



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

“Μελέτη του θερμοροϊκού πεδίου αλληλεπιδρώντων τετραγωνικών κυλίνδρων”

υπό : Σπυρίδης Παναγιώτης

Επιβλέπων καθηγητής : Σταπουντζής Ερρίκος

ΒΟΛΟΣ, 2010



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

Αριθ. Εισ.: 8140/1

Ημερ. Εισ.: 26-02-2010

Δωρεά: Συγγραφέας

Ταξιδετικός Κωδικός: Δ

624.177 2

ΣΠΥ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ερρίκο Σταπουντζή για τη βοήθεια του στην εκπόνηση της εργασίας μου, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους καθηγητές κ. Σταματέλλο Αναστάσιο και Τσιακάρα Παναγιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Καπτσιανού Δημήτρα και Τσιουρτζούμη Δημήτριο για τη βοήθεια τους κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και τον τεχνικό του τμήματος Βέργο Αθανάσιο για την ουσιαστική βοήθεια του στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης.

Αφιερώνω την μεταπτυχιακή μου εργασία στην κοπέλα μου Νίκη και στην οικογένεια μου που με στηρίζει σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και σε κάθε μου επιλογή τόσο υλικά όσο και ψυχολογικά.

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ:

ΠΡΩΤΟΣ ΕΞΕΤΑΣΤΗΣ : ΔΡ. ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ ΕΡΡΙΚΟΣ
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ) **ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΤΗΣ : ΔΡ. ΣΤΑΜΑΤΕΛΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΡΙΤΟΣ ΕΞΕΤΑΣΤΗΣ : ΔΡ. ΤΣΙΑΚΑΡΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1. ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	9
1.1.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	9
1.1.2. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	10
1.2. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	10
1.2.1. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΚΑΠΝΟ.....	10
1.2.2. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΙΔΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	22
3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	22
3.1.1. ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ.....	22
3.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	25
3.1.3. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	27
3.1.3.1. ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ.....	27
3.1.4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	29
3.1.4.1. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΚΑΠΝΟ.....	29
3.1.4.2. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΙΔΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	30
3.1.4.3. ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΜΕΡΑ.....	32
3.1.5. ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ FLIR.....	32
3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥΣ.....	33
3.2.1. ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ – ΡΟΪΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	33
3.2.1.1. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΟΗΣ.....	34
3.2.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	35
3.2.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	41
4.1. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	41
4.1.1. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΚΑΠΝΟ.....	41
4.1.2. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΙΔΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	60
4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΑΜΕΡΑ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ, THERMACAM P45.....	92

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

L : Απόσταση των κυλίνδρων (cm)

S : Απόσταση των κυλίνδρων (cm)

x : Απόσταση μεταξύ των κέντρων των κυλίνδρων (cm)

D : Διάσταση του τετραγωνικού κυλίνδρου (cm)

Re : Αριθμός Reynolds

St : Αριθμός Strouhal

U : Ταχύτητα του ρευστού (m/sec)

v : Κινηματικό ιξώδες του ρευστού

C_D : Οπισθέλκουσα μεταβλητή

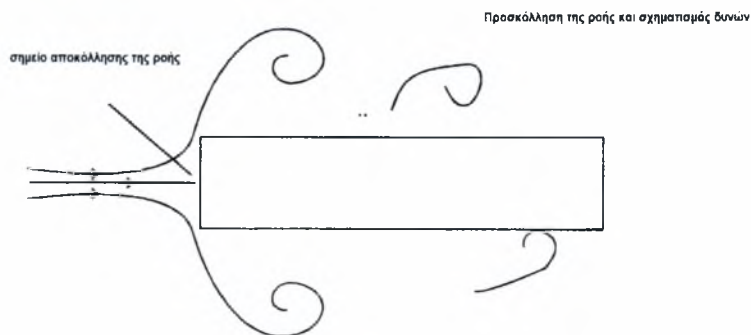
P : Πίεση (Pa)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μορφή του θερμοροϊκού πεδίου μεταξύ δυο τετραγωνικών κυλίνδρων σε σειρά. Όταν το διάστημα μεταξύ των κυλίνδρων είναι μικρό η αλληλεπίδραση των διατμητικών στρωμάτων που αποκολλώνται από τον πρώτο κύλινδρο εμποδίζεται από τον δεύτερο και έτσι δεν δημιουργούνται δίνες von Karman. Όταν όμως, ξεπερνάει μια κρίσιμη τιμή της απόστασης οι αναδιπλόμενες δίνες αλληλεπιδρούν με τον κατάντη κύλινδρο και τότε δημιουργούνται δίνες von Karman πίσω από τον ανάντη αλλά και τον κατάντη κύλινδρο. Τα πειράματα διεξήχθησαν με την απόσταση μεταξύ των δύο κυλίνδρων να αλλάζει από $L=0$ μέχρι $L=6D$. Η διαφορά στα μοτίβα της ροής έχει να κάνει κυρίως με τον ανάντη κύλινδρο και την αποκόλληση της ροής πίσω από αυτόν. Έτσι, μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρεις φάσεις: μια πριν εμφανιστούν δίνες στον ανάντη κύλινδρο, μια όταν αρχίζουν να εμφανίζονται και μια όταν πια έχουμε σχηματισμένες δίνες και στους δύο κυλίνδρους. Πειράματα μελέτης της ροής και μετάδοσης θερμότητας μεταξύ δύο κυλίνδρων στην σειρά έχουν γίνει και στο παρελθόν. Στην παρούσα εργασία, ο ανάντη κύλινδρος έχει τη δυνατότητα να θερμαίνεται. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για να διερευνηθεί κατά πόσο επηρεάζει ο θερμαινόμενος κύλινδρος τις μορφές της ροής και με την βοήθεια της θερμογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δίνες von Karman είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στην ρευστομηχανική για να περιγράψει επαναλαμβανόμενα μοντέλα περιστροφικών δινών που δημιουργούνται από την ασταθή αποκόλληση της ροής ενός ρευστού, πάνω από μη αεροδυναμικά σώματα. Μη αεροδυναμικά σώματα θεωρούνται όλα τα σώματα στα οποία η οπισθέλκουσα κυριαρχείται από οπισθέλκουσα πίεσης, έχουμε αποκόλληση της ροής του ρευστού πάνω στο σώμα και η άνωση είναι πολύ μικρότερη από την οπισθέλκουσα όπως φαίνεται στο σχήμα 1 :



Σχήμα 1. 1. Μη αεροδυναμικό σώμα

Οι δίνες αυτές ονομάστηκαν έτσι από τον Theodore von Karman και είναι υπεύθυνες για φαινόμενα όπως οι δονήσεις μιας κεραίας αυτοκινήτου σε ορισμένες ταχύτητες. Οι δίνες von Karman για κυκλικούς κυλίνδρους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό Reynolds. Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

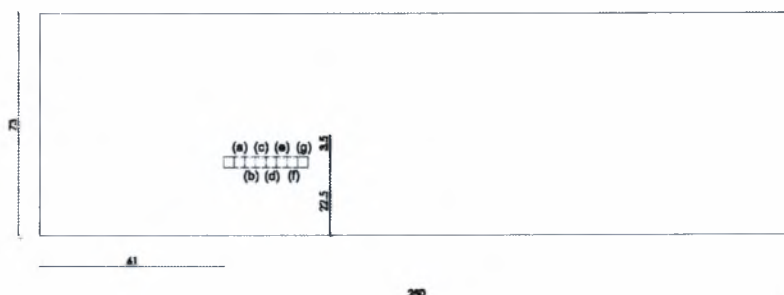
Όπου Re ο αριθμός Reynolds, U η ταχύτητα του ρευστού, D η διάμετρος του κυλίνδρου και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Για αριθμούς Reynolds πάνω από μια τιμή ($47 < Re < 10^7$) εμφανίζονται δίνες στον κύλινδρο στο απόρρευμά του. Για τους μηχανικούς, είναι πολύ σημαντική η μελέτη των δινών από τα απόρρευματα των κυλίνδρων, για τον σχεδιασμό μιας μεγάλης γκάμας μηχανολογικών σχεδιασμών, από τηλεσκόπια υποβρυχίων έως και βιομηχανικές καμινάδες.

Όταν μια κατασκευή επηρεάζεται από το απόρρευμα μιας άλλης τα χαρακτηριστικά της ροής και οι αεροδυναμικές δυνάμεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το σχήμα, την απόσταση των δύο κατασκευών, την διάταξη των κατασκευών και την κατεύθυνση του αέρα.

Εφόσον πολλά ψηλά κτίρια επηρεάζονται από παρακείμενα κτίρια, στον σχεδιασμό τους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αεροδυναμικές δυνάμεις και τα φαινόμενα που εμφανίζονται σε αυτά. Η μελέτη της επίδρασης της ροής σε κατασκευές είναι σημαντική από τη στιγμή που ενέχουν προβλήματα αστάθειας της δομής τους.

Η ροή γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα είναι ένα θέμα πάνω στο οποίο έχουν γίνει πολλές ρευστομηχανικές έρευνες για μεγάλο χρονικό διάστημα και έχει εφαρμογή σε πολλά πεδία της μηχανικής. Η έρευνα για τα μη αεροδυναμικά σώματα δεν περιέχει μόνο βασικά ρευστομηχανικά προβλήματα, όπως δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο σώμα, και μετάβαση σε τύρβη, αλλά βρίσκει και πολλές πρακτικές εφαρμογές, όπως είναι ο δομικός σχεδιασμός κτιρίων, γεφυρών, τρένων και γενικά μηχανοκίνητων οχημάτων. Ένας ορθογωνικός κύλινδρος είναι ένα τυπικό παράδειγμα μη αεροδυναμικού σώματος. Η ροή σε ένα τετραγωνικό κύλινδρο θυμίζει αρκετά την ροή σε ένα κυκλικό κύλινδρο, αλλά οι μηχανισμοί αποκόλλησης της ροής διαφέρουν δραματικά. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι αεροδυναμικοί συντελεστές του τετραγωνικού κυλίνδρου είναι λιγότερο εξαρτημένοι από τον αριθμό Reynolds σε σχέση με τον κυκλικό κύλινδρο.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη θερμο-ροϊκή μελέτη δυο τετραγωνικών κυλίνδρων σε σειρά μέσα σε αεροσήραγγα. Θα παρατηρηθούν τα φαινόμενα αυτά σε διάφορες θέσεις μέσα στη σήραγγα δοκιμών από μηδενική απόσταση μέχρι έξι φορές την διάσταση του μοντέλου όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1. :



Σχήμα 1. 2. Διάταξη πειράματος

1.1. ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

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

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

Η πρώτη αποκαλούμενη «φωτογραφία θερμότητας» έγινε το 1840 από τον γιο του William Herschel τον John Herschel. Ο John ήταν ο πρώτος ο οποίος κατάφερε να καταγράψει την θερμική εικόνα σε χαρτί. Το επίτευγμα του αυτό το ονόμασε θερμογράφημα. Από το 1900 και μετά η επιστήμη της θερμογραφίας γνώρισε μεγάλη πρόοδο. Κατά την διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, ο στρατός χρησιμοποίησε την υπέρυθρη θερμογραφία για την κατασκευή αισθητήρων κίνησης. Τέλος, από το 1950 και έπειτα οι συσκευές υπέρυθρης θερμογραφίας άρχισαν να είναι πλέον διαθέσιμες στο ευρύ κοινό.

1.1.2 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

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

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

- I. 0,76 – 3 mm, near infrared
- II. 3 – 6 mm, middle infrared
- III. 6 – 15 mm, far infrared
- IV. 15 – 100 mm, extreme infrared

Η μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος είναι συνήθως τα μικρόμετρα (μm), ενώ άλλες μονάδες μέτρησης είναι τα νανόμετρα (nm) και τα Angstrom (A). Η συσχέτιση μεταξύ των διάφορων μονάδων μέτρησης είναι η ακόλουθη:

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

1.2. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

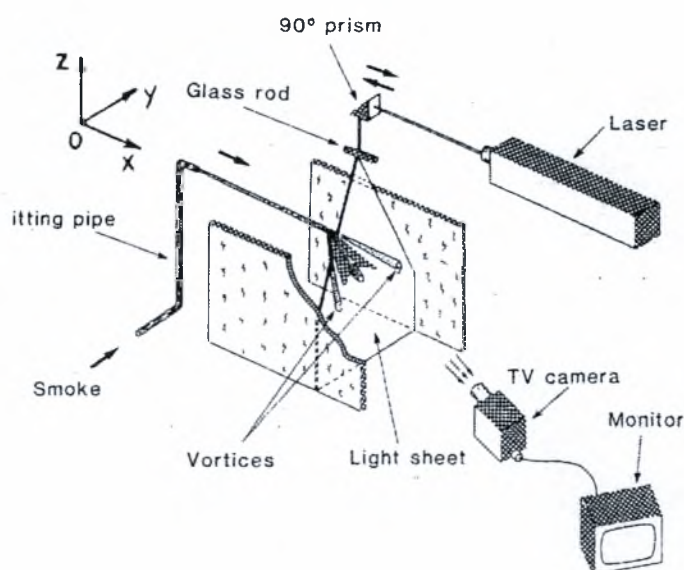
1.2.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΚΑΠΝΟ

Η τεχνική οπτικοποίησης της ροής με καπνό είναι μια μέθοδος διάγνωσης της ροής. Η μέθοδος αυτή είναι πιο εύκολο να εφαρμοστεί σε χαμηλή ταχύτητα ροής παρά σε υψηλή αφού το φαινόμενο εξελίσσεται πιο αργά και είναι πιο εύκολη η μελέτη του. Η χρήση μιας λεπτής φέτας φωτός χρησιμοποιείται για την λεπτομερή οπτικοποίηση και μετέπειτα παρατήρηση του φαινομένου σε τρεις διαστάσεις με την δυνατότητα πλήρους επεξεργασίας. Η τεχνική οπτικοποίησης με laser είναι ευρέως διαδεδομένη σε δεξαμενές νερού σε σειρά. Λόγω της εξέλιξης των laser, νέες εφαρμογές της τεχνικής έχουν βρεθεί και διερευνηθεί σε αεροδυναμική οπτικοποίηση της ροής. Πιο συγκεκριμένα, η μεγάλη φωτεινή ισχύς και η απόκλιση της ασθενούς ακτίνας της φωτεινής πηγής κάνουν δυνατή την παρατήρηση πολύ πιο λεπτών και δυνατών στρωμάτων φωτός. Η χρήση των παλμικών laser μικρής διάρκειας

και υψηλής ενέργειας κάνουν πιο εύκολη την αναλυτική οπτικοποίηση της ροής σε ασταθή φαινόμενα, όπως στην αποκόλληση τυρβώδους οριακού στρώματος και στα απορρεύματα. Η εφαρμογή αυτής βοηθά την πραγματοποίηση των παρακάτω ενεργειών:

1. Υλοποίηση του στρώματος φωτός
2. Παροχή καπνού
3. Συνεχής φωτισμός
4. Επιλογή και τοποθέτηση της κάμερας

Μία εφαρμογή της τεχνικής αυτής φαίνεται στο σχήμα 1.3:



Σχήμα 1. 3. Διάταξη οπτικοποίησης με καπνό

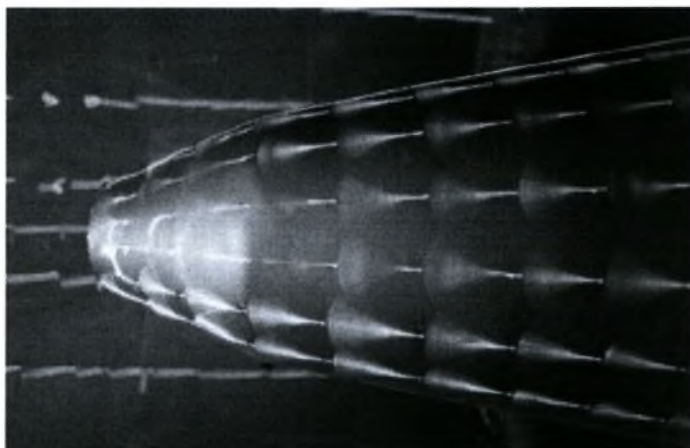
Το laser τοποθετείται πάνω από την περιοχή δοκιμών με την ακτίνα φωτός παράλληλα προς την κατεύθυνση της ροής. Η ακτίνα αυτή αντανάκλαται προς τα κάτω με ένα πρίσμα 90 μοιρών, ώσπου να συναντήσει το κάτω μέρος της πειραματικής διάταξης. Όλο το σύστημα είναι τοποθετημένο με μια τέτοια διάταξη, ώστε να μπορεί να κινείται. Άλλος τρόπος για την δημιουργία του στρώματος φωτός είναι με την χρήση ενός συστήματος με ένα περισρεφόμενο ή ταλαντευόμενο καθρέπτη. Επίσης μια κοινώς χρησιμοποιούμενη μέθοδος παροχής καπνού είναι με αγωγό καπνού. Το σημείο της παροχής είναι πολύ σημαντικό να είναι τοποθετημένο μετά από μελέτη, ώστε, ο καπνός να καλύπτει όλη την περιοχή της ροής που μας ενδιαφέρει. Πολύ σημαντικό επίσης είναι και το πάχος του στρώματος του καπνού.

Ο φωτισμός του αντικειμένου της μελέτης είναι συχνά χρήσιμος για την ακρίβεια προσδιορισμού του στρώματος φωτός σε σχέση με το μοντέλο. Μια μονάδα φωτισμού μπορεί να είναι μια σειρά από προβολείς γύρω από τον χώρο των πειραμάτων. Η χρήση του ίδιου

χρώματος φωτισμού με αυτό του στρώματος φωτός μπορεί να επιφέρει σημαντική βελτίωση στην παρατήρηση του πειράματος. Η χρήση φωτογραφικής μηχανής ή βιντεοκάμερας γίνεται έξω από τον πειραματικό χώρο, ώστε να μην παρεμποδίζεται η ροή. Για τη μελέτη της ροής, η κάμερα τοποθετείται κατακόρυφα σε σχέση με το στρώμα φωτός, για την αποφυγή διεστρέβλωσης της απεικόνισης στις αποθηκευμένες εικόνες ή βίντεο.

1.2.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΙΔΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

Η οπτικοποίηση με νηματίδια υφάσματος είναι μια από τις πρώτες μεθόδους οπτικοποίησης της ροής. Στην πιο απλή της μορφή η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με τα πιο απλά διαθέσιμα υλικά και εξοπλισμό. Τα νηματίδια αποτελούν τους δείκτες της διεύθυνσης της ροής. Χρησιμοποιούνται για να διαχωρίζουν την προσκολλημένη από την αποκολλημένη ροή. Κάθε νηματίδιο μπορεί να απεικονίσει τις συνθήκες της ροής μόνο σε ένα σημείο. Η οπτικοποίηση της ροής προϋποθέτει μια διάταξη από νηματίδια υφάσματος. Το πόσο επιτυχημένη θα είναι η οπτικοποίηση της ροής εξαρτάται από την πυκνότητα των νηματιδίων και τον αριθμό αυτών. Η τεχνική που θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία αποτελεί μια από τις συμβατικές τεχνικές με νηματίδια. Τα νηματίδια είναι συνήθως μικρά κομμάτια κλωστής προσκολλημένα σε μια επιφάνεια με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατόν να κινούνται ελεύθερα κάτω από την επίδραση της ροής. Το μεγεθός και το υλικό τους μπορεί να ποικίλει. Είναι το ίδιο αποτελεσματικά σε ροές με αέρα ή με υγρά.



Εικόνα 1.1. Εφαρμογή με νηματίδια υφάσματος

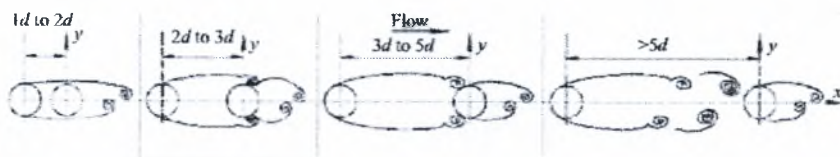
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από την συμπεριφορά του υλικού του νηματιδίου υφάσματος σε σχέση με τις συνθήκες του

πειράματος. Όταν είναι τοποθετημένα πολύ πυκνά, η διεύθυνση που δείχνουν είναι παρόμοια με τα γειτονικά τους νηματίδια. Σε αποκολλημένη ροή τα νηματίδια αναπτύσσουν μια ασταθή κίνηση και παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές στη διεύθυνση σε σχέση με τα γειτονικά τους. Οι λεπτομέρειες αυτών των φαινομένων εξαρτώνται από μια ποικιλία παραγόντων, όπως είναι το υλικό των νηματιδίων, οι ιδιότητες της ροής, οι διαδικασίες εγκατάστασης και οι μέθοδοι καταγραφής των δεδομένων. Μια βασική μελέτη στις συμβατικές μεθόδους είναι η απαίτηση να μελετηθεί οπτικά η συμπεριφορά των νηματιδίων. Κάθε πείραμα γίνεται σε κλίμακα και κύριο χαρακτηριστικό αυτής είναι η απόσταση από την οποία παρατηρούνται τα νηματίδια. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση παρατήρησης, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το μήκος των νηματιδίων. Αυτό επηρεάζει και όλες τις παραμέτρους του πειράματος όπως τη διάμετρό τους και το πόσο απέχουν μεταξύ τους.

Τα νηματίδια υφάσματος έχουν χρησιμοποιηθεί από πολύ παλιά σε μελέτες ροών πριν από την σύγχρονη εποχή της αεροναυτικής μηχανικής. Η πρώτη αναφορά ανήκει στον Haslam το 1928 [23]. Κρίνοντας και από πιο πρόσφατες αναφορές [24,25] η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε την εποχή εκείνη θεωρούνταν ως ένα βασικό εργαλείο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

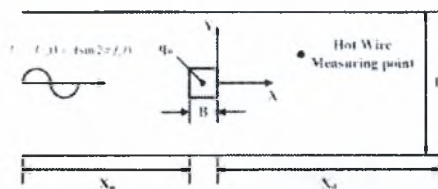
Οι Matsumura και Antonia το 1993 [1] ασχολήθηκαν με την ορμή και την παθητική μετάδοση θερμότητας στο τυρβώδες απόρρευμα ενός κυκλικού κυλίνδρου σε συγκεκριμένο αριθμό Reynolds. Αργότερα, ακολούθησαν αρκετές εργασίες παρόμοιες με αυτή των Matsumura και Antonia όπως αυτή των Zhou, Zhang & Yiu το 2002 [2], που μελέτησαν την ροή στο απόρρευμα δυο κυλίνδρων, ο ένας δίπλα στον άλλο. Το συμπέρασμά τους ήταν ότι η δομή της τυρβώδους ροής, όπως και τα άλλα χαρακτηριστικά που μελετούσαν εξαρτώνταν από το μέγεθος των κυλίνδρων, όπου L η απόσταση του ενός κυλίνδρου από τον άλλο και D η διάμετρος του κυλίνδρου. Αυτό το μέγεθος παίζει σημαντικό ρόλο και στο απόρρευμα του κάθε κυλίνδρου. Αντίστοιχα, όπως επηρεάζεται η ροή στον κύλινδρο, είτε είναι μόνος του, είτε δίπλα σε ένα άλλο, το ίδιο συμβαίνει και όταν είναι σε σειρά. Αρκετές μελέτες υπάρχουν για την ροή σε κυκλικούς κυλίνδρους σε σειρά, οι περισσότερες από τις οποίες επικεντρώνονται στον αριθμό Strouhal, σε φαινόμενα Reynolds και στις δυνάμεις πάνω στους κυλίνδρους. Από αυτές ενδεικτικές είναι αυτές του Zoravkovich [3] το 1977 και [4] το 1987, του Igarashi [5] το 1981, των Onya, Okajima & Hayashi [6] το 1989, του Williamson [22] το 1996 και του Mahir & Rockwell [7] το 1996.



Σχήμα 2. 1 Σκίτσα από τέσσερις διαφορετικές δομές ροής

Παρόλο που υπάρχει αρκετά μεγάλος αριθμός από μελέτες που ασχολούνται με τα αεροδυναμικά φαινόμενα γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο, δεν υπάρχουν τα ίδια και για τετραγωνικό κύλινδρο. Οι περισσότερες από αυτές επικεντρώνονται στην ρευστομηχανική του πειράματος, χωρίς να εξετάζουν την μετάδοση θερμότητας, όπως αυτές του Okajima το 1982 [8], του Davis και Moore το 1982 [9] και 1984 [10], του Suzuki, Inoue και Nishimura το 1993 [12] και των Breuer, Bernsdark, Zeiser και Durst το 2000 [13]. Κάποιες μελέτες έχουν ασχοληθεί με τους μηχανισμούς της μετάδοσης θερμότητας σε τετραγωνικό κύλινδρο όπως αυτή του Kelkar και Patankar [14] η οποία έδειξε ότι τα θερμοκρασιακά πεδία στο απόρρευμα για σταθερή και ασταθή ροή, είναι πολύ διαφορετικά. Ο Suzuki [15] μελέτησε ένα τετραγωνικό κύλινδρο σε κανάλι στρωτής ροής και την αναγκαζόμενη μετάδοση θερμότητας. Η έρευνα αυτή έδειξε ότι το πεδίο κοντά στην επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας περιείχε πιο κρύο

ρευστό και ότι η κίνηση του ρευστού συνέβαλε στην μετάδοση θερμότητας. Πάνω στη δουλειά των παραπάνω βασίστηκαν και οι Ji, Kim και Hyun [21] για την διάχυση της θερμότητας από ένα τετραγωνικό θερμαινόμενο κύλινδρο μέσα σε αεροσήραγγα και παρατήρησαν ότι ο συντελεστής της μετάδοσης θερμότητας αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό Reynolds.



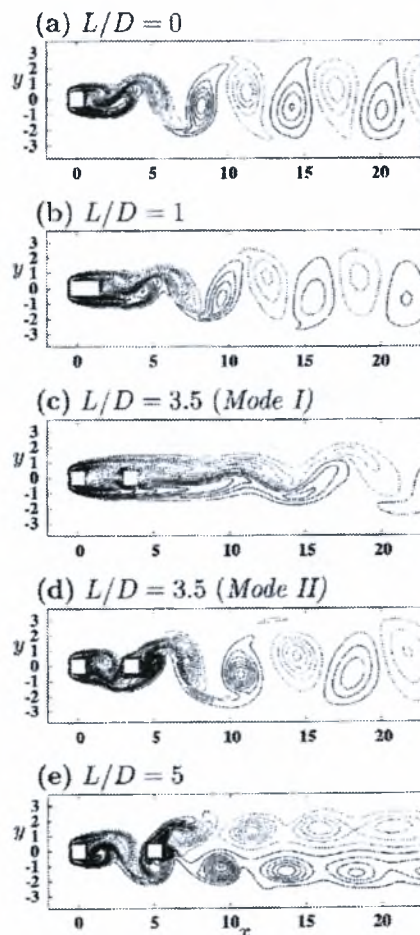
Σχήμα 2. 2 Σχήμα ενός θερμαινόμενου τετραγωνικού κυλίνδρου μέσα σε κανάλι

Η ροή σε δύο τετραγωνικούς κυλίνδρους με διάταξη σε σειρά είναι μια κλασική περίπτωση ροής σε ένα σύστημα κυλίνδρων, που λαμβάνει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον. Ο Sakamoto [16] μελέτησε πειραματικά τις δυνάμεις που εμφανίζονται στους δύο τετραγωνικούς κυλίνδρους σε σειρά. Οι αριθμοί Reynolds που εξετάστηκαν ήταν $2,76 \times 10^4$ και $5,52 \times 10^4$. Παρατηρήθηκε ότι η ροή, πιο κάτω και πιο πάνω από μια κρίσιμη απόσταση μεταξύ των δύο κέντρων των κυλίνδρων, είχε διαφορετική μορφή ροής. Η κρίσιμη αυτή τιμή ήταν $L/D=4$, όπου L η απόσταση μεταξύ των κέντρων των κυλίνδρων και D η διάμετρος των κυλίνδρων. Στο $L/D=4$, δύο τιμές της μέσης τιμής της οπισθέλκουσας μεταβλητής C_D και του αριθμού Strouhal παρατηρήθηκαν εξαιτίας των δύο μορφών ροής. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στα πειράματα των Luo & Teng [17], όπου ο αριθμός Reynolds ήταν $5,67 \times 10^4$.

Οι Liu & Chen [18] μελέτησαν πειραματικά τα χαρακτηριστικά της ροής σε δύο τετραγωνικούς κυλίνδρους σε σειρά. Η απόσταση L/D ποίκιλε από 1,5 μέχρι 9 και ο αριθμός Reynolds από 2×10^3 μέχρι $1,6 \times 10^4$. Αποδείχτηκε ότι τα χαρακτηριστικά της ροής αλλάζουν με δύο διαφορετικούς τρόπους, ο ένας με σταδιακή αύξηση της απόστασης των κυλίνδρων και ο άλλος με σταδιακή μείωση της απόστασης των κυλίνδρων. Και αυτή η μελέτη επιβεβαιώνει ότι υπάρχουν δυο μορφές ροής. Στη μία, όταν η απόσταση των κυλίνδρων είναι μικρή, η αναδίπλωση του αέρα του ανάντη κυλίνδρου καταπιέζεται και αυτό ονομάζεται φάση 1. Στην άλλη μορφή ροής, όταν η απόσταση ξεπερνάει ένα κρίσιμο σημείο, η ροή πίσω από τον ανάντη κύλινδρο αναδιπλώνεται και σχηματίζει δίνες περιοδικά και οι αναδιπλώνες δίνες αλληλεπιδρούν με τον κατόντη κύλινδρο. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται φάση 2. Οι Liu & Chen επίσης παρατήρησαν δυο μέσες τιμές της C_D για κάθε διάστημα L/D σε καθένα από τους δύο κυλίνδρους οι οποίες συνδέθηκαν με την ύπαρξη των δύο μορφών ροής. Διαφορετικές τιμές παρατηρήθηκαν και για τον αριθμό Strouhal.

Όταν η απόσταση L/D είναι ίση με 1, δηλαδή είναι σε επαφή οι δύο κύλινδροι, σχηματίζουν ένα σώμα με διπλάσια διάμετρο, αφού έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Για L/D μεγαλύτερο του 1 εμφανίζεται κενό ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους.

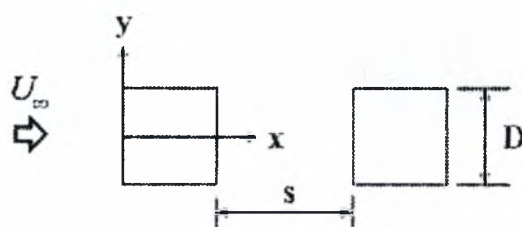
Στην εργασία των Inoue, Mori και Halakeyama [19] τα οριακά στρώματα που αποχωρίζονται από τον ανάντη κύλινδρο δεν αναδιπλώνονται για να σχηματίσουν δίνες von Karman έως και για απόσταση μικρότερη του 3,5, αλλά επανακολουθούνται στον κατάντη κύλινδρο και ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες, δίνες δημιουργούνται μόνο στον κατάντη κύλινδρο. Έτσι, σύμφωνα με τους Liu & Chen αυτό αναφέρεται ως φάση 1.



Σχήμα 2.3 Στιγμασιαά πεδία δινών. (a) $L/D=0$ (ένας τετραγωνικός κύλινδρος), (b) $L/D=1$ (ένας ορθογώνιος κύλινδρος), (c) $L/D=3,5$ (φάση 1), (d) $L/D=3,5$ (φάση 2), (e) $L/D=5$

Στη διατριβή αυτή μελέτησαν ότι όταν το διάστημα L/D είναι ίσο με 3,5 υπάρχουν δύο διαφορετικές μορφές ροής. Δίνες σχηματίζονται στον κατάντη κύλινδρο αλλά η μορφή της ροής ανήκει στη φάση 1 ή στη φάση 2 ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες του πειράματος. Για μεγαλύτερα διαστήματα δημιουργούνται δίνες και από τους δύο κύλινδρους αντίστοιχα και η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως φάση 2 πάλι σύμφωνα με τον ορισμό της από τους Liu & Chen.

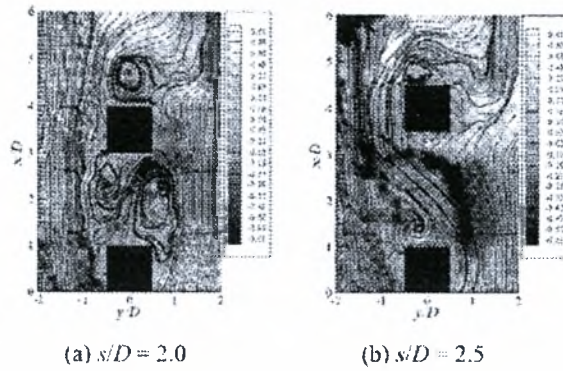
Στην πειραματική εργασία των Kim M., Voon και Lee [20] αυτό το κρίσιμο σημείο είναι διαφορετικό και ίσο με 10 και δυο τιμές για αριθμούς Reynolds 5300 και 16000.



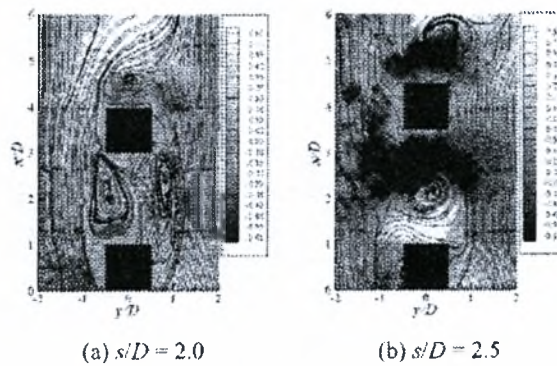
Σχήμα 2. 4 Δύο τετραγωνικοί κύλινδροι σε σειρά

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μορφές της ροής για S/D μικρότερο ή ίσο του 2 και για S/D μεγαλύτερο ή ίσο του 2,5 ήταν τελείως διαφορετικά και για τους δύο αριθμούς Reynolds. Για απόσταση $S/D = 2$ η ροή που αποκολλόταν από τις άκρες του ανάντη κύλινδρου επικολλόταν στον κατάντη κύλινδρο σχηματίζοντας παράλληλα ανακυκλοφορία αέρα ανάμεσα και αυτό αναφέρεται στη φάση 1 στους δυο κύλινδρους. Το κρίσιμο διάστημα γι'αυτό το σύγγραμμα είναι το 2,5 και για τους δύο αριθμούς Reynolds. Στο $S/D=2,5$ δεν εμφανίζεται η ανακυκλοφορία του αέρα ανάμεσα στους κύλινδρους και δίνες εμφανίζονται και στους δύο. Αυτό, αναφέρεται στη φάση 2. Η ροή αποκολλάται από τον ανάντη κύλινδρο και δεν κολλάει εκ νέου στον κατάντη κύλινδρο.

Όπως φαίνεται από τις εργασίες των Chen & Liu, Okajima για τιμές Reynolds μικρότερες του 5300 το κρίσιμο διάστημα αλλάζει και πιο συγκεκριμένα μειώνεται σε σχέση με τον αριθμό Reynolds. Άρα, το κρίσιμο διάστημα εμφανίζεται σε μικρότερο διάστημα όταν η ένταση της τύρβης μεγαλώνει. Δηλαδή, το κρίσιμο διάστημα εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Αντίθετα, στην εργασία των Kim, Voon και Lee το κρίσιμο διάστημα δεν φαίνεται να επηρεάζεται για αριθμούς Reynolds μεταξύ του 5300 και 16000.

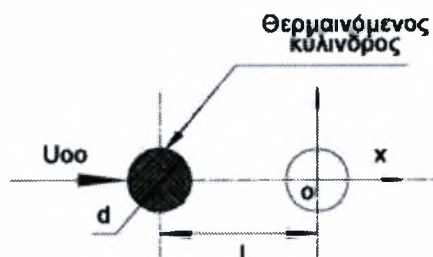


Σχήμα 2. 5. Στιγμαία πεδία δινών για $Re=5300$



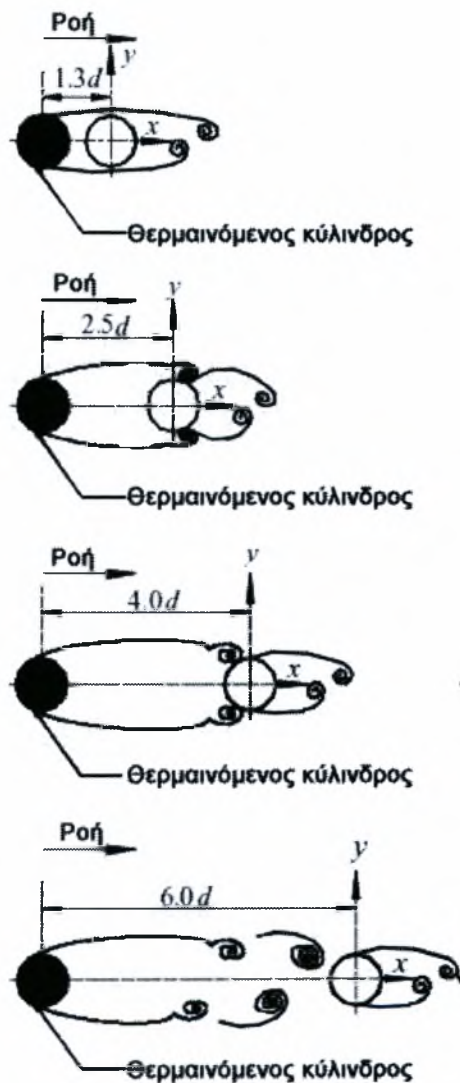
Σχήμα 2. 6. Στιγμαία πεδία δινών για $Re=16000$

Η έρευνα που σχετίζεται περισσότερο με το θέμα της παρούσας εργασίας είναι των Zhou και Υίου το 2005 [26], οι οποίοι μελέτησαν τα ροϊκά φαινόμενα σε δυο κυκλικούς κυλίνδρους ίδιου μεγέθους σε σειρά, με τον ανάντη να είναι αρχικά ελάχιστα πιο θερμός. Πιο συγκεκριμένα, ο ανάντη κύλινδρος θερμάνθηκε στους $36\text{ }^\circ\text{C}$ και τοποθετήθηκε θερμοστοιχείο πάνω στην επιφάνειά του για την μέτρηση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 2. 7. Διάταξη κυλινδρικών μοντέλων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για τις αποστάσεις $L=1,3$, $2,5$, 4 και 6 όπου $L=x/D$, x η απόσταση μεταξύ των κέντρων των κυλίνδρων και D η διάμετρός τους. Διαπιστώθηκαν διαφορές στα πεδία ροών για αυτές τις θέσεις.

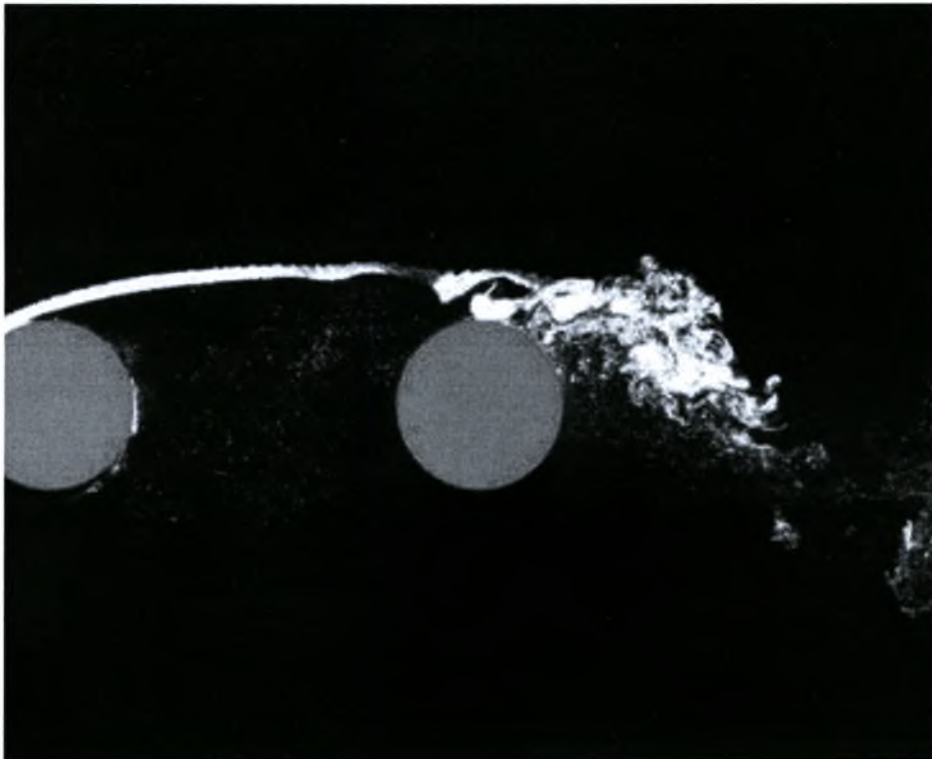


Σχήμα 2. 8. Απεικόνιση του σχηματισμού δινών για :
(a) $L = 1,3$ (b) $L = 2,5$ (c) $L = 4$ και (d) $L = 6$

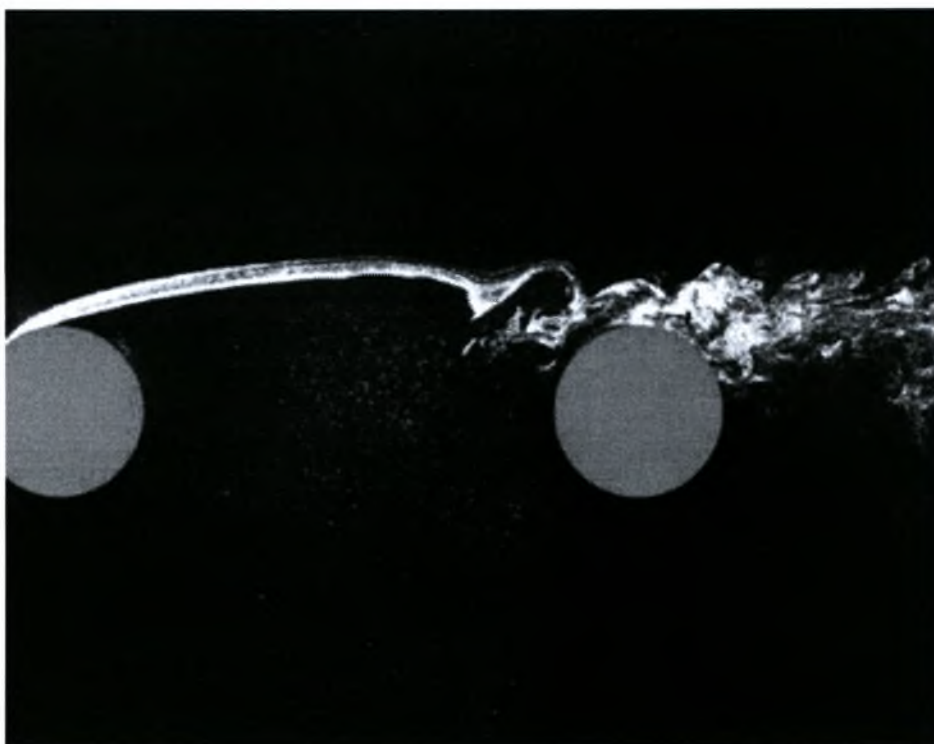
Για $L=1,3$ τα δύο σώματα συμπεριφέρονταν σχεδόν σαν ένα και εμφανίζονταν δίνες πίσω από τον κατάντη κύλινδρο. Για $L=2,5$ υπήρχε ανακυκλοφορία πίσω από τον ανάντη κύλινδρο και δίνες von Karman πίσω από τον κατάντη κύλινδρο. Για $L=4$ ήταν ακόμα εμφανές ότι η

αποκολλημένη ροή από τον ανάντη κύλινδρο προλάβαινε και προσκολλόταν στον κατάντη κύλινδρο με την εμφάνιση δινών μόνο σε αυτόν τον κύλινδρο. Μόνο για $L=6$ η ροή που αποκολλόταν από τον ανάντη κύλινδρο δεν προσκολλόταν στον κατάντη και δημιουργούνταν δίνες πίσω και από τους δύο κυλίνδρους, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο παραπάνω σχήμα 2.8.

Για την οπτικοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απεικόνισης με καπνό. Ο καπνός πραγματοποιήθηκε με την χρήση λαδιού από παραφίνη, ο οποίος εξερχόταν από σωλήνα διαμέτρου $1\mu\text{m}$ τοποθετημένο στην διεύθυνση της ροής του ρευστού. Οι εικόνες 2.1. και 2.2. δείχνουν την αποκόλληση της ροής στον ανάντη κύλινδρο, την διαταραχή στο οριακό στρώμα και την μετάβασή του σε τυρβώδες, καθώς η ροή προσκολλόταν στον κατάντη κύλινδρο. Από τη ανάλυση των φωτογραφιών φαίνεται ότι υπήρχε μια μικρή διαφορά στις μορφές της ροής για τις θέσεις $L=2,5$ και $L=4$. Αυτή η διαφορά είναι ότι η προσκόλληση της ροής στον κατάντη γινόταν με μεγαλύτερη ευκολία και πιο αποτελεσματικά για την θέση $L=2,5$ απ' ό τι για την θέση $L=4$.



Εικόνα 2. 1. Απεικόνιση με καπνό για $L=2,5$



Εικόνα 2. 2. Απεικόνιση με καπνό για $L=4$

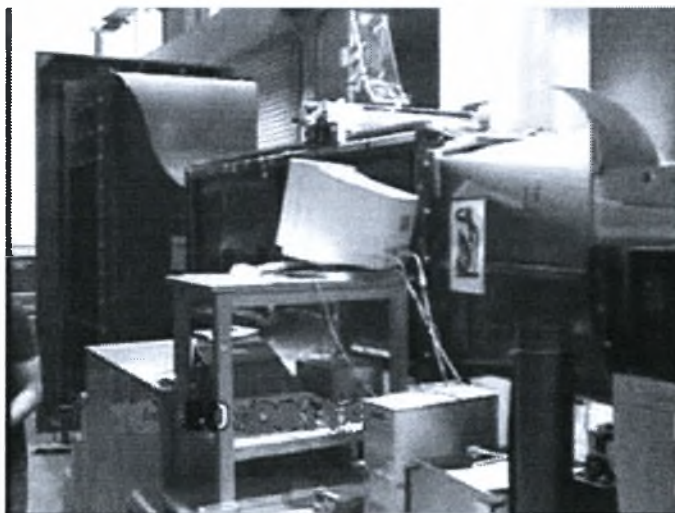
Σύμφωνα με την έρευνα του συγγραφέα της συγκεκριμένης διατριβής, μελέτες για μη αεροδυναμικά σώματα και πιο συγκεκριμένα πειραματικές μελέτες για δυο τετραγωνικούς κυλίνδρους σε σειρά, με τον ανάντη κύλινδρο να θερμαίνεται δεν έχουν πραγματοποιηθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

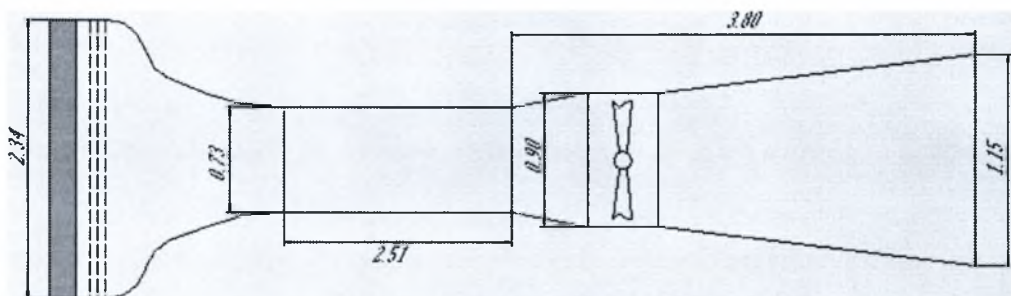
3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

3.1.1 ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ

Η αεροσήραγγα του Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ., η οποία χρησιμοποιήθηκε, είναι ανοικτού κυκλώματος και λειτουργεί με αναρρόφηση. Αποτελείται από το συγκλίνον στόμιο αναρρόφησης, το τμήμα δοκιμών, τον διαχύτη και το τμήμα του ανεμιστήρα. Στην εικόνα 3.1 φαίνεται η αεροσήραγγα. Η μέγιστη επιτυγχάνόμενη ταχύτητα είναι της τάξης των 20 m/s.



Εικόνα 3. 1. Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών



Εικόνα 3. 2. Κύριες διαστάσεις της αεροσήραγγας

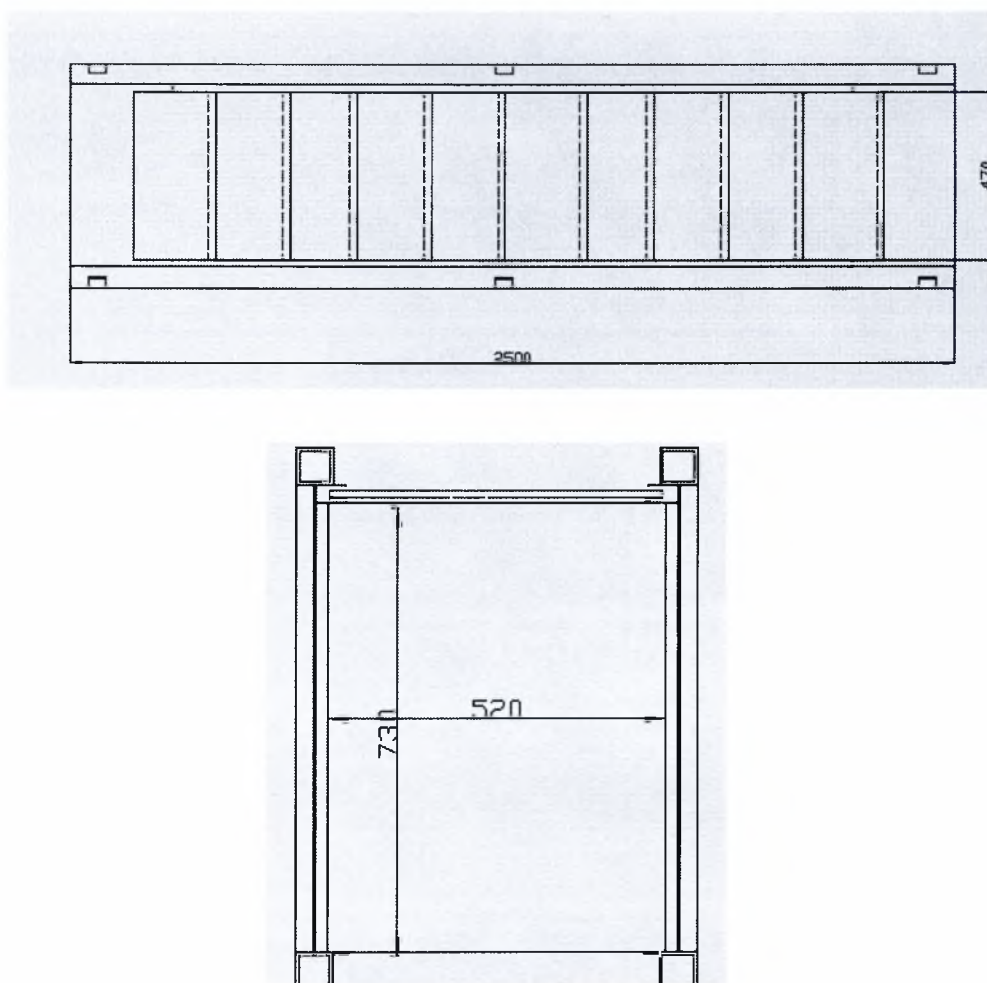
Ο συλλέκτης είναι συγκλίνουσας ορθογωνικής διατομής (110cm x 234 cm), η οποία στο τέλος έχει τις διαστάσεις της διατομής του χώρου δοκιμών. Μπροστά στην εισαγωγή υπάρχει το φίλτρο εξομάλυνσης της ροής, που περιλαμβάνει περίπου 66000 κυψέλες διαστάσεων 8x70mm και είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου. Μετά το φίλτρο εξομάλυνσης, υπάρχουν τρεις σειρές πλεγμάτων με σκοπό την επίτευξη ομοιομορφίας της ροής και της μείωσης της τύρβης.



Εικόνα 3. 3. Συλλέκτης

Το τμήμα δοκιμών είναι το κυρίως τμήμα της αεροσήραγγας μέσα στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις. Έχει διαστάσεις 2.51x0.52x0.73 m. Πάνω στο τμήμα μετρήσεων στηρίζεται το σύστημα μετακίνησης των αισθητήρων, το οποίο δίνει τη δυνατότητα κίνησης και προς τις τρεις διευθύνσεις. Το τμήμα δοκιμών έχει κατασκευασθεί από μεταλλικούς φορείς μορφοσιδήρου. Τέσσερις δοκοί 60x60 mm σχηματοποιούν τον κύριο φορέα του θαλάμου δοκιμών, συγκολλημένοι μεταξύ τους στις τρεις πλευρές από δοκούς 30x50 mm. Στην άνω πλευρά του φορέα και εκατέρωθεν αυτού είναι συγκολλημένες δυο σιδηρές λάμες 30x50 mm που έχουν υποστεί την κατάλληλη κατεργασία για την διάνοιξη αύλακος. Στις τρεις πλευρές του μεταλλικού φορέα είναι τοποθετημένα τα τοιχώματα από plexiglass πάχους 20mm. Αυτό επιτρέπει στον ερευνητή την οπτική παρατήρηση των πειραμάτων και την οπτικοποίηση της

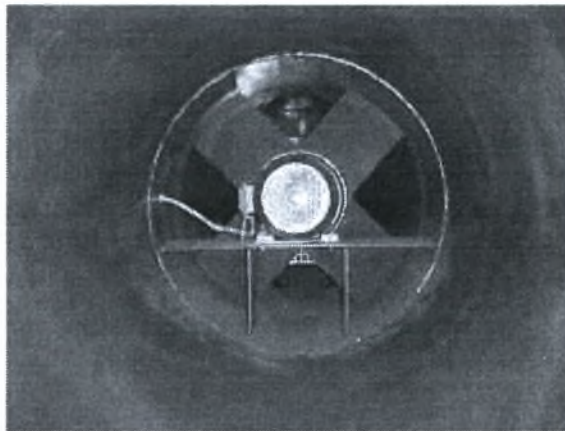
ροής, όποτε το επιθυμεί. Στην επάνω πλευρά το τοίχωμα αποτελείται από πλάκες MDF κατάλληλα διαμορφωμένες, διαστάσεων 520x220 mm, οι οποίες μπορούν να ολισθαίνουν στις δύο ειδικά διαμορφωμένες ράγες που βρίσκονται σε κάθε μια από τις πάνω διαμήκεις λάμες και να αποσπώνται αφήνοντας ελεύθερο όλο τον χώρο του πλαισίου για πρόσβαση στον χώρο μετρήσεων. Στα δύο άκρα του θαλάμου υπάρχουν φλάντζες για την σύνδεση του με το ακροφύσιο και τον διαχύτη αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.1. φαίνεται η κάτοψη (α) και η κάθετη τομή (β) του τμήματος δοκιμών.



Σχήμα 3. 1. (α) Κάτοψη και (β) Κάθετη τομή του τμήματος δοκιμών

Ανάμεσα στο τμήμα δοκιμών και το διαχύτη βρίσκεται ο φυσητήρας ο οποίος εδράζεται στον ηλεκτροκινητήρα και φέρει τέσσερα μεταλλικά πτερύγια στερεωμένα στον άξονα του ρότορα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι ασύγχρονος τριφασικός, ονομαστικής ισχύος 7.5 kW, τροφοδοτούμενος από τριφασικό ρεύμα 380 Volts μέσω του μετατροπέα της συχνότητας του

ρεύματος (Inverter). Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της παροχής και άρα της ταχύτητας της αεροσήραγγας μέσω μεταβολής του αριθμού στροφών του κινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι στερεωμένος στο εσωτερικό της αεροσήραγγας μέσω τριών μεταλλικών ορθογωνικών ελασμάτων σχήματος αεροτομής, που βρίσκονται πίσω από τον ανεμιστήρα. Στην εικόνα 3.4 φαίνεται ο φυσητήρας.

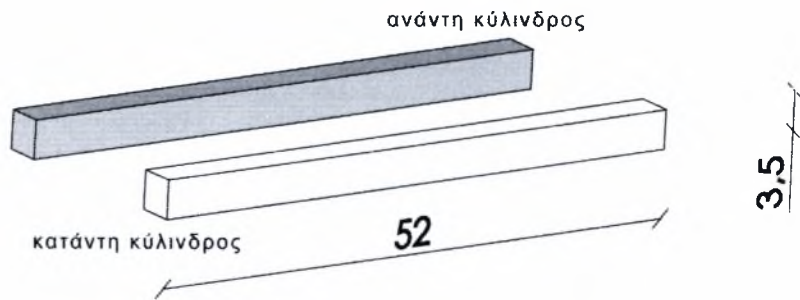


Εικόνα 3. 4. Ο φυσητήρας της αεροσήραγγας

Τέλος, υπάρχει ο διαχύτης, οι διαστάσεις του οποίου φαίνονται στο σχήμα 3.1. Σκοπός του διαχύτη είναι η μείωση της ταχύτητας με αύξηση της διατομής, ώστε να ελαττώνονται οι απώλειες τριβής, να γίνεται ομαλή ανάκτηση πίεσης μέχρι την ατμοσφαιρική και με κατάλληλη κλίση να αποτρέπεται η αποκόλληση του οριακού στρώματος.

3.1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

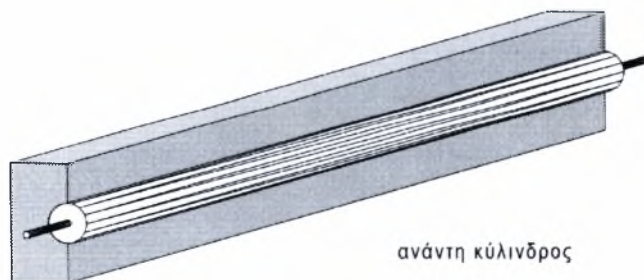
Τα μοντέλα του πειράματος έχουν ίδιες διαστάσεις και πιο συγκεκριμένα 35 x 35 x 52 εκατοστά. Οι κύλινδροι απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα, όπου γκρι ο ανάντη κύλινδρος και λευκός ο κατόντη κύλινδρος:



Σχήμα 3. 2. Οι τετραγωνικοί κύλινδροι του πειράματος

Τα κριτήρια βάση των οποίων επιλέχτηκαν οι συγκεκριμένες διαστάσεις για τους κύλινδρους είναι τα εξής:

1. Οι διαστάσεις της αεροσήραγγας είναι 520 x 730 χιλιοστά. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων πρέπει να είναι το μέγιστο 10 % των διαστάσεων της αεροσήραγγας, ώστε να μην δημιουργείται παρεμπόδιση της ροής.
2. Οι διαστάσεις των μοντέλων εξαρτώνται από τις μεθόδους μέτρησης και οπτικοποίησης που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εργασία. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα οι διαστάσεις να είναι προσαρμοσμένες στα μετρητικά – πειραματικά όργανα.



Σχήμα 3. 3. Ανάτη κύλινδρος με αντίσταση

Ο ανάντη κύλινδρος περιέχει στο κέντρο του αντίσταση ισχύος 500 W. Για την θέρμανση του κυλίνδρου οι άκρες της αντίστασης είναι συνδεδεμένες με ρεοστάτη τάσης 240V.

3.1.3 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

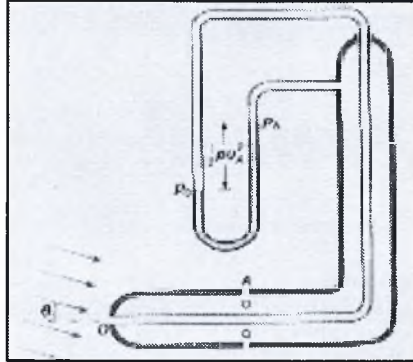
3.1.3.1. ΣΩΛΗΝΑΣ ΠΙΤΟΤ

Για τον αρχικό έλεγχο στο τμήμα δοκιμών της αεροσήραγγας χρησιμοποιήθηκε ένα κεκλιμένο μανόμετρο οιοπνεύματος. Ο σωλήνας Pitot-Static συνδέονταν με το μανόμετρο που μετρούσε την διαφορά στάθμης Δh . Στην εικόνα 3.5. φαίνεται το μανόμετρο:



Εικόνα 3. 5. Το μανόμετρο οιοπνεύματος

Ο σωλήνας Pitot-Static (Prandtl), αποτελεί συνδυασμό σωλήνων στατικής πίεσης Pitot και δυναμικής πίεσης και χρησιμοποιείται ως όργανο μέτρησης της ταχύτητας. Μια τυπική μορφή σωλήνα Pitot-Static (Prandtl) εικονίζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3. 4. Σωλήνας Pitot - Static (Prandtl)

Με την βοήθεια του σωλήνα Pitot ο οποίος τοποθετείται στην αρχή της αεροσήραγγας, μπροστά από τους δύο κυλίνδρους και στο ίδιο ύψος με αυτούς, γίνεται βαθμονόμηση της αεροσήραγγας και με αυτό το τρόπο προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Συχνότητα (Hz)	Πίεση (Pa)	Ταχύτητα (m/sec)
3	1,65	0,8
5	2,75	1,4
10	5,5	2,9
15	13	4,6
20	23	6,1
25	37	7,7
30	53	9,3
35	72	10,8
40	93	12,3

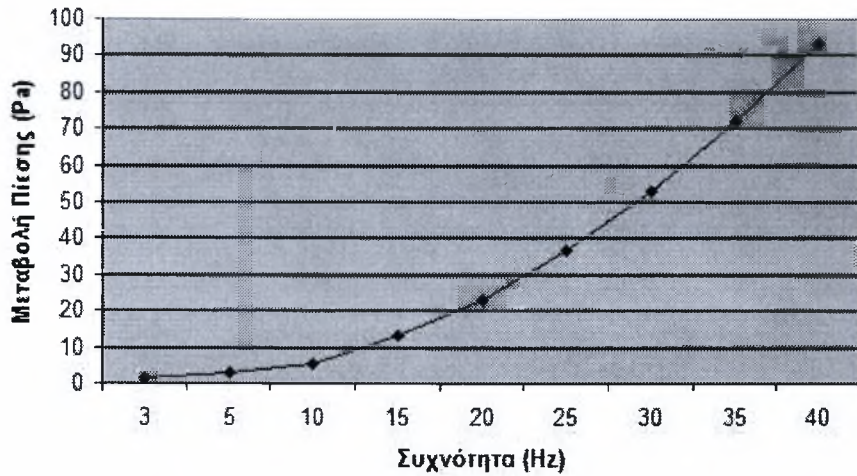
Πίνακας 3. 1. Βαθμονόμηση αεροσήραγγας

Η ταχύτητα προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

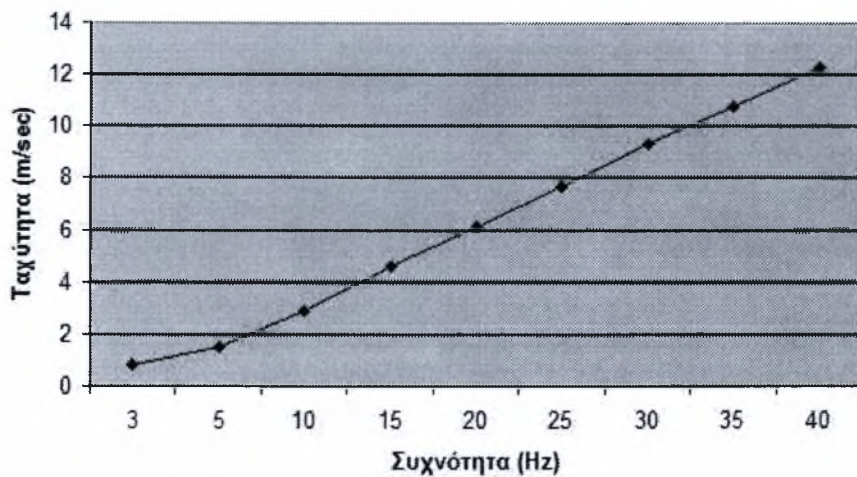
$$U = 4,05 \sqrt{\frac{P}{10}} \text{ όπου } P \text{ η ένδειξη της πίεσης σε Pascal δηλαδή για συχνότητα 3Hz έχουμε:}$$

$$U = 4,05 \sqrt{\frac{1,65}{10}} = 0,858 \text{ m/sec}$$

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



Γράφημα 3. 1. Γραφική παράσταση πίεσης - συχνότητας



Γράφημα 3. 2. Γραφική παράσταση ταχύτητας - συχνότητας

3.1.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

3.1.4.1. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΚΑΠΝΟ

Η οπτικοποίηση πραγματοποιήθηκε με έκχυση καπνού μέσω ακροφυσίου κυκλικής διατομής το οποίο τοποθετήθηκε στο ίδιο ύψος με τους τετραγωνικούς κυλίνδρους και με τη

φορά του καπνού να ακολουθεί τη φορά της ροής του αέρα. Το καπνογόνο που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

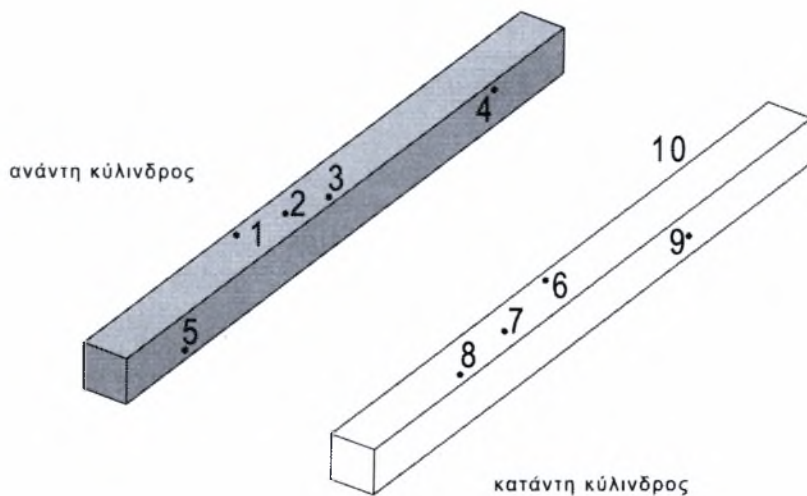


Εικόνα 3. 6. Καπνογόνο

Ο φωτισμός του πεδίου ροής επιτεύχθηκε με το Argon laser SDL-532-1000T με ισχύ 1120 mW και μήκος κύματος 532 nm το οποίο τοποθετήθηκε στην οροφή της αεροσήραγγας όπου είχε προσαρμοστεί μεταλλική πλάκα με διατομή, έτσι ώστε να δημιουργεί ένα πέπλο φωτός παράλληλο με την κατεύθυνση της ροής, ενώ η αντανάκλαση της ακτίνας έγινε με ένα σύστημα υψηλής ταχύτητας περιστρεφόμενων κατόπτρων.

3.1.4.2. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΙΔΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

Στον ανάντη και στον κατόντη κύλινδρο επικολλώνται 10 νηματίδια συνολικά και στους δύο κυλίνδρους. Τα νηματίδια υφάσματος, τα οποία έχουν μήκος 5 cm, είναι τοποθετημένα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3. 5. Θέσεις νηματιδίων υφάσματος

Για την απεικόνιση με τα νηματίδια υφάσματος, πλαγίως της αεροσήραγγας και σε απόσταση 0.5 m και ύψος 1 m από το έδαφος, τοποθετήθηκε μία λάμπα αλογόνου για το φωτισμό του χώρου των πειραμάτων η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα ενώ κατά τη διάρκεια της βιντεοσκόπησης τα φώτα του εργαστηρίου έμειναν κλειστά. Η λάμπα αυτή, είχε ισχύ 100W και ήταν συνδεδεμένη με ένα dimmer. Με αυτό το dimmer υπάρχει η δυνατότητα να μειώνεται η ένταση της ακτινοβολίας της λάμπας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός φωτισμός.

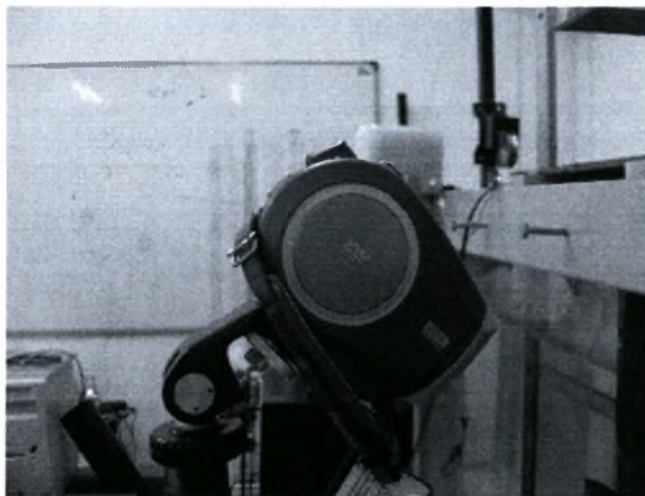


Εικόνα 3. 7. Λάμπα αλογόνου

Επίσης στην διατριβή αυτή και για τις δύο μεθόδους τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν με μία κάμερα που έχει συχνότητα δειγματοληψίας 25 frames ανά δευτερόλεπτο.

3.1.4.3 ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΜΕΡΑ

Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την μαγνητοσκόπηση των πειραμάτων οπτικοποίησης της ροής για την απεικόνιση με καπνό αλλά και με τα νηματίδια υφάσματος είναι μία ψηφιακή κάμερα οικιακής χρήσης Canon dvd camcorder PAL DC21 με ταχύτητα λήψης 25 frames per second και frame analysis 720x576.



Εικόνα 3. 8. Ψηφιακή κάμερα Canon

3.1.5. ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ FLIR

Για το πείραμα με την βοήθεια της θερμογραφίας χρησιμοποιήθηκε η θερμοκάμερα που φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Η ThermaCAM P45 (Παράρτημα Ι) είναι μια επαγγελματική θερμογραφική κάμερα που παράγει υψηλής ανάλυσης jpeg φωτογραφίες με 320x240 pixels. Η ThermaCAM P45 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση θερμικών ανωμαλιών που δεν

είναι δυνατόν να εντοπιστούν με γυμνό μάτι. Είναι σχεδιασμένη για οποιοδήποτε περιβάλλον. Κατασκευάστηκε για να αντέχει το απότομο τράνταγμα (25G) και τις δονήσεις (2G). Έχει προστασία από την σκόνη και από τις σταγόνες νερού καθώς και την βιομηχανική αξιολόγηση IP54. Μπορεί να λειτουργεί πολλές ώρες την ημέρα και ζυγίζει μόνο 1,4 Kgr. Αποτελεί ιδανική επιλογή για μετρήσεις τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Για μεγαλύτερη ευκολία στην χρήση η κάμερα διαθέτει εξωτερικά κουμπιά που αντιστοιχούν σε βασικές λειτουργίες της όπως οι παλέτες χρωμάτων και η κλίμακα θερμοκρασίας. Έχει μια LCD οθόνη που παρέχει συνεχώς πληροφορίες για τις σημαντικές λειτουργίες της κάμερας. Ο χειρισμός μπορεί να γίνει μέσω ενός ειδικού joystick που είναι τόσο εύκολο στο χειρισμό όσο το ποντίκι ενός υπολογιστή. Με αυτό είναι δυνατός ο εντοπισμός και η φωτογράφιση της επιθυμητής περιοχής καθώς και η αλλαγή βασικών λειτουργιών όπως ο υπολογισμός θερμοκρασιακών διαφορών και η ανάλυση των προφίλ γραμμών. Επίσης η αποθήκευση των εικόνων και η αυτόματη εστίαση είναι δυνατή με το πάτημα ενός μόνο κουμπιού. Οι εκόνες μαζί με τις μετρήσεις αποθηκεύονται σε κάρτα μνήμης χωρητικότητας 128 MB. Η μπαταρία είναι λιθίου τύπου Li-Ion. Αυτό δίνει στην ThermaCAM P45 αυτονομία για πάνω από δύο ώρες. Η κάμερα συνεργάζεται με το πρόγραμμα ThermaCAM Researcher για την συλλογή των μετρήσεων.



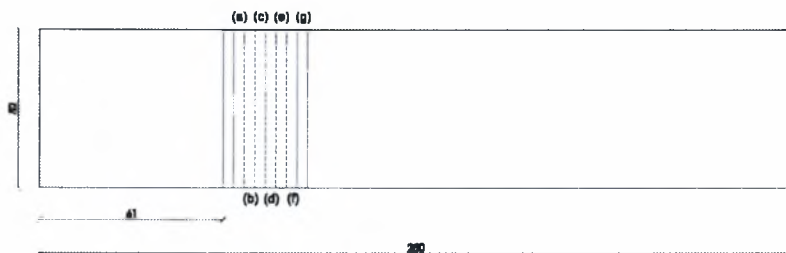
Εικόνα 3. 9. Θερμοκάμερα P45

3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥΣ

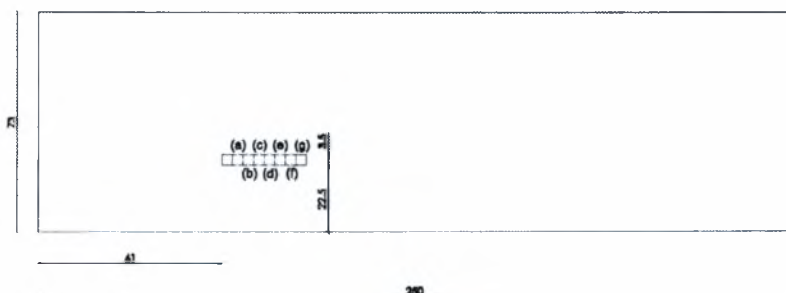
3.2.1 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ – ΡΟΪΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

3.2.1.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΟΗΣ

Η οπτικοποίηση με καπνό αλλά και αυτή με τα νηματίδια υφάσματος πραγματοποιήθηκε στην αεροσήραγγα για 7 θέσεις από $L=0$ μέχρι και $L=6D$ όπου από L η απόσταση των κυλίνδρων από το τέλος του ανάντη κυλίνδρου στην αρχή του κατόντη. Οι θέσεις αυτές στην αεροσήραγγα φαίνονται αναλυτικά στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3. 6. Κάτοψη αεροσήραγγας με τις θέσεις των κυλίνδρων από $L=0$ μέχρι $L=6D$



Σχήμα 3. 7. Προφίλ αεροσήραγγας με τις θέσεις των κυλίνδρων από $L=0$ μέχρι $L=6D$



Εικόνα 3. 10. Καρέ θέσεων κυλίνδρων από $L=0$ μέχρι $L=6D$

Ο κάθε κύλινδρος είναι στερεωμένος στην αεροσύραγμα με πείρο διαμέτρου 3 mm για την εύκολη εγκατάσταση και απομακρυσή του από την κάθε θέση.



Εικόνα 3. 11. Πείρος στερέωσης πειραματικών μοντέλων

Για την απεικόνιση με τα νηματίδια υφάσματος η ταχύτητα της ροής, η οποία παρέμεινε σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας και για όλες τις θέσεις ίδια, ήταν περίπου 15 m/sec, που αντιστοιχεί σε συχνότητα αεροσήραγγας 50 Hz. Για την απεικόνιση με καπνό, μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για ταχύτητες 0,9 m/sec, 1,4 m/sec και 2,9 m/sec και συχνότητες 3, 5 και 10 Hz αντίστοιχα. Αυτό, έγινε για την καλύτερη διαλογή, επεξεργασία και χρήση των αποτελεσμάτων από το βίντεο και τις φωτογραφίες που ελήφθησαν στην οπτικοποίηση με καπνό.

3.2.1.2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η θερμοκάμερα τοποθετήθηκε στο ίδιο ύψος με τους κυλίνδρους αλλά 1,5 m πίσω από το τέλος του κατάντη κυλίνδρου, ώστε να είναι ορατός ολόκληρος ο κατάντη κύλινδρος. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην φωτογραφία 3.12 :



Εικόνα 3. 12. Πειραματική διάταξη

Για όλα τα πειράματα θερμογραφίας η συχνότητα της αεροσήραγγας είναι η ίδια και ίση με 10 Hz δηλαδή ταχύτητα ροής $U = 2,9 \text{ m/sec}$. Μετρήσεις ελήφθησαν για τις θέσεις από $L=0$ μέχρι και $L=4$. Η διαφορά σε σχέση με τις πειράματα οπτικοποίησης της ροής έγκειται στο γεγονός ότι για την θέση $L=4$ πραγματοποιήθηκε μέτρηση με μια λεπτή πλάκα αλουμινίου πάχους 5 mm η οποία τοποθετήθηκε ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους και στο ύψος των κυλίνδρων. Σκοπός, ήταν η παρατήρηση της ενδεχόμενης μεταβολής διαταραχής στα θερμοροϊκά φαινόμενα της διάταξης και τι ρόλο παίζουν οι δίνες von Karman στην μετάδοση θερμότητας από τον ανάντη στο κατόντη κύλινδρο σε σχέση με το L/D . Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ρεοστάτης όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με τον ανάντη κύλινδρο και πιο συγκεκριμένα με την αντίσταση του, για όλες τις θέσεις από $L=0$ μέχρι και $L=4D$ και καθόλη την διάρκεια της δειγματοληπτικής μέτρησης παρέιχε ρεύμα στην αντίσταση του ανάντη κυλίνδρου τάσεως 240 V.



Εικόνα 3. 13. Ρεοστάτης

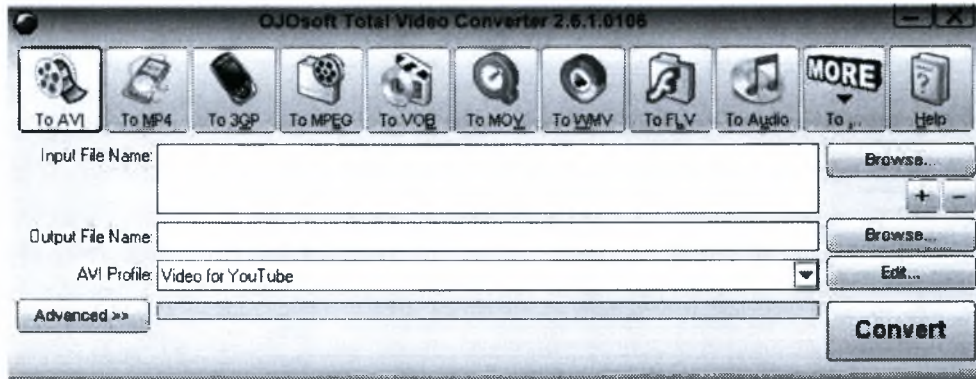
Κατά μήκος όλης της αεροσήραγγας τοποθετήθηκαν 10 μαύρα ορθογώνια φύλλα χαρτονιού για την επίτευξη του επιθυμητού φωτισμού με αποφυγή ανακλάσεων και παρεμβολών στην υπέρυθρη κάμερα αποκλειστικά στο χώρο των πειραμάτων όπως φαίνεται στην φωτογραφία:



Εικόνα 3. 14. Κάλυψη αεροσήραγγας με χαρτόνια

3.2.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Τα βίντεο που ελήφθησαν με την χρήση της βιντεοκάμερας μετατράπηκαν από είδος αρχείου βίντεο VOB σε είδος αρχείου βίντεο τύπου AVI με το πρόγραμμα OJOSOFT Total Video Converter.



Εικόνα 3. 15. OjOSoft Total Video Converter

Στην συνέχεια με την βοήθεια του προγράμματος AVI Splitter, τα αρχεία κόπηκαν σε άλλα μικρότερης διάρκειας, καθώς και σε φωτογραφίες.



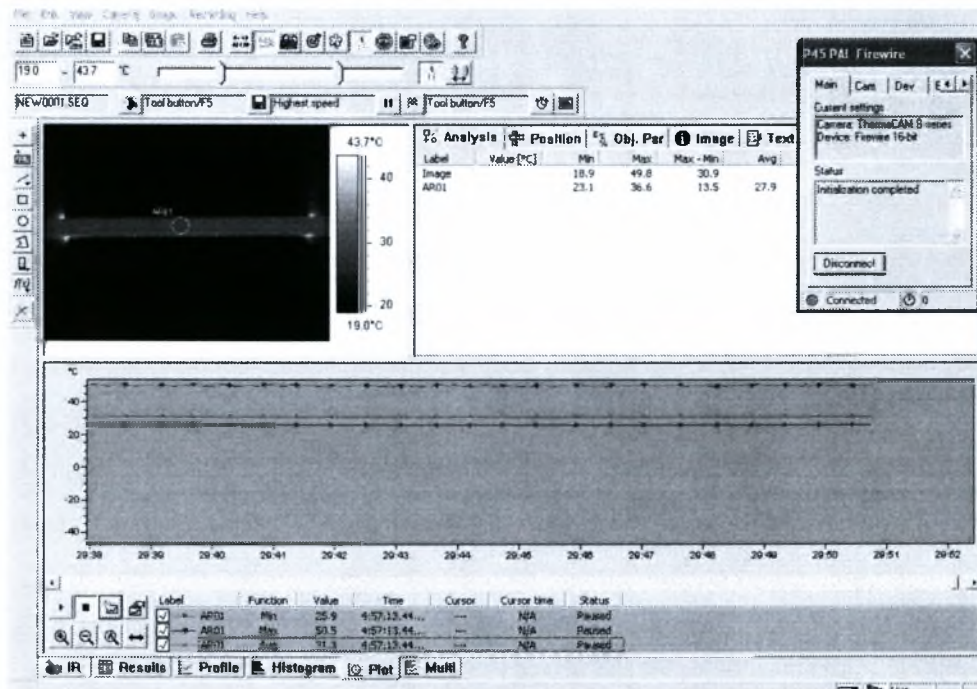
Εικόνα 3. 16. Πρόγραμμα AVI SPLITTER

Για την ανάκτηση των δεδομένων και των φωτογραφιών στο πείραμα με την θερμοκάμερα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ThermoCAM Researcher Pro 2.8 SR – 3. Για το πρόβλημά μας επιλέχθηκε μια μικρή περιοχή παρατήρησης και μέτρησης της θερμοκρασίας και πιο συγκεκριμένα μια περιοχή στο πίσω μέρος του κατόντη κυλίνδρου διαμέτρου 3,5 cm, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3. 8. Περιοχή μελέτης θερμοκάμερας

Επίσης, έγινε επιλογή των μεγεθών που θα μελετηθούν δηλαδή της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας. Με την βοήθεια του προγράμματος αυτού είναι δυνατή η απευθείας παρακολούθηση των διαγραμμάτων μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας στην περιοχή που επιλέχθηκε νωρίτερα.



Εικόνα 3. 17. Πρόγραμμα ThermaCAM

Η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων αυτών έγινε με την βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel.

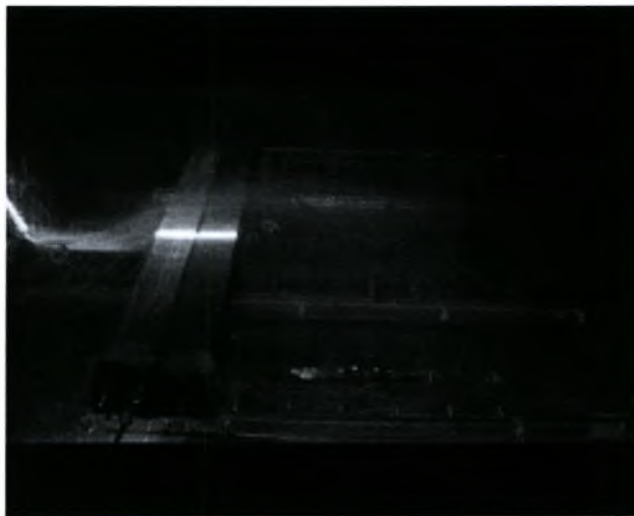
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

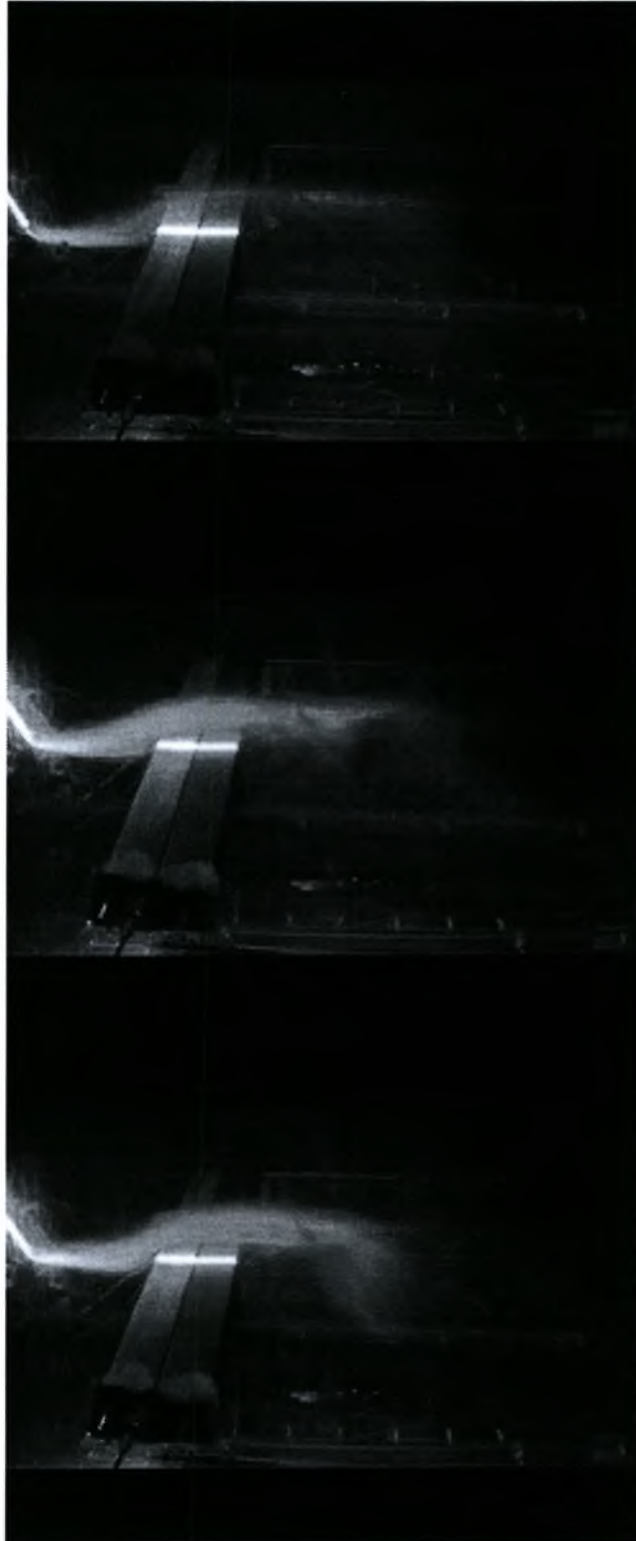
4.1. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

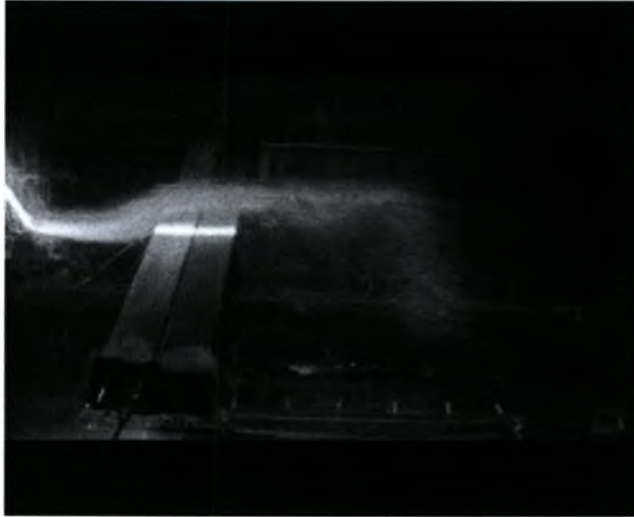
4.1.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΚΑΠΝΟ

1. Για $L=0$

Αφού η απόσταση είναι μηδενική οι δύο κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα και έτσι παράγονται δίνες μόνο από το σύστημα των δύο σωμάτων όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες. Άρα για απόσταση $L=0$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=2,9\text{m/sec}$ παρατηρείται ότι δίνες παράγονται πίσω από τον κατάντη κύλινδρο:





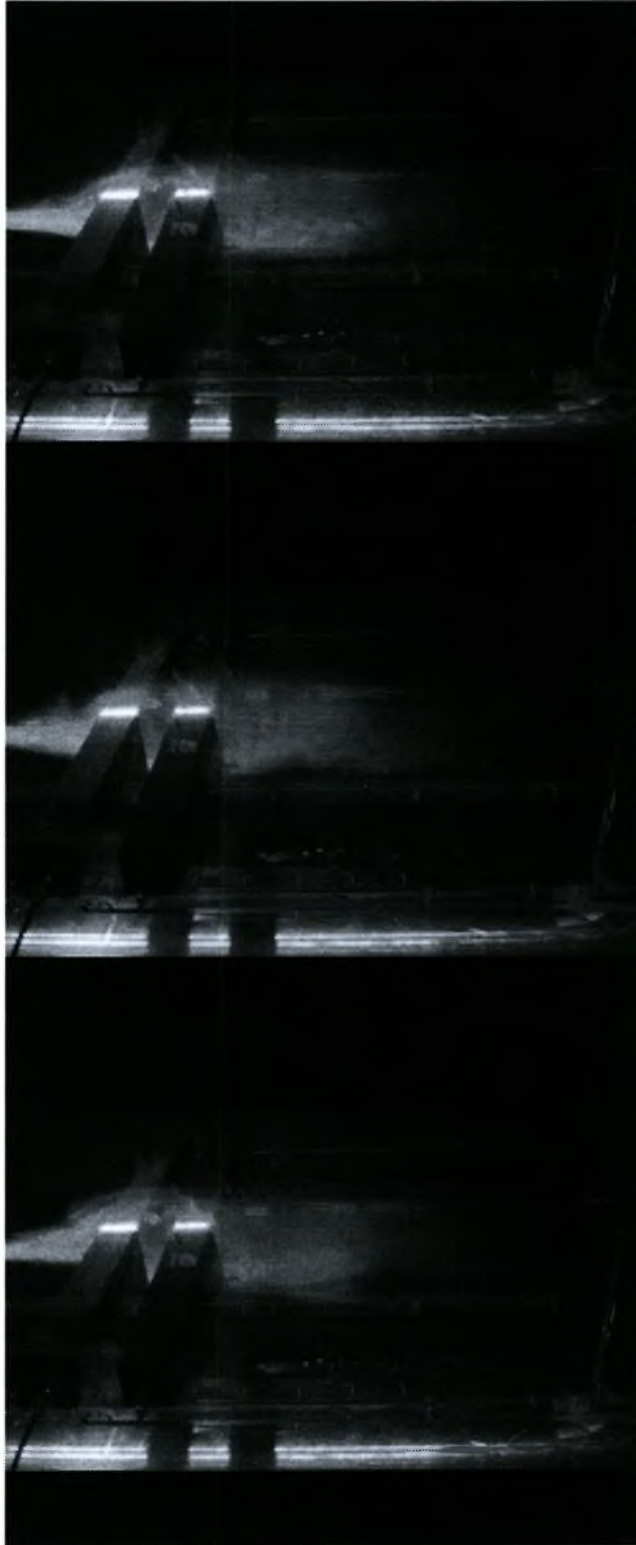


Εικόνα 4. 1. Για $L=0$ και $U=2,9\text{m/sec}$

2. Για $L=1D$

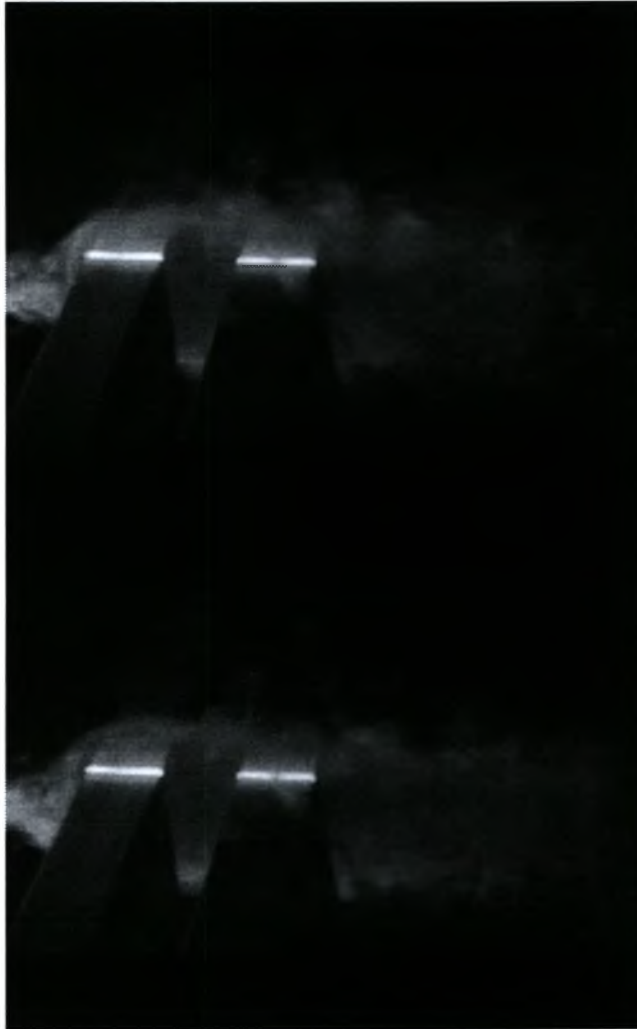
Παρατηρείται ένας χώρος ανακυκλοφορίας ανάμεσα στους δυο κυλίνδρους. Το ανάντη σώμα δεν παράγει δίνες Von Karman απλώς υπάρχει ανακυκλοφορία στην πίσω πλευρά του. Το κατόντη σώμα παράγει δίνες Von Karman και υπάρχει εναλλασόμενη περιοδικότητα. Η περιοδική αυτή κίνηση του αέρα φαίνεται καθαρά πίσω από αυτόν το κύλινδρο. Μεταξύ του ανάντη και κατόντη κυλίνδρου δεν σχηματίζονται δίνες Von Karman. Άρα για απόσταση $L=1D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=2,9\text{m/sec}$ παρατηρείται:

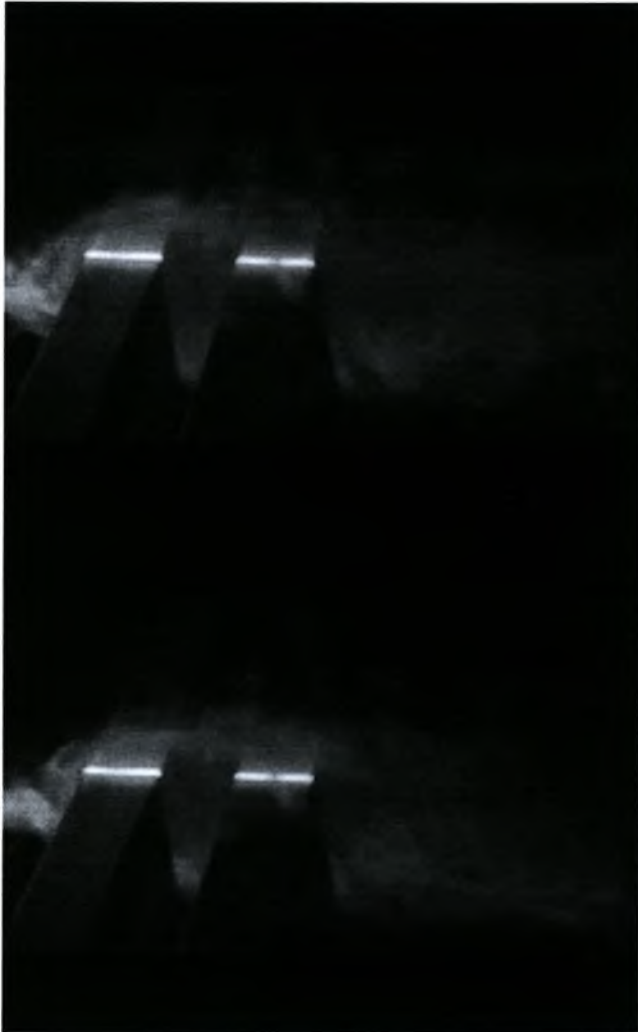




Εικόνα 4. 2. Για $L=1D$ και $U=2,9m/sec$

Με μια πιο κοντινή λήψη το φαινόμενο γίνεται πιο εμφανές:





Εικόνα 4. 3. Κοντινή λήψη για $L=1D$ και $U=2,9\text{m/sec}$



3. Για $L=2D$

Για την απόσταση $L=2D$ είναι φανερή η προσπάθεια σχηματισμού εναλλασσόμενης κίνησης πίσω κ από τους δύο κυλίνδρους. Εμφανής η περιοδική κίνηση πίσω από τον κατάντη κύλινδρο. Παρατηρείται τάση σχηματισμού δινών Von Karman πίσω από το ανάντη σώμα. Για απόσταση $L=2D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=0,8\text{m/sec}$ παρατηρείται:



Εικόνα 4. 4. Για $L=2D$ και $U=0,8m/sec$

Για απόσταση $L=2D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=1,4\text{m/sec}$ παρατηρείται:

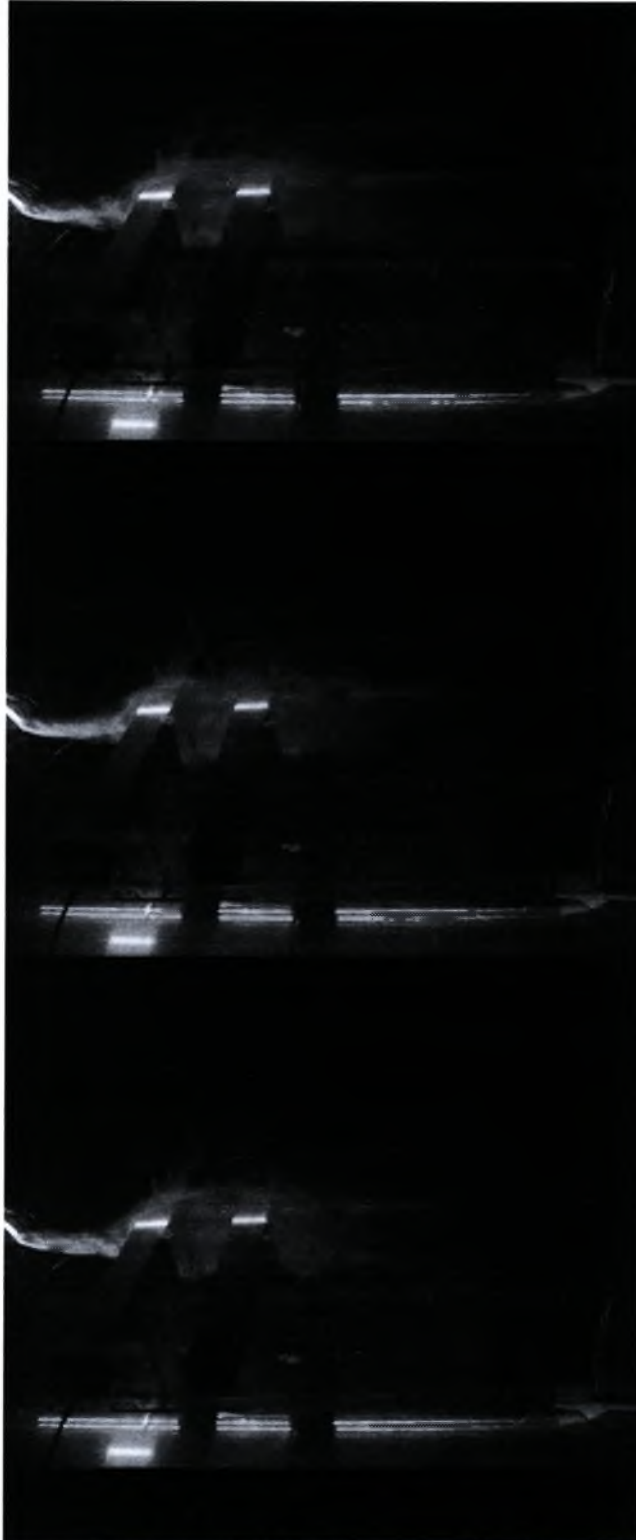




Εικόνα 4. 5. Για $L=2D$ και $U=1,4\text{m/sec}$

Για απόσταση $L=2D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=2,9\text{m/sec}$ παρατηρείται:

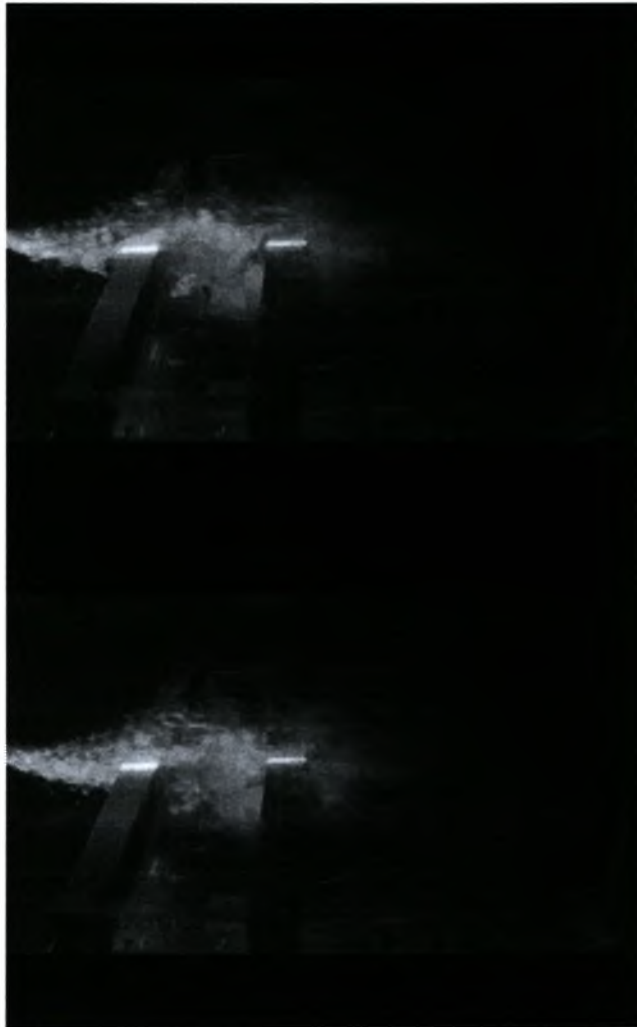


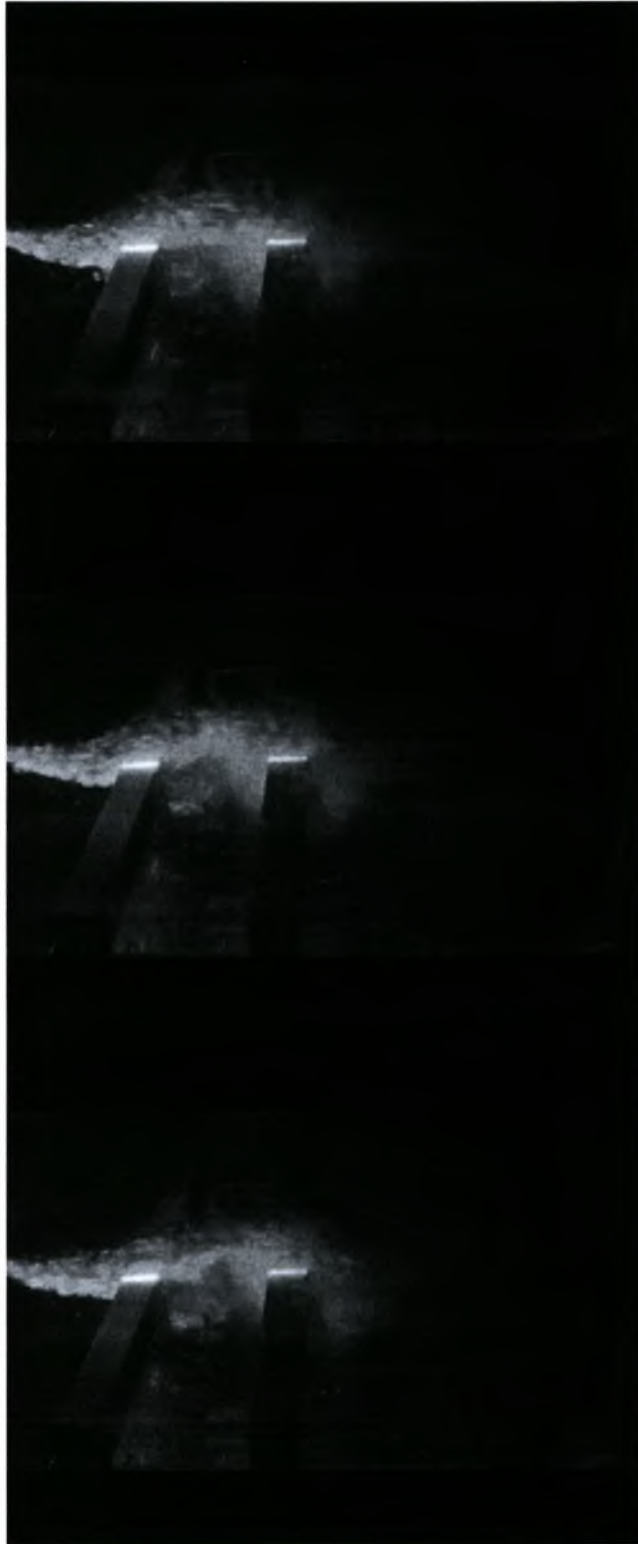


Εικόνα 4. 6. Για $L=2D$ και $U=2,9m/sec$

4. Για $L=3D$

Πλέον είναι φανερές οι δίνες πίσω και από τον ανάντη κύλινδρο. Παρατηρείται έτσι περιοδικότητα των δινών και από το ανάντη αλλά κ από το κατόντη σώμα. Στα 3Hz το φαινόμενο φαίνεται καλύτερα αφού έχουμε μικρότερη ταχύτητα:

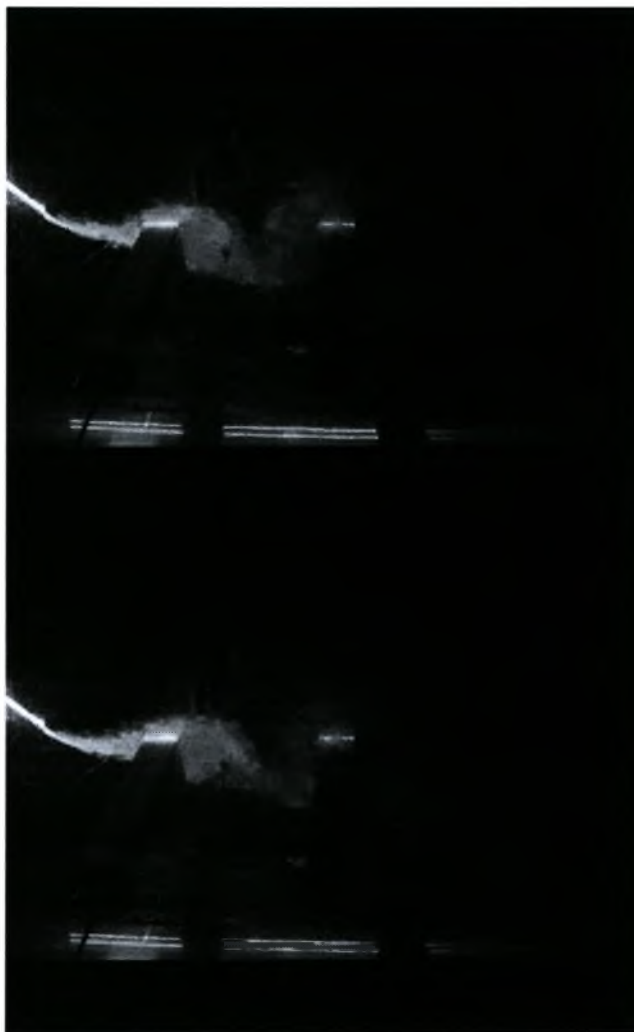




Εικόνα 4. 7. Για $L=3D$ και $U=0,8m/sec$

5. Για $L=4D$

Δίνες Von Karman και περιοδικότητα στην κίνηση του αέρα πίσω και από τα δύο σώματα. Οι δίνες πίσω από τον κατάντη κύλινδρο δεν είναι ιδιαίτερα εμφανής λόγω μη αρκετού καπνού. Άρα για απόσταση $L=4D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=1,4\text{m/sec}$ παρατηρείται:



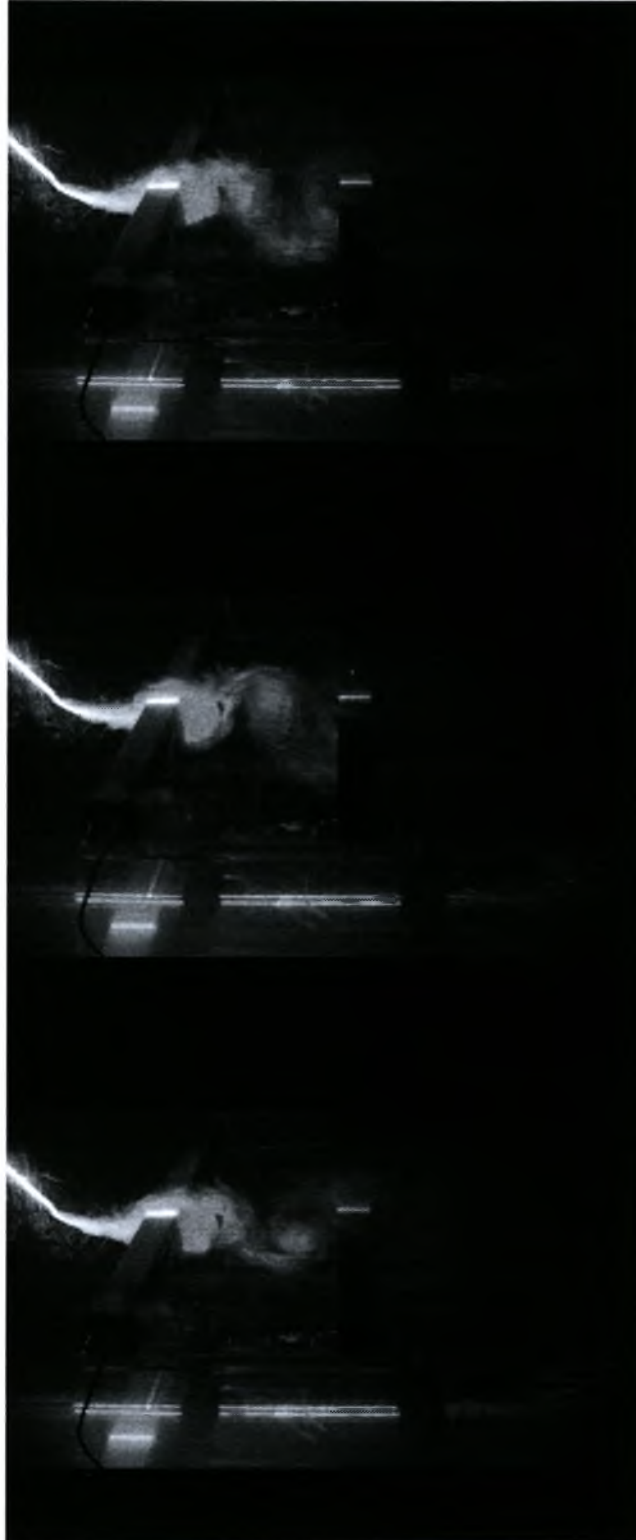


Εικόνα 4. 8. Για $L=4D$ και $U=1,4m/sec$

6. Για $L=5D$

Δίνες Von Karman και περιοδικότητα στην κίνηση του αέρα πίσω και από τα δύο σώματα.
Αρα για απόσταση $L=5D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=1,4\text{m/sec}$ παρατηρείται:





Εικόνα 4. 9. Για $L=5D$ και $U=1,4m/sec$

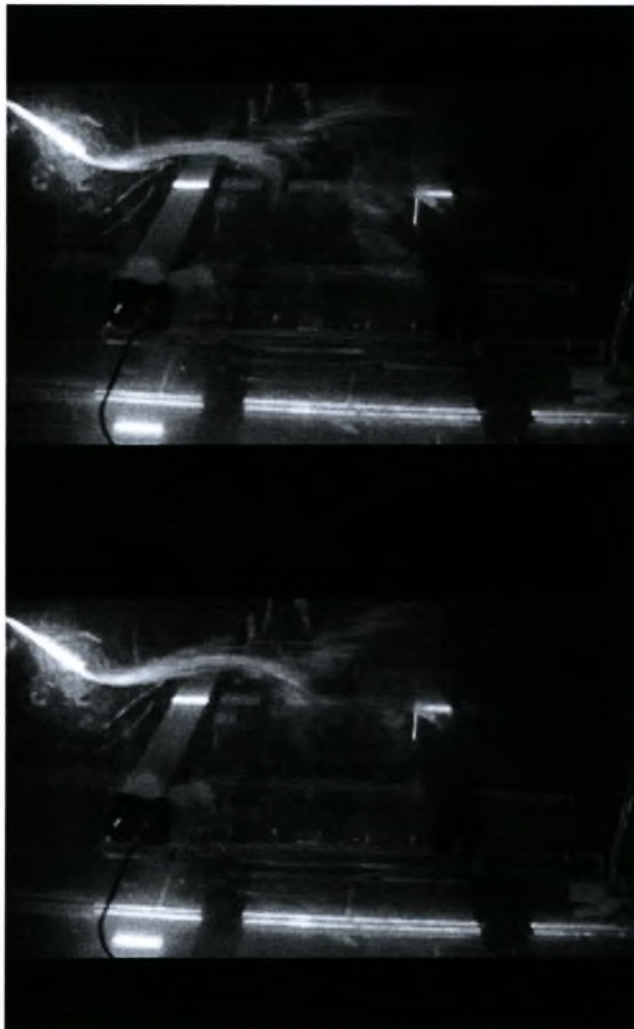
Για απόσταση $L=5D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=0,8\text{m/sec}$ η περιοδικότητα είναι εμφανής:



Εικόνα 4. 10. Για $L=5D$ και $U=0,8\text{m/sec}$

7. Για $L=6D$

Στην απόσταση αυτή η ροή είναι αποκολλημένη και δημιουργούνται δίνες Von Karman πίσω από τον ανάντη αλλά και από τον κατόντη κύλινδρο. Η ροή προσπαθεί να κατευθυνθεί αντίθετα με την αρχική της κατεύθυνσης εξαιτίας του τυρβώδες απορεύματος του ανάντη κυλίνδρου. Άρα για απόσταση $L=6D$ και ταχύτητα αεροσήραγγας $u=1,4\text{m/sec}$ παρατηρείται:





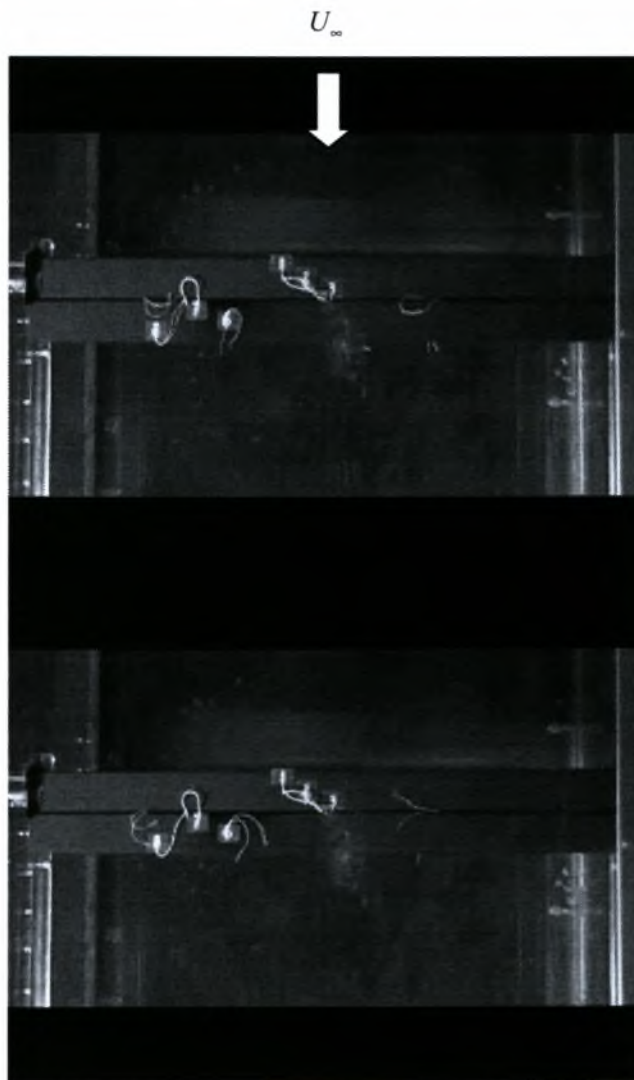
Εικόνα 4. 10. Για $L=6D$ και $U=1,4\text{m/sec}$

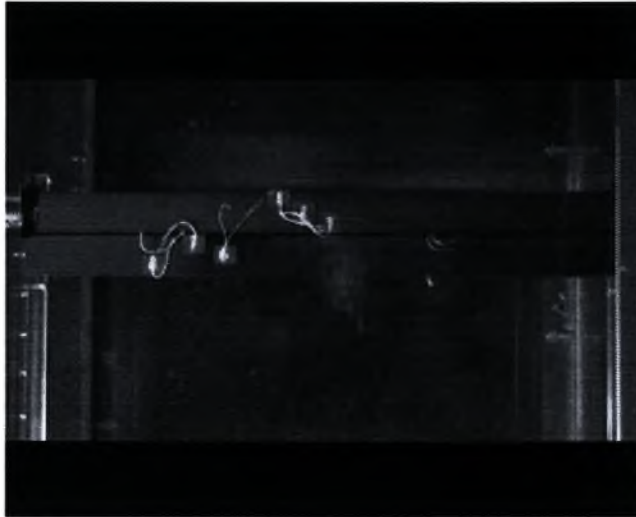
4.1.2. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΙΔΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

Όλες οι μετρήσεις έγιναν για συχνότητα αεροσήραγγας 50Hz:

1. Για $L=0$

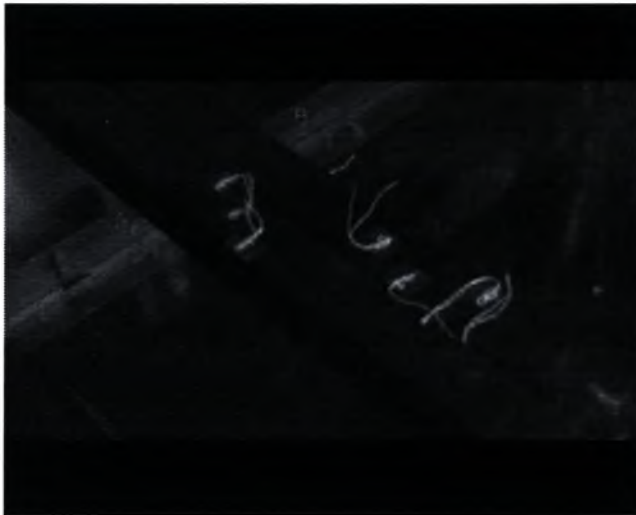
Η ροή είναι ανεστραμμένη γιατί τα νηματίδια 1, 2, 3 και 8 έχουν διεύθυνση αντίθετα με αυτή της ροής.





Εικόνα 4. 11. L=0 Κάτοψη

Από τα νηματίδια 6,8 των οποίων η διεύθυνση εναλλάσσεται, μία είναι σε συμφωνία με την διεύθυνση της ροής και μία αντίθετα με την διεύθυνση της ροής, γίνεται κατανοητό ότι η ροή είναι αποκολλημένη και αυτό είναι εμφανές στις παρακάτω φωτογραφίες:





Εικόνα 4. 12. $L=0$ Πλάγια μπροστινή όψη

2. Για $L=1D$

Στον ανάντη κύλινδρο δεν παρατηρούμε οτιδήποτε περίεργο στην συμπεριφορά των νηματιδίων. Τα νηματίδια 4,5 όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα κινούνται ακανόνιστα επειδή ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους υπάρχει ανακυκλοφορία:

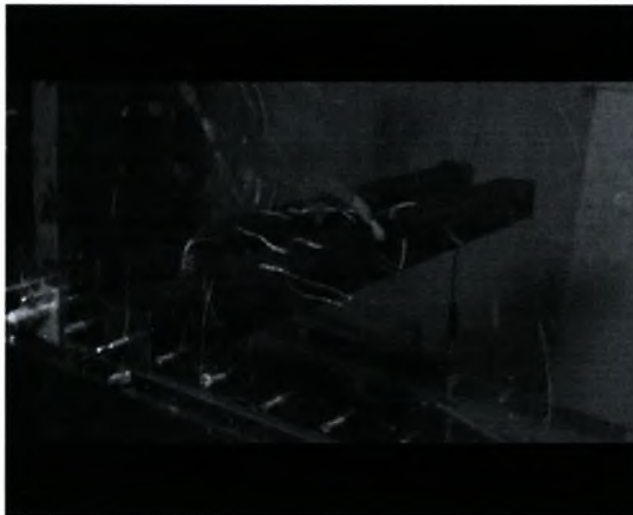


Εικόνα 4. 13. $L=1D$ Κάτοψη

Παρατηρείται ότι η ροή είναι ανεστραμμένη όπως φαίνεται από το νηματίδιο 6 που κινείται αντίθετα προς την διεύθυνση της ροής. Επίσης η ροή είναι αποκολλημένη όπως φαίνεται από το νηματίδιο 7 το οποίο πηγαίνει μια μπροστά κ μία πίσω:



Εικόνα 4. 14. L=1D Πλάγια μπροστινή όψη



Εικόνα 4. 15. $L=1D$ Πλάγια πίσω όψη

3. Για $L=2D$

Όπως φαίνεται από τις εικόνες νηματίδια 1, 2 και 3 η ροή στον ανάντη κύλινδρο είναι μερικώς προσκολλημένη. Τα 4, 5 κινούνται ακανόνιστα λόγω ανακυκλοφορίας παρόμοια με αυτή που είχαν για $L=1D$. Παρατηρείται:

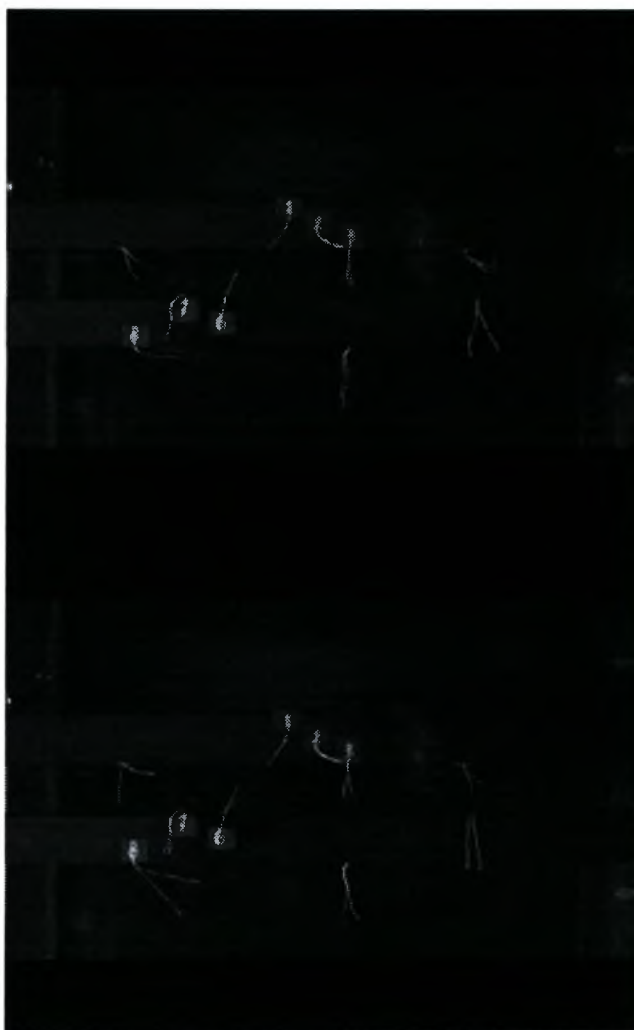


Εικόνα 4. 16. $L=2D$ Πλάγια πίσω όψη



Εικόνα 4. 17. L=1D Πλάγια μπροστινή όψη

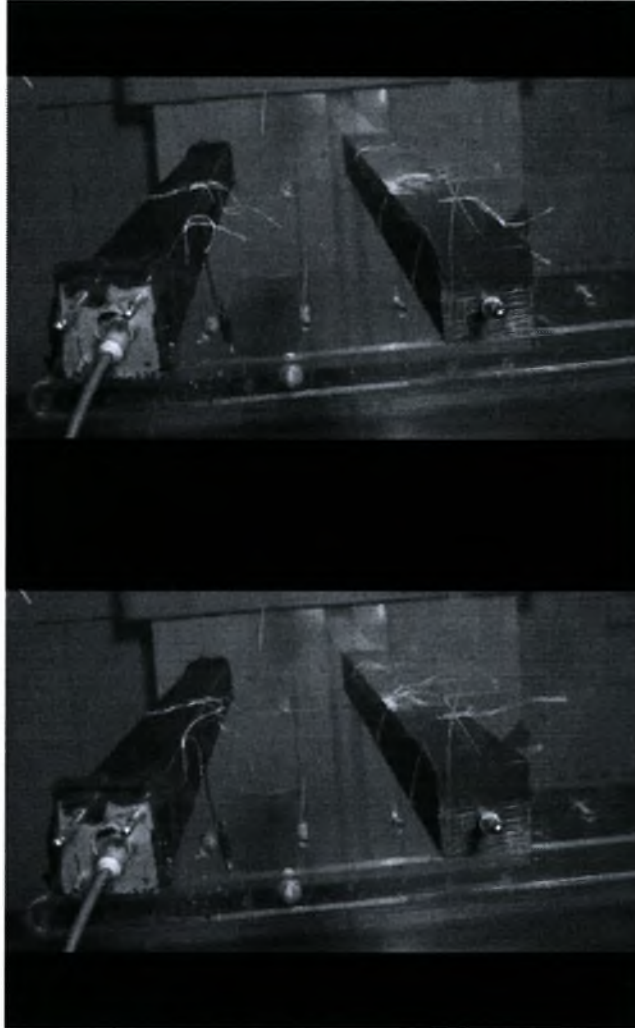
Ενώ κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του πειράματος, τα νηματίδια 6 και λιγότερο το 7 κινούνται κατά την διεύθυνση της ροής, υπάρχουν στιγμές που η διεύθυνσή τους αλλάζει και γίνεται αντίθετη σε σχέση με αυτή της ροής το οποίο φαίνεται χαρακτηριστικά στις φωτογραφίες:



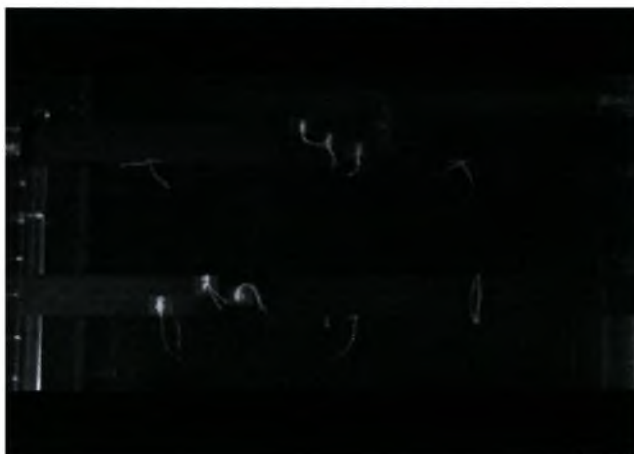
Εικόνα 4. 18. L=2D Κάτοψη

4. Για L=3D

Από αυτήν την απόσταση μεταξύ των δύο κυλίνδρων και μετά δεν παρατηρείται αναστραμμένη ροή. Στον ανάντη κύλινδρο εμφανίζεται αποκόλληση της ροής αλλά αυτή δεν γίνεται έντονη στην κίνηση των νηματιδίων, ενώ στο κατάντη κύλινδρο η ροή είναι πλήρως προσκολλημένη.



Εικόνα 4. 19. L=3D Προφίλ μοντέλων



Εικόνα 4. 20. L=3D Κάτοψη

Οι κινήσεις των 6 και 7 που περιγράφηκαν στο $L=2D$ γίνονται λιγότερο απότομες:



Εικόνα 4. 21. $L=3D$ Πάνω οψη

5. Για $L=4D$

Οι κυκλικές κινήσεις που κάνουν τα νηματίδια 6, 7 και 8 του κατάντη κυλίνδρου οφείλονται στο απόρρευμα του ανάντη κυλίνδρου και εμφανίζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 4. 221. $L=4D$ Προφίλ



Εικόνα 4. 23. $L=4D$ Πάνω οψη



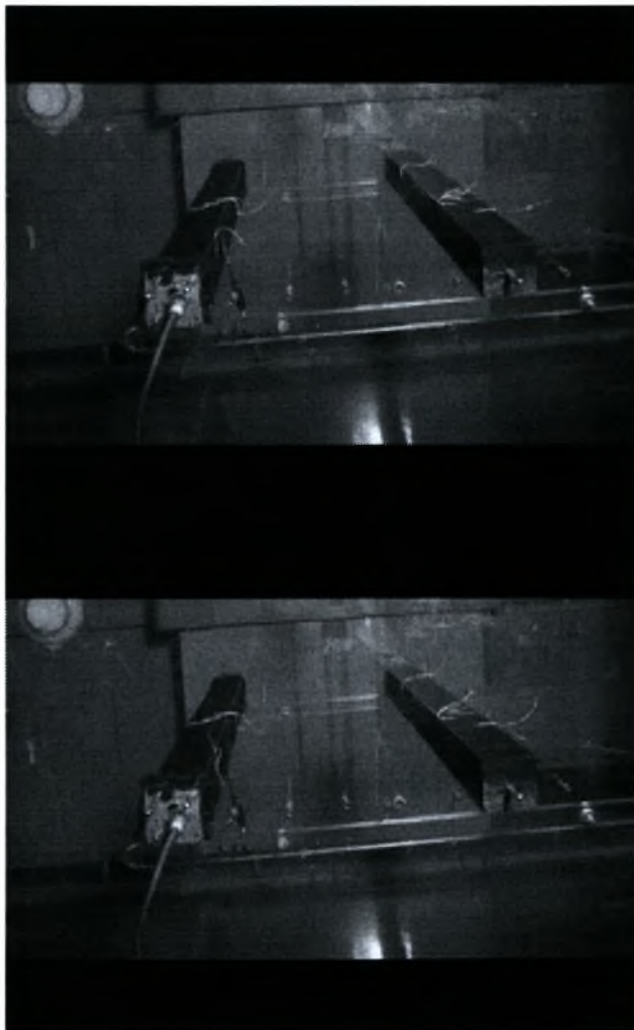
Εικόνα 4. 24. L=4D Κάτοψη



Εικόνα 4. 25. L=4D Πλάγια πίσω όψη

6. Για L=5D

Για L=5D δεν παρατηρείται κάτι σημαντικό στην κίνηση των νηματιδίων υφάσματος μιας και όλα κινούνται σύμφωνα με την διεύθυνση της ροής.



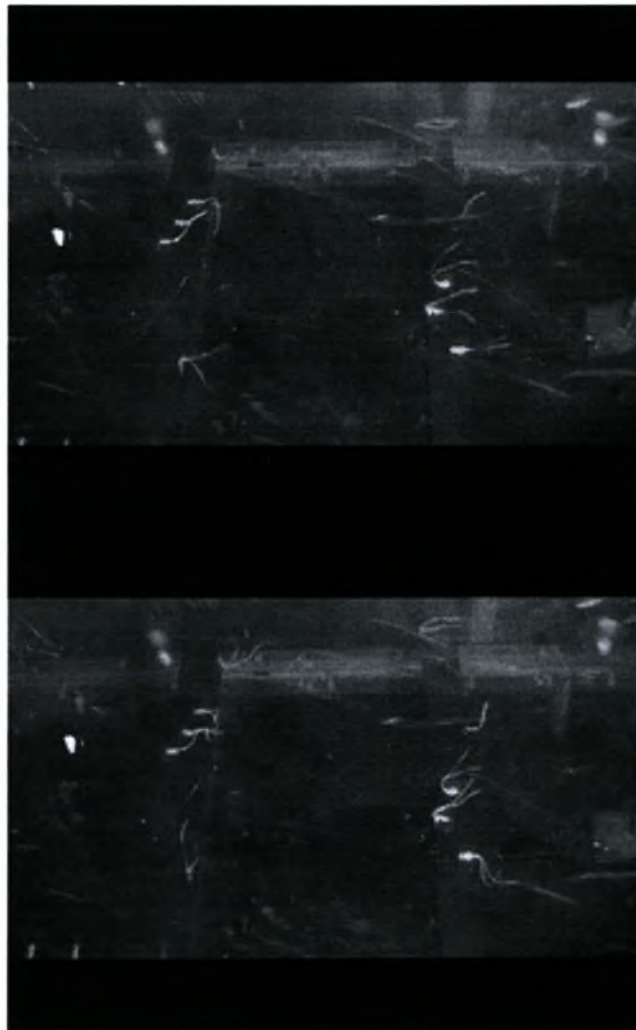
Εικόνα 4. 26. L=5D Προφίλ



Εικόνα 4. 27. L=5D Πλάγια πίσω όψη

7. Για $L=6D$

Ομοίως για $L=6D$ δεν παρατηρείται κάτι άξιο αναφοράς στην κίνηση των νηματιδίων υφάσματος μιας και όλα κινούνται σύμφωνα με την διεύθυνση της ροής:



Εικόνα 4. 28. $L=6D$ Πάνω όψη



Εικόνα 4. 29. L=6D Προφίλ



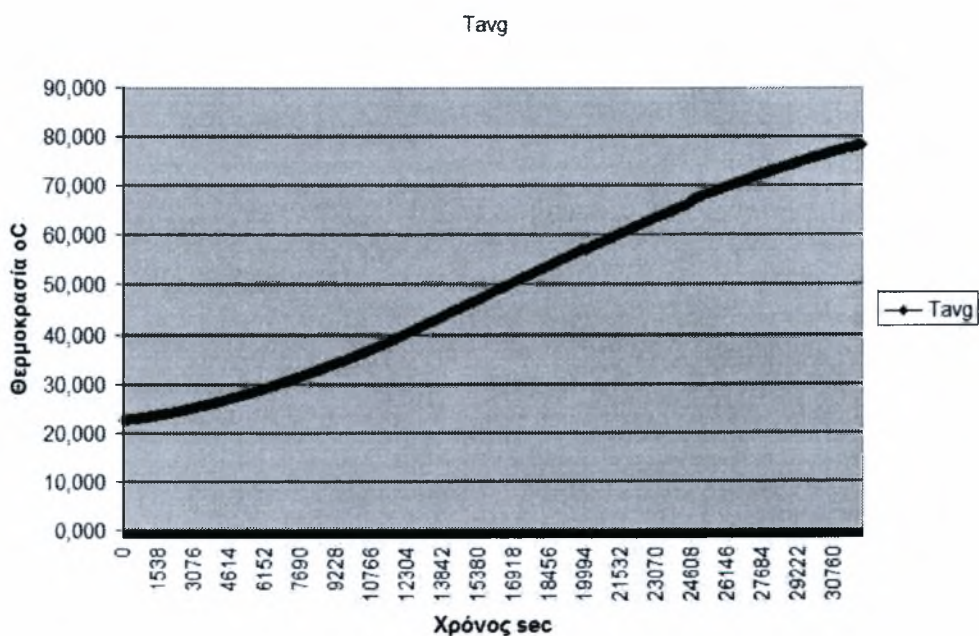
Εικόνα 4. 30. L=6D Πλάγια πίσω όψη

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ

Όλες οι μετρήσεις γίνονται με τον ρεοστάτη (variac) στα 240 V και την αεροσήραγα σε συχνότητα 10 Hz δηλαδή με ταχύτητα ίση με 2,86 m/sec.

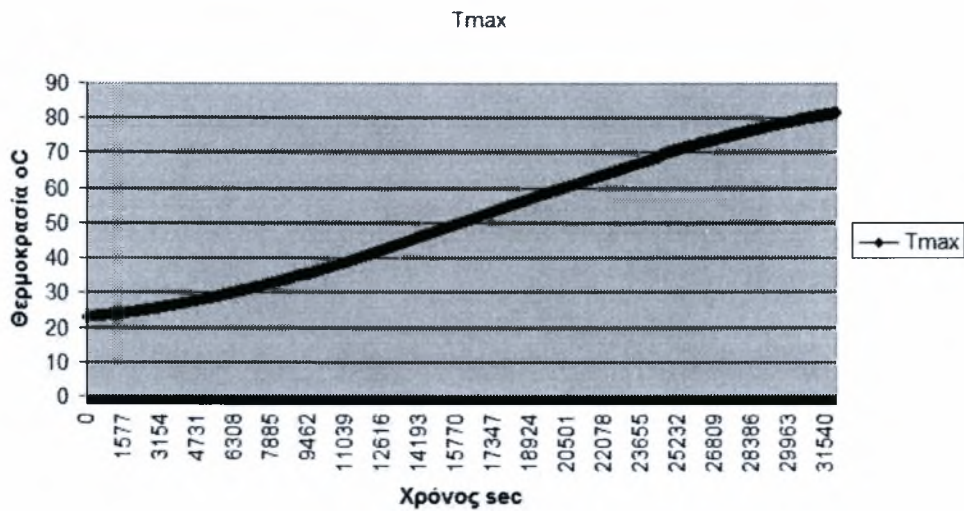
1. Για $L=0$

Για $L=0$ η μετάδοση της θερμότητας από τον ανάντη κύλινδρο στον κατόντη πραγματοποιείται με γρήγορους ρυθμούς και σχεδόν επιτυγχάνεται στον συγκεκριμένο χρόνο μέτρησης σταθερή θερμοκρασία περίπου στους 80°C . Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο (sec) είναι:



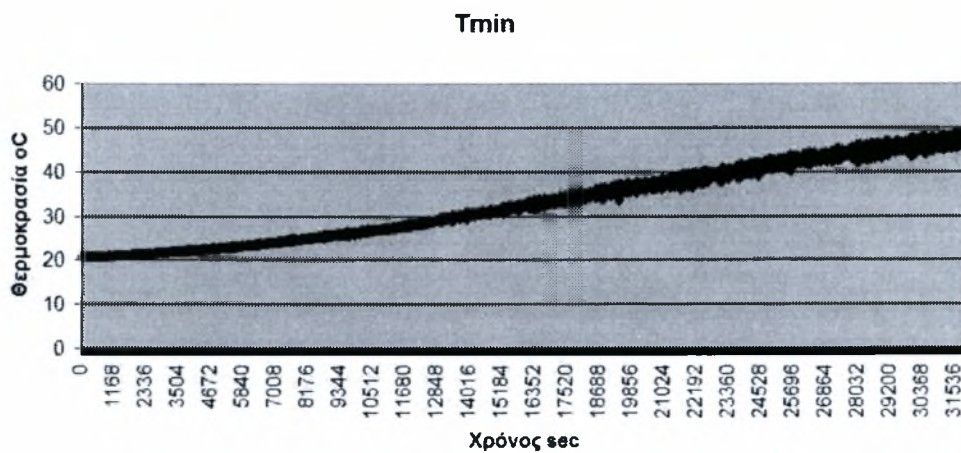
Γράφημα 4. 1. $L=0$, Tavg

Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 2. L=0, Tmax

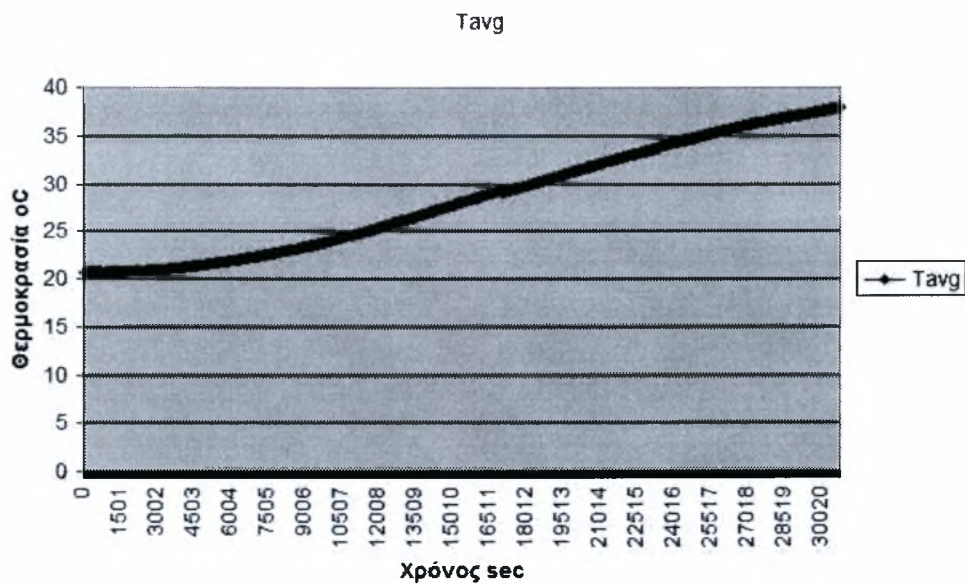
Η γραφική παράσταση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 3. L=0, Tmin

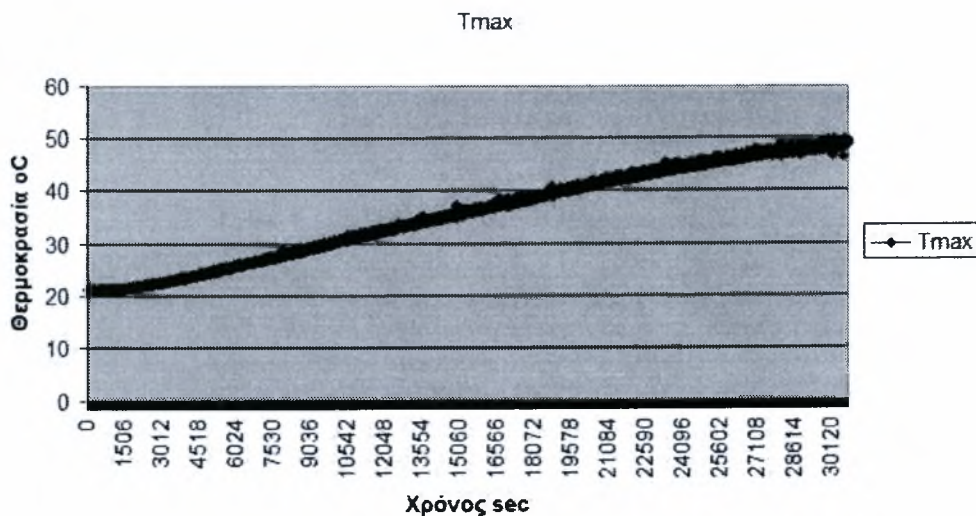
2. Για $L=1D$

Για $L=1D$ ο ρυθμός της μετάδοσης θερμότητας από τον ανάντη κύλινδρο στον κατόντη είναι βραδύτερος σε σχέση με τη περίπτωση $L=0$ και σχεδόν επιτυγχάνεται στον συγκεκριμένο χρόνο μέτρησης σταθερή θερμοκρασία περίπου στους 48°C . Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



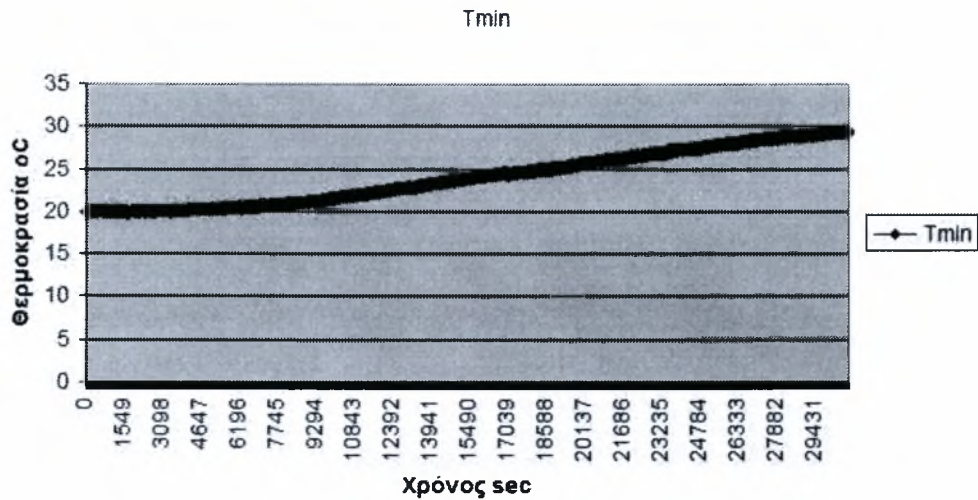
Γράφημα 4. 4. $L=1D$, T_{avg}

Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 5. $L=1D$, T_{max}

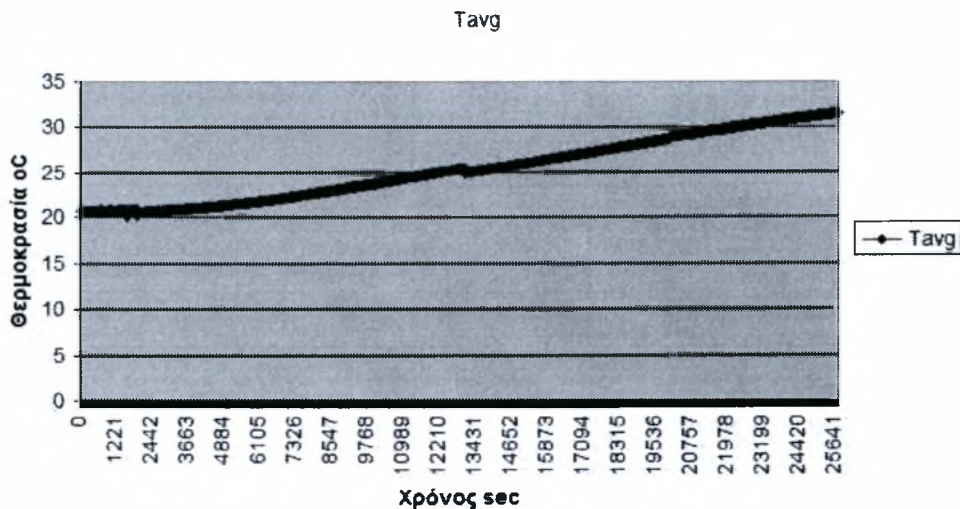
Η γραφική παράσταση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 6. L=1D, Tmin

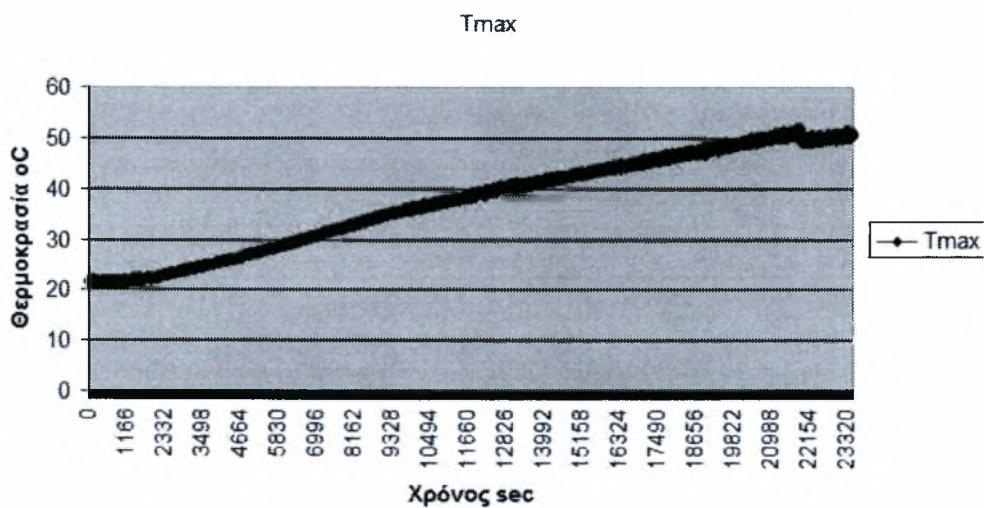
3. Για L=2D

Για L=2D ο ρυθμός της μετάδοσης θερμότητας από τον ανάντη κύλινδρο στον κατόντη είναι αρκετά πιο αργός σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



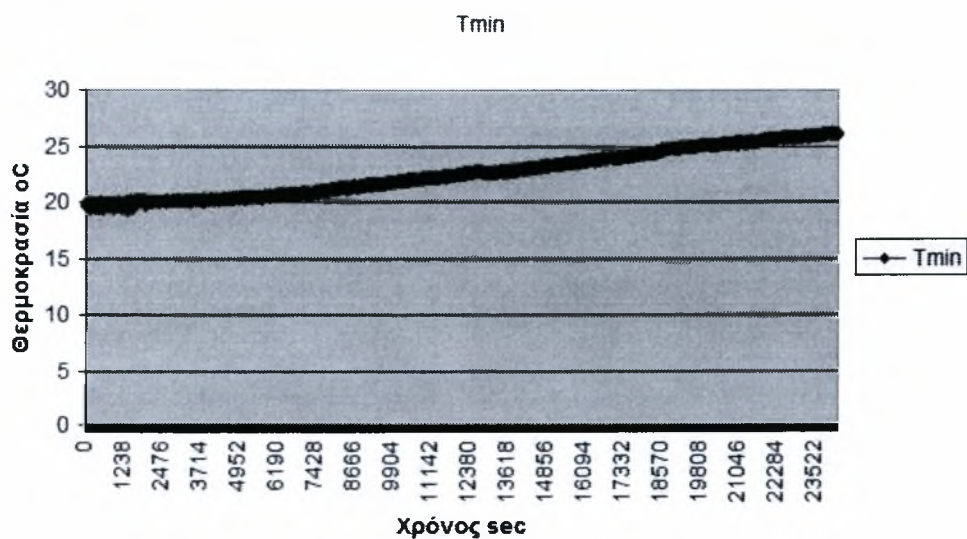
Γράφημα 4. 7. L=2D, Tavg

Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 8. L=2D, Tmax

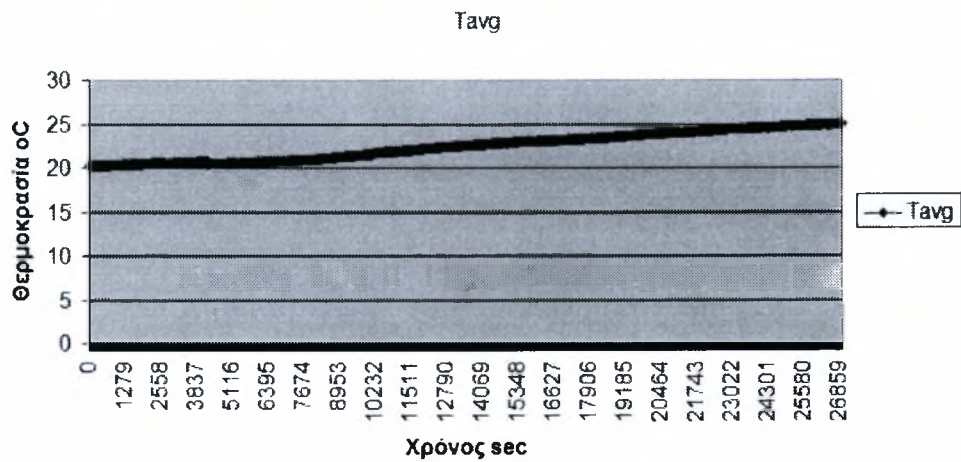
Η γραφική παράσταση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 9. L=2D, Tmin

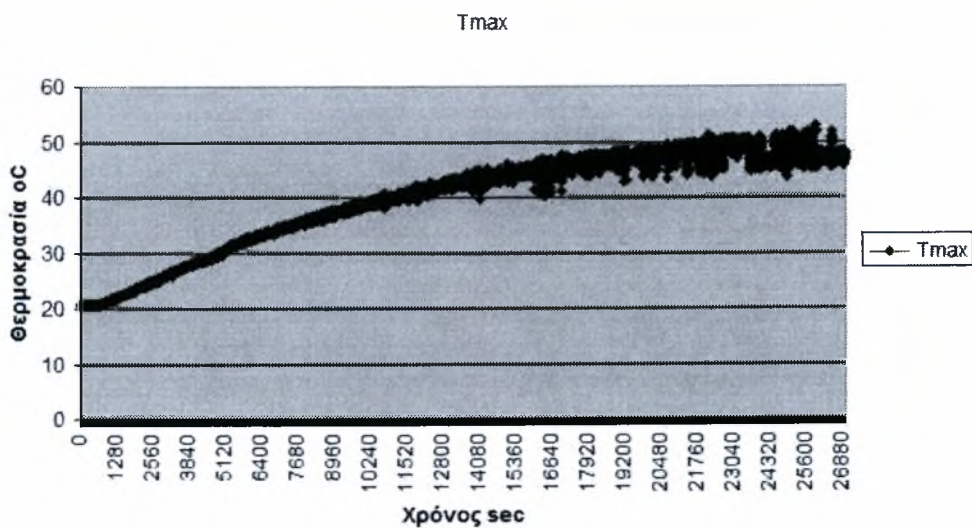
4. Για L=3D

Για L=3D ο ρυθμός της μετάδοσης θερμότητας από τον ανάντη κύλινδρο στον κατόντη είναι αρκετά αργός. Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



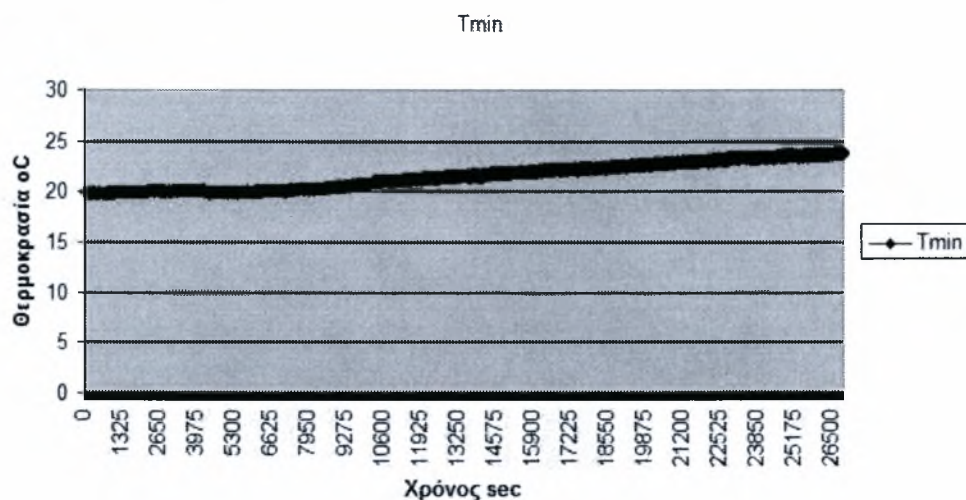
Γράφημα 4. 10. L=3D, Tavg

Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 11. L=3D, Tmax

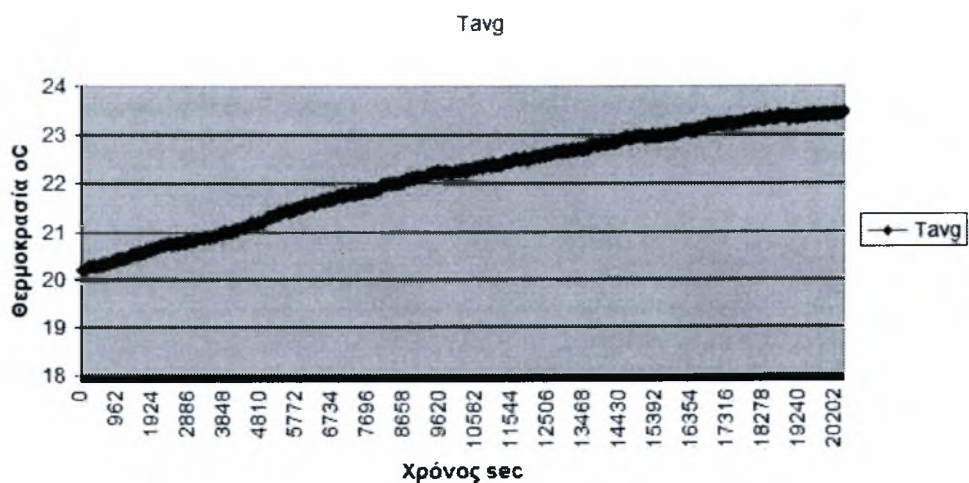
Η γραφική παράσταση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 12. L=3D, T_{min}

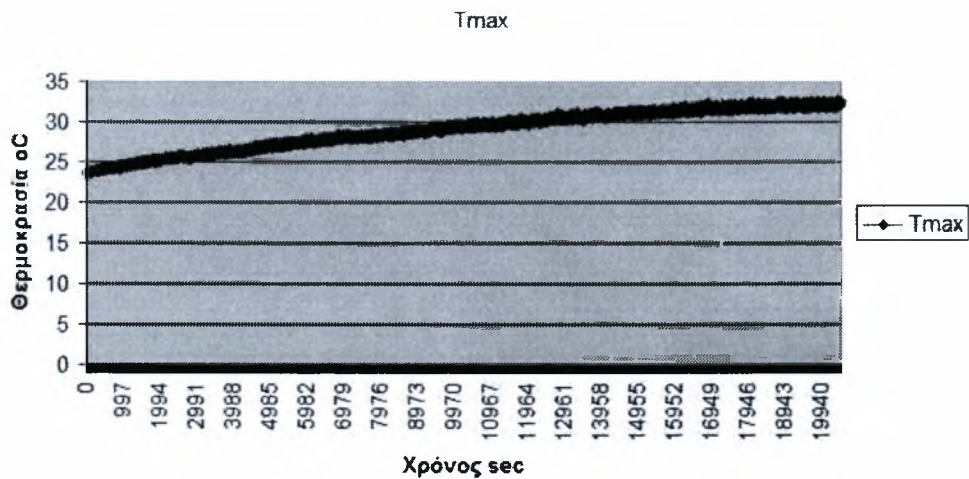
5. Για L=4D

Για L=4D η μετάδοση της θερμότητας από τον ανάντη κύλινδρο στον κατόντη πραγματοποιείται με πολύ βραδείς ρυθμούς. Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



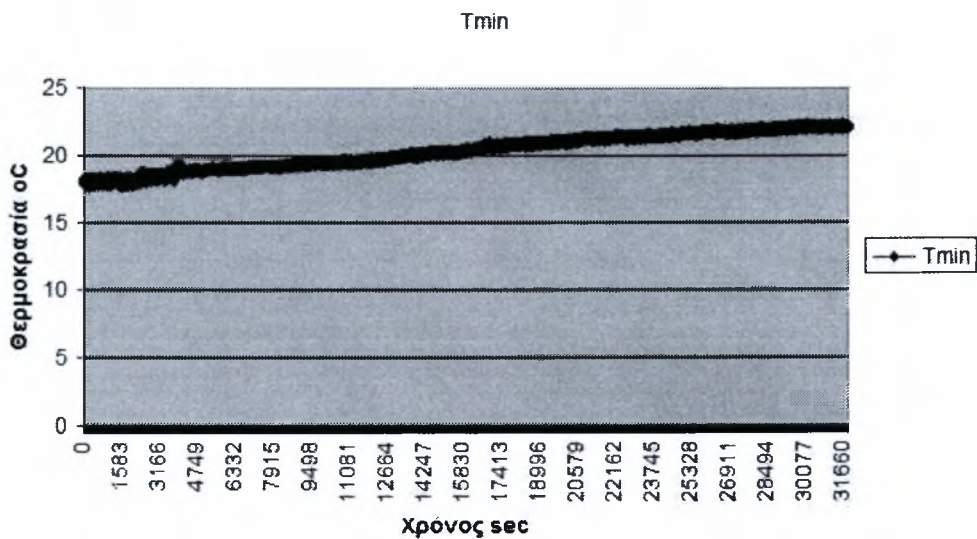
Γράφημα 4. 13. L=4D, T_{avg}

Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 14. L=4D, Tmax

Η γραφική παράσταση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:

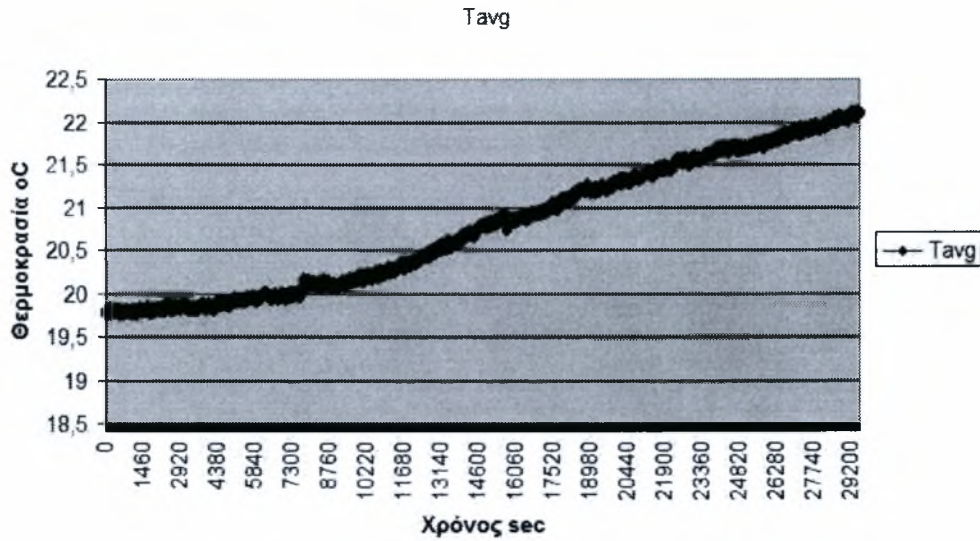


Γράφημα 4. 15. L=4D, Tmin

6. Για L=4D με επίπεδη πλάκα ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους

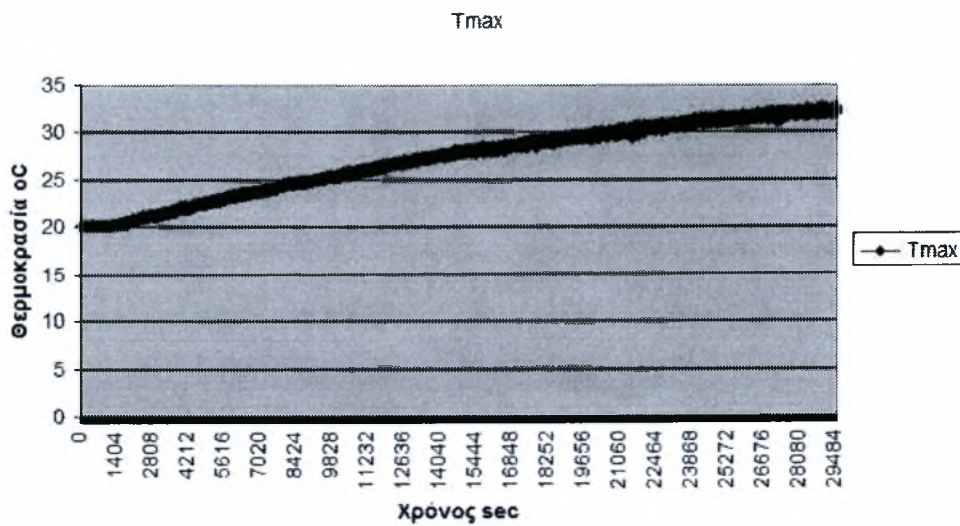
Για L=4D με επίπεδη πλάκα ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους η μετάδοση της θερμότητας από τον ανάντη κύλινδρο στον κατόντη πραγματοποιείται με πολύ βραδείς ρυθμούς με πολύ

μικρές διαφορές σε σχέση με την περίπτωση για $L=4D$ χωρίς επίπεδη πλάκα. Η γραφική παράσταση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



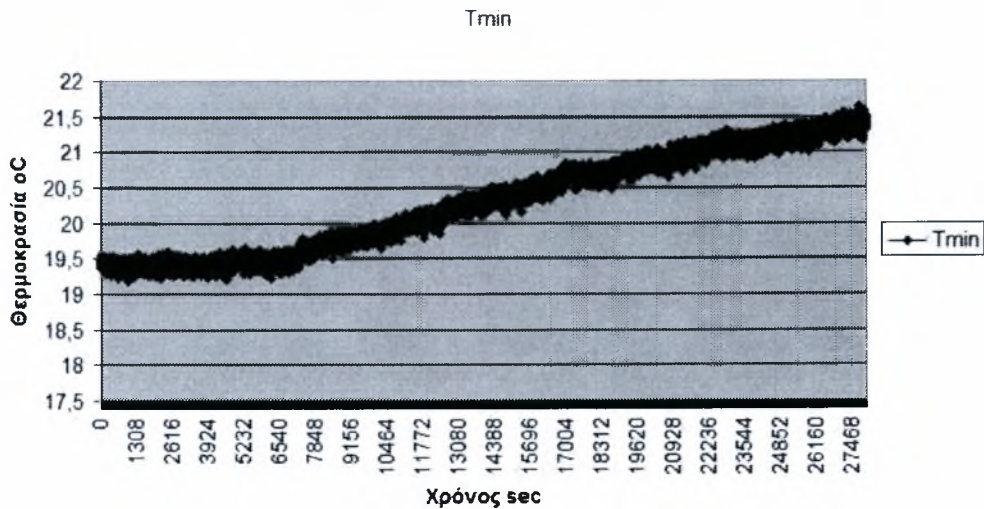
Γράφημα 4. 16. $L=4D$, T_{avg} με ενδιάμεση πλάκα

Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



Γράφημα 4. 17. $L=4D$, T_{max} με ενδιάμεση πλάκα

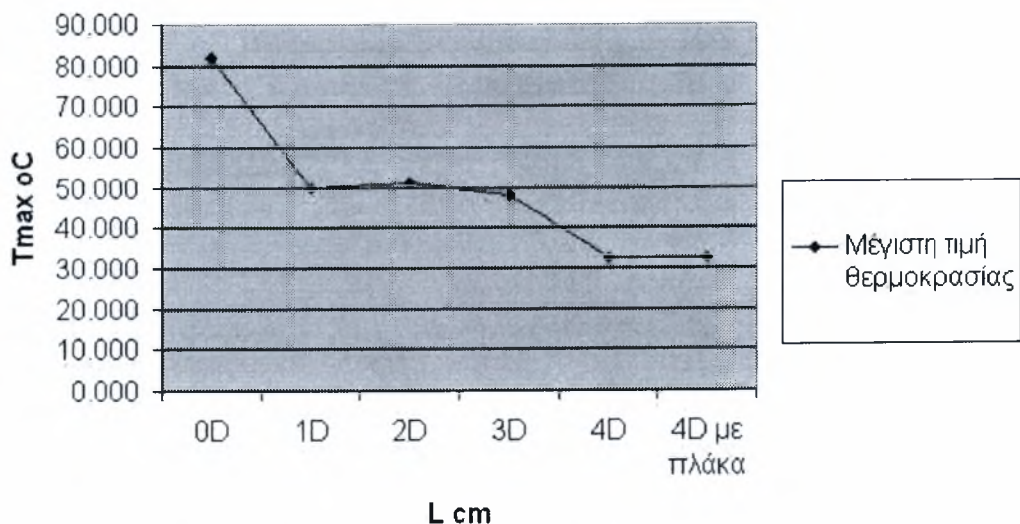
Η γραφική παράσταση της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο σε sec είναι:



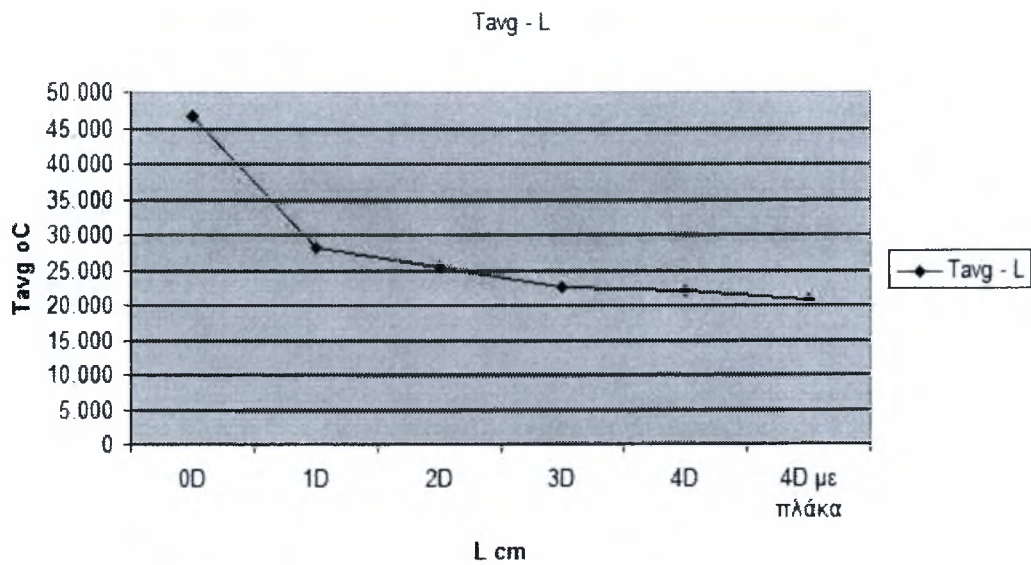
Γράφημα 4. 18. $L=4D$, T_{min} με ενδιάμεση πλάκα

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται πως επηρεάζει η απόσταση L , ανάμεσα στον ανάντη και στον κατόντη κύλινδρο, την μέγιστη, μεση και ελάχιστη θερμοκρασία του κατόντη κυλίνδρου στα παραπάνω πειράματα.

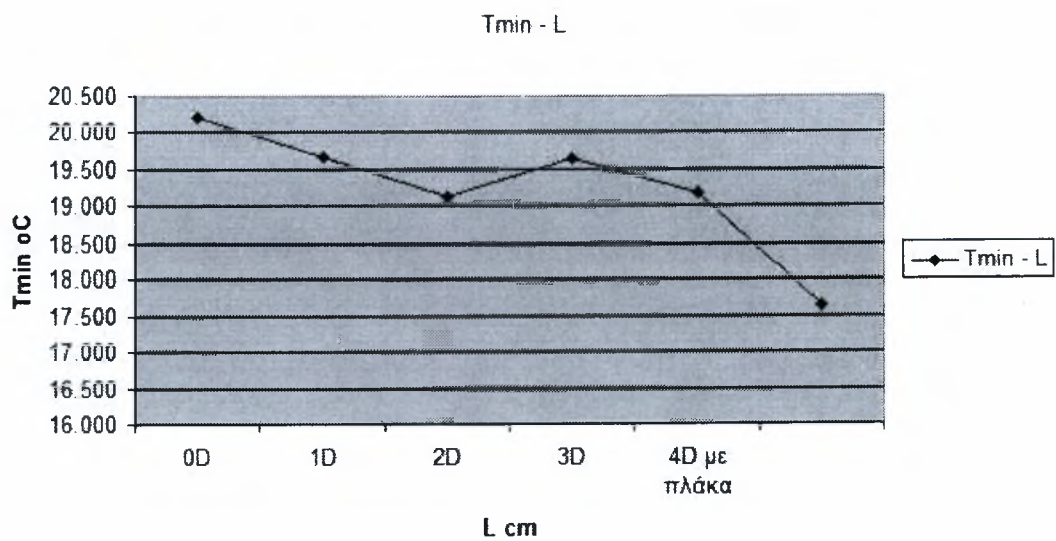
$T_{max} - L$



Γράφημα 4. 19. Μέγιστη θερμοκρασία σε σχέση με την απόσταση L



Γράφημα 4. 20. Μέση θερμοκρασία σε σχέση με την απόσταση L



Γράφημα 4. 21. Ελάχιστη θερμοκρασία σε σχέση με την απόσταση L

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το πείραμα της οπτικοποίησης της ροής γύρω από δύο τετραγωνικούς κυλίνδρους σε σειρά με την μέθοδο της απεικόνισης με καπνό καθώς και με την μέθοδο της οπτικοποίησης με νηματίδια υφάσματος είναι τα ακόλουθα :

Για $L = 0$ οι δύο κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα

Για $L = 1D$ και $L = 2D$ υπάρχει ανακυκλοφορία του αέρα ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους και παρατηρείται σχηματισμός δινών von Karman πίσω από τον κατάντη κύλινδρο.

Από $L = 3D$ μέχρι $L = 6D$ η ροή είναι αποκολλημένη, παρατηρείται περιοδικότητα και υπάρχουν δίνες von Karman πίσω και από τους δύο κυλίνδρους.

Άρα το κρίσιμο διάστημα πέρα από το οποίο οι δίνες von Karman και στους δύο κυλίνδρους είναι το $L = 3D$.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το πείραμα της υπέρυθρης θερμογραφίας σε δύο τετραγωνικούς κυλίνδρους σε σειρά είναι τα ακόλουθα :

Όσο πιο κοντά τόσο είναι οι δύο κύλινδροι τόσο πιο γρήγορα θερμαίνεται ο κατάντη κύλινδρος.

Για $L = 0$ και $L = 1D$ ο χρόνος που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη θερμοκρασία ο κατάντη κύλινδρος είναι περίπου μισή ώρα και για τις δύο περιπτώσεις.

Από $L = 2D$ μέχρι $L = 4D$ ο χρόνος που απαιτείται αυξάνεται κατά πολύ, ανάλογα φυσικά και με την απόσταση της κάθε θέσης.

Τέλος για $L = 4D$ με πλάκα ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους οι διαφορές που παρατηρούνται στα θερμοκρασιακά μοντέλα σε σχέση με αυτά για την θέση $L = 4D$ χωρίς όμως την πλάκα, είναι πολύ μικρές και όχι άξιες αναφοράς.

Οι δίνες von Karman με τη μεταβολή του L/D δεν επηρεάζουν την μετάδοση θερμότητας από τον ανάντη στο κατάντη κύλινδρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Antonia R.A., Zhou Y. & Matsamura M., "Spectral characteristics of momentum and heat transfer in the turbulent wake of a circular cylinder", *Exp. Thermal Fluid Sci.* 6.371-375, 1993
- [2] Zhou Y., Zhang H.J. & Yiu M.W., "The turbulent wake of two side by side circular cylinders", 2002
- [3] Zouravkovich M.M., Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements *Trans ASME J.Fluids* , 94,618-633, 1977
- [4] Zouravkovich M.M., "The effects of the interference between circular cylinder in cross flow", *J.Fluids.* 1, 239-261, 1987
- [5] Igarashi T., "Characteristics of the flow around two cylinders arranged in tandem", 1st Report *Bull ISME, B 24*, 323-331, 1981
- [6] Ohya Y., Okajima A, and HAYASHI M., "Wake interference and vortex shedding", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, vol.5=8 chap 10, Gulph pp 322-389, 1989
- [7] Mahir N & Rockwell D., "Vortex formation from a forced system of two cylinders". Part 1.: Tandem arrangement *J. Fluid Struct.* 10, 473-489, 1996
- [8] Okajima, A., "Strouhal numbers of rectangular cylinders", *J. Fluid Mech.*, vol.123 pp 379-398, 1989
- [9] Davis R.W., Moore E.F., "A numerical study of vortex shedding from rectangles", *J. Fluid Mech.*, vol.116 pp 475-506, 1982
- [10] Davis R.W., Moore E.F., Purtley L.P., "A Numerical Experimental study of confined flow around rectangular cylinders". *Phys. Fluids* vol.27 no.1 pp 46-59, 1984
- [11] Mukhopadhyay A. Buwas G., Sundarajan T, "Numerical investigation of confined wakes behind a square cylinder in a channel", *Int. J. Numer, Meth. Fluids*, Vol.14, pp 1473-1484,1992

- [12] Suzuki H. Inove Y., Nishimura T., Fukutani K. and Suzuki K., "Unsteady Flow in a channel obstructed by a square rod (crisscross motion of vortex)", *Int. J. Heat Fluid Flow* vol. 14, No.1, pp 2-9, 1973
- [13] Breuer M., Bernsdoff J., Zeiser T. and Durst F., "Accurate computations of the lamineur flow past a square cylinder based on two different methods: lattice Boltzmann and finite-volume", *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol.21, pp 186-196, 2000
- [14] Kelkar K. M. and Patanskar S.V., "Numerical prediction of vortex shedding behind a square cylinder", *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol.14, no 1, pp 327-341, 1992
- [15] Suzuki K. and Suzuki H., "Unsteady heat transfer in a channel obstructed by an immersed body", *Annu. Rev. Heat Transfer* vol.5, pp 174-206, 1994
- [16] Sakamoto H. Hanio and Obatu V., "Fluctuating forces acting on two square prisms in a tandem arrangement", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 26,85, 1987
- [17] Luo S.C. and Jeng J.C. "Aerodynamic forces on a square section cylinder", *Aeronaut J.* 94,203, 1990
- [18] Liu C.H and Chen J.M. "Observation of hysteresis in flow around two square cylinders in a tandem arrangement", *J.Wind Eng. Ind. Aerolyn.* 90.1019, 2002
- [19] Inove O., Mori M., Hatakeyama N., "Aeolian tones radiated from flow past two square cylinders in tandem", Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2006
- [20] Kim M.K., Kim D. K. Yoon S.H. and Loe D.H., "Measurements of the flow fields around two square cylinders in a tandem arrangement", Institute of Mechanical Engineering Technology, 2007
- [21] Ji T. H., Kim S. Y. and Hyun J. M., "Heat dissipation from a heated square cylinder in oscillating channel flow", Thermal/Flow Research Center, 2007
- [22] Williamson C. H. K., "Vortex dynamics in the cylinder wake", *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, vol.28, pp. 477-539, 1996

[23] Haslam F. Lt., "Wool tufts : A direct method of visually discriminating between steady and turbulent flow over the wing surfaces of aircraft in flight" Rep. Mem. Aeronaut. Res. Council. 1209, 1928

[24] Gough M. N. and Johnson E., "Methods of visually determining the air flow around airplanes ", NACA Tech. Note 425, July 1932

[25] Clark K. W., "Methods of visualizing air flow", Rep. Mem. Aeronaut Res. Council. 1552, May 1932

[26] Zhou Y. and Yiu M. W., "Flow structure, momentum and heat transport in a two tandem cylinder wake", Dep. Of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, 2005

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΑΜΕΡΑ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ, THERMACAM P45

The global leader in infrared cameras

ThermaCAM™ P45

High performance portable infrared camera

- IMAGING PERFORMANCE
- IMAGE PRESENTATION
- MEASUREMENT
- IMAGE STORAGE
- LENSES (OPTIONAL)
- SYSTEM STATUS INDICATOR
- BATTERY SYSTEM
- ENVIRONMENTAL SPECIFICATION
- PHYSICAL CHARACTERISTICS
- INTERFACES
- Laser LocatIR

IMAGING PERFORMANCE

Field of view/min focus distance	24°x18° /0.3 m (with 35 mm lens)
Spatial resolution (IFOV)	1.3 mrad
Thermal sensitivity	0.08°C at 30°C
Image frequency	50/60 Hz non-interlaced
Focus	Automatic or manual
Electronic zoom function	2.4 interpolating
Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5 to 13µm
Digital image enhancement	Standard

IMAGE PRESENTATION

Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video and S- video
Viewfinder	Built-in, high-resolution color LCD (TFT)
External display	4" LCD with integrated remote control (optional)

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

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

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

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073858



