



Βασιλική Μπλήτα

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη διδιάστατη μέτρηση πεδίου θερμοκρασίας σε ροές αέρα

Τομέας Ρευστών

Επιβλέπων: Δ.Μπούρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΑΘΗΝΑ, 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους με υποστήριξαν σε αυτή την διαδικασία.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δ. Μπούρη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, πρώτα απ'όλα αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα και στη συνέχεια παρέχοντας μου ελεύθερα τον εξοπλισμό και το χώρο να κάνω δοκιμές και να εργαστώ. Επίσης, τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση, τις υποδείξεις και το αδιάλειπτο ενδιαφέρον του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησής της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, την ΥΔ Β. Παππά για τη βοήθεια που μου προσέφερε σε οτιδήποτε πρακτικό ζήτημα προέκυπτε αναφορικά με τη λειτουργία της αεροσήραγγας, αλλά και για τις πολύ χρήσιμες παρατηρήσεις και συμβουλές της.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ονοματεπώνυμο

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες.....	2
Πίνακας περιεχομένων.....	4
1 Περίληψη.....	7
2 Abstract.....	8
3 Εισαγωγή.....	9
3.1 Γενικά.....	9
3.2 Στόχος εργασίας.....	9
3.3 Διάρθρωση εργασίας.....	10
4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	12
5 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	17
5.1 Θερμογραφία.....	17
5.1.1 Έννοια της θερμογραφίας.....	17
5.1.2 Θεωρία της ακτινοβολίας.....	17
5.1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	20
5.1.4 Μέτρηση θερμοκρασίας μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας.....	21
5.1.5 Συντελεστές εκπομπής και θερμοκρασία ανάκλασης.....	23
5.1.6 Τεχνικές θερμογράφησης.....	24
5.1.7 Θερμοκάμερες.....	24
5.2 Μέτρηση με σωλήνα Pitot-Static.....	25
5.3 Έλεγχος θερμοκρασίας PID.....	27
5.3.1 Γενικά για τα συστήματα ελέγχου.....	27
5.3.2 Είδη ελεγκτών.....	28
5.4 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας.....	30
5.4.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	30
5.4.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	31
5.4.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	33
6 Σχεδίαση της πειραματικής διαδικασίας.....	34
6.1 Πειραματική διάταξη.....	34
6.1.1 Επεξήγηση συνδεσμολογίας συστήματος διατήρησης θερμοκρασίας.....	36
6.1.2 Σχετικά με την αεροσήραγγα.....	37
6.1.3 Μετρητικά συστήματα.....	38
7 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	46
7.1 Θερμογραφήματα.....	46
7.1.1 Συνθήκες περιβάλλοντος και ρυθμίσεις.....	46
7.1.2 Θερμοκρασιακά προφίλ.....	49

7.1.3	Παρατηρήσεις.....	53
7.2	Μετρήσεις ταχυτήτων ρευστού	54
7.2.1	Συνθήκες περιβάλλοντος και ρυθμίσεις	54
7.2.2	Μετρήσεις κατακόρυφα στο εσωτερικό της αεροσήραγγας για τρεις περιπτώσεις	55
7.2.3	Μετρήσεις κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου για τρεις περιπτώσεις ροής 56	
7.2.4	Παρατηρήσεις.....	58
8	Συμπεράσματα.....	60
8.1	Συνοπτικά αποτελέσματα του πειράματος.....	60
8.2	Σχολιασμός σχετικά με την επάρκεια της μεθόδου και των μέσων.....	61
8.3	Προσωπική συμβολή	62
8.4	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	62
9	Πίνακας αναφορών	64
10	Παραρτήματα.....	66
10.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	66
10.2	Κατάλογος εικόνων και σχημάτων	68
10.3	Κατάλογος εξισώσεων	69
10.4	Κατάλογος διαγραμμάτων	69

1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται πειραματικά η χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας για την μέτρηση και καταγραφή της κατανομής θερμοκρασίας σε πεδίο ροής αέρα.

Το πειραματικό μέρος περιλαμβάνει τη μέτρηση του πεδίου θερμοκρασίας κατάντι διδιάστατου εμποδίου τετραγωνικής διατομής το οποίο διατηρείται, μέσω συστήματος ελέγχου, σε θερμοκρασία υψηλότερη του περιβάλλοντος. Το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιείται είναι θερμοκάμερα η οποία εντοπίζει ως στόχο μια μη ανακλαστική επιφάνεια αλουμινίου . Μελετάται αρχικά η κατάσταση ηρεμίας, όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μεταφοράς με το μηχανισμό της φυσικής συναγωγής. Έπειτα, η διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας ελέγχεται σε αεροσήραγγα, με το εμπόδιο εκτεθειμένο σε ροή αέρα τριών διαφορετικών μέσων ταχυτήτων- αριθμών Reynolds.

Μετράται σημειακά η ταχύτητα της ροής με τη χρήση σωλήνα Pitot-Static στην αδιατάρακτη ροή μέσα στην αεροσήραγγα και στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του εμποδίου. Όταν η μέτρηση αφορά τον κατακόρυφο άξονα πάνω από το θερμαινόμενο εμπόδιο, εκτιμώνται και οι αριθμοί Richardson για τις τρεις περιπτώσεις.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέτρηση του πεδίου θερμοκρασίας του αέρα πάνω στην επιφάνεια αλουμινίου είναι ικανοποιητική όσον αφορά την οπτικοποίηση του φαινομένου αλλά και την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι μετρήσεις των μεγεθών της ροής πάνω από το θερμαινόμενο τοίχωμα υποδεικνύουν τις αναμενόμενες διαφορές μεταξύ των τριών περιπτώσεων για διαφορετικούς αριθμούς Richardson, δηλαδή είναι εμφανής η επίδραση της άνωσης στη ροή.

2 ABSTRACT

In this thesis the use of infrared thermography for the measurement and recording of the 2D temperature distribution of a flow field is studied experimentally.

The experimental part includes the measurement of the temperature field downstream of a two-dimensional square cross-sectioned obstacle which is maintained at a temperature higher than the ambient through a control system. The measuring instrument used is a thermal camera which detects a non-reflective aluminum surface as a target. The resting state is studied first, where transport phenomena take place by the mechanism of natural convection. Then, the temperature measurement device is also tested in a wind tunnel, with the obstacle exposed to air flow of three different mean velocities.

The flow velocity is measured pointwise using a Pitot-Static tube in the undisturbed flow inside the wind tunnel and on the vertical axis of symmetry of the obstacle. When the measurement is on the vertical axis above the heated barrier, the Richardson numbers are also estimated for the three cases.

The results show that the measurement of the air temperature field on the aluminum surface is satisfactory in terms of visualization of the phenomenon and accuracy of the measurements. The measurements of the flow magnitudes over the heated wall indicate the expected differences between the three cases for different Richardson numbers, i.e. the effect of buoyancy on the flow is evident.

3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η υπέρυθρη θερμογραφία ή θερμογραφία υπέρυθρων (IR) είναι μια τεχνική μέτρησης θερμοκρασίας, η οποία βασίζεται στην καταγραφή της θερμικής ενέργειας λόγω ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο και στη μετατροπή της σε θερμοκρασία, χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις αρχές μεταφοράς θερμότητας.

Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς έρευνας και τεχνολογίας από την επιθεώρηση μεγάλων εγκαταστάσεων, σε κτήρια και βιομηχανίες για τον εντοπισμό διαρροών και τον προσδιορισμό της θερμικής τους κατάστασης, μέχρι την αξιολόγηση και την επιθεώρηση των συγκολλήσεων και των ενώσεων των διάφορων στοιχείων πάνω σε ένα ηλεκτρονικό μικροκύκλωμα. Χρησιμοποιείται συχνά στον εντοπισμό ατελειών και ρωγμών σε υλικά, καθώς επίσης και στον τομέα της ιατρικής για την ανίχνευση καρκινικών όγκων, ρευματικών και αναπνευστικών ασθενειών. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών η υπέρυθρη θερμογραφία έχει εξελιχθεί σε ένα ισχυρό ερευνητικό μέσο θερμορροστοδυναμικής ανάλυσης για τη μέτρηση των ροών θερμότητας λόγω συναγωγής, καθώς και για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του πεδίου ροής στην επιφάνεια σωμάτων με πολύπλοκα σχήματα.

Όσον αφορά τη διαγνωστική κτηρίων, εξίσου σημαντικές είναι και οι ενεργειακές μελέτες για τους εσωτερικούς χώρους. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους γίνονται κατά κύριο λόγο σημειακά με τη χρήση θερμομέτρων ή θερμοστοιχείων. Όμως, οι μέθοδοι αυτοί οδηγούν σε σφάλματα, καθώς το πεδίο της θερμοκρασίας σε εσωτερικούς χώρους αλλάζει έντονα από θέση σε θέση. Αυτό το εμπόδιο μπορεί να ξεπεραστεί με την κατάλληλη αξιοποίηση της υπέρυθρης θερμογραφίας. Γνωρίζουμε ότι σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της, η υπέρυθρη θερμογραφία δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα καθώς η τεχνική αυτή εφαρμόζεται για την οπτικοποίηση του πεδίου θερμοκρασίας πάνω σε επίπεδες επιφάνειες θερμών σωμάτων. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι η υπέρυθρη θερμογραφία μας δίνει τη δυνατότητα να λάβουμε μετρήσεις για μια ολόκληρη επιφάνεια έχει ωθήσει πολλούς ερευνητές να αναπτύξουν τεχνικές μέτρησης θερμοκρασίας αέρα σε εσωτερικούς χώρους.

3.2 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατό να μελετούμε το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα με τη χρήση θερμοκάμερας και σε πειράματα σε αεροδυναμικές σήραγγες εφαρμόζοντας τις ίδιες ιδέες της μέτρησης θερμοκρασιακού πεδίου σε εσωτερικούς χώρους. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας με θερμοκάμερα τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου-στόχου κατάλληλης γεωμετρίας και υλικού.

Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η ανάπτυξη μιας τέτοιας πειραματικής μεθόδου μέτρησης θερμοκρασίας του αέρα με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας και η αξιοποίησή της σε δοκιμή σε αεροσήραγγα. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε η παραπάνω ιδέα σε πειραματικές συνθήκες που παραπέμπουν σε ζητήματα περιβαλλοντικής μηχανικής.

Πιο συγκεκριμένα, το πειραματικό μοντέλο που επιλέχθηκε να μελετηθεί αποτελείται από ένα μακρόστενο εμπόδιο τετραγωνικής διατομής του οποίου οι δύο κάθετες επιφάνειες θερμαίνονται σε υψηλή θερμοκρασία. Η διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ότι προσομοιάζει την περίπτωση ενός μοναδικού μακρόστενου κτηρίου (ή σειράς κτηρίων) όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν στην οροφή και στην μία κάθετη πλευρά του. Κύριο αντικείμενο της μελέτης είναι η επίδραση της άνωσης λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των πλευρών του κτηρίου και του αέρα στα χαρακτηριστικά της ροής καθώς και η αποτύπωση της μεταβολής του πεδίου θερμοκρασίας κατάντι του κτηρίου.

Ιδανικά, ο αέρας ανταλλάσει μέσω συναγωγής θερμότητα με το αντικείμενο-στόχο, το οποίο είναι στην περίπτωσή μας μια επιφάνεια από αλουμίνιο επικαλυμμένη με μαύρη βαφή πολύ μεγάλου συντελεστή εκπομπής. Σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία της επιφάνειας έρχεται σε ισοζύγιο με την τοπική θερμοκρασία του αέρα. Στην πράξη, η θερμοκρασία της επιφάνειας δεν θα είναι ακριβώς ίδια με τη θερμοκρασία του αέρα. Η επιφάνεια είναι εντελώς απορροφητική λόγω της βαφής ώστε να εντοπίζεται από την θερμοκάμερα. Επομένως απορροφά και την ακτινοβολία από άλλα θερμά σώματα που βρίσκονται στο χώρο και δεν αναπαριστά επακριβώς τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Παρόλα αυτά, η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε αυτή της επιφάνειας-στόχου, είναι συνάρτηση ορισμένων παραγόντων, τους οποίους έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε ώστε να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Στα πλεονεκτήματα μια τέτοιας μεθόδου πρέπει να αναφερθούν το χαμηλό κόστος της διάταξης και η ευκολία στην κατασκευή της. Επίσης, είναι μια μέθοδος πλήρως μη επεμβατική, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί με μικρές αλλαγές σε μια πληθώρα συνθηκών και πειραμάτων. Ασφαλώς, η υπέρυθρη θερμογραφία δεν είναι απαλλαγμένη από σφάλματα, δεδομένου ότι, εκτός από τα προβλήματα που σχετίζονται με το συντελεστή εκπομπής, υπάρχουν και άλλες επιπλοκές που σχετίζονται με τη βαθμονόμηση της κάμερας, την εστίαση, την τοποθέτηση και τις αντανάκλασεις. Για το λόγο αυτό η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται περισσότερο όταν η οπτικοποίηση και η ποιοτική αποτύπωση ενός φαινομένου είναι το ζητούμενο και όχι η ακριβής καταγραφή ποσοτικών μεγεθών.

3.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τον εντοπισμό ήδη υπάρχουσων ερευνών και των αποτελεσμάτων τους, οι οποίες έχουν διεξαχθεί γύρω το αντικείμενο του πειραματικού προσδιορισμού της θερμοκρασίας του αέρα με χρήση μεθόδων θερμογραφίας. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις μεθόδους θερμογραφίας που χρησιμοποιούνται γενικά σε μελέτες μηχανικής ρευστών και αεροδυναμικής όταν μελετούνται ροές στις οποίες ενεργούν φαινόμενα συναγωγής.

Στη συνέχεια, αναφέρονται οι πειραματικές προσπάθειες προσδιορισμού της θερμοκρασίας του αέρα σε κλειστούς χώρους με την χρήση κάποιου αντικειμένου-στόχου το οποίο υπό τις κατάλληλες συνθήκες έχει ίδια θερμοκρασία με αυτή του περιβάλλοντος αέρα. Επίσης, παρουσιάζονται μελέτες που έχουν γίνει σε αεροσήραγγες με παρόμοιο εξοπλισμό και παρόμοια σύνθεση του πειράματος για τη μελέτη ανωστικών ροών σε οδικές χαράδρες.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στις απαραίτητες θεωρητικές βάσεις στις οποίες στηρίζεται το πείραμα που σχεδιάστηκε και εκτελέστηκε. Καταρχήν, αναλύεται το θεωρητικό μέρος των πειραματικών μεθόδων/οργάνων που χρησιμοποιούνται, δηλαδή οι αρχές θερμογραφίας, η λειτουργία του σωληνα Pitot-static και ο PID έλεγχος θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε σε κάποιες έννοιες μηχανικής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας, όπως οι βασικές αρχές που διέπουν τις ανωστικές ροές λόγω εξαναγκασμένης συναγωγής, τα οριακά στρώματα θερμοκρασίας και ταχύτητας πάνω από ένα θερμαινόμενο αντικείμενο κλπ.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και τα μέρη που την απαρτίζουν. Γίνεται μια σύντομη αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων και στη συνδεσμολογία τους. Αναλύονται οι κύριες λειτουργίες της διάταξης που σχεδιάστηκε, οι παράμετροι που έπρεπε να ληφθούν υπόψη, τα προβλήματα που προέκυψαν και οι περιορισμοί που υπήρχαν.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος με τη μορφή θερμογραφήμάτων και διαγραμμάτων των σημειακών μετρήσεων για την ταχύτητα, την πίεση και την ογκομετρική παροχή.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 επαναδιατυπώνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα του πειράματος. Αξιολογείται η επάρκεια των μεθόδων και των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται κάποιες προτάσεις για τη βελτίωση του πειράματος που σχεδιάστηκε. Επίσης προτείνονται κάποιες ιδέες για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον και παραλλαγές οι οποίες προσομοιάζουν πραγματικές καταστάσεις.

4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το πεδίο εφαρμογών της θερμογραφίας υπέρυθρων (IR) είναι ευρύ και περιλαμβάνει διάφορα επιστημονικά πεδία. Η θερμογραφία IR μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε ερευνητικά προβλήματα όσο και σε εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με ποικίλες φυσικές διατάξεις.

Στον τομέα της πειραματικής μηχανικής των ρευστών, η χρήση της θερμογραφίας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Στις προηγούμενες δεκαετίες υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη των τεχνολογιών θερμογραφίας, η οποία τις κατέστησε ένα σημαντικό εργαλείο για μελέτη φαινομένων θερμοδυναμικής, ρευστομηχανικής και αεροδυναμικής.

Μια βασική εφαρμογή είναι η εκτίμηση της ροής θερμότητας (heat flux) λόγω φαινομένων συναγωγής σε πειράματα σε αεροσήραγγες. Γενικά, η μέτρηση της ροής θερμότητας και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (h) από την επιφάνεια ενός σώματος σε μια ροή ρευστού, παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην πράξη σε σχέση με άλλες μετρήσεις θερμοδυναμικών μεγεθών. Συνήθως, είναι απαραίτητη η μέτρηση θερμοκρασίας, για την οποία οι συνήθεις τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση θερμοστοιχείων, ανιχνευτών θερμοκρασίας με αντιστάσεις (RTDs) ή πυρομέτρων. Όλα τα προηγούμενα αποτελούν μετρητικά συστήματα που ο αισθητήρας παρέχει μια σημειακή πληροφορία για την τοπική ροή θερμότητας, το οποίο δεν είναι επαρκές στις περιπτώσεις που το πεδίο ροής θερμότητας παρουσιάζει υψηλούς ρυθμούς μεταβολής.

Εν αντιθέσει, οι θερμοκάμερες υπέρυθρων αποτελούν μια τεχνική διαστάτης μέτρησης θερμοκρασίας, καθώς επιτρέπουν ακριβείς μετρήσεις «χαρτών» επιφανειακής θερμοκρασίας και με την παρουσία σχετικά υψηλών χωρικών κλίσεων θερμοκρασίας. Επομένως, μπορούν να αξιοποιηθούν επιτυχώς για την μέτρηση ροής θερμότητας λόγω συναγωγής σε σταθερές και μεταβατικές ροές.

Η υπέρυθη θερμογραφία υπερταίρει των συμβατικών μεθόδων σημειακής μέτρησης καθώς μειώνονται τα σφάλματα μέτρησης λόγω θερμικής αγωγής που συμβαίνουν λόγω των καλωδίων των αισθητήρων RTD ή των θερμοστοιχείων. Παρόλα αυτά είναι απαραίτητος ο ορισμός του συντελεστή εκπομπής των υπό εξέταση αντικειμένων αφού είναι μια παράμετρος που συμβάλει στην ακρίβεια των μετρήσεων. Αντίστοιχα, το στήσιμο της μετρητικής διάταξης πρέπει να είναι τέτοιο που να μειώνεται όσο το δυνατό η επίδραση της ακτινοβολίας άλλων αντικειμένων πέρα από τα εξεταζόμενα [1].

Εκτός από την εκτίμηση των ροών θερμότητας, έχει δοκιμαστεί και η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας για την μελέτη των περιοχών μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή, των σημείων διαχωρισμού ή αποκόλλησης της ροής σε μοντέλα διαφόρων σχημάτων και διατομών [2]. Στον τομέα της αεροναυπηγικής, μια τέτοια μελέτη έχει ενδιαφέρον καθώς προκειμένου να μειωθεί η συνολική αντίσταση σε ένα συμβατικό αεροσκάφος, πρέπει το οριακό στρώμα πάνω από τα πτερύγια να παραμένει στο μεγαλύτερο μέρος του στρωτό. Αυτό γίνεται με τη χρήση συσκευών για την αναρρόφηση του οριακού στρώματος ή με τη βελτίωση του σχεδιασμού των της πτέρυγας. Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας

τέτοιων πιθανών λύσεων πραγματοποιούνται έλεγχοι σε αεροσήραγγες, στους οποίους ένα αποτελεσματικό σύστημα μέτρησης είναι η υπέρυθρη θερμογραφία. Η βασική αρχή συνίσταται στο γεγονός ότι η αύξηση της τύρβης οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή, η οποία εντοπίζεται μέσω υπέρυθρης θερμογραφίας. Στις εγκαταστάσεις του Γαλλικού Εργαστηρίου Αεροδιαστημικής ONERA έχουν πραγματοποιηθεί τέτοια ερευνητικά προγράμματα που αφορούν την οπτικοποίηση του οριακού στρώματος πάνω από αεροτομές για τον προσδιορισμό της περιοχής μετάβασης. Οι δοκιμές εφαρμόζονται με το μοντέλο να είναι σε υψηλότερη θερμοκρασία από τη ροή, οπότε η αύξηση των επιπέδων της τύρβης κατά τη μετάβαση του οριακού στρώματος να προκαλεί την ψύξη του μοντέλου. Επομένως, η περιοχή μετάβασης εμφανίζεται ψυχρότερη. Απαραίτητη είναι η προετοιμασία του μοντέλου με μονωτική βαφή μεγάλου συντελεστή εκπομπής, ώστε να ενισχύεται η καθαρότητα της εικόνας.

Η τεχνική αυτή δίνει μια ποιοτική εκτίμηση για τη μορφή του οριακού στρώματος κατά μήκος ενός σώματος και επομένως μπορεί να αξιοποιηθεί σαν ένα εργαλείο αξιολόγησης μεθόδων μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης.

Πρόσφατες μελέτες έχουν ασχοληθεί και με την ποσοτική εκτίμηση της μεταβατικής περιοχής με χρήση μεθόδων θερμογραφίας. Οι Boiko et al. [3] ασχολήθηκαν με τον ακριβή πειραματικό προσδιορισμό του σημείου εκκίνησης και του μήκους της μεταβατικής περιοχής σε τρισδιάστατα οριακά στρώματα. Η τεχνική που αναπτύχθηκε στηρίζεται στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του μοντέλου και της ροής που βρίσκεται είτε σε στρωτή είτε σε τυρβώδη κατάσταση. Περιλαμβάνει την επεξεργασία μιας σειράς καταγεγραμμένων υπέρυθρων εικόνων και δοκιμάστηκε για ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων ροής. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στον αυτοματισμό και στην ταχύτητα της επεξεργασίας δεδομένων, καθώς και στο ότι επιτρέπει την παραμετρική μελέτη της διαδικασίας μετάβασης.

Στις περιπτώσεις χρήσης υπέρυθρης θερμογραφίας που συζητήθηκαν παραπάνω, οι μετρήσεις αφορούσαν τη θερμοκρασία της επιφάνειας στερεών αντικειμένων, όπως επιβάλλεται εξ ορισμού από τον τρόπο λειτουργίας της θερμοκάμερας.

Παρόλα αυτά, η θερμογραφία είναι μια μη επεμβατική μέθοδος, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό του πεδίου θερμοκρασίας μιας ολόκληρης επιφάνειας ταυτόχρονα, το οποίο αποδίδεται στη συνέχεια ποιοτικά σε μια εικόνα. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην αποτύπωση του πεδίου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε κλειστούς χώρους.

Μια τέτοια τεχνική έχει αναπτυχθεί από τους Fokaides et al. [4], και βασίζεται στη χρήση εικονικών στόχων, δηλαδή αντικειμένων δεδομένης γεωμετρίας με συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες τα οποία έρχονται σε θερμική ισορροπία με τον περιβάλλοντα αέρα σε μικρό χρονικό διάστημα. Με αυτή τη θεώρηση, η θερμοκρασία του εικονικού στόχου αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ως εικονικοί στόχοι χρησιμοποιήθηκαν στήλοι PVC, αφού από τα υλικά που δοκιμάστηκαν ήταν εκείνο το οποίο έφτανε πιο γρήγορα σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον. Προκειμένου να αποδειχθεί η εγκυρότητα της μεθόδου, οι ερευνητές καθόρισαν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξάγονται οι μετρήσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται η διαχείριση της επίδρασης της ακτινοβολίας των γειτονικών επιφανειών, η επιλογή κατάλληλου υλικού του εικονικού στόχου και ο

υπολογισμός του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την επίτευξη θερμικού ισοζυγίου μεταξύ στόχου και περιβάλλοντος. Η αρτιότητα της μεθόδου επιβεβαιώνεται από τους ερευνητές με την εκτέλεση πειράματος, με αναλυτικές λύσεις των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και με υπολογιστικό μοντέλο.

Οι Georgiou, et al. [5], εξέλιξαν τα παραπάνω αφού εξέτασαν αν η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη και σε μη σταθερές συνθήκες. Ως τέτοιες θεωρούνται οι καταστάσεις όπου η θερμοκρασία του αέρα υφίσταται μεταβολές λόγω εξωτερικών κλιματικών συνθηκών ή λόγω της λειτουργίας συστημάτων HVAC σε εσωτερικούς χώρους. Οι ερευνητές πραγματοποίησαν δοκιμές σε ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου, με τρεις τύπους συστημάτων θέρμανσης για εσωτερικούς χώρους. Στόχος τους ήταν να παρατηρήσουν τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου σε διαφορετικές συνθήκες θέρμανσης όπου τα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής και λόγω ακτινοβολίας κυμαίνονται διαφορετικά. Συμπληρωματικά, αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να προσδιοριστούν αριθμητικά οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ εικονικού στόχου και περιβάλλοντος σε ακόμα περισσότερες συνθήκες.

Από τις δύο μελέτες επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία της μεθόδου τόσο σε μόνιμες όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις για εικονικούς στόχους δεδομένης γεωμετρίας και θερμικών ιδιοτήτων σε ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου.

Οι Porras- Amoresa et al. [6] ανέπτυξαν, επίσης, ένα σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος με υπέρυθρη θερμογραφία το οποίο αντί για κατακόρυφο κυλινδρικό στήλο, μετράει τη θερμοκρασία μιας επιφάνειας φύλλου αλουμινίου επικαλυμμένης στο κέντρο της με μονωτική ταινία γνωστού συντελεστή εκπομπής. Βασικός στόχος της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μιας τεχνικής υπέρυθρης θερμογραφίας για εσωτερικούς χώρους κτιρίων και υποδομών, η οποία να αποδίδει τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του πεδίου θερμοκρασίας με μεγάλη ακρίβεια. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται μεταξύ άλλων το χαμηλό κόστος των υλικών, η φορητότητα της διάταξης καθώς επίσης και το ότι πρόκειται για ένα ευέλικτο σύστημα το οποίο μπορεί να βρεί εφαρμογή σε διαφόρων ειδών εγκαταστάσεις. Η μελέτη ασχολείται με τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση θερμογραφίας τα οποία αφορούν το συντελεστή εκπομπής, την εστίαση της κάμερας, την ακτινοβολία από άλλα αντικείμενα του χώρου.

Η χρήση θερμογραφίας για την οπτικοποίηση του πεδίου θερμοκρασίας έχει δοκιμαστεί από τους Cehlin et al. [7], σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σχετικά με την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς ασχολήθηκαν με την αποτελεσματικότητα των συστημάτων εξαερισμού και ειδικά με την μελέτη της ροής κοντά σε διαχύτες χαμηλής ταχύτητας.

Αναπτύχθηκε μια τεχνική μέτρησης και απεικόνισης των πεδίων θερμοκρασίας του αέρα και των μοτίβων της ροής σε μια μεγάλη διατομή του χώρου. Στη συγκεκριμένη μέθοδο οι θερμοκρασίες του αέρα μετρούνται με μια κάμερα υπέρυθρων και μια «οθόνη» μέτρησης, δηλαδή μια πλάκα η οποία τοποθετείται παράλληλα στη ροή του αέρα και εντοπίζεται από τη θερμοκάμερα. Η τεχνική είναι εφαρμόσιμη στα περισσότερα εργαστηριακά περιβάλλοντα και σε επιτόπιες δοκιμές και προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που αναφέρουν οι συγγραφείς είναι η δυνατότητα καταγραφής εικόνων σε πραγματικό χρόνο σε ευρύτερες

περιοχές του χώρου, κάτι το οποίο είναι αδύνατο με τις συμβατικές μεθόδους σημειακής μέτρησης θερμοκρασίας.

Στο συγκεκριμένο πείραμα ελήφθησαν μετρήσεις σε διάφορα επίπεδα γύρω από τον διαχύτη με τη θερμοκάμερα να είναι κάθε φορά κάθετη στο επίπεδο μέτρησης. Ο συνδυασμός των εικόνων της θερμοκάμερας και άλλων επιφανειακών μετρήσεων αποδίδει μια ακριβή αναπαράσταση του πεδίου θερμοκρασίας ενός εσωτερικού χώρου. Ακόμα είναι δυνατόν από τις επιφανειακές μετρήσεις σε διάφορα επίπεδα να δημιουργηθεί η αντίστοιχη τρισδιάστατη κατανομή.

Οι Lewandowski et al. [8] αναφέρουν, επίσης, ότι σχεδίασαν και εφάρμοσαν μια νέα μέθοδο θερμογραφίας για μελέτες μεταφοράς θερμότητας. Στο πείραμα τους η θερμοκάμερα εντόπιζε ένα πλέγμα κατασκευασμένο από πλαστικό το οποίο ήταν τοποθετημένο κάθετα σε μια κατακόρυφη μεταλλική πλάκα, η οποία θερμαινόταν εκπέμποντας υψηλή ακτινοβολία. Οι ερευνητές με βάση το θερμοκρασιακό πεδίο που μετρήθηκε με τη θερμοκάμερα και τη θερμοκρασία πάνω στην θερμαινόμενη πλάκα ήταν σε θέση να υπολογίσουν τους τοπικούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας της θερμαινόμενης μεταλλικής πλάκας καθώς και τους τοπικούς αριθμούς Nu. Η διάταξη της κατακόρυφης θερμαινόμενης πλάκας είναι μια περίπτωση που έχει μελετηθεί λεπτομερώς στο παρελθόν με μεγάλο όγκο βιβλιογραφίας με βάση την οποία επιβεβαιώθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνητών.

Μέσα από αυτή τη μελέτη επιβεβαιώνεται ότι με την κατάλληλη διαχείριση, μπορούν να πραγματοποιηθούν με ακρίβεια μετρήσεις κατανομής θερμοκρασίας στο οριακό στρώμα μιας θερμαινόμενης επιφάνειας, από τις οποίες στη συνέχεια μπορούν να υπολογισθούν η κλίση της θερμοκρασίας και ο αριθμός Nu.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου που αναπτύχθηκε, οι ερευνητές αναφέρουν το χαμηλό κόστος της μετρητικής διάταξης και τη γρήγορη λήψη μετρήσεων για μια ολόκληρη επιφάνεια, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους σημειακής μέτρησης, όπως είναι τα θερμόμετρα και τα θερμοστοιχεία.

Σε συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, οι Ryms et al. [9] ασχολήθηκαν με μια Διαδικασία Αριθμητικής Ανακατασκευής (Numerical Reconstruction Procedure: NRP) του πεδίου ταχύτητας που δημιουργείται λόγω φυσικής συναγωγής από μια κατακόρυφη θερμαινόμενη πλάκα. Με δεδομένη την κατανομή του πεδίου θερμοκρασίας η μέθοδος NRP ανακατασκευάζει το πεδίο ταχυτήτων λύνοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes και Fourier-Kirchhoff. Οι ερευνητές εξετάζουν την υπόθεση ότι γνωρίζοντας το πεδίο θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί και το πεδίο ταχύτητας και το αντίστροφο. Τα υπολογιστικά τους αποτελέσματα επαληθεύτηκαν με τη σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες. Τέλος, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση με τις τρέχουσες μελέτες με τη χρήση αριθμητικών υπολογισμών. Και στις δύο περιπτώσεις επιτεύχθηκε ικανοποιητική συμφωνία.

Εκτός από τη συνεισφορά της υπέρυθρης θερμογραφίας στην αποτύπωση της κατάστασης του αέρα σε εσωτερικούς χώρους, υπάρχουν και αναφορές αξιοποίησής της σε πειραματικές μετρήσεις σε αεροσήραγγες. Οι Tsalicoglou et al. [10] μελέτησαν πειραματικά το πεδίο ροής και θερμοκρασίας σε οδικές χαράδρες με θερμαινόμενα τοιχώματα. Τα πειράματα διεξάχθηκαν στην Αεροσήραγγα Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος του ETHZ/Emra με τη χρήση PIV για την οπτικοποίηση των κινούμενων σωματιδίων και τον προσδιορισμό της

ταχύτητάς τους και υπέρυθρης θερμογραφίας για την οπτικοποίηση του πεδίου θερμοκρασίας του αέρα. Για τη μέτρηση του θερμοκρασιακού πεδίου χρησιμοποίησαν ένα πλέγμα από σιλικονούχα νήματα πολύ μικρής διαμέτρου το οποίο στηριζόταν σε ένα τετραγωνικό πλαίσιο μικρού πάχους. Στις διασταυρώσεις των νημάτων τοποθετήθηκαν κομμάτια φύλλου αλουμινίου βαμμένα με μαύρο ματ χρώμα ώστε να αυξάνεται ο συντελεστής εκπομπής. Αυτά τα κομμάτια φύλλου αλουμινίου ήταν τα σημεία μέτρησης θερμοκρασίας με τη θερμοκάμερα. Επιπλέον, προκειμένου να μειωθεί στο ελάχιστο η μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, όλες οι θερμαινόμενες επιφάνειες των μοντέλων καλύφθηκαν με ανακλαστικό φύλλο αλουμινίου πολύ χαμηλού συντελεστή εκπομπής. Επίσης, μετρούταν η θερμοκρασία του χώρου κοντά στο πλέγμα με βαθμονομημένα θερμοστοιχεία, ώστε να ελέγχεται η ακρίβεια των μετρήσεων της θερμοκάμερας. Η ακρίβεια της μεθόδου που ανέπτυξαν οι ερευνητές για την εκτίμηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ήταν της τάξης του $-1.1-0.3^{\circ}\text{C}$ (διαφορά θερμοκάμερας και θερμοστοιχείων).

5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

5.1 ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

5.1.1 Έννοια της θερμογραφίας

Η υπέρυθη θερμογραφία (Infrared Thermography ή IRT) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με τη συλλογή και την επεξεργασία πληροφοριών για τη θερμοκρασία αντικειμένων χρησιμοποιώντας μετρητικά όργανα που δεν απαιτούν άμεση επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο. Βασίζεται στην υπέρυθη ακτινοβολία, ένα είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, την οποία εκπέμπει κάθε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδέν. Η υπέρυθη ακτινοβολία δεν είναι εντός του φάσματος του ορατού φωτός και επομένως δεν είναι δυνατό να την αντιληφθεί το ανθρώπινο μάτι. Για την επίτευξη μετρήσεων με υπέρυθη θερμογραφία αξιοποιούνται συγκεκριμένες συσκευές και μετρητικά όργανα.

Οι συσκευές μέτρησης υπέρυθρων λαμβάνουν την υπέρυθη ακτινοβολία που προέρχεται από ένα σώμα και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Το πυρόμετρο, για παράδειγμα, είναι μια απλή συσκευή μέτρησης υπέρυθρων μίας εισόδου και μίας εξόδου. Πιο ανεπτυγμένες και σύγχρονες διατάξεις περιλαμβάνουν μια σειρά αισθητήρων, δηλαδή εισόδων, για να αποδώσουν μια πιο λεπτομερή υπέρυθη εικόνα.

Η διαφορά μεταξύ μιας ορατής εικόνας και μιας εικόνας υπέρυθρων είναι ότι η ορατή εικόνα είναι μια αναπαράσταση του ανακλώμενου φωτός πάνω στο πραγματικό σκηνικό, ενώ στην υπέρυθη εικόνα, το σκηνικό είναι η πηγή ακτινοβολίας η οποία μπορεί να παρατηρηθεί από μια υπέρυθη κάμερα, χωρίς να είναι προϋπόθεση η ύπαρξη φωτός. Οι εικόνες που λαμβάνονται με χρήση υπέρυθρων κάμερων μετατρέπονται σε ορατές εικόνες αποδίδοντας ένα χρώμα σε κάθε επίπεδο ενέργειας υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα ψευδούς χρώματος που ονομάζεται θερμογράφημα.

5.1.2 Θεωρία της ακτινοβολίας

Η ενέργεια ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει πάνω σε ένα σώμα μπορεί είτε να απορροφηθεί, είτε να μεταδοθεί από αυτό, είτε να ανακλαστεί από την επιφάνειά του. Αντίστοιχα, ορίζονται τα μεγέθη της απορροφητικότητας του σώματος (α_λ), της ανακλαστικότητας (ρ_λ) και της διαπερατότητας (τ_λ). Το άθροισμά τους σε κάθε μήκος κύματος ακτινοβολίας πρέπει να ισούται με 1: $\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$.

Τα αδιαφανή υλικά έχουν μηδενική διαπερατότητα, δηλαδή: $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$.

Ορίζεται ως μέλαν σώμα εκείνο που έχει μηδενική διαπερατότητα και ανακλαστικότητα. Δηλαδή, το σύνολο της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του απορροφάται από αυτό ($\alpha_\lambda = 1$).

Η θεωρία του Planck για την ακτινοβολία μέλανος σώματος αποτελεί μια θεωρητική ερμηνεία του τρόπου με τον οποίο τα σώματα παράγουν και κατά συνέπεια εκπέμπουν

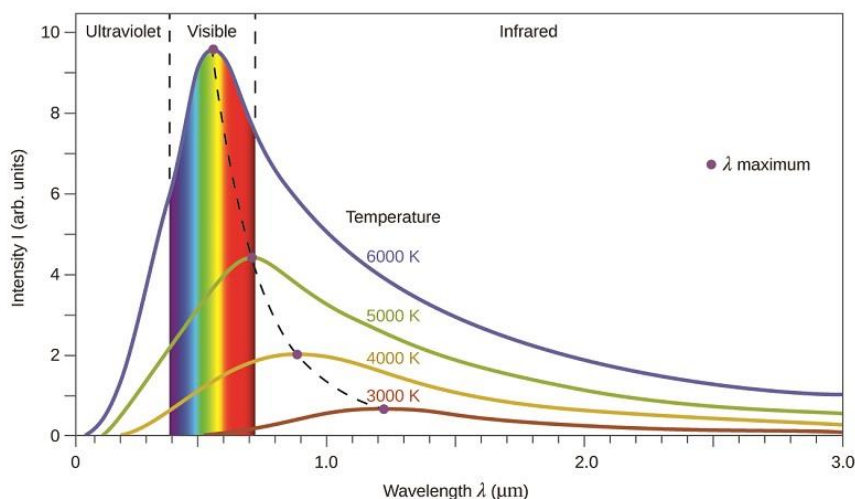
ακτινοβολία εξαιτίας της ίδιας τους της θερμοκρασίας. Με αυτή ορίζεται η ενέργεια που εκπέμπεται από μέλαν σώμα απόλυτης θερμοκρασίας T ανά μονάδα χρόνου, μονάδα επιφάνειας και μονάδα μήκους κύματος λ και είναι:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

Εξίσωση 1

Όπου, οι σταθερές $C_1 = 2\pi^5 h c_0^2 = 3.742 * 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$, $C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1.439 * 10^4 \mu\text{mK}$ και $k = 1.3805 * 10^{-23} \text{ J/K}$.

Η Εικόνα 1 δείχνει την κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μέλαν σώμα σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι καμπύλες δείχνουν την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



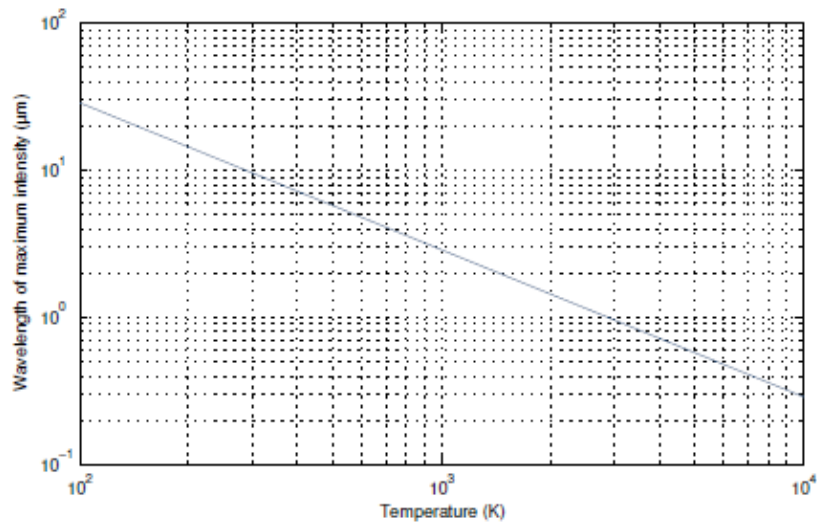
Εικόνα 1: Κατανομή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

- Η ακτινοβολία είναι συνεχής συνάρτηση του μήκους κύματος και παρουσιάζει μέγιστο για κάποια τιμή του λ
- Για κάθε μήκος κύματος, η ενέργεια που ακτινοβολείται αυξάνεται με τη θερμοκρασία
- Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας εκπέμπεται σε μικρά μήκη κύματος
- Παραγοντοποιώντας την εξίσωση του Planck ως προς το μήκος κύματος, προκύπτει ο νόμος του Wien

$$\lambda_{max} = \frac{0,0029}{T}$$

Εξίσωση 2



Εικόνα 2 [11]

- Ολοκληρώνοντας την Εξίσωση 1 προκύπτει η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς μέλανος σώματος για όλα τα μήκη κύματος είναι:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Εξίσωση 3

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση Stefan-Boltzmann.

Αν ορίσουμε το συντελεστή εκπομπής ενός σώματος για συγκεκριμένο μήκος κύματος λ ως το λόγο της εκπέμπουσας ακτινοβολίας από το σώμα προς την εκπέμπουσα ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda,b}}$$

Αν ο συντελεστής εκπομπής του σώματος είναι ανεξάρτητος του μήκους κύματος, τότε:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}$$

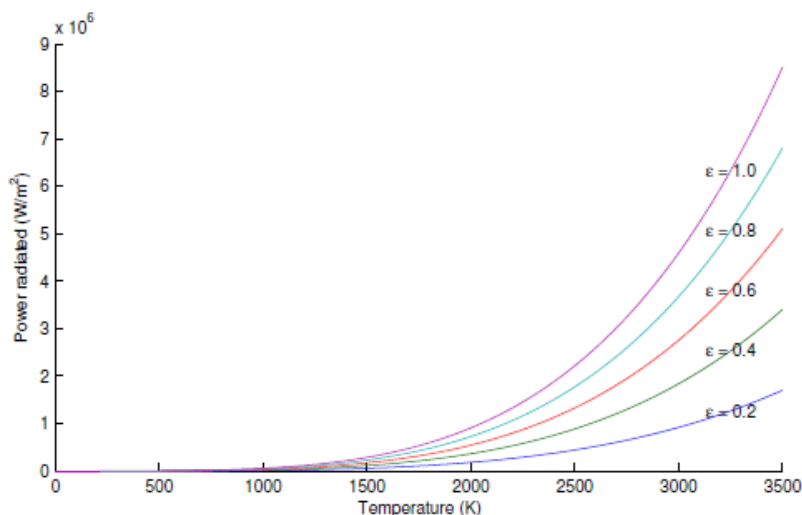
Και άρα,

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Το μέγεθος E_b ονομάζεται ολικής ισχύς εκπομπής ενός σώματος θερμοκρασίας T (K) και

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$$

είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann.



Εικόνα 3: Ισχύς εκπομπής συναρτήσει της θερμοκρασίας του σώματος [11]

5.1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε περιοχές ή ζώνες ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, ενώ τα όρια των περιοχών δεν είναι σαφώς καθορισμένα. Η υπέρυθρη περιοχή ορίζεται περίπου για μήκη κύματος από 0,8 μm έως 1000 μm , δηλαδή από το τέλος της περιοχής του ορατού φωτός έως την αρχή της περιοχής των μικροκυμάτων.

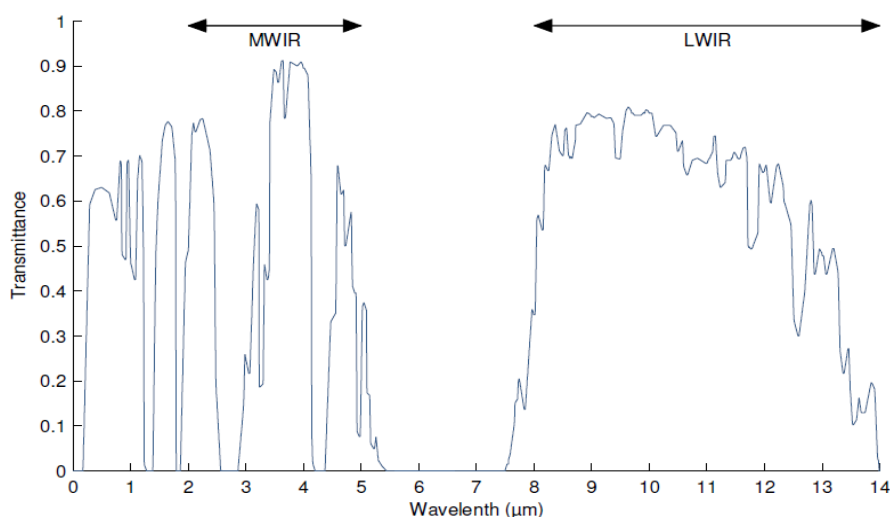
Ένα μεγάλο μέρος του υπέρυθρου φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στην θερμογραφία υπέρυθρων, καθώς αποκόπτεται από την ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι το αξιοποιήσιμο και κατηγοριοποιείται ως εξής:

- Κοντά στις υπέρυθρες από 0,8 μm μέχρι 1,7 μm (Near- infrared: NIR)
- Μικρού μήκους από 1 μm μέχρι 2,5 μm (Short-wavelength infrared: SWIR)
- Μέσου μήκους από 2 μm μέχρι 5 μm (Mid-wavelength infrared: MWIR)
- Μεγάλου μήκους από 8 μm μέχρι 14 μm (Long-wavelength infrared: LWIR)
- Πολύ μεγάλου μήκους από 14 μm μέχρι 1000 μm (Very long-wavelength infrared: VLWIR)

Από όλες αυτές τις περιοχές, οι μεσαίου (MWIR) και μεγάλου (LWIR) μήκους είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στην υπέρυθρη θερμογραφία. Σε αυτό συντελούν δύο βασικές παράμετροι: η περιοχή όπου οι εκπομπές είναι μέγιστες και η ατμοσφαιρική διαπερατότητα (τ_{atm}).

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνα 1 στην περιοχή υπέρυθρης ακτινοβολίας, σε κάθε καμπύλη θερμοκρασίας η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη, μια μέτρηση σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι περισσότερο αποτελεσματική όταν πραγματοποιείται για το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μεγαλύτερη ένταση. Μετρήσεις σε διαφορετικό μήκος κύματος θα απαιτούσαν πολύ πιο ευαίσθητη κάμερα ώστε να επιτευχθεί η ίδια απόδοση. Έτσι, για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτούνται μήκη κύματος μεγαλύτερα από το SWIR.

Ο δεύτερος λόγος για τον οποίο προτιμούνται οι μεσαίου (MWIR) και μεγάλου (LWIR) μήκους κύματος υπέρυθρες ακτινοβολίες σχετίζεται με την ατμοσφαιρική διαπερατότητα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία ταξιδεύει μέσω του αέρα όπου απορροφάται από διάφορα αέρια σωματίδια, κυρίως από το CO₂ και το H₂O. Ο βαθμός απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τον αέρα εξαρτάται από το μήκος κύματος. Στις ζώνες MWIR και LWIR, η απορρόφηση αυτή είναι χαμηλή, επιτρέποντας να φτάσουν μεγαλύτερα ποσά ακτινοβολίας στον αισθητήρα της κάμερας.

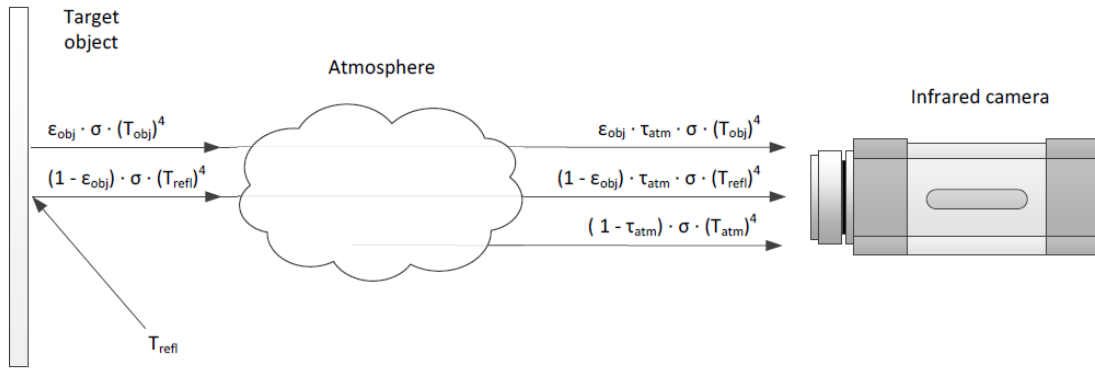


Εικόνα 4: Ατμοσφαιρική διαπερατότητα ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που τη διαπερνά [11]

Η Εικόνα 4 δείχνει τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που τη διαπερνά. Για μήκη κύματος περίπου 2-5 μm και 8-14 μm η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας είναι σε πολύ υψηλά ποσοστά, που σημαίνει ότι ένα πολύ μικρό μέρος της προσπίπτουσας στην ατμόσφαιρα υπέρυθρης ακτινοβολίας απορροφάται από αυτή. Επομένως, οι μετρητικές συσκευές που υπέρυθρων λειτουργούν είτε στην περιοχή μικρού μήκους κυμάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας όταν οι μετρήσεις γίνονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος είτε στην περιοχή μεγάλου μήκους όταν μετρούν υψηλές θερμοκρασίες.

5.1.4 Μέτρηση θερμοκρασίας μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας με τη χρήση IRT μετρά την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο και μετατρέπει την ενέργεια που ανιχνεύεται σε τιμή θερμοκρασίας. Ωστόσο, καθώς το σύνολο της ακτινοβολίας που λαμβάνεται δεν προέρχεται από το αντικείμενο-στόχο, για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας, απαιτείται η ακτινοβολία από άλλες πηγές (όπως άλλα αντικείμενα ή η ατμόσφαιρα) να αφαιρεθεί. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αντιστάθμιση. [11]



Εικόνα 5: Σχεδιάγραμμα μέτρησης θερμοκρασίας ενός αντικειμένου με θερμοκάμερα [11]

Η συνολική ακτινοβολία που προσλαμβάνεται από την κάμερα (W_{tot}) προέρχεται από την εκπομπή του αντικειμένου-στόχου (E_{obj}), του περιβάλλοντος η οποία ανακλάται από το αντικείμενο (E_{refl}) και από την εκπομπή της ατμόσφαιρας (E_{atm}).

Δηλαδή,

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{ref} + E_{atm}$$

Εξίσωση 4

Στον υπολογισμό της εκπεμπόμενης από το αντικείμενο ακτινοβολίας πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν λαμβάνεται ολόκληρη από τη θερμοκάμερα λόγω της απορρόφησης ενός μέρους της από την ατμόσφαιρα.

Άρα,

$$E_{obj} = \varepsilon_{obj} \tau_{atm} \sigma T_{obj}^4$$

Εξίσωση 5

Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον περιβάλλοντα χώρο που, στη συνέχεια, ανακλάται από το αντικείμενο είναι:

$$E_{refl} = (1 - \varepsilon_{obj}) \tau_{atm} \sigma T_{refl}^4$$

Εξίσωση 6

Τέλος, η ενέργεια λόγω εκπομπής ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας είναι:

$$E_{atm} = (1 - \tau_{atm}) \sigma T_{atm}^4$$

Εξίσωση 7

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 4 τις παραπάνω, προκύπτει η Εξίσωση 8 Εξίσωση 8 που δίνει την τιμή της θερμοκρασίας του αντικειμένου ως:

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj})\tau_{atm}\sigma T_{refl}^4 - (1 - \tau_{atm})\sigma T_{atm}^4}{\varepsilon_{obj}\tau_{atm}\sigma}}$$

Εξίσωση 8

Οι παράμετροι που πρέπει να οριστούν είναι ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου, η θερμοκρασία που ανακλάται από το περιβάλλον, η διαπερατότητα και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας εκτιμάται γενικά με βάση την απόσταση του αντικειμένου από τη θερμοκάμερα και τη σχετική υγρασία. Γενικά, η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας λαμβάνεται χρησιμοποιώντας ένα κοινό θερμόμετρο. Η παράμετρος αυτή έχει μικρή επίδραση στη μέτρηση της θερμοκρασίας, καθώς ο συντελεστής εκπομπής της ατμόσφαιρας είναι πολύ κοντά στο μηδέν ($1 - \tau_{atm}$). Αντίθετα, ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου και η ανακλώμενη θερμοκρασία έχουν πολύ μεγάλη επίδραση στη μέτρηση της θερμοκρασίας και είναι απαραίτητο η μέτρησή τους να γίνεται με ακρίβεια [11].

5.1.5 Συντελεστές εκπομπής και θερμοκρασία ανάκλασης

Όπως φαίνεται και από την Εξίσωση 8 η ζητούμενη θερμοκρασία του αντικειμένου είναι συνάρτηση του συντελεστή εκπομπής (ε) του αντικειμένου και της ανακλώμενης θερμοκρασίας από την επιφάνειά του (T_{refl}). Αυτές οι δύο παράμετροι είναι, επομένως, απαραίτητο να ορισθούν με ακρίβεια προκειμένου η μέτρηση με θερμογραφία υπερύθρων να δώσει σωστά αποτελέσματα.

Για τη μέτρηση του συντελεστή εκπομπής ακολουθείται μια δεδομένη διαδικασία κατά την οποία το αντικείμενο θερμαίνεται μέχρις ότου να φτάσει τη θερμοκρασία που θα έχει κάτω από φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας. Η θερμοκρασία του αντικειμένου μετράται είτε με θερμοστοιχείο (μέθοδος επαφής) είτε με τη θερμοκάμερα (μέθοδος συντελεστή εκπομπής αναφοράς του υλικού). Στη δεύτερη περίπτωση ένα κομμάτι κολλητικής ταινίας για ηλεκτρική χρήση (συνήθως γνωστού συντελεστή εκπομπής) επικολλάται πάνω στο αντικείμενο και στη συνέχεια μετράται η θερμοκρασία της. Τέλος, αφού είναι πλέον γνωστή η πραγματική θερμοκρασία του αντικειμένου, η θερμοκρασία του μετράται με τη θερμοκάμερα μεταβάλλοντας το συντελεστή εκπομπής στις ρυθμίσεις της κάμερας μέχρις ότου να δείξει τη σωστή θερμοκρασία. Επομένως, ο συντελεστής εκπομπής για τον οποίο η ένδειξη της θερμοκάμερας ταυτίζεται με την πραγματική θερμοκρασία του αντικειμένου, είναι ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου.

Αντίστοιχα, για τον καθορισμό της θερμοκρασίας ανάκλασης χρησιμοποιείται η παρακάτω διαδικασία. Η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος του κατόπτρου κατά την οποία χρησιμοποιείται κάποιο υλικό γνωστής ανακλαστικότητας, για παράδειγμα μια επικάλυψη χρυσού με 95% ανακλαστικότητα σε μήκη κύματος 2-20μm. Πιο συχνά επιλέγεται σαν εναλλακτική κατόπτρου ένα φύλλο αλουμινίου το οποίο έχει πρώτα τσαλακωθεί και στη συνέχεια έχει γίνει πάλι επίπεδο. Το κάτοπλο τοποθετείται μέσα στο πεδίο όρασης της κάμερας και μετράται η θερμοκρασία του ορίζοντας την τιμή του συντελεστή εκπομπής ίση

με 1. Τέλος, η μέτρηση επαναλαμβάνεται ορίζοντας σαν τιμή ανακλώμενης θερμοκρασίας τη θερμοκρασία του κατόπτρου που μετρήθηκε στην αρχή. Η τιμή που αποδίδει η θερμοκάμερα είναι η πραγματική ανακλώμενη θερμοκρασία [11].

5.1.6 Τεχνικές θερμογράφησης

Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μέθοδοι υπέρυθρης θερμογραφίας είναι η ενεργητική θερμογραφία και η παθητική θερμογραφία. Στην περίπτωση παθητικής θερμογραφίας τα υλικά ή τα σώματα που εξετάζονται βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος από τη φύση τους. Αντίθετα, στην ενεργητική θερμογραφία απαιτείται κάποιος εξωγενής παράγοντας ο οποίος να προκαλεί τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του εξεταζόμενου αντικειμένου και του περιβάλλοντος του [12].

5.1.6.1 Παθητική

Η παθητική θερμογραφία αξιοποιείται πολύ συχνά στη διάγνωση σφαλμάτων και αστοχιών σε βιομηχανικές εφαρμογές. Διάφορες ανωμαλίες στο προφίλ της θερμοκρασίας υποδεικνύουν την ύπαρξη κάποιου προβλήματος, δηλαδή κάποιου πιθανού σημείου αστοχίας μέσα στο υλικό. Οι έντονες θερμοκρασιακές διαφορές είναι τις περισσότερες φορές απόδειξη για την ύπαρξη ανώμαλης συμπεριφοράς.

Γενικά, η παθητική θερμογραφία έχει ποιοτικό χαρακτήρα, με την έννοια ότι στοχεύει στον εντοπισμό των ανωμαλιών και όχι στην ποσοτικοποίησή τους. Σε κάποιες περιπτώσεις όπου το θερμικό μοντέλο της δεδομένης κατάστασης μπορεί να υπολογιστεί, η παθητική θερμογραφία είναι δυνατό να παρέχει και ποσοτικές μετρήσεις [12].

5.1.6.2 Ενεργητική

Στην ενεργητική θερμογραφία ένα εξωτερικό ερέθισμα δημιουργεί μια θερμοκρασιακή διαφορά την οποία καταγράφει η θερμοκάμερα. Το ερέθισμα αυτό είναι δεν εμφανίζεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και ο σκοπός του είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός της θέσης μιας πιθανής ανωμαλίας. Αυτό είναι εφικτό όταν τα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος, για παράδειγμα ο χρόνος εφαρμογής του, είναι γνωστά. Οι ιδιότητες των μεθόδων ενεργητικής θερμογραφίας την καθιστούν κατάλληλη στις εφαρμογές μη καταστροφικών δοκιμών.

Οι διάφορες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας χαρακτηρίζονται με βάση το ερέθισμα το οποίο επιβάλλεται στο αντικείμενο. Τέτοιες είναι η θερμογραφία με παλμό (pulse thermography: PT), η θερμογραφία με βηματική θέρμανση (step heating: SH), η θερμογραφία εστιασμένης θέρμανσης (lock in thermography: LT) και η θερμογραφία ταλαντώσεων (vibrometry: VT) [12].

5.1.7 Θερμοκάμερες

Η θερμοκάμερα είναι μια ανιχνευτική διάταξη η οποία μετράει την ακτινοβολία που προσπίπτει στον φακό και με κατάλληλες βαθμονομήσεις τη «μεταφράζει» σε θερμοκρασία. Παρουσιάζει, δηλαδή, την επιφανειακή θερμοκρασία των σωμάτων στα οποία εστιάζει.

Το πιο σημαντικό στοιχείο της θερμοκάμερας είναι ο ανιχνευτής θερμότητας ή αλλιώς οπτικός δέκτης. Στην έξοδο του ανιχνευτή ακτινοβολίας καταλήγει ένα σήμα εξαρτώμενο από την ακτινοβολία που προσπίπτει στο φακό. Από το συγκεκριμένο σήμα θα προκύψει μια οπτική αναπαράσταση με τη μορφή μιας σειράς σημείων, τα οποία είναι ευρέως γνωστά ως pixels. Η απεικόνιση των υπέρυθρων εικόνων μπορεί να αποθηκευτεί ή να παρουσιαστεί σε πραγματικό χρόνο, το οποίο συνηθίζεται σε μη καταστροφικές εφαρμογές και ελέγχους.

Δύο βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας μιας θερμοκάμερας είναι η ευαισθησία και η ανάλυση (θερμοκρασιακή και χωρική). Η ευαισθησία εκφράζει την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ποσότητα θερμοκρασίας και μετράται με μονάδες θερμοκρασίας. Θερμοκάμερες με πολύ καλή ευαισθησία αναγνωρίζουν διαφορές θερμοκρασίας της τάξης των 10^{-3} °C. Η θερμοκρασιακή ανάλυση αφορά την ομαλότητα με την οποία παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές στην επιφάνεια του παρατηρούμενου αντικειμένου. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα σώμα παρουσιάζει απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές αυτές θα οφείλονται στο ίδιο το σώμα και όχι στην ανάλυση της κάμερας. Η χωρική ανάλυση εξαρτάται απ τον αριθμό των pixels της θερμοκάμερας, όπου όσο περισσότερα pixels συνθέτουν μια εικόνα, τόσο καλύτερη χωρική ανάλυση διαθέτει.

Μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να επισημανθεί είναι το δυναμικό εύρος, το οποίο εξαρτάται από την ψηφιοποίηση της θερμής εικόνας. Όσο περισσότερα bits χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της θερμοκρασίας σε κάθε pixel, τόσο μεγαλύτερο το δυναμικό εύρος. Το δυναμικό εύρος αντικατοπτρίζει τη θερμοκρασιακή λεπτομέρεια που αποθηκεύεται σε ένα pixel.

Τέλος, στις σύγχρονες θερμοκάμερες, χρησιμοποιείται η τεχνολογία συστοιχιών εστιακού επιπέδου (Focal Plane Array) για τους ανιχνευτές. Η κατασκευή καμερών FPA είναι αρκετά απλή, υπό την έννοια ότι χρειάζονται μόνο τα οπτικά μέσα, η συστοιχία εστιακού επιπέδου με τα απαραίτητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και σε μερικές περιπτώσεις ένα σύστημα ψύξης.

5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ PİTOT-STATIC

Το απλούστερο μετρητικό όργανο ολικής πίεσης είναι ο σωλήνας Pitot. Ο σωλήνας Pitot αποτελείται από έναν λεπτότοιχο σωλήνα με ένα ανοιχτό άκρο το οποίο τοποθετείται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής. Στο ανοιχτό άκρο εμφανίζεται σημείο ανακοπής, δηλαδή μηδενίζεται η ταχύτητα και η πίεση που μετράται είναι η ολική.

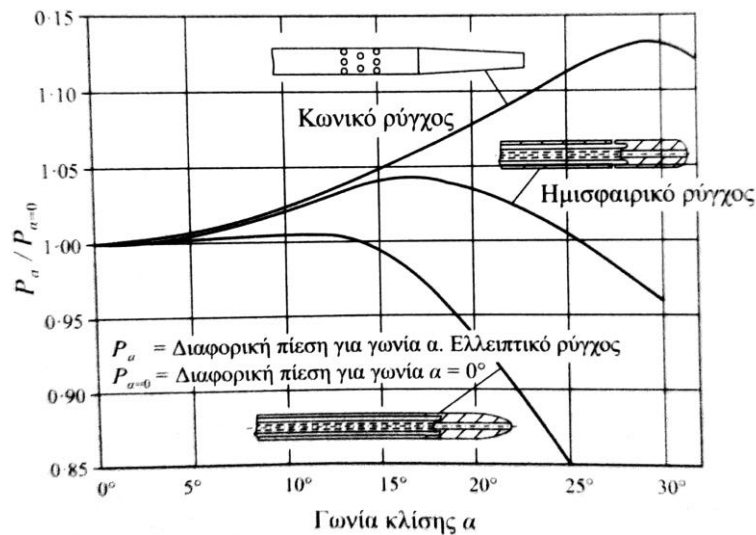
Όταν επιθυμούμε και τη μέτρηση της σημειακής ταχύτητας της ροής, χρησιμοποιείται σωλήνας Pitot-Static ή σωλήνας Prandtl ο οποίος συνδυάζει ένα σωλήνα στατικής και ένα σωλήνα ολικής πίεσης (Pitot). Ο σωλήνας Prandtl ή Pitot-static αποτελείται από έναν σωλήνα Pitot, ο οποίος σε κατάλληλη απόσταση από το ανοιχτό του άκρο φέρει έναν αριθμό περιφερειακών οπών. Από την πρώτη οπή γίνεται η μέτρηση της ολικής πίεσης, και από τις περιφερειακές η μέτρηση της στατικής πίεσης. Ο εσωτερικός σωλήνας συνδέεται με το ένα άκρο ενός μανομέτρου και διοχετεύει στην ολική πίεση και ο εξωτερικός διοχετεύει την στατική πίεση στο άλλο άκρο του μανομέτρου.

Για ασυμπίεστη ροή, η εξίσωση Bernoulli δίνει:

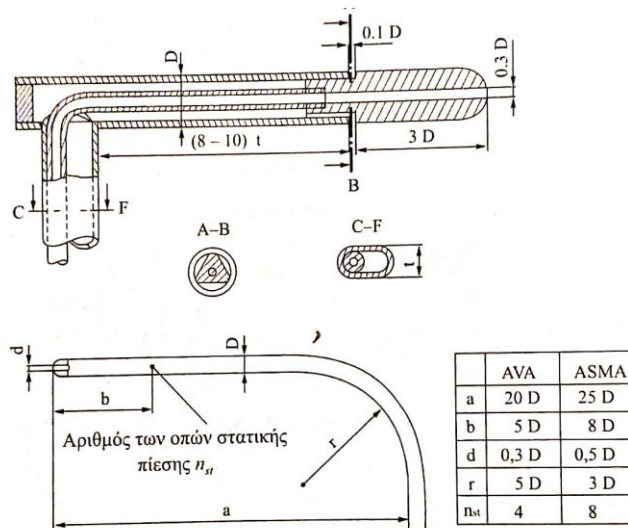
$$\frac{\rho}{2} u^2 = p_0 - p \text{ ή } u = \sqrt{\frac{p_0 - p}{\rho/2}}$$

Εξίσωση 9

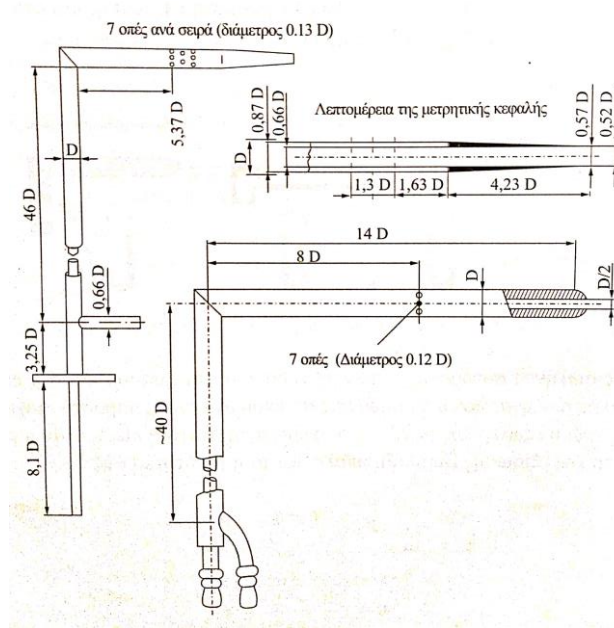
Η γωνία κλίσης α του σωλήνα παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της μέτρησης της ολικής πίεσης. [13] Τροποποιώντας το είδος της κεφαλής του άκρου του σωλήνα επιτυγχάνεται βελτίωση στην επίδραση της γωνίας κλίσης, τόσο για τους σωλήνες μέτρησης μόνο της ολικής πίεσης, όσο και για τους σωλήνες με περιφερειακές οπές (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Χαρακτηριστικές γωνίες κλίσεις σωλήνων Prandtl [13]



Εικόνα 7: Τυπικές κατασκευαστικές μορφές για σωλήνες Prandtl κατά AVA και ASMA [13]



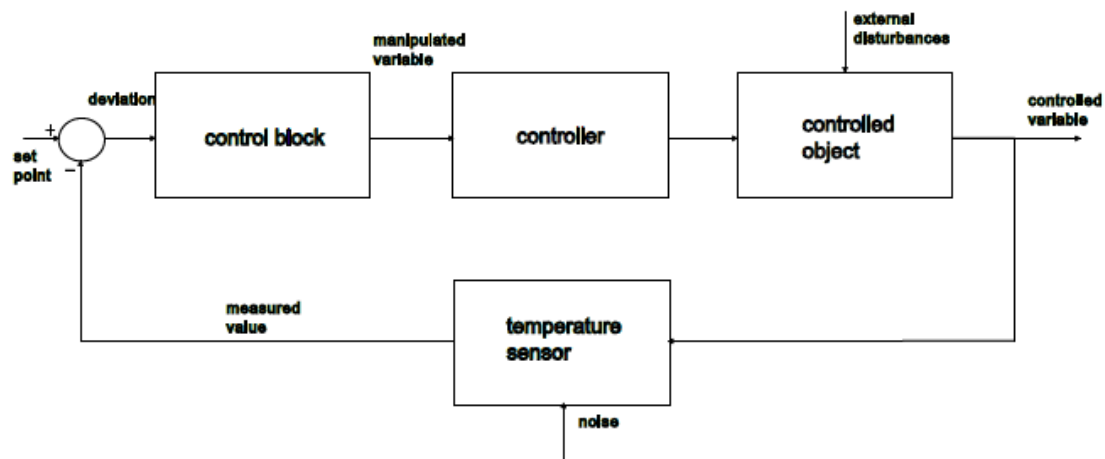
Εικόνα 8: Σωλήνες Prandtl με οξεία και στρογγυλεμένη κεφαλή [13]

Η διαφορική πίεση ($p_0 - p$) μετράται είτε από διαφορικό μανόμετρο όπου η μετατόπιση του μανομετρικού υγρού συσχετίζεται με τη μεταβολή της ταχύτητας, είτε από ψηφιακό μανόμετρο στο οποίο αποθηκεύονται οι τοπικές τιμές της ταχύτητας και υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών.

5.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ PID

5.3.1 Γενικά για τα συστήματα ελέγχου

Ένα σύστημα ακριβούς ελέγχου θερμοκρασίας μιας διεργασίας, το οποίο δεν απαιτεί εκτεταμένη εμπλοκή του χειριστή, βασίζεται σε έναν ελεγκτή ο οποίος δέχεται ως είσοδο έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, όπως ένα θερμοστοιχείο ή ένα RTD (Εικόνα 9). Η διαδικασία ελέγχου είναι απλή. Ο ελεγκτής συγκρίνει την θερμοκρασία που μετράει ο αισθητήρας με την επιθυμητή θερμοκρασία ελέγχου, η οποία συνήθως αποκαλείται «σημείο αναφοράς» ή «setpoint», και παρέχει μια έξοδο σε ένα στοιχείο ελέγχου. [14]



Εικόνα 9: Δομικό διάγραμμα ελέγχου θερμοκρασίας

Κατά το σχεδιασμό του κατάλληλου συστήματος ελέγχου για μια δεδομένη εφαρμογή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

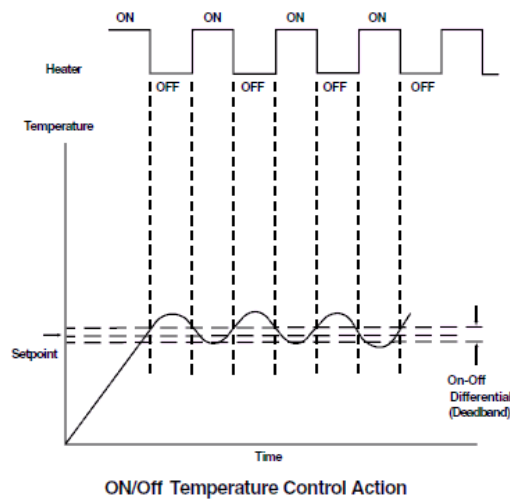
- Το είδος του αισθητήρα (θερμοστοιχείο, RTD) και το εύρος θερμοκρασιών κατά τη λειτουργία της διάταξης
- Το είδος της εξόδου (ηλεκτρομηχανικό ρελέ, SSR, αναλογική έξοδος)
- Το πλήθος των εξόδων και η λειτουργία τους (θέρμανση, ψύξη κλπ)
- Το είδος του ελέγχου (on/off, αναλογικός, PID)
- Η φύση της εγκατάστασης και των συνθηκών λειτουργίας, η ασφάλεια, το κόστος, η διαθεσιμότητα, η αξιοπιστία, το βάρος, το μέγεθος [14]

5.3.2 Είδη ελεγκτών

5.3.2.1 Ελεγκτές δύο θέσεων (On/Off)

Σε ένα σύστημα ελέγχου δύο θέσεων, ο ενισχυτής (actuating element) έχει μόνο δύο σταθερές θέσεις, οι οποίες είναι συνήθως το on και το off. Ο έλεγχος δύο θέσεων είναι σχετικά απλός και φθηνός και γι αυτό το λόγο βρίσκει πολύ συχνή εφαρμογή σε βιομηχανικά και οικιακά συστήματα ελέγχου. [14]

Αν είναι $u(t)$ το σήμα εξόδου και $e(t)$ το σήμα σφάλματος, το $u(t)$ λαμβάνει είτε την τιμή U_1 αν το σφάλμα είναι θετικό είτε την τιμή U_2 αν το σφάλμα είναι αρνητικό. Τα U_1, U_2 είναι σταθερές ποσότητες και συνήθως $U_2=0$ ή $U_2=-U_1$. Το διάστημα κατά το οποίο πρέπει να μετακινηθεί το σήμα σφάλματος πριν επιτευχθεί η μεταγωγή (switching) ονομάζεται διαφορικό κενό (differential gap). Το διαφορικό διάκενο αναγκάζει την έξοδο να διατηρεί την παρούσα τιμή της μέχρις ότου το σήμα του σφάλματος μετακινηθεί πέρα από τη μηδενική τιμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής να αυξομειώνεται κυκλικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Λειτουργία ελεγκτή δύο θέσεων[Πηγή: <https://www.ia.omron.com>]

5.3.2.2 Αναλογικός ελεγκτής (P)

Οι ελεγκτές με αναλογική δράση ελέγχου, διατηρούν μία σχέση μεταξύ του σήματος εξόδου $u(t)$ και του σήματος σφάλματος $e(t)$ της μορφής:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Όπου K_p το αναλογικό κέρδος.

Επομένως, πρόκειται για έναν ενισχυτή με ρυθμίσιμο κέρδος K_p . Στον αναλογικό έλεγχο στόχος είναι η απάλειψη της κυκλικής εναλλαγής του σήματος εξόδου που συμβαίνει στον έλεγχο δύο θέσεων. Ένας αναλογικός ελεγκτής έχει τη δυνατότητα να μειώνει το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στην ελεγχόμενη μεταβλητή όσο αυτή πλησιάζει την τιμή αναφοράς. Αυτή η αναλογική διαδικασία εφαρμόζεται εντός ενός εύρους τιμών γύρω από την τιμή αναφοράς, ενώ έξω από το εύρος αυτό ο ελεγκτής λειτουργεί σαν on/off, δίνοντας έξοδο U_1 όταν η τιμή της θερμοκρασίας είναι χαμηλότερα από το κατώτερο όριο του «αναλογικού εύρους» και, αντίστοιχα, έξοδο U_2 όταν είναι πάνω από το ανώτερο όριο.

5.3.2.3 Ολοκληρωτικός ελεγκτής (I)

Στους ελεγκτές με ολοκληρωτική δράση ελέγχου, η τιμή της εξόδου $u(t)$ μεταβάλλεται με την παράγωγο του σήματος σφάλματος:

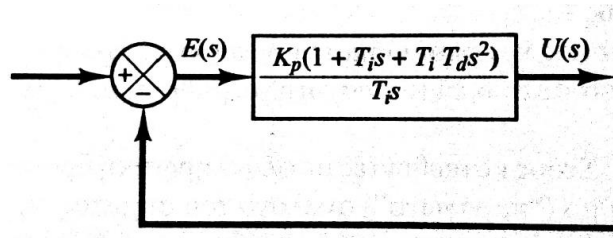
$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

5.3.2.4 Αναλογικός- Ολοκληρωτικός- Διαφορικός Ελεγκτής (PID)

Ο έλεγχος PID συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του αναλογικού, του ολοκληρωτικού και του διαφορικού ελέγχου με εξίσωση εξόδου την:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_{der} \frac{de(t)}{dt}$$

Όπου K_p το αναλογικό κέρδος, T_i ο χρόνος ολοκλήρωσης και T_d ο χρόνος διαφόρισης



Εικόνα 11: Δομικό διάγραμμα PID ελέγχου [14]

Αυτού του είδους οι ελεγκτές, παρέχουν τον πιο ακριβή και σταθερό έλεγχο σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους και είναι κατάλληλοι για συστήματα με σχετικά μικρή μάζα, τα οποία αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές φορτίου, ενέργειας ή ελεγχόμενης μάζας.

Στην πράξη, ο χρόνος ολοκλήρωσης αναφέρεται ως reset και ο χρόνος διαφόρισης ως rate. Αυτές οι δυο παράμετροι αντιστοιχούν στους όρους ολοκλήρωσης και διαφόρισης και καθορίζονται με δοκιμές στην εκάστοτε εφαρμογή.

5.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

5.4.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο, χωρίς να συνοδεύεται από αλλαγή φάσης καθώς και στην περίπτωση δύο σωμάτων που βρίσκονται σε απόλυτη επαφή χωρίς σχετική κίνηση. Στα στερεά σώματα, μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται είτε μέσω μοριακών ταλαντώσεων είτε μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων. Στα υγρά σώματα, η ύπαρξη δυνάμεων μεταξύ των μορίων τους επιδρά στην κίνησή τους και συνεπώς στη μετάδοση της θερμότητας. Στα αέρια σώματα, η κινητική ενέργεια των μορίων αυξάνεται όταν αυτά συγκρούονται με μόρια που προέρχονται από περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας του σώματος και έτσι επιτυγχάνεται η μετάδοση της θερμότητας. Στην περίπτωση των αερίων σωμάτων η μετάδοση της θερμότητας εξαρτάται και από την πίεση αφού αυτή επιδρά στην κινητικότητα των μορίων τους. Είναι φανερό ότι η μετάδοση θερμότητας με αγωγή στα υγρά και τα αέρια υφίσταται μόνο σε λεπτά στρώματα αυτών διότι σε παχύτερα στρώματα λαμβάνουν χώρα μακροσκοπικές κινήσεις των μορίων και ατόμων τους οπότε εμφανίζονται φαινόμενα συναγωγής.

Η γενική εξίσωση ενέργειας για μεταφορά θερμότητας με αγωγή είναι:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \nabla T &= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}'''}{k} \\ &= \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

Εξίσωση 10

Όπου \dot{q}''' ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου στον οποίο εφαρμόζεται ισοζύγιο ενέργειας, T η θερμοκρασία και ορίζουμε τις παραμέτρους:

$a = \frac{k}{\rho c_p}$: η θερμική διαχυτότητα σε [m²/s] και

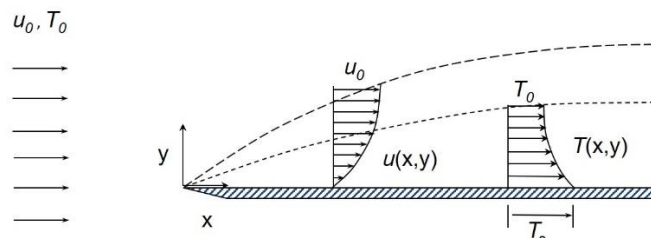
k : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού σε [W/mK]

Η εξίσωση απλουστεύεται όταν δεν υπάρχει εσωτερική πηγή θερμότητας και $\dot{q}''' = 0$ και όταν η διαφορά θερμοκρασίας δεν μεταβάλλεται με το χρόνο οπότε $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.

5.4.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η συναγωγή είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στα ρευστά, όπου η ύλη μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα. Καθώς στοιχεία μάζας του ρευστού μετακινούνται από μία περιοχή σε άλλη μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους (συνάγουν) όλες τους τις ιδιότητες, δηλαδή την ορμή τους, τη θερμική τους ενέργεια και τα συστατικά τους. Στην περίπτωση που η κίνηση του ρευστού γίνεται υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, η συναγωγή πραγματοποιείται λόγω εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις δυνάμεις άνωσης λόγω μεταβολής θερμοκρασίας και κατ' επέκταση μεταβολής πυκνότητας, η συναγωγή πραγματοποιείται με φυσική κυκλοφορία.

Η πιο απλή περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή είναι αυτής της θερμαινόμενης πλάκας (T_s) μέσα σε ροή ρευστού (U_0, T_0) (Εικόνα 12) . Εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς του ρευστού με την επιφάνεια αναπτύσσεται -παράλληλα με το υδροδυναμικό- και θερμικό οριακό στρώμα. Η θερμοκρασία μεταβαίνει ασυμπτωτικά από T_s στην επιφάνεια της πλάκας σε T_0 . Το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις της πλάκας.



Εικόνα 12: Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή πάνω από επίπεδη πλάκα

Η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται από το πάχος τόσο του θερμικού όσο και του υδροδυναμικού οριακού στρώματος. Ο αδιάστατος αριθμός Prandtl συσχετίζεται με τα οριακά στρώματα και ορίζεται ως:

$$Pr = \frac{c_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$$

Εξίσωση 11

Όπου c_p η θερμοχωρητικότητα του ρευστού (J/kgK), ν το κινηματικό ιξώδες (m²/s).

Ο αριθμός Pr εκφράζει τη διαχυτότητα της ορμής προς τη διαχυτότητα της θερμότητας. Για αριθμούς Pr μεγαλύτερους του 1 το πάχος του υδροδυναμικού οριακού στρώματος είναι μεγαλύτερο από αυτό του θερμικού και το αντίθετο.

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός ρευστού εκφράζεται με τη σχέση:

$$\dot{q}''_{\text{συν}} = h(T_w - T_{\text{ref}})$$

Εξίσωση 12

Όπου h είναι ο συντελεστής συναγωγής, T_w η θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας και T_{ref} η θερμοκρασία μακριά από το τοίχωμα. Τα προβλήματα συναγωγής εστιάζονται πολύ συχνά στο υπολογισμό ή στην προσέγγιση του συντελεστή συναγωγής h . Ο αδιάστατος αριθμός που συνδέεται με το συντελεστή συναγωγής είναι ο αριθμός Nusselt και ορίζεται ως:

$$Nu = \frac{hl}{k}$$

Εξίσωση 13

Όπου l ένα χαρακτηριστικό μήκος (π.χ. το μήκος μιας θερμαινόμενης πλάκας) και k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού.

Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής, έχει αναπτυχθεί για τον αριθμό Nusselt μια πληθώρα εμπειρικών τύπων για διαφορετικές περιπτώσεις ροής και διατάξεις.

Στην περίπτωση φυσικής κυκλοφορίας είναι σημαντικός ο ορισμός του αδιάστατου αριθμού Grashof (Gr) που ορίζεται ως:

$$Gr = \frac{g\beta H^3 (T_w - T_{\text{ref}})}{\nu^2}$$

Εξίσωση 14

Όπου $\beta = 1/T_{\text{ref}}$ [1/K], ο συντελεστής διαστολής όγκου του ρευστού.

Πολλές φορές χρησιμοποιείται αντί του αριθμού Grashof ο αριθμός Richardson. Ο αριθμός Ri εκφράζει την κυριαρχία της άνωσης ή φυσικής συναγωγής ως προς την εξαναγκασμένη συναγωγή όταν η δράση των δυο τύπων συμβαίνει ταυτόχρονα. Ο Ri ορίζεται ως:

$$Ri = \frac{gH(T_w - T_{\text{ref}})}{T_{\text{ref}} u_{\text{ref}}^2}$$

Εξίσωση 15

Προκύπτει ότι

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

Εξίσωση 16

Όταν ο λόγος Gr/Re^2 είναι πολύ μικρότερος της μονάδας, η φυσική κυκλοφορία είναι αμελητέα, ενώ όταν είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδας αμελείται η εξαναγκασμένη συναγωγή. Στην περίπτωση που ο λόγος Gr/Re^2 είναι πολύ κοντά στο 1, οι δύο μηχανισμοί έχουν αντίστοιχη επίδραση.

Ακόμα, στη φυσική συναγωγή το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) καθορίζεται από τον αριθμό Rayleigh (Ra). Ο Ra δίνεται από τη σχέση:

$$Ra = GrPr = \frac{g\beta H^3 (T_w - T_{ref}) \nu}{\nu^2} \frac{\nu}{\alpha} = \frac{g\beta H^3 (T_w - T_{ref})}{\nu\alpha}$$

Εξίσωση 17

Με τον υπολογισμό του αριθμού Ra και με βάση την μορφή του στερεού ορίου πάνω από το οποίο περνάει το ρευστό (π.χ. κατακόρυφη ή οριζόντια πλάκα) αποφαινόμαστε για το είδος της ροής. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt από εμπειρικές σχέσεις της μορφής:

$$Nu = C Ra^n$$

Εξίσωση 18

Όπου οι αριθμοί Nusselt και Rayleigh αναφέρονται είτε ως τοπικοί είτε ως μέσοι και οι C, n είναι σταθερές που δίνονται από πίνακες.

Τελικά, είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο τοπικός συντελεστής συναγωγής και επομένως το ποσό θερμότητας το οποίο μεταφέρεται από το θερμαινόμενο σώμα στην ροή του ρευστού λόγω φυσικής συναγωγής.

5.4.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Η θεωρία της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία αναπτύχθηκε στο 5.1.2. Συνοπτικά, η πυκνότητα παροχής θερμότητας από σώμα που ακτινοβολεί δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{q}''_{\text{ακτ}} = \varepsilon \sigma T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Εξίσωση 19

Όπου $\varepsilon \in [0,1]$ ο συντελεστής εκπομπής του σώματος και

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$$

είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann.

6 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

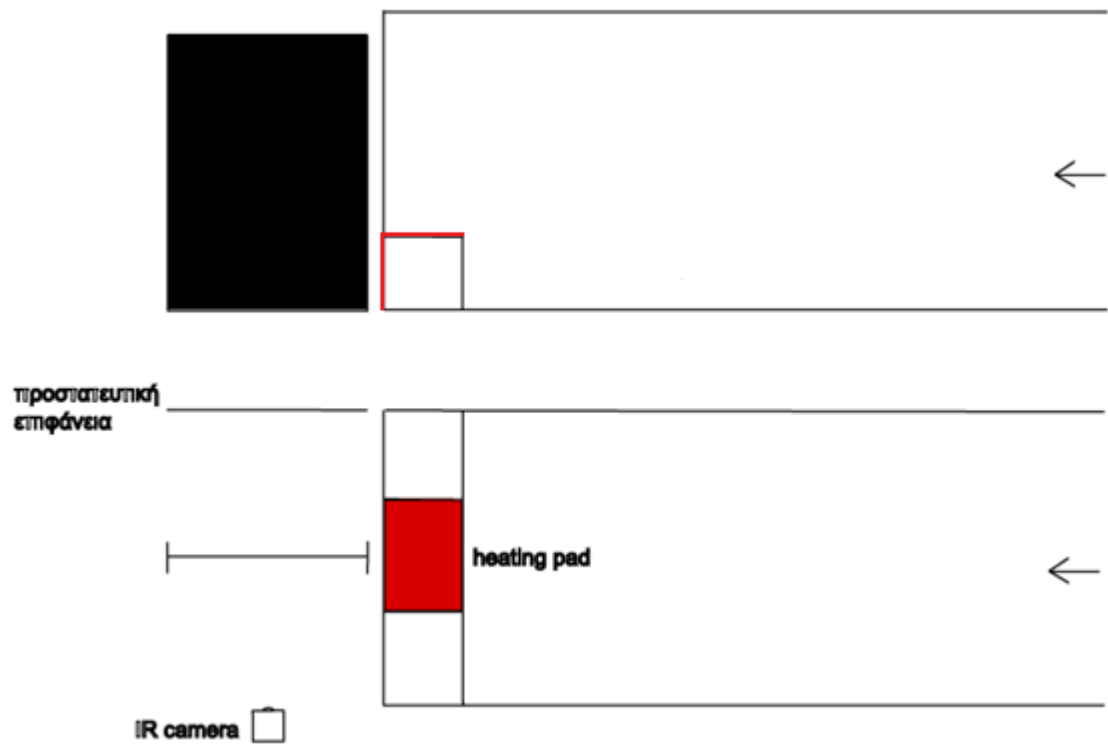
6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε εξ'αρχής η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη ενώ ο απαραίτητος εξοπλισμός διατέθηκε από το Εργαστήριο ΚΤΠΠ.

Στόχος του πειράματος είναι η επίτευξη μετρήσεων υψηλής ακρίβειας θερμοκρασιακού προφίλ και σημειακών ταχυτήτων ρευστού. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε σημεία ενδιαφέροντος πάνω από το εμπόδιο, αρχικά χωρίς και στη συνέχεια με την παρουσία θερμαινόμενων επιφανειών, σε σταθερή θερμοκρασία πολύ υψηλότερη από του περιβάλλοντος. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται η αεροσήραγγα να λειτουργεί όπως μια open-jet αεροσήραγγα. Επομένως, είναι απαραίτητο η διάταξη καθώς και τα μετρητικά όργανα να τοποθετούνται πολύ κοντά στην έξοδο της αεροσήραγγας και συμμετρικά ως προς το μέσο του πλάτους της.

Ένα κομμάτι ξύλου τετραγωνικής διατομής πλευράς $a=5,5$ cm και μήκους 40 cm τοποθετείται στην έξοδο της αεροσήραγγας λειτουργώντας σαν εμπόδιο στη ροή. Δύο θερμαινόμενες ελαστικές σιλικονούχες επιφάνειες διαστάσεων $2'' \times 4''$ τοποθετούνται κατά μήκος του εμποδίου στην κάθετη στη ροή πλευρά και στην παράλληλη σε αυτή (Εικόνα 13). Η θερμοκρασία των πλακών μετράται από αισθητήρα RTD και διατηρείται σταθερή μέσω συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας τύπου PID. Έπειτα, ένα μεταλλικό πλέγμα επικαλυμμένο με βαμμένο ματ μαύρο φύλλο αλουμινίου τοποθετείται κάθετα στις θερμαινόμενες επιφάνειες και παράλληλα στη ροή του ρευστού ώστε να μειώνονται στο μέγιστο δυνατό οι διαταραχές που προκαλεί σε αυτή (Εικόνα 13, Εικόνα 14α). Το πλέγμα αυτό είναι ο «στόχος» ο οποίος μπορεί να εντοπιστεί με υπέρυθρη θερμογραφία και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του θερμοκρασιακού προφίλ του ρέοντος αέρα.

Προκειμένου να προσδιοριστεί το προφίλ των ταχυτήτων πάνω από το θερμαινόμενο εμπόδιο χρησιμοποιείται μανόμετρο με σωλήνα Pitot-static ο οποίος τοποθετείται στην έξοδο της αεροσήραγγας με το ρύγχος του παράλληλα και αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής (Εικόνα 14β). Το πτυσσόμενο στέλεχος του εξυπηρετεί στην λήψη μετρήσεων σε οποιαδήποτε θέση επιθυμούμε κατακόρυφα πάνω από το εμπόδιο. Στη συνέχεια, με το σωλήνα Pitot-Static μετρούνται και οι σημειακές ταχύτητες της πλήρως ανεπτυγμένης ροής εντός της σήραγγας σε απόσταση 21 cm από την έξοδό της (Εικόνα 21).



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης



Εικόνα 14: Φωτογραφίες της διάταξης: α) διάταξη εμποδίου και φύλλου μέτρησης και β) εμπόδιο με τοποθετημένα τα θερμαντικά στοιχεία και το σωλήνα Pitot για τη μέτρησης της ταχύτητας, στην έξοδο της αεροσήραγγας

6.1.1 Επεξήγηση συνδεσμολογίας συστήματος διατήρησης θερμοκρασίας

Συνολικά η διάταξη του συστήματος θέρμανσης και ελέγχου των θερμαινόμενων επιφανειών αποτελείται από τον μετασχηματιστή τάσης ρεύματος, τις θερμαινόμενες επιφάνειες, τον αισθητήρα RTD και τον PID ελεγκτή.

Για τις ανάγκες του πειράματος απαιτείται τα τοιχώματα του μοντέλου να βρίσκονται σε θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη του περιβάλλοντος η οποία να διατηρείται σταθερή. Η συνθήκη αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ελαστικών σιλικονούχων θερμαινόμενων επιφανειών οι οποίες εφαρμόζονται σταθερά πάνω στα τοιχώματα του μοντέλου. Χρησιμοποιήθηκαν οι ηλεκτρικά θερμαινόμενες επιφάνειες OMEGALUX® Silicone Rubber Fiberglass Insulated Heaters SRFG-204/10-P, ως κατάλληλες για την συγκεκριμένη εφαρμογή όσον αφορά το σχήμα, το μέγεθος, το εύρος θερμοκρασιών και τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Οι θερμαινόμενες επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν αποδίδουν θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας ίση με $10\text{W}/\text{in}^2$, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι οι 120°C .

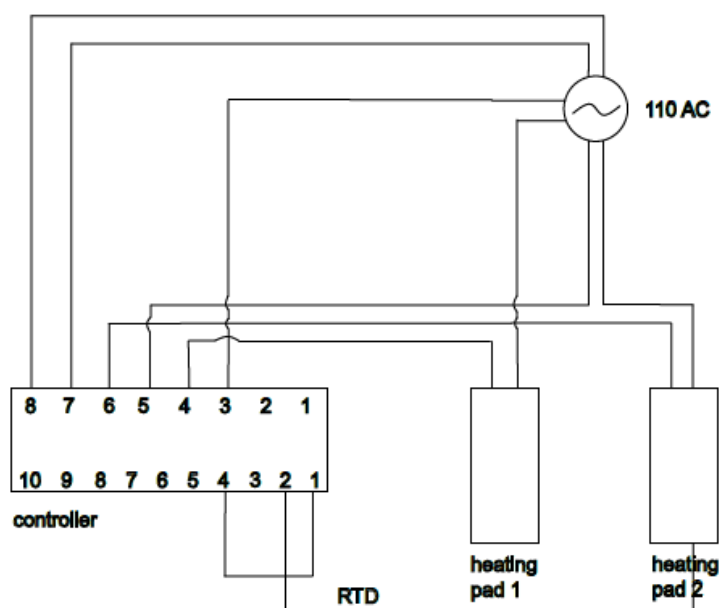
Προκειμένου να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία των τοιχωμάτων σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε σύστημα ελέγχου PID. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Platinum Series CN32Pt-220 της εταιρείας OMEGA®. Ο ελεγκτής χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευκολία στη χρήση καθώς, εκτός από τη χειροκίνητη πλοήγηση στο μενού, μπορεί να αξιοποιηθεί και το αντίστοιχο λογισμικό. Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα πλήρους ορισμού των παραμέτρων λειτουργίας του ελεγκτή, προγραμματισμού του ελέγχου και παρακολούθησης της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο. Ο χρήστης του λογισμικού ορίζει την επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας, διαχειρίζεται τις παραμέτρους του ελέγχου, παρακολουθεί την εξέλιξη της θερμοκρασίας και την αντίδραση του συστήματος ελέγχου σε μεταβολές και έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει αυτά τα δεδομένα. Καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων γίνεται καταγραφή της μεταβολής με το χρόνο της θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών μέσω του λογισμικού.

Για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων χρησιμοποιήθηκε ο RTD αισθητήρας RTD- F3102-36-T-B της εταιρίας OMEGA® ο οποίος προσαρμόστηκε πάνω στη θερμαινόμενη επιφάνεια και συνδέθηκε στις ειδικές υποδοχές του ελεγκτή. Ανάμεσα στον αισθητήρα και τη θερμαινόμενη επιφάνεια τοποθετήθηκε μια στρώση θερμοαγώγιμης πάστας η οποία διασφαλίζει ότι ο αισθητήρας λαμβάνει την ακριβή θερμοκρασία της επιφάνειας, ακόμα και στην περίπτωση που δεν εφάπτεται κανονικά πάνω στην επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας στον αισθητήρα για την λήψη σωστών μετρήσεων.

Η διάταξη τροφοδοτείται με ρεύμα τάσης 110V, η οποία απαιτείται για τη λειτουργία της θερμαινόμενης επιφάνειας. Η πτώση τάσης από τα 220V στα 110V πραγματοποιείται με μετασχηματιστή στον οποίο συνδέεται πολύμπριζο από το οποίο τροφοδοτείται ξεχωριστά ο ελεγκτής (υποδοχές εξόδου 7-8) και οι θερμαινόμενες επιφάνειες (υποδοχές εξόδου 3-4 και 5-6). Ο αισθητήρας RTD συνδέεται απλώς στις υποδοχές εισόδου 1-2-4 του ελεγκτή και στερεώνεται πάνω στη μια από τις δύο θερμαινόμενες επιφάνειες.

Η λειτουργία ενός συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας ενός φορτίου από τον ελεγκτή προϋποθέτει την ύπαρξη ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Αυτό προκύπτει με την παρακάτω διαδικασία. Το ένα από τα δύο καλώδια της κάθε θερμαινόμενης επιφάνειας συνδέεται

απευθείας στην μία από τις δύο κατάλληλες υποδοχές εξόδου του ελεγκτή (cold wire). Στο άλλο καλώδιο της επιφάνειας πρέπει να γίνει ένωση με τον ένα πόλο του καλωδίου τροφοδοσίας και ο δεύτερος πόλος να συνδεθεί στην υποδοχή του ελεγκτή ώστε να κλείσει ο βρόγχος. Η συνδεσμολογία γίνεται κατανοητή με το σχεδιάγραμμα στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Συνδεσμολογία συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας

6.1.2 Σχετικά με την αεροσήραγγα

Για τις ανάγκες του πειράματος αξιοποιήθηκε η μικρή αεροσήραγγα του εργαστηρίου. Η αεροσήραγγα έχει μήκος 1,5m και ορθογωνική διατομή διαστάσεων 23x40 cm².

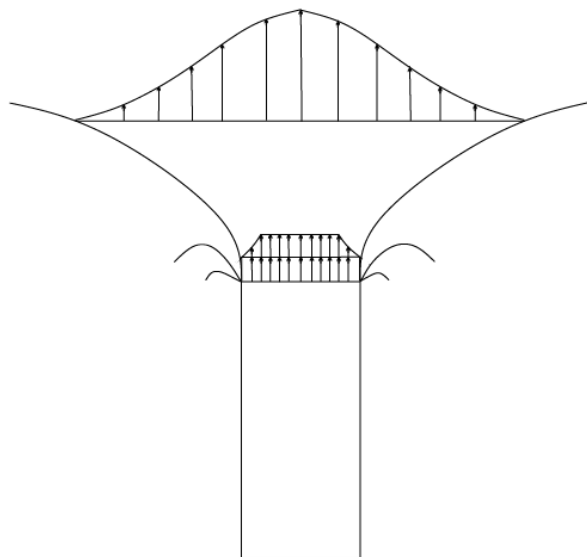
Η επιλογή της συγκεκριμένης αεροσήραγγας στηρίχθηκε καταρχάς στη δυνατότητα ικανοποίησης των απαιτήσεων του πειράματος και στα πλεονεκτήματα που διαθέτει μια εφαρμογή σε ανοιχτού τύπου αεροσήραγγα. Η πειραματική διάταξη τοποθετείται με ευκολία στην έξοδο της σήραγγας και είναι προσβάσιμη κατά τη διάρκεια των δοκιμών για πιθανές διορθώσεις.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση ειδικότερα χρειάστηκαν διαδοχικές μετρήσεις ταχυτήτων και θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία. Οι μετρήσεις ταχυτήτων γίνονται σημειακά, επομένως για κάθε μέτρηση χρειάζεται και μια μετακίνηση του οργάνου. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία του ρεόντος αέρα εκτιμάται ως η θερμοκρασία του πλέγματος-στόχου. Τα σημεία στα οποία πρέπει να τοποθετηθούν η θερμοκάμερα και το πλέγμα είναι συγκεκριμένα, ενώ η τοποθέτηση γίνεται χειροκίνητα και η διαδικασία αυτή απαιτεί πολλές μικρές μετακινήσεις των οργάνων και λεπτές κινήσεις. Έτσι οι μικρές διορθώσεις και προσαρμογές καθίστανται γρήγορες και αποτελεσματικές λόγω της ευκολίας πρόσβασης που παρέχει μια open jet διάταξη.

Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε με κύριο γνώμονα τη δυνατότητα χρήσης θερμοκάμερας, αφού η μέτρηση πεδίου θερμοκρασίας με υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί το βασικό μέρος της παρούσας μελέτης. Ανάμεσα στη θερμοκάμερα και το πεδίο μέτρησης

δεν υπάρχουν παρεμβολές άλλων αντικειμένων ενώ η θέση της κάμερας δεν επηρεάζει με κανέναν τρόπο τη ροή που εξέρχεται από την αεροσήραγγα.

Η αξιοποίηση της αεροσήραγγας σαν αεροσήραγγα ανοιχτού τύπου ενέχει ασφαλώς και ορισμένους περιορισμούς. Αυτοί αφορούν κυρίως στην ομοιομορφία της ροής στην έξοδο της σήραγγας, όπου είναι τοποθετημένο το πλέγμα μέτρησης του θερμοκρασιακού πεδίου. Η μορφή της ροής κατάντι του εμποδίου στην έξοδο της αεροσήραγγας αναπτύσσεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Ποιοτική αποτύπωση της μορφής της ροής στην έξοδο της αεροσήραγγας

Με βάση αυτή την πληροφορία η πειραματική διάταξη τοποθετείται εντός του τμήματος της ροής που είναι ομοιόμορφο. Συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει οι θέσεις που τοποθετείται το πλέγμα να είναι εντός αυτού του τμήματος και οι θερμαινόμενες επιφάνειες να είναι επικολλημένες σε σημεία του εμποδίου στα οποία προσπίπτει ροή ομοιόμορφης κατανομής ταχύτητας.

6.1.3 Μετρητικά συστήματα

6.1.3.1 Θερμοκάμερα

Η θερμογραφία για τη μέτρηση πεδίου θερμοκρασίας ρέοντος αέρα αποτελεί μια μέθοδο μη επεμβατική και οικονομική, η οποία παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια. Παρόλα αυτά χρειάζεται ειδική μεταχείριση καθώς είναι ένα μέσο το οποίο δεν επιτρέπει την άμεση μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα. Ο περιορισμός αυτός κάμπτεται χρησιμοποιώντας ένα μεταλλικό πλέγμα ως αντικείμενο εντοπισμού από τη θερμοκάμερα. Το πλέγμα είναι κατασκευασμένο από ηλεκτροσυγκολλημένο εν θερμώ γαλβανισμένο σύρμα διαμέτρου 1.5 mm και έχει ορθογωνική οπή διαστάσεων 12x25 mm².

Η τεχνική που ακολουθείται βασίζεται στη χρήση ενός «στόχου» κατάλληλης γεωμετρίας και θερμικών ιδιοτήτων ο οποίος έρχεται σε θερμικό ισοζύγιο με τον περιβάλλοντα αέρα σε συγκεκριμένο χρόνο. Επομένως, η μέτρηση της θερμοκρασίας του «στόχου» με τη χρήση θερμογραφίας ισοδυναμεί με μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα.

Καθώς η ανάλυση της θερμοκάμερας δεν επιτρέπει τον εντοπισμό σύρματος αυτού του πάχους, δοκιμάστηκε η χρήση κάποιου υλικού που να καλύπτει μια ολόκληρη επιφάνεια χωρίς κενά. Μετά από δοκιμές, ως βέλτιστη λύση προέκυψε η επικάλυψη του πλέγματος με φύλλο αλουμινίου το οποίο βιάφτηκε με μαύρο ματ χρώμα κιμωλίας ώστε η ανακλαστικότητα του να είναι σχεδόν μηδενική. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται προέρχεται από το πλέγμα και ένα πολύ μικρότερο από τα γειτονικά αντικείμενα.

Σαν αποτέλεσμα έχουμε ένα στερεό σώμα μεγάλου βαθμού εκπομπής, το οποίο λειτουργεί σαν «στόχος» και εντοπίζεται από τη θερμοκάμερα. Το φύλλο αλουμινίου έχει υψηλή θερμική διαχυτότητα (α). Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα διαδίδεται στο εσωτερικό του με υψηλό ρυθμό. Συγκεκριμένα,

$$\alpha_{Al1100} = \frac{k}{\rho c_p} = 906 \text{ mm}^2/\text{sec}$$

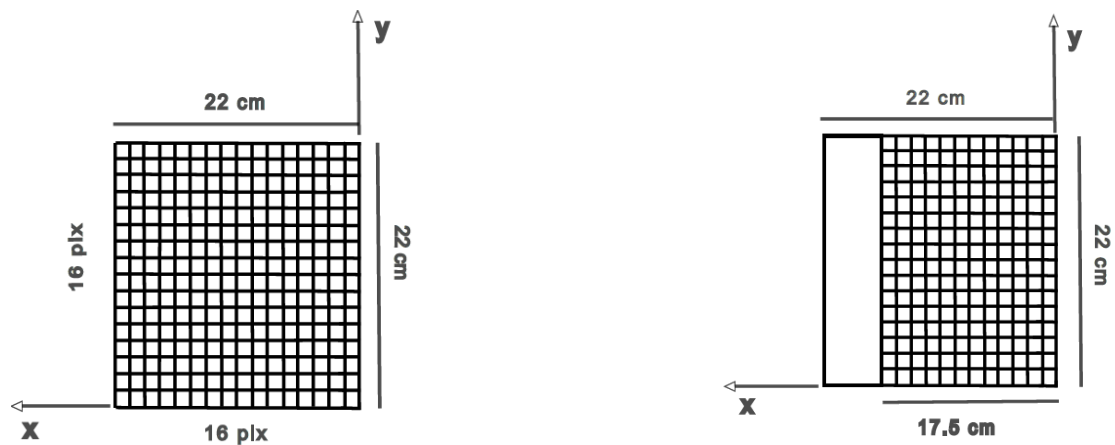
Όπου, $\rho = 2.71 \frac{g}{cm^3}$, $k = 222 \frac{W}{mK}$, $c_p = 904 \frac{J}{kgK}$

Επομένως, η θερμοκρασία του πλέγματος προσαρμόζεται πολύ γρήγορα στις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε οι θερμαινόμενες επιφάνειες να καλυφθούν με φύλλο αλουμινίου. Χρησιμοποιήθηκε τυπικό φύλλο αλουμινίου για οικιακή χρήση, το οποίο είναι καθαρό Al 1100, με συντελεστή εκπομπής $\epsilon \approx 0,08$. Με τον τρόπο αυτό, ελαχιστοποιείται η επίδραση της ακτινοβολίας από τις θερμές επιφάνειες πάνω στο πλέγμα και μπορεί να θεωρηθεί ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται εξ ολοκλήρου με συναγωγή.

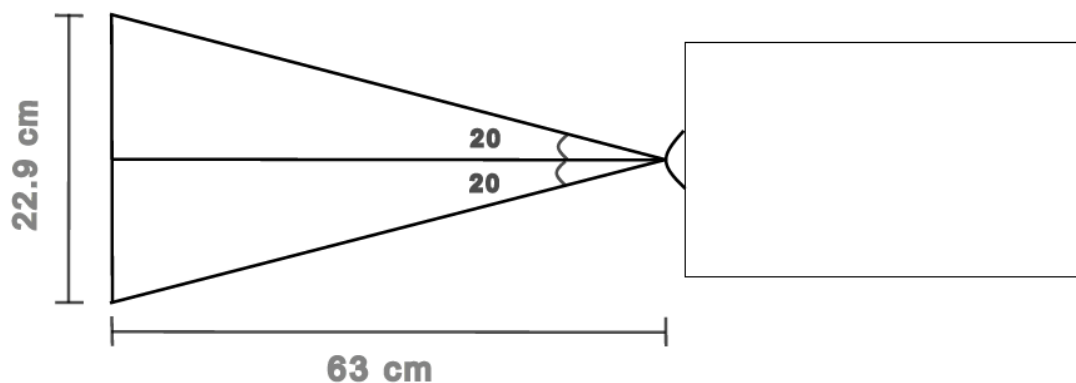
Επιπλέον, είναι απαραίτητη μια διαδικασία καθορισμού του κάδρου της θερμοκάμερας. Καταρχάς, πρέπει να αποκόπτονται από την τελική εικόνα του πεδίου θερμοκρασίας αντικείμενα που μπορεί να βρίσκονται στο βάθος ή κάπου αλλού στο χώρο και να εκπέμπουν θερμότητα. Για αυτό το λόγο ο χώρος πίσω από το σημείο του πειράματος αποκόπτεται από το πεδίο θέασης της θερμοκάμερας με μια ξύλινη επιφάνεια μικρού πάχους.

Με την έννοια του καθορισμού του κάδρου της κάμερας εννοούμε ότι χρειάζεται να προσδιοριστούν ακριβώς τα σημεία του χώρου τα οποία αυτή καταγράφει. Συγκεκριμένα, η κάμερα τοποθετείται κάθετα στο επίπεδο του πλέγματος και οι σχετικές τους θέσεις είναι τέτοιες ώστε οι τρεις πλευρές του κάδρου της να ταυτίζονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια με τα τρία όρια του πλέγματος. Το αριστερό όριο του πλέγματος δεν ταυτίζεται με αυτό του κάδρου της κάμερας λόγω των διαστάσεων τους (Εικόνα 17β). Αυτή η μη ταύτιση είναι και εμφανής στα θερμογραφήματα που προκύπτουν και είναι ένας παράγοντας που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι θερμοκρασιακό πεδίο που καταγράφει η θερμοκάμερα είναι αποκλειστικά η έκταση που καταλαμβάνει το πλέγμα και όχι η επιφάνεια που έχει τοποθετηθεί ακριβώς πίσω από τη διάταξη.



Εικόνα 17: (α) Αντιστοιχία pixels με πραγματικές αποστάσεις, (β) Διαστάσεις του πλέγματος σε σχέση με το FoV της θερμικάμερας

Από τις τεχνικές προδιαγραφές της θερμικάμερας, γνωρίζουμε το FoV (Field of View), δηλαδή το μέγεθος των γωνιών που έχουν ως κορυφή τους το φακό της κάμερας και εκτείνονται στο παράλληλο και στο κατακόρυφο στο έδαφος επίπεδο. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι $FoV=(20^\circ,20^\circ)$. Επομένως, αν το πλάτος και το ύψος του πλέγματος που χρησιμοποιείται είναι 17.5cm και 22cm αντίστοιχα, η θέση του φακού της θερμικάμερας πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση 63cm από αυτό (Εικόνα 18).



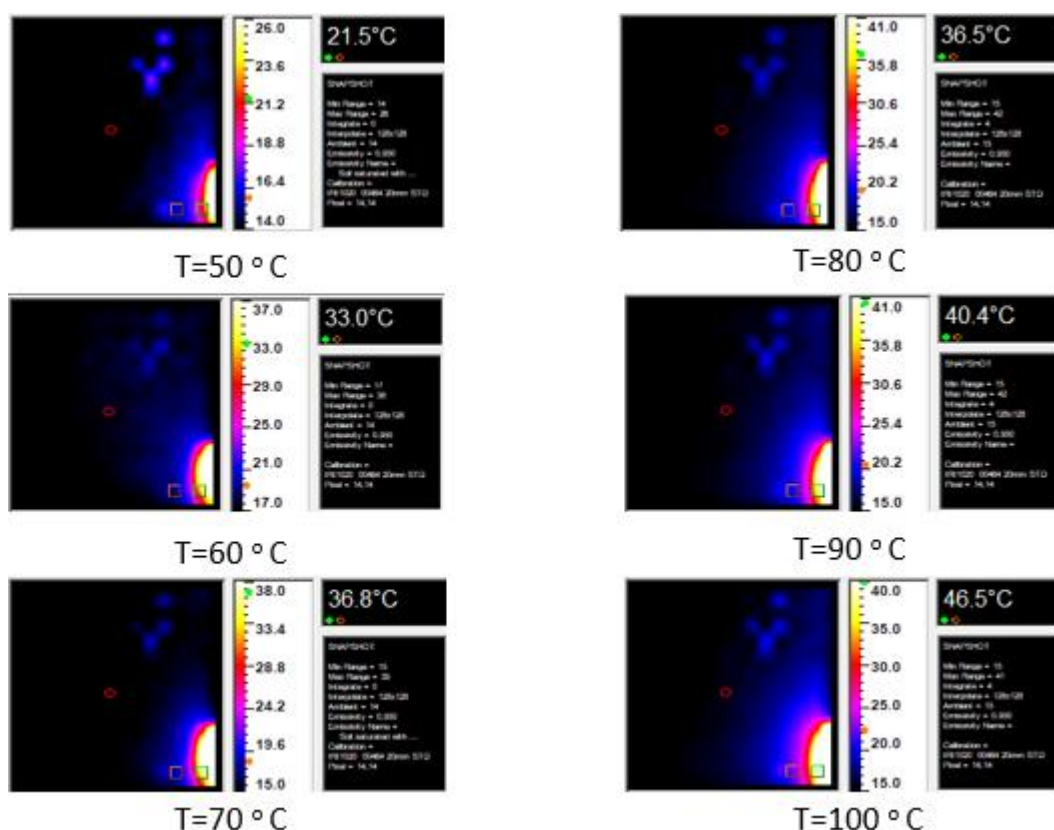
Εικόνα 18: Field of View της θερμικάμερας

Το πλέγμα-στόχος τοποθετήθηκε σε απόσταση 0.5cm από το μέσο του εμποδίου και των θερμαινόμενων επιφανειών. Η θερμικάμερα τοποθετήθηκε έτσι ώστε αυτές να είναι εκτός του πεδίου όψης της, ώστε να μην διαταράσσουν, λόγω της πολύ υψηλότερης θερμοκρασίας τους, το πεδίο μέτρησης του πλέγματος-στόχου. Ένα ακόμα πρόβλημα που θα προέκυπτε αν θέλαμε να συμπεριλαμβάνονται στην εικόνα και τα θερμαινόμενα τοιχώματα του εμποδίου θα ήταν ότι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα heating pads και στα πιο απομακρυσμένα σημεία του πλέγματος είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συμπεριληφθούν οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας τους σε μία αξιοποιήσιμη εικόνα.

Η διάταξη δοκιμάστηκε θέτοντας διάφορες θερμοκρασίες στις θερμαινόμενες επιφάνειες και παρατηρώντας τη μορφή των θερμογραφήματων που προέκυπταν (Εικόνα 19). Στην κατάσταση ηρεμίας, χωρίς παροχή αέρα, τα θερμογραφήματα είχαν κοινή μορφή όσον αφορά την διάδοση της θερμότητας πάνω στο πλέγμα, ενώ φυσικά άλλαζαν οι τιμές της θερμοκρασίας που καταγράφονταν. Αντιθέτως, όταν το πλέγμα βρισκόταν μέσα σε ροή αέρα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στις θερμαινόμενες επιφάνειες και άρα και στο πλέγμα,

απέδιδαν καλύτερη οπτικοποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ σε σχέση με τις χαμηλότερες. Τα αποτελέσματα επηρεάζονταν σημαντικά και από την ταχύτητα της ροής, καθώς στις μεγαλύτερες ταχύτητες ήταν αμελητέα η επίδραση των ανωστικών δυνάμεων. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, επιλέχθηκαν οι τελικές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας.

Για λόγους οπτικοποίησης και πάλι, επιλέχθηκε να αφήνεται επαρκής χρόνος έως ότου να σταθεροποιείται το πεδίο θερμοκρασίας στην κατάσταση ηρεμίας. Στόχος του πειράματος σε αυτή τη φάση είναι να μπορούμε να δούμε τη μορφή του θερμοκρασιακού πεδίου πάνω στο πλέγμα όσο πιο ευδιάκριτα γίνεται. Επομένως, μέσω δοκιμών επιθυμούμε να καταλήξουμε στον τρόπο με τον οποίο θα έχουμε το βέλτιστο οπτικό αποτέλεσμα.



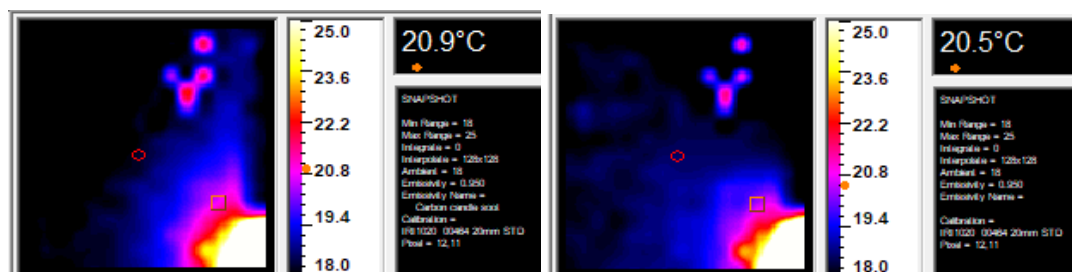
Εικόνα 19: Όψεις θερμοκρασιακού πεδίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας των heating pads, χωρίς την ύπαρξη ροής

Παρατηρούμε σε όλα τα θερμογραφήματα ένα στίγμα στην πάνω δεξιά γωνία το οποίο οφείλεται σε βλάβη της θερμοκάμερας και θα αγνοείται στο εξής.

Παρακάτω παρατίθεται ακόμη μια περίπτωση προκαταρκτικής δοκιμής της διάταξης. Τα θερμογραφήματα στην Εικόνα 20 δείχνουν τη μεταβολή του πεδίου θερμοκρασίας λόγω μόνιμης ροής αέρα μέσης ταχύτητας $u=1.4$ m/s. Το πρώτο στιγμιότυπο λαμβάνεται σε χρόνο $t=120$ sec μετά την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας των heating pads με μηδενική ταχύτητα ροής και το δεύτερο σε $t=360$ sec αφού έχει σταθεροποιηθεί η ταχύτητα της ροής και η θερμοκρασία των pads.

Στα θερμογραφήματα διακρίνονται ξεκάθαρα οι θέσεις που είναι τοποθετημένες οι θερμαινόμενες επιφάνειες καθώς και το κατακόρυφο όριο του πλέγματος το οποίο

θερμαίνεται στη δεξιά πλευρά του. Στην περίπτωση μη ύπαρξης ροής επιδρά μόνο η άνωση και η επιφάνεια του πλέγματος θερμαίνεται από κάτω κατακόρυφα προς τα πάνω. Αντίθετα, στην περίπτωση ροής, ο θερμός αέρας παρασύρεται και θερμαίνει το πλέγμα όχι μόνο καθ' ύψος, αλλά και κατά πλάτος.



Εικόνα 20: (A) $T_{grid}=70^{\circ}C$, χωρίς ροή, $t=120sec$, (B) $T_{grid}=70^{\circ}C$, με ροή αέρα $u=1.4 m/s$, $t=360sec$

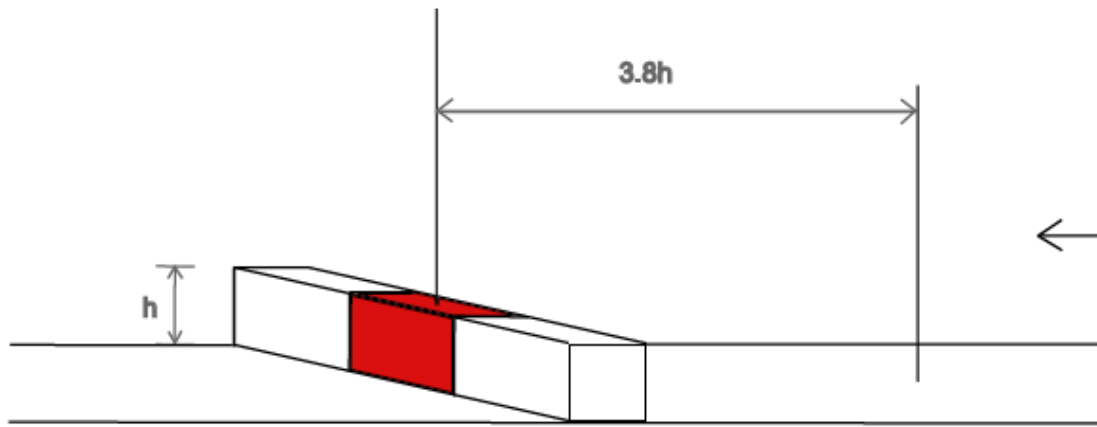
6.1.3.2 Σωλήνας Pitot-static/Prandtl

Η μέτρηση των σημειακών ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε με σωλήνα Pitot-static. Το στέλεχος του σωλήνα σταθεροποιείται μηχανικά με τη χρήση σφιγκτήρων στην έξοδο της αεροσήραγγας με το ρύγχος του σωλήνα να τοποθετείται αντίθετα και παράλληλα στη ροή και το στέλεχος του κάθετα σε αυτή (Εικόνα 14β) .

Το μήκος του στελέχους του οργάνου αυξομειώνεται και άρα η θέση του ρύγχους μπορεί να μετατοπίζεται καθ' ύψος. Επομένως, παίρνονται μετρήσεις σε 15 ισαπέχουσες διαδοχικές θέσεις πάνω από το εμπόδιο. Κοντά στα στερεά όρια αναμένουμε πολύ χαμηλές ταχύτητες λόγω της οριακής συνθήκης μη ολίσθησης και επομένως επιλέχθηκε να ληφθούν μετρήσεις σε αποστάσεις 1.25 cm από τα στερεά όρια.

Επιλέχθηκε να μετρηθούν και οι ταχύτητες καθ' ύψος σε απόσταση 3.8h πριν την έξοδο της σήραγγας. Ο σωλήνας Pitot εισάγεται, διαμέσου μιας τετραγωνικής οπής στο πάνω τοίχωμα της αεροσήραγγας, κατακόρυφα μέσα στο πεδίο της ροής στο επιθυμητό σημείο (Εικόνα 21). Στη συνέχεια, φροντίζουμε κατά το δυνατό να μην υπάρχει κανένα άλλο σημείο από το οποίο να μπορεί να εκφεύγει προς το περιβάλλον μέρος της ροής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Αντίστοιχα με τη διαδικασία μέτρησης πάνω από το μέσο του εμποδίου, αφέθηκαν 1,5 cm από το πάνω και το κάτω τοίχωμα της αεροσήραγγας, καθώς όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία, οι μετρήσεις κοντά σε στερεά όρια θα έχουν αποκλίσεις όταν γίνονται με σωλήνα Pitot-Static.



Εικόνα 21: Θέσεις μέτρησης σημειακών ταχυτήτων με σωλήνα Pitot

Στη συγκεκριμένη αεροσήραγγα, η ταχύτητα της ροής ρυθμίζεται χειροκίνητα αλλάζοντας τις στροφές του ηλεκτροκινητήρα και άρα της πτερωτής στο πίσω μέρος της. Θα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός N για να υποδηλώνει τις στροφές και το N λαμβάνει τιμές 1-4. Σε κάθε περίπτωση, η μέση τιμή της ταχύτητας (u_m), η τυπική απόκλιση (u_{std}) και ο μέσος Reynolds (Re_m) στην πλήρως ανεπτυγμένη ροή εντός της αεροσήραγγας για κάθε N παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

	N=1	N=3	N=4
u_m (m/s)	0,910	1,110	1,275
u_{std} (m/s)	0,147	0,119	0,191
Re_m	3381,8	4125	4738,2

Πίνακας 1: Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και αριθμός Reynolds για τρεις ταχύτητες ροής

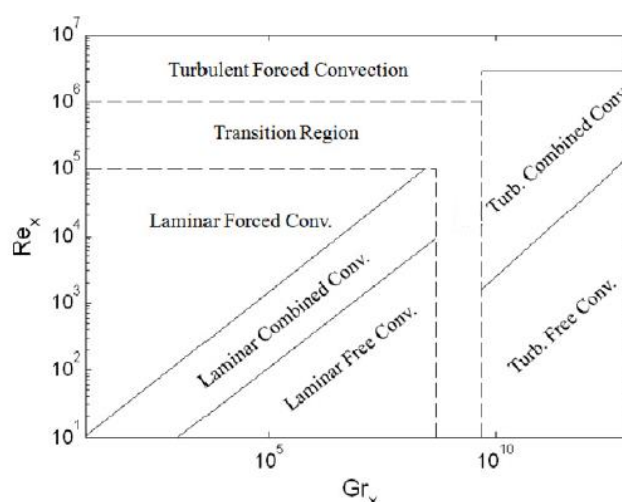
Το σημείο που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε σε αυτό το στάδιο των μετρήσεων είναι η επίδραση που έχει η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των τοιχωμάτων του εμποδίου και του αέρα, στα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται 15 μετρήσεις με τις θερμαινόμενες επιφάνειες να βρίσκονται σε θερμοκρασία $T=100^{\circ}\text{C}$ και 15 μετρήσεις χωρίς αυτές να θερμαίνονται. Σε κάθε θέση το χρονικό διάστημα μέτρησης είναι 30 sec.

Από τις μετρήσεις των σημειακών ταχυτήτων υπολογίζεται και η μέση τιμή του αδιάστατου αριθμού Richardson, ο οποίος είναι ένα μέτρο της αναλογίας των ανωστικών δυνάμεων στη ροή και των δυνάμεων συνεκτικότητας. Το γινόμενο του αριθμού Ri και του τετραγώνου του Re δίνει τον αδιάστατο αριθμό Gr .

N	Re	Ri	Gr
1	3381,8	2,34	$2,68 \cdot 10^7$
3	4125	1,60	$2,71 \cdot 10^7$
4	4738,2	0,97	$2,18 \cdot 10^7$

Πίνακας 2: Αδιάστατοι αριθμοί για τρεις περιπτώσεις ροής

Στη βιβλιογραφία [15] βρίσκουμε προηγούμενες μελέτες, που αφορούν ισόθερμες επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας μέσα σε ροή ρευστού, στις οποίες συσχετίζεται η κινητική κατάσταση της ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης) και ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με τους αριθμούς Re και Gr. Οι αριθμοί Gr που υπολογίζονται στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι της τάξης του 10^7 και άρα, με βάση το διάγραμμα στην Εικόνα 22, εμπίπτουν στην περίπτωση στρωτής ροής και συνδυασμένης συναγωγής.



Εικόνα 22: Χάρτης τυρβώδους κατάστασης ροής και μηχανισμού συναγωγής [15]

Οι αριθμοί Ri που μελετούνται αντιστοιχούν στην περίπτωση της συνδυασμένης μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή συντελούνται ταυτόχρονα φυσική και εξαναγκασμένη συναγωγή. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [16] για κατακόρυφη πλάκα ομογενώς κατανεμημένης θερμοκρασίας ισχύει ότι:

- $Ri < 0,1$: εξαναγκασμένη συναγωγή
- $0,1 < Ri < 3,0$: συνδυασμένη φυσική και εξαναγκασμένη κυκλοφορία
- $Ri > 3,0$: φυσική συναγωγή

Με βάση αυτή την κατηγοριοποίηση και οι 3 περιπτώσεις ροών που μελετούνται θεωρούνται συνδυασμένης κυκλοφορίας, όμως με διαφορετικά ποσοστά φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής.

Η τιμή $Ri=2,34$ ήταν η μέγιστη δυνατή που μπορούσε να επιτευχθεί στη συγκεκριμένη αεροσήραγγα λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του εμποδίου και της ελάχιστης ταχύτητας που μπορούσε να επιτευχθεί στην αεροσήραγγα. Οι θερμαινόμενες επιφάνειες έχουν ανώτατο όριο θέρμανσης τους $120 \text{ }^\circ\text{C}$, επομένως για λόγους ασφαλείας η τιμή θερμοκρασίας που ορίστηκε ήταν $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Αντίστοιχα, για τιμές Ri χαμηλότερες από 0,97 παύει να υπάρχει διαφορά στο θερμοκρασιακό πεδίο που καταγράφει η θερμοκάμερα, καθώς η ταχύτητα είναι αρκετά μεγάλη και η θερμοκρασιακή διαφορά των τοιχωμάτων και του περιβάλλοντος αέρα δεν επηρεάζει την γειτονική περιοχή που βρίσκεται το πλέγμα-στόχος.

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

7.1 ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

7.1.1 Συνθήκες περιβάλλοντος και ρυθμίσεις

Ρυθμίσεις παραμέτρων της θερμοκάμερας

Αρχικά, είναι απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία της θερμοκάμερας. Όπως έχει προαναφερθεί, έχει μεγάλη σημασία ο ορισμός του συντελεστή εκπομπής του αντικειμένου που εντοπίζει η θερμοκάμερα και η ανακλώμενη θερμοκρασία από το περιβάλλον. Τα σφάλματα μέτρησης με υπέρυθρη θερμογραφία συνδέονται συνήθως με ζητήματα που αφορούν το συντελεστή εκπομπής και τον εσφαλμένο ορισμό του ή την κακή διαχείριση ανάλογα με την τιμή του. Για το φύλλο αλουμινίου το οποίο είναι βαμμένο με μαύρο ματ χρώμα κιμωλίας, ο συντελεστής εκπομπής ορίστηκε ίσος με 0.95. Η ανακλώμενη από το περιβάλλον θερμοκρασία τέθηκε ίση με 15°C. Επίσης, σύμφωνα με τον κατασκευαστή η ευαισθησία της θερμοκάμερας είναι περίπου 0.3°C (στους 30°C).

Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα να οριστεί ο συντελεστής ολοκλήρωσης. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ολοκλήρωσης, τόσο μικρότερη η επίδραση του θορύβου στον ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Με την έννοια της ολοκλήρωσης (integration) εννοείται η διαδικασία κατά την οποία συνδυάζονται πολλαπλές εικόνες με στόχο να μειωθεί ο θόρυβος, ενώ όμως μειώνεται η ταχύτητα απόκρισης της κάμερας στις αλλαγές. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή ο συντελεστής ολοκλήρωσης κρατήθηκε σε χαμηλά επίπεδα καθώς το φαινόμενο που προσπαθούμε να καταγράψουμε είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο.

Τέλος, ορίζεται χειροκίνητα η κλίμακα των θερμοκρασιών στα θερμογραφήματα που καταγράφονται, έτσι ώστε να είναι δυνατή η προβολή όλων των θερμοκρασιών που καταγράφονται στην τελική εικόνα.

Διακύμανση της θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών με την επίδραση της ροής

Τα θερμοκρασιακά προφίλ στο πλέγμα μετρήθηκαν σε τρεις διαφορετικές συνθήκες ροής αυξανόμενης έντασης. Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών της αδιατάρακτης ροής (ταχύτητα αναφοράς U_{ref} , πίεση αναφοράς P_{ref} , παροχή όγκου αναφοράς \dot{V}_{ref} και αριθμός Reynolds όπως υπολογίζεται για την ταχύτητα U_{ref} και για χαρακτηριστικό μήκος το μήκος της αεροσήραγγας για τις τρεις περιπτώσεις συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3).

	N=1	N=3	N=4
$U_{ref}(\frac{m}{s})$	0,910	1,110	1,275
Re_{ref}	3381,8	4125	4738,2
$P_{ref}(Pa)$	0,5	0,8	1
$\dot{V}_{ref}(\frac{m^3}{s})$	0,084	0,102	0,117

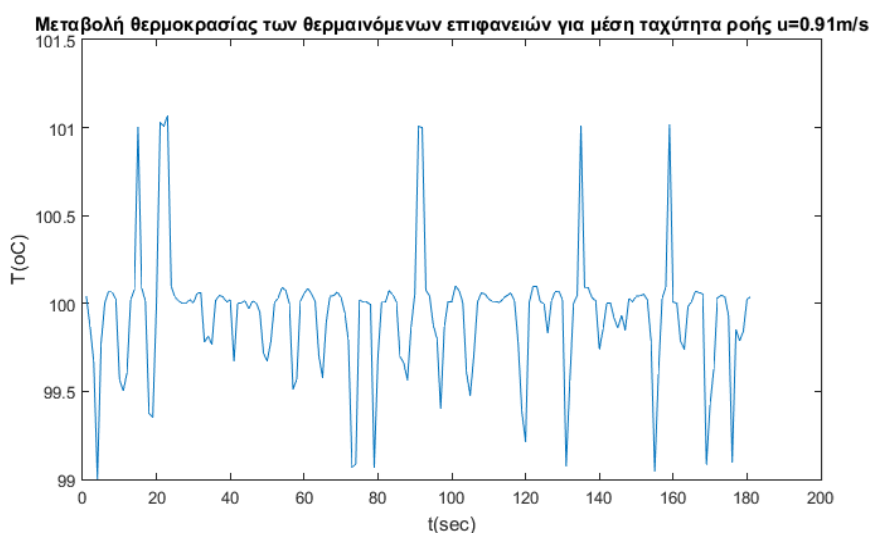
Πίνακας 3: Μέσες τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής

Η θερμοκρασία των θερμαινόμενων επιφανειών πάνω στο εμπόδιο είχε τεθεί σε $T=100^{\circ}\text{C}$. Μέσω του λογισμικού που παρέχεται για τον ελεγκτή, καταγράφεται καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων η διακύμανση της θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών, όπως αυτή μετράται από τον αισθητήρα RTD. Η τυπική απόκλιση της είναι της τάξης του 0.83% στην πρώτη, 2.49% στη δεύτερη και 6.23% στην τρίτη περίπτωση. Ο έλεγχος PID προσφέρει το πλεονέκτημα της προσαρμογής στις εξωτερικές συνθήκες, αφού μεταβάλλει κάθε στιγμή τις τιμές των παραμέτρων ελέγχου ώστε η μεταβλητή εξόδου να παραμένει σταθερή. Οι τυπικές αποκλίσεις γύρω από την επιθυμητή τιμή (100°C) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

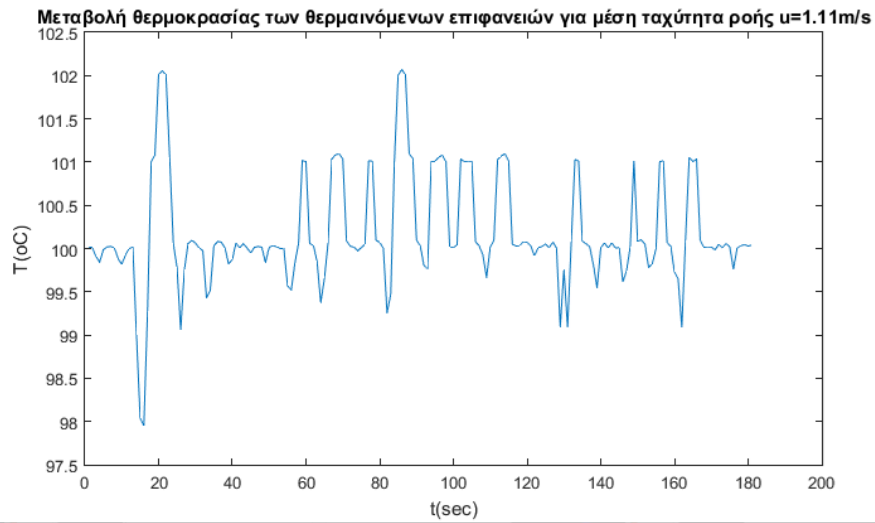
Κλίμακα στροφών A/Σ	Τυπ. Απόκλιση (%)
N=1	0.83
N=3	2.49
N=4	6.23

Πίνακας 4: Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για 3 κλίμακες ταχυτήτων ρευστού

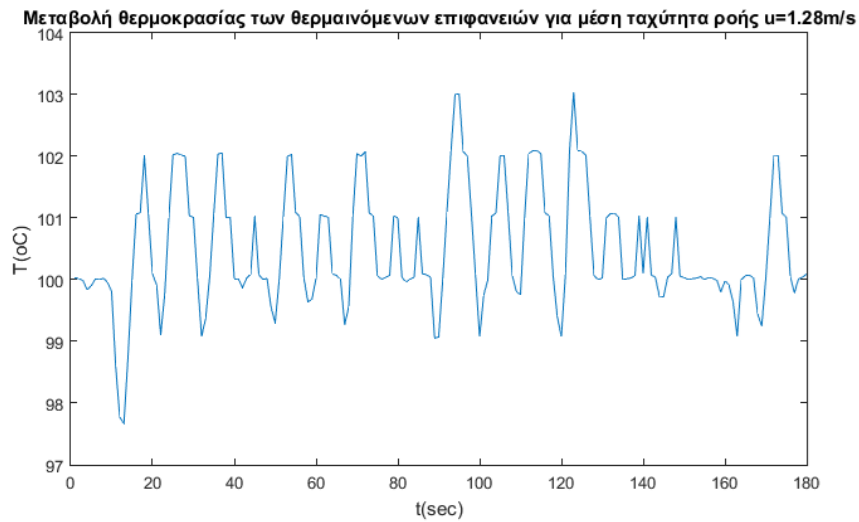
Στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 1,2,3) παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας των επιφανειών γύρω από την επιθυμητή τιμή, όπως προκύπτει από την καταγραφή του λογισμικού. Όπως είναι αναμενόμενο, σε μεγαλύτερες ταχύτητες ροής η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας είναι δυσκολότερη σε σχέσεις με τις χαμηλότερες ταχύτητες. Ωστόσο, οι διακυμάνσεις που προκύπτουν θεωρούνται ικανοποιητικές για τη δεδομένη εφαρμογή.



Διάγραμμα 1: Μεταβολή θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για ταχύτητα αέρα $u_{ref}=0.91\text{ m/s}$



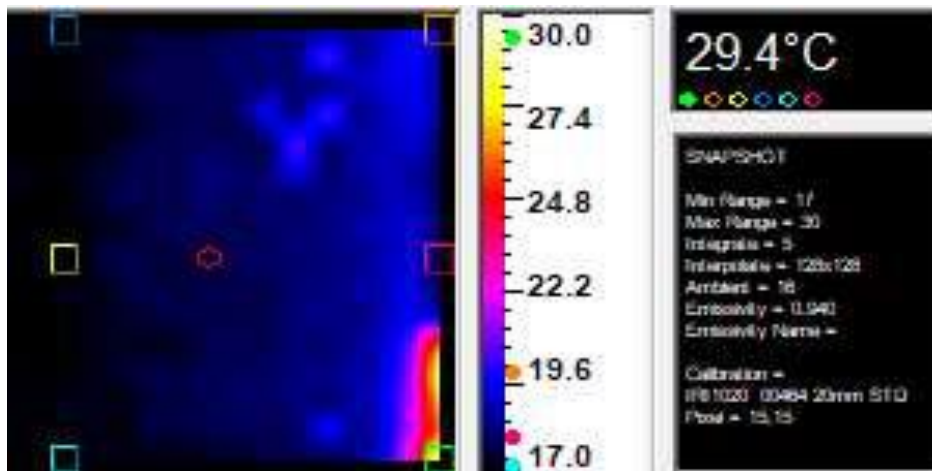
Διάγραμμα 2: Μεταβολή θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για ταχύτητα αέρα $u_{ref}=1.1\text{ m/s}$



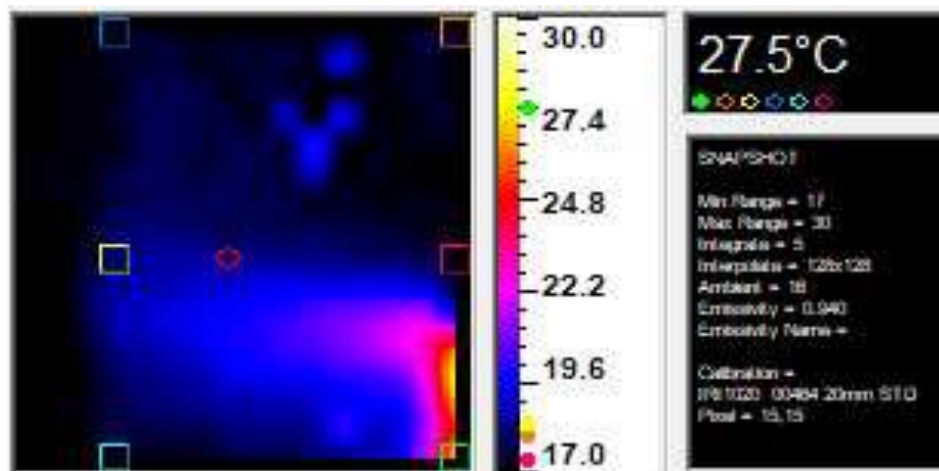
Διάγραμμα 3: Μεταβολή θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για ταχύτητα αέρα $u_{ref}=1.28\text{ m/s}$

7.1.2 Θερμοκρασιακά προφίλ

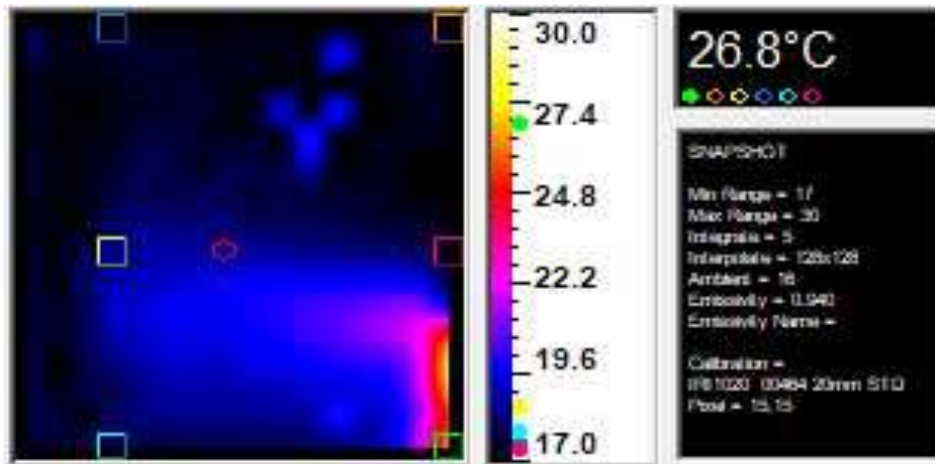
7.1.2.1 Περίπτωση 1: Ροή με μέση ταχύτητα αναφοράς $u_{ref}=0.91$ m/s



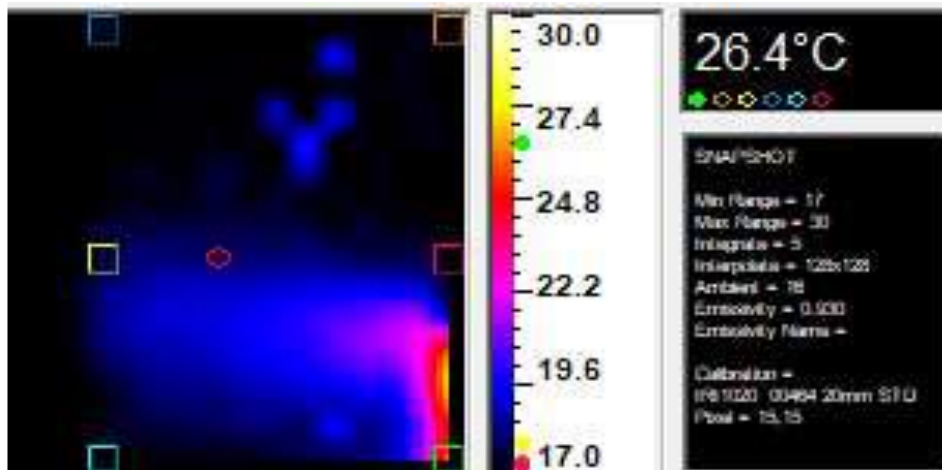
Εικόνα 23: $t=0$, $u=0$



Εικόνα 24: $t=60$ s, $u=0.91$ m/s

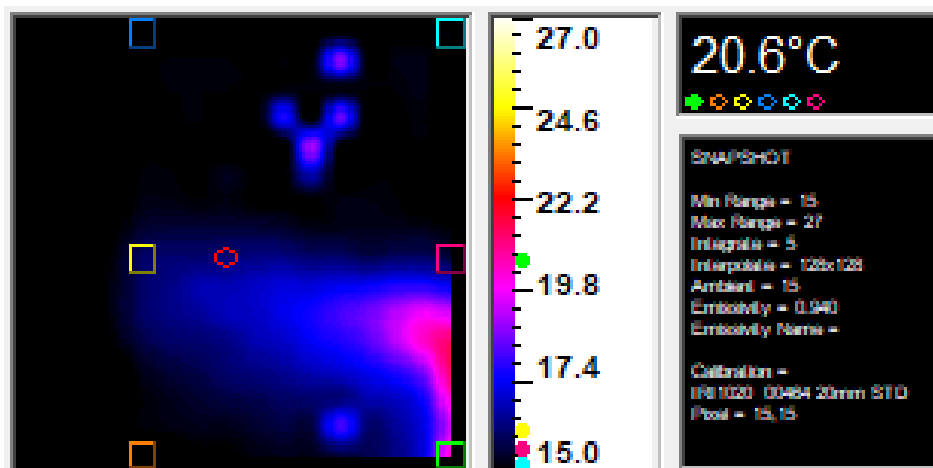


Εικόνα 25: $t=120\text{ s}$, $u=0.91\text{ m/s}$

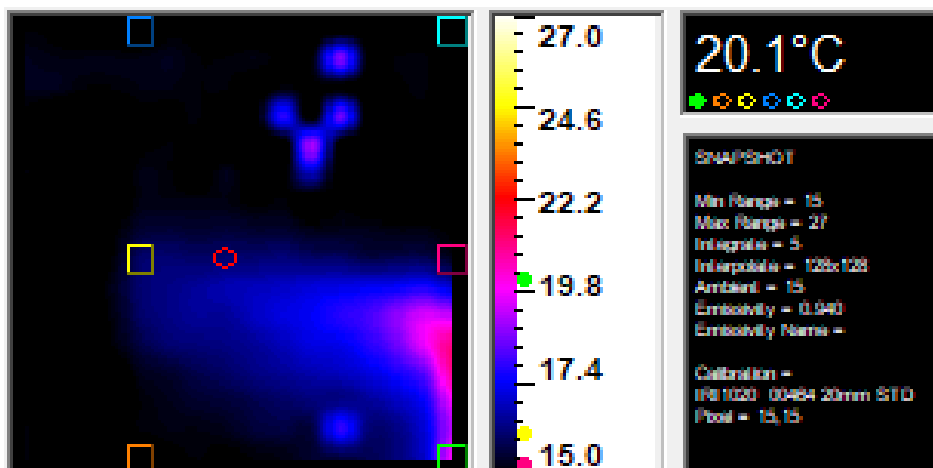


Εικόνα 26: $t=180\text{ s}$, $u=0.91\text{ m/s}$

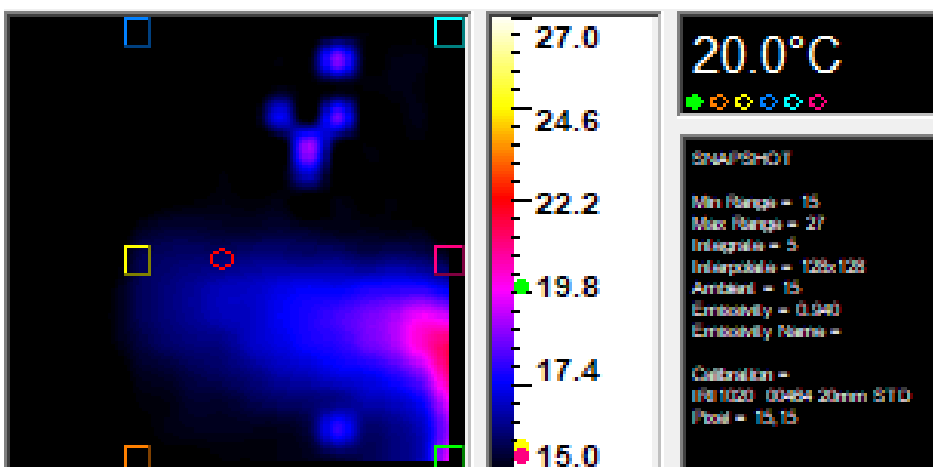
7.1.2.2 Περίπτωση 2: Ροή με μέση ταχύτητα αναφοράς $u_{ref}=1.1$ m/s



Εικόνα 27: $t=60$ s, $u=1.1$ m/s

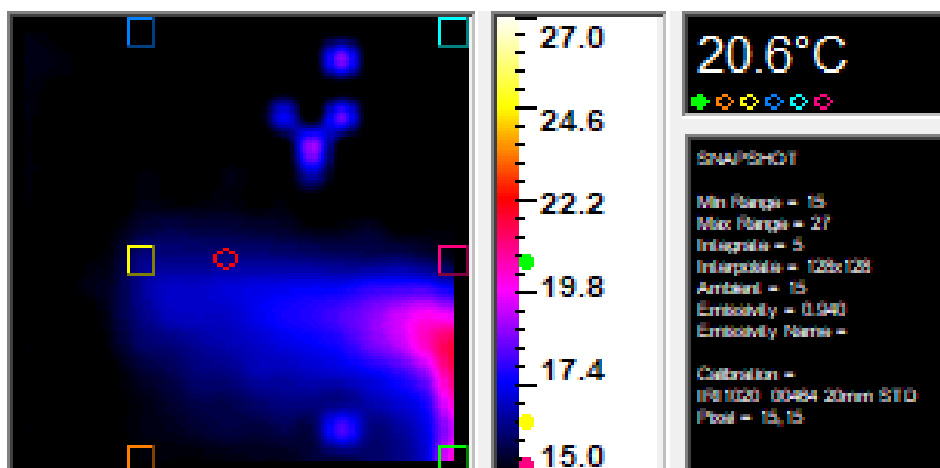


Εικόνα 28: $t=120$ s, $u=1.1$ m/s

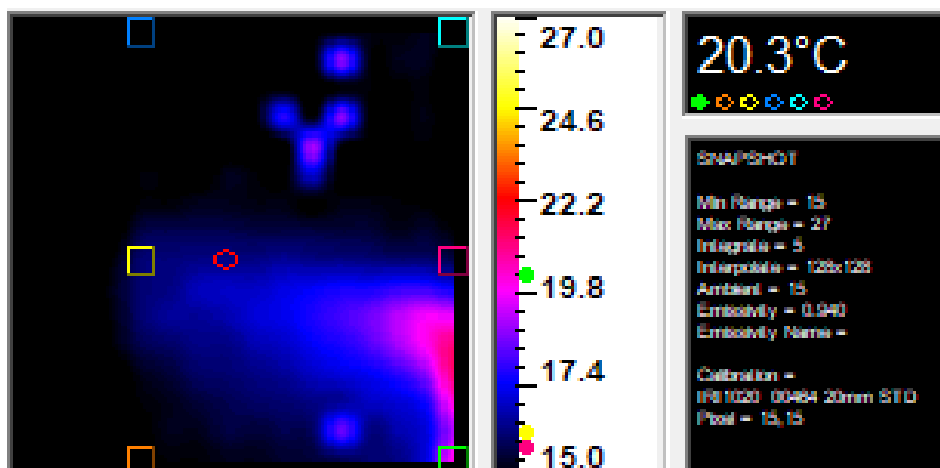


Εικόνα 29: $t=180$ s, $u=1.1$ m/s

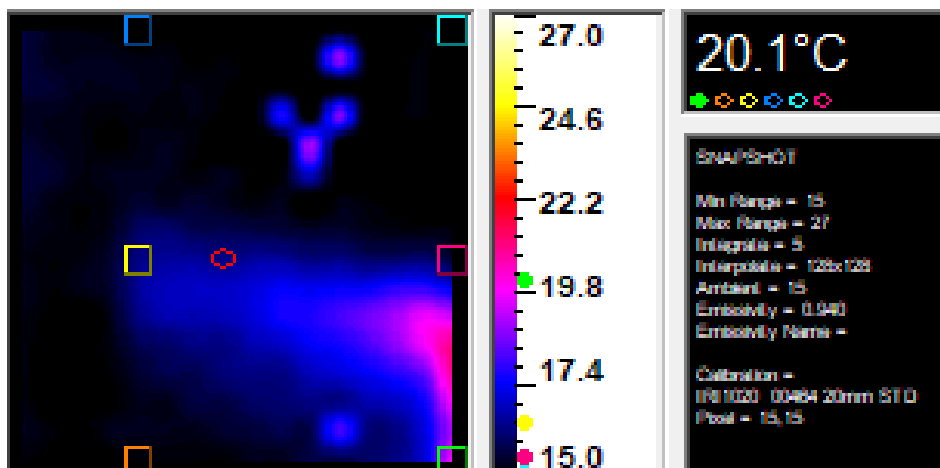
7.1.2.3 Περίπτωση 3: Ροή με μέση ταχύτητα αναφοράς $u_{ref}=1.28$ m/s



Εικόνα 30: $t=60$ s, $u=1.28$ m/s



Εικόνα 31: $t=120$ s, $u=1.28$ m/s



Εικόνα 32: $t=180$ s, $u=1.28$ m/s

7.1.3 Παρατηρήσεις

7.1.3.1 Σχετικά με το καδράρισμα της θερμοκάμερας

Κατά τη διάρκεια του πειράματος δόθηκε μεγάλη προσοχή στο στήσιμο της θερμοκάμερας. Η κάμερα τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε οι θερμαινόμενες επιφάνειες που είναι επικολημένες πάνω στο εμπόδιο να μην βρίσκονται μέσα στο πεδίο όψης της. Αυτό εξασφαλίζεται, με την τοποθέτησή της ακριβώς κάθετα στο πλέγμα και παράλληλα στο εμπόδιο και με μικροδιορθώσεις μεχρις ότου η δεξιά πλευρά του πλέγματος να ταυτίζεται με τη δεξιά πλευρά της εικόνας.

Τα όρια του πλέγματος είναι εμφανή στην Εικόνα 23 . Η θερμότητα έχει μεταφερθεί κατά μήκος και καθ' ύψος σε όλη την επιφάνεια του πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση, το φαινόμενο έχει αφεθεί να σταθεροποιηθεί για δεδομένο χρονικό διάστημα και, επομένως, προκύπτει μια πολύ ικανοποιητική οπτικοποίηση του. Τα σημεία που έχουν τοποθετηθεί στις εικόνες αντιστοιχούν στις πραγματικές θέσεις των ορίων του πλέγματος. Αυτή είναι μια ισχυρή ένδειξη ότι πράγματι η θερμοκάμερα εντοπίζει μόνο το πλέγμα το οποίο μας ενδιαφέρει και όχι κάποιο άλλο θερμό αντικείμενο στο χώρο.

Με βάση το FoV της θερμοκάμερας γνωρίζουμε ακριβώς τις αποστάσεις μεταξύ κάμερας και πλέγματος και μπορούμε να αντιστοιχήσουμε κάθε pixel της παραγόμενης εικόνας με το πραγματικό σημείο στο χώρο (Εικόνα 18).

Τέλος, η κλίμακα θερμοκρασιών επιλέχθηκε να καλύπτει ένα εύρος από 15°C-30°C, στο οποίο περιλαμβάνονται όλες οι ακραίες τιμές που καταγράφονται. Σαν αποτέλεσμα η οπτικοποίηση του φαινομένου είναι πολύ παραστατική. Έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε στην ουσία τη ροή της θερμότητας όπως αυτή μετατοπίζεται πάνω στο πλέγμα εξαρτώμενη από τη ροή του αέρα.

7.1.3.2 Σχετικά με την αποτύπωση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας

Τη χρονική στιγμή $t=0$ (Εικόνα 23) σε κατάσταση ηρεμίας και όπου το φαινόμενο έχει σταθεροποιηθεί, η ροή της θερμότητας έχει κατά κύριο λόγο κατεύθυνση προς τα πάνω λόγω φυσικής συναγωγής και στη συνέχεια λόγω αγωγής μέσα στο πλέγμα μεταφέρεται σε όλη του την επιφάνεια.

Μετά από διάστημα $\Delta t=60\text{sec}$ (Εικόνα 24) όπου η ταχύτητα της ροής του αέρα είναι αρκετά χαμηλή, το ρεύμα θερμότητας μετακινείται κατά κύριο λόγο προς τα αριστερά, ενώ υπάρχει και μια συνιστώσα με κατεύθυνση προς τα πάνω.

Μετά από $\Delta t=120\text{sec}$ (Εικόνα 25) η ροή θερμότητας πάνω στο πλέγμα κινείται προς τα αριστερά ενώ ένα πολύ μικρό τμήμα της έχει κατεύθυνση προς τα πάνω. Στα $\Delta t=180\text{sec}$ (Εικόνα 26) έχει χαθεί πλέον κάθε τάση της θερμότητας προς τα πάνω και φαίνεται ότι παρασύρεται πλήρως από την ροή του ρευστού.

Για μεγαλύτερες ταχύτητες, η θερμότητα ακολουθεί μέσα σε μικρότερο χρονικό διάστημα τη ροή του αέρα, όπως φαίνεται στις εικόνες (Εικόνα 27-Εικόνα 32). Είναι σημαντικό ότι στην αρχή του πειράματος η θερμοκρασία στο πλέγμα είναι μέγιστη, ενώ στη συνέχεια λόγω της ροής αέρα φαίνεται σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας στα σημεία που έχουν τοποθετηθεί ενδεικτικά στα θερμογραφήματα. Αυτό σημαίνει ότι το πλέγμα ψύχεται με την πάροδο του χρόνου και με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα.

Από την αντιστοιχία των pixels με τις πραγματικές θέσεις των σημείων πάνω στο πλέγμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε την επίδραση της κατακόρυφης και της οριζόντιας θερμαινόμενης πλάκας πάνω στο πλέγμα (Εικόνα 17). Η επίδραση της κατακόρυφης πλάκας είναι προφανής και αναμενόμενη, καθώς η πλάκα μεταφέρει στο πλέγμα τη θερμότητα της μέσω φυσικής συναγωγής πολύ γρήγορα, αφού τα δύο αντικείμενα είναι κοντά τοποθετημένα. Η επίδραση της οριζόντιας πλάκας μπορεί να διαπιστωθεί από το γεγονός ότι το ρεύμα θερμότητας που εντοπίζεται στο πλέγμα με την ύπαρξη ροής, εκτείνεται αρκετά ψηλότερα από το ύψος του εμποδίου. Αν δεν υπήρχε η θερμαινόμενη πλάκα στην οροφή του εμποδίου, το ρεύμα θερμότητας πιθανότατα θα εκτεινόταν μέχρι το ύψος του εμποδίου και λίγο πιο ψηλά.

7.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΟΥ

7.2.1 Συνθήκες περιβάλλοντος και ρυθμίσεις

Οι μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής με τον σωλήνα Pitot-Static, πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστά από τις μετρήσεις του θερμοκρασιακού πεδίου. Η ύπαρξη του πλέγματος, παρόλο που ήταν μικρής διατομής και τοποθετημένο παράλληλα στη ροή, θα δημιουργούσε παρεμβολές και θα επηρέαζε τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επομένως, οι μετρήσεις ταχύτητας έγιναν σε δεύτερο χρόνο αλλά με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 15°C και η βαρομετρική πίεση 99.6 kPa.

Στο ψηφιακό μανόμετρο που είναι συνδεδεμένοι οι αγωγοί του σωλήνα Pitot, απαιτείται να ορίσουμε κάποιες παραμέτρους, όπως είναι η θερμοκρασία, η βαρομετρική πίεση και οι διαστάσεις του αγωγού στον οποίο ρέει το ρευστό (εδώ οι διαστάσεις της διατομής της αεροσήραγγας). Επίσης, ορίζεται ο χρόνος της δειγματοληψίας (log interval) κατά τον οποίο το όργανο παίρνει μετρήσεις και στο τέλος εμφανίζει τη μέση τιμή αυτών. Τέλος, ορίζεται και η χρονική σταθερά (time constant) η οποία εκφράζει το χρόνο κατά τον οποίο λαμβάνει μετρήσεις το όργανο μέχρι να εμφανίσει στην οθόνη τη μέση τιμή αυτών των μετρήσεων. Αφορά δηλαδή τη συχνότητα με την οποία αλλάζει η τιμή που εμφανίζεται στην οθόνη, και επομένως ο ορισμός της είναι χρήσιμος σε περιπτώσεις έντονα μεταβαλλόμενου πεδίου. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5) παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίστηκαν.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	15,0
Βαρομετρική πίεση (kPa)	99,6
Διαστάσεις αγωγού (cm*cm)	23*40
Χρόνος δειγματοληψίας (sec)	30
Χρονική σταθερά (sec)	10

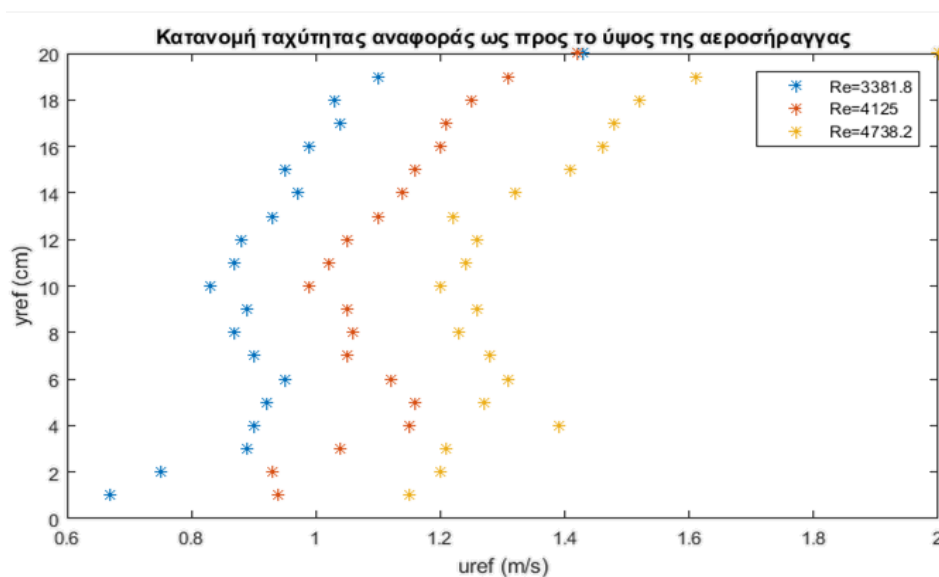
Πίνακας 5: Ορισμός παραμέτρων μανομέτρου

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του μανομέτρου που δίνονται από τον κατασκευαστή, το όργανο έχει ακρίβεια $\pm 1.5\%$ στην μέτρηση σημειακής ταχύτητας.

Οι συνθήκες της ροής όπως μετρήθηκαν στο εσωτερικό της αεροσήραγγας σε θέση $x=3.8h$, δηλαδή $x=21\text{cm}$ κατακόρυφα στο μέσο του πλάτους της δίνονται στον Πίνακα 2. Για τη διάκριση των τριών περιπτώσεων ροής θα χρησιμοποιείται ο αριθμός Re όπως προκύπτει από τη μέση τιμή των ταχυτήτων που μετρήθηκαν στο εσωτερικό της σήραγγας .

7.2.2 Μετρήσεις κατακόρυφα στο εσωτερικό της αεροσήραγγας για τρεις περιπτώσεις

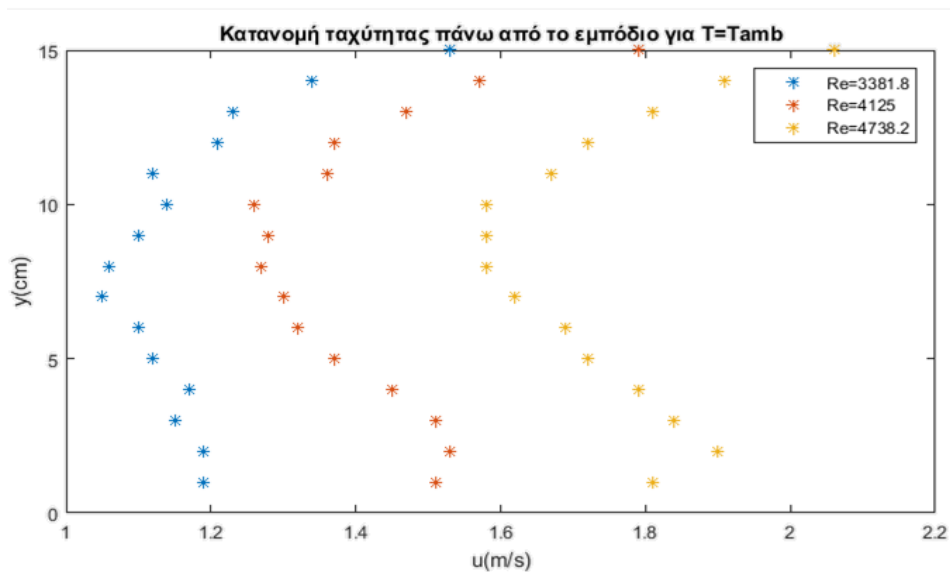
Αρχικά μετρώνται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αδιατάρακτης ροής στο εσωτερικό της αεροσήραγγας. Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή καθ' ύψος της οριζόντιας ταχύτητας.



Διάγραμμα 4: Κατανομή ταχύτητας αναφοράς ως προς το ύψος της αεροσήραγγας

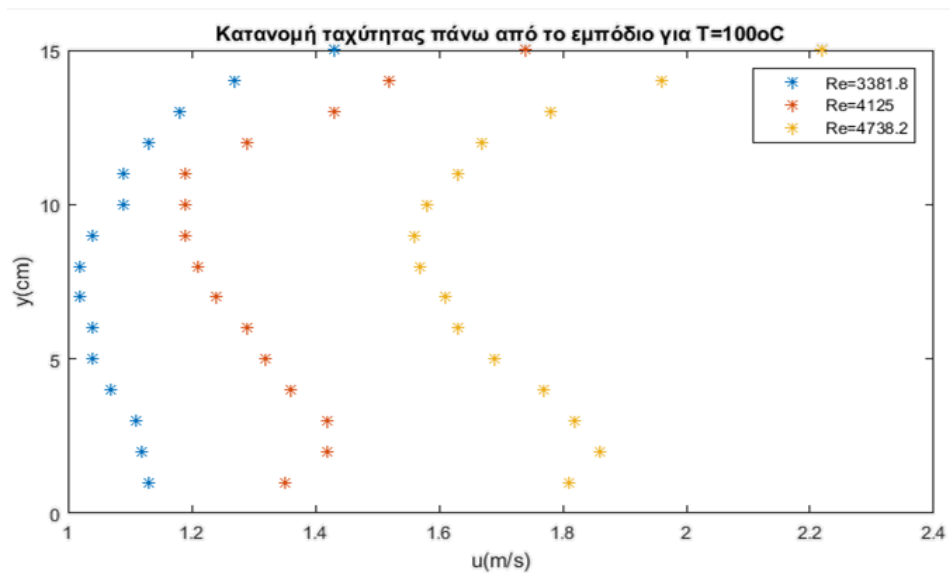
7.2.3 Μετρήσεις κατακόρυφα στο μέσο του εμπόδιου για τρεις περιπτώσεις ροής

7.2.3.1 Χωρίς πηγή θερμότητας

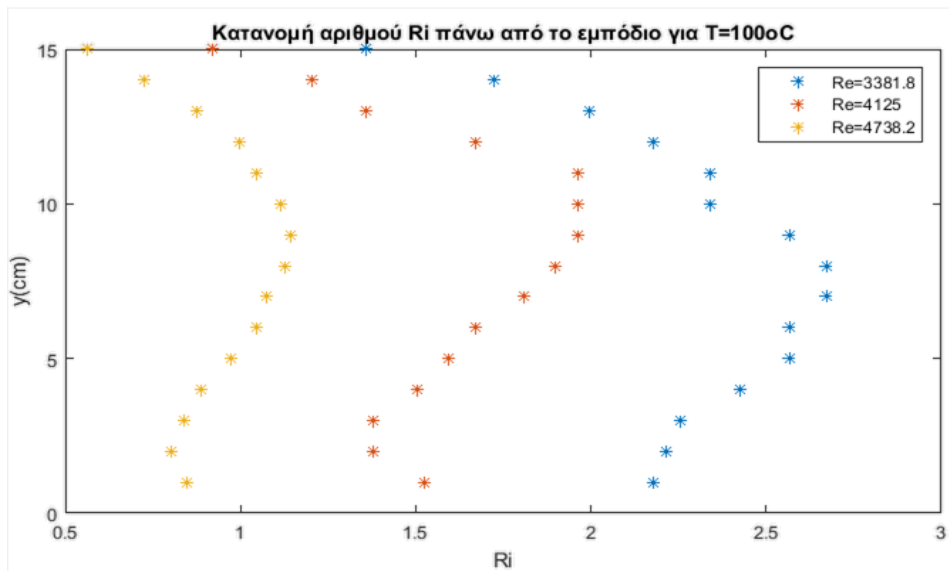


Διάγραμμα 5: Κατανομή ταχύτητας πάνω από το εμπόδιο για $T=T_{amb}$

7.2.3.2 Με πηγή θερμότητας

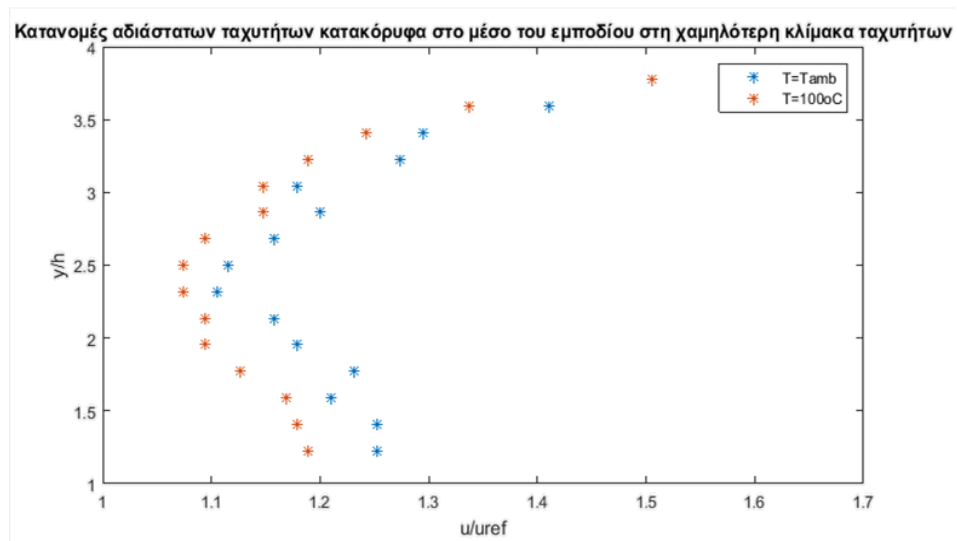


Διάγραμμα 6: Κατανομή ταχύτητας πάνω από το εμπόδιο για $T=100^{\circ}C$

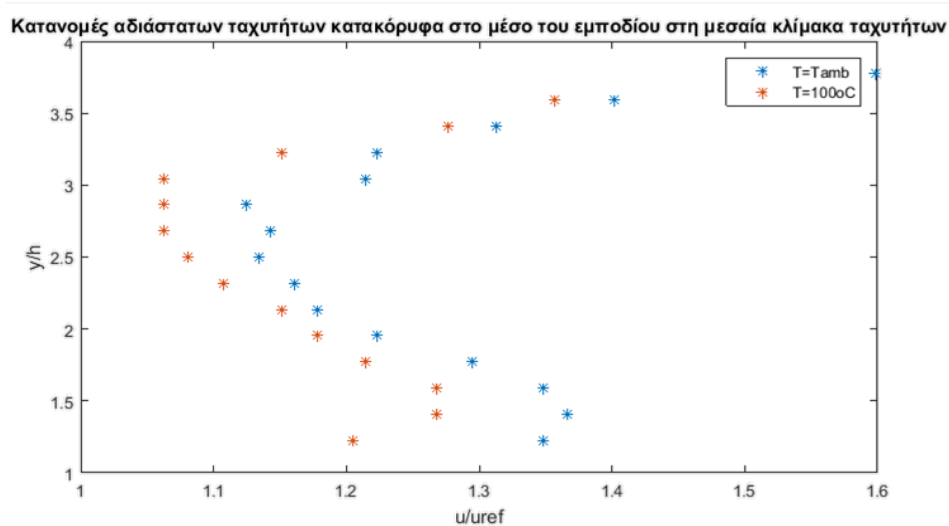


Διάγραμμα 7: Κατανομή αριθμού Ri πάνω από το εμπόδιο για $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

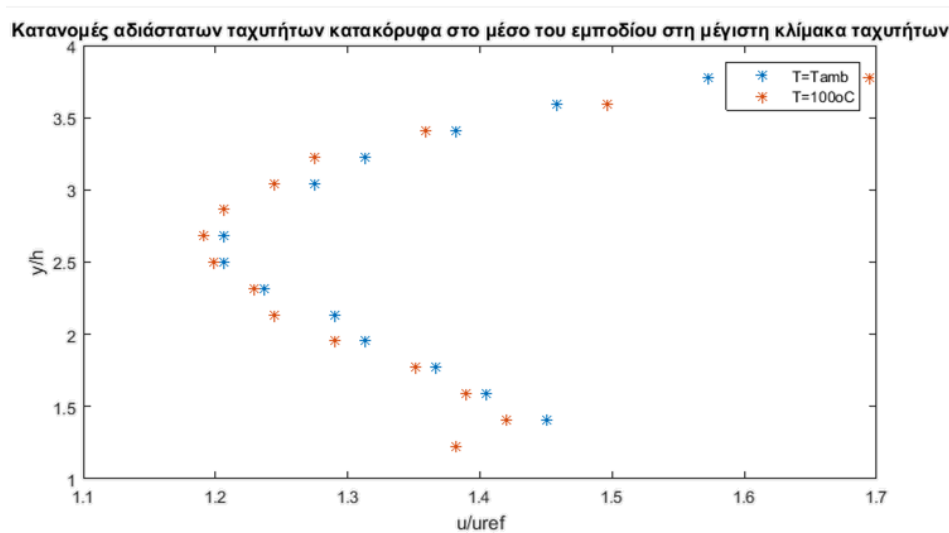
7.2.3.3 Συγκριτικές καμπύλες των ταχυτήτων της ροής πάνω από το εμπόδιο με παρουσία πηγής θερμότητας και χωρίς



Διάγραμμα 8: Κατανομές αδιάστατων ταχυτήτων κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου στη χαμηλότερη κλίμακα στροφών



Διάγραμμα 9: Κατανομές αδιάστατων ταχυτήτων κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου στη μεσαία κλίμακα στροφών



Διάγραμμα 10: Κατανομές αδιάστατων ταχυτήτων κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου στη μέγιστη κλίμακα στροφών

7.2.4 Παρατηρήσεις

7.2.4.1 Σχετικά με τα απόλυτα μεγέθη

Το Διάγραμμα 5 παρουσιάζει τη μεταβολή των σημειακών ταχυτήτων που μετρώνται κατακόρυφα πάνω από το μέσο του εμποδίου για τρεις περιπτώσεις ροής αυξανόμενης έντασης. Όπως είναι αναμενόμενο, οι σημειακές ταχύτητες αυξάνονται όσο αυξάνονται και οι στροφές της αεροσήραγγας και οι καμπύλες τους έχουν κοινή μορφή. Στις μέγιστες στροφές, οι σημειακές ταχύτητες έχουν μεγαλύτερη διακύμανση γύρω από τη μέση τιμή σε σχέση με τις λιγότερες στροφές. Οι κλίσεις των καμπυλών και για τα τρία μεγέθη γίνονται πιο απότομες όσο αυξάνεται ο αριθμός Re της ροής.

Γενικά παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του εμποδίου και πιο κοντά στο πάνω τοίχωμα, σε σχέση με το μέσο του κατακόρυφου άξονα των μετρήσεων.

Όμοια φαινόμενα παρατηρούνται τις ταχύτητες και στην περίπτωση του θερμαινόμενου τοιχώματος (Διάγραμμα 6). Στην περίπτωση αυτή, που υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ στερεού ορίου και ρευστού, υπολογίζουμε και τη μεταβολή καθ ύψος του αριθμού Richardson (Διάγραμμα 7).

Στις δύο περιπτώσεις ροής όπου $Re=3381.8$, $Re=4125$ ο αριθμός Richardson λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1. Επομένως, στην κίνηση του ρευστού συντελεί περισσότερο η επίδραση της άνωσης ή φυσικής κυκλοφορίας και λιγότερο η επίδραση της ορμής λόγω ροής ρευστού από την αεροσήραγγα. Όταν είναι $Re=4738.2$ ο αριθμός Ri είναι κοντά στην περιοχή του 1, δηλαδή οι δυνάμεις άνωσης και ορμής έχουν σχεδόν την ίδια επίδραση στην ροή του ρευστού πάνω από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.

7.2.4.2 Συγκριτικά διαγράμματα

Στα συγκριτικά διαγράμματα (Διάγραμμα 8, Διάγραμμα 9, Διάγραμμα 10) παρουσιάζονται τα αδιαστατοποιημένα μεγέθη στον κατακόρυφο άξονα πάνω από το μέσο του εμποδίου όταν τα τοιχώματα θερμαίνονται και όταν είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η αδιαστατοποίηση έχει γίνει διαιρώντας με την τιμή αναφοράς που μετρήθηκε για το κάθε μέγεθος στο εσωτερικό της αεροσήραγγας στο ύψος του εμποδίου. Το ύψος y πάνω από το εμπόδιο αδιαστατοποιείται ως προς το ύψος του εμποδίου H .

Η κατανομές των ταχυτήτων για μέση τιμή Re αναφοράς $Re=3381.8$ παρουσιάζουν παρόμοια μορφή στην περίπτωση που τα τοιχώματα του εμποδίου θερμαίνονται και στην περίπτωση που είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην περίπτωση της θέρμανσης οι ταχύτητες είναι λίγο πιο μικρές σε όλα τα σημεία πάνω από το εμπόδιο. Αυτό είναι πιθανότατα άμεση απόρροια του τρόπου λειτουργίας του μετρητικού οργάνου που χρησιμοποιήθηκε.

Το ρύγχος του σωλήνα Pitot έχει τοποθετηθεί παράλληλα στη ροή, άρα μετράει μόνο την οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας. Όταν το τοίχωμα θερμαίνεται και η ταχύτητα της ροής είναι μικρή, ο αριθμός Ri αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι η άνωση συμβάλλει σημαντικά στη ροή και η κίνηση του ρευστού πάνω από το θερμό τοίχωμα έχει τάση προς τα πάνω. Όμως, ο σωλήνας Pitot δεν μετρά την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας η οποία πλέον δεν είναι αμελητέα. Σαν αποτέλεσμα, οι οριζόντιες σημειακές ταχύτητες που προκύπτουν πάνω από το θερμαινόμενο τοίχωμα είναι μικρότερες σε σχέση με το τοίχωμα χωρίς θέρμανση, στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας της αεροσήραγγας.

Παρατηρούμε, επίσης, ότι όσο αυξάνεται ο μέσος Re της ροής, οι διαφορές ανάμεσα στις καμπύλες μειώνονται. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα οι δυνάμεις της άνωσης λόγω του θερμαινόμενου τοιχώματος γίνονται αμελητέες. Σαν αποτέλεσμα, οι καμπύλες τείνουν να ταυτιστούν, όπως φαίνεται στο διάγραμμα για μέσο $Re=4738.2$.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το πείραμα που σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε περιλαμβάνει μετρήσεις με θερμοκάμερα του πεδίου της θερμοκρασίας ενός αντικείμενου-στόχου. Το αντικείμενο αυτό είναι ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο είναι καλυμμένο με φύλλο αλουμινίου βαμμένο με μαύρο μη ανακλαστικό χρώμα. Στόχος είναι το καταγραφόμενο πεδίο θερμοκρασιών να προσομοιάζει το πεδίο θερμοκρασίας του ρέοντος αέρα σε εκείνη την περιοχή του χώρου. Η μεταβολή θερμοκρασίας του πλέγματος (άρα και του αέρα) οφείλεται στην παρουσία ενός μακρόστενου εμποδίου τεταργωνικής διατομής το οποίο θερμαίνεται στις δύο κάθετες πλευρές του μέσω θερμαινόμενων ελαστικών επιφανειών που είναι επικολλημένες στις πλευρές του. Η επιφάνεια-στόχος είναι τοποθετημένη κάθετα στο θερμαινόμενο εμπόδιο και κάθετα στο φακό της θερμοκάμερας.

Στη συνέχεια, με τη χρήση μανομέτρου με σωλήνα Pitot-Static μετρώνται οι σημειακές ταχύτητες της αδιατάρακτης ροής καθ' ύψος σε σημείο στο εσωτερικό της αεροσήραγγας. Επίσης, μετρώνται οι ταχύτητες στον κατακόρυφο άξονα πάνω από το μέσο του εμποδίου. Οι μετρήσεις λαμβάνονται για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ροής καθώς και για τις περιπτώσεις του θερμαινόμενου και μη θερμαινόμενου τοιχώματος του εμποδίου.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος προκύπτει ότι:

- Με τους κατάλληλους χειρισμούς το στήσιμο της θερμοκάμερας μπορεί να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτυπώνεται μόνο το πεδίο θερμοκρασίας του πλέγματος το οποίο μας ενδιαφέρει. Αυτό επιτυγχάνεται γνωρίζοντας το Field of View της κάμερας και τροποποιώντας κατάλληλα το χώρο πίσω από την επιφάνεια-στόχο ώστε να αποκόπτονται άλλα αντικείμενα.
- Όσον αφορά τα θερμογραφήματα τα οποία λαμβάνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η χρονική μεταβολή του θερμοκρασιακού πεδίου λόγω της ροής είναι εμφανής μέσα από την αλληλουχία των θερμογραφημάτων.
- Επίσης, η επίδραση της ταχύτητας στο πεδίο θερμοκρασίας είναι εμφανής. Το θερμοκρασιακό πεδίο παρασύρεται πιο έντονα λόγω του αέρα όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητά της αδιατάρακτης ροής.
- Οι μετρήσεις με σωλήνα Pitot στον κατακόρυφο άξονα πάνω από το εμπόδιο ελήφθησαν μία φορά με το εμπόδιο να είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μία φορά σε θερμοκρασία 100 °C. Και στις δύο περιπτώσεις (θέρμανσης του τοιχώματος ή όχι) οι σημειακές ταχύτητες αυξάνονται όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής στο εσωτερικό της αεροσήραγγας.
- Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις θερμαινόμενων και μη θερμαινόμενων τοιχωμάτων παρατηρείται ότι οι τιμές σημειακής ταχύτητας είναι μικρότερες όταν το τοίχωμα θερμαίνεται. Αυτό εξηγείται σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του σωλήνα Pitot, ο οποίος μετράει μόνο την οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας. Στη συγκεκριμένη

περίπτωση η άνωση επιδρά σημαντικά στη ροή δημιουργώντας μια κατακόρυφη συνιστώσα η οποία δεν μετράται με σωλήνα Pitot.

- Όσο αυξάνεται ο μέσος αριθμός Re της αδιατάρακτης ροής, οι συγκριτικές καμπύλες (θερμαινόμενου και μη θερμαινόμενου τοιχώματος) τείνουν να ταυτιστούν. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο αφού όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα της ροής τόσο μικρότερη επίδραση έχουν σε αυτή οι δυνάμεις άνωσης.

8.2 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ

Πρωταρχικός στόχος του πειράματος που διεξάχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας ήταν η αξιοποίηση θερμοκάμερας για την καταγραφή και τη μέτρηση του θερμοκρασιακού πεδίου του αέρα. Αξιολογώντας την απόδοση της μεθόδου θερμογραφίας που σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκάμερα χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στην απόκτηση ποιοτικών και ποσοτικών μετρήσεων. Οι ποιοτικές μετρήσεις είναι απόλυτα ικανοποιητικές για τη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου μας ενδιαφέρει να παρατηρήσουμε τη μορφή του πεδίου θερμοκρασίας και τη μεταβολή του ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Μέσα από τα θερμογραφήματα εμφανίζονται οι σχετικές θερμοκρασίες των σημείων του πλέγματος-στόχου ανάλογα με τη θέση τους στο χώρο, το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο διαχέεται η θερμότητα στην επιφάνεια του πλέγματος. Επίσης, έχουμε τη δυνατότητα να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με τη χρονική μεταβολή του πεδίου και τη μεταβολή του ανάλογα με την ένταση της ροής που αναπτύσσεται παράλληλα σε αυτό.

Παρόλα αυτά, όπως έγινε αντιληπτό από τη διαδικασία τοποθέτησης των στοιχείων της διάταξης, χρειάζεται κατάλληλος χειρισμός και πολλές μικρές μετακινήσεις του οργάνου μέχρις ότου επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Εκτός αυτών, πρέπει να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα τα οποία οδηγούν σε μείωση ακριβείας. Τέτοια είναι ο ακριβής προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής του αντικειμένου και της ανακλώμενης θερμοκρασίας και η προσεκτική τοποθέτηση όλων των αντικειμένων στο χώρο των δοκιμών προκειμένου να μην υπάρχουν παρεμβολές στην εικόνα. Επομένως, ο κίνδυνος εμφάνισης συστηματικών σφαλμάτων λόγω μεθοδολογίας είναι σημαντικός και γι αυτό απαιτείται προσεκτική μελέτη κάθε συνιστώσας του πειράματος ξεχωριστά πριν την τελική εκτέλεσή του.

Για τη μέτρηση των ταχυτήτων πάνω από το εμπόδιο χρησιμοποιήθηκε σωλήνας Pitot-Static με μανόμετρο. Ο σωλήνας Pitot-Static δεν μπορεί να αποτυπώσει τις ανακυκλοφορίες που λαμβάνουν χώρα λόγω της διαταραχής της ροής από το εμπόδιο που είναι τοποθετημένο στην έξοδο της αεροσήραγγας. Παρόλα αυτά συγκρίνοντας τα διαγράμματα των μετρήσεων με ύπαρξη πηγής θερμότητας και χωρίς βλέπουμε ότι με το σωλήνα Pitot καταγράφεται, πράγματι, η αναμενόμενη μεταβολή στην παράλληλη στη ροή συνιστώσα της ταχύτητας, η οποία οφείλεται στην επίδραση των ανωστικών δυνάμεων. Ακόμα, ο σωλήνας Pitot είναι μια απλή αλλά επεμβατική μέθοδος μέτρησης ταχύτητας, αφού το όργανο τοποθετείται μέσα στη ροή την οποία μετρά. Συμπερασματικά, κάποια άλλη μέθοδος προσδιορισμού των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής θα παρείχε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τον τρόπο που εκτυλίσσεται το φαινόμενο.

8.3 ΠΡΟΣΩΠΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας δοκιμάστηκε για πρώτη φορά η συγκεκριμένη η σύνθεση πειράματος στις εγκαταστάσεις του ΚΤΠΠ. Το πείραμα αποτελείται πρακτικά από τρία διαφορετικά συστήματα τα οποία είναι: το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, το σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας (θερμοκάμερα-πλέγμα) και το σύστημα μέτρησης ταχύτητας με σωλήνα Pitot-Static.

Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε από την αρχή και τέθηκε σε λειτουργία ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας με δύο θερμικά φορτία αξιοποιώντας τον εξοπλισμό που διατέθηκε από το εργαστήριο ΚΤΠΠ. Κατασκευάστηκε, επίσης, το πλέγμα-στόχος που εντοπίζει η θερμοκάμερα και στη συνέχεια μέσα από δοκιμές βελτιστοποιήθηκε η λειτουργία του. Η βαθμονόηση του συστήματος μέτρησης θερμοκρασίας αποτέλεσε ένα μεγάλο μέρος του σχεδιασμού της πειραματικής διαδικασίας. Η διαδικασία αυτή απαιτούσε συνεχείς δοκιμές και αλλαγές μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος, επιλέχθηκαν οι θέσεις στις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις σημειακής ταχύτητας. Η επιλογή έγινε με γνώμονα τη μορφή της ροής κατά μήκος της διαδρομής που ακολουθεί και τις δυνατότητες παρέχει η χρήση σωλήνα Pitot-Static.

8.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η συμπεριφορά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος σε αστικές περιοχές αποτελεί εκτεταμένο αντικείμενο μελέτης. Ειδικότερα, μελετάται η επίδραση του παράγοντα της θερμοκρασίας στις ατμοσφαιρικές ροές, η οποία είναι πολύ υψηλότερη στον αστικό ιστό σε σχέση με τα προάστια [10]. Εκτός αυτού, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις ροές αέρα μέσα στις πόλεις έχει μεγάλη αξία καθώς επηρεάζουν τη ζωή ενός πολύ μεγάλου ποσοστού ανθρώπων που κατοικούν σε αυτές. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αποκτούν τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα κτήρια και οι δρόμοι αλλάζουν το μικροκλίμα μέσα στις πόλεις με πολλές επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής των κατοίκων.

Ο αστικός ιστός με τα συμπλέγματα κτηρίων του αποτελεί φυσικά μια ιδιαίτερα πολύπολοκη περίπτωση μελέτης. Συχνά μελετάται το σύστημα δυο κτηρίων τοποθετημένων παράλληλα με κάποια απόσταση μεταξύ τους. Το σύστημα αυτό αναφέρεται ως οδική χαράδρα και έχει μελετηθεί τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά (βλ. αναφορές [17], [18], [19]).

Επομένως, θα είχε ενδιαφέρον η επέκταση του πειράματος που διεξάχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής στην μελέτη της περίπτωσης μιας οδικής χαράδρας με τοιχώματα που θερμαίνονται λόγω ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση της οδικής χαράδρας το πεδίο ροής στο εσωτερικό της είναι τυρβώδες και με ανακυκλοφορίες και γι' αυτό το λόγο προτείνεται η αξιοποίηση κάποιου άλλου συστήματος μέτρησης ταχύτητας. Η καταγραφή του πεδίου ταχύτητας στο εσωτερικό μιας οδικής χαράδρας δεν μπορεί να επιτευχθεί όταν χρησιμοποιούνται όργανα που αποδίδουν σημειακές μετρήσεις ταχύτητας. Για παράδειγμα

η χρήση PIV (Particle Image Velocimetry) από άλλους ερευνητές έχει αναδειχθεί κατάλληλη για τη μέτρηση των επιπέδων τύρβης και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ([18], [19], [10]).

Μελλοντικά θα μπορούσε ακόμα να αναπτυχθεί κάποιος κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής που να επιλύει τις εξισώσεις ροής και μετάδοσης θερμότητας που διέπουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση της υπολογιστικής μεθόδου ανάλογα με τη σύγκλιση των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

9 ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

- [1] T. Astarita, G. Cardone, G. M. Carlomagno και C. Meola, «A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements,» *Optics & Laser Technology*, pp. 593-610, October 2000.
- [2] Y. Sant, M. Marchard, P. Milan και J. Fontaine, «An overview of infrared thermography techniques used in large wind tunnels,» *Aerospace Science and Technology*, pp. 355-366, 2002.
- [3] A. Voiko, A. Ivanov, V. Borodulin και D. Mischenko, «Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, February 2022.
- [4] P. A. Fokaides, A. Jurelionis, L. Gagyte και S. A. Kalogirou, «Mock target IR thermography for indoor air temperature measurement,» *Applied Energy*, February 2016.
- [5] L. Georgiou, L. Stasiuliene, R. Valancius, L. Seduikyte, A. Jurelionis και P. A. Fokaides, «Investigation of the performance of mock-target IR thermography for indoor air temperature measurements under transient conditions,» *Measurement*, February 2023.
- [6] C. Porras-Amores, F. R. Mazarron και I. Canas, «Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature,» *Energy and Buildings*, pp. 292-298, October 2013.
- [7] M. Cehlin, B. Moshfegh και M. Sandberg, «Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using an infrared camera,» *Energy and Buildings*, August 2002.
- [8] W. M. Lewdowski, M. Ryms, H. Denda και E. Klugmann-Radziemska, «Possibility of thermal imaging use in studies of natural convection heat transfer on the example of an isothermal vertical plate,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, November 2014.
- [9] M. Ryms, K. Tesch και W. M. Lewadowski, «The use of thermal imaging camera to estimate velocity profiles based on temperature distribution in a free convection boundary layer,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, February 2021.
- [10] J. Carmeliet, J. Allegrini και C. Tsalicoglou, «Non-isothermal flow between heated building models,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, September 2020.
- [11] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda και F. Bulnes, «Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing,» *Sensors*, July 2014.
- [12] N. Μπενάκη, *Εισαγωγή στην υπέρυθη θερμογραφία- Εφαρμογές*, 2014.

- [13] Σ. Τσαγγάρης, *Μηχανική των Ρευστών: Θεωρία και Ασκήσεις*, 2016: Εκδόσεις Τσότρας.
- [14] K. Ogata, *Modern control engineering*, Delhi: Pearson, 2016.
- [15] K. Patel, B. F. Armaly και T. S. Chen, «Transition from turbulent natural convection to,» *Heat Transfer*, pp. 1086-1089, 1998.
- [16] J. Gryzagoridis, «Combines free and forced convection from an isothermal vertical plate,» *Heat Mass Transfer*, τόμ. 18, pp. 911-916, 1975.
- [17] J. Carmeliet, V. Dorer και J. Allegrini, «“Buoyant flows in street canyons: Validation of CFD simulations with wind tunnel measurements,» *Building and Environment*, τόμ. 72, pp. 63-74, February 2014.
- [18] J. Allegrini, V. Dorer και J. Carmeliet, «Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons,» *Building and Environment*, τόμ. 59, pp. 315-326, January 2013.
- [19] J. Allegrini, «A wind tunnel study on three-dimensional buoyant flows in street canyons with different roof shapes and building lengths,» *Building and Environment*, τόμ. 143, pp. 71-88, October 2018.

10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

10.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμοκάμερας IRI 1020

Εύρος θερμοκρασίας (°C)	-10.0 μέχρι 300.0
Field of view (FOV) (°)	20.0x20.0
Φασματική απόκριση (μm)	8.00-14.00
Ευαισθησία (°C)	~0.3 στους 30.0°C
Εμφανιζόμενη εικόνα	192x192 pixels
Ανιχνευτής	16x16 pixel array
Frame rate (Hz)	8.00
Εύρος εστίασης (m)	0.7 +
Θερμ. περιβάλλοντος κατά τη λειτουργία (°C)	-5.0 μέχρι 50.0
Θερμ. περιβάλλοντος αποθήκευσης (°C)	-20.0 μέχρι 70.0
Υγρασία	10%-90%
Διαστάσεις (mm)	230.00x120.00x90.00
Βάρος (kg)	0.7

Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα RTD-2-F3102

Θερμική απόκριση	<75ms σε ροή νερού ταχύτητας 0.91m/s
Εύρος λειτουργίας (°C)	230.0
Προστατευτικό/ μονωτικό υλικό	Εποξική ρητίνη
Υλικό καλωδίου	PFA

Τεχνικά χαρακτηριστικά heating pad

Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	120.00
Τάση ρεύματος (V)	115.00
Πυκνότητα ροής θερμότητας (W/in ²)	10
Ισχύς ρεύματος (W)	5.00-1440.00
Διηλεκτρική αντοχή (VAC)	1250.00
Σχεδιασμός θερμοστοιχείου	Wire wound αντιστάτης
Διαστάσεις (in ²)	2'' πλάτος X 4'' μήκος
Πάχος (in)	0.045-0.007
Ελάχιστη ακτίνα κάμψης (in)	2.00
Μήκος καλωδίου (in)	12.00
Υλικό καλωδίου	PFA (Teflon®)

Τεχνικά χαρακτηριστικά controller CN32Pt-220

Είσοδος

Τύπος	RTD 3-wire
Ένταση ρεύματος	4-20 mA
Τάση ρεύματος	
Ανάλυση	0.1°C
Σταθερότητα θερμοκρασίας	0.04°C/°C

Έξοδος

Τύπος	SSR
Ένταση ρεύματος	0.05-0.5 A
Τάση ρεύματος	20-265 Vac

Έλεγχος

Λειτουργία	Reverse (θέρμανση)
Τρόπος ελέγχου	Auto PID

Επικοινωνία

Σύνδεση	USB: θηλυκό Micro-USB
---------	-----------------------

Γενικά

Οθόνη	LED, 10.2 mm
Διαστάσεις	25.4H x 48W x 127D (mm)
Βάρος	127 g
Συνθήκες περιβάλλοντος	0-50°C, 90% υγρασία

Τεχνικά χαρακτηριστικά μανομέτρου

Εύρος στατικής πίεσης	-3735 μέχρι 3735 Pa
Ακρίβεια στατικής πίεσης	±1 Pa
Ευαισθησία στατικής πίεσης	0.1 Pa
Εύρος ταχύτητας	1.27 μέχρι 78.7 m/s
Ακρίβεια ταχύτητας	±1.5 % στα 10.16 m/s
Ευαισθησία ταχύτητας	0.1 m/s
Ογκομετρική παροχή	Το εύρος εξαρτάται από την ταχύτητα, την πίεση, το είδος του αγωγού και το συντελεστή K
Εύρος μεγέθους αγωγού	2.5 μέχρι 1270 cm με βήμα 0.1 cm
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	5°C μέχρι 45°C

Εύρος θερμοκρασιών αποθήκευσης	-20°C μέχρι 60°C
Αποθήκευση δεδομένων	12700+ δείγματα και 100 διαφορετικά τεστ
Logging interval	1sec μέχρι 1h
Διαστάσεις οργάνου	8.4 x 17.8 x 4.4 (cm)
Βάρος οργάνου	0.27 kg

10.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Κατανομή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες	18
Εικόνα 2 [11]	19
Εικόνα 3: Ισχύς εκπομπής συναρτήσει της θερμοκρασίας του σώματος [11]	20
Εικόνα 4: Ατμοσφαιρική διαπερατότητα ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που τη διαπερνά [11]	21
Εικόνα 5: Σχεδιάγραμμα μέτρησης θερμοκρασίας ενός αντικειμένου με θερμοκάμερα [11]	22
Εικόνα 6: Χαρακτηριστικές γωνίες κλίσεις σωλήνων Prandtl [13]	26
Εικόνα 7: Τυπικές κατασκευαστικές μορφές για σωλήνες Prandtl κατά AVA και ASMA [13]	26
Εικόνα 8: Σωλήνες Prandtl με οξεία και στρογγυλεμένη κεφαλή [13]	27
Εικόνα 9: Δομικό διάγραμμα ελέγχου θερμοκρασίας	28
Εικόνα 10: Λειτουργία ελεγκτή δύο θέσεων [Πηγή: https://www.ia.omron.com]	29
Εικόνα 11: Δομικό διάγραμμα PID ελέγχου [14]	30
Εικόνα 12: Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή πάνω από επίπεδη πλάκα	31
Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης	35
Εικόνα 14: Φωτογραφίες της διάταξης: α) διάταξη εμπόδιου και φύλλου μέτρησης και β) εμπόδιο με τοποθετημένα τα θερμαντικά στοιχεία και το σωλήνα Pitot για τη μέτρησης της ταχύτητας, στην έξοδο της αεροσήραγγας	35
Εικόνα 15: Συνδεσμολογία συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας	37
Εικόνα 16: Ποιοτική αποτύπωση της μορφής της ροής στην έξοδο της αεροσήραγγας	38
Εικόνα 17: (α) Αντιστοιχία pixels με πραγματικές αποστάσεις, (β) Διαστάσεις του πλέγματος σε σχέση με το FoV της θερμοκάμερας	40
Εικόνα 18: Field of View της θερμοκάμερας	40
Εικόνα 19: Όψεις θερμοκρασιακού πεδίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας των heating pads, χωρίς την ύπαρξη ροής	41
Εικόνα 20: (A) $T_{pad}=70^{\circ}C$, χωρίς ροή, $t=120sec$, (B) $T_{pad}=70^{\circ}C$, με ροή αέρα $u=1.4 m/s$, $t=360sec$	42
Εικόνα 21: Θέσεις μέτρησης σημειακών ταχυτήτων με σωλήνα Pitot	43
Εικόνα 22: Χάρτης τυρβώδους κατάστασης ροής και μηχανισμού συναγωγής [15]	44
Εικόνα 23: $t=0$, $u=0$	49
Εικόνα 24: $t=60 s$, $u=0.91 m/s$	49
Εικόνα 25: $t=120 s$, $u=0.91 m/s$	50
Εικόνα 26: $t=180 s$, $u=0.91 m/s$	50
Εικόνα 27: $t=60 s$, $u=1.1 m/s$	51
Εικόνα 28: $t=120 s$, $u=1.1 m/s$	51
Εικόνα 29: $t=180 s$, $u=1.1 m/s$	51

Εικόνα 30: $t=60$ s, $u=1.28$ m/s	52
Εικόνα 31: $t=120$ s, $u=1.28$ m/s	52
Εικόνα 32: $t=180$ s, $u=1.28$ m/s	52

10.3 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1	18
Εξίσωση 2	18
Εξίσωση 3	19
Εξίσωση 4	22
Εξίσωση 5	22
Εξίσωση 6	22
Εξίσωση 7	22
Εξίσωση 8	23
Εξίσωση 9	26
Εξίσωση 10	30
Εξίσωση 11	31
Εξίσωση 12	32
Εξίσωση 13	32
Εξίσωση 14	32
Εξίσωση 15	32
Εξίσωση 16	32
Εξίσωση 17	33
Εξίσωση 18	33
Εξίσωση 19	33

10.4 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Μεταβολή θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για ταχύτητα αέρα $u_{ref}=0.91$ m/s	47
Διάγραμμα 2: Μεταβολή θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για ταχύτητα αέρα $u_{ref}=1.1$ m/s.....	48
Διάγραμμα 3: Μεταβολή θερμοκρασίας των θερμαινόμενων επιφανειών για ταχύτητα αέρα $u_{ref}=1.28$ m/s.....	48
Διάγραμμα 4: Κατανομή ταχύτητας αναφοράς ως προς το ύψος της αεροσήραγγας	55
Διάγραμμα 5: Κατανομή ταχύτητας πάνω από το εμπόδιο για $T=T_{amb}$	56
Διάγραμμα 6: Κατανομή ταχύτητας πάνω από το εμπόδιο για $T=100$ °C	56
Διάγραμμα 7: Κατανομή αριθμού Ri πάνω από το εμπόδιο για $T=100$ °C.....	57
Διάγραμμα 8: Κατανομές αδιάστατων ταχυτήτων κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου στη χαμηλότερη κλίμακα στροφών.....	57
Διάγραμμα 9: Κατανομές αδιάστατων ταχυτήτων κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου στη μεσαία κλίμακα στροφών	58
Διάγραμμα 10: Κατανομές αδιάστατων ταχυτήτων κατακόρυφα στο μέσο του εμποδίου στη μέγιστη κλίμακα στροφών	58