

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΓΙΑΣ.

749  
υ/χ

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Εργαστήριο Μετρήσεων Τεχνικών Μεγεθών

Κατασκευή συστήματος οπτικοποίησης ροής με χρήση λευκού καπνού και χρήση του στην απεικόνιση της ροής γύρω από σχήματα και αεροτομές συγκεκριμένης γεωμετρίας



Πτυχιακή εργασία: Αντι Α. Μπερμπέρι

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ι. Λεκάκης

## **Ευχαριστίες**

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία είχε αρκετά εμπόδια μέχρι να υλοποιηθεί και να γίνει πραγματικότητα και για να τα ξεπεράσω με βοήθησαν αρκετά άτομα που θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Πρώτα από όλα ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ι. Λεκάκη που μου εμπιστεύτηκε αυτή την πτυχιακή εργασία και για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκειά της.

Ευχαριστώ επίσης τον εργαστηριακό συνεργάτη κ. Θ. Παπαδόπουλο για την ουσιαστική βοήθεια του σε πολλά σημεία της κατασκευής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου προσέφεραν σε όλη την διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας.

Στην Οικογένεια μου

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	3
Περίληψη .....	4
Summary .....	5
Εισαγωγή .....	6
1.Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	7
1.1 Τροχιές.....	7
1.2 Ινώδεις φλέβες .....	8
1.3 Ροϊκές γραμμές .....	9
1.4 Γραμμές καπνού .....	10
2 Επιλογή του συστήματος οπτικοποίησης με θερμαινόμενο σύρμα .....	12
3 Περιγραφή του συστήματος οπτικοποίησης ροής με καπνό εκλυόμενο από θερμαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση (smoke wire).....	14
Αρχή λειτουργίας.....	14
3.1 Κύρια εξαρτήματα του συστήματος .....	15
3.1.1 Η βάση .....	15
3.1.2Το θερμαινόμενο σύρμα .....	17
3.1.3 Το τροφοδοτικό .....	17
3.1.4 Η τροφοδοσία ελαίου .....	21
4 Συσκευή οπτικοποίησης .....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
4.1 Κατασκευή φορητής αεροσήραγγας χαμηλών ταχυτήτων .....	23
5 Εφαρμογές μελέτης της ροής γύρω από αντικείμενα διαφορετικής γεωμετρίας.....	28
6 Συμπεράσματα και προτάσεις για βελτιώσεις του συστήματος. ....	35
Βιβλιογραφία .....	36

## Περίληψη

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την κατασκευή ενός συστήματος οπτικοποίησης της ροής γύρω από σώματα διαφορετικών γεωμετριών όπως οι αεροτομές, με τη χρήση καπνού. Κατά το χρόνο που χρειάστηκε να υλοποιηθεί η διπλωματική εργασία έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση και σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή κ Λεκάκη και τον εργαστηριακό βοηθό κ Παπαδόπουλο οδήγησε στην επιλογή της διάταξης παραγωγής καπναερίων για τις ανάγκες του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η διάταξη καπνού με τη μέθοδο του θερμού νήματος (smoke wire). Η διάταξη αποτελείται από ένα χρωμιονικελιούχο σύρμα που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παρέχεται μέσω κατάλληλου τροφοδοτικού. Ο καπνός δημιουργείται από την καύση λαδιού που ρέει με σταθερή παροχή στη θερμή επιφάνεια του σύρματος. Έγιναν σειρά δοκιμών για τη βελτιστοποίηση του παραγόμενου καπνού για διάφορες ταχύτητες ροής στην περιοχή τιμών που δημιουργούνται στις εγκαταστάσεις αεροσηρράγων του εργαστηρίου ώστε τελικά να προστεθεί στον υφιστάμενο εργαστηριακό εξοπλισμό και να είναι δυνατή η χρήση του σε πειραματικές διατάξεις στο μέλλον.

## Summary

This thesis deals with the construction of a system of flow visualization of bodies of different geometry such as airfoils, using smoke technique. Literature review was made in order to adopt the best system that in collaboration with the supervisor Prof Lekaki and laboratory assistant Mr Papadopoulos is ideal for the needs of the laboratory. Specifically we chose a device that produces smoke with a hot wire (smoke wire). The device consists of a chrome nickel wire carrying electric current provided by a suitable power supply. The smoke was produced from the burning oil flowing at a constant flow rate over the hot wire. A series of tests were made to optimize the parameters of smoke production such for the flow velocities in the range to be used in experiments to be performed in the wind tunnel facilities.



## Εισαγωγή

Για τη μελέτη του πεδίου ροής γύρω από σώματα βυθισμένα στο πεδίο ροής, όπως αεροτομές σε αεροδυναμικές σήραγγες, χρειάζεται μεταξύ άλλων και η οπτικοποίηση της ροής. Για την οπτικοποίηση της ροής σε αεροσήραγγες υπάρχουν διάφορες τεχνικές στη διεθνή βιβλιογραφία. Μια από τις περισσότερο συνήθεις τεχνικές οπτικοποίησης χρησιμοποιεί τον καπνό για οπτικό μέσο.

Στην παρούσα πτυχιική εργασία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα σύστημα οπτικοποίησης της ροής με καπνό για τη χρήση του Εργαστηρίου Μετρήσεων Τεχνικών Μεγεθών. Επιπλέον, κατασκευάστηκε μια μικρή πλήρως λειτουργική καπνοσήραγα για την ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής καπνού με θερμαινόμενο σύρμα και την βελτιστοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας του, καθώς και για εκπαιδευτικούς λόγους επίδειξης της τεχνικής αυτής.

Η συσκευή αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους υποσυστήματα:

Τη βάση

Το θερμαινόμενο σύρμα

Το τροφοδοτικό ρεύματος

Την αντλία ελαίου

Τους ανεμιστήρες

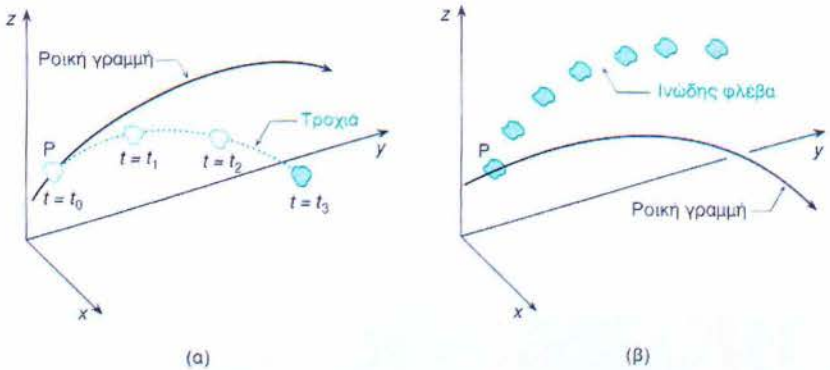
Όλα τα παραπάνω υποσυστήματα και εξαρτήματα συνεργάζονται μεταξύ τους αποτελεσματικά σύμφωνα με τις προδιαγραφές των πειραμάτων, δηλαδή ο καπνός να μην επηρεάζει τη ροή γύρω από την επιφάνεια τους εξεταζομένου αντικειμένου που βρίσκεται στο θάλαμο δοκιμών και τη λήψη φωτογραφιών και βίντεο μεγάλης ευκρίνειας.

## 1.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

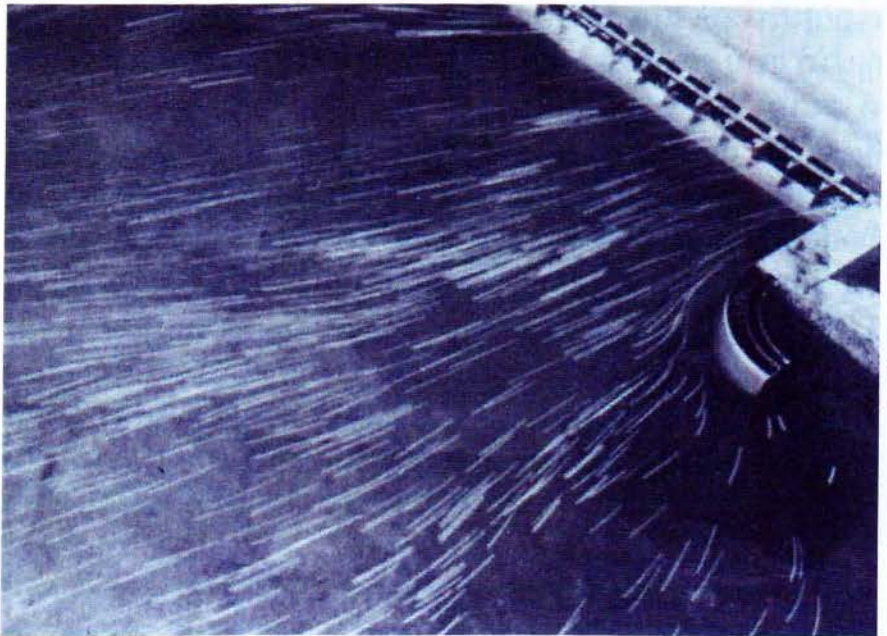
Τα πεδία ροής όπως απεικονίζονται στις φωτογραφίες από τεχνικές οπτικοποίησης και η ευκρίνειά τους ποικίλουν ανάλογα με το είδος της ροής, για παράδειγμα αν είναι στρωτή ή τυρβώδης καθώς και από την τεχνική της οπτικοποίησης της ροής.

### 1.1 Τροχιές

Τροχιά ονομάζεται η διαδρομή την οποία ακολουθεί ένα συγκεκριμένο σωματίδιο του ρευστού καθώς αυτό κινείται μέσα στο πεδίο ροής, για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Στο σχήμα 1 εικονίζεται η τροχιά ενός σωματιδίου το οποίο τη χρονική στιγμή  $t = t_0$  βρισκόταν στο σημείο P του χώρου. Για την πειραματική εύρεση μιας τροχιάς πρέπει, πρώτα, να ταυτοποιήσουμε (π.χ. χρωματίζοντας το) το σωματίδιο του ρευστού την κίνηση του οποίου επιθυμούμε να παρακολουθήσουμε. Στη συνέχεια «αποτυπώνουμε» (π.χ. με διαδοχικές φωτογραφήσεις ή κινηματογράφηση) την κίνηση του σωματιδίου αυτού στο χώρο σε διάφορες χρονικές στιγμές. Από τα διάφορα «στιγμιότυπα» του πεδίου ροής εντοπίζουμε τις θέσεις του με μια συνεχή γραμμή. Αυτή η γραμμή αποτελεί την τροχιά του σωματιδίου για το θεωρούμενο χρονικό διάστημα. Στην πράξη, για την εύρεση των τροχιών χρησιμοποιούνται αιωρούμενα σωματίδια τα οποία ανακλούν ικανοποιητικά το φως και φροντίζουμε να φωτίζεται έντονα το πεδίο ροής. Τα φωτιζόμενα σωματίδια παρασύρονται από το κινούμενο ρευστό διαγράφοντας μέσα στο πεδίο ροής ένα πλήθος τροχιών η «αποτύπωση» των οποίων γίνεται με τις τεχνικές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στο σχήμα 2 εικονίζεται παραστατικά η ροή του ρευστού σε μια πειραματική διάταξη προσομοίωσης ενός υπερχειλιστήρα φράγματος. Οι φωτεινές γραμμές παράγονται από τα κινούμενα σωματίδια και αποτελούν τμήματα των τροχιών τους.



Σχήμα 1 Γραφική απεικόνιση (α) τροχιάς και (β) ινώδους φλέβας



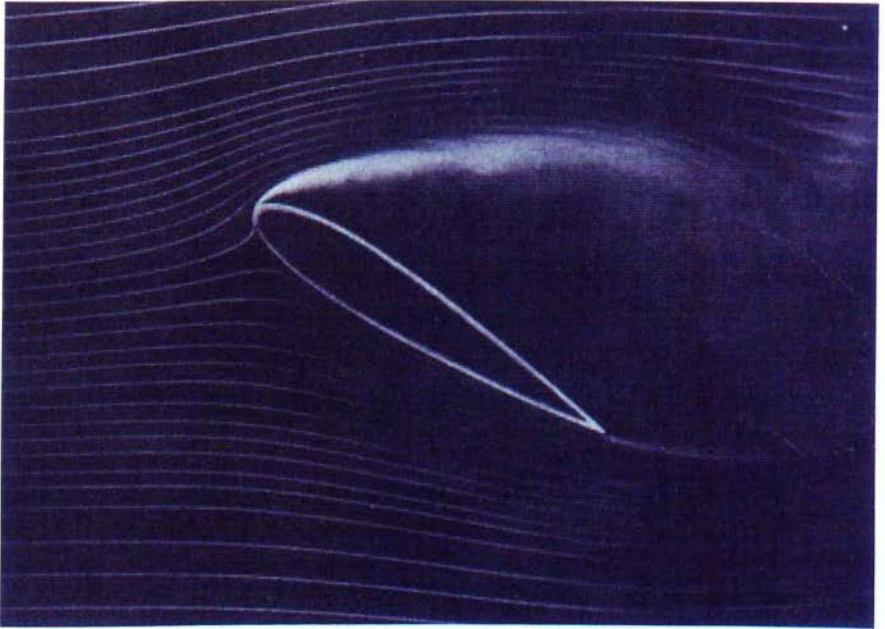
Σχήμα 2 Τροχιές αιρούμενων σωματιδίων σε ροή πάνω από έναν υπερχειλιστήρα φράγματος.

## 1.2 Ινώδεις φλέβες

Ινώδης φλέβα ονομάζεται μια νοητή γραμμή πάνω στην οποία βρίσκεται το σύνολο των σωματιδίων του ρευστού τα όποια πέρασαν, πριν από μια δεδομένη χρονική στιγμή  $t$ , από ένα ορισμένο σημείο του πεδίου ροής. Στο σχήμα 1β εικονίζεται η ινώδης φλέβα των σωματιδίων του ρευστού τα όποια πέρασαν από το σημείο P του χώρου στο χρονικό διάστημα από  $t = t_0$  μέχρι  $t = t$ . Για να αναπτύξουμε πειραματικά μια ινώδη φλέβα, εισάγουμε σε ένα προκαθορισμένο σημείο του πεδίου ροής ένα λεπτό σωλήνα και διοχετεύουμε, μέσα από αυτόν, μια χρωστική ουσία. Τα σωματίδια της χρωστικής ουσίας, καθώς παρασύρονται από το



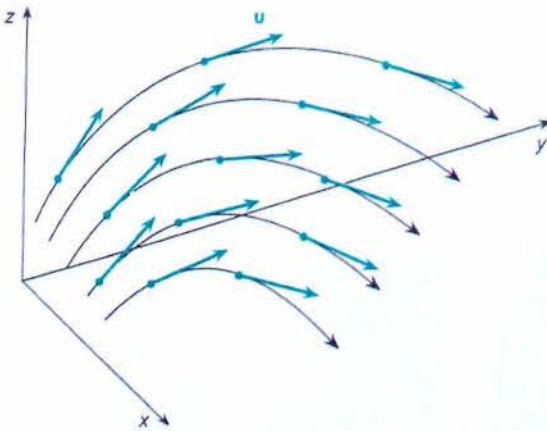
κινούμενο ρευστό, σχηματίζουν μέσα στο πεδίο ροής μια νηματοειδή φλέβα χρωματισμένου υγρού. Εφόσον δεν παρατηρείται σημαντική διάχυση ή ανάμειξη της χρωστικής ουσίας με το κινούμενο ρευστό, η παραπάνω χρωματισμένη φλέβα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί την ινώδη φλέβα των σωματιδίων του ρευστού τα όποια πέρασαν από το σημείο έγχυσης της ουσίας όσο χρόνο συνεχιζόταν η διοχέτευσή της στο πεδίο ροής. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται παραστατικά η ροή αέρα γύρω από μια αεροτομή πτέρυγας αεροπλάνου. Οι φωτεινές γραμμές παριστάνουν ινώδεις φλέβες οι όποιες παράγονται με διοχέτευση καπνού σε διάφορα σημεία του πεδίου ροής.



Σχήμα 3 Ινώδεις φλέβες καπνού σε ροή αέρα γύρω από μια αεροτομή πτέρυγας αεροπλάνου.

### 1.3 Ροϊκές γραμμές

Ροϊκή γραμμή ενός πεδίου ροής ονομάζεται κάθε γραμμή η οποία έχει την ιδιότητα η επαπτόμενη σε κάθε σημείο της να συμπίπτει με τη διεύθυνση της ταχύτητας του ρευστού σε εκείνο το σημείο, μια δεδομένη χρονική στιγμή  $t$ . Στο σχήμα 4 εικονίζεται ένας αριθμός ροϊκών γραμμών και τα ανύσματα της ταχύτητας μερικών σωματιδίων τα όποια βρίσκονται πάνω σε αυτές. Οι ροϊκές γραμμές είναι ανάλογες προς τις δυναμικές γραμμές των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων. Αντίθετα προς τις τροχιές και τις ινώδεις φλέβες οι οποίες είναι γραμμές που αναπτύσσονται με την πάροδο του χρόνου, οι ροϊκές γραμμές είναι «στιγμιαίες» γραμμές. Δηλαδή το σχεδιαγράφημα ενός πεδίου ροής με ροϊκές γραμμές δίνει τη μορφή της ροής σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

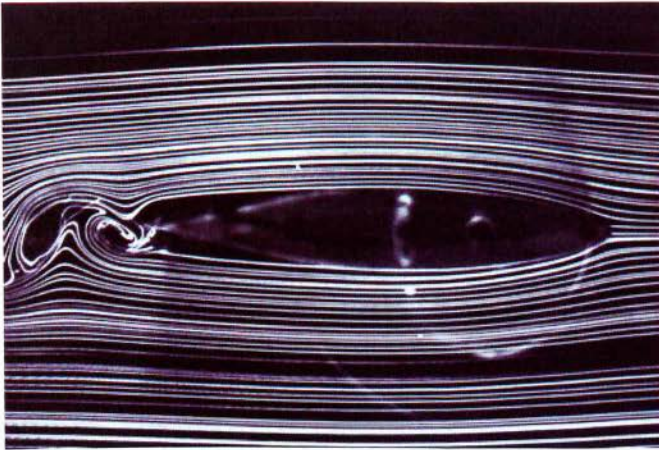


Σχήμα 4 Τυπικές Ροϊκές γραμμές

## 1.4 Γραμμές καπνού

Η τεχνική της οπτικοποίησης των πεδίων ροής του αέρα μέσω καπνού έχει, ως βασική αρχή, ίδια με την οπτικοποίηση του πεδίου ροής ενός αντικειμένου που βρίσκεται μέσα σε υγρό και εγχέεται χρωστική ουσία. Παρόλο που η εφαρμογή της δεν περιορίζεται στις αεροσήραγγες, η οπτικοποίηση μέσω καπνού είναι ένα πολύ χρήσιμο πειραματικό εργαλείο για αυτές τις εγκαταστάσεις, καθώς και η τεχνολογική πρόοδος της τεχνικής αυτής είναι στενά συνδεδεμένη με την ιστορία των αεροδυναμικών σηράγγων. Ο όρος καπνός δεν είναι καλά καθορισμένος, και εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ευρεία έννοια και δεν περιορίζεται σε καύση προϊόντων, οπότε μπορεί να περιλαμβάνει επίσης τον ατμό και αεροζόλ. Οι ουσίες αυτές δεν μπορούν να εκπληρώσουν την απαίτηση ώστε να μην επιδρούν στην ροή δεδομένου ότι οι πυκνότητές τους είναι μεγαλύτερες από την πυκνότητα του αέρα. Οι προϋποθέσεις για το χρησιμοποιούμενο μέσο οπτικοποίησης είναι να μην επιδρά στη ροή του ρευστού, και να μην παρουσιάζει έντονα φαινόμενα διάχυσης. Οι βασικές τεχνικές παραγωγής καπνού είναι η καύση καπνού, ξύλου και άχρου και η εξάτμιση ορυκτών ελαίων, με αποτέλεσμα να παράγεται μια ομίχλη από την συμπίκνωση των ατμών που προκύπτουν από την καύση των διαφόρων χημικών ουσιών. Η παραγωγή και η χρήση του καπνού για οπτικοποίηση είναι περισσότερο μια τέχνη παρά μια τεχνολογία, και πολλά εργαστήρια έχουν αναπτύξει τις δικές τους τεχνικές και εξοπλισμό. Γεννήτριες καπνού είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, οι περισσότερες δεν είναι σχεδιασμένες για πειραματικά εργαστήρια, αλλά για κέντρα διασκέδασης (σύννεφα καπνού σε κέντρα διασκέδασης). Η πλειοψηφία των γεννητριών καπνού βασίζονται στην καύση υδρογονανθράκων και συγκεκριμένα κηροζίνης.

Μια γεννήτρια καπνού με κηροζίνη έχει μια θερμαινόμενη αντίσταση εκεί όπου γίνεται η καύση της κηροζίνης και στην συνέχεια παρασύρεται ο καπνός από τον αέρα σε μορφή ομίχλης. Για να σχηματιστούν και να απεικονιστούν γραμμές καπνού, σχήμα 5, ο καπνός εισάγεται στη ροή διαμέσου ενός σωλήνα που είναι προσανατολισμένος κάθετα στην κύρια ροή. Στα πειράματα που πραγματοποιούνται σε αεροσήραγγες προτιμώνται να εγχέεται ο καπνός πριν από το υπο μελέτη σώμα και μάλιστα σε περιοχές με επίπεδο τύρβης πολύ χαμηλό (ιδανική ροή).



Σχήμα 5 Γραμμές καπνού γύρω από μια αεροτομή σε στρωτή ροή μέσα σε αεροσύραγγα.



## 2 Επιλογή του συστήματος οπτικοποίησης με θερμαινόμενο σύρμα

Για την οπτικοποίηση της ροής εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ανάλογα με το προς μελέτη αντικείμενο ή εφαρμογή.

Σε υδροσήραγγες ως μέσο οπτικοποίησης χρησιμοποιείται το μελάνι που παρασύρεται από τη ροή σχηματίζοντας τις ροϊκές γραμμές γύρω από τη προς μελέτη γεωμετρία. Αντίθετα στις αεροσήραγγες το μέσο είναι ο καπνός που παράγεται από την καύση ελαίου, η οποία γίνεται είτε έξω από το θάλαμο δοκιμών (Smoke generator) και οδηγείται ο καπνός σε αυτόν, είτε απευθείας στο εσωτερικό του θαλάμου δοκιμών μέσω ενός θερμαινόμενου σύρματος (Smoke Wire). Στην πρώτη περίπτωση ο καπνός εξέρχεται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για τη μελέτη ροών υψηλών ταχυτήτων ιδιαίτερα δε στη μελέτη της ροής σε συγκεκριμένες περιοχές γύρω από ένα αντικείμενο. Η δεύτερη τεχνική ενδείκνυται για τη μελέτη της συνολικής ροής γύρω από μια γεωμετρική κατασκευή δεδομένου ότι παράγεται ένα φιλμ καπνού που περιβάλλει το προς μελέτη αντικείμενο.

Ακόμα και σήμερα, ο καπνός συνεχίζει να αποτελεί μια πολύτιμη τεχνική οπτικοποίησης της ροής διότι ο καπνός δεν έχει καμία επίδραση στην αεροδυναμική σήραγγα ή το αντικείμενο που εξετάζεται. Αυτό το σημαντικό χαρακτηριστικό του καπνού σε γενικές γραμμές έχει καταστήσει τις μεθόδους αυτές πολύ διαδομένες, **επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές μορφές αντικειμένων.**

**Ο παραγόμενος καπνός για να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά πρέπει να μην εμφανίζει φαινόμενα διάχυσης, διατηρώντας την αρχική του κατάσταση για αρκετό χρόνο έως ότου φτάσει στο αντικείμενο.** Οι γραμμές ροής του καπνού όσο περισσότερο παραμένουν σε ένα πυκνό ρεύμα, τόσο καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται.

Για να δημιουργηθεί καπνός με τα παραπάνω κριτήρια απαιτείται εκτεταμένη διερεύνηση του θέματος και αρκετές δοκιμές έως ότου βρεθεί ο κατάλληλος τρόπος. Πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του καπνού σε μια αεροδυναμική σήραγγα. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι η καύση φύλλων καπνού, σάπιου ξύλου, άχυρο και η καύση διαφόρων ελαίων και ορυκτελαίων. **Δοκιμές έχουν αποδείξει ότι η καύση των διαφόρων ελαίων παράγουν τα καλύτερα αποτελέσματα, αλλά υπάρχουν πολλά διαφορετικά έλαια και μείγματα υδρογονανθράκων που δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.** Το βέλτιστο είναι ένα άμεσα διαθέσιμο, φθινό έλαιο που εξατμίζεται στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία, δεν είναι εύφλεκτο, και παράγει γραμμές καπνού που φωτογραφίζονται εύκολα.



Μία δημοφιλής μέθοδος είναι το Smoke-generator δηλαδή ο καπνός παράγεται έξω από το θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας και στη συνέχεια οδηγείται στα επιθυμητά σημεία του αντικειμένου με μια κατάλληλη διάταξη σωλήνων. Η μέθοδος αυτή έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όμως πρέπει να αναζητηθεί μια καλύτερη μέθοδος και αυτή κρύβεται στην απλούστευση αυτής της μεθόδου και η οποία είναι η παραγωγή του καπνού στο θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας με τη βοήθεια θερμαινόμενου νήματος Smoke-wire.

### 3 Περιγραφή του συστήματος οπτικοποίησης ροής με καπνό εκλυόμενο από θερμαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση (smoke wire).

#### Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία της συσκευής όπως έχει περιγραφεί και παραπάνω, βασίζεται, σύμφωνα με επιστημονικά άρθρα στο χρωμιονικελιούχο σύρμα με μορφή πηνίου. Η καλύτερη τάση για να θερμανθεί το σύρμα ανάλογα και με την ταχύτητα του αέρα στο θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας είναι συνήθως 10-12Volt. Σε υψηλές ταχύτητες ροής απαιτείται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια για να θερμανθεί το σύρμα λόγω του υψηλού ρυθμού απαγωγής θερμότητας από αυτό που έχει σαν συνέπεια την ψύξη του με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιείται καλή καύση του ελαίου. Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης είναι μικρός, η συνολική αντίσταση εξαρτάται μόνο από το μήκος του σύρματος, την εσωτερική αντίσταση του υλικού, και τη διατομή του. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικά υλικά σύρματος, όπως χαλκό και χάλυβα, αλλά το χρωμιονικελιούχο έδειξε ότι μπορεί να παρέχει αρκετή θερμότητα ώστε να γίνει καύση του ελαίου και να παράγει καπνό.

Το υλικό του σύρματος πρέπει να θερμαίνεται εύκολα και να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η ομική αντίσταση είναι

$$R = \frac{V}{I}$$

όπου  $V$  είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντιστάσεως, και  $I$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που τη διαρρέει.

Σύμφωνα με το νόμο αυτό όσο η τάση αυξάνεται και το ρεύμα μειώνεται, η αντίσταση αυξάνεται.

Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση όσο αυξάνει η αντίσταση αυξάνεται και η θερμοκρασία του σύρματος.

$$R_t = R_0 [1 + a(T - T_0)] \Leftrightarrow T = \frac{R_t + aR_0T_0}{aR_0}$$

όπου  $a$  ο θερμοκός συντελεστής ειδικής αντίστασης και  $R_0$  η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ .

Τα ηλεκτρόνια κερδίζουν ενέργεια μεταξύ των συγκρούσεων από το έργο που τους προσφέρεται από το ηλεκτρικό πεδίο. Κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων, μέρος της ενέργειας αυτής μεταφέρεται στα άτομα του υλικού του αγωγού. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της εσωτερικής (θερμοδυναμικής) ενέργειας και της θερμοκρασίας του υλικού. Αυτός είναι ο λόγος που θερμαίνονται τα σύρματα που διαρρέονται από ρεύμα.

Επίσης το σύρμα πρέπει να επιτρέπει τη ροή του λαδιού προς το έδαφος διότι πρέπει να παράγει ομοιόμορφες γραμμές καπνού, διαφορετικά όταν η ροή του λαδιού εμποδίζεται ο καπνός παράγεται τοπικά σε ένα σημείο πράγμα που είναι ανεπιθύμητο.

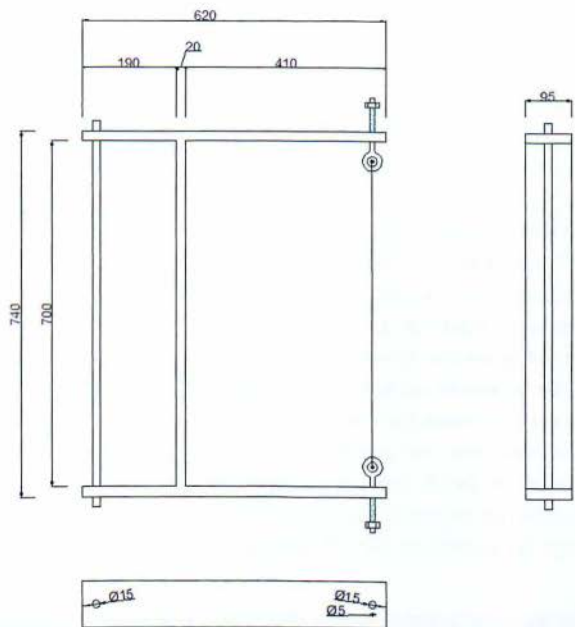
Από έρευνα της επιστημονικής βιβλιογραφίας προέκυψε ότι το χρωμιονικελιούχο σύρμα σε μορφή πηνίου μπορεί να παράγει καλής ποιότητας γραμμές καπνού με τη χρήση λαδιού. Για το λόγο ελελέγη το χρωμιονικελιούχο σύρμα σε μορφή πηνίου για το σύστημα (Smoke-wire) δεδομένου ότι δημιουργεί σαφές, ενιαίο λευκό πυκνό καπνό και η εναπόθεση του λαδιού στο σύρμα είναι εύκολη.

### **3.1 Κύρια εξαρτήματα του συστήματος**

#### **3.1.1 Η βάση**

Κατά τη χρήση της συσκευής η στήριξη του θερμού σύρματος στο θάλαμο δοκιμών είναι πολύ κρίσιμη δεδομένου ότι από αυτό εξαρτάται η μορφή του παραγόμενου καπνού. Για το λόγο αυτό το σύρμα απαιτείται να είναι τεντωμένο καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Προκειμένου να ολοκληρωθεί και να δοκιμασθεί η συσκευή κατασκευάστηκε μια πρότυπη διάταξη στήριξης που με μικρές τροποποιήσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αυτούσια στους θαλάμους δοκιμών των αεροσήραγγων του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκε ξύλινη βάση από μελαμίνη σχήματος «Η». Το σχήμα αυτό επιτρέπει την στήριξη του σύρματος από το ένα άκρο ενώ από το άλλο άκρο μέσω κοχλία επιτυγχάνεται η έκταση του σύρματος ώστε αυτό να τεντωθεί. Το σύρμα στηρίζεται στα άκρα του με δύο κρίκους του εμπορίου που διαθέτουν απόληξη με σπείρωμα που συγκρατούνται μέσω ελατηρίου με τη βάση για να παραλαμβάνουν τις διαστολές του σύρματος κατά τη λειτουργία της συσκευής.

Η βάση πρέπει να διατηρεί το χρωμιονικελιούχο σύρμα κάθετα προς το έδαφος και να είναι κατασκευασμένη από μονωτικό υλικό. Οι διαστάσεις της βάσης εξαρτώνται από τις διαστάσεις του θαλάμου δοκιμών της αεροσήραγγας στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η βάση που κατασκευάστηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω σχέδιο όπου φαίνονται και οι διαστάσεις της.



Σχέδιο 1. Η βάση



Εικόνα 1. Η ζύλινη βάση



### 3.1.2 Το θερμαινόμενο σύρμα

Το θερμαινόμενο σύρμα αποτελεί τον κύριο μηχανισμό για την παραγωγή του καπνού. Τοποθετείται στο εσωτερικό του θαλάμου δοκιμών μπροστά από το υπό μελέτη αντικείμενο και για το λόγο αυτό θα πρέπει να είναι πολύ μικράς διαμέτρου για να μην επηρεάζει τη ροή ενώ ταυτόχρονα πρέπει να έχει κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να παράγεται πυκνός καπνός σε όλο το μήκος του. Συγκεκριμένα μετά από βιβλιογραφική έρευνα που παραγματοποίησα στο πλαίσιο της πτυχιακής μου εργασίας κατέληξα στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη διαμόρφωση του σύματος είναι αυτή που προκύπτει από τη συστροφή ενός λεπτού σύματος γύρω από ένα άλλο λίγο μεγαλύτερης διαμέτρου σχηματίζοντας έτσι μια ελικοειδή σπείρα. Με τον τρόπο αυτό το λάδι που εκχύεται στο πάνω τμήμα του σύματος κινείται κατά μήκος της σπείρας με αποτέλεσμα να καθυστερεί η κάθοδός του στη βάση οπότε με σχετικά μικρή παροχή ρεύματος παράγεται πυκνός καπνός. Κατά τη διάρκεια της πτυχιακής μου πραγματοποίησα δοκιμές με διαφορετικές διατομές και διαμορφώσεις και κατέληξα στην επιλογή σύματος διαμέτρου 0,5mm για κορμό και 0,3mm για συνεστραμμένο σύρμα με βήμα 1 έως 1,5mm.

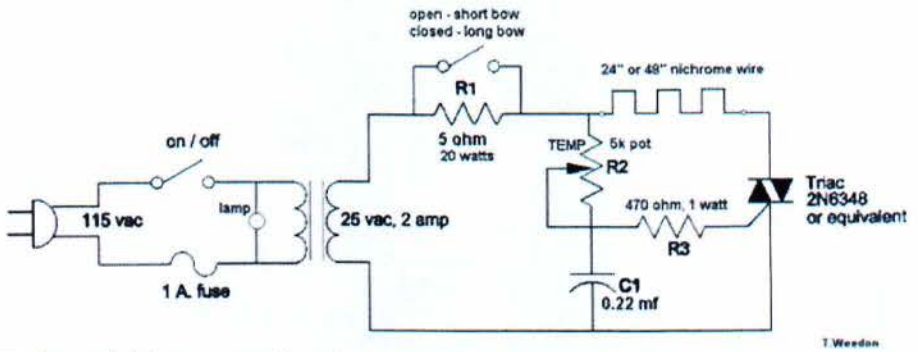


Εικόνα 2. Το χρωμονικελούχο σύρμα

### 3.1.3 Το τροφοδοτικό

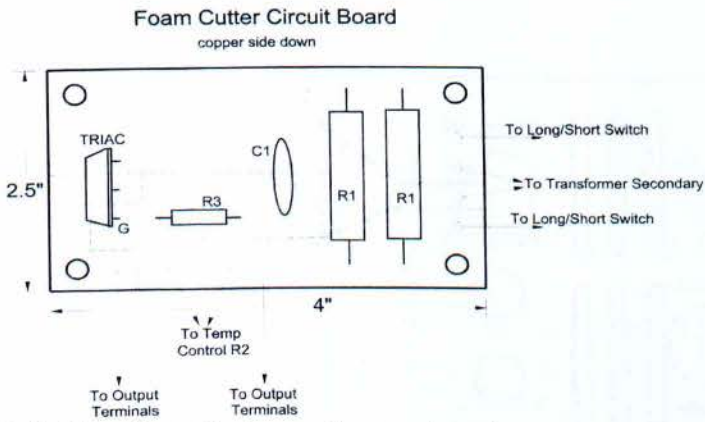
Η όλη διάταξη για να λειτουργεί αποτελεσματικά πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλο τροφοδοτικό που όταν θα συνδέεται στα άκρα του σύματος θα θερμαίνει το σύρμα σε τέτοια θερμοκρασία ικανή να προκαλέσει την καύση του λαδιού. Η θερμοκρασία του νήματος αποτελεί κρίσιμο μέγεθος δεδομένου ότι θα πρέπει να διατηρείται σταθερή για διαφορετικές ταχύτητες ροής. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του σύματος είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει συνεπώς για τον έλεγχο της θερμοκρασίας αρκεί ο έλεγχος της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το σύρμα. Για τον έλεγχο αυτό απαιτείται η κατασκευή κατάλληλου τροφοδοτικού. Η κατασκευή βασίστηκε σε έτοιμα σχέδια από το διαδίκτυο και συγκεκριμένα από τον ιστότοπο: <http://nsrca.us/index.php/all/building/65-powersupply>. Πρόκειται για τροφοδοτικό 24V με μεταβλητή έξοδο ελεγχόμενη με ποτενσιόμετρο.

Εδώ παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα με τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν:



Σχέδιο 1. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του τροφοδοτικού

Η κατασκευή της πλακέτας του τροφοδοτικού πραγματοποιήθηκε από εμένα με τη βοήθεια και την καθοδήγηση του Θεόδωρου Παπαδόπουλου. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής καθώς και η τελική πλακέτα:

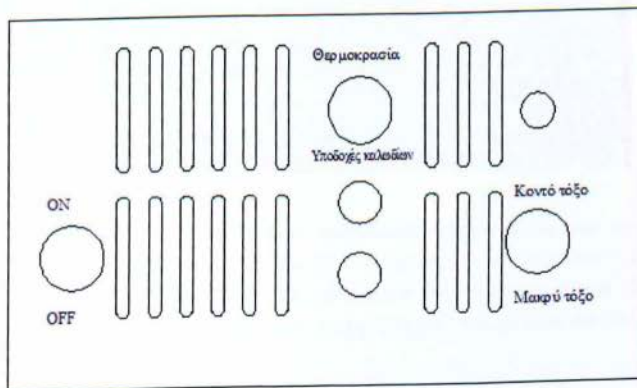


Σχέδιο 2. Το σχέδιο της πλακέτας με τις θέσεις των εξαρτημάτων

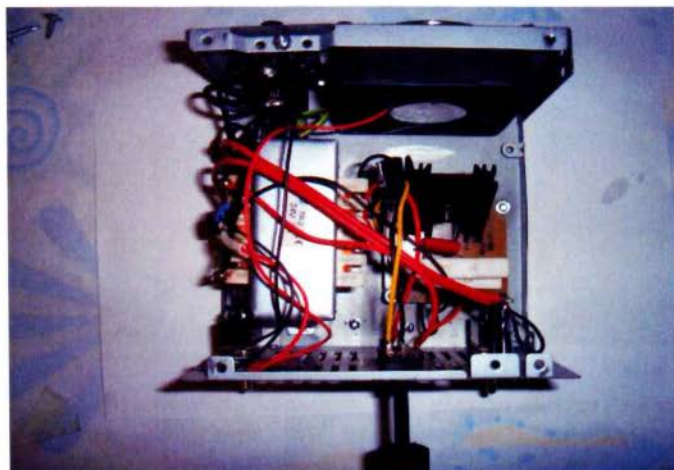


Εικόνα 3. Η πλακέτα με τα εξαρτήματα συνδεδεμένα

Η όλη κατασκευή τοποθετήθηκε στη συνέχεια σε μεταλλικό κουτί από ένα παλιό τροφοδοτικό. Στην εμπρόσθια και πίσω όψη του τροφοδοτικού τοποθετήθηκαν κατάλληλα βύσματα για τα καλώδια τροφοδοσίας, διακόπτες ελέγχου, ποτενσιόμετρο και οι ενδεικτικές λυχνίες σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.



Σχέδιο 3. Η πρόσοψη του τροφοδοτικού με τις οπές.



Εικόνα 4. Το εσωτερικό του τροφοδοτικού ρεύματος

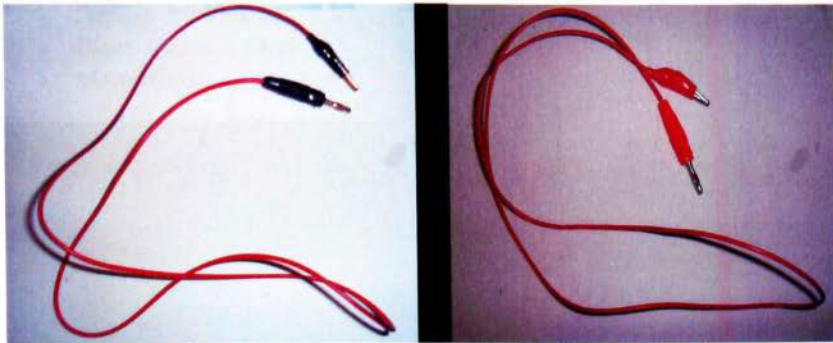


Εικόνα 5. Το εξωτερικό του τροφοδοτικού ρεύματος

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής το τροφοδοτικό ελέγχθηκε σε παλμογράφο του εργαστηρίου μετρήσεων τεχνικών μεγεθών προκειμένου να διαπιστωθεί η καλή λειτουργία του και η τάση εξόδου σε κάθε θέση του ποτενσιομέτρου. Κατά τον έλεγχο απαιτήθηκε η αντικατάσταση του γραμμικού ποτενσιομέτρου των  $5K\Omega$  με νέο  $30K\Omega$ .

Για την τροφοδότηση του θερμού σύρματος κατασκευάστηκε ένα ζευγάρι καλώδια μήκους  $1m$  και διατομής  $1mm$  στα άκρα των οποίων τοποθετήθηκαν κατάλληλοι σύνδεσμοι (κορκοδειλάκια και μπόρνες).





Εικόνα 6. Τα καλώδια που συνδέουν τη συσκευή με το σύρμα.

Ως επιπρόσθετη λειτουργία, στην πλακέτα ελέγχου έχουν τοποθετηθεί δύο ωμικές αντιστάσεις ισχύος 10W. Οι αντιστάσεις είναι τοποθετημένες σε ένα βρόγχο κατά τέτοιον τρόπο ώστε να είναι δυνατή η κατ' επιλογή μέσω διακόπτη σύνδεσή τους παράλληλα με το θερμαινόμενο σύρμα προκειμένου να μειωθεί η συνολική ωμική αντίσταση του συστήματος για την ταχύτερη θέρμανση του σύρματος.

### 3.1.4 Η τροφοδοσία ελαίου

Για τη λειτουργία του συστήματος σημαντική παράμετρο αποτελεί η παροχή ελαίου στο θερμαινόμενο σύρμα, καθώς σταθερή παροχή ελαίου απαιτείται για σταθερή ταχύτητα ρευστού και για ορισμένη θερμοκρασία σύρματος, προκειμένου να παραχθεί σταθερός και συνεχόμενος καπνός σε όλο το μήκος του σύρματος. Η τροφοδοσία μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη βαρύτητα είτε με αντλία μεταβλητής παροχής. Στην πρώτη περίπτωση το δοχείο ελαίου τοποθετείται πάνω από τα θάλαμο δοκιμών και μέσω τριχοειδούς αγωγού το λάδι διοχετεύεται στο σύρμα με σταθερή παροχή. Στην περίπτωση αυτή οι ρυθμίσεις περιορίζονται από την δυνατότητα αλλαγής της θέσης καθ' ύψος του δοχείου αποθήκευσης του ελαίου, ενώ με τη δεύτερη μέθοδο επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της ποσότητας και ποιότητας του παραγόμενου καπνού σε όλο το εύρος των ταχυτήτων ροής.

Στην κατασκευή μας επιλέχθηκε η τροφοδοσία ελαίου στο θερμό νήμα να πραγματοποιείται μέσω αντλίας 12V μεταβλητής παροχής ελεγχόμενης με κατάλληλο τροφοδοτικό που διαθέτει το εργαστήριο μετρήσεων.

Η αντλία είναι τοποθετημένη πάνω στη δεξαμενή ελαίου και η έξοδός της είναι συνδεδεμένη με μικρό τριχοειδή σωλήνα διαμέτρου 1/8'' που οδηγεί το λάδι στο πάνω τμήμα του θερμού νήματος. Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Τάση λειτουργίας: 12v
- Ένταση ρεύματος λειτουργίας: 2.2A

- Παροχή: 2800 ml/min
- Πίεση εξόδου: 170Kpa
- Μονή έξοδος



Εικόνα 7. Η αντλία ελαίου τοποθετημένη στη βάση του δοχείου.

## 4 Συσκευή οπτικοποίησης

### 4.1 Κατασκευή φορητής αεροσήραγγας χαμηλών ταχυτήτων

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής και δεδομένου ότι οι αεροσήραγγες του εργαστηρίου δεν ήταν σε λειτουργία απαιτήθηκε η κατασκευή μικρής διάταξης για τη δοκιμή και επίδειξη της συσκευής. Για την κατασκευή της αεροσήραγγας χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία τριών ανεμιστήρων 12x12cm τάσης 12V τοποθετημένων σε μεταλλική κορνίζα και ξύλινο πλαίσιο διαστάσεων 550x200mm. Για την παραγωγή γραμμικής ροής μετά τους ανεμιστήρες τοποθετήθηκε μεταλλική σίτα και διάταξη Honeycom αποτελούμενη από πλαστικά καλαμάκια τοποθετημένα σε στρώσεις σε όλη την επιφάνεια του πλαισίου όπως παρουσιάζονται και στις φωτογραφίες των σταδίων κατασκευής.



Εικόνα 8. Οι ανεμιστήρες μέσα στο πλαίσιο.



Εικόνα 9. Η τοποθέτηση Honeycom μέσα στο πλαίσιο μπροστά από τους ανεμιστήρες

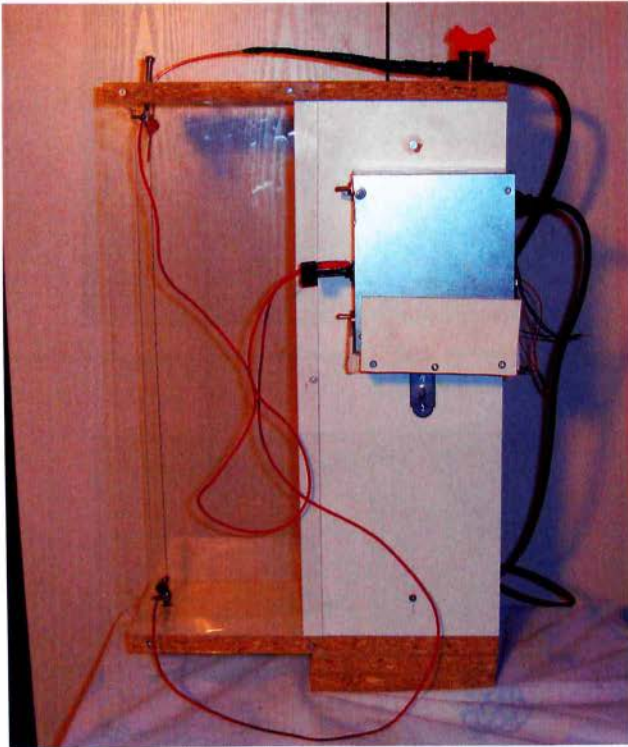
Για την ολοκλήρωση της κατασκευής στη βάση και το πάνω τμήμα του ξύλινου πλαισίου προσαρμόστηκαν δύο προεκτάσεις μήκους 200mm στις οποίες θα συνδεθούν τα άκρα του θερμαινόμενου σύρματος. Για την ολοκλήρωση της κατασκευής στα άκρα του πλαισίου τοποθετήθηκαν δύο διαφανή Plexiglas διαστάσεων 550x200mm για τη διατήρηση της ομαλής ομοιόμορφης ροής έως το θερμό σύρμα.



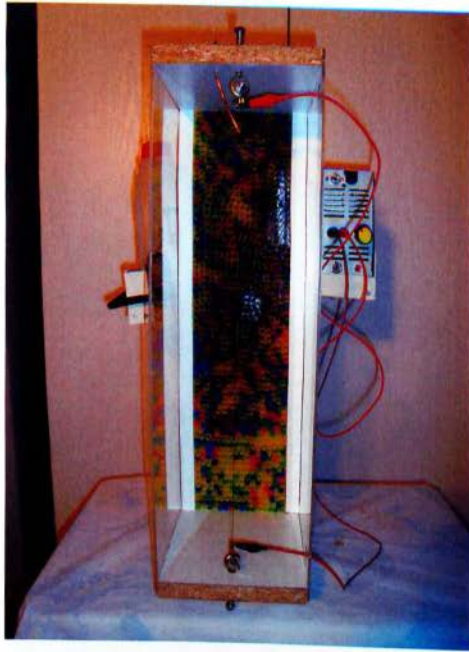
Εικόνα 10. Η τελική εμφάνιση της αεροσίραγγας



Με την ολοκλήρωση της μικρής αεροσήραγγας και την ολοκλήρωση της κατασκευής του συστήματος οπτικοποίησης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές των δύο συστημάτων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών και προκειμένου να είναι ευκολότερος ο έλεγχος των λειτουργικών παραμέτρων τοποθετήθηκαν όλα τα εξαρτήματα πάνω στην ξύλινη κατασκευή της αεροσήραγγας συγκροτώντας με τον τρόπο αυτό μια πλήρως λειτουργική συσκευή επίδειξης για την οπτικοποίηση της ροής γύρω από αντικείμενα οποιασδήποτε γεωμετρίας. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι όψεις της συσκευής:



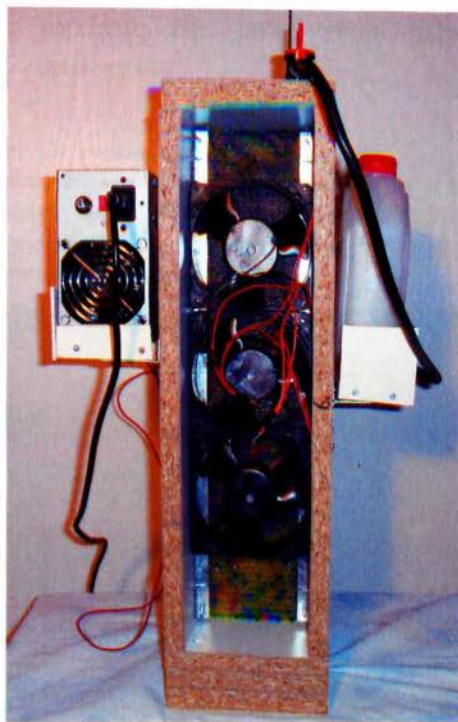
Εικόνα 11. Η θέση του τροφοδοτικού μαζί με τα καλώδια πάνω στο σύρμα.



Εικόνα 12. Δεξιά φαίνεται το τροφοδοτικό ρεύματος, αριστερά φαίνεται η δεξαμενή λαδιού.



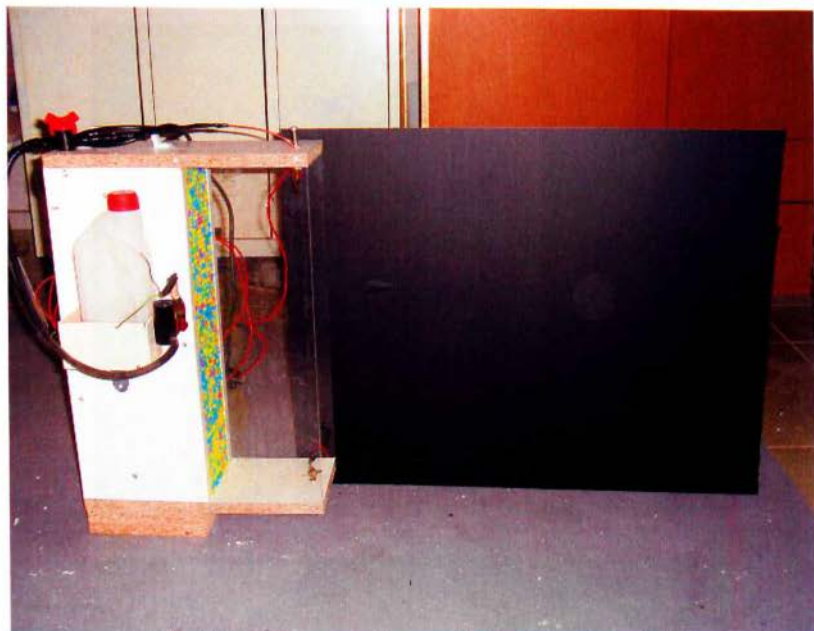
Εικόνα 13. Η δεξαμενή και η αντλία λαδιού με τους αγωγούς.



Εικόνα 14. Η πίσω όψη της συσκευής με τους ανεμιστήρες και τα καλώδια.

## 5 Εφαρμογές μελέτης της ροής γύρω από αντικείμενα διαφορετικής γεωμετρίας

Με την ολοκλήρωση των κατασκευών και των λειτουργικών δοκιμών των συστημάτων διενεργήθηκαν μια σειρά από πειραματικές δοκιμές επίδειξης της ροής γύρω από σώματα διαφορετικής γεωμετρίας. Για την καλύτερη οπτική αποτύπωση της ροής γύρω από τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήθηκε ως φόντο ένα φύλλο πλαστικού επικαλυμμένου με επιφάνεια μαύρου χρώματος.



Εικόνα 15. Η διάταξη της συσκευής για την διενέργεια πειραμάτων επίδειξης.

Για τις πειραματικές δοκιμές της συσκευής χρησιμοποιήθηκαν μία αεροτομή NACA 4418 μήκους χορδής 20cm που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο μετρήσεων και ένας κύλινδρος διατομής  $\Phi 32$ . Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στον υπαίθριο χώρο έξω από την είσοδο του εργαστηρίου.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγιναν δοκιμές σε διαφορετικές ρυθμίσεις των παραμέτρων της ταχύτητας του αέρα, της παροχής της αντλίας τροφοδοσίας ελαίου και σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του σύρματος προκειμένου να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση της ροής γύρω από τα εξεταζόμενα αντικείμενα. Συγκεκριμένα για δεδομένη ταχύτητα ροής και συγκεκριμένη παροχή ελαίου η θερμοκρασία του σύρματος ορίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε στη βάση του σύρματος να μην εμφανίζεται άκαυστο λάδι. Στη συνέχεια η μικρή αύξηση της παροχής ελαίου και της θερμοκρασίας του σύρματος οδηγεί σε παραγωγή



πυκνότερου καπνού σε όλο το μήκος του σύρματος. Οι δοκιμές συνεχίστηκαν με διαφορετικές ταχύτητες ροής.

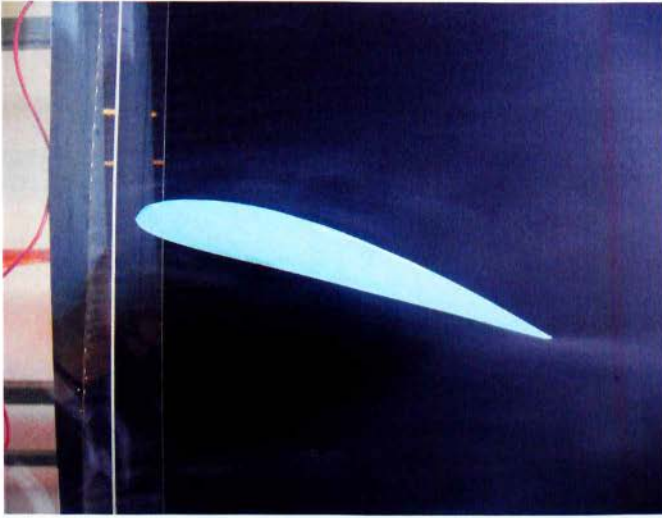
Παράλληλα με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής αποτυπώθηκε το ροϊκό πεδίο γύρω από τα σώματα για διαφορετικές γωνίες προσβολής.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις εφαρμογές.

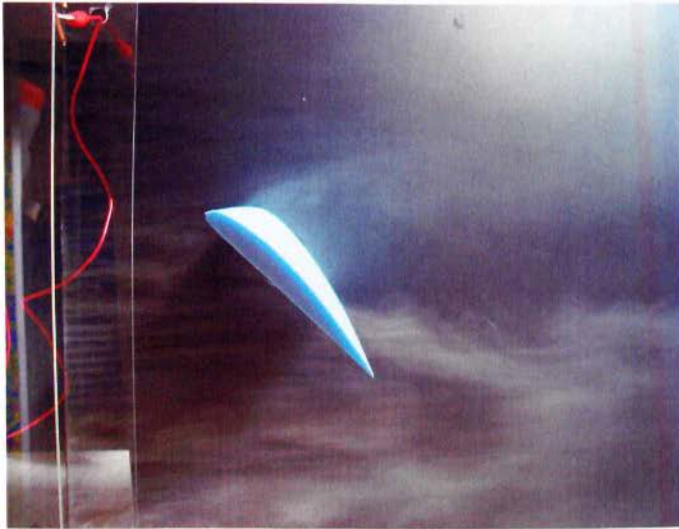
Αρχικά μελετήθηκε η ροή γύρω από την αεροτομή NACA 4418 σε διαφορετικές γωνίες προσβολής και ιδιαίτερα σε μεγάλες γωνίες όπου αποκολλάται το οριακό στρώμα σχηματίζοντας μια περιοχή ανακυκλοφορίας στην περιοχή πάνω από την πτέρυγα.



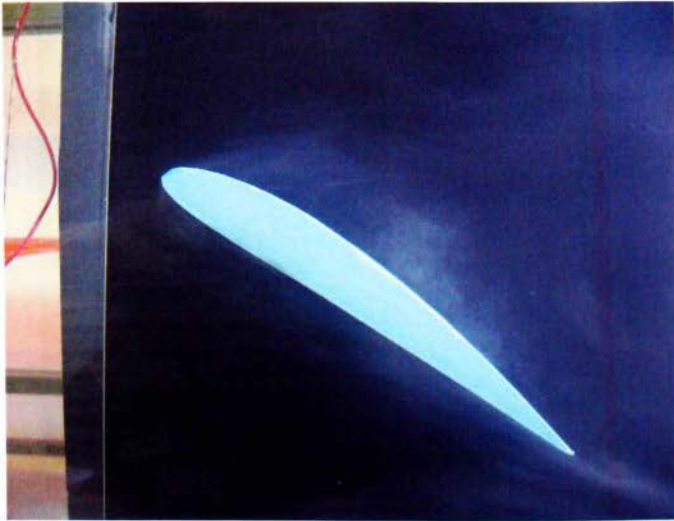
Εικόνες 16 και 17. Αεροτομές σε γωνία προσβολής 0°.



Εικόνα 18. Αεροτομή σε μικρή θετική γωνία προσβολής.



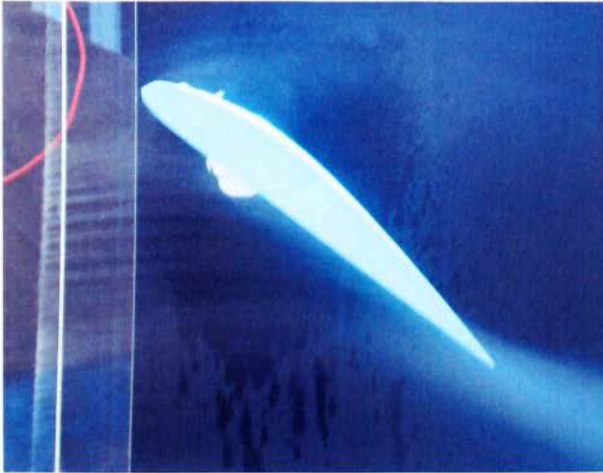
Εικόνα 19. Αεροτομή σε μεγάλη θετική γωνία προσβολής.



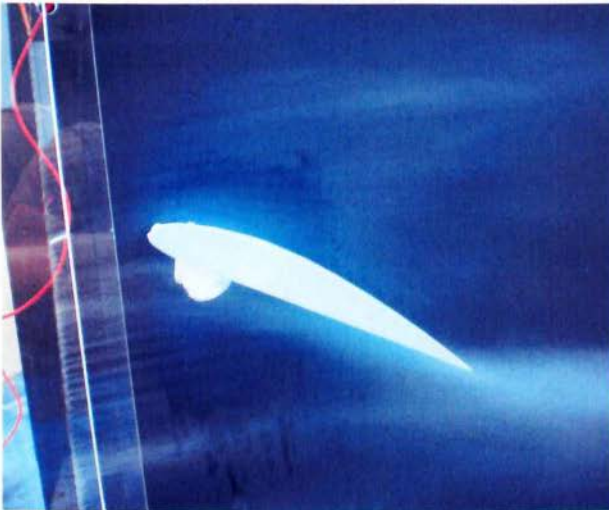
Εικόνα 20. Αεροτομή σε μεγάλη θετική γωνία προσβολής.



Εικόνα 21. Γενική εικόνα της διάταξης



Εικόνα 22. Λεπτομέρεια του πεδίου ροής γύρω από πτέρυγα με μεγάλη θετική γωνία προσβολής.



Εικόνα 23. Λεπτομέρεια του πεδίου ροής γύρω από πτέρυγα με θετική γωνία προσβολής.



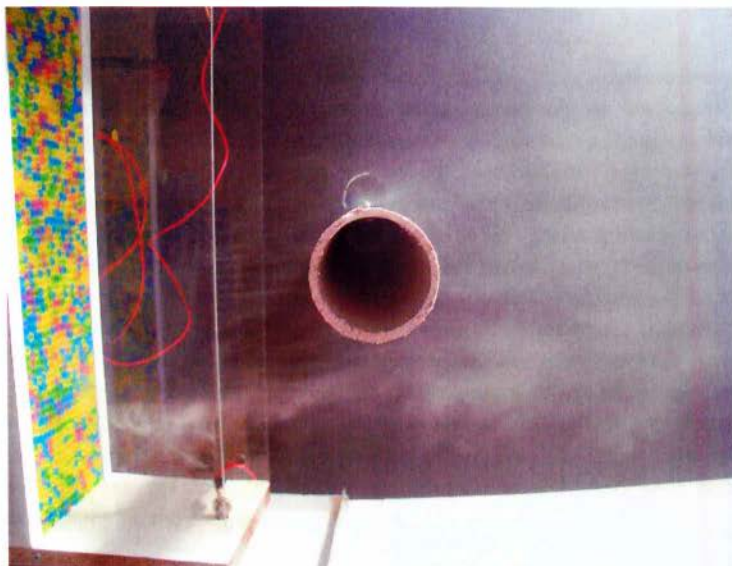


Εικόνα 24. Αεροτομή σε μεγάλη αρνητική γωνία προσβολής



Εικόνα 25. Αεροτομή σε μεγάλη αρνητική γωνία προσβολής .

Στη συνέχεια μελετήθηκε η ροή γύρω από κύλινδρο όπου παρατηρήθηκε ο σχηματισμός δύο συμμετρικών περιοχών ανακυκλοφορίας πίσω από τον κύλινδρο.



Εικόνα 26 και 27. Ροή γύρω από κύλινδρο.

## **6 Συμπεράσματα και προτάσεις για βελτιώσεις του συστήματος.**

Με την ολοκλήρωση των πειραματικών εφαρμογών προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συσκευή λειτουργεί ικανοποιητικά ενώ σε συνδυασμό με την αυτοσχέδια αεροσήραγγα αποτελούν ιδανική συσκευή οπτικοποίησης της ροής τόσο για πειράματα επίδειξης όσο και για ερευνητικούς σκοπούς. Δυστυχώς μέχρι την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας δεν ήταν δυνατή η δοκιμή της συσκευής στις αεροσήραγγες του εργαστηρίου, κάτι που θα αποτελέσει αντικείμενο μιας νέας πτυχιακής. Παρά το γεγονός αυτό, ο σχεδιασμός και η κατασκευή της συσκευής που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ρυθμίσει το σύνολο των παραμέτρων λειτουργίας, καθιστά δυνατή τη χρήση της στο σύνολο σχεδόν των συνθηκών κάθε πειράματος. Παράλληλα για την τυποποίηση της χρήσης της συσκευής θα ήταν σκόπιμο να καταρτιστεί πίνακας με τις παραμέτρους λειτουργίας ανάλογα με την ταχύτητα ροής που θα μπορούσαν στο μέλλον να χρησιμοποιηθούν για την πλήρη αυτοματοποίηση του συστήματος και τον έλεγχο του με Η/Υ. Τέλος απαιτείται να βελτιωθεί ο φωτισμός για την λήψη καλύτερων φωτογραφιών κατά τη διενέργεια πειραμάτων οπτικοποίησης της ροής γύρω από σώματα.

## Βιβλιογραφία

Αγγέλου Θ. Παπαϊωάννου, *Μηχανική των ρευστών*, Τομος Ι

Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss, *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

T.J. Mueller, *Flow Visualization by Direct Injection – Smoke Wire Method*, *Fluid Mechanics Measurement*, 1983

Hugh D. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική*, Τόμοι Α' & Β', Εκδόσεις Παπαζήση

Sharul Sham dol, Mohd Arief Mohd Nor and Muhamad Khairun Kamaruzaman, *An Improved Smoke-Wire Flow Visualization Technique*, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Elounda, Greece, August 21-23, 2006

Chun-Guang Li, John C. K. Cheung and Z.Q. Chen (2009), *Effect of square cells in improving wind tunnel flow quality*, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan, November 8-12, 2009

Tom Weedon, Foam Cutting Power Supply, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο (<http://nsrca.us/index.php/all/building/65-powersupply> τελευταία πρόσβαση 10/05/2012)