολία. Σε

οποιαδήποτε περίπτωση, η έννοια του μέλανος σώματος ή επιφάνειας είναι πολύ χρήσιμη στην ανάλυση προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία.

Συνεπώς, μπορούμε να συσχετίσουμε τη συμπεριφορά του υλικού που εξετάζεται, με αυτήν του μέλανος σώματος σε παρόμοιες περιπτώσεις. Το μέλαν σώμα εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην απόλυτη θερμοκρασία του, ενώ αντίστοιχα απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του.

2.4.3 Ο νόμος του Stefan Boltzmann

Ο ρυθμός που ακτινοβολεί ενέργεια ένα μέλαν σώμα, είναι ανάλογος της 4ης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του:

$$E_b = \sigma T^4$$

όπου E_b είναι η ακτινοβολουμένη θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας ενός μέλανος σώματος (b από το black) θερμοκρασίας T προς τον ημισφαιρικό χώρο υπεράνω αυτού

Σταθερά Stefan-Boltzmann σ ($56.7 \cdot 10^{-12} \text{ kW} / \text{m}^2 \text{ K}^4$).

Για τους υπολογισμούς, είναι πιο βολικό να χρησιμοποιούμε την παραπάνω εξίσωση με τη μορφή:

$$E_b = 56.7(T/1000)^4 \text{ (kW} / \text{m}^2)$$

2.4.4 Μεταβολή της ακτινοβολουμένης θερμορροής με το μήκος κύματος

Το **Σχήμα 1** που ακολουθεί δείχνει την ακτινοβολουμένη θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας του μέλανος σώματος σαν συνάρτηση του μήκους κύματος για έναν αριθμό θερμοκρασιών. Οι καμπύλες αυτές δίνουν τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία που μπορεί να εκπέμπεται από οποιοδήποτε σώμα στις θερμοκρασίες αυτές. Η συνάρτηση που απεικονίζουν οι καμπύλες αυτές, έχει βρεθεί από τον Planck με βάση την θεωρία των κβάντα, και είναι:

$$E_{b\lambda} = (c_1 \lambda^{-5}) / (e^{c_2 / \lambda T} - 1)$$

$E_{b\lambda}$: μονοχρωματική ικανότητα εκπομπής του μέλανος σώματος [$\text{kW} / \text{m}^2 \mu\text{m}$]

λ : μήκος κύματος [μm]

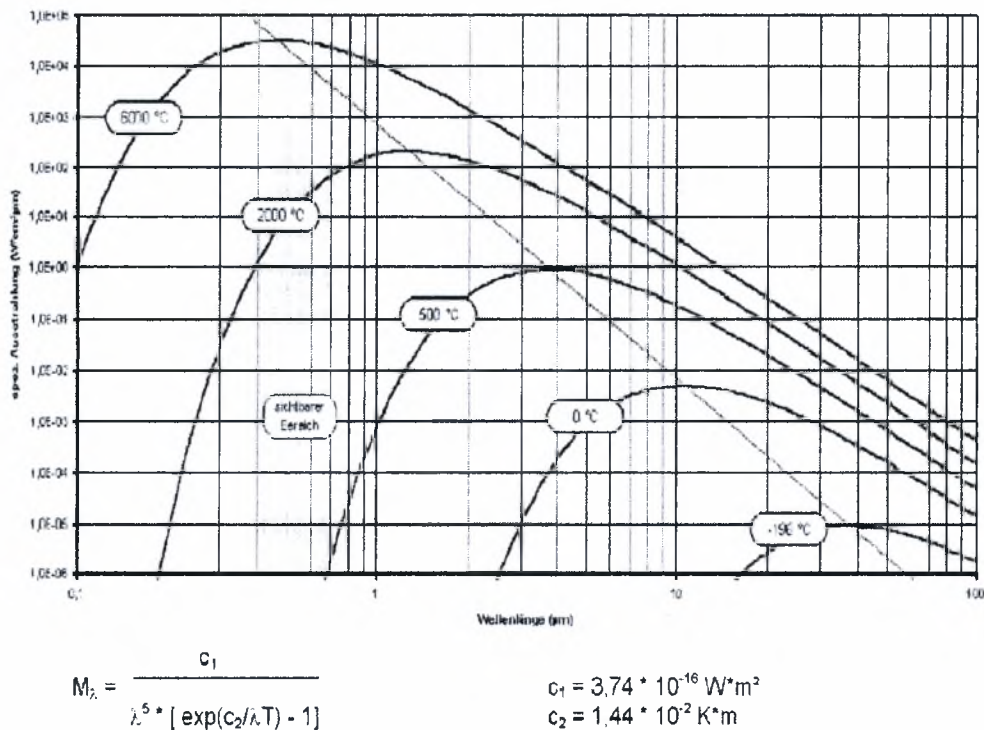
T : απόλυτη θερμοκρασία [K]

$c_1 = 3.74 \cdot 10^{-19} \text{ [kW m}^2]$

$c_2 = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{ [m K]}$

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται σε όλη την περιοχή μηκών κύματος, μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση της παραπάνω έκφρασης από $0 - \infty$, οπότε προκύπτει ίση με σT^4 .

Επειδή τώρα για κάθε θερμοκρασία προκύπτει μία και μοναδική καμπύλη, ο Νόμος του Planck μπορεί να παρασταθεί πιο καλά σαν μία ενιαία καμπύλη, εάν παρασταθεί γραφικά το μέγεθος $E_{b\lambda} / T^5$ σαν συνάρτηση του λT , όπως στο **Σχήμα1** :



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

2.4.5 Νόμος μετατόπισης του Wien

Η καμπύλη ροής ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος, έχει την ίδια γενική μορφή για όλες τις θερμοκρασίες, αλλά με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνει το ύψος της καμπύλης και το μέγιστο της μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος.

Εάν η θερμοκρασία του σώματος δεν ξεπερνά τους 500 °C, τα ποσοστά της ακτινοβολίας που βρίσκεται στην ορατή περιοχή, είναι πρακτικά αμελητέο. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, αρχίζει να ακτινοβολεί το σώμα στο σκοτάδι, στην αρχή σε σκοτεινά κόκκινο χρώμα (700 °C), στη συνέχεια σε βυссινί (900 °C), μετά σε πορτοκαλί (1100 °C), και τέλος σε λευκό (1400 °C και άνω, όπου η εκπεμπόμενη ενέργεια καλύπτει όλο το ορατό φάσμα). Συγχρόνως βέβαια αυξάνει ραγδαία και η ακτινοβολούμενη ισχύς.

Το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μέγιστη θερμοροή (λ), είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόλυτη θερμοκρασία, σύμφωνα με το Νόμο μετατόπισης του Wien, που προκύπτει με μηδενισμό της παραγώγου στην εξίσωση του Planck:

$$\lambda_{\max} = \frac{2896}{T} [\mu m]$$

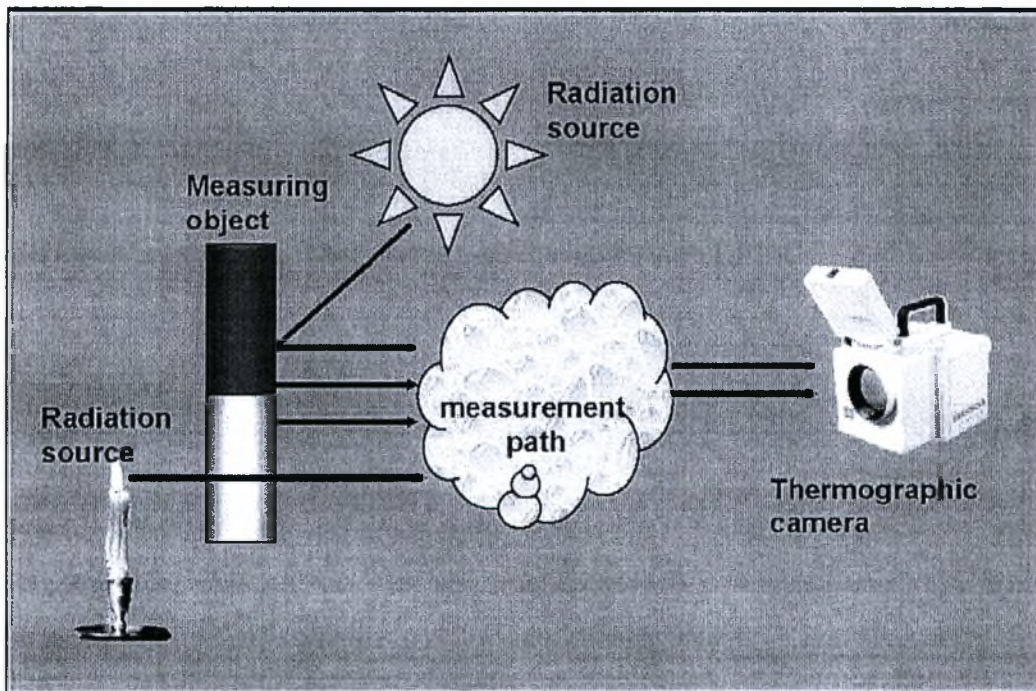
2.5 Βασικές Αρχές Υπέρυθρης Θερμογραφίας

2.5.1 Εισαγωγή

Τα αντικείμενα που έχουν θερμοκρασία επιφανείας υψηλότερη από 0 K, εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Εφόσον μπορούμε να μετρήσουμε την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μπορούμε να εκτιμήσουμε τη θερμοκρασία της επιφανείας.

Εκτός από τα πυρόμετρα, με την ανάπτυξη κεφαλών (CCD) ευαίσθητων σε υπέρυθη ακτινοβολία, αναπτύχθηκε ως παραλλαγή της συνηθισμένης βιντεοκάμερας, η βιντεοκάμερα υπέρυθρων. Έτσι εξελίχθηκε μία νέα επιστήμη μετρήσεων θερμοκρασιών με πολύπλευρες δυνατότητες, που ονομάζεται υπέρυθη θερμογραφία.

Η αρχή λειτουργίας της υπέρυθρης θερμογραφίας φαίνεται στην **Εικόνα 17** που ακολουθεί:



Εικόνα 17 Αρχή λειτουργίας υπέρυθρης θερμογραφίας

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, υπάρχει το αντικείμενο το οποίο θέλουμε να θερμογραφήσουμε και η θερμοκάμερα. Το θερμογράφημα αρκετές φορές δεν παρουσιάζει πάντα τη σωστή κατανομή θερμοκρασιών. Αυτό συμβαίνει διότι: η μετρούμενη ακτινοβολία δεν εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του αντικειμένου, είναι συνάρτηση και της ικανότητα εκπομπής (emissivity) αυτού. Επίσης ακτινοβολία εκπέμπει και το περιβάλλον, οι διάφορες πηγές του, η οποία με τη σειρά της

αντανεκλάται στην επιφάνεια του προς μέτρηση αντικειμένου. Τέλος η ακτινοβολία από το αντικείμενο και η αντανεκλώμενη ακτινοβολία εξαρτώνται από την απορρόφηση της ατμόσφαιρας.

Για να μετρήσεις ακριβώς την θερμοκρασία θα πρέπει να εξαλείψεις τις επιδράσεις των διάφορων πηγών ακτινοβολίας. Αυτό μπορεί να συμβεί on-line από την θερμοκάμερα. Στη συνέχεια παρατίθενται οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να ρυθμίζονται στην θερμοκάμερα πριν από την χρήση της:

- Η ικανότητα εκπομπής του αντικειμένου (emissivity)
- Η αντανεκλώμενη θερμοκρασία
- Η απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της θερμοκάμερας
- Η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος μέτρησης

Στη συνέχεια της εργασίας θα αναλυθούν οι παραπάνω παράμετροι.

2.5.1.1 Ικανότητα Εκπομπής (emissivity)

Η ικανότητα εκπομπής μιας επιφάνειας ορίζεται ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπει η επιφάνεια αυτή προς την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Η ικανότητα εκπομπής μιας επιφάνειας συμβολίζεται με ϵ , και κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας, $0 \leq \epsilon \leq 1$. Η ικανότητα εκπομπής αποτελεί μέτρο του κατά πόσο μια επιφάνεια προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός μέλανος σώματος, για το οποίο $\epsilon = 1$.

Πρόκειται για τη σημαντικότερη παράμετρο αντικειμένου η οποία πρέπει να ρυθμιστεί σωστά. Συνήθως τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνεται η ικανότητα εκπομπής είναι από 0.1 μέχρι 0.95. Μια πολύ γυαλισμένη επιφάνεια, όπως είναι ο καθρέφτης, έχει emissivity κάτω από 0.1 σε αντίθεση με το ανθρώπινο δέρμα το οποίο έχει 0.97 με 0.98.

Τα ανοξειδωτα μέταλλα χαρακτηρίζονται από υψηλή ικανότητα αντανεκλάσης γεγονός το οποίο δεν είναι επιθυμητό σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επομένως, η ικανότητα εκπομπής των μετάλλων είναι μικρή και αυξάνεται μόνο με την αύξηση της θερμοκρασίας

2.5.1.2 Απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της θερμοκάμερας

Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι η ακτινοβολία θα φθάσει στην θερμοκάμερα περιορίζοντας την επίδραση της απόστασης στην εκπομπή.

2.5.1.3 Αντανεκλώμενη θερμοκρασία

Σε μερικές κάμερες υπέρυθρης θερμογραφίας ονομάζεται και θερμοκρασία του φόντου (background temperature). Είναι απαραίτητο να ρυθμίζεται σωστά αυτή η θερμοκρασία στην περίπτωση που η ικανότητα εκπομπής του αντικειμένου είναι χαμηλή και η θερμοκρασία του αντικειμένου πλησιάζει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

2.5.1.4 Ατμοσφαιρική θερμοκρασία, υγρασία και απόσταση

Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν το γεγονός ότι i) μέρος της ακτινοβολίας μεταξύ αντικειμένου και θερμοκάμερας, απορροφάται από την ατμόσφαιρα και ii) η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μειώνεται με την απόσταση.

Εάν η σχετική υγρασία του αέρα είναι υψηλή, η απόσταση πολύ μεγάλη και η θερμοκρασία του αντικειμένου πολύ κοντά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος της μέτρησης είναι απαραίτητο να ρυθμιστούν σωστά αυτές οι παράμετροι.

Η απόσταση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι η απόσταση ανάμεσα στο προς μέτρηση αντικείμενο και την κάμερα υπέρυθρης θερμογραφίας.

Η εκπομπή (transmittance) είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη σχετική υγρασία του αέρα. Για να εξισορροπηθεί αυτό πρέπει να τεθεί σωστή τιμή στη σχετική υγρασία. Για μικρές αποστάσεις και για αέρα με κανονική (normal) τιμή υγρασίας, η σχετική υγρασία μπορεί να πάρει την τιμή 50% (by default value).

Τέλος, θα αναφερθούμε στις αντανάκλασεις όχι μόνο στην επιφάνεια του αντικείμενου που θερμογραφείται αλλά και στο φακό της θερμοκάμερας.

Σχετικά με τις δεύτερες, αυτές δεν λαμβάνονται υπ' όψη είτε γιατί ο φακός είναι καλυμμένος με ένα ειδικό στρώμα το οποίο αποτρέπει τις αντανάκλασεις είτε γιατί έχει την ίδια θερμοκρασία με αυτή του περιβάλλοντος.

Οι πρώτες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ανεπιθύμητες να εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της θερμογραφίας μιας επιφάνειας. Εξαρτώνται από το υλικό του αντικειμένου, από το φωτισμό του χώρου που λαμβάνει χώρα η μέτρηση, από τον χώρο μέτρησης (εσωτερικός, εξωτερικός) καθώς επίσης και από την ώρα της μέτρησης.

2.5.2 Σύντομη αναφορά στην Ιστορία της Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Πριν από 200 χρόνια δεν είχε ακόμη γίνει αντιληπτό το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η ακτινοβολία ως τρόπος μετάδοσης θερμότητας ανακαλύφθηκε το 1800 από τον Herschel. Η ανακάλυψη έγινε τυχαία κατά τη διάρκεια έρευνας του για ένα νέο οπτικό υλικό. Ο αστρονόμος Herschel και ήδη διάσημος για την ανακάλυψη του πλανήτη Ουρανού, έψαχνε το κατάλληλο υλικό για να κατασκευάσει οπτικό φίλτρο με σκοπό τη μείωση της φωτεινότητας της εικόνας του ήλιου στα τηλεσκόπια κατά τη διάρκεια ηλιακών παρατηρήσεων. Ενώ δοκίμαζε διάφορα έγχρωμα γυαλιά τα οποία έδιναν παρόμοιες μειώσεις της φωτεινότητας, λάμψης, του ήλιου παρατήρησε ότι κάποια από τα δείγματα δεν επέτρεπαν την ενέργεια του ήλιου να τα διαπεράσει ενώ άλλα την επέτρεπαν σε μεγάλο βαθμό.

Με αφορμή αυτή την παρατήρηση προχώρησε στην κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης η οποία βασίστηκε στο πρίσμα του Νεύτωνα. Η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω:

Αρχικά, έβαψε μαύρο το βολβό ενός ευαίσθητου υδραργυρικού θερμομέτρου. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το πρίσμα του Νεύτωνα δημιούργησε το φάσμα των χρωμάτων. Τέλος, περνούσε το θερμοόμετρο μέσα από το χρωματικό φάσμα και παρατηρούσε την ένδειξη του θερμομέτρου. Καθώς το θερμοόμετρο κινούταν αργά μέσα στο χρωματικό φάσμα παρατήρησε σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή, από το τέλος του ιώδους μέχρι το τέλος του κόκκινου. Το ίδιο αποτέλεσμα είχε παρατηρήσει και ο Ιταλός ερευνητής, Landriani, σε παρόμοιο πείραμα το 1777. Ωστόσο ο Herschel ήταν ο πρώτος που αναγνώρισε ότι μπορεί να υπάρχει ένα σημείο, το οποίο δεν περιέχεται στο ορατό φάσμα, όπου οι επιδράσεις της θερμότητας φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους. Μετακινώντας το θερμοόμετρο πέραν της περιοχής του κόκκινου χρώματος, παρατήρησε ότι η θερμοκρασία συνέχιζε να αυξάνεται. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται στις μέρες μας από τα υπέρυθρα μήκη κύματος. Ο Herschel ονόμασε αυτό το νέο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως θερμομετρικό φάσμα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ο όρος υπέρυθρη δεν επινοήθηκε από τον William Herschel.

Η πρώτη αποκαλούμενη «φωτογραφία θερμότητας» έγινε το 1840 από το γιο του William Herschel, τον John Herschel. Επίσης ο John ήταν ο πρώτος ο οποίος κατάφερε να καταγράψει την θερμική εικόνα σε χαρτί. Το επίτευγμα του αυτό το ονόμασε θερμογράφημα.

Από το 1900 και έπειτα η επιστήμη της θερμογραφίας γνωρίζει μεγάλη πρόοδο. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, ο στρατός χρησιμοποιούσε την υπέρυθρη θερμογραφία για την κατασκευή αισθητήρων κίνησης. Τέλος, από το 1950 και έπειτα οι συσκευές υπέρυθρης θερμογραφίας αρχίζουν να είναι πλέον διαθέσιμες στο ευρύ κοινό.

2.5.3 Θεωρία της θερμογραφίας

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαιρείται αυθαίρετα σε περιοχές μήκους κύματος, οι οποίες ονομάζονται ζώνες (bands). Δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά όσον αφορά την ακτινοβολία μεταξύ των ζωνών αυτών. Όλες διέπονται από τους ίδιους νόμους και η μόνη διαφορά τους είναι τα διαφορετικά μήκη κύματος.

Το υπέρυθρο φάσμα εκτείνεται από το βαθύ κόκκινο, στα μικρά μήκη κύματος, ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος συγχωνεύεται με τα ραδιοκύματα. Πιο συγκεκριμένα η υπέρυθρη περιοχή μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 μικρότερες ζώνες τα όρια των οποίων συνήθως επιλέγονται αυθαίρετα. Αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- i) 0.76 – 3 μm , near infrared,
- ii) 3 - 6 μm , middle infrared,
- iii) 6 - 15 μm , far infrared και
- iv) 15 – 100 μm , extreme infrared.

Η μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος είναι συνήθως τα μικρόμετρα (μm), ενώ άλλες μονάδες είναι τα νανόμετρα (nm) και τα Ångström (Å).

Η συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων μονάδων μέτρησης είναι η ακόλουθη:

$$10000 \text{ \AA} = 1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m}$$

2.6 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics)

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι ένα «εργαλείο το οποίο βασίζεται στον υπολογιστή» και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς συστημάτων τα οποία περικλείουν, ροές ρευστών, μετάδοση θερμότητας, και άλλες φυσικές και χημικές διεργασίες. Λειτουργεί, επιλύοντας τις εξισώσεις του ροϊκού πεδίου στον επιθυμητό όγκο ελέγχου στα σύνορα του οποίου έχουν εφαρμοστεί κατάλληλες οριακές συνθήκες.

2.6.1 Η Ιστορία του CFD

Από την αυγή του πολιτισμού, η ανθρωπότητα γοητευόταν από τα ρευστά, από τα φαινόμενα που συνέβαιναν γύρω της. Τέτοια φαινόμενα είναι: η ροή του νερού στους ποταμούς, ο αέρας, ισχυρά ωκεάνια ρεύματα, η ροή του ανθρώπινου αίματος.

Στην αρχαιότητα, οι μεγάλοι έλληνες φιλόσοφοι όπως ο Ηράκλειτος έθεσαν το αξίωμα ότι "όλα ρέουν" αλλά αυτό το αντιλαμβάνονταν υπό μια φιλοσοφική έννοια παρά με έναν ευδιάκριτα επιστημονικό τρόπο. Εντούτοις, ο Αρχιμήδης ήταν ο πρώτος που 'εγκαινίασε' το πεδίο της υδροστατικής και καθόρισε πώς να γίνεται η μέτρηση των πυκνοτήτων και των όγκων των αντικειμένων. Η επικέντρωση ωστόσο με την πάροδο του χρόνου γινόταν στα υδραυλικά έργα: υδραγωγεία, κανάλια, λιμάνια, και λουτρά, τα οποία οι αρχαίοι Ρωμαίοι μετέτρεψαν σε επιστήμη.

Δεν είχε ξεκινήσει η περίοδος της Αναγέννησης όταν αυτές οι ιδέες επανήλθαν πάλι στην επιφάνεια στη Νότια Ευρώπη όπου συναντάμε μεγάλους καλλιτέχνες – μηχανικούς, όπως ο Leonardo Da Vinci, οι οποίοι ξεκινάνε να εξετάζουν το φυσικό κόσμο των ρευστών και των ροών λεπτομερώς. Ο Leonardo Da Vinci παρατήρησε φυσικά φαινόμενα στον ορατό κόσμο, αναγνωρίζοντας τη μορφή και τη δομή τους, και περιγράφοντας τα γραφικά, ακριβώς όπως ήταν. Σχεδίασε και επόπτευσε τις εργασίες καναλιών και λιμανιών σε ένα μεγάλο μέρος της Κεντρικής Ιταλίας. Οι συνεισφορές του στη Ρευστομηχανική παρουσιάζονται σε μια πραγματεία εννέα τμημάτων (περιοχών μελέτης).

Ένας άλλος πρόσωπο που πρόσφερε πολλά στην Ρευστομηχανική είναι ο Isaac Newton. Η κυριότερη συνεισφορά του είναι ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα: $F = ma$.

Το 18^ο και 19^ο αιώνα έγιναν σημαντικές προσπάθειες για να περιγραφεί μαθηματικά η κίνηση των ρευστών. Αυτή την περίοδο διατυπώνονται η γνωστή σε όλους Εξίσωση Bernoulli από τον Daniel Bernoulli (1700-1782) και οι Εξισώσεις Euler από τον Leonhard Euler (1707-1783). Δύο άλλοι πολύ σημαντικοί ερευνητές στο πεδίο των ροών εμφανίζονται στο προσκήνιο αυτή την περίοδο, ο Claude Louis Marie Henry Navier (1785-1836) και ο George Gabriel Stokes (1819-1903) οι οποίοι έχοντας ως βάση τις Εξισώσεις Euler διατυπώνουν τις Εξισώσεις Navier – Stokes.

Πρόκειται για μερικές διαφορικές εξισώσεις (Partial Differential Equations) οι οποίες εμφανίστηκαν πριν 200 περίπου και χρόνια και αποτέλεσαν τη βάση της σύγχρονης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Αυτές περιλαμβάνουν εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής, πίεσης και τύρβης. Το 19^ο αιώνα θεωρίες σχετικές με τη ροή ρευστών

διατύπωσαν οι ακόλουθοι: Le Rond d'Alembert, Siméon-Denis Poisson, Joseph Louis Lagrange, Jean Louis Marie Poiseuille, John William Rayleigh, M. Maurice Couette, Osborne Reynolds, και Pierre Simon de Laplace.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, έγινε πολύ δουλειά στην αναθεώρηση, βελτίωση των θεωριών του οριακού στρώματος (boundary layer) και της τύρβης (turbulence). Στα θέματα αυτά πολύτιμες ήταν οι συνεισφορές των Ludwig Prandtl (1875 – 1953) , Theodore Von Karman (1881 – 1963), Geoffrey Ingram Taylor (1886 – 1975), Andrey Nikolaevich Kolmogorov (1903 – 1987) and George Keith Batchelor (1920 – 2000). Επιγραμματικά αναφέρεται το έργο του καθενός:

- Ludwig Prandtl: θεωρία οριακού στρώματος, μήκος ανάμιξης, συμπιεστές ροές, αριθμός Prandtl
- Theodore Von Karman: δίνες Von Karman
- Geoffrey Ingram Taylor: στατιστική θεωρία τύρβης, μικροκλίμακα Taylor (microscale Taylor)
- Andrey Nikolaevich Kolmogorov: Kolmogorov scales, γενικό ενεργειακό φάσμα για τη τύρβη
- George Keith Batchelor: συμβολές στη θεωρία της ομοιογενούς τύρβης.

Το 1933 πραγματοποιήθηκε στην Αγγλία η πρώτη αριθμητική επίλυση ροής γύρω από κύλινδρο, από τον A. Thom.

Τη δεκαετία του 60' σημαντική θεωρείται και η συμβολή της NASA με πολλές αριθμητικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα στο CFD (αλγόριθμος SIMPLE, κώδικας TEACH).

Στις αρχές του 80' έκαναν την εμφάνιση τους στην αγορά οι πρώτοι εμπορικοί κώδικες CFD. Πλέον το CFD έχει αναγνωριστεί ως ένα τμήμα της υπολογιστικά βοηθούμενης μηχανικής (Computer – Aided Engineering ,CAE). Εφαρμόζεται ευρέως από όλες τις μεγάλες βιομηχανίες με κυρίαρχο σκοπό τη μοντελοποίηση ροών μέσα ή γύρω από οποιαδήποτε γεωμετρία επιθυμεί ο χρήστης. Είναι αναπόσπαστο κομμάτι του αεροδυναμικού και υδροδυναμικού σχεδιασμού των αεροπλάνων, πλοίων, τρενών, αυτοκινήτων, υποβρυχίων, πυραύλων και γενικά οποιουδήποτε οχήματος ή κατασκευής έχει επινοήσει ο άνθρωπος.

2.6.2 Η Μαθηματική βάση του CFD

Οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη μεταφορά θερμότητας, μάζας και ορμής είναι οι εξισώσεις Navier – Stokes. Αυτές οι μερικές διαφορικές εξισώσεις όπως προαναφέρθηκε, διατυπώθηκαν στις αρχές του 19^{ου} αιώνα και στην γενική τους μορφή δεν έχουν αναλυτική λύση αλλά μπορούν να διακριτοποιηθούν και να λυθούν αριθμητικά. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης οι οποίες εφαρμόζονται στους κώδικες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Η πιο γνωστή μέθοδος είναι η μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η περιοχή ενδιαφέροντος, χωρίζεται σε μικρές υποπεριοχές, οι οποίες ονομάζονται όγκοι ελέγχου. Οι εξισώσεις διακριτοποιούνται και επιλύονται επαναληπτικά σε κάθε όγκο ελέγχου. Αποτέλεσμα αυτής της

διαδικασίας είναι η προσέγγιση της τιμής των προς μελέτη μεγεθών σε συγκεκριμένα σημεία του πεδίου ροής. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να έχουμε μια εικόνα της συμπεριφοράς του ρευστού στον όγκο ελέγχου μας.

2.6.3 Η μεθοδολογία επίλυσης του κώδικα CFD

Το CFD συνήθως εφαρμόζεται για το σχεδιασμό ενός μοντέλου, αλλά τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται για την ανάλυση και βελτίωση ενός ήδη υπάρχοντος, όπως στην περίπτωση μας.

Πρώτο στάδιο είναι ο ορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή του όγκου ελέγχου. Η γεωμετρία του προβλήματος μπορεί να σχεδιαστεί από την αρχή, αλλά όπως συμβαίνει τις περισσότερες φορές, γεγονός το οποίο είναι μεγάλο πλεονέκτημα των προγραμμάτων CFD, εισάγεται έτοιμη, έχοντας σχεδιαστεί με τη βοήθεια κάποιου CAD λογισμικού. Αφού έχει οριστεί ο όγκος ελέγχου, δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα. Στη συνέχεια, εισάγεται το υπολογιστικό πλέγμα στο pre – processor και ορίζονται οι οριακές συνθήκες στα διάφορα τμήματα (parts) του όγκου ελέγχου.

Ο solver επιλύει το πρόβλημα και δημιουργεί ένα αρχείο αποτελεσμάτων το οποίο περιέχει τις μεταβολές της ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας και των άλλων προς μελέτη μεγεθών.

Τα αποτελέσματα μπορούν να οπτικοποιηθούν με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς του ρευστού στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιαστικές τροποποιήσεις οι οποίες μπορούν να ελέγχονται, αλλάζοντας την γεωμετρία του CFD μοντέλου και παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εκάστοτε επίλυσης.

Η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, αποτελείται από 4 τμήματα:

- Γεωμετρία - Υπολογιστικό Πλέγμα (Geometry / Mesh)
- Ορισμός Οριακών Συνθηκών (Physics Definition)
- Επίλυση (Solver)
- Παρουσίαση Αποτελεσμάτων (Post – Processor)

Γεωμετρία – Υπολογιστικό Πλέγμα (Geometry – Mesh)

Αυτή η διαδικασία είναι το πρώτο τμήμα του pre – processing σταδίου. Στόχος είναι η δημιουργία του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος. Για την δημιουργία του πλέγματος απαιτείται η ύπαρξη κλειστής γεωμετρίας. Τα βασικά στάδια αυτού του τμήματος περιλαμβάνουν:

- ✓ Καθορισμός της γεωμετρίας (όγκου ελέγχου)
- ✓ Δημιουργία των απαραίτητων τμημάτων στα οποία στη συνέχεια θα εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες
- ✓ Ρύθμιση των παραμέτρων του πλέγματος

Ορισμός οριακών συνθηκών (Physics definition)

Πρόκειται για το δεύτερο τμήμα του pre – processing σταδίου και στόχος του είναι η δημιουργία του αρχείου εισόδου στο solver. Στο στάδιο αυτό εισάγεται το υπολογιστικό πλέγμα, ορίζονται οι οριακές συνθήκες στα επιμέρους τμήματα τα οποία έχουν δημιουργηθεί στο προηγούμενο τμήμα της επίλυσης και προσδιορίζονται οι ιδιότητες του ρευστού του προβλήματος.

Επίλυση (Solver)

Ο Solver παράγει ένα αρχείο το οποίο περιέχει τα αποτελέσματα της επίλυσης. Τα βήματα επίλυσης είναι τα ακόλουθα:

1. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται σε ολόκληρο τον όγκο ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό εφαρμόζονται οι βασικοί νόμοι διατήρησης σε κάθε επιμέρους όγκο ελέγχου.
2. Αυτές οι ολοκληρωτικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων δημιουργώντας μια ομάδα προσεγγίσεων για τους σταθερούς όρους των ολοκληρωτικών εξισώσεων.
3. Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά.

Απαιτείται επαναληπτική διαδικασία εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης αυτών των εξισώσεων, και όταν η αριθμητική λύση προσεγγίζει την ακριβή λύση τότε λέμε ότι έχουμε σύγκλιση.

Σε κάθε επανάληψη, ένα σφάλμα ή υπόλοιπο, καταγράφεται ως τιμή της συνολικής, σε όλο τον όγκο ελέγχου, διατήρησης των ιδιοτήτων του ρευστού. Η σύγκλιση της τελικής λύσης στην ακριβή λύση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί είναι το μέγεθος και το σχήμα των επιμέρους όγκων ελέγχου και οι τιμές των τελικών σφαλμάτων (residuals).

Στο τέλος αυτού του σταδίου ο solver δημιουργεί το αρχείο των αποτελεσμάτων το οποίο στη συνέχεια εισάγεται στο τελευταίο τμήμα της διαδικασίας επίλυσης το οποίο είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (post – processing).

Παρουσίαση αποτελεσμάτων (Post – Processor)

Τελευταίο τμήμα της επίλυσης του προβλήματος είναι η απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρωματικά και με διάφορους τρόπους στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αποτελέσματα, τα οποία περιέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τη ροή του προβλήματος μπορούν να παρουσιαστούν με ποικίλους τρόπους σε οποιαδήποτε περιοχή, επιφάνεια, του όγκου ελέγχου θελήσει ο χρήστης.

Οι ποικίλοι τρόποι οι οποίοι αναφέρθηκαν είναι: γραμμές ροής (streamlines), επίπεδα κάθετα στους τρεις άξονες (τομές δηλαδή του όγκου ελέγχου) (planes), όγκοι οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου και απεικονίζονται πάνω σε αυτούς οι κατανομές των ζητούμενων μεγεθών. Ακόμη, μπορούν να δημιουργηθούν

εικόνες οι οποίες περιέχουν τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα αλλά και βίντεο, animation, στο οποίο να παρουσιάζεται η μεταβολή ενός μεγέθους.

Τέλος, το post – processor εξάγει και αρχεία διαφόρων τύπων (.txt, .dat, .csv) τα οποία περιέχουν τις υπολογιζόμενες τιμές διαφόρων μεγεθών σε οποιοδήποτε τμήμα του όγκου ελέγχου επιθυμεί ο χρήστης. Στη συνέχεια τα αρχεία αυτά μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία σε προγράμματα στατιστικά και να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα συμβάλλουν στην κατανόηση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση τέτοιων αρχείων εξόδου για να γίνει έλεγχος ικανοποίησης των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.

2.6.4 Άνωση (Buoyancy)

Το ANSYS – CFX μπορεί να μοντελοποιήσει ροές φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής αλλά και ροές στις οποίες η επίδραση της άνωσης είναι σημαντική. Η φυσική συναγωγή αναφέρεται στην περίπτωση όπου η συναγωγή προέρχεται μόνο από τοπικές μεταβολές της πυκνότητας, για παράδειγμα σε ένα κλειστό κουτί όπου υπάρχει στο εσωτερικό του μια πηγή θερμότητας. Η εξαναγκασμένη συναγωγή αναφέρεται στην περίπτωση όπου η συναγωγή του ρευστού προκαλείται από την διαφορά πίεσης και τις δυνάμεις άνωσης.

Η άνωση οφείλεται σε μεταβολές στην πυκνότητα του ρευστού, στο δικό μας πρόβλημα είναι ο αέρας, οι οποίες μπορεί να προκαλούνται από πολλούς λόγους. Κάποιοι από αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τοπικές θερμοκρασιακές μεταβολές προκαλούν αλλαγές στην πυκνότητα
- Σε πολυφασικές ροές, στις οποίες λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μεταφοράς μεταξύ των φάσεων, η διαφορά στην πυκνότητα των φάσεων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δυνάμεων άνωσης.
- Για ιδανικά αέρια και πραγματικά ρευστά, τοπικές διακυμάνσεις της πίεσης μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στην πυκνότητα. Αυτές οι μεταβολές είναι συνήθως μικρές και η επίδραση της άνωσης στην ροή συνήθως δεν είναι σημαντική. Σε αυτή την περίπτωση και αν δεν υπάρχουν άλλες πηγές άνωσης, η άνωση δεν είναι απαραίτητο να μοντελοποιείται.

Ένας τρόπος για να προβλεφθεί η επίδραση των δυνάμεων άνωσης στην ροή είναι ο λόγος των Αριθμών Grashof και Reynolds:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \beta L \Delta T}{U^2}$$

Αν η τιμή του λόγου πλησιάζει ή υπερβαίνει την μονάδα, αυτό υποδηλώνει ότι οι επιδράσεις των δυνάμεων άνωσης είναι σημαντικές στη ροή, ενώ αν ο λόγος παίρνει τιμές πολύ μικρές τότε οι δυνάμεις άνωσης μπορούν να αγνοηθούν.

Σε προβλήματα φυσικής συναγωγής, ο αριθμός Rayleigh (Ra) εκφράζει το μέγεθος της επίδρασης της άνωσης στην ροή.

$Ra = Gr Pr$, όπου Pr είναι ο αριθμός Prandtl του ρευστού. Οι στρωτές ροές χαρακτηρίζονται από τιμές του αριθμού $Ra < 10^8$, ενώ οι τυρβώδεις ροές από $Ra > 10^{10}$.

Οι επιδράσεις της άνωσης μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας ένα από τα δύο μοντέλα του ANSYS – CFX:

➤ Full Buoyancy Model (Density Difference)

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται, για μονοφασικές ροές, όταν η πυκνότητα του ρευστού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης. Εδώ περιλαμβάνονται όλα τα ιδανικά αέρια και πραγματικά ρευστά. Το μόνο το οποίο χρειάζεται να ορίζεται είναι μια πυκνότητα αναφοράς ως μια προσεγγιστική μέση τιμή της προσδοκώμενης πυκνότητας του όγκου ελέγχου (ρ_{ref}).

➤ Boussinesq model

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται όταν η μεταβολή της πυκνότητας είναι πολύ μικρή. Αυτό ισχύει στα υγρά. Επομένως το μοντέλο Boussinesq εφαρμόζεται όταν η πυκνότητα του ρευστού δεν είναι συνάρτηση της πίεσης ή της θερμοκρασίας.

Για την επίλυση των μοντελοποιήσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε το Full Buoyancy Model.

2.6.5 Εξισώσεις Επίλυσης

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι το ANSYS-CFX [18], το οποίο περιλαμβάνει pre – processor, solver και post – processor.

Οι εξισώσεις επίλυσης παρουσιάζονται στις σελίδες που ακολουθούν:

Εξισώσεις Μεταφοράς

Η Εξίσωση Συνέχειας (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

Οι Εξισώσεις Ορμής (Momentum Equations)

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M$$

Η Εξίσωση της Ολικής Ενέργειας (Total Energy Equation)

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot \tau) + \bar{u} \cdot S_M + S_E$$

Η Εξίσωση Θερμικής Ενέργειας (Total Energy Equation)

Για χαμηλής ταχύτητας ροές μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια εναλλακτική μορφή της εξίσωσης ολικής ενέργειας, την εξίσωση θερμικής ενέργειας:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \bar{u} \cdot \nabla p + \tau : \nabla \bar{u} + S_E$$

Εξισώσεις κατάστασης

Ο solver υπολογίζει πίεση και στατική ενθαλπία. Επομένως, όταν υπολογίζει την πυκνότητα, αυτό σημαίνει ότι έχουμε επιλέξει την θερμική εξίσωση κατάστασης, ενώ όταν υπολογίζει την θερμοκρασία αυτό σημαίνει ότι έχουμε επιλέξει την βασική συσχέτιση.

Η θερμική εξίσωση κατάστασης περιγράφεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης:

$$\rho = \rho(p, T)$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα, μπορεί επίσης να περιγραφεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης:

$$c_p = c_p(p, T)$$

Για ένα ιδανικό αέριο, η πυκνότητα προσδιορίζεται από τον νόμο των ιδανικών αερίων, σε αυτή την περίπτωση η c_p μπορεί να είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας:

$$c_p = c_p(T)$$

Καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου

Λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο των ιδανικών αερίων, για ένα ιδανικό αέριο έχουμε:

$$\rho = \frac{w(p + p_{ref})}{R_0 T}, \text{ όπου } w \text{ είναι το μοριακό βάρος του αερίου και } R_0 \text{ είναι}$$

Παγκόσμια Σταθερά των Αερίων.

2.6.6 Μοντέλα Τύρβης (Turbulence Models)

Η τύρβη περιλαμβάνει τις διακυμάνσεις του ροϊκού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο. Πρόκειται για μια πολύπλοκη διεργασία κυρίως επειδή είναι τρισδιάστατη και ασταθής. Τύρβη εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις αδράνειας του ρευστού γίνονται πιο σημαντικές από τις ιξώδεις δυνάμεις, και χαρακτηρίζεται από μεγάλους αριθμούς Reynolds. Γενικά οι εξισώσεις Navier – Stokes περιγράφουν μαζί στρατές και τυρβώδεις ροές.

Για να καταστεί ικανό να προβλέπονται τα αποτελέσματα της τύρβης, μεγάλο τμήμα της CFD έρευνας έχει επικεντρωθεί σε μεθόδους οι οποίες κάνουν χρήση υπολογιστικών μοντέλων τύρβης. Τα μοντέλα τύρβης αναπτύχθηκαν για να ερμηνεύουν τις επιδράσεις, τα αποτελέσματα της τύρβης, χωρίς να κρίνεται αναγκαία η χρήση κάποιας απευθείας αριθμητικής ανάλυσης. Τα περισσότερα μοντέλα τύρβης είναι στατιστικά μοντέλα τύρβης. Οι μοναδικές εξαιρέσεις είναι το μοντέλο Large Eddy Simulation (Προσομοίωση μεγάλης δίνης) και το μοντέλο Detached Eddy Simulation.

Πολύ συνηθισμένο στην επίλυση βιομηχανικών ροών, είναι το μοντέλο k-ε.

Τα λεγόμενα “Δύο εξισώσεων μοντέλα τύρβης”, Two equation turbulence models, χρησιμοποιούνται ευρέως διότι επιτυγχάνουν ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ της αριθμητικής προσπάθειας και της υπολογιστικής ακρίβειας. Αυτά τα μοντέλα είναι περισσότερο πολύπλοκα από τα Zero equation models. Η ταχύτητα και το length scale επιλύονται χρησιμοποιώντας ξεχωριστές εξισώσεις μεταφοράς.

Το k-ε μοντέλο στο ANSYS – CFX

k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και ορίζεται η μεταβολή των διακυμάνσεων της ταχύτητας. Οι διαστάσεις της είναι: m^2/s^2 .

ε είναι η τυρβώδης απώλεια δινών, turbulence eddy dissipation, και έχει διαστάσεις: m^2/s^3 .

Το k-ε μοντέλο προκαλεί αλλαγές στις εξισώσεις μεταφοράς.

Οι εξισώσεις ορμής γίνονται ως εξής:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \otimes \bar{u}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u})^T + B$$

2.6.7 Μοντελοποίηση ακτινοβολίας

Ο σκοπός της μοντελοποίησης της ακτινοβολίας είναι η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς της ακτινοβολίας για να προσδιοριστεί ο όρος S στην εξίσωση ενέργειας και η ακτινοβολούμενη θερμότητα στα τοιχώματα.

Υπάρχουν πολλά μοντέλα ακτινοβολίας:

- Rosseland Model
- The P1 Model
- Discrete Transfer Model
- Monte Carlo Model
- Spectral Model

Στις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας, σύμφωνα με τις υποδείξεις του ANSYS – CFX, επιλέχθηκε το μοντέλο Monte Carlo, διότι είναι το μόνο στο οποίο οι τροχιές των φωτονίων εξαρτώνται από το συντελεστή απορρόφησης και την ικανότητα εκπομπής των τοιχωμάτων.

3 Μεθοδολογία επίλυσης του βασικού προβλήματος (reference case)

Εξαιτίας της φύσης του προβλήματος, αναπτύχθηκε η παρακάτω μεθοδολογία προσέγγισης, η οποία βασίζεται στην (πειραματικά επιβεβαιωμένη) παραδοχή ότι το θερμοκρασιακό πεδίο στο κέλυφος του εναλλάκτη θερμότητας του αερολέβητα, καθορίζεται από τον εσωτερικό σχεδιασμό του θαλάμου καύσης – αυλών καυσαερίων, και δεν επηρεάζεται σημαντικά από αλλαγές στο ροϊκό πεδίο του αέρα αεροθέρμανσης εξωτερικά του κελύφους. Με βάση την παραδοχή αυτή, αναπτύξαμε τη μεθοδολογία σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:

1. Διεξαγωγή μετρήσεων βαθμού απόδοσης, λόγου αέρα καυσίμου και εκπομπών αιθάλης στον αερολέβητα, στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, σε μόνιμη κατάσταση (MRU Vario Plus Industrial).
2. Διεξαγωγή μετρήσεων με υπέρυθρη θερμογραφία, (κάμερα υπέρυθρων Thermacam P45) ώστε να καταγραφεί το θερμοκρασιακό πεδίο στο τμήμα της επιφανείας εναλλαγής θερμότητας του λέβητα που γίνεται ορατό όταν αφαιρεθεί το πρόσθιο κάλυμμα.
3. Διεξαγωγή μετρήσεων με ανεμόμετρο θερμού σύρματος (TSI Velocicalc) σε όλο το εύρος του στομίου εξόδου του αεραγωγού του αερολέβητα, ώστε να υπάρχουν ενδεικτικές τιμές της διακύμανσης της ταχύτητας και θερμοκρασίας αέρα στην έξοδο.
4. Διεξαγωγή μετρήσεων με ανεμόμετρο θερμού σύρματος σε ένα κάθετο στη ροή επίπεδο στο εσωτερικό του αερολέβητα ώστε να καταγραφεί το πεδίο ταχυτήτων σε αυτή.
5. Διεξαγωγή μετρήσεων με θερμοστοιχεία τύπου K στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό
6. Παραγωγή solid model της περιοχής εναλλαγής θερμότητας του αερολέβητα με βάση σχέδια σε ProEngineer [25] που μας παρέδωσε ο κατασκευαστής [17] (λογισμικό ANSYS ICEM).

7. Παραγωγή κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος στον συνολικό όγκο ελέγχου στον οποίο αναπτύσσεται το ροϊκό πεδίο του αέρα αεροθέρμανσης (λογισμικό ANSYS ICEM).
8. Παραγωγή οριακών συνθηκών ροής και μετάδοσης θερμότητας στα όρια του όγκου ελέγχου (λογισμικό CFX Pre). Όσον αφορά τη μετάδοση θερμότητας από την επιφάνεια εναλλαγής προς τον αέρα αεροθέρμανσης, χρησιμοποιείται οριακή συνθήκη σταθερών θερμοκρασιών στα διάφορα τμήματα της επιφάνειας εναλλαγής, που λαμβάνονται από τα θερμογραφήματα. Όσον αφορά την παροχή αέρα εισόδου, αυτή εκτιμάται προσεγγιστικά με βάση τις χαρακτηριστικές του ανεμιστήρα [26] και διορθώνεται με επαναληπτική προσέγγιση ώστε να επιτευχθεί συμφωνία πειράματος – υπολογισμού όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση στο στόμιο εξόδου του αερολέβητα.
9. Επίλυση των εξισώσεων του τρισδιάστατου ροϊκού πεδίου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με το μοντέλο τύρβης k-ε (CFX Solver).
10. Οπτικοποίηση – παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή ροϊκών γραμμών και πεδίων κατανομής θερμοκρασιών και ταχυτήτων σε χαρακτηριστικές διατομές (CFX Post).
11. Εξαγωγή αρχείων αποτελεσμάτων στις διατομές εισόδου – εξόδου του όγκου ελέγχου, για έλεγχο ισοζυγίων μάζας και ενέργειας (επεξεργασία αρχείων εξόδου του CFX Post).

Αφού διασφαλιστεί η συμφωνία πειράματος – υπολογισμού όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση στο στόμιο εξόδου του αερολέβητα, οριστικοποιούμε την παροχή αέρα και πλέον μπορούμε να τρέξουμε ξανά τη συγκεκριμένη περίπτωση, αλλάζοντας μόνο τη θέση – διαστάσεις της θυρίδας εισόδου αέρα, αλλά ακόμη, σε κάποιο βαθμό, και τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης – αυλών, ώστε να δοκιμάζονται υπολογιστικά διάφορες βελτιώσεις στο σχεδιασμό.

3.1 Πειραματικό μέρος επίλυσης

3.1.1 Διεξαγωγή μετρήσεων βαθμού απόδοσης και λόγου αέρα

Στη φάση αυτή γίνονται μετρήσεις βαθμού απόδοσης και λόγου αέρα στον αερολέβητα, στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, σε μόνιμη κατάσταση με χρήση του οργάνου MRU Vario Plus Industrial [27]. Επίσης μετρήθηκε και ο δείκτης αιθάλης με χρήση χειροκίνητης αντλίας Bacharach. Ο στόχος ήταν να επιτευχθεί μία βέλτιστη ρύθμιση του καυστήρα, ώστε να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός απόδοσης του λέβητα με το συγκεκριμένο σχεδιασμό.

Συνολικά έγιναν 7 μετρήσεις με διαφορετικές ρυθμίσεις, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη με την οποία και συνεχίστηκαν οι μετρήσεις αξιολόγησης.

Αξίζουν να σημειωθούν τα ακόλουθα: α) ο χρόνος μεταξύ ρύθμισης και μέτρησης είναι 2 λεπτά (2 min) και β) όλες οι μετρήσεις γίνονται έχοντας αφαιρέσει το εξωτερικό μονωτικό τμήμα (καπάκι) του αερολέβητα.

Ο βαθμός απόδοσης του αερολέβητα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_B H_u} = \frac{\dot{m}_B H_u - \dot{m}_v \overline{C_p T_v}}{\dot{m}_B H_u} \Leftrightarrow$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{m}_v \overline{C_p T_v}}{\dot{m}_B H_u} \Leftrightarrow$$

$$\eta = 1 - \frac{(1 + \lambda L_{\min}) \overline{C_p T_v}}{H_u}$$

Στους πίνακες 2 και 3 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα μετρήσεων και ο βαθμός απόδοσης αντίστοιχα:

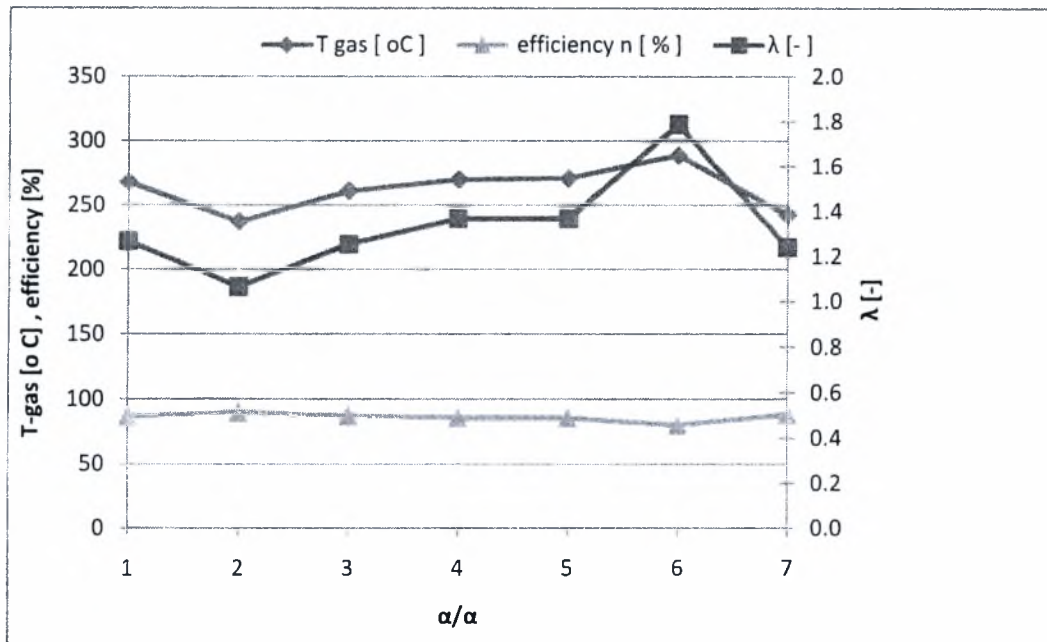
Πίνακας 2 Πρωτόκολλο μετρήσεων

a/a	T gas [°C]	λ [-]
1	268	1.27
2	237	1.07
3	261	1.25
4	270	1.37
5	271	1.37
6	289	1.79
7	242	1.24

Πίνακας 3 Βαθμός απόδοσης efficiency , η [%]

a/a	efficiency , η [%]
1	86,8
2	90.0
3	87.3
4	85.7
5	85.6
6	80.2
7	88.3

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 2, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων:



Σχήμα 2 λ, T_{καυσαερίων}, η

Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται στη μέτρηση 2, αλλά το σημείο λειτουργίας δεν είναι αποδεκτό λόγω υψηλής εκπομπής αιθάλης, γι' αυτό επιλέχθηκε τελικά ως βέλτιστο σημείο το σημείο 3, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

max efficiency, n [%]	T _{gas} [°C]	λ [-]
87.3	261	1.25

Από το Σχήμα 2 προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Οι γραμμές των T_{exh} και λ είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους.
- Η θερμοκρασία καυσαερίων αυξάνεται με αύξηση του λ
- Στη μέτρηση 6 εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των λ = 1.79 και T_{exh} = 289 °C
- Στη μέτρηση 2 εμφανίζονται οι ελάχιστες τιμές των λ = 1.07 και T_{exh} = 237 °C και η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης η = 90 %
- Η γραμμή του βαθμού απόδοσης είναι σχεδόν ευθεία
- Ο βαθμός απόδοσης, σε αντίθεση με την θερμοκρασία των καυσαερίων, μειώνεται με αύξηση του λ και αντίστοιχα αυξάνεται με μείωση αυτού

3.1.2 Μετρήσεις με υπέρυθρη θερμογραφία

Στο τμήμα αυτό της εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με υπέρυθρη θερμογραφία, ώστε να καταγραφεί το θερμοκρασιακό πεδίο στο τμήμα της επιφανείας αναλλαγής θερμότητας του λέβητα που γίνεται ορατό όταν αφαιρεθεί το κάλυμμα (Εικόνα 2).

Η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την θερμογραφία του αερολέβητα είναι η ακόλουθη:

- Αρχικά τίθεται σε λειτουργία η θερμοκάμερα και επιχειρείται η τοποθέτηση της στη βέλτιστη δυνατή θέση, δηλαδή να εστιάζει κατευθείαν πάνω στον αερολέβητα.
- Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και συνδέεται η κάμερα σε αυτόν (σύνδεση FIREWIRE).
- Τελικά γίνεται εκκίνηση του αερολέβητα, ο οποίος έχει ρυθμιστεί προηγουμένως (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο) στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του.
- Τέλος, με την εκκίνηση του προγράμματος THERMACAM Researcher [28] εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή η υπέρυθρη εικόνα του αερολέβητα και μπορούν να ληφθούν περιοδικά θερμογραφήματα.

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην **Εικόνα 18**.



Εικόνα 18 Μετρήσεις με την πειραματική διάταξη υπέρυθρης θερμογραφίας, με τον αερολέβητα σε λειτουργία.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται κατανομές θερμοκρασιών σε διάφορες περιοχές του αερολέβητα.

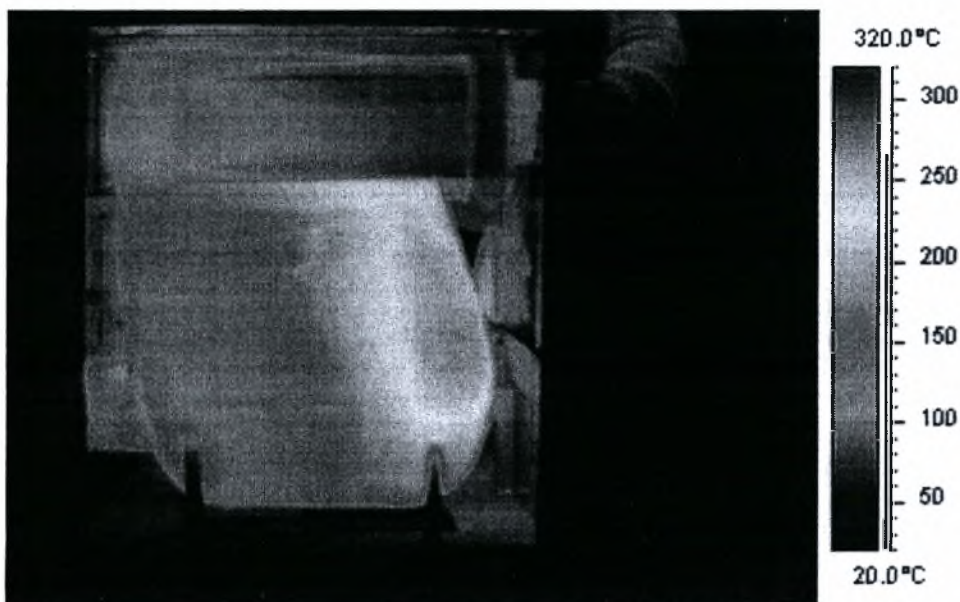
Πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά τη λήψη των θερμογραφημάτων δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στη σχετική συσκότιση του εργαστηρίου, ώστε να αποφεύγονται οποιεσδήποτε αντανακλάσεις εξωτερικών πηγών φωτός στις επιφάνειες που μελετώνται, οι οποίες θα μπορούσαν να δώσουν παρασιτικές ενδείξεις θερμοκρασιών.

Στην **Εικόνα 19** παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασιών στον αερολέβητα όταν έχει ρυθμιστεί σε λόγο αέρα καυσίμου, $\lambda=1,37$ (μέτρηση 5)

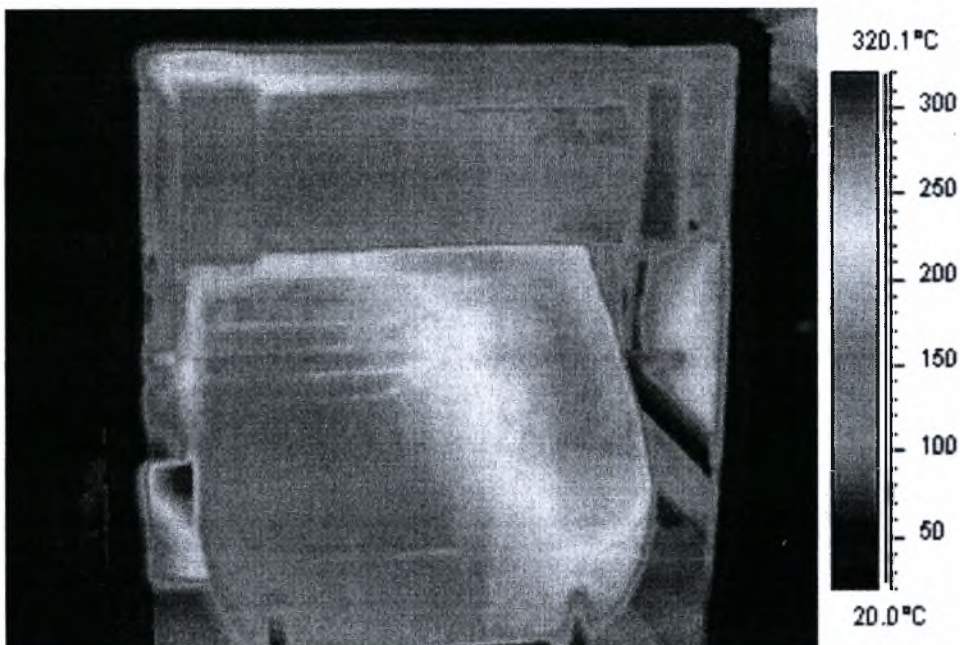
Στην **Εικόνα 20** παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασιών στον αερολέβητα όταν έχει ρυθμιστεί σε λόγο αέρα καυσίμου, $\lambda=1,79$ (μέτρηση 6)

Στην **Εικόνα 21** παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασιών στον αερολέβητα όταν έχει ρυθμιστεί σε λόγο αέρα καυσίμου, $\lambda=1,24$ (μέτρηση 7)

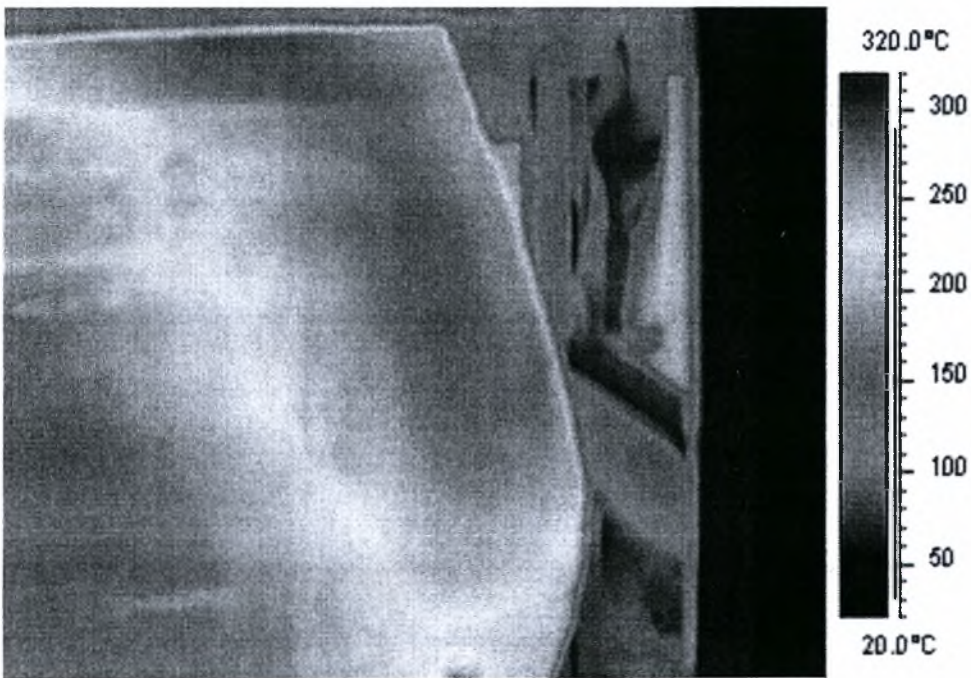
Στην **Εικόνα 22** παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασιών στον αερολέβητα όταν έχει ρυθμιστεί σε λόγο αέρα καυσίμου, $\lambda=1,25$ (μέτρηση 3)

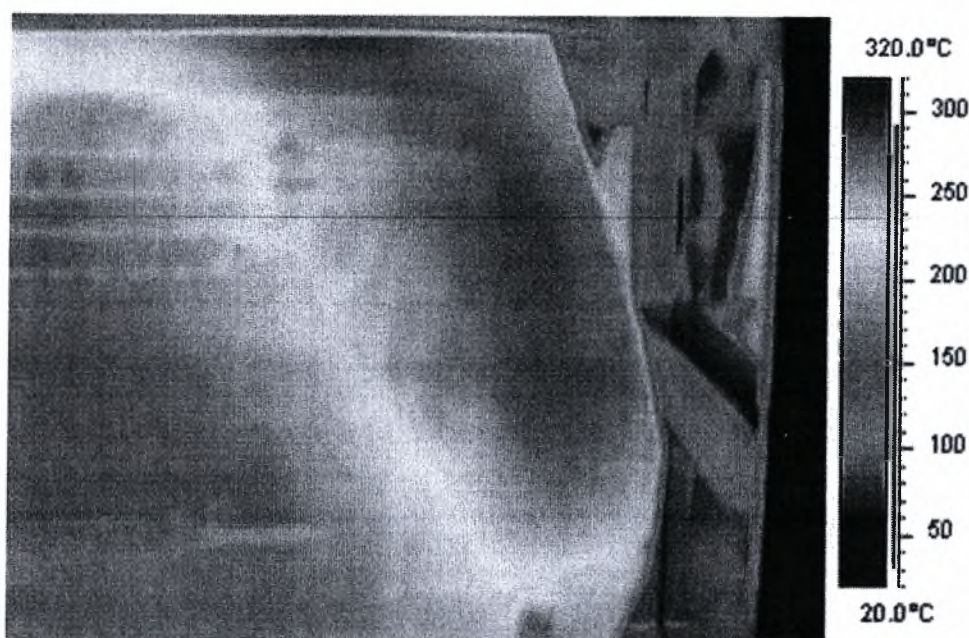


Εικόνα 19 Θερμογράφημα για τη μέτρηση 5

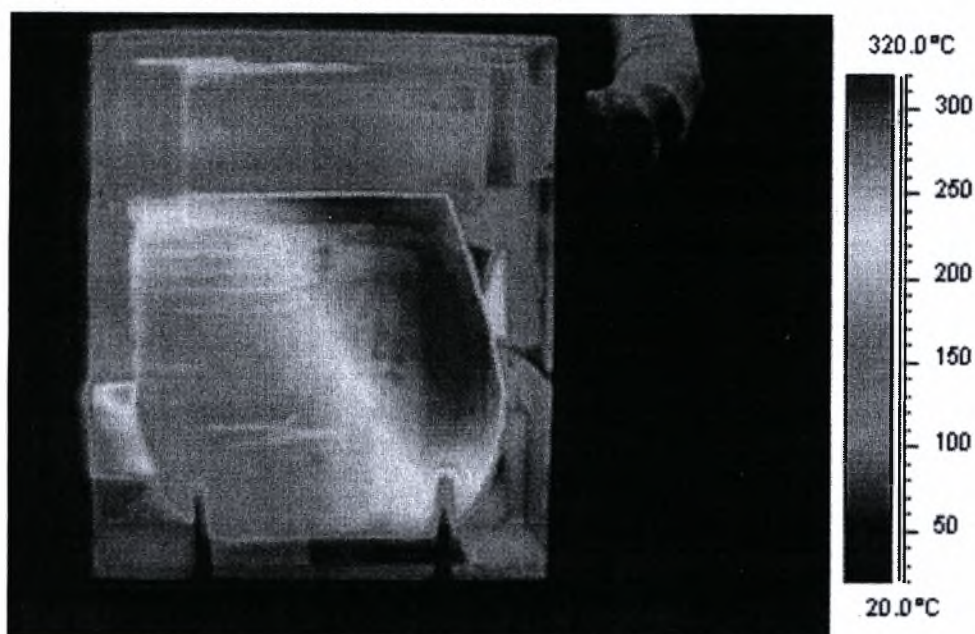


Εικόνα 20 Θερμογράφημα για τη μέτρηση 6





Εικόνα 21 Θερμογράφημα για τη μέτρηση 7



Εικόνα 22 Θερμογράφημα για τη μέτρηση 3

Από την επεξεργασία των δεδομένων των σχετικών θερμογραφημάτων, όπως αυτά λαμβάνονται από διάφορες οπτικές γωνίες μέσω του προγράμματος Thermacam Researcher [28] προκύπτουν περισσότερες πληροφορίες για το θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε φθάνει τους 325°C. Επιπλέον των παραπάνω, ελέγχθηκε κατά πόσον η αφαίρεση του καλύμματος για την οπτική πρόσβαση στην επιφάνεια εναλλαγής, ενδεχόμενα διαταράσσει το θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό, μετά από λειτουργία του αερολέβητα στο ονομαστικό σημείο επί 30 min, αφαιρέθηκε ταχύτατα (σε διάστημα 2 s) το κάλυμμα και κινηματογραφήθηκε το θερμοκρασιακό πεδίο από την θερμοκάμερα η οποία ήταν ήδη στημένη και εστιασμένη. Η παρακολούθηση του

μεταβατικού αυτού θερμογραφήματος έδειξε αμελητέα μεταβολή μετά την αφαίρεση του καλύμματος.

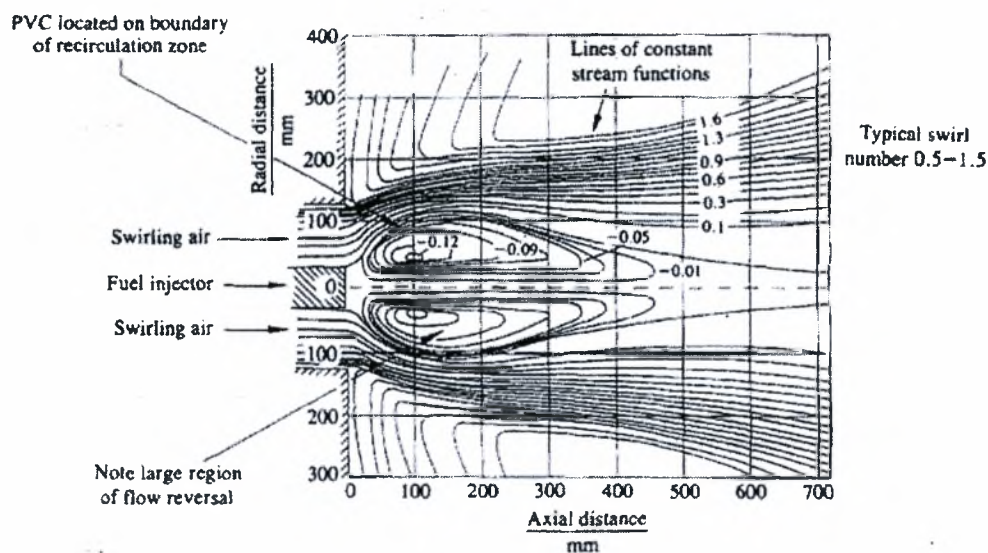
Από την επεξεργασία των θερμογραφημάτων επιλέγονται και οι οριακές συνθήκες στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας:

Τούμπο εισόδου καυσαερίων: 160 °C

Εναλλάκτης 4 τούμπων: 140 °C

Τούμπο εξόδου καυσαερίων: 100 °C

Για να πάρουμε μία ιδέα για την κατανομή της φλόγας στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, παρατίθεται το παρακάτω σχήμα από τον Syred [29] (2006) – Fig.1.2.



Εικόνα 23 Κατανομή φλόγας στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης

3.1.3 Μετρήσεις στο στόμιο με ανεμόμετρο θερμού σύρματος

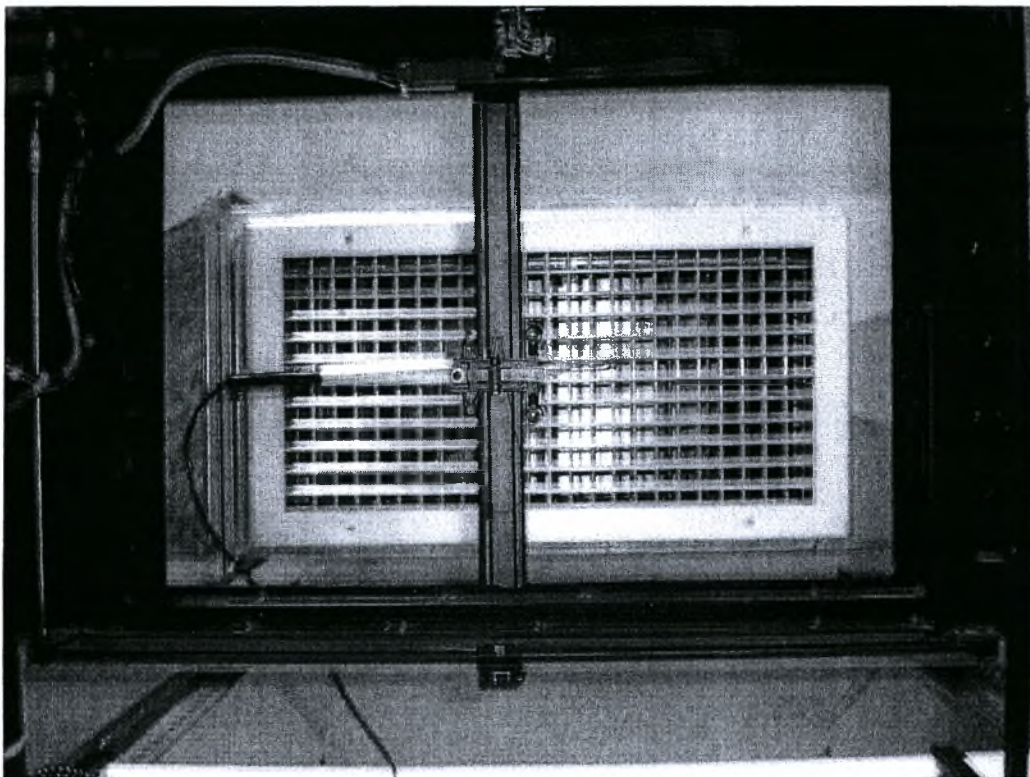
Στη φάση αυτή διεξήχθησαν μετρήσεις με ανεμόμετρο θερμού σύρματος σε όλο το εύρος του στομίου εξόδου του αεραγωγού του αερολέβητα, ώστε να υπάρχουν ενδεικτικές τιμές της διακύμανσης της ταχύτητας και θερμοκρασίας αέρα σε αυτό.

Η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε είναι η ακόλουθη: Αρχικά τίθεται σε λειτουργία μόνο ο φυσητήρας (κρύος αέρας) του αερολέβητα και γίνεται η σάρωση του στομίου εξόδου του αεραγωγού. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μόνο που τώρα τίθεται σε λειτουργία ο αερολέβητας (ζεστός αέρας). Συνολικά έγιναν 50 μετρήσεις (25 μετρήσεις με κρύο αέρα και 25 μετρήσεις με ζεστό αέρα).

Για την αυτόματη σάρωση του στομίου εξόδου, χρησιμοποιήθηκε ιδιοκατασκευή του εργαστηρίου, που βασίζεται σε κατάλληλη μετατροπή ενός desktop plotter IP 210 . Η

μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στο στόμιο γίνεται με hot wire anemometer TSI Velocicalc [30] το οποίο έχει προσαρμοστεί πάνω στην ιδιοκατασκευή. Ο προγραμματισμός οδήγησης της σάρωσης γίνεται σε γλώσσα HP-GL. Το ανεμόμετρο εξάγει τα δεδομένα των μετρήσεων (θέση – ταχύτητα), μέσω σειριακής εξόδου στο λογισμικό Labview [31]. Στην **Εικόνα 24** παρουσιάζεται ο αισθητήρας του ανεμόμετρου θερμού σύρματος που χρησιμοποιήθηκε [30], τοποθετημένος στη διάταξη σάρωσης, μπροστά από το στόμιο εξόδου του αεραγωγού του λέβητα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν τα ακόλουθα: α) η χρονική σταθερά δειγματοληψίας είναι 10 s, β) όλες οι μετρήσεις γίνονται με αφαιρεμένο το πρόσθιο κάλυμμα του αερολέβητα, γ) ο χρόνος παραμονής σε μια θέση για να καταγραφεί η μέτρηση είναι 1 min και δ) η κίνηση του plotter γίνεται αυτόματα μέσω σειριακής σε usb εξόδου (serial to usb) στο λογισμικό Labview.

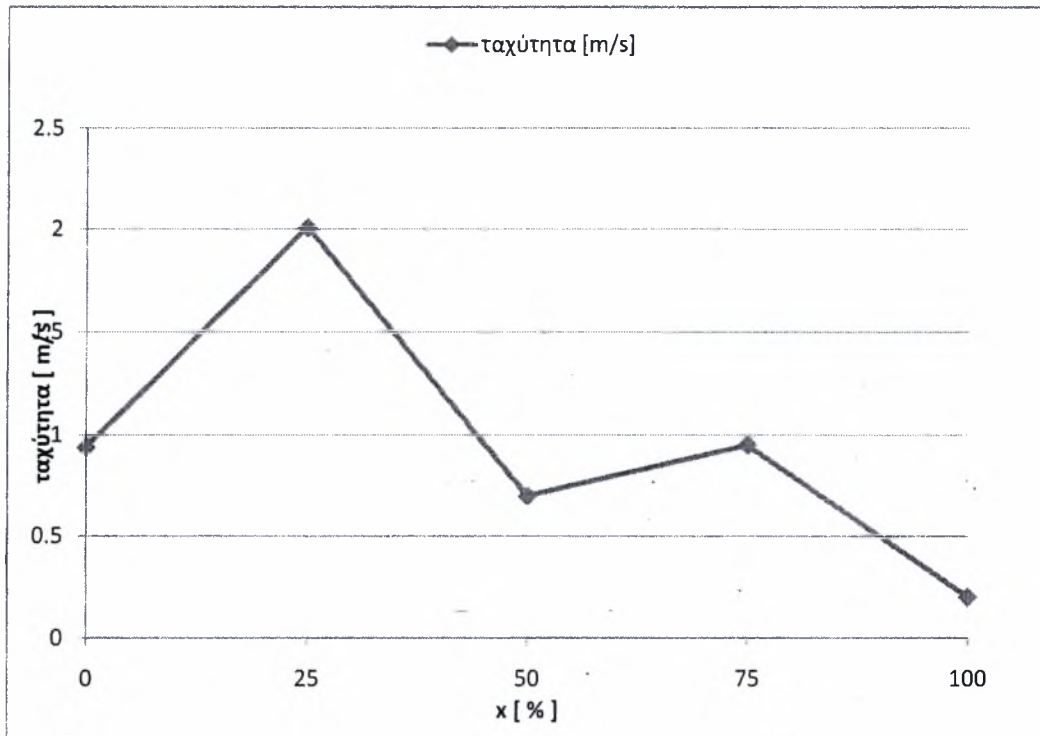


Εικόνα 24 Διάταξη σάρωσης με αισθητήρα και στόμιο κλιματισμού

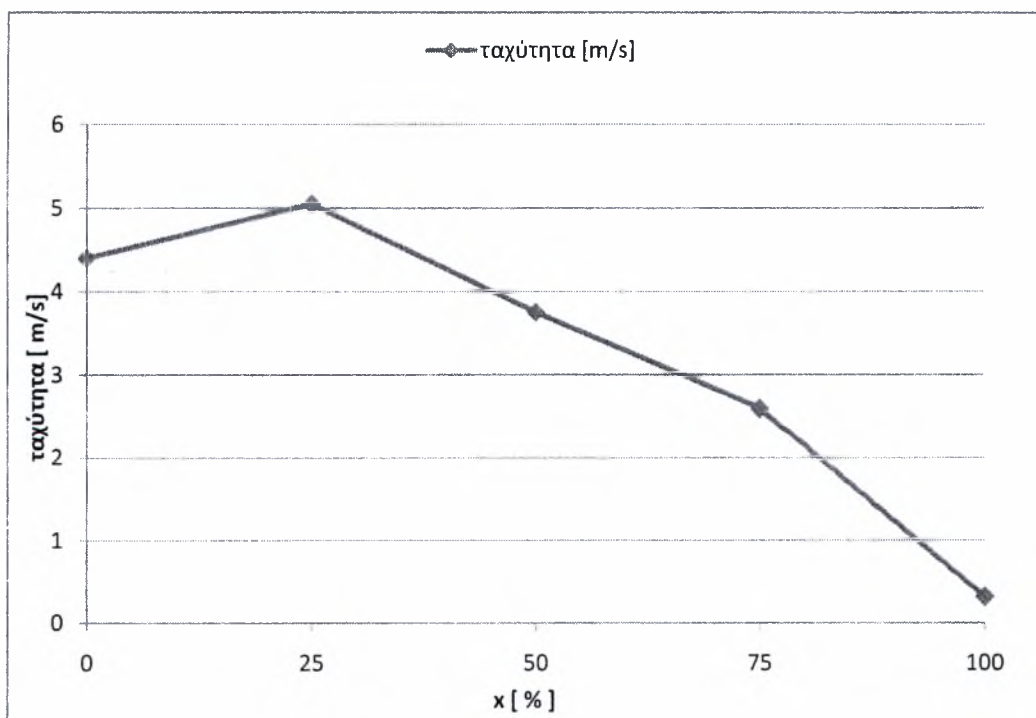
Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ παρατίθενται τα πρωτόκολλα μετρήσεων για το κρύο και το θερμό αέρα αντίστοιχα.

Στα **Σχήματα 3 έως 7** εμφανίζονται οι κατανομές ταχυτήτων στην περίπτωση του κρύου αέρα.

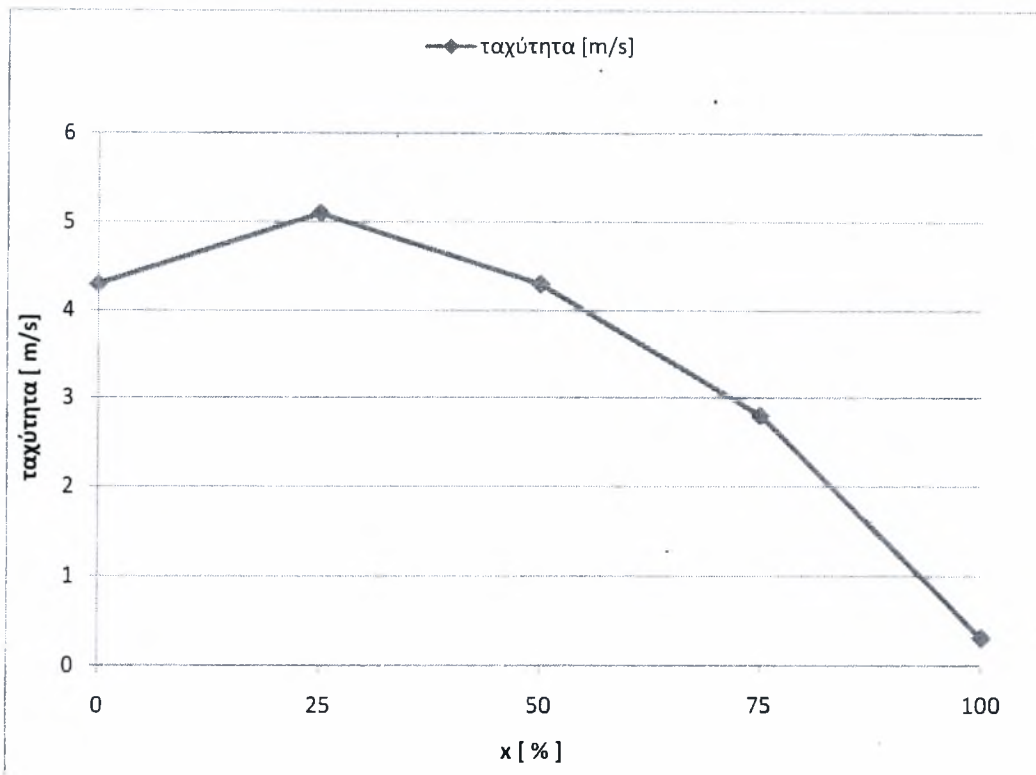
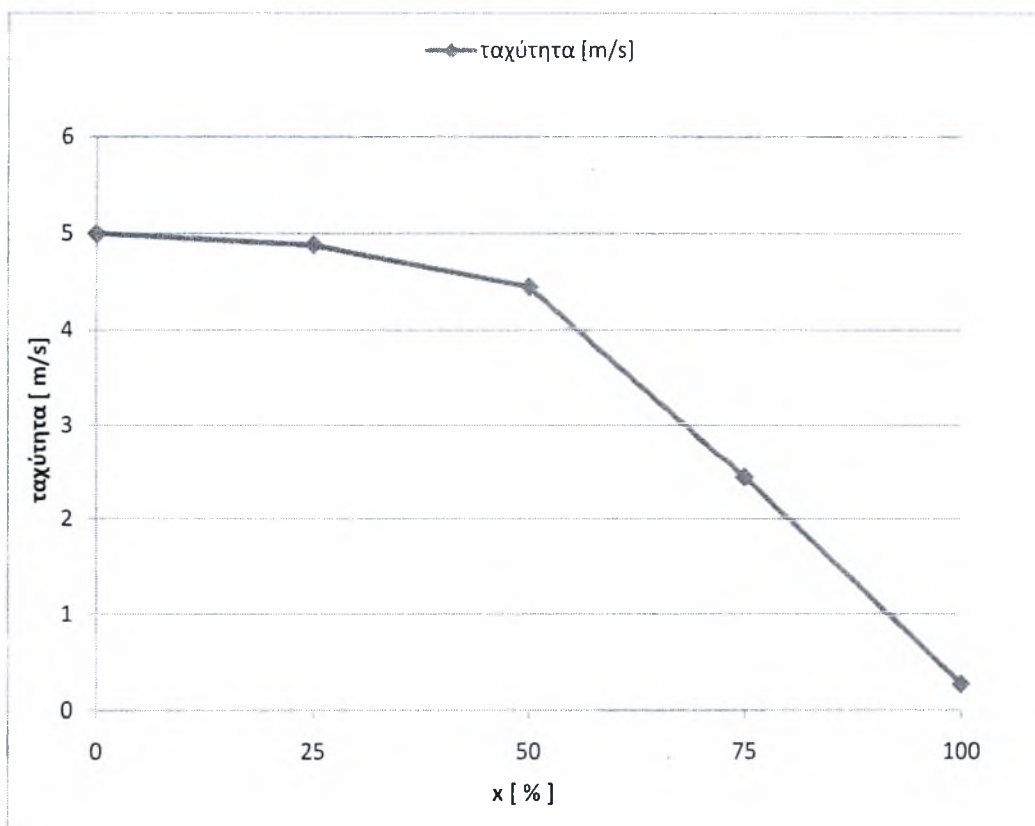
Στα **Σχήματα 8 έως 12** εμφανίζονται οι κατανομές ταχυτήτων και θερμοκρασιών στην περίπτωση του θερμού αέρα.

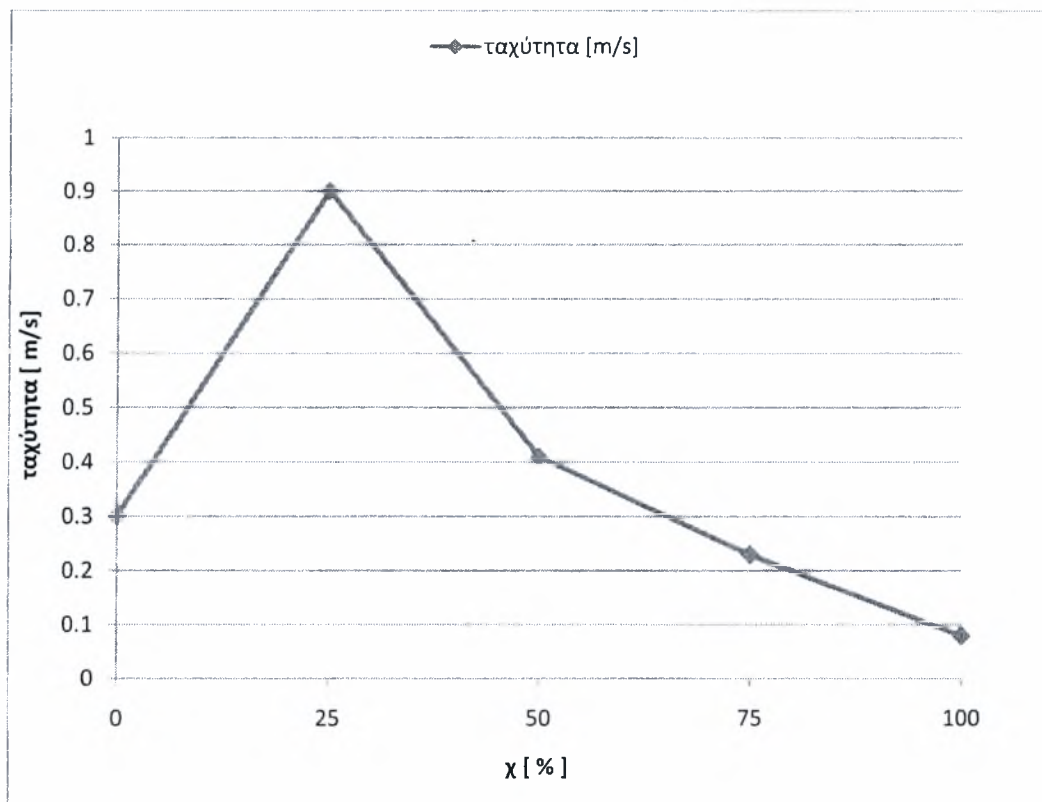


Σχήμα 3 Σάρωση στη θέση $\gamma = 0 \%$

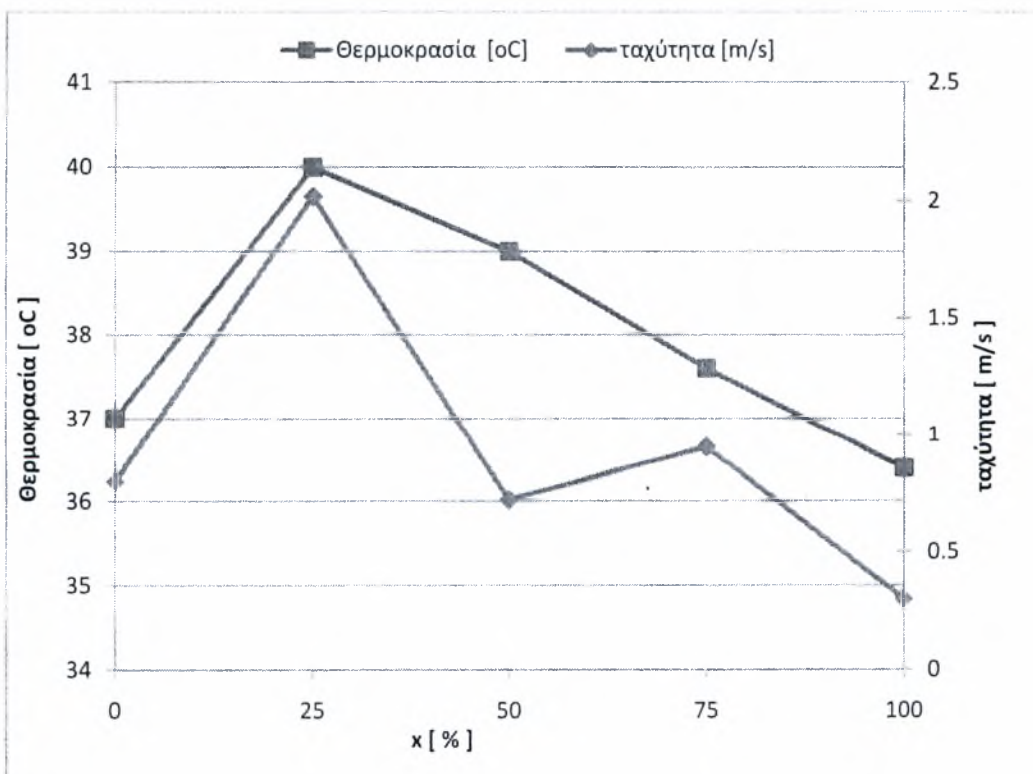


Σχήμα 4 Σάρωση στη θέση $\gamma = 25 \%$

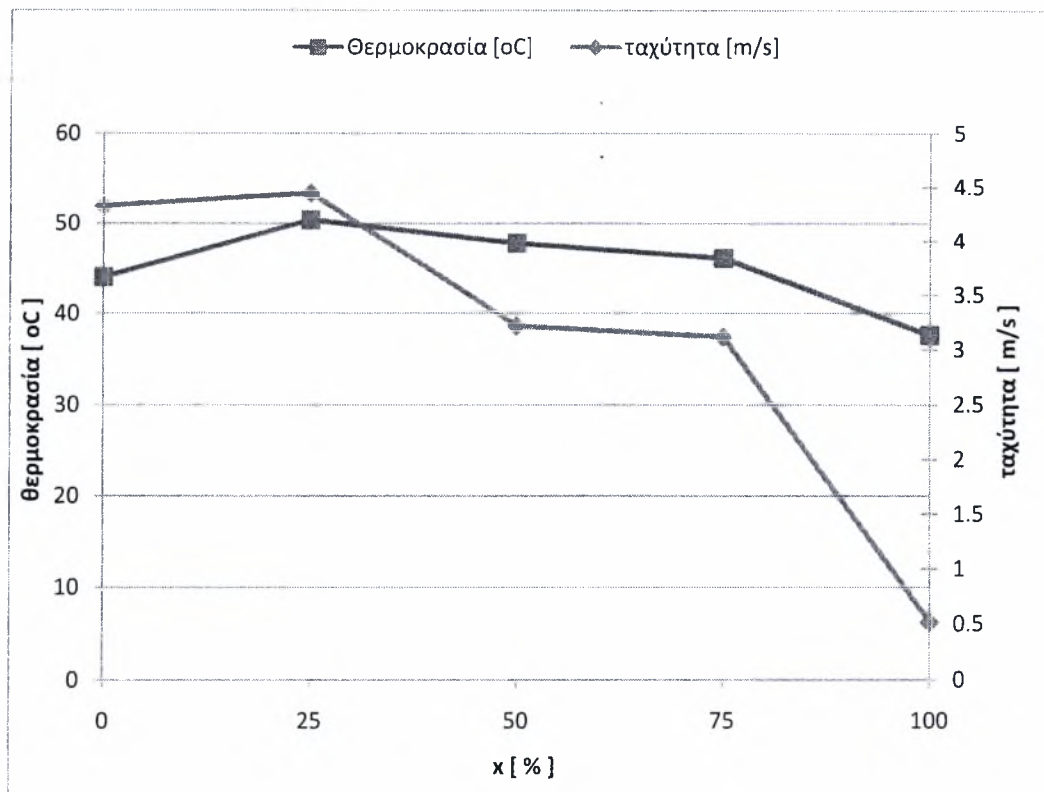
**Σχήμα 5** Σάρωση στη θέση $\gamma = 50\%$ **Σχήμα 6** Σάρωση στη θέση $\gamma = 75\%$



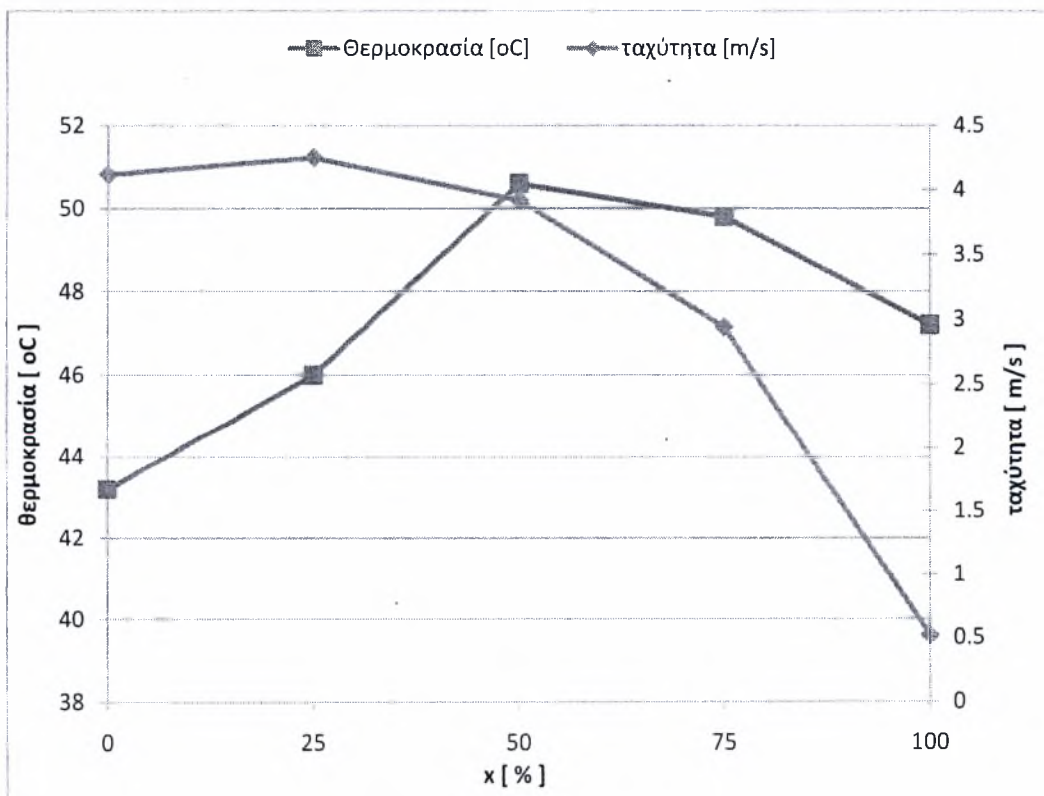
Σχήμα 7 Σάρωση στη θέση $\gamma = 100\%$



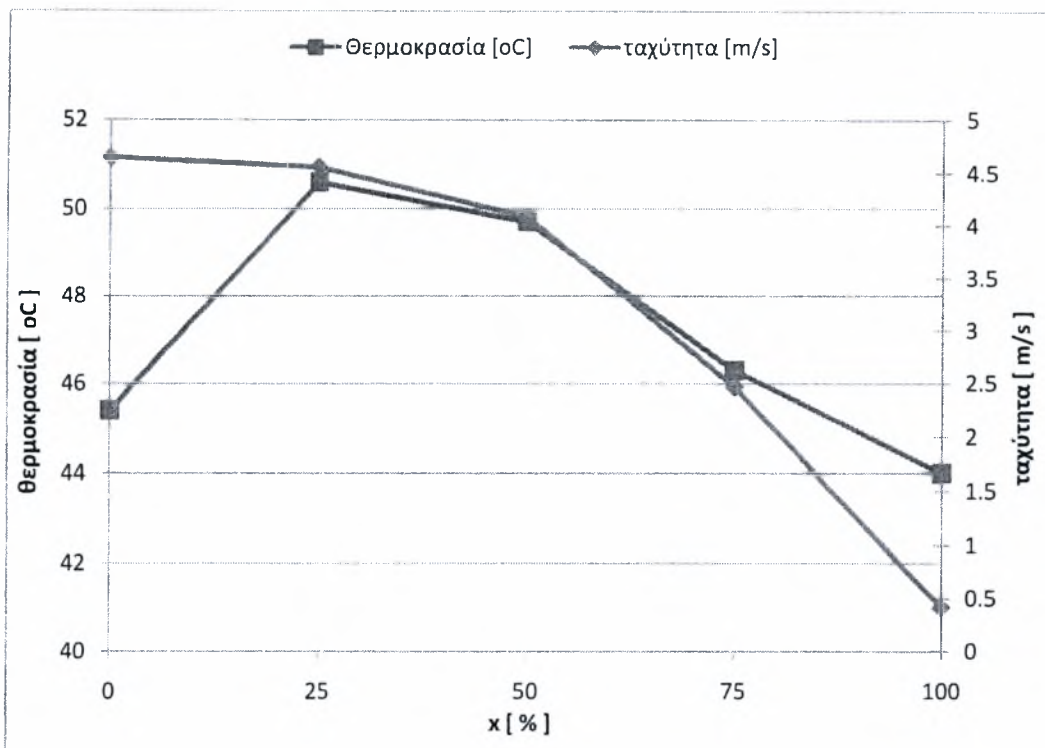
Σχήμα 8 Σάρωση στη θέση $\gamma = 0\%$



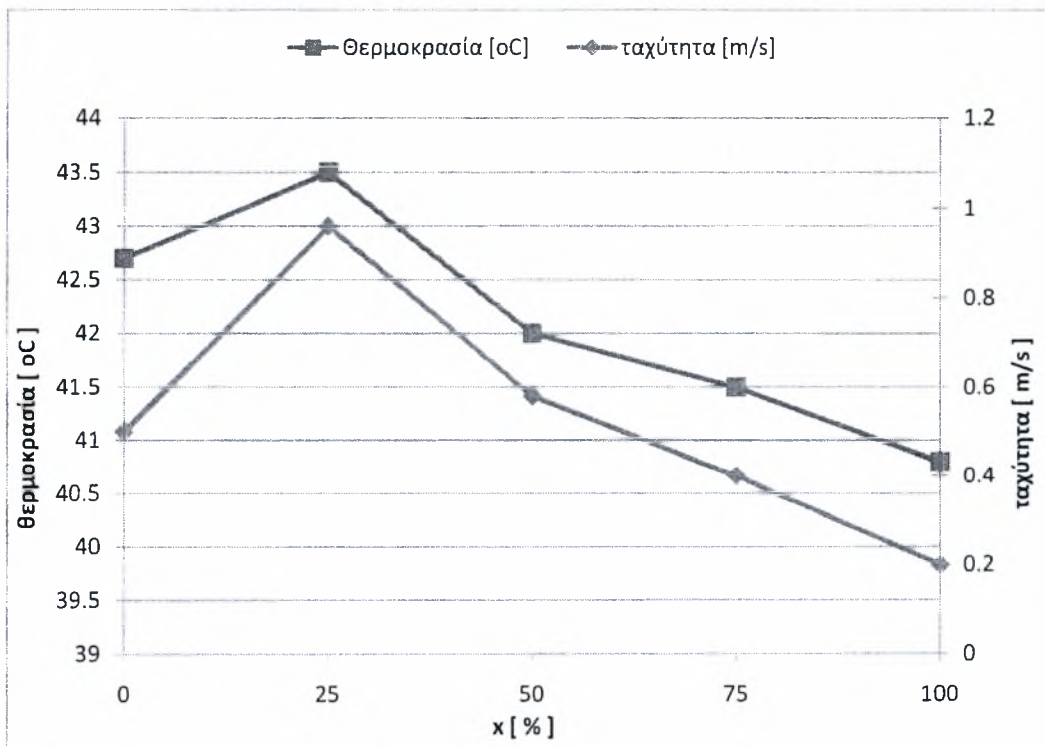
Σχήμα 9 Σάρωση στη θέση $\gamma = 25\%$



Σχήμα 10 Σάρωση στη θέση $\gamma = 50\%$



Σχήμα 11 Σάρωση στη θέση $\gamma = 75\%$



Σχήμα 12 Σάρωση στη θέση $\gamma = 100\%$

Από τις μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Κρύος αέρας:

Μέση ταχύτητα [m/s]	Μέγιστη ταχύτητα [m/s]	Ελάχιστη ταχύτητα [m/s]
2.27	5.1	0.08

Θερμός αέρας:

Μέση ταχύτητα [m/s]	Μέγιστη ταχύτητα [m/s]	Ελάχιστη ταχύτητα [m/s]	Μέση Θερμοκρασία [°C]	Μέγιστη Θερμοκρασία [°C]	Ελάχιστη Θερμοκρασία [°C]
2.20	4.65	0.20	44.0	50.6	36.4

Παρατηρούμε ότι: α) η μέση ταχύτητα αέρα είναι σχεδόν ίδια, β) το προφίλ των ταχυτήτων εξομαλύνεται κάπως στην περίπτωση του θερμού αέρα.

Θέση μέγιστης και ελάχιστης ταχύτητας και θερμοκρασίας

Κρύος αέρας

- Η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στη θέση : $x = 25 \%$, $y = 50 \%$
- Η ελάχιστη ταχύτητα εμφανίζεται στη θέση: $x = 100 \%$, $y = 100 \%$

Θερμός αέρας

- Η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στη θέση: $x = 0 \%$, $y = 75 \%$
- Η ελάχιστη ταχύτητα εμφανίζεται στη θέση: $x = 100 \%$, $y = 100 \%$
- Η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στη θέση: $x = 25 \%$, $y = 75 \%$ και $x = 50 \%$, $y = 50 \%$
- Η ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στη θέση: $x = 100 \%$, $y = 0 \%$

Από τα Σχήματα προκύπτουν τα ακόλουθα:

Κρύος αέρας

Στα άκρα του στομίου ($y = 0 \%$, $y = 100 \%$) η ροή δεν είναι ευσταθής. Επικρατεί μόνιμη αστάθεια η οποία εμφανίζεται και κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η ταχύτητα μεταβάλλεται συνεχώς. Αυτό οφείλεται στις δίνες (οι οποίες είναι έντονες) και εμφανίζονται σε εκείνη την περιοχή. Τα παραπάνω φαίνονται **στα Σχήματα 3 και 7**: η ταχύτητα αυξάνεται και μειώνεται κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Αντίθετα, στις άλλες περιοχές σάρωσης η ροή εμφανίζει σταθερότητα. Δεν εμφανίζονται έντονες δίνες και η ταχύτητα μειώνεται διαρκώς.

Η ομαλότερη κατανομή ταχυτήτων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6**.

Η ταχύτητα μειώνεται διαρκώς. Αρχικά είναι η μέγιστη δυνατή (της περιοχής αυτής) και μειώνεται μέχρι την ελάχιστη στο τέλος της σάρωσης.

Θερμός αέρας

Στην περίπτωση του ζεστού αέρα ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις. Η ομαλότερη κατανομή ταχυτήτων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 11**.

Στο **Σχήμα 9** η κατανομή θερμοκρασιών είναι σχεδόν ευθεία γραμμή. Η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται αρκετά κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Από τα **Σχήματα 8 έως 12** προκύπτει ότι στη θέση $x = 25\%$ εμφανίζεται σε κάθε σάρωση (εκτός της $3^{η}$ $y = 50\%$) η μεγαλύτερη θερμοκρασία.

Στο **Σχήμα 12** οι γραμμές των κατανομών είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους.

Τέλος, παρατηρώντας όλα τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα και θερμοκρασία εμφανίζονται μαζί στην ίδια θέση. Η θερμοκρασία είναι λιγότερο ασταθής σε σχέση με την ταχύτητα, που επηρεάζεται από τις δίνες. Αυτό παρατηρείται και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων: η ταχύτητα μεταβάλλεται διαρκώς και για αρκετό χρόνο μέχρι να σταθεροποιηθεί κάπως (εξαρτάται από την περιοχή σάρωσης) σε αντίθεση με τη θερμοκρασία η οποία σε λιγότερο χρόνο ισορροπεί σε μια τιμή.

3.1.4 Μετρήσεις στο εσωτερικό του αερολέβητα

Χρησιμοποιήθηκε το ανεμόμετρο θερμού σύρματος TSI Velocicalc, για την σάρωση ενός επιπέδου κάθετο στη ροή στο εσωτερικό του αερολέβητα. Η σάρωση έγινε έχοντας αφαιρέσει το πρόσθιο κάλυμμα του αερολέβητα. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4**:

Πίνακας 4 Μετρήσεις ταχυτήτων στο εσωτερικό του αερολέβητα

Θέση [cm]	Μέση Ταχύτητα [m/s]
10	0.2
20	1.5 (Εντονες Δίνες)
30	0.8
40	1.5
50	1.5
60	3.0
70	0.9

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του αερολέβητα σε ορισμένες περιοχές παίρνει τιμές κάτω από 1 m/s σε αντίθεση με άλλες. Χαρακτηριστικές είναι οι θέσεις 10 cm, 30 cm και 70 cm. Σε αυτές η ταχύτητα είναι πολύ μικρή γεγονός το οποίο εξηγείται ως εξής:

Θέση 10 cm: Η ποσότητα του αέρα η οποία φθάνει σε αυτή την περιοχή του όγκου ελέγχου και η αναπτυσσόμενη ταχύτητα είναι μικρή γεγονός που οφείλεται κυρίως στη θέση και στο μέγεθος της διατομής εισόδου του αέρα.

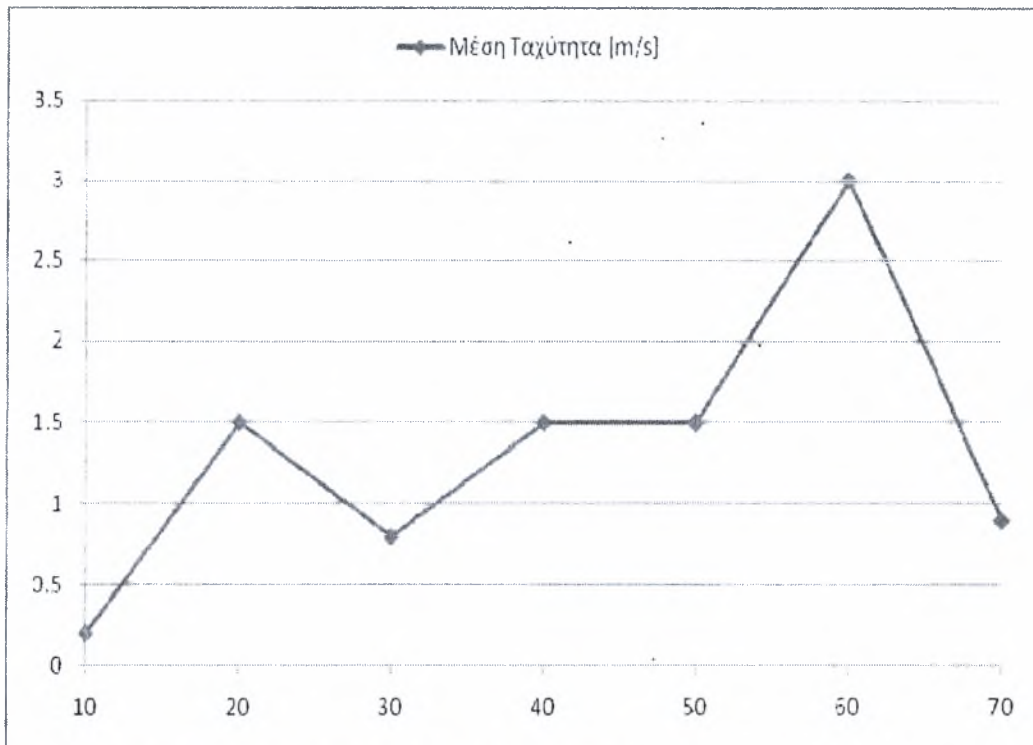
Θέση 70 cm: Η περιοχή αυτή είναι εκτός του πεδίου ροής

Θέση 30 cm: Σε αυτή τη θέση η ταχύτητα μειώνεται απότομα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του αερολέβητα, παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, όπως άλλωστε θα αναμενόταν εξαιτίας των σημαντικών μεταβολών στην διατομή ροής που επιβάλλει η γεωμετρία και η σχετική θέση των εναλλακτών σε σχέση με το στόμιο εισόδου του ανεμιστήρα.

Οι συγκεκριμένες, δειγματοληπτικές μετρήσεις έγιναν με στόχο να ελεγχθούν τα αποτελέσματα των ρευστοδυναμικών υπολογισμών που θα ακολουθήσουν.

Στο **Σχήμα 13** που ακολουθεί απεικονίζεται η μεταβολή της ταχύτητας:



Σχήμα 13 Σάρωση στο εσωτερικό του αερολέβητα

3.1.5 Μετρήσεις θερμοκρασιών και στατικής πίεσης στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω: Στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό τοποθετήσαμε τρία θερμοστοιχεία τύπου K και μια προσαρμογή για την τοποθέτηση μανόμετρου, όπως δείχνει η **Εικόνα 51**. Σκοπός αυτών των μετρήσεων είναι η καταγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής στην έξοδο του όγκου ελέγχου και η σύγκριση της με την υπολογιζόμενη κατανομή. Επίσης, με τη χρήση του μανόμετρου υπολογίσαμε την στατική πίεση (υποπίεση) η οποία ορίζεται ως οριακή συνθήκη εξόδου. Η καταγραφή των θερμοκρασιών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Labview.

Παρατηρούμε ότι οι μέσες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων είναι:

Αριστερό θερμοστοιχείο: 90 °C

Κεντρικό θερμοστοιχείο: 60 °C

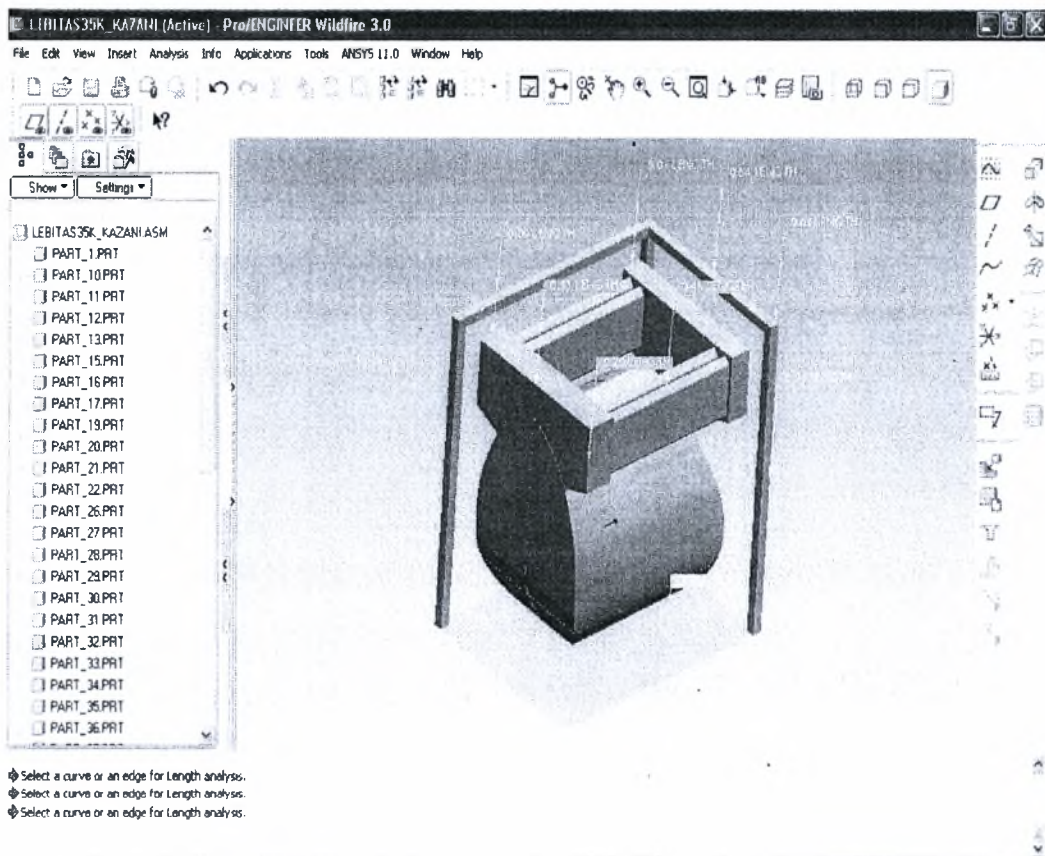
Δεξιό θερμοστοιχείο: 48 °C

Υποπίεση: 60 Pa

3.2 Υπολογιστικό μέρος επίλυσης

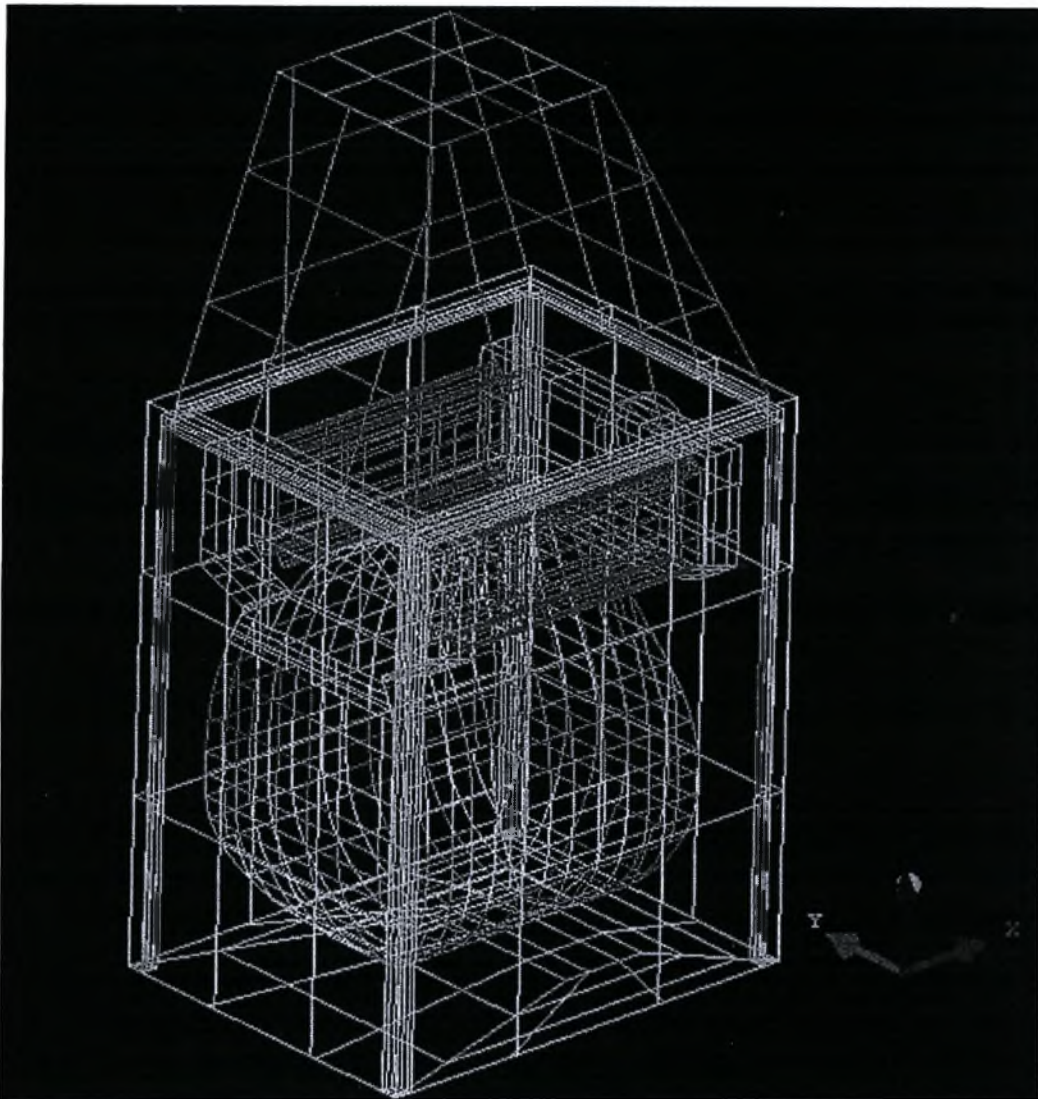
3.2.1 Solid modeling

Η παραγωγή του solid model της περιοχής εναλλαγής θερμότητας του αερολέβητα έγινε στη φάση αυτή με βάση σχέδια σε ProEngineer [25] που μας παρέδωσε ο κατασκευαστής του αερολέβητα [17].



Εικόνα 25 Σχέδιο Γεώργιου Ποντικάκη σε ProE: κύριες διαστάσεις

Το σχέδιο του αερολέβητα εισάγεται στο λογισμικό ANSYS ICEM και ακολουθώντας μια συγκεκριμένη διαδικασία η γεωμετρία μας αποκτά την τελική της μορφή, δηλαδή δημιουργούνται όλα τα απαραίτητα τμήματα (parts) στα οποία στη συνέχεια της επίλυσης θα εφαρμοσθούν οι οριακές συνθήκες. Η μορφή αυτή απεικονίζεται στην **Εικόνα 26**.



Εικόνα 26 Ο αερολέβητας και ο όγκος ελέγχου (solid modeling).

3.2.2 Υπολογιστικό πλέγμα

Στη συνέχεια δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα στον συνολικό όγκο ελέγχου στον οποίο αναπτύσσεται το ροϊκό πεδίο του αέρα αεροθέρμανσης σύμφωνα με το οποίο γίνεται η επίλυση του προβλήματος. Το επιθυμητό πλέγμα δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS ICEM και παρουσιάζεται στην **Εικόνα 27**. Οι παράμετροι του πλέγματος παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Global MeshSize

- **Global Element Seed Size**

Max Element: 0.2

Natural Size

Size: 0.1

Cells in Gap: 1

Refinement: 20

Mesh TetraHedral

- **Tetra Mesher**

Use Smoother

Quality: 0.7

Smooth Transition

Transition Factor: 1.2

- **Options**

Activate: Save All Triangles

Χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος

Number of Nodes: 12640

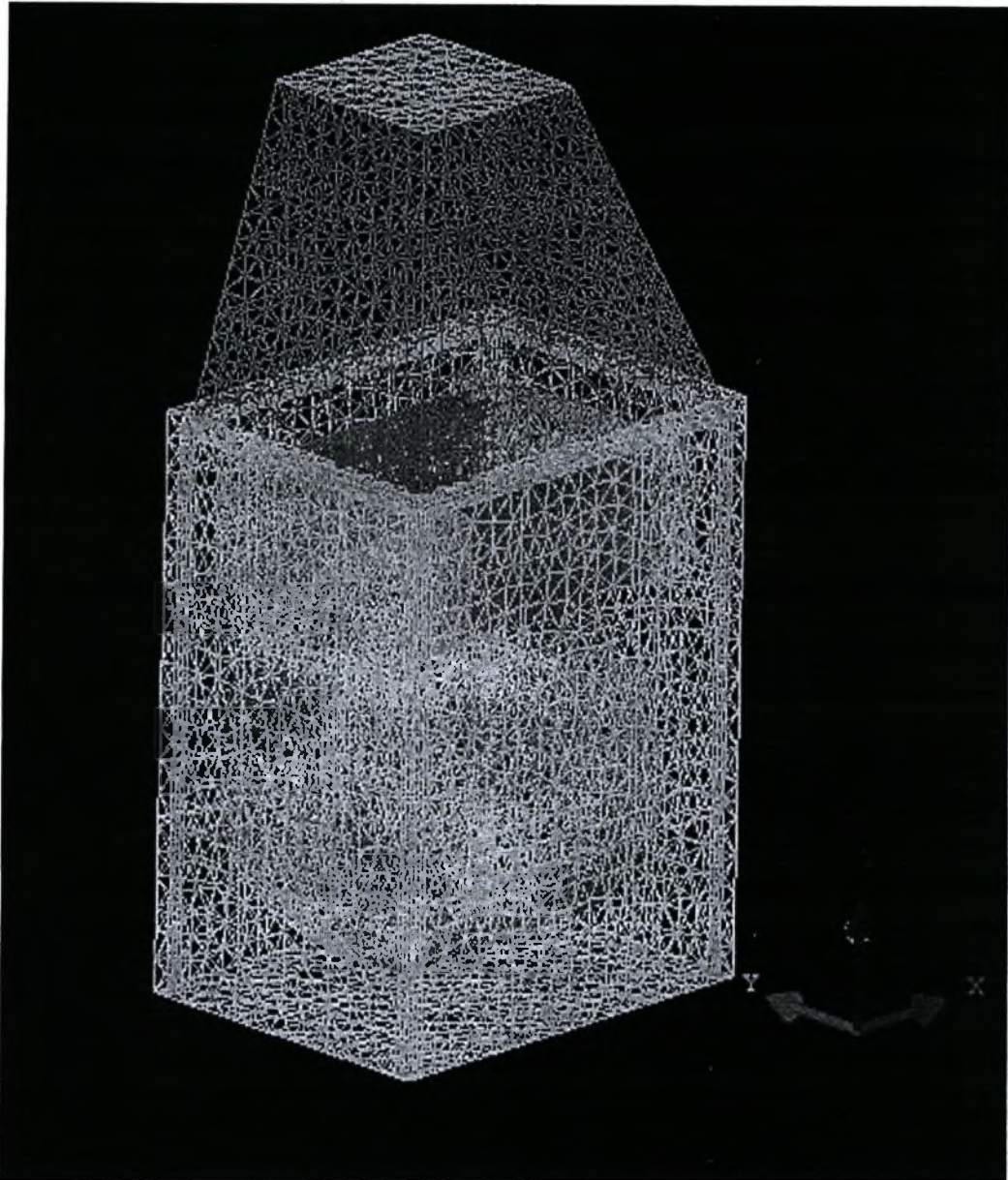
Number of Elements: 61732

Tetrahedra: 61732

Wedges: 0

Pyramids: 0

Hexahedra: 0



Εικόνα 27 Υπολογιστικό πλέγμα συνολικού όγκου ελέγχου

3.2.3 Διαδικασία προσδιορισμού οριακών συνθηκών

3.2.3.1 Οριακές συνθήκες εισόδου, εξόδου, plenum, cover

Επόμενο στάδιο της επίλυσης είναι ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών. Αυτό γίνεται μέσω του υποπρογράμματος CFX-Pre. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται περιγράφεται παρακάτω: Η γεωμετρία και το υπολογιστικό πλέγμα εισάγονται στο υποπρόγραμμα. Στη συνέχεια στα parts, τα οποία έχουμε δημιουργήσει, θέτουμε τις συνθήκες οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

Είσοδος

Type: inlet Static Temperature: $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Mass Flow Rate: $m=0.8\text{ kg/s}$

Έξοδος

Type: outlet Relative Pressure: $P = 60\text{ Pa}$

Εναλλάκτης 4 Τούμπων

Type: wall Fixed temperature: $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tubo in

Type: wall Fixed temperature: $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tubo out

Type: wall Fixed temperature: $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Plenum

Type: wall Heat Transfer Coefficient: $U = 6\text{ W/m}^2\text{K}$ Outside Temperature: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Θεωρήσαμε τον αέρα ιδανικό αέριο με πίεση αναφοράς (Ref. Pressure = 1 atm).

Cover

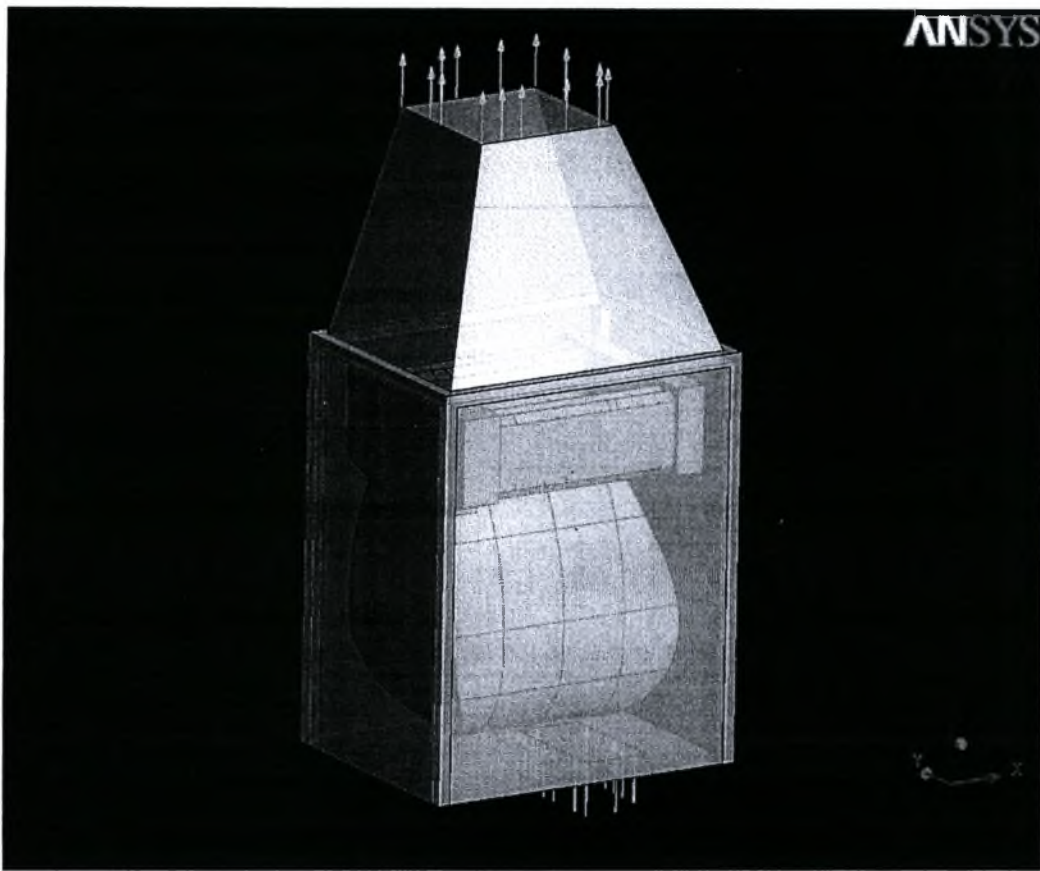
Type wall: Heat Transfer: Adiabatic

Η συνοριακή συνθήκη της εισόδου ορίζεται σύμφωνα με την χαρακτηριστική του ανεμιστήρα. Ο ανεμιστήρας είναι της ισπανικής εταιρείας Tecrifan και έχει ισχύ 1/3 hp (250 W). Οι χαρακτηριστικές φαίνονται στις ιστοσελίδες του κατασκευαστή [26]. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ παρατίθεται η χαρακτηριστική που μας παραχώρησε ο κατασκευαστής του αερολέβητα [17].

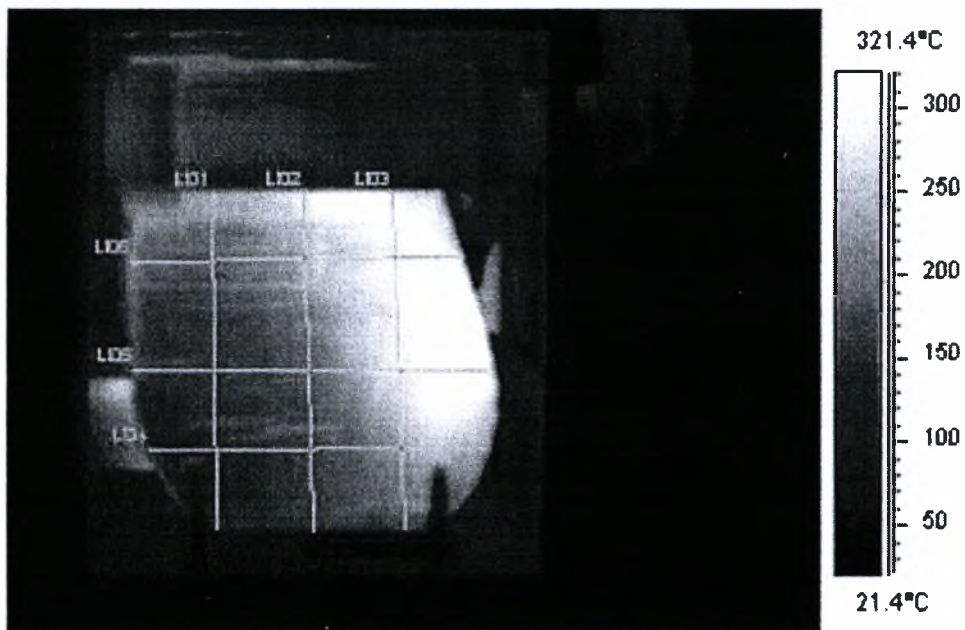
3.2.3.2 Οριακές συνθήκες επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας λέβητα

Στην μοντελοποίηση μας η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας του λέβητα έχει χωριστεί σε περιοχές στις οποίες ορίζεται οριακή συνθήκη σταθερής θερμοκρασίας (Fixed Temperature). Οι περιοχές αυτές είναι τα τούμπα των καυσαερίων και ο θάλαμος καύσης. Η μέση θερμοκρασία σε κάθε περιοχή υπολογίζεται έπειτα από επεξεργασία θερμογραφημάτων του αερολέβητα στο λογισμικό της θερμοκάμερας [28]. Ο θάλαμος καύσης έχει χωριστεί σε περιοχές κατά προσέγγιση ίσης θερμοκρασίας, με σκοπό την ικανοποιητική μοντελοποίηση της μετάδοσης θερμότητας. Στις **Εικόνες** που ακολουθούν παρουσιάζονται οι περιοχές του εναλλάκτη θερμότητας.

Στην **Εικόνα 28** η οποία προέρχεται από το CFX – Pre φαίνονται όλα τα τμήματα της γεωμετρίας πάνω στα οποία εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες καθώς επίσης και οι περιοχές στις οποίες έχει χωριστεί ο θάλαμος καύσης. Οι θερμοκρασίες αυτών των περιοχών προέρχονται από επεξεργασία αντίστοιχου θερμογραφήματος (**Εικόνα 29**).



Εικόνα 28 Περιοχές στις οποίες έχει χωριστεί ο θάλαμος καύσης



Εικόνα 29 Επεξεργασία του θαλάμου καύσης

3.2.4 Επίλυση των εξισώσεων

Στη φάση αυτή γίνεται η επίλυση των εξισώσεων του τρισδιάστατου ροϊκού πεδίου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με το μοντέλο τύρβης k-ε (CFX Solver), με βάση τις ακόλουθες απλοποιητικές παραδοχές:

- Θεωρήσαμε το k-Epsilon(k-ε) μοντέλο τύρβης (5% turbulence intensity στην συνθήκη εισόδου). Μοντέλο το οποίο εξασφαλίζει καλές προβλέψεις για τις περισσότερες ροές μηχανολογικού ενδιαφέροντος, χωρίς υπερβολικό χρόνο CPU.
- Η ροή του αέρα λήφθηκε σταθερή ως προς το χρόνο (steady state problem)
- Ο αέρας θεωρήθηκε ιδανικό αέριο

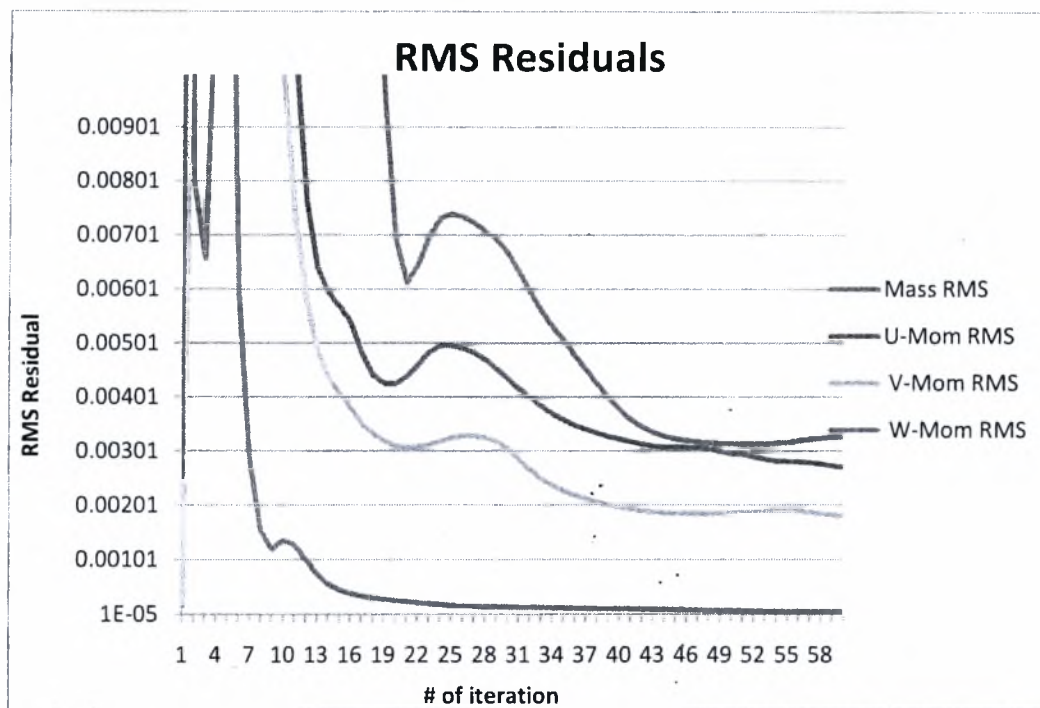
Με τη βοήθεια του CFX – Pre ορίσαμε τις παραμέτρους επίλυσης (solver control). Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (max iterations) ο οποίος επιλέχθηκε είναι 60 ενώ το κριτήριο σύγκλισης (convergence criteria) είναι: residual type : RMS και residual target: 1.0 e-04. Ο χρόνος της κάθε επίλυσης του προβλήματος ήταν περίπου 20 λεπτά.

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η CFD μοντελοποίηση έχει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής: AMD Athlon Dual Processor 2.80 GHz

Μνήμη RAM: 2.00 GB

Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με το CFX – Solver. Ο solver επιστρέφει δυο τμήματα οθόνης: στο ένα φαίνεται διαγραμματικά η σύγκλιση ή όχι της λύσης και στο άλλο φαίνονται αναλυτικά σε κάθε επανάληψη οι τιμές των Residuals των προς μελέτη μεγεθών. Αξίζει να αναφέρουμε ότι έχουμε σύγκλιση όταν φθάσουμε το κριτήριο σύγκλισης ή όταν οι τιμές των μεγεθών από μια επανάληψη και έπειτα δεν αλλάζουν σημαντικά. Το τελευταίο συνέβη στο δικό μας πρόβλημα, διότι θέσαμε αυστηρό κριτήριο σύγκλισης για να είμαστε σίγουροι ότι θα υπάρξει σύγκλιση και για να δούμε από ποιο σημείο και μετά επιτυγχάνεται αυτή. Στο **Σχήμα 14** και στο **Σχήμα 15** που ακολουθούν φαίνεται το ιστορικό σύγκλισης της επίλυσης.



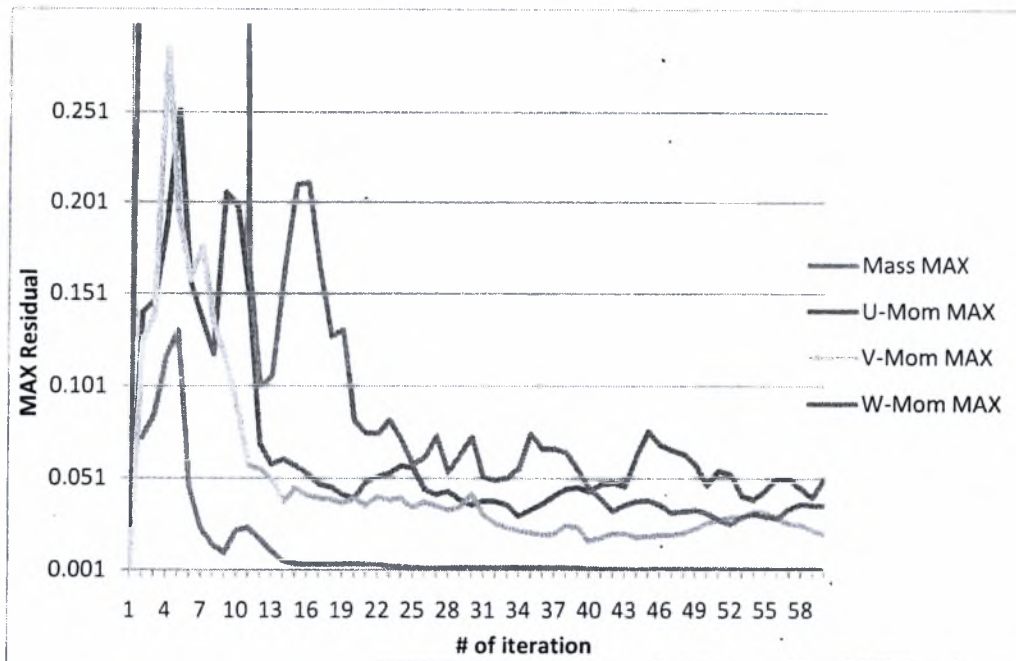
Σχήμα 14 Διάγραμμα των RMS τιμών των Residuals των κινηματικών ιδιοτήτων

Σύμφωνα με τις οδηγίες του CFX – Solver οι βασικές κινηματικές ιδιότητες ,ορμή και μάζα, πρέπει να ικανοποιούν το κριτήριο σύγκλισης $1.0 \cdot 10^{-3}$.

Παρατηρώντας το

Σχήμα 14 συμπεραίνουμε ότι η μάζα είναι η μόνη που ικανοποιεί το κριτήριο σύγκλισης και η τιμή στην οποία φθάνουν οι RMS τιμές των Residuals είναι $1.0 \cdot 10^{-5}$. Η ορμή στη X, Y και Z κατεύθυνση, η οποία είναι η κύρια κατεύθυνση ροής του προβλήματος μας και στην οποία λαμβάνουν χώρα όλα μελετώμενα φαινόμενα, δεν καταφέρνει μετά το πέρας των επαναλήψεων να ικανοποιήσει το επιθυμητό κριτήριο αλλά συγκλίνει και παραμένει σταθερή σε μια τιμή πολύ κοντά στην $1.0 \cdot 10^{-3}$.

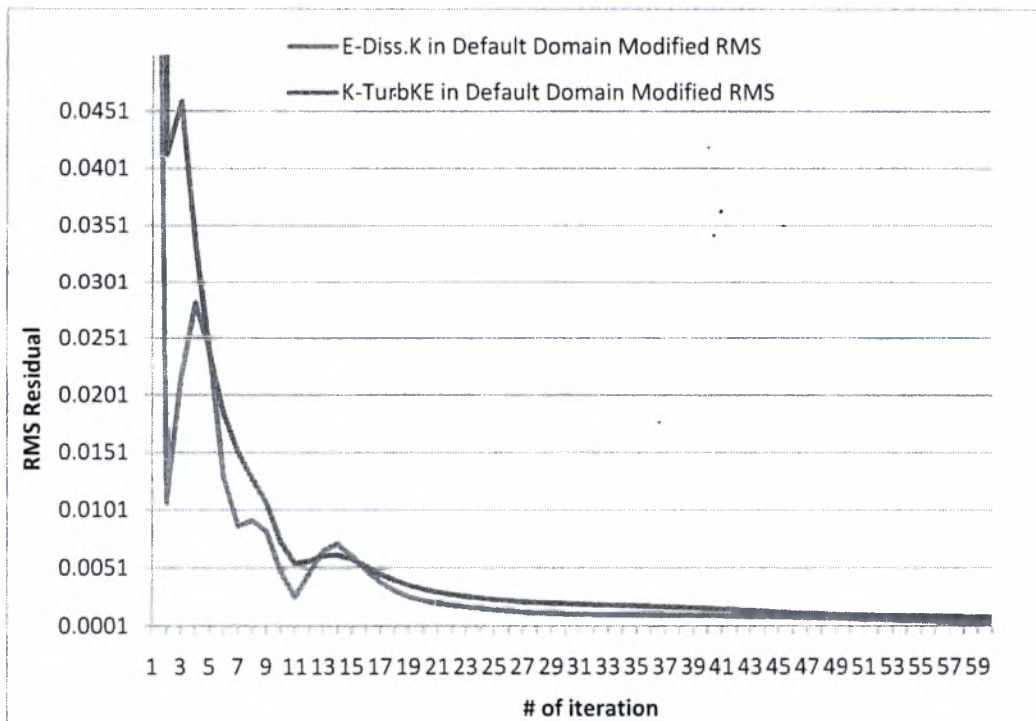
Η δεύτερη σημαντική πληροφορία που αντλείται από τα γραφήματα της διαδικασία επίλυσης είναι η τιμή και η θέση των MAX Residuals. Αυτή η πληροφορία ορίζει την περιοχή του όγκου ελέγχου όπου η ομάδα των εξισώσεων επίλυσης εμφανίζει αριθμητικές αστάθειες. Σύμφωνα με τις οδηγίες του CFX – Solver, αποδεκτή σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν οι MAX τιμές των Residuals είναι περίπου της τάξης του $1.0 \cdot 10^{-3}$.



Σχήμα 15 Διάγραμμα των MAX τιμών των Residuals των κινηματικών ιδιοτήτων

Από το **Σχήμα 15** συμπεραίνουμε ότι οι MAX τιμές των Residuals είναι μεγαλύτερες από τις RMS τιμές των Residuals. Η μάζα και η ορμή εμφανίζουν την ίδια με πριν συμπεριφορά. Τέλος, το κριτήριο σύγκλισης, $1.0 \cdot 10^{-3}$, ικανοποιείται μόνο από τη μάζα.

Το Solver δίνει πληροφορίες για όποιο μέγεθος ορίσει ο χρήστης. Στην δική μας επίλυση προσθέσαμε τη τύρβη, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 16** που ακολουθεί.



Σχήμα 16 Διάγραμμα των RMS τιμών των Residuals της τύρβης

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα, γίνεται αντιληπτό ότι η τύρβη έχει μοντελοποιηθεί σωστά. Αυτό επαληθεύεται από τις RMS τιμές των Residuals οι οποίες έχουν πλησιάσει το επιθυμητό κριτήριο σύγκλισης.

3.2.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

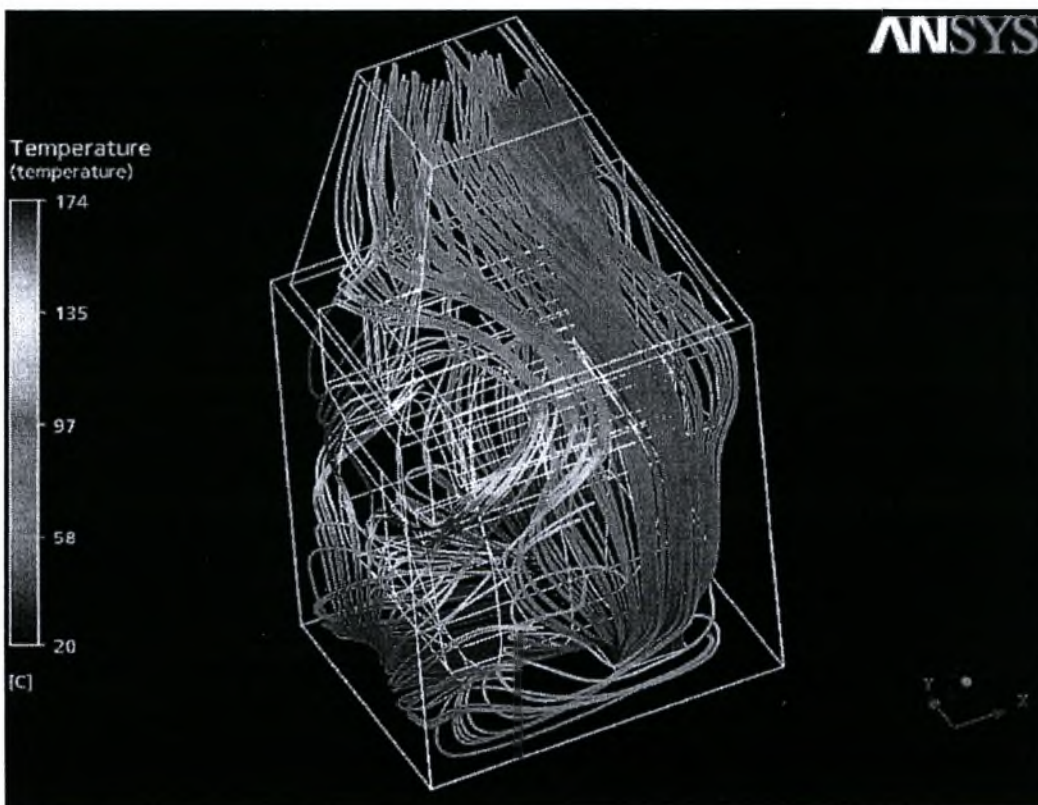
Στη φάση αυτή γίνεται η οπτικοποίηση – παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή ροϊκών γραμμών και πεδίων κατανομής θερμοκρασιών και ταχυτήτων (CFX Post).

Στην **Εικόνα 30** φαίνεται το υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο.

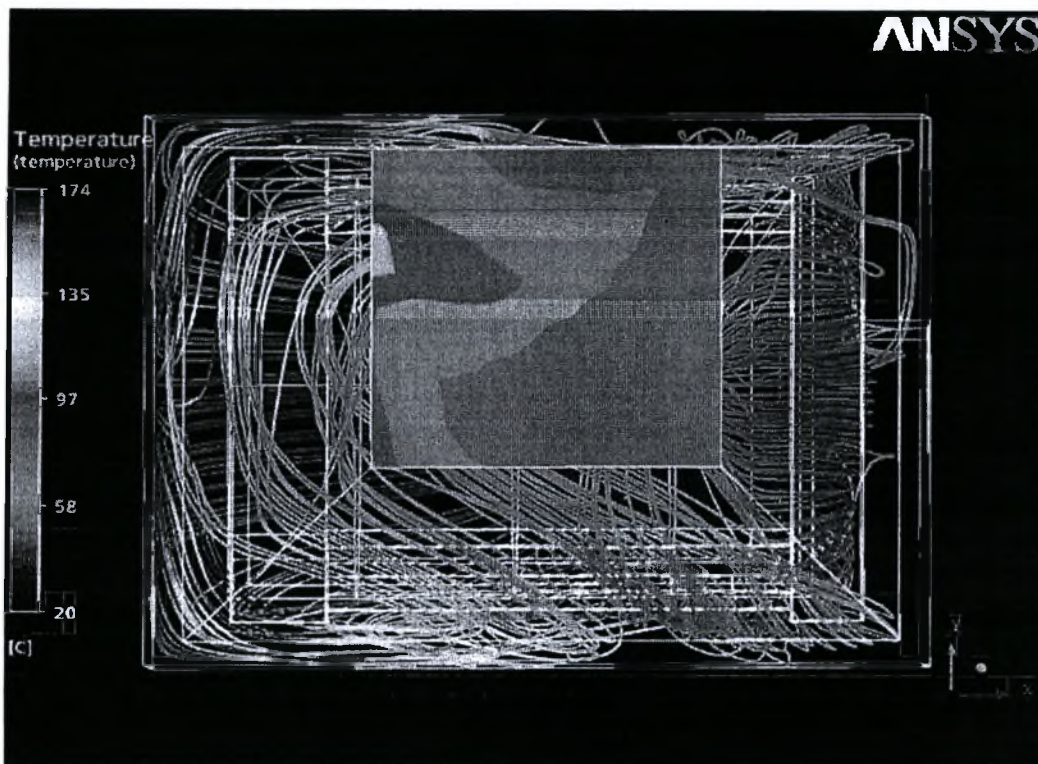
Στην **Εικόνα 31** παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα στην έξοδο του όγκου ελέγχου (στο plenum).

Στην **Εικόνα 32** παρουσιάζονται οι γραμμές ροής και το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα που περιρρέει τα τούμπα καυσαερίων.

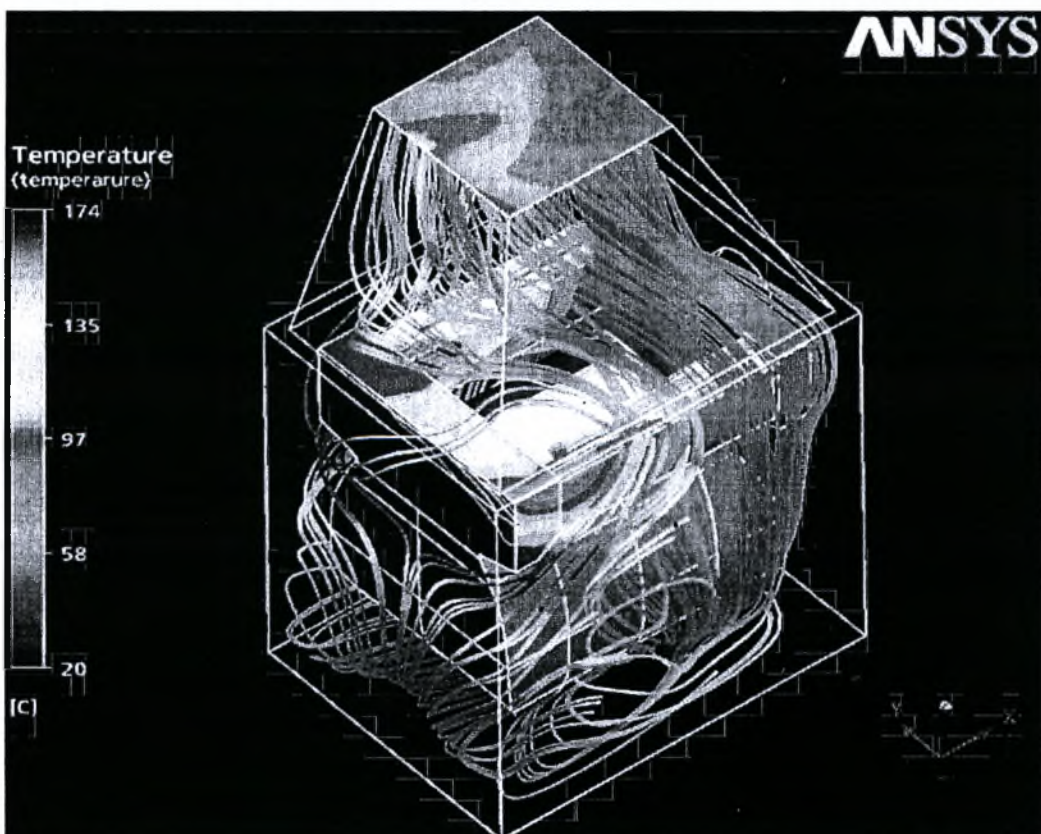
Στην **Εικόνα 33** φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων στο εσωτερικό μεταξύ επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του λέβητα, και των καλυμμάτων (περιοχή ροής του αέρα αεροθέρμανσης).



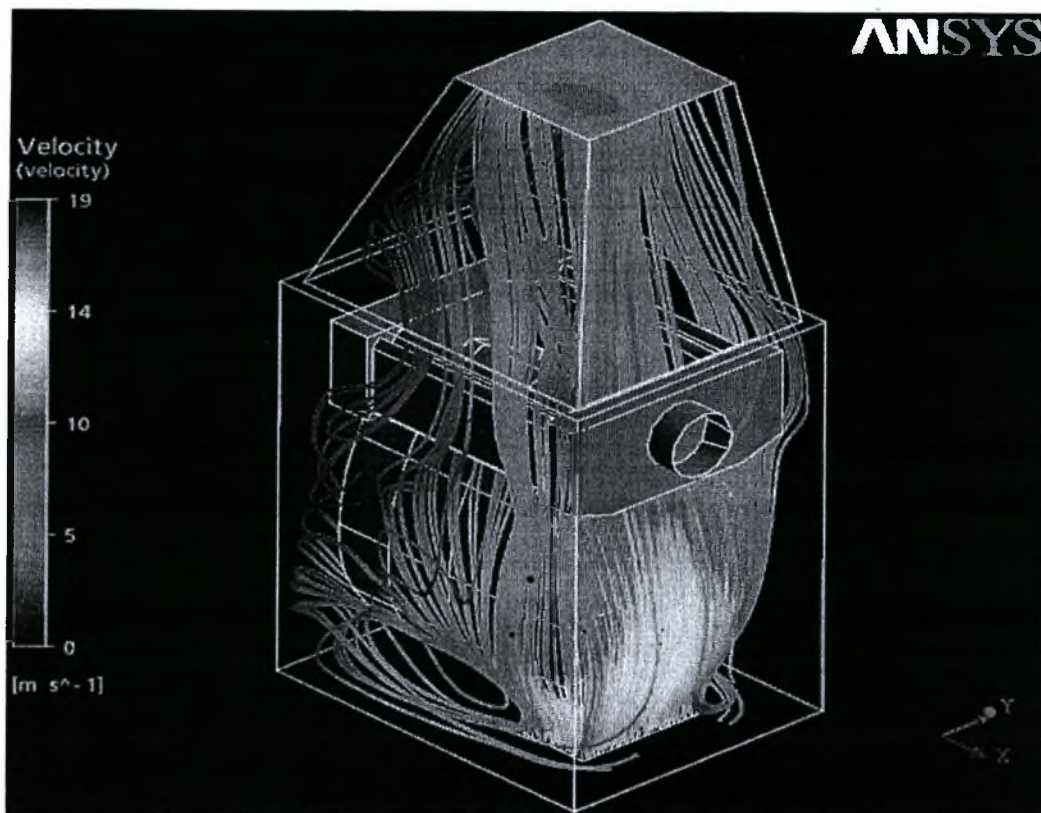
Εικόνα 30 Υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο



Εικόνα 31 Υπολογισμένο πεδίο θερμοκρασιών στην έξοδο του plenum και στις ροϊκές γραμμές στο εσωτερικό



Εικόνα 32 Ροϊκό πεδίο και κατανομή θερμοκρασίας στον εναλλάκτη θερμότητας



Εικόνα 33 Πεδίο ταχυτήτων του αέρα αεροθέρμανσης στο εσωτερικό του λέβητα

3.2.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τις παραπάνω **Εικόνες** συμπεραίνουμε ότι η θερμοκρασιακή κατανομή στην έξοδο του plenum, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 31**, δεν είναι ομοιόμορφη. Παρατηρείται θερμοκρασιακή διαβάθμιση. Οι υπολογιζόμενες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα στις θέσεις που έχουμε τοποθετήσει τα θερμοστοιχεία είναι 44 °C, 64 °C και 93 °C. Αυτό οφείλεται στη θέση και στις διαστάσεις της διατομής εξόδου του ανεμιστήρα. Στο τμήμα της διατομής εξόδου που βρίσκεται στην πλευρά της καπνοδόχου, εμφανίζονται οι μικρότερες υπολογιζόμενες θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει διότι, σύμφωνα με το υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο, το οποίο φαίνεται στην **Εικόνα 30** και στην **Εικόνα 33**, από εκείνη την περιοχή του όγκου ελέγχου διέρχεται με μεγάλη ταχύτητα η μεγαλύτερη ποσότητα του αέρα εισαγωγής, με αποτέλεσμα, ο αέρας να μην θερμαίνεται αρκετά και να φθάνει με θερμοκρασία περίπου 50 °C, στην διατομή εξόδου. Από την άλλη παρατηρείται ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στο τμήμα της διατομής εξόδου που βρίσκεται στην πλευρά του καυστήρα. Σύμφωνα με τις παραπάνω **Εικόνες** σε εκείνη την περιοχή της διατομής εξόδου, η ποσότητα του αέρα που φθάνει είναι μικρή. Επιπλέον, σε εκείνο το τμήμα του εναλλάκτη θερμότητας, όπως προκύπτει από τα θερμογραφήματα, οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είναι υψηλές. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις μικρές ταχύτητες που αναπτύσσονται σε εκείνη την περιοχή του όγκου ελέγχου οδηγούν στο παραπάνω αποτέλεσμα.

3.3 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας

Το υποπρόγραμμα CFX Post παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής αρχείων .dat τα οποία μπορούν να περιέχουν τις τιμές οποιουδήποτε θερμοδυναμικού μεγέθους και όχι μόνο θελήσει ο χρήστης με σκοπό την επεξεργασία αυτών. Τα αρχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν συστηματικά για τον έλεγχο των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, που αποτελεί πολύ σημαντικό τμήμα οποιασδήποτε μελέτης με εμπορικούς κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Για τον έλεγχο του ισοζυγίου μάζας προχωρήσαμε στην εξαγωγή 2 αρχείων .dat ένα για την είσοδο και ένα για την έξοδο. Στα αρχεία αυτά περιέχονται οι τιμές της μαζικής παροχής αέρα (mass flow rate , kg/s) τις οποίες υπολογίζει μόνο του το πρόγραμμα λαμβάνοντας υπ'όψη του τις διαστάσεις των διατομών εισόδου, εξόδου αλλά και τις οριακές συνθήκες στις περιοχές αυτές.

Στη συνέχεια προχωρήσαμε σε επεξεργασία αυτών των αρχείων, στο λογισμικό Microsoft Office Excel, με σκοπό τον υπολογισμό της μαζικής παροχής. Τελικά, ικανοποιήθηκε το ισοζύγιο μάζας, δηλαδή $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = 0.8 \text{ kg/s}$

Για τον έλεγχο του ισοζυγίου ενέργειας η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω:

Το ισοζύγιο ενέργειας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{Q}_{burner} = \dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = \dot{Q}_{net} + \dot{Q}_{plenum} + \dot{Q}_{exhaust}$$

Η θερμική ισχύς του εναλλάκτη θερμότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{Q}_{boiler} = \dot{Q}_{net} + \dot{Q}_{plenum}$$

Υπολογισμός των απωλειών θερμότητας από το plenum:

Για τον υπολογισμό αυτής της θερμικής ισχύος χρησιμοποιήσαμε αρχεία εξόδου από το CFX – Post. Τα αρχεία αυτά περιέχουν τις υπολογιζόμενες τιμές της επιφάνειας και της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε κάθε element του υπολογιστικού πλέγματος του τμήματος plenum. Έπειτα από επεξεργασία αυτών των τιμών προέκυψε η ζητούμενη ισχύς:

$$\dot{Q}_{plenum} = 0.295 \text{ kW}$$

Υπολογισμός της ωφέλιμης θερμικής ισχύος του αερολέβητα:

Ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον προσδιορισμό της ωφέλιμης ισχύος του αερολέβητα: $\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in}$

Τα αρχεία εξόδου τα οποία χρησιμοποιήθηκαν περιέχουν τις υπολογιζόμενες τιμές της παροχής μάζας και θερμοκρασίας του αέρα σε κάθε element του υπολογιστικού πλέγματος στις διατομές εισόδου και εξόδου του συνολικού όγκου ελέγχου.

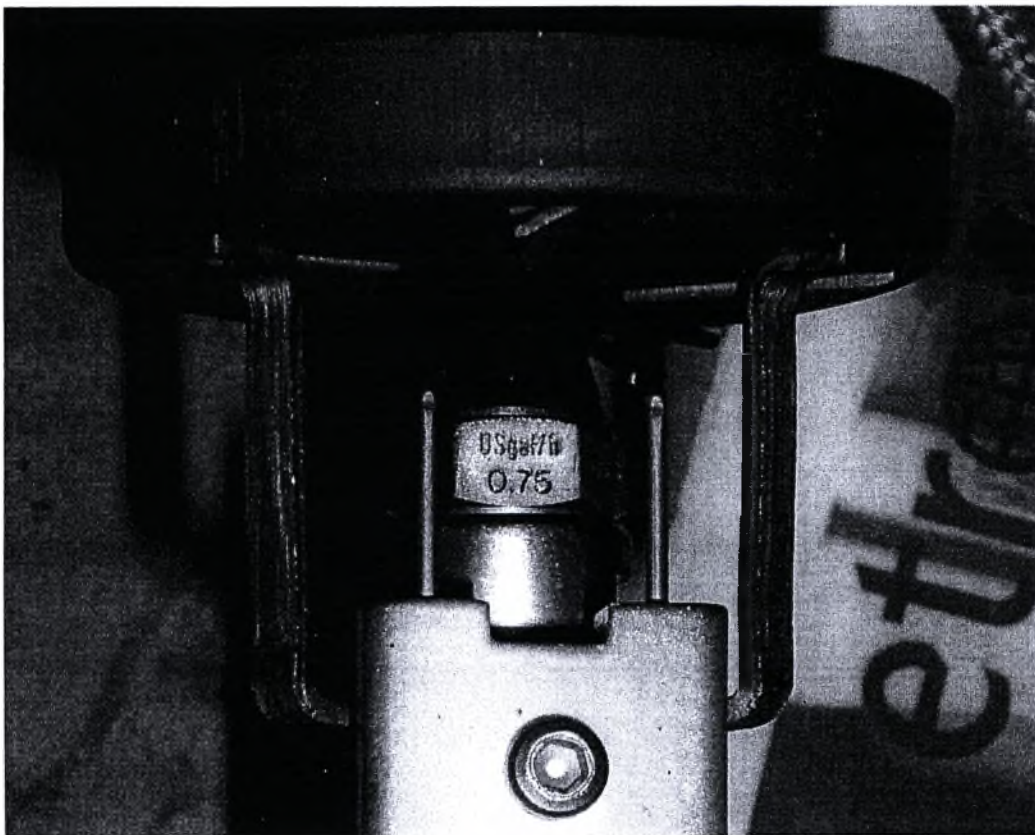
Τελικά, η ωφέλιμη ισχύς για την reference case, θέση αναφοράς του ανεμιστήρα, είναι:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in} = 28.977 \text{ kW}$$

Υπολογισμός της θερμικής ισχύος του καυστήρα:

Η μαζική παροχή του καυσίμου προσδιορίζεται από την τιμή που αναγράφεται στο ακροφύσιο ψεκασμού του καυστήρα. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 34** που ακολουθεί η ογκομετρική παροχή του καυσίμου είναι:

$$\dot{m}_{fuel} = 0.75 \text{ gal/h}$$



Εικόνα 34 Ακροφύσιο ψεκασμού καυσίμου

Λαμβάνοντας υπόψη μας την παραπάνω τιμή μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ του καυστήρα:

$$0.75 \text{ GPH} = 2.78 \text{ kg/h}$$

Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του πετρελαίου θέρμανσης είναι:

$$H_u = 43.2 \text{ MJ/kg}$$

Επομένως η ισχύς του καυστήρα είναι:

$$\dot{Q}_{burner} = \dot{m}_{fuel} H_u = 28370 \text{ kcal/h} = 33.36 \text{ kW}$$

Υπολογισμός της θερμικής ισχύος των καυσαερίων:

Πρόκειται για την θερμότητα η οποία αποβάλλεται από το σύστημα μας μέσω των καυσαερίων:

Η παροχή των καυσαερίων υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{m}_{exhaust} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}$$

Υπολογισμός της παροχής του απαιτούμενου αέρα καύσης:

$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_{st}} = \frac{\dot{m}_{air} / \dot{m}_{fuel}}{(A/F)_{st}}$$

$$\dot{m}_{air} = \lambda (A/F)_{st} \dot{m}_{fuel}$$

$$\dot{m}_{air} = (1.25) \cdot (14.5) (2.78 \text{ kg/h})$$

$$\dot{m}_{air} = 50.39 \text{ kg/h}$$

Επομένως η μαζική παροχή των καυσαερίων είναι :

$$\dot{m}_{exhaust} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} = (50.39 \text{ kg/h}) + (2.78 \text{ kg/h}) \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_{exhaust} = 53.17 \text{ kg/h}$$

Η θερμική ισχύς των καυσαερίων υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{Q}_{exhaust} = \dot{m}_{exhaust} \bar{C}_p T_{exhaust} \quad (0.1)$$

$$\dot{Q}_{exhaust} = \left(\frac{53.17 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) (1.1 \text{ kJ/kgK}) (261^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{exhaust} = 4.24 \text{ kW}$$

Τελικά, αντικαθιστούμε τους παραπάνω όρους στο ισοζύγιο ενέργειας και έχουμε:

$$\dot{Q}_{burner} = 33.36 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = 28.977 \text{ kW} + 0.295 \text{ kW} + 4.24 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = 33.512 \text{ kW}$$

Ο υπολογιζόμενος βαθμός απόδοσης του λέβητα είναι:

$$n_k = \frac{\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_{burner}}$$

$$n_k = \frac{28.977 \text{ kW}}{33.36 \text{ kW}} = 0.869$$

ή

$$n_k = 86.9\%$$

Παρατηρούμε ότι το ισοζύγιο ενέργειας σε αντίθεση με το ισοζύγιο μάζας δεν ικανοποιείται απόλυτα. Υπάρχει σφάλμα 0.46 %, το οποίο είναι παρά πολύ μικρό. Το γεγονός αυτό εξηγείται με την μη ικανοποίηση του κριτηρίου σύγκλισης.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι η εμφάνιση τόσο μικρού σφάλματος επαληθεύει την ορθότητα των ρυθμίσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην θερμοκάμερα και των συνθηκών διεξαγωγής των θερμογραφημάτων.

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ παρατίθενται οι πίνακες οι οποίοι περιέχουν τις τιμές των αρχείων εξόδου (CFX – Post) και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτών, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο ικανοποίησης των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας και για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του λέβητα.

4 Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών – Επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού παροχής αέρα

Μετά από έναν έλεγχο με διαδοχικές επαναλήψεις, με μικρές μεταβολές στην παροχή αέρα, βρέθηκε συμφωνία πειράματος – υπολογισμού όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση στο στόμιο εξόδου του αερολέβητα, για την τιμή παροχής αέρα 0.8 kg/s. Η τιμή αυτή συμφωνεί με τις χαρακτηριστικές του κατασκευαστή του ανεμιστήρα [26], και επομένως οριστικοποιείται για τις επόμενες υπολογιστικές διερευνήσεις.

Γενικά, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω συνοπτικές παρατηρήσεις όσον αφορά τη σύγκριση μετρημένων – υπολογισμένων πεδίων ταχυτήτων – θερμοκρασιών:

Το προφίλ ταχύτητας αέρα στην είσοδο του plenum εξόδου προς τον αεραγωγό (αμέσως μετά τα τούμπα), που μετρήθηκε με το ανεμόμετρο TSI, επιβεβαιώνει σε γενικές γραμμές το ροϊκό πεδίο που υπολογίζει ο υπολογιστικός κώδικας (**Εικόνα 33**).

Η κατανομή θερμοκρασίας στην έξοδο του plenum εξόδου προς τον αεραγωγό, που μετρήθηκε με τα θερμοστοιχεία, οι τιμές των οποίων παρουσιάστηκαν στο τμήμα **3.1.5** της παρούσας εργασίας, επιβεβαιώνει τις υπολογιζόμενες θερμοκρασίες οι οποίες παρουσιάζονται στην **Εικόνα 31**.

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης του λέβητα ο οποίος μετρήθηκε με τον αναλυτή καυσαερίων MRU Vario Plus Industrial συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τον υπολογιζόμενο βαθμό απόδοσης διότι το σφάλμα που εμφανίζεται είναι πολύ μικρό, 0.46 %.

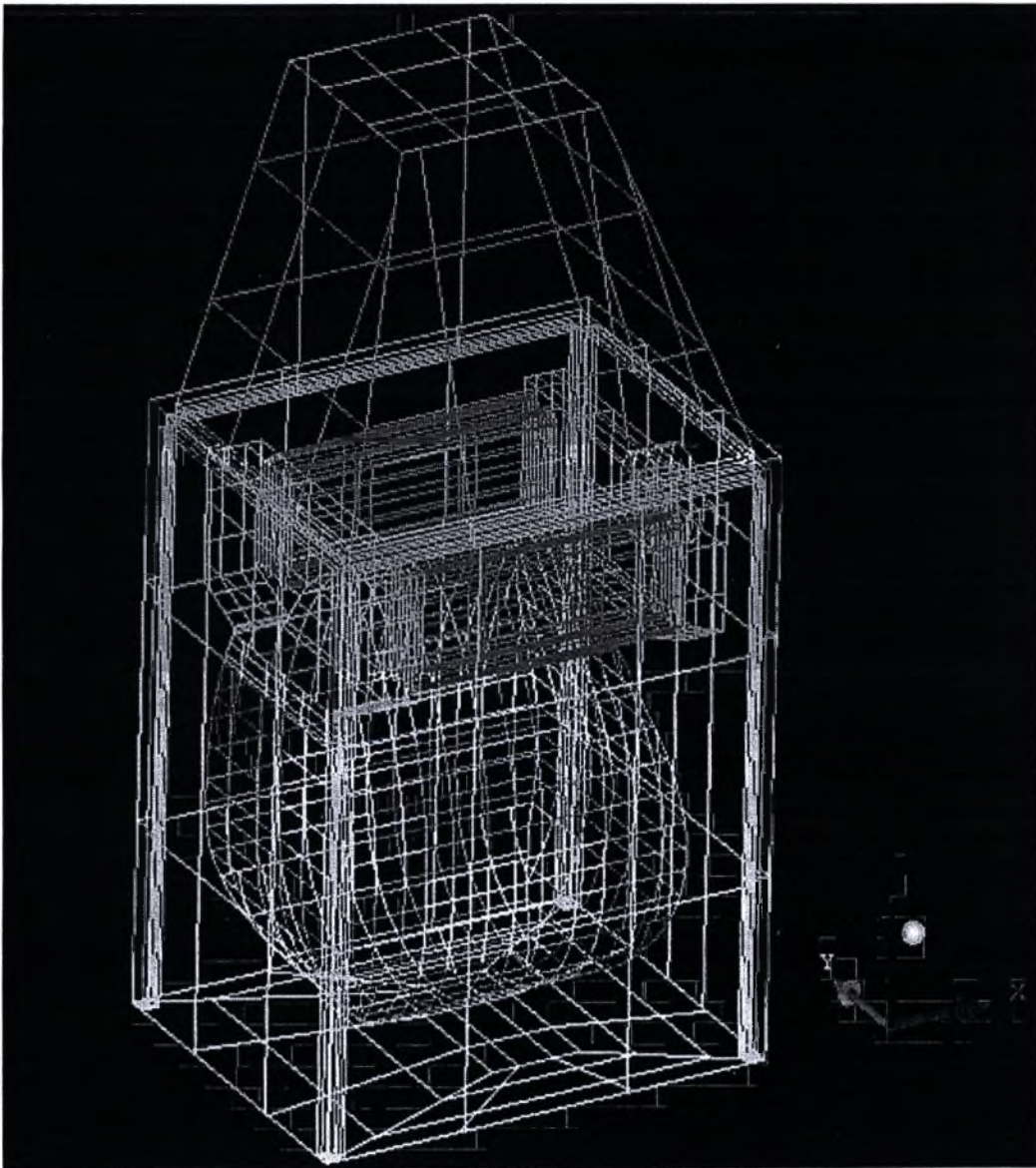
Από το σημείο αυτό και μετά, μπορούμε να τρέξουμε ξανά τη συγκεκριμένη περίπτωση, αλλάζοντας μόνο τη θέση – διαστάσεις της θυρίδας εισόδου αέρα, αλλά ακόμη, σε μικρό βαθμό, και τη γεωμετρία του θαλάμου – αυλών, ώστε να δοκιμάζονται υπολογιστικά διάφορες βελτιώσεις στο σχεδιασμό [1].

5 Έλεγχος πιθανών σχεδιαστικών βελτιώσεων

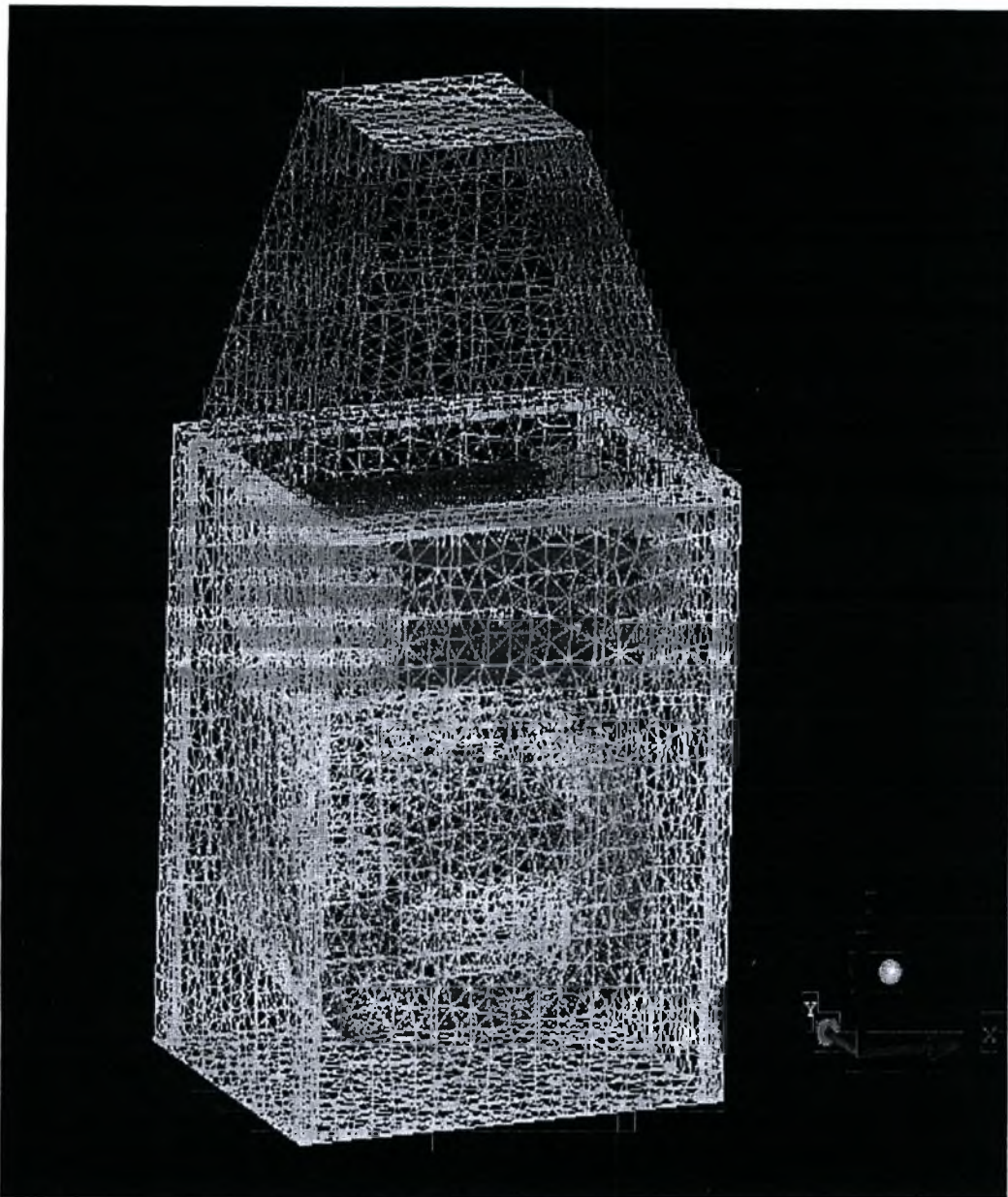
5.1 Μετατόπιση της θέσης του ανεμιστήρα με χρήση του θερμογραφήματος της *reference case*.

Η αλλαγή στην οποία προχωρήσαμε είναι η εικονική και όχι η πραγματική μετατόπιση της θέσης του ανεμιστήρα κατά 10 cm αριστερά από την αρχική της θέση (βλέποντας τον αερολέβητα από την όψη της **Εικόνα 2**). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε τα ήδη υπάρχοντα θερμογραφήματα.

Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι ίδια με αυτή που παρουσιάζεται στα τμήματα 3.2.1 έως 3.2.5 της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια παρατίθενται **Εικόνες** στις οποίες φαίνονται ο όγκος ελέγχου και το υπολογιστικό πλέγμα με την τροποποιημένη γεωμετρία εισόδου αέρα στο εσωτερικό του αερολέβητα.



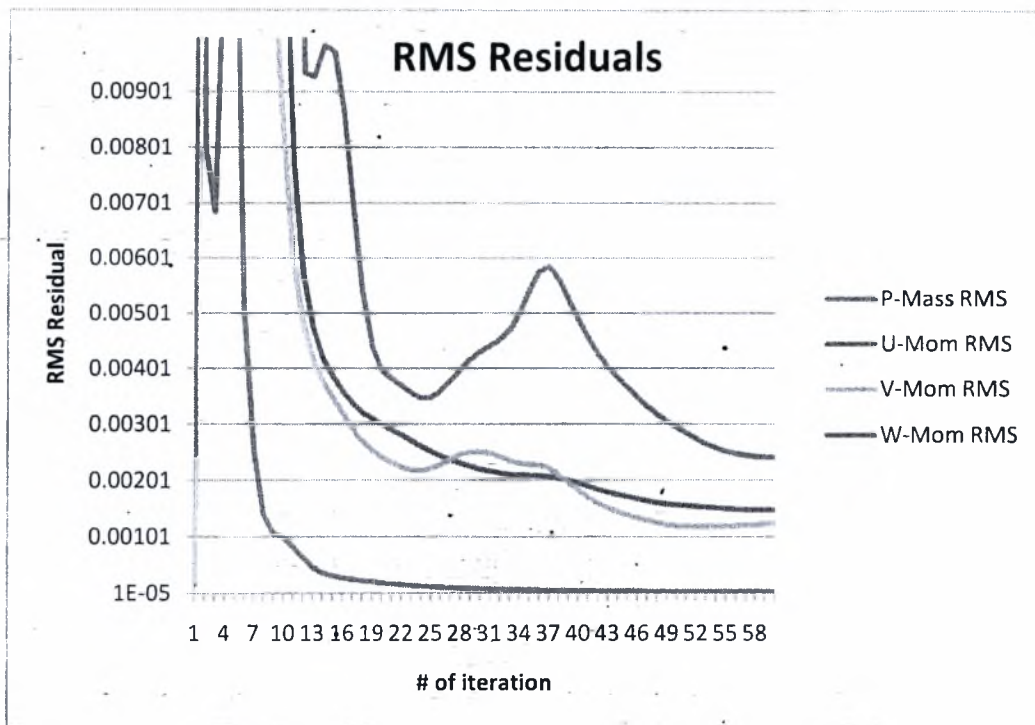
Εικόνα 35 Ο αερολέβητας και ο όγκος ελέγχου



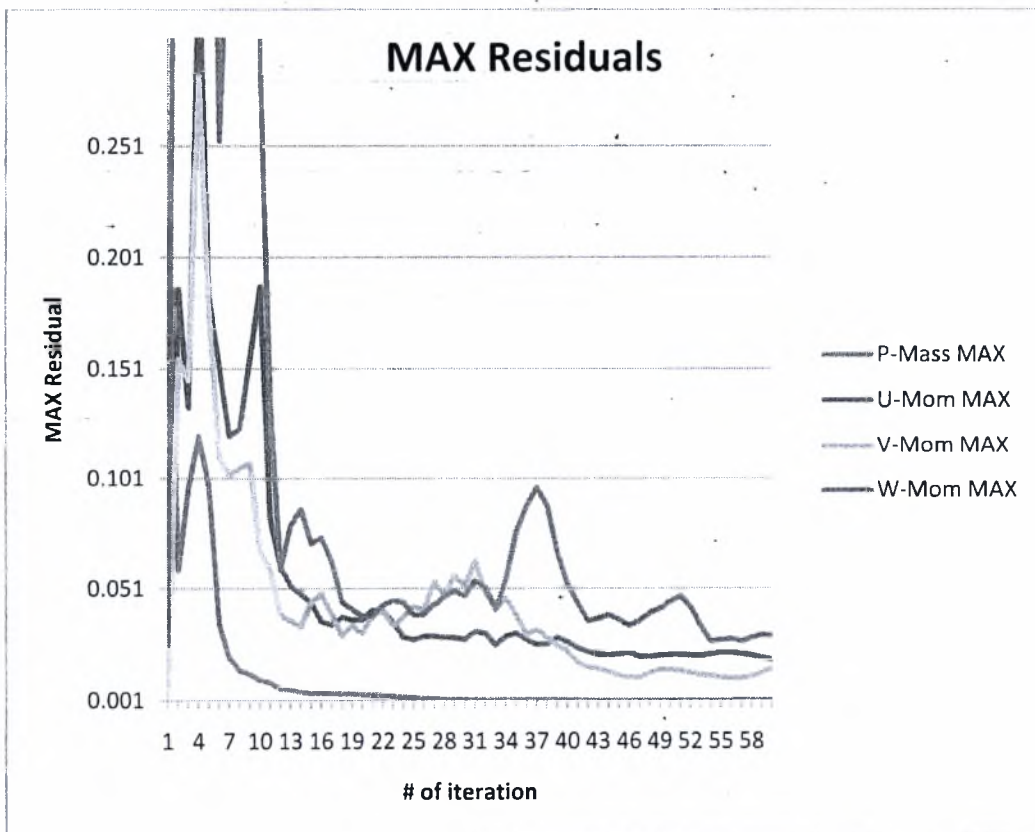
Εικόνα 36 Υπολογιστικό πλέγμα

5.1.1 Επίλυση εξισώσεων

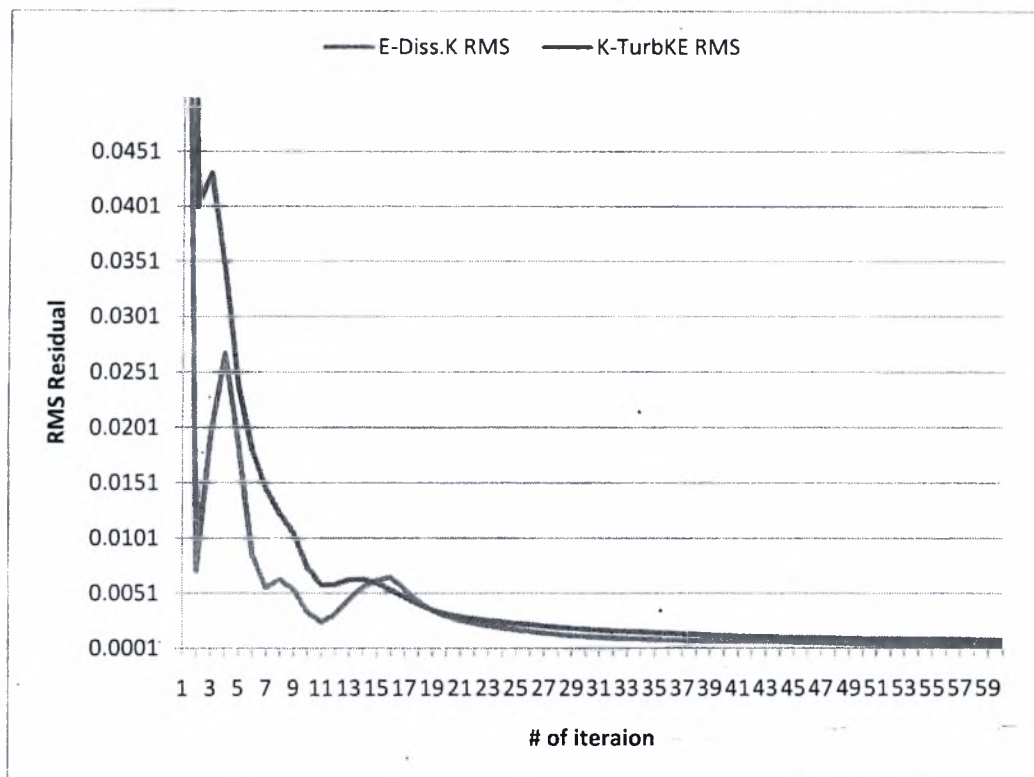
Σε αυτό το τμήμα της εργασίας παρουσιάζεται το χρονικό της σύγκλισης της δεύτερης μοντελοποίησης. Τα αποτελέσματα τα οποία φαίνονται στα **Σχήματα** που ακολουθούν είναι ίδια με αυτά της πρώτης μοντελοποίησης, δηλαδή: η μάζα είναι η μόνη που ικανοποιεί το κριτήριο σύγκλισης και η τιμή στην οποία φθάνουν οι RMS τιμές των Residuals είναι $1.0 \cdot 10^{-5}$. Η ορμή στη X, Y και Z κατεύθυνση, η οποία είναι η κύρια ροή του προβλήματος και στην οποία λαμβάνουν χώρα όλα μελετώμενα φαινόμενα, δεν καταφέρνει μετά το πέρας των επαναλήψεων να ικανοποιήσει το ελαθυσμένο κριτήριο αλλά συγκλίνει και παραμένει σταθερή σε μια τιμή πολύ κοντά στην $1.0 \cdot 10^{-3}$. Έ τέλος, σύμφωνα με το **Σχήμα 19** η τύρβη έχει πλήρως μοντελοποιηθεί.



Σχήμα 17 Διάγραμμα των RMS τιμών των Residuals των κινηματικών ιδιοτήτων



Σχήμα 18 Διάγραμμα των MAX τιμών των Residuals των κινηματικών ιδιοτήτων



Σχήμα 19 Διάγραμμα των RMS τιμών των Residuals της τύρβης

Συγκρίνοντας τα χρονικά των δύο μοντελοποιήσεων συμπεραίνουμε ότι στην τελευταία μοντελοποίηση η σύγκλιση των μεγεθών είναι καλύτερη. Αυτό προκύπτει από τις μικρότερες τιμές των Residuals.

5.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

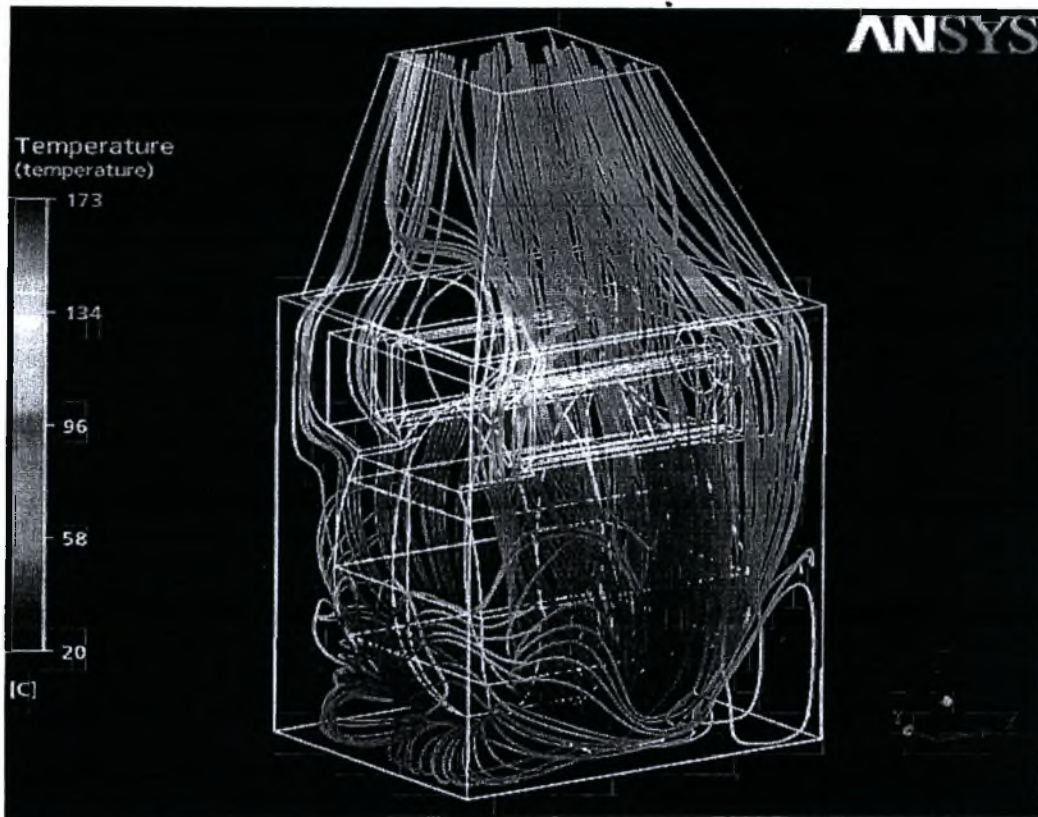
Στην **Εικόνα 37** φαίνεται το υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο.

Στην **Εικόνα 38** παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα στην έξοδο του όγκου ελέγχου (στο plenum).

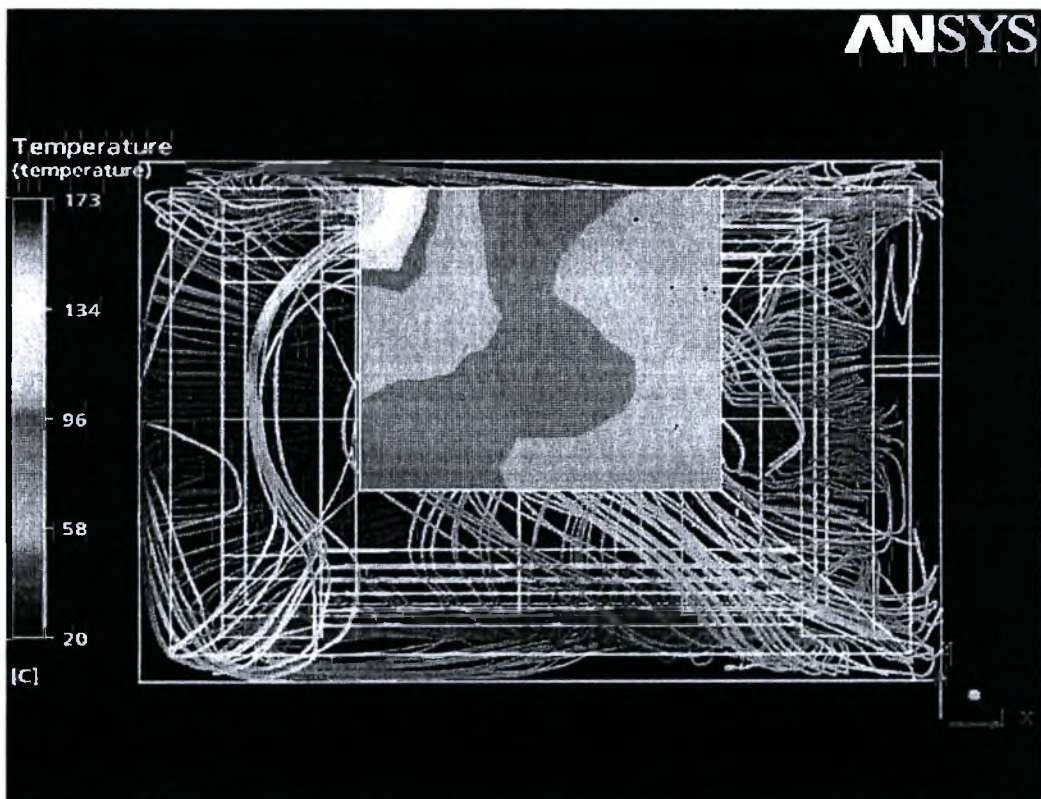
Στην **Εικόνα 39** παρουσιάζονται οι γραμμές ροής και το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα που περιρρέει τα τούμπα καυσαερίων.

Στην **Εικόνα 40** φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων στο εσωτερικό μεταξύ επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του λέβητα, και των καλυμμάτων (περιοχή ροής του αέρα αεροθέρμανσης).

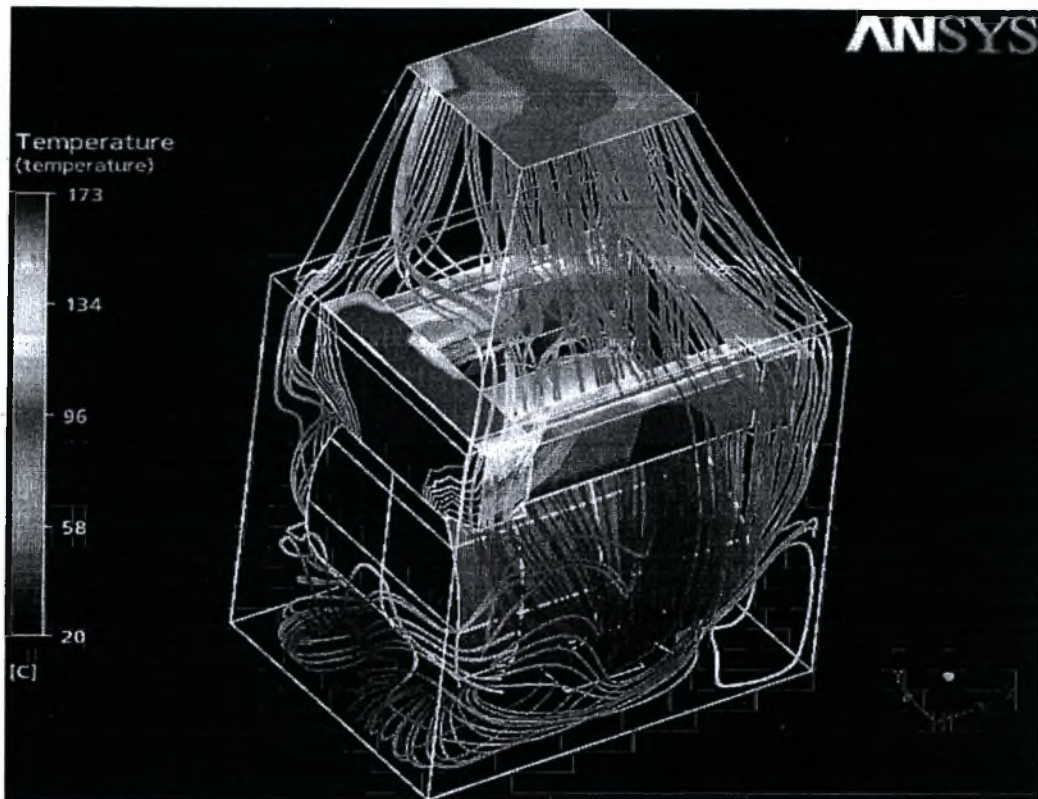
Στην **Εικόνα 41** παρουσιάζεται η σύγκριση των πεδίων ροής ενθαλπίας των μέχρι στιγμής μοντελοποιήσεων στην έξοδο του plenum.



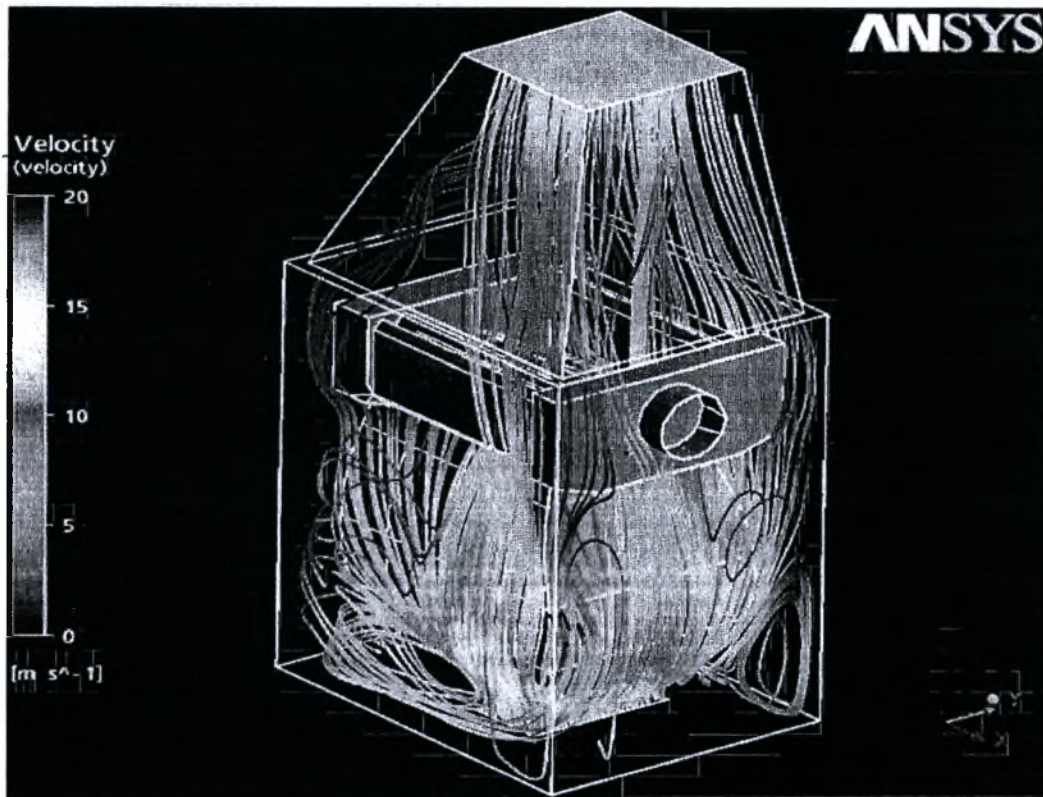
Εικόνα 37 Ροή του αέρα στον όγκο ελέγχου



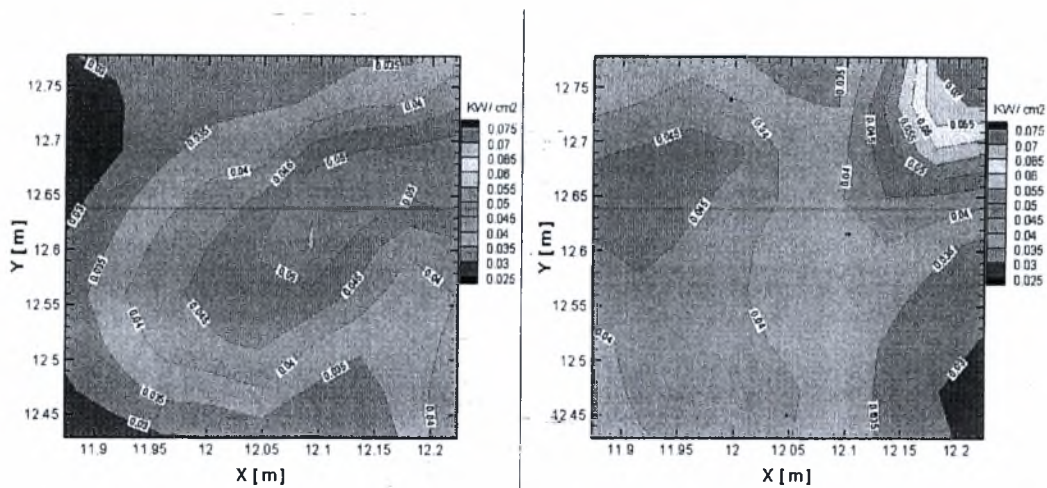
Εικόνα 38 Υπολογισμένο πεδίο θερμοκρασιών στην έξοδο του πλεθμ και στις ροϊκές γραμμές στο εσωτερικό.



Εικόνα 39 Κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και στις ροϊκές γραμμές γύρω από αυτήν.



Εικόνα 40 Πεδίο ταχυτήτων του αέρα αεροθέρμανσης στο εσωτερικό του λέβητα.



Εικόνα 41 Σύγκριση πεδίων ροής ενθαλπίας (θερμοροής) στην έξοδο του plenum. Αριστερά, θέση αναφοράς, (reference case), δεξιά: μετατοπισμένη θέση εισόδου αέρα από ανεμιστήρα.

5.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων – Σύγκριση των δύο μοντελοποιήσεων

Η οπτική παρατήρηση – σύγκριση των **Εικόνων Εικόνα 31 και Εικόνα 38**, δείχνει σημαντικές διαφορές στην κατανομή θερμοκρασιών τόσο στις γραμμές ροής, όσο και (περισσότερο εμφανώς), στην διατομή εξόδου του plenum. Η κατανομή των θερμοκρασιών στην **Εικόνα 38** είναι πιο ομοιόμορφη. Η ποσότητα του αέρα κατανέμεται εξίσου σε όλη τη διατομή. Αυτό εξηγείται και από το προφίλ ταχυτήτων το οποίο είναι επίσης ομοιόμορφο. Όπως δείχνει η **Εικόνα 40** οι ροϊκές γραμμές περιρρέουν σε μεγαλύτερο βαθμό τον εναλλάκτη θερμότητας. Εμφανίζεται θερμοκρασιακή διακύμανση, αλλά οι αναπτυσσόμενες διαφορές των θερμοκρασιών είναι μικρότερες. Η διατομή εξόδου χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Οι περιοχές που βρίσκονται στην πλευρά του καυστήρα και της καπνοδόχου εμφανίζουν ίδιες θερμοκρασίες. Στη μέση της διατομής σχηματίζεται μια περιοχή μέσης θερμοκρασίας 50 °C. Τα παραπάνω οφείλονται στη νέα θέση του ανεμιστήρα.

Η επεξεργασία των αρχείων εξόδου, τα οποία παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, δείχνει μία σημαντική αναμενόμενη βελτίωση στην ωφέλιμη ισχύ του λέβητα, όπως φαίνεται και από την **Εικόνα 41**, από 28.977 σε 31.537 kW με αποτέλεσμα και ο βαθμός απόδοσης να βελτιώνεται σημαντικά, από 0.869 σε 0.946, με την προτεινόμενη σχεδιαστική τροποποίηση.

5.1.4 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας

Για τον έλεγχο ικανοποίησης των ισοζυγίων ακολουθείται η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στο 3.3. Έπειτα από επεξεργασία των απαραίτητων αρχείων, το ισοζύγιο μάζας ικανοποιήθηκε: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = 0.8 \text{ kg/s}$

Ο έλεγχος ικανοποίησης του ισοζυγίου ενέργειας παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\dot{Q}_{burner} = \dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = \dot{Q}_{net} + \dot{Q}_{plenum} + \dot{Q}_{exhaust}$$

$$\dot{Q}_{burner} = 33.36 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = 31.537 \text{ kW} + 0.298 \text{ kW} + 4.24 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = 36.075 \text{ kW}$$

Ο υπολογιζόμενος βαθμός απόδοσης του λέβητα είναι:

$$n_k = \frac{\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_{burner}}$$

$$n_k = \frac{31.537 \text{ kW}}{33.36 \text{ kW}} = 0.946$$

ή

$$n_k = 94.6\%$$

Παρατηρούμε ότι το ισοζύγιο ενέργειας σε αντίθεση με το ισοζύγιο μάζας δεν ικανοποιείται απόλυτα. Υπάρχει σφάλμα 8.14 %, το οποίο είναι μεγάλο. Η ύπαρξη τόσο μεγάλου σφάλματος θέτει σε αμφισβήτηση τα αποτελέσματα αυτής της μοντελοποίησης. Για το λόγο αυτό, μετατοπίσαμε την θέση του ανεμιστήρα του αερολέβητα και προχωρήσαμε στην υλοποίηση της ίδιας μεθόδου επίλυσης.

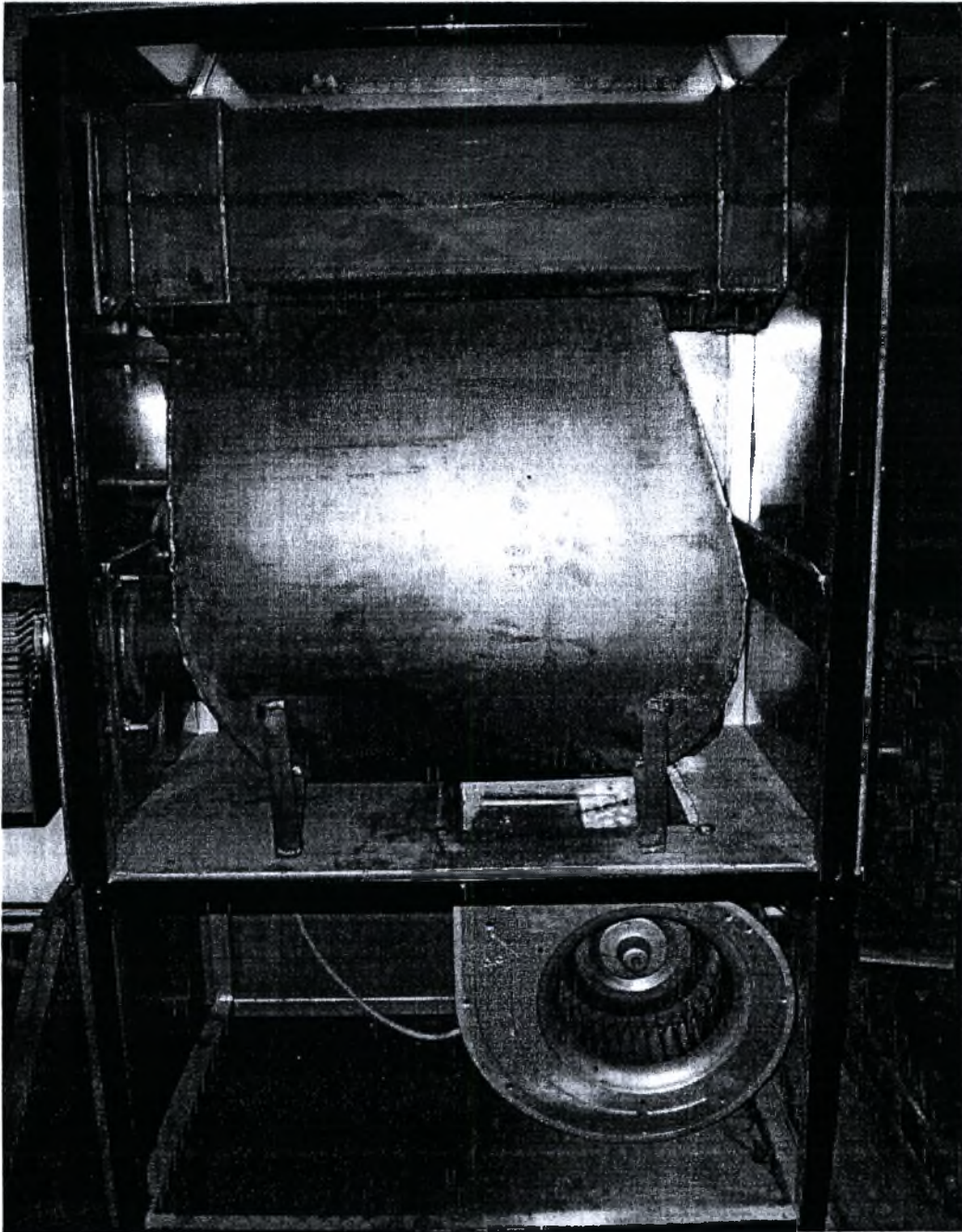
5.1.5 Συμπεράσματα

Πιθανώς η θέση του ανεμιστήρα δεν έχει βελτιστοποιηθεί επαρκώς από τον κατασκευαστή του αερολέβητα. Μένει να παρουσιαστεί και η τελευταία μοντελοποίηση για να συμπεράνουμε αν η προτεινόμενη σχεδιαστική τροποποίηση οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του λέβητα.

5.2 Μεθοδολογία επίλυσης της *shifted case*

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της 2^{ης} μοντελοποίησης, προχωρήσαμε στην μετατόπιση του ανεμιστήρα κατά 10 cm αριστερά από την αρχική του θέση. Στην πραγματικότητα, πραγματοποιήσαμε περιστροφή 180° ολόκληρου του ανεμιστήρα με στόχο την επίτευξη της επιθυμητής θέσης.

Η νέα θέση του ανεμιστήρα φαίνεται στην **Εικόνα 42** που ακολουθεί.



Εικόνα 42 Ο αερολέβητας 30,000 kcal/h (μετά την αφαίρεση του πρόσθιου καλύμματος του εναλλάκτη και της σχάρας εισόδου του ανεμιστήρα και την αλλαγή της θέσης του ανεμιστήρα)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βήματα της επίλυσης:

1. Διεξαγωγή μετρήσεων βαθμού απόδοσης, λόγου αέρα και εκπομπών αιθάλης στον αερολέβητα, στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, σε μόνιμη κατάσταση (MRU Vario Plus Industrial).
2. Διεξαγωγή μετρήσεων με υπέρυθρη θερμογραφία, (κάμερα υπέρυθρων Thermacam P45) ώστε να καταγραφεί το θερμοκρασιακό πεδίο στο τμήμα της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του λέβητα που γίνεται ορατό όταν αφαιρεθεί το πρόσθιο κάλυμμα.
3. Διεξαγωγή μετρήσεων με χρήση θερμοστοιχείων τύπου K στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό.
4. Παραγωγή solid model της περιοχής εναλλαγής θερμότητας του αερολέβητα με βάση σχέδια σε ProEngineer [25] που μας παρέδωσε ο κατασκευαστής [17] (λογισμικό ANSYS ICEM).
5. Παραγωγή κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος στον συνολικό όγκο ελέγχου στον οποίο αναπτύσσεται το ροϊκό πεδίο του αέρα αεροθέρμανσης (λογισμικό ANSYS ICEM).
6. Παραγωγή οριακών συνθηκών ροής και μετάδοσης θερμότητας στα όρια του όγκου ελέγχου (λογισμικό CFX Pre). Όσον αφορά τη μετάδοση θερμότητας από την επιφάνεια εναλλαγής προς τον αέρα αεροθέρμανσης; χρησιμοποιείται οριακή συνθήκη σταθερών θερμοκρασιών στα διάφορα τμήματα της επιφάνειας εναλλαγής, που λαμβάνονται από τα θερμογραφήματα. Όσον αφορά την παροχή αέρα εισόδου, αυτή εκτιμάται προσεγγιστικά με βάση τις χαρακτηριστικές του ανεμιστήρα [26] και διορθώνεται με επαναληπτική προσέγγιση ώστε να επιτευχθεί συμφωνία πειράματος – υπολογισμού όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση στο στόμιο εξόδου του αερολέβητα.
7. Επίλυση των εξισώσεων του τρισδιάστατου ροϊκού πεδίου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με το μοντέλο τύρβης k-ε (CFX Solver).
8. Οπτικοποίηση – παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή ροϊκών γραμμών και πεδίων κατανομής θερμοκρασιών και ταχυτήτων σε χαρακτηριστικές διατομές (CFX Post).
9. Εξαγωγή αρχείων αποτελεσμάτων στις διατομές εισόδου – εξόδου του όγκου ελέγχου, για έλεγχο ισοζυγίων μάζας και ενέργειας (επεξεργασία αρχείων εξόδου του CFX Post).

5.2.1 Πειραματικό μέρος επίλυσης

5.2.1.1 Διεξαγωγή μετρήσεων βαθμού απόδοσης και λόγου αέρα

Στη φάση αυτή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βαθμού απόδοσης και λόγου αέρα στον αερολέβητα, στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, σε μόνιμη κατάσταση με χρήση του οργάνου Spectra 1600-GL[32]. Επίσης μετράται και ο δείκτης αιθάλης με χρήση χειροκίνητης αντλίας Bacharach. Στόχος των μετρήσεων δεν είναι η βέλτιστη ρύθμιση του καυστήρα, η οποία έχει ήδη γίνει, αλλά η συλλογή των απαραίτητων μετρήσεων που θα συμβάλλουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την νέα σχεδιαστική τροποποίηση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

max efficiency, η [%]	T gas [°C]	λ [-]
88.1	245	1.25

5.2.1.2 Μετρήσεις με υπέρυθρη θερμογραφία

Στο τμήμα αυτό της εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με υπέρυθρη θερμογραφία, ώστε να καταγραφεί το θερμοκρασιακό πεδίο στο τμήμα της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του λέβητα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται **Εικόνες** στις οποίες φαίνονται τα θερμογραφήματα των τεσσάρων τμημάτων του εναλλάκτη θερμότητας και η επεξεργασία αυτών.

Στην **Εικόνα 43** φαίνεται η κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του θαλάμου καύσης.

Στην **Εικόνα 44** φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή στην επιφάνεια του τεσσάρων τούμπων εναλλάκτη θερμότητας.

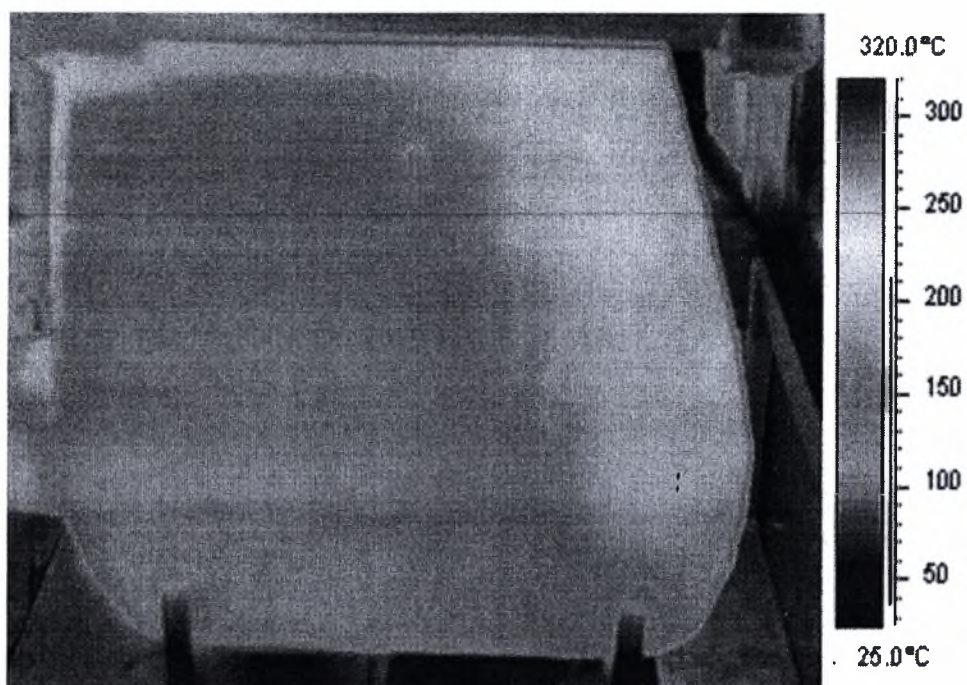
Στις **Εικόνες 45 και 46** παρουσιάζονται τα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία στις επιφάνειες των τούμπων εισόδου και εξόδου των καυσαερίων αντίστοιχα.

Στην **Εικόνα 47** παρουσιάζεται η επεξεργασία του θερμογραφήματος της **Εικόνας 43**. Είναι εμφανείς οι περιοχές στις οποίες έχει χωριστεί ο θάλαμος καύσης με στόχο την καλύτερη μοντελοποίηση της μετάδοσης θερμότητας.

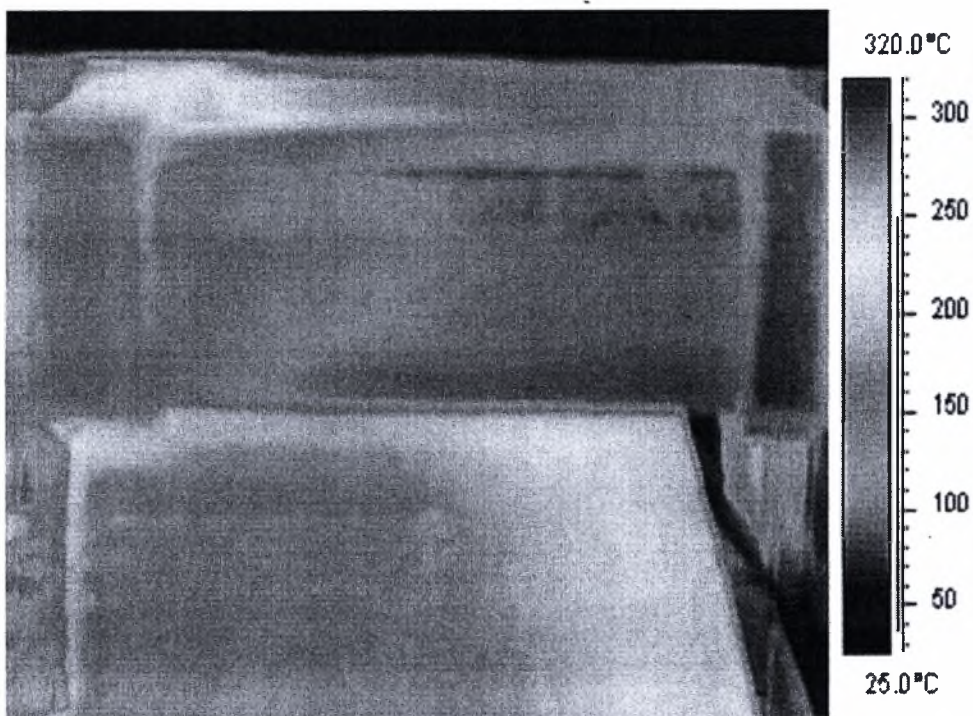
Στην **Εικόνα 48** φαίνεται η επεξεργασία του θερμογραφήματος της **Εικόνας 44**.

Στην **Εικόνα 49** φαίνεται η επεξεργασία του θερμογραφήματος της **Εικόνας 45**.

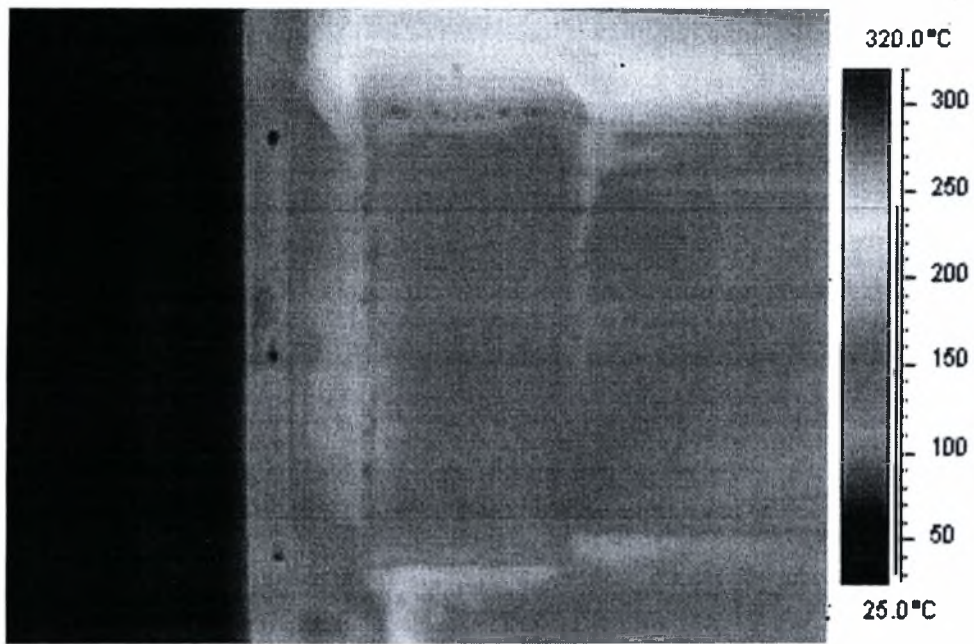
Στην **Εικόνα 50** φαίνεται η επεξεργασία του θερμογραφήματος της **Εικόνας 46**.



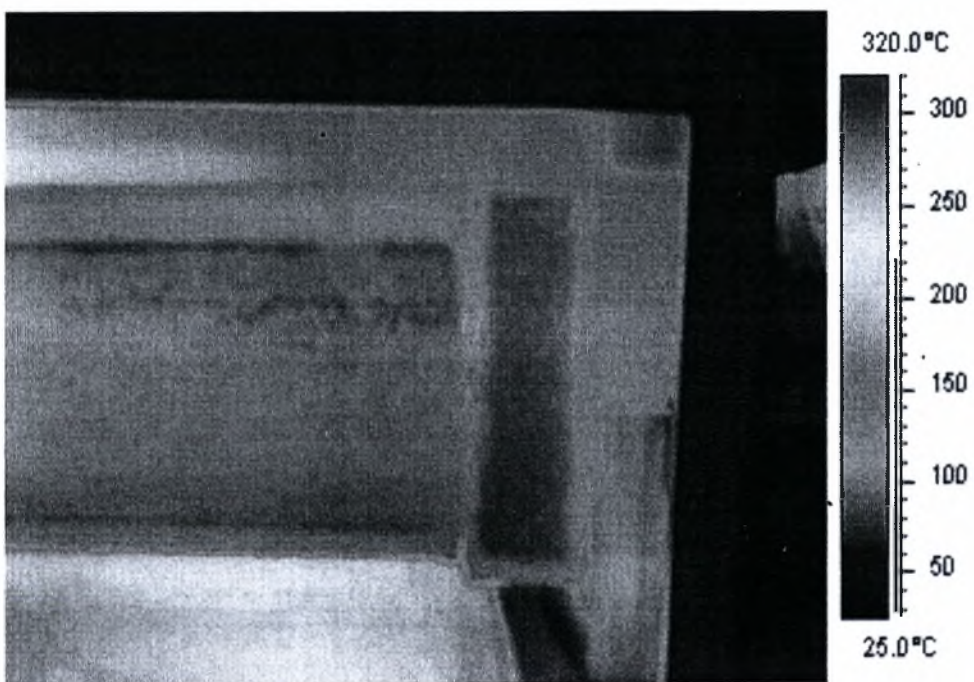
Εικόνα 43 Θερμογράφημα του θαλάμου καύσης



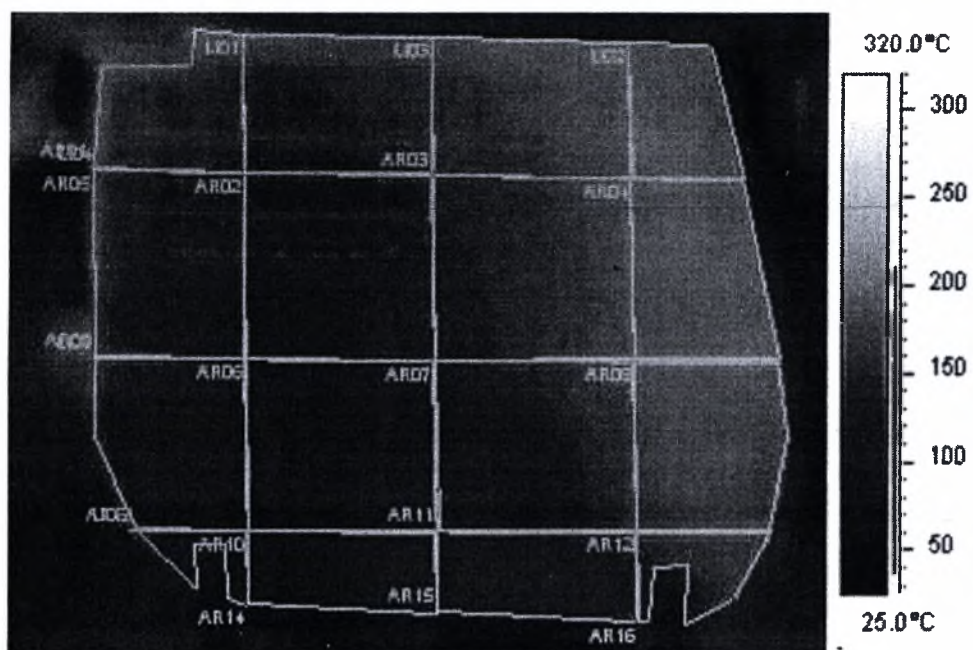
Εικόνα 44 Θερμογράφημα του τεσσάρων τούμπων εναλλάκτη θερμότητας



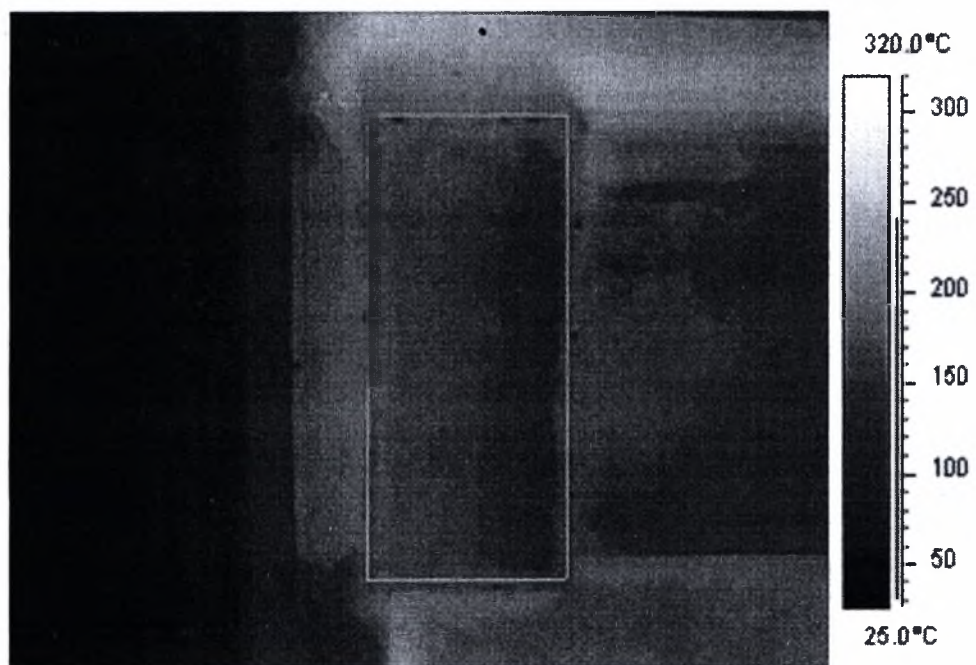
Εικόνα 45 Θερμογράφημα του τούμπου εισόδου των καυσαερίων



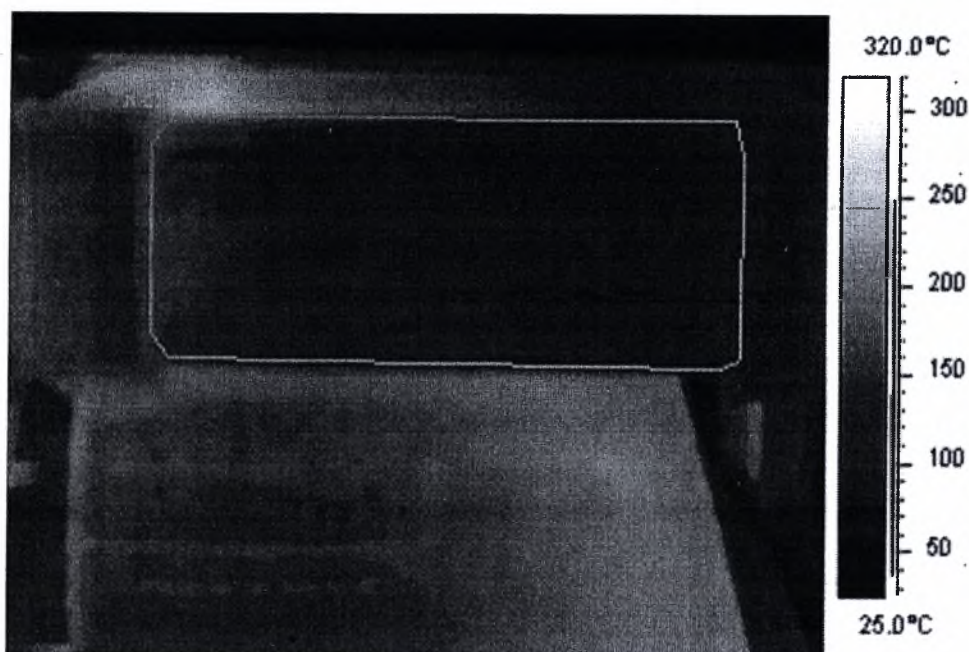
Εικόνα 46 Θερμογράφημα του τούμπου εξόδου των καυσαερίων



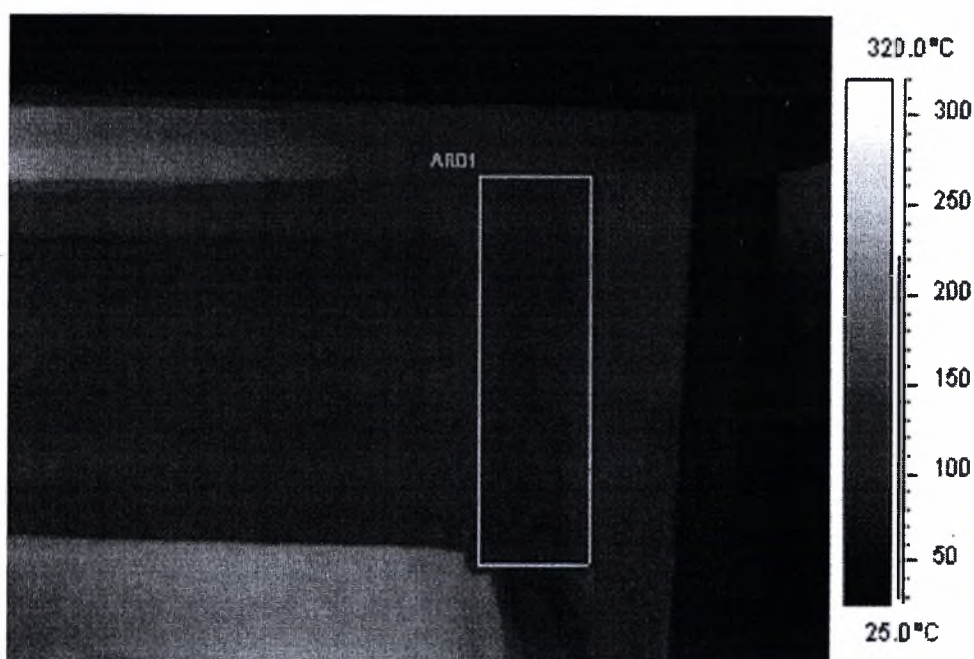
Εικόνα 47 Περιοχές θαλάμου καύσης



Εικόνα 48 Μελετώμενη περιοχή τούμπου εισόδου των καυσαερίων



Εικόνα 49 Μελετώμενη περιοχή του τεσσάρων τούμπων εναλλάκτη θερμότητας



Εικόνα 50 Μελετώμενη περιοχή του τούμπου εξόδου των καυσαερίων

Από την επεξεργασία των δεδομένων των σχετικών θερμογραφημάτων, όπως αυτά λαμβάνονται μέσω του προγράμματος Thermacam Researcher [28] προκύπτουν περισσότερες πληροφορίες για το θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε φθάνει τους 225°C. Επιπλέον των παραπάνω, ελέγχθηκε πάλι κατά πόσον η αφαίρεση του καλύμματος για την οπτική πρόσβαση στην επιφάνεια εναλλαγής, ενδεχόμενα διαταράσσει το θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό, μετά από λειτουργία του αερολέβητα στο ονομαστικό σημείο επί 30 min, αφαιρέθηκε ταχύτατα (σε διάστημα 2 s) το κάλυμμα και κινηματογραφήθηκε το θερμοκρασιακό πεδίο από την

θερμοκάμερα η οποία ήταν ήδη στημένη και εστιασμένη. Η παρακολούθηση του μεταβατικού αυτού θερμογραφήματος έδειξε πάλι αμελητέα μεταβολή μετά την αφαίρεση του καλύμματος.

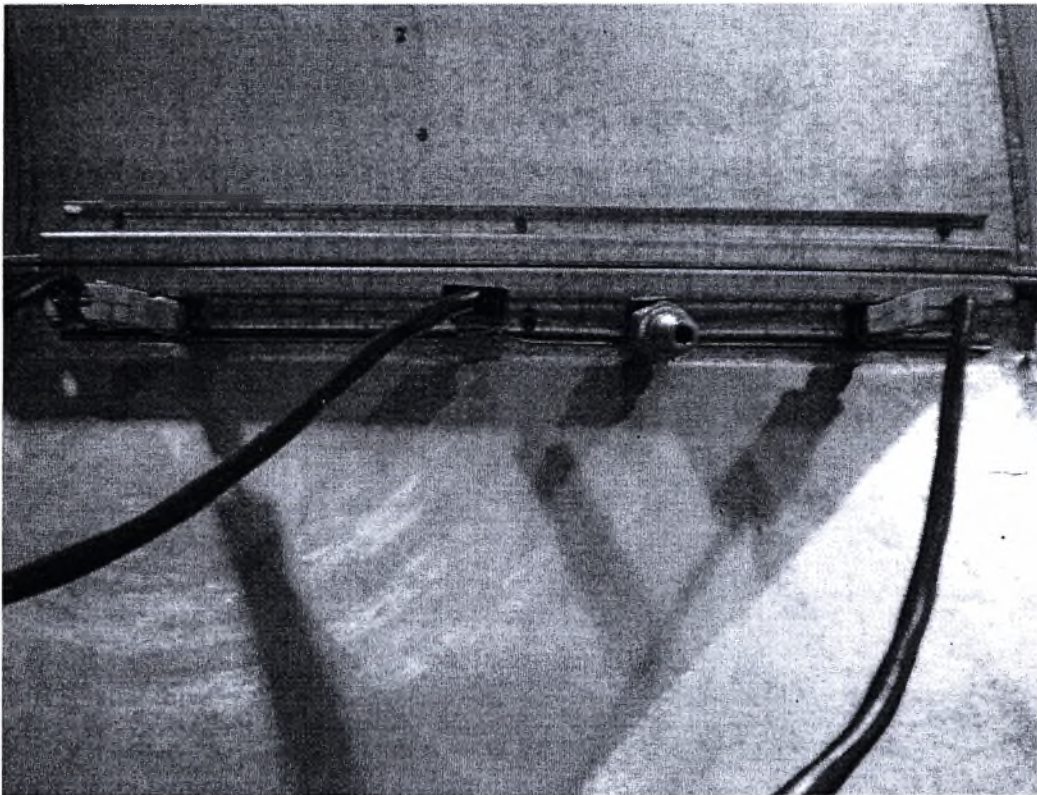
Από την επεξεργασία των θερμογραφημάτων, όπως αυτά παρουσιάζονται στις **Εικόνες 47, 48, 49 και 50** επιλέγονται και οι οριακές συνθήκες στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, οι οποίες περιέχονται στον **Πίνακα** που ακολουθεί:

Πίνακας 5 Ανάλυση των παραπάνω θερμογραφημάτων

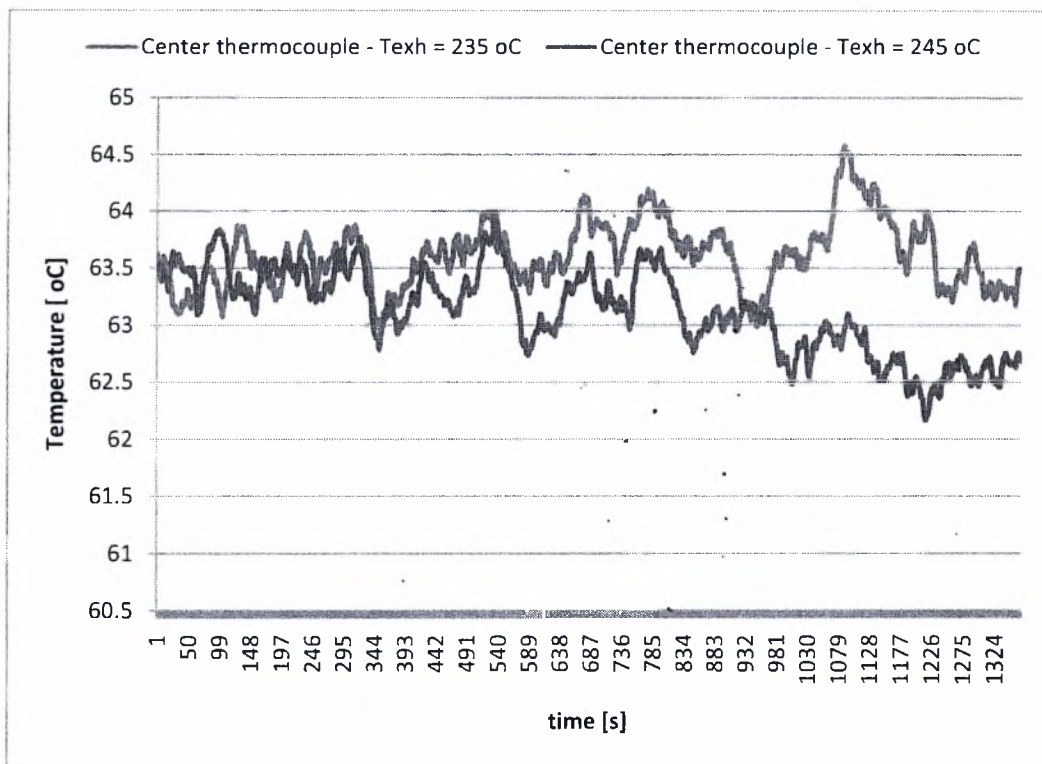
Label	Value [°C]	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
inlet						
Image		36	215	178		
LI01		92	199	107	133	24
LI02		112	211	98	182	22
LI03		84	193	109	139	22
LI04		145	207	62	172	19
LI05		118	193	75	152	26
LI06		101	172	70	130	23
AR01		145	215	69	171	16
AR02		142	199	57	164	14
AR03		151	211	60	188	14
AR04		128	213	84	198	13
AR05		124	199	75	148	14
AR06		117	167	50	136	9
AR07		129	202	73	166	17
AR08		143	207	65	194	7
AR09		102	179	76	125	13
AR10		101	140	39	117	6
AR11		116	187	71	145	17
AR12		141	195	54	182	7
AR13		85	148	63	112	12
AR14		86	129	43	108	7
AR15		98	156	58	134	9
AR16		77	172	94	152	15
tubo in						
Image		29	236	207		
AR01		124	184	60	155	14
enallaktis						
Image		44	250	206		
AR01		75	195	120	110	23
tubo out						
Image		28	219	191		
AR01		67	128	61	89	13

5.2.1.3 Μετρήσεις θερμοκρασιών και στατικής πίεσης στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω: Στην έξοδο του plenum προς τον αεραγωγό τοποθετήσαμε τρία θερμοστοιχεία τύπου K και μια προσαρμογή για την τοποθέτηση μανομέτρου, όπως δείχνει η **Εικόνα 51**. Σκοπός αυτών των μετρήσεων είναι η καταγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής στην έξοδο του όγκου ελέγχου και η σύγκριση της με την υπολογιζόμενη κατανομή. Επίσης, με τη χρήση του μανομέτρου υπολογίσαμε την στατική πίεση (υποπίεση) η οποία ορίζεται ως οριακή συνθήκη εξόδου. Η καταγραφή των θερμοκρασιών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Labview. Στο **Σχήμα 20** που ακολουθεί φαίνονται οι καταγραμμένες τιμές των θερμοστοιχείων.



Εικόνα 51 Διάταξη μέτρησης θερμοκρασιών και υποπίεσης στο plenum



Σχήμα 20 Διακύμανση της θερμοκρασίας του κεντρικού θερμοστοιχείου (με διαφορετικές ρυθμίσεις).

Παρατηρούμε ότι οι μέσες θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων είναι:

Αριστερό θερμοστοιχείο: 70 °C

Κεντρικό θερμοστοιχείο: 64 °C

Δεξιό θερμοστοιχείο: 47 °C

Υποπίεση: 60 Pa

5.2.2 Υπολογιστικό μέρος επίλυσης

5.2.2.1 Solid modeling

5.2.2.2 Υπολογιστικό πλέγμα

Τα δύο αυτά τμήματα της επίλυσης, τα οποία περιέχουν την παραγωγή του solid model και του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος, είναι ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην δεύτερη μοντελοποίηση της παρούσας εργασίας.

5.2.2.3 Διαδικασία προσδιορισμού οριακών συνθηκών

5.2.2.3.1 Οριακές συνθήκες εισόδου, εξόδου, plenum, cover

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι πλέον γνωστή, για το λόγο αυτό παραθέτουμε αμέσως τις οριακές συνθήκες.

Είσοδος

Type: inlet Static Temperature: $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Mass Flow Rate: $\dot{m}=1.0\text{ kg/s}$

Έξοδος

Type: outlet Relative Pressure: $P = 60\text{ Pa}$

Εναλλάκτης 4 Τούμπων

Type: wall Fixed temperature: $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tubo in

Type: wall Fixed temperature: $T = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tubo out

Type: wall Fixed temperature: $T = 89\text{ }^{\circ}\text{C}$

Plenum

Type: wall Heat Transfer Coefficient: $U = 6\text{ W/m}^2\text{K}$ Outside Temperature: $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Θεωρήσαμε τον αέρα ιδανικό αέριο με πίεση αναφοράς (Ref. Pressure = 1 atm).

Cover

Type wall: Heat Transfer: Adiabatic

Η συνοριακή συνθήκη της εισόδου ορίζεται σύμφωνα με την χαρακτηριστική του ανεμιστήρα. Δεν επιλέχθηκε η προηγούμενη, 0.8 kg/s , αλλά η μέγιστη εφικτή του ανεμιστήρα, 1 kg/s . Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία επιλέχθηκε αυτή η τιμή, διότι είναι η μόνη με την οποία ικανοποιήθηκε το ισοζύγιο ενέργειας.

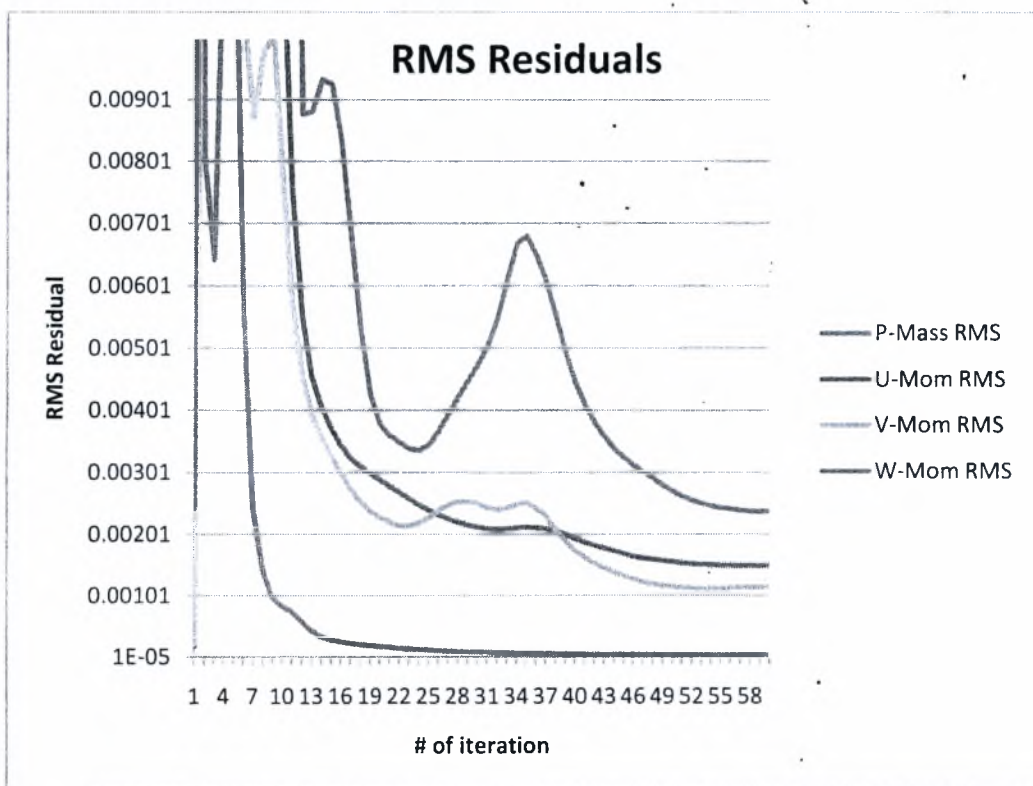
Η παροχή του αέρα εισόδου στον όγκο ελέγχου είναι λογικό να άλλαξε εξαιτίας της νέας θέσης του ανεμιστήρα. Η είσοδος του ανεμιστήρα τώρα είναι πιο ελεύθερη, ανοιχτή στο περιβάλλον. Δεν περιορίζεται από καλύμματα. Επομένως είναι λογικό, η ποσότητα του αέρα προσαγωγής να αυξήθηκε.

5.2.2.3.2 Οριακές συνθήκες επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας λέβητα

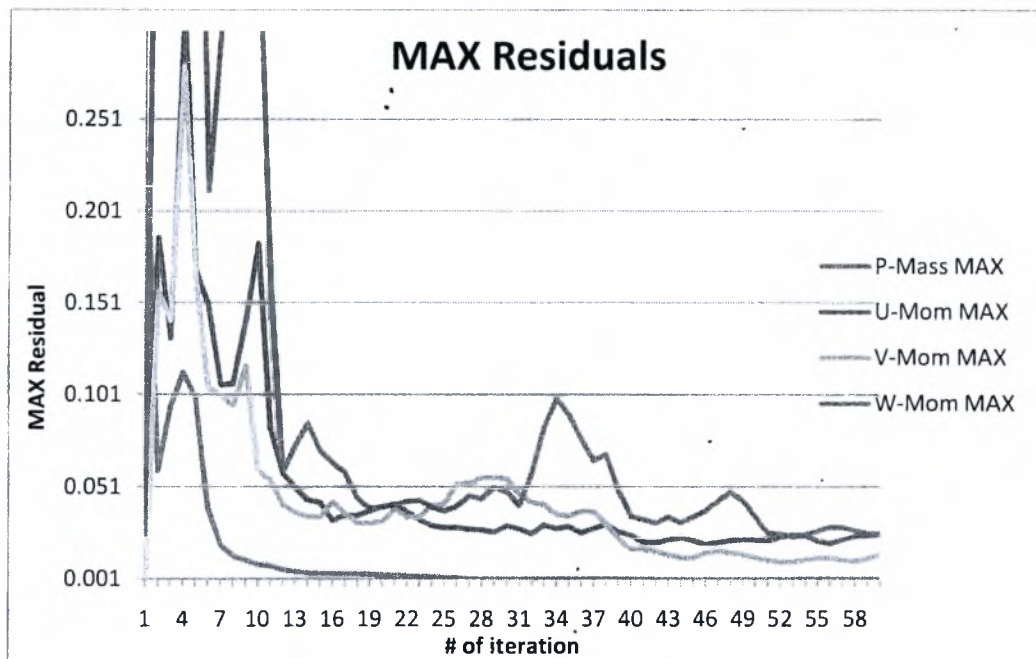
Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για τον ορισμό των οριακών συνθηκών είναι ίδια με αυτή των προηγούμενων μοντελοποιήσεων. Οι περιοχές στις οποίες έχει χωριστεί ο θάλαμος καύσης παρουσιάστηκαν στην **Εικόνα 43** ενώ οι θερμοκρασίες των επιμέρους parts περιέχονται στον **Πίνακα 5**.

5.2.2.4 Επίλυση εξισώσεων

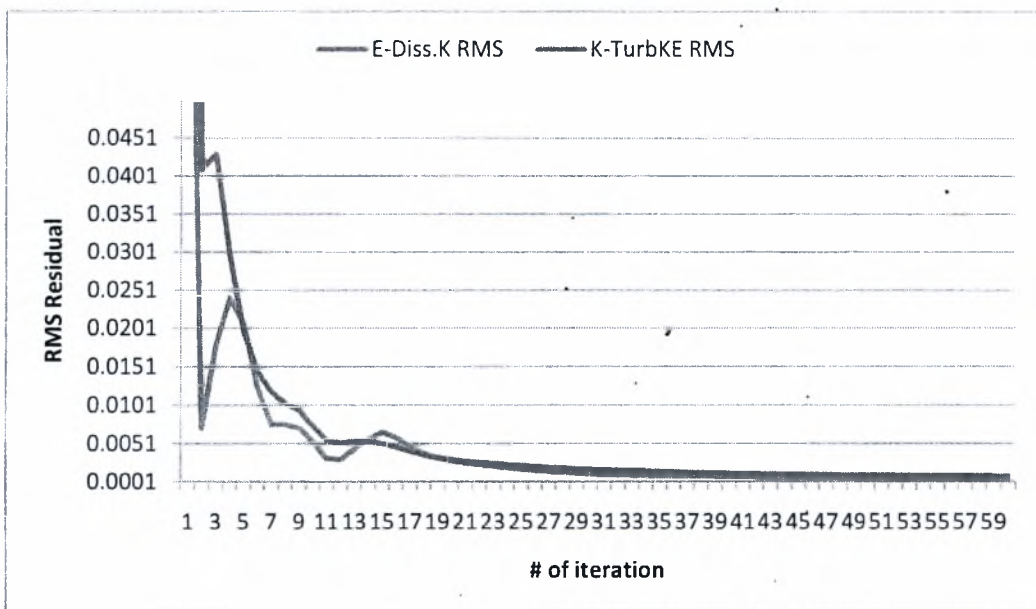
Σε αυτό το τμήμα της εργασίας παρουσιάζεται το χρονικό της σύγκλισης της δεύτερης μοντελοποίησης. Τα αποτελέσματα τα οποία φαίνονται στα **Σχήματα** που ακολουθούν είναι τα ίδια με τις άλλες δύο μοντελοποιήσεις, δηλαδή: η μάζα είναι η μόνη που ικανοποιεί το κριτήριο σύγκλισης και η τιμή στην οποία φθάνουν οι RMS τιμές των Residuals είναι $1.0 \cdot 10^{-5}$. Η ορμή στη X, Y και Z κατεύθυνση, η οποία είναι η κύρια ροή του προβλήματος και στην οποία λαμβάνουν χώρα όλα μελετώμενα φαινόμενα, δεν καταφέρνει μετά το πέρας των επαναλήψεων να ικανοποιήσει το επιθυμητό κριτήριο αλλά συγκλίνει και παραμένει σταθερή σε μια τιμή πολύ κοντά στην $1.0 \cdot 10^{-3}$. Τέλος, σύμφωνα με το **Σχήμα 23** η τύρβη έχει πλήρως μοντελοποιηθεί.



Σχήμα 21 Διάγραμμα των RMS τιμών των Residuals των κινηματικών ιδιοτήτων



Σχήμα 22 Διάγραμμα των MAX τιμών των Residuals των κινηματικών ιδιοτήτων



Σχήμα 23 Διάγραμμα των RMS τιμών των Residuals της τύρβης

Συγκρίνοντας τα χρονικά και των τριών μοντελοποιήσεων συμπεραίνουμε ότι στην τελευταία μοντελοποίηση η σύγκλιση των μεγεθών είναι καλύτερη και ταχύτερη. Δεν χρειάζεται πολλές επαναλήψεις για να φθάσει και να ισορροπήσει στην περιοχή κοντά στο κριτήριο σύγκλισης. Αυτό προκύπτει από τις μικρότερες τιμές των Residuals.

Τέλος, στα **Σχήματα 21 και 22** παρατηρείται ένα τοπικό peak των τιμών των Residuals της Y και Z-Ορμής. Αυτό εξηγείται ως αστάθεια σε εκείνο το σημείο της επίλυσης.

5.2.2.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

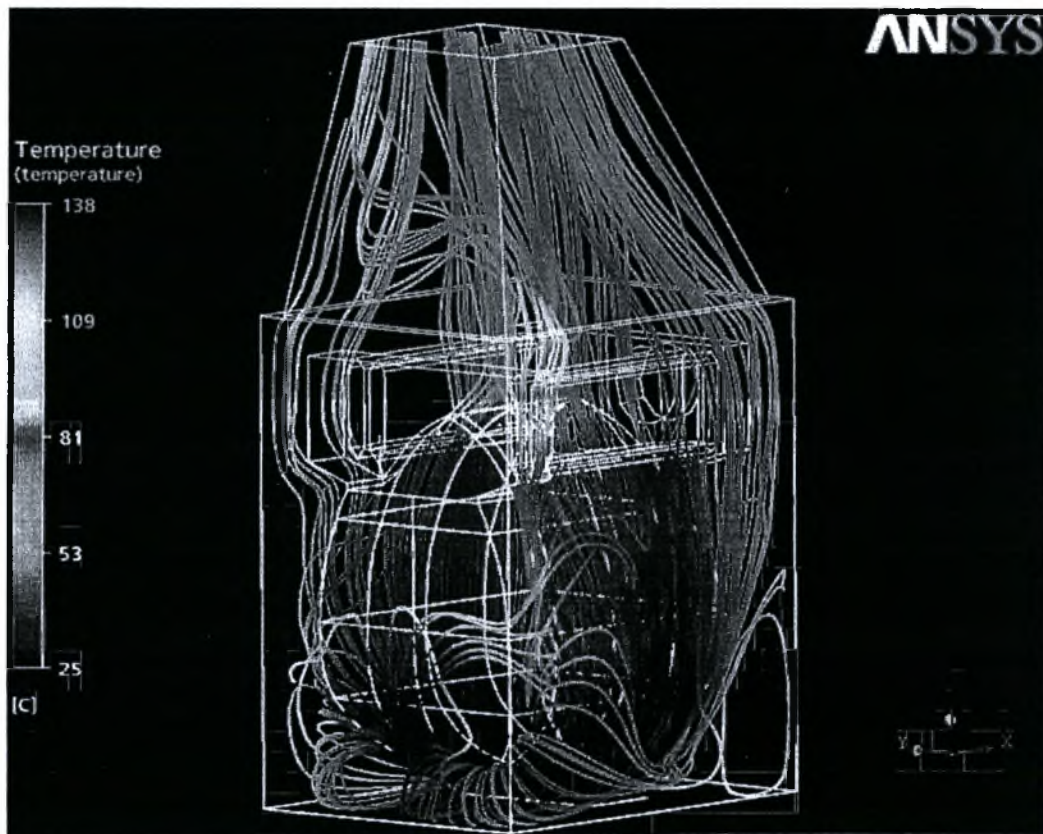
Στην **Εικόνα 52** φαίνεται το υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο.

Στην **Εικόνα 53** παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα στην έξοδο του όγκου ελέγχου (στο plenum).

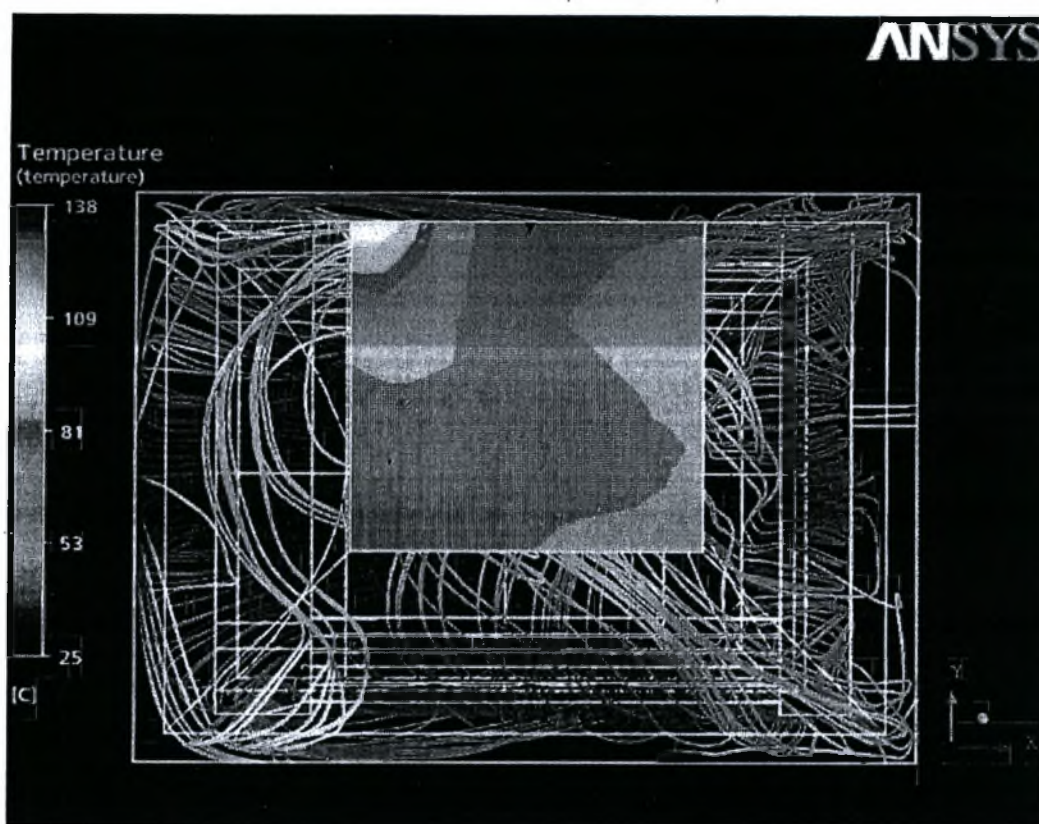
Στην **Εικόνα 54** παρουσιάζονται οι γραμμές ροής και το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα που περιρρέει τα τούμπα καυσαερίων.

Στην **Εικόνα 55** φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων στο εσωτερικό μεταξύ επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του λέβητα, και των καλυμμάτων (περιοχή ροής του αέρα ταρσοθέρμανσης).

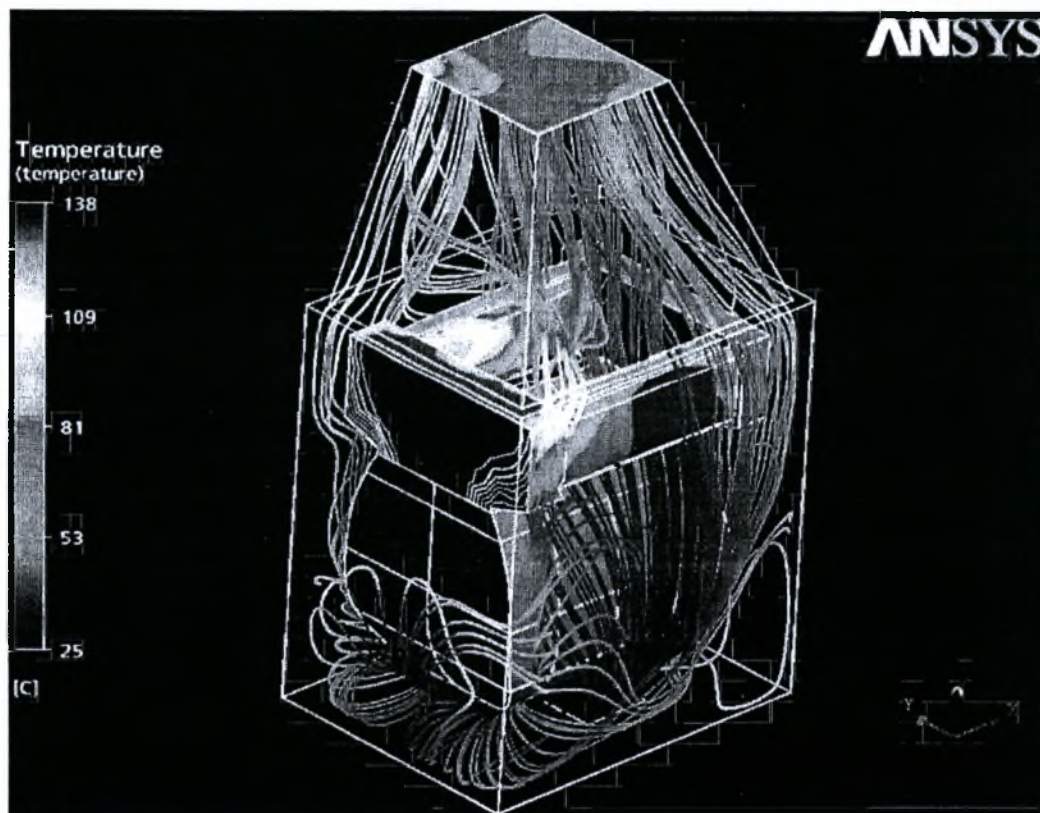
Στην **Εικόνα 56** παρουσιάζεται η σύγκριση των πεδίων ροής ενθαλπίας των μέχρι στιγμής μοντελοποιήσεων στην έξοδο του plenum.



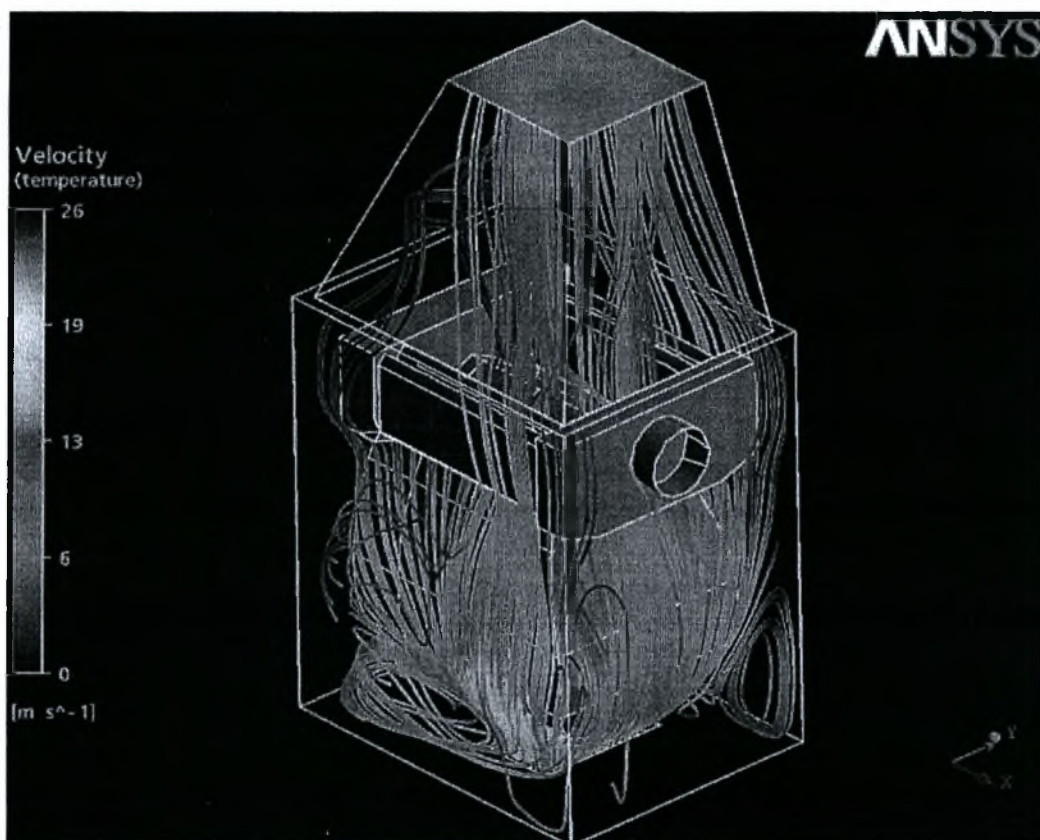
Εικόνα 52 Υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο



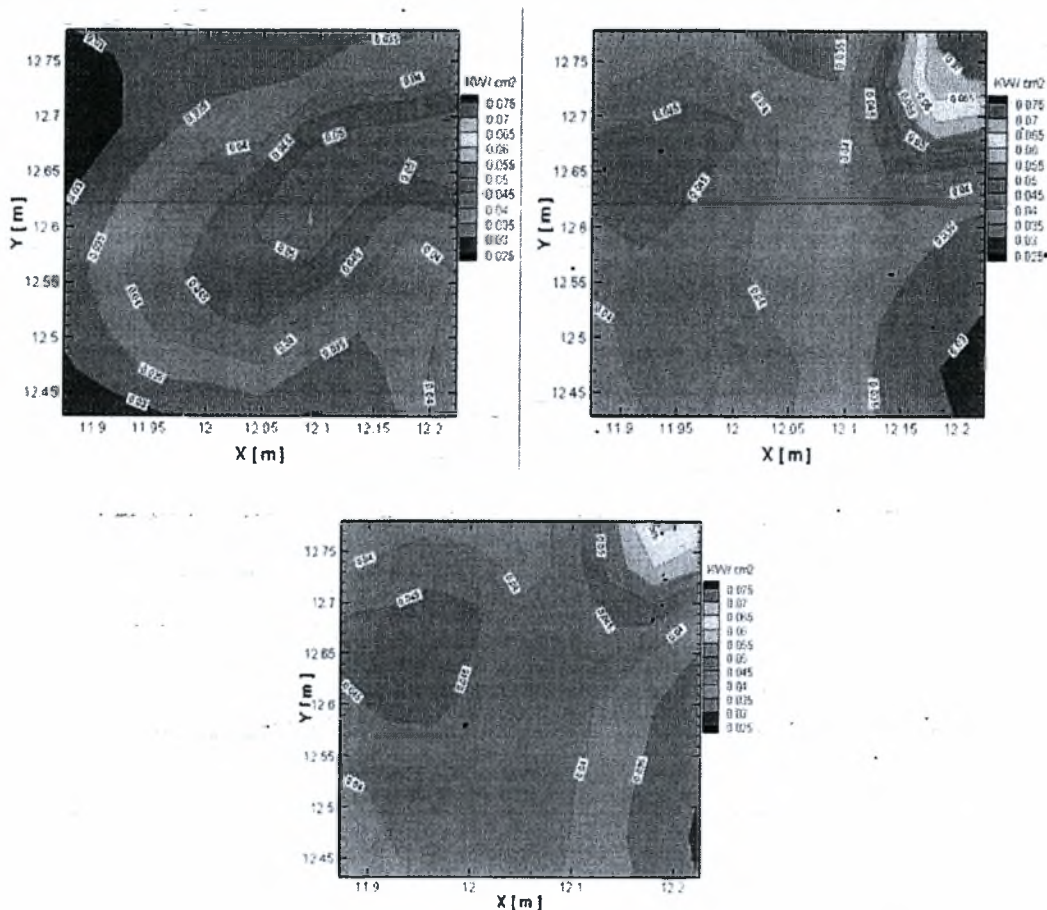
Εικόνα 53 Υπολογισμένο πεδίο θερμοκρασιών στην έξοδο του riserum και στις ροϊκές γραμμές στο εσωτερικό



Εικόνα 54 Ροϊκό πεδίο και κατανομή θερμοκρασίας στον εναλλάκτη θερμότητας



Εικόνα 55 Πεδίο ταχυτήτων του αέρα αεροθέρμανσης στο εσωτερικό του λέβητα



Εικόνα 56 Σύγκριση πεδίων ροής ενθαλπίας, (θερμοροής) στην έξοδο του plenum. Αριστερά, θέση αναφοράς, (reference case), δεξιά: εικονικά μετατοπισμένη θέση εισόδου αέρα από ανεμιστήρα, κάτω: πραγματικά μετατοπισμένη θέση εισόδου αέρα από ανεμιστήρα

5.2.2.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τις **Εικόνες** της τελευταίας μοντελοποίησης συμπεραίνουμε ότι η θερμοκρασιακή κατανομή στην έξοδο του plenum, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 53**, είναι ομοιόμορφη. Δεν εμφανίζεται θερμοκρασιακή διαβάθμιση. Στο μεγαλύτερο μέρος της διατομής εξόδου η θερμοκρασία του αέρα είναι $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η υπολογιζόμενη ροή ενθαλπίας ανά επιφάνεια element είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, όπως δείχνει η **Εικόνα 56**. Επιπλέον, στις θερμοκρασιακές κατανομές των διατομών εξόδου και των προηγούμενων μοντελοποιήσεων παρατηρείται η εμφάνιση των μέγιστων υπολογιζόμενων θερμοκρασιών στο αριστερό άκρο αυτών, γεγονός το οποίο οφείλεται στις κατανομές θερμοκρασιών και ταχυτήτων σε εκείνο το τμήμα του όγκου ελέγχου.

Ακόμη, πρέπει να αναφερθούμε και στο υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο. Στη reference case οι περισσότερες ροϊκές γραμμές έρχονται σε επαφή μόνο με ένα τμήμα του εναλλάκτη θερμότητας σε αντίθεση με τη shifted case στην οποία τον περιρρέουν.

5.2.3 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας

Για τον έλεγχο ικανοποίησης των ισοζυγίων ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στο 3.3. Έπειτα από επεξεργασία των απαραίτητων αρχείων, το ισοζύγιο μάζας ικανοποιήθηκε: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = 1.0 \text{ kg/s}$

Ο έλεγχος ικανοποίησης του ισοζυγίου ενέργειας παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\dot{Q}_{burner} = \dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = \dot{Q}_{net} + \dot{Q}_{plenum} + \dot{Q}_{exhaust}$$

$$\dot{Q}_{burner} = 33.36 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = 29.562 \text{ kW} + 0.187 \text{ kW} + 3.77 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{boiler} + \dot{Q}_{exhaust} = 33.519 \text{ kW}$$

Ο υπολογιζόμενος βαθμός απόδοσης του λέβητα είναι:

$$n_k = \frac{\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_{burner}}$$

$$n_k = \frac{29.562 \text{ kW}}{33.36 \text{ kW}} = 0.89$$

ή

$$n_k = 89\%$$

Παρατηρούμε ότι το ισοζύγιο ενέργειας σε αντίθεση με το ισοζύγιο μάζας δεν ικανοποιείται απόλυτα. Υπάρχει σφάλμα 0.48 %, το οποίο είναι πολύ μικρό.

5.2.4 Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών

Γενικά, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω συνοπτικές παρατηρήσεις όσον αφορά τη σύγκριση μετρημένων – υπολογισμένων πεδίων ταχυτήτων – θερμοκρασιών:

Η κατανομή θερμοκρασίας στην έξοδο του plenum εξόδου προς τον αεραγωγό, που μετρήθηκε με τα θερμοστοιχεία, οι τιμές των οποίων παρουσιάστηκαν στο τμήμα 5.2.1.3 της παρούσας εργασίας, δεν επιβεβαιώνει με ακρίβεια τις υπολογιζόμενες θερμοκρασίες οι οποίες παρουσιάζονται στην **Εικόνα 53**. Παρόλα αυτά, το μοντέλο εύστοχα προβλέπει ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα στην αριστερή πλευρά του plenum είναι υψηλότερη. Να σημειωθεί εδώ ότι η προσεκτική μελέτη των καταγραφών των θερμοστοιχείων δείχνει κάποιες διακυμάνσεις που φανερώνουν την ύπαρξη δινών. Η μεταβατική συμπεριφορά της κατανομής θερμοκρασιών και ταχυτήτων μέσα στο plenum προφανώς δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια με τη steady-state παραδοχή. Όμως η ακρίβεια μοντελοποίησης που επιτυγχάνεται είναι απολύτως ικανοποιητική για υποστήριξη της μεθοδολογίας σχεδιασμού.

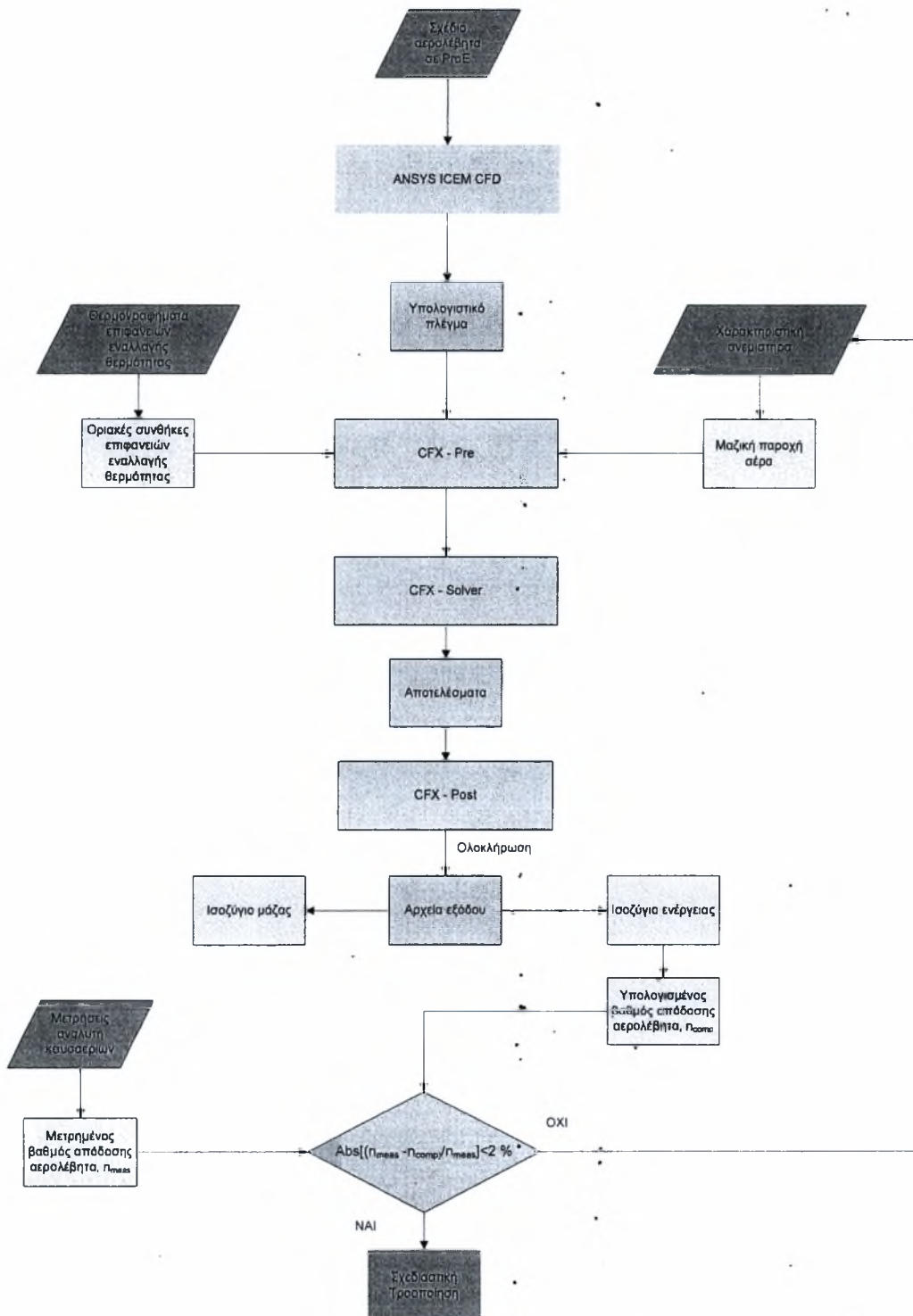
Τέλος, ο βαθμός απόδοσης του λέβητα ο οποίος μετρήθηκε με τον αναλυτή καυσαερίων MRU Vario Plus Industrial συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τον υπολογιζόμενο βαθμό απόδοσης διότι το σφάλμα που εμφανίζεται είναι πολύ μικρό, 1 %.

5.2.5 Σύγκριση των δύο τελευταίων μοντελοποιήσεων

Ο στόχος της τελευταίας μοντελοποίησης ήταν η επαλήθευση ή όχι της δεύτερης κατά σειρά μοντελοποίησης, στην οποία χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα των θερμογραφημάτων της reference case και προέκυψαν αποτελέσματα πολύ αισιόδοξα. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν υπάρχει επαλήθευση. Υπάρχει απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο και από το μεγάλο σφάλμα που εμφανίστηκε στο ισοζύγιο ενέργειας. Τελικά η μη επαλήθευση οφείλεται στα διαφορετικά θερμογραφήματα, δηλαδή το αναπτυσσόμενο θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας είναι διαφορετικό για κάθε case (reference και shifted).

6 Σύνοψη μεθοδολογίας επίλυσης και βελτιστοποίησης σχεδιασμού

Λογικό διάγραμμα reference case



Συνοπτική παρουσίαση των μοντελοποιήσεων

Αρχικά, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία επίλυσης για την reference case και

επαληθεύτηκε. Το κριτήριο είναι:
$$\left| \frac{n_{meas} - n_{comp}}{n_{meas}} \right| \leq 2$$

Στη συνέχεια, με υπόθεση μικρή μεταβολή της κατανομής θερμοκρασίας τοιχωμάτων, εφαρμόστηκε πάλι η μεθοδολογία επίλυσης με μοναδική τροποποίηση τη θέση της διατομής εισόδου. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ αισιόδοξα, βαθμός απόδοσης 94.6 %. Τα ισοζύγια δεν επαληθεύτηκαν.

Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία επίλυσης της shifted case. (μετρήσεις, μοντελοποίηση, σύγκριση μετρήσεων υπολογισμών ισοζύγια μάζας και ενέργειας). Τελικά επαληθεύτηκε.

7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, επιδείχτηκε επιτυχής συνδυασμός της χρήσης εμπορικού κώδικα CFD με τεχνική υπέρυθρης θερμογραφίας, με απώτερο στόχο την υποστήριξη βελτιώσεων στο σχεδιασμό μικρού αερολέβητα. Αποδείχτηκε ότι είναι εφικτή η εκτίμηση των αναμενόμενων βελτιώσεων της απόδοσης του λέβητα, για μικρές μεταβολές στο σχεδιασμό του.

Η σχεδιαστική μεταβολή η οποία μελετήθηκε ως case study, είναι η μετατόπιση της θυρίδας εξόδου (και της θέσης) του ανεμιστήρα κατά 10 cm αριστερά από την αρχική του θέση.

Έπειτα από την διεξαγωγή μετρήσεων επαλήθευσης και των δύο εναλλακτικών γεωμετριών, τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα ακόλουθα:

Η θερμοκρασία των καυσαερίων παρουσίασε μείωση της τάξης των 16 °C, από 261 °C στη reference case στους 245 °C στη shifted case, με αποτέλεσμα και ο βαθμός απόδοσης του λέβητα να αυξηθεί από 87.3 % σε 88.1% αντίστοιχα.

Βέβαια, η αύξηση βαθμού απόδοσης που επιτεύχθηκε τελικά, υπολείπονταν σημαντικά από την αρχική πρόβλεψη του ANSYS, πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι η τάση αύξησης των κινητικών της μετάδοσης θερμότητας που δημιουργείται από τη νέα κατανομή ταχυτήτων, συγκρατείται από τα ισοζύγια ενέργειας.

Γενικότερα, από τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το υπολογιζόμενο ροϊκό πεδίο και για τις κατανομές θερμοκρασιών και ταχυτήτων σε χαρακτηριστικές διατομές του όγκου ελέγχου.

Παρατηρήθηκε επίσης συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμών και ικανοποίηση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας και στα δυο μελετώμενα προβλήματα. Επομένως τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Τέλος, η επεξεργασία των αρχείων εξόδου έδειξε μία σημαντική αναμενόμενη βελτίωση στην ωφέλιμη ισχύ του λέβητα από 28.977 σε 29.562 kW. Με αποτέλεσμα και ο βαθμός απόδοσης να βελτιώνεται σημαντικά από 86.9 % σε 89% με την προτεινόμενη σχεδιαστική τροποποίηση.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η θέση εισόδου δεν έχει βελτιστοποιηθεί επαρκώς από τον κατασκευαστή του αερολέβητα.

8 Προτάσεις για το μέλλον

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από την επιτυχή ανάπτυξη και εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας υποστήριξης σχεδιασμού, επόμενο βήμα θα είναι η συνεργασία με τον κατασκευαστή στην ανάπτυξη βελτιωμένων πρωτοτύπων, τα οποία θα αξιολογηθούν εργαστηριακά, *in situ* ή στο ΕΘΟΜ. Τα πρωτότυπα αυτά, ενδεχόμενα θα συμπεριλαμβάνουν και αερολέβητες φυσικού αερίου, με δυνατότητα συμπύκνωσης υδρατμών του καυσαερίου για μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης (condensing furnaces).

9 Βιβλιογραφία

1. Recknagel and Sprenger, *Heizung + Klimatechnik*. 1995: R. Oldenbourg Verlag.
2. Kerch, R., *Hot air furnace, US Patent 4,215,669*. 1978: USA.
3. Tallman, W.R., S.C. McDevitt, and W.H. Delancey, *Gas-fired condensing mode furnace, US Patent 4,515,145*. 1985.
4. Huggins, G.J. and L.W. Holmes, *Multistage warm air furnace with single stage thermostat and return air sensor and method of operating same, US Patent 6,925,999* 2005
5. Schonberger, M.L., *Hot air furnace, US Patent.6,923,173*. 2005.
6. Kujawa, M. and T.J. Waterman, *Air intake for furnace, US Patent 5,313,930* 1994.
7. Asotani, T., et al., *Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD*. Fuel, 2008. **87**(4-5): p. 482-490.
8. Diez, L.I., C. Cortes, and J. Pallares, *Numerical investigation of NOx emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation*. Fuel, 2008. **87**(7): p. 1259-1269.
9. Gomez, A., N. Fueyo, and L.I. Diez, *Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in the convective zone of a power-generation boiler*. Applied Thermal Engineering, 2008. **28**(5-6): p. 532-546.
10. He, B., et al., *Computational fluid dynamics based retrofits to reheater panel overheating of No. 3 boiler of Dagang Power Plant*. Computers & Fluids, 2007. **36**(2): p. 435-444.
11. Pallares, J., I. Arauzo, and A. Williams, *Integration of CFD codes and advanced combustion models for quantitative burnout determination*. Fuel, 2007. **86**(15): p. 2283-2290.
12. Ravelli, S., A. Perdichizzi, and G. Barigozzi, *Description, applications and numerical modelling of bubbling fluidized bed combustion in waste-to-energy plants*. Progress in Energy and Combustion Science, 2008. **34**(2): p. 224-253.
13. *DIN 4702 Teil 1: Heizkessel: Begriffe, heiztechnische Anforderungen, Pruefung, Kennzeichnung*, DIN, Editor. 1990.
14. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IV: Heating Boilers* 2004.
15. *CAN/CSA B140.4-04 Oil-Fired Warm Air Furnaces, Includes Updates No. 1 and No. 2* 2007, Canadian Standards Association
16. *DIN EN 303-1, DIN EN 303-2: Heating boilers with forced draught burners - Part 1: Terminology, general requirements, testing and marking, Part 2: Special requirements for boilers with atomizing oil burners*. 1998 (includes amendment A1:2003).
17. Ποντικάκης, Γ., *Σχεδιομελέτη αερολέβητα 35,000 kcal/h*. 2006: Θεσσαλονίκη.
18. ANSYS. *ANSYS CFX Computational Fluid Dynamics software*. 2008 [cited 30.1.2008]; Available from: <http://www.ansys.com/products/cfx.asp>.
19. Πασπαλάς, Κ., *Καυστήρες - Λέβητες*. 2001, Θεσσαλονίκη: Σύλλογος Μηχανολόγων - Ηλεκτρολόγων Β. Ελλάδος, TEE-TKM.
20. Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1988, New York: McGraw - Hill.
21. GROUP, A. *Burners and heating devices*. 2008 [cited 20.2.2008]; Available from: www.apengroup.com.

22. Goodman. *GMV95 Gas Furnace: 95% AFUE, Multi-Position, Two-Stage, Variable-Speed* 2008 [cited 30.1.2008]; Available from: <http://www.goodmanmfg.com/Home/Products/tabid/53/Default.aspx>.
23. Freedom. *Oil and gas air furnaces*. 2008 [cited 15.1.2008]; Available from: <http://www.americanstandardair.com/homeowner/products/Furnaces/>.
24. Bryant. *Furnaces for Split Systems*. 2008 [cited 15.1.2008]; Available from: <http://www.bryant.com/products/furnaces/index.shtml>.
25. PTC. *ProEngineer Wildfire 3D CAD software*. 2008 [cited 30.1.2008]; Available from: <http://www.ptc.com/>.
26. Tecnifan. *Direct Drive Centrifugal Fans characteristics*. 2008 [cited 30.1.2008]; Available from: <http://www.tecnifan.es/>.
27. MRU. *MRU Vario Plus Industrial semi-continuous multi-gas analyzer*. 2008 [cited 30.1.2008]; Available from: <http://www.mru.de/>.
28. Flir, *ThermaCam Researcher Professional 2.8 SR-3*. 2007.
29. Syred, N., *A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems*. Energy and Combustion Science, 2006. **32**: p. 93-161.
30. TSI. *Velocicalc Air Velocity Meters*. 2008 [cited 30.1.2008]; Available from: www.tsi.com.
31. *NI Labview graphical development of scalable test, measurement, and control applications*. 2008, National Instruments [cited 30.1.2008]; Available from: <http://www.ni.com/>.
32. MRU. *Spectra 1600GL handheld gas analyzer*. 2008 [cited 20.02.2008]; Available from: <http://www.mru.de/>.

10 Παραρτήματα

10.1 Πρωτόκολλα μετρήσεων

Πίνακας 6 Κρύος Αέρας

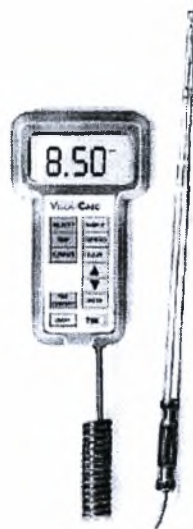
Μέτρηση ταχύτητας αέρα σε στόμια κλιματισμού							
Κρύος αέρας							
Λέβητας: 30000 kcal/hr				ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 23/11/2007			
Καυστήρας: Apen Group				ΩΡΑ: 09:35			
Τύπος Καυσίμου: Πετρέλαιο Θέρμανσης				ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ: 1 atm			
				ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ: 46%			
				ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ: 21.5 °C			
ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ							
α/α	x [%]	y [%]	ταχύτητα [m/s]	Μέση ταχύτητα [m/s]	Μέγιστη ταχύτητα [m/s]	Ελάχιστη ταχύτητα [m/s]	
1	0	0	0.94	2.27	5.1	0.08	
2	25	0	2.01				
3	50	0	0.7				
4	75	0	0.95				
5	100	0	0.2				
6	0	25	4.4				
7	25	25	5.05				
8	50	25	3.75				
9	75	25	2.6				
10	100	25	0.32				
11	0	50	4.3				
12	25	50	5.1				
13	50	50	4.3				
14	75	50	2.8				
15	100	50	0.31				
16	0	75	5				
17	25	75	4.88				
18	50	75	4.45				
19	75	75	2.45				
20	100	75	0.27				
21	0	100	0.3				
22	25	100	0.9				
23	50	100	0.41				
24	75	100	0.23				
25	100	100	0.08				

Πίνακας 7 Θερμός Αέρας

Μέτρηση ταχύτητας αέρα σε στόμια κλιματισμού							
Θερμός αέρας							
Λέβητας: 30000 kcal/hr				ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 23/11/2007			
Καυστήρας: Apen Group				ΩΡΑ:10:08			
Τύπος Καυσίμου: Πετρέλαιο Θέρμανσης				ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ: 1 atm			
				ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ: 46%			
				ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ: 21.5 °C			
ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ							
a/a	x [%]	y [%]	ταχύτητα [m/s]	Θερμοκρασία [oC]	Μέση ταχύτητα [m/s]	Μέγιστη ταχύτητα [m/s]	Ελάχιστη ταχύτητα [m/s]
1	0	0	0.8	37	2.20	4.65	0.20
2	25	0	2.02	40			
3	50	0	0.72	39	Μέση Θερμοκρασία [°C]	Μέγιστη Θερμοκρασία [°C]	Ελάχιστη Θερμοκρασία [°C]
4	75	0	0.95	37.6	44.0	50.6	36.4
5	100	0	0.3	36.4			
6	0	25	4.33	44			
7	25	25	4.45	50.4			
8	50	25	3.22	47.8			
9	75	25	3.12	46.1			
10	100	25	0.52	37.6			
11	0	50	4.12	43.2			
12	25	50	4.25	46			
13	50	50	3.92	50.6			
14	75	50	2.94	49.8			
15	100	50	0.52	47.2			
16	0	75	4.65	45.4			
17	25	75	4.56	50.6			
18	50	75	4.09	49.7			
19	75	75	2.47	46.3			
20	100	75	0.42	44			
21	0	100	0.5	42.7			
22	25	100	0.96	43.5			
23	50	100	0.58	42			
24	75	100	0.4	41.5			
25	100	100	0.2	40.8			

10.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά οργάνων μέτρησης

10.2.1 Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot wire anemometer)



VELOCICALC[®] Air Velocity Meters

Models 8345 and 8346

TSI's VelociCalc Air Velocity Meters are easy to use from the first time you pick them up. The meters measure velocity and temperature, and with a few simple keystrokes the calculate flowrate, perform multi-value averaging, and determine minimum and maximum readings.

The VelociCalc Features

- Extended velocity range of 0 to 30 m/s
- Temperature range of -17.8 to 93.3°C
- Easy-to-read digital display
- Variable time constant modes available for a steady display when measuring fluctuating flows
- 94.0 cm telescoping probe with etched length marks to make duct traverse measurements easier
- Sampling function allows for easy recording of multiple measuring points
- Statistics function can display average, maximum and minimum values, and the number of recorded samples
- Flowrate feature allows for simple and quick calculations of volumetric flowrate when the user inputs the duct shape and size
- Optional portable printer provides a hard copy documentation of your readings
- Includes a battery check that monitors battery level to ensure accurate readings
- NIST[®]-traceable calibration certificate

Applications

- HVAC duct measurements
- Fume hood face velocity tests
- Clean room studies
- Wind tunnel work
- Filter face velocity measurements
- Indoor Air Quality tests

Models 8345 and 8346 VelociCalc Specifications

Velocity (all models):

Range: 0 to 30 m/s (0 to 6,000 ft/min)
Accuracy^{1,2}: 3.0% of reading or ± 0.15 m/s (± 3 ft/min) whichever is greater

Temperature (all models):

Range: -17.8 to 93.3°C (0 to 200°F)
Resolution: 0.1°C (0.1°F)
Accuracy³: ± 0.3 °C (± 0.5 °F)

Instrument Temperature Range (all models):

Operating (Electronics): 5 to 45°C (40 to 113°F)
Operating (Probe): -17.8 to 93.3°C (0 to 200°F)
Storage: -30 to 90°C (-22 to 194°F)

Volumetric Flowrate (all models):

Range⁴: 0.1 to 195,000 l/s, 0.0424 to 702,000 m³/hr,
0.2 to 2,700,000 ft³/min

Duct Size (all models):

Range: 1 to 100 cm in increments of 0.5 cm, 100 to 255 cm in increments of 1 cm
(1 to 100 inches in increments of 0.5 inches, 100 to 255 inches in increments of 1 inch)

Averaging Capability (all models):

Range: Up to 255 values each of velocity, temperature

Time Constant (all models):

Range: Adjustable from 1 to 20 seconds

Response Time (all models):

To velocity: 200 msec
To temperature: 8 seconds

Product Data Sheet

External Meter Dimensions (all models):

Size Measurements: 10 cm x 16.8 cm x 3.8 cm (3.9 in. x 6.6 in. x 1.5 in.)

Meter Probe Dimensions (Model 8345):

Probe Length: 94.0 cm (37 in.) telescopic

Probe Diameter of Tip: 6.0 mm (0.236 in.)

Probe Diameter of Base: 10.03 in. (0.395 in.)

Meter Probe Dimensions (Model 8346):

Probe Length: 94.0cm (37 in.) telescopic articulating

Probe Diameter of Tip: 6.0 mm (0.236 in.)

Probe Diameter of Base: 10.03mm. (0.395 in.)

Meter Weight Dimensions (all models):

Weight (with batteries) 0.5 kg (1.1 lbs)

Meter Display Dimensions (all models):

Display: 4-digit LCD, 15 mm (0.6 in.) digit height

Power (all models):

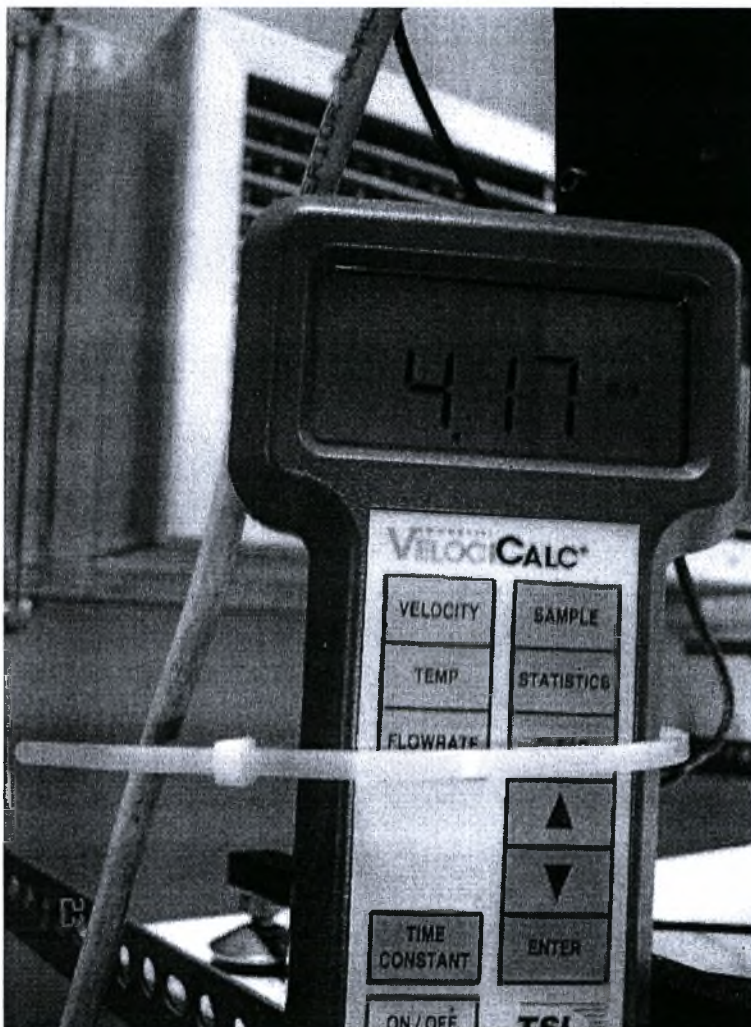
Requirements: Four AA-size batteries (included) or AC adapter (optional)

Printer Interface:

Type: Serial


Baud Rate: 1200

	Velocity	Temperature	Volumetric Flowrate	Averaging Capability	Variable Time Constant	Articulating Probe	Printer Output	NIST Calibration Certificate
8345	X	X	X	X	X		X	X
8346	X	X	X	X	X	X	X	X



Εικόνα 57 Hot wire anemometer

10.2.2 Κάμερα Υπέρυθρης Θερμογραφίας, ThermaCAM P45

 The global leader in infrared cameras	
ThermaCAM™ P45 High performance portable infrared camera	
	<ul style="list-style-type: none"> • IMAGING PERFORMANCE • IMAGE PRESENTATION • MEASUREMENT • IMAGE STORAGE • LENSES (OPTIONAL) • SYSTEM STATUS INDICATOR • BATTERY SYSTEM • ENVIRONMENTAL SPECIFICATION • PHYSICAL CHARACTERISTICS • INTERFACES • Laser LocatIR
IMAGING PERFORMANCE	
Field of view/min focus distance	24°x18° /0.3 m (with 35 mm lens)
Spatial resolution (IFOV)	1.3 mrad
Thermal sensitivity	0.08°C at 30°C
Image frequency	50/60 Hz non-interlaced
Focus	Automatic or manual
Electronic zoom function	2.4 interpolating
Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5 to 13μm
Digital image enhancement	Standard
IMAGE PRESENTATION	
Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video and S- video
Viewfinder	Built-in, high-resolution color LCD (TFT)
External display	4" LCD with integrated remote control. (optional)

MEASUREMENT	
Temperature range	-40°C to +500°C, (-40°F to +932°F) Up to +1500°C (2732°F) or +2000°C (3632°F), optional
Accuracy	±2°C, ±2% of reading
Measurement mode	Spot/manual (up to 10 movable), Area (circle (5) and/or box (5), up to 10 movable), isotherm (2), line profile, Delta T
Atmospheric transmission correction	Automatic, based on inputs for distance, atmospheric temperature and relative humidity
Optics transmission correction	Automatic, based on signals from internal sensors
Emissivity correction	Variable from 0.1 to 1.0 or select from listings in pre-defined materials list
Reflected ambient temperature correction	Automatic, based on input of reflected temperature
External optics/window correction	Automatic, based on input of optics/window transmission and temperature
IMAGE STORAGE	
Type	Removable Flash-card (128 MB)
File formats	Standard JPEG, 14 bit measurement data included
Voice annotation of images	30 sec. of digital voice "clip" stored together with the image
LENSES (OPTIONAL)	
Field of view/min focus distance	7°x5.3°/4 m (with 122 mm lens) 12°x 9°/1.2 m (with 71 mm lens) 45°x 34°/0.1 m (with 18 mm lens) 80°x 60°/0.1 m (with 9 mm lens) 200µm close-up (64 mm x 48

	mm/150 mm)
	100 μ m close-up (34 mm x 25 mm/80 mm)
	50 μ m close-up (15 mm x 11 mm/19mm)
	18 μ m close-up (6 mm x 4 mm/7mm)
Lens identification	Automatic
SYSTEM STATUS INDICATOR	
LCD Display	Shows status of battery and storage media. Indication of power, communication and storage modes
BATTERY SYSTEM	
Type	Li-Ion, rechargeable, field replaceable
Operating time	2 hours continuous operation
Charging system	in camera (AC adapter or 12 V from car) or 2 bay intelligent charger
External power operation	AC adapter 110/220 V AC, 50/60 Hz or 12 V from car (cable with Std plug: optional)
Power saving	Automatic shutdown and sleep mode (user selectable)
ENVIRONMENTAL SPECIFICATION	
Operating temperature range	-15°C to +50°C (5°F to 122°F)
Storage temperature range	-40°C to +70°C (-40°F to 158°F)
Humidity	Operating and storage 10% to 95%, non-condensing
Encapsulation	IP 54 IEC 529
Shock	Operational: 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational: 2G, IEC 68-2-6
PHYSICAL CHARACTERISTICS	

Weight	1.4 kg incl. Battery 1.2 kg excluding battery
Size	100mm x 120mm x 220mm (3.9"x4.7"x8.7")
Tripod mounting	1/4" – 20
INTERFACES	
USB / RS-232	Image, measurement, voice transfer to PC
Laser LocatIR	
Classification	Classe 2
Type	Diode laser semi-conducteur AlGaInP : 1mW/635.nm red
Back to top	

10.2.3 Αναλυτής καυσαερίων MRU Vario plus industrial

STANDARD SCOPE OF DELIVERY

- Automatic selftest of soft- and hardware functions
- Large, high-contrast, illuminated graphical display
- All measuring data at a glance
- Integrated, electrical peltiercooler unit
- Automatic condensate pump
- Battery and mains power operation
- Fuel types user selectable
- Reference oxygen user selectable
- Automatic print- and data storage program
- RS 232 to PC
- Internal measuring data storage for approx. 2.400 measuring data
- CO-sensor purge by means of a programable CO shut-off valve
- Integrated high-speed thermo printer
- Automatic interval measurement program with graphical print-out
- Automatic zero calibration by means of a integrated solenoid valve
- Measuring data visualisation program

TECHNICAL DATA

Measuring Ranges

CO (electrochemical)	0 ... 10.000 ppm
CO (Infrared)	0 ... 10 %
CO ₂ (Infrared)	0 ... 20 %
O ₂ (electrochemical)	0 ... 21 %
NO (electrochemical)	0 ... 4.000 ppm
NO ₂ (Cat. Conv.)	0 ... 100/500 ppm
NO(x) (electrochemical)	0 ... 4.000 ppm
SO ₂ (electrochemical)	0 ... 4.000 ppm
HC (Infrared)	CH ₄ 0 ... 2,5 %
HC (Infrared)	C ₃ H ₈ 0 ... 5.000 ppm
H ₂ S (electrochemical)	0 ... 1.000 ppm
T-Gas	0 ... 1.700 °C
T-Air	0 ... 100 °C
Draft	± 20 hPa
Pressure Measuring Range	±100 hPa
1 differential pressure	

Calculated values

CO	unv. ppm, mg/m ³ , mg/x%O ₂ , ppm/x%O ₂ , mg/kWh
NO(x)	mg/m ³
Excess Air	1, ...
Dew Point	°C
Efficiency	0 ... 120 %
Losses	0 ... 99,9 %

Fuel types

All known fuel types. User defineable types.

Dimensions and other data

Dimensions	438 x 290 x 152 mm
Weight	appr. 6,5 kg
Operating Temperature	+5 ... +45°C
Storage Temperature	-20 ... +60°C
Power Supply	90 ... 240 VAC or 12

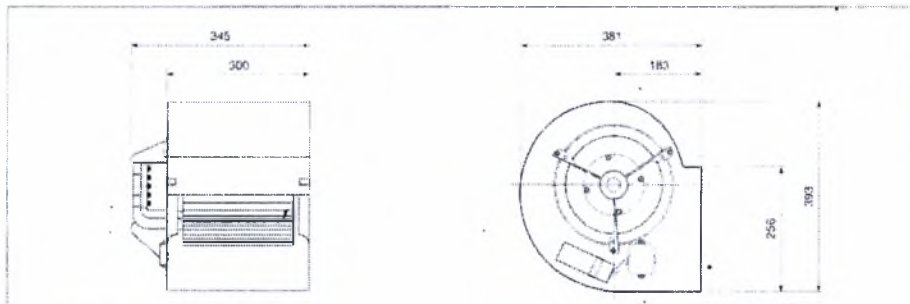
	VDC
Display	9 measuring values, illuminated
Analogue Signal	4 ... 20 mA
PC - Interface	RS 232/485



Εικόνα 58 MRU Vario plus industrial – Gas analyzer

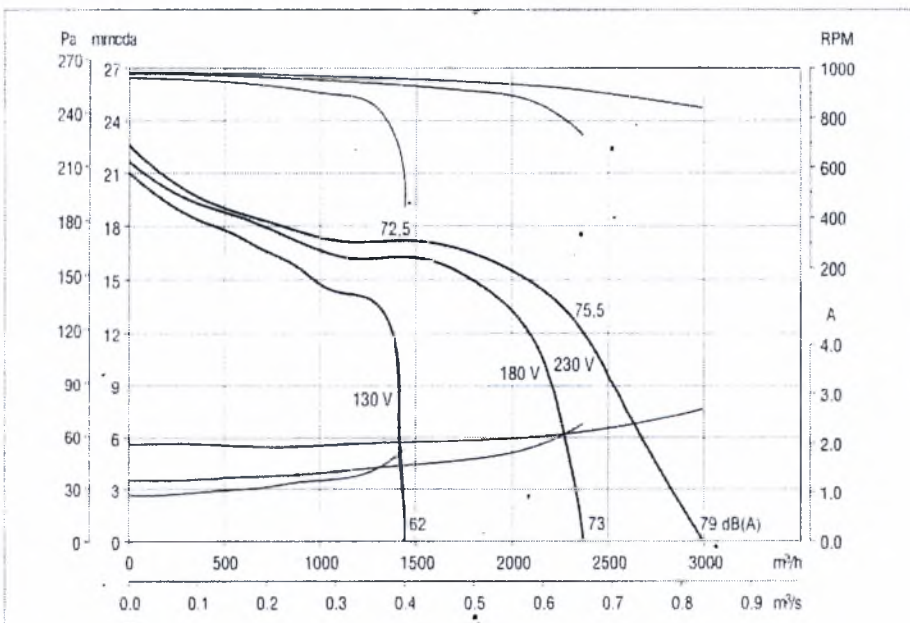
10.2.4 Χαρακτηριστική ανεμιστήρα, tecnifan

CBM-240/240 (9/9) - 1/3 CV (250 W)

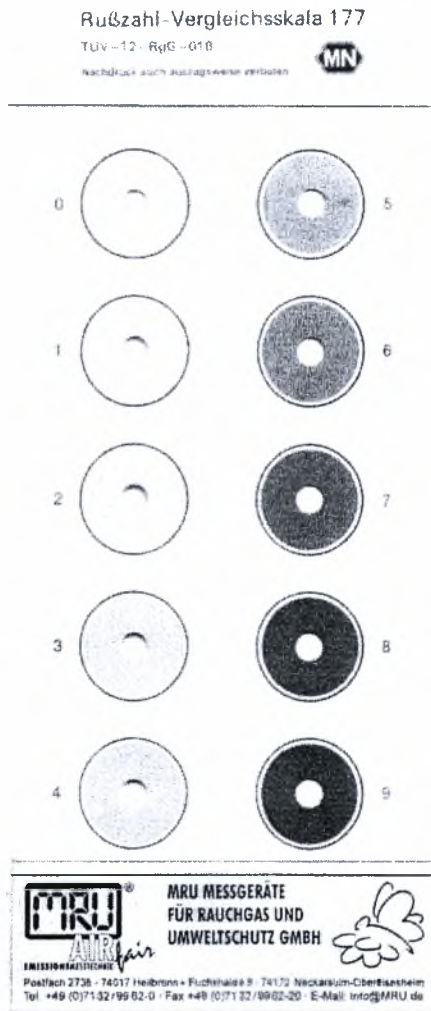


Tension Voltage	Monofásica 230 V Single-phase 230 V	Velocidad media Mean speed	900 RPM
Potencia motor Motor power	250 W	Tipo motor Motor type	IP10, clase B IP10, class B
Intensidad absorbida máxima Maximum absorbed current	2,7 A	Condensador Capacitor	10 µF/ 450 V
Temperatura del aire Air temperature	-20°C<T<+40°C	Peso Weight	17,0 kg

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
LwA dB(A)	29	20	12	7	4	6	12	19



10.2.5 Καρτέλα τιμών δείκτη αιθάλης



Εικόνα 59 Καρτέλα Bacharach

10.3 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας

Outlet		1.006												
X [m]	Y [m]	Z [m]	Mass Flow [kg]	Temp [K]	Cp [kJ/kg K]	Temp [oC]	m*Cp*Tout	Inlet	Y [m]	Z [m]	Mass Flow [kg]	Temp [K]	Temp [oC]	m*Cp*Tin
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.05E-02	319.30	46.15	-4.88E-01	46.15	-4.88E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.82E-02	2.94E+02	2.06E+01	3.75E-01
-1.19E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-3.22E-03	322.50	49.35	-1.60E-01	49.35	-1.60E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.82E-02	2.94E+02	2.02E+01	4.78E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-5.67E-03	320.40	47.25	-2.69E-01	47.25	-2.69E-01	1.30E+01	-6.40E+00	4.70E-03	2.98E+02	2.44E+01	1.15E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.53E-02	315.70	42.55	-6.53E-01	42.55	-6.53E-01	1.30E+01	-6.40E+00	5.63E-03	3.05E+02	3.19E+01	1.80E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-2.02E-02	314.50	41.35	-8.42E-01	41.35	-8.42E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.37E-02	2.96E+02	2.30E+01	3.17E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.69E-02	327.50	54.35	-9.22E-01	54.35	-9.22E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.69E-02	3.06E+02	3.24E+01	5.49E-01
-1.19E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-5.47E-03	325.90	52.75	-2.90E-01	52.75	-2.90E-01	1.20E+01	-6.40E+00	2.12E-02	2.97E+02	2.39E+01	5.07E-01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-6.89E-03	326.00	52.85	-3.67E-01	52.85	-3.67E-01	1.20E+01	-6.40E+00	4.24E-02	2.93E+02	2.00E+01	8.51E-01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-4.69E-03	325.30	52.15	-2.46E-01	52.15	-2.46E-01	1.20E+01	-6.40E+00	2.27E-02	2.95E+02	2.14E+01	4.87E-01
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.45E-02	326.70	53.55	-7.83E-01	53.55	-7.83E-01	1.20E+01	-6.40E+00	3.46E-02	2.93E+02	2.01E+01	6.98E-01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.67E-02	339.50	66.35	-1.11E+00	66.35	-1.11E+00	1.30E+01	-6.40E+00	7.79E-03	2.96E+02	2.27E+01	1.78E-01
-1.21E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-7.14E-03	326.90	53.75	-3.86E-01	53.75	-3.86E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.62E-02	2.95E+02	2.22E+01	3.61E-01
-1.22E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-6.18E-03	330.80	57.65	-3.58E-01	57.65	-3.58E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.03E-02	3.08E+02	3.48E+01	3.60E-01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.42E-02	327.60	54.45	-7.76E-01	54.45	-7.76E-01	1.30E+01	-6.40E+00	4.52E-02	2.93E+02	2.01E+01	9.11E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.20E-02	319.50	46.35	-5.61E-01	46.35	-5.61E-01	1.30E+01	-6.40E+00	4.18E-02	2.93E+02	2.00E+01	8.40E-01
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-3.99E-03	323.70	50.55	-2.03E-01	50.55	-2.03E-01	1.30E+01	-6.40E+00	3.67E-02	2.93E+02	2.00E+01	7.37E-01
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-4.22E-03	322.80	49.65	-2.11E-01	49.65	-2.11E-01	1.30E+01	-6.40E+00	2.82E-02	2.94E+02	2.10E+01	5.94E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.71E-03	325.90	52.75	-9.06E-02	52.75	-9.06E-02	1.30E+01	-6.40E+00	4.43E-02	2.93E+02	2.00E+01	8.90E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.08E-02	322.80	49.65	-5.38E-01	49.65	-5.38E-01	1.20E+01	-6.40E+00	1.76E-02	2.95E+02	2.19E+01	3.88E-01
-1.21E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-4.31E-03	327.80	54.65	-2.37E-01	54.65	-2.37E-01	1.20E+01	-6.40E+00	4.10E-02	2.93E+02	2.01E+01	8.27E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.29E-02	325.40	52.25	-6.76E-01	52.25	-6.76E-01	1.20E+01	-6.40E+00	3.38E-02	2.93E+02	2.02E+01	6.86E-01
-1.22E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-4.05E-03	345.70	72.55	-2.96E-01	72.55	-2.96E-01	1.30E+01	-6.40E+00	1.85E-02	2.94E+02	2.10E+01	3.91E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.35E-02	330.00	56.85	-7.70E-01	56.85	-7.70E-01	1.20E+01	-6.40E+00	2.08E-02	2.94E+02	2.05E+01	4.29E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.50E-02	350.30	77.15	-1.15E+00	77.15	-1.15E+00	1.20E+01	-6.40E+00	2.98E-02	2.93E+02	2.01E+01	6.01E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.19E-02	349.00	75.85	-9.10E-01	75.85	-9.10E-01	1.20E+01	-6.40E+00	1.32E-02	3.01E+02	2.76E+01	3.64E-01
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.21E-02	375.70	102.55	-1.14E+00	102.55	-1.14E+00	1.30E+01	-6.40E+00	5.33E-02	2.93E+02	2.00E+01	1.07E+00
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-7.12E-03	346.70	73.55	-5.27E-01	73.55	-5.27E-01	1.20E+01	-6.40E+00	4.05E-02	2.93E+02	2.01E+01	8.16E-01
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.24E-02	332.60	59.45	-7.40E-01	59.45	-7.40E-01	1.20E+01	-6.40E+00	8.19E-03	2.96E+02	2.27E+01	1.87E-01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.88E-02	319.70	46.55	-8.81E-01	46.55	-8.81E-01	1.20E+01	-6.40E+00	5.71E-02	2.93E+02	2.00E+01	1.15E+00
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-2.01E-02	313.80	40.65	-8.22E-01	40.65	-8.22E-01	1.20E+01	-6.40E+00	1.23E-02	2.93E+02	2.03E+01	2.51E-01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.48E-02	317.00	43.85	-6.54E-01	43.85	-6.54E-01	1.20E+01	-6.40E+00	1.99E-02	2.97E+02	2.37E+01	4.74E-01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-2.00E-02	317.00	43.95	-8.83E-01	43.95	-8.83E-01	1.30E+01	-6.40E+00	8.00E-01	2.97E+02	2.37E+01	1.71E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.62E-02	324.60	51.45	-8.36E-01	51.45	-8.36E-01	Total mfr					
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-2.59E-02	313.30	40.15	-1.04E+00	40.15	-1.04E+00						
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.28E-02	337.40	64.25	-8.27E-01	64.25	-8.27E-01						
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.25E-02	345.00	71.85	-9.05E-01	71.85	-9.05E-01						
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-8.66E-03	367.80	94.65	-8.24E-01	94.65	-8.24E-01						
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.54E-02	320.60	47.45	-7.34E-01	47.45	-7.34E-01						
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.07E-02	332.40	59.25	-6.40E-01	59.25	-6.40E-01						

Reference Case	Enthalpy Out / sec	Enthalpy In/ sec	Ωφέλιμη Ισχύς	Ονομαστική Ισχύς	Βαθμός Απόδοσης	
	46.032 KW	17.055 KW	28.977 KW	33.36 KW	0.869	
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-8.81E-03	337.90	64.75	-5.74E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-9.85E-03	323.60	50.45	-5.00E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.81E-02	319.20	46.05	-8.36E-01
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-5.83E-03	351.50	78.35	-4.60E-01
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-3.17E-03	376.80	103.65	-3.30E-01
-1.22E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-2.00E-03	380.60	107.45	-2.16E-01
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-5.83E-03	324.40	51.25	-3.01E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.53E-02	318.90	45.75	-7.04E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-9.07E-03	320.80	47.65	-4.35E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-2.07E-02	315.30	42.15	-8.78E-01
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-3.96E-03	366.00	92.85	-3.70E-01
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-3.92E-03	359.90	86.75	-3.42E-01
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.16E-03	381.20	108.05	-2.34E-01
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-4.50E-03	385.20	112.05	-5.07E-01
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.14E-02	372.70	99.55	-1.14E+00
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-3.76E-03	355.30	82.15	-3.10E-01
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.51E-02	330.20	57.05	-8.67E-01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.61E-02	353.40	80.25	-1.30E+00
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.97E-02	330.50	57.35	-1.14E+00
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-9.64E-03	325.20	52.05	-5.05E-01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-9.89E-03	372.90	99.75	-9.92E-01
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-8.17E-03	343.10	69.95	-5.75E-01
-1.22E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-2.82E-03	343.90	70.75	-2.01E-01
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-4.33E-03	366.70	93.55	-4.07E-01
-1.19E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-2.64E-03	325.60	52.45	-1.39E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-6.95E-03	326.10	52.95	-3.70E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-3.12E-03	324.90	51.75	-1.62E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.80E-02	324.90	51.75	-9.35E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-9.69E-03	324.40	51.25	-4.99E-01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-1.89E-03	324.70	51.55	-9.78E-02
-1.21E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-4.49E-03	324.90	51.75	-2.34E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-2.46E-03	316.90	43.75	-1.08E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-7.57E-03	314.60	41.45	-3.16E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-3.12E-03	320.50	47.35	-1.49E-01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-9.93E-03	314.40	41.25	-4.12E-01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.02E-02	317.50	44.35	-4.56E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.03E-02	321.50	48.35	-9.88E-02
-1.19E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-1.73E-03	323.10	49.95	-8.68E-02
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.38E-02	314.80	41.65	-5.77E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.66E-02	315.90	42.75	-7.12E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.17E-02	323.10	49.95	-5.88E-01
		Total mfr	-8.00E-01 [kg/s]	Total Enthalpy		-4.60E+01 KW

Outlet		1.006 Inlet											
X [m]	Y [m]	Z [m]	Mass Flow [kg]	Temp [K]	Cp [kJ/kg K]	m*Cp*Tout	X [m]	Y [m]	Z [m]	Mass Flow [kg]	Temp [K]	Temp [oC]	m*Cp*Tin
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-9.24E-03	338.50	65.35	-6.07E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	5.65E-03	3.01E+02	2.80E+01	1.59E-01
-1.19E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-3.54E-03	338.80	65.65	-2.34E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.22E-02	2.96E+02	2.29E+01	2.81E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-5.34E-03	339.90	66.75	-3.59E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.20E-02	2.93E+02	2.01E+01	5.51E-01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.15E-02	338.70	65.55	-7.58E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.60E-02	2.95E+02	2.15E+01	3.46E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.46E-02	331.40	58.25	-8.56E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	4.45E-02	2.93E+02	2.01E+01	8.98E-01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.93E-02	340.10	66.95	-1.30E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	9.29E-03	2.94E+02	2.13E+01	1.99E-01
-1.19E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-6.24E-03	328.50	55.35	-3.47E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.53E-02	2.93E+02	2.01E+01	7.11E-01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-8.29E-03	324.40	51.25	-4.27E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.17E-02	2.94E+02	2.10E+01	2.46E-01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-5.87E-03	317.30	44.15	-2.61E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.48E-02	2.95E+02	2.16E+01	3.21E-01
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.75E-02	326.90	53.75	-9.44E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.48E-02	2.93E+02	2.01E+01	7.02E-01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.86E-02	350.80	77.65	-1.46E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	4.16E-02	2.93E+02	2.00E+01	8.35E-01
-1.22E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-8.34E-03	332.10	58.95	-4.95E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.17E-02	2.93E+02	2.01E+01	4.38E-01
-1.21E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-5.94E-03	337.20	124.05	-7.42E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.02E-02	2.93E+02	2.00E+01	6.06E-01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.76E-02	316.70	43.55	-7.69E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.30E-02	2.93E+02	1.99E+01	4.59E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.06E-02	335.10	61.95	-6.61E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.48E-02	2.97E+02	2.42E+01	3.60E-01
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-4.55E-03	335.10	61.95	-2.84E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	3.14E-02	2.93E+02	2.01E+01	6.33E-01
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-4.65E-03	337.20	64.05	-2.99E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	2.75E-02	2.93E+02	2.01E+01	5.55E-01
-1.21E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-2.16E-03	326.80	53.65	-1.17E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.57E-02	2.98E+02	2.45E+01	5.90E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.13E-02	326.70	53.55	-6.07E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.07E-02	2.99E+02	2.58E+01	3.86E-01
-1.21E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-5.50E-03	322.10	48.95	-2.71E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.96E-02	2.93E+02	2.01E+01	3.95E-01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.41E-02	322.60	49.45	-7.03E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	3.31E-02	2.93E+02	2.00E+01	6.65E-01
-1.21E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-5.50E-03	319.10	45.95	-2.54E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	3.02E-02	2.93E+02	2.00E+01	6.07E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.58E-02	323.50	50.55	-6.51E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	2.50E-02	2.93E+02	2.01E+01	5.04E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.37E-02	330.20	57.05	-7.84E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.88E-02	2.93E+02	2.01E+01	3.79E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.36E-02	337.70	64.55	-8.83E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.21E-02	2.96E+02	2.24E+01	2.72E-01
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.43E-02	345.00	71.85	-1.03E+00	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.31E-02	2.95E+02	2.18E+01	2.86E-01
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-8.40E-03	329.90	56.75	-4.80E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.19E-02	2.95E+02	2.15E+01	2.56E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.35E-02	325.00	51.85	-7.02E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.02E-02	2.98E+02	2.50E+01	2.56E-01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.64E-02	319.40	46.25	-7.62E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.52E-02	2.95E+02	2.17E+01	3.32E-01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.50E-02	321.40	48.25	-7.30E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.47E-02	2.94E+02	2.12E+01	3.12E-01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.18E-02	326.00	52.85	-6.29E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	2.27E-02	2.94E+02	2.12E+01	4.83E-01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.62E-02	344.90	71.75	-1.17E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	4.07E-03	3.00E+02	2.71E+01	1.11E-01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.52E-02	332.50	59.35	-9.10E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	7.95E-03	3.01E+02	2.75E+01	2.20E-01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.84E-02	334.80	61.65	-1.14E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.23E-02	2.94E+02	2.05E+01	2.54E-01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.32E-02	320.50	47.35	-6.29E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.52E-02	2.93E+02	2.00E+01	7.07E-01
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.51E-02	324.30	51.15	-7.76E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.88E-02	2.93E+02	2.01E+01	5.81E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.06E-02	325.30	52.15	-5.58E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.48E-02	2.94E+02	2.08E+01	3.08E-01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.28E-02	319.20	46.05	-5.94E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	8.00E-03	2.94E+02	2.08E+01	1.68E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.15E-02	324.10	50.95	-5.90E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	Total mfr	Total Enthalpy		

Shifted Case - reference thermograph

-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.01E-02	322.20	49.05	-4.99E-01	48.299 KW
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-9.43E-03	324.10	50.95	-4.83E-01	16.762 KW
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.52E-02	324.90	51.75	-7.91E-01	31.537 KW
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-7.62E-03	320.20	47.05	-3.61E-01	33.36 KW
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-4.28E-03	322.60	49.45	-2.13E-01	0.945
-1.22E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-2.92E-03	320.40	47.25	-1.39E-01	
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-6.61E-03	330.70	57.55	-3.83E-01	
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.30E-02	328.30	55.15	-7.23E-01	
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-8.53E-03	332.20	59.05	-5.07E-01	
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.57E-02	325.00	51.85	-8.17E-01	
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-4.75E-03	332.50	59.35	-2.83E-01	
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-4.72E-03	329.00	55.85	-2.65E-01	
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.18E-03	384.00	110.85	-2.43E-01	
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-5.05E-03	350.10	76.95	-3.91E-01	
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.19E-02	382.70	109.55	-1.31E+00	
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-3.46E-03	416.20	143.05	-4.98E-01	
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.84E-02	321.90	48.75	-9.02E-01	
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.02E-02	324.30	51.15	-1.04E+00	
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.17E-02	338.60	65.45	-1.43E+00	
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-1.21E-02	315.30	42.15	-5.12E-01	
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.17E-02	349.90	76.75	-9.03E-01	
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-7.68E-03	405.10	131.95	-1.02E+00	
-1.22E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-2.52E-03	426.40	153.25	-3.89E-01	
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-5.33E-03	326.00	52.85	-2.84E-01	
-1.19E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-2.87E-03	329.90	56.75	-1.64E-01	
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-7.93E-03	335.60	62.45	-4.98E-01	
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-3.62E-03	334.90	61.75	-2.25E-01	
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.78E-02	349.90	76.75	-1.38E+00	
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.07E-02	346.30	73.15	-7.88E-01	
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-2.39E-03	313.60	40.45	-9.72E-02	
-1.21E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-5.62E-03	314.10	40.95	-2.32E-01	
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-2.01E-03	340.10	66.95	-1.35E-01	
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-5.79E-03	340.30	67.15	-3.91E-01	
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-2.84E-03	340.60	67.45	-1.93E-01	
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-8.09E-03	345.90	72.75	-5.92E-01	
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-9.82E-03	352.60	79.45	-7.85E-01	
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.30E-03	346.80	73.65	-1.70E-01	
-1.19E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-1.88E-03	340.20	67.05	-1.27E-01	
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.06E-02	319.30	46.15	-4.92E-01	
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.25E-02	321.70	48.55	-6.09E-01	
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-9.68E-03	321.40	48.25	-4.70E-01	
		Total mfr	-8.00E-01 [kg/s]	Total Enthalpy		-4.83E+01 KW	

Outlet		1.006										
X [m]	Y [m]	Z [m]	Mass Flow [kg Temp [K]	Cp [kJ/kg K]	m ³ Cp*Tout	Inlet	X [m]	Y [m]	Z [m]	Mass Flow [kg Temp [K]	Cp [kJ/kg K]	m ³ Cp*Tin
				Temp [oC]	Temp [oC]						Temp [oC]	Temp [oC]
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.16E-02	324.30	51.15	-5.98E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	7.06E-03	3.03E+02	2.12E-01
-1.19E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-4.42E-03	324.50	51.35	-2.28E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.53E-02	3.00E+02	2.68E+01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-6.75E-03	324.60	51.45	-3.49E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.41E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.48E-02	323.60	50.45	-7.51E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.00E-02	2.99E+02	2.61E+01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.87E-02	319.90	46.75	-8.81E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	5.57E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.42E-02	326.80	53.65	-1.30E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.16E-02	2.99E+02	2.60E+01
-1.19E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-7.67E-03	319.70	46.55	-3.59E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	4.41E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-1.08E-02	316.20	43.05	-4.48E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.46E-02	2.99E+02	2.56E+01
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-7.37E-03	311.60	38.45	-2.85E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.85E-02	2.99E+02	2.61E+01
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.21E-02	316.70	43.55	-9.66E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	4.35E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.21E-02	339.10	65.95	-1.47E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	5.20E-02	2.98E+02	2.50E+01
-1.21E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-9.84E-03	333.30	60.15	-5.95E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.71E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.22E+01	1.28E+01	-4.97E+00	-6.94E-03	374.00	100.85	-7.04E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.78E-02	2.98E+02	2.50E+01
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-2.14E-02	314.40	41.25	-8.90E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.87E-02	2.98E+02	2.50E+01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.33E-02	323.40	50.25	-6.72E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.85E-02	3.01E+02	2.76E+01
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-5.74E-03	324.60	51.45	-2.97E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.92E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.21E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-2.65E-03	319.90	46.75	-1.24E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	3.44E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.40E-02	319.40	46.25	-6.50E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	3.66E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.21E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-6.77E-03	316.20	43.05	-2.93E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.96E-02	3.01E+02	2.78E+01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.75E-02	316.40	43.25	-7.61E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.34E-02	3.02E+02	2.86E+01
-1.22E+01	1.24E+01	-4.97E+00	-6.83E-03	313.40	40.25	-2.76E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	2.45E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.60E-02	316.70	43.55	-6.99E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	4.14E-02	2.98E+02	2.50E+01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.98E-02	316.20	43.05	-8.59E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	3.78E-02	2.98E+02	2.50E+01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.69E-02	319.80	46.65	-7.93E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	3.12E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.70E-02	323.20	50.05	-8.54E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	2.35E-02	2.98E+02	2.51E+01
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.76E-02	326.30	53.15	-9.42E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.51E-02	3.00E+02	2.64E+01
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.02E-02	320.10	46.95	-4.83E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.60E-02	2.99E+02	2.62E+01
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.64E-02	317.40	44.25	-7.30E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.49E-02	2.99E+02	2.58E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-2.07E-02	314.10	40.95	-8.52E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.28E-02	3.01E+02	2.82E+01
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	-1.93E-02	314.50	41.35	-8.05E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.91E-02	2.99E+02	2.61E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.53E-02	316.50	43.35	-6.67E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-2.12E-02	327.10	53.95	-1.15E+00	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.94E-02	321.30	48.15	-9.40E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-2.41E-02	320.50	47.35	-1.15E+00	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.65E-02	315.00	41.85	-6.94E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	-1.88E-02	316.90	43.75	-8.26E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.33E-02	317.10	43.95	-5.86E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.21E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.63E-02	314.10	40.95	-6.69E-01	-1.20E+01	1.20E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01
-1.20E+01	1.26E+01	-4.97E+00	-1.43E-02	317.20	44.05	-6.35E-01	-1.20E+01	1.30E+01	-6.40E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.23E+01

Shifted Case		Enthalpy Out / sec		Enthalpy In/ sec		Ωφέλιμη ισχύς		Ονομαστική Ισχύς		Βαθμός Απόδοσης	
		51.841 KW		22.279 KW		29.562 KW		33.36 KW		0.886	
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	315.60	-1.24E-02	42.45	-5.31E-01	42.45	-5.31E-01	42.45	-5.31E-01	42.45
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	317.40	-1.17E-02	44.25	-5.19E-01	44.25	-5.19E-01	44.25	-5.19E-01	44.25
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	317.60	-1.92E-02	44.45	-8.57E-01	44.45	-8.57E-01	44.45	-8.57E-01	44.45
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	314.00	-9.46E-03	40.85	-3.89E-01	40.85	-3.89E-01	40.85	-3.89E-01	40.85
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	314.70	-5.28E-03	41.55	-2.21E-01	41.55	-2.21E-01	41.55	-2.21E-01	41.55
-1.22E+01	1.24E+01	-4.97E+00	313.30	-3.63E-03	40.15	-1.47E-01	40.15	-1.47E-01	40.15	-1.47E-01	40.15
-1.20E+01	1.24E+01	-4.97E+00	322.80	-8.10E-03	49.65	-4.05E-01	49.65	-4.05E-01	49.65	-4.05E-01	49.65
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	319.90	-1.65E-02	46.75	-7.74E-01	46.75	-7.74E-01	46.75	-7.74E-01	46.75
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	322.70	-1.06E-02	49.55	-5.30E-01	49.55	-5.30E-01	49.55	-5.30E-01	49.55
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	317.10	-2.00E-02	43.95	-8.83E-01	43.95	-8.83E-01	43.95	-8.83E-01	43.95
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	320.90	-5.77E-03	47.75	-2.77E-01	47.75	-2.77E-01	47.75	-2.77E-01	47.75
-1.22E+01	1.26E+01	-4.97E+00	319.10	-5.70E-03	45.95	-2.64E-01	45.95	-2.64E-01	45.95	-2.64E-01	45.95
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	337.90	-2.69E-03	64.75	-1.75E-01	64.75	-1.75E-01	64.75	-1.75E-01	64.75
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	325.60	-6.21E-03	52.45	-3.28E-01	52.45	-3.28E-01	52.45	-3.28E-01	52.45
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	344.40	-1.46E-02	71.25	-1.05E+00	71.25	-1.05E+00	71.25	-1.05E+00	71.25
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	367.00	-4.17E-03	93.85	-3.94E-01	93.85	-3.94E-01	93.85	-3.94E-01	93.85
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	314.20	-2.31E-02	41.05	-9.53E-01	41.05	-9.53E-01	41.05	-9.53E-01	41.05
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	317.20	-2.48E-02	44.05	-1.10E+00	44.05	-1.10E+00	44.05	-1.10E+00	44.05
-1.20E+01	1.27E+01	-4.97E+00	325.40	-2.74E-02	52.25	-1.44E+00	52.25	-1.44E+00	52.25	-1.44E+00	52.25
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	310.90	-1.51E-02	37.75	-5.73E-01	37.75	-5.73E-01	37.75	-5.73E-01	37.75
-1.21E+01	1.27E+01	-4.97E+00	330.60	-1.43E-02	57.45	-8.28E-01	57.45	-8.28E-01	57.45	-8.28E-01	57.45
-1.22E+01	1.27E+01	-4.97E+00	369.40	-9.09E-03	96.25	-8.80E-01	96.25	-8.80E-01	96.25	-8.80E-01	96.25
-1.22E+01	1.28E+01	-4.97E+00	384.20	-2.97E-03	111.05	-3.32E-01	111.05	-3.32E-01	111.05	-3.32E-01	111.05
-1.22E+01	1.25E+01	-4.97E+00	317.10	-6.49E-03	43.95	-2.87E-01	43.95	-2.87E-01	43.95	-2.87E-01	43.95
-1.19E+01	1.28E+01	-4.97E+00	321.40	-3.51E-03	48.25	-1.70E-01	48.25	-1.70E-01	48.25	-1.70E-01	48.25
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	325.20	-9.76E-03	52.05	-5.11E-01	52.05	-5.11E-01	52.05	-5.11E-01	52.05
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	325.70	-4.43E-03	52.55	-2.34E-01	52.55	-2.34E-01	52.55	-2.34E-01	52.55
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	332.80	-2.26E-02	59.65	-1.36E+00	59.65	-1.36E+00	59.65	-1.36E+00	59.65
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	332.10	-1.33E-02	58.95	-7.89E-01	58.95	-7.89E-01	58.95	-7.89E-01	58.95
-1.20E+01	1.28E+01	-4.97E+00	310.30	-2.98E-03	37.15	-1.11E-01	37.15	-1.11E-01	37.15	-1.11E-01	37.15
-1.21E+01	1.28E+01	-4.97E+00	312.20	-6.91E-03	39.05	-2.72E-01	39.05	-2.72E-01	39.05	-2.72E-01	39.05
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	324.40	-2.58E-03	51.25	-1.33E-01	51.25	-1.33E-01	51.25	-1.33E-01	51.25
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	324.40	-7.52E-03	51.25	-3.88E-01	51.25	-3.88E-01	51.25	-3.88E-01	51.25
-1.19E+01	1.25E+01	-4.97E+00	324.80	-3.61E-03	51.65	-1.88E-01	51.65	-1.88E-01	51.65	-1.88E-01	51.65
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	328.10	-1.05E-02	54.95	-5.82E-01	54.95	-5.82E-01	54.95	-5.82E-01	54.95
-1.19E+01	1.26E+01	-4.97E+00	334.00	-1.25E-02	60.85	-7.64E-01	60.85	-7.64E-01	60.85	-7.64E-01	60.85
-1.19E+01	1.27E+01	-4.97E+00	333.50	-2.83E-03	60.35	-1.72E-01	60.35	-1.72E-01	60.35	-1.72E-01	60.35
-1.19E+01	1.24E+01	-4.97E+00	324.60	-2.37E-03	51.45	-1.23E-01	51.45	-1.23E-01	51.45	-1.23E-01	51.45
-1.20E+01	1.25E+01	-4.97E+00	314.00	-1.35E-02	40.85	-5.56E-01	40.85	-5.56E-01	40.85	-5.56E-01	40.85
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	315.30	-1.60E-02	42.15	-6.77E-01	42.15	-6.77E-01	42.15	-6.77E-01	42.15
-1.21E+01	1.25E+01	-4.97E+00	315.30	-1.23E-02	42.15	-5.21E-01	42.15	-5.21E-01	42.15	-5.21E-01	42.15
										Total Enthalpy	-5.18E+01 KW
										Total mfr	-1.00E+00 (kg/s)





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091558