

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΤΕΙ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΣΕΡΡΕΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
Ζ' ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ
2017



2017 4:44:42 PM -3326.8[ms] 00000282 EoSens mini2 EOSENS Mikrotron 1696x776 404fps 2413μs V1.4.0.1

*“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ
ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”*

ΕΚΠΟΝΗΤΡΙΑ: ΣΟΥΡΒΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗ (6454)

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΔΑΥΙΔ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ



Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	3
2. Διάγραμμα ροής διαδικασίας (Procedure Flow Chart)	3-4
3. Υπόβαθρο Ρευστομηχανικής και Αεροδυναμικής (Basic Fluid Dynamics and Aerodynamics)	5-11
4. Ορισμός Αεροσήραγγας	12
5. Ιστορική Αναδρομή	12-19
6. Κατηγορίες αεροσηράγγων	20-24
7. Μέρη της αεροσήραγγας.....	25-30
8. Σχεδιομελέτη (2-D and 3-D Drawings)	30-40
9. Κατασκευή (Actual Construction)	41-60
10. Κοστολόγηση Κατασκευής.....	61-62
11. Αξιολόγηση μοντέλου μέσω Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD).....	63-64
12. Πειραματική Διαδικασία Οπτικοποίησης Ροή Αέρα (Air Flow Visualization)	65-70
13. Μέτρηση Δυναμικής Άνωσης (Lift Force Measurement)	72-75
14. Βιβλιογραφία	76-77

1. Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η οπτικοποίηση της ροής του αέρα (Air Flow Visualization) πάνω σε αντικείμενα αεροδυναμικής γεωμετρίας, μέσω πρωτότυπης διάταξης αεροσήραγγας μεσαίου μεγέθους και ανοιχτού τύπου. Με τη βοήθεια της αεροσήραγγας είναι δυνατή η οπτικοποίηση των φαινομένων ροής (στρωτής και τυρβώδους), καθώς και η μέτρηση της δύναμης άνωσης και οπισθέλκουσας που ασκούνται στα σώματα λόγω της ροής αέρα μέσω δυναμομετρικής διάταξης.

Για την δοκιμή και επίδειξη της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα πτερύγιο **NACA 5522** κάθετης ανεμογεννήτριας (VAWT blade) υπό κλίμακα που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος του τμήματος **“Renewable Energy Systems: Design Development & Optimization”**.



fig. 1 ALEKO 12V 30W VAWT.

Συγκεκριμένα έχει πραγματοποιηθεί μελέτη και κατασκευή της διάταξης, εκπόνηση πειραμάτων για τη μελέτη της ροής λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους ταχύτητα αέρα-γωνία πτερυγίου με αντίστοιχη βιντεοσκόπηση μέσω κάμερας υψηλής ταχύτητας (high speed camera).

Γνωρίζοντας ότι οι αεροσήραγγες που χρησιμοποιούνται για **οπτικοποίηση** ροής διαφέρουν από αυτές που χρησιμοποιούνται για **δυναμομετρήσεις** και δοκιμές πρωτότυπων μοντέλων

(αεροσκάφη, αυτοκίνητα, πτερύγια) - η διάταξη που κατασκευάστηκε είναι ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας.

Λαμβάνοντας υπ' όψη το γεγονός, ότι η εργασία εκπονείται στα πλαίσια του **Κατασκευαστικού Τομέα** του Τμήματος και της φιλοσοφίας των μαθημάτων που περιλαμβάνει αυτός, στόχος είναι μια έξυπνη, λειτουργική διάταξη που να τροποποιείται εύκολα για οποιαδήποτε παραπλήσια χρήση από το προσωπικό του Τμήματος μετά την παρουσίαση της , ενώ παράλληλα με το ελάχιστο κόστος να έχει την βέλτιστη ποιότητα και αξιοπιστία ως κατασκευή.

Συνοψίζοντας, παρόλο που η παρούσα πτυχιακή εργασία βασίστηκε σε εγχειρίδια κατασκευής αεροσήραγγας που γράφτηκαν από επιστήμονες οι οποίοι διεύθυναν project αεροδιαστημικών και αεροναυπηγικών εργαστηρίων όπως αυτά της NASA, NACA και της SATA αποτελεί κυρίως μια εποπτική προσέγγιση για παρουσίαση και επίδειξη.

2. Διάγραμμα ροής διαδικασίας (Procedure Flow Chart)

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε μετά την σύλληψη της ιδέας ήταν αρχικά η εκλογή κατάλληλων υλικών τα οποία έπρεπε να καλύπτουν τις απαιτήσεις της κατασκευής (στιβαρότητα, στεγανότητα, μικρό βάρος, ικανοποιητική τραχύτητα που να μην επηρεάζει σημαντικά την ροή αέρα κτλ). Επιπλέον τα υλικά αυτά θα έπρεπε να μην είναι δυσεύρετα στην αγορά και να έχουν το ελάχιστο κόστος. Έτσι η αεροσήραγγα κατασκευάστηκε κυρίως από ινοσανίδα τύπου MDF (Medium Density Fiberboard) πλην του τμήματος δοκιμών (testing section-observation window) που κατασκευάστηκε από plexiglass έτσι ώστε να είναι ορατή η ροή του αέρα (με διάφορες τεχνικές τις οποίες θα αναλύσουμε παρακάτω). Όντας υλικό ευκολοδιαμόρφωτο όσον αφορά την κοπή, το στραντζάρισμα και την συγκόλληση με ηλεκτροπόντα, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον γαλβανισμένη λαμαρίνα στα δύο άκρα της αεροσήραγγας προκειμένου να ενωθεί ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας με την κατασκευή από την μία πλευρά ενώ από την άλλη να τοποθετηθεί το φίλτρο ευθυγράμμισης ροής .

Παράλληλα με την εκλογή υλικών εκπονήθηκε και η σχεδιομελέτη της κατασκευής (digital part), αρχικά σε πρόγραμμα 2-Δ σχεδίασης και αργότερα σε πρόγραμμα 3-Δ σχεδίασης έτσι ώστε η γεωμετρία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα και σε πρόγραμμα προσομοίωσης Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) για να διαπιστωθούν τυχόν ατέλειες και να γίνει η βελτιστοποίηση της.

Κατόπιν ακολούθησε η πραγματική κατασκευή (actual part) με την συναρμολόγηση των κομματιών ινοσάνιδου και λαμαρίνας, η σιδηροκατασκευή τροχήλατης επιδαπέδιας βάσης για την αεροσήραγγα καθώς και για τον ανεμιστήρα, η πειραματική διαδικασία με την βιντεοσκόπηση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

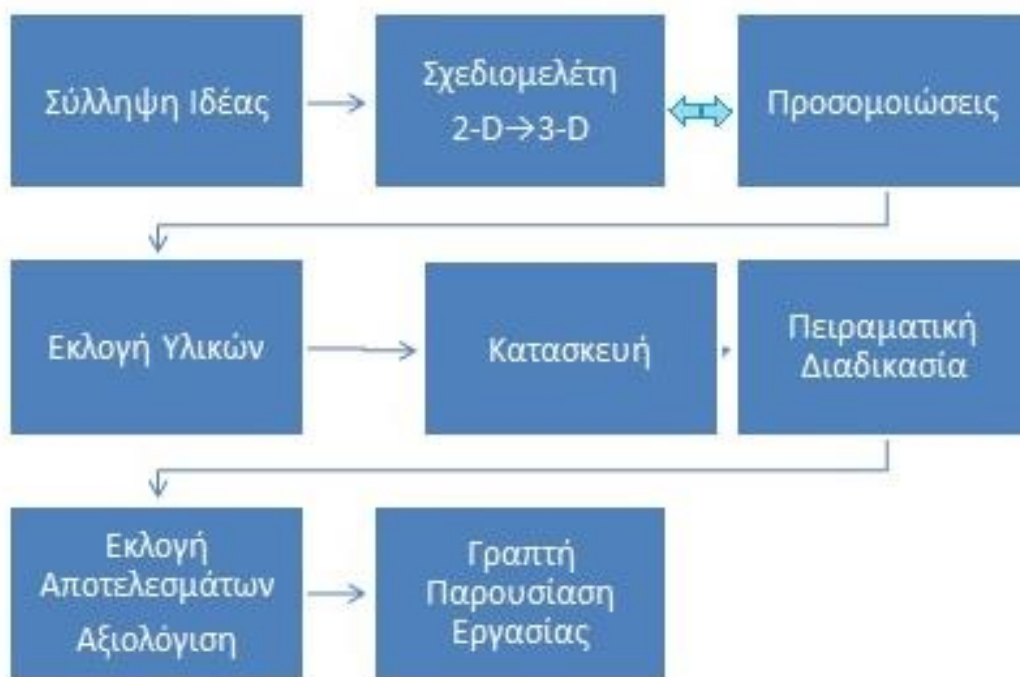


fig. 2 Διάγραμμα ροής διαδικασίας.

3. Υπόβαθρο Ρευστομηχανικής και Αεροδυναμικής (Basic Fluid Dynamics and Aerodynamics)

Άντωση, Δυναμική άνωση	FL	N
Συντελεστής άνωσης	Cl	
Πυκνότητα ρευστού	ρ	Kg/m^3
Επιφάνεια σώματος κάθετη στην ροή	A	m^2
Ταχύτητα Ρευστού ως προς το σώμα	U	m/s
Οπισθέλκουσα Δύναμη	FD	N
Συντελεστής αντίστασης σώματος	Cd	
Αριθμός Reynolds	Re	
Γραμμική διάσταση αγωγού	L	m
Δυναμικό ιξώδες ρευστού	μ	P
Γωνία πρόσπτωσης/προσβολής	a	deg
Αριθμός Strouhal	St	
Συχνότητα αποκόλλησης δινών	f	s^{-1}

Στρωτή ροή ή ομαλή ροή ονομάζεται εκείνη που περιγράφεται με την παραδοχή ότι τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ομαλά και παράλληλα μεταξύ τους σε στοιβάδες και υπάρχει μοριακή μεταφορά ορμής και θερμότητας μεταξύ των στρωμάτων του ρευστού.

laminar flow

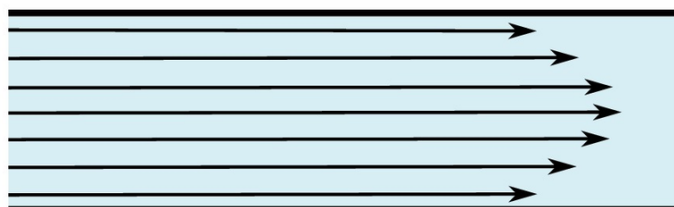


fig. 3 Στρωτή ροή μέσα σε αγωγό.

Τυρβώδης ροή ή στροβιλώδης ροή, ονομάζεται η ροή εκείνη κατά την οποία οι ροϊκές γραμμές έχουν την μορφή ακανόνιστων χαοτικών καμπυλών και η μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας επιτυγχάνεται μεταξύ διαφορετικών περιοχών ροής.

turbulent flow

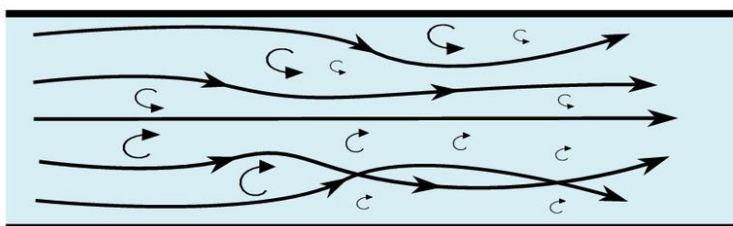


fig. 4 Τυρβώδης ροή μέσα σε αγωγό.

Ο αριθμός **Reynolds** εκφράζει τον λόγο των δυνάμεων αδρανείας ως προς τις δυνάμεις τριβής (που σχετίζονται με τις διατμητικές τάσεις του δυναμικού ιξώδους) ενός ρευστού και μας βοηθά μαζί με την σχετική τραχύτητα (e/D) του αγωγού του ρευστού να διαπιστώσουμε το είδος της ροής.

Συνεπώς:
$$Re = \frac{U \cdot L \cdot \rho}{\mu}$$

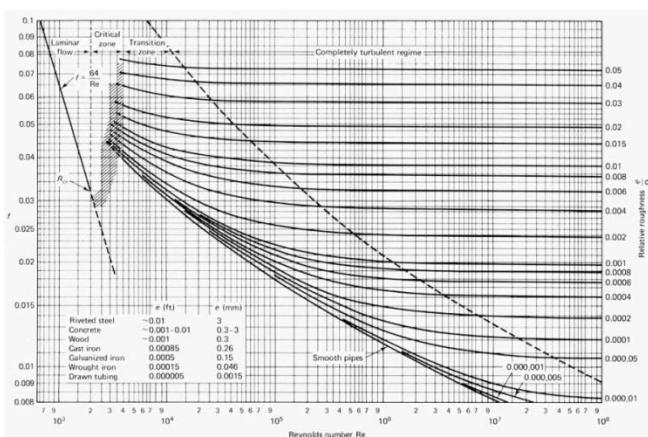
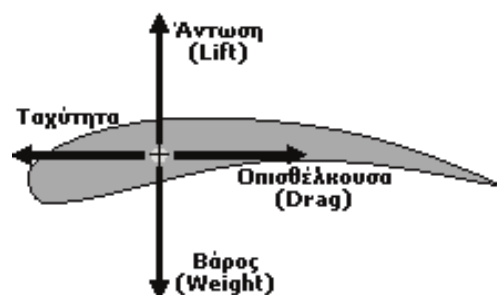


fig. 5 Το διάγραμμα Moody και η σχέση του με τον αριθμό Reynolds και την σχετική τραχύτητα.

Άντωση ή Δυναμική Άνωση (Lift Force) ενός σώματος που βρίσκεται μέσα σε ένα ρευστό που κινείται πάνω σε αυτό είναι η κάθετη συνιστώσα της δύναμης που ασκείται στο σώμα από το ρευστό.

$$\text{Συνεπώς: } F_l = \frac{1}{2} \cdot c_l \cdot \rho \cdot A \cdot U^2$$

Οπισθέλκουσα (Drag Force) ονομάζεται η δύναμη που έχει ίδιο φορέα με αυτόν της ταχύτητας κίνησης του ρευστού αλλά αντίθετη φορά από αυτό. Η οπισθέλκουσα δύναμη οφείλεται στην διαφορά πίεσης που υπάρχει μεταξύ των απέναντι επιφανειών ενός σώματος όταν αυτό βρίσκεται μέσα σε ρευστό που κινείται πάνω του.



$$\text{Συνεπώς: } F_d = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot A \cdot U^2$$

fig. 6 Ανάλυση δυνάμεων σε πτερύγιο.

Στην αεροδυναμική επιδιώκεται μεγιστοποίηση της δύναμης άνωσης F_l και ελαχιστοποίηση των αντιστάσεων. Για τον λόγο αυτό κατασκευάζονται ειδικές γεωμετρίες που ονομάζονται αεροτομές ή πτερύγια και έχουν όλες κάποια κοινά χαρακτηριστικά.

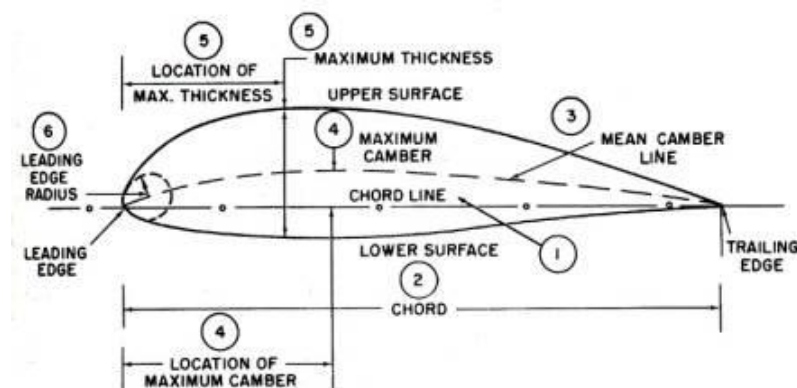


fig. 7 Τυπική διαμόρφωση πτερυγίου με τις κύριες διαστάσεις του.

*Οι παραπάνω ορισμοί και μαθηματικές σχέσεις έχουν διαπιστωθεί με την παραδοχή ότι το σώμα είναι ακίνητο και το ρευστό κινείται ως προς το σώμα.

Η επάνω πλευρά του πτερυγίου ονομάζεται **πλευρά αναρρόφησης**, ενώ η κάτω, **πλευρά πίεσης**. Στην πλευρά αναρρόφησης η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη από αυτήν της πλευράς πίεσης. Η αύξηση της ταχύτητας λόγω μακρύτερης διαδρομής οδηγεί στην μείωση της πίεσης. Επομένως η πίεση στην πλευρά πίεσης είναι μεγαλύτερη από αυτήν στην πλευρά αναρρόφησης με αποτέλεσμα να δημιουργείται άνωση.

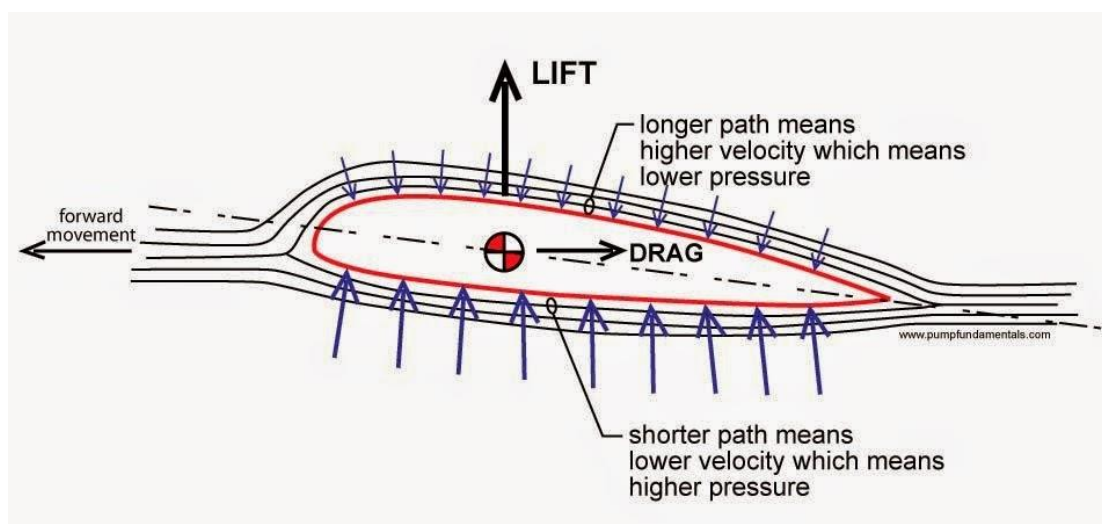


fig. 8 Διαφορά πίεσης σε πτερύγιο.

Καθώς το ρευστό ταξιδεύει διαχωρίζεται στην **ακμή ανακοπής** που βρίσκεται στην επιφάνεια πρόσπτωσης του πτερυγίου. Ένα μέρος του, πλέον κατευθύνεται προς την πλευρά αναρρόφησης και ένα προς την πλευρά πίεσης. Έτσι δημιουργούνται τα **οριακά στρώματα (boundary layers)** του ρευστού πάνω στο πτερύγιο.

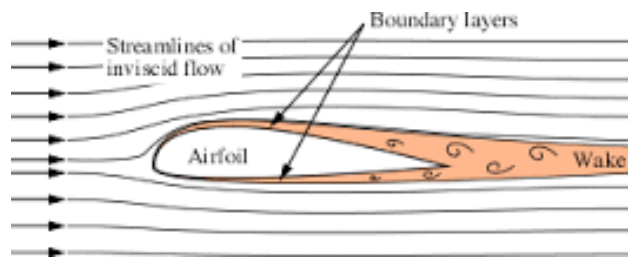


fig. 9 Δημιουργία οριακών στρωμάτων στην επιφάνεια του πτερυγίου.

Σημαντικό ρόλο στην λειτουργικότητα του πτερυγίου παίζει η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού (angle of attack). Με τον όρο **γωνία πρόσπτωσης α** εννοούμε την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ μιας ευθείας ροϊκής γραμμής (streamline) και της κύριας χορδής του πτερυγίου.

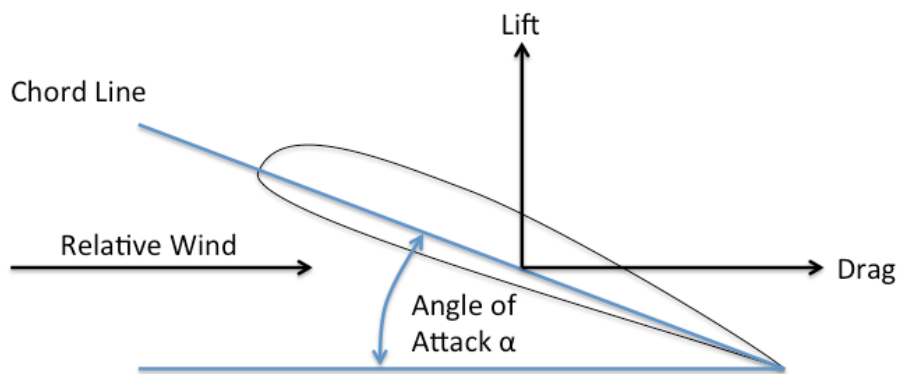


fig. 10 Γωνία πρόσπτωσης ρευστού.

Αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης προκαλεί μετακίνηση του σημείου ανακοπής προς τα κάτω (πλευρά πίεσης), ενώ η μείωση της προκαλεί μετακίνηση του σημείου ανακοπής προς τα επάνω (πλευρά αναρρόφησης). Η αύξηση αυτής της γωνίας όμως έχει κάποια όρια. Πειραματικά μπορεί να φτάσει έως τις **12°-13° για κυρτά πτερύγια** ενώ **για συμμετρικές αεροτομές** μπορεί να φτάσει έως και τις **21°**. Από αυτά τα σημεία και μετά τα οριακά στρώματα αρχίζουν να αποκολλώνται από την επιφάνεια της αεροτομής καθώς αυξάνεται το **εύρος της ζώνης** αποκόλλησης και μετακινείται όλο και περισσότερο προς το **μέγιστο πάχος** της αεροτομής με αποτέλεσμα αυτή να χάνει την λειτουργικότητα της.

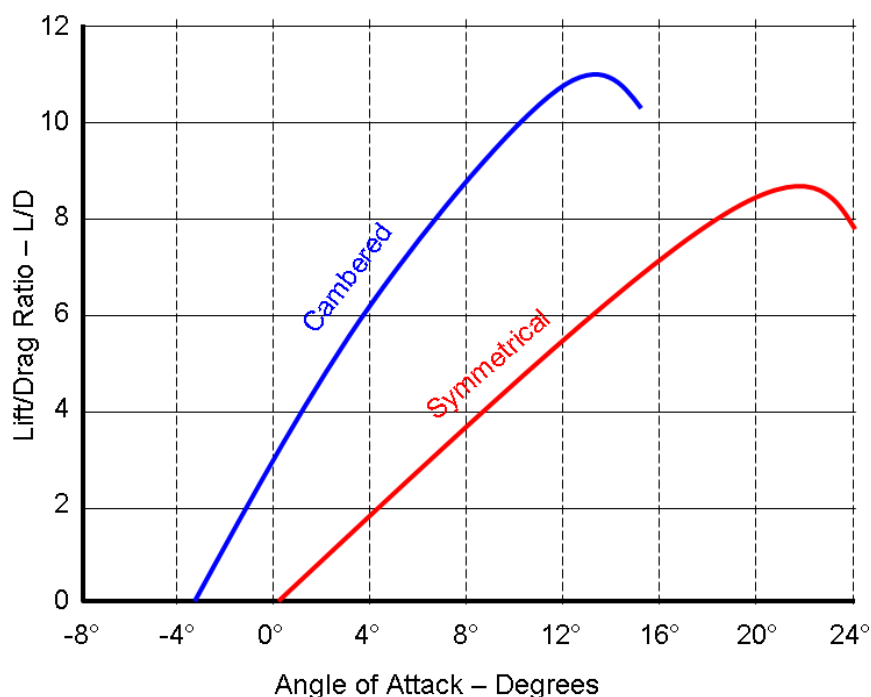


fig. 11 Διάγραμμα αναλογίας άνωσης-οπισθέλκουσας ως προς την γωνία πρόσπτωσης ανέμου για πτερύγιο αεροσκάφους CESSNA T-37 (κυρτό πτερύγιο) και Boeing B-52 Stratofortress (συμμετρικό πτερύγιο).

Ένα άλλο ποιοτικό χαρακτηριστικό που εξετάζεται στις αεροτομές είναι οι **δίνες** που σχηματίζονται στο πίσω μέρος τους και **αποκολλούνται περιοδικά** δημιουργώντας ένα μοτίβο (Theodore Von Karman street). Η συχνότητα με την οποία επαναλαμβάνεται το φαινόμενο αυτό δημιουργεί ταλαντώσεις που αλληλεπιδρούν και μπορούν να κάνουν την κατασκευή να αστοχήσει. Η συχνότητα με την οποία επιτυγχάνεται η αποκόλληση των δινών σε μια γεωμετρία σχετίζεται με τον αδιάστατο αριθμό Strouhal:

$$St = \frac{f \cdot D}{V}$$

Όπου:

D= χαρακτηριστικό μήκος (στην περίπτωση μας πάχος πτερυγίου)

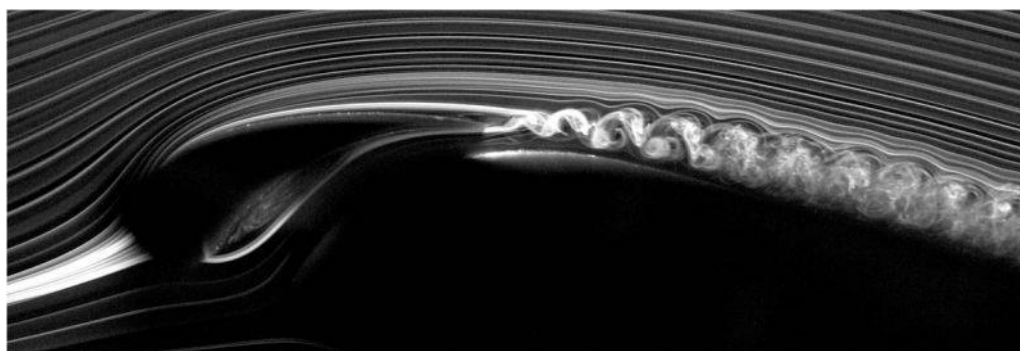


fig. 12 Δημιουργία δινών (vortex shedding trail) στο πίσω μέρος πτερυγίου.

Ο αριθμός Strouhal σχετίζεται με τον αριθμό Reynolds καθώς για $250 < Re < 2 \cdot 10^5$

$$St = 0,198 \left(1 - \frac{19,7}{Re} \right)$$

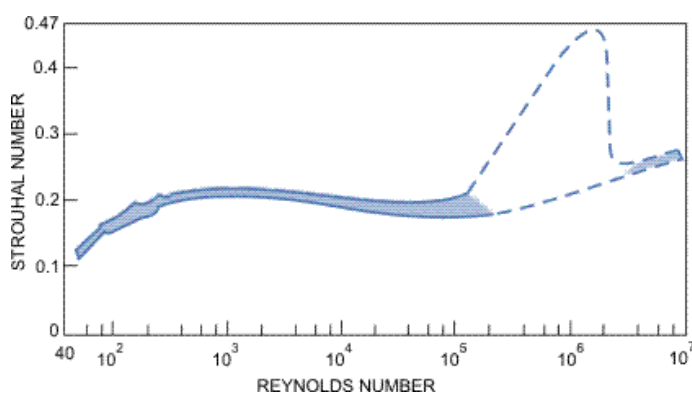


fig. 13 Ροή γύρω από κύλινδρο.

*Εφόσον η αεροσήραγγα σχεδιάστηκε για ταχύτητες πολύ μικρότερες από αυτήν του ήχου δεν θα γίνει αναφορά στον αριθμό Mach.

4. Ορισμός Αεροσήραγγας

Η αεροσήραγγα είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται σε αεροδυναμικές έρευνες προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά διαφόρων στερεών γεωμετριών μέσα σε ρευστά. Με την βοήθεια μιας αεροσήραγγας επιτυγχάνεται η δημιουργία κατάλληλων συνθηκών (ταχύτητα ρευστού, πίεση, γωνία πρόσπτωσης κτλ) έτσι ώστε να γίνουν διάφορες μετρήσεις και βελτιστοποίηση ή έλεγχος κατασκευών. Η αρχή λειτουργίας βασίστηκε στην αντιστροφή του φυσικού μοντέλου του προβλήματος. Δηλαδή εάν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό θα παρουσιάσει κάποια συμπεριφορά. Εάν το ίδιο σώμα είναι ακίνητο και το ρευστό κινείται πάνω σε αυτό θα παρουσιάσει την ίδια συμπεριφορά. Έτσι ο εξωτερικός παρατηρητής θα μπορεί να μετρήσει τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα αυτό.



fig. 14 Υπερσύγχρονη αεροσήραγγα δοκιμής αυτοκινήτων κόστους 230εκατ. ευρώ στις εγκαταστάσεις της Mercedes-Benz. Γερμανία, 2013.

5. Ιστορική Αναδρομή

Η εξέλιξη της αεροσήραγγας ως τεχνικό μέσο ακολούθησε την εξέλιξη των αεροπλάνων εφόσον αρχικά είχαν γίνει κάποιες μεμονωμένες προσπάθειες από επιστήμονες προκειμένου να μετρήσουν κάποιες δυνάμεις πάνω σε εφευρέσεις τους κατά τον 18^ο αιώνα. Χρυσή εποχή για τις αεροσήραγγες υπήρξε ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος το 1939 και ο μετέπειτα Ψυχρός Πόλεμος. Την εποχή εκείνη τα βομβαρδιστικά αεροσκάφη εξελισσόταν ραγδαία σε Ευρώπη και Αμερική και έπρεπε να δοκιμαστούν είτε υπό κλίμακα ως μοντέλα είτε σε πραγματικό μέγεθος. Την δεκαετία του '50 τα κτήρια άρχισαν να γίνονται ψηλότερα με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες επιφάνειες ανεμοπροσβολής και να δημιουργούνται δυνάμεις οι οποίες έπρεπε να μετρηθούν, προτού ξεκινήσει η κατασκευή. Έτσι κάθε φορά που σχεδιαζόταν ένα ψηλό ή καινοτόμου σχήματος κτήριο, δοκιμαζόταν το πρωτότυπο του. Την δεκαετία του '70 οι αυτοκινητοβιομηχανίες αντιμετώπιζαν

προβλήματα όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια τις εκπομπές ρύπων. Για τον λόγο αυτό ξεκίνησε η δοκιμή αυτοκινήτων σε αεροσήραγγες οι οποίες είχαν μάντες κίνησης στην περιοχή μετρήσεων για να προσομοιώνονται καλύτερα οι συνθήκες κίνησης οχήματος σε δρόμο. Η γενική διατύπωση έλεγε ότι αυτοκίνητα με μικρότερη μετωπική επιφάνεια χρειαζόταν λιγότερη παραγόμενη ισχύ, συνεπώς λιγότερο καύσιμο. Την ίδια περίοδο έως και σήμερα οι αεροσήραγγες χρησιμοποιήθηκαν για αεροδιαστημικές έρευνες. Σημαντικά σημεία σταθμοί στην εξέλιξη της αεροσήραγγας είναι τα εξής:

- **1871:** Ο Βρετανός Francis Herbert Wenham κατασκευάζει την πρώτη αεροσήραγγα κλειστού τύπου προκειμένου να μετρήσει την αναλογία άνωσης/οπισθέλκουσας (l/f ratio).

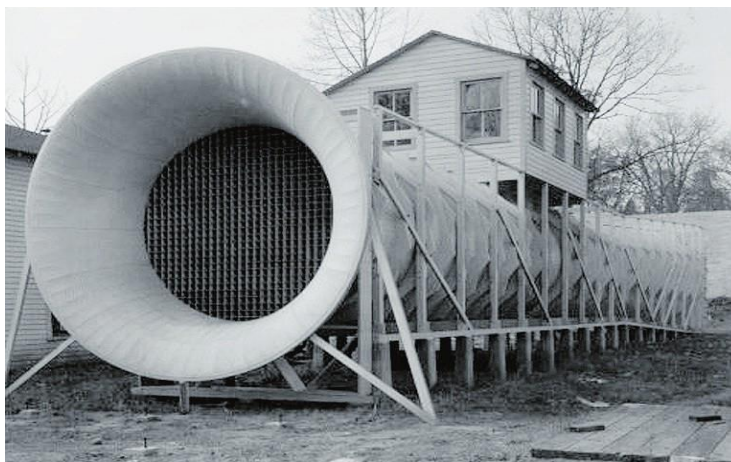


fig. 15 Μοντέλο της αεροσήραγγας του Francis Herbert Wenham.

- **1883:** Ο Osborne Reynolds του Πανεπιστημίου του Manchester μέσα από μια σειρά πειραμάτων με την βοήθεια αεροσήραγγας διαπιστώνει ότι το μοτίβο ροής αέρα ενός μοντέλου υπό κλίμακα θα είναι το ίδιο με αυτό του πραγματικού αντικειμένου εάν κάποια παράμετρος (αριθμός Reynolds αργότερα) διατηρηθεί σταθερή και στις δύο περιπτώσεις.

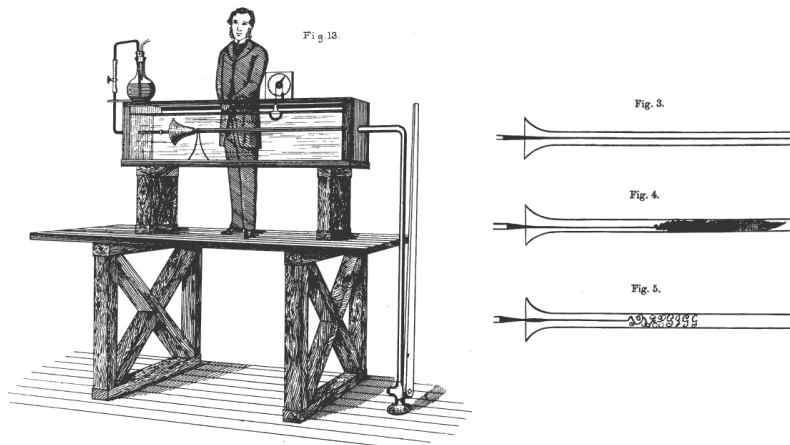


fig. 16 Σκίτσο του Reynolds από την εργασία του.

- **1901:** Οι Αμερικανοί αδελφοί Ράιτ χρησιμοποιώντας μια απλή διάταξη αεροσήραγγας δοκιμάζουν διάφορα μοντέλα αεροπλάνων που τους οδήγησαν στην επαναστατική για την εποχή κατασκευή του Wright Flyer, του πρώτου αεροσκάφους που πέταξε με επιτυχία.

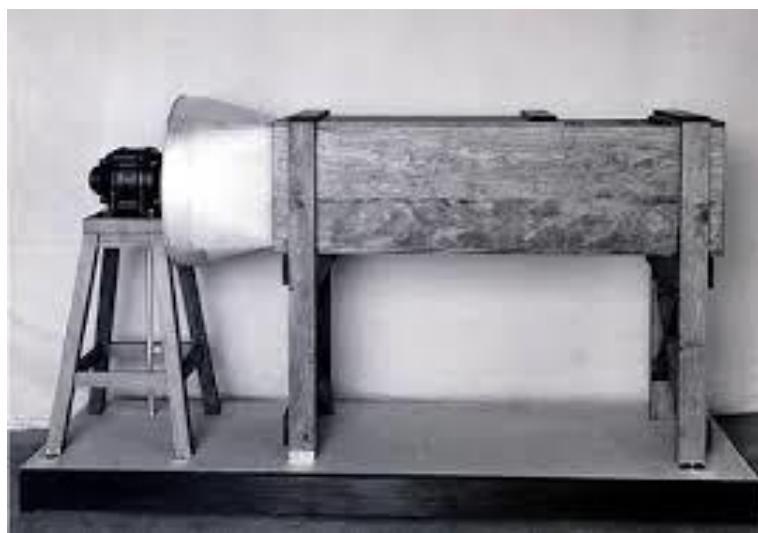


fig. 17 Η αεροσήραγγα των αδελφών Ράιτ.

- **1909:** Ο Gustave Eiffel κατασκεύασε στο Παρίσι μια αεροσήραγγα ανοιχτού τύπου με επιστροφή (open-return low speed wind tunnel) στην οποία πραγματοποίησε πάνω από 4000 πειράματα. Η καινοτομία του ήταν ότι απομόνωσε την περιοχή δοκιμών (test section) σε έναν θάλαμο, τοποθέτησε φίλτρο ευθυγράμμισης ροής στην εισαγωγή (honeycomb) και παρέμβαλε έναν διαχύτη (diffuser) μεταξύ του θαλάμου δοκιμών και του ανεμιστήρα.

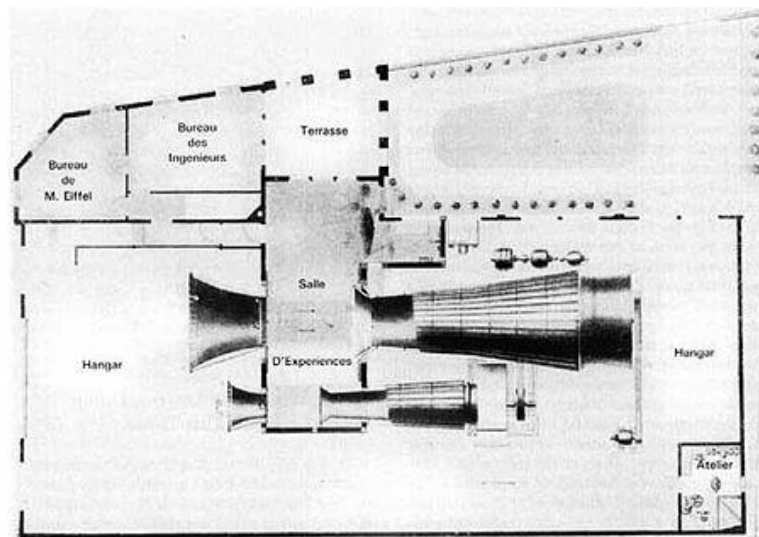


fig. 18 Κάτοψη αεροσήραγγας Eiffel.

- **1916:** Στο πολεμικό ναυτικό της Αμερικής (US Navy) κατασκευάζεται η μεγαλύτερη για την εποχή αεροσήραγγα με διάμετρο 3,4 μέτρα και ανεμιστήρα ισχύος 370KW.

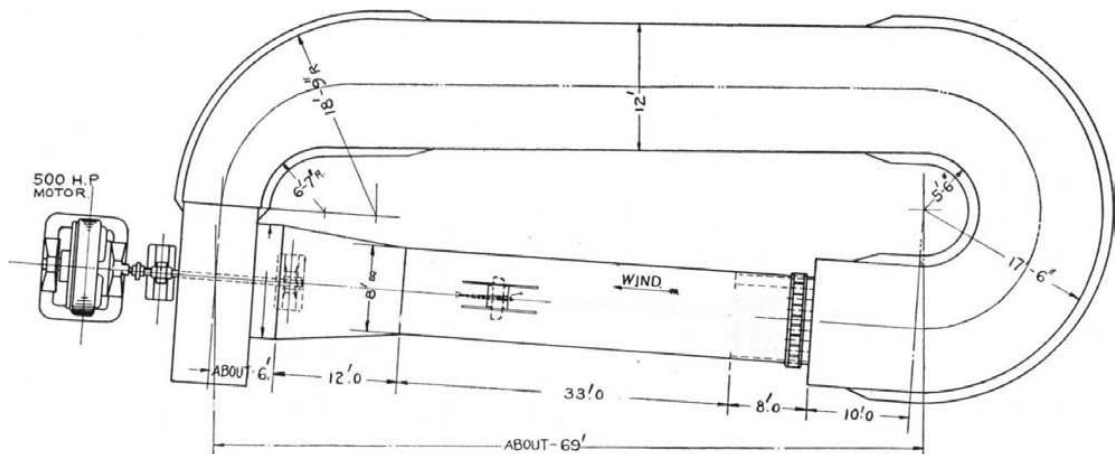


fig. 19 Διάγραμμα της αεροσήραγγας του πολεμικού ναυτικού Αμερικής. Washington, 8 Απριλίου 1916.

- **1931:** Η NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) στην Αμερική κατασκευάζει αεροσήραγγα μεγέθους 9x18 μέτρα στο Ερευνητικό Κέντρο της Βιρτζίνια. Η διάταξη κλειστού τύπου διπλής επιστροφής (closed-loop double return full scale wind tunnel) τροφοδοτείται από δύο ανεμιστήρες ισχύος 2941KW και έχει την δυνατότητα να μετρήσει δυνάμεις ακόμα και σε πραγματικά αεροσκάφη.



fig. 20 Το βομβαρδιστικό αεροσκάφος Curtiss SB2C-4 Helldiver τοποθετείται στην αεροσήραγγα του Langley, Virginia για διερεύνηση της οπισθέλκουσας δύναμης.

- **1941:** Κατασκευάζεται στο Ohio αεροσήραγγα διαμέτρου 14 μέτρων με δύο ανεμιστήρες ισχύος 29827KW που φτάνει ταχύτητες έως και 640χλμ/ώρα.



fig. 21 Εγκαταστάσεις Wright Field Dayton, Ohio USA.

- **1964:** Κατασκευάζεται στην αεροπορική βάση Wright-Patterson οριζόντια αεροσήραγγα και γίνεται η πρώτη πτήση ανθρώπου μέσα σε αυτήν για δοκιμή αλεξιπτωτου από τον Jack Tiffany.



fig. 22 Ο Jack Tiffany στην πρώτη του πτήση σε αεροσήραγγα.

- **1999:** Το Skyventure Orlando ανοίγει τον δρόμο στον ερασιτεχνικό αλεξιπτωτισμό ελεύθερας πτώσεως. Με διάμετρο 3,5 μέτρα και οκταγωνικό σχήμα αποτελεί πηγή διασκέδασης για τους κατοίκους της Φλόριντα. Υστερεί όμως σε έλεγχο κλιματικών συνθηκών επειδή ο αέρας αντλείται από το εξωτερικό περιβάλλον.



fig. 23 Το Skyventure Orlando στο θεματικό πάρκο της Φλόριντα.

Key: Announced Under Construction Open to the Public Privately Operated

Status	Tunnel Name	Country	Size	Opened / Opening	Tunnel Type
	Banner Vertical Wind Tunnel	USA	15.48 (5m)	2014	Recirculating
	CLYMB Abu Dhabi	United Arab Emirates	32ft (9.75m)	2018	Recirculating
	FlyBox	Israel	14ft (4.3m)	December 21st, 2016	Recirculating
	Freezone I	Russia	12ft (3.7m)	2007	Recirculating
	Freezone II	Russia	16.4ft (5m)	2009	Recirculating
	IFLY Adelaide	Australia	12ft (3.7m)	2017	Recirculating
	IFLY Atlanta	USA	14ft (4.3m)	November 2016	Recirculating
	IFLY Austin	USA	14ft (4.3m)	2013	Recirculating
	IFLY Baltimore	USA	14ft (4.3m)	Aug 3rd, 2016	Recirculating
	IFLY Basingstoke	United Kingdom	14ft (4.3m)	2013	Recirculating
	IFLY Brasilia	Brazil	12ft (3.7m)	February 2016	Recirculating
	IFLY Bristol	United Kingdom	14ft (4.3m)	2017	Recirculating
	IFLY Chicago Lincoln Park	USA	19ft (5.7m)	March 2016	Recirculating
	IFLY Chicago Naperville	USA	14ft (4.3m)	2014	Recirculating
	IFLY Chicago Rosemont	USA	14ft (4.3m)	2014	Recirculating
	IFLY Cincinnati	USA	N/A	2017	Recirculating
	IFLY Dallas	USA	14ft (4.3m)	2013	Recirculating
	IFLY Denver	USA	12ft (3.7m)	2008	Recirculating
	IFLY Dooenunder	Australia	15.48 (5m)	2014	Recirculating
	IFLY Dubai I and II	United Arab Emirates	10ft (3.1m)	2010	Recirculating
	IFLY Fort Lauderdale	USA	14ft (4.3m)	February 2017	Recirculating
	IFLY Fort Worth	USA	12ft (3.7m)	October 2016	Recirculating
	IFLY Gold Coast	Australia	12ft (3.7m)	February 2016	Recirculating
	IFLY Hollywood	USA	10ft (3.1m)	2007	Recirculating
	IFLY Houston Memorial	USA	14ft (4.3m)	2015	Recirculating
	IFLY Houston Woodlands	USA	14ft (4.3m)	2015	Recirculating
	IFLY Jihua Park	China	14ft (4.3m)	October 2016	Recirculating
	IFLY Kansas City	USA	14ft (4.3m)	Early 2016	Recirculating

fig. 24 Λίστα με μερικές από τις πιο υπερσύγχρονες οριζόντιες αεροσήραγγες για Indoor Skydiving.

- **2014:** Στις Καναδικές εγκαταστάσεις GE and StandardAero’s Winnipeg ολοκληρώνεται η αεροσήραγγα διαμέτρου 15 μέτρων που καταλαμβάνει συνολικό χώρο 11380 τετραγωνικά μέτρα και τροφοδοτείται από 7 ανεμιστήρες ισχύος 186KW έκαστος. Η αεροσήραγγα περιλαμβάνει 125 ακροφύσια υψηλής πίεσης που ψεκάζουν νερό και έλεγχο κλιματικών συνθηκών για να κατεβάξει την θερμοκρασία στους -20°C . Η αεροσήραγγα χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθεί το φαινόμενο σχηματισμού πάγου σε κινητήρες αεροσκαφών με την βοήθεια κάμερας υψηλής ταχύτητας και να διαπιστωθεί εάν αυτά είναι ασφαλή.



fig. 25 Ο κινητήρας του επιβατικού αεροσκάφους GENX κατά την διάρκεια της δοκιμής του στην αεροσήραγγα του Καναδά.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι παρόλο που πλέον υπάρχει η δυνατότητα ψηφιακής προσομοίωσης ροής μέσω διαφόρων λογισμικών (CFD), οι αεροσήραγγες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Αυτό συμβαίνει διότι τα αποτελέσματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής δεν είναι πάντα αξιόπιστα και είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν όλες οι παράμετροι του φυσικού προβλήματος. Έτσι χρησιμοποιούνται οι αεροσήραγγες για να τα επαληθεύσουν.

6. Κατηγορίες αεροσήραγγων

Ανάλογα με την ταχύτητα του ρευστού:

- Χαμηλής ταχύτητας αεροσήραγγες (Low Speed Wind Tunnels)
- Υψηλής ταχύτητας αεροσήραγγες (High speed Wind Tunnels)
- Υπερηχητικές αεροσήραγγες (Supersonic Wind Tunnels 1,2-5 Mach)
- Υπερηχητικές αεροσήραγγες (Hypersonic Wind Tunnels 5-15 Mach)
- Υποχητικές αεροσήραγγες (Subsonic Wind Tunnels 0,4-0,75 Mach)
- Διηχητικές αεροσήραγγες (Trasonic Wind Tunnels 0,75-1,2 Mach)

Ανάλογα με το μήκος και διάμετρο τους:

- Μικρές
- Μεσαίες (Model Wind Tunnels)
- Μεγάλες (Full Scale Wind Tunnels)

Ανάλογα με τον τρόπο κυκλοφορίας του ρευστού:

- **Ανοιχτού τύπου αεροσήραγγες** (Open Circuit Wind Tunnels, Eiffel Type Wind Tunnels)

Πλεονεκτήματα:

1. Χαμηλό κόστος κατασκευής
2. Κατάλληλες για δοκιμή μηχανών εσωτερικής καύσης
3. Τροποποιούνται εύκολα

Μειονεκτήματα:

1. Εάν βρίσκονται μέσα σε κλειστό χώρο ενδέχεται να χρειαστεί ενίσχυση στην εισαγωγή αέρα για καλύτερης ποιότητας ροή.
2. Είναι θορυβώδεις, μπορεί να προκαλέσουν περιβαλλοντικά προβλήματα και έχουν μικρότερη διάρκεια λειτουργίας.

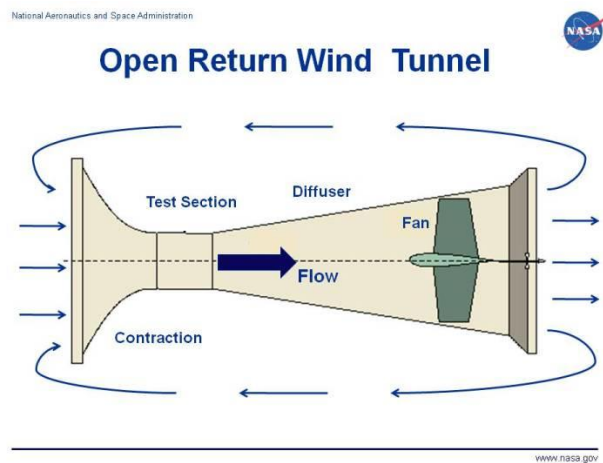


fig. 26 Αεροσήραγγα ανοιχτού τύπου.

- **Κλειστού τύπου αεροσήραγγες** μονής ή διπλής επιστροφής (Closed single or Double Return Wind Tunnels)

Πλεονεκτήματα:

1. Λόγω των γωνιών που σχηματίζει η διάταξη είναι εύκολος ο έλεγχος της ποιότητας ροής.
2. Λιγότερη απαιτούμενη ισχύς.
3. Λιγότερος θόρυβος κατά την λειτουργία.

Μειονεκτήματα:

1. Μεγαλύτερο κόστος κατασκευής.
2. Δυσκολότερο καθάρισμα σε περίπτωση οπτικοποίησης ροής με καπνό.
3. Δυσκολότερη ψύξη αέρα.

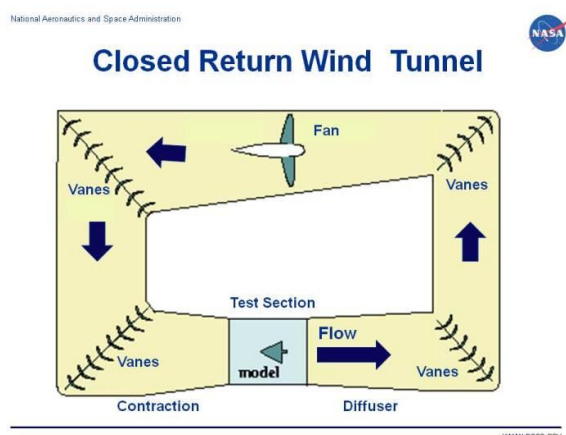


fig. 27 Αεροσήραγγα κλειστού τύπου

Ανάλογα τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκαν:

- Αεροσήραγγες μέτρησης δυνάμεων
- Αεροσήραγγες VDT για υψηλό αριθμό Reynolds (Variable Density Tunnels)
- Αεροσήραγγες ελεύθερης πτήσης (Free Flight Tunnels)
- Αεροσήραγγες ελέγχου στροβιλισμών (Spin Tunnels)
- Αεροσήραγγες μελέτης σχηματισμού πάγου (Ice Tunnels)
- Αεροσήραγγες Μετεωρολογικού τύπου (Meteorological-Environmental Tunnels)
- Αεροσήραγγες Αυτοκινητοβιομηχανίας (Automobile Tunnels)
- Αεροσήραγγες Οπτικοποίησης Ροής (Air Flow Visualization Tunnels) ➡

Μέσω:

- Καπνού (Smoke Flow Visualization)

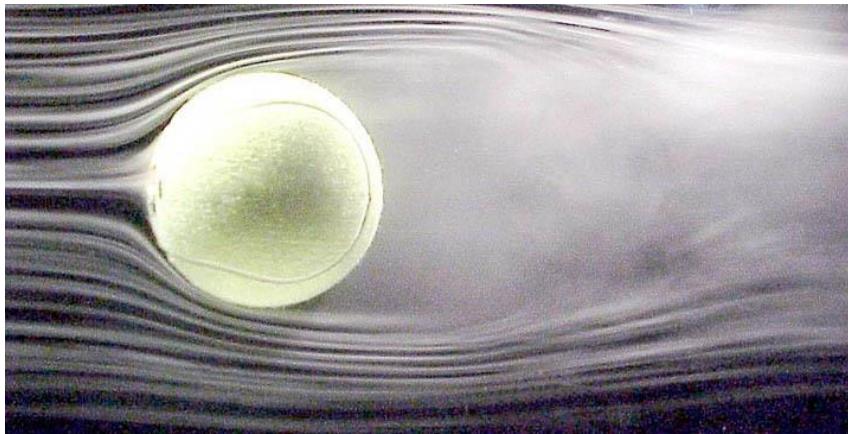


fig. 28 Οπτικοποίηση ροής μέσω καπνού. Ο καπνός παράγεται είτε με την καύση διαφόρων ουσιών όπως γλυκερίνη, ισοπροπυλική γλυκόλη κτλ, είτε με την εξάτμιση νερού είτε με χημική μέθοδο χρησιμοποιώντας τετραχλωρίδιο τιτανίου, μίγμα άνυδρης αμμωνίας κτλ.

-Ινών (Tuft Flow Visualization)

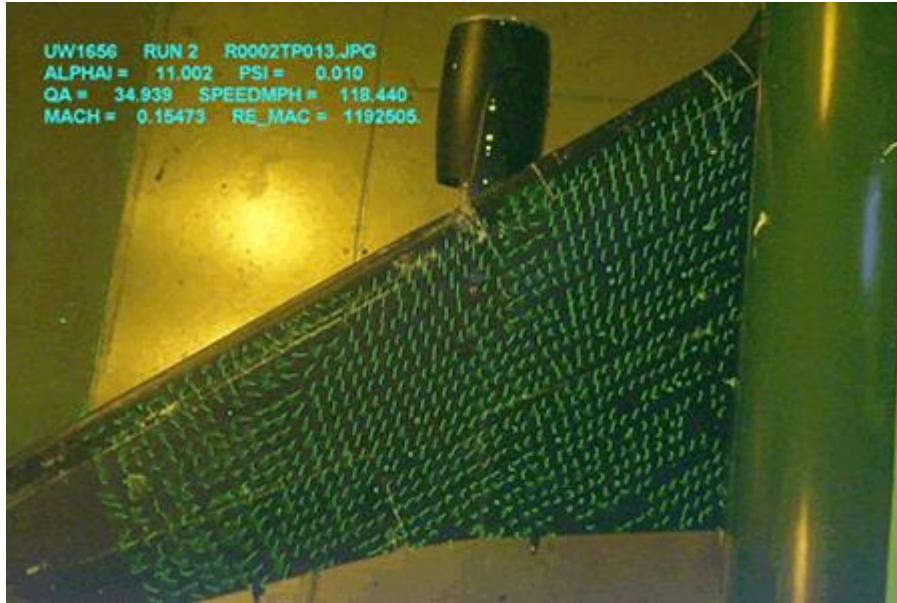


fig. 29 Οπτικοποίηση ροής μέσω ινών. Οι ίνες προσαρμόζονται πάνω στην εξεταζόμενη γεωμετρία και ανάλογα με την ροή του αέρα παίρνουν κλίση.

-Ελαίου (Oil Flow Visualization)

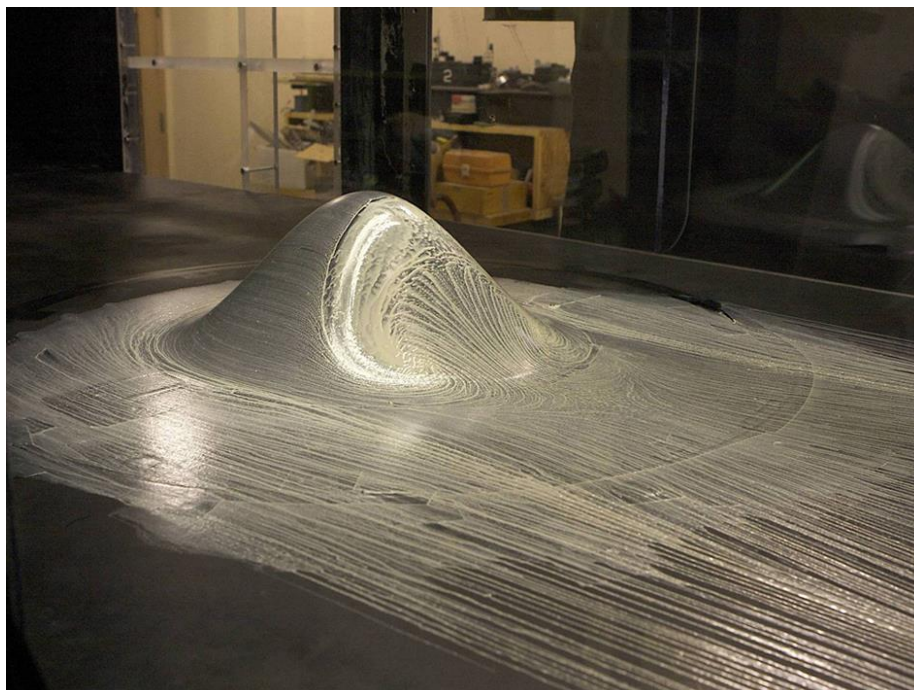


fig. 30 Οπτικοποίηση ροής μέσω ελαίου. Όταν το έλαιο εφαρμόζεται στην εξεταζόμενη επιφάνεια, μπορεί να φανεί η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

-Πηλού (China Clay Flow Visualization)



fig. 31 Ο πηλός πάνω στην γεωμετρία λειτουργεί όπως το έλαιο.

7. Μέρη της αεροσήραγγας

Μια τυπική διάταξη αεροσήραγγας (πλην μεμονωμένων περιπτώσεων) αποτελείται από τα εξής μέρη:

- **Σύστημα Οδήγησης Ρευστού (Drive System):** Το σύστημα οδήγησης ρευστού καθορίζει με ποιόν τρόπο θα οδηγηθεί το ρευστό στον θάλαμο δοκιμών. Αποτελείται συνήθως από έναν ανεμιστήρα και έναν συμπιεστή. Το ρευστό που αποθηκεύεται σε φιάλες οδηγείται στον συμπιεστή και κατόπιν στον ανεμιστήρα ο οποίος το διοχετεύει στον θάλαμο δοκιμών. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας ανεμιστήρες ή ένας ανεμιστήρας φυγοκεντρικού τύπου που οδηγεί προς τα μέσα ή ‘τραβάει’ προς τα έξω το ρευστό. Στην περίπτωση που υπάρχει συμπιεστής στην διάταξη, η διάρκεια λειτουργίας της αεροσήραγγας εξαρτάται από το μέγεθος της φιάλης του συμπιεστή, πράγμα το οποίο περιορίζει την χρήση της και την διάρκεια του πειράματος σε μερικά μόλις λεπτά. Αντίθετα οι ανεμιστήρες όταν χρησιμοποιούνται σκέτοι, εξασφαλίζουν συνεχή παροχή ροής μάζας αέρα, απαιτούν όμως περισσότερη ισχύ για να εξασφαλίσουν την απαιτούμενη πίεση. Συνεπώς καθοριστικό ρόλο για την διάταξη παίζει η ισχύς του ανεμιστήρα, προκειμένου να υπάρχει ικανοποιητική ταχύτητα ρευστού. Η μέτρηση της ταχύτητας μπορεί να διεξαχθεί εύκολα, είτε με την μέτρηση μέσω σωλήνα Pitot, είτε με ανεμόμετρο.



fig. 33 Σωλήνα Pitot 360mm.



fig. 32 Ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας της General Motors στο Michigan με διάμετρο 13 μέτρα, ταχύτητα ανέμου 200km/h και ισχύ 3335KW που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα.



fig. 34 Ψηφιακό ανεμόμετρο.

- **Εργαζόμενη ουσία (Operating Fluid):** Στις αεροσήραγγες συνήθως το εργαζόμενο ρευστό είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Σε ειδικές περιπτώσεις όπου χρειάζεται να μεταβληθούν οι ιδιότητες του ρευστού (όπως στις αεροσήραγγες μελέτης σχηματισμού πάγου πάνω σε κινητήρες αεροσκαφών), χρησιμοποιείται και σύστημα ψύξης. Κρυογονικά συστήματα χρησιμοποιούνται επίσης για να μεταβάλλουν το ιξώδες του ρευστού και κατά συνέπεια να επιτευχθεί συγκεκριμένος αριθμός Reynolds. Σε ακόμα πιο ειδικές περιπτώσεις (όπως στις δοκιμές υποβρυχίων) το ρευστό είναι υγρό και η αεροσήραγγα πλήρως στεγανοποιημένη ώστε να μην υπάρχουν διαρροές.
- **Συστολή-Εισαγωγή (Contraction cone):** Η εισαγωγή τοποθετείται απευθείας μετά τον ανεμιστήρα εάν δεν παρεμβάλλεται μεταξύ τους κάποιο φίλτρο σωματιδίων σκόνης. Σκοπός της είναι να επιταχύνει και να εξομαλύνει τη ροή. Έχει τετράγωνο, κυκλικό, ορθογώνιο ή οκταγωνικό σχήμα που αναπτύσσεται κατά μήκος κωνικά. Ο καθορισμός της γεωμετρίας της είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία ιδιαίτερα πριν την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό συμβαίνει επειδή θέλουμε αφενός μεν μεγάλο μήκος εισαγωγής ώστε να προλαμβάνεται όσο είναι δυνατόν η εμφάνιση στρώματος υποπίεσης (presence of adverse pressure gradient κατά G.E

Chmielewski) που οδηγεί στον διαχωρισμό των οριακών στρωμάτων (boundary layer separation κατά Stratford), αφετέρου δε μικρό μήκος που να μην κοστίζει αρκετά και να μην επηρεάζει την ομοιομορφία των οριακών στρωμάτων.

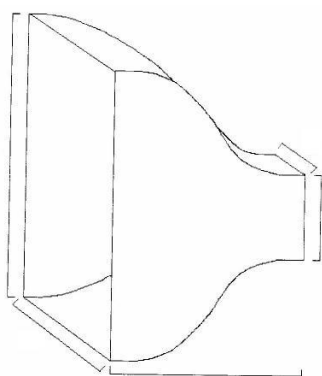


fig. 35 Τετράγωνη εισαγωγή.

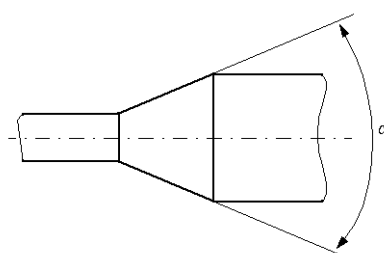


fig. 37 Ορθογώνια εισαγωγή.

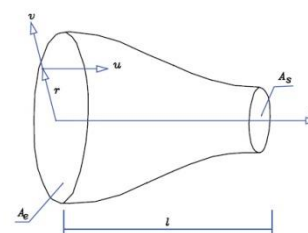


fig. 36 Κυκλικη εισαγωγή.

- **Ευθυγραμμιστές ροής (Flow conditioners, Honeycombs):** Τοποθετούνται μετά την εισαγωγή και σκοπός τους είναι να ευθυγραμμίζουν περαιτέρω την ροή. Δεν αποτελούν κάποιο πολύπλοκο εξάρτημα και έχουν κυκλικό, τετράγωνο ή εξαγωνικό σχήμα. Σε λιγότερο εξειδικευμένες και μικρές ιδιοκατασκευές, συνήθως κατασκευάζονται από πλαστικά σωληνάκια ή καλαμάκια για ροφήματα.

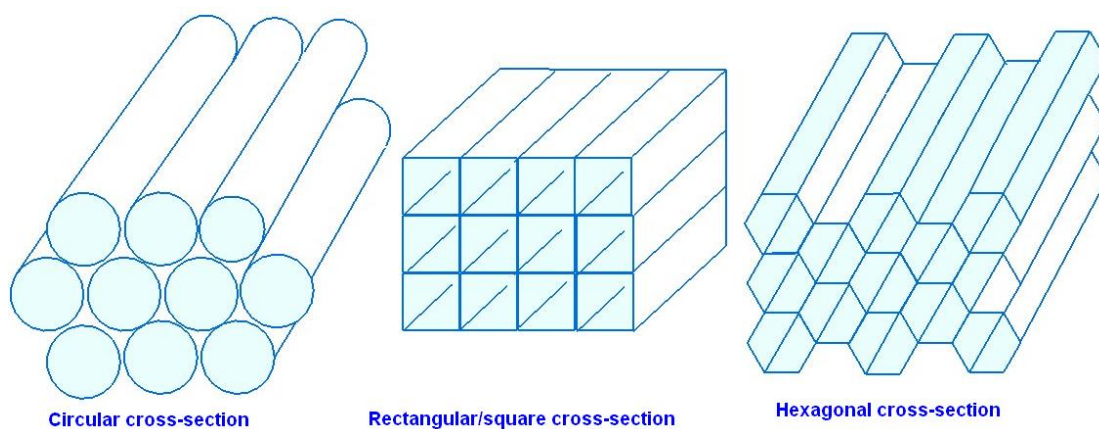


fig. 38 Ευθυγραμμιστές κυκλικού, τετράγωνου και εξαγωνικού σχήματος.



fig. 39 Ιδιοκατασκευή ευθυγραμμιστή ροής.

- **Θάλαμος δοκιμών (Test section-Observation Window):** Αποτελεί το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί η εξεταζόμενη γεωμετρία και έχει συνήθως ορθογώνιο σχήμα. Πρέπει να μην έχει διαρροές, να εμφανίζει ομοιόμορφη ροή και τον επιθυμητό αριθμό Reynolds. Μπορεί να είναι ένα ανοιχτό κομμάτι μεταξύ εισαγωγής και εξαγωγής ή ένας κλειστός θάλαμος. Στις ακουστικές μετρήσεις ένας ανοιχτός θάλαμος δίνει καθαρότερα σήματα που δεν επηρεάζονται από τον θόρυβο των δινών. Στις μετρήσεις πραγματικών διαστάσεων αντικειμένων ένας κλειστός θάλαμος δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Σε πειράματα που περιλαμβάνουν βιντεοσκόπηση, ο θάλαμος δοκιμών κατασκευάζεται από διαφανές υλικό (γυαλί, plexiglass) διότι αποφεύγεται να τοποθετείται κάμερα μέσα στον θάλαμο δοκιμών. Σε αυτήν την περίπτωση επίσης τοποθετείται διακριτικός φωτισμός μέσα στο θάλαμο, ο οποίος συγκεντρώνεται στο εξεταζόμενο αντικείμενο.

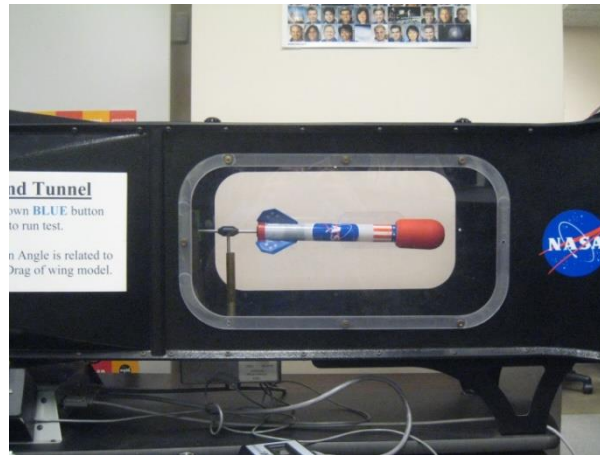


fig. 40 Θάλαμος δοκιμών σε μικρή αεροσήραγγα.

- Εξαγωγή-Διαχύτης (Diffuser):** Τοποθετείται μετά τον θάλαμο δοκιμών και ρόλος του είναι να βοηθάει το ρευστό να εξέλθει από την αεροσήραγγα χωρίς να δημιουργείται επιστροφή και δίνες. Εάν η αεροσήραγγα είναι κλειστού τύπου, τοποθετείται διαχύτης πριν από κάθε γωνία. Γενικά οι διαχύτες έχουν κωνικό σχήμα και μοιάζουν με την Συστολή-Εισαγωγή. Σημαντικό ρόλο παίζει η κλίση που θα έχουν έτσι ώστε το ρευστό να μην αλλάζει κατεύθυνση απότομα και διαχωρίζονται τα οριακά του στρώματα (boundary layers). Ένας γενικός κανόνας λέει ότι η γωνία αυτή πρέπει να είναι από 5-10 μοίρες με την επικρατέστερη επιλογή να είναι οι 7°.

“The current practice uses an equivalent cone angle of 7° or less; however, the cone angle also depends on the area ratio and the area ratio determines the pressure recovery and pressure gradients, and, hence, the risk of separation.”

J. M. Robertson and H. R. Fraser, Separation Prediction for Conical Diffusers, Transactions ASME, Series D82, 201, 1960.

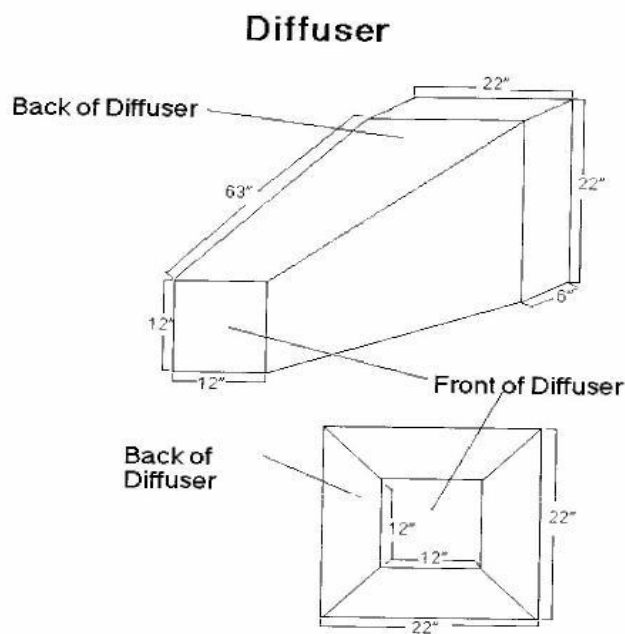


fig. 41 Τυπικός διαχύτης.

8. Σχεδιομελέτη (2-D and 3-D Drawings)

Μετά από αλληπάλληλα σκαριφήματα που προέκυψαν από υπολογισμούς για τις διαστάσεις της αεροσήραγγας, ακολούθησαν διάφορα 3-Δ σχέδια σε υπολογιστή με την βοήθεια του προγράμματος Solidworks 2010. Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούσαν κυρίως το συνολικό μήκος της αεροσήραγγας και την γωνία κλίσης της εισαγωγής (Contraction) και της εξαγωγής (Diffuser).

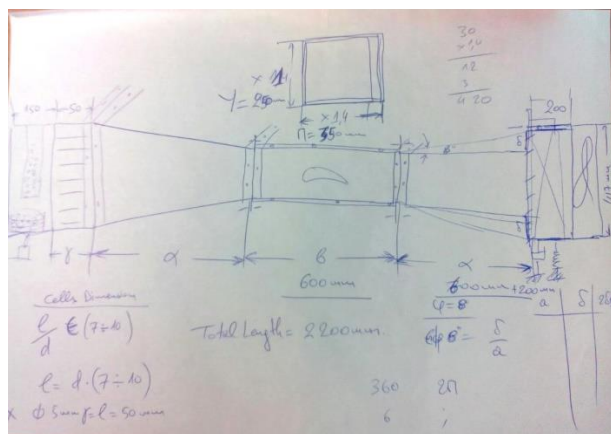


fig. 42 Σκαρίφημα αεροσήραγγας.

	A	B	C	D	E	F
1	φ	rad->deg	tanφ	δ	2δ	2δ+Υ
2	6	0,104667	0,105051	63,03034	126,0607	376,0607
3	7	0,122111	0,122722	73,63301	147,266	397,266
4	8	0,139556	0,140469	84,28119	168,5624	418,5624
5	9	0,157	0,158303	94,98169	189,9634	439,9634
6	10	0,174444	0,176236	105,7415	211,4829	461,4829

fig. 43 Υπολογισμός ύψους εισαγωγής και εξαγωγής με γνωστά γωνία κλίσης φ, μήκος α και ύψος ορθογωνίου γ.

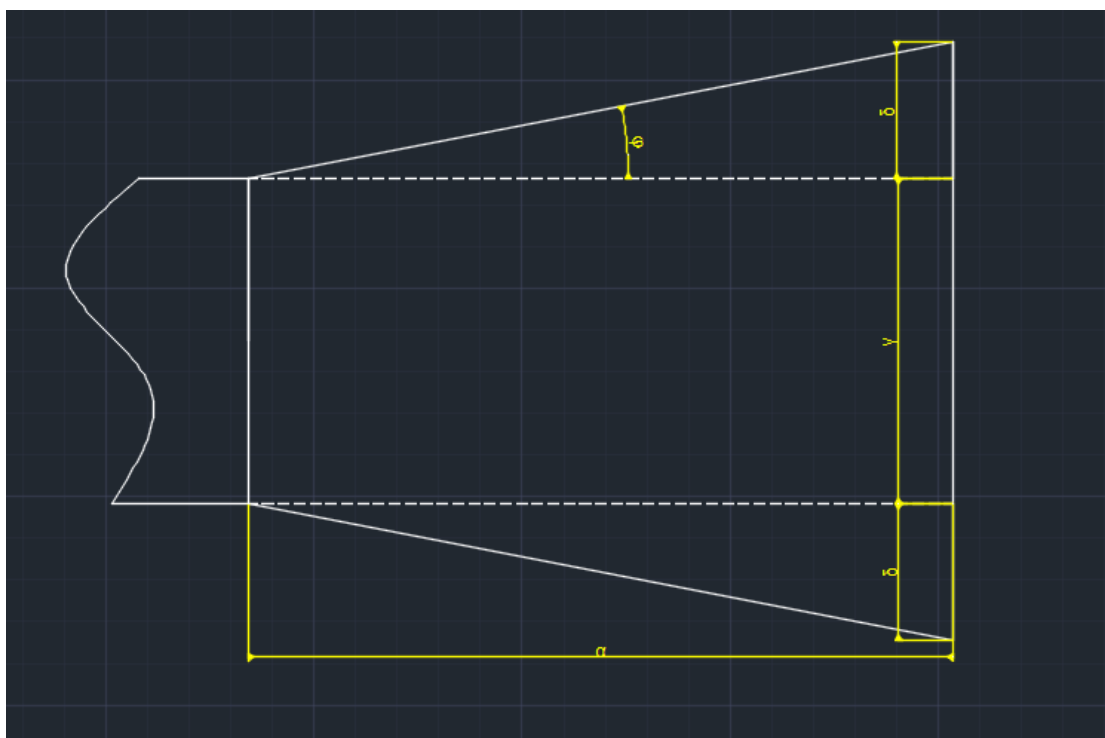


fig. 44 Σχηματική επεξήγηση συμβόλων που αναφέρονται στον πίνακα του fig.42.

Έστω ότι η γωνία φ θέλουμε να έχει τιμές $\phi=6^\circ \sim 10^\circ$.

$$\rightarrow \phi = \frac{\varphi \cdot \pi}{180} \text{ [rad]} \quad (\text{Μετατροπή σε ακτίνια})$$

Με γνωστό μήκος α:

$$\rightarrow \tan\phi = \frac{\delta}{\alpha} \quad (\text{Υπολογισμός τριγωνομετρικού αριθμού})$$

Συνεπώς:

$$\rightarrow \delta = \tan\phi \cdot \alpha \text{ [mm]} \quad (\text{Υπολογισμός πλευράς δ σε χιλιοστά})$$

Άρα το συνολικό ύψος της εισαγωγής είναι:

$$\rightarrow l = 2 \cdot \delta + \gamma \quad (\text{Εύρεση ύψους εισαγωγής})$$

Παράλληλα σχεδιάστηκαν και κάποιες δοκιμαστικές γεωμετρίες για την εισαγωγή (Contraction Intake Funnel) που ήταν όμως δύσκολο να κατασκευαστούν στην πραγματικότητα λόγω των καμπυλών τους.

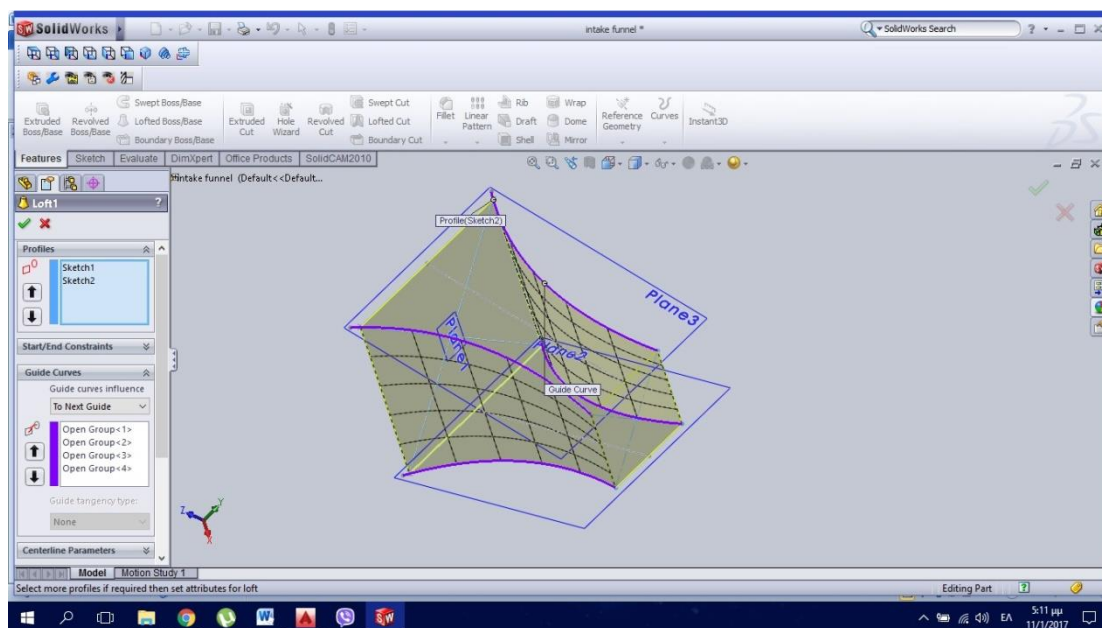


fig. 45 Σχεδίαση εισαγωγής στο Solidworks μέσω της εντολής Loft με οδηγητικές καμπύλες (Guide Curves).

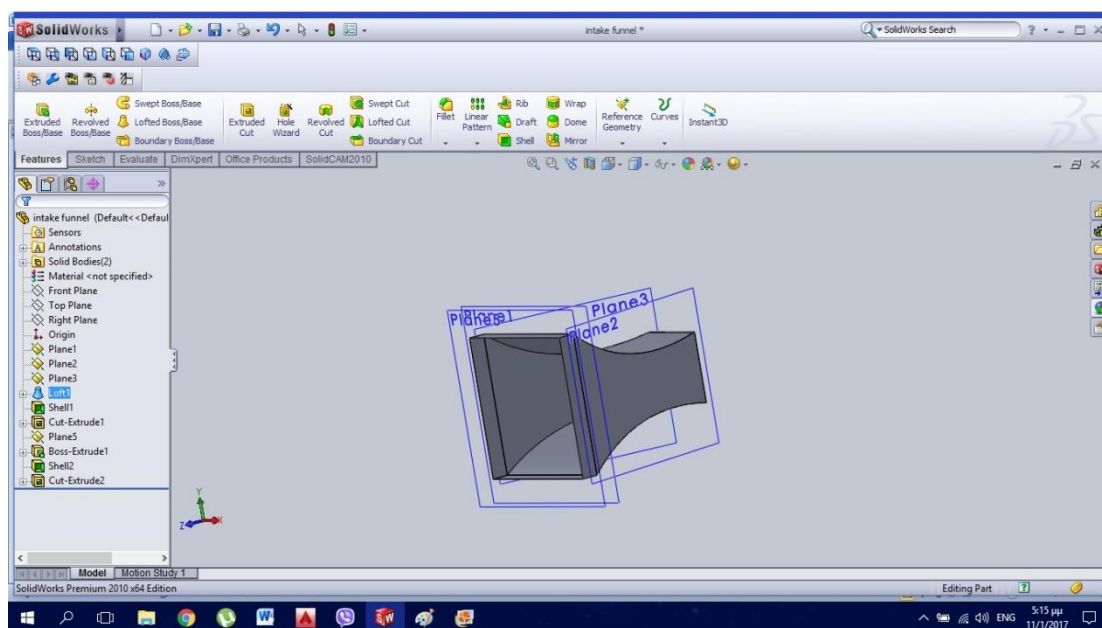


fig. 46 Ολοκλήρωση σχεδίου fig.44. Η συγκεκριμένη εισαγωγή προορίζεται για αεροσήραγγα μήκους περίπου 5 μέτρα.

“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”

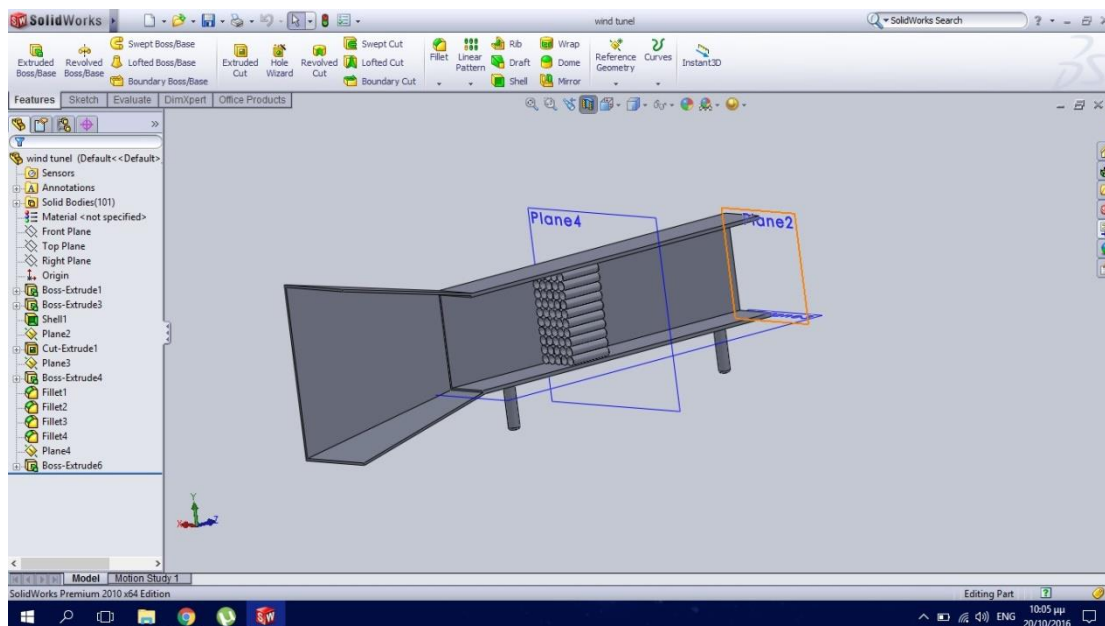


fig. 47 Ακόμα ένα προσχέδιο της αεροσήραγγας. Το φίλτρο ευθυγράμμισης ροής βρίσκεται σε διαφορετική θέση και τα στοιχεία του έχουν μεγαλύτερη διάμετρο. Η βάση της αεροσήραγγας εδώ έχει σχεδιαστεί επιτραπέζια.

Η τελική γεωμετρία σχεδιάστηκε αρχικά σε 2-Δ με την βοήθεια του προγράμματος AutoCad 2016. Το σχέδιο αυτό βοήθησε αρκετά στο να υπολογιστεί πόσα τετραγωνικά μέτρα ινοσάνιδα MDF χρειάζονται έτσι ώστε να γίνει παραγγελία τυποποιημένης πλάκας MDF και να κοπούν τα κομμάτια χωρίς να υπάρχει αρκετό περίσσειμα (φύρα).

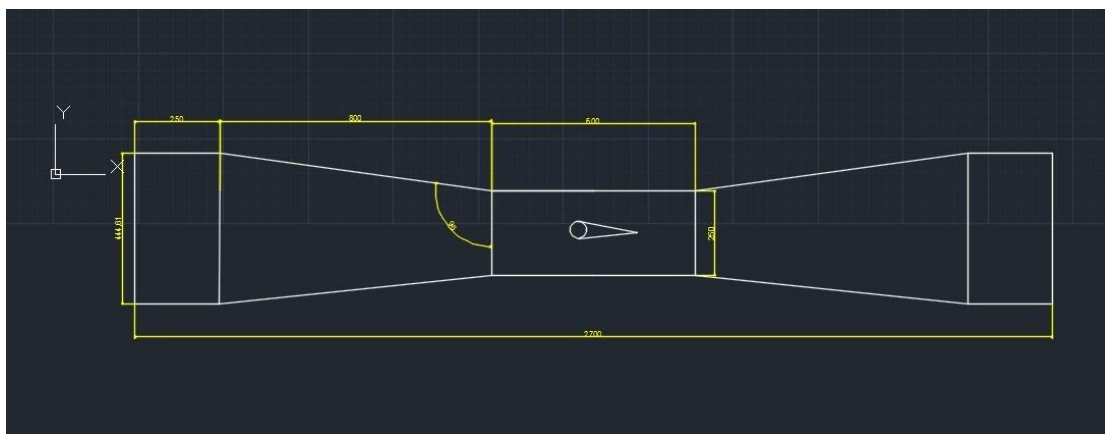


fig. 48 Πρόοψη τελικής γεωμετρίας.

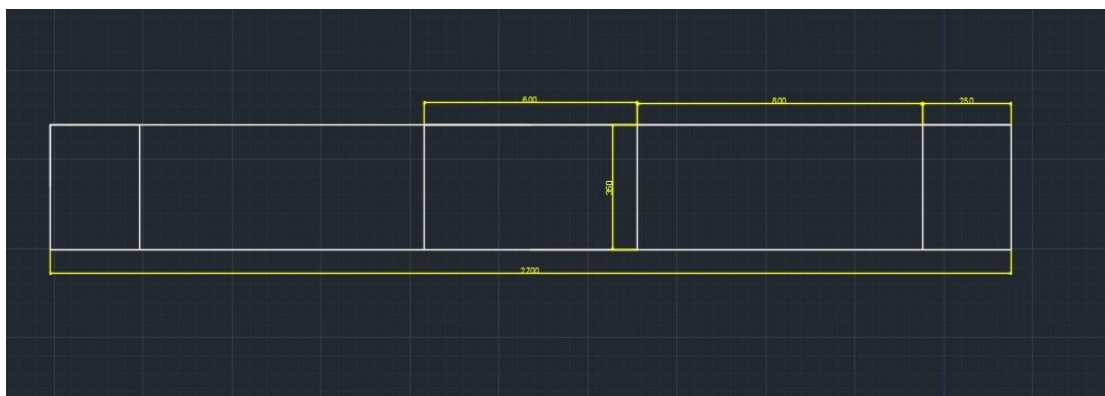


fig. 49 Κάτοψη τελικής γεωμετρίας.

MFD Γυμνά

Διαθέσιμες διαστάσεις:

πάχος / διαστάσεις (mm)	<u>2200x1850</u>	<u>3050x1220</u>	<u>3050x1850</u>	<u>3660x1850</u>
4	€12,31	-	-	-
6	€17,34	-	-	-
7	€20,23	-	-	-
8	-	€20,21	€30,64	-
10	-	€24,37	€36,95	-
12	-	€29,24	€44,34	-
16	-	€36,24	€54,96	€65,24
19	-	€43,04	€65,27	€77,48
22	-	€49,86	€75,60	-
25	-	€60,05	€91,06	-
30	-	€72,08	€109,30	-
38	-	€91,30	-	-

Τιμές φύλλου με ΦΠΑ 23%

fig. 50 Πίνακας με τις διαθέσιμες στο εμπόριο πλάκες MDF.

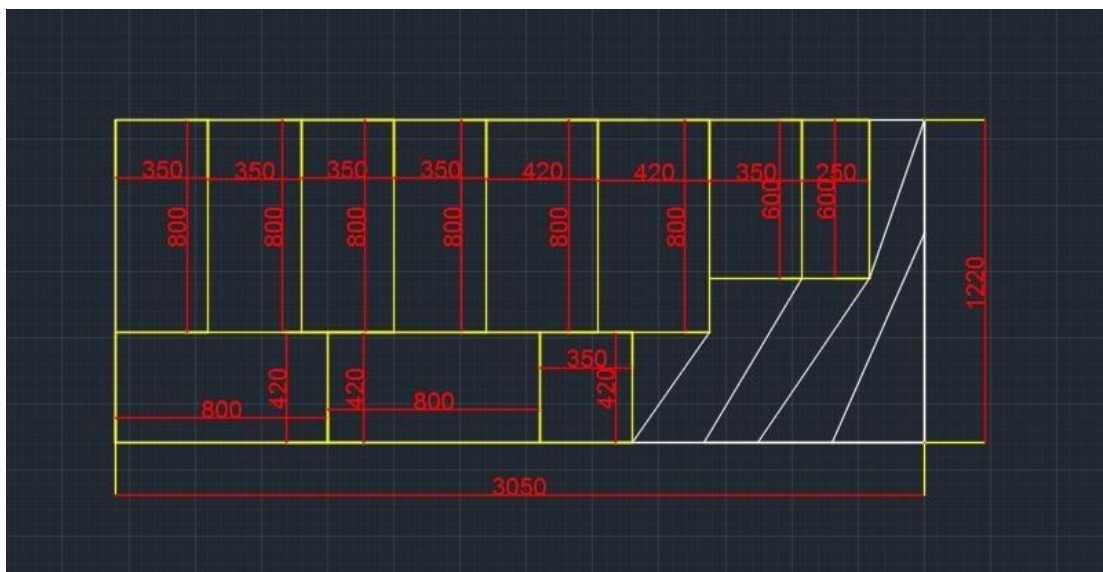


fig. 51 Τοποθέτηση κατά την κοπή για βέλτιστο συντελεστή εκμετάλλευσης του υλικού.

Κατόπιν σχεδιάστηκε το τρισδιάστατο μοντέλο της αεροσήραγγας. Το μοντέλο αυτό είναι συμμετρικό και στους 3 άξονες του και μοιάζει με ένα στοιχείο Venturi. βοήθησε στην αντίληψη της πραγματικής γεωμετρίας πριν την κατασκευή, καθώς και στα πειράματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) που διεξάχθηκαν προκειμένου να αξιολογήσουν την κατασκευή.

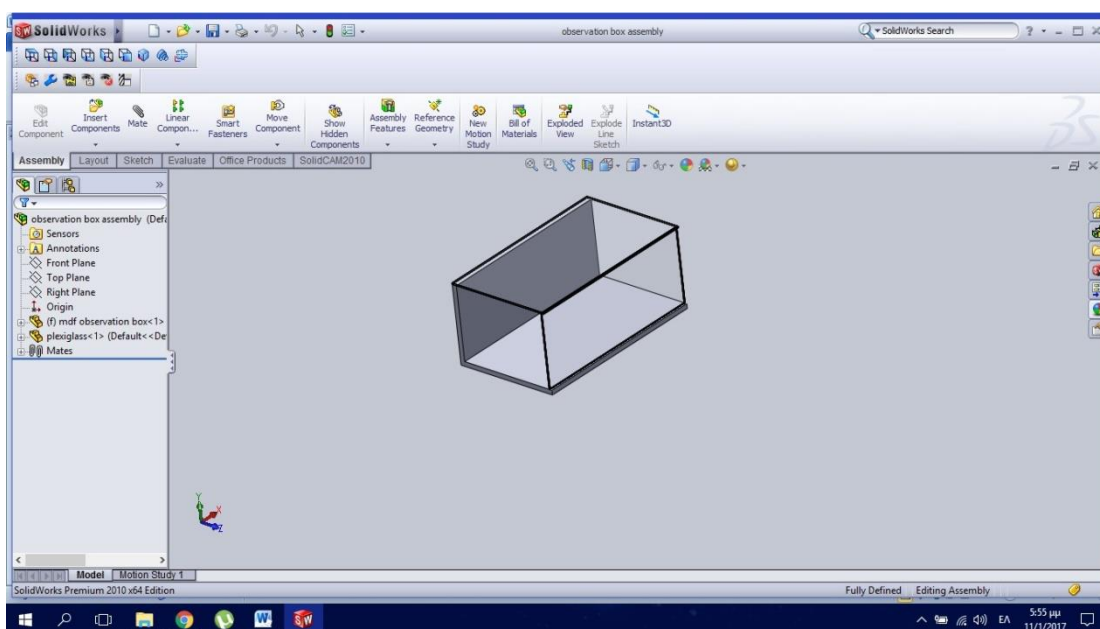


fig. 52 Σχεδιασμός του θαλάμου δοκιμών (Observation Box- Test Section). Οι δύο μπροστινές επιφάνειες έγιναν διαφανείς (εντολή transparency) όπως είναι και στην πραγματικότητα με το plexiglass.

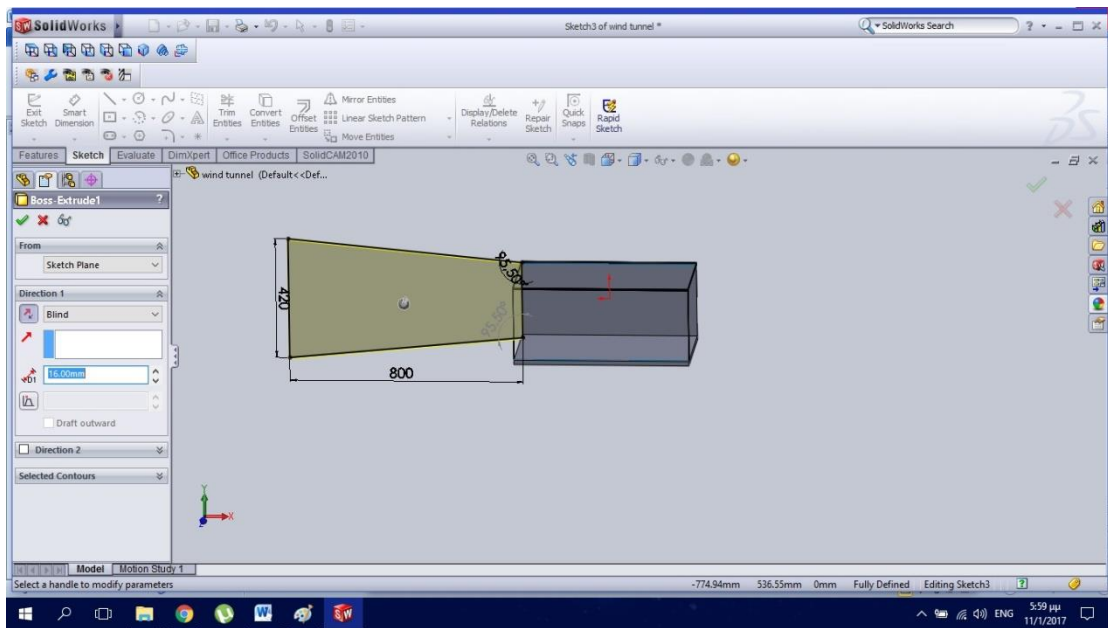


fig. 53 Σχεδιασμός της μιας πλευράς εισαγωγής (Extrude Boss).

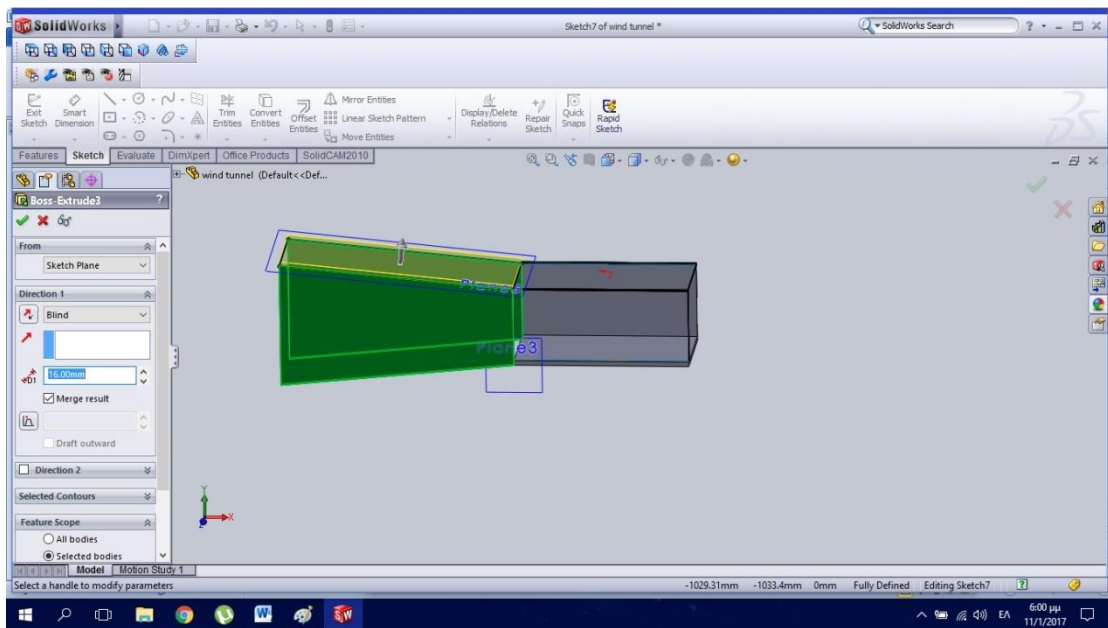


fig. 54 Σχεδιασμός του κώνου εισαγωγής (κάθετο και οριζόντιο Mirror με Midplane).

“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”

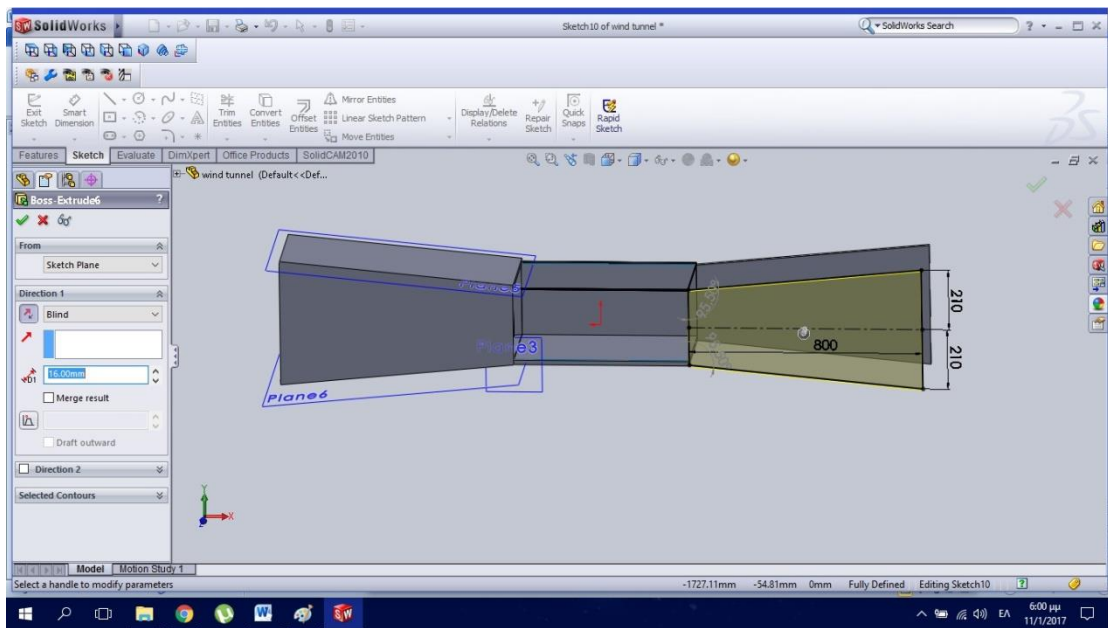


fig. 55 Σχεδιασμός της εξαγωγής με τον ίδιο τρόπο όπως στην εισαγωγή εφόσον η αεροσήραγγα είναι συμμετρική.

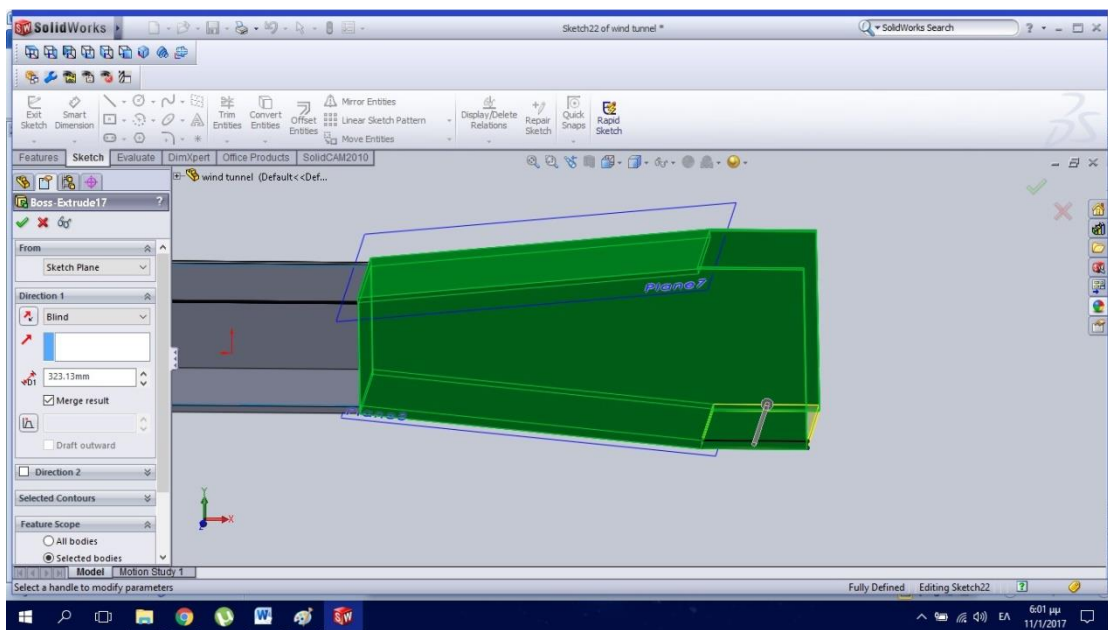


fig. 56 Σχεδιασμός της ορθογωνικής προέκτασης από λαμαρίνα που τοποθετήθηκε δεξιά και αριστερά από την κατασκευή, προκειμένου να 'κουμπώσει' ο ανεμιστήρας στην δεξιά πλευρά και να κατασκευαστεί το φίλτρο ευθυγράμμισης ροής (honeycomb) στην αριστερή.

“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”

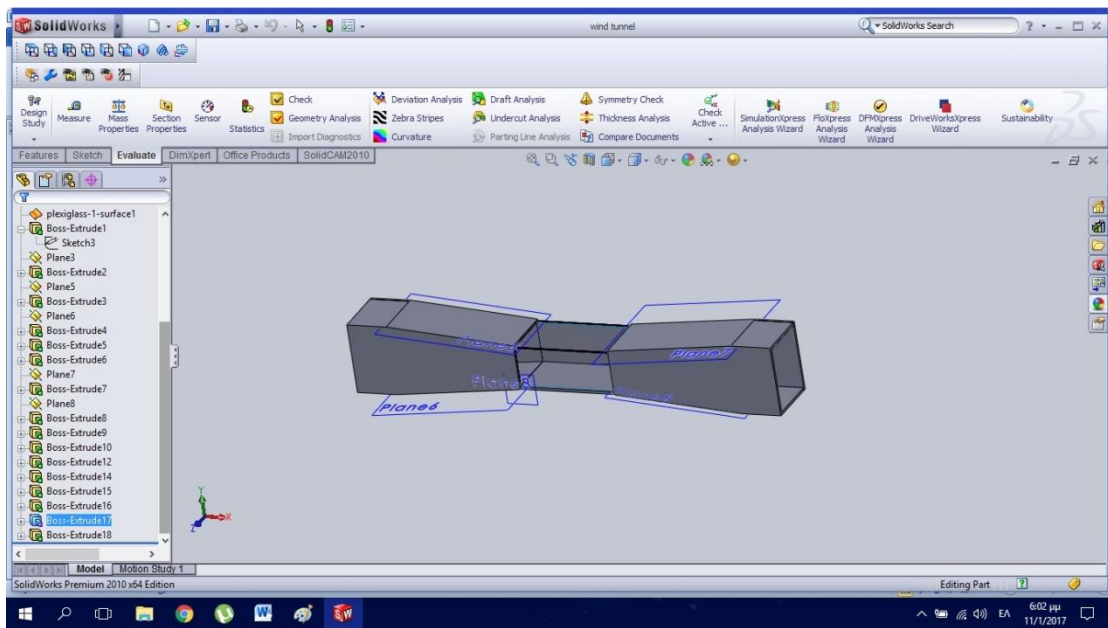


fig. 57 Τελική αεροσήραγγα.

Στην συνέχεια σχεδιάστηκε η επιδαπέδια βάση της αεροσήραγγας, μια συγκολλητή τροχήλατη σιδηροκατασκευή με τετράγωνους και κυκλικούς κοιλοδοκούς.

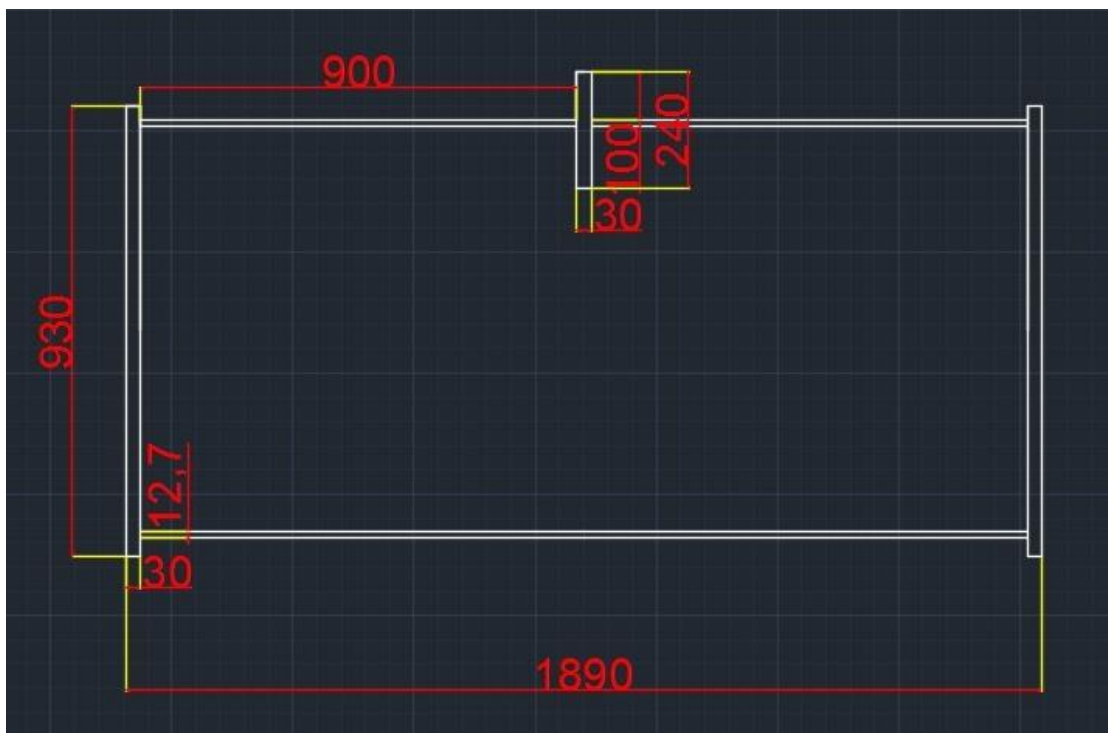


fig. 58 Πρόοψη βάσης αεροσήραγγας σε 2-Δ.

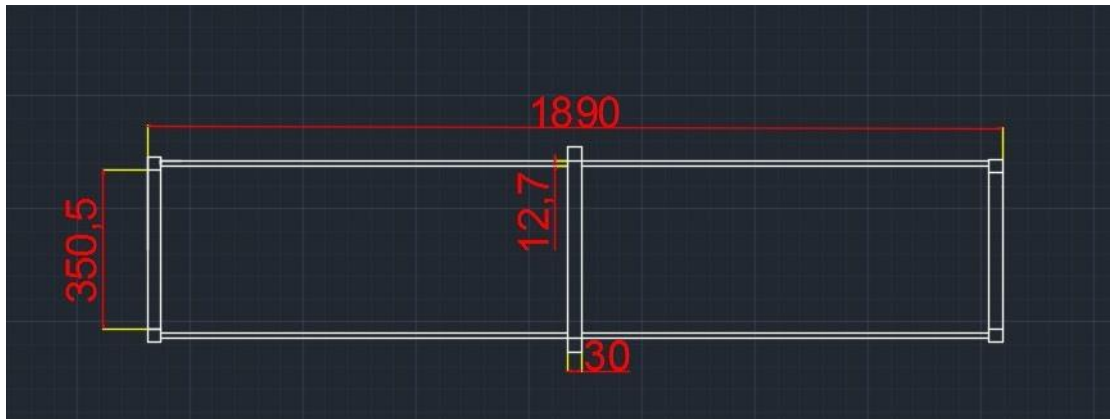


fig. 59 Κάτοψη βάσης αεροσήραγγας σε 2-Δ.

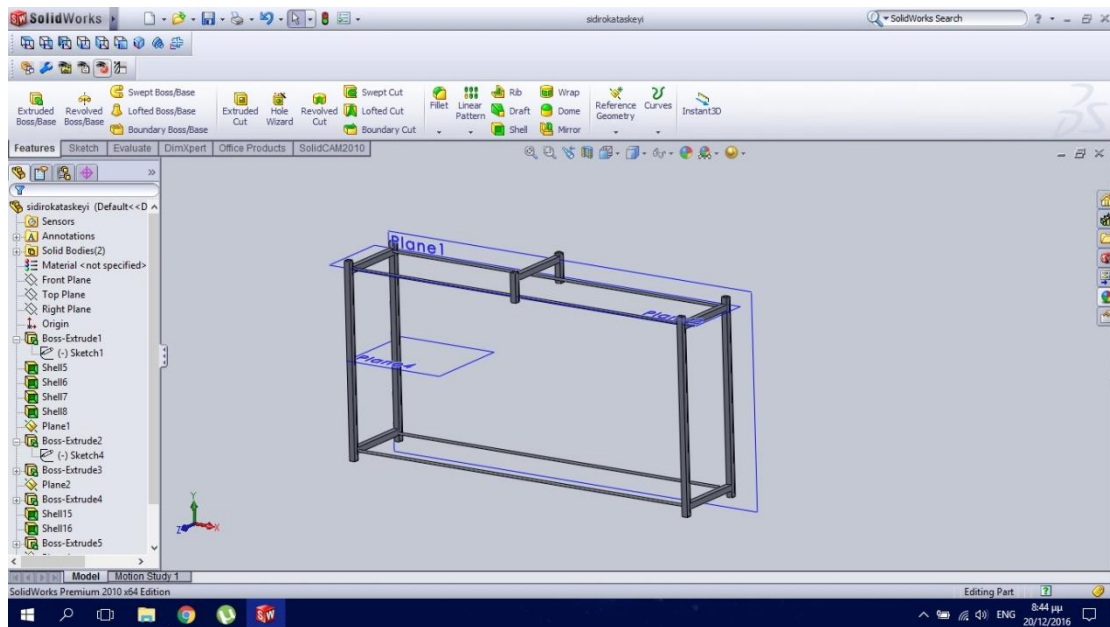


fig. 60 Βάση αεροσήραγγας στο Solidworks. Οι κοιλοδοκοί σχεδιάστηκαν με τις εντολές Extruded Boss/Base και Shell.

Τέλος, έγινε η συναρμολογημένη διάταξη (Assembly) αεροσήραγγας και βάσης στο Solidworks .

“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”

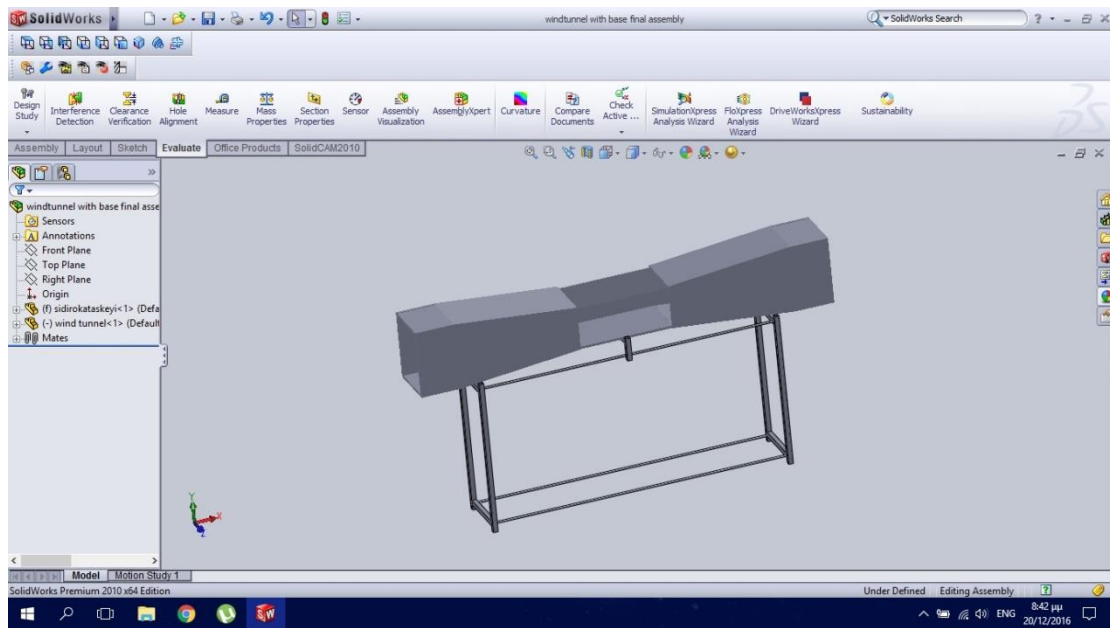


fig. 61 Συναρμολόγηση σχεδίου με την εντολή mate.

9. Κατασκευή (Actual Construction)

Εφόσον συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα υλικά και εργαλεία, ξεκίνησε η κατασκευή της αεροσήραγγας στον χώρο του Μηχανουργείου του ΤΕΙ Σερρών. Η κατασκευή διήρκεσε περίπου 1 εβδομάδα (λόγω περιορισμένου χρόνου) και συμπεριλάμβανε εργασίες διάνοιξης οπών με τρυπάνι χειρός και δράπανο στήλης, βαφής με ρολό και πινέλο, κόλλησης με ηλεκτροπόντα, ηλεκτροσυγκόλλησης, απότμισης σε ηλεκτρικό λαμαρινοψάλιδο, κοίλανσης σε κουρμπαδόρο, απότμισης σε κορδονιέρα, κοπής σε αυτόματη κορδέλα, διάνοιξης σπειρωμάτων με κολαούζο, κόλλησης καλωδίων με καλάι κ.ά.



fig. 62 Τα απαραίτητα υλικά για την εργασία και οι πλάκες plexiglass όπως τις παραλάβαμε από το υαλοτεχνουργείο.



fig. 64 Οι πλάκες από ινοσανίδο MDF πάχους 16mm όπως τις παραλάβαμε από το ξυλουργείο.



fig. 65 Βαφή πλακών MDF με ρολό.

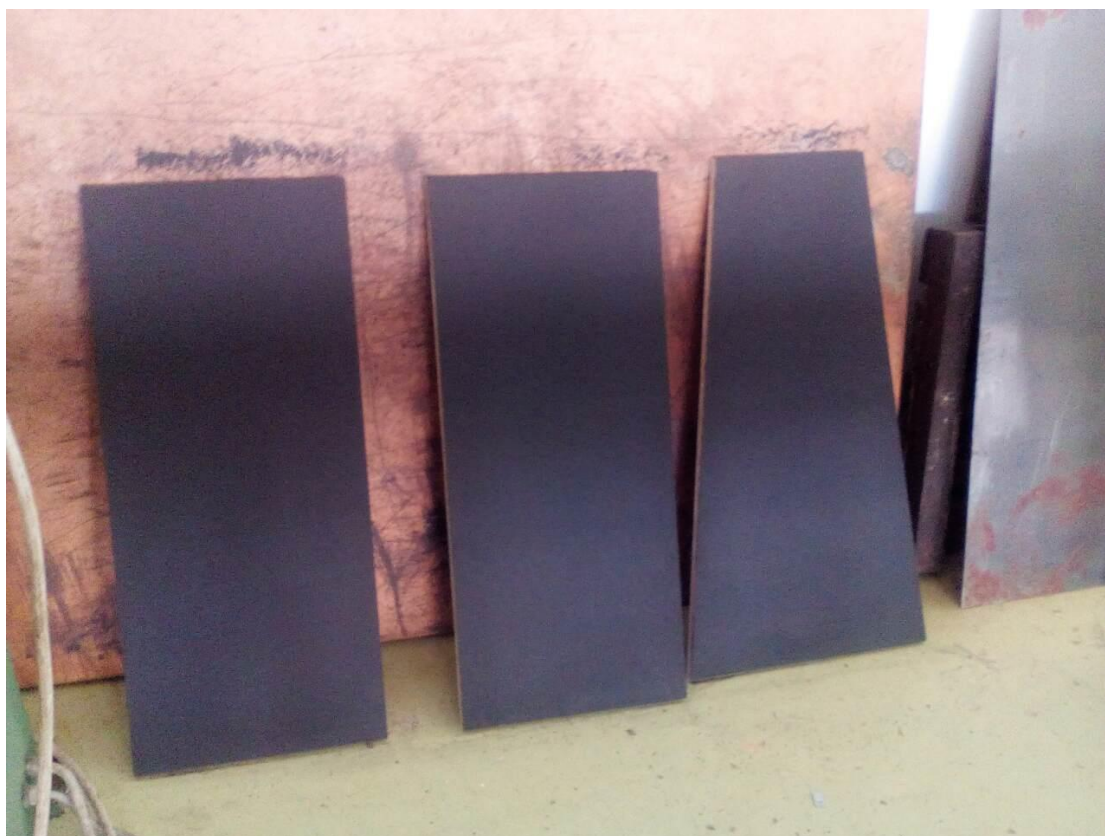


fig. 66 Τα ινοσάνιδα απλωμένα προκειμένου να στεγνώσει το πλαστικό χρώμα.

Οι πλάκες MDF βάφτηκαν μαύρο χρώμα από την μια πλευρά και λευκό από την άλλη. Το μαύρο χρώμα είναι το εσωτερικό της αεροσήραγγας και επιλέχθηκε έτσι ώστε με την βοήθεια του φωτισμού που τοποθετήθηκε αργότερα να είναι ορατός ο λευκός καπνός που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση της ροής αέρα. Μετά την βαφή ακολούθησε η διάνοιξη οπών στις πλάκες με τρυπάνι χειρός. Οι πλάκες συνδέθηκαν μεταξύ τους με ξυλόβιδες στα σημεία κάθετης σύνδεσης έτσι ώστε να σχηματιστούν οι τρεις θάλαμοι: εισαγωγή, θάλαμος δοκιμών και εξαγωγή. Στη συνέχεια έγινε μετωπική σύνδεση μεταξύ των τριών θαλάμων με την βοήθεια λαμαρίνας και κοχλιών μικρότερου μήκους από το πάχος του ινοσάνιδου.



fig. 68 Σημάδεμα MDF στα 8mm για τα κέντρα των οπών.



fig. 67 Ένωση των δύο θαλάμων και πρόχειρη στήριξη της αεροσήραγγας πάνω σε τάκους.



fig. 69 Ένωση των τριών θαλάμων. Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν περισσότερες ξυλόβιδες για μεγαλύτερη στιβαρότητα και ασφάλεια.



fig. 71 Όψη του θαλάμου δοκιμών που αποτελείται από δύο ινοσάνιδα και δύο plexiglass που θα τοποθετηθούν αργότερα.



fig. 70 Όψη της αεροσήραγγας που φαίνονται τα σημεία μετωπικής σύνδεσης με λαμαρίνα και ξυλόβιδες.

Στην συνέχεια τοποθετήθηκε το εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου δοκιμών, μία πλάκα plexiglass πάχους 5mm με την βοήθεια στραντζαρισμένων λαμών και σιλικόνης για στεγανοποίηση. Στο εσωτερικό χρησιμοποιήθηκε ξυλόστοκος που τρίφτηκε με γυαλόχαρτο για ακόμα καλύτερη στεγανοποίηση και λεία επιφάνεια που να μην διαταράσσει την ροή αέρα.

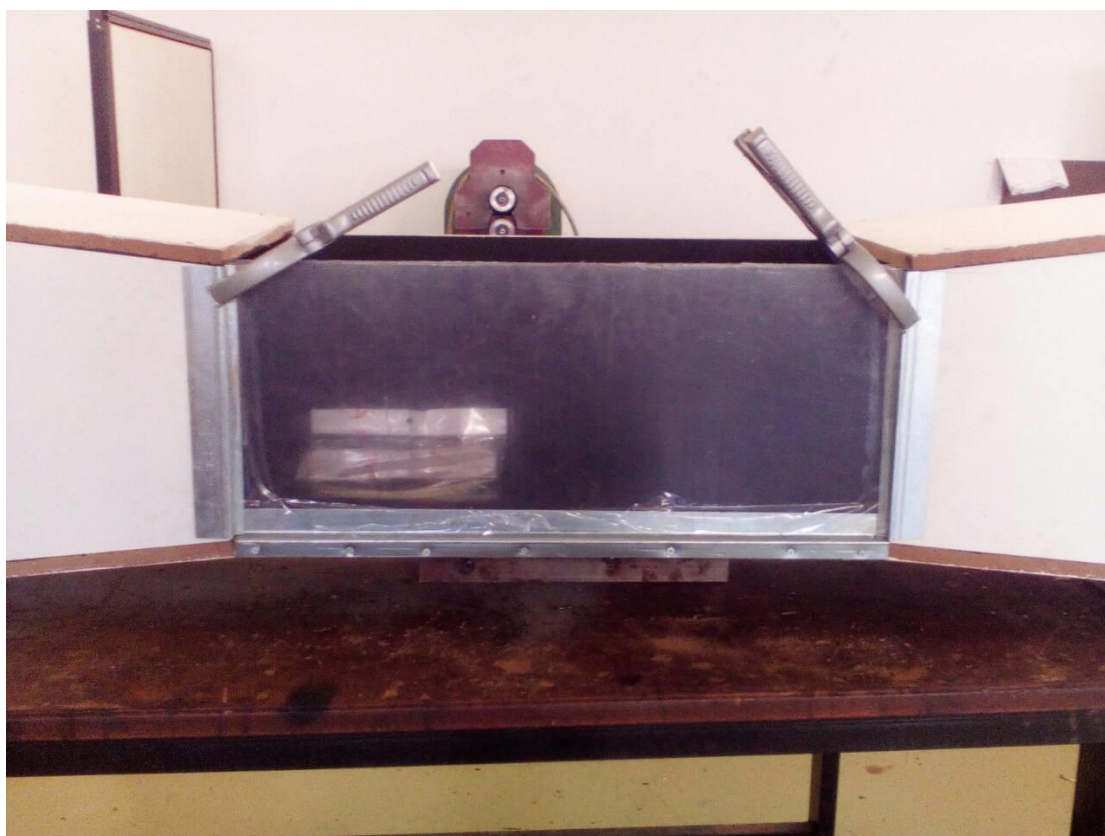


fig. 72 Η εμπρόσθια πλάκα plexiglass κρατημένη με σφικτήρες για να στεγνώσει.

Κατόπιν τοποθετήθηκε το επάνω κομμάτι του θαλάμου δοκιμών, μια πλάκα plexiglass πάχους 5mm στην οποία έγινε διάνοιξη φρεζάτων οπών με δράπανο στήλης. Το ένα άκρο είναι βιδωμένο με μεντεσέδες και το άλλο ελεύθερο, έτσι ώστε να υπάρχει πρόσβαση στο εσωτερικό της αεροσήραγγας για την τοποθέτηση του πτερυγίου. Οι βίδες που χρησιμοποιήθηκαν για τους μεντεσέδες έχουν επίπεδο κεφάλι για να μην διαταράσσεται η ροή αέρα και συνοδεύονται από περικόχλια που δένουν στην εξωτερική πλευρά της κατασκευής.



fig. 73 Τοποθέτηση plexiglass με μεντεσέ (Εξωτερική όψη).



fig. 74 Το plexiglass με τους μεντεσέδες και τους φυτευτούς κοχλίες (Εσωτερική όψη).

Ακολούθησε η κατασκευή της υποδοχής του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα, ένα πλαίσιο από γαλβανιζέ λαμαρίνα διαμορφωμένο στον κουρμπαδόρο και κολλημένο στην ηλεκτροπόντα. Η απότμιση του έγινε σε αυτόματο λαμαρινοφάλιδο αφού πρώτα σχεδιάστηκε σε σκαρίφημα. Η ένωση του με το υπόλοιπο μέρος της κατασκευής έγινε με ξυλόβιδες, αφού πρώτα τοποθετήθηκε μεταξύ τους στεγανοποιητικό λάστιχο.

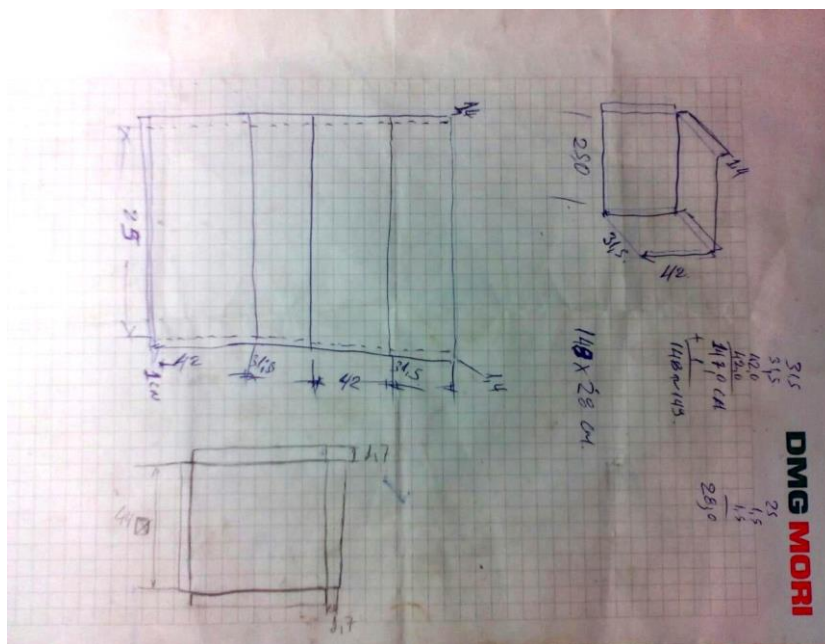


fig. 75 Σκαρίφημα υποδοχέα ανεμιστήρα.



fig. 76 Τοποθέτηση του υποδοχέα ανεμιστήρα.



fig. 77 Γώνιασμα του υποδοχέα ανεμιστήρα.



fig. 78 Πρόχειρη τοποθέτηση του υποδοχέα ανεμιστήρα με ξυλόβιδες.

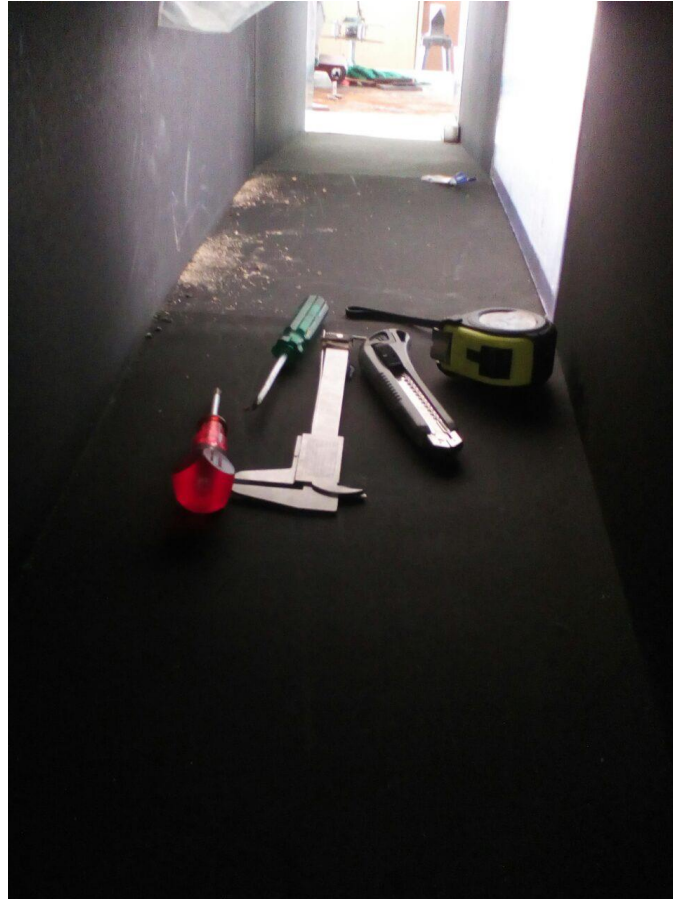


fig. 79 Το εσωτερικό της αεροσήραγγας.

Κατόπιν κατασκευάστηκε το πλαίσιο του φίλτρου ευθυγράμμισης ροής αέρα (honeycomb) με παρόμοιο τρόπο και τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό του περίπου 5000 καλαμάκια με θερμόκολλα. Τα καλαμάκια κόπηκαν στο σημείο που λυγίζουν και χρησιμοποιήθηκε μόνο το ευθύγραμμο μέρος από αυτά.

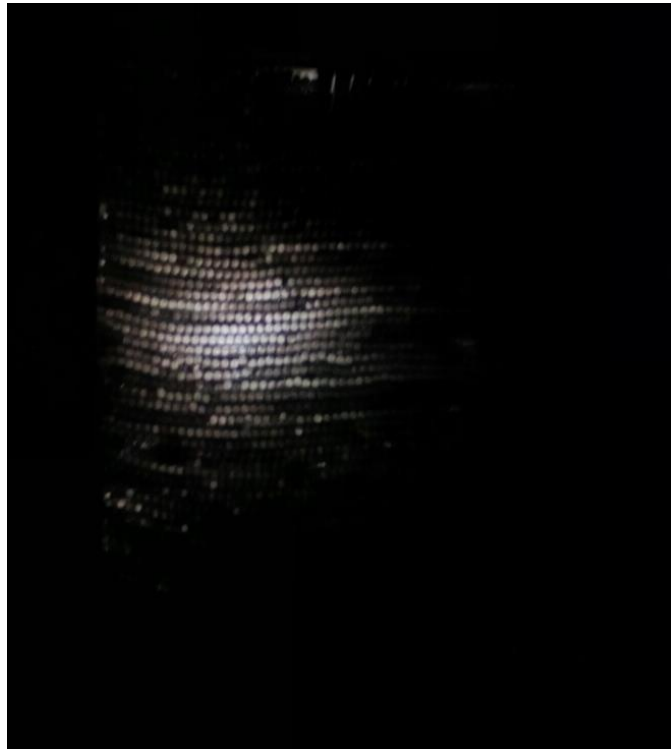


fig. 80 Φίλτρο ευθυγράμμισης ροής αέρα.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο διακριτικός φωτισμός στο εσωτερικό της αεροσήραγγας εκατέρωθεν του θαλάμου δοκιμών. Ο φωτισμός έγινε μέσω αυτοκόλλητης ταινίας τύπου LED και τεσσάρων εξωτερικών καλωδίων που ενώθηκαν με τους ακροδέκτες της ταινίας με καλάι και με έναν μετασχηματιστή 12V.

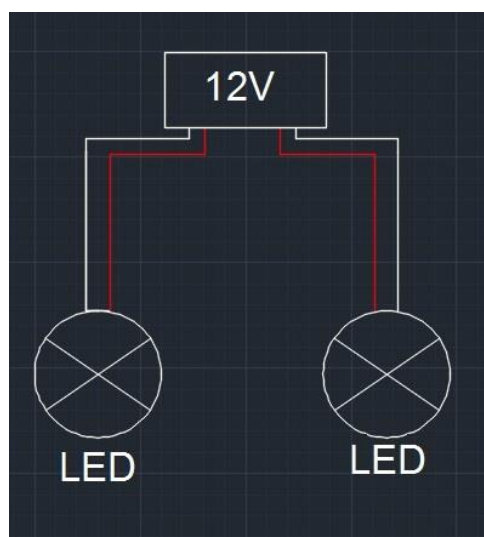


fig. 81 Συνδεσμολογία LED.



fig. 83 Εσωτερική όψη της αεροσήραγγας με τον φωτισμό και τον ανεμιστήρα.



fig. 82 Φωτισμός θαλάμου δοκιμών.

Αργότερα πραγματοποιήθηκε η συγκολλητή τροχήλατη σιδηροκατασκευή που στηρίζει την αεροσήραγγα. Από τις διαθέσιμες κοιλοδοκούς που υπήρχαν στο Μηχανουργείο του ΤΕΙ Σερρών αρχικά σχεδιάστηκε ένα σκαρίφημα και στην συνέχεια οι κοιλοδοκοί κόπηκαν στην αυτόματη πριονοκορδέλα. Μετά συγκολλήθηκαν, τροχίστηκαν και αφού τοποθετήθηκαν οι τέσσερις τροχοί (εκ των οποίων οι δύο έχουν φρένο ασφαλείας) βάφτηκαν με λαδομπογιά. Τελευταίες τοποθετήθηκαν οι οκτώ πλαστικές τάπες στα σημεία όπου υπήρχαν ανοίγματα. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βάση της αεροσήραγγας αρχικά προοριζόταν για επιτραπέζια αλλά στην συνέχεια διαπιστώθηκε ότι εάν γινόταν τροχήλατη θα ήταν ευκολότερη η μετακίνηση της, δεν θα δέσμευε κάποιον πάγκο εργασίας και θα ήταν πιο καλαίσθητη σαν κατασκευή. Έτσι συγκολλήθηκαν μετωπικά προεκτάσεις στην αρχικά επιτραπέζια βάση, εργασία η οποία δεν φαίνεται με γυμνό μάτι. Επιπλέον η σιδηροκατασκευή ελέγχθηκε εμπειρικά πρώτα εάν αντέχει σε κάμψη σε όλο το μήκος της με σημειακό φορτίο 57Kg ενώ η αεροσήραγγα ζυγίζει μόλις 25Kg:

- Η συνολική επιφάνεια των ινοσανίδων από τα σχέδια προκύπτει ότι είναι $A=20000\text{cm}^2$. Το πάχος του ινοσανίδου είναι $a=1,6\text{cm}$. Συνεπώς ο όγκος της κατασκευής είναι:

$$V=a*A=32000\text{cm}^3$$

- Η πυκνότητα ενός ινοσανίδου είναι $\rho_{\max}=0,6\text{g/cm}^3$. Συνεπώς η μάζα της κατασκευής είναι:

$$m=\rho*V=19,2\text{Kg}$$

- Τα παρελκόμενα φορτία (λαμαρίνες, βίδες, plexiglass, ίδιον βάρος σιδηροκατασκευής κτλ) υποθέτουμε ότι είναι περίπου 6Kg. Άρα η κατασκευή πρέπει να αντέχει 25Kg ✓



fig. 84 Η αρχικά επιτραπέζια βάση.



fig. 85 Η τελική τροχήλατη βάση.



fig. 86 Η αεροσήραγγα πάνω στην βάση της.

Τέλος έγινε η κατασκευή της βάσης του ανεμιστήρα με παρόμοιο τρόπο. Η βάση αυτή είναι μια συγκολλητή επιδαπέδια τροχήλατη σιδηροκατασκευή που σχεδιάστηκε μετά την εκλογή του ανεμιστήρα ο οποίος τροποποιήθηκε προκειμένου να τοποθετηθεί πάνω στην βάση. Συγκεκριμένα αφαιρέθηκε το εξωτερικό περίβλημα του και τοποθετήθηκαν προστατευτικές σίτες στις δύο εισόδους αέρα έτσι ώστε να μην υπάρχει πρόσβαση στην φτερωτή. Τα δύο πόδια στήριξής του βιδώθηκαν προς τα μέσα για να επιτυγχάνεται μετωπική επαφή του ανεμιστήρα με το πλαίσιο υποδοχής του. Στα σημεία επαφής ανεμιστήρα-πλαisiού τοποθετήθηκε αυτοκόλλητη στεγανοποιητική ταινία. Στην βάση

τοποθετήθηκαν ντίζες με σπείρωμα και παξιμάδι για την ρύθμιση του ύψους του ανεμιστήρα ξεχωριστά και στα τέσσερα σημεία στήριξης.

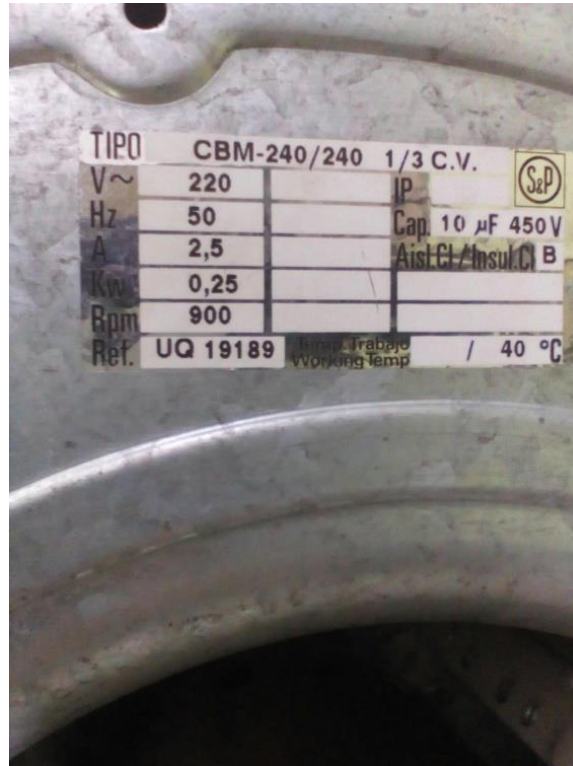


fig. 87 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα.

Ο ανεμιστήρας είναι φυγοκεντρικού τύπου μοντέλου CBM 10/10 C 6P VR 245W, έχει δύο εισόδους και μία έξοδο αέρα, τροφοδοτείται από ρεύμα 220V AC 50Hz και φτάνει μέχρι τις 900rpm. Είναι συνδεδεμένος με ένα περιστροφικό ποτενσιόμετρο με διακόπτη και σκάλες 0 έως 8 για τον έλεγχο των στροφών του.

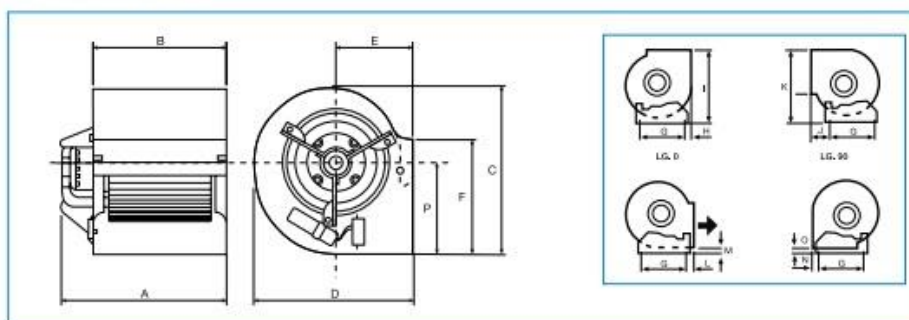


fig. 88 Ο ανεμιστήρας πριν την αφαίρεση του περιβλήματος του.

Model	Motor power		Equiv. in inches	Poles	Capacitor (μF / V)	Current (A)		Flow (m³/h)	pressure level* (dB(A))	Weight (Kg)
	(W)	(CV)				230V/1/50Hz	230-400V/3/50Hz			
CBM-7/7 C 6P VR 72W	72	1/10	7/7	6	3/450	0,77	-	1395	55	9
CBM-7/7 C 4P VR 147W	147	1/5	7/7	4	5/450	1,55	-	1540	57	10
CBM-9/7 C 6P VR 122W	122	1/6	9/7	6	6/450	1,30	-	2170	60	16
CBM-9/7 C 6P 245W	247	1/3	9/7	6	10/450	2,04	-	2600	64	16
CBM-9/9 C 6P VR 122W	122	1/6	9/9	6	6/450	2,05	-	2360	60	17
CBM-9/9 C 6P VR 245W	247	1/3	9/9	6	10/450	2,23	-	2860	64	17
CBM-9/9 C 4P VR 373W	373	1/2	9/9	4	10/450	3,85	-	2770	66	19
CBM-10/8 C 6P VR 245W	247	1/3	10/8	6	10/450	2,30	-	2730	62	18
CBM-10/8 C 6P 373W	373	1/2	10/8	6	15/450	4,15	-	4100	73	19
CBM-10/8 C 4P 373W	373	1/2	10/8	4	25/400	4,50	-	3280	67	19
CBM-10/10 C 6P VR 245W	245	1/3	10/10	6	10/450	2,35	-	3080	60	21
CBM-10/10 C 6P VR 373W	373	1/2	10/10	6	15/450	4,40	-	4700	70	21
CBM-10/10 C 4P VR 550W	550	3/4	10/10	4	25/450	4,40	-	3300	66	23
CBM-12/9 C 6P VR 550W	550	3/4	12/9	6	18/450	6,00	-	4770	67	28
CBM-T-12/9 C 6P 1100W	1100	1,5	12/9	6	-	-	7,1/4,1	6300	73	28
CBM-12/12 C 6P VR 550W	550	3/4	12/12	6	18/450	5,30	-	4740	66	30
CBM-T-12/12 C 6P 1100W	1100	1,5	12/12	6	-	-	7,3/4,2	7420	74	30
CBM-T-15/15 KC 6P 2200W	2200	3	15/15	6	-	-	8,8/5,1	8950	72	45

fig. 89 Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας CBM-10/10 C 6P VR-245W έχει 6 πόλους, πυκνωτή 10μF/450V, παροχή μάζας αέρα 3060m³/h, δημιουργεί θόρυβο 60dB και ζυγίζει 21Kg.

■ Dimensions (mm)



Model	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
CBM-7/7 6P (72W)	270	233	327	308	145	207	225	47,6	314	57	333	28	16,4	8,6	6	187
CBM-7/7 4P (147W)	284	233	327	308	145	207	225	47,6	314	57	333	28	16,4	8,6	6	187
CBM-9/7 6P (122W)	306	234	390	381	184	260	296	34,5	382	69	395,5	68,5	39	34,5	6	221
CBM-9/7 6P (245W)	318	234	390	381	184	260	296	34,5	382	69	395,5	68,5	39	34,5	6	221
CBM-9/9 (122W/6P-245W/6P-373W/4P)	348	300	390	381	184	260	296	34,5	382	69	395,5	68,5	39	34,5	6	221
CBM-10/8 (245W/6P-373W/4P)	328	267	443	423	200	288	339	39	427	67	451,5	67	40	39	8	249
CBM-10/8 6P (373W)	367	267	443	423	200	288	339	39	427	67	451,5	67	40	39	8	249
CBM-10/10 6P (245W)	377	333	443	423	200	288	339	39	427	67	451,5	67	40	39	8	249
CBM-10/10 6P (373W)	418	333	443	423	200	288	339	39	427	67	451,5	67	40	39	8	249
CBM-10/10 4P (550W)	430	333	443	423	200	288	339	39	427	67	451,5	67	40	39	8	249
CBM-12/9 6P (550W)	419	311	521	490	229	341	407	40,5	496,5	69,5	528,5	69,5	38,5	41,5	4,5	293
CBM-T-12/9 6P (1100W)	416	311	521	490	229	341	407	40,5	496,5	69,5	528,5	69,5	38,5	41,5	4,5	293
CBM-12/12 6P (550W)	459	396	521	490	229	341	407	40,5	496,5	69,5	528,5	69,5	38,5	41,5	4,5	293
CBM-T-12/12 6P (1100W)	460	396	521	490	229	341	407	40,5	496,5	69,5	528,5	69,5	38,5	41,5	4,5	293

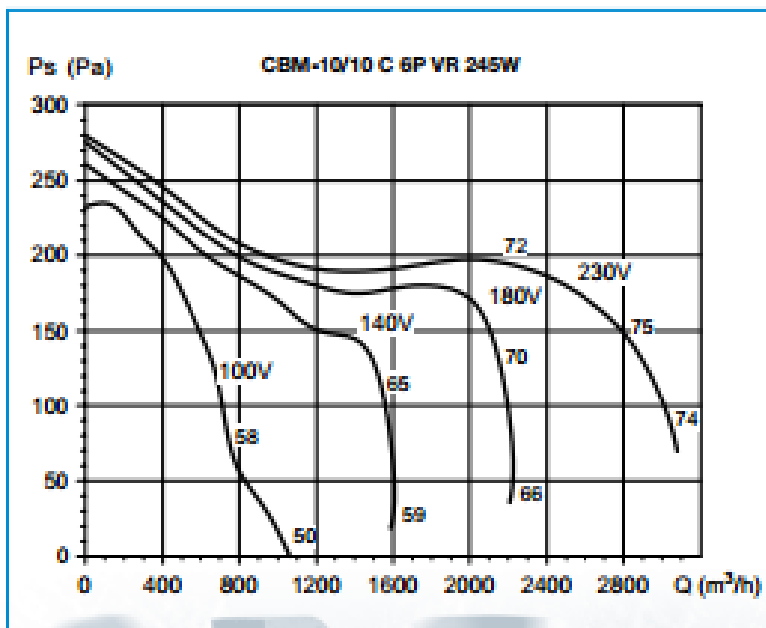


fig. 92 Διάγραμμα πίεσης-παροχής αέρα ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του ανεμιστήρα.



fig. 91 Φωτογραφία του ανεμιστήρα από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.



fig. 93 Η φτερωτή του ανεμιστήρα.



fig. 94 Το χειριστήριο του ανεμιστήρα.



fig. 95 Τοποθέτηση ανεμιστήρα στην βάση του. Στην φωτογραφία φαίνονται οι προστατευτικές σίτες, τα στεγανοποιητικά αυτοκόλλητα στα σημεία επαφής και οι ρυθμιστικές βίδες του ύψους.



fig. 96 Ο ανεμιστήρας τοποθετημένος στην βάση με τις τέσσερις ρόδες εκ των οποίων οι δύο χιαστί διαθέτουν φρένο ασφαλείας.



fig. 97 Η τελική διάταξη της αεροσήραγγας.



fig. 98 Ολοκλήρωση κατασκευής.

10.Κοστολόγηση Κατασκευής

Η πτυχιακή εργασία έγινε με την συγχρηματοδότηση του ΤΕΙ Σερρών κατά 47% μέσω της διάταξης του Ν. 4412/2016 άρθρο 118 «Απευθείας Ανάθεση» που ορίζει την διαδικασία ανάθεσης σύμβασης για την ανάδειξη αναδόχου προμήθειας αγαθών με αριθμούς πρωτοκόλλου 4147, 4148, 4149 και η δαπάνη βαρύνει τον τακτικό προϋπολογισμό του Ιδρύματος οικονομικού έτους 2016, ΚΑΕ 1831.01. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα υλικά και αγαθά που αγοράστηκαν για την κατασκευή της αεροσήραγγας από τον οποίο προκύπτει το συνολικό κόστος κατασκευής. Σε αυτόν τον πίνακα δεν περιλαμβάνονται υλικά και εργαλεία που ήδη υπήρχαν στις εγκαταστάσεις του Ιδρύματος καθώς και η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος και νερού.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΕΜΑΧΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ ΕΥΡΩ ΜΕ ΦΠΑ
1	ΠΛΑΚΑ PLEXIGLASS	t=5mm διαστάσεις 250x600	1	4,00
2	ΠΛΑΚΑ PLEXIGLASS	t=5mm 350x600	1	6,00
3	ΠΛΑΚΑ MDF	16X420X800	4	33,00
4	ΠΛΑΚΑ MDF	16X250X600	1	10,00
5	ΠΛΑΚΑ MDF	16X350X600	1	10,00
6	ΠΛΑΚΑ MDF	16X350X800	4	23,00
7	ΠΛΑΚΑ MDF	16X350X420	1	7,00
8	ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΧΡΩΜΑ	ΛΕΥΚΟ 750 ML	2	7,00
9	ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΧΡΩΜΑ	ΜΑΥΡΟ 750 ML	1	5,15
10	ΞΥΛΟΒΙΔΕΣ	M3,5X50	100	3,60
11	ΓΑΝΤΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΖΕΥΓΑΡΙ	1	1,19
12	ΡΟΛΟ ΒΑΦΗΣ	ΣΕΤ ΜΙΚΡΟ ΜΕΣΑΙΟ ΜΕΓΑΛΟ	4	14,00
13	ΜΕΝΤΕΣΕΔΕΣ	70X100	2	3,80
14	ΣΚΑΦΗ ΒΑΦΗΣ	5LIT	1	1,20
15	ΞΥΛΟΚΟΛΛΑ	200ML	1	1,70
16	ΔΙΑΛΥΤΙΚΟ ΜΠΟΓΙΑΣ	400ML	1	1,25
17	ΑΕΡΟΣΤΟΠ	3m	1	2,00
18	ΤΑΙΝΙΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ	6m	1	4,80
19	ΞΥΛΟΒΙΔΕΣ	M3,5	50	1,50
20	ΣΙΛΙΚΟΝΗ	80ML	2	6,00
21	ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΤΑΠΕΣ	30x30	8	3,60
22	ΞΥΛΟΣΤΟΚΟΣ	50ML	1	2,20

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”

23	ΒΙΔΕΣ ΜΕ ΠΑΞΙΜΑΔΙ	M5X25	10	0,75
24	ΤΑΙΝΙΑ LED	1m	1	2,50
25	ΚΑΛΩΔΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ	3m	1	1,80
26	ΚΑΛΑΪ ΚΑΙ ΑΛΟΙΦΗ	1m	1	2,00
27	ΘΕΡΜΟΠΙΣΤΟΛΟ ΓΙΑ ΚΑΛΑΪ	60W ISO 9001 CT-89A	1	6,50
28	ΡΟΔΑΚΙΑ	Φ10	8	28,00
29	ΣΥΡΜΑ ΓΑΛΒΑΝΙΖΕ	1m ²	1	3,00
30	ΘΕΡΜΟΠΙΣΤΟΛΟ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ	80W	1	1,00
31	ΡΑΒΔΟΙ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ	Φ5X170	40	4,00
32	ΚΟΛΛΑ ΣΤΙΓΜΗΣ	3g	5	1,00
33	ΣΠΑΤΟΥΛΕΣ ΣΤΟΚΑΡΙΣΜΑΤΟΣ	5cm,8cm,10cm,12cm	4	1,20
34	ΛΑΔΟΜΠΟΓΙΑ	ΜΑΥΡΗ 50ML	1	3,00
35	ΚΑΛΑΜΑΚΙΑ ΡΟΦΗΜΑΤΩΝ	ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ 1000	5	14,00
36	ΓΥΑΛΟΧΑΡΤΟ	P180	1	0,30
37	ΕΞΟΔΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ	ΠΡΟΣ ΠΑΝ ΜΑΡΚΕΤ		10,00
38			ΣΥΝΟΛΟ:	231,04

- Συνολικό κόστος εργασίας: 231,04 ΕΥΡΩ
- Ώρες εργασίας στο μηχανουργείο: 32
- Ώρες εργασίας στο σπίτι: 17

11. Αξιολόγηση μοντέλου μέσω Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD)

Στην παρακάτω έκθεση παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αεροσήραγγας μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS (Finite Element Analysis) στην λειτουργία CFD (Computational Fluid Dynamics). Όπως διαπιστώθηκε η αεροσήραγγα παρουσιάζει ομαλή-στρωτή ροή με σταθερή ταχύτητα στο τμήμα δοκιμών (test section) και ελάχιστες επιστροφές δινών στην έξοδο (Diffuser) που δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις. Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Μισηρλή Δημήτριο για την πολύτιμη βοήθεια του σε αυτό το στάδιο της πτυχιακής εργασίας.

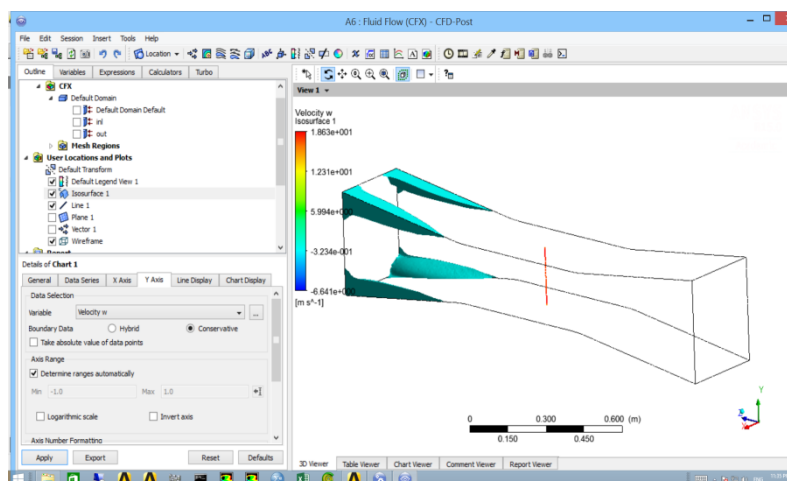


fig. 99 Περιορισμένες περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής στις γωνίες της εξόδου που δεν επηρεάζουν το κεντρικό τμήμα της περιοχής μετρήσεων το οποίο έχει σταθερή ταχύτητα.

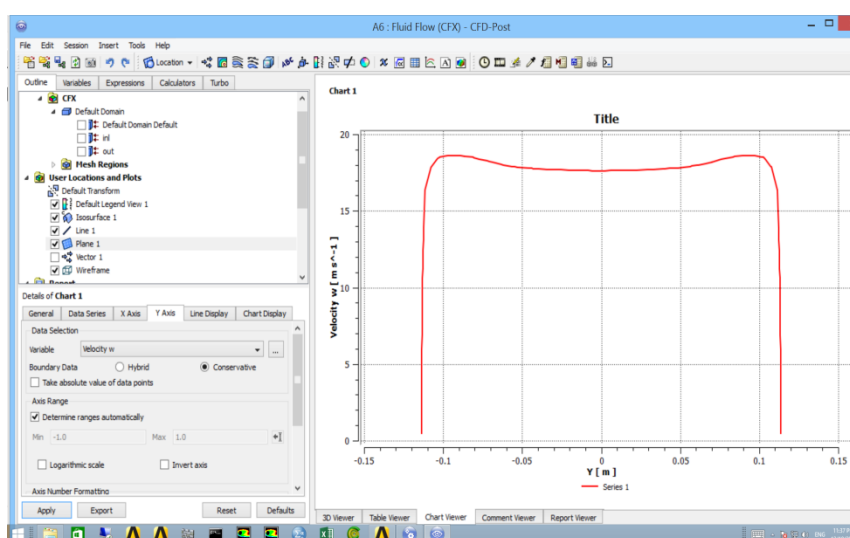


fig. 100 Διάγραμμα σταθερής ταχύτητας στον θάλαμο δοκιμών.

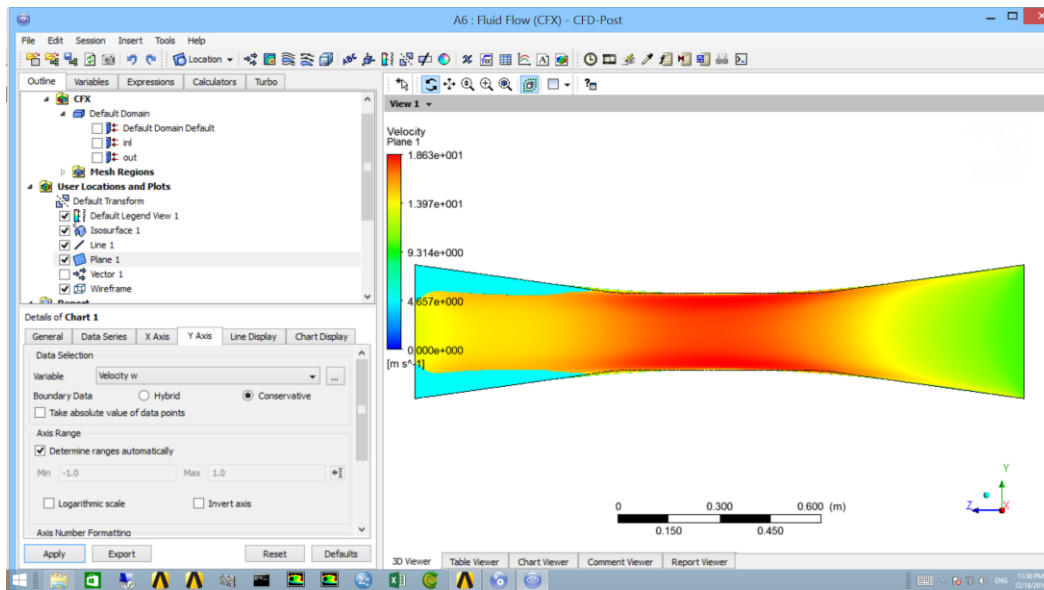


fig. 101 Καθαρό κεντρικό τμήμα (περιοχή μετρήσεων).

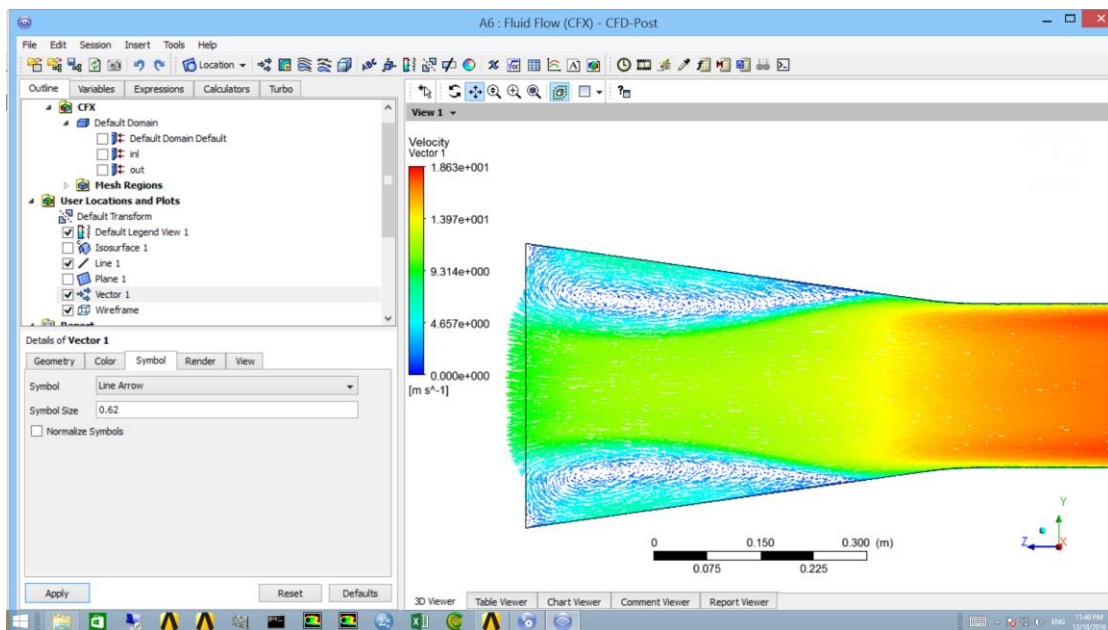


fig. 102 Μεγέθυνση των διανυσμάτων ταχύτητας στις γωνίες της εξόδου.

Συνεπώς η αεροσήραγγα σαν κατασκευή είναι επιτυχής και μπορεί να δώσει έγκυρα αποτελέσματα μετρήσεων, αρκεί μόνο να υπάρχουν τα κατάλληλα μετρητικά όργανα και οι εξεταζόμενες γεωμετρίες να μην ξεπερνούν το μέγεθος του θαλάμου δοκιμών.

12. Πειραματική Διαδικασία Οπτικοποίησης Ροής Αέρα (Air Flow Visualization)

Η πειραματική διαδικασία οπτικοποίησης ροής αέρα έλαβε χώρα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας την Πέμπτη 2/3/2017. Η εξεταζόμενη γεωμετρία ήταν ένα πτερύγιο NACA 5522 κάθετης ανεμογεννήτριας (VAWT blade) πλάτους 10cm.

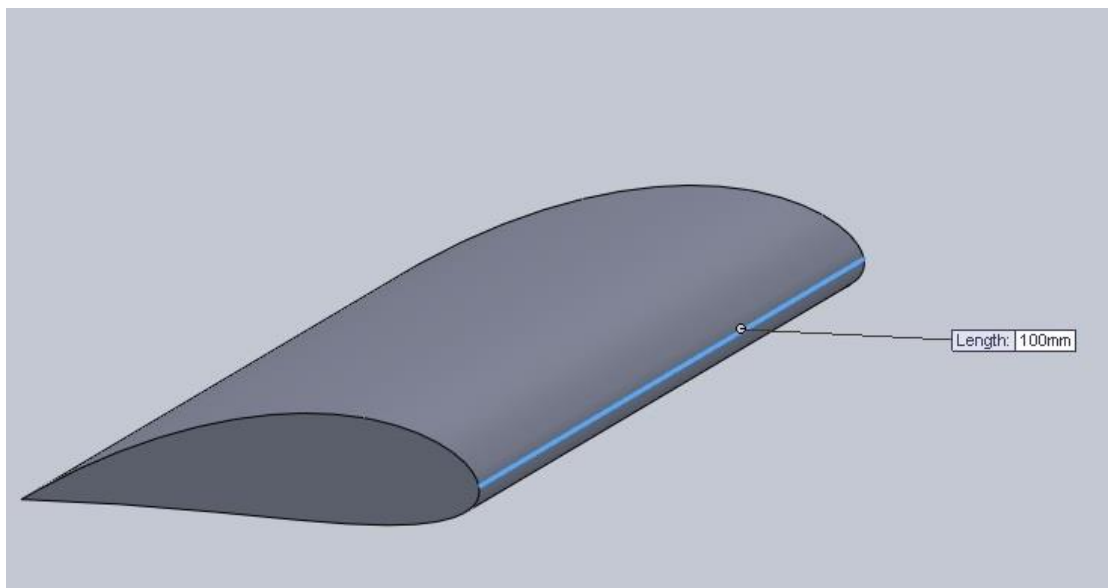


fig. 103 3Δ σχέδιο πτερυγίου NACA 5522 πλάτους 10cm.

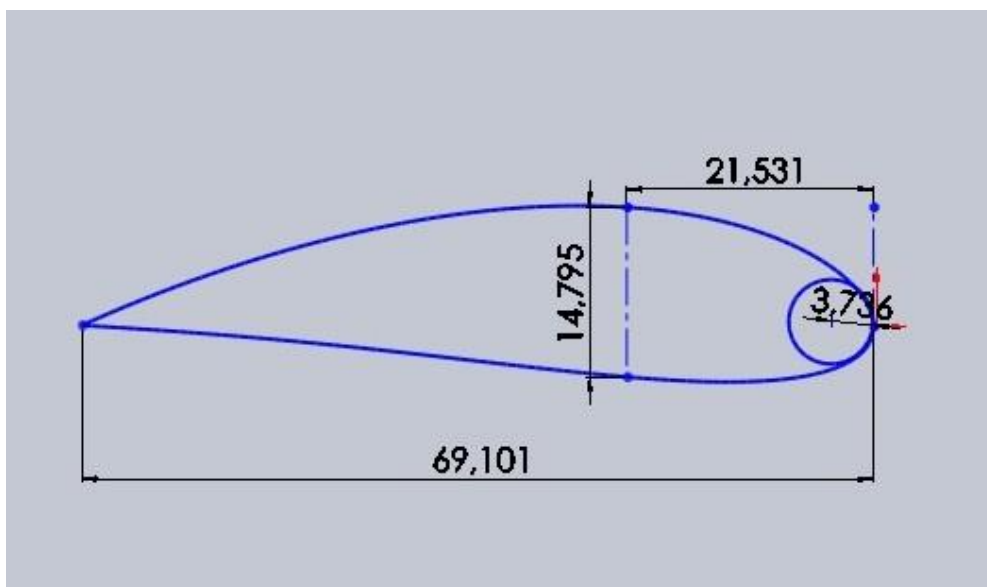


fig. 104 2Δ σχέδιο πτερυγίου NACA 5522 με χορδή 69,101mm απόσταση μεγίστου πάχους 21,531mm μέγιστο πάχος 14,795mm και ακτίνα ακμής προσβολής 3,736mm.

Η οπτικοποίηση ροής αέρα έγινε με την βοήθεια μηχανήματος καπνού MBT Lighting FM5000Z_86676 που παράγει καπνό μέσω θερμαντικού στοιχείου υψηλής θερμοκρασίας εξατμίζοντας πρόσμιξη νερού και γλυκόλης σε συγκεκριμένη αναλογία. Ο καπνός που παράγεται είναι σχεδόν άοσμος και ακίνδυνος για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η εξαγωγή του ανεμιστήρα τοποθετήθηκε κοντά σε μια από τις εξόδους του κτηρίου, έτσι ώστε ο καπνός μετά το πέρασμα του μέσα από την αεροσήραγγα να διοχετεύεται απευθείας στο εξωτερικό περιβάλλον.



fig. 105 μηχανήμα καπνού MBT Lighting FM5000Z_86676 αναρτημένο στην εισαγωγή της αεροσήραγγας.

Το πτερύγιο αναρτήθηκε στον θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας μέσω μιας ντίζας και περικοχλίων έτσι ώστε η κλίση του να μεταβάλλεται εύκολα. Επιπλέον τοποθετήθηκε μέσα στον θάλαμο μοιρογνωμόνιο έτσι ώστε να γνωρίζουμε την ακριβή κλίση του πτερυγίου.



fig. 106 Το πτερύγιο NACA 5522 αναρτημένο στον θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας.

Η κάμερα υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε για την βιντεοσκόπηση των πειραμάτων, είναι μοντέλου Mikrottron MotionBlitz, έχει δυνατότητα εγγραφής βίντεο 1,5s, ευκρίνεια 3Mpixel και frame rate έως και 200000 fps. Τοποθετήθηκε πάνω σε τρίποδα σε σημείο όπου να υπάρχει άπλετο φυσικό φως και ρυθμίστηκε με ανάλυση 1696x776/404 fps.

3 Megapixel High Definition - for detailed images

- **Extremely flexible in resolution and speed:**
3 Megapixel resolution up to 525 frames per second at 1,696 x 1,710 pixel resolution
- **Stepless adjustable frame rate up to more than 200,000 frames per second at reduced resolution**
- **Maximum photo sensitivity:**
1,200 ASA monochrome, 1,000 ASA RGB
- **1.5 seconds onboard Recording Memory at full resolution and full speed**
- **GigE Vision® compatible**
- **ImageBLITZ® Automatic Trigger**
- **Crashproof up to 100 g shock, 10 g vibration**
- **Pixel based Fixed Pattern Noise Correction**
- **Burst Trigger Mode**
- **Multi Sequence Mode**



fig. 107 Η κάμερα υψηλής ταχύτητας.

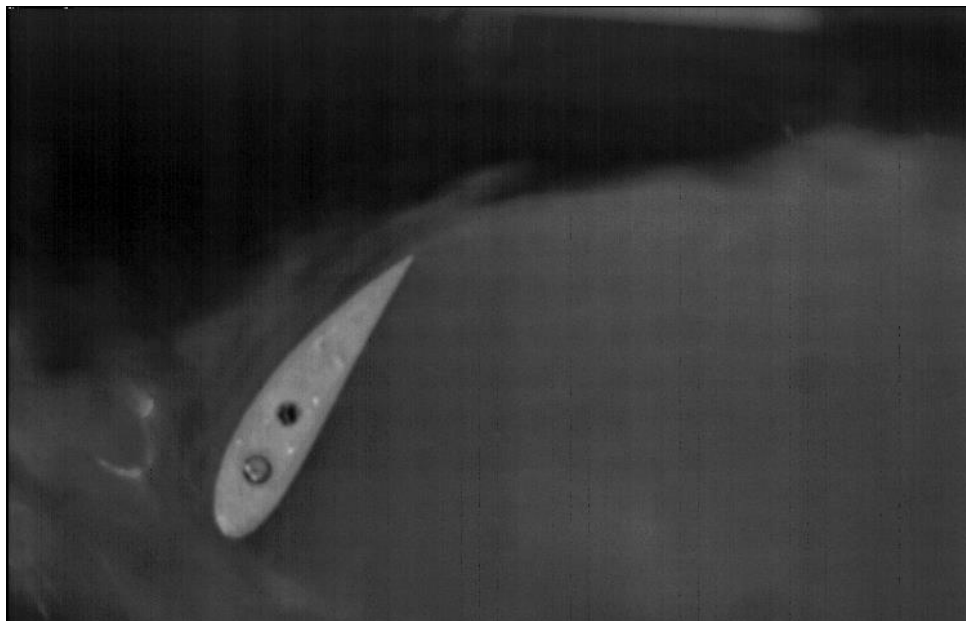


fig. 108 Εικόνα από την βιντεοσκόπηση του πειράματος. Πτερύγιο σε πρόοψη και θέση 55°.



fig. 109 Εικόνα από την βιντεοσκόπηση του πειράματος όπου διαφαίνεται ο σχηματισμός οριακού στρώματος (boundary layer) στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου θέσης 55° .

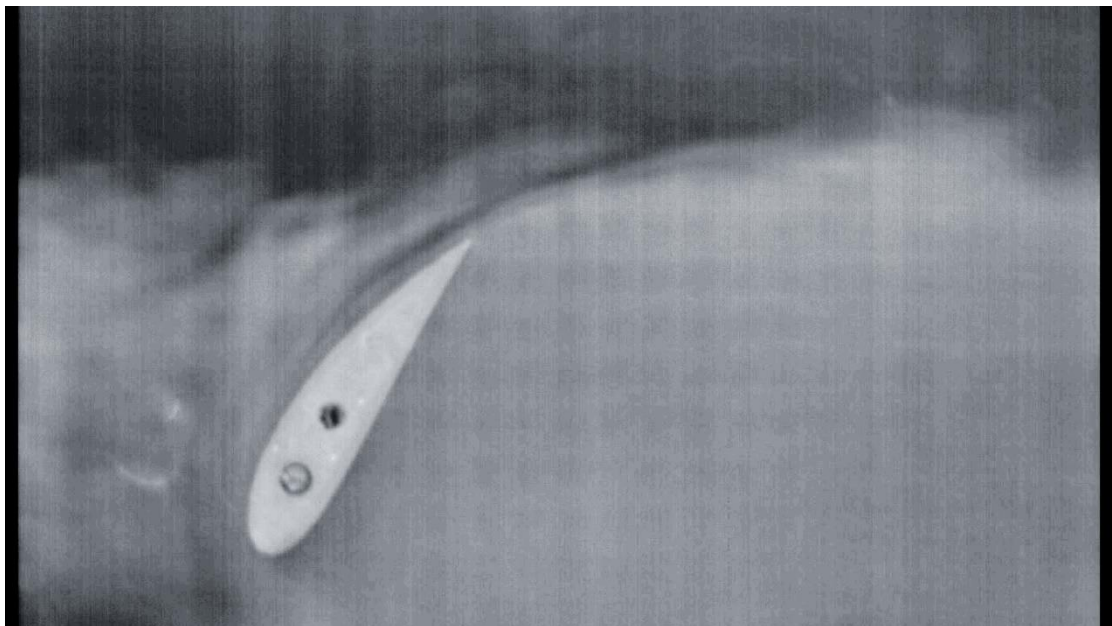


fig. 110 Εικόνα από την βιντεοσκόπηση του πειράματος όπου διαφαίνεται ο σχηματισμός οριακού στρώματος και δινών.



fig. 111 Πτερύγιο στην θέση 0°. Στο κόκκινο σημείο φαίνεται το σημείο αποκόλλησης.

Από τα βίντεο και τις εικόνες της παρουσίασης συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη κλίση δίνουμε στο πτερύγιο, τόσο πιο μπροστά μετακινείται το σημείο αποκόλλησης των δινών στην πλευρά αναρρόφησης ενώ το σημείο ανακοπής μετακινείται προς τα επάνω στην επιφάνεια πρόσπτωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα χρονικά περιθώρια εκπόνησης της Πτυχιακής εργασίας, διαπιστώνουμε ότι η παρούσα διάταξη επιδέχεται βελτιώσεις που θα προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα στην οπτικοποίηση ροής αέρα. Τέτοιες μελλοντικές βελτιώσεις είναι:

- Αγορά ανεμιστήρα μεγαλύτερης ισχύος που να προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα.
- Χρήση ξηρού πάγου (dry ice=στερεό διοξείδιο του άνθρακα -78°C) ως μέσο για την οπτικοποίηση ροής αέρα. Η χρήση γλυκόλης και νερού απεδείχθη ότι αφήνει λιπαρότητα στα τοιχώματα της αεροσήραγγας και στην επιφάνεια του πτερυγίου.
- Κατασκευή ολόσωμου πτερυγίου του οποίου το μήκος να είναι ίσο με το μήκος του θαλάμου δοκιμών (περίπου 35cm) έτσι ώστε η ροή αέρα να μην διαχωρίζεται στα πλαϊνά τοιχώματα.
- Κατασκευή πτερυγίου με μικρότερη τραχύτητα έτσι ώστε να μελετηθεί η επίπτωση της στα οριακά στρώματα.

- Χρήση ακροφυσίων τύπου μπεκ για ακόμα περισσότερο κατευθυνόμενη και διαχωρισμένη ροή αέρα. Εμφανέστερη δημιουργία ροϊκών γραμμών.
- Καλύτερο καλιμπράρισμα και γνώση της κάμερας υψηλής ταχύτητας.
- Συγκέντρωση περισσότερου φυσικού φωτός ή τεχνητού φωτός του οποίου όμως η συχνότητα (50Hz) να μην είναι αισθητή στα βίντεο.



fig. 112 Βίντεο από την διεξαγωγή του πειράματος.

13. Μέτρηση Δυναμικής Άνωσης (Lift Force Measurement)

Το πείραμα μέτρησης της δύναμης άνωσης στο πτερύγιο NACA 5522 έλαβε χώρα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας την Παρασκευή 13/1/2017. Λόγω έλλειψης εξοπλισμού η δυναμομέτρηση έγινε ενδεικτικά με μια ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας μοντέλου CAS MW-II-300 στην οποία αναρτήθηκε το πτερύγιο με την βοήθεια μεταλλικών λαμών που του επέτρεπαν να αλλάζει την γωνία πρόσπτωσης.

	MW-II-200	MW-II-300	MW-II-2000	MW-II-3000
Model				
Capacity x Readability	200 X 0.01g	300 X 0.01g	2kg X 0.1g	3kg X 0.1g
Price	\$192.50 	\$206.50 	\$227.50 	\$245.00 
Maximum Tare	200g	300g	2kg	3kg
Display	LCD(6 Digits)			
Power Source	Dry Battery (1.5V 6AA Size) DC 12V 300mA AC Adaptor AC 110/220V, 50/60Hz			
Power Consumption	0.4W			
Operating Temperature	-10 C ~ +40 C (14 F ~ +104 F)			
Platter Size(inch/mm)	5.1 / 130(Radius)		6.2(W) 5.7(D)/158(W) 144.6(D)	
Dimensions	7.5(W) 10.7(D) 3.3(H) inch 190(W) 271(D) 83.5(H) mm			
Product Weight	2.27lb / 1.03kg		6.6lb / 3kg	

fig. 113 Πίνακας με το μοντέλο της ηλεκτρονικής ζυγαριάς

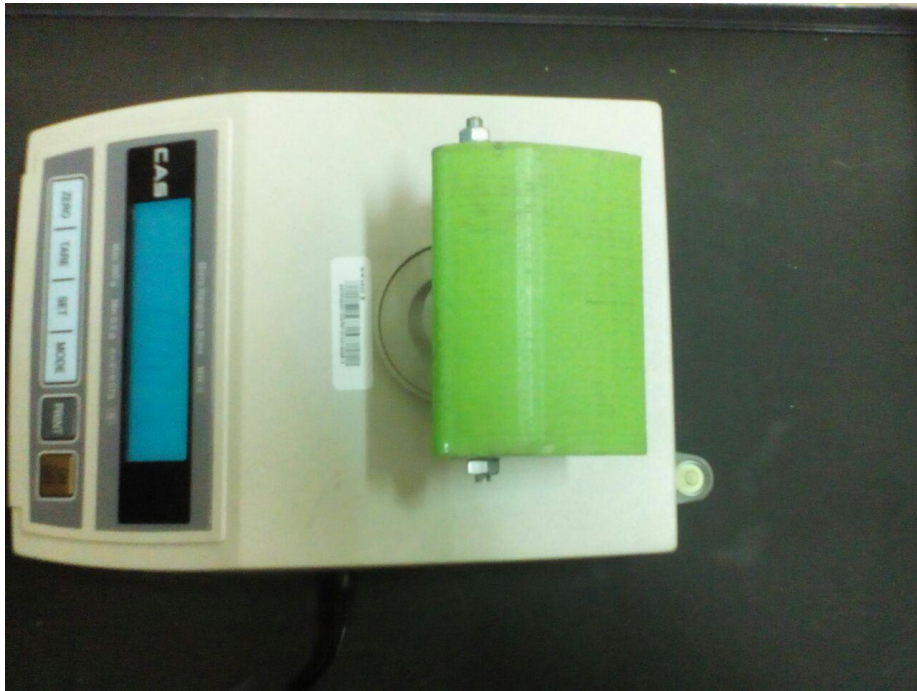


fig. 114 Το πτερύγιο αναρτημένο στην ζυγαριά.



fig. 115 Το πτερύγιο αναρτημένο στην ζυγαριά.

Συνεπώς οι μεταβλητές παράμετροι του πειράματος είναι η γωνία πρόσπτωσης (angle of attack) και η ταχύτητα αέρα.

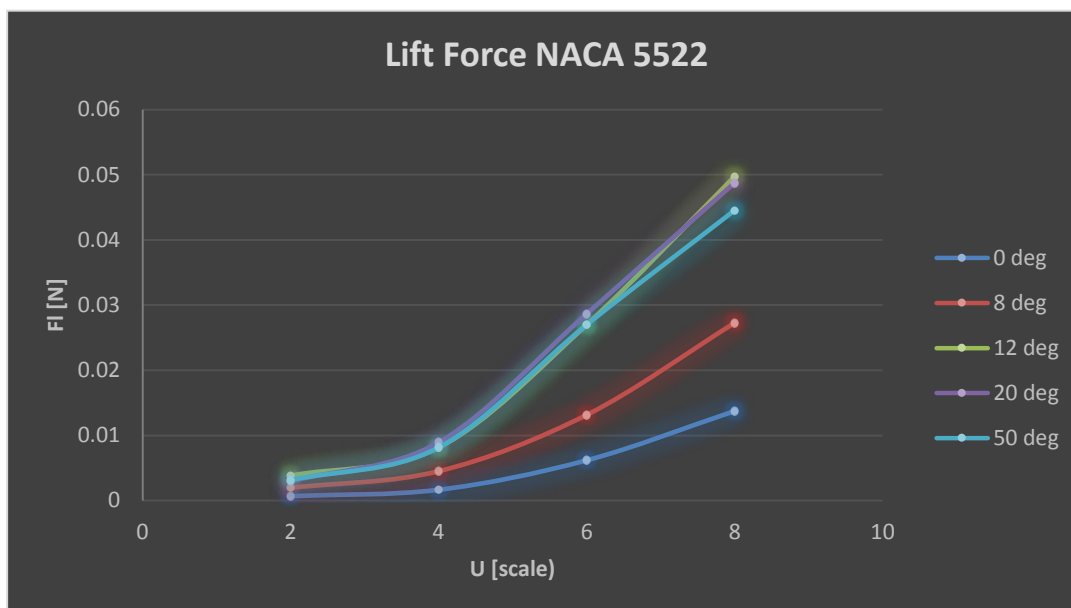


fig. 116 Η δύναμη άνωσης συναρτήσει της ταχύτητας αέρα για 5 διαφορετικές γωνίες με βέλτιστη αυτή των 12°.

Τα συνήθη διαγράμματα δυναμομέτρησης σε αεροσήραγγες περιλαμβάνουν στον κάθετο άξονα τον λόγο άνωσης/οπισθέλκουσας (l/d ratio) και στον οριζόντιο άξονα την ταχύτητα του αέρα. Συνεπώς η ιδανική περίπτωση για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα ήταν ένα δυναμόμετρο αναρτημένο έξω από τον θάλαμο δοκιμών (test section) κατάλληλης ακριβείας που να είχε την δυνατότητα μέτρησης σε τρεις άξονες, έτσι ώστε να υπήρχαν ενδεικτικές τιμές και για την οπισθέλκουσα δύναμη. Επιπλέον, η μόνη πληροφορία που υπάρχει για την ταχύτητα του αέρα προέρχεται από το ποτενσιόμετρο του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα με σκάλες ρύθμισης 1 έως 8, ενώ θα έπρεπε να είναι γνωστή (η ταχύτητα του αέρα) σε m/s μέσω σωλήνα pitot ή ψηφιακού ανεμόμετρου.

12 deg				
A/A	U (scale)	FI (g)	FI (kg)	FL (N)
1	2	0,39	0,00039	0,003826
2	4	0,83	0,00083	0,008142
3	6	2,75	0,00275	0,026978
4	8	5,07	0,00507	0,049737

fig. 116 Ενδεικτικός πίνακας υπολογισμού άνωσης για γωνία πρόσπτωσης 12 μοίρες.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία επιδέχεται βελτιώσεις όσον αφορά τα περιφερειακά όργανα, οι οποίες δεν έγιναν λόγω περιορισμένου χρόνου και έλλειψης εξοπλισμού. Ωστόσο, ο σχεδιασμός της έγινε έτσι ώστε να τροποποιείται εύκολα για τις διάφορες ανάγκες του Ιδρύματος. Σαν κατασκευή είναι επιτυχής και λειτουργική καθώς μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα στην αεροσήραγγα πειράματα οπτικοποίησης ροής αέρα και δυναμομέτρησης πάνω σε αεροδυναμικές γεωμετρίες.

14. Βιβλιογραφία-Πηγές

- William H.Rae, JR, Associate Professor and Associate Director University of Washington Aeronautical Laboratory F.K Kirsten Wind Tunnel - Alan Pope, Formerly Director of Aerospace Projects Sandia National Laboratories, “Low-Speed Wind Tunnel Testing” Second Edition. May, 1984
- John J. Bertin, Department of Aeronautics U.S Air Force Academy- Michael L. Smith, , Department of Aeronautics U.S Air Force Academy, “ Aerodynamics for Engineers” Third Edition.
- G.E Chmielewski, McDonnell Douglas Research Laboratories, St. Louis, Mo. “Boundary-Layer Considerations in the Design of Aerodynamic Contractions”, Vol 11. No 8, August, 1974
- J. M. Robertson and H. R. Fraser, “Separation Prediction for Conical Diffusers”, *Transactions ASME, Series D82, 201, 1960.*
- Louis Cattafesta, Florida State University- Christopher J. Bahr, NASA- Jose Mathew, LM Wind Power Group “Fundamentals of Wind-Tunnel Design”, December, 2009.
- Jonathan Amichai Butbul, University of San Diego, Master of Science in Mechanical Engineering Thesis, “THE IMPACT OF INERTIA FORCES ON A MORPHING WIND TURBINE BLADE IN A VERTICAL AXIS CONFIGURATION: A WIND TUNNEL TEST”, Summer, 2014.
- Mealani Nakamura, MIT “How an airfoil works”

<http://web.mit.edu/course/2/2.972/OldFiles/www/reports/airfoil/airfoil.html>

- https://en.wikipedia.org/wiki/National_Advisory_Committee_for_Aeronautics
- Dr. Judie Foss Van Zante, NASA Glenn Research Center, “Wind Tunnel Experiments”

<http://www.slideshare.net/chetanatamalner/wind-tunnel-ex>

“ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ”

- Mike Brigg, International Bodyflight Association, “The History of Wind Tunnels” April 7, 2016

<https://tunnelflight.com/news/other/the-history-of-wind-tunnels/>

- Vincze Miklos, “Dramatic Vintage Photos of Wind Tunnel Tests”. September 16, 2014.

<http://io9.gizmodo.com/dramatic-vintage-photos-of-wind-tunnel-tests-1635356317>

- F.H Norton NACA Technical Note No. 60 “ On a new Type of Wind Tunnel”, 1921
<https://history.nasa.gov/naca/Wind-Beyond%20book%20%20p511-521.pdf>

- Douglas J F, Gasiorek J M, and Swaffield J A. Longman publishers “Fluid Mechanics”

http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE1400/Section4/boundary_layer.htm

- Harold Sherwood Boudreau, “DESIGN, CONSTRUCTION, AND TESTING OF AN OPEN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER WIND TUNNEL” University of Florida ,2009.

<http://www.davidoprevatt.com/wp-content/uploads/2010/09/boudreau-2009-honors-thesis.pdf>