

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική και υπολογιστική μελέτη φόρτισης και ροϊκής πεδίου
ζεύγους αεροτομών για αυτοκίνητα**

**Περιοχή Αεροδυναμικής
Ενεργειακού τομέα**

Στυλιανός Κανελλόπουλος

AM:1242

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ερρίκος Σταπουντζής, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός

Αναπληρωτής Καθηγητής

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος 2015

©Στυλιανός Κανελλόπουλος

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Πρώτος εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Τάσος Σταματέλλος
Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Μεταλλουργός Μηχανικός
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του σε όλη την πορεία εκπόνησης της εργασίας μου. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον απόφοιτο του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Γεώργιο Παπαγεωργίου, για την βοήθεια του στα πειράματα και την υπολογιστική μελέτη. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό και ερευνητικό προσωπικό του τμήματος που με εφοδίασε με τις απαραίτητες γνώσεις για την εκπόνηση της διπλωματικής μου και την απόκτηση του διπλώματός μου, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστική επιτροπής, Δρ. Τάσο Σταματέλλο και Δρ. Νικόλαο Χασιώτη, για την ανάγνωση της διπλωματικής εργασίας μου.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική και υπολογιστική μελέτη φόρτισης και ροϊκής πεδίου
ζεύγους αεροτομών για αυτοκίνητα**

**Περιοχή Αεροδυναμικής
Ενεργειακού τομέα**

Στυλιανός Κανελλόπουλος
AM:1242

Επιβλέπων Καθηγητής:
Ερρίκος Σταπουντζής, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Αναπληρωτής Καθηγητής

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τόσο η αεροδυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος δύο πτερύγων ως προς τη μεταβολή της αναπτυσσόμενης κάθετης δύναμης όσο και η μεταβολή της ταχύτητας του αέρα του απορεύματος.

Για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν εμπορικές πτέρυγες για συμβατικά οχήματα, τοποθετημένες κατά συγκεκριμένη γεωμετρία μεταξύ τους και συνδεδεμένες μέσω ακραίων πλακών.

Η διπλωματική αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο περιλαμβάνει διεξαγωγή πειραμάτων, που πραγματοποιήθηκαν στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών. Έγιναν μετρήσεις της κάθετης δύναμης που δέχεται το σύστημα και της ταχύτητας του απορεύματος σε διάφορα σημεία. Από τα δεδομένα αυτά κατασκευάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της κάθετης δύναμης με την ταχύτητα και της μέσης ταχύτητας και rms ταχύτητας απορεύματος με τη θέση του μετρητικού.

Το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, και τη μελέτη του ροϊκού πεδίου του απορεύματος του συστήματος.

Λέξεις – κλειδιά: Αεροδυναμική, Σύστημα πτερύγων, Αεροσήραγγα, Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Κάθετη δύναμη, Ροϊκό πεδίο

Abstract

The aerodynamic behavior of a two-wing system, regarding the differentiation of the produced downforce, as well as the differentiation of the wind speed of the wake are studied in the current diploma dissertation.

Commercial wings for conventional vehicles, positioned in a particular geometry with each other and connected by end plates, are used for the purposes of this dissertation.

The diploma thesis consists of two parts. The first involves experiments, which were conducted in the wind tunnel of the laboratory of Fluid Mechanics. Measurements of downforce and wake velocity on various points, were conducted. From these data, were constructed diagrams that show the change of downforce with the air velocity and the mean and root mean square speed with the distance of the measuring device.

The second part involves creating finite element models, using the finite element program ANSYS, and the study of the flow field in the wake of the system.

Keywords: Aerodynamics, Wing system, Wind Tunnel, Downforce, Computational fluid dynamics, Flow field

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	v
Περίληψη	ix
Abstract.....	xi
Κατάλογος Σχημάτων	xvi
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	xviii
Πίνακας συμβόλων.....	xx
1 Εισαγωγή	1
1.1 Πλαίσιο έρευνας	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	1
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1 Ιστορική αναφορά στην εξέλιξη της αεροδυναμικής μελέτης για οχήματα..	3
2.2 Αεροδυναμική και παραγωγή κάθετης δύναμης από πτέρυγες.....	5
2.3 Είδη ροής.....	6
2.4 Αριθμός Reynolds.....	7
2.5 Κάθετη δύναμη και συντελεστής άνωσης	7
2.6 Μέθοδοι μέτρησης αεροδυναμικών μεγεθών	8
3 Πειραματική Διάταξη	11
3.1 Εισαγωγή.....	11
3.2 Αεροσήραγγα	11
3.2.1 Φυσητήρας	11
3.2.2 Τμήμα δοκιμών	11
3.2.3 Συλλέκτης – Εισαγωγή αέρα.....	12
3.2.4 Αδρανειακή βάση	12
3.2.5 Βαθμονόμηση αεροσήραγγας.....	13
3.3 Παραγωγή τύρβης.....	14
3.4 Σύστημα δύο πτερύγων	15
3.5 Τρόπος στήριξης συστήματος πτερύγων.....	15
3.6 Μετρητικά Όργανα	16
3.6.1 Θερμό-ανεμόμετρο χειρός	17

3.6.2	Συσκευή ζυγίσματος	17
3.6.3	Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος (Hot Wire).....	18
3.6.4	Βαθμονόμηση Hot Wire	19
3.6.5	Σύστημα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων.....	22
3.7	Μεθοδολογία Μετρήσεων.....	22
3.8	Επεξεργασία Δεδομένων	23
4	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα Μετρήσεων.....	25
4.1	Εισαγωγή.....	25
4.2	Αριθμός Reynolds.....	26
4.3	Αποτελέσματα Μετρήσεων Κάθετης Δύναμης για την Αεροτομή.....	27
4.3.1	Αποτελέσματα για Στρωτή Ροή	27
4.3.2	Αποτελέσματα για Τυρβώδη Ροή	29
4.4	Αποτελέσματα Μετρήσεων Ταχύτητας Απορεύματος με το Hot Wire.....	31
4.4.1	Μεταβολή ταχύτητας για στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$	34
4.4.2	Μεταβολή ταχύτητας για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1 = 18^\circ$	37
4.4.3	Μεταβολή ταχύτητας για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_2 = 37^\circ$	40
5	Συμπεράσματα Πειραματικών Μετρήσεων	43
6	Υπολογιστική Μελέτη με το ANSYS CFX	45
6.1	Εισαγωγή.....	45
6.2	Περιγραφή του προβλήματος.....	45
6.2.1	Μέθοδος Επίλυσης	45
6.2.2	Χαρακτηριστικά γεωμετρίας	46
6.2.3	Χαρακτηριστικά πλέγματος	47
6.2.4	Χαρακτηριστικά Συνοριακών Συνθηκών	52
6.2.5	Παράμετροι Επίλυσης.....	54
6.3	Αποτελέσματα – Σχολιασμός.....	56
6.3.1	Μέτρηση ταχύτητας απορεύματος	56
6.4	Γραφική απεικόνιση ροής και σημαντικών μεγεθών	61
6.4.1	Στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$	61
6.4.2	Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$	64
6.4.3	Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$	68
6.5	Συμπεράσματα.....	72

7	Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων	75
7.1	Εισαγωγή	75
7.2	Προφίλ ταχυτήτων στο απόρευμα και κάθετη δύναμη	75
7.2.1	Στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$	75
7.2.2	Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$	76
7.2.3	Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$	77
7.3	Σχολιασμός και σύγκριση των δύο μεθόδων	77
	Παράρτημα	79
	Μέθοδος εγκατάστασης και εκτέλεσης πειραμάτων με το ANSYS CFX.....	79
	Βιβλιογραφία	81

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Όχημα τύπου Formula του 1960	3
Σχήμα 2.2 Όχημα τύπου Formula του 2015	4
Σχήμα 2.3 Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης με τα χρόνια.....	4
Σχήμα 2.4 Ροή σε πτέρυγα.....	5
Σχήμα 2.5 Στρωτή και τυρβώδης ροή	6
Σχήμα 2.6 Μεταβολή συντελεστή άνωσης με γωνία προσβολής.....	8
Σχήμα 2.7 Αεροσήραγγα ανοιχτού κυκλώματος	9
Σχήμα 2.8 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος	10
Σχήμα 3.1 Ανεμιστήρας αεροσήραγγας και η αεροσήραγγα.....	12
Σχήμα 3.2 Αδρανειακή βάση αεροσήραγγας	13
Σχήμα 3.3 Ξύλινο πλαίσιο για παραγωγή τύρβης	14
Σχήμα 3.4 Τρισδιάστατο σχέδιο συστήματος πτερυγών.....	15
Σχήμα 3.5 Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης (ρουλεμάν και ατισταίσεις)	16
Σχήμα 3.6 Εμπρόσθια όψη πειραματικής διάταξης.....	16
Σχήμα 3.7 Αναλογική συσκευή ζυγίσματος.....	17
Σχήμα 3.8 Ενισχυτής σήματος του hot wire και μηχανισμός για την κατακόρυφη μετατόπισή του	18
Σχήμα 3.9 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της θέσης του hot wire ως προς το σύστημα	19
Σχήμα 3.10 Κάρτα NI USB6009 της National Instruments.....	22
Σχήμα 4.1 Σημεία τοποθέτησης του hot wire	32
Σχήμα 6.1 Γεωμετρίες αεροτομών για $\alpha_2=37^\circ$ και $\alpha_1=18^\circ$	46
Σχήμα 6.2 Υπολογιστικός χώρος προβλήματος.....	47
Σχήμα 6.3 Συνολικό πλέγμα της προσομοίωσης και τοπική πύκνωση	48
Σχήμα 6.4 Σύνορα προβλήματος	54
Σχήμα 6.5 Γραφική απεικόνιση πίεσης πάνω στην αεροτομή	61
Σχήμα 6.6 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης για την αεροτομή ..	62
Σχήμα 6.7 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή	62
Σχήμα 6.8 Διανύσματα ταχύτητας.....	63
Σχήμα 6.9 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%.....	64
Σχήμα 6.10 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%.....	64
Σχήμα 6.11 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%	65
Σχήμα 6.12 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%	65
Σχήμα 6.13 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5% ..	66

Σχήμα 6.14 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%	66
.....	
Σχήμα 6.15 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 5%	67
Σχήμα 6.16 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 10%	67
Σχήμα 6.17 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%.....	68
Σχήμα 6.18 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%.....	69
Σχήμα 6.19 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%	69
.....	
Σχήμα 6.20 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%	70
.....	
Σχήμα 6.21 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%.	70
Σχήμα 6.22 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%	71
.....	
Σχήμα 6.23 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 5%	71
Σχήμα 6.24 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 10%	72

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1 Κατανομή ταχύτητας με και χωρίς πλέγμα	14
Διάγραμμα 3.2 Βαθμονόμηση του hot wire για στρωτή ροή	20
Διάγραμμα 3.3 Βαθμονόμηση του hot wire για τυρβώδη ροή.....	21
Διάγραμμα 4.1 Μεταβολή του αριθμού Reynolds σε σχέση με την ταχύτητα.....	26
Διάγραμμα 4.2 Μεταβολή της κάθετης δύναμης με την ταχύτητα για στρωτή ροή .	28
Διάγραμμα 4.3 Μεταβολή του συντελεστή άνωσης με την ταχύτητα για στρωτή ροή	29
Διάγραμμα 4.4 Μεταβολή της κάθετης δύναμης με την ταχύτητα για τυρβώδη ροή	30
Διάγραμμα 4.5 Μεταβολή του συντελεστή άνωσης με την ταχύτητα για τυρβώδη ροή	31
Διάγραμμα 4.6 Χρονοσειρά της ταχύτητας για στρωτή ροή	33
Διάγραμμα 4.7 Χρονοσειρά της ταχύτητας για τυρβώδη ροή.....	33
Διάγραμμα 4.8 Μεταβολή μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση Z του Hot Wire	34
Διάγραμμα 4.9 Μεταβολή rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire.....	34
Διάγραμμα 4.10 Μεταβολή αδιάστατης μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση z του Hot Wire	35
Διάγραμμα 4.11 Μεταβολή αδιάστατης rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire.	35
Διάγραμμα 4.12 Μεταβολή μέσης ταχύτητας απορεύματος U_{mean} με τη θέση Z του Hot Wire.....	37
Διάγραμμα 4.13 Μεταβολή rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire.....	37
Διάγραμμα 4.14 Μεταβολή αδιάστατης μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση z του Hot Wire	38
Διάγραμμα 4.15 Μεταβολή αδιάστατης rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire.	38
Διάγραμμα 4.16 Μεταβολή μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση z του Hot Wire	40
Διάγραμμα 4.17 Μεταβολή rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire.....	40
Διάγραμμα 4.18 Μεταβολή αδιάστατης μέσης ταχύτητας απορεύματος με την κατακόρυφη θέση z του Hot Wire.....	41
Διάγραμμα 4.19 Μεταβολή αδιάστατης rms ταχύτητας με την κατακόρυφη θέση z του Hot Wire.....	41
Διάγραμμα 6.1 Διάγραμμα ταχύτητας απορεύματος με τη θέση Z	57
Διάγραμμα 6.2 Διάγραμμα ταχυτήτων για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$	59
Διάγραμμα 6.3 Διάγραμμα ταχυτήτων για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$	60
Διάγραμμα 7.1 Ταχύτητες απορεύματος για υπολογιστικές και πειραματικές μετρήσεις	75

Διάγραμμα 7.2 Ταχύτητες απορεύματος για υπολογιστικές και πειραματικές μετρήσεις.....	76
Διάγραμμα 7.3 Ταχύτητες απορεύματος για υπολογιστικές και πειραματικές μετρήσεις.....	77

Πίνακας συμβόλων

U_{∞} : Ταχύτητα αναφοράς του αέρα

U_{rms} : Rms τιμή της ταχύτητας (Μέση τετραγωνική ρίζα)

U_{mean} : Μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα

z : Θέση hot wire πίσω από την αεροτομή

L : Κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα πτερύγων

ρ : Πυκνότητα του αέρα

v : Κινηματικό ιξώδες

Re : Αριθμός Reynolds

α_1 : Γωνία προσβολής 1 της κινητής πτέρυγας

α_2 : Γωνία προσβολής 2 της κινητής πτέρυγας

c : Χορδή του συστήματος πτερύγων

C_L : Συντελεστής άνωσης του συστήματος πτερύγων

A : Επιφάνεια του συστήματος πτερύγων

N : Newton

kg : χιλιόγραμμα

V : Volts

1 Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο έρευνας

Η βελτίωση της απόδοσης των οχημάτων αποτελεί διαχρονικά στόχο των αυτοκινητοβιομηχανιών. Τόσο η βελτίωση της συμπεριφοράς των συμβατικών οχημάτων όσο και η αύξηση των επιδόσεων των αγωνιστικών οχημάτων αντανακλούν την προσπάθεια αυτή.

Ειδικά τα τελευταία 50 χρόνια, στην προσπάθεια επίτευξης αυτού του στόχου, παρατηρείται η τάση μείωσης των αντιστάσεων του αέρα διαμορφώνοντας κατάλληλα τη γεωμετρία του οχήματος. Βέβαια, εκτός από τη διαμόρφωση της γεωμετρίας του οχήματος, κρίθηκε απαραίτητη η τοποθέτηση κατάλληλων αεροδυναμικών συστημάτων ώστε να επιτυγχάνεται ο παραπάνω στόχος.

Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων προσδίδει χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα, τόσο στα συμβατικά όσο και στα αγωνιστικά οχήματα. Για τα συμβατικά οχήματα ένας καλός αεροδυναμικός σχεδιασμός, οδηγεί στη μείωση των αντιστάσεων που δέχεται το όχημα στην κίνηση του, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμων. Για τα αγωνιστικά οχήματα από την άλλη, ένας καλός αεροδυναμικός σχεδιασμός δεν μειώνει μόνο την αντίσταση του αέρα καθώς το όχημα κινείται, αλλά με χρήση κατάλληλων αεροδυναμικών συστημάτων δημιουργούνται κάθετες δυνάμεις οι οποίες επιτρέπουν την γρηγορότερη κίνηση του οχήματος στο οδόστρωμα.

Ένα από τα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν είναι ένας συνδυασμός πτερύγων, οι οποίες μελετώνται στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα δύο πτερύγων με κινητή άνω πτέρυγα, με σκοπό την εύρεση της μεταβολής της κάθετης δύναμης του συστήματος ως προς τη μεταβολή της ταχύτητας του αέρα και της γωνίας προσβολής της άνω πτέρυγας. Ταυτόχρονα μελετήθηκε το ροϊκό πεδίο του απορεύματος στο σύστημα συναρτήσεως της θέσης του μετρητικού, για διάφορα σημεία. Τέλος, δημιουργήθηκε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για να διαπιστωθούν τυχόν αποκλίσεις ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις και την υπολογιστική προσομοίωση.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται στα ακόλουθα επτά κεφάλαια.

Το πρώτο αποτελεί και την εισαγωγή της εργασίας, όπου παρατίθεται το συνολικό πλαίσιο του προβλήματος, καθώς επίσης και η διάρθρωση της.

Το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει το κατάλληλο θεωρητικό για την ανάλυση και επεξήγηση των αεροδυναμικών φαινομένων που παρατηρούνται στις πτέρυγες, σαν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.

Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της αεροσήραγγας που χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος παραγωγής της τύρβης σε αυτή. Έπειτα, παρουσιάζεται το σύστημα πτερύγων και ο τρόπος στήριξής του στην αεροσήραγγα, καθώς και η μεθοδολογία μετρήσεων και επεξεργασίας δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα των πτερύγων αλλά και για την ταχύτητα του απορεύματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται υπό μορφή συμπερασμάτων όλα τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.

Στο έκτο κεφάλαιο υπολογίζονται τα επιθυμητά μεγέθη, χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα. Αναλύεται η μέθοδος κατασκευής του υπολογιστικού χώρου και του πλέγματος του προσομοιώματος και εξάγονται συμπεράσματα από αυτές τις μετρήσεις.

Στο έβδομο κεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μελετών και της υπολογιστικής μεθόδου.

Τέλος, στο παράρτημα της εργασίας παρουσιάζεται η μέθοδος εγκατάστασης του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS CFX.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Ιστορική αναφορά στην εξέλιξη της αεροδυναμικής μελέτης για οχήματα

Ανέκαθεν υπήρχε η επιθυμία για τη βελτίωση της απόδοσης των οχημάτων, τόσο από τις αυτοκινητοβιομηχανίες όσο και τις ομάδες του μηχανοκίνητου αθλητισμού, και γίνεται φανερό ότι η εκμετάλλευση του αέρα μπορούσε να συμβάλει σε αυτήν την προσπάθεια. Μπορεί να παρατηρηθεί πως ακόμα και σε οχήματα του 1960, υπήρχε αεροδυναμικός σχεδιασμός με στόχο τη μείωση της αντίστασης που δέχεται το όχημα από τον αέρα. Ο σκοπός του σχεδιασμού αυτού ήταν το όχημα να μπορεί να αναπτύσσει μεγαλύτερες ταχύτητες και να καταναλώνει λιγότερα καύσιμα.



Σχήμα 2.1 Όχημα τύπου Formula του 1960

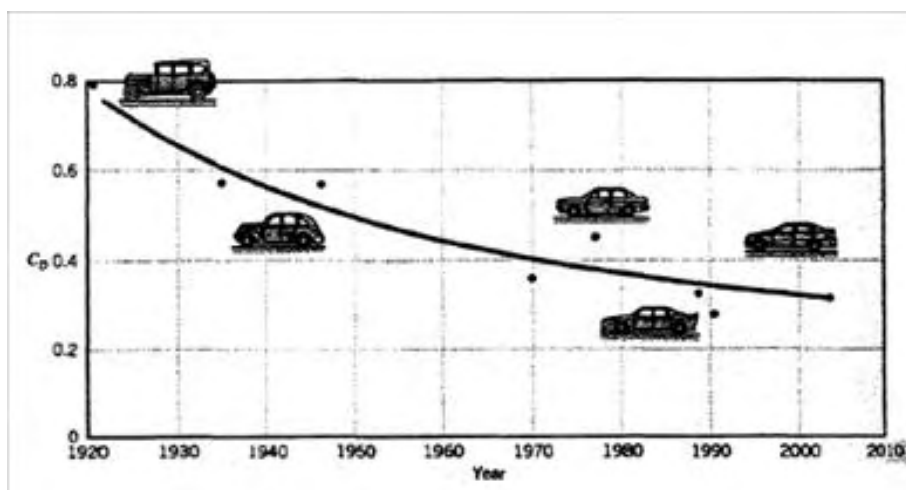
Με την εξέλιξη της τεχνολογίας όμως προέκυψε η επιθυμία της περαιτέρω εκμετάλλευσης των αεροδυναμικών δυνάμεων και των οφελών που μπορούν να προσφέρουν. Έτσι, εισήχθη στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας ο όρος των πτερύγων, οι οποίες ήταν παρόμοιες με

αυτές που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα. Ο σκοπός τους, βέβαια, στα οχήματα δεν ήταν η δημιουργία δύναμης άνωσης, αλλά ένας συνδυασμός κάθετων δυνάμεων οι οποίες θα συνεισέφεραν στην πρόσφυση του οχήματος στο οδόστρωμα, επιτρέποντας την επίτευξη όλο και μεγαλύτερων ταχυτήτων. Ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση πτερυγών έχει εξελιχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και με την εφαρμογή τους να επεκτείνεται και σε συμβατικά αυτοκίνητα με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας των επιβατών. (Katz J., 1995)



Σχήμα 2.2 Όχημα τύπου Formula του 2015

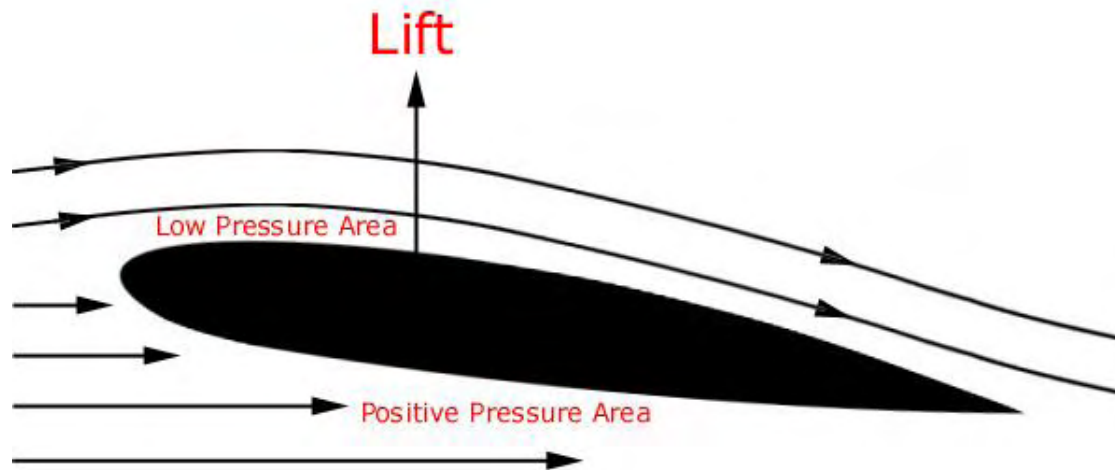
Όπως παρατηρείται από το παραπάνω σχήμα, ο σχεδιασμός των πτερυγών έχει εξελιχθεί πολύ, καθώς πλέον χρησιμοποιούνται πτέρυγες περίπλοκου σχήματος και σε διάφορες διατάξεις. Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η μείωση του συντελεστή αντίστασης στην πορεία των χρόνων καθώς βελτιωνόταν ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των οχημάτων.



Σχήμα 2.3 Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης με τα χρόνια

2.2 Αεροδυναμική και παραγωγή κάθετης δύναμης από πτέρυγες

Για την κατανόηση της λειτουργίας μίας πτέρυγας αυτοκινήτου, πρέπει πρώτα να αναλυθεί η αεροδυναμική συμπεριφορά της. Τα στοιχεία που προκύπτουν από τους υπολογισμούς έχουν αντίθετο πρόσημο για την περίπτωση των πτερύγων αυτοκινήτων.



Σχήμα 2.4 Ροή σε πτέρυγα

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι, λόγω του σχήματος και της γωνία προσβολής της πτέρυγας, ο αέρας αναγκάζεται να κινηθεί γρηγορότερα στο άνω μέρος σε σχέση με το κάτω μέρος της. Αυτή η διαφορά ταχύτητας προκαλεί, λόγω του νόμου του Βερνουλλι, και διαφορά πιέσεων ανάμεσα στην άνω και κάτω επιφάνεια (πλευρά χαμηλών και υψηλών πιέσεων αντίστοιχα) (Katz J, 1995) Ο νόμος του Βερνουλλι ορίζεται ως εξής:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} = Constant \quad (2.1)$$

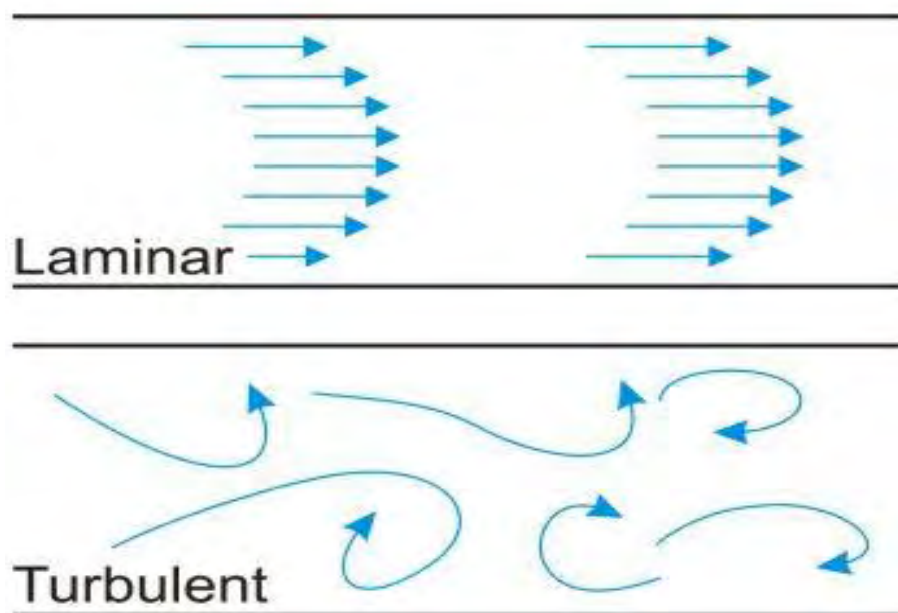
, όπου p είναι η πίεση, ρ είναι η πυκνότητα και U είναι η ταχύτητα του ρευστού.

Λόγω της διαφοράς των πιέσεων στην πτέρυγα, παράγεται μία δύναμη η οποία τείνει να ανασηκώσει την πτέρυγα προς τα πάνω. Ταυτόχρονα, παράγεται οπισθέλκουσα δύναμη η οποία δημιουργεί αντίσταση στην πτέρυγα καθώς κινείται στον αέρα. Συνήθως η οπισθέλκουσα σε μία πτέρυγα είναι αρκετά μικρότερη από την παραγόμενη άνωση.

2.3 Είδη ροής

Η ροή ενός ρευστού διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες, την στρωτή και την τυρβώδη ροή. Εάν η ροή κινείται με διανύσματα ταχύτητας τα οποία είναι παράλληλα μεταξύ τους και έχουν τιμή, τη μέση τιμή της ροής τότε η ροή ονομάζεται στρωτή. Αντιθέτως, αν η ταχύτητα έχει μία μέση τιμή αλλά τα διανύσματα της αλλάζουν πορεία τυχαία μέσα στο χώρο, τότε η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης (Streeter V. & Wylie B. & Bedford K., 1998).

Το είδος της ροής είναι σημαντικό για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό διότι επηρεάζει την κάθετη δύναμη του οχήματος, την οπισθέλκουσα και την αποκόλληση ροής. Παρακάτω εικονίζονται παραδείγματα τυρβώδους και στρωτής ροής.



Σχήμα 2.5 Στρωτή και τυρβώδης ροή

Η ροή μπορεί να μεταβληθεί από στρωτή σε τυρβώδη ακόμα και πάνω στην πτέρυγα, λόγω της γεωμετρίας ή της επιφάνειάς της. Η ροή που ακολουθεί το σχήμα της πτέρυγας σε όλη την απόσταση χαρακτηρίζεται ως προσκολλημένη και επηρεάζει σημαντικά την οπισθέλκουσα και την κάθετη δύναμη που παράγεται, ενώ, αντίθετα, η ροή ονομάζεται αποκολλημένη αν σε κάποιο σημείο σταματήσει να ακολουθεί τη γεωμετρία του συστήματος πτερύγων.

2.4 Αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος αριθμός που δίνει ένα μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων σε ιξώδεις δυνάμεις και κατά συνέπεια ποσοτικοποιεί τη σχετική σημασία αυτών των δύο τύπων των δυνάμεων για δεδομένες συνθήκες ροής. Η έννοια εισήχθη από τον George Stokes το 1851 αλλά πήρε το όνομά της από τον Osborne Reynolds ο οποίος διέδωσε τη χρήση του το 1883.

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.2)$$

, όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, U είναι η ταχύτητα, L ένα μήκος αναφοράς και μ είναι το ιξώδες του ρευστού.

Για τιμές του αριθμού Reynolds κάτω από 10^5 η ροή που περνά από μια αεροτομή θα είναι στρωτή και προσκολλημένη στο οριακό στρώμα. Σε τιμές πάνω από $5 \cdot 10^5$ έχουμε τυρβώδη ροή και οι επιδράσεις της κάθετης δύναμης μειώνονται.

2.5 Κάθετη δύναμη και συντελεστής άνωσης

Από την κάθετη δύναμη που παράγεται προκύπτει ο συντελεστής άνωσης μίας αεροτομής. Η σχέση για την άνοση εκφράζεται με τον τύπο:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 C_L A \quad (2.3)$$

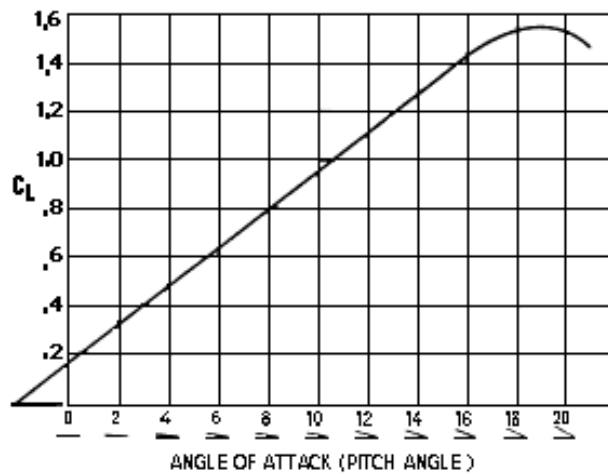
, όπου L είναι η άνοση του συστήματος πτερύγων και στην περίπτωση μας η κάθετη δύναμη (downforce), ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, C_L είναι ο συντελεστής άνωσης του συστήματος πτερύγων και A είναι η επιφάνεια επιρροής του συστήματος πτερύγων. (

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς τον συντελεστή άνωσης προκύπτει η επόμενη σχέση.

$$C_L = \frac{2L}{\rho U_{\infty}^2 A} \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής άνωσης είναι αδιάστατο μέγεθος. Για να υπολογιστεί ο συντελεστής άνωσης από τον συνδυασμό ταχύτητας και της κάθετης δύναμης, θα πρέπει η γραφική παράσταση των δύο μεγεθών να είναι γραμμική.

Ο συντελεστής άνωσης επηρεάζεται σημαντικά και από τη γωνία προσβολής των πτερύγων όπως μπορούμε να δούμε παρακάτω.



Σχήμα 2.6 Μεταβολή συντελεστή άνωσης με γωνία προσβολής

2.6 Μέθοδοι μέτρησης αεροδυναμικών μεγεθών

Τα πειράματα για την εξέταση των αεροδυναμικών φαινομένων που παρουσιάζονται κατά την κίνηση των οχημάτων, γίνονται με δύο τρόπους:

- σε αεροσήραγγες με μοντέλα υπό κλίμακα ή μη,
- σε συνθήκες δρόμου.

Οι σύγχρονες αεροσήραγγες λειτουργούν γενικά με απορρόφηση αέρα και αποτελούνται από τρία κύρια μέρη:

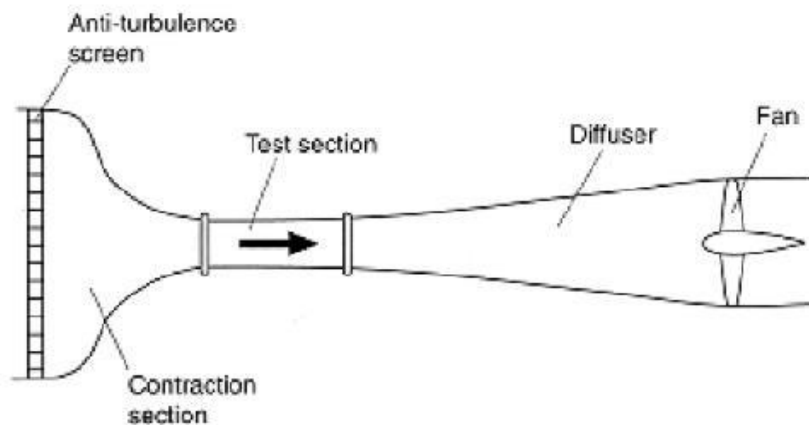
- I. Το συλλέκτη, που βρίσκεται στο εμπρός μέρος της σήραγγας. Μέσα από αυτόν επιταχύνεται προοδευτικά ο εισερχόμενος αέρας και συγχρόνως εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του και μειώνεται το μέγεθος των στροβιλισμών.

- II. Το τμήμα δοκιμών. Εδώ η διατομή της δέσμης του αέρα είναι σταθερή και επικρατούν παντού οι ίδιες συνθήκες ροής. Φυσικά, απόλυτα ομαλή ροή δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στην πράξη.
- III. Το ακροφύσιο εξόδου ή διαχύτη, που βρίσκεται στο πίσω μέρος της αεροσήραγγας. Σκοπός του διαχύτη είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του εξερχομένου αέρα, ελαττώνοντας έτσι την απώλεια κινητικής ενέργειας και κατά συνέπεια μειώνοντας την απαίτηση σε ενέργεια που πρέπει να δοθεί από τον κινητήρα.

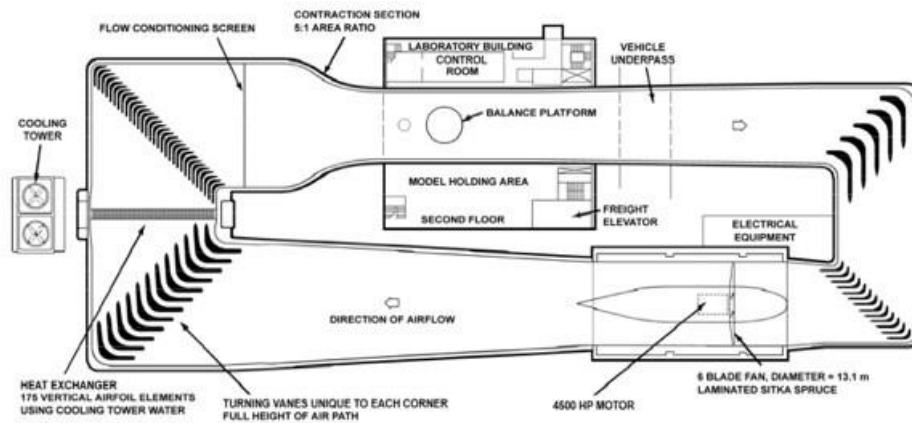
Επίσης, οι αεροσήραγγες είναι εξοπλισμένες και με άλλα εξαρτήματα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως ο ανεμιστήρας για την παραγωγή αέρα, ο κινητήρας που κινεί τον ανεμιστήρα και ένα φίλτρο εξομάλυνσης της ροής.

Η κατάταξη σε ομάδες των αεροσήραγγων μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια, τα κυριότερα των οποίων είναι η ταχύτητα ροής στο τμήμα δοκιμών, ο τύπος του τμήματος δοκιμών, η δυνατότητα εκτέλεσης διάφορων πειραμάτων και ο τύπος του κυκλώματος μέσα στο οποίο γίνεται η κίνηση του αέρα. Έτσι, οι αεροσήραγγες χωρίζονται σε:

- i. Σήραγγες υποηχητικές, διηχητικές, υπερηχητικές και υπέρ-υπερηχητικές
- ii. Σήραγγες αεροδυναμικές, περιβαλλοντικές ή κλιματολογικές. Στις πρώτες γίνονται μόνο αεροδυναμικές μελέτες ενώ στις άλλες μπορεί να μετρηθεί και η θερμοκρασία και υγρασία
- iii. Σήραγγες κλειστού τμήματος δοκιμών
- iv. Σήραγγες κλειστής ροής ή κλειστού κυκλώματος στις οποίες ο αέρας ανακυκλοφορεί και σήραγγες ανοιχτού κυκλώματος



Σχήμα 2.7 Αεροσήραγγα ανοιχτού κυκλώματος



Σχήμα 2.8 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος

Η μέτρηση των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- a) μέτρηση με μηχανισμό ισορροπίας εξωτερικής δύναμης (external force balance),
- b) μέτρηση της δύναμης μέσω κατανομής πιέσεων στο σώμα (pressure distribution).

Η μέτρηση με μηχανισμό ισορροπίας εξωτερικής δύναμης γίνεται με την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυσιομέτρων εξωτερικά του μοντέλου, πάνω στην πλατφόρμα όπου στηρίζεται. Οι μετρήσεις καταγράφονται από τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα και αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συνήθως χρησιμοποιούνται 6 αισθητήρες, οι οποίοι μετράνε τις τρεις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα την κάθετη, οριζόντια και πλευρική, καθώς και τις τρεις ροπές που ασκούνται σε αυτό. (Glenn Research Center, *External Force Balance*, NASA) Οι μετρήσεις των δυνάμεων είναι σε N.

Η μέτρηση της δύναμης μέσω κατανομής πιέσεων, γίνεται με την τοποθέτηση αισθητήρων για τη μέτρηση της πίεσης σε διάφορα σημεία πάνω στην επιφάνεια του σώματος. Αφού μετρηθεί η πίεση στην άνω και κάτω επιφάνεια του σώματος, υπολογίζονται οι διαφορές πίεσης και με την ολοκλήρωσή τους οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα. Η καταγραφή των μετρήσεων είναι σε Pa και μετατρέπεται σε N.

3 Πειραματική Διάταξη

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της αεροσήραγγας που χρησιμοποιήθηκε και στη μέθοδο παραγωγής της τύρβης σε αυτή. Έπειτα, παρουσιάζεται το σύστημα πτερύγων και ο τρόπος στήριξής του στην αεροσήραγγα. Τέλος, γίνεται αναφορά στα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα, καθώς και ανάλυση του τρόπου λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων.

3.2 Αεροσήραγγα

Η αεροσήραγγα που χρησιμοποιείται από το εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών είναι ανοιχτού κυκλώματος αέρα και αποτελείται από το συλλέκτη, το τμήμα δοκιμών, το τμήμα του ανεμιστήρα και το διαχύτη. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα προαναφερθέντα επιμέρους τμήματα.

3.2.1 Φυσητήρας

Ο αέρας αναρροφάται από έναν ανεμιστήρα τεσσάρων πτερυγίων. Η περιστροφή και η ρύθμιση των στροφών του ανεμιστήρα πραγματοποιείται από ένα μετατροπέα (inverter) τύπου Toshiba VF-SXN, ο οποίος μπορεί να φτάσει μέχρι τα 57Hz. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί ταχύτητα αέρα έως και 22 m/s. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε συχνότητα του inverter 50 Hz και η ταχύτητα που μετρήθηκε ήταν 14.85 m/s για στρωτή ροή.

3.2.2 Τμήμα δοκιμών

Το τμήμα όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις έχει διαστάσεις (300 cm x 50 cm x 70 cm) και αποτελείται από μεταλλικό πλαίσιο, που καλύπτεται από πλεξιγκλάς υψηλής αντοχής. Στο επάνω μέρος υπάρχουν μια σειρά από ξύλινα πάνελ που διευκολύνουν την αλληλεπίδραση του χρήστη με τον εσωτερικό χώρο της αεροσήραγγας, καθώς και σύστημα με οδοντώσεις και γρανάζια στο οποίο στηρίζονται τα μετρητικά όργανα.

3.2.3 Συλλέκτης – Εισαγωγή αέρα

Η εισαγωγή του αέρα πραγματοποιείται από συλλέκτη ορθογώνιας διατομής. Ο συλλέκτης είναι μειούμενης διατομής η οποία καταλήγει στις διαστάσεις της διατομής του χώρου δοκιμών. Μπροστά στην εισαγωγή υπάρχει κυψελοειδές πλέγμα honeycomb από αλουμίνιο, με σκοπό την εξομάλυνση της ροής, το οποίο περιλαμβάνει κατά προσέγγιση 66000 κυψέλες διαστάσεων 8 x 70 mm. Μετά το κυψελοειδές πλέγμα είναι τοποθετημένες άλλες τρεις σειρές όμοιων πλεγμάτων για την εξομάλυνση της ροής και τη μείωση της τύρβης.



Σχήμα 3.1 Ανεμιστήρας αεροσήραγγας και η αεροσήραγγα

3.2.4 Αδρανειακή βάση

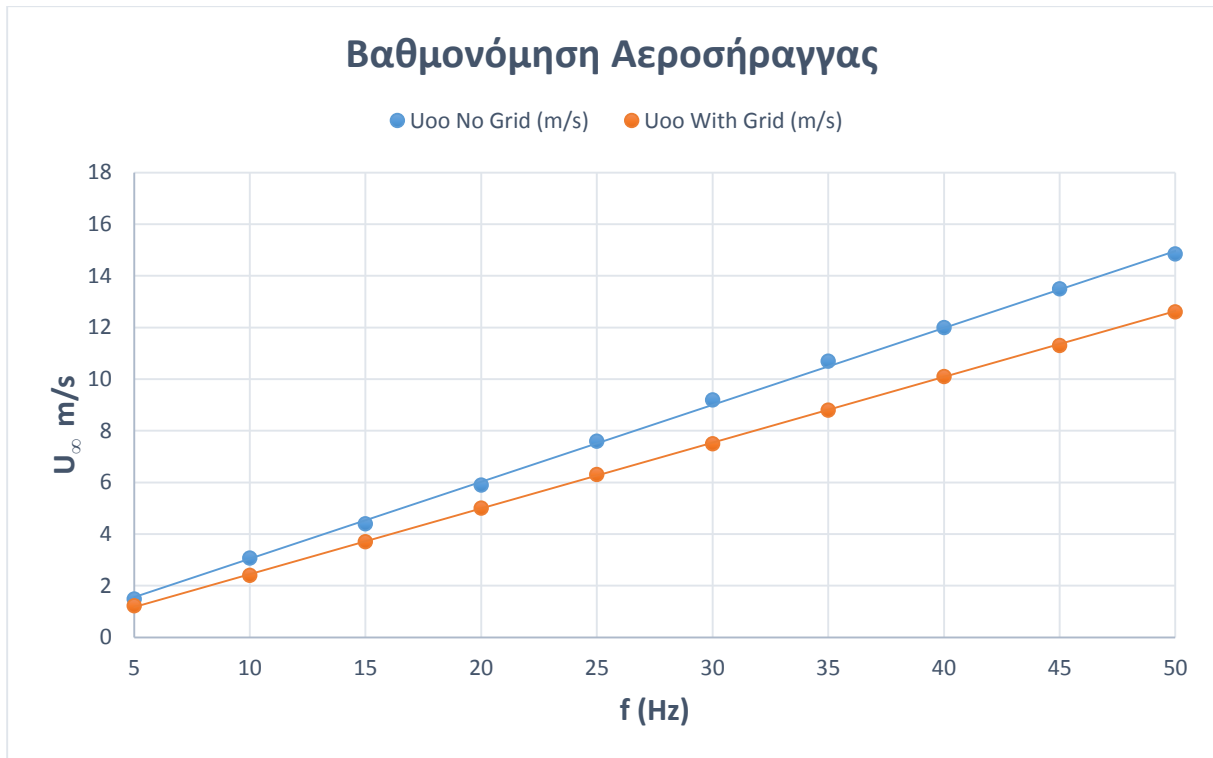
Στο κάτω μέρος της αεροσήραγγας υπάρχει κατάλληλη βάση για την απορρόφηση των κραδασμών που μπορεί να παράγονται από το περιβάλλον, με σκοπό οι διάφορες ταλαντώσεις που παράγονται επηρεάζουν τις μετρήσεις. Η βάση αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο στο οποίο έχουν συγκολληθεί ελατήρια, πάνω στα οποία είναι συγκολλημένα μεταλλικά βάρη, και κοιλοδοκοί που σχηματίζουν επίπεδη επιφάνεια. Πάνω στο σύστημα αυτό τοποθετούνται οι βάσεις του συστήματος πτερύγων. Τέλος, έχουν τοποθετηθεί 4 αποσβεστήρες καθώς πιθανές ταλαντώσεις της βάσης θα επηρέαζαν τις μετρήσεις.



Σχήμα 3.2 Αδρανειακή βάση αεροσήραγγας

3.2.5 Βαθμονόμηση αεροσήραγγας

Η βαθμονόμηση της αεροσήραγγας πραγματοποιήθηκε με θερμό-ανεμόμετρο μεγάλης ευαισθησίας. Το θερμό-ανεμόμετρο ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 3 χορδών μπροστά από την αεροτομή και κατέγραφε τη μέση ταχύτητα του αέρα. Αυξάνοντας σταδιακά την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα με βήμα 5Hz, ξεκινώντας από τα 5Hz έως τα 50Hz, καταγραφόταν η ταχύτητα του αέρα για την αντίστοιχη συχνότητα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με και χωρίς πλέγμα για την παραγωγή τυρβώδους και στρωτής ροής αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 3.1 Κατανομή ταχύτητας με και χωρίς πλέγμα

3.3 Παραγωγή τύρβης

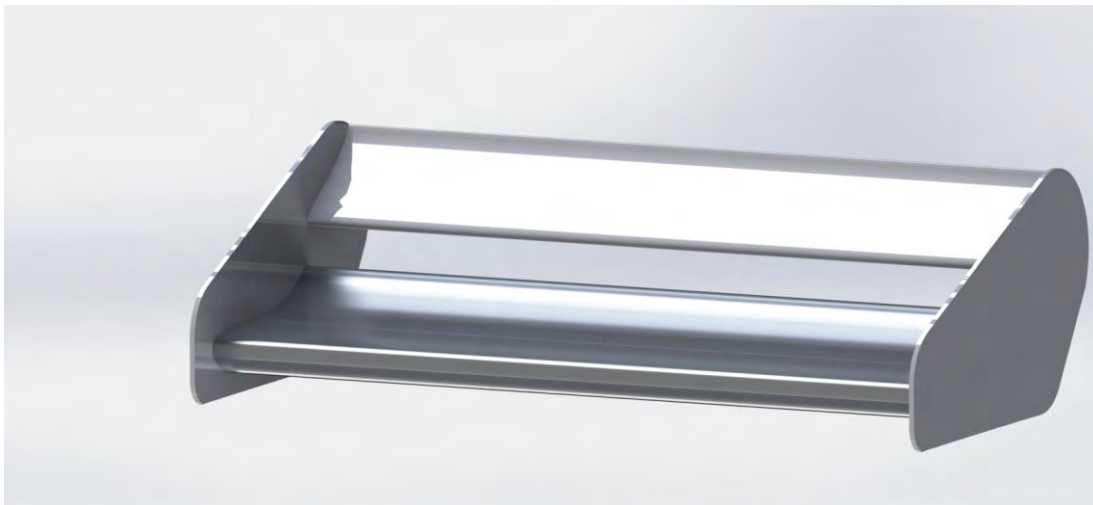
Για την παραγωγή τυρβώδους ροής στα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε ξύλινο πλαίσιο στην είσοδο της ροής. Στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν 48 τετράγωνα διαστάσεων 7.2 cm x 7.2 cm το καθένα και είναι κατασκευασμένο από ξύλο τετραγωνικής διατομής.



Σχήμα 3.3 Ξύλινο πλαίσιο για παραγωγή τύρβης

3.4 Σύστημα δύο πτερύγων

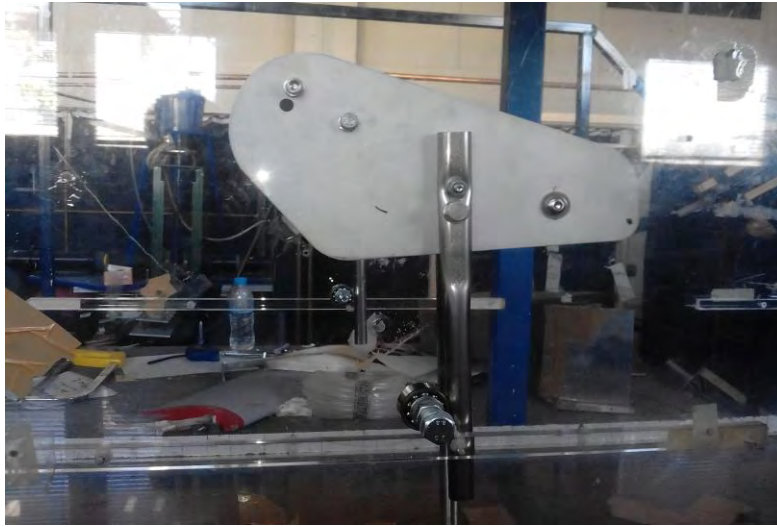
Χρησιμοποιήθηκε εμπορικό σύστημα δύο πτερύγων με γεωμετρική ασυμμετρία και καμπυλότητα για συμβατικά αυτοκίνητα, από τις οποίες η άνω είναι κινητή ενώ η κάτω σταθερή, και συγκρατούνται πλευρικά από δύο ακραίες πλάκες (end plates). Οι πτέρυγες είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο με λείανση υψηλής ποιότητας. Η σταθερή πτέρυγα, με χορδή 13.7 cm, είναι τοποθετημένη με γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$, ενώ η κινητή πτέρυγα, με χορδή 6.5 cm, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων τοποθετήθηκε σε δύο γωνίες προσβολής $\alpha_1=18^\circ$ και η $\alpha_2=37^\circ$. Το σύστημα πτερύγων είχε συνολικό πλάτος 46 cm.



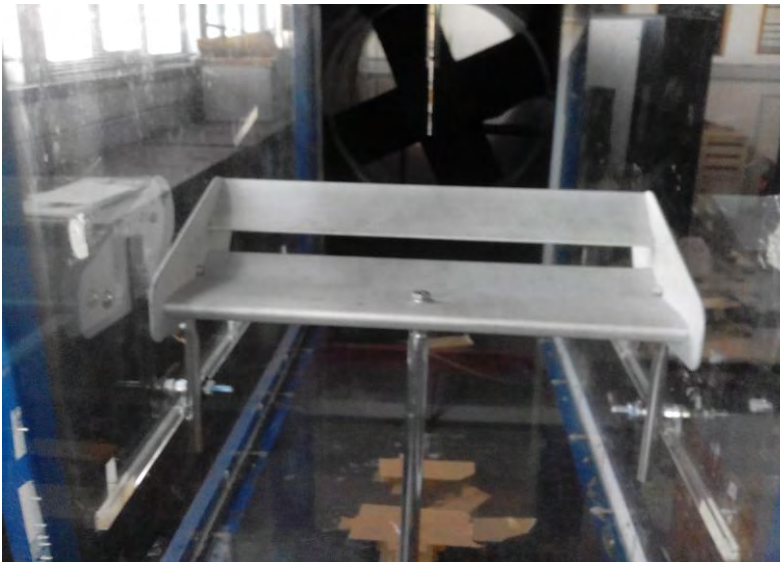
Σχήμα 3.4 Τρισδιάστατο σχέδιο συστήματος πτερύγων

3.5 Τρόπος στήριξης συστήματος πτερύγων

Το σύστημα πτερύγων στηρίχθηκε στην αεροσήραγγα μέσω της σταθερής πτέρυγας και ενός σωλήνα διατομής 1,2 cm από ανοξείδωτο χάλυβα. Στο κέντρο της πτέρυγας έγινε μία οπή 10 mm όπου βιδώθηκε ο χαλύβδινος σωλήνας. Στη συνέχεια, ο σωλήνας βιδώθηκε στη βάση της συσκευής ζυγίσματος, που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή του downforce το οποίο παράγγαγε το σύστημα πτερύγων. Για να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα από την οπισθέλκουσα δύναμη που παράγεται από το σύστημα, κατασκευάστηκαν δύο αντιστάσεις οι οποίες επιτρέπουν την κατακόρυφη αλλά απαγορεύουν την οριζόντια μετατόπιση του συστήματος πτερύγων. Για να επιτευχθεί αυτό, κόπηκαν δύο λεπτοί σωλήνες από χάλυβα οι οποίοι βιδώθηκαν πλευρικά στις ακραίες πλάκες. Έπειτα, έγιναν δύο οπές στο πλεξιγκλάς της αεροσήραγγας όπου βιδώθηκαν δύο βίδες 8 mm, πάνω στις οποίες στηρίχτηκαν δύο ρουλεμάν πάχους 1,5 cm, προκειμένου να κινείται ελεύθερα το σύστημα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.



Σχήμα 3.5 Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης (ρουλεμάν και ατισταίσεις)



Σχήμα 3.6 Εμπρόσθια όψη πειραματικής διάταξης

3.6 Μετρητικά Όργανα

Τα βασικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τη μέτρηση των απαραίτητων μεγεθών, είναι τα εξής:

- Θερμό-ανεμόμετρο χειρός
- Συσκευή ζυγίσματος

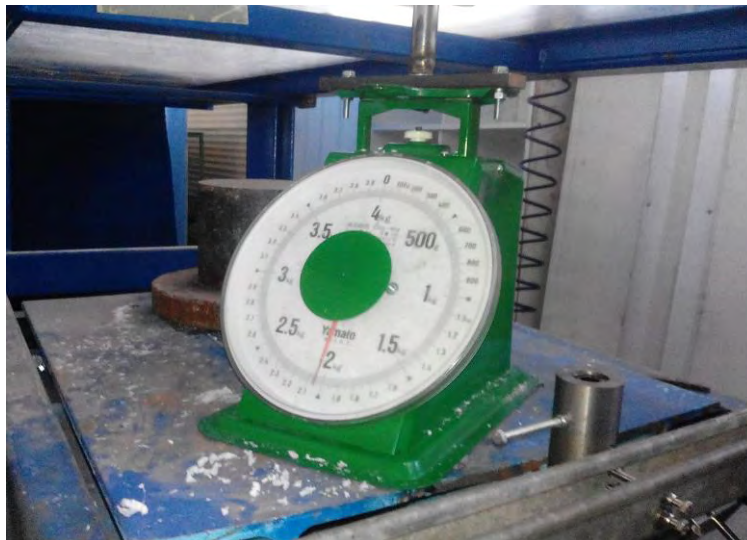
- Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος (Hot Wire)
- Υπολογιστικό πρόγραμμα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων

3.6.1 Θερμό-ανεμόμετρο χειρός

Για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα σε κανονικές συνθήκες και για τη βαθμονόμηση της αεροσήραγγας χρησιμοποιήθηκε θερμό-ανεμόμετρο υψηλής ευαισθησίας, το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση ίση με το τριπλάσιο του μήκους της χορδής της σταθερής πτέρυγας μπροστά από το σύστημα πτερύγων, προκειμένου να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από το σύστημα και να μετριέται η ταχύτητα που δέχεται αυτό. Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής ελήφθη η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ταχύτητας και χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους ως η ταχύτητα της αεροσήραγγας για τη συγκεκριμένη ροή.

3.6.2 Συσκευή ζυγίσματος

Για τη μέτρηση της δύναμης που παράγεται από το σύστημα πτερύγων λόγω της μεταβολής του αέρα, χρησιμοποιήθηκε αναλογική συσκευή ζυγίσματος. Η συσκευή ζυγίσματος είχε εύρος από 0 έως 4 kg. Μετά τη στήριξη του συστήματος πτερύγων πάνω στη συσκευή ζυγίσματος η ένδειξη ήταν 2 kg. Η τιμή αυτή αφαιρούνταν από τις τιμές που καταγράφονταν.



Σχήμα 3.7 Αναλογική συσκευή ζυγίσματος

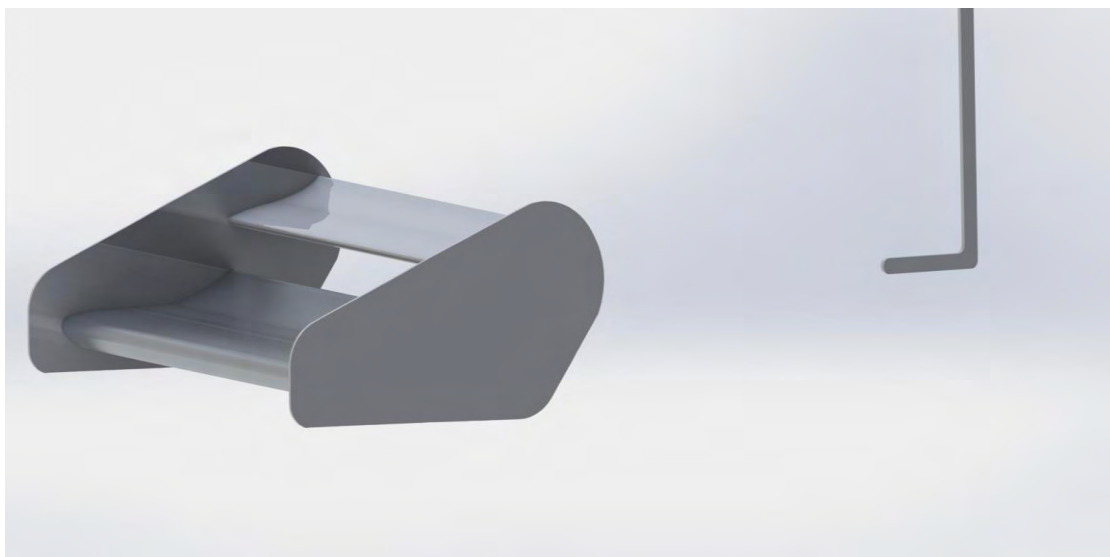
3.6.3 Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος (Hot Wire)

Για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων, χρησιμοποιήθηκε ανεμόμετρο θερμού σύρματος τύπου hot wire. Το συγκεκριμένο ανεμόμετρο είναι υψηλής ευαισθησίας και αντιλαμβάνεται πολύ μικρές μεταβολές της ταχύτητας του αέρα.

Η μέτρηση της ταχύτητας με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία στηρίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του σύρματος, η οποία σταθεροποιείται σε διαφορετική τιμή για την εκάστοτε ταχύτητα. Τα βασικά στοιχεία του είναι ο αισθητήρας υψηλής ευαισθησίας και ο ενισχυτής του σήματος. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα πολύ λεπτό σύρμα από πλατίνα και βολφράμιο. Με τη βοήθεια του ενισχυτή, ο οποίος παρέχει μία στιγμιαία τάση, διατηρείται υψηλή η θερμοκρασία του σύρματος περίπου στους 180 C°. Το θερμοστοιχείο τοποθετήθηκε 40 cm πίσω από την ακμή πρόσπτωσης της σταθερής πτέρυγας του συστήματος.



Σχήμα 3.8 Ενισχυτής σήματος του hot wire και μηχανισμός για την κατακόρυφη μετατόπισή του



Σχήμα 3.9 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της θέσης του hot wire ως προς το σύστημα

3.6.4 Βαθμονόμηση Hot Wire

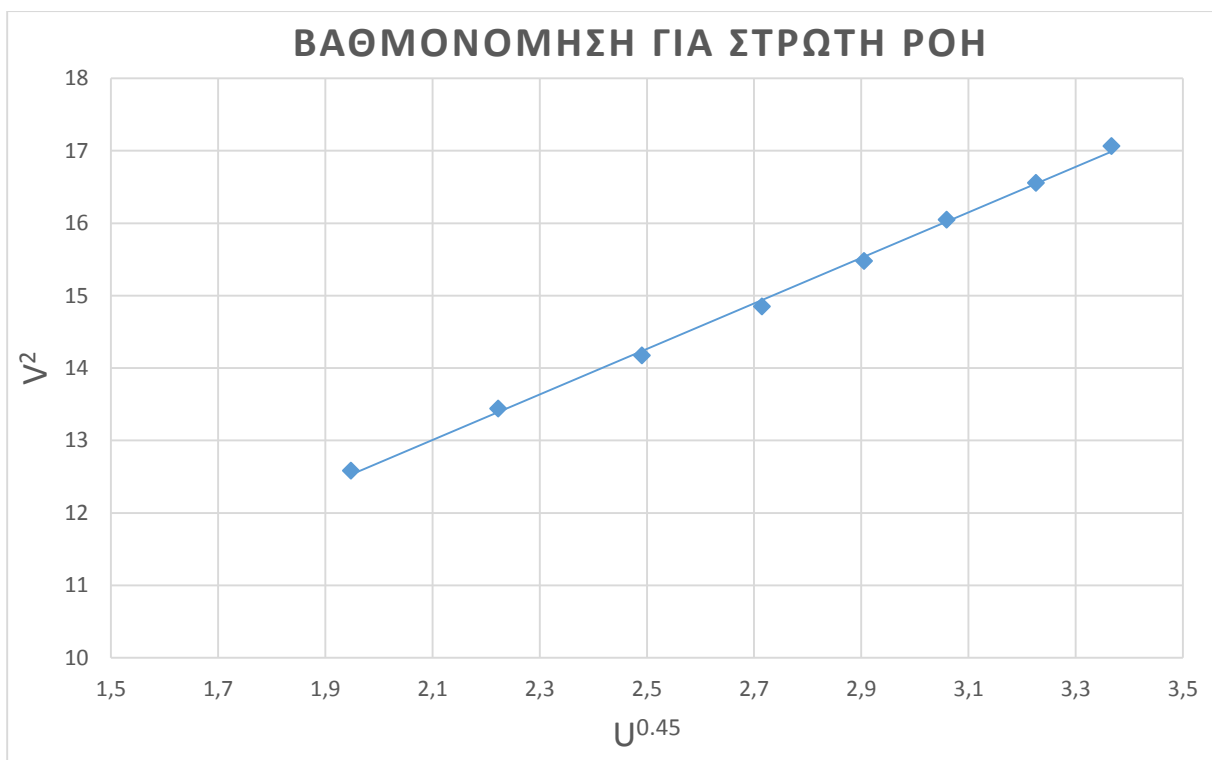
Για να καταγραφούν αξιόπιστες μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων με τη βοήθεια του hot wire, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια του θερμό-ανεμομέτρου χειρός. Καταγράφεται η ταχύτητα της ροής από το θερμό-ανεμόμετρο και η μέση τάση που δίνεται από το hot wire. Και οι δύο μετρήσεις πραγματοποιούνται για την ταχύτητα της ροής του αέρα σε κανονικές συνθήκες, χωρίς την επίδραση του συστήματος πτερύγων. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για διάφορες συχνότητες του inverter και για τις δύο περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής αέρα. Στη μεν στρωτή ροή ξεκινάμε από τα 15 Hz έως τα 50 Hz με βήμα 5 Hz, στη δε τυρβώδη ξεκινάμε από 20 Hz ως 50 Hz με βήμα 10 Hz. Με τη μέθοδο αυτή αντιστοιχούνται οι τιμές της ταχύτητας της ροής με τις τιμές της απαραίτητης τάσης του hot wire. Για την αναλογία αυτή χρησιμοποιείται ο νόμος του King που μας δίνει την εξίσωση:

$$E^2 = A + BU^{0.45} \quad (3.1)$$

Για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των A και B, προκειμένου να βρεθεί η σχέση μεταξύ ταχύτητας και τάσης. Η ταχύτητα μετράτε σε m/s και η τάση σε V. Από την εφαρμογή της διαδικασίας πήραμε τα επόμενα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.1 Τιμές ταχύτητας και τάσης σε σχέση με τη συχνότητα του inverter (στρωτή ροή)

Hz	U_{oo} (m/s)	V (Volt)	$U_{oo}^{0.45}$	V^2
15	4.4	-3.5468	1.94784	12.58031
20	5.9	-3.6657	2.22271	13.43757
25	7.6	-3.7650	2.49095	14.17295
30	9.2	-3.8536	2.71459	14.85082
35	10.7	-3.9338	2.90551	15.47522
40	12	-4.0056	3.05936	16.04561
45	13.5	-4.0688	3.22589	16.55401
50	14.85	-4.1307	3.36726	17.06313



Διάγραμμα 3.2 Βαθμονόμηση του hot wire για στρωτή ροή

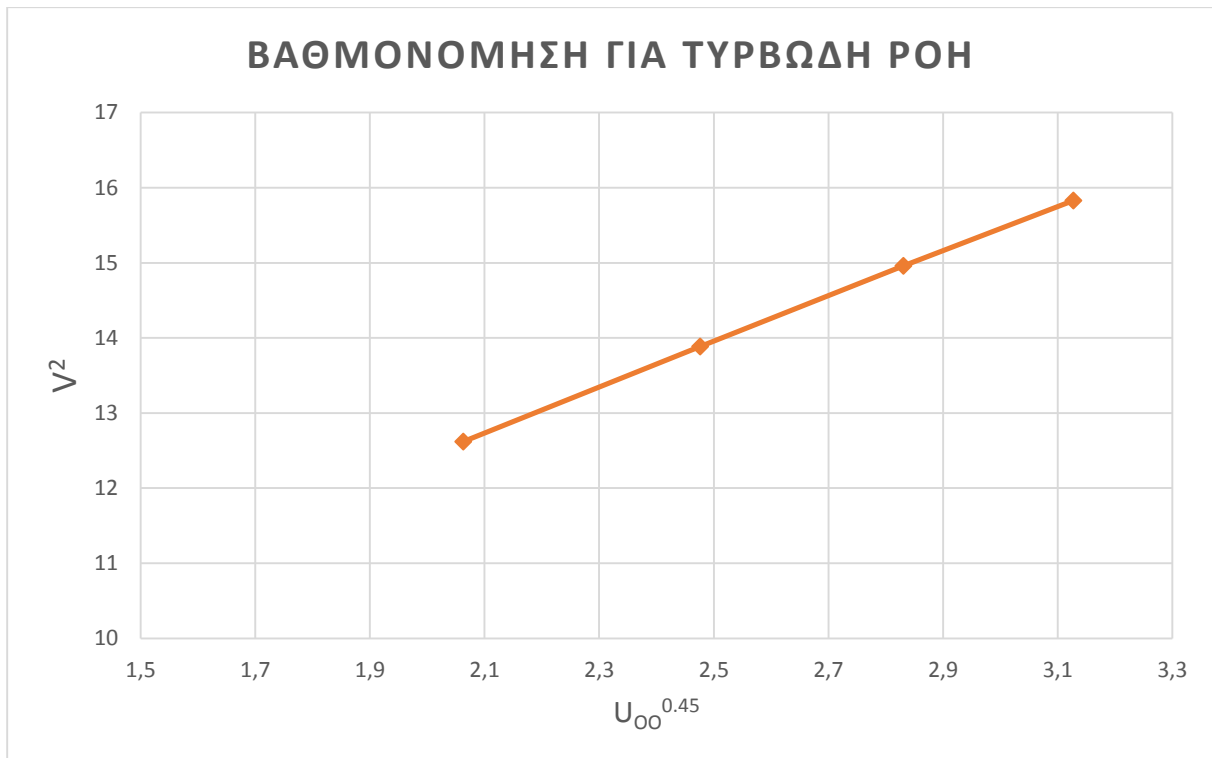
Με τη χρήση του excel έγινε ο υπολογισμός των τιμών A και B για στρωτή ροή και βρέθηκε ότι:

$$A_{\text{στρωτή}} = 6,4051 \quad B_{\text{στρωτή}} = 3,1430$$

Για την τυρβώδη ροή προκύψαν τα επόμενα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.2 Τιμές ταχύτητας και τάσης σε σχέση με τη συχνότητα του inverter (τυρβώδης ροή)

Hz	U_{oo} (m/s)	V (Volt)	$U_{oo}^{0.45}$	V^2
20	5	-3.5521	2.06317	12.61798
30	7.5	-3.7262	2.47615	13.88501
40	10.1	-3.8677	2.83103	14.95918
50	12.6	-3.9785	3.12727	15.82916



Διάγραμμα 3.3 Βαθμονόμηση του hot wire για τυρβώδη ροή

Πάλι με τη χρήση του excel υπολογίστηκαν τα A και B για τυρβώδη ροή και βρέθηκε ότι:

$$A_{\Sigma\tau\omega\tau\eta} = 6,3952 \quad B_{\Sigma\tau\omega\tau\eta} = 3,0207$$

Αφού υπολογίστηκαν τα A και B για κάθε περίπτωση, υπολογίστηκαν οι ταχύτητες μέσω της σχέσης:

$$V = \sqrt[0.45]{\frac{A + E^2}{B}} \quad (3.2)$$

Υπολογίστηκε η ταχύτητα κάθε σημείου της χρονοσειράς για κάθε περίπτωση και υπολογίστηκαν ποσότητες όπως U_{rms} , U_{stdev} , U_{mean} .

3.6.5 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων

Για τη καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένας σταθερός υπολογιστής στον οποίο προσαρμόστηκε μία εξωτερική 8κάναλι κάρτα ανάκτησης και ψηφιοποίησης δεδομένων. Η κάρτα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η NI USB6009 της National Instruments και το πρόγραμμα για την καταγραφή και αποθήκευση το LabView 8 της ίδιας εταιρείας. Το πρόγραμμα LabView είναι προγραμματισμένο έτσι ώστε να καταγράφει δεδομένα για όση ώρα επιθυμεί ο χρήστης και με όποια συχνότητα αυτός επιθυμεί, και να δίνει τιμές όπως τη μέση τιμή, την rms τιμή και την τυπική απόκλιση. Επίσης αναπαριστά διαγραμματικά το Power Spectral Density και τη χρονοσειρά του σήματος. Για τη στρωτή και τυρβώδη ροή τα πειράματα διήρκησαν 1 λεπτό με 120000 δείγματα (samples) το κάθε κανάλι.



Σχήμα 3.10 Κάρτα NI USB6009 της National Instruments

3.7 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αεροσήραγγα αφορούν την καταγραφή της ταχύτητας του αέρα στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων και της κάθετης δύναμης (downforce) που αναπτύσσεται. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, πριν αρχίσουν τα πειράματα έγινε βαθμονόμηση της αεροσήραγγας και του ανεμομέτρου θερμού νήματος (hot wire), για τη σωστή διεξαγωγή των πειραμάτων.

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθορίστηκαν οι συνθήκες εκτέλεσής του και οι επιθυμητές γεωμετρίες του συστήματος πτερύγων για τις μετρήσεις των μεγεθών που αποφασίστηκαν. Χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωμετρίες για το σύστημα, μεταβάλλοντας την γωνία πρόσπτωσης της κινητής πτέρυγας. Οι γωνίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: $\alpha_1=18^\circ$ και $\alpha_2=37^\circ$. Τα πειράματα διεξήχθησαν τόσο για στρωτή όσο και τυρβώδη ροή.

Για τη μέτρηση της κάθετης δύναμης που παράγεται, τα πειράματα διεξήχθησαν με ταχύτητες που αντιστοιχούσαν σε Hz του inverter. Το εύρος ήταν από 5Hz έως 50Hz της συχνότητας του inverter. Οι τιμές της κάθετης δύναμης καταγράφονταν για κάθε τιμή της ταχύτητας του αέρα, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η μεταξύ τους σχέση. Οι δυνάμεις μετρήθηκαν σε kg αλλά μετατρέπονταν σε N.

Έπειτα, τοποθετήθηκε το hot wire προκειμένου να γίνει η βαθμονόμηση του σε στρωτή και τυρβώδη ροή για τις νέες μετρήσεις. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση περιγράφηκε παραπάνω. Το hot wire τοποθετήθηκε 2 χορδές της σταθερής πτέρυγας πίσω από την ακμή προσβολής της, στα 40 cm. Επιλέχθηκε ταχύτητα $U_{\infty} = 12.6$ m/s για τη μέτρηση της ταχύτητας του απορεύματος, η οποία αντιστοιχεί στα 50 Hz για στρωτή ροή και 42 Hz για τυρβώδη ροή. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τυρβώδη ροή για τις γωνίες $\alpha_1=18^\circ$ και $\alpha_2=37^\circ$ ενώ σε στρωτή ροή μόνο για τη γωνία $\alpha_2=18^\circ$ λόγω αστοχίας του σύρματος του ανεμομέτρου hot wire. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 17 διαφορετικά σημεία, ξεκινώντας από το κέντρο του συστήματος πτερύγων, με βήμα 1 cm προς τα κάτω και πάνω κάθετα στο σύστημα.

3.8 Επεξεργασία Δεδομένων

Η λήψη των μετρήσεων από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν δυνατή μέσω του προγράμματος LabView. Οι μετρήσεις αποθηκεύονταν στον υπολογιστή σε μορφή κειμένου (.txt), παρέχοντας τη δυνατότητα να γίνει επεξεργασία τους από άλλα προγράμματα. Τα πειράματα διαρκούσαν 1 λεπτό για κάθε ένα από τα 17 σημεία που επιλέχθηκαν. Οι τιμές ελήφθησαν με χρονικό βήμα 0.0005 s, που αντιστοιχεί σε 120000 τιμές, για την στρωτή ροή και τυρβώδη ροή.

Η μορφή των αρχείων κειμένου (.txt) ήταν η ίδια για όλες τις μετρήσεις. Σε κάθε αρχείο αναγραφόταν η διακύμανση της ταχύτητας, εκφρασμένη σε V, και εμφανίζονταν σε μία στήλη. Μετά τη λήψη των δεδομένων, έγινε η επεξεργασία τους για να βρεθεί η ταχύτητα του αέρα του απορεύματος σε κάθε σημείο που είχε επιλεγεί, με χρήση του προγράμματος Microsoft Excel.

Από την επεξεργασία των δεδομένων υπολογίστηκαν η μέση, η τυπική απόκλιση και η rms τιμή της ταχύτητας του απορεύματος για κάθε ένα από τα 17 σημεία πίσω από το σύστημα

πτερύγων. Έπειτα, έγιναν τα διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή της ταχύτητας του αέρα στα 17 αυτά σημεία, για κάθε περίπτωση τυρβώδους και στρωτής ροής.

Από τα δεδομένα που καταγράφηκαν για την κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα πτερύγων, έγιναν τα διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή της δύναμης καθώς αυξάνει η ταχύτητα της αεροσήραγγας.

4 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα Μετρήσεων

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η παρουσίαση, ο σχολιασμός και η σύγκριση με βιβλιογραφικά δεδομένα, όπου κρίθηκε απαραίτητο, των αποτελεσμάτων από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα των πτερύγων αλλά και για την ταχύτητα στο απόρρευμά του.

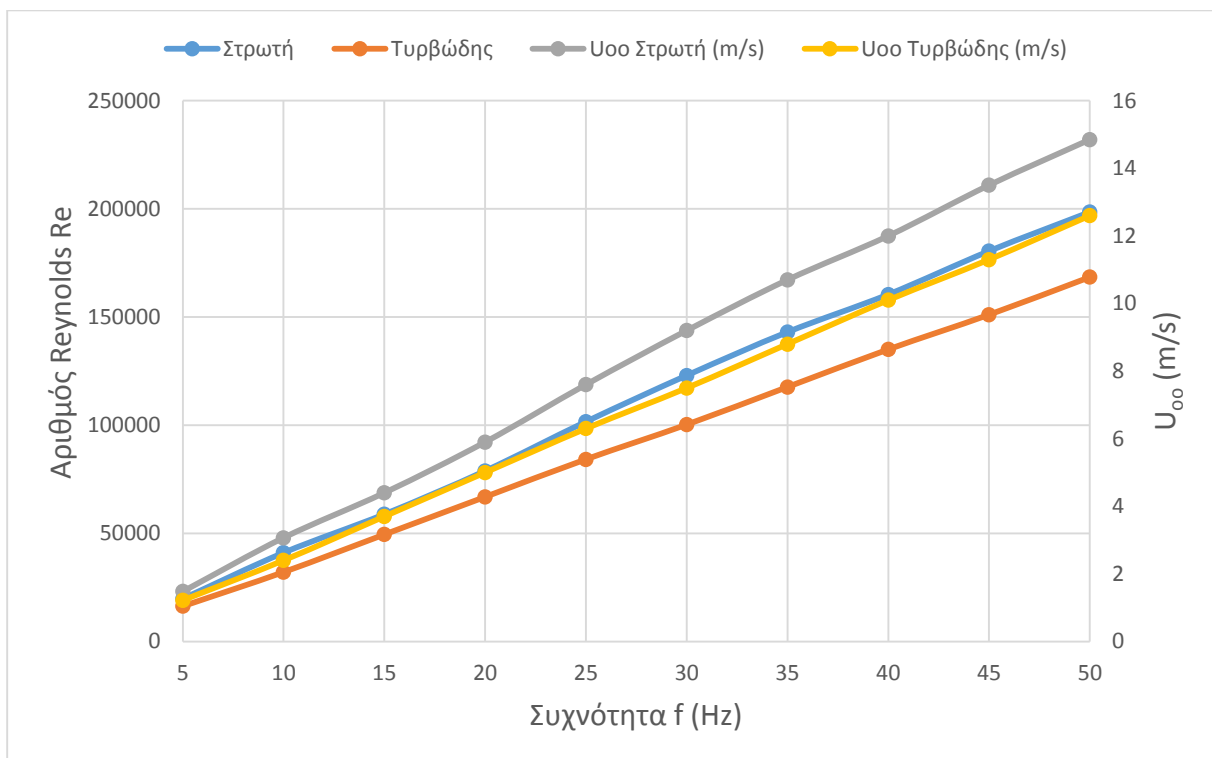
Βασικός στόχος είναι να διαπιστωθεί ο τρόπος μεταβολής της κάθετης δύναμης σε σχέση με την ταχύτητα του αέρα και η μεταβολή της ταχύτητας του απορεύματος στα επιλεγμένα σημεία μέτρησης, για τυρβώδη και στρωτή ροή.

Τα πειράματα χωρίζονται σε δύο βασικά μέρη. Πρώτον, στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τη μέτρηση της κάθετης δύναμης που παράγει το σύστημα των πτερύγων και δεύτερον στα πειράματα που έγιναν για τη μέτρηση της ταχύτητας στο απόρρευμά του. Επίσης, μπορούμε να χωρίσουμε το κάθε μέρος σε πειράματα που γίνονται για στρωτή και τυρβώδη ροή, καθώς και σε αυτά που πραγματοποιούνται για τις δύο γωνίες $\alpha_1=18^\circ$ και $\alpha_2=37^\circ$ της κινητής πτέρυγας του συστήματος.

Οι μετρήσεις στο πρώτο μέρος των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν για ένα εύρος ταχυτήτων της αεροσήραγγας που αντιστοιχεί σε μεταβολή της συχνότητας του inverter από 5 Hz έως 50 Hz με βήμα 5 Hz. Στο δεύτερο μέρος των πειραμάτων η ταχύτητα της ροής ήταν σταθερή στα 12.6 m/s, ταχύτητα που αντιστοιχεί σε 50 Hz για στρωτή ροή και 42 Hz για τυρβώδη ροή.

4.2 Αριθμός Reynolds

Προτού ξεκινήσει η μελέτη των αποτελεσμάτων, πρέπει να γίνει έλεγχος των συνθηκών με τις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα. Λαμβάνοντας υπόψιν τις διαστάσεις των χορδών των πτερύγων, τις συνθήκες του αέρα που επικρατούσε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και το εύρος της ταχύτητας του αέρα της αεροσήραγγας, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα για τον αριθμό Reynolds, ο οποίος αποτελεί σημαντική πληροφορία για πειράματα στον τομέα της Ρευστοδυναμικής.



Διάγραμμα 4.1 Μεταβολή του αριθμού Reynolds σε σχέση με την ταχύτητα

Ο αριθμός Reynolds για την κάθε περίπτωση υπολογιζόταν από τον τύπο:

$$Re = \frac{U_{oo}C}{\nu} \quad (4.1)$$

, όπου U_{oo} είναι ταχύτητα του αέρα, $c = 20.2$ cm το άθροισμα των χορδών των πτερύγων και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα στους 25 °C, δηλαδή τη θερμοκρασία όπου διεξήχθησαν τα πειράματα. Το διάγραμμα είναι κατασκευασμένο με τον αριθμό των Hz του

inverter, καθώς έχουμε διαφορετικές τιμές στην ταχύτητα του αέρα για τυρβώδη και στρωτή ροή. Δεδομένου ότι καμία από τις τιμές Re που καταγράφηκαν δεν ξεπερνά τις 200000, βρισκόμαστε στην περίπτωση προβλημάτων χαμηλού αριθμού Reynolds.

4.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων Κάθετης Δύναμης για την Αεροτομή

4.3.1 Αποτελέσματα για Στρωτή Ροή

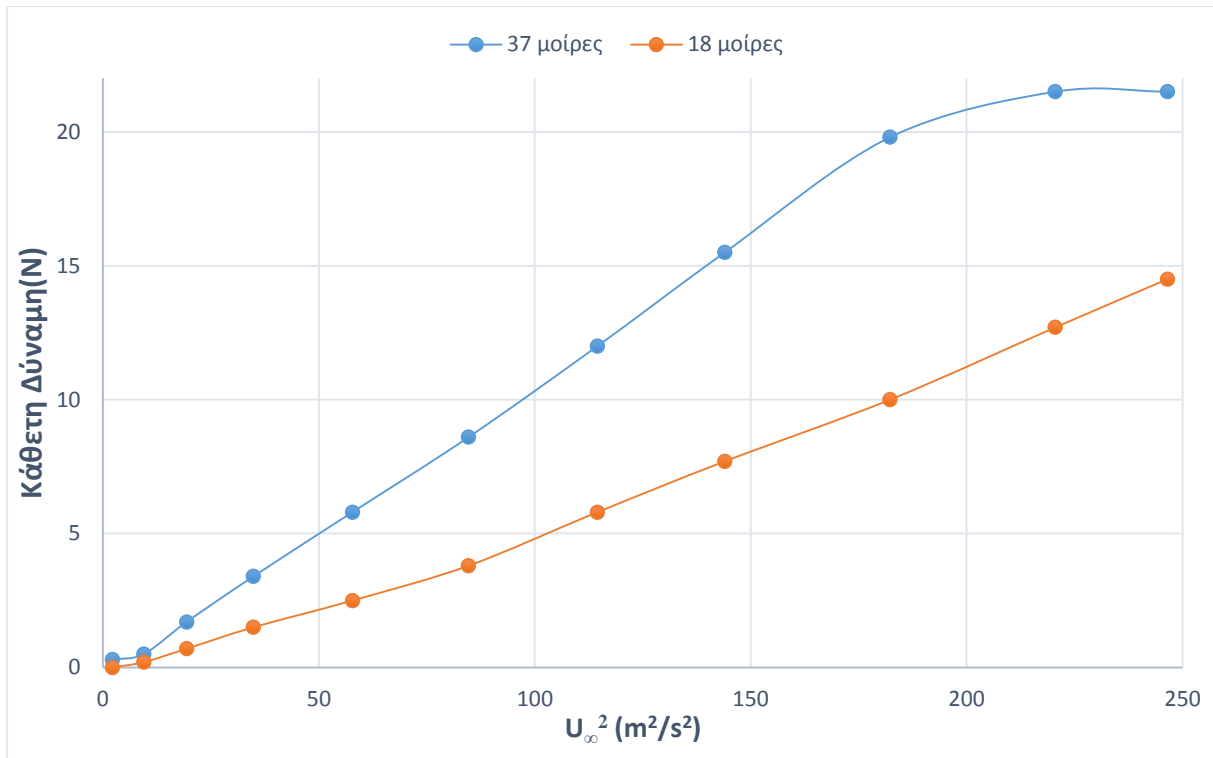
Από τη μέτρηση της κάθετης δύναμης για το σύστημα των πτερύγων σε στρωτή ροή και για τις γωνίες $\alpha_1=18^\circ$ και $\alpha_2=37^\circ$ προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 4.1 Πίνακας ταχύτητας και δυνάμεων για γωνίες α_1 και α_2

U_∞ (m/s)	Κάθετη Δύναμη για α_2 (N)	Κάθετη Δύναμη για α_1 (N)
1.48	0.3	0
3.07	0.5	0.2
4.4	1.7	0.7
5.9	3.4	1.5
7.6	5.8	2.5
9.2	8.6	3.8
10.7	12	5.8
12	15.5	7.7
13.5	19.8	10
14.85	21.5	12.7

Παρατηρείται πως οι τιμές της κάθετης δύναμης για τις δύο περιπτώσεις διαφέρουν σημαντικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην γωνία προσβολής της κινητής πτέρυγας. Είναι γνωστό ότι όταν αυξάνεται η γωνία προσβολής μίας αεροτομής αυξάνεται και η άνωση που παράγει. Έτσι στην περίπτωση της γωνίας α_2 καταγράφονται πολύ μεγαλύτερες τιμές κάθετης δύναμης σε σχέση με την περίπτωση της α_1 . Οι μέγιστες τιμές για τις δύο περιπτώσεις παρατηρούνται για ταχύτητα αέρα 14.85 m/s και είναι 21.5 N για την γωνία α_2 και 12.7 N για την α_1 αντίστοιχα.

Από τις τιμές που καταγράφηκαν, κατασκευάζεται το διάγραμμα κάθετης δύναμης σε σχέση με την U_{∞}^2 .

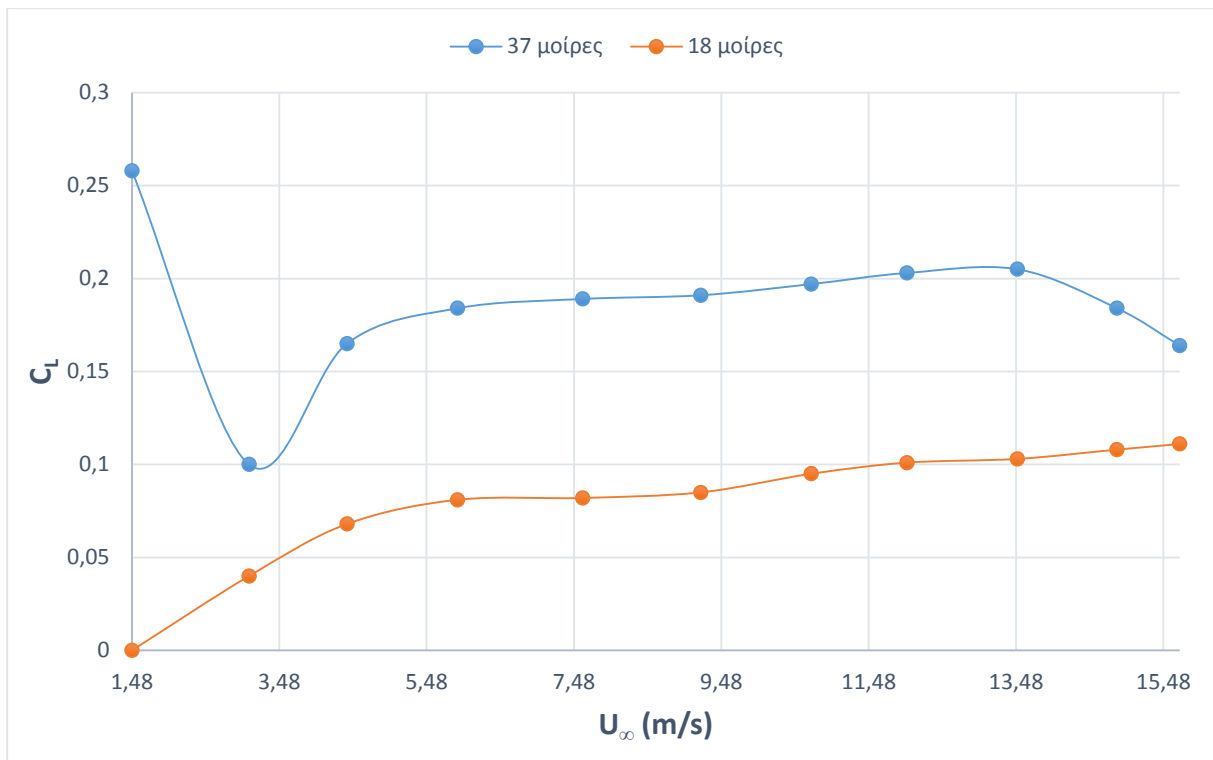


Διάγραμμα 4.2 Μεταβολή της κάθετης δύναμης με την ταχύτητα για στρωτή ροή

Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά των καμπυλών είναι γραμμική στο μεγαλύτερο μέρος τους και ότι επαληθεύουν την καμπύλη που δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 C_L A \quad (4.2)$$

, όπου L είναι η άνωση του συστήματος πτερύγων και στην περίπτωση μας η κάθετη δύναμη (downforce), ρ είναι η πυκνότητα του αέρα στους 25 C°, C_L είναι ο συντελεστής άνωσης και A είναι η επιφάνεια επιρροής του συστήματος. Αφού ικανοποιείται η παραπάνω σχέση μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής άνωσης για το σύστημα των πτερύγων. Έτσι κατασκευάζεται το επόμενο διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή άνωσης με την ταχύτητα του αέρα ($C_L - U_{\infty}$).



Διάγραμμα 4.3 Μεταβολή του συντελεστή άνωσης με την ταχύτητα για στρωτή ροή

4.3.2 Αποτελέσματα για Τυρβώδη Ροή

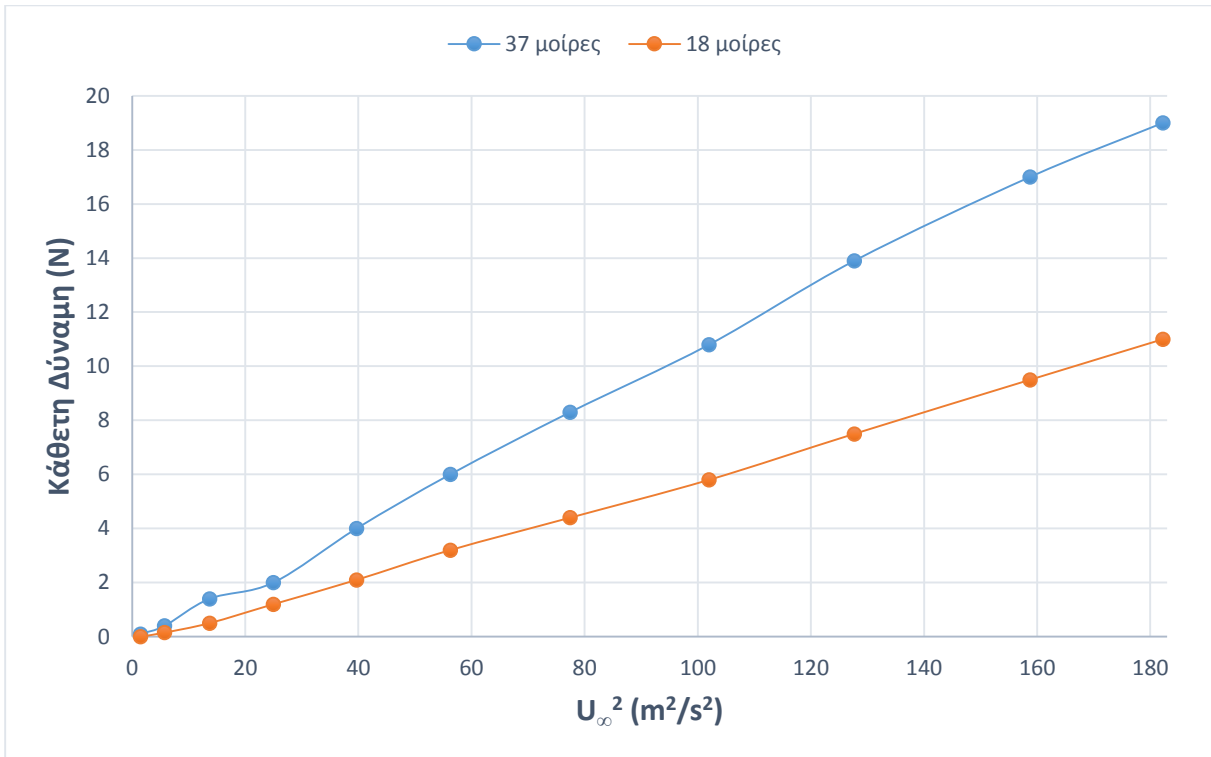
Από τη μέτρηση της κάθετης δύναμης για το σύστημα πτερύγων σε τυρβώδη ροή και για τις γωνίες $\alpha_1=37^\circ$ και $\alpha_2=18^\circ$ προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 4.2 Πίνακας ταχύτητας και δυνάμεων για γωνίες α_1 και α_2

U_{∞} (m/s)	Κάθετη Δύναμη για α_2 (N)	Κάθετη Δύναμη για α_1 (N)
1.22	0.1	0
2.4	0.4	0.15
3.7	1.4	0.5
5	2	1.2
6.3	4	2.1
7.5	6	3.2
8.8	8.3	4.4
10.1	10.8	5.8
11.3	13.9	7.5
12.6	17	9.5

Παρατηρείται πως και για την τυρβώδη ροή οι τιμές της κάθετης δύναμης για τις δύο περιπτώσεις διαφέρουν σημαντικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται πάλι στην γωνία προσβολής της κινητής πτέρυγα. Οι μέγιστες τιμές για τις δύο περιπτώσεις παρατηρούνται για ταχύτητα αέρα 12.6 m/s και είναι 17 N για την γωνία α_2 και 9.5 N για την α_1 αντίστοιχα.

Από τις τιμές που καταγράφηκαν, κατασκευάζεται το διάγραμμα κάθετης δύναμης σε σχέση με την U_{∞}^2 .

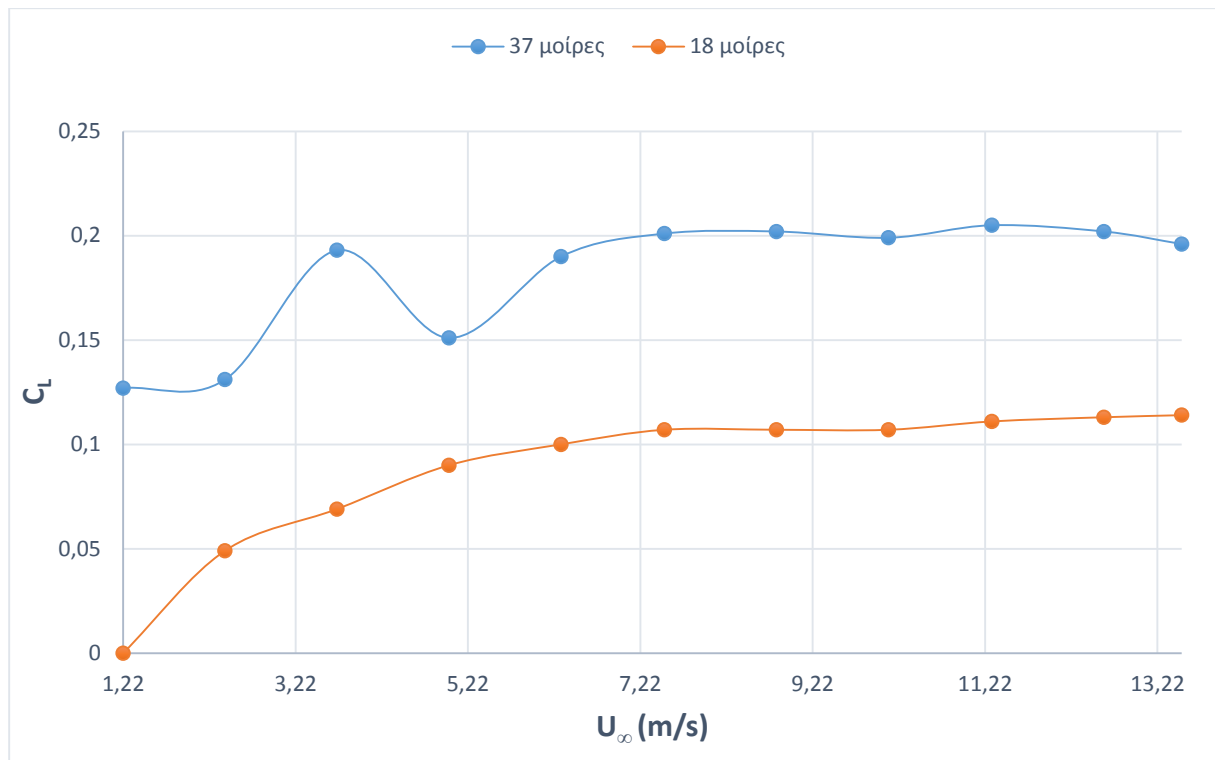


Διάγραμμα 4.4 Μεταβολή της κάθετης δύναμης με την ταχύτητα για τυρβώδη ροή

Παρατηρείται κι εδώ, ότι η συμπεριφορά των καμπυλών είναι προσεγγιστικά γραμμική στο μεγαλύτερο μέρος τους και ότι επαληθεύουν την καμπύλη που δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 C_L A \quad (4.2)$$

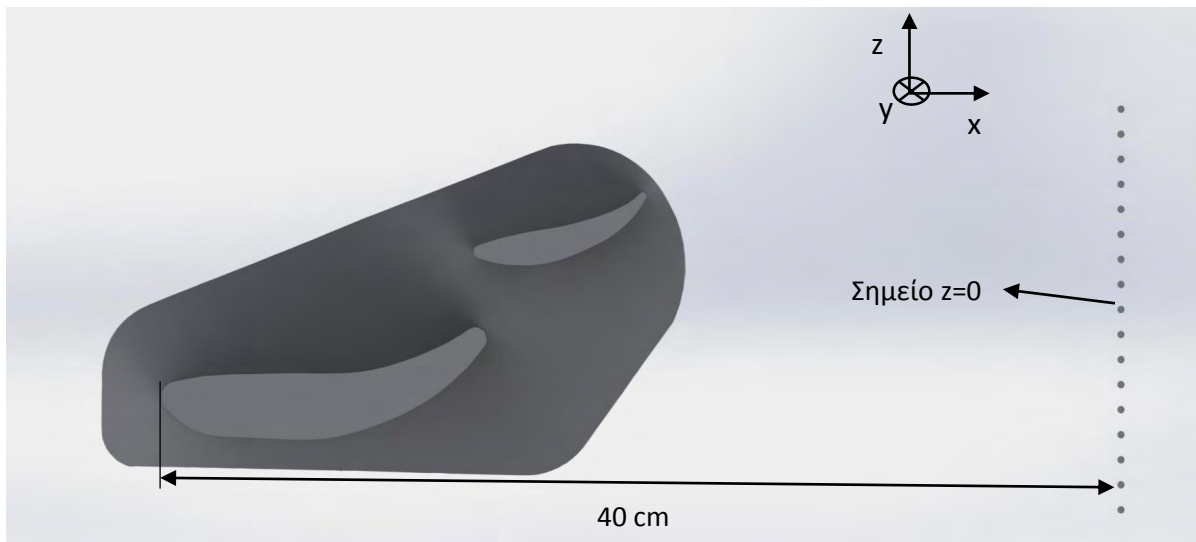
,όπου L είναι η άνωση του συστήματος πτερύγων και στη συγκεκριμένη περίπτωση η κάθετη δύναμη (downforce), ρ είναι η πυκνότητα του αέρα στους 25 C°, C_L είναι ο συντελεστής άνωσης και A είναι η επιφάνεια επιρροής του συστήματος πτερύγων. Έτσι κατασκευάστηκε το διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή άνωσης με την ταχύτητα του αέρα ($C_L - U_{\infty}$).



Διάγραμμα 4.5 Μεταβολή του συντελεστή άνωσης με την ταχύτητα για τυρβώδη ροή

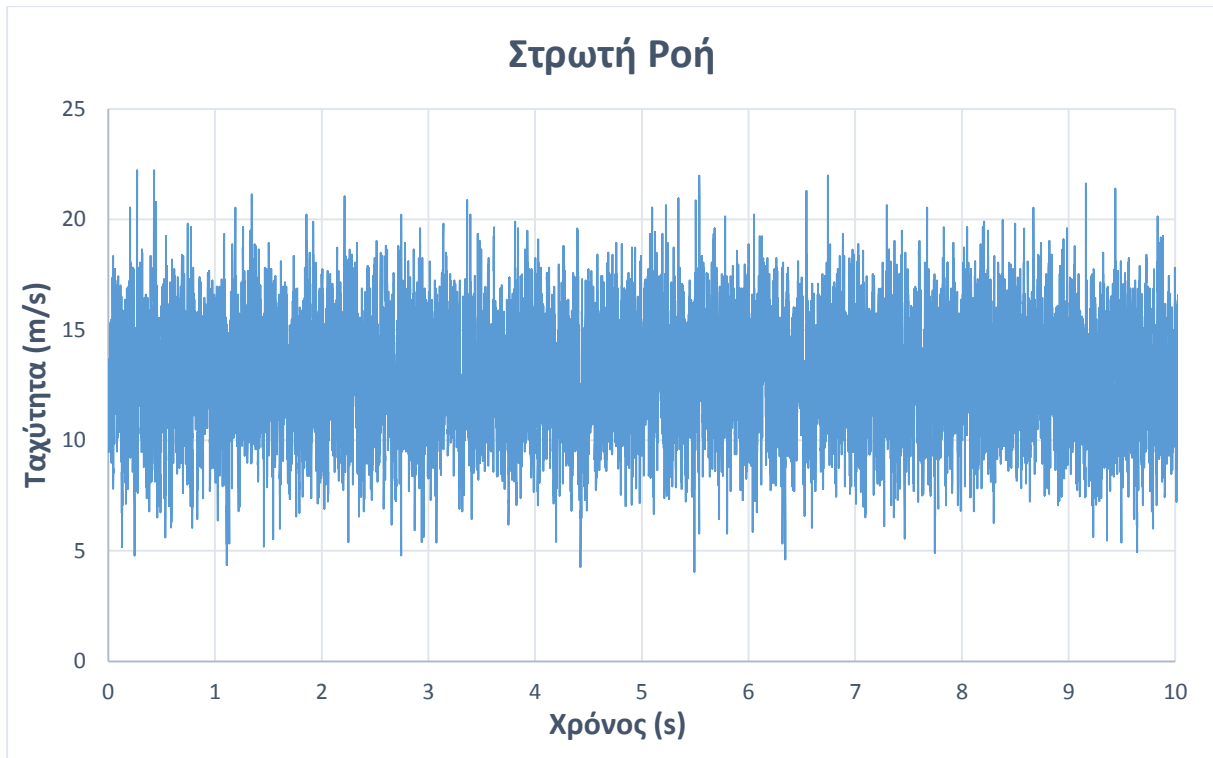
4.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων Ταχύτητας Απορεύματος με το Hot Wire

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η μεταβολή της ταχύτητας του αέρα στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων, προκειμένου να βρεθούν τα αίτια που προκαλούν τη συγκεκριμένη μεταβολή. Για να υπάρχει μια σαφής εικόνα για τις ταχύτητες που επικρατούν στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων, επιλέχθηκε να τοποθετηθεί το hot wire σε 17 διαφορετικές θέσεις πίσω από την αεροτομή. Λήφθηκε ως σημείο αναφοράς των μετρήσεων το κέντρο των δύο πτερύγων (σημείο $z = 0$) και μετατοπίζοντας το μετρητικό εργαλείο με βήμα 1 cm προς τα άνω ή προς τα κάτω από το σύστημα πτερύγων, λαμβάνονταν οι τιμές της ταχύτητας. Ως θετική φορά θεωρήθηκε αυτή προς τα άνω (σημεία μέχρι $z = 8$ cm). Το hot wire τοποθετήθηκε περίπου 2 χορδές σταθερής πτέρυγας, πίσω από την επιφάνεια πρόσπτωσής της.

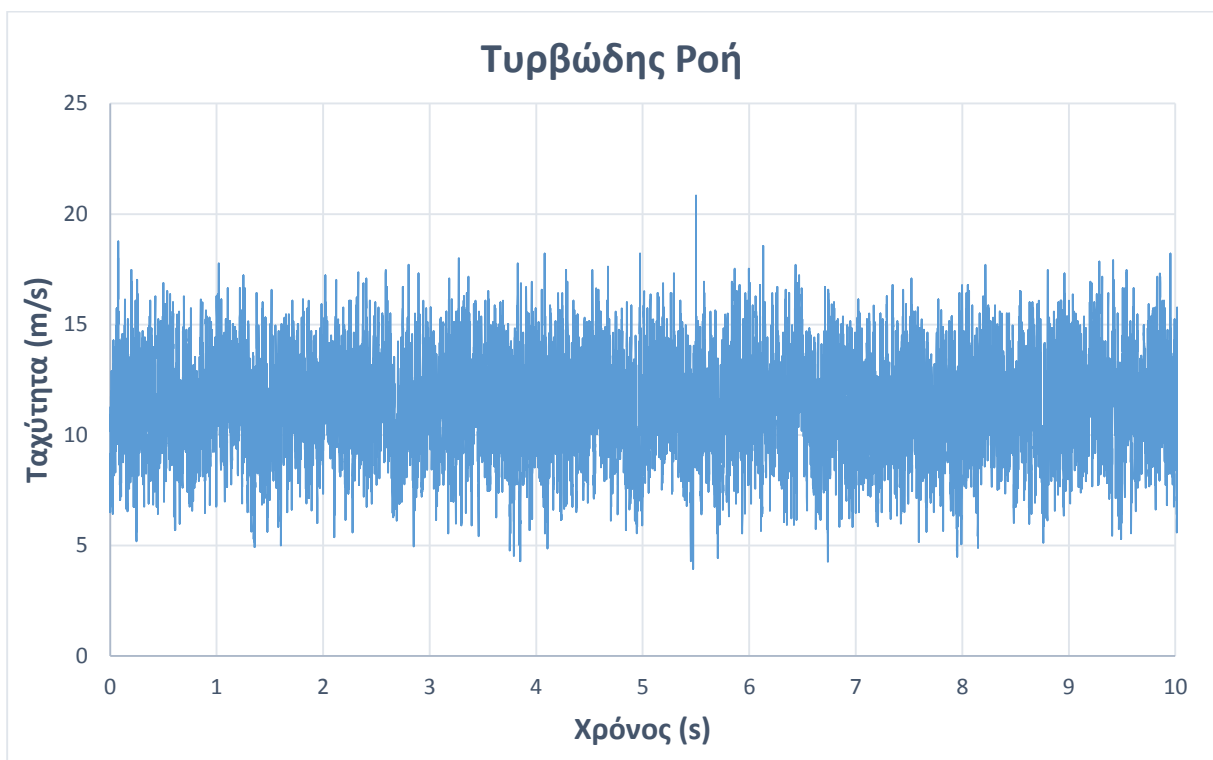


Σχήμα 4.1 Σημεία τοποθέτησης του hot wire

Οι μετρήσεις για την ταχύτητα του απορεύματος έγιναν για τις περιπτώσεις τυρβώδους και στρωτής ροής καθώς και για τις γωνίες $\alpha_1 = 18^\circ$ και $\alpha_2 = 37^\circ$ της κινητής πτέρυγας. Για την τυρβώδη ροή μελετήθηκαν οι γωνίες α_1 και α_2 , ενώ για τη στρωτή ροή μελετήθηκε μόνο η γωνία α_2 καθώς υπήρξε αστοχία του hot wire μετά το συγκεκριμένο πείραμα. Από τα πειράματα λήφθηκαν τα αποτελέσματα για την ταχύτητα σε κάθε περίπτωση και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα της μέσης και της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας. Παρακάτω παρατίθενται παραδείγματα των χρονοσειρών της ταχύτητας για το κέντρο των πειραμάτων και τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα, για τις περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής.

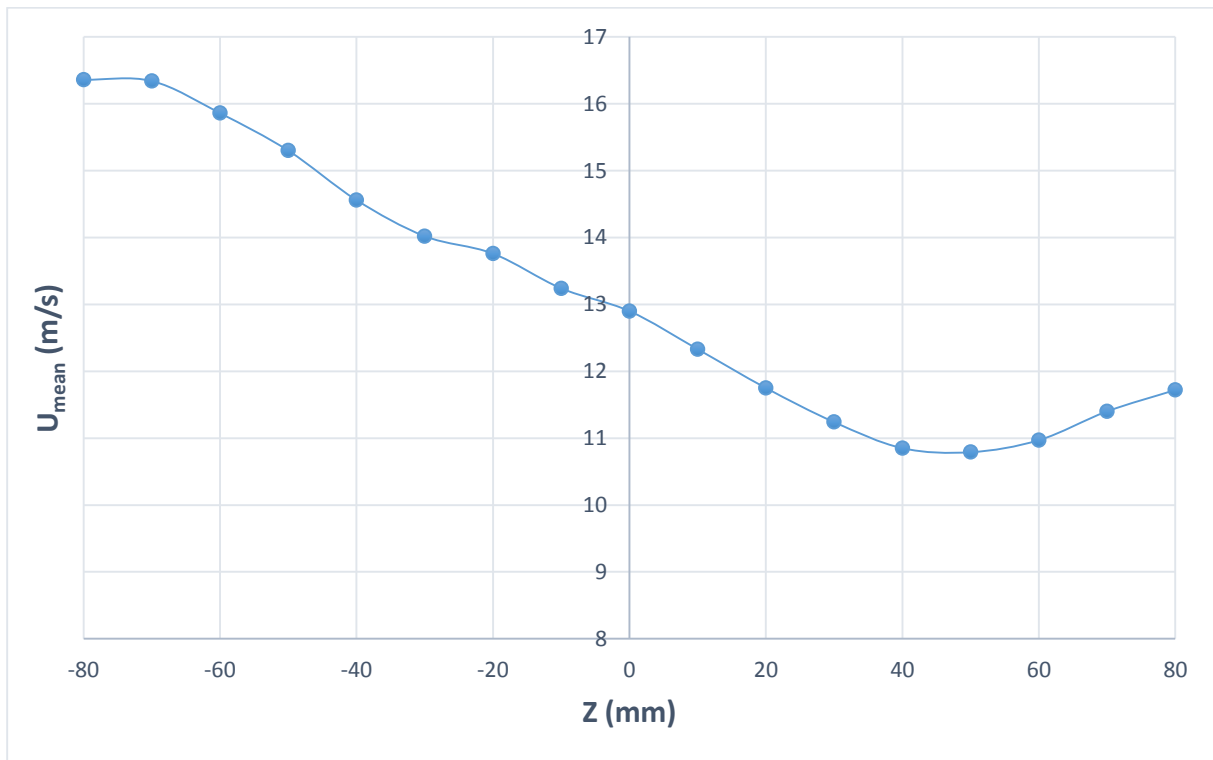


Διάγραμμα 4.6 Χρονοσειρά της ταχύτητας για στρωτή ροή

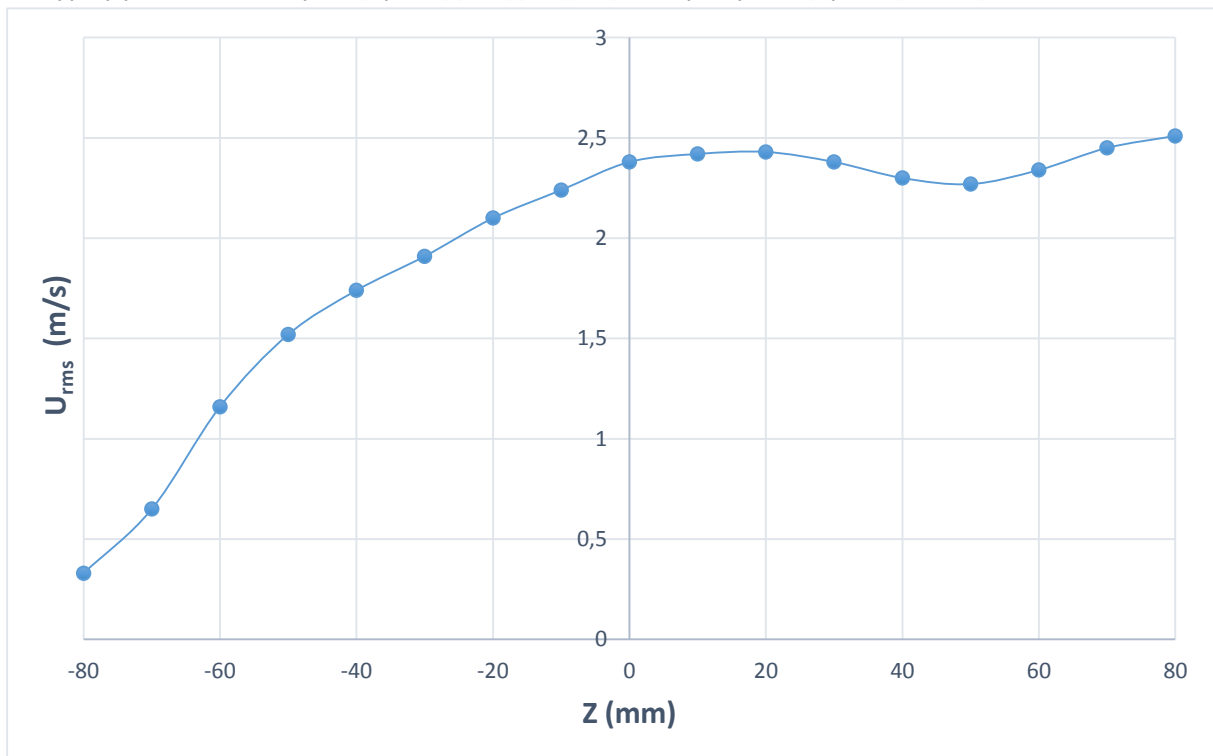


Διάγραμμα 4.7 Χρονοσειρά της ταχύτητας για τυρβώδη ροή

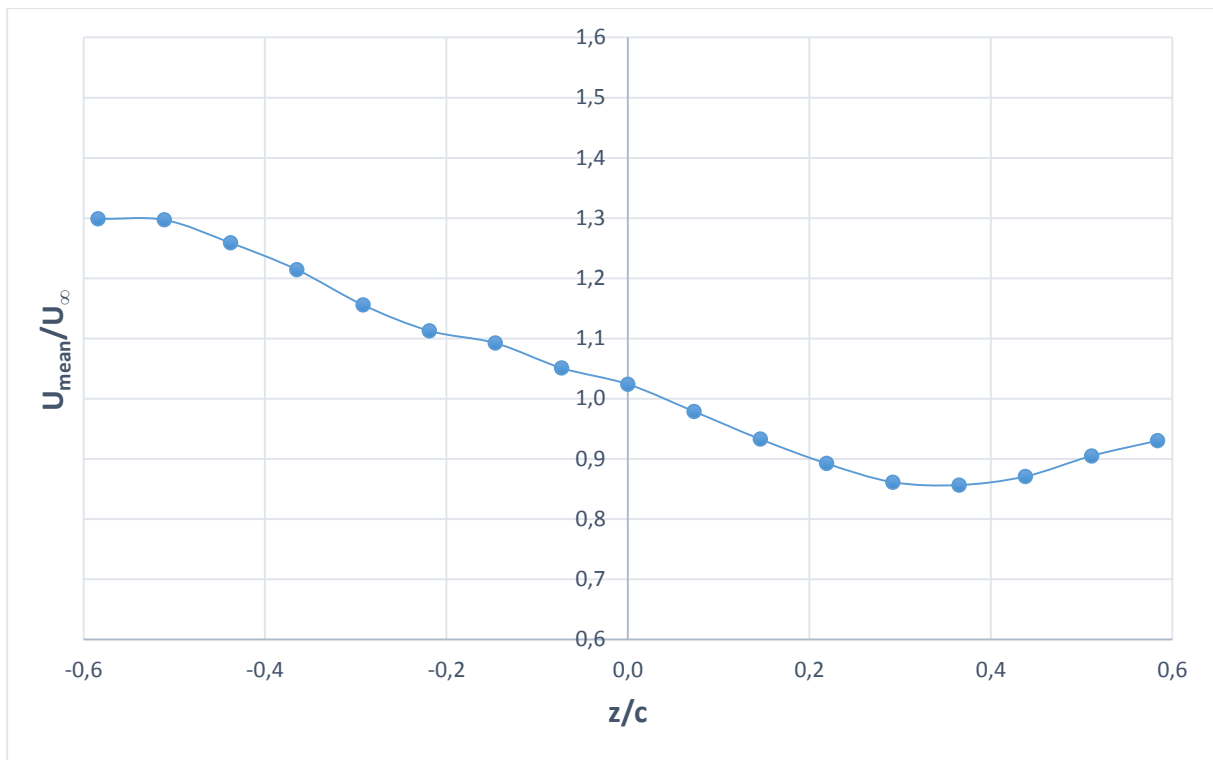
4.4.1 Μεταβολή ταχύτητας για στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$



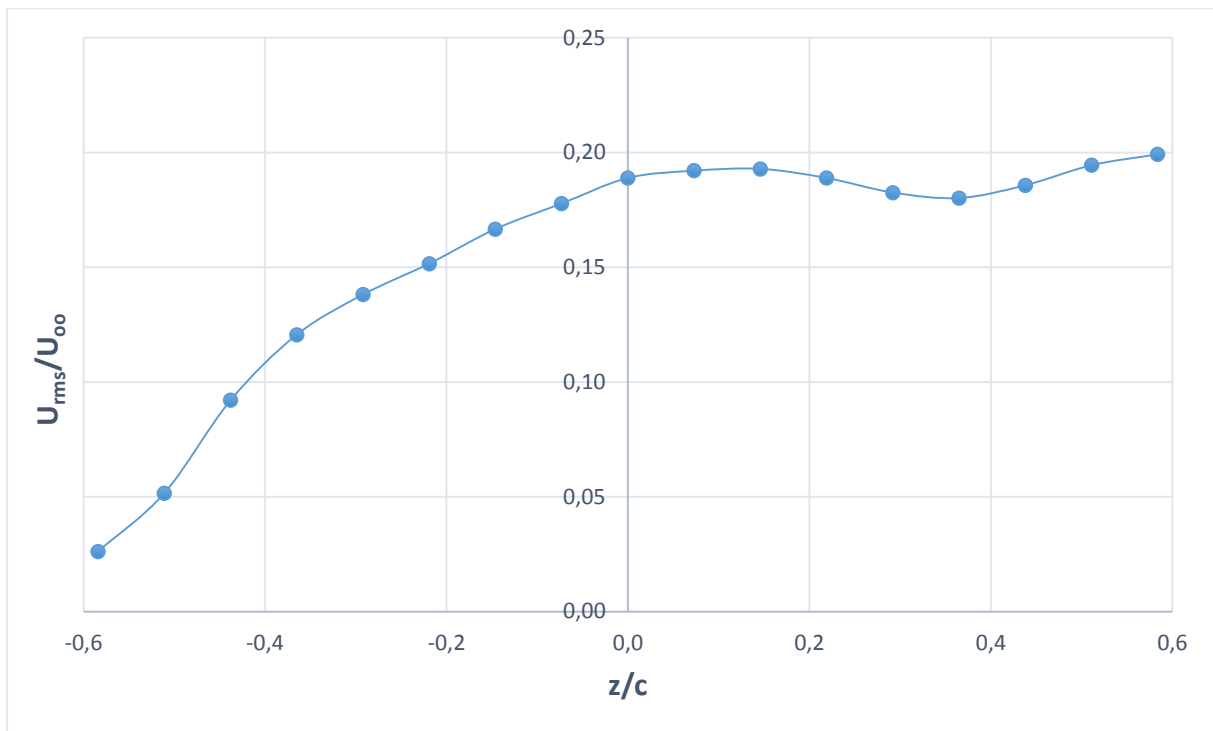
Διάγραμμα 4.8 Μεταβολή μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση Z του Hot Wire



Διάγραμμα 4.9 Μεταβολή rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire



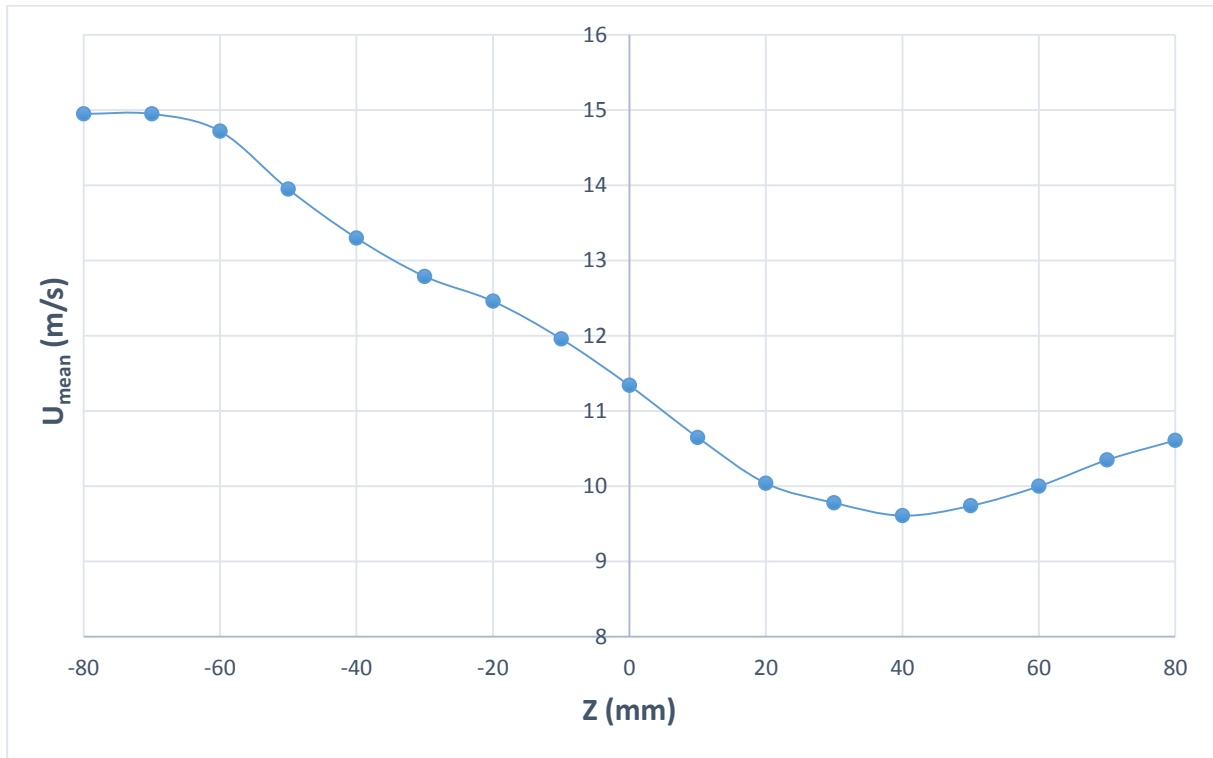
Διάγραμμα 4.10 Μεταβολή αδιάστατης μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση z του Hot Wire



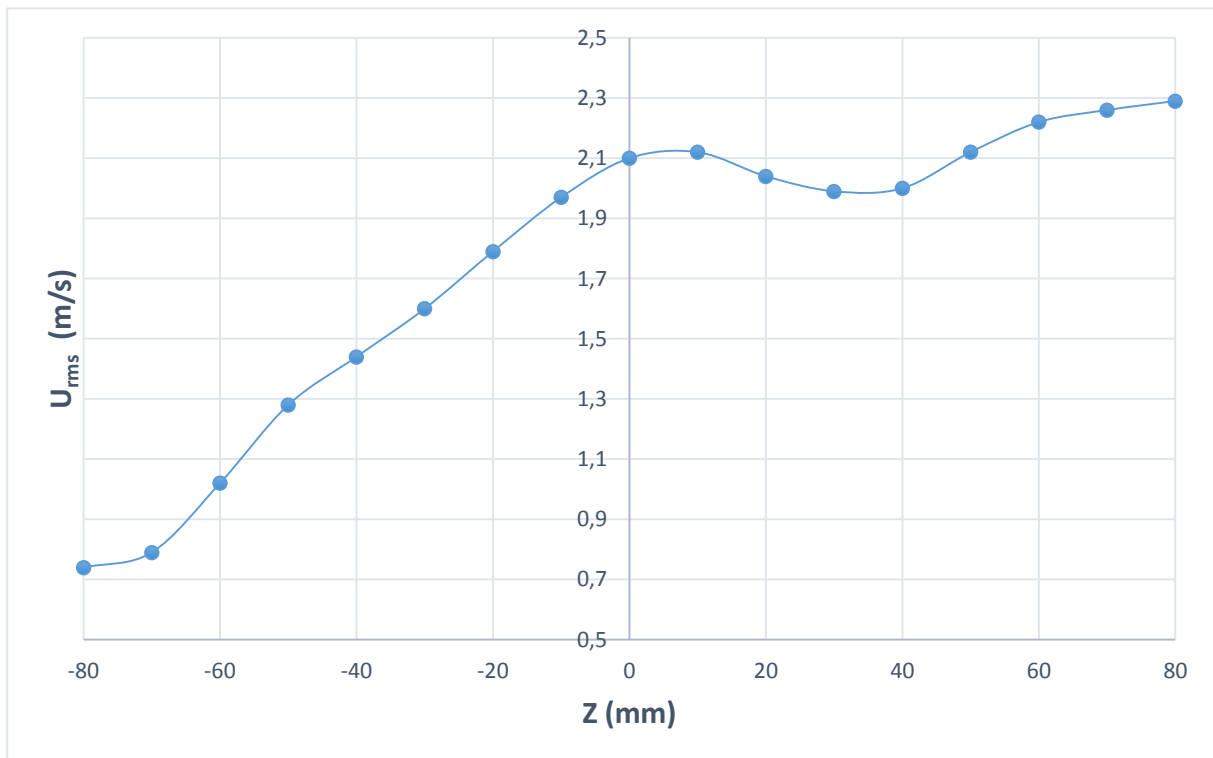
Διάγραμμα 4.11 Μεταβολή αδιάστατης rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire

Παρατηρείται πως υπάρχουν αρκετές μεταβολές στην ταχύτητα απορεύματος του συστήματος. Από την καμπύλη ταχύτητας είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της είναι στο κατώτερο σημείο των μετρήσεων και η ελάχιστη εντοπίζεται στο σημείο $Z=4$ cm. Αυτό παρατηρείται και από το διάγραμμα των rms ταχυτήτων καθώς στο σημείο $Z=4$ cm και γενικώς άνω από το κέντρο των μετρήσεων έχουμε μεγάλες τιμές τους που δείχνουν αναταραχή της ροής. Η τιμή της ταχύτητας στο ανώτερο σημείο των μετρήσεων είναι 11.8 m/s.

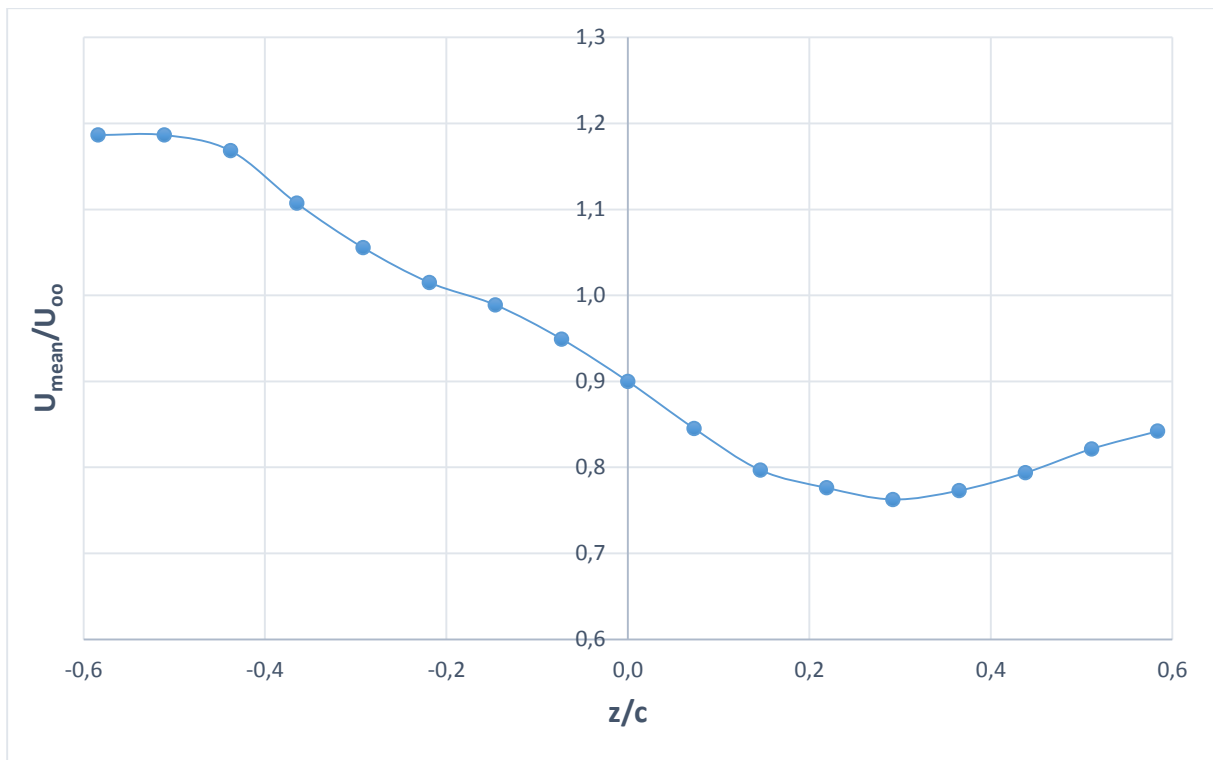
4.4.2 Μεταβολή ταχύτητας για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1 = 18^\circ$



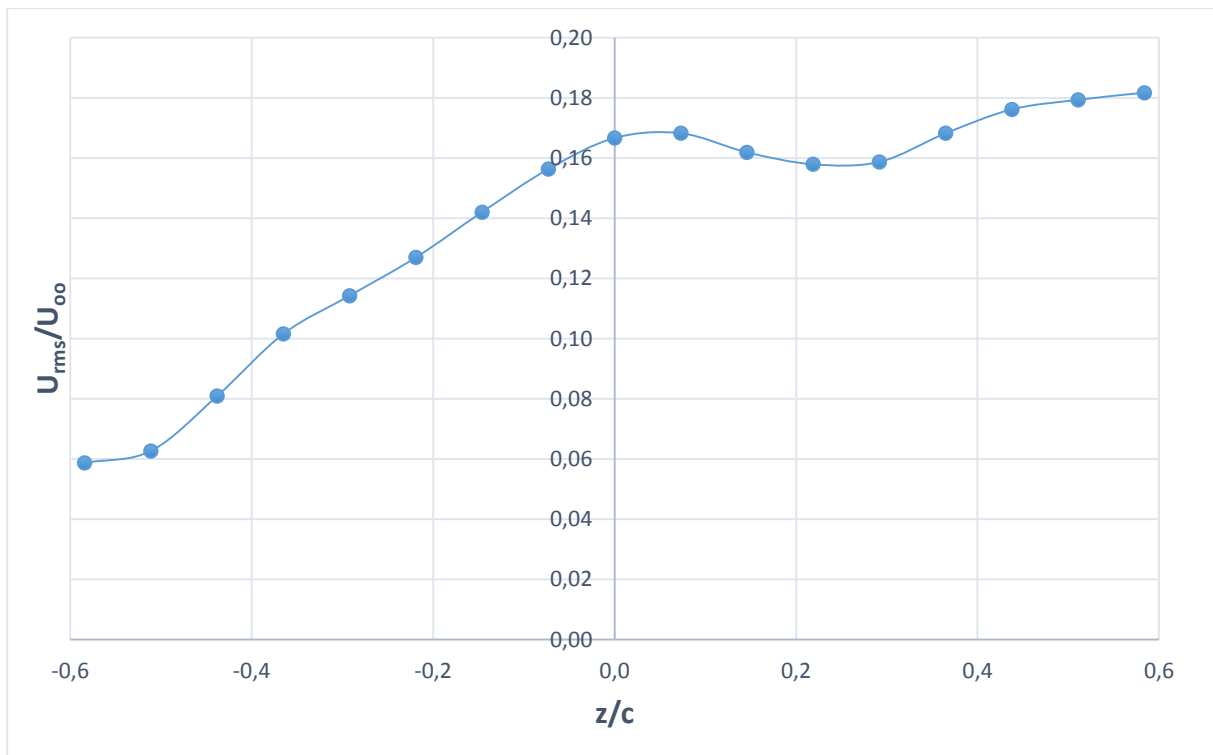
Διάγραμμα 4.12 Μεταβολή μέσης ταχύτητας απορεύματος U_{mean} με τη θέση Z του Hot Wire



Διάγραμμα 4.13 Μεταβολή rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire



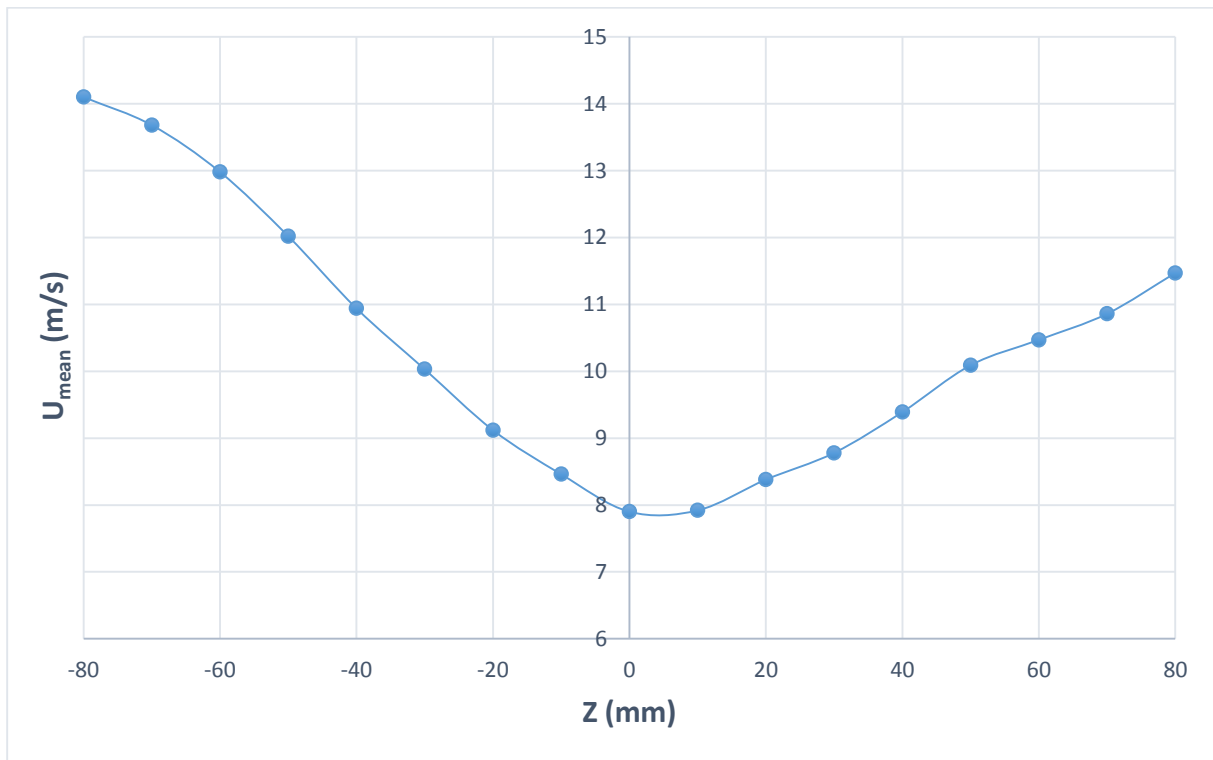
Διάγραμμα 4.14 Μεταβολή αδιάστατης μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση z του Hot Wire



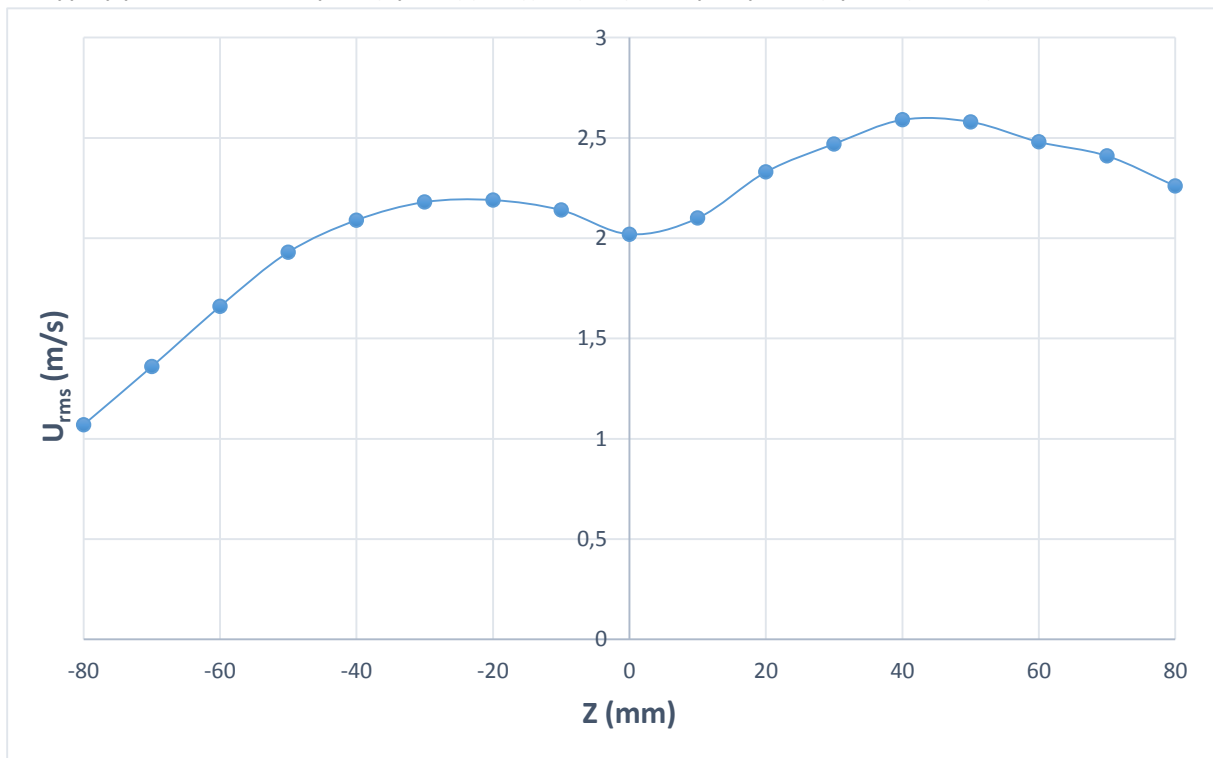
Διάγραμμα 4.15 Μεταβολή αδιάστατης rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire

Και εδώ παρατηρείται πως υπάρχουν αρκετές μεταβολές στην ταχύτητα απορεύματος του συστήματος. Οι τιμές της ταχύτητας για την περίπτωση της τυρβώδους ροής είναι σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τη στρωτή ροή. Από την καμπύλη ταχύτητας είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της είναι στο κατώτερο σημείο των μετρήσεων, με μέτρο 15 m/s, και η ελάχιστη εντοπίζεται στο σημείο $Z=4$ cm με μέτρο 9.6 m/s. Αυτό παρατηρείται και από το διάγραμμα των rms ταχυτήτων καθώς στο σημείο $Z=4$ cm και γενικώς άνω από το κέντρο των μετρήσεων έχουμε μεγάλες τιμές τους που δείχνουν αναταραχή της ροής.

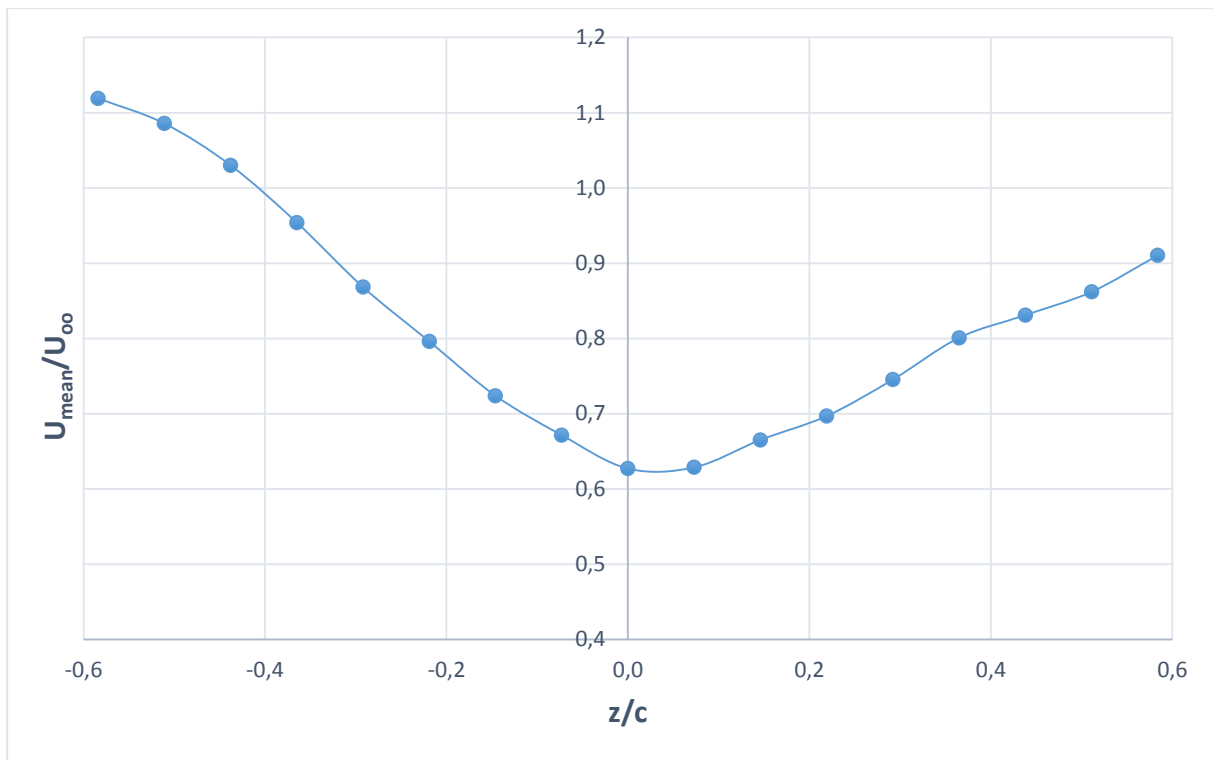
4.4.3 Μεταβολή ταχύτητας για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_2 = 37^\circ$



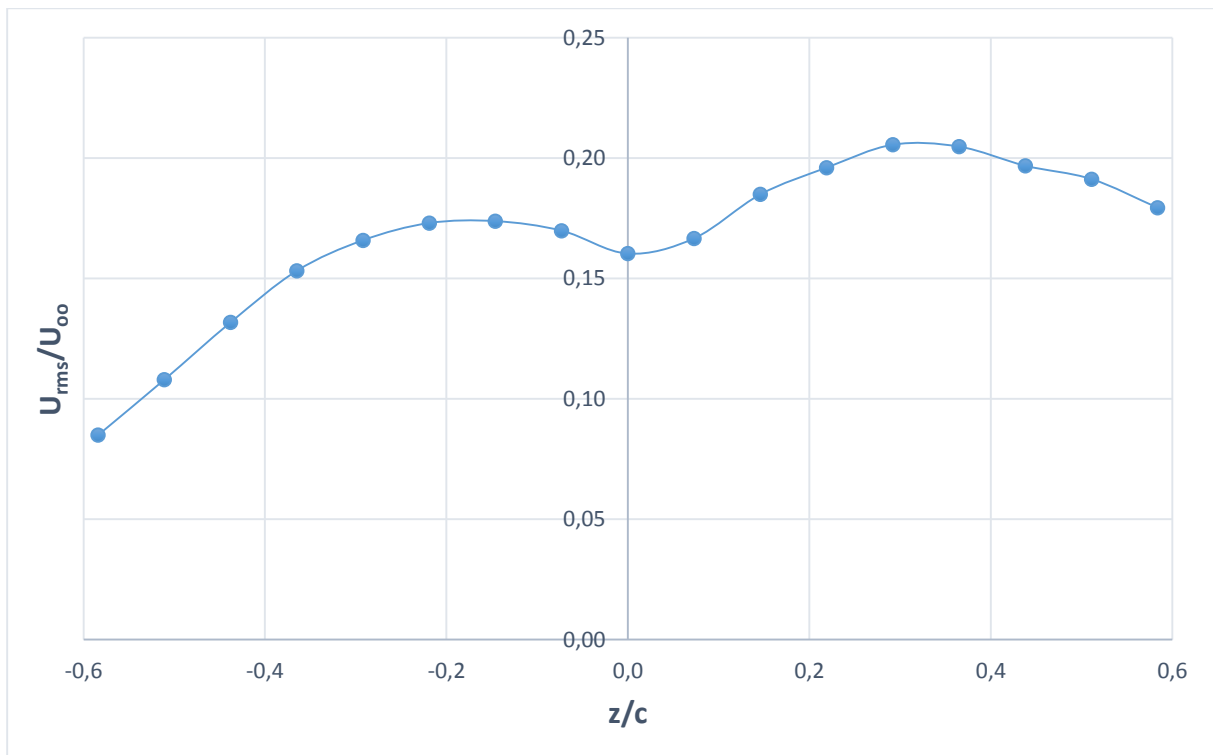
Διάγραμμα 4.16 Μεταβολή μέσης ταχύτητας απορεύματος με τη θέση z του Hot Wire



Διάγραμμα 4.17 Μεταβολή rms ταχύτητας με τη θέση z του Hot Wire



Διάγραμμα 4.18 Μεταβολή αδιάστατης μέσης ταχύτητας απορεύματος με την κατακόρυφη θέση z του Hot Wire



Διάγραμμα 4.19 Μεταβολή αδιάστατης rms ταχύτητας με την κατακόρυφη θέση z του Hot Wire

Από τα διαγράμματα για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1 = 18^\circ$, παρατηρούνται αρκετές μεταβολές στην ταχύτητα απορεύματος του συστήματος. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τη στρωτή ροή. Από την καμπύλη ταχύτητας είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της είναι στο κατώτερο σημείο των μετρήσεων, με μέτρο 14.1 m/s, και η ελάχιστη εντοπίζεται στο σημείο $Z = 0$ cm με μέτρο 7.9 m/s. Επίσης, παρατηρείται από το διάγραμμα των rms ταχυτήτων, πως στο σημείο $Z = 4$ cm και γενικώς άνω από το κέντρο των μετρήσεων έχουμε μεγάλες τιμές τους που δείχνουν αναταραχή της ροής. Η τιμή της ταχύτητας στο ανώτερο σημείο των μετρήσεων είναι 11.4 m/s.

5 Συμπεράσματα Πειραματικών Μετρήσεων

Όπως έχει προαναφερθεί, τα πειράματα χωρίστηκαν σε δύο κύριες φάσεις. Η πρώτη φάση αφορούσε την μέτρηση της κάθετης δύναμης που παράγεται από το σύστημα των δύο πτερύγων. Η δεύτερη φάση ήταν ο υπολογισμός των ταχυτήτων του αέρα στο απόρευμα του συστήματος. Οι συνθήκες των πειραμάτων ήταν για στρωτή και τυρβώδη ροή του αέρα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο περιπτώσεις τοποθέτησης της κινητής πτέρυγας στο σύστημα: μία για γωνία $\alpha_1=18^\circ$ και μία για $\alpha_2=37^\circ$. Ο στόχος των πειραμάτων, ήταν να διαπιστωθεί η μεταβολή στην κάθετη δύναμη του συστήματος με την ταχύτητα του αέρα και το προφίλ ταχυτήτων του απορεύματος του συστήματος.

Το γενικό συμπέρασμα που συνάγεται από τις μετρήσεις στην κάθετη δύναμη του συστήματος πτερύγων, είναι πως καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ροής του αέρα αυξάνεται και η κάθετη δύναμη του συστήματος. Ακόμα παρατηρήθηκε πως η κάθετη δύναμη του συστήματος, επηρεάζεται σημαντικά από το είδος της ροής και τη γωνία πρόσπτωσης της κινητής πτέρυγας του συστήματος.

Από τα πειράματα παρατηρήθηκε πως η κάθετη δύναμη έχει μικρότερες τιμές για την περίπτωση της τυρβώδους ροής σε σχέση με τη στρωτή ροή. Αυτό οφείλεται στο ασταθές πεδίο που επικρατεί στη ροή του αέρα, ο οποίος προκαλεί μεγαλύτερες αναταραχές στο σύστημα πτερύγων, μειώνοντας έτσι την κάθετη δύναμη που παράγεται. Παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης, για συχνότητα του inverter στα 50 Hz, ήταν 21.5 N για τη στρωτή και 17 N για την τυρβώδη ροή.

Από τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης της κινητής πτέρυγας, παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην κάθετη δύναμη του συστήματος. Οι τιμές της κάθετης δύναμης για τη γωνία πρόσπτωσης $\alpha_1=18^\circ$ είχαν μικρότερη τιμή από αυτές για τη γωνία $\alpha_2=37^\circ$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διαφορά πιέσεων, στην περίπτωση της γωνίας $\alpha_2=37^\circ$, είναι μεγαλύτερη λόγω της θέσης της πτέρυγας ως προς τον αέρα, προκαλώντας μεγαλύτερη δύναμη. Παρατηρείται πως για τις δύο γωνίες σε στρωτή ροή οι τιμές της δύναμης είναι 21.5 N για την α_2 και 12.5 για την α_1 και για την τυρβώδη ροή είναι 17 για την α_1 και 9.5 N για την α_2 .

Σημαντικά συμπεράσματα προκύπτουν και από τη μελέτη των ταχυτήτων στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων. Προκύπτει, από τα διαγράμματα ταχύτητας όλων των περιπτώσεων πως η ταχύτητα είναι μέγιστη στο κατώτερο σημείο των μετρήσεων ενώ αντιθέτως στο ανώτερο σημείο η ταχύτητα είναι κοντά στην ταχύτητα του αέρα. Αυτό οφείλεται στην γεωμετρία του συστήματος, όπου αναγκάζει τον αέρα να κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα στην κάτω επιφάνεια και με μικρότερη στην άνω επιφάνεια των πτερύγων. Σε όλες τις περιπτώσεις, γίνεται φανερό ότι η ταχύτητα μειώνεται στο κέντρο των μετρήσεων ή λίγο υψηλότερα, γεγονός που οφείλεται στην αποκόλληση της ροής λόγω της κινητής πτέρυγας.

Για τη γωνία $\alpha_1=18^\circ$ παρατηρούνται διαφορές στις μετρήσεις της ταχύτητας για στρωτή και τυρβώδη ροή του αέρα. Από τα διαγράμματα ταχυτήτων παρατηρείται πως οι καμπύλες μεταβολής της μέσης ταχύτητας έχουν την ίδια συμπεριφορά, αλλά οι τιμές για στρωτή ροή είναι μεγαλύτερες από αυτές για τυρβώδη. Επίσης, παρατηρούνται μικρότερες τιμές της U_{rms} για την τυρβώδη ροή σε σχέση με την στρωτή.

Για τη γωνία $\alpha_2=37^\circ$ παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε σχέση με τη γωνία α_1 . Υπολογίστηκε πως οι ταχύτητες του απορεύματος είχαν χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις. Επίσης, παρατηρήθηκε πως στο κέντρο των μετρήσεων υπήρξε μία μεγάλη μείωση στην ταχύτητα του αέρα, η οποία μετρήθηκε στα 8 m/s. Η μείωση αυτή οφείλεται στην τύρβη που παράγει το σύστημα, λόγω της αποκόλλησης της ροής από το οριακό στρώμα που προκαλεί η γεωμετρία του συστήματος. Η τιμή της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας είχε μεγαλύτερη τιμή σε όλα τα σημεία για την γωνία α_2 .

Από όλα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα πειράματα, προκύπτουν κάποια συνολικά συμπεράσματα. Παρατηρήθηκε πως για να αυξηθεί η κάθετη δύναμη του συστήματος, πρέπει να επιλεγεί η μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης της κινητής πτέρυγας και η ροή του αέρα να είναι στρωτή. Παρ' όλα αυτά, καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης, προκαλούνται περισσότερες αναταραχές στο απόρευμα του συστήματος, οι οποίες επιδρούν αρνητικά στην παραγωγή κάθετης δύναμης.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης γωνίας πρόσπτωσης των πτερύγων είναι απαραίτητη η διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων σε διάφορες συνθήκες. Θα πρέπει συνυπολογιστεί και η οπισθέλκουσα δύναμη για κάθε περίπτωση, καθώς επιδρά σημαντικά στην παραγωγή κάθετης δύναμης. Τέλος θα μπορούσε να δοκιμαστεί η επίδραση του ύψους της αεροτομής από το έδαφος της αεροσήραγγας.

6 Υπολογιστική Μελέτη με το ANSYS CFX

6.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκε η μεταβολή της ταχύτητας του απορεύματος του συστήματος πτερύγων σε διάφορα σημεία καθώς και η μεταβολή της δύναμης που παράγει το σύστημα πτερύγων καθώς αλλάζει η ταχύτητα του αέρα σε πραγματικές συνθήκες στο εργαστήριο. Στο παρόν κεφάλαιο γίνονται οι ίδιοι υπολογισμοί, χρησιμοποιώντας όμως ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η υπολογιστική μελέτη του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Solidworks για το σχεδιασμό του συστήματος πτερύγων και το ANSYS CFX για την προσομοίωση του συστήματος στις επιθυμητές συνθήκες.

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η επίδραση του αέρα στην κάθετη δύναμη του συστήματος πτερύγων και στην ταχύτητα του απορεύματος σε διάφορα σημεία, σε συνθήκες στρωτής και τυρβώδους ροής για τις δύο γωνίες της κινητής πτέρυγας. Επίσης περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό του μοντέλου και του υπολογιστικού χώρου, οι παράμετροι και μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος καθώς και ο τρόπος διακριτοποίησης του πλέγματος.

6.2 Περιγραφή του προβλήματος

6.2.1 Μέθοδος Επίλυσης

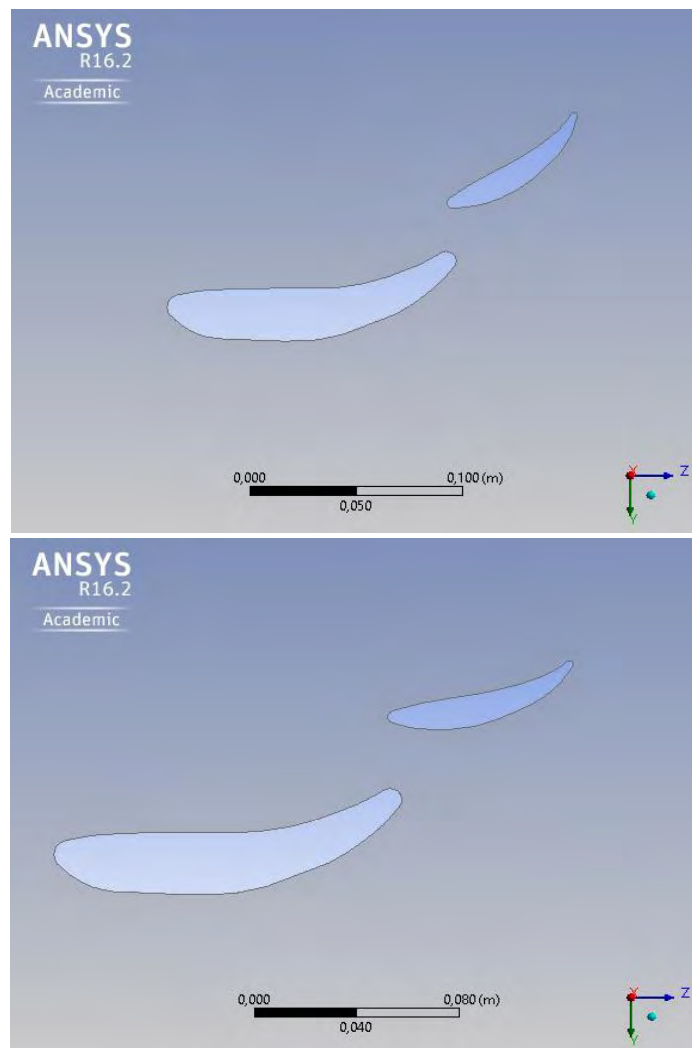
Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS CFX, αφορούσαν τη μέτρηση της κάθετης δύναμης του συστήματος πτερύγων και το προφίλ ταχυτήτων στο απόρευμα του. Επιλέχθηκαν 3 είδη ροής για τις μετρήσεις όπου ήταν:

- I. Στρωτή ροή
- II. Τυρβώδης ροή με μέτρια ένταση τύρβης 5%
- III. Τυρβώδης ροή με μεγάλη ένταση τύρβης 10%

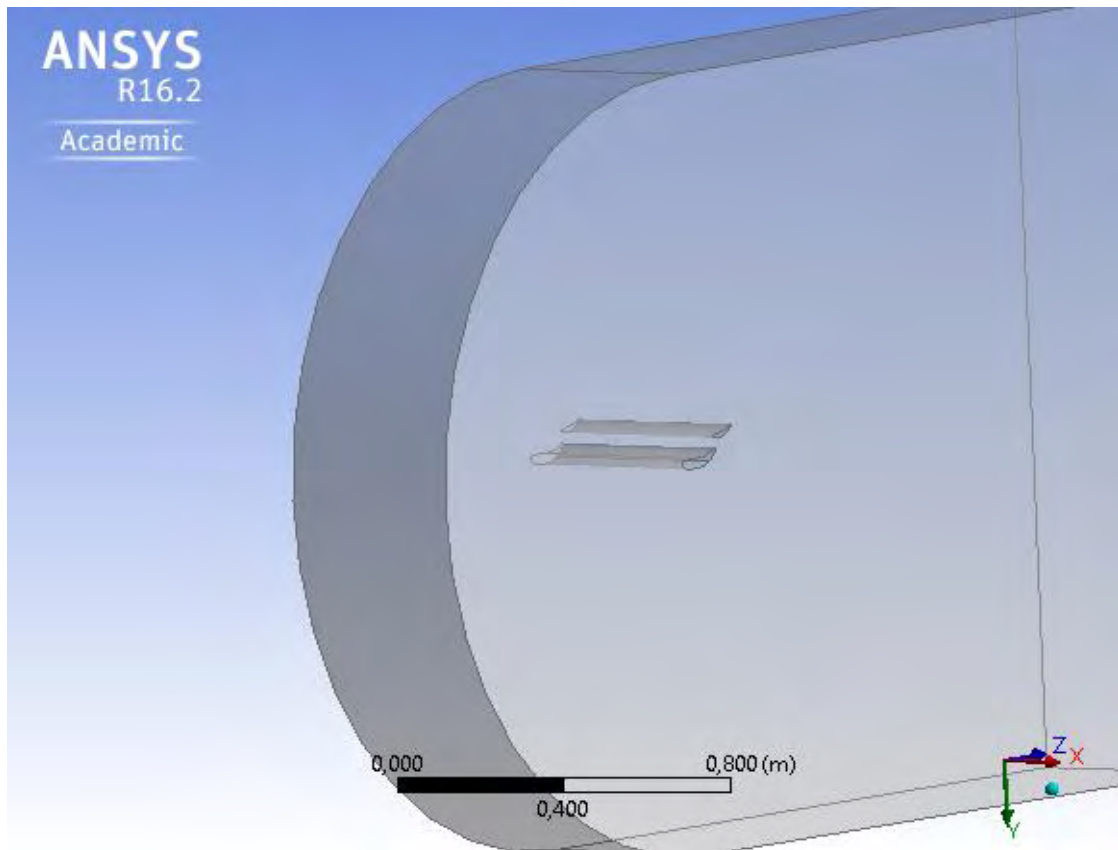
Όλες οι μετρήσεις έγιναν για τις δύο γωνίες της κινητής πτέρυγας: $\alpha_1=18^\circ$ και $\alpha_2=37^\circ$. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα του συστήματος πτερύγων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ακραίες πλάκες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος, του υπολογιστικού χώρου, των οριακών συνθηκών και η γεωμετρία του προσομοιώματος.

6.2.2 Χαρακτηριστικά γεωμετρίας

Οι γεωμετρία του συστήματος πτερύγων είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στα πειράματα. Η χορδή της σταθερής πτέρυγας είναι $c_1=13.7\text{cm}$ και της κινητής πτέρυγας $c_2=6.5\text{cm}$. Ο υπολογιστικός χώρος σε πλάτος είναι τόσο όσο και το πλάτος του συστήματος πτερύγων, δηλαδή 45.4cm , καθώς έχουν αφαιρεθεί οι δύο ακραίες πλάκες που είναι 0.6cm . Όπως προαναφέρθηκε, τα προσομοιώματα σχεδιάστηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks και στη συνέχεια τα σχέδια εισήχθησαν στο ANSYS CFX.



Σχήμα 6.1 Γεωμετρίες αεροτομών για $\alpha_2=37^\circ$ και $\alpha_1=18^\circ$

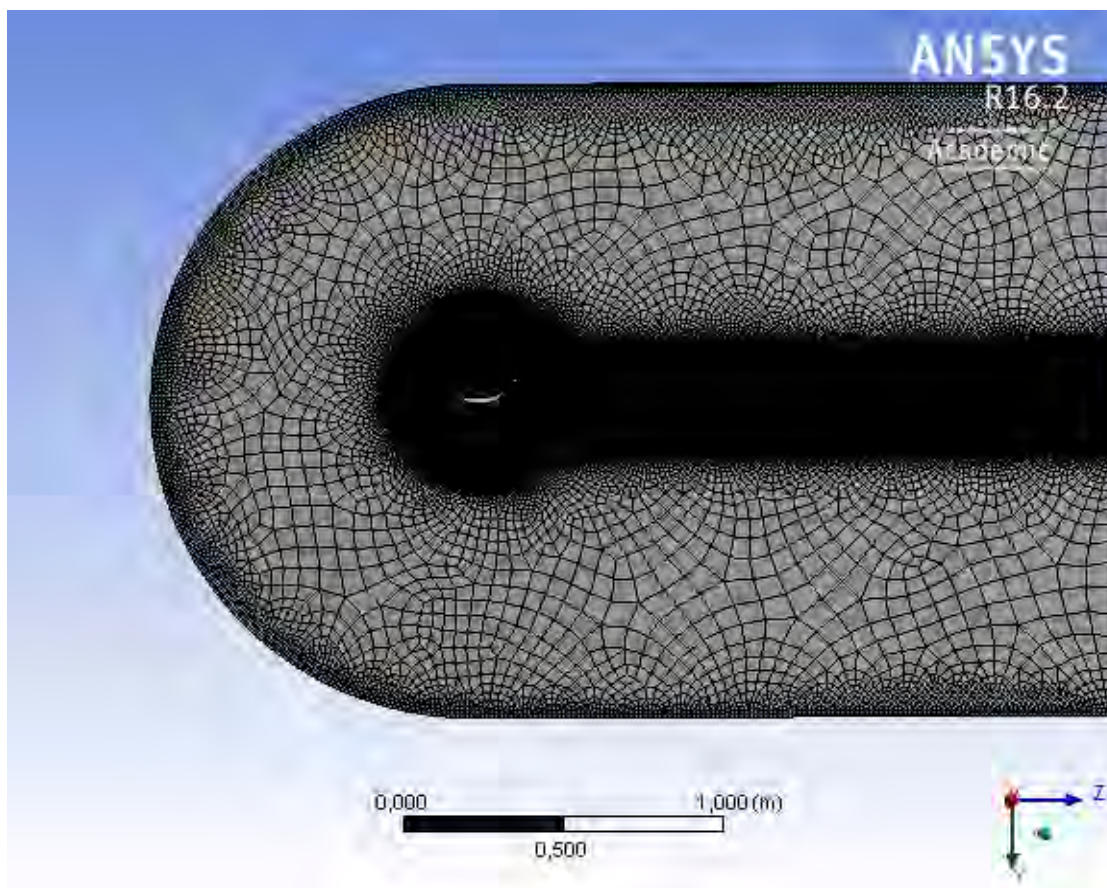


Σχήμα 6.2 Υπολογιστικός χώρος προβλήματος

Βρέθηκε πως ο καλύτερος σχεδιασμός για τη μελέτη αεροτομών με υπολογιστικά προγράμματα είναι η συνένωση ημικυκλίου, με κέντρο το αεροδυναμικό κέντρο του συστήματος πτερύγων, και ενός ορθογωνίου όπως βλέπουμε πιο πάνω.

6.2.3 Χαρακτηριστικά πλέγματος

Για το πλέγμα του προβλήματος επιλέχθηκε να διακριτοποιηθεί ένα ευρύ πλέγμα χωρίς μεγάλη πυκνωση, προκειμένου να ελαφρυνθεί το σύστημα κατά την επίλυση, και μία τοπική πυκνωση στην αεροτομή με διάμετρο 1 μέτρο η οποία θα εκτείνεται μέχρι το τέλος του υπολογιστικού χώρου. Στην επιφάνεια εισόδου της ροής επιλέχθηκε πυκνωση του πλέγματος για καλύτερη προσομοίωση της ροής.



Σχήμα 6.3 Συνολικό πλέγμα της προσομοίωσης και τοπική πύκνωση

Από της επιλογές του προγράμματος κατά τη διαδικασία διακριτοποίησης του πλέγματος επιλέχθηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6.1 Καθορισμός είδους μελέτης και επιλογή προγράμματος

Details of "Mesh"	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX

Πίνακας 6.2 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθους πλέγματος

Sizing	
Use Advanced Size Function	On : Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	High
Transition	Slow

Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18°)
Min Size	5, e-003 m
Max Face Size	0.180 m
Max Size	0.450 m
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	0.134210 m

Πίνακας 6.3 Χαρακτηριστικά ενίσχυσης του πλέγματος

Inflation

Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	Yes
Collision Avoidance	Layer Compression
Fix First Layer	No
Gap Factor	0.5
Maximum Height Over Base	1
Growth Rate Type	Geometric
Maximum Angle	140°
Fillet Ratio	1
Use Post Smoothing	Yes
Smoothing Iterations	5

Το πλέγμα διαμορφώθηκε με τα παρακάτω χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας την εντολή insert.

Πίνακας 6.4 Χαρακτηριστικά μεγέθους πλέγματος για σώματα του προσομοιώματος

Body Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body (υπολογιστικός χώρος)
Definition	

Suppressed	No
Type	Body of Influence
Bodies of Influence	2 Bodies (Τοπική Πύκνωση)
Element Size	4, e-003m
Growth Rate	1.2
Local Min Size	Default (4, e-003m)

Πίνακας 6.5 Χαρακτηριστικά μεγέθους πλέγματος για τις ακμές της σταθερής πτέρυγας του προσομοιώματος

Edge Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Edges (Ακμές σταθερής πτέρυγας)
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
Number of Divisions	500
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias
Local Min Size	Default (0 m)

Πίνακας 6.6 Χαρακτηριστικά μεγέθους πλέγματος για τις ακμές της κινητής πτέρυγας του προσομοιώματος

Edge Sizing 2	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges (Ακμές κινητής πτέρυγας)
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
Number of Divisions	500
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias

Local Min Size	Default (0 m)
-----------------------	---------------

Πίνακας 6.7 Χαρακτηριστικά μεγέθους πλέγματος για την επιφάνεια εισόδου της ροής

Face Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	1, e-002m
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	36°
Growth Rate	1.2
Local Min Size	Default (5,e-003m)

Πίνακας 6.8 Μέθοδος σάρωσης του πλέγματος

Sweep Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Sweep
Element Midsize Nodes	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Manual Source
Source	1 Face
Target	Program Controlled
Free Face Mesh Type	Quad/Tri
Type	Number of Divisions
Sweep Num Divs	1
Sweep Bias Type	No Bias
Element Option	Solid

6.2.4 Χαρακτηριστικά Συνοριακών Συνθηκών

Σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται τα χαρακτηριστικά των συνοριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό πρόβλημα. Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- Inlet:** Ως inlet χαρακτηρίστηκε η επιφάνεια εισόδου του αέρα στο πρόβλημα. Οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε τύπο ροής διαφέραν και η ταχύτητα του αέρα λήφθηκε 12.6 m/s για τα προβλήματα υπολογισμού των ταχυτήτων στο απόρρευμα της ροής και της κάθετης δύναμης του συστήματος.
- Free:** Ήταν η συνοριακή συνθήκη των επιφανειών που αποτελούσαν την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού.
- Airfoil:** Οι συνοριακές συνθήκες των πτερύγων
- Symmetry:** Συνοριακή συνθήκη για τη συμμετρία των πλευρικών επιφανειών του υπολογιστικού χώρου

Τα χαρακτηριστικά των συνοριακών συνθηκών αναλυτικά είναι:

Πίνακας 6.9 Χαρακτηριστικά εισόδου της ροής

		Inlet		
		Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
Flow Regime		Subsonic	Subsonic	Subsonic
Mesh Motion		-	Stationary	Stationary
Mash and Momentum		Cart. Velocity Components	Cart. Velocity Components	Cart. Velocity Components
Heat Transfer		Static Temperature		
Velocity U (m/s)		0	0	0
Velocity V (m/s)		0	0	0
Velocity W (m/s)		12.5	12.5	12.5
Turbulence		Low 1%	Medium 5%	High 10%

Πίνακας 6.10 Χαρακτηριστικά ελεύθερων επιφανειών του ρευστού

		Free		
		Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
Flow Regime		Subsonic	Subsonic	Subsonic

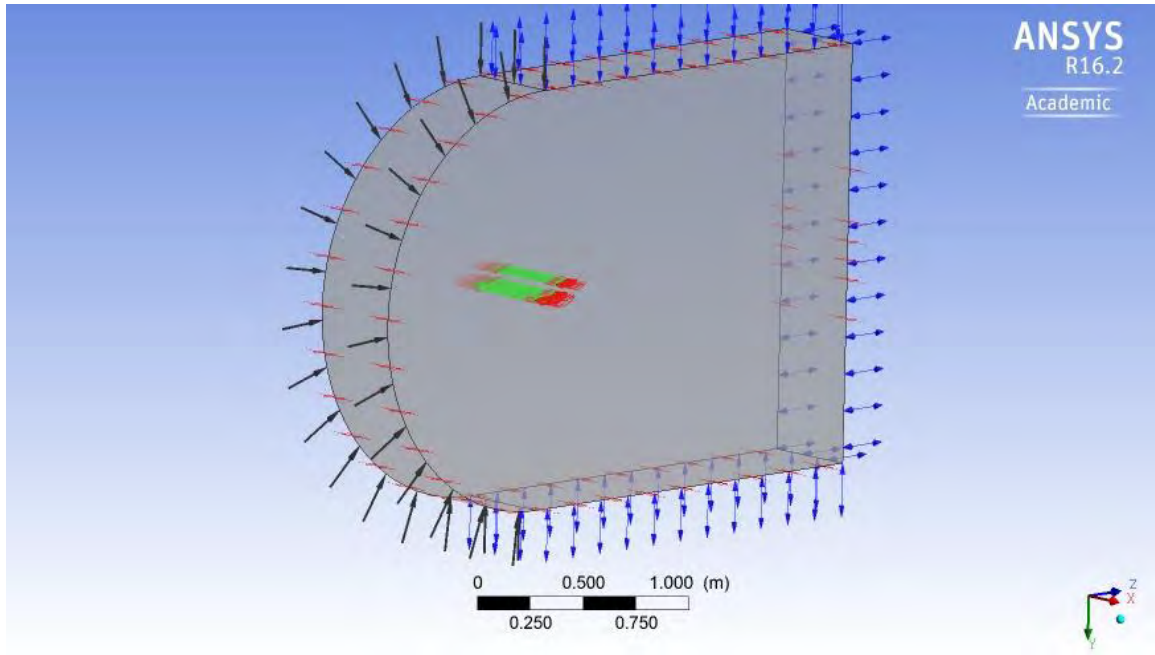
Mesh Motion	-	Stationary	Stationary
Mash and Momentum	Entrainment (0Pa)	Entrainment (0Pa)	Entrainment (0Pa)
Turbulence	Zero Gradient	Zero Gradient	Zero Gradient
Heat Transfer	Opening Temperature	-	-

Πίνακας 6.11 Συμμετρία του προβλήματος

Symmetry			
	Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
Mesh Motion	-	Unspecified	Unspecified

Πίνακας 6.12 Χαρακτηριστικά των πτερύγων για την προσομοίωση

Airfoil			
	Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
Boundary Type	Wall	Wall	Wall
Mesh Motion	Stationary	Stationary	Stationary
Mash and Momentum	No Slip Wall	No Slip Wall	No Slip Wall
Mash and Momentum Wall	-	Mesh Motion	Mesh Motion
Wall Roughness	Smooth Wall	Smooth Wall	Smooth Wall



Σχήμα 6.4 Σύνορα προβλήματος

6.2.5 Παράμετροι Επίλυσης

Παρακάτω βλέπουμε τις παραμέτρους των προβλημάτων στρωτής και τυρβώδους ροής που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος.

Πίνακας 6.13 Χαρακτηριστικά τύπου ανάλυσης του προβλήματος

	Analysis Type		
	Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
External Solver C	None	None	None
Analysis Type	Steady State	Transient	Transient
Time Duration	-	Total Time 2s	Total Time 2s
Time Steps	-	Time Steps 0.05s	Time Steps 0.05s
Initial Time	-	-	-

Πίνακας 6.14 Χαρακτηριστικά του υπολογιστικού χώρου του προβλήματος

Default Domain			
	Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
Basic Settings			
Domain Type	Fluid Domain	Fluid Domain	Fluid Domain
Coordinate Frame	Coord 0	Coord 0	Coord 0
Material	Air Ideal Gas	Air Ideal Gas	Air Ideal Gas
Morphology	Continuous Fluid	Continuous Fluid	Continuous Fluid
Pressure	1	1	1
Buoyancy Model	Non Buoyant	Non Buoyant	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary	Stationary	Stationary
Mesh Deformation			
Displacement	-	Previous Mesh	Previous Mesh
Fluid Modes			
Heat Transfer	Total Energy	Isothermal	Isothermal
Turbulence Option	Shear Stress Tr.	K-epsilon	K-epsilon
Turbulence Wall	Automatic	Scalable	Scalable
Combustion	None	None	None
Thermal Radiation	None	None	None
Initialization			
Domain Initialization	-	TRUE	TRUE
Velocity Type	-	Cartesian	Cartesian
Cart. Vel. Comp.	-	Automatic with Velocity	Automatic with Velocity
Static Pressure	-	Automatic with Velocity	Automatic with Velocity
Turbulence	-	Medium 5%	High 10%
Output Control			
	Steady	Medium Turbulence 5%	High Turbulence 10%
Transient Results	-	→ New	→ New
Options	-	Standard	Standard
File Compression	-	Default	Default
Output Frequency	-	Every Timestep	Every Timestep
Solver Control			

Advection Scheme	High Resolution	High Resolution	High Resolution
Transient Scheme	-	Second Order	Second Order
Timestep	-	Automatic	Automatic
Initialization			
Turbulence	First Order	First Order	First Order
Numerics			
Convergence MIN Iterations	1	1	1
Convergence MAX Iterations	100	20	20
Timescale Control	Auto Timescale	Coefficient Loops	Coefficient Loops
Length Scale Option	Conservative	-	-
Timescale Factor	1	-	-
Residual Type	RMS	RMS	RMS
Residual Target	0.00001	0.00001	0.00001

6.3 Αποτελέσματα – Σχολιασμός

6.3.1 Μέτρηση ταχύτητας απορεύματος

Αρχικά μετρήθηκαν οι τιμές της ταχύτητας του αέρα στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων. Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις αυτές στο ANSYS CFX, σχεδιάστηκαν στο απόρευμα του συστήματος και σε απόσταση περίπου 2 χορδών από αυτό, δηλαδή στα 40cm, 17 κύλινδροι διαμέτρου 3mm προκειμένου να γίνουν οι μετρήσεις. Στα επόμενα σχήματα και πίνακες εμφανίζονται οι τιμές και τα διαγράμματα ταχυτήτων σε σχέση με τη θέση του μετρητή Z.

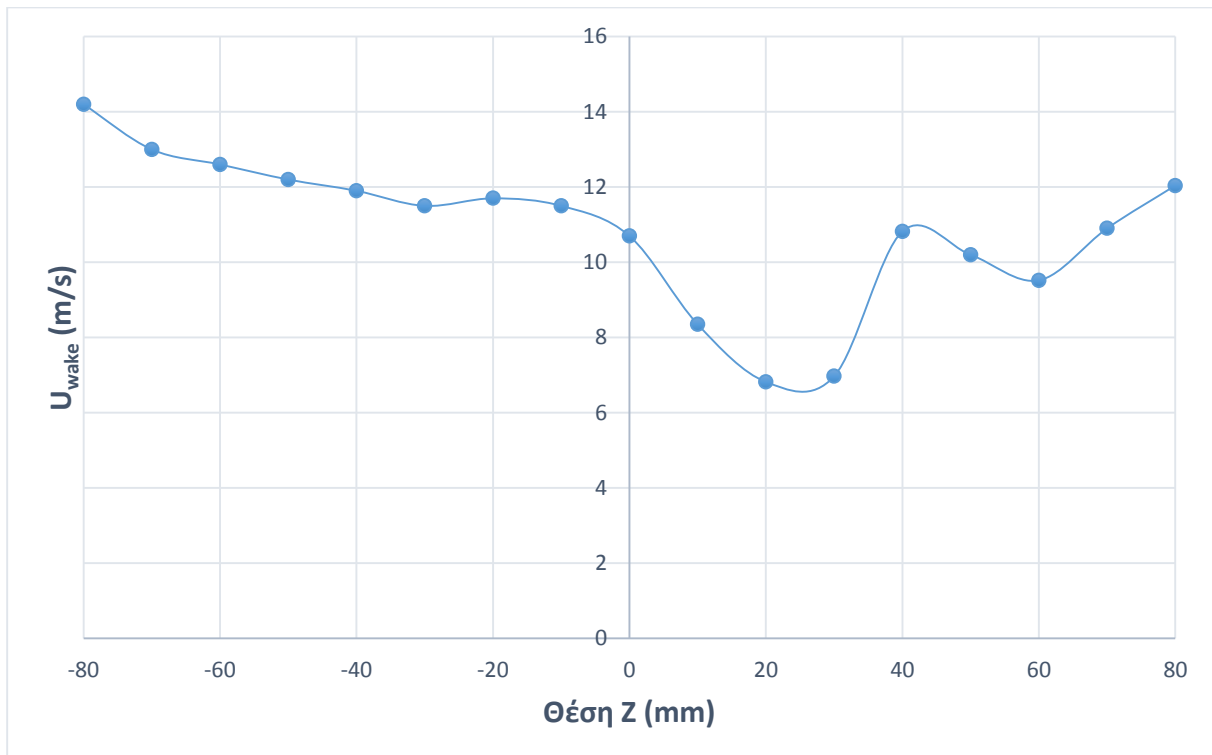
6.3.1.1 Αποτελέσματα για στρωτή ροή και γωνία πτέρυγας $\alpha_1=18^\circ$

Από την προσομοίωση στο ANSYS πήραμε τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 6.15 Αποτελέσματα ταχυτήτων απορεύματος για στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$

Θέση Z (mm)	Ταχύτητα απορεύματος (m/s)
80	12.04
70	10.9
60	9.52

50	10.2
40	10.82
30	6.97
20	6.82
10	8.35
0	10.7
-10	11.5
-20	11.7
-30	11.5
-40	11.9
-50	12.2
-60	12.6
-70	13
-80	14.2



Διάγραμμα 6.1 Διάγραμμα ταχύτητας απορεύματος με τη θέση Z

Από το διάγραμμα ταχύτητας για στρωτή ροή παρατηρείται πως οι ταχύτητες έχουν ένα εύρος από 12 έως 14.2 m/s, με την ταχύτητα ελάχιστη τιμή της ταχύτητας να σημειώνεται σε

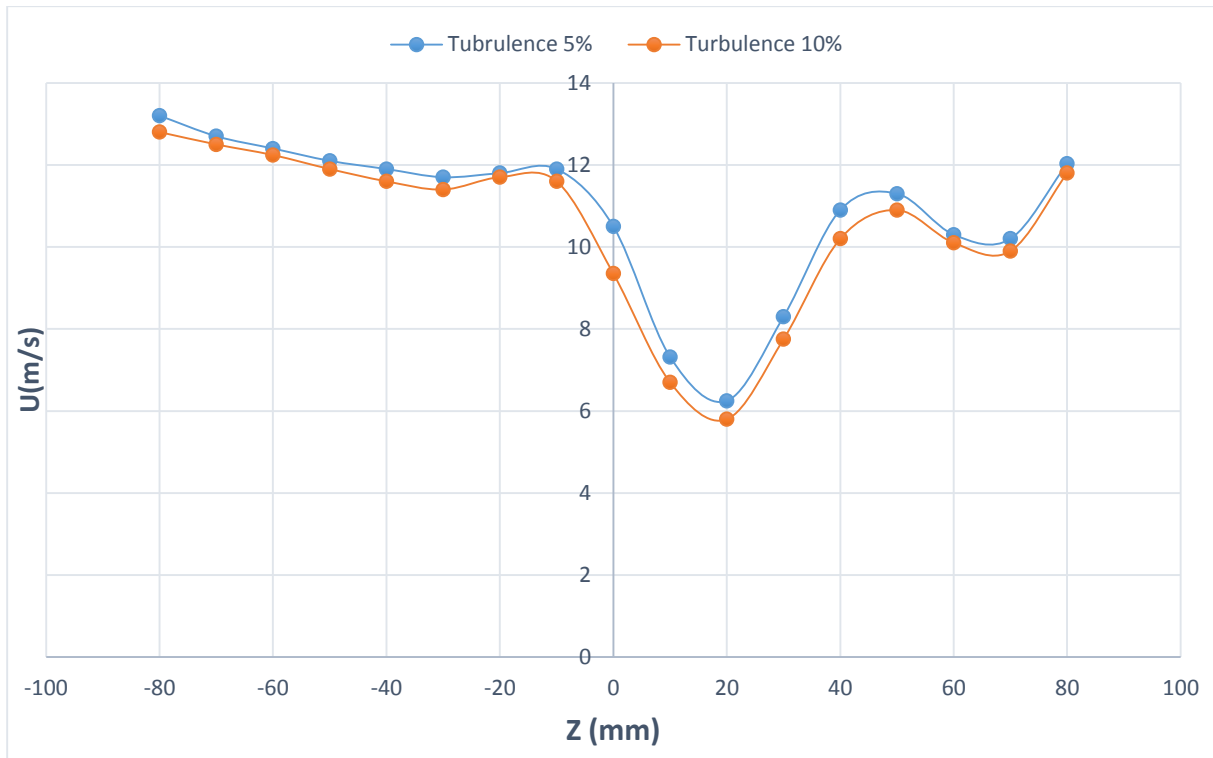
θέση 2 cm πάνω από το κέντρο του συστήματος πτερύγων, γεγονός που είναι αναμενόμενο διότι εκεί παρατηρείται αποκόλληση της ροής από την επιφάνεια του συστήματος.

6.3.1.2 Αποτελέσματα για τυρβώδη ροή και γωνία πτέρυγας $\alpha_1=18^\circ$

Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων της ταχύτητας του αέρα στο απόρρευμα του συστήματος πτερύγων, για την περίπτωση τυρβώδους ροής. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν για δύο περιπτώσεις τυρβώδους ροής: μία για τύρβη με μέτρια ένταση 5% και μία για τύρβη μεγάλης έντασης 10%.

Πίνακας 6.16 Αποτελέσματα ταχυτήτων απορεύματος για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$

Θέση Z	Ταχύτητα για τύρβη	
	5%	10%
80	12.03	11.8
70	10.2	9.9
60	10.3	10.1
50	11.3	10.9
40	10.9	10.2
30	8.3	7.75
20	6.25	5.8
10	7.32	6.7
0	10.5	9.35
-10	11.9	11.6
-20	11.8	11.7
-30	11.7	11.4
-40	11.9	11.6
-50	12.1	11.9
-60	12.4	12.24
-70	12.7	12.5
-80	13.2	12.8



Διάγραμμα 6.2 Διάγραμμα ταχυτήτων για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$

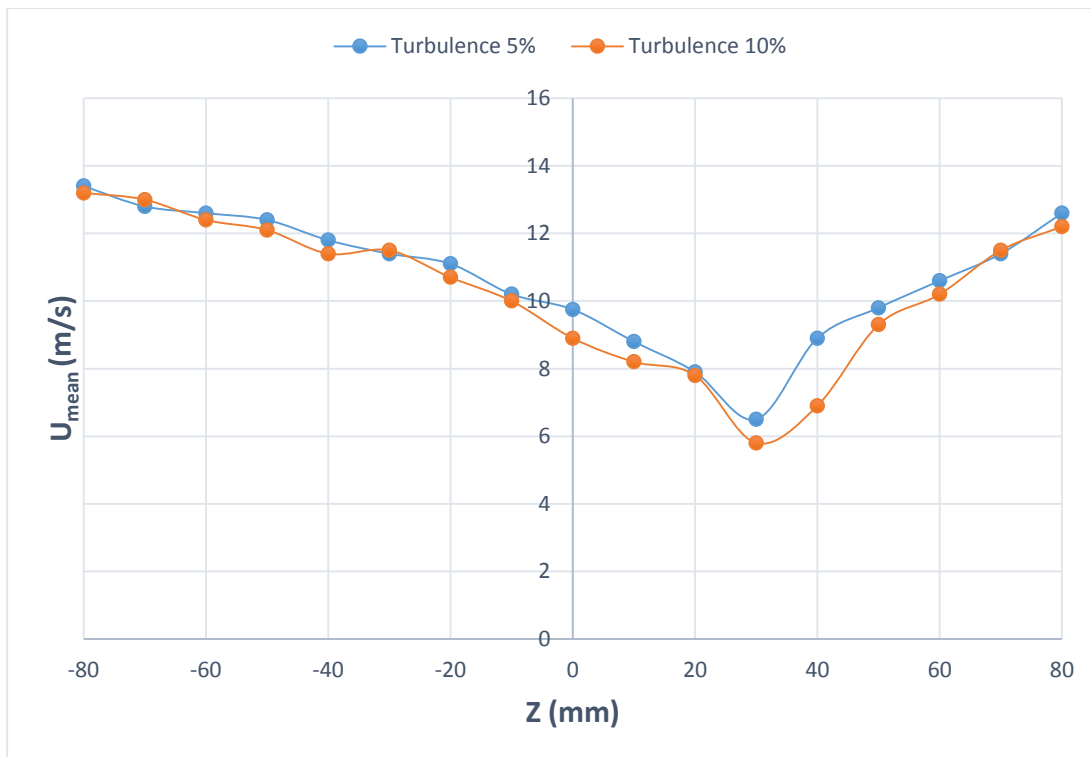
Από τα διαγράμματα ταχυτήτων για την περίπτωση της τυρβώδους ροής για γωνία της κινητής πτέρυγας $\alpha_1=18^\circ$, παρατηρείται πως το εύρος των ταχυτήτων είναι μικρότερο από πού υπολογίστηκε για στρωτή ροή. Η τιμή της ταχύτητας ελαχιστοποιείται κοντά στο κέντρο μετρήσεων του συστήματος πτερύγων λόγω της αποκόλλησης της ροής. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τύρβη έντασης 10% είναι μικρότερες από αυτές για τύρβη έντασης 5%, γεγονός που οφείλεται στην πρόσκρουση αέρα με αυξημένη ένταση ροής πάνω στο σύστημα.

6.3.1.3 Αποτελέσματα για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και εδώ για δύο περιπτώσεις τυρβώδους ροής: μία για τύρβη με μέτρια ένταση 5% και μία για τύρβη μεγάλης έντασης 10%.

Πίνακας 6.17 Αποτελέσματα ταχυτήτων απορεύματος για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_1=37^\circ$

Θέση Z	Ταχύτητα για τύρβη 5%	Ταχύτητα για τύρβη 10%
80	12.6	12.2
70	11.4	11.5
60	10.6	10.2
50	9.8	9.3
40	8.9	6.9
30	6.5	5.8
20	7.9	7.8
10	8.8	8.2
0	9.75	8.9
-10	10.2	10
-20	11.1	10.7
-30	11.4	11.5
-40	11.8	11.4
-50	12.4	12.1
-60	12.6	12.4
-70	12.8	13
-80	13.4	13.2



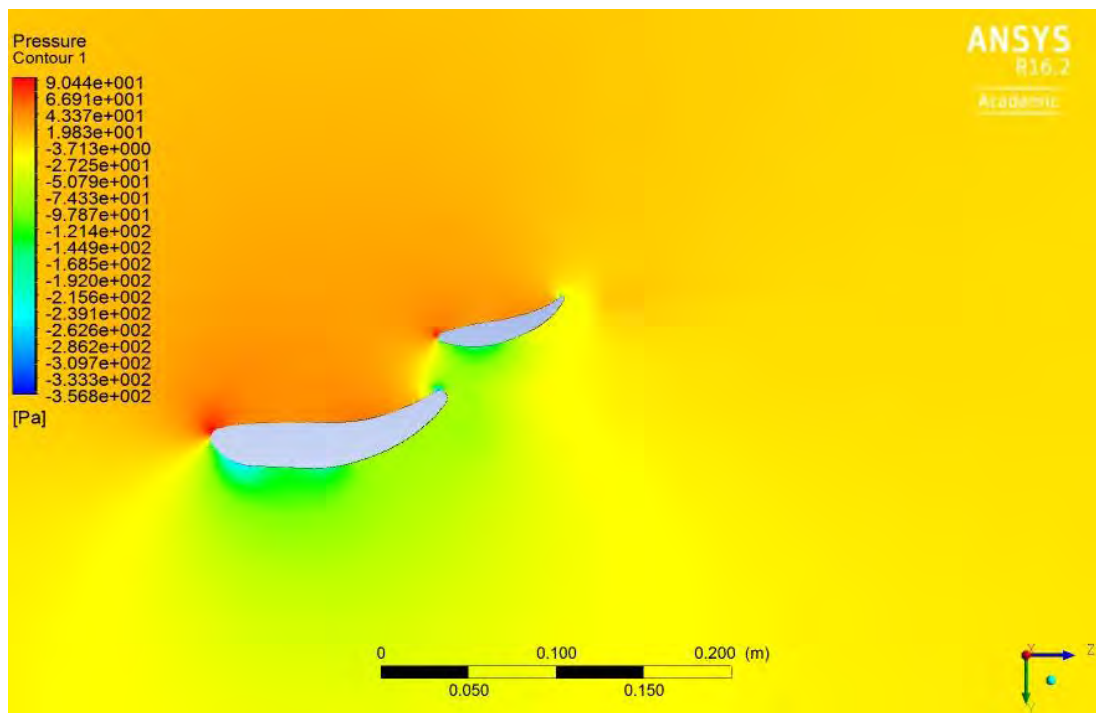
Διάγραμμα 6.3 Διάγραμμα ταχυτήτων για τυρβώδη ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$

Από τα διαγράμματα ταχυτήτων για την περίπτωση της τυρβώδους ροής για γωνία της κινητής πτέρυγας $\alpha_2=37^\circ$, παρατηρείται πως το εύρος των ταχυτήτων είναι μικρότερο από το εύρος που είχαμε για στρωτή ροή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι τιμές της ταχύτητας είναι χαμηλότερες από τις προηγούμενες στο τμήμα που βρίσκεται πάνω από το κέντρο της μέτρησης του συστήματος περύγων, εξαιτίας της αποκόλλησης της ροής που προκαλεί η αυξημένη γωνία προσβολής της κινητής πτέρυγας. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τύρβη έντασης 10% είναι μικρότερες από αυτές για τύρβη έντασης 5%, γεγονός που οφείλεται στην πρόσκρουση αέρα με αυξημένη ένταση ροής πάνω στο σύστημα.

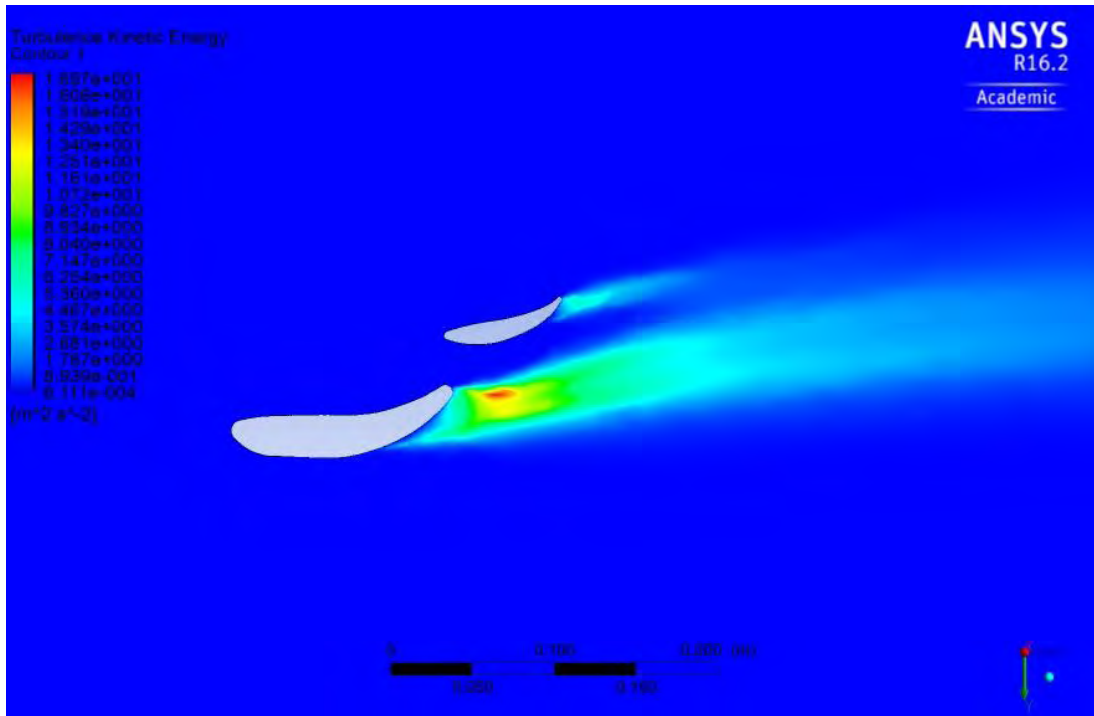
6.4 Γραφική απεικόνιση ροής και σημαντικών μεγεθών

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται εικόνες από το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS CFX που απεικονίζουν την ροή του αέρα καθώς διέρχεται από τον όγκο ελέγχου. Από το πρόγραμμα λήφθηκαν γραφικές απεικονίσεις από σημαντικά μεγέθη για την αεροδυναμική. Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν ήταν: η πίεση στην αεροτομή, η ταχύτητα στην αεροτομή και η κινητική ενέργεια της τύρβης.

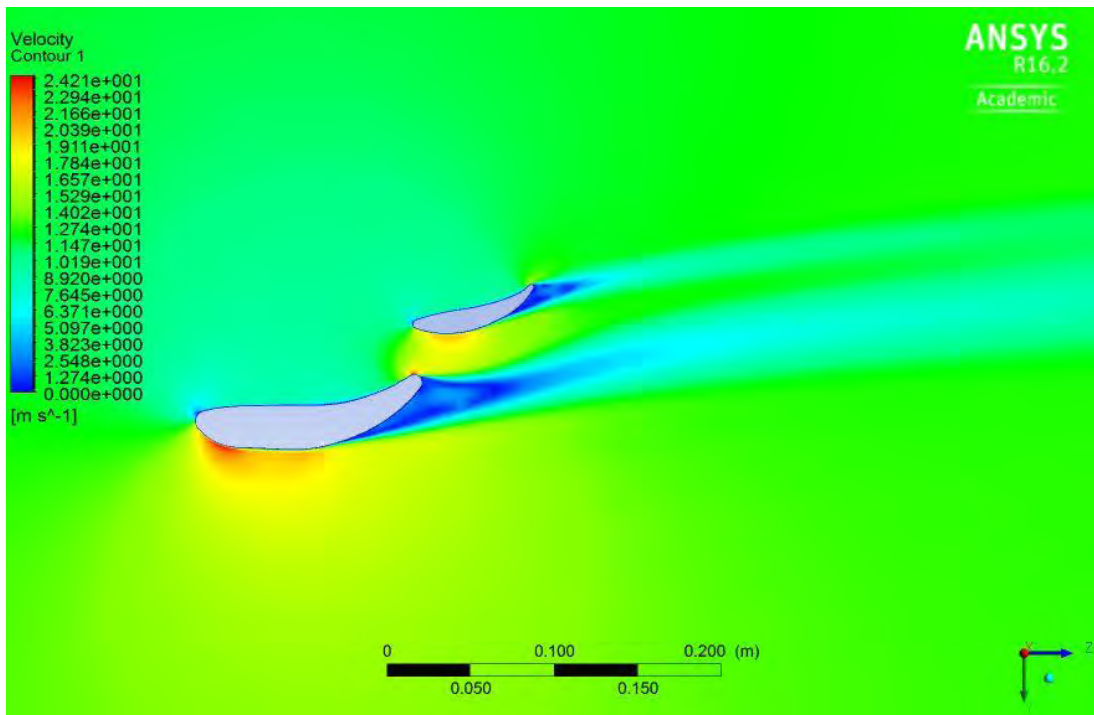
6.4.1 Στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$



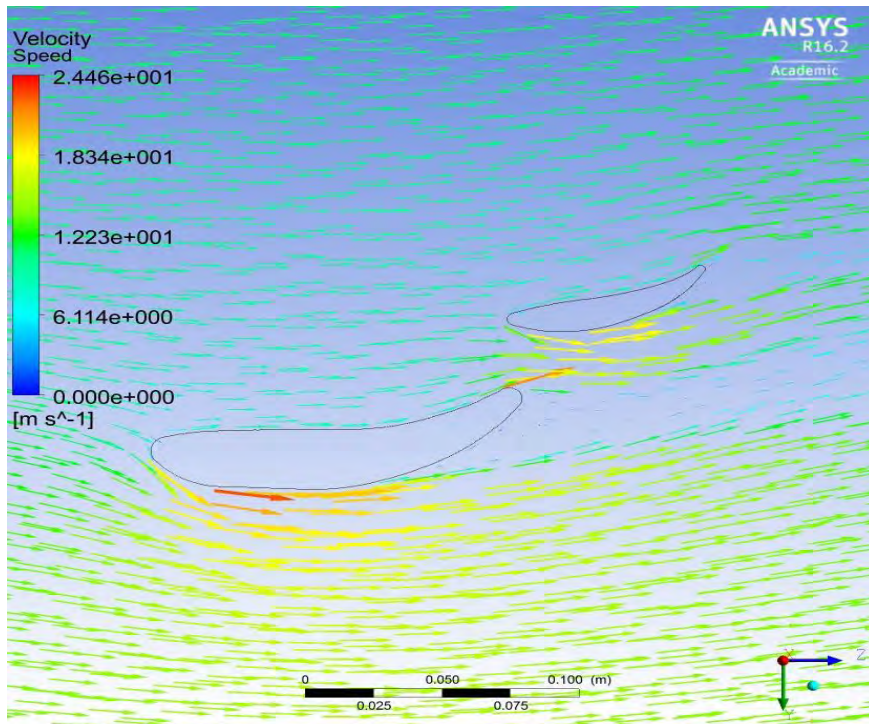
Σχήμα 6.5 Γραφική απεικόνιση πίεσης πάνω στην αεροτομή



Σχήμα 6.6 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης για την αεροτομή



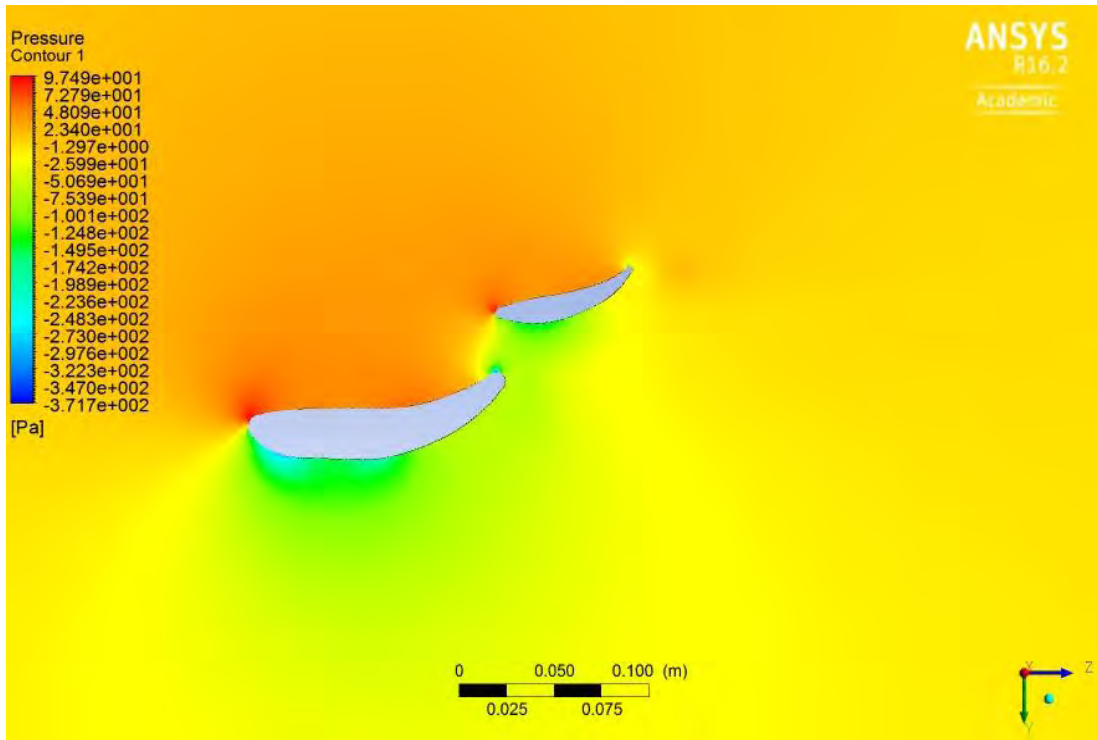
Σχήμα 6.7 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή



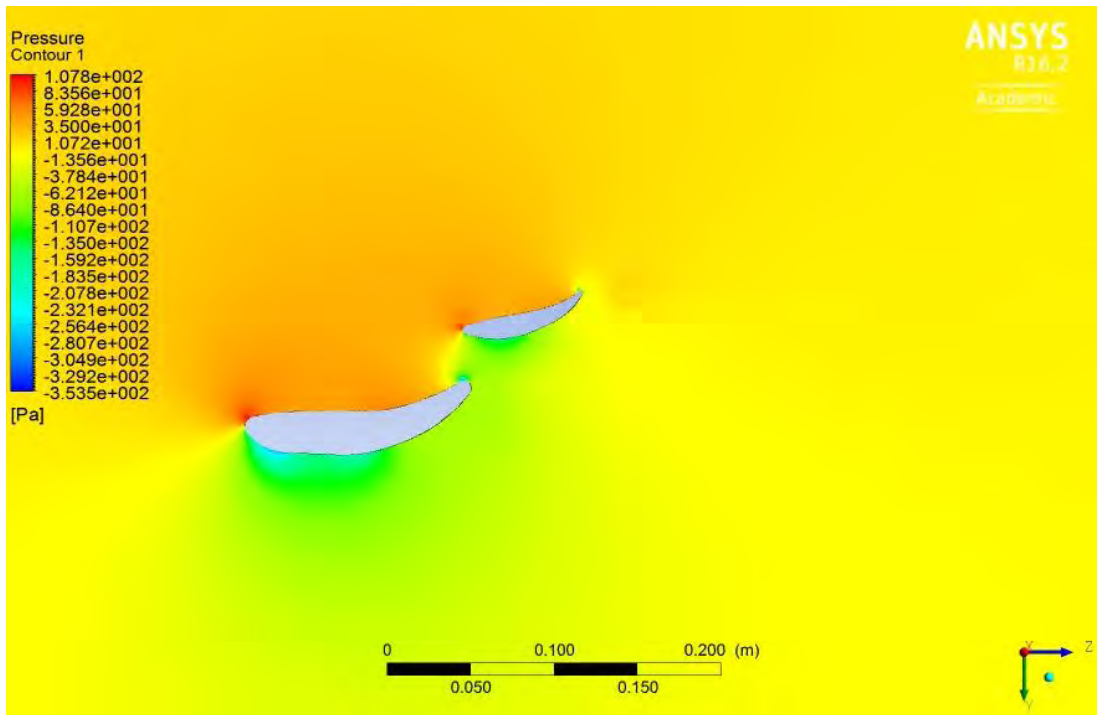
Σχήμα 6.8 Διανύσματα ταχύτητας

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα για τη ροή του αέρα στο σύστημα πτερύγων καθώς και για τη συμπεριφορά του στην αλλαγή των διάφορων μεγεθών. Παρατηρείται πως στις δύο πτέρυγες η πίεση στο πάνω μέρος των πτερύγων είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πίεση στο κάτω μέρος τους. Αυτό οφείλεται στη διαφορά ταχυτήτων του αέρα γύρω από το σύστημα πτερύγων, η οποία είναι μεγάλη στο κάτω μέρος και μικρή στο πάνω μέρος του συστήματος. Αυτή η διαφορά πιέσεων γύρω από το σύστημα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κάθετης δύναμης που αναπτύσσεται σε αυτή. Από το ANSYS υπολογίστηκε πως η κάθετη δύναμη του συστήματος πτερύγων είναι 14N. Από τα διανύσματα ταχυτήτων γύρω από το σύστημα, παρατηρείται πως μετά το μέσο της σταθερής πτέρυγας, υπάρχει αποκόλληση της ροής από το οριακό στρώμα. Σε εκείνο το σημείο η κινητική ενέργεια της τύρβης έχει μεγάλη τιμή, γεγονός που προκαλείται από την αποκόλληση της ροής λόγω της γωνίας προσβολής των πτερύγων.

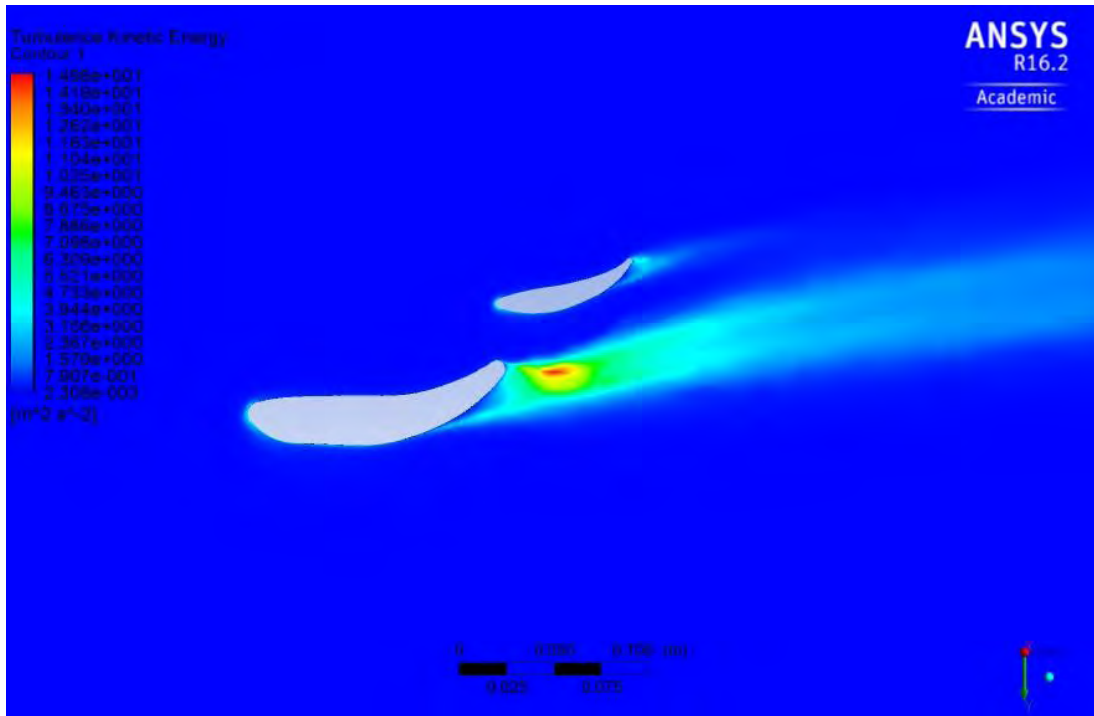
6.4.2 Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$



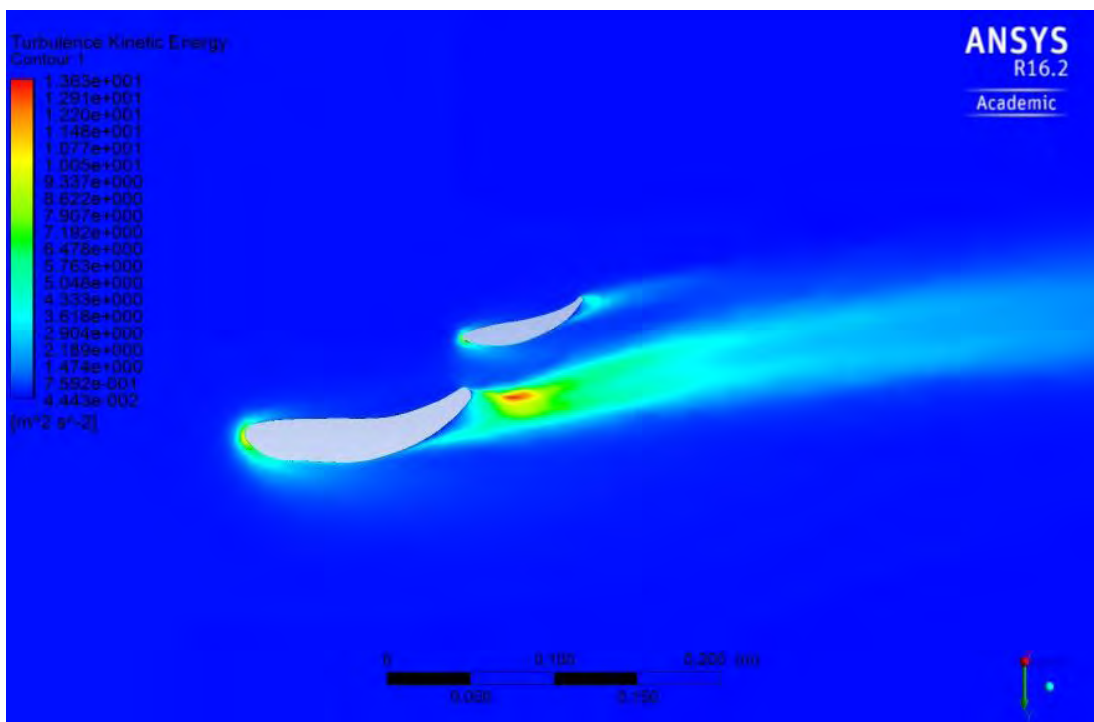
Σχήμα 6.9 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%



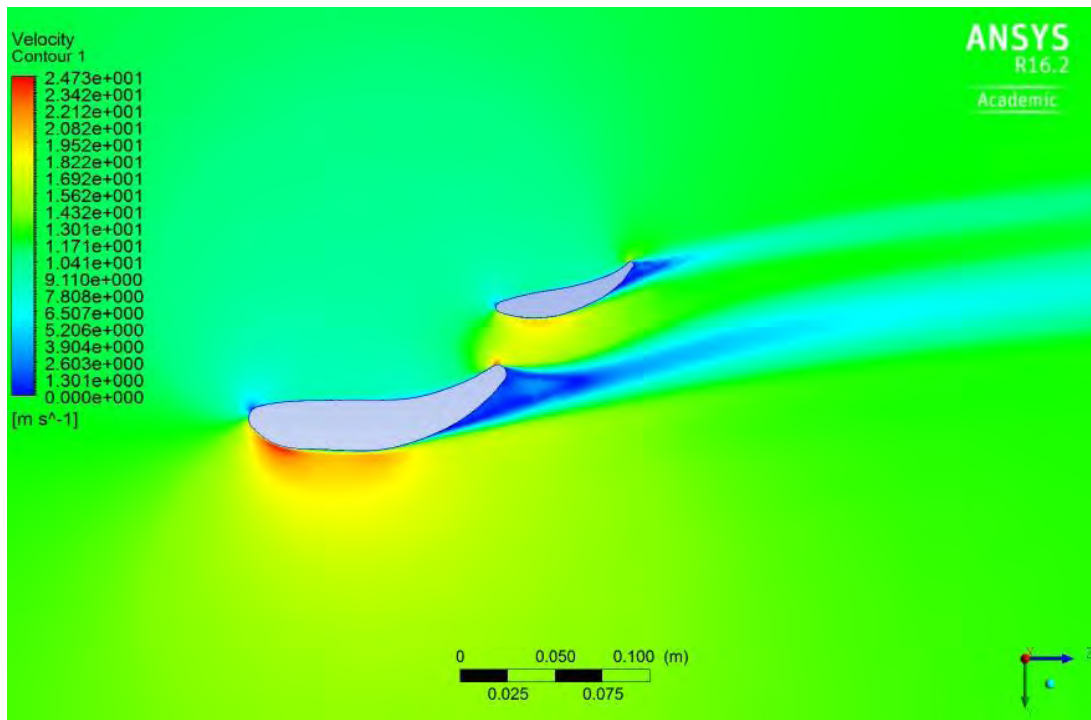
Σχήμα 6.10 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%



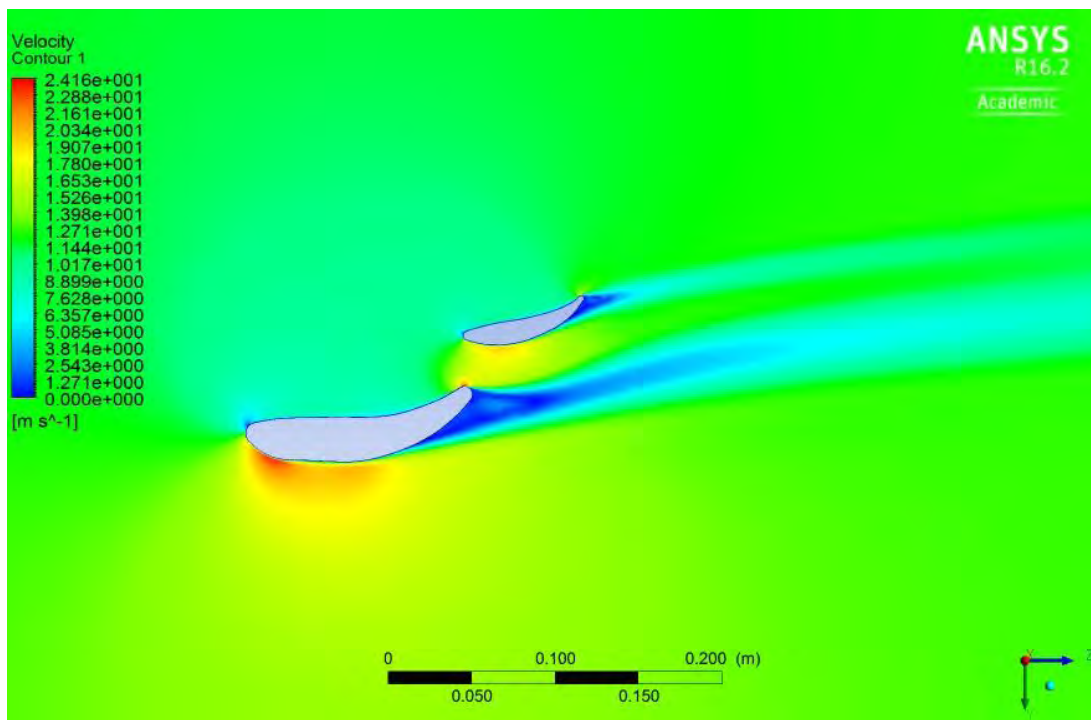
Σχήμα 6.11 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%



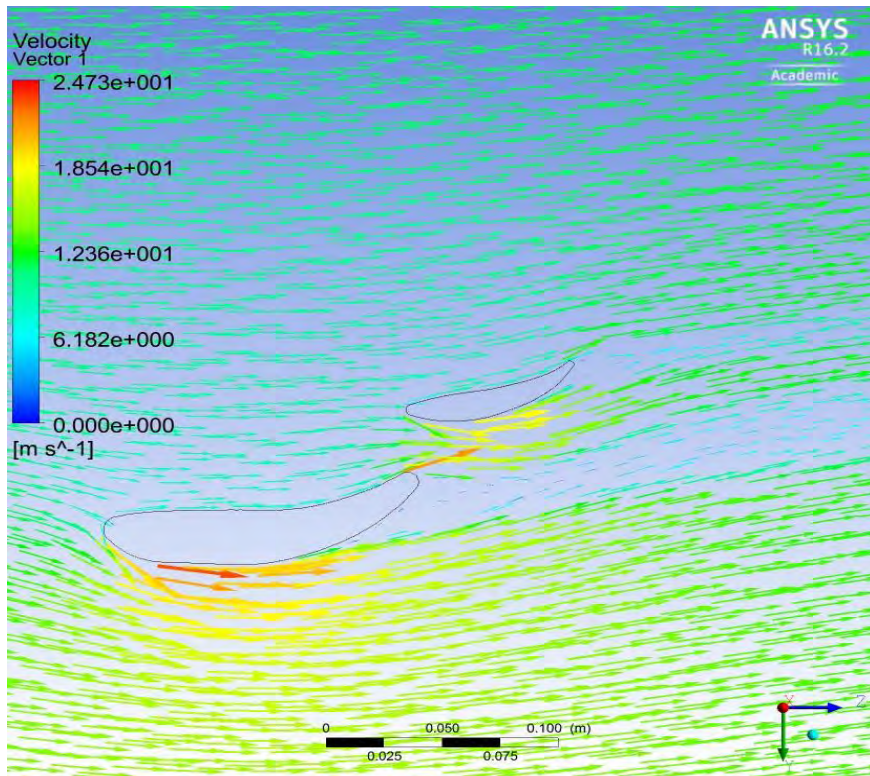
Σχήμα 6.12 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%



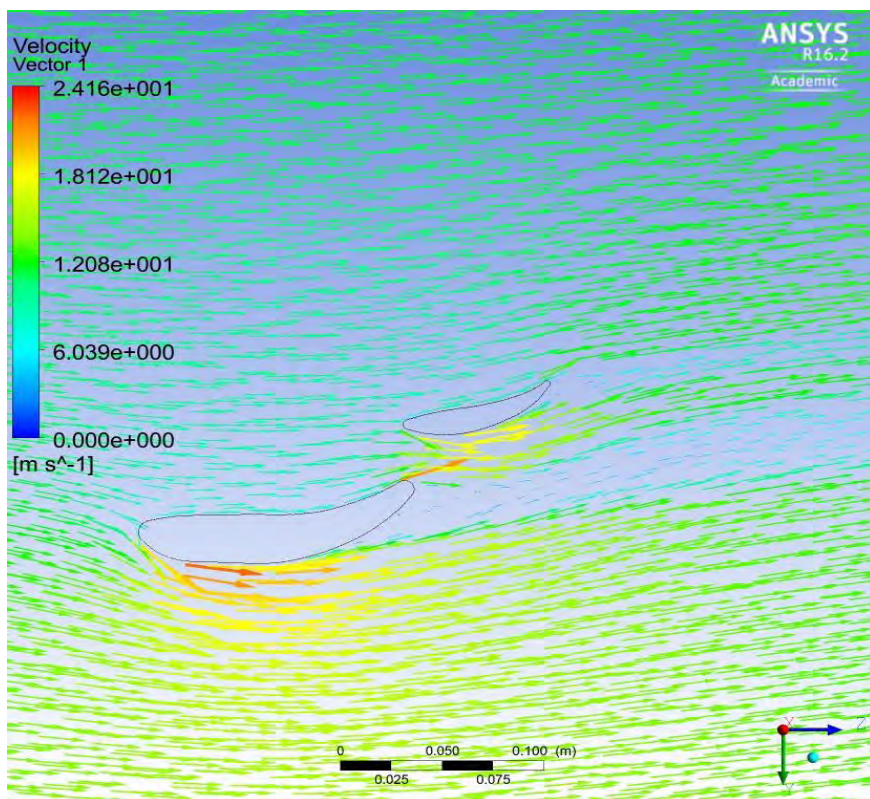
Σχήμα 6.13 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%



Σχήμα 6.14 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%



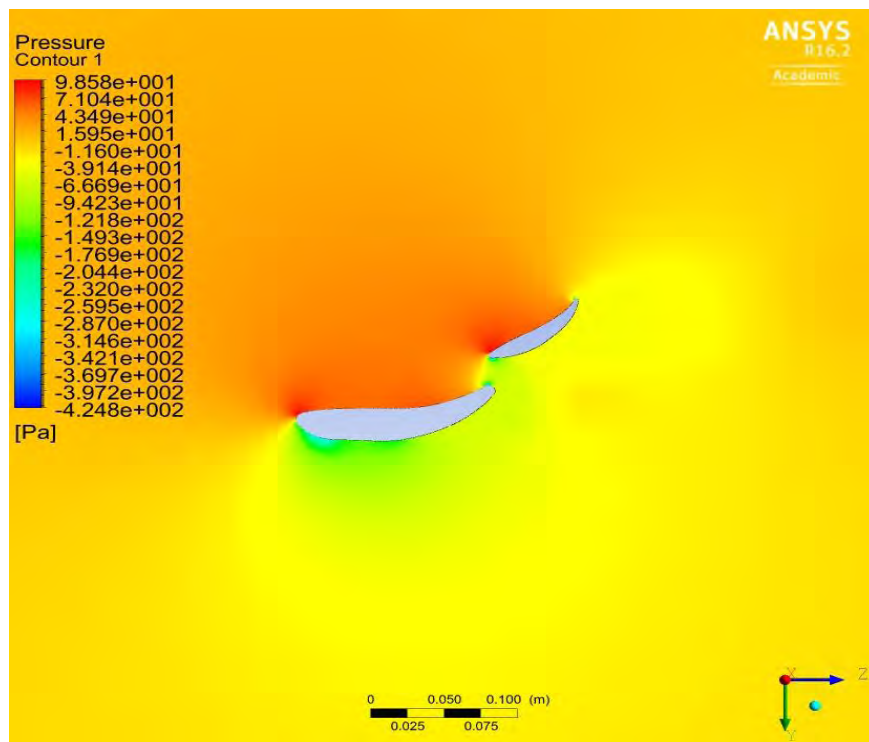
Σχήμα 6.15 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 5%



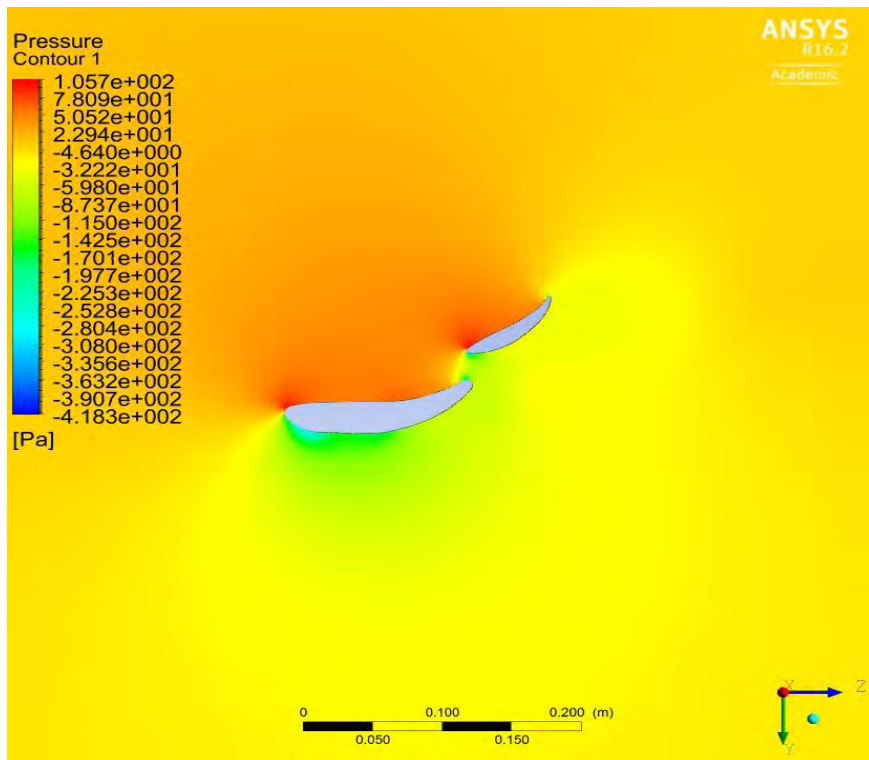
Σχήμα 6.16 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 10%

Από τις προηγούμενες εικόνες παρατηρείται ότι η κινητική ενέργεια της τύρβης στο απόρρευμα του συστήματος πτερύγων είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της στρωτής ροής απ' ό τι στην περίπτωση της τυρβώδους. Αυτό προκύπτει από τα διανύσματα ταχύτητας όπου παρατηρείται αποκόλληση της ροής η οποία είναι μικρότερη από την περίπτωση της στρωτής ροής. Το αντίθετο συμβαίνει για τις πιέσεις που ασκούνται στο σύστημα όπου είναι μικρότερες στη στρωτή παρά στην τυρβώδη ροή. Η κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα πτερύγων είναι 14.7N, δηλαδή 0.7N μεγαλύτερη σε σχέση με την στρωτή ροή.

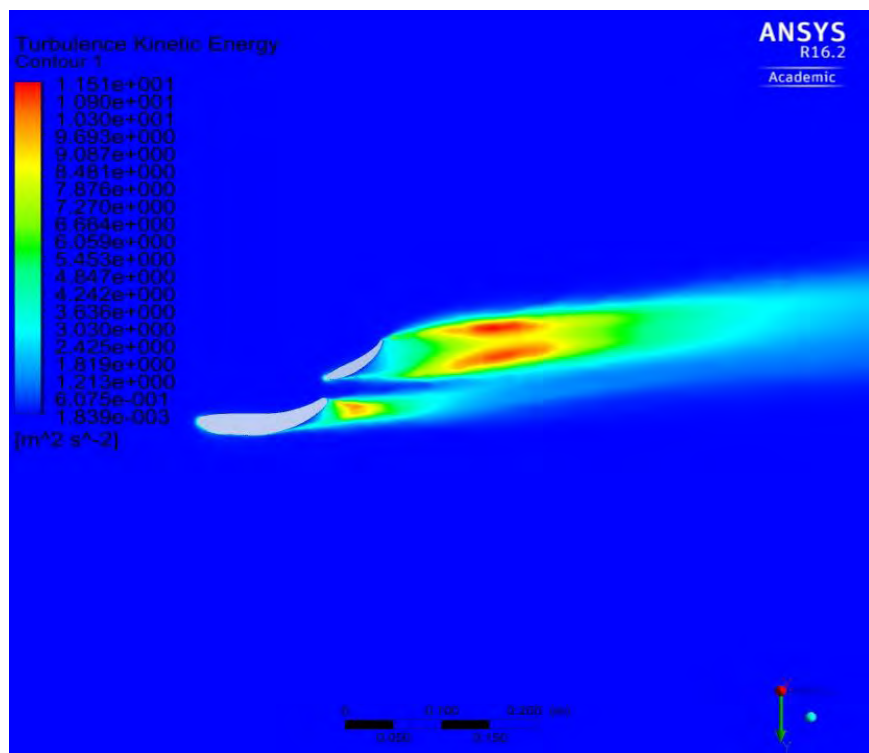
6.4.3 Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$



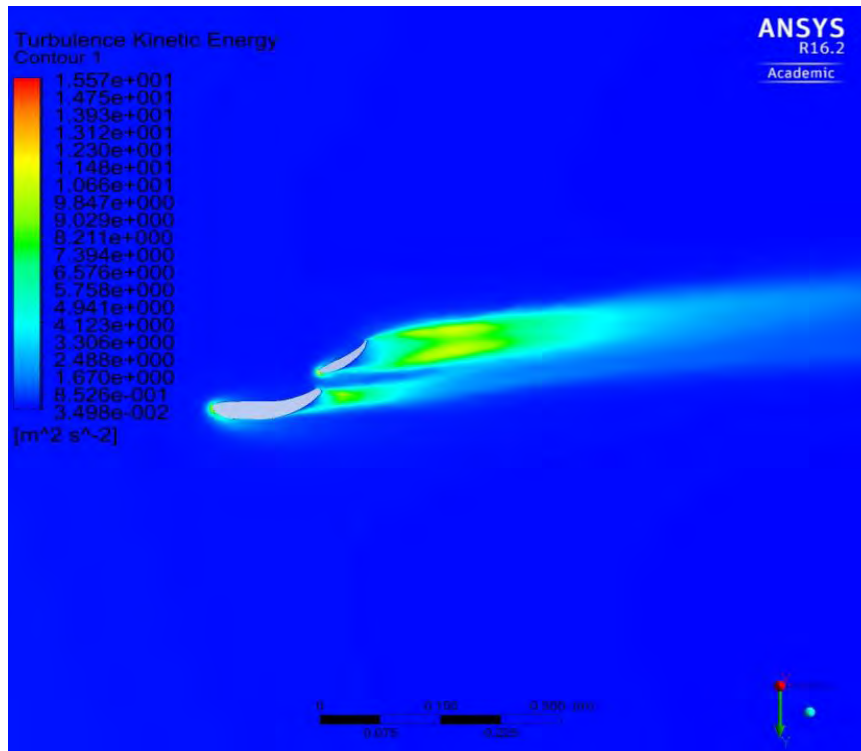
Σχήμα 6.17 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%



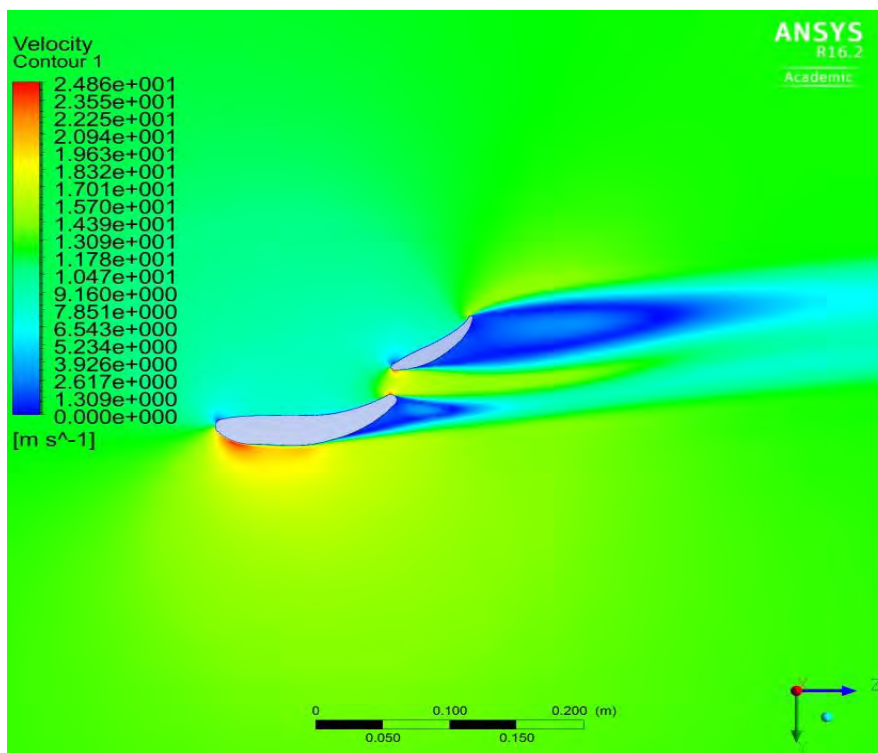
Σχήμα 6.18 Γραφική απεικόνιση πίεσης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%



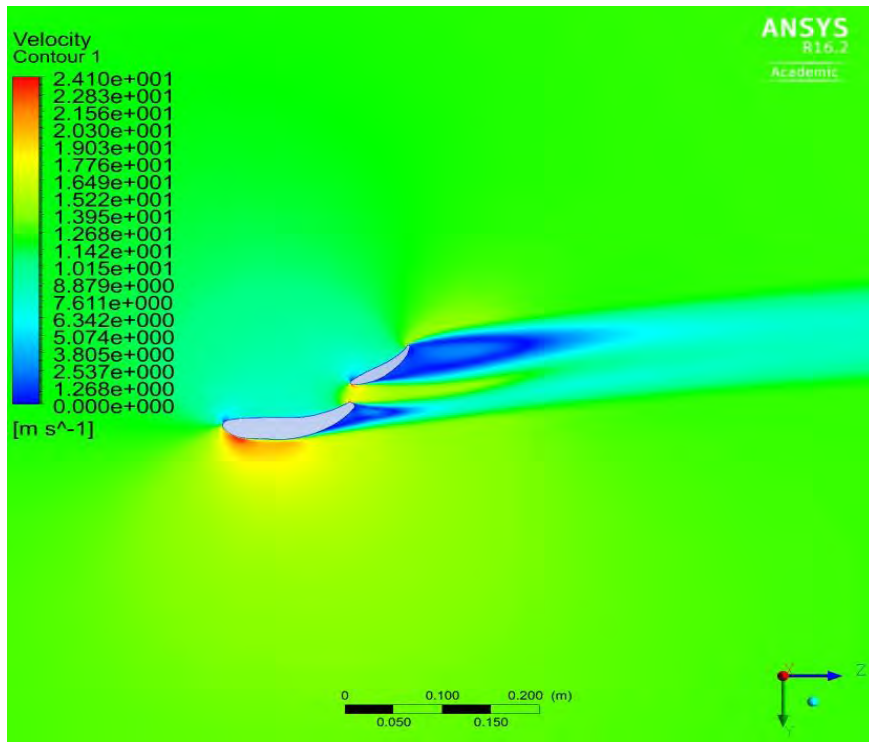
Σχήμα 6.19 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%



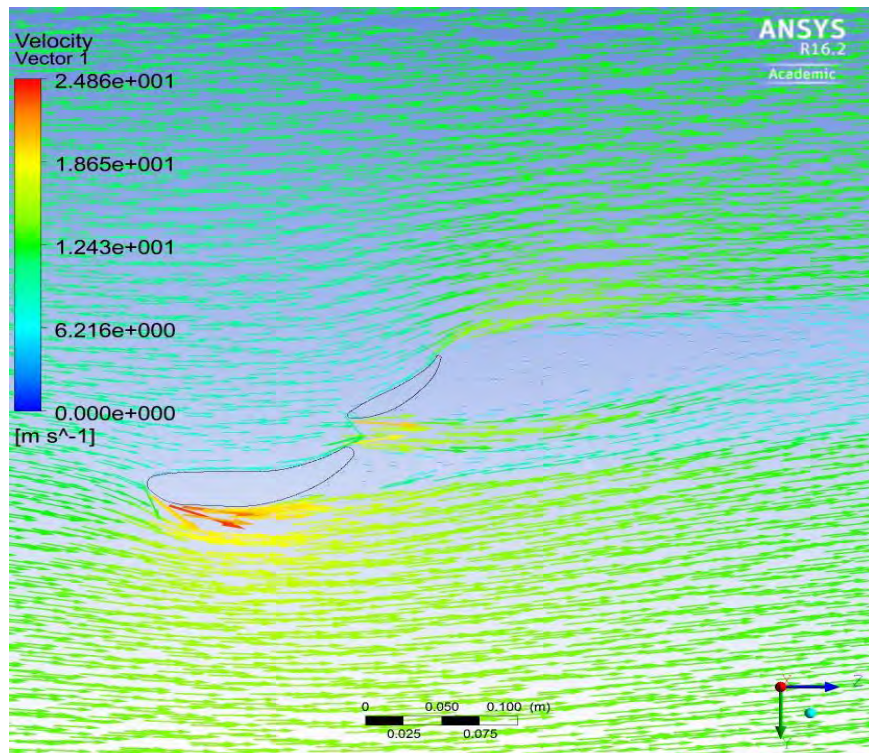
Σχήμα 6.20 Γραφική απεικόνιση κινητικής ενέργειας της τύρβης στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%



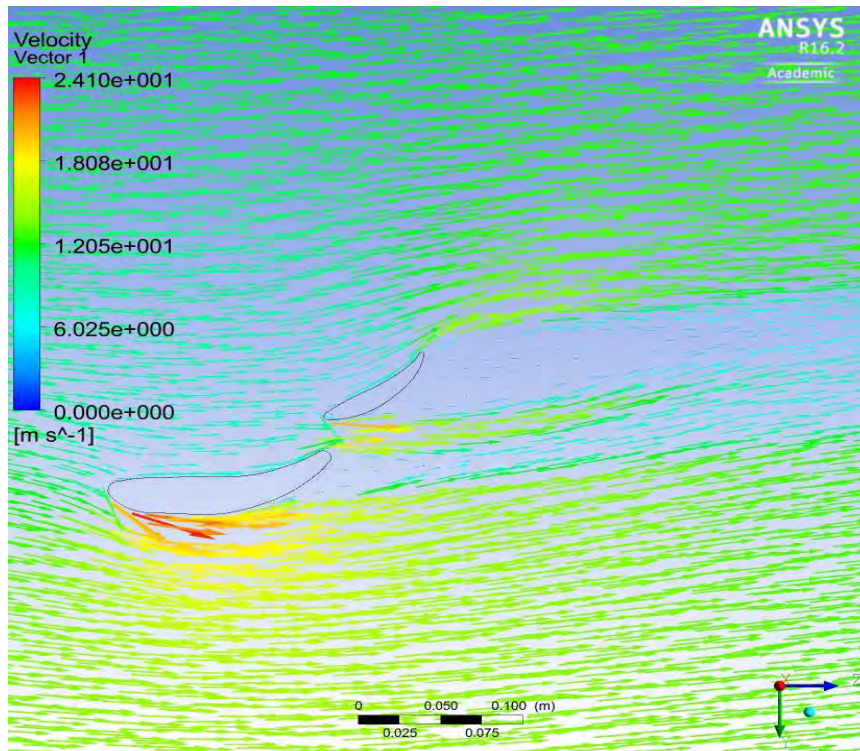
Σχήμα 6.21 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 5%



Σχήμα 6.22 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας στην αεροτομή για ένταση τύρβης 10%



Σχήμα 6.23 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 5%



Σχήμα 6.24 Διανύσματα Ταχύτητας για ένταση τύρβης 10%

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτουν συμπεράσματα για τη ροή του αέρα στο σύστημα πτερυγίων, για γωνία της κινητής πτέρυγας $\alpha_2=37^\circ$. Παρατηρείται ότι η κινητική ενέργεια της τύρβης στο απόρευμα του συστήματος πτερυγίων είναι αρκετά πιο έντονη για τη γωνία $\alpha_2=37^\circ$. Αυτό οφείλεται στο ότι η πτέρυγα είναι στραμμένη με μεγαλύτερη γωνία προσβολής στη ροή του αέρα και προκαλεί μεγαλύτερη αποκόλληση ροής, όπως φαίνεται από τα διανύσματα ταχύτητας. Το αντίθετο συμβαίνει για τις πιέσεις που ασκούνται στο σύστημα οι οποίες είναι μικρότερες στην περίπτωση όπου έχουμε γωνία $\alpha_1=18^\circ$. Η κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα πτερυγίων υπολογίστηκε στα 15.1N, δηλαδή είναι 0.4N μεγαλύτερη σε σχέση με την γωνία $\alpha_1=18^\circ$ για τυρβώδη ροή.

6.5 Συμπεράσματα

Από την διεξαγωγή των μετρήσεων με το υπολογιστικό πρόγραμμα λήφθηκε μία σαφής εικόνα για την ροή του αέρα, καθώς διέρχεται από το σύστημα πτερυγίων όπως και για κάποια βασικά μεγέθη. Παρατηρήθηκε από τα προφίλ της ταχύτητας, πως υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ της τυρβώδους και στρωτής ροής του αέρα. Για τυρβώδη ροή, ο αέρας στο απόρευμα του συστήματος πτερυγίων έχει χαμηλότερη τιμή ταχύτητας από ότι στην

περίπτωση της στρωτής ροής. Μεταξύ των δύο γωνιών, παρατηρήθηκαν πιο μεγάλες τιμές στην ταχύτητα του απορεύματος στην περίπτωση της γωνίας $\alpha_1=18^\circ$. Αυτό οφείλεται στην ευκολότερη διέλευση του αέρα διαμέσου του υπάρχοντος κενού ανάμεσα στις δύο πτέρυγες. Αντίθετα παρατηρήθηκε πως η κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα πτερύγων στην ταχύτητα των 12.6 m/s, είναι μεγαλύτερη για την γωνία $\alpha_2=37^\circ$, καθώς σε αυτή την περίπτωση το σύστημα πτερύγων έχει μεγαλύτερη διαφορά πιέσεων στο πάνω από το κάτω μέρος της.

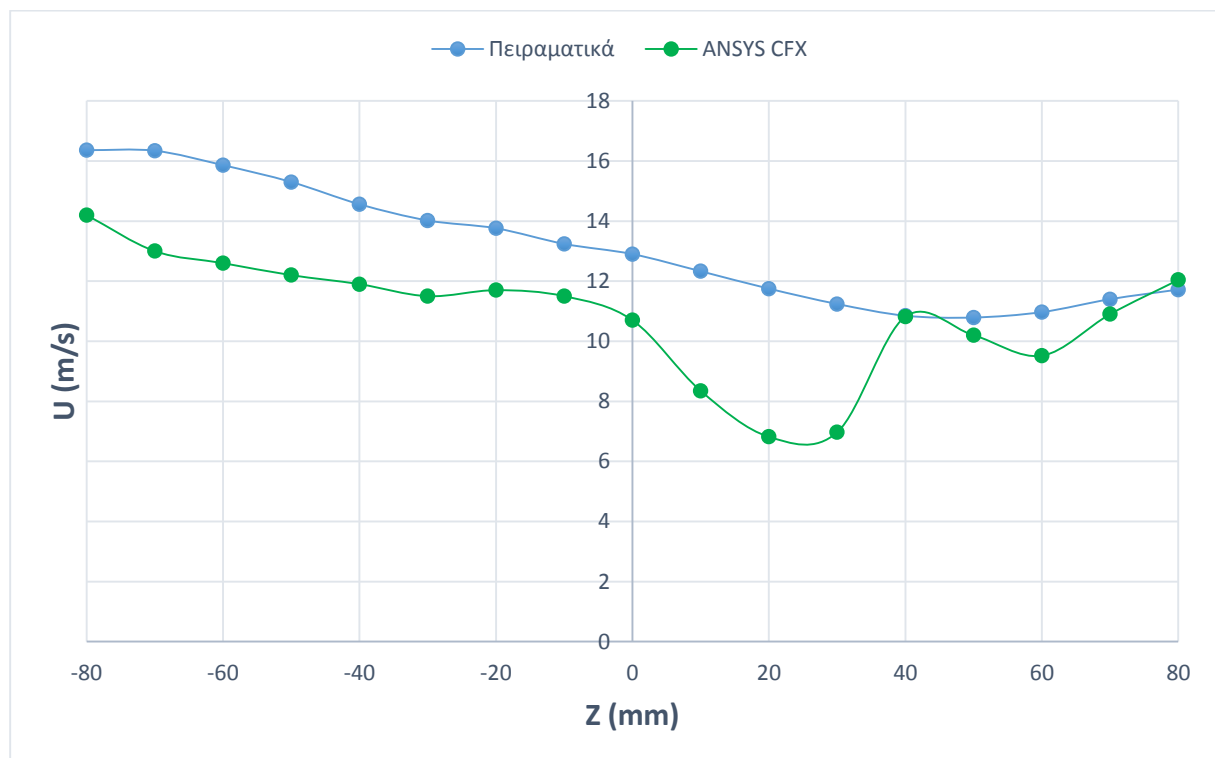
7 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύγκριση ανάμεσα στις τιμές που λήφθηκαν από την πειραματική διαδικασία και τις τιμές του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS CFX. Τα μεγέθη που συγκρίνονται είναι τα προφίλ ταχυτήτων του απορεύματος καθώς και η κάθετη δύναμη που παράγει το σύστημα πτερύγων για ταχύτητα αέρα 12.6 m/s.

7.2 Προφίλ ταχυτήτων στο απόρευμα και κάθετη δύναμη

7.2.1 Στρωτή ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$

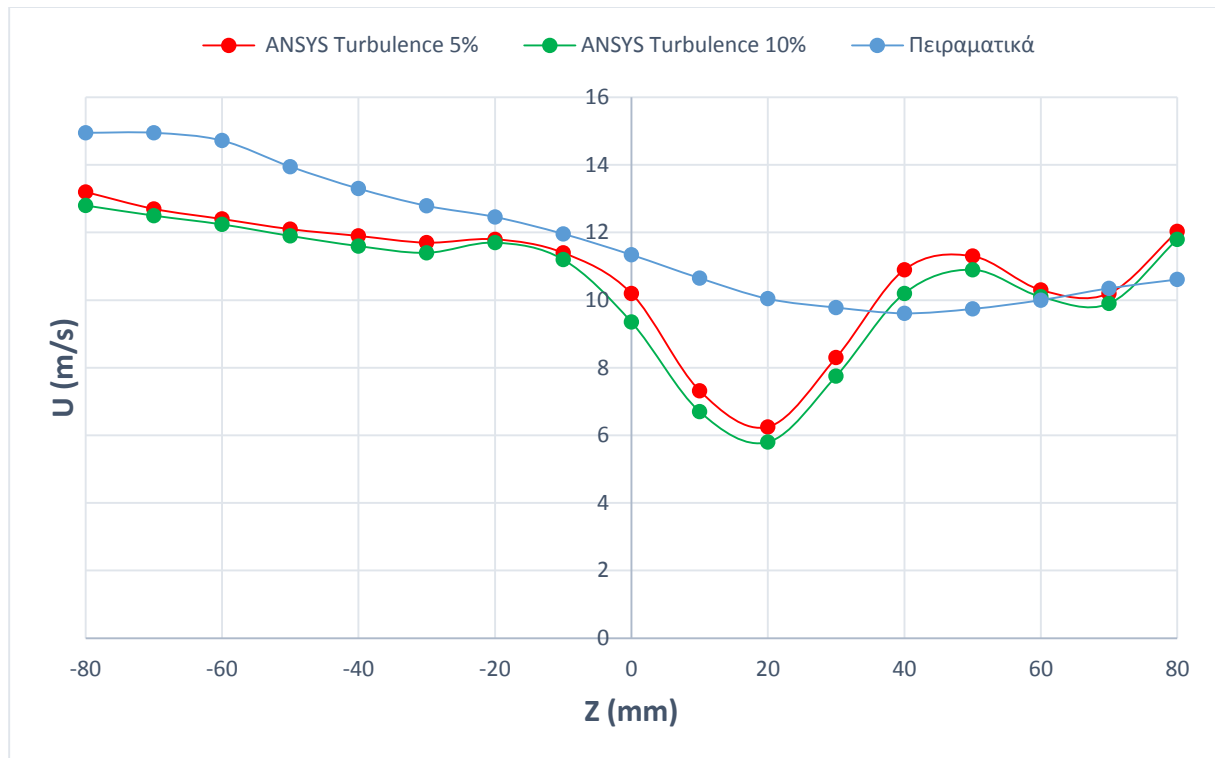


Διάγραμμα 7.1 Ταχύτητες απορεύματος για υπολογιστικές και πειραματικές μετρήσεις

Παρατηρείται ότι καταγράφηκαν χαμηλότερες τιμές για την ταχύτητα του αέρα στο απόρευμα του συστήματος πτερύγων στις μετρήσεις που έγιναν στο ANSYS CFX. Η διαφορά είναι σταθερή στα 2 m/s σχεδόν σε όλα τα σημεία μέτρησης, αλλά η καμπύλη ακολουθεί προσεγγιστικά την ίδια μεταβολή και στις δύο περιπτώσεις. Η σημαντική διαφορά ανάμεσα

στις δύο περιπτώσεις εντοπίζεται σε σημείο λίγο υψηλότερα από το κέντρο μετρήσεων του συστήματος πτερύγων, όπου από το ANSYS παρατηρείται μία σημαντική μείωση της ταχύτητας. Η κάθετη δύναμη που αναπτύσσεται στο σύστημα πτερύγων μετρήθηκε στην τιμή 14N από το ANSYS CFX και 8.2N από τις πειραματικές μετρήσεις.

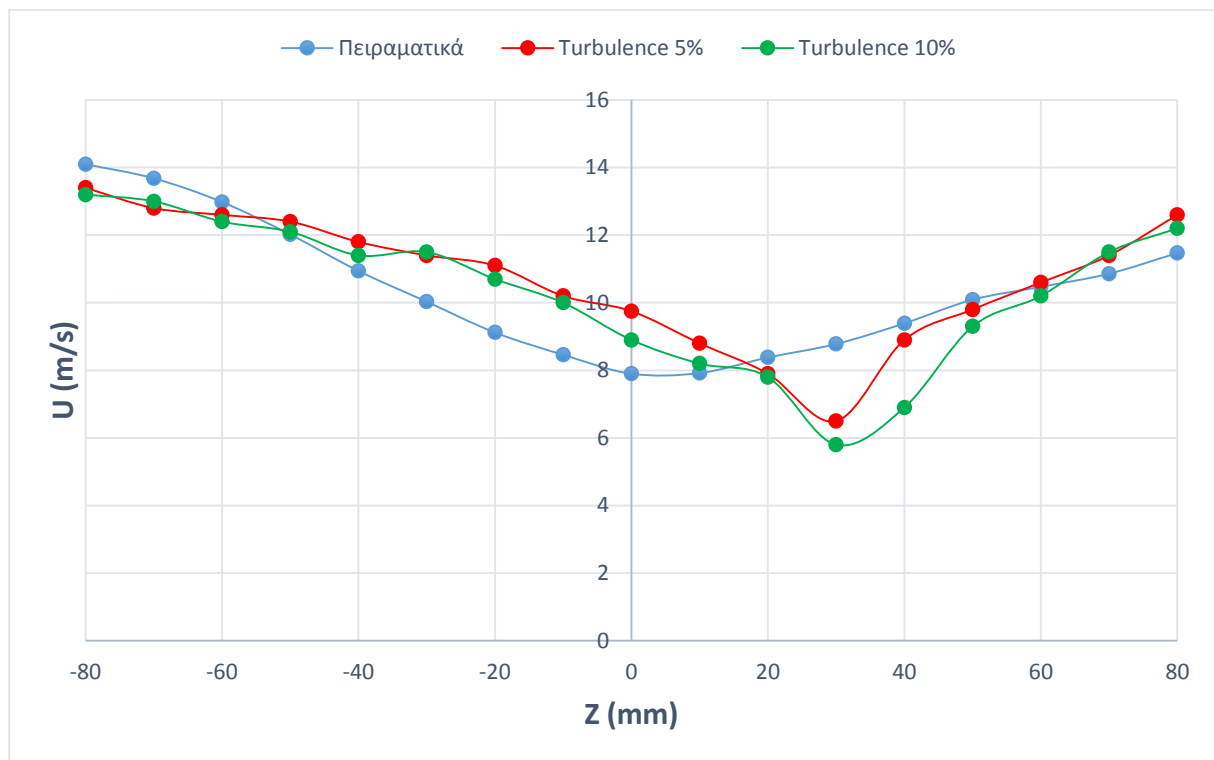
7.2.2 Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_1=18^\circ$



Διάγραμμα 7.2 Ταχύτητες απορεύματος για υπολογιστικές και πειραματικές μετρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν και πάλι διαφορές ανάμεσα στις τιμές της ταχύτητας μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων. Η μορφή της καμπύλης έχει παρόμοια συμπεριφορά στις δύο περιπτώσεις, ενώ παρατηρείται μία μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο λίγο υψηλότερα από το κέντρο μετρήσεων του συστήματος πτερύγων. Η κάθετη δύναμη που υπολογίστηκε από το ANSYS ήταν 14.4N σε σχέση με την πειραματική μέτρηση που ήταν 9.5N

7.2.3 Τυρβώδης ροή και γωνία $\alpha_2=37^\circ$



Διάγραμμα 7.3 Ταχύτητες απορεύματος για υπολογιστικές και πειραματικές μετρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούμε διαφορετικές τιμές μεταξύ των δύο μεθόδων. Σε αυτή την περίπτωση οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται για τις υπολογιστικές μετρήσεις. Η κάθετη δύναμη που υπολογίστηκε από το ANSYS ήταν 15.1N σε σχέση με τα πειράματα όπου μετρήθηκε στα 17N.

7.3 Σχολιασμός και σύγκριση των δύο μεθόδων

Παρατηρήθηκαν αρκετές διαφορές μεταξύ των μετρήσεων που έγιναν με πειράματα και με το υπολογιστικό πρόγραμμα. Αυτές οι διαφορές λογικά οφείλονται στην διαμόρφωση του πειράματος και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Η επιφάνεια του πειραματικού μοντέλου μπορεί να διαμορφώσει σημαντικά τα αποτελέσματα για την ταχύτητα. Από την άλλη μεριά οι συνθήκες που θεωρήθηκαν για την εκτέλεση της προσομοίωσης ήταν κοντά στις πραγματικές συνθήκες, αλλά κάποιες διαφορές του προσομοιώματος επηρέασαν τα αποτελέσματα.

Παράρτημα

Μέθοδος εγκατάστασης και εκτέλεσης πειραμάτων με το ANSYS CFX

Για τις προσομοιώσεις του συστήματος πτερύγων σε συνθήκες σαν αυτές του εργαστηρίου και τη λήψη μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS CFX 16.2. Αυτή η έκδοση του ANSYS αποτελεί αυθεντικό αντίγραφο του υπολογιστικού προγράμματος στα πλαίσια του ακαδημαϊκού του προγράμματος. Για τη λήψη του προγράμματος μπορούμε να επισκεφτούμε την ιστοσελίδα της εταιρείας και στο πλαίσιο Academic η οποία είναι:

<http://www.ansys.com/Industries/Academic/Student+Product/Product+Information>

Από εκεί πηγαίνουμε στην επιλογή Free Download για να κατεβάσουμε το πρόγραμμα και την ακαδημαϊκή άδεια του προγράμματος.

Αφού κατεβάσουμε την εφαρμογή αποσυμπιέζουμε το αρχείο που έχουμε και εκτελούμε το πρόγραμμα setup.exe. Επιλέγουμε το Install ANSYS, Inc. Products και ακολουθούμε την διαδικασία εγκατάστασης επιλέγοντας Accept όπου μας ζητηθεί.

Αφού έχει εγκατασταθεί το πρόγραμμα, αντιγράφουμε το αρχείο license file με όνομα – ansys_student_<yyyyymmdd>.lic και το περνάμε στο φάκελο Licensing που βρίσκεται στα αρχεία εφαρμογών του υπολογιστή και στο φάκελο ANSYS.

Με το που ολοκληρώσουμε αυτή την διαδικασία μπορούμε να τρέξουμε το πρόγραμμα ANSYS. Για να μην έχουμε θέματα συμβατότητας με το πρόγραμμα τα αρχεία θα πρέπει πάντα να αποθηκεύονται πάντα σε λατινικούς χαρακτήρες και να αποθηκεύονται στο φάκελο CFX που βρίσκεται στο C:\Χρήστες\UserName\.cfx\16.2.

Βιβλιογραφία

- [1] **Anderson J. D.** (1991) *Fundamentals of aerodynamics* (McGraw Hill)
- [2] **Glenn Research Center NASA External Force Balance**
(<https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/tunbalext.html>)
- [3] **Hucho W.H.** (1987) *Aerodynamics of road vehicles* (Butterworth – Heinemann)
- [4] **Katz J.** (1995) *Race Car Aerodynamics* (Robert Bentley)
- [5] **Katz J.** (2006) *Aerodynamics of Race Cars* (The Annual Review of Fluid Mechanics. pp. 51-53)
- [6] **Streeter V. and Wylie B. and Bedford K.** (1998) *Μηχανική Ρευστών* (Fountas Publishing)
- [7] **Seljak G.** (2008) *Race car aerodynamics*
- [8] **Ρώσσης Κ. και Αγερίδης Γ. και Μπεργελές Γ.** (1993) *Η Αεροδυναμική του Αυτοκινήτου*