

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΕ ΣΤΡΩΤΗ ΚΑΙ ΤΥΡΒΩΔΗ
ΡΟΗ**

υπό

ΜΠΟΥΛΑΜΑΤΣΗ ΑΧΙΛΛΕΑ

Διπλωματούχου Μηχανικού Αεροσκαφών Σ.Μ.Α., 2008

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος 2010

© 2010 ΑΧΙΛΛΕΥΣ ΜΠΟΥΛΑΜΑΤΣΗΣ

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών 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 Σταπουντζής Ερρίκος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ Σταματέλλος Τάσος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ Τσιακάρας Παναγιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή καθηγητή κ. Σταπουντζή Ερρίκο, για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σταματέλλο Τάσο και Αναπληρωτή καθηγητή κ. Τσιακάρα Παναγιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον κ. Βέργο Αθανάσιο μηχανοτεχνίτη του πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την κατασκευή της αυτοσχέδιας διάταξης ταλάντωσης που χρησιμοποιήθηκε στα πείραμα. Ευχαριστώ τον συνάδελφό μου Τζαμτζή Δημήτριο για τη βοήθειά του στην επιμέλεια του πίνακα περιεχομένων και του

Καραπατή Αθανάσιου για τη βοήθειά του στην ψηφιακή επεξεργασία των βίντεο. Ευχαριστώ επίσης τον αδερφό μου Μπουλαμάτση Σπυρίδων και όλους τους φίλους μου για την ηθική τους υποστήριξη. Ευχαριστώ την Κρομμύδα Ευσταθία για την κατανόησή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στους γονείς μου Μπουλαμάτση Μιχαήλ και Κομισοπούλου Παρασκευή για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την μεταπτυχιακή εργασία στους γονείς μου και τον αδερφό μου.

Μπουλαμάτσης Αχιλλεύς

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΕ ΣΤΡΩΤΗ ΚΑΙ ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ

ΜΠΟΥΛΑΜΑΤΣΗΣ ΑΧΙΛΛΕΥΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ Σταπουντζής Ερρίκος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ταλάντωση τρισδιάστατης πτέρυγας, με αεροτομή NACA 2816, σε παράλληλη ροή αριθμού Re 86000 και σε δύο επίπεδα εντάσεως τύρβης 0,68% και 5,82%. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στην αεροσήραγγα του πανεπιστημίου Θεσσαλίας διαστάσεων 300cm x 50cm x 70cm, και μία αυτοσχέδια διάταξη συστροφής ταλάντωνε την πτέρυγα ως προς τη γωνία προσβολής της. Επίσης, ένα πλέγμα παραγωγής τύρβης τοποθετημένο στην αρχή της αεροσήραγγας αύξανε την τύρβη της ελεύθερης ροής. Η εξίσωση κίνησης του μοντέλου ήταν $\varphi(t) = 12^\circ \sin \omega t$, η συχνότητα ταλάντωσης ήταν από 1 έως 9 Hz και η μειωμένη συχνότητα έλαβε τιμές από $k = 0,034$ έως $k = 0,308$. Μετρήσεις έγιναν ως προς τη μέση διαφορική πίεση σε επιλεγμένα σημεία x/c της επιφάνειας της πτέρυγας και ως προς τις μέσες ταχύτητες u_x σε συγκεκριμένα σημεία του απορεύματος. Για την ανάκτηση και επεξεργασία των δεδομένων έγινε συνδυασμένη χρήση του H/Y με ηλεκτρονικό μανόμετρο και θερμονήμα (hotwire). Τέλος έγινε και απεικόνιση της ροής με καπνό και νημάτια.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	10
1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο	10
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	12
1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής εργασίας	17
Κεφάλαιο 2 Πειραματική διάταξη	18
2.1 Αεροσήραγγα και παραγωγή τύρβης	18
2.1.1 Αεροσήραγγα	18
2.1.2 Παραγωγή τύρβης	20
2.2 Μοντέλο-Αεροτομή-Πτέρυγα	22
2.2.1 Περιγραφή της πτέρυγας	22
2.2.2 Τρόπος στήριξης και ταλάντωσης του μοντέλου	24
2.3 Ηλεκτρονικό μανόμετρο-βαθμονόμηση	28
2.3.1 Ηλεκτρονικό μανόμετρο	28
2.3.2 Βαθμονόμηση μανομέτρου	30
2.4 Θερμονήμα (Hot wire)-Βαθμονόμηση	31
2.4.1 Θερμονήμα	31
2.4.2 Βαθμονόμηση	32
2.5 Επεξεργασία και ψηφιοποίηση των δεδομένων των μετρήσεων	34
2.6 Διάταξη απεικόνισης ροής Laser-καπνογόνο	37
2.6.1 Σύστημα λέιζερ (laser)	37
2.6.2 Καπνογόνο (smoke generator)	39
2.6.3 Τρόπος στήριξης της διάταξης	40
2.7 Πειραματική μέθοδος	41
2.7.1 Μετρήσεις πιέσεων	42
2.7.2 Μετρήσεις ταχυτήτων-απόρευμα	44
2.7.3 Απεικόνιση ροής (Flow visualization)	45
Κεφάλαιο 3 Μετρήσεις πιέσεων-σχολιασμός	48
3.1 Μετρήσεις πιέσεων σε στρωτή ροή	48
3.1.1 Μετρήσεις πιέσεων σε στρωτή ροή με το μοντέλο ακίνητο	48
3.1.1.α Σύγκριση των μετρήσεων με το πρόγραμμα JAVA FOIL	53
3.1.2 Μετρήσεις πιέσεων σε στρωτή ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση	60

3.2 Μετρήσεις πιέσεων σε τυρβώδη ροή	63
3.2.1 Μετρήσεις πιέσεων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο ακίνητο	63
3.2.2 Μετρήσεις πιέσεων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση	67
3.3 Σύγκριση των μετρήσεων πίεσης για τη στρωτή και τυρβώδη ροή	70
3.3.1 Σύγκριση για την περίπτωση του ακίνητου μοντέλου	70
3.3.2 Σύγκριση για την περίπτωση του ταλαντευόμενου μοντέλου	74
Κεφάλαιο 4 Μετρήσεις ταχυτήτων του απορεύματος-σχολιασμός.....	79
4.1 Μετρήσεις ταχυτήτων-ένταση τύρβης σε στρωτή ροή	79
4.1.1.α Κατανομή ταχυτήτων σε στρωτή ροή με το μοντέλο ακίνητο	79
4.1.1.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο ακίνητο σε στρωτή ροή	87
4.1.2.α Κατανομή ταχυτήτων σε στρωτή ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση	90
4.1.2.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο σε ταλάντωση και ροή στρωτή	92
4.1.3. Σύγκριση των απορευμάτων ακίνητης και ταλαντευόμενης πτέρυγας σε στρωτή ροή	94
4.2 Μετρήσεις ταχυτήτων-ένταση τύρβης σε τυρβώδη ροή	96
4.2.1.α Κατανομή ταχυτήτων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο ακίνητο	96
4.2.1.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο ακίνητο σε τυρβώδη ροή	101
4.2.2.α Κατανομή ταχυτήτων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση	103
4.2.2.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο σε ταλάντωση και ροή τυρβώδη	106
4.2.3. Σύγκριση των απορευμάτων ακίνητης και ταλαντευόμενης πτέρυγας σε τυρβώδη ροή	107
4.3 Σύγκριση των απορευμάτων της στρωτής ροής με αυτά της τυρβώδους	109
4.3.1 Σύγκριση απορευμάτων στρωτής και τυρβώδους ροής για ακίνητο μοντέλο	109
4.3.2 Σύγκριση απορευμάτων στρωτής και τυρβώδους ροής για ταλαντευόμενο μοντέλο	117
Κεφάλαιο 5 Απεικόνιση ροής-Flow visualization.....	121
5.1 Απεικόνιση της ροής για ακίνητη πτέρυγα.....	121
5.1.1 Απεικόνιση της ροής για ακίνητη πτέρυγα - Στρωτή ροή	121
5.1.2 Απεικόνιση της ροής για ακίνητη πτέρυγα - Τυρβώδους ροή	124
5.2. Απεικόνιση της ροής για ταλαντευόμενη πτέρυγα.....	127
5.2.1. Απεικόνιση της ροής για ταλαντευόμενη πτέρυγα – στρωτή ροή	127
5.2.2 Απεικόνιση της ροής για ταλαντευόμενη πτέρυγα – Τυρβώδους ροή	133
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	137
6.1 Συμπεράσματα	137

6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	140
Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφία - Αναφορές.....	141

Πίνακας συμβόλων

c : μήκος χορδής

C_L : συντελεστής άντωσης

C_D : συντελεστής οπισθέλκουσας

C_p : συντελεστής πίεσης

Re : Αριθμός Reynolds

t_{max} : μέγιστο πάχος αεροτομής

φ(t) ή α(t) : γωνία προσβολής της πτέρυγας

R_{op} : αντίσταση λειτουργίας

R_{cold} : αντίσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

E : τάση εξόδου

V : ταχύτητα ροής

C_{DP} : συντελεστής διαφορικής πίεσης

U_∞ : ταχύτητα ελεύθερης ροής

ρ : πυκνότητα

k : μειωμένη ή ανηγμένη συχνότητα (reduced frequency)

u_x : ταχύτητα στη διεύθυνση x

u_y : ταχύτητα στη διεύθυνση y

f : συχνότητα ταλάντωσης

RMS : τυπική απόκλιση (root mean square)

thesis of T.E. : θέση του χείλους εκφυγής

thesis of bottom : θέση του κατώτερου σημείου

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των αεροτομών σε χαμηλούς αριθμούς Re αποκτούν συνεχώς ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, όπως επίσης και τα σύγχρονα μικρά αεροοχήματα. Συνήθως τέτοιου είδους οχήματα βασίζουν την λειτουργία τους σε πτερυγισμό των φτερών τους όπως ακριβώς τα έντομα αλλά και τα ψάρια. Η κίνηση αυτή των πτερύγων χαρακτηρίζεται από έντονες αστάθειες, εκμεταλλεύεται όμως ορισμένα φαινόμενα όπως η δυναμική απώλεια στήριξης για να δημιουργήσουν αυξημένη άντωση. Ο τομέας της επιστήμης, μεταξύ των άλλων, που ασχολείται με αυτό το θέμα είναι η Εμβιομηχανική των ρευστών (Bio Fluid dynamics). Ασταθή όμως αεροδυναμικά φαινόμενα απαντώνται και αλλού στη φύση. Ένα από αυτά είναι το λεγόμενο flutter εξαιτίας του οποίου έχουν πέσει γέφυρες (πχ Tacoma Narrows Bridge), έχουν σπάσει καλώδια και έχουν καταστραφεί κατασκευές. Περισσότερο όμως, το flutter απασχολεί τους αεροναυπηγούς που μελετούν την απόκριση των πτερύγων ενός αεροσκάφους σε ασταθείς ροές. Επίσης, σημαντικό για την επιστήμη της αεροναυπηγικής είναι και το buffeting που επηρεάζει το ουραίο ενός αεροσκάφους όταν από μία ξαφνική αιτία – μία αποκόλληση της ροής ή ένα κρουστικό κύμα – δημιουργηθεί μία υψηλής συχνότητα διαταραχή που ταξιδεύει προς τα πίσω προκαλώντας πρόβλημα στην ευστάθειά του.

Οι ασταθείς όμως ροές ή αλλιώς οι ασταθείς κινήσεις των πτερύγων επάγουν ένα ασταθές απόρευμα. Η σημασία του απορεύματος είναι μεγάλη στην πλειονότητα των σύγχρονων ιπτάμενων ή υποβρύχιων μηχανών και κρίνει σε μεγάλο βαθμό την απόδοσή τους ιδιαίτερα όταν σε αυτές υπάρχουν πολλά και κοντά τοποθετημένα πτερύγια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο θόρυβος που παράγει η έλικα ενός ελικοπτέρου εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των ελίκων · εξ' ου και ο θόρυβος αλληλεπίδρασης ή Blade Vortex

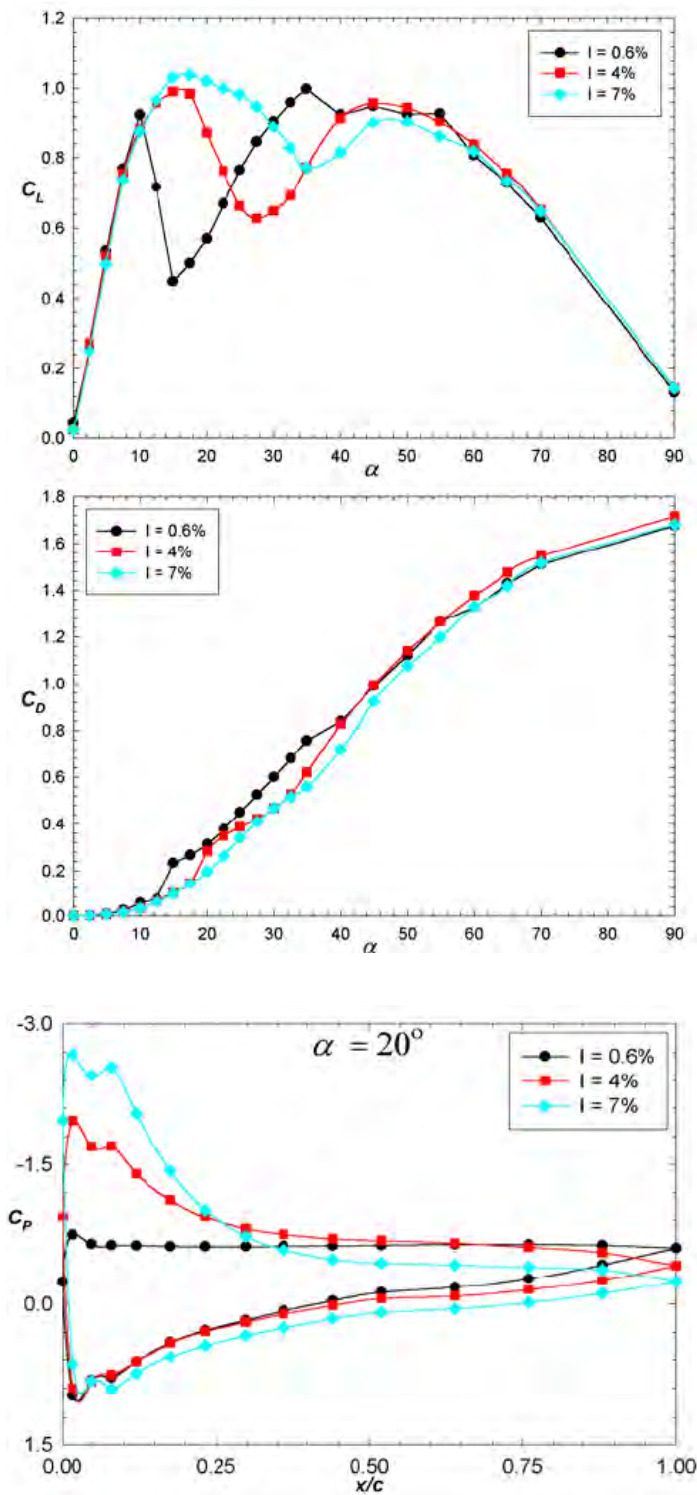
Interaction Noise. Οι έλικες εκτός από την περιστροφή γύρω από τον άξονα, ταλαντώνονται λόγω της φυσικής ευκαμψίας τους με αποτέλεσμα να παράγουν δίνες (ανομοιογενή πεδία πιέσεων και ταχυτήτων) οι οποίες όταν συναντήσουν την επόμενο έλικά αυξάνουν τον θόρυβο. Ένα άλλο παράδειγμα είναι οι αεροπορικοί κινητήρες (turbomachinery), μόνο που σε αυτούς εκτός από την αλληλεπίδραση των πτερυγίων ενδιαφέρει και η αλληλεπίδραση των απορευμάτων. Καθώς, τα κινητά πτερύγια του ρότορα περνούν από αυτά του στάτορα τα απορεύματα των πρώτων δημιουργούν μία περιοδική διαταραχή η οποία μεταδίδεται προς τα πίσω επηρεάζοντας έτσι, πολλές παραμέτρους της απόδοσης του αεροκινητήρα.

Μέχρι στιγμής, έχει μελετηθεί λίγο το θέμα της μορφής του απορεύματος ταλαντευόμενου πτερυγίου σε τυρβώδη ροή. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία, θα ερευνηθεί η τροποποίηση του ασταθούς απορεύματος όταν η επερχόμενη ροή έχει υψηλό ποσοστό τύρβης. Θα μετρηθούν τα προφίλ ταχυτήτων πίσω από το πτερύγιο σε απόσταση 0,75c σε στρωτή και τυρβώδη ροή όταν η συχνότητα ταλάντωσης μεταβάλλεται από 0Hz έως 9Hz. Συμπληρωματικά, θα μετρηθούν οι μέσες διαφορές πιέσεων, στην επάνω και κάτω επιφάνεια σε 4 σημεία της χορδής της αεροτομής, κοντά στο χείλος προσβολής και εκφυγής, ώστε να ελεγχθεί η επίδραση της ταλάντωσης και της τύρβης στην κατανομή πίεσης της πτέρυγας αλλά και η ισχύ του νόμου Kutta – Joukowski. Επίσης, θα γίνει προσπάθεια απεικόνισης του ροϊκού πεδίου γύρω από το ταλαντευόμενο πτερύγιο και στο απόρρευμά του με δύο μεθόδους · με καπνό και με νημάτια.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι μέχρι τώρα σχετικές μελέτες έχουν να κάνουν με την επίδραση της τύρβης στη ροή γύρω από μία ακίνητη πτέρυγα, με το ασταθές απόρρευμα που προκύπτει πίσω από μία ταλαντευόμενη πτέρυγα αλλά και με την αλληλεπίδραση των πτερυγίων σε διάφορες σύγχρονες κατασκευές όπως είναι τα ελικόπτερα και οι αεροκινητήρες. Οι μελέτες αυτές διεξήχθησαν τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά και στη συνέχεια θα γίνει σύνοψη των αποτελεσμάτων τους.

Όσον αφορά τις μελέτες πάνω στην επίδραση της τύρβης χαρακτηριστική είναι αυτή των K.E. Swalwell και J. Sheridan [1] & [2]. Τα πειράματά τους έγιναν με τις αεροτομές NACA 0012 και NACA 4421 και αριθμούς Re περίπου στα $3,5 \cdot 10^5$ με χαμηλή και υψηλή ένταση τύρβης προκειμένου να εξετασθεί η επίδρασή της στο στατικό 'stall'. Συγκεκριμένα, το εύρος της γωνίας προσβολής των αεροτομών ήταν μεγάλο καθώς ξεκινούσε από τις 0° και έφτανε ως τις 90° . Μάλιστα, στη δεύτερη μελέτη τους ενέταξαν και διαφορετικές κλίμακες μήκους τύρβης κάνοντας χρήση τριών διαφορετικών πλεγμάτων (grid) στην αεροσήραγγα. Από τις μετρήσεις τους, προέκυψαν τα διαγράμματα C_L και C_D σε συνάρτηση με τη γωνία προσβολής της αεροτομής καθώς και τα διαγράμματα C_p σε συνάρτηση με την επί της εκατό απόσταση x από το χείλος προσβολής της αεροτομής, για διάφορες γωνίες προσβολής, τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη ροή. Η αντιπαραβολή των μετρήσεων στα αντίστοιχα διαγράμματα έδειξε ότι η τυρβώδης ροή έχει θετική επίδραση στη στατική απώλεια στήριξης (stall) καθώς καθυστερεί την αποκόλληση της ροής από την εκάστοτε αεροτομή έως και 5° ! Ο συντελεστής άντωσης διατηρείται υψηλά και για μεγαλύτερες γωνίες προσβολής καθώς αυξάνεται η ένταση της τύρβης και μάλιστα η καμπύλη του είναι πιο ομαλή. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας δεν παρουσιάζει αξιόλογη μεταβολή καθώς αυξάνεται η ένταση της τύρβης παρά μόνο μειώνεται λίγο. Τέλος, ο συντελεστής πίεσης κυρίως σε μεγάλες γωνίες προσβολής είναι ξεκάθαρα υψηλότερος από αυτόν της στρωτής ροής.



Χαρακτηριστικά διαγράμματα C_L , C_D , C_p αεροτομής NACA 0012 που δείχνουν τη θετική επίδραση της τύρβης στο stall, στο C_D και στην κατανομή πίεσης σε μεγάλες γωνίες προσβολής (20°) Πηγή : [1]

Αναφορικά με τη μελέτη ασταθών ροών αλλά και του απορεύματος πίσω από ένα ταλαντευόμενο πτερύγιο οι έρευνες είναι σαφώς περισσότερες. Η ανάγκη μελέτης των παραπάνω προέκυψε, αρχικά, ως αποτέλεσμα του ενδιαφέροντος που αναπτύχθηκε γύρω από το φαινόμενο του περυγισμού (flutter) και τα προβλήματα που αυτό προκαλεί στα αεροπλάνα. Το παραπάνω φαινόμενο μελετήθηκε εκτενώς από τους Theodorsen [3], Von Karman και Sears [4] ενώ αργότερα οι Lighthill [5] και Wu [6] ασχολήθηκαν με το μοντέλο πρόωσης των μικρών υδρόβιων οργανισμών στην επιφάνεια της λίμνης καθώς επίσης των πουλιών και των εντόμων που οφείλεται στη μορφή του απορεύματος που προκαλούν με τα πόδια ή τα φτερά τους αντίστοιχα. Οι McCroskey [7] και Carr [8] επικεντρώθηκαν στην ασταθή αεροδυναμική φόρτιση των πτερύγων (buffeting) αλλά και στο φαινόμενο της δυναμικής απώλειας στήριξης (dynamic stall) χρησιμοποιώντας τόσο αριθμητικές μεθόδους όσο και πειραματικές μεθόδους ενώ ο Tolouei et al [9] εξέτασε πειραματικά την ασταθή κατανομή των πιέσεων στην ταλαντευόμενη αεροτομή EPPLER 361. Συνοπτικά, οι παραπάνω συμπεράναν ότι υπάρχει στενή σχέση του αριθμού Re και της μειωμένης συχνότητας (reduced frequency) στη μορφή του απορεύματος αλλά και στην κατανομή των πιέσεων πάνω στην πτέρυγα. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές πίεσης, για μικρό εύρος ταλάντωσης της γωνίας προσβολής, παρουσίασαν μόνο μία μικρή άνοδο σε σχέση με τις στατικές μετρήσεις ενώ για μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης τα αντίστοιχα αποτελέσματα ήταν πολύ διαφορετικά. Θεώρησαν ότι στη δίνη – φυσαλίδα (bubble), που παράγεται κοντά στο χείλος προσβολής και κινείται προς τα πίσω, οφείλεται η μεγάλη αύξηση του συντελεστή δυναμικής πίεσης για την περίπτωση του μεγάλου εύρους ταλάντωσης. Τέλος, οι Mani et al [10] μέτρησαν την κατανομή των στατικών πιέσεων και στις δύο πλευρές διαφόρων πτερύγων όταν αυτές εκτελούσαν ταλάντωση και συμπεράναν ότι η μειωμένη συχνότητα διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην κατανομή και μάλιστα κοντά στο χείλος προσβολής της εκάστοτε πτέρυγας.

Ενώ οι παραπάνω επιστήμονες ασχολήθηκαν κυρίως με τα ασταθή αεροδυναμικά φορτία που προκύπτουν κατά την ταλάντωση μιας πτέρυγας, υπήρξαν άλλοι που έδωσαν περισσότερη προσοχή στο απόρευμα που προκύπτει. Συγκεκριμένα, ο Santanarayana [11] παρουσίασε τα προφίλ των μέσων ταχυτήτων καθώς και τα προφίλ των ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου, των απορευμάτων από αεροτομές που εκτίθεντο σε ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενες ριπές ανέμου με χαμηλές συχνότητες και τα σχολίασε. Από την άλλη μεριά, ο Koochesfahani [12] μελέτησε πειραματικά τις μορφές του απορεύματος της ταλαντευόμενης αεροτομής NACA 0012 σε μικρό εύρος και έδειξε ότι η μορφή τους αλλά και οι μέσες ταχύτητες εξαρτώνται άμεσα από τη μορφή της ταλάντωσης, συγκεκριμένα εμφανίζονται δύο κορυφές (peaks) και μάλιστα υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της συχνότητας ταλάντωσης για την οποία το προφίλ των ταχυτήτων αλλάζει δραματικά σε ροή τζετ (jet flow) και η αεροτομή παράγει πρόωση. Οι Park, Kim και Lee [13] με την ίδια αεροτομή μελέτησαν την επίδραση της γωνίας γύρω από την οποία γίνεται η ταλάντωση και παρατήρησαν ότι από μία τιμή και μετά το απόρευμα παχαίνει δραματικά λόγω της μεγάλης αποκόλλησης της ροής από την αεροτομή. Εξάλλου, και οι Mani et al [14] έκαναν έρευνα στο απόρευμα ταλαντευόμενης αεροτομής από όπου βγαίνει το συμπέρασμα ότι βασικοί παράγοντες που το καθορίζουν είναι η γωνία προσβολής και η συχνότητα. Τέλος, χαρακτηριστική είναι η αναφορά των Sadeghi H., Mani M. και Ardakani M. A., [15] που αφορά την ταλάντωση της αεροτομής Eppler 361 με διαφορετικές μέσες γωνίες ταλάντωσης και πλάτος ταλάντωσης που αρχικά κινείται πριν το στατικό stall και κατόπιν το ξεπερνά. Σε αυτή την αναφορά παρουσιάζουν διαγράμματα με τα προφίλ ταχυτήτων για διαφορετικές περιπτώσεις και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι όταν δε ξεπερνιέται το στατικό stall είναι αδύναμη η επιρροή των παραπάνω δύο παραγόντων ενώ όταν ξεπερνιέται, μεγάλες δίνες δημιουργούνται και το πάχος του απορεύματος αυξάνεται σημαντικά. Μάλιστα, η μέση

γωνία ταλάντωσης έχει μεγαλύτερη επίδραση από ότι το πλάτος ταλάντωσης στην πάχυνση του απορεύματος.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα οποία είναι κυρίως σε μορφή διαγραμμάτων, από όλες τις παραπάνω έρευνες αλλά και των μεταγενέστερων και σχετικών με αυτές παρέχουν μια σαφή εικόνα για τα ασταθή αεροδυναμικά φαινόμενα. Η μεγάλη εξέλιξη όμως της τεχνολογίας, τα τελευταία χρόνια, κάνει επιτακτική την ανάγκη αποτύπωσης αυτής της ασταθούς ροής προκειμένου ο εκάστοτε μελετητής - ερευνητής να κατανοήσει καλύτερα και ευκολότερα τα φαινόμενα αυτά. Έτσι, στις περισσότερες αναφορές πλέον, συμπεριλαμβάνεται και η φωτογράφιση της ροής και κυρίως του απορεύματος από ψηφιακές κάμερες υψηλής τεχνολογίας με τη βοήθεια της συνδυασμένης χρήσης καπνού και επιπέδου φωτός laser (laser light sheet) ή της μεθόδου με τα σωματίδια (Particle Image Velocimetry). Χαρακτηριστική είναι η αναφορά των Idil Fenercioglu και Oskan Cetiner [16] που αποτυπώνουν το ροϊκό πεδίο γύρω από την αεροτομή SD7003 η οποία στροφικές και εγκάρσιες ημιτονοειδής ταλαντώσεις (κίνηση ανάλογη με αυτή των φτερών των εντόμων αλλά και των πειραματικών μικρο-αεροχημάτων) σε δύο διαφορετικούς αριθμούς Re. Τα συμπεράσματά τους είναι ότι από το χείλος εκφυγής σχηματίζονται δίνες όμοιες με αυτές που παρατήρησε ο Von Karman και μάλιστα με μια περίπου σταθερή συχνότητα χωρίς όμως να υπάρχουν ενδείξεις για πρόωση ενώ, κατά την κίνηση της αεροτομής προς τα κάτω (downstroke) ολόκληρη η ράχη της καλύπτεται από μικρής κλίμακας δίνες. Εξάλλου, υπάρχει και η μελέτη των Berton E., Favier D., Maresca C και Benyahia A [17] όπου με χρήση laser sheet φωτογραφίζουν και συγκρίνουν το στιγμιότυπο της ροής, στις 10 και 14 μοίρες γωνίας προσβολής, της ακίνητης με αυτό της ταλαντευόμενης αεροτομής NACA 0012. Εξετάζουν δηλαδή την περίπτωση πριν και μετά το στατικό stall.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης που ασκούν η τύρβη και η στροφική ταλάντωση στη μέση φόρτιση πτέρυγας και στην δομή του απορεύματός της

1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής εργασίας

Το υπόλοιπο της μεταπτυχιακής εργασίας χωρίζεται σε 4 βασικές ενότητες που καταλαμβάνουν τα κεφάλαια 2 έως 5 ,αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται όλος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος, οι βαθμονομήσεις των οργάνων μέτρησης και στο τέλος η μεθοδολογία.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται διαγραμματικά, τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις πιέσεων πρώτα σε στρωτή και μετά σε τυρβώδη ροή και γίνονται οι απαραίτητες συγκρίσεις ώστε να φανεί η επίδραση της ταλάντωσης σε καθεμία από τις δύο ροές. Κατόπιν, γίνεται σύγκριση των κατάλληλων διαγραμμάτων ώστε να φανεί η επίδραση της τύρβης σε καθεμία από τις δύο καταστάσεις κίνησης του πτερυγίου (ακίνητη – ταλαντευόμενη).

Στο κεφάλαιο 4 προβάλλονται τα διαγράμματα ταχυτήτων, έντασης τύρβης και μισού πάχους του απορεύματος στις ίδιες περιπτώσεις, με σειρά και φιλοσοφία ίδια με αυτή του κεφαλαίου 3.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται απεικόνιση της ροής με δύο μεθόδους. Με τα νημάτια ερευνάται η περιοχή της στατικής απώλειας στήριξης ενώ με τον καπνό, η μορφή του ασταθούς απορεύματος του ταλαντευόμενου πτερυγίου σε στρωτή και τυρβώδη ροή.

Τα τελικά συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 6.

Το κεφάλαιο 7 περιέχει τις αναφορές και τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία.

Κεφάλαιο 2 Πειραματική διάταξη

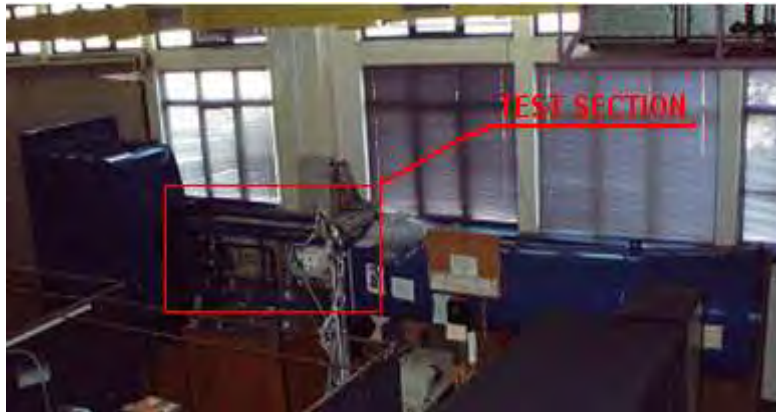
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή όλων των διατάξεων, αλλά και των χαρακτηριστικών τους, που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος. Η δομή του δε, οργανώνεται ως εξής. Στο υποκεφάλαιο 2.1 περιγράφεται το βασικότερο σύστημα όλων που είναι η αεροσήραγγα και επιπλέον ο τρόπος παραγωγής τύρβης σε αυτή. Στο υποκεφάλαιο 2.2 περιγράφεται το μοντέλο της αεροτομής που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ο τρόπος στήριξης και κίνησης αυτής, ενώ στο 2.3 το ηλεκτρονικό μικρο-μανόμετρο από το οποίο μετρήθηκαν οι στατικές πιέσεις. Συνέχεια έχουν το μέρος 2.4, με την παρουσίαση του θερμονήματος (hot wire) με το οποίο εκτιμήθηκαν οι ταχύτητες στο απόρευμα της αεροτομής, το μέρος 2.5 όπου περιγράφεται ο τρόπος ανάκτησης, ψηφιοποίησης και επεξεργασίας όλων των δεδομένων των μετρήσεων και το μέρος 2.6 όπου περιγράφεται η διάταξη με την οποία έγινε η απεικόνιση της ροής. Το κεφάλαιο 2 τελειώνει με το μέρος 2.7 όπου γίνεται περιγραφή της πειραματικής μεθόδου και διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

2.1 Αεροσήραγγα και παραγωγή τύρβης

2.1.1 Αεροσήραγγα

Η αεροσήραγγα του πειράματος βρίσκεται στο εργαστήριο ρευστομηχανικής του πανεπιστημίου Θεσσαλίας και είναι υποηχητική. Πιο συγκεκριμένα, είναι ανοικτού τύπου και η μέγιστη ταχύτητα ροής που μπορεί να επιτύχει είναι τα 20m/s. Η αναρρόφηση του αέρα γίνεται από μία φτερωτή τεσσάρων πτερυγίων της οποίας η συχνότητα περιστροφής καθορίζεται από έναν inverter μάρκας Toshiba VF-SXN που φτάνει ως τα 60Hz. Για την ομοιογενοποίηση της ροής και για την αποφυγή αναρρόφησης ξένων σωμάτων τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν ζημιά είτε στο μοντέλο, είτε στη φτερωτή ένα κυψελοειδές πλαίσιο φιλτράρει τον εισερχόμενο αέρα. Ο χώρος όπου γίνονται χώρα οι μετρήσεις είναι

διαστάσεων 300cm x 50cm x 70cm και για να είναι ορατός καλύπτεται από Plexiglas υψηλής αντοχής. Στο επάνω μέρος της υπάρχει ένα σύστημα με γρανάζια που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη της αεροσήραγγας να μετακινήσει τον αισθητήρα της επιλογής του σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο εντός του τομέα μετρήσεων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα εξαρτήματα.



Φωτογραφία 1. Αεροσήραγγα



Φωτογραφία 2. Ο inverter της αεροσήραγγας



Φωτογραφία 3. Το κυψελοειδές φίλτρο



Φωτογραφία 4. Η φτερωτή



Φωτογραφία 5. Το σύστημα γραναζιών κίνησης του αισθητήρα

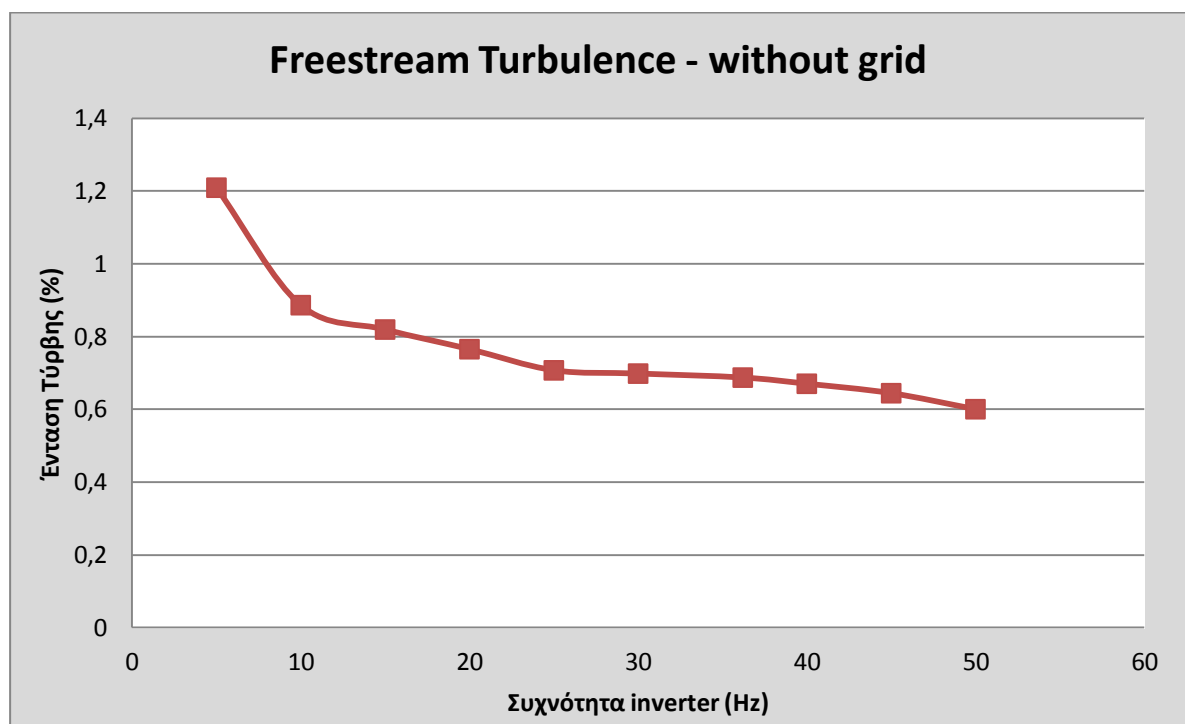
2.1.2 Παραγωγή τύρβης

Οι μετρήσεις του πειράματος έγιναν σε στρωτή αλλά και σε τυρβώδη ροή. Για την παραγωγή τύρβης έγινε χρήση ξύλινου πλέγματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 6, στο οποίο σχηματίζονται 48 τετράγωνα διαστάσεων 9×9 cm το καθένα. Το πλέγμα αυτό τοποθετήθηκε στην αρχή του τομέα μετρήσεων και στηρίχθηκε από 6 ξυλόβιδες. Λόγω, όμως του σχήματός του αλλά και της θέσης του μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγει ομοιόμορφη-ομοιογενή τύρβη στην αεροσήραγγα.



Φωτογραφία 6. Πλέγμα(grid)

Οι μετρήσεις με το ανεμόμετρο παρουσία του πλέγματος για την ταχύτητα ροής του πειράματος έδειξαν ότι η τιμή της έντασης της τύρβης είναι 5,8% η οποία εντάσσεται στη μεσαία κατηγορία τύρβης (5%-20%). Τύρβη όμως παράγεται και χωρίς το πλέγμα λόγω των διάφορων μικρο-ελαττωμάτων της περιοχής μετρήσεων της αεροσήραγγας που αναπόφευκτα υπάρχουν. Έτσι, με το παρακάτω διάγραμμα έγινε μια προσπάθεια να εκτιμηθεί η ένταση της τύρβης που παράγει η αεροσήραγγα και συνεπώς η απόδοσή της, χωρίς το πλέγμα, σε όλο το φάσμα λειτουργίας της.

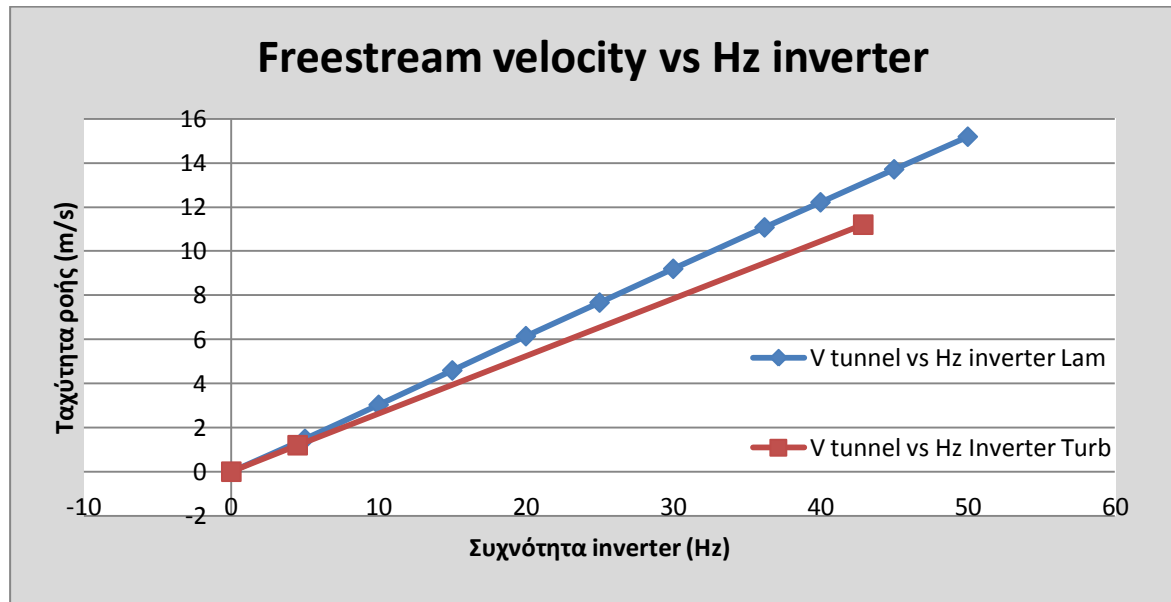


Διάγραμμα 1 Ένταση τύρβης συναρτήσει συχνότητας inverter-χωρίς πλέγμα

Είναι φανερό ότι η φτερωτή της αεροσήραγγας λειτουργεί καλύτερα στις υψηλές συχνότητες περιστροφής. Συγκεκριμένα, για την ταχύτητα ροής που διεξάγεται το πείραμα η έντασή της είναι 0,687%, τιμή η οποία εντάσσεται στην κατηγορία χαμηλής τύρβης.

Επιπρόσθετα, έγινε και το διάγραμμα της ταχύτητας ροής που επιτυγχάνεται στην αεροσήραγγα από τη φτερωτή με, αλλά και χωρίς το πλέγμα προκειμένου να φανεί η επίδραση του τελευταίου σε αυτή. Η διάταξη παραγωγής τύρβης προβάλλει αντίσταση στη

ροή και επομένως είναι φυσικό στις ίδιες στροφές της φτερωτής η ταχύτητα ροής να είναι χαμηλότερη με το πλέγμα εγκατεστημένο. Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας, U συναρτήσει της συχνότητας του inverter με και χωρίς πλέγμα τύρβης. Οι ταχύτητες μετρήθηκαν με θερμονήμα και με Pitot Static tube.



Διάγραμμα 2. Ταχύτητα ροής συναρτήσει συχνότητα Inverter (στρωτή και τυρβώδη ροή)

Τέλος, έγινε υπολογισμός του πάχους του οριακού στρώματος της ροής στο σημείο που είναι τοποθετημένη η πτέρυγα (στα 1,8 m από αρχή) και για τα δύο είδη ροής. Σύμφωνα με το σχετικό τύπο ($\delta = 5x/Re_x^{0.5}$) [28] για τη στρωτή ροή το πάχος υπολογίσθηκε στα 3cm, ενώ για την τυρβώδη ροή από τον αντίστοιχο τύπο ($\delta = 0,382 x/Re_x^{0.2}$) [28], στα 7cm.

2.2 Μοντέλο-Αεροτομή-Πτέρυγα

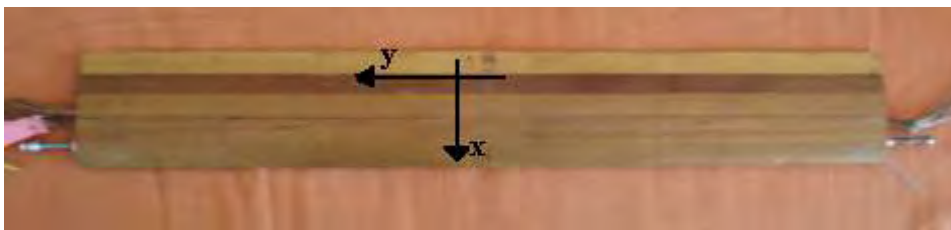
2.2.1 Περιγραφή της πτέρυγας

Η πτέρυγα του πειράματος είναι μη συμμετρική και ελαφρώς τροποποιημένη από την αεροτομή NACA 2816 με εκπέτασμα 68,5cm, μήκος χορδής $c = 12\text{cm}$ και μέγιστο πάχος $t_{\max} = 2\text{cm}$. Είναι κατασκευασμένη από ξύλο και η λείανση είναι υψηλής ποιότητας. Επιπρόσθετα, διαθέτει 31 σε σειρά οπές στην επιφάνειά της, για μέτρηση στατικής πίεσης,

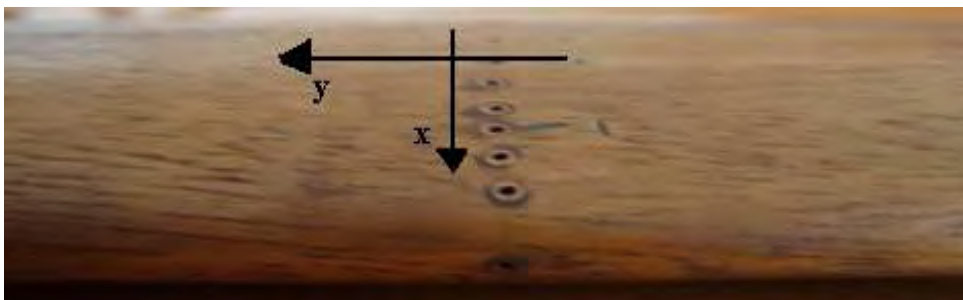
που καταλήγουν σε πλαστικά σωληνάκια τα οποία εξέρχονται από τις δυο πλάγιες μεριές της. Οι οπές ξεκινούν από το χείλος προσβολής και καταλήγουν πάλι σε αυτό κάνοντας κύκλο. Διαθέτει ακόμα, δύο εσωτερικά σπειρώματα σε απόσταση 2,3cm από το χείλος προσβολής τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία στήριξης. Στη συνέχεια, παρατίθενται φωτογραφίες του μοντέλου του πειράματος αλλά και το γράφημα της NACA 2816 από το πρόγραμμα Design Foil.



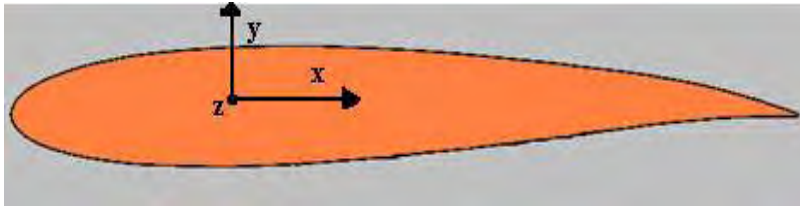
Φωτογραφία 7. Η πτέρυγα



Φωτογραφία 8. Η κάτοψη της πτέρυγας και το σύστημα αξόνων της



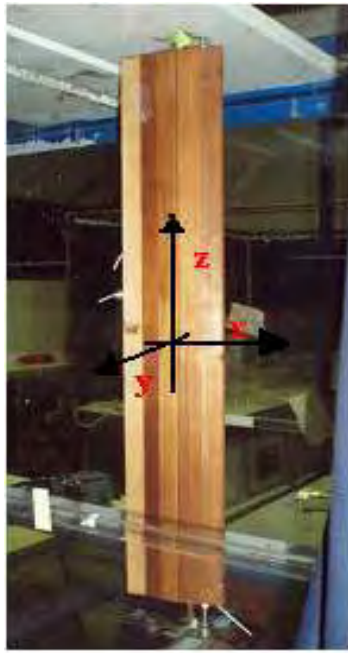
Φωτογραφία 9. Οι οπές μέτρησης επιφανειακής πίεσης και το σύστημα αξόνων της



Εικόνα 1. Αεροτομή NACA 2816 από το πρόγραμμα Design Foil

2.2.2 Τρόπος στήριξης και ταλάντωσης του μοντέλου

Το μοντέλο, λόγω των διαστάσεών του τοποθετήθηκε κατακόρυφα μέσα στην αεροσήραγγα. Για τη στήριξή του στο επάνω μέρος, τοποθετήθηκε βίδα μαζί με κόντρα παξιμάδι σφικμένο στην πτέρυγα, ενώ στο κάτω μέρος, έγινε χρήση εξωτερικού σπειρώματος πάνω στο οποίο έσφιξαν δύο κόντρα παξιμάδια, ένα στην πτέρυγα και ένα στον άξονα του ταλαντωτή. Μάλιστα, ήταν απαραίτητη και η χρήση κατάλληλης κόλλας στα κόντρα παξιμάδια που θα εξασφάλιζε την μη χαλάρωση του συστήματος στις απότομες επιταχύνσεις κατά την ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Τα σημεία στήριξης ήταν στο μέσον του πλάτους του τομέα μετρήσεων ενώ ανοίχθηκαν κατάλληλες τρύπες ούτως ώστε να διέρχονται τα σωληνάκια της αεροτομής εκτός της αεροσήραγγας. Το διάκενο μεταξύ των σημείων στήριξης και επιφάνειας αεροσήραγγας ήταν 3cm επάνω και 4,5cm κάτω. Με βάση τον υπολογισμό του πάχους του οριακού στρώματος στο μέρος 2.1.2, το οριακό στρώμα της αεροσήραγγας επηρεάζει τη ροή της πτέρυγας μόνο στην περίπτωση της τυρβώδους ροής και συγκεκριμένα υπεισέρχεται σε αυτή 4cm από την πάνω πλευρά και 2,5 από την κάτω.



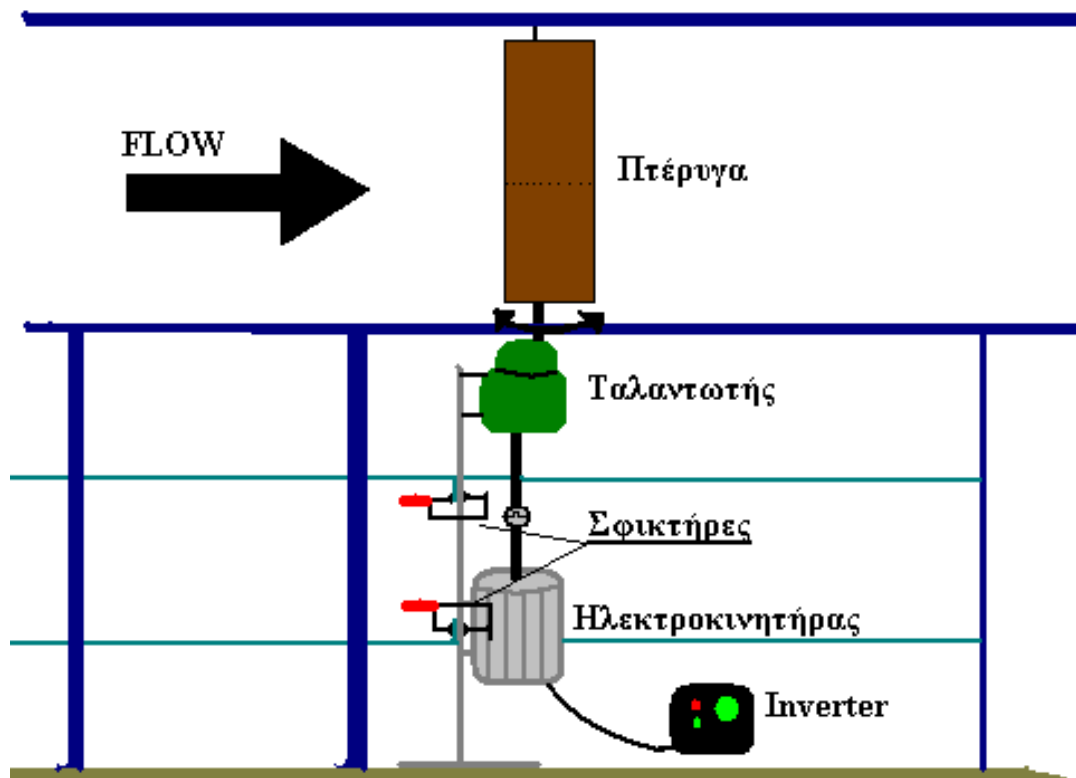
ΚΑΤΩ ΣΤΗΡΙΞΗ

ΠΑΝΩ ΣΤΗΡΙΞΗ



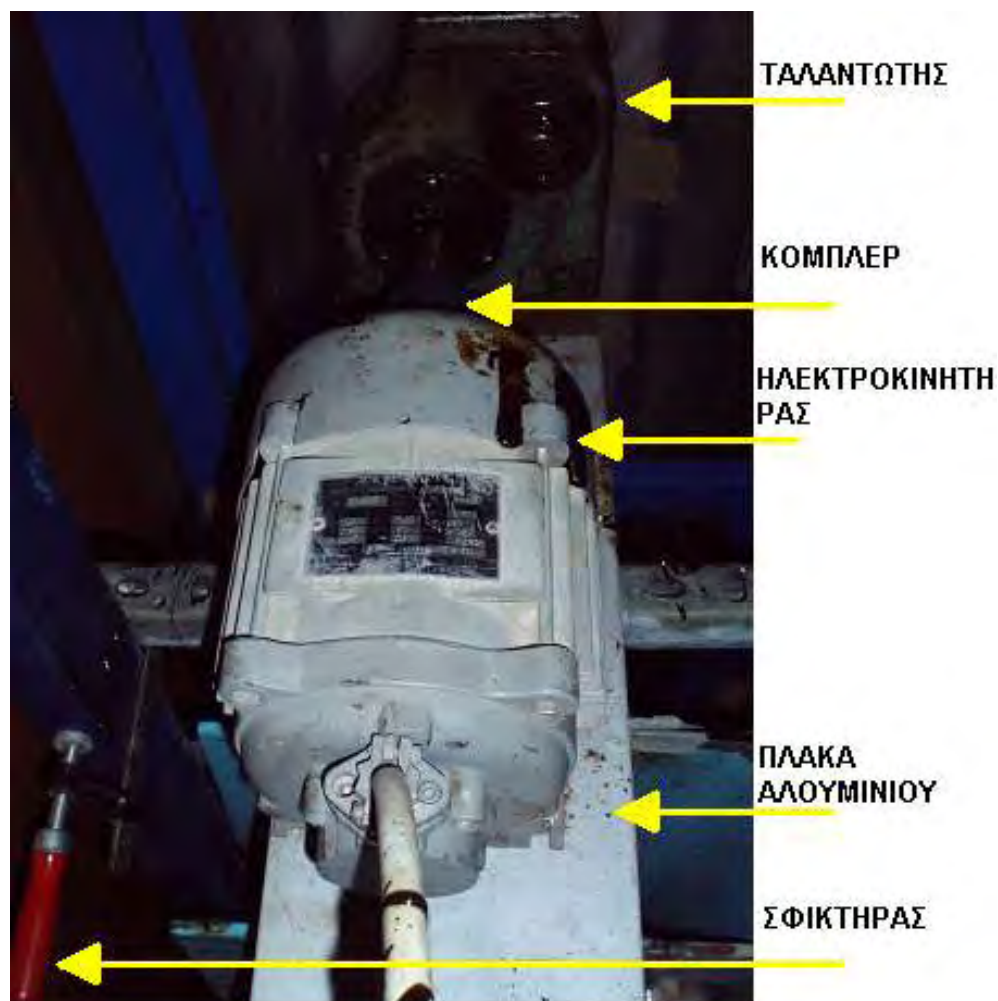
Φωτογραφία 10. Η στήριξη του μοντέλου στην αεροσήραγγα

Για την ταλάντωση του μοντέλου ως προς τη γωνία προσβολής του κατασκευάστηκε μια αυτοσχέδια διάταξη αποτελούμενη από έναν ηλεκτροκινητήρα ισχύος 1Hp, έναν ταλαντωτή που μετέτρεπε τη συνεχή περιστροφική κίνηση του πρώτου σε ταλαντευόμενη περιστροφική, ένα ‘κόμπλερ’ ως σύνδεσμος μεταξύ των δύο, έναν inverter και τέλος μία διάταξη στήριξης όλων των παραπάνω. Τα δύο πρώτα μέρη της διάταξης προσαρμόστηκαν πάνω σε μια πλάκα αλουμινίου που αυτή με της σειρά της ακουμπούσε στο έδαφος μέσω μιας πλατιάς βάσης. Για τη σωστή και στιβαρή λειτουργία του συστήματος έγινε καλή ευθυγράμμιση του ταλαντωτή με τον ηλεκτροκινητήρα και καλή στερέωση της διάταξης πάνω στη δομή της αεροσήραγγας με δύο σφικτήρες.



Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση της αυτοσχέδιας διάταξης στην αεροσήραγγα

Για να είναι εφικτή και ακριβής η ανάγνωση της γωνίας προσβολής του μοντέλου προσαρμόστηκε ένα καρφί στην κάτω πλευρά του και στερεώθηκε έτσι ώστε να είναι στην ίδια ευθεία με τη χορδή της αεροτομής, ενώ στην αεροσήραγγα προσαρμόστηκε κατάλληλα ένα μοιρογνωμόνιο. Από τη δοκιμαστική λειτουργία της διάταξης βρέθηκε ότι το εύρος ταλάντωσης της γωνίας προσβολής του μοντέλου ήταν 24° αλλά η πτέρυγα ρυθμίστηκε πάνω στον άξονα του συστήματος ώστε να εκτελεί ταλάντωση γύρω από τις 0° . Συνεπώς, εκτελούσε κίνηση με όρια τις $\pm 12^\circ$ και μαθηματικό τύπο $\varphi(t) = 12\sin\omega t$. Τέλος, ο λόγος της συχνότητας του inverter προς την συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος ήταν 2,4. Με τις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το αυτοσχέδιο σύστημα ταλάντωσης, ο τρόπος στήριξής του και ο τρόπος μέτρησης της γωνίας προσβολής του μοντέλου.



Φωτογραφία 11. Αυτοσχέδια διάταξη ταλάντωσης



Εικόνα 3. Ο inverter της διάταξης ταλάντωσης



Φωτογραφία 12. Ο τρόπος ανάγνωσης της γωνίας προσβολής του μοντέλου

2.3 Ηλεκτρονικό μανόμετρο-βαθμονόμηση

2.3.1 Ηλεκτρονικό μανόμετρο

Το ηλεκτρονικό μανόμετρο χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της διαφοράς στατικής πίεσης σε 4 ζεύγη οπών της αεροτομής αλλά και για την εκτίμηση της ταχύτητας ροής μέσω ενός σωλήνα Pitot. Είναι το μοντέλο FCO 510 της εταιρίας Furness Control Limited και αφορά τη μέτρηση μικρών τιμών πίεσης έως 200Pa με αρκετά καλή απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Οι μετρήσεις φαίνονται μέσω μιας κοινής οθόνης υγρών κρυστάλλων στον παρατηρητή, αλλά υπάρχει και θύρα που δίνει τάση εξόδου, για τη σύνδεση του μανομέτρου με τον υπολογιστή και επεξεργασία των μετρήσεων. Υπάρχουν τέσσερις βασικές λειτουργίες του μανομέτρου όταν αυτό συνδέεται με σωλήνα Pitot όπως είναι η μέτρηση διαφορικής πίεσης, η ταχύτητα ροής, η μαζική και τέλος η ογκομετρική παροχή. Για να είναι όμως απόλυτα σωστές οι μετρήσεις στις τρεις τελευταίες λειτουργίες υπάρχει υποδοχή σύνδεσης της συσκευής με αισθητήρα πίεσης και θερμοκρασίας. Λόγω όμως, της μη διαθεσιμότητας αυτών η ταχύτητα ροής υπολογίστηκε από τη διαφορική πίεση

του σωλήνα Pitot σε συνδυασμό με το νόμο του Bernoulli για ασυμπίεστη ροή και θερμοκρασία περίπου 20°C (τόση ήταν περίπου και η θερμοκρασία διεξαγωγής των πειραμάτων). Η παραπάνω σχέση που εκφράζει αυτό το νόμο είναι η $V \sim 4,05(\Delta P/10)^{1/2}$ m/s.

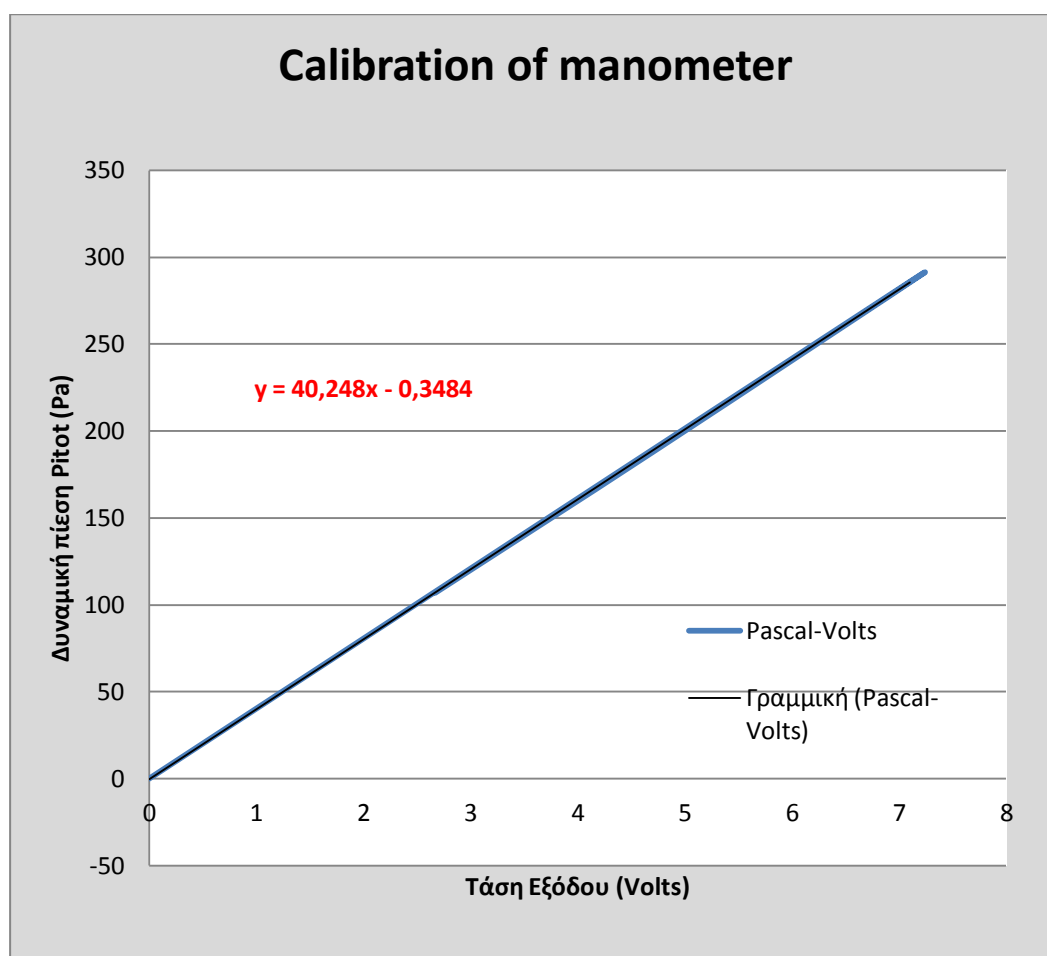
Όσον αφορά τη μέτρηση στατικών διαφορικών πιέσεων πάνω στην πτέρυγα χρησιμοποιήθηκαν εύκαμπτοι πλαστικοί σωλήνες προέκτασης, μικρής διαμέτρου, για την σύνδεση μανομέτρου-οπών πτέρυγας καθώς επίσης και ειδικοί προσαρμογείς (adaptors) μικρού μεγέθους για καλή στεγανότητα μεταξύ των συνδέσεων των σωλήνων. Στην παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται το ηλεκτρονικό μανόμετρο με τους σωλήνες και ένα από τα μικρά adaptors σύνδεσης.



Φωτογραφία 13. Ηλεκτρονικό μανόμετρο και adaptor

2.3.2 Βαθμονόμηση μανομέτρου

Αν και η οθόνη υγρών κρυστάλλων δείχνει ανά πάσα στιγμή τη μετρούμενη διαφορά στατικής πίεσης δύο σημείων αλλά και τη μέση τιμή διαλέγοντας το 'AVERAGE', στις περιπτώσεις της τυρβώδους ροής κυρίως και λόγω της ταχείας και απότομης διακύμανσης της πίεσης είναι πιο συνετό η επεξεργασία να γίνει από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πρώτα όμως, πρέπει να γίνει βαθμονόμηση του μανομέτρου και κάθε τιμή της τάσης εξόδου που διαβάζει ο υπολογιστής να αντιστοιχηθεί στην αντίστοιχη πίεση. Η διαδικασία προβλέπει την έκθεση του σωλήνα Pitot σε στρωτή ροή και σε διάφορες ταχύτητες και τελικά προκύπτει το διάγραμμα Volts-Pascal. Η εξίσωση βαθμονόμησης υπολογίζεται εύκολα μέσω της προσθήκης γραμμής τάσης.



Διάγραμμα 3. Διάγραμμα βαθμονόμησης του μανομέτρου και εξίσωση

2.4 Θερμονήμα (Hot wire)-Βαθμονόμηση

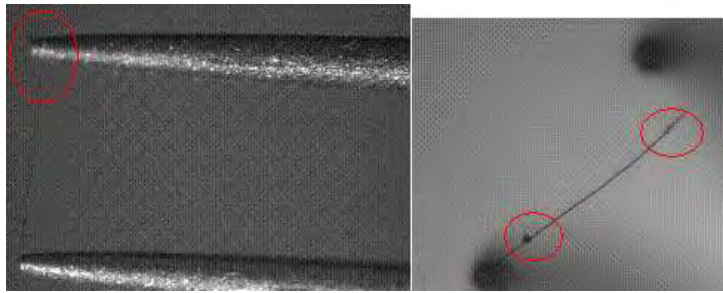
2.4.1 Θερμονήμα

Το θερμονήμα χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της συνιστώσας x της ταχύτητας ροής του απορεύματος του πτερυγίου. Η επιλογή του έγινε λόγω της ταχύτατης απόκρισής του πράγμα που το καθιστά κατάλληλο για ταχύτατα μεταβαλλόμενες τιμές ταχύτητας όπως σε μια τυρβώδη ροή. Από τις τιμές που καταγράφηκαν είναι εύκολο να υπολογισθεί και η ένταση της τύρβης σε κάθε περίπτωση.

Τα βασικά υποσυστήματα της ανεμομετρίας με θερμονήμα ως γνωστόν είναι δύο, ο αισθητήρας που στην ουσία είναι ένα πολύ λεπτό νήμα κυρίως από βολφράμιο και πλατίνα και ο ειδικός ενισχυτής που προσπαθεί να κρατήσει σταθερή την αντίσταση - θερμοκρασία του νήματος μέσω της πρόσδωσης στιγμιαίας τάσης. Η σύνδεση μεταξύ των, έγινε με ομοαξονικό καλώδιο και στη συνέχεια ρυθμίστηκε η τιμή της αντίστασης λειτουργίας (R_{op}) που θα έχει το νήμα σε θερμοκρασία περίπου ίση με 180°C . Ο τύπος που καθορίζει την αντίσταση λειτουργίας είναι ο $R_{op} = (R_{cold}-1) \times 1,7$ όπου R_{cold} η αντίσταση του θερμονήματος όταν αυτό είναι κρύο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα hot wires που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο λόγω ενός ατυχήματος, στο οποίο το πρώτο έσπασε από πρόσκρουση ξένου σώματος πάνω σε αυτό. Έτσι, το δεύτερο νήμα με το οποίο και έγιναν όλες οι μετρήσεις του πειράματος είχε $R_{cold}=4,09\Omega$ και η αντίσταση λειτουργίας του από τον παραπάνω τύπο είχε τιμή $5,253\Omega$ αλλά λόγω μιας μικρής απόκλισης αυτού του τύπου τελικά ρυθμίστηκε στα 5Ω .

Ακολουθούν οι φωτογραφίες από την αστοχία του πρώτου νήματος με τη χρήση κατάλληλου μικροσκοπίου και του συστήματος της ανεμομετρίας.



Φωτογραφία 14. Η αστοχία του 1^{ου} νήματος όπως φαίνεται στο μικροσκόπιο



Φωτογραφία 15. Ο ειδικός ενισχυτής και το δεύτερο θερμονήμα

2.4.2 Βαθμονόμηση

Για να λειτουργήσει σωστά το σύστημα ανεμομετρίας και με ακρίβεια το τελευταίο βήμα που απαιτείται είναι η βαθμονόμησή του με τη βοήθεια ενός σωλήνα Pitot. Η διαδικασία προβλέπει την τοποθέτηση των δύο αισθητήρων κοντά και παράλληλα μεταξύ τους με μέτωπο στη ροή. Ακολουθεί η αύξηση των στροφών της φτερωτής της αεροσήραγγας μέσω της αύξησης της συχνότητας του inverter, με βήμα περίπου 5Hz φτάνοντας ως τα 50Hz. Έτσι, σε κάθε ταχύτητα ροής που υπολογίζεται από το σωλήνα Pitot (σε συνδυασμό με το νόμο του Bernoulli), αντιστοιχεί μία τιμή τάσης E για το θερμονήμα. Αυτή είναι η απαραίτητη τάση που πρέπει να δώσει ο ενισχυτής για να κρατηθεί σταθερή η θερμοκρασία του νήματος καθώς αυτό ψύχεται από τη ροή του αέρα. Ο νόμος που διέπει την παραπάνω πρόταση λέγεται νόμος ψύξης του King και εκφράζεται από την μαθηματική

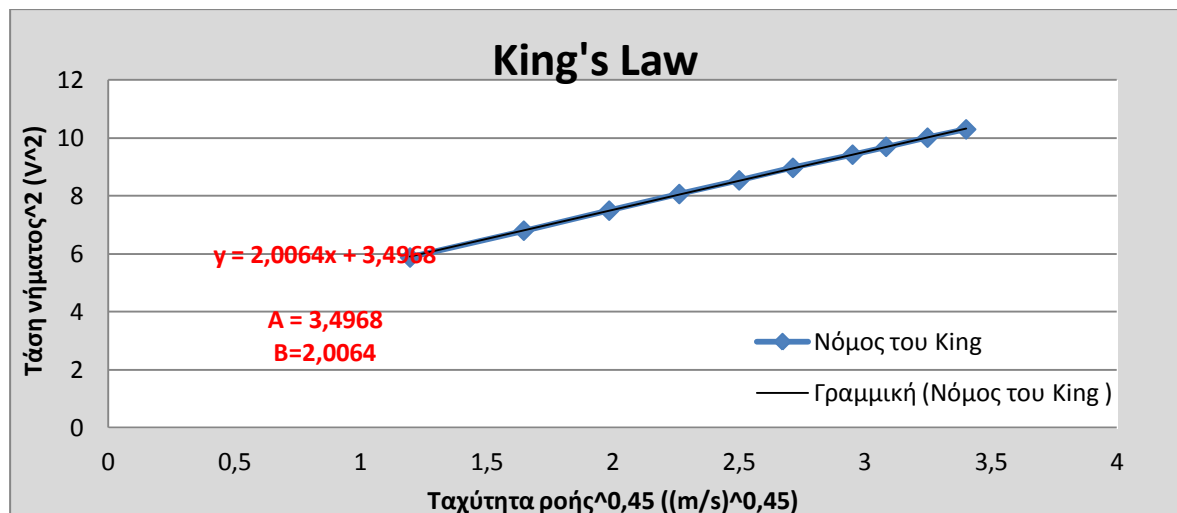
σχέση $E^2 = A + BV^{0,45}$. Η βαθμονόμηση του νήματος συνίσταται στην εύρεση των συντελεστών A και B.

Από τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

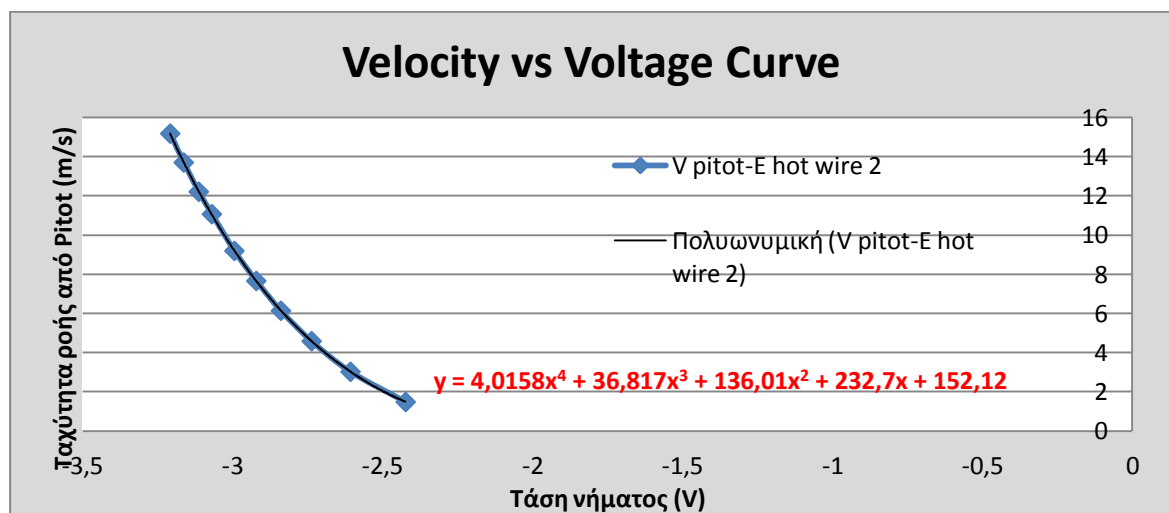
f(hz)tunnel	DP(Pa)	E _{mean}	St dev	E ²	V	V ^{0,45}
5	1,35	-2,423	0,002589	5,870929	1,488065	1,195859
10	5,6	-2,607	0,002548	6,796449	3,030742	1,647013
15	12,85	-2,7365	0,002759	7,488432	4,590993	1,985445
-						
20	23,02	2,83895	0,002763	8,059637	6,144799	2,26375
25	35,85	-2,921	0,00272	8,532241	7,668309	2,501007
30	51,6	-2,994	0,00278	8,964036	9,199832	2,714569
36,2	74,8	-3,069	0,002956	9,418761	11,07658	2,951091
-						
40	91	3,11269	0,003	9,688839	12,21731	3,084175
-						
45	114,6	3,16296	0,00288	10,00432	13,71031	3,248413
50	140,65	-3,208	0,002836	10,29126	15,18885	3,401623

Πίνακας 1. Βαθμονόμηση του θερμονήματος

Από τον πίνακα 1 υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευασθούν τα διαγράμματα 4 και 5. Το πρώτο διάγραμμα, στον άξονα των y θα έχει την στήλη E^2 και στον άξονα των x την στήλη $V^{0,45}$ και θα πρέπει σύμφωνα με το νόμο του King να σχηματίζεται ευθεία γραμμή. Όντως, οι μετρηθείσες τιμές ευρίσκονται πολύ κοντά σε ευθεία οι συντελεστές της οποίας προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Εναλλακτικά, το δεύτερο διάγραμμα μπορεί να προκύψει από τις στήλες E και V και να έχει πολωνυμική έκφραση με συντελεστές οι οποίοι και πάλι θα βρεθούν με την προσθήκη γραμμής παρεμβολής.



Διάγραμμα 4. Ο νόμος του King για το hot wire του πειράματος ($E^2 - V^{0,45}$)



Διάγραμμα 5. Η καμπύλη της ταχύτητας ροής συναρτήσει της τάσεως του Hot wire.

2.5 Επεξεργασία και ψηφιοποίηση των δεδομένων των μετρήσεων

Η επεξεργασία και ψηφιοποίηση των μετρήσεων του πειράματος είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Η ιδιαιτερότητα του πειράματος είναι ότι τα μετρούμενα μεγέθη (δηλαδή η ταχύτητα ροής και η στατική πίεση σε διάφορα σημεία της αεροτομής) μεταβάλλονται ταχύτατα εξαιτίας της τύρβης αυξάνοντας έτσι αναπόφευκτα και τον όγκο των δεδομένων. Έτσι, επιβάλλεται η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό που θα ψηφιοποιήσει, θα αποθηκεύσει και θα δώσει τη δυνατότητα στον εκτελεστή του πειράματος να επεξεργασθεί γρήγορα όλα αυτά τα δεδομένα.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένας κοινός επιτραπέζιος υπολογιστής με προσαρμοσμένη εξωτερική 8-κάναλη κάρτα ανάκτησης και ψηφιοποίησης δεδομένων NI USB6009(14-bit,48KS/s) της National Instruments, ο οποίος λειτουργούσε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Labview 8, της ίδιας εταιρίας. Ανάλογα με το μετρούμενο μέγεθος ο αισθητήρας συνδέονταν με το ένα από τα οκτώ διαθέσιμα κανάλια της κάρτας η οποία δεχόταν το αναλογικό σήμα και το μετέτρεπε σε ψηφιακό και επομένως κατάλληλο για επεξεργασία από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το Labview, είχε προγραμματισθεί να συλλέγει δεδομένα από την κάρτα για όσο χρονικό διάστημα επιθυμεί ο εκτελεστής, με συχνότητα δειγματοληψίας της επιλογής του, να τα αναπαριστά διαγραμματικά, να δίνει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση και τέλος να κάνει ανάλυση συχνοτήτων μέσω Fast Fourier Transform σε ξεχωριστό διάγραμμα.

Η συχνότητα δειγματοληψίας επιλέχθηκε ανάλογα με το είδος της μέτρησης και την απόκριση του οργάνου-αισθητήρα. Συνεπώς, όταν οι μετρήσεις αφορούσαν στατικές πιέσεις επάνω στην αεροτομή η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 250Hz ενώ για τις ταχύτητες του απορεύματος στα 1000Hz, τόσο λόγω της ταχύτερης μεταβολής του μεγέθους όσο και λόγω της καλύτερης απόκρισης του θερμονήματος σε σχέση με το ηλεκτρονικό μανόμετρο. Το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας και για τα δύο μεγέθη ήταν 20 δευτερόλεπτα με εξαίρεση την περίπτωση που το μοντέλο ταλαντεύονταν και οι μετρήσεις του απορεύματος διήρκησαν 30 δευτερόλεπτα έκαστη.

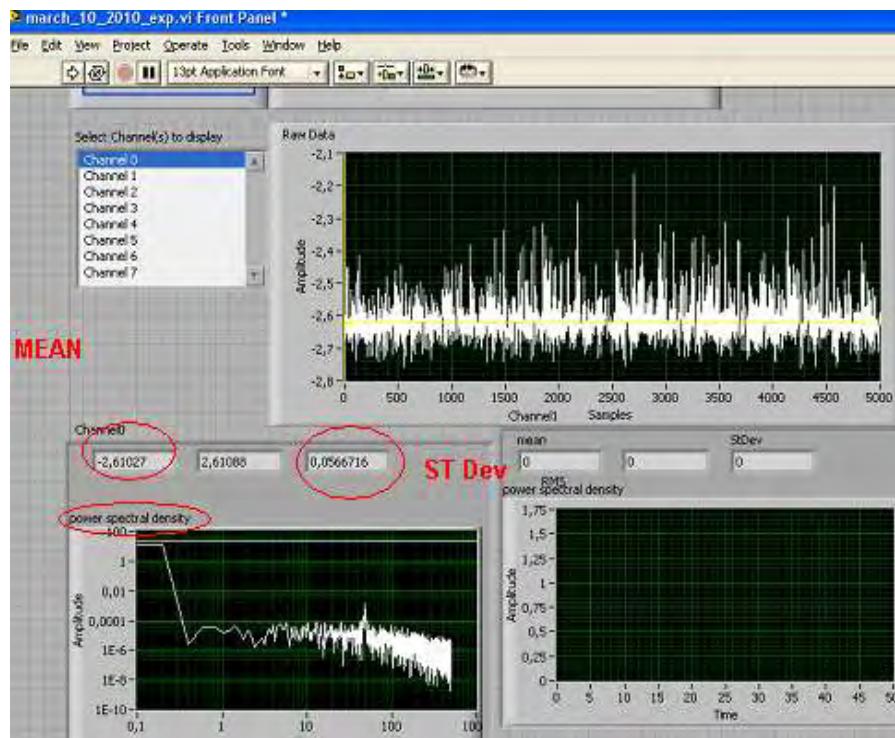
Ακολουθούν οι φωτογραφίες της κάρτας και του υπολογιστή καθώς και μια χαρακτηριστική εικόνα του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Labview.



Φωτογραφία 16. Η κάρτα ψηφιοποίησης και ανάκτησης δεδομένων NI USB6009



Φωτογραφία 17. Ο Η/Υ του πειράματος



Εικόνα 4. Το

περιβάλλον του Labview 8.

2.6 Διάταξη απεικόνισης ροής Laser-καπνογόνο

Η διάταξη απεικόνισης της ροής αποτελείται από δύο βασικά συστήματα, το λέιζερ (laser) και τη συσκευή καπνού ή αλλιώς καπνογόνο. Το σύστημα laser δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει ένα επίπεδο το οποίο θα φωτίσει οτιδήποτε το διασχίσει. Το σύστημα του καπνογόνου παρέχει στη ροή, μία συνεχή δέσμη καπνού που αναμιγνύεται με αυτή και σε συνδυασμό με το laser κάνει ορατή τη μορφή της. Για την καταγραφή της ροής έγινε χρήση DVD βιντεοκάμερας CANON DC22, στηριγμένη σε τρίποδα.

2.6.1 Σύστημα λέιζερ (laser)

Για να δημιουργηθεί το επίπεδο laser χρειάζονται δύο βασικά εξαρτήματα, η συσκευή παραγωγής laser και το περιστρεφόμενο κάτοπτρο. Η συσκευή laser, με ισχύ λειτουργίας περίπου 1,27Watt, παράγει μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος 532nm και τη στέλνει στο περιστρεφόμενο κάτοπτρο. Η λειτουργία της συσκευής laser καθορίζεται από τον οδηγό (laser driver) ο οποίος παρέχει ρεύμα κατάλληλης τάσης σε αυτή. Το περιστρεφόμενο κάτοπτρο από την άλλη πλευρά, είναι ένας ταχύτατα περιστρεφόμενος δίσκος αποτελούμενος από μικρά κάτοπτρα που δημιουργεί ένα φωτεινό επίπεδο όταν προσπίπτει σε αυτόν η δέσμη laser και η λειτουργία του ρυθμίζεται από μία ξεχωριστή συσκευή παροχής συνεχούς τάσης. Το όλο σύστημα στηρίζεται σε ειδική βάση και είναι της εταιρίας La Vision. Κατά τη λειτουργία του, απαραίτητο μέτρο ασφάλειας είναι η χρήση ειδικών γυαλιών που φιλτράρουν τη βλαβερή για τα μάτια δέσμη. Ακολουθούν οι φωτογραφίες του συστήματος.



Φωτογραφία 18. Το σύστημα laser



Φωτογραφία 19. Laser Driver



Φωτογραφία 20. Το περιστρεφόμενο κάτοπτρο



Φωτογραφία 21. Η συσκευή παροχής συνεχούς τάσης στο περιστρεφόμενο κάτοπτρο

2.6.2 Καπνογόνο (smoke generator)

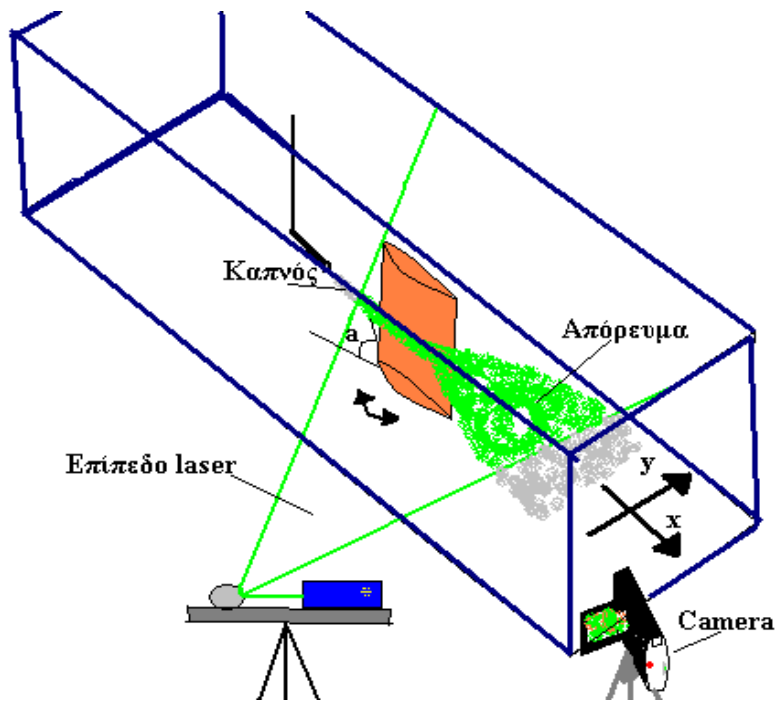
Το καπνογόνο τροφοδοτούσε τη ροή με λευκό καπνό μέσω ενός λεπτού ακροφυσίου, σχεδιασμένο έτσι ώστε να προσθέτει όσο το δυνατόν λιγότερες αναταράξεις στη ροή και η λειτουργία του ήταν σχετικά απλή. Για τη δημιουργία του καπνού μία αντίσταση θέρμανε παραφινέλαιο το οποίο αναμιγνύονταν με τον αέρα και μέσω μιας αντλίας στέλνονταν στη ροή. Μάλιστα, υπήρχε η δυνατότητα ρύθμισης της πυκνότητας του καπνού μέσω ενός επιλογέα. Η συσκευή ήταν της εταιρίας SP TEKNIK.



Φωτογραφία 22. Η συσκευή καπνογόνου.

2.6.3 Τρόπος στήριξης της διάταξης

Η ειδική βάση στήριξης του συστήματος laser σταθεροποιήθηκε σε τέτοια θέση έτσι ώστε το φωτεινό επίπεδο να τέμνει κάθετα την πτέρυγα και στο μέσον της. Το ακροφύσιο του καπνογόνου τοποθετήθηκε ελαφρώς μπροστά του χείλους προσβολής και προς τη μεριά της ράχης της πτέρυγας, ώστε να φαίνεται όσο το δυνατόν καθαρότερα η εκάστοτε μορφή του απορεύματος και η βιντεοκάμερα κάτω από το επίπεδο του laser όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



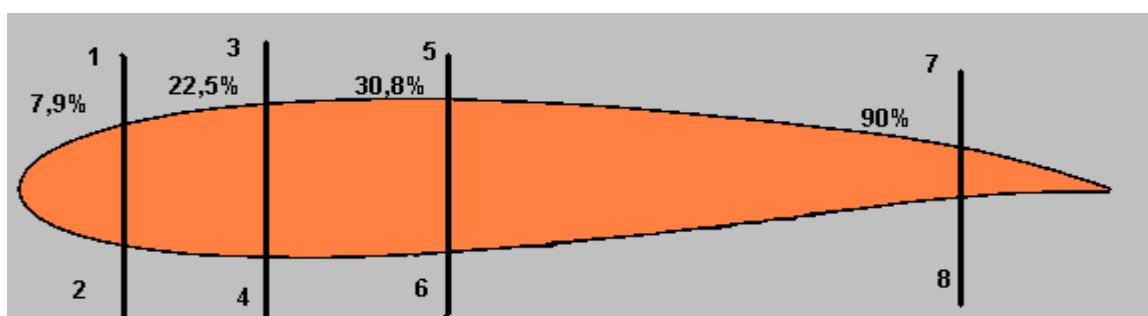
Εικόνα 5. Η διάταξη απεικόνισης ροής

2.7 Πειραματική μέθοδος

Το πείραμα χωρίζεται σε τρεις βασικές ενότητες, τη μέτρηση των πιέσεων, τη μέτρηση των ταχυτήτων και την απεικόνιση της ροής. Οι μετρήσεις έγιναν τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη ροή με το πλήθος τους να ξεπερνά τις 1000. Σε κάθε τύπο ροής η ταχύτητα επιλέχθηκε στα 11 μέτρα/δευτερόλεπτο και οι μετρήσεις έγιναν με το μοντέλο ακίνητο πρώτα σε διάφορες γωνίες προσβολής και κατόπιν ταλαντευόμενο γύρω από τις 0 μοίρες με διάφορες συχνότητες. Ο αριθμός Reynolds που αντιστοιχεί στη ροή αυτή ισούται με 86000 και είναι σχετικά μικρής τάξης μεγέθους. Αναφορικά με την τρίτη ενότητα η απεικόνιση κάλυψε συγκεκριμένες μόνο πτυχές του πειράματος και μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Στο μέρος 2.7.1 περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση πιέσεων και στο 2.7.2 η αντίστοιχη για τη μέτρηση ταχυτήτων του απορεύματος. Τέλος, στο μέρος 2.7.3 περιγράφεται η διαδικασία με την οποία έγινε η απεικόνιση της ροής.

2.7.1 Μετρήσεις πιέσεων

Όσον αφορά τη μέτρηση των πιέσεων επιλέχθηκαν 4 ζεύγη οπών της αεροτομής. Κάθε ζεύγος αποτελούνταν από δύο οπές, μια της ράχης και μια της κοιλάδας οι οποίες απέχουν απόσταση ίση από το χείλος προσβολής. Συγκεκριμένα, οι αποστάσεις των ζευγών επί της χορδής είναι για το 1-2 7,9%, για το 3-4 22,5%, για το 5-6 30,8% και για το 7-8 90% όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 6. Τα ζεύγη των οπών μέτρησης στατικής πίεσης

Τα σωληνάκια της αεροτομής που αντιστοιχούν σε αυτές τις οπές σημαδεύτηκαν και τοποθετήθηκαν οι ειδικοί προσαρμογείς (adaptors) για την ταχεία σύνδεση-αποσύνδεση τους με τα σωληνάκια που οδηγούν στο ηλεκτρονικό μανόμετρο. Στην είσοδο του μανομέτρου με την ένδειξη '+' τοποθετούνταν τα σωληνάκια των κάτω οπών (2,4,6,8) ενώ τα επάνω σωληνάκια (1,3,5,7) στην είσοδο με την ένδειξη '-'. Η διαφορά πίεσης που μετρούσε το μανόμετρο ήταν ένα μέτρο της αντωτικής δύναμης που ασκούσαν στο εκάστοτε σημείο.

Αφού ολοκληρώθηκε η επιλογή των οπών επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός της συχνότητας του inverter της αεροσήραγγας προκειμένου να επιτευχθεί ταχύτητα ροής 11m/s με το μοντέλο εντός, φυσικά. Η διαδικασία έγινε με τη βοήθεια του σωλήνα Pitot σε σύνδεση με το μανόμετρο και του τύπου του Bernoulli. Ο Pitot τοποθετήθηκε σε απόσταση 1,35m από την αρχή του τομέα μετρήσεων, μακριά από τα τοιχώματα, στην ελεύθερη ροή και ελαφρώς μπροστά από το μοντέλο. Ως συχνότητα inverter ορίστηκε αυτή που έδινε στο μανόμετρο διαφορά πίεσης 73,77Pa (δηλαδή ταχύτητα 11m/s). Απουσία του πλέγματος η

διαδικασία ήταν απλή αφού επιλέχθηκε από το μανόμετρο η επιλογή 'AVERAGE' και λόγω της χαμηλής τύρβης η διακύμανση της τιμής ήταν ελάχιστη.

Έτσι σε πρώτη φάση, καταγράφηκε από τον υπολογιστή, η διαφορά πιέσεων για τα 4 ζεύγη, με συχνότητα δειγματοληψίας τα 250Hz, για 20 δευτερόλεπτα στις εξής μοίρες: 8,6,4,...0,...,4,6,8 και απουσία του πλέγματος. Ο λόγος για τον οποίο οι μετρήσεις δεν καλύπτουν όλο το φάσμα κίνησης του μοντέλου (-12 έως 12 μοίρες) καθορίζεται από τα όρια λειτουργίας του ηλεκτρονικού μανομέτρου το οποίο μετρούσε πίεση όχι πάνω από 200Pa. Από το πρόγραμμα Labview φαίνονταν αμέσως η μέση τιμή της τάσης του μανομέτρου και επομένως και της διαφοράς στατικής πίεσης των εκάστοτε οπών. Όπου όμως η τιμή της στατικής πίεσης ήταν αρνητική η τάση εξόδου του μανομέτρου ήταν μηδενική και για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις το σωληνάκια συνδέονταν ανάποδα στο όργανο και στην μέση τιμή από το Labview έμπαινε μπροστά ένα μείον.

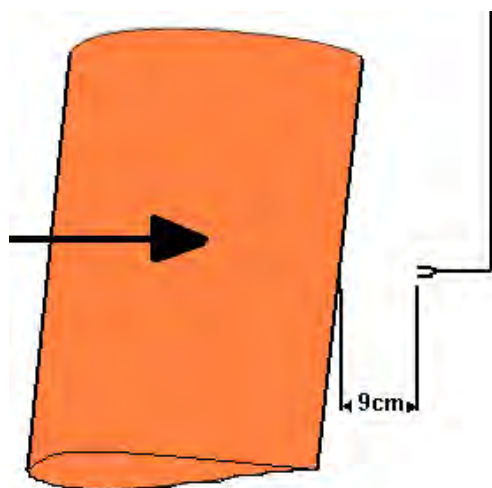
Τις στατικές μετρήσεις ακολούθησαν οι δυναμικές μετρήσεις (ταλαντευόμενο πτερύγιο) και πάλι απουσία του πλέγματος. Η ταχύτητα ροής ήταν η ίδια, οι συχνότητες ταλάντωσης της πτέρυγας 1,2,4,6,8 και 9Hz, ενώ ο χρόνος και η συχνότητα δειγματοληψίας από τον υπολογιστή δεν μεταβλήθηκε. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή της συχνότητας ταλάντωσης καθορίστηκε από την αντοχή της διάταξης. Πέραν των 9Hz παρατηρήθηκε ότι τα 'κόντρα' παξιμάδια ξέσφιγγαν λόγω των απότομων επιταχύνσεων. Τέλος, για να είναι ασφαλή τα αποτελέσματα στις παραπάνω συνθήκες έγιναν μεμονωμένα πειράματα προκειμένου να βρεθεί κατά πόσο οι δονήσεις από την ταλάντωση του μοντέλου που αναπόφευκτα περνούσαν στα σωληνάκια επηρέαζε τις μετρούμενες τιμές στο μανόμετρο και βρέθηκε πως δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο.

Σειρά είχαν οι μετρήσεις σε τυρβώδη ροή οπότε και τοποθετήθηκε το πλέγμα παραγωγής τύρβης. Το μόνο που άλλαξε από την προηγούμενη διαδικασία ήταν η συχνότητα των στροφών της φτερωτής εξαιτίας της παραπάνω αντίστασης που προέβαλλε

το πλέγμα. Προφανώς αυξήθηκαν τόσο, ώστε η μέση τιμή διαφοράς πίεσης του σωλήνα Pitot να δίνει και πάλι 73,77Pa.

2.7.2 Μετρήσεις ταχυτήτων-απόρευμα

Για τη μέτρηση των ταχυτήτων όπισθεν του μοντέλου έγινε αποκλειστικά χρήση του θερμονήματος (hot wire) το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση μικρότερη από μία χορδή όπως και σε παρόμοιες με αυτή μελέτες. Συγκεκριμένα, απείχε από το χείλος εκφυγής της αεροτομής 9cm, δηλαδή 0,75c, και στο μέσον σε σχέση με το μήκος της όπως απεικονίζεται ακριβώς κάτω.



Εικόνα 7 Η θέση του hot wire σε σχέση με το μοντέλο

Η κίνηση του αισθητήρα γινόταν με το σύστημα γραναζιών που φαίνεται στη φωτογραφία 5 τόσο στις στατικές όσο και στις δυναμικές μετρήσεις. Ως μηδενική ορίστηκε η θέση ακριβώς πίσω από το χείλος εκφυγής και γωνία προσβολής του μοντέλου ίση με 0° , ενώ τα υπόλοιπα σημεία-σταθμοί μετρήσεων βρισκόταν εκατέρωθεν αυτής της θέσης, πιο πυκνά κοντά στο μηδενικό σημείο και πιο αραιά μακριά από αυτό έτσι ώστε να καλύπτεται ικανοποιητικά η περιοχή του απορεύματος. Για την περίπτωση του ακίνητου μοντέλου, σε στρωτή ροή, οι σταθμοί μέτρησης ταχύτητας σε εκατοστά (cm) ήταν οι εξής: -5, -4, -3, -2, -1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5 ενώ στην τυρβώδη ροή προστέθηκαν

τα σημεία 13 και -13 και αφαιρέθηκαν τα 4 και -4. Αντίθετα, στην περίπτωση του ταλαντευόμενου μοντέλου (και στα 2 είδη ροών) η διάταξη των σταθμών ήταν διαφορετική με τον αισθητήρα να βρίσκεται στις θέσεις (σε cm) -13, -8, -5, -3, -1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3, 5, 8, 13 και αυτό γιατί οι αστάθειες εκτείνονται σε μεγαλύτερο εύρος όταν το πτερύγιο ταλαντεύεται.

Οι μετρήσεις του απορεύματος ξεκίνησαν απουσία του πλέγματος παραγωγής τύρβης με το μοντέλο σταθερό στις παρακάτω γωνίες προσβολής -12, -10, -8,...0,...8, 10, 12 και στα σημεία που προαναφέρθηκαν και συνεχίστηκαν με το μοντέλο να ταλαντεύεται σε συχνότητες 1, 2, 4, 6, 8, 9Hz και μετρήσεις στα αντίστοιχα σημεία. Καθ' όλη τη διάρκεια ο σωλήνας Pitot που ήταν συνδεδεμένος με το ηλεκτρονικό μανόμετρο χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς της ταχύτητας της ελεύθερης ροής και όπου χρειαζόταν γινόταν μικρές διορθώσεις στη συχνότητα του inverter για να διατηρηθεί στα 11m/s.

Σειρά είχαν οι μετρήσεις παρουσία του πλέγματος με τη διαδικασία να μη διαφέρει ουσιαστικά. Φυσικά και πάλι ο Pitot χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς.

Το πρόγραμμα Labview είχε προγραμματισθεί να καταγράφει μετρήσεις ταχύτητας με συχνότητα 1000Hz και χρονικό διάστημα 20 δευτερολέπτων με εξαίρεση την περίπτωση του ταλαντευόμενου πτερυγίου στην τυρβώδη ροή όπου το διάστημα καθορίστηκε στα 30 δευτερόλεπτα λόγω της έντονης αστάθειας της ροής. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου του θερμονήματος υπολογίζονταν αυτόματα καθώς επίσης και η τυπική της απόκλιση.

2.7.3 Απεικόνιση ροής (Flow visualization)

Η διαδικασία αυτή είχε σαν σκοπό να απεικονίσει τη ροή γύρω αλλά και πίσω από την πτέρυγα σε συγκεκριμένες συνθήκες έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αλλά και τα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν τις ασταθείς ροές

γενικότερα. Όπως, στις μετρήσεις πιέσεων και ταχυτήτων έτσι και η απεικόνιση της ροής έγινε με το μοντέλο ακίνητο αλλά και ταλαντευόμενο, σε στρωτή και τυρβώδη ροή.

Στην περίπτωση που το μοντέλο ήταν ακίνητο χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι, αυτή με το laser-καπνογόνο και η μέθοδος με τα νημάτια. Η βιντεοσκόπηση επικεντρώθηκε μόνο στην περιοχή του στατικού stall με γωνίες προσβολής άνω των 12° και με την ταχύτητα ροής να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 11m/s διότι σε αυτές τις τιμές φαινόταν πιο καθαρά η αποκόλληση της ροής στην πτέρυγα. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να φανεί η επίδραση της τύρβης στην απώλεια στήριξης του πτερυγίου και να επιβεβαιωθεί η καθυστέρηση του φαινομένου σε σχέση με τη στρωτή ροή.

Στην αντίθετη περίπτωση που το μοντέλο ταλαντευόταν έγινε χρήση μόνο της μεθόδου laser-καπνογόνου με ταχύτητα ροής αρκετά χαμηλότερη, στα 1,2 m/s, ούτως ώστε να μην διαχέεται γρήγορα ο καπνός στη ροή και χαθούν οι παραγόμενες από την πτέρυγα δίνες. Η βιντεοσκόπηση έγινε με συχνότητες ταλάντωσης 1,2,4,6,8 και 9 Hz όπως και στις μετρήσεις πιέσεων και ταχυτήτων. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να καταγραφεί το απόρευμα της πτέρυγας και να εξετασθεί η επίδραση της συχνότητας ταλάντωσης αλλά και της τύρβης σε αυτό.

Όσον αφορά την μέθοδο απεικόνισης με νημάτια (wool tuft method), η διαδικασία ήταν συγκριτικά πιο εύκολη. Τοποθετήθηκαν 7 λεπτά νημάτια μήκους 1,5-2 cm ξεκινώντας από το χείλος προσβολής και καταλήγοντας στο χείλος εκφυγής της πτέρυγας. Τα νημάτια αυτά συγκρατήθηκαν από λεπτή διάφανη ταινία και η διάταξή τους φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία. Η κάμερα ρυθμίστηκε στην αυτόματη λειτουργία καθώς οι συνθήκες λήψης και ο φωτισμός ήταν κανονικές. Η γωνία καταγραφής ήταν κάθετη στην πλευρά της πτέρυγας που είχε τα νημάτια και από το βίντεο που καταγράφηκε επιλέχθηκαν κάποια χαρακτηριστικά καρέ (frames) για να παρουσιασθούν στη διατριβή.



Φωτογραφία 23. Τα νημάτια της πτέρυγας.

Ωστόσο, η μέθοδος απεικόνισης με laser και καπνό είχε κάποιες ιδιαιτερότητες συγκριτικά με την προηγούμενη και αυτό γιατί έγινε στο σκοτάδι ώστε να φανεί καθαρά ο καπνός. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν σκούρες κουρτίνες στην περιοχή γύρω από το μοντέλο και η ταχύτητα του κλείστρου της κάμερας ρυθμίστηκε στα 1/500 ή 1/1000 sec ανάλογα με το πόσο καθαρά φαίνονταν η μορφή του απορεύματος. Από τα βίντεο που καταγράφηκαν έγινε και πάλι επιλογή και παρουσίαση των αντιπροσωπευτικών καρέ (frames).

Κεφάλαιο 3 Μετρήσεις πιέσεων-σχολιασμός

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση, σχολιασμός και σύγκριση με τη βιβλιογραφία όπου είναι δυνατόν, των μετρήσεων που αφορούν τη διαφορά στατικής πίεσης στα 4 ζεύγη οπών της πτέρυγας που επιλέχθηκαν (πβ 2.7.1, εικόνα 4). Σκοπός είναι να φανεί η επίδραση αφενός μεν, της συχνότητας ταλάντωσης του πτερυγίου, αφετέρου δε της τυρβώδους ροής στην κατανομή της στατικής πίεσης. Αρχικά, στο μέρος 3.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τη στρωτή ροή με πρώτες τις στατικές μετρήσεις και κατόπιν αυτές με την ταλάντωση του μοντέλου και γίνεται σύγκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων ώστε να φανεί η επίδραση της ταλάντωσης. Στο μέρος 3.2 γίνεται η αντίστοιχη εργασία αλλά για την τυρβώδη ροή ενώ στο υποκεφάλαιο 3.3 συγκρίνονται τα διαγράμματα του 3.1 με τα αντίστοιχα του 3.2 ώστε να φανεί η επίδραση της τύρβης.

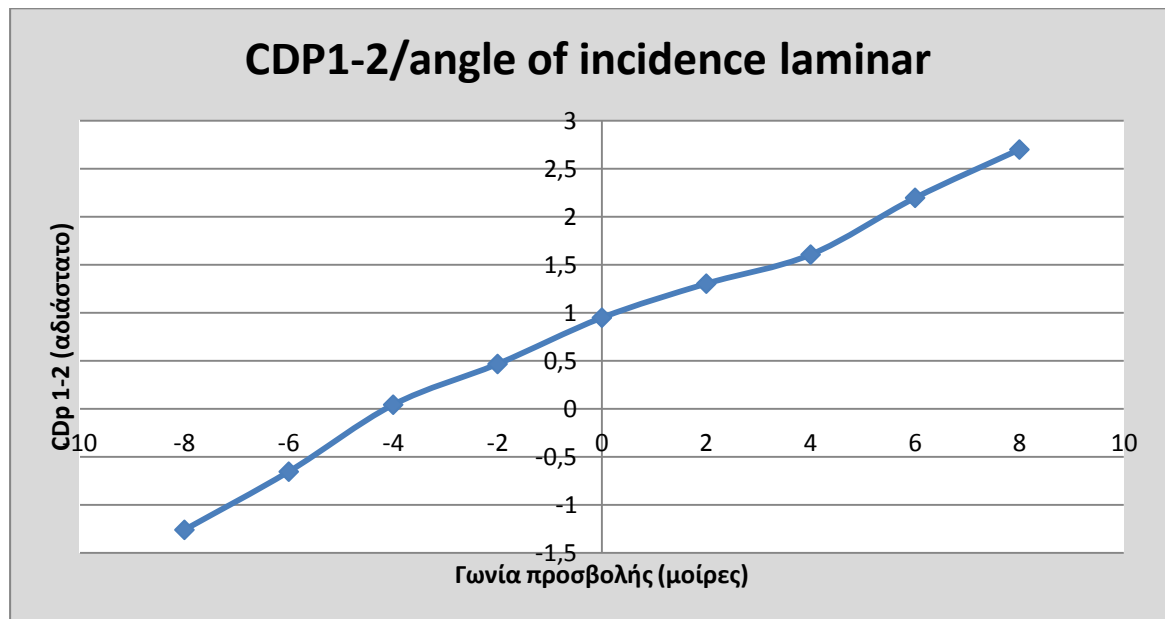
3.1 Μετρήσεις πιέσεων σε στρωτή ροή

3.1.1 Μετρήσεις πιέσεων σε στρωτή ροή με το μοντέλο ακίνητο

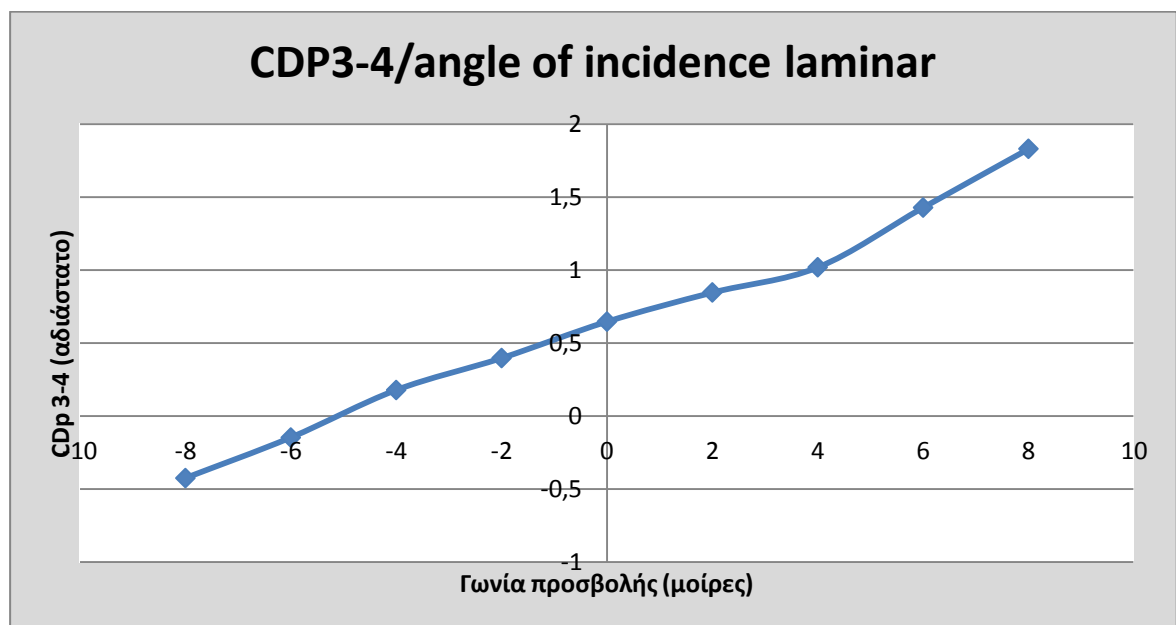
Στα διαγράμματα 6,7,8 και 9 φαίνεται η καμπύλη της αδιαστατοποιημένης διαφοράς πίεσης των τεσσάρων ζευγών των οπών συναρτήσει της γωνίας προσβολής της πτέρυγας. Ο παραπάνω αδιάστατος αριθμός δεν είναι άλλο από τον συντελεστή διαφορικής πίεσης C_{DP} που προκύπτει από τη σχέση $C_{DP} = (P_{\text{static down}} - P_{\text{static upper}}) / P_{\text{total}}$. Παραδείγματος χάρη, για το ζευγάρι οπών 1-2 ισχύει $C_{DP(1-2)} = (P_2 - P_1) / 0,5 \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2$ όπου αριθμητής είναι η μέση τιμή (για 20 δευτερόλεπτα) διαφορικής πίεσης που δείχνει το μανόμετρο και παρονομαστής η δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής ή αλλιώς η τιμή που δείχνει ο σωλήνας Pitot - για το συγκεκριμένο πείραμα ο παρονομαστής ισούται με 73,7 Pa. Ο συντελεστής αυτός είναι ένα μέτρο της αντωτικής δύναμης που παράγει το μοντέλο στα επιλεγμένα σημεία κατά μήκος

της χορδής. Η διαδικασία ανάκτησης των δεδομένων πίεσης περιγράφεται στο υποκεφάλαιο

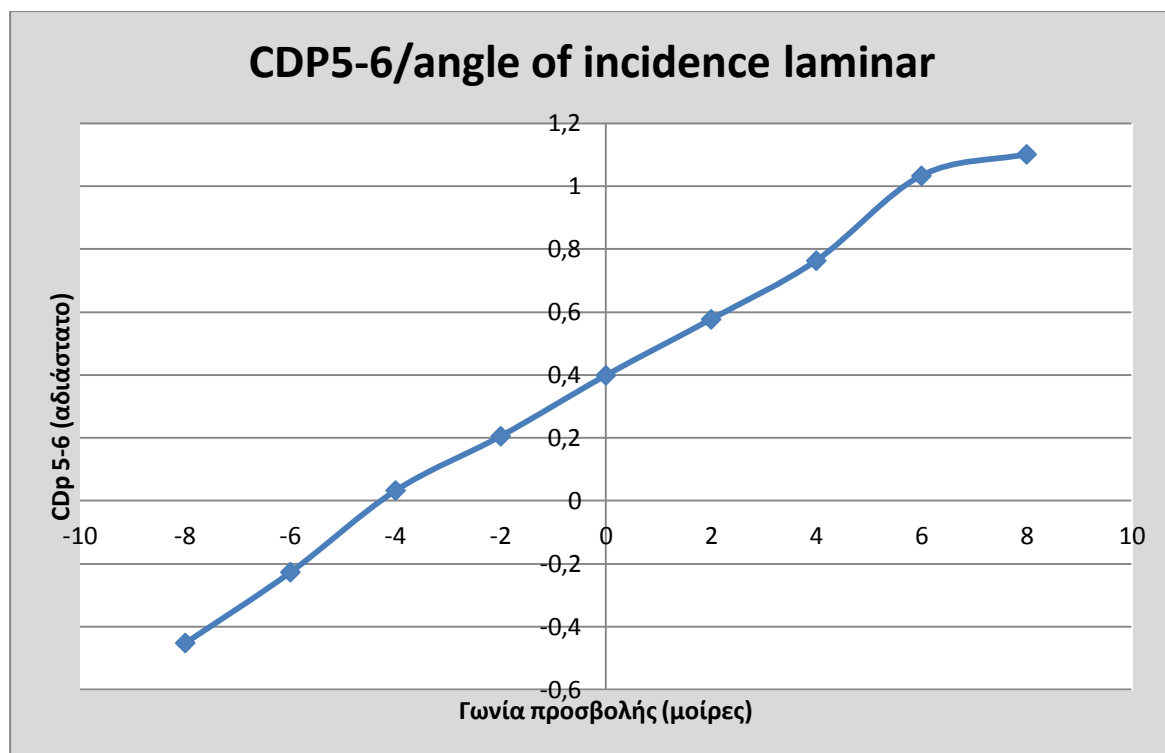
2.7.1



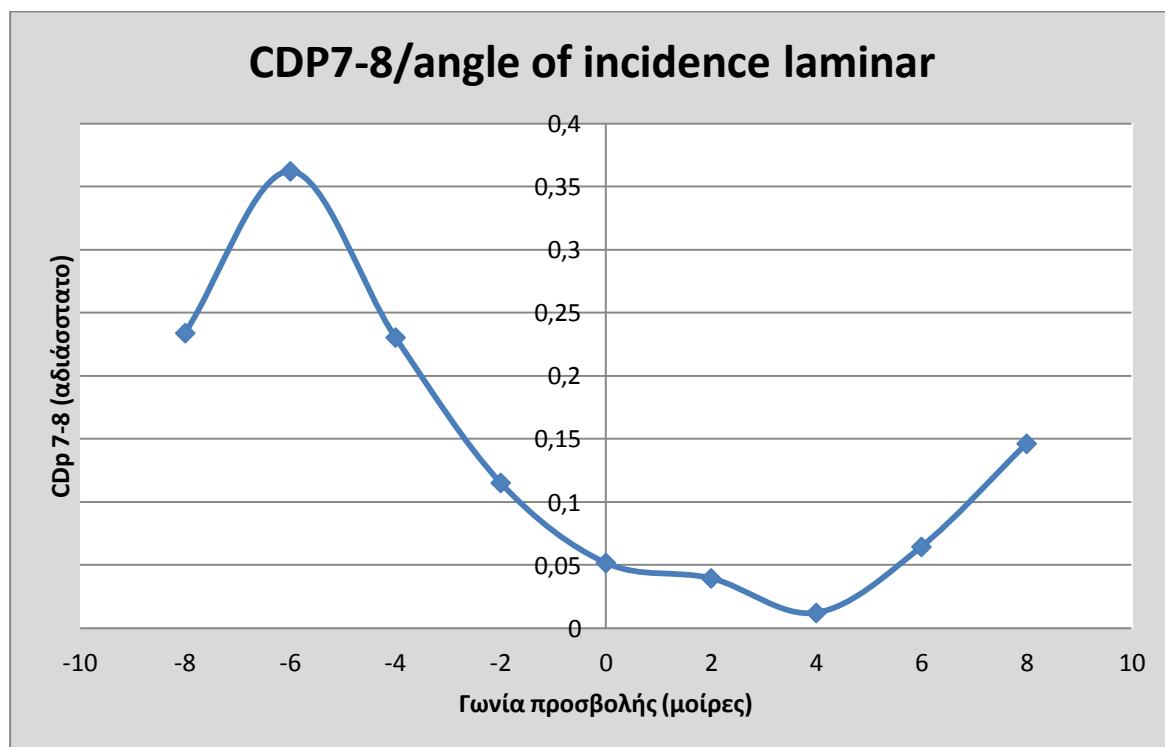
Διάγραμμα 6. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής / οπές 1-2 (7,9% c)



Διάγραμμα 7. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής / οπές 3-4 (22,5% c)

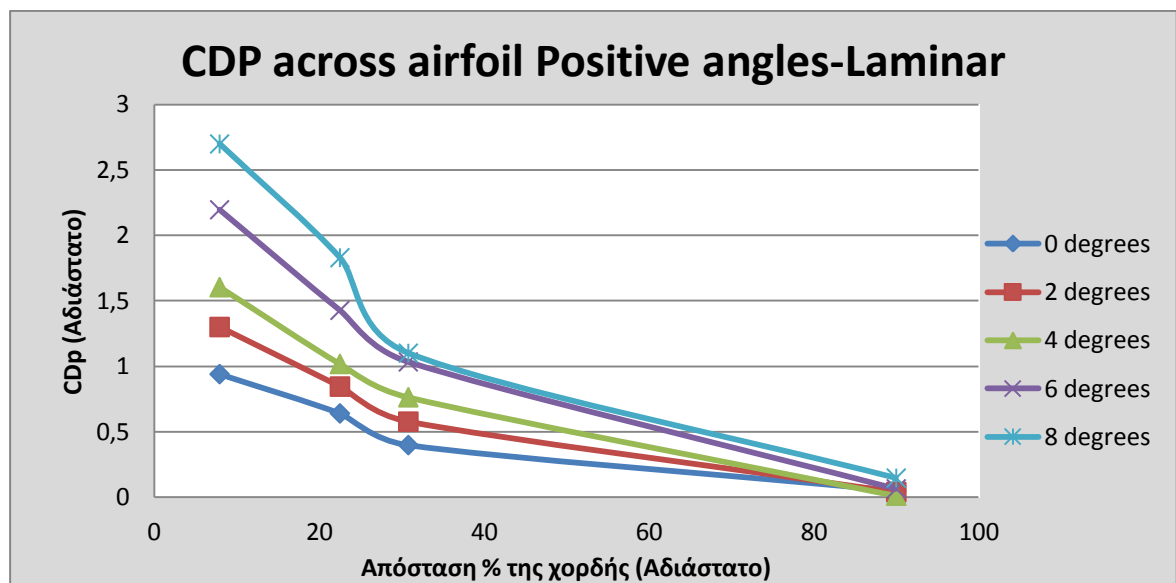


Διάγραμμα 8. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής 5-6 (30,8% c)

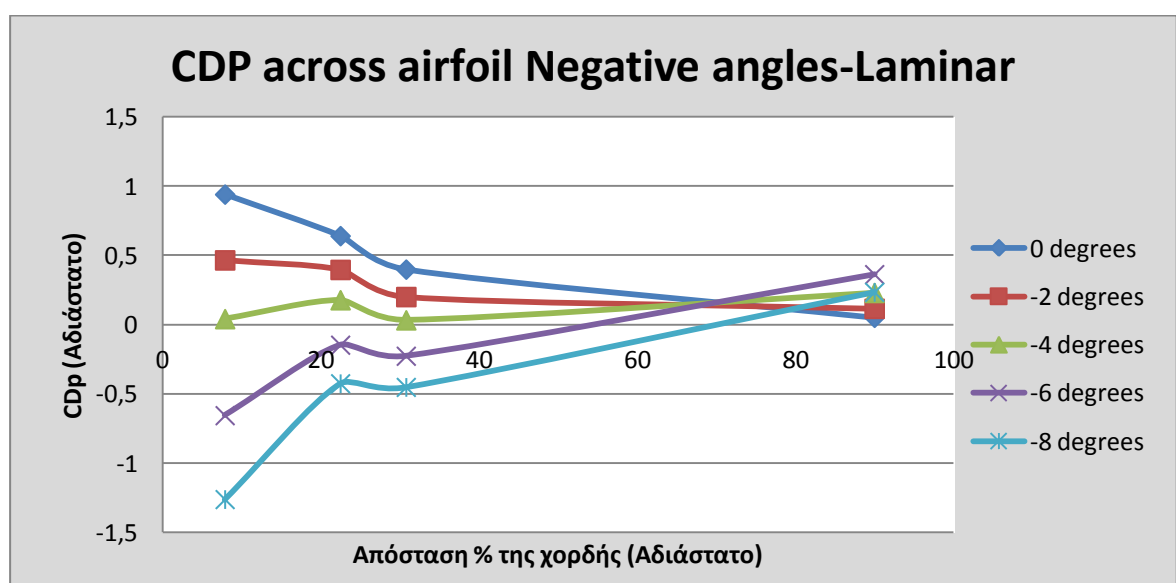


Διάγραμμα 9. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής 7-8 (90% c)

Τα διαγράμματα 10 και 11 που ακολουθούν δείχνουν την κατανομή πίεσης στην αεροτομή καθώς αλλάζει η γωνία προσβολής του μοντέλου. Προφανώς, αποτελούν μία προσέγγιση διότι τα ζεύγη μετρήσεων είναι μόλις 4 αλλά δεν παύουν να είναι καλές αυτές οι προσεγγίσεις επειδή καλύπτουν σχεδόν όλο το μήκος της χορδής και τα ζεύγη είναι πιο πυκνά στο εμπρός τμήμα όπου οι πιέσεις παίρνουν μεγάλες τιμές και παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παραγόμενη άντωση.



Διάγραμμα 10. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης κατά μήκος της αεροτομής (+ γωνίες)



Διάγραμμα 11. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης κατά μήκος της αεροτομής (- γωνίες)

Τα συμπεράσματα και οι διαπιστώσεις που προκύπτουν από τα διαγράμματα 6,7,8,9,10 και 11 είναι ότι ο συντελεστής διαφορικής πίεσης αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της γωνίας προσβολής για τα 3 πρώτα ζεύγη. Το ίδιο συμβαίνει και με το συντελεστή άντωσης C_I και για μικρές γωνίες προσβολής στις αεροτομές που εξέτασε ο Abbott [26]. Ο συντελεστής άντωσης όμως προκύπτει από την ολοκλήρωση του $CD_p(x)$ από 0 έως απόσταση c [27]. Εξάλλου, για το ζεύγος οπών 7-8 η μεταβολή του συντελεστή δεν είναι γραμμική όπως θα έπρεπε θεωρητικά και μάλιστα στο μεγαλύτερο μέρος της έχει αρνητική κλίση. Η ροή στο οριακό στρώμα δηλαδή, είναι αποκολλημένη σε αντίθεση με τα άλλα 3 ζεύγη οπών. Αυτό πιθανώς οφείλεται στη γεωμετρία της αεροτομής καθώς στο κάτω μέρος της μετά το 65% του c αυξάνεται αρκετά η καμπυλότητά της προκαλώντας έτσι αστάθειες ίσως και μικρές φυσαλίδες αποκόλλησης. Επίσης, ο αριθμός Re της ροής δεν είναι αρκετά μεγάλος ώστε η ροή να είναι πλήρως προσκολλημένη στην αεροτομή και πιθανόν το οριακό στρώμα να αποκολλάται πριν το 90% του c όπου και βρίσκεται το εν λόγω ζεύγος.

Παρόλο όμως που η καμπύλη στο ζεύγος 7-8 έχει αυτή τη μορφή, το εύρος των τιμών του συντελεστή πίεσης είναι σημαντικά μικρό (0,35 ή 26Pa) σε σχέση με το εύρος από τα υπόλοιπα ζεύγη και μάλιστα κοντά στο μηδέν. Επιβεβαιώνεται δηλαδή η συνθήκη των Kutta-Joukowski για το χείλος εκφυγής που θέλει τη διαφορά πίεσης εκεί να είναι μηδέν. Οι οπές 7-8 βρίσκονται στο 90% της χορδής οπότε δικαιολογούνται οι τιμές κοντά στο μηδέν.

Εντύπωση όμως, προκαλεί το γεγονός ότι η κλίση για τις καμπύλες των διαγραμμάτων 6,7 και 8 αλλά και του 9 φαίνεται να αλλάζει ελαφρώς στις 4 αλλά και -4 μοίρες. Η υπόθεση που μπορεί να γίνει σε αυτή την περίπτωση, είναι ότι υπάρχουν 'φαινόμενα εμποδισμού' ή αλλιώς blockage effects στην αεροσήραγγα [18]. Είναι γεγονός ότι το πλάτος της αεροσήραγγας δεν είναι αρκετά μεγάλο (50cm) ώστε να εξαλείψει τα φαινόμενα αυτά. Έτσι, όταν το μοντέλο ξεπεράσει τις 4 ή -4 μοίρες το στένεμα που δημιουργείται ανάμεσα στα τοιχώματα του τομέα μετρήσεων και της πτέρυγας επιταχύνει τη ροή πάνω από αυτή και

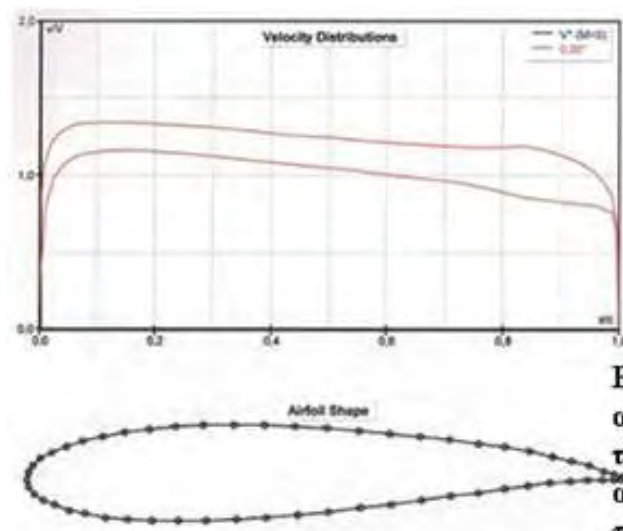
φαινομενικά ανεβαίνει ελαφρώς η άντωση. Το ίδιο συμβαίνει και στο απόρευμα (όπισθεν) της πτέρυγας όπου ένας τομέας έχει σημαντικά χαμηλότερες ταχύτητες από αυτή της ροής ενώ οι τομείς κοντά στα τοιχώματα παρουσιάζουν επιτάχυνση προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η μαζική παροχή. Εξάλλου, τα τοιχώματα έχουν την τάση να μειώνουν τεχνητά την καμπυλότητα των γραμμών ροής και έτσι το μοντέλο παρουσιάζεται να έχει περισσότερο κάμπερ (camber) από ότι στην πραγματικότητα και συνεπώς να παράγει φαινομενικά περισσότερη άντωση.

Συμπληρωματικά συμπεράσματα είναι ότι καμπύλη της κατανομής παραμένει ίδια σε μορφή αλλά ανεβαίνει ή μειώνεται καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής του μοντέλου (διαγράμματα 10 και 11). Μαζί όμως με την καμπύλη μεταβάλλεται και η παραγόμενη άντωση που όπως φαίνεται είναι μηδενική για γωνία -4° . Η αύξηση όμως αυτή, αποκλίνει από τη γραμμική συμπεριφορά όπως ακριβώς συμβαίνει και στα διαγράμματα 6, 7, 8 και 9 - υπάρχει ένα 'σκαλοπάτι' μετά τις 4° και -4° αντίστοιχα. 'Σκαλοπάτι' παρατηρείται ακόμα και στο συντελεστή πίεσης μετά τις οπές 3-4 σε απόσταση 22,5% της χορδής και σε υψηλές μοίρες, πράγμα το οποίο πιθανολογείται ότι οφείλεται σε παρουσία φλύκταινας (separation bubble) στην περιοχή αυτή. Παρόμοιες έρευνες[19] έδειξαν ότι η φλύκταινα αλλάζει σημαντικά την κατανομή πίεσης στην αεροτομή και κυρίως σε μεγάλες γωνίες προσβολής (πβ διάγραμμα 10 καμπύλη-8 degrees).

3.1.1.α Σύγκριση των μετρήσεων με το πρόγραμμα JAVA FOIL

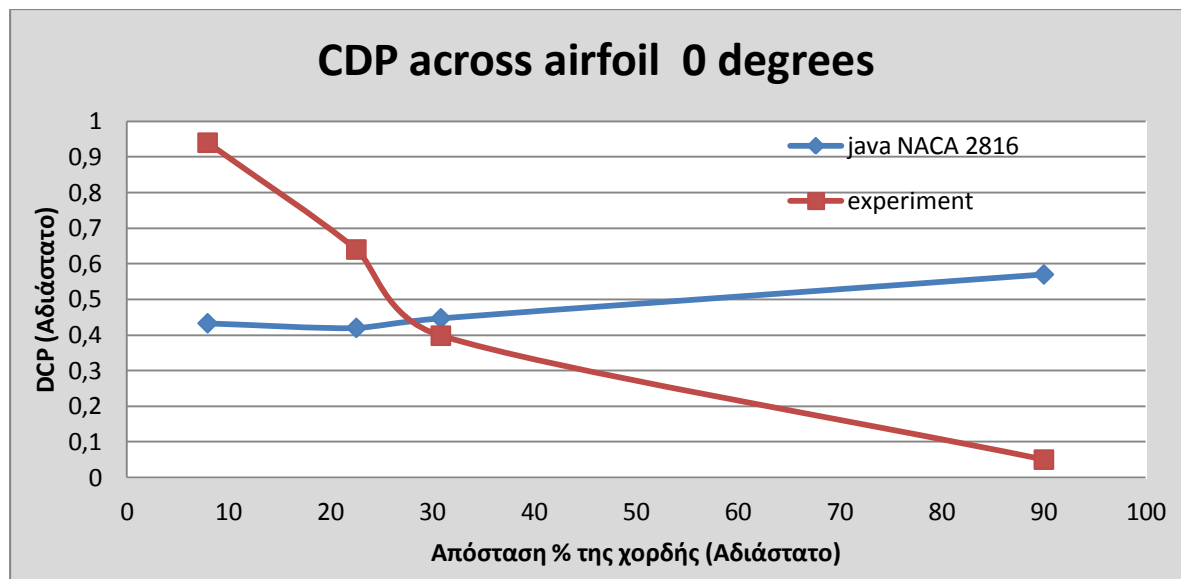
Η σύγκριση των μετρήσεων με τη θεωρία είναι απαραίτητη για να σχηματισθεί μια εικόνα της απόκλισης των συνθηκών του πειράματος από τις ιδανικές συνθήκες. Οι θεωρητικές τιμές των συντελεστών πίεσης θα μπορούσαν να αντληθούν από το βιβλίο του Abbott και Doenhoff 'Theory of wing sections' το οποίο όμως δεν περιλαμβάνει διαγράμματα της NACA 2816 ή αεροτομής που είναι κοντά σε αυτή. Έτσι, η σύγκριση έγινε

από το πρόγραμμα JAVA FOIL το οποίο υπολογίζει και παρουσιάζει τις σχετικές καμπύλες από μία μεγάλη γκάμα των αεροτομών NACA 4-digit. Συγκεκριμένα, το JAVA FOIL μπορεί να υπολογίσει την αδιάστατη κατανομή ταχυτήτων u/U_∞ της πάνω και της κάτω πλευράς της αεροτομής στις επιθυμητές γωνίες προσβολής. Η κατανομή αυτή δίνεται είτε σε διάγραμμα όπως το παρακάτω (εικόνα 8), είτε σε δύο στήλες, με τη μία στήλη να αντιπροσωπεύει συγκεκριμένες θέσεις της αεροτομής και την άλλη να αντιπροσωπεύει την αδιάστατη ταχύτητα u/U_∞ σε αυτές τις θέσεις. Από την αδιάστατη ταχύτητα και γνωρίζοντας αυτή της ελεύθερης ροής (11m/s), προκύπτει η δυναμική πίεση κάθε σημείου και αφαιρώντας την από την δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής, προκύπτει η στατική πίεση. Έτσι, είναι εύκολη η κατασκευή των κατάλληλων διαγραμμάτων για τη σύγκριση των μετρήσεων με τις τιμές που υπολογίζει το πρόγραμμα.

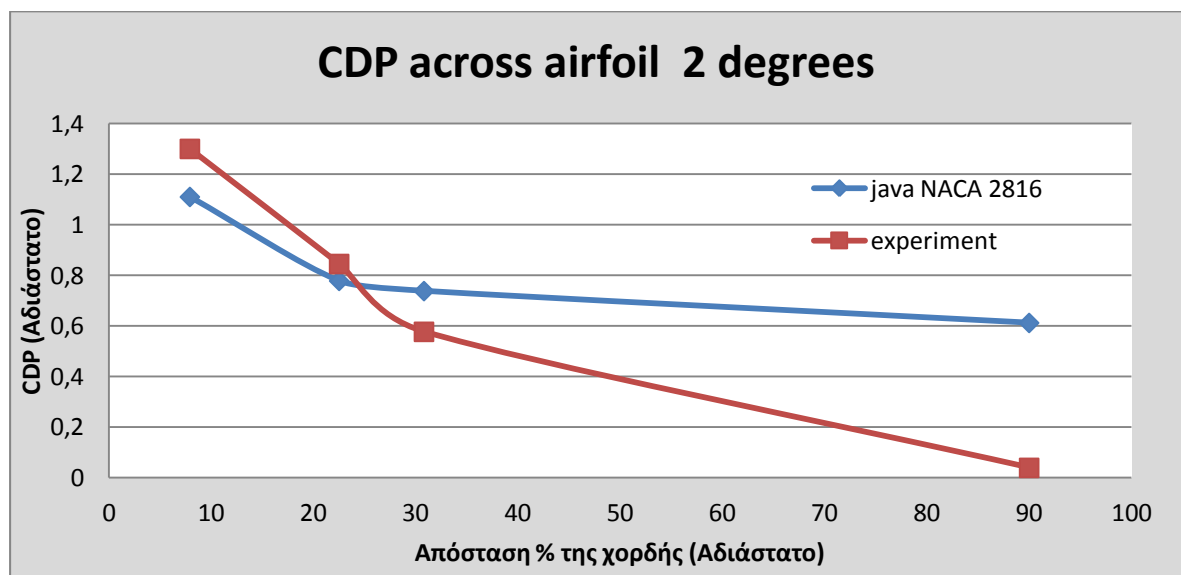


Εικόνα 8. Το διάγραμμα της αδιάστατης ταχύτητας u/U_∞ για την πάνω και κάτω πλευρά της αεροτομής NACA 2816 σε γωνία προσβολής 0 μοίρες-JAVA FOIL.

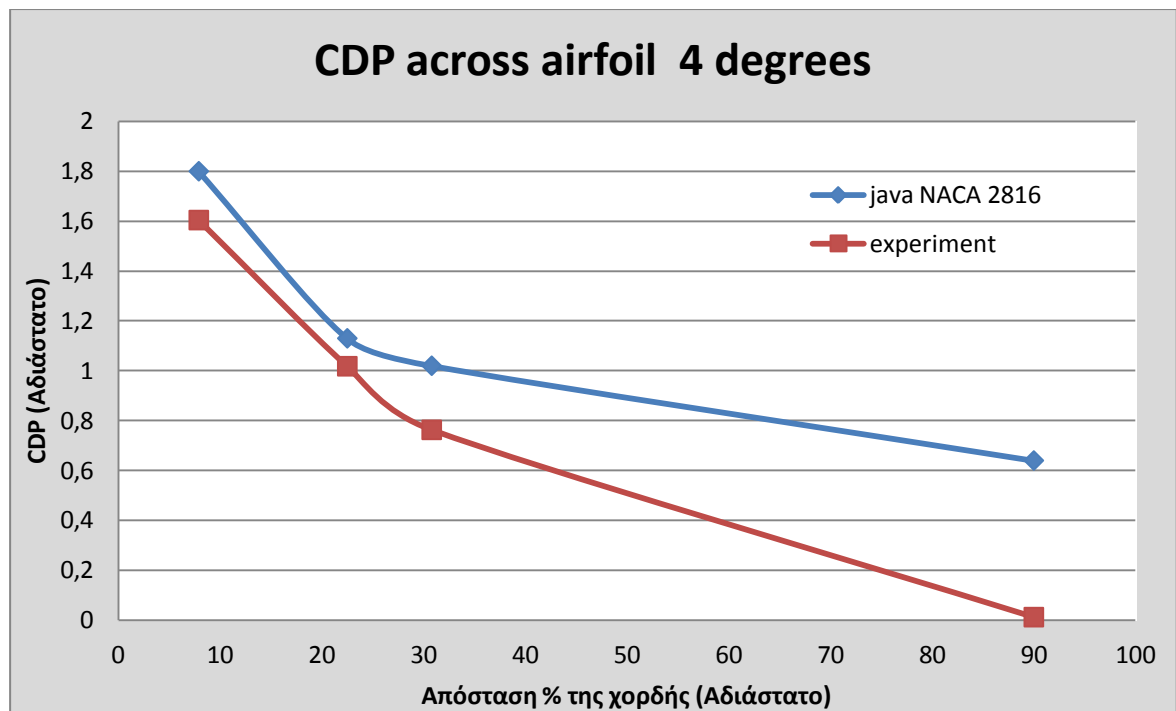
Ακολουθούν, τα διαγράμματα της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης κατά μήκος της αεροτομής για όλες γωνίες προσβολής του πειράματος, με την κόκκινη καμπύλη να αντιπροσωπεύει τις τιμές των μετρήσεων και τη μπλε τις τιμές από το πρόγραμμα JAVA FOIL.



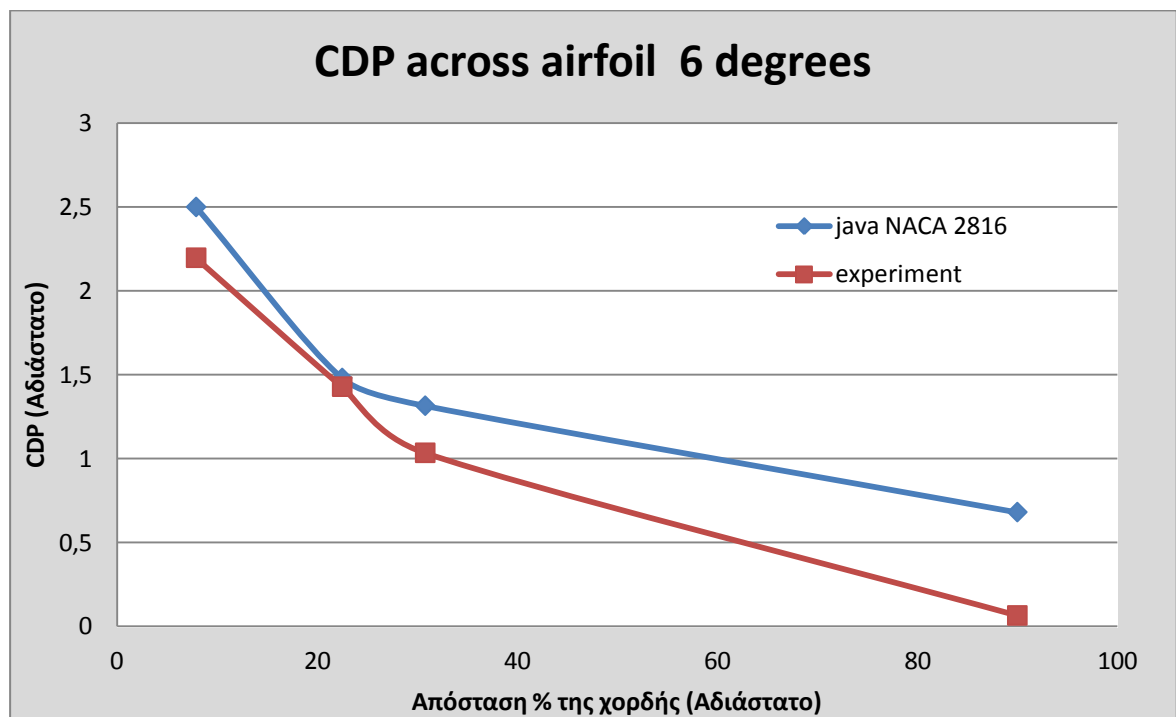
Διάγραμμα 12. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για 0 μοίρες γωνία προσβολής.



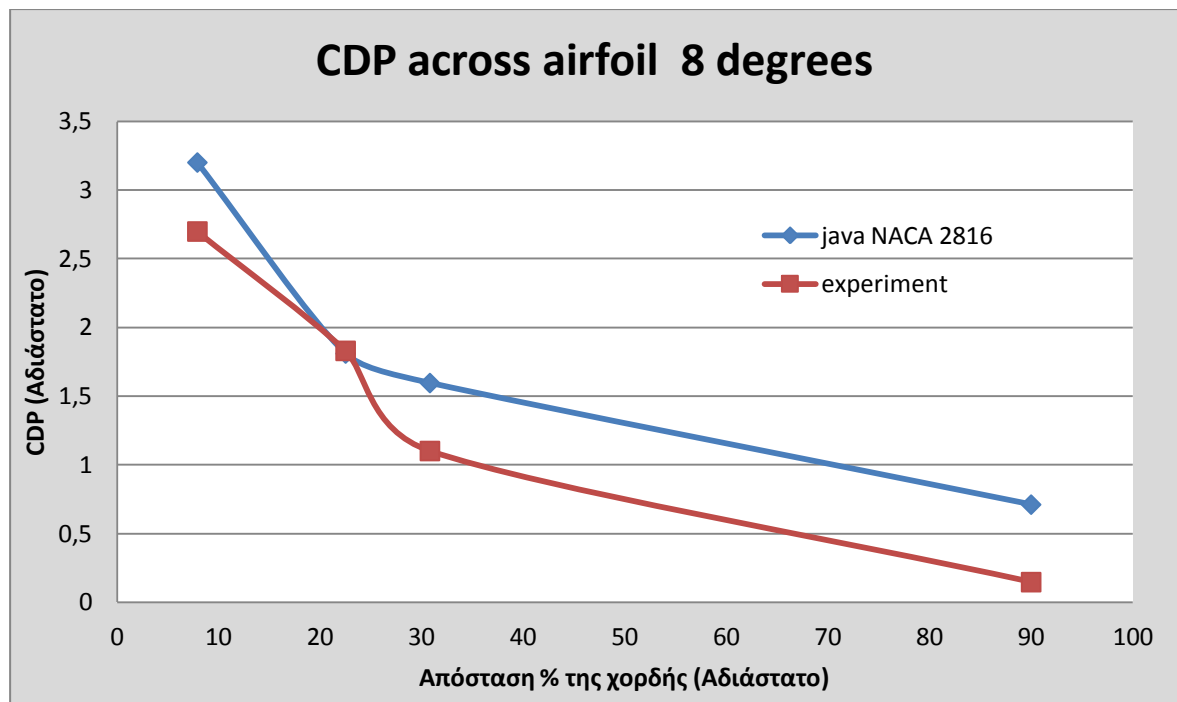
Διάγραμμα 13. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για 2 μοίρες γωνία προσβολής.



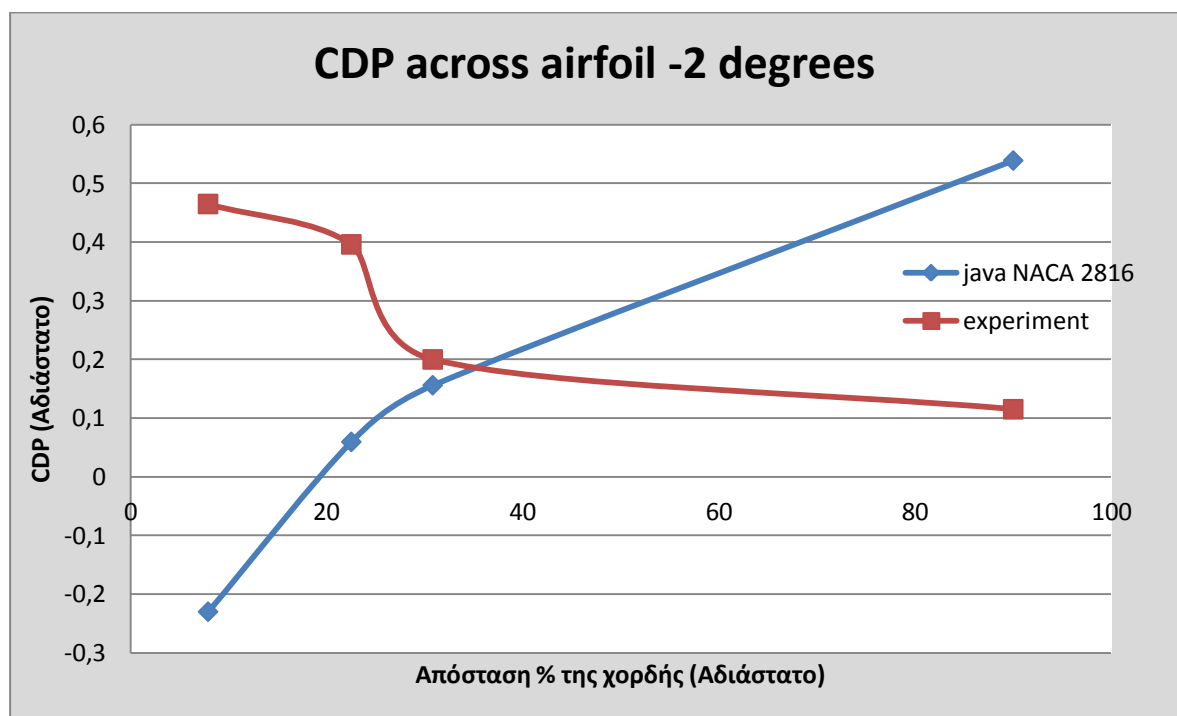
Διάγραμμα 14. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για 4 μοίρες γωνία προσβολής.



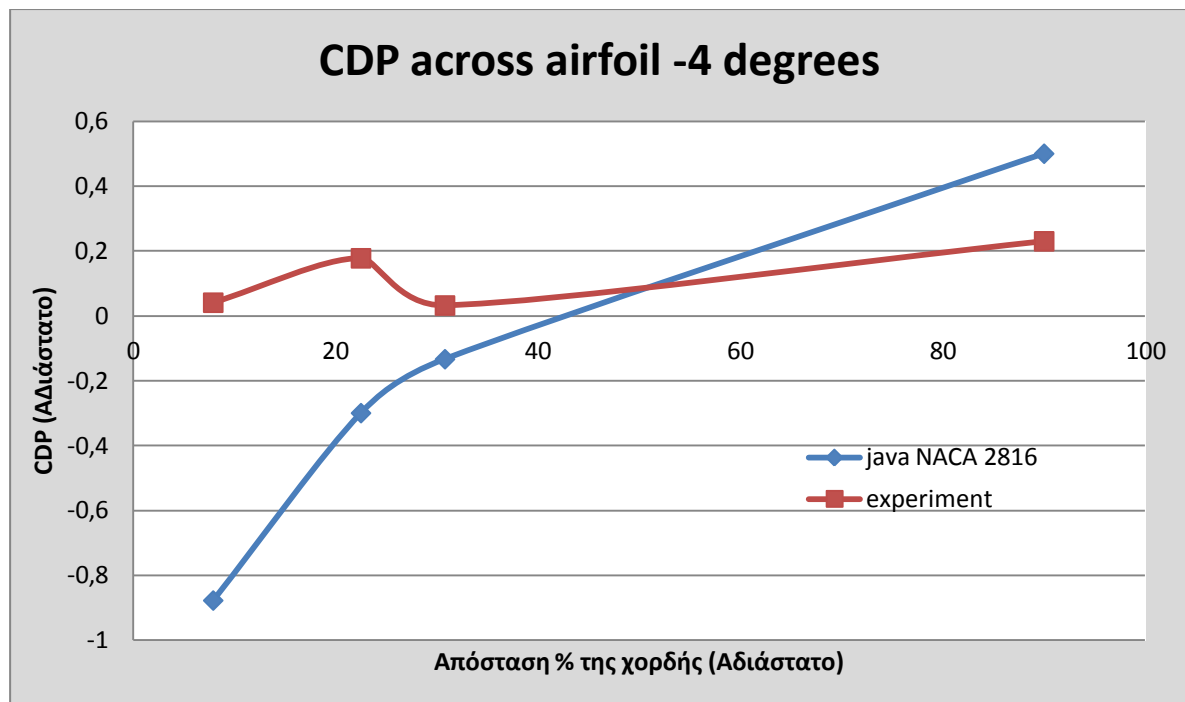
Διάγραμμα 15. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για 6 μοίρες γωνία προσβολής.



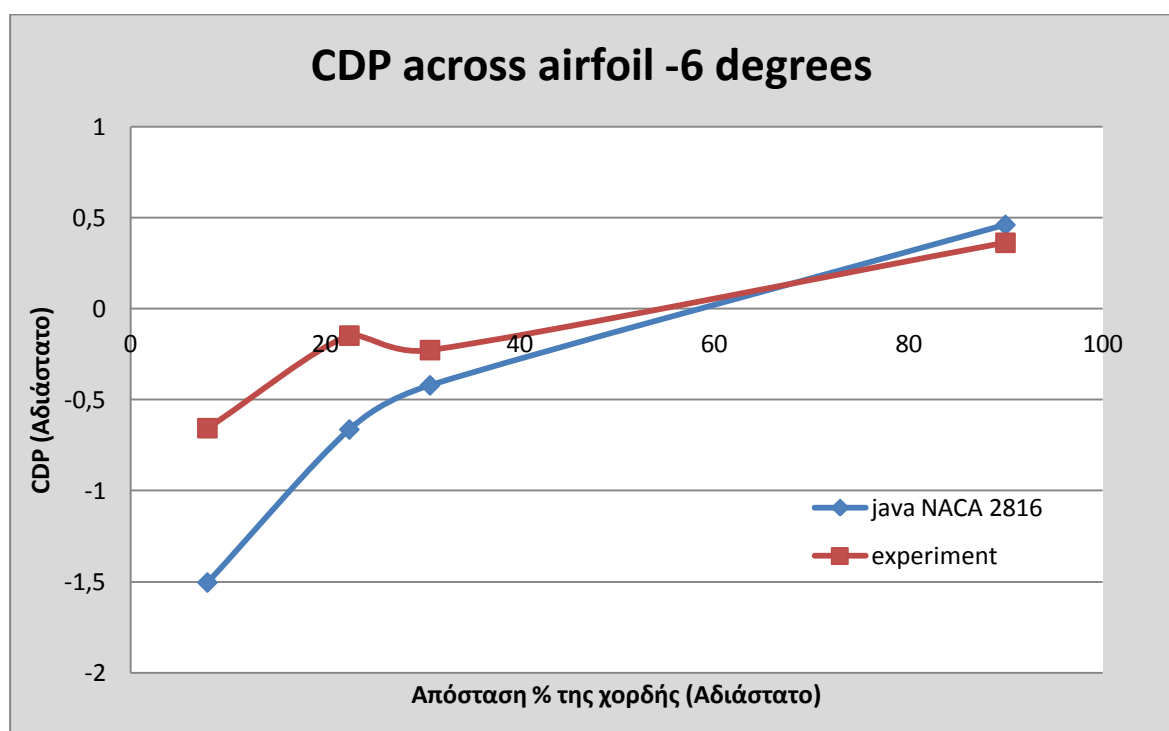
Διάγραμμα 16. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για 8 μοίρες γωνία προσβολής.



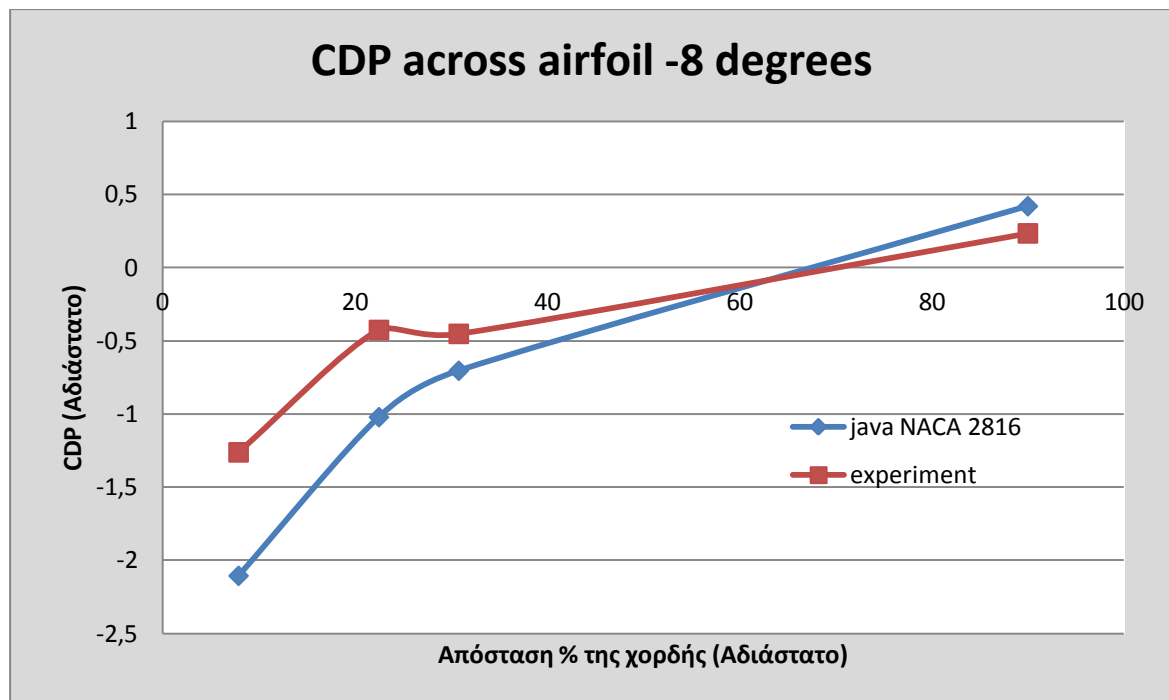
Διάγραμμα 17. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για -2 μοίρες γωνία προσβολής.



Διάγραμμα 18. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για -4 μοίρες γωνία προσβολής.



Διάγραμμα 19. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για -6 μοίρες γωνία προσβολής.



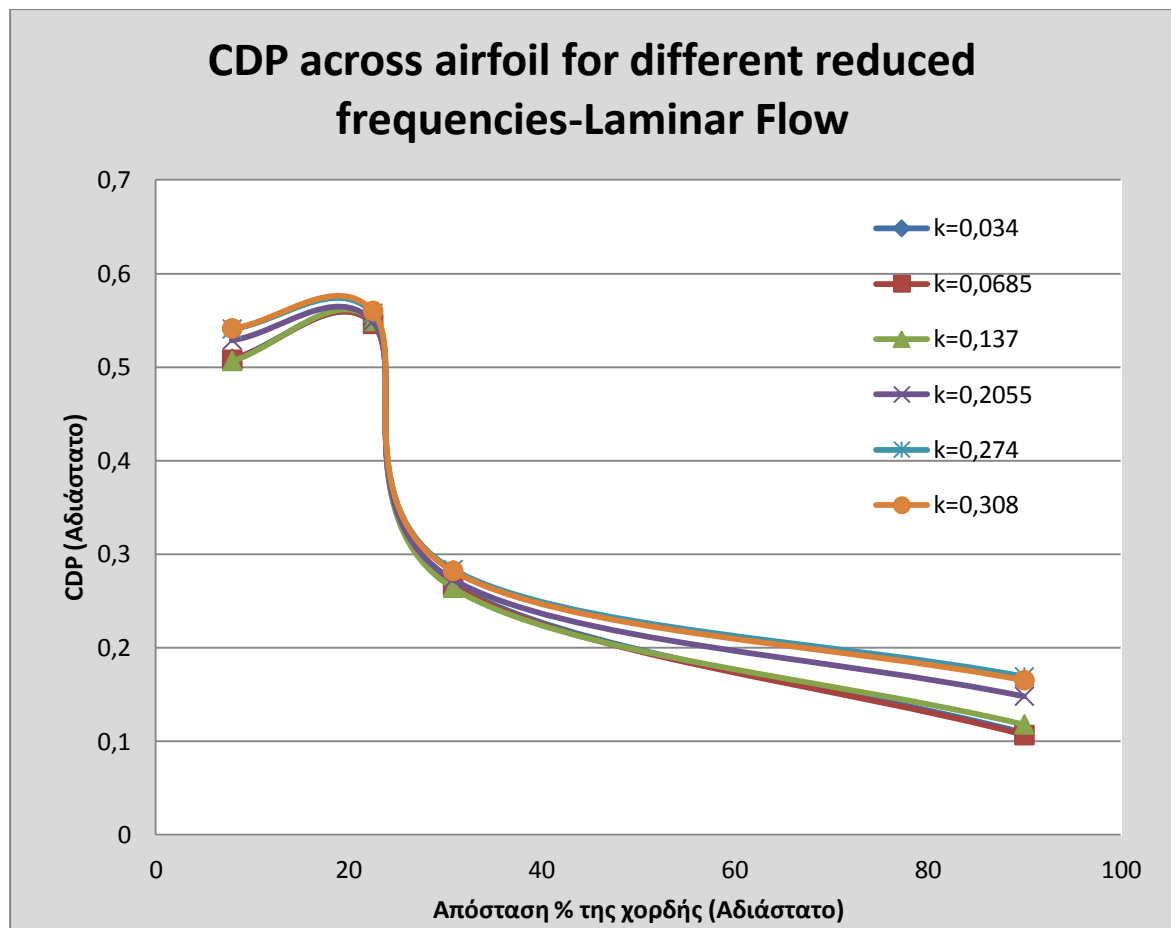
Διάγραμμα 20. Αντιπαραβολή των μετρήσεων με τις τιμές από το JAVA FOIL, της κατανομής του συντελεστή διαφορικής πίεσης για -8 μοίρες γωνία προσβολής.

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από την παραπάνω σύγκριση επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι το πείραμα δε διεξήχθη σε ιδανικές συνθήκες. Οι τιμές κατά κύριο λόγο δε συμπίπτουν μεταξύ τους, παρόλα αυτά, η μορφή της καμπύλης στις περισσότερες γωνίες προσβολής είναι σχεδόν ίδια για το πρόγραμμα και τις μετρήσεις. Οι διαφορετικές τιμές για την περίπτωση των μετρήσεων οφείλεται στην τραχύτητα της πτέρυγας, στην παρουσία έστω και μικρής τύρβης στην αεροσήραγγα, στα blockage effects, στο γεγονός ότι οι οπές των ζευγών δεν είναι ακριβώς η μία κάτω από την άλλη και τέλος στο ότι η αεροτομή του μοντέλου με την αεροτομή NACA 2816 παρουσιάζει μικρές διαφορές. Επίσης, είναι γεγονός ότι η πτέρυγα τρισδιάστατη – δεν τοποθετήθηκαν δηλαδή end plates πράγμα το οποίο εισάγει νέα φαινόμενα που προκαλούν διαφοροποιήσεις από την ιδανική κατάσταση. Μεγάλες δε, αποκλίσεις παρατηρούνται στις καμπύλες των 0, -2, -4 μοιρών και πιθανώς σε αυτές να έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο η διαφορετική γεωμετρία των αεροτομών.

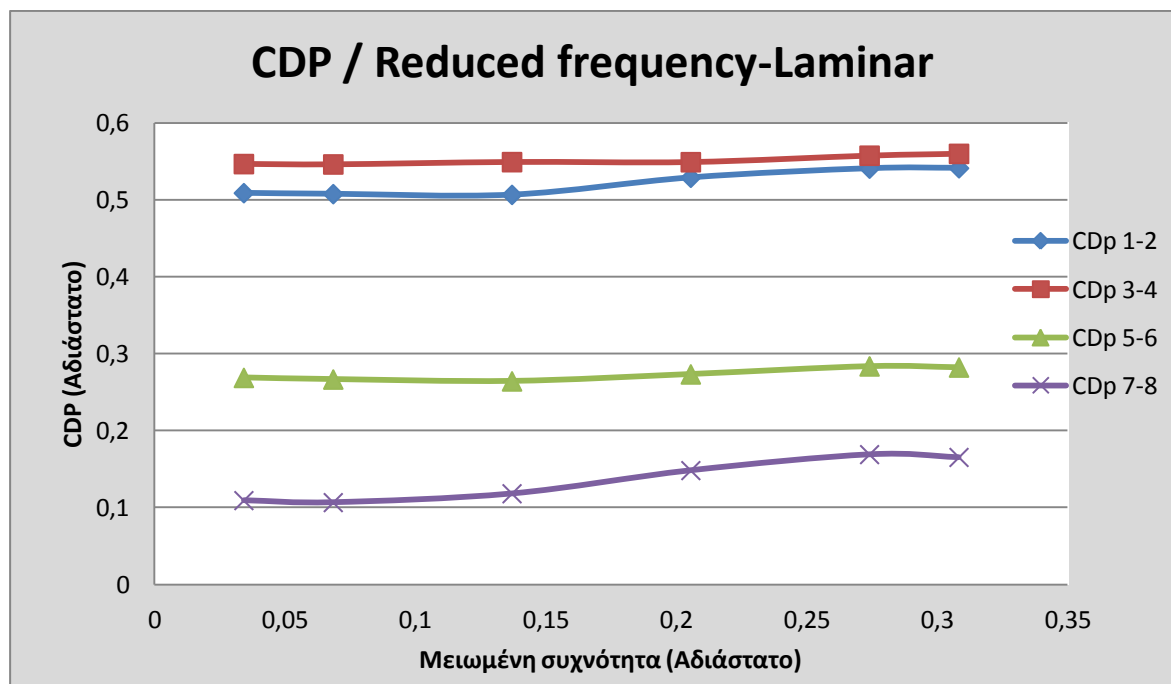
3.1.2 Μετρήσεις πιέσεων σε στρωτή ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση

Ο σκοπός αυτού του υποκεφαλαίου είναι να δείξει την επίδραση της συχνότητας ταλάντωσης του μοντέλου, στο συντελεστή διαφορικής πίεσης των ζευγών των οπών αλλά και της κατανομής πίεσης της αεροτομής. Ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστού διαφορικής πίεσης προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.1. και λήφθηκαν υπόψη οι μέσες τιμές πίεσης. Ωστόσο, θα ήταν καλύτερο αντί της συχνότητας ταλάντωσης, στο διάγραμμα, να φαίνεται η μειωμένη συχνότητα (reduced frequency) λόγω της φυσικής της σημασίας. Ο τύπος που δίνει τη μειωμένη συχνότητα σύμφωνα με τον McCroskey είναι ο $k=\omega c/2V$ ενώ οι Liiva και Dadone χρησιμοποιούν την παραλλαγή αυτού που είναι $k=\pi f c/V$ όπου c η χορδή της αεροτομής, f η συχνότητα ταλάντωσης και V η ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Η φυσική σημασία του αριθμού k είναι η συσχέτιση του μήκους κύματος μιας διαταραχής με το μήκος της χορδής της αεροτομής. Όταν ο αριθμός k είναι της τάξης του 1, τότε σύμφωνα με τον McCroskey [20] τα ασταθή αεροδυναμικά φαινόμενα λαμβάνουν σημαντικές διαστάσεις. Έτσι, τα ασταθή αυτά φαινόμενα που συμβαίνουν π.χ. σε ένα αεροσκάφος (full scale model) για να τα αναπαραστήσει κάποιος σε μία αεροσήραγγα θα πρέπει ο αριθμός k μοντέλου-αεροσκάφους να είναι ο ίδιος.

Έτσι, το διάγραμμα 21 που ακολουθεί δείχνει την εξέλιξη της κατανομής του συντελεστού διαφορικής πίεσης στην αεροτομή του μοντέλου με τη μεταβολή της τιμής της μειωμένης συχνότητας k ενώ το διάγραμμα 22 τη μεταβολή του συντελεστή στα ζεύγη των οπών συναρτήσει και πάλι της τιμής k . Στο παρόν πείραμα, το εύρος ταλάντωσης ήταν -12° έως $+12^\circ$, η συχνότητα ταλάντωσης του μοντέλου δεν ξεπέρασε τα 9Hz λόγω των περιορισμών που θέτει η αντοχή της διάταξης και έτσι η μειωμένη συχνότητα κυμάνθηκε μεταξύ 0,034 και 0,308. Σημειωτέον ότι, η τιμή 0,308 της τάξης μεγέθους του 1. Θα ήταν τέλος, χρήσιμο να αντιπαραβληθεί η κατανομή χωρίς ταλάντωση με αυτή που εμπεριέχει την ταλάντωση από το διάγραμμα 23.



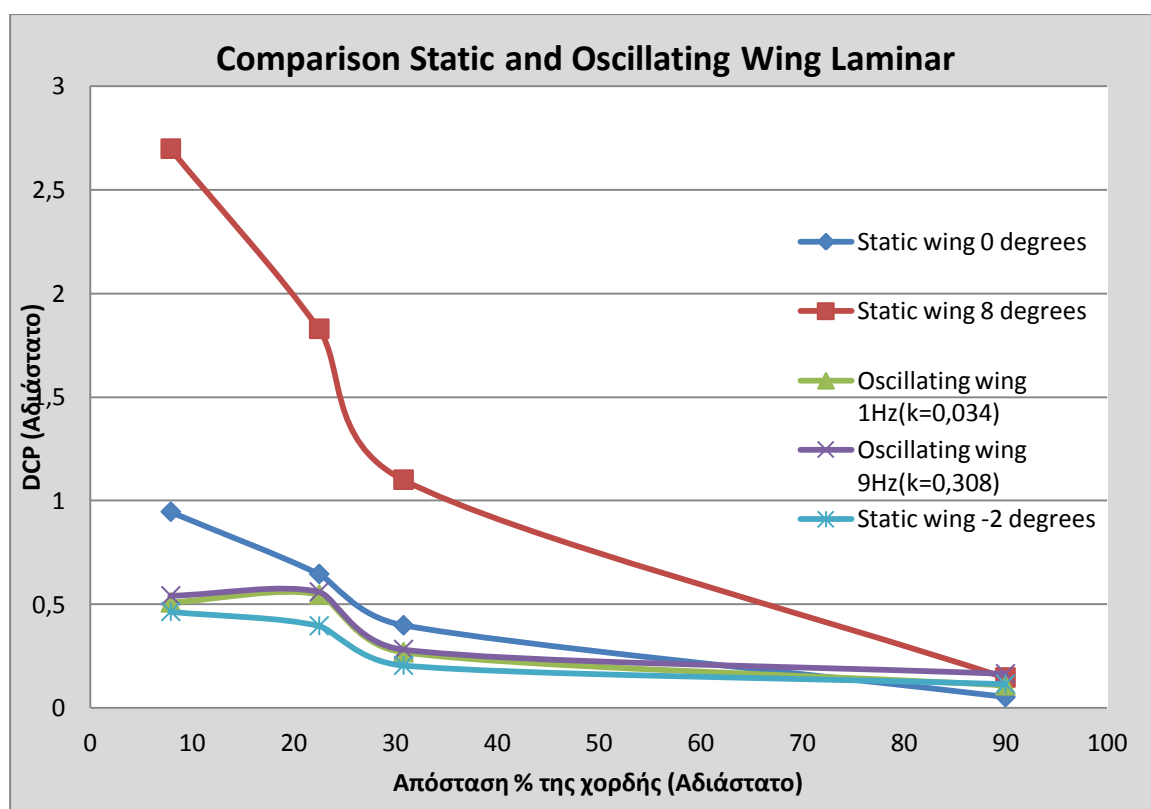
Διάγραμμα 21. Κατανομή συντελεστού διαφορικής πίεσης για διάφορα k -Στρωτή ροή



Διάγραμμα 22. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει του k για τα 4 ζεύγη

Τα προηγούμενα διαγράμματα δείχνουν, άμεσα, ότι η επίδραση της συχνότητας ταλάντωσης είναι ασθενική στις χαμηλές τιμές ενώ, γίνεται αισθητή μετά τα 6Hz ή $k=0,2055$ και ξεχωρίζει στα 8 και 9Hz - δηλαδή για μειωμένη συχνότητα κοντά το 0,3. McCroskey[20]. Η επίδρασή της είναι αισθητή κυρίως στο χείλος προσβολής και εκφυγής της αεροτομής, όπως συμπέρανε ο Mani et Al [10] και ανεπαίσθητη στις ενδιάμεσες θέσεις. Ωστόσο, η τάση των συντελεστών είναι αυξητική με την αύξηση της μειωμένης συχνότητας.

Στη συνέχεια, το διάγραμμα 23 παρουσιάζει το στατικό προφίλ κατανομής πίεσης σε σχέση με το δυναμικό προφίλ που οφείλεται στην ταλάντωση του μοντέλου.



Διάγραμμα 23. Σύγκριση στατικού και δυναμικού προφίλ των κατανομών CDP

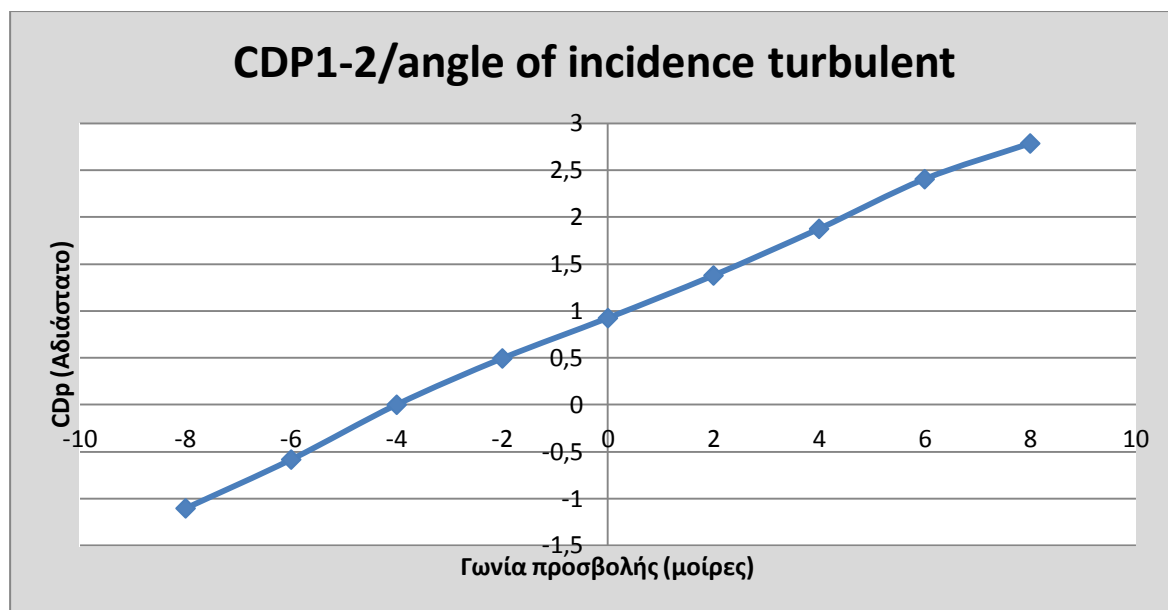
Οι θέσεις που εδόθησαν για τις δύο καταστάσεις της πτέρυγας ήταν χαρακτηριστικές και συγκεκριμένα οι δύο ακραίες θέσεις των μετρήσεων ώστε να υπονοείται η ενδιάμεση κατάσταση. Για την ακίνητη κατάσταση παρουσιάσθηκαν οι κατανομές 0° και 8° και στην ταλαντευόμενη οι κατανομές 1Hz($k=0,034$) και 9Hz($k=0,308$).

Είναι εμφανές ότι η ταλάντωση μειώνει την κατανομή πίεσης οπότε και της παραγόμενης άντωσης σε σχέση με την ακίνητη κατάσταση. Παρόλα αυτά, η κατανομή πίεσης των 0° γωνίας προσβολής είναι ακόμα συγκρίσιμη με αυτή της ταλάντωσης και η κατανομή των -2° μικρότερη της. Επίσης, η μεταβολή των συντελεστών διαφορικής πίεσης λόγω συχνότητας είναι πολύ μικρότερη από τη μεταβολή λόγω γωνίας προσβολής. Η μόνη συγκρίσιμη περιοχή είναι κοντά στο χείλος εκφυγής όπου ο συντελεστής σε κάθε περίπτωση είναι κοντά στο μηδέν επιβεβαιώνοντας τη συνθήκη Kutta – Joukowski. Σημαντικό τέλος είναι ότι η καμπύλη αλλάζει μορφή κατά την ταλάντωση και το μέγιστο (peak) της διαφορικής πίεσης μετακινείται προς τα πίσω, στα 25% της χορδής περίπου.

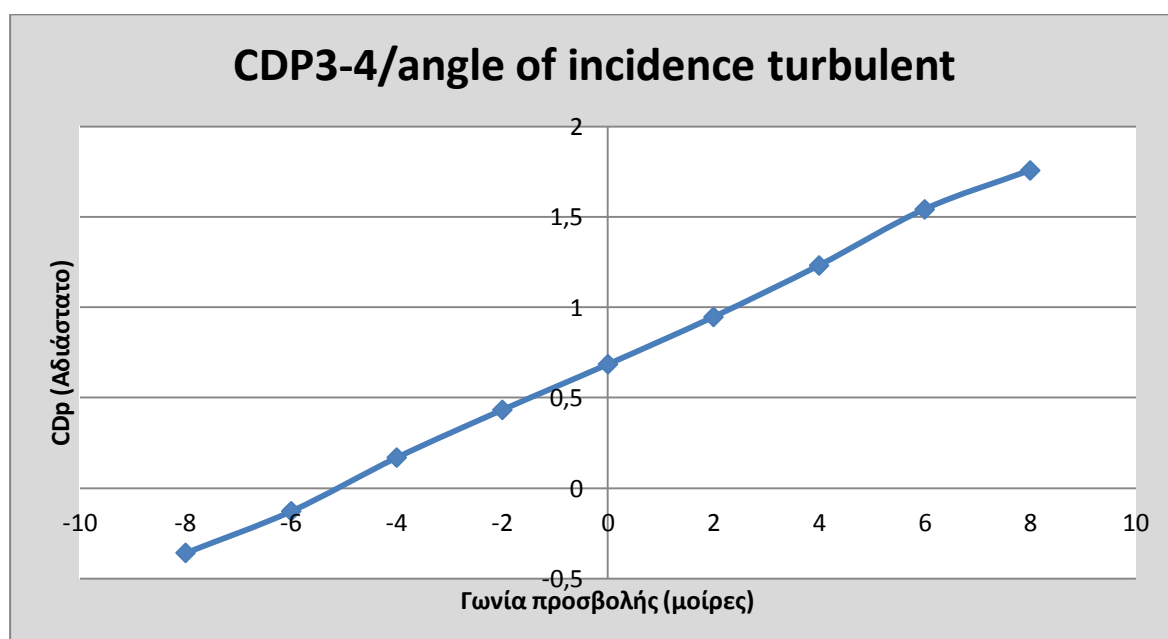
3.2 Μετρήσεις πιέσεων σε τυρβώδη ροή

3.2.1 Μετρήσεις πιέσεων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο ακίνητο

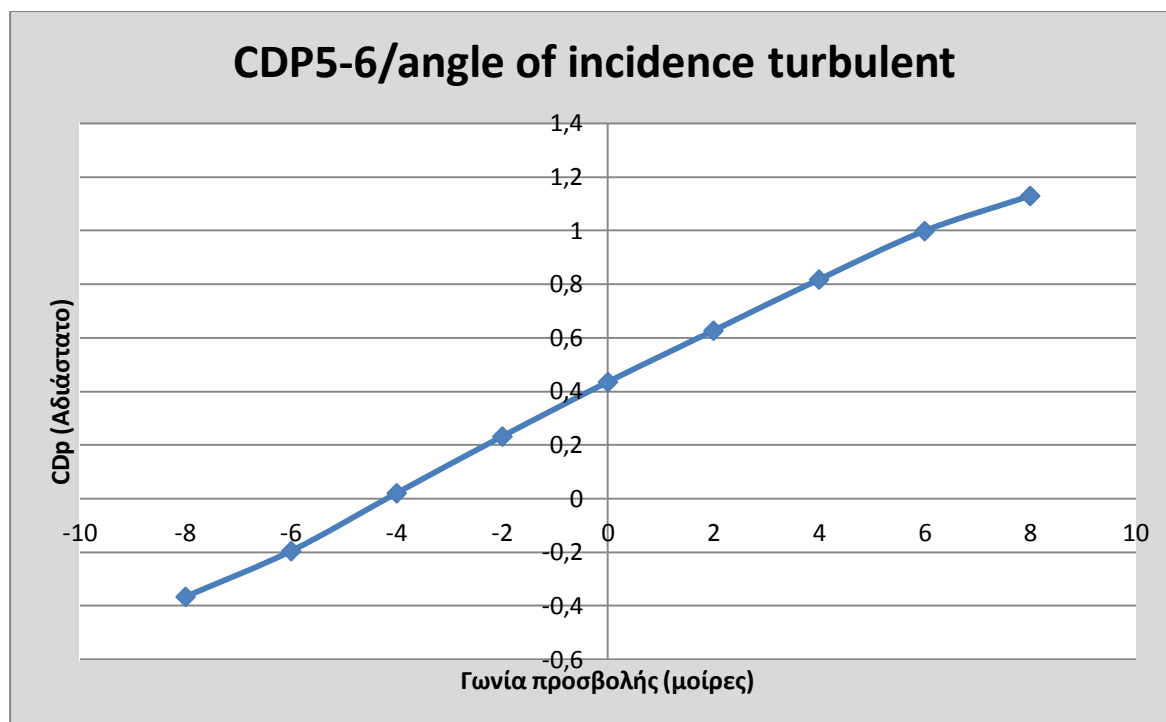
Όπως και στο κεφάλαιο 3.1.1 έτσι και σε αυτό θα παρατεθούν πρώτα τα αντίστοιχα διαγράμματα του συντελεστή διαφορικής πίεσης των ζευγών των οπών συναρτήσει της γωνίας προσβολής και στη συνέχεια τα διαγράμματα των κατανομών πίεσης στην αεροτομή. Ο τρόπος υπολογισμού των τιμών, το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας αλλά και η μέση ταχύτητα ροής δεν άλλαξαν σε σχέση με τη στρωτή ροή. Με την εισαγωγή όμως, του πλέγματος στην αεροσήραγγα η ένταση της τύρβης έφτασε στα 5,82%. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα JAVA FOIL δεν έγινε διότι δεν υπήρχε η δυνατότητα εισαγωγής της παραμέτρου της τύρβης.



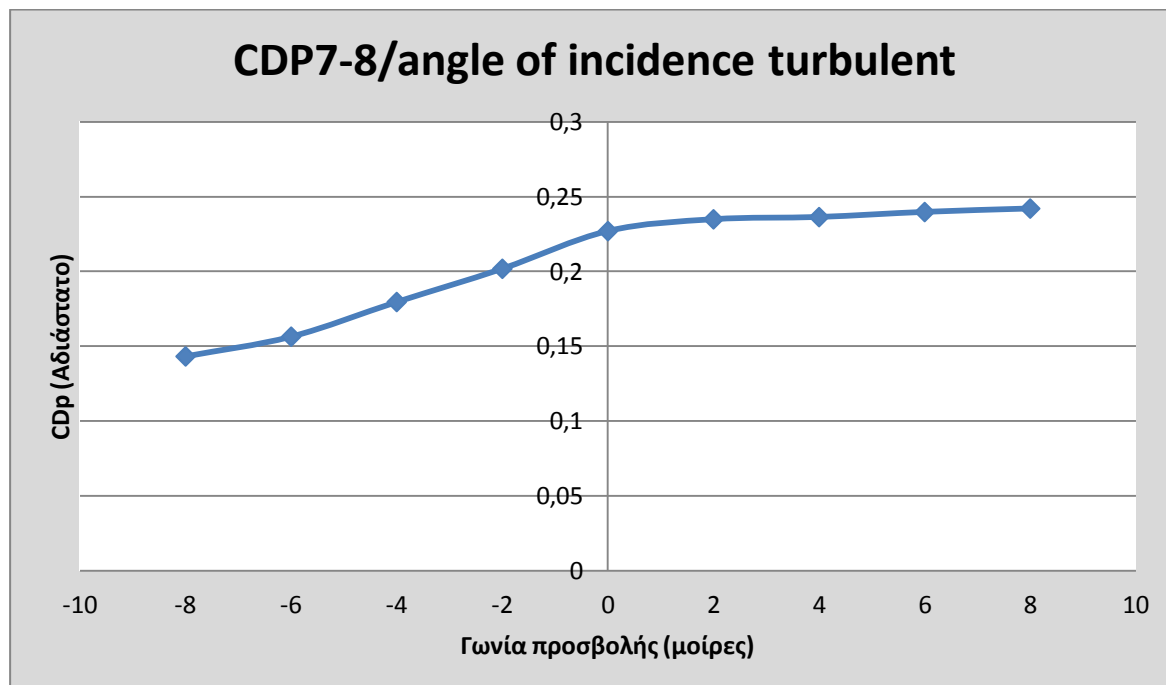
Διάγραμμα 24. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής, οπές 1-2 (7,9% c)



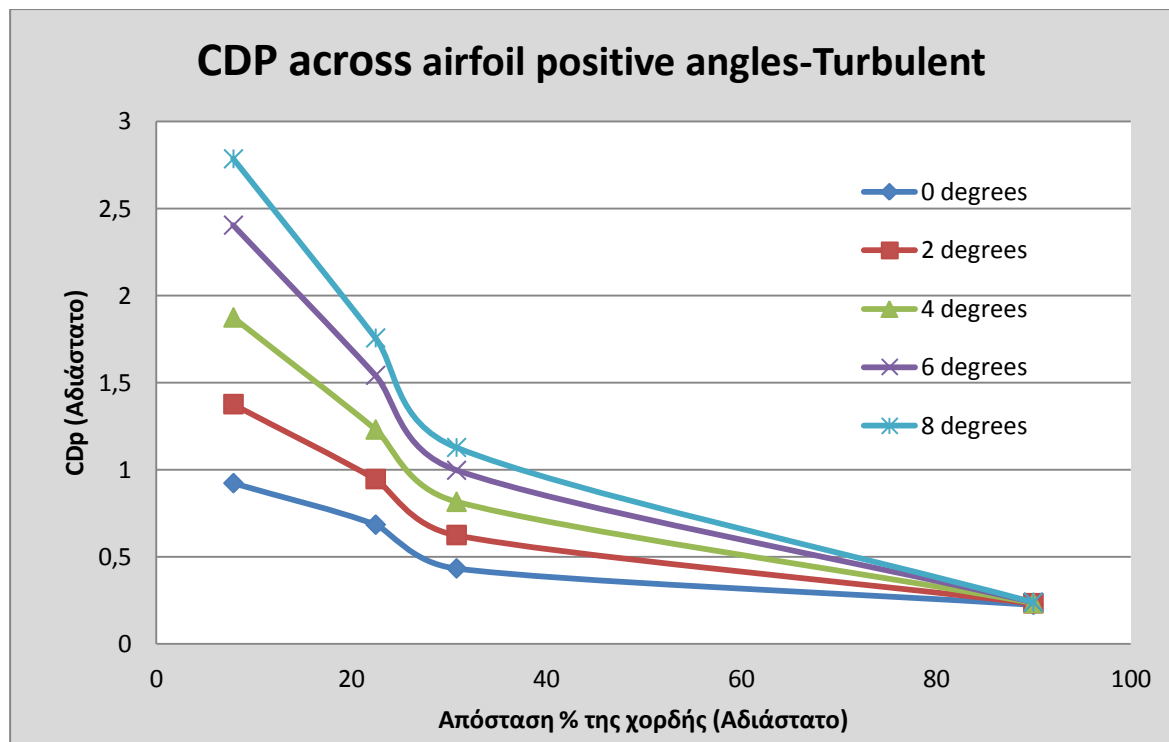
Διάγραμμα 25. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής, οπές 3-4 (22,5% c)



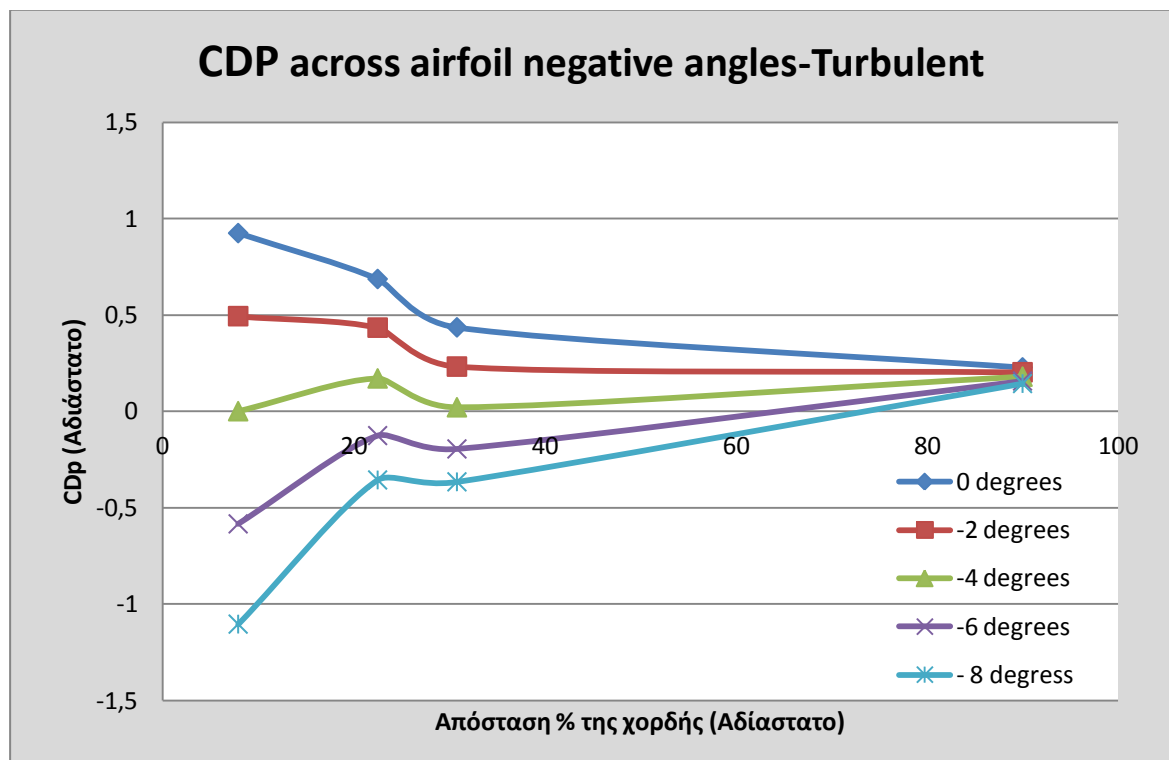
Διάγραμμα 26. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής, οπές 5-6 (30,8% c)



Διάγραμμα 27. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει γωνίας προσβολής, οπές 7-8 (90% c)



Διάγραμμα 28. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης κατά μήκος της αεροτομής (+ γωνίες)



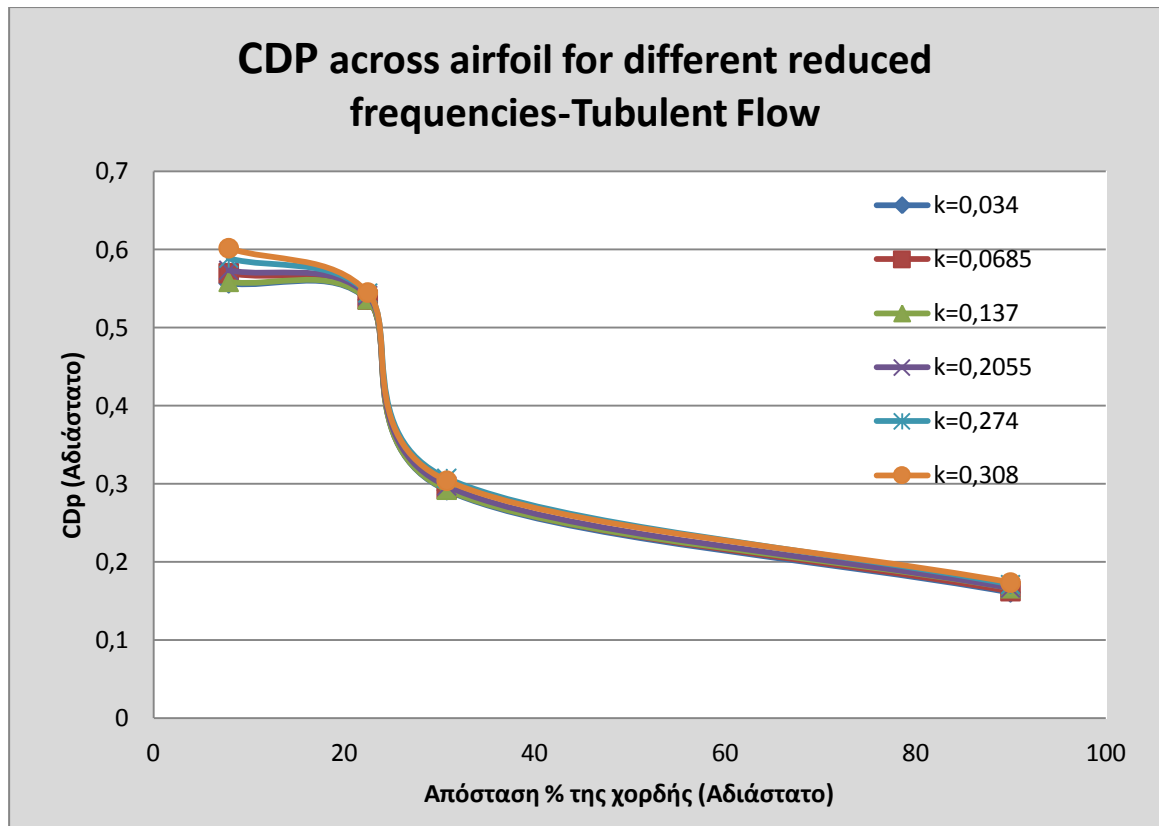
Διάγραμμα 29. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης κατά μήκος της αεροτομής (- γωνίες)

Τα σχόλια που αφορούν τα παραπάνω διαγράμματα δεν διαφέρουν πολύ από τα αντίστοιχα για τη στρωτή ροή. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της γωνίας προσβολής, για τα τρία πρώτα ζεύγη οπών, επιβεβαιώνοντας με αυτό τον τρόπο τη θεωρία. Αντιθέτως, για το ζευγάρι οπών 7-8 η κλίση της καμπύλης έχει μη γραμμική συμπεριφορά, εξακολουθεί όμως η τάση να είναι αυξητική τείνοντας να σταθεροποιηθεί μετά τις 0° γωνίας προσβολής. Όσον αφορά το εύρος τιμών των συντελεστών για το προαναφερθέν ζεύγος οπών, αυτό είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα άλλα τρία ζεύγη (της τάξης του 0,1CDp ή των 7,37Pa διαφοράς πίεσης) και μάλιστα κοντά στο μηδέν επιβεβαιώνοντας τη συνθήκη των Kutta - Joukowski για το χείλος εκφυγής.

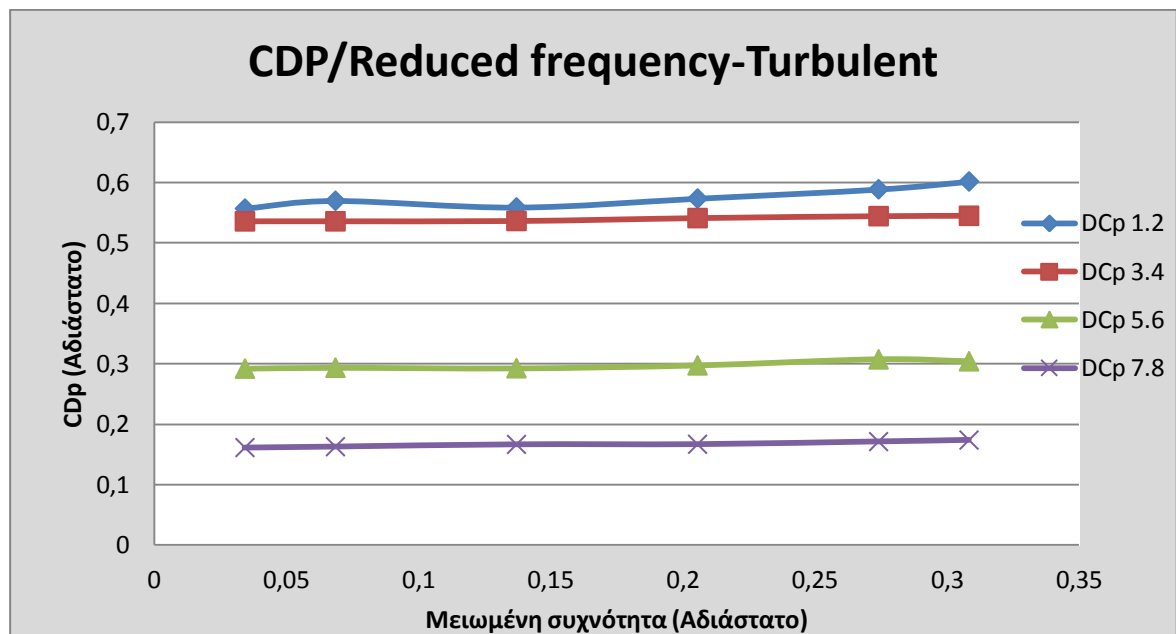
Σχετικά με την κατανομή πίεσης φαίνεται ότι παρουσιάζει ομαλή αύξηση με την αύξηση της γωνίας προσβολής και δεν αλλάζει σε μορφή. Συγκεκριμένα, μεταξύ των οπών 3-4 και 5-6 παρατηρείται και πάλι μια διαβάθμιση στους συντελεστές διαφορικής πίεσης με το πρώτο να ξεπερνά σταθερά το δεύτερο, σε όλο το εύρος γωνιών. Πιθανολογείται πως και πάλι είναι παρούσα μία φλύκταινα στην περιοχή. Η γωνία μηδενικής άντωσης είναι παραμένει κοντά στις -4° .

3.2.2 Μετρήσεις πιέσεων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση

Όπως και στο υποκεφάλαιο 3.1.2 έτσι και σε αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστού διαφορικής πίεσης στις οπές αλλά και της κατανομής του στην αεροτομή συναρτήσει της μειωμένης συχνότητας k για το ίδιο εύρος ταλάντωσης και συχνοτήτων διέγερσης παρουσία όμως του πλέγματος παραγωγής τύρβης.



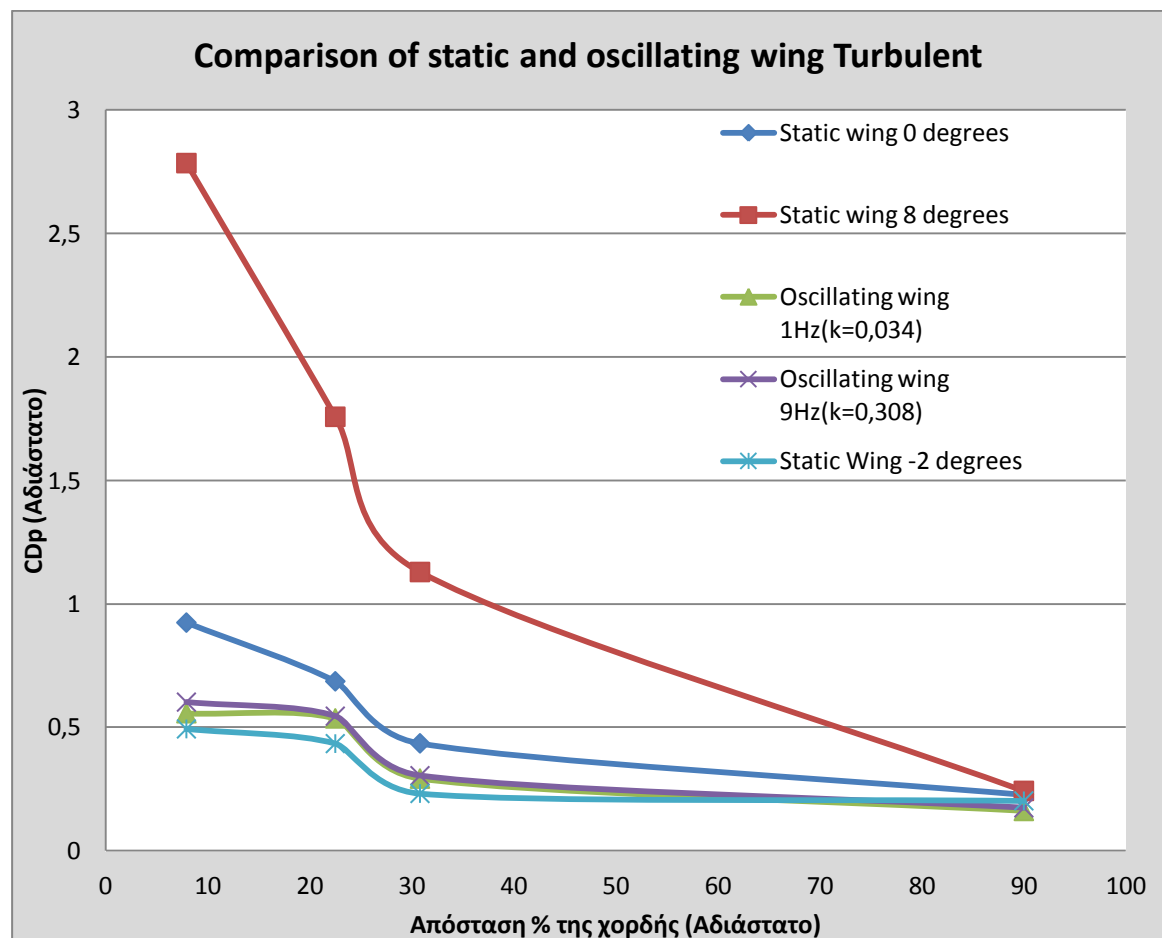
Διάγραμμα 30. Κατανομή συντελεστού διαφορικής πίεσης για διάφορα k -τυρβώδη ροή.



Διάγραμμα 31. Ο συντελεστής διαφορικής πίεσης συναρτήσει του k για τα 4 ζεύγη.

Η ανάλυση των διαγραμμάτων δείχνει ότι η ταλάντωση επέδρασε σημαντικά μόνο στο χείλος προσβολής και συγκεκριμένα μετά από μειωμένη συχνότητα $k = 0,2055$. Τα άλλα ζεύγη παρουσίασαν μόνο ελαφρά αύξηση.

Όπως στη στρωτή ροή έτσι και στην τυρβώδη ακολουθεί η σύγκριση των δύο ακραίων κατανομών, του ακίνητου (0 και 8 μοίρες γωνία προσβολής) και ταλαντευόμενου (1 και 9Hz) μοντέλου.



Διάγραμμα 32. Σύγκριση στατικού και δυναμικού προφίλ των κατανομών CDP

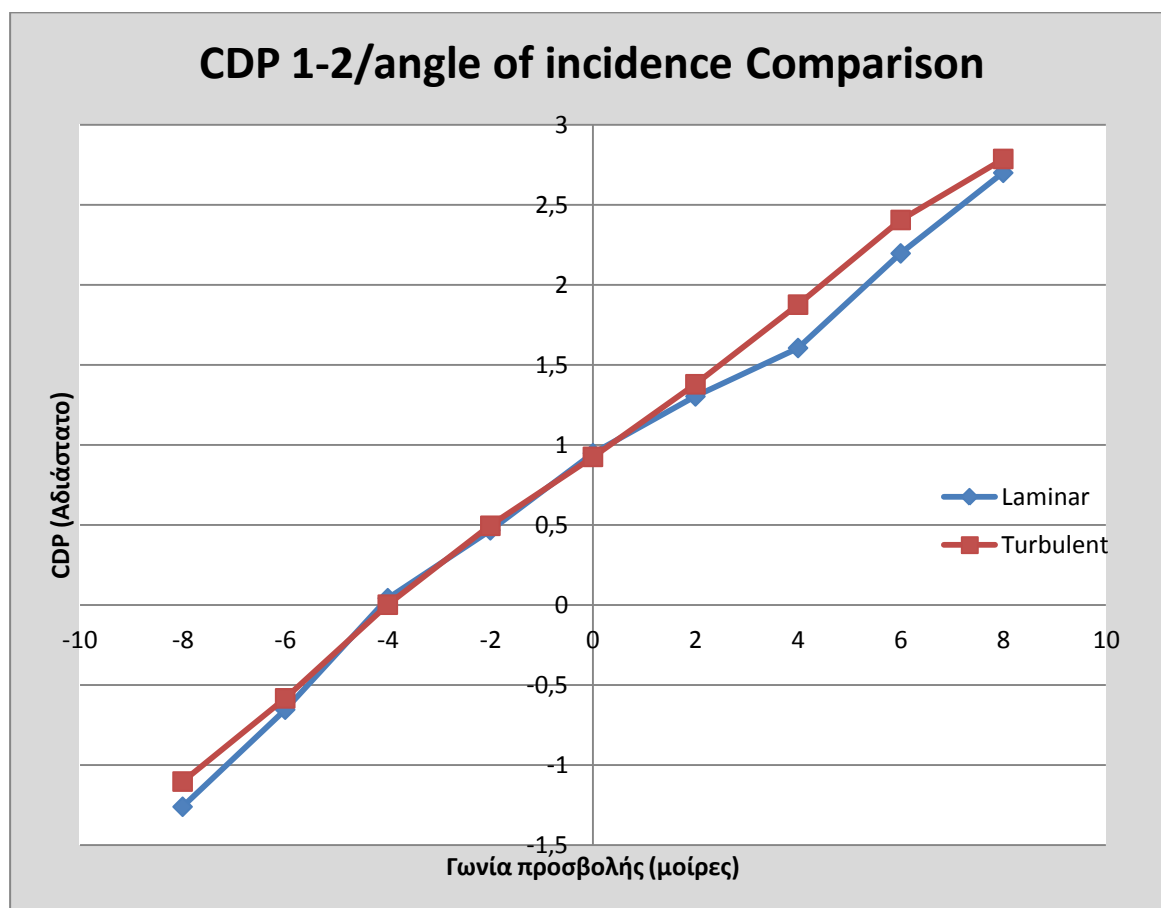
Το διάγραμμα 32 δείχνει ότι η ταλάντωση χαμηλώνει την κατανομή χωρίς όμως να αλλάζει τη μορφή της. Η άντωση είναι χαμηλότερη από αυτή των 0° (μεσαία θέση για την ταλάντωση) αλλά παραμένει υψηλότερη από τις -2° . Οι συντελεστές δεν παρουσίασαν αξιόλογη μεταβολή με τη μειωμένη συχνότητα όπως παρουσίασαν με τη γωνία προσβολής

του μοντέλου. Για ακόμη μια φορά η τιμή του συντελεστή παρέμεινε χαμηλά σε όλες τις περιπτώσεις ως επιβεβαίωση των Kutta – Joukowski.

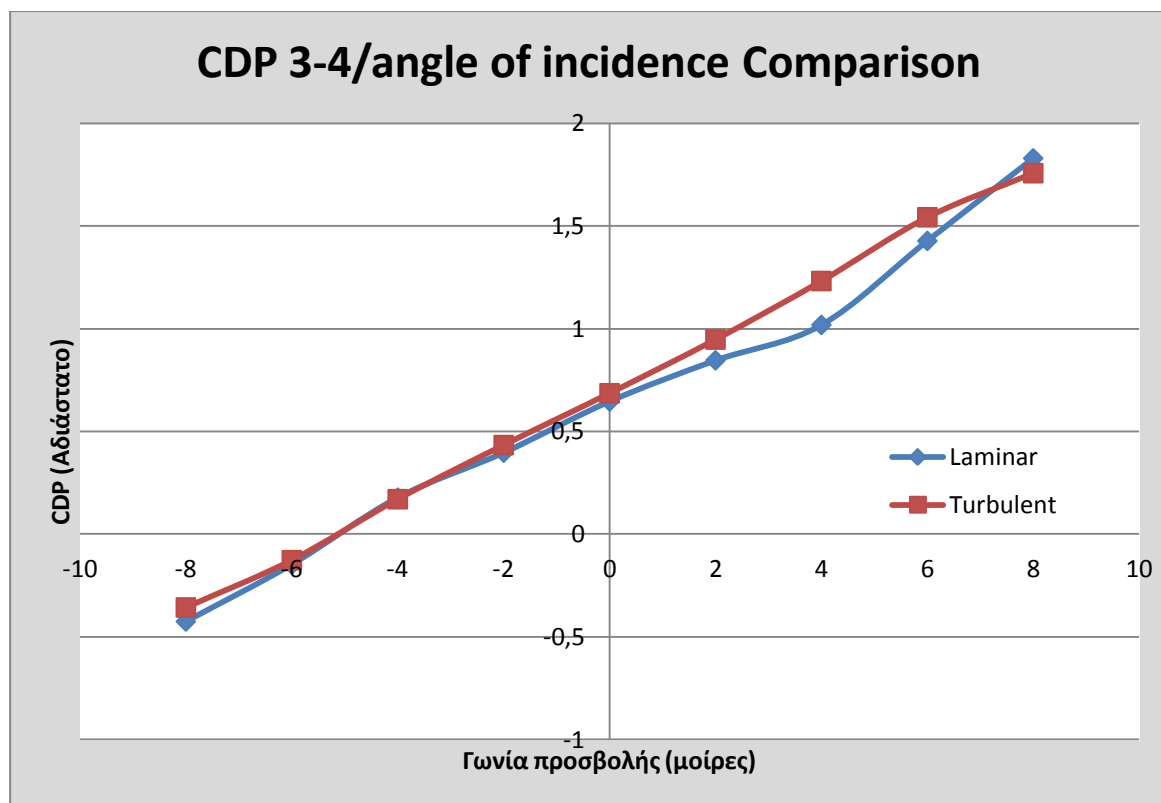
3.3 Σύγκριση των μετρήσεων πίεσης για τη στρωτή και τυρβώδη ροή

3.3.1 Σύγκριση για την περίπτωση του ακίνητου μοντέλου

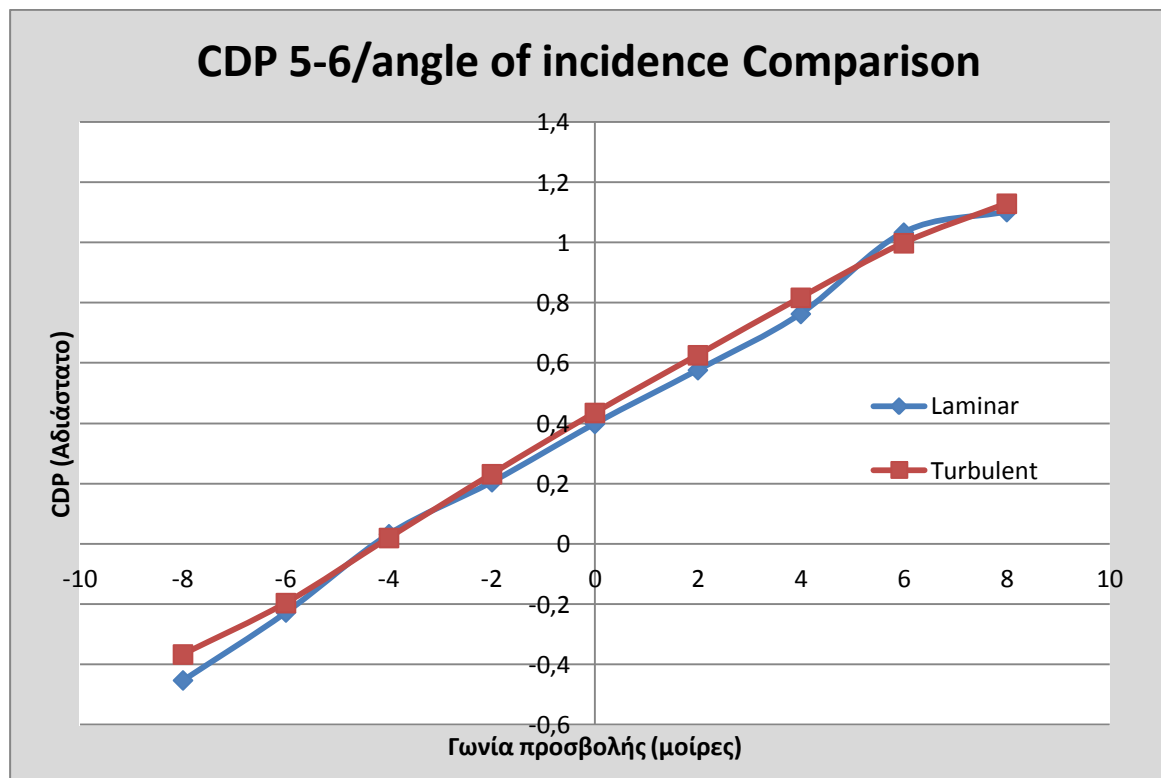
Οι διαφορές μπορούν να καταδειχθούν από τα γνωστά πλέον διαγράμματα των συντελεστών διαφορικής πίεσης των οποίων συναρτήσει της γωνίας προσβολής αλλά και από τα διαγράμματα των κατανομών της αεροτομής. Έτσι, παρουσιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:



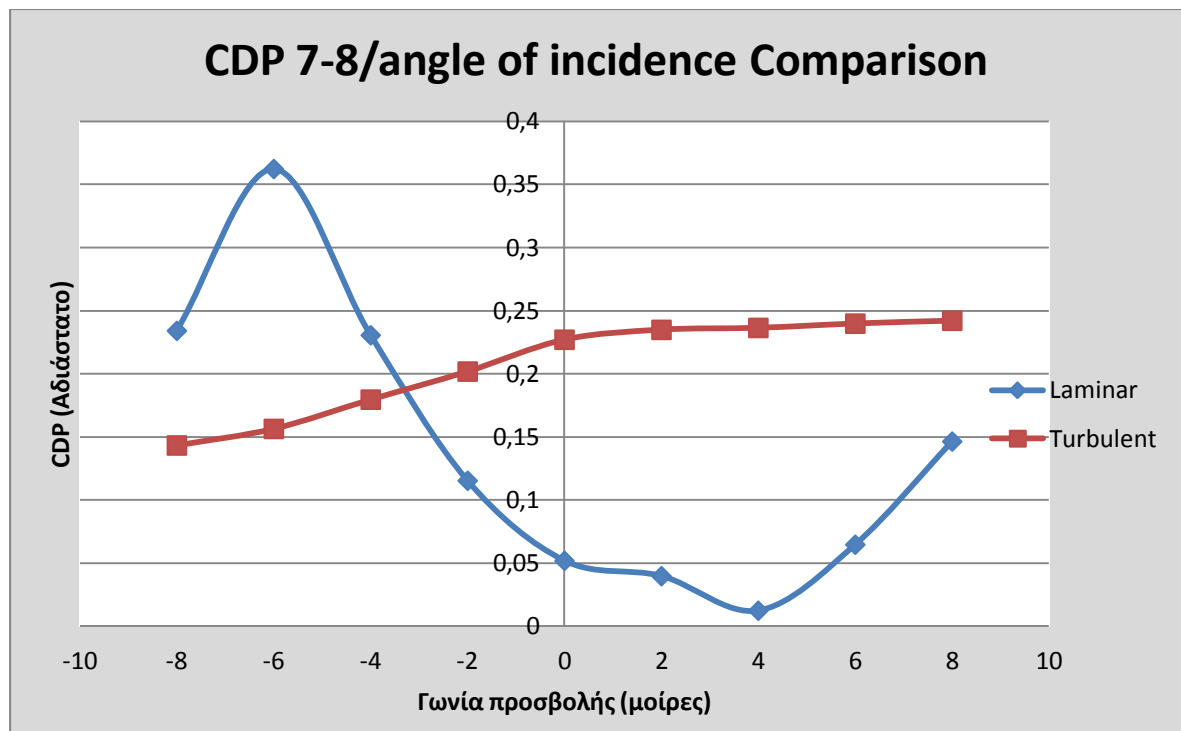
Διάγραμμα 33. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP 1-2 συναρτήσει της γωνίας προσβολής



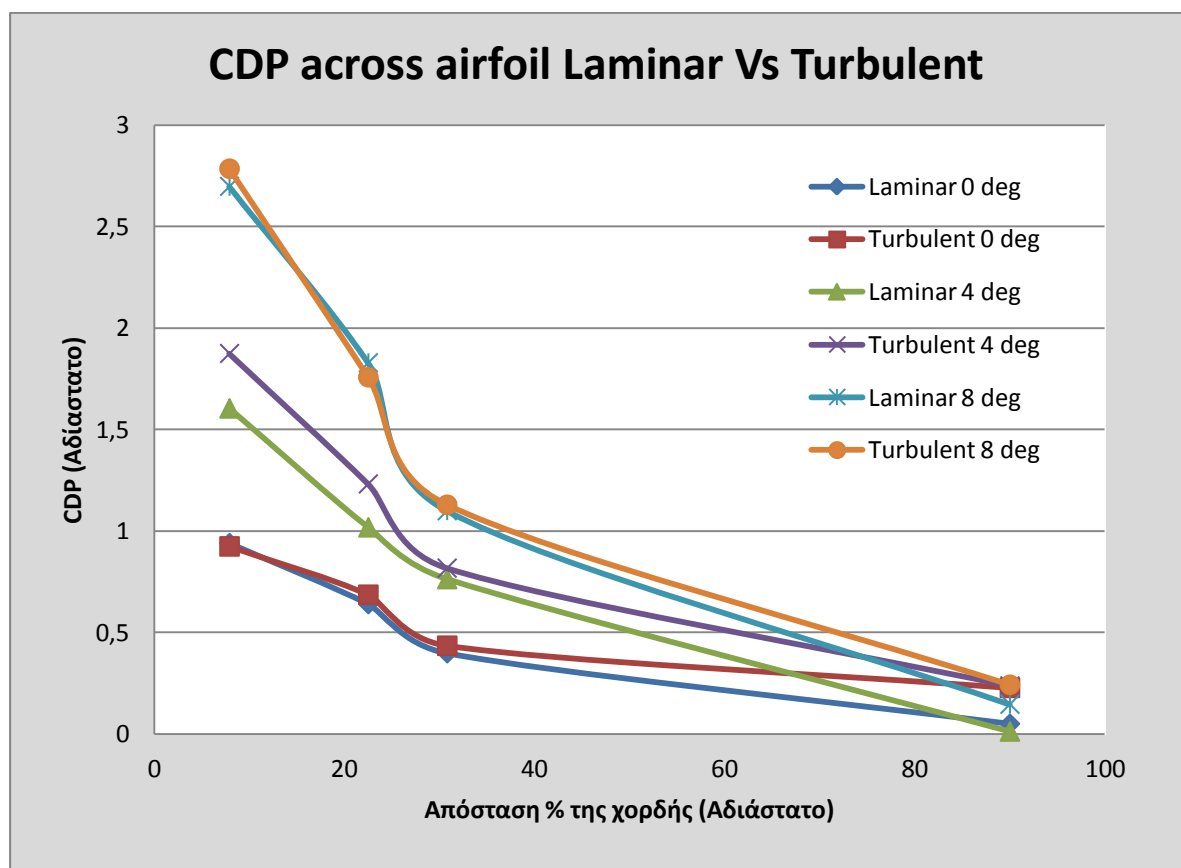
Διάγραμμα 34. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP 3-4 συναρτήσει της γωνίας προσβολής



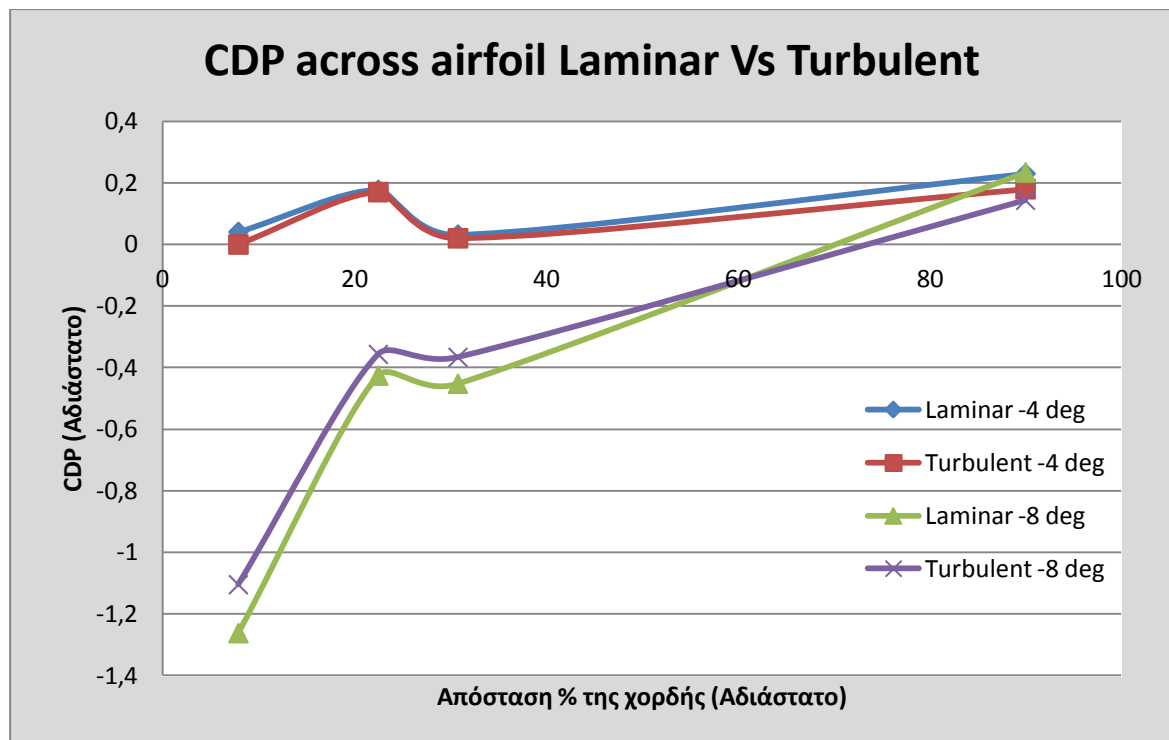
Διάγραμμα 35. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP 5-6 συναρτήσει της γωνίας προσβολής



Διάγραμμα 36. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP 7-8 συναρτήσει της γωνίας προσβολής



Διάγραμμα 37. Συγκριτικό διάγραμμα των κατανομών CDP για τις 0, 4, 8 μοίρες



Διάγραμμα 38. Συγκριτικό διάγραμμα των κατανομών CDP για τις -4 και -8 μοίρες

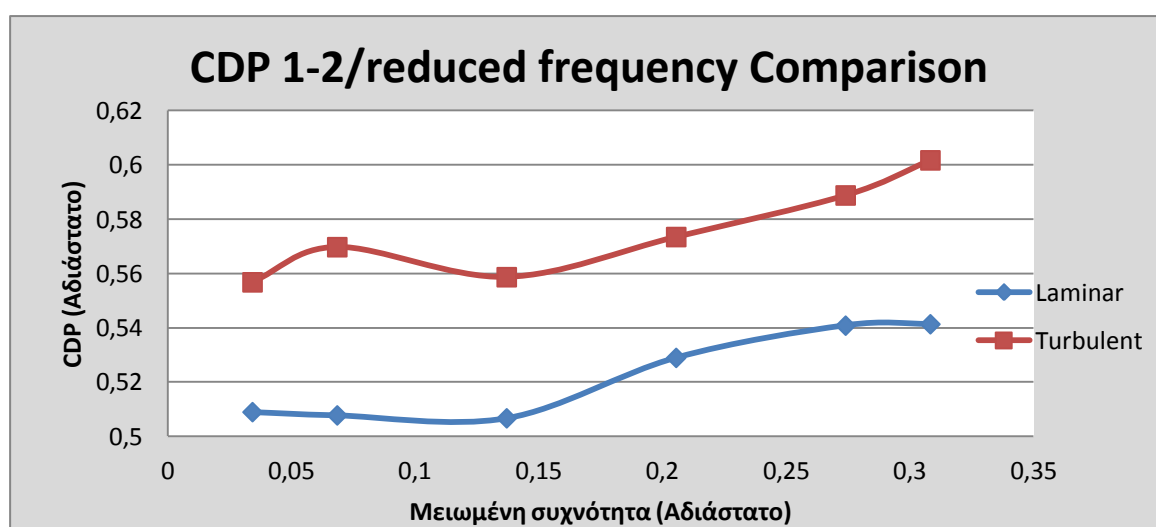
Τα διαγράμματα σύγκρισης έδειξαν ότι η τύρβη επιδρά θετικά στην άντωση της πτέρυγας στην ακίνητη κατάσταση. Ο ισχυρισμός βασίζεται στο ότι, γενικά, οι κατανομές των τυρβωδών ροών είναι ελαφρώς πιο ψηλά από τις κατανομές των στρωτών ροών. Αυτό πρέπει να οφείλεται στο συνδυασμό του αριθμού Re της ροής και της έντασης της τύρβης. Στην τυρβώδη ροή, η μετάπτωση του οριακού στρώματος της αεροτομής, από στρωτό σε τυρβώδες συμβαίνει πιο γρήγορα. Το τυρβώδες οριακό στρώμα έχει περισσότερη ενέργεια και αντέχει καλύτερα στην όποια αντίστροφη βαθμίδα πίεσης συναντά. Έτσι, το σημείο αποκόλλησης της ροής μεταφέρεται πιο κάτω και η άντωση που παράγεται είναι μεγαλύτερη. Είναι γεγονός ότι ο αριθμός Re της ροής είναι σχετικά μικρός (86000) και δεν μπορεί να μην υπάρχουν καθόλου αποκολλήσεις. Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και η εργασία [21] για την αεροτομή NACA 0012 στις 10° όπου εξετάζεται η επίδραση της τύρβης στην κατανομή των πιέσεων και του στατικού stall.

Με βάση τα παραπάνω εξηγείται και η ομαλότερη μεταβολή του συντελεστή διαφορικής πίεσης του ζεύγους 7-8 για την τυρβώδη ροή – διάγραμμα 36. Από την άλλη πλευρά όμως, η σταθερότερη κλίση των τυρβωδών καμπύλων (διαγράμματα 33, 34 και 35) φαίνεται πως οφείλεται στο ότι τα φαινόμενα εμποδισμού (blockage effects) επηρεάζουν περισσότερο τις μετρήσεις στην στρωτή ροή.

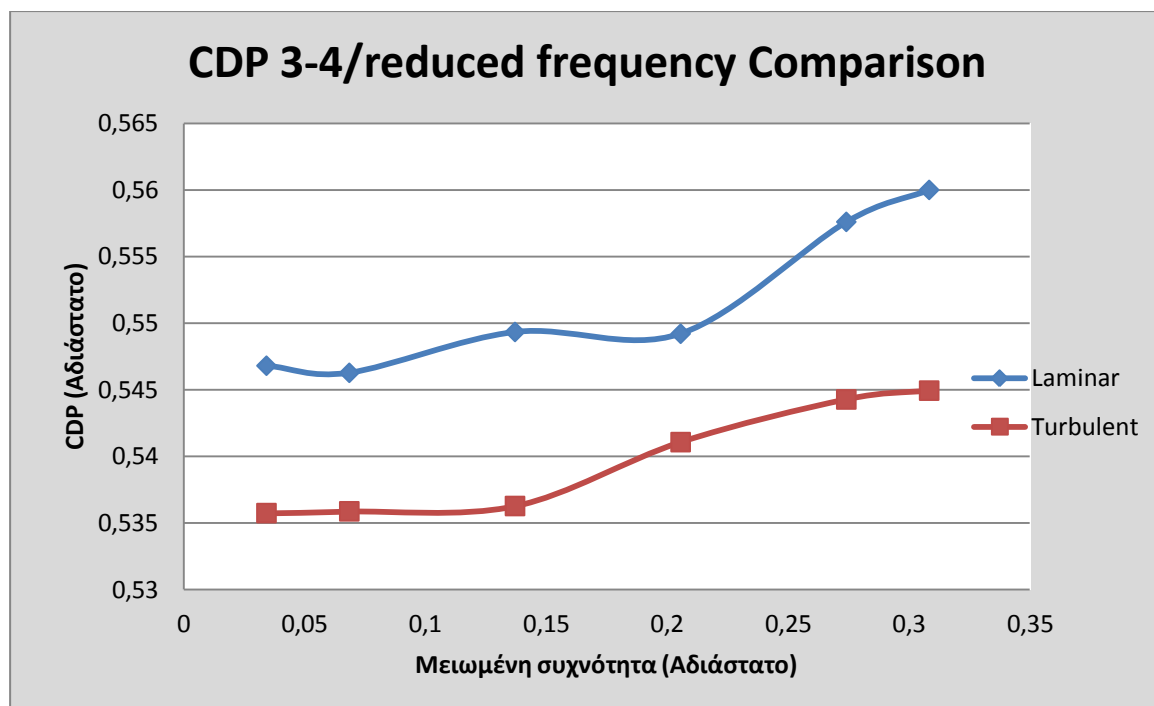
Το μόνο ‘αντιφατικό’ σημείο είναι η συμπεριφορά της πτέρυγας στις αρνητικές γωνίες. Δηλαδή, το αντίθετο από αυτό που συμβαίνει στις θετικές μοίρες γωνίας προσβολής συμβαίνει στις αρνητικές (-4° και -8°). Η (αρνητική) άντωση που παράγεται στη στρωτή ροή φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της τυρβώδους. Η υπόθεση που μπορεί να γίνει - αν ισχύει κάτι τέτοιο διότι μετρήθηκαν μόνο τέσσερα ζεύγη - είναι ότι οφείλεται στη γεωμετρία της αεροτομής της πτέρυγας.

3.3.2 Σύγκριση για την περίπτωση του ταλαντευόμενου μοντέλου

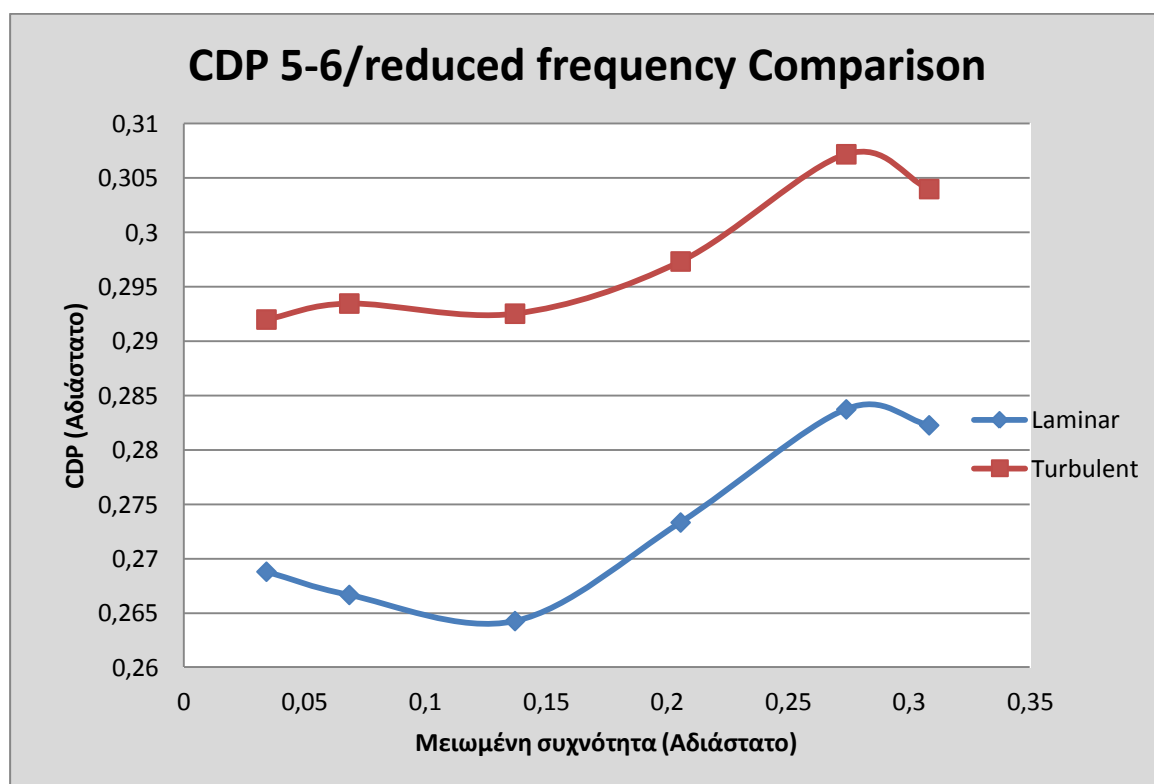
Η σύγκριση θα γίνει με την παρουσίαση των αντίστοιχων με το προηγούμενο υποκεφάλαιο διαγραμμάτων συναρτήσεως όμως της μειωμένης συχνότητας και όχι της γωνίας προσβολής.



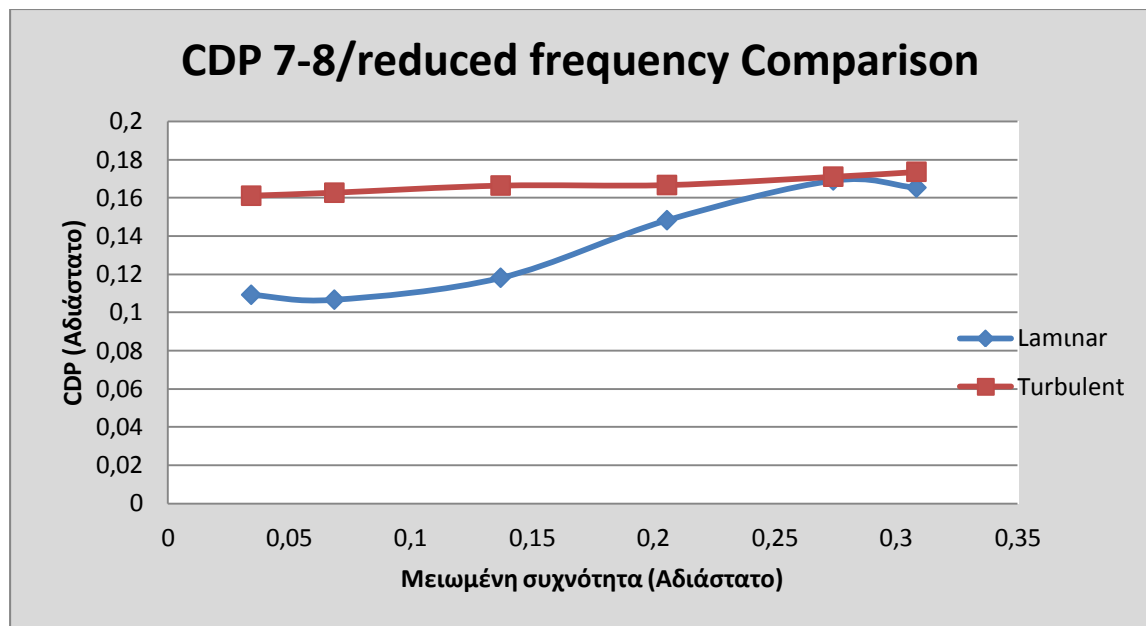
Διάγραμμα 39. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP1-2 συναρτήσεως της μειωμένης συχνότητας



Διάγραμμα 40. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP3-4 συναρτήσει της μειωμένης συχνότητας

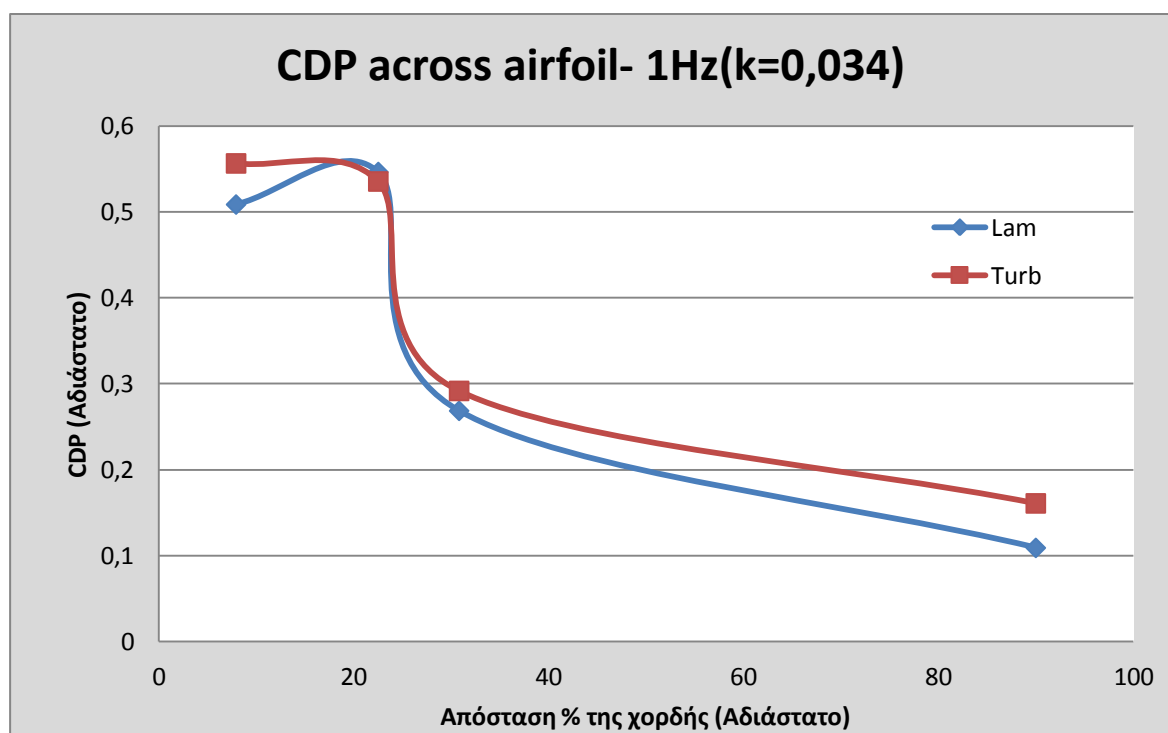


Διάγραμμα 41. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP5-6 συναρτήσει της μειωμένης συχνότητας

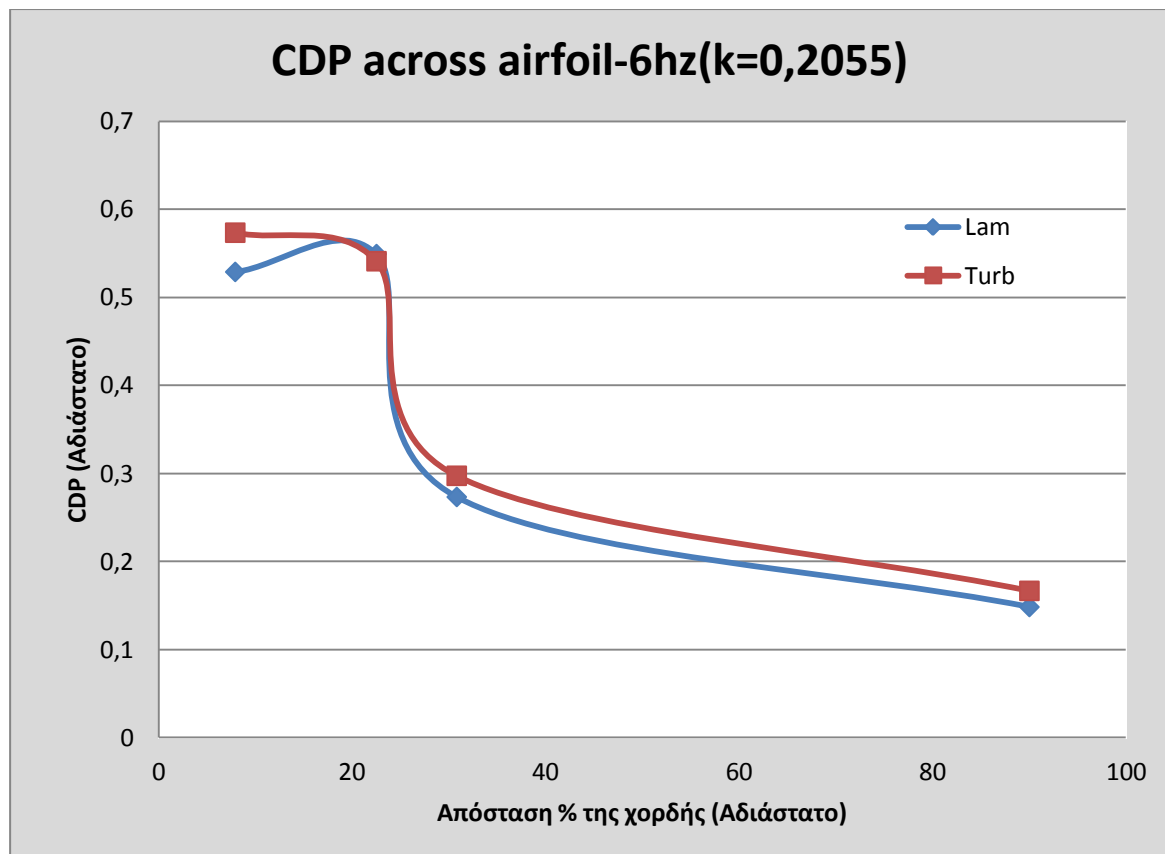


Διάγραμμα 42. Συγκριτικό διάγραμμα για το CDP7-8 συναρτήσει της μειωμένης συχνότητας

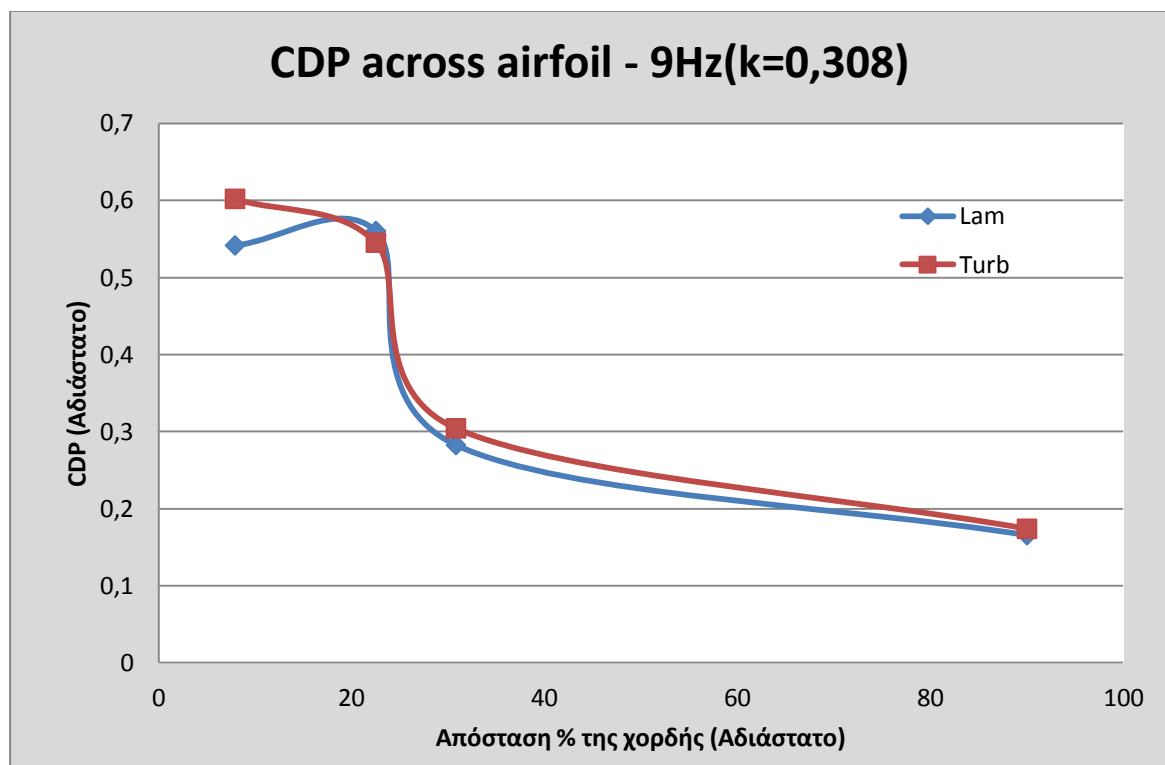
Τα επόμενα διαγράμματα αντιστοιχούν στις κατανομές των συντελεστών για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις και τρεις ενδεικτικές τιμές μειωμένης συχνότητας.



Διάγραμμα 43. Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του CDP για $k=0,034$



Διάγραμμα 44. Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του CDP για $k=0,2055$



Διάγραμμα 45. Συγκριτικό διάγραμμα της κατανομής του CDP για $k=0,308$

Τα διαγράμματα 39 – 55 έδειξαν ότι η αύξηση της τύρβης στην ελεύθερη ροή δεν επηρέασε σημαντικά την επίδραση της ταλάντωσης στους συντελεστές πίεσης και στις κατανομές. Η ταλάντωση του μοντέλου οδήγησε σε μείωση των κατανομών σε σχέση με την ακίνητη κατάσταση (0°). Η αύξηση της μειωμένης συχνότητας αύξησε τους συντελεστές πίεσης του χείλους προσβολής (και εκφυγής για τη στρωτή μόνο ροή) κυρίως όταν η τιμή της έγινε της τάξης του 1.

Ωστόσο μία βασική διαφορά είναι η υπεροχή ως προς την παραγόμενη άντωση, για την τυρβώδη ροή. Ο λόγος είναι και πάλι τα ενδυναμωμένα οριακά στρώματα και η αντοχή τους στις αποκολλήσεις. Επίσης, μία άλλη διαφορά εντοπίζεται στις οπές 3-4 καθώς είναι το μόνο ζευγάρι από τα τέσσερα που η τιμή του συντελεστή για τη στρωτή ροή υπερέχει της τυρβώδους. Πιθανολογείται πως με την ταλάντωση του πτερυγίου παράγεται στο εμπρός μέρος δίνη, η οποία ταξιδεύει προς τα πίσω και μειώνει τη στατική πίεση της οπής 3 οπότε αυξάνεται η διαφορική των οπών 3-4. Στην τυρβώδη ροή θα πρέπει η δίνη αυτή να ενσωματώνεται στην ελεύθερη ροή και να αποδυναμώνεται. Το φαινόμενο αυτό συναντάται στη δυναμική απώλεια στήριξης και σε γωνίες προσβολής πέραν του στατικού stall. Στο συγκεκριμένο πείραμα κάνει την εμφάνιση του σε γωνίες πριν από το stall και είναι πιο έντονο στη στρωτή ροή με αποτέλεσμα να τροποποιεί τη μορφή της κατανομής σε σχέση με την ακίνητη κατάσταση.

Κεφάλαιο 4 Μετρήσεις ταχυτήτων του απορεύματος-σχολιασμός

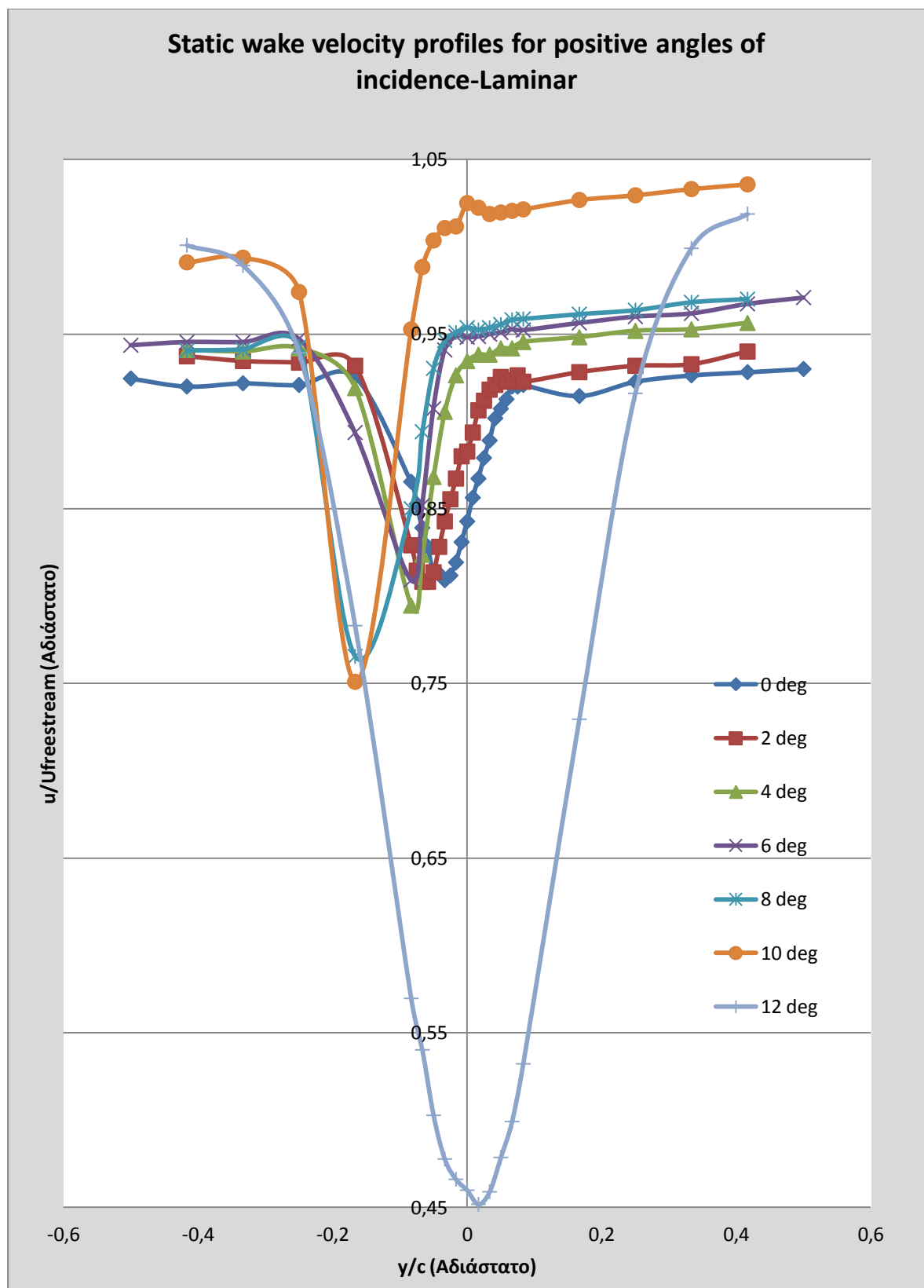
Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην μορφή του απορεύματος του περυγίου στα δύο καθεστώτα κίνησής του -ακίνητο και ταλαντευόμενο- καθώς επίσης και στις δύο διαφορετικές ροές -στρωτή και τυρβώδη-. Ο σκοπός είναι να φανεί η επίδραση της ταλάντωσης αλλά και της τύρβης στο απόρευμα. Αρχικά, στο μέρος 4.1 γίνεται η παρουσίαση των κατανομών ταχυτήτων καθώς επίσης και της έντασης της τύρβης στην περιοχή του απορεύματος (σε 13 διαφορετικές γωνίες προσβολής της πτέρυγας για τις κατανομές ταχυτήτων και 9 για την τύρβη). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για 6 διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης. Ακολουθεί, η σύγκριση των προφίλ για τις δύο αυτές διαφορετικές περιπτώσεις ώστε να δειχθεί η επίδραση της ταλάντωσης. Στο μέρος 4.2, γίνεται η ίδια εργασία αλλά για την ροή με υψηλή ένταση τύρβης και τέλος στο 4.3 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μέρους 4.1 με αυτά του 4.2 ώστε να γίνει σαφής η επίδραση της τύρβης στην κατανομή των ταχυτήτων του απορεύματος.

4.1 Μετρήσεις ταχυτήτων-ένταση τύρβης σε στρωτή ροή

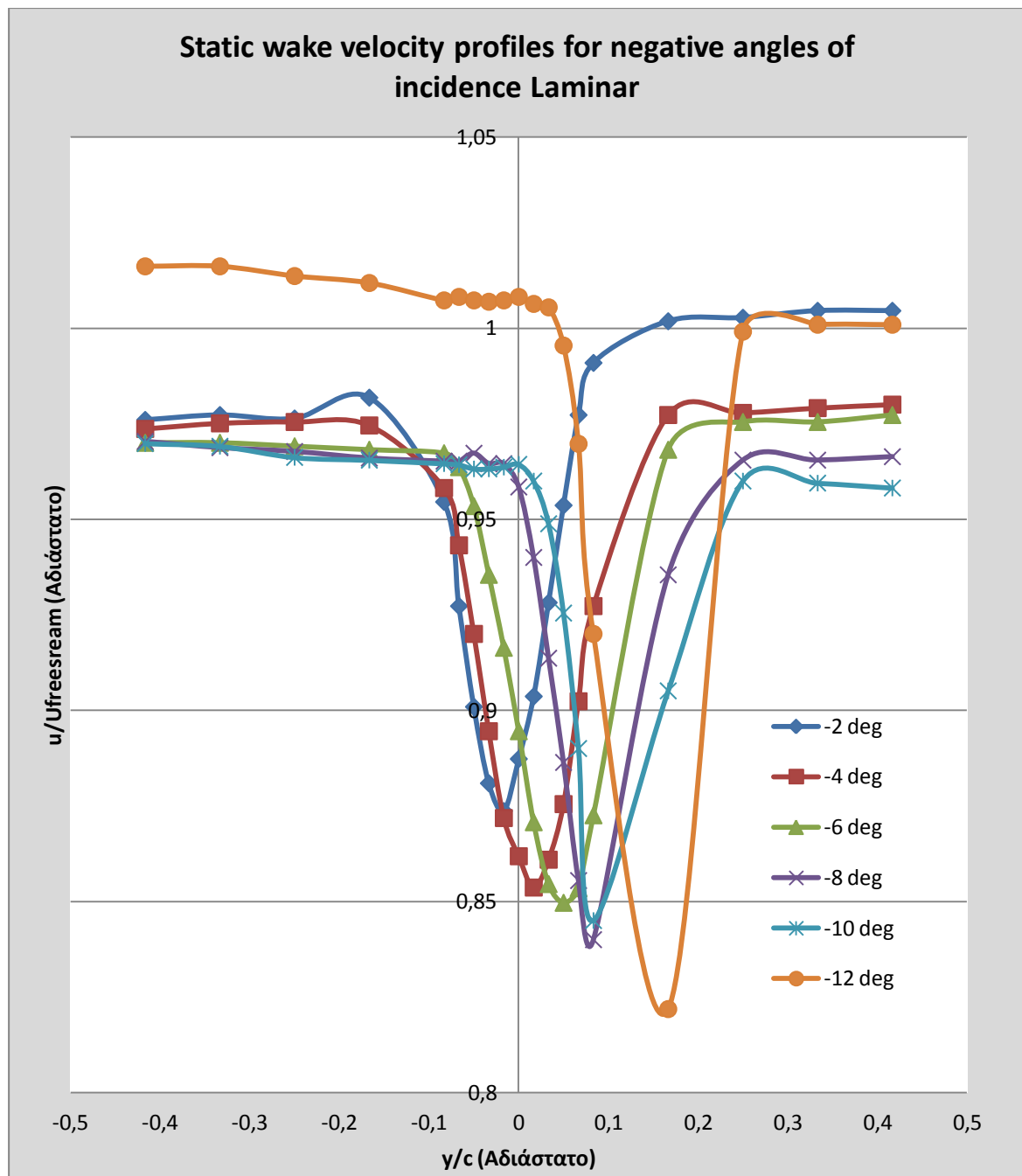
4.1.1.α Κατανομή ταχυτήτων σε στρωτή ροή με το μοντέλο ακίνητο

Τα διαγράμματα 46 και 47 που ακολουθούν αναφέρονται στις μέσες τιμές ταχύτητας συγκεκριμένων σημείων του απορεύματος που απέχουν $x=0,75c$ (9cm) από το χείλος εκφυγής της πτέρυγας και βρίσκονται σε διακριτές θέσεις πάνω στον κάθετο άξονα y , όπως ακριβώς περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.7.2 για την περίπτωση της στρωτής ροής και το μοντέλο ακίνητο. Η απόσταση x είναι τέτοια ώστε να έχει αναπτυχθεί επαρκώς η μορφή του απορεύματος και ταυτόχρονα να μην έχει προλάβει να αναμιχθεί με την εξωτερική ροή (σε

παρόμοια πειράματα η απόσταση κυμαίνεται από 0,4c έως 1c). Η μέση τιμή των ταχυτήτων υπολογίζονταν αυτόματα από το πρόγραμμα Labview. Το πρώτο διάγραμμα αφορά τις θετικές γωνίες προσβολής ενώ το δεύτερο, τις αρνητικές γωνίες καλύπτοντας έτσι όλο το εύρος κίνησης της πτέρυγας. Οι τιμές των διαγραμμάτων είναι αδιαστατοποιημένες, με τη μέση ταχύτητα u_x να είναι διαιρεμένη με αυτή της ελεύθερης ροής (u/U_∞) και τις αποστάσεις y των σημείων μέτρησης διαιρεμένες με το μήκος χορδής της αεροτομής (y/c). Σημείο αναφοράς ($y=0$) για τις αποστάσεις y/c ορίζεται εκείνο το σημείο που βρίσκεται ακριβώς πίσω από το χείλος εκφυγής του μοντέλου όταν αυτό βρίσκεται στις 0 μοίρες γωνίας προσβολής. Η ταχύτητα της ελεύθερης ροής ελέγχονταν συνεχώς από το σωλήνα Pitot, που ήταν τοποθετημένος ελαφρώς μπροστά του μοντέλου και διατηρούνταν σταθερή στα 11m/s μέσω της ρύθμισης των στροφών της φτερωτής της αεροσήραγγας.



Διάγραμμα 46. Κατανομή ταχυτήτων απορεύματος για γωνίες προσβολής 0,2,4,6,8,10,12.

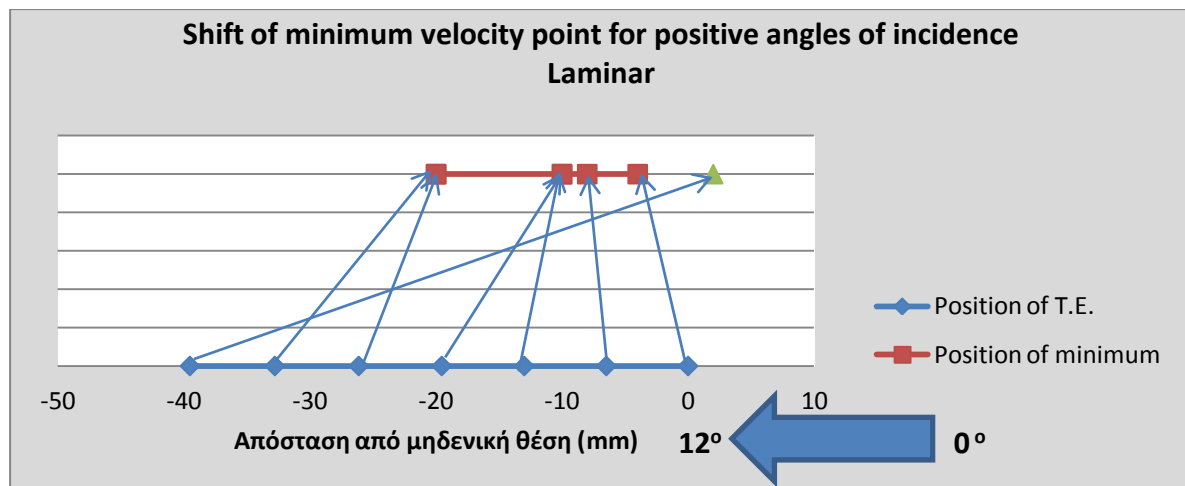


Διάγραμμα 47. Κατανομή ταχυτήτων απορεύματος για γωνίες προσβολής -2,-4,-6,-8,-10 και -12.

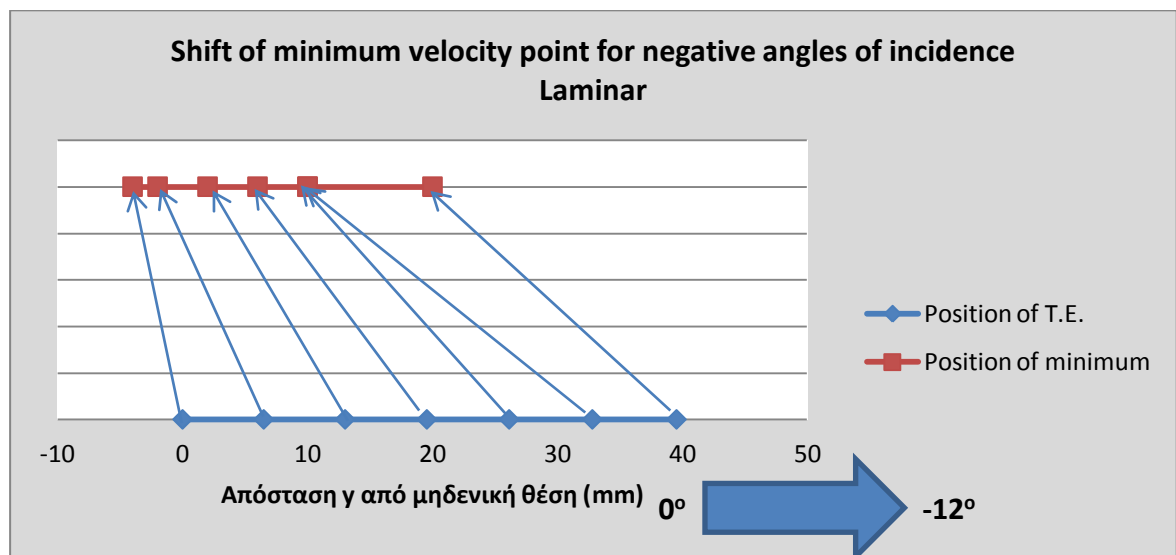
Από τη μελέτη των διαγραμμάτων είναι σαφές και φυσικά αναμενόμενο να υπάρξει πτώση της ταχύτητας σε μια περιοχή πίσω από την πτέρυγα. Η μορφή του απορεύματος είναι όμοια σε κάθε γωνία προσβολής και χαρακτηρίζεται από μία ‘κοιλάδα’ που σε ένα σημείο της παρουσιάζει ελάχιστο. Άλλωστε, παρόμοια μορφή έχουν τα αντίστοιχα προφίλ

της αεροτομής NACA 0012 καθώς μεταβάλλεται η γωνία προσβολής στην εργασία [22]. Η τιμή της ελάχιστης ταχύτητας σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται στο 85% της ταχύτητας της ελεύθερης ροής. Μάλιστα, καθώς αυξάνεται ή μειώνεται η γωνία προσβολής της πτέρυγας σε σχέση με τη θέση μηδενικής γωνίας η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας όλο και μειώνεται. Προφανώς, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η οπισθέλκουσα της αεροτομής, άρα και η επιβράδυνση της ροής, αυξάνεται με τη μεταβολή της γωνίας προσβολής από τη μηδενική θέση. Αλλά είναι εύκολα κατανοητό και από το γεγονός ότι με τη μεταβολή της γωνίας αυξάνεται η μετωπική επιφάνεια της αεροτομής που είναι κόντρα στη ροή. Η κατανομή όμως των 12° είναι πολύ διαφορετική από όλες τις υπόλοιπες διότι οι ταχύτητες μειώνονται πολύ περισσότερο στο κέντρο ενώ αυξάνονται στις άκρες. Το ίδιο συμβαίνει και στις ακραίες θέσεις, στην περίπτωση των 10° και -12° , πράγμα το οποίο πιθανολογείται ότι οφείλεται στα φαινόμενα εμποδισμού (blockage effects) που συμβαίνουν στην αεροσήραγγα καθώς στενεύει ο χώρος από τον οποίο μπορεί να περάσει ο αέρας. Μάλιστα, στις 12° πρέπει να υποβαθμίζεται και η αεροδυναμική απόδοση της φτερωτής της αεροσήραγγας ώστε να προκύπτει περαιτέρω μείωση στις ταχύτητες.

Επιπρόσθετα, η μεταβολή της γωνίας προσβολής εκτός από τις αλλαγές στις ταχύτητες επιφέρει και μετατόπιση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας. Το σημείο αυτό έχει σχέση με την ένωση των δύο οριακών στρωμάτων που διασχίζουν την πτέρυγα με την έννοια ότι βρίσκεται στην προέκταση του σημείου που αυτά ενώνονται. Έτσι, η φορά κίνησης του δε μπορεί να είναι διαφορετική από αυτή του χείλους εκφυγής της πτέρυγας. Στα διαγράμματα 48 και 49 φαίνεται η πορεία του σημείου ελάχιστης ταχύτητας σε σχέση με την πορεία του χείλους εκφυγής καθώς μεταβάλλεται η γωνία προσβολής προς τις θετικές ή αρνητικές τιμές αντίστοιχα.



Διάγραμμα 48. Μετατόπιση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας με κίνηση της πτέρυγας από τις 0° στις 12°.



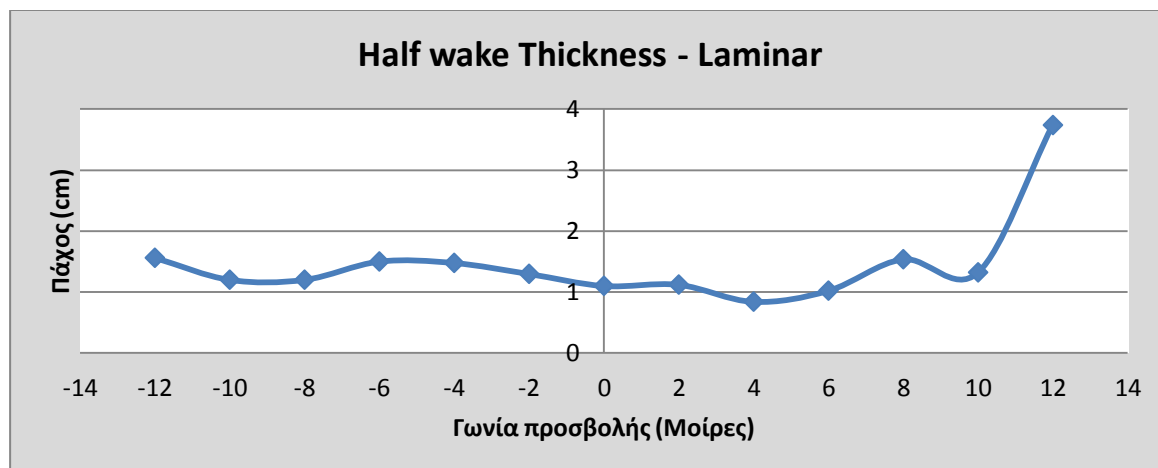
Διάγραμμα 49. Μετατόπιση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας με κίνηση της πτέρυγας από τις 0° στις -12°.

Το συμπέρασμα που πηγάζει από τα διαγράμματα 48 και 49 είναι ότι, όντως υπάρχει μία σχέση μεταξύ της θέσης του χείλους εκφυγής της πτέρυγας με αυτό της ελάχιστης ταχύτητας η οποία όμως, δεν είναι γραμμική. Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι για τις 0 μοίρες γωνίας προσβολής τα δύο αυτά σημεία δε συμπίπτουν και αυτό γιατί η αεροτομή του μοντέλου δεν είναι συμμετρική; η γεωμετρία της αεροτομής επιβάλλει την ένωση των δύο οριακών

στρωμάτων στα αρνητικά του άξονα y . Αντίθετα, στις 12° η αποκόλληση της ροής είναι τέτοια που μετακινεί το σημείο ελάχιστης ταχύτητας από την άλλη πλευρά και μάλιστα στα θετικά y . Εξάλλου, η μετατόπιση του σημείου είναι πιο ξεκάθαρη και ‘ευδιάκριτη’ στις αρνητικές γωνίες προσβολής από ότι στις θετικές. Συγκεκριμένα, στο 48 διάγραμμα (αλλά και στο 46) δε φαίνεται σημαντική διαφορά στη θέση του σημείου κατά την αύξηση της γωνίας προσβολής από 4° σε 6° και από 8° σε 10° . Η πιο πιθανή αιτία για αυτό είναι ότι συμβαίνουν φαινόμενα εμποδισμού (blockage effects) στην αεροσήραγγα και είναι πιο έντονα στις θετικές κυρίως γωνίες προσβολής του μοντέλου (λόγω γεωμετρίας) αλλά και στις υψηλές τιμές των αρνητικών γωνιών. Όσον αφορά τη μετατόπιση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας, για το διάγραμμα 48 είναι από τα -4mm στα -20mm και για το 49 από τα -4mm στα 20mm σε αντίθεση με την προέκταση του χείλους εκφυγής που είναι από τα 0 στα 40 ή -40mm .

Τέλος, ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος που μεταβάλλεται με τη γωνία προσβολής είναι το πάχος του απορεύματος. Αυτό το μέγεθος μπορεί να ορισθεί ως η περιοχή που επηρεάζεται από το πτερύγιο ή αλλιώς το πάχος της ‘κοιλιάδας’ που σχηματίζεται στα διαγράμματα 46 και 47 στις διάφορες γωνίες προσβολής. Παράλληλα όμως, έχει επικρατήσει και η έννοια του μισού πάχους του απορεύματος ή half wake thickness/width. Στην πραγματικότητα δεν ισούται ακριβώς με το μισό πάχος του απορεύματος, παρόλα αυτά απεικονίζει αρκετά καλά την εξέλιξή του συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας προσβολής του μοντέλου και υπολογίζεται με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η μέτρηση της απόστασης μεταξύ των σημείων από η καμπύλη των ταχυτήτων αλλάζει κοίλα ενώ ένας άλλος, είναι η μέτρηση της απόστασης των σημείων που έχουν ταχύτητα ίση με το μισό της συνολικής μεταβολής της ταχύτητας. Χρησιμοποιείται δε, πιο συχνά από το πάχος του απορεύματος γιατί ο υπολογισμός του είναι πιο ακριβής.

Στο διάγραμμα 50 φαίνεται η τιμή του μισού πάχους (half wake thickness) στα επιλεγμένα σημεία του άξονα y σε όλο το εύρος κίνησης του μοντέλου υιοθετώντας το 2^ο τρόπο για τον υπολογισμό του.



Διάγραμμα 50. Το μισό πάχος του απορεύματος συναρτήσει της γωνίας προσβολής

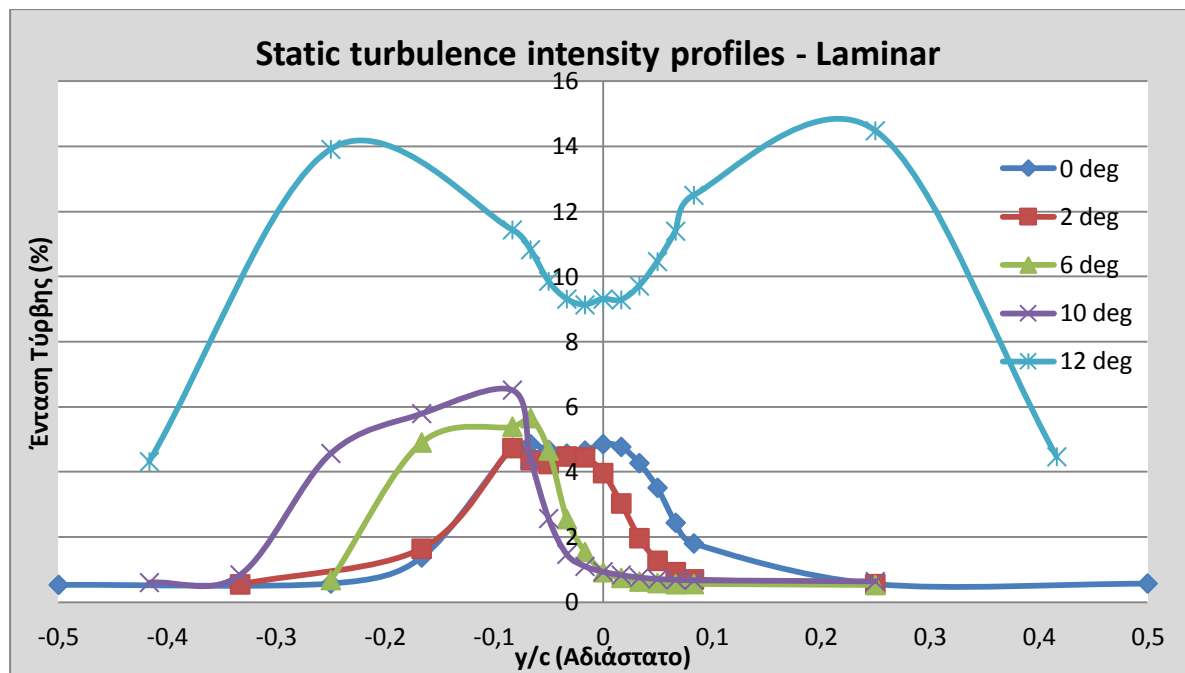
Η πρώτη διαπίστωση που μπορεί να γίνει από το διάγραμμα 50 είναι ότι όλες οι τιμές, με εξαίρεση αυτή των 12^ο, είναι ελαφρώς υψηλότερα του 1cm, δηλαδή του μισού του μέγιστου πάχους της αεροτομής του μοντέλου, οπότε, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους όπως και θα έπρεπε. Όσον αφορά τις θετικές γωνίες προσβολής είναι φανερό πως υπάρχει μία αυξητική τάση του πάχους του απορεύματος, γενικότερα. Παρόλα αυτά, η ελάχιστη τιμή είναι στις 4^ο και αυτό πιθανολογείται ότι οφείλεται στη σχετικά απότομη γεωμετρία της κοιλίας της πτέρυγας στο πίσω μέρος της. Φαίνεται πως σε μικρότερες μοίρες δημιουργούνται μικρό-δίνες που αυξάνουν ελαφρώς το πάχος του απορεύματος ενώ στις 4^ο και καθώς κατεβαίνει το πίσω μέρος της αεροτομής η ροή τοπικά δεν παρουσιάζει αποκολλήσεις. Κατόπιν, αυξάνοντας περαιτέρω τη γωνία προσβολής το πάχος αυξάνει σημαντικά και στις 12^ο δραματικά και ίσο περίπου με το διπλάσιο του μέγιστου πάχους της αεροτομής. Η σχετική μείωση της τιμής όμως στις 10^ο επιβεβαιώνει την ύπαρξη των blockage effects εξαιτίας των οποίων η ροή του απορεύματος κατά κάποιον τρόπο συμπιέζεται από την εξωτερική ροή.

Αναφορικά με τις αρνητικές γωνίες προσβολής, η εικόνα είναι πιο ξεκάθαρη από πριν αφού σημειώνεται αύξηση του half width με αύξηση της απόλυτης τιμής της γωνίας ενώ, τοπική μείωση παρατηρείται στις -8° έως -10° και πάλι λόγω των blockage effects. Γενικά όμως, στις αρνητικές γωνίες οι αποκολλήσεις είναι περισσότερες (αφού μεγαλύτερες είναι οι τιμές των half widths) όπως και ήταν αναμενόμενο εξαιτίας της ασύμμετρης αεροτομής.

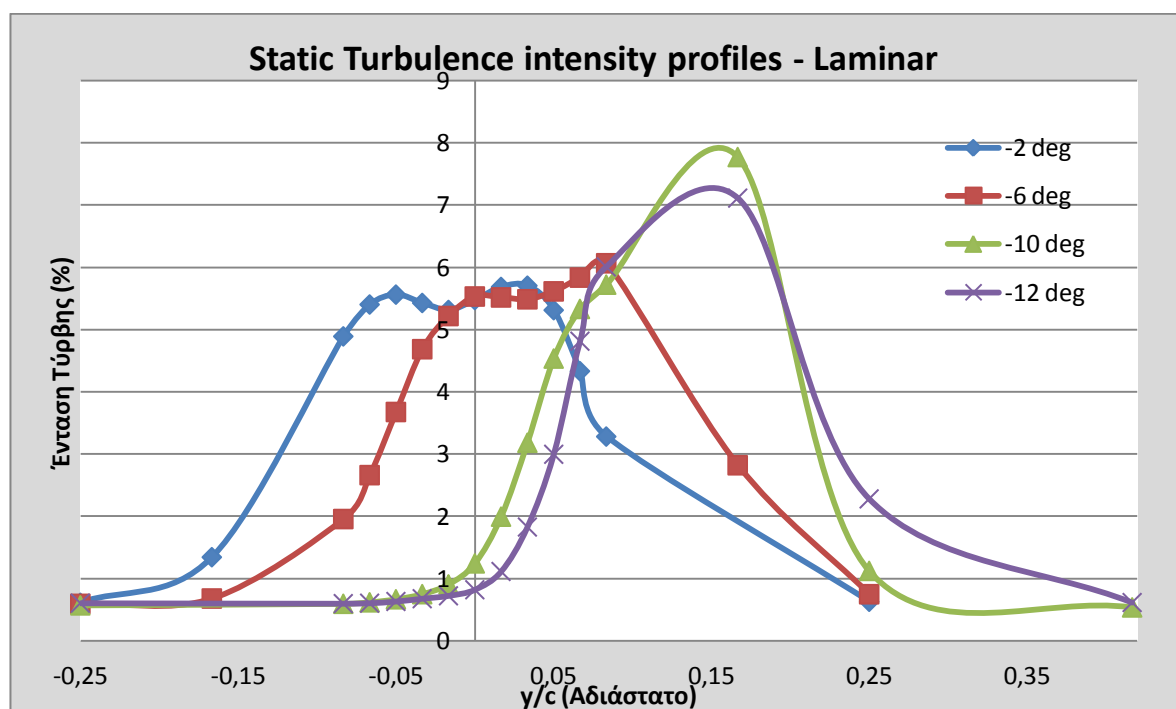
4.1.1.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο ακίνητο σε στρωτή ροή

Για την καλύτερη κατανόηση της ροής στο απόρευμα του μοντέλου είναι χρήσιμη και η παρουσίαση της εντάσεως της τύρβης σε αυτή την περιοχή. Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους διαιρέθηκε η RMS τιμή της ταχύτητας U_x κάθε σημείου με την μέση τιμή της ταχύτητας της ελεύθερης ροής U_∞ (11m/s) και πολλαπλασιάστηκε με το 100%. Ο λόγος για τον οποίο η U_x ταχύτητα κάθε σημείου διαιρέθηκε με την U_∞ και όχι με την μέση τιμή της ταχύτητας του σημείου είναι για να υπάρχει ένα κοινό μέτρο σύγκρισης των RMS ταχυτήτων και να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα από το θερμοπήμα (hot wire). Το ίδιο συμβαίνει και σε παρόμοιες εργασίες όπως στην [22] μόνο που εκεί διαιρείται η RMS τιμή της U_y ταχύτητας με αυτή της ελεύθερης ροής.

Από τις μετρήσεις που έγιναν αρχικά, ώστε να προσδιορισθεί η ένταση της τύρβης για την ελεύθερη ροή απουσία του πλέγματος πρόεκυψε η τιμή 0,687%. Στα διαγράμματα 51 και 52 σχηματίζεται το προφίλ της εντάσεως της τύρβης στα επιλεγμένα σημεία του άξονα y και για τις εξής γωνίες προσβολής του μοντέλου: 0° , 2° , 6° , 10° , 12° στο πρώτο διάγραμμα και -2° , -6° , -10° , -12° στο δεύτερο.



Διάγραμμα 51. Κατανομή εντάσεως τύρβης u/U_∞ (%) στο απόρευμα για 0° , 2° , 6° , 10° , 12°



Διάγραμμα 52. Κατανομή εντάσεως τύρβης u/U_∞ (%) στο απόρευμα για -2° , -6° , -10° , -12°

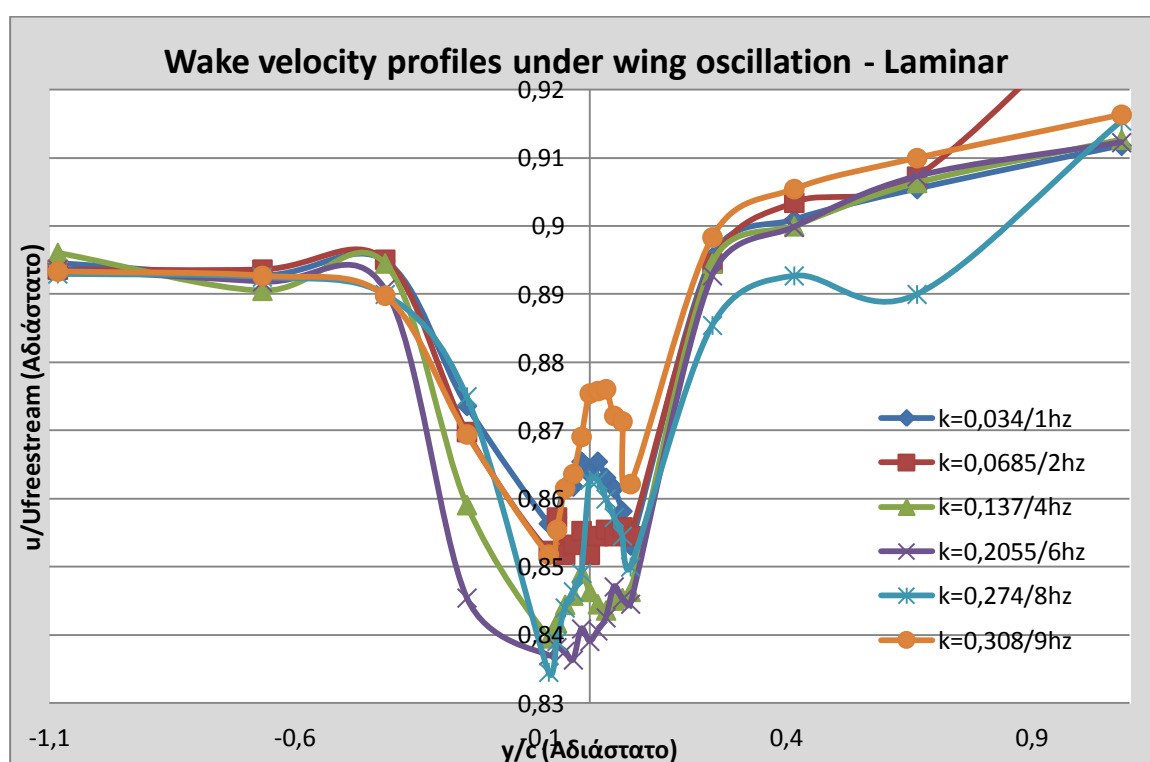
Με μια γρήγορη ματιά είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι το προφίλ της εντάσεως τύρβης είναι ανάποδο σε σχέση με το στατικό προφίλ ταχυτήτων που σημαίνει ότι εκεί που η ταχύτητα μειώνεται, η ένταση της τύρβης αυξάνεται. Άλλωστε, αυτό είναι αναμενόμενο

γιατί στα σημεία όπου υπάρχει υψηλή ‘αναστάτωση’ της ροής η ταχύτητα στη διεύθυνση x δε μπορεί παρά να μειωθεί. Μία ακόμη διαφορά είναι ότι στα προφίλ ταχυτήτων η στενή περιοχή έχει ευδιάκριτο ένα μέγιστο σημείο (peak) σε αντίθεση με τα προφίλ τύρβης όπου στην αντίστοιχη περιοχή υπάρχουν αρκετά σημεία με τιμές κοντά στο μέγιστο. Αναφορικά με τις ομοιότητες, φαίνεται πως και στα δύο η φορά κίνησης των καμπύλων συμπίπτει με τη φορά κίνησης του χείλους εκφυγής. Λογικά, στο σημείο ένωσης των οριακών στρωμάτων που διασχίζουν την πτέρυγα η ένταση της τύρβης θα πρέπει να μεγιστοποιείται.

Εξάλλου, είναι αξιοσημείωτο ότι καθώς αυξάνει η γωνία προσβολής της πτέρυγας σε απόλυτη τιμή, το πάχος της περιοχής του απορεύματος που επηρεάζεται από το μοντέλο μικραίνει ενώ αντίθετα οι τιμές της έντασης της τύρβης αυξάνονται · με άλλα λόγια, το διάγραμμα γίνεται όλο και πιο μυτερό. Γενικά, η πτέρυγα αυξάνει αισθητά την τύρβη στο απόρευμα σε σχέση με την ελεύθερη ροή που είναι 0,687%, σε τιμές της τάξης του 5% και μέγιστο το 7,7%. Πρέπει όμως να διευκρινισθεί ότι στις αρνητικές μοίρες γωνίας προσβολής η τύρβη είναι γενικά υψηλότερη και το προφίλ τους πιο πλατύ από ό,τι στις θετικές μοίρες και αυτό γιατί η αεροτομή είναι μη συμμετρική. Είναι φυσικό και επόμενο ο αέρας να ρέει πιο ομαλά, παράγοντας λιγότερες δίνες στις θετικές μοίρες αφού η αεροτομή έχει σχεδιασθεί ώστε να λειτουργεί καλά σε ένα συγκεκριμένο εύρος γωνιών και όχι στο αντίθετό του. Τέλος, από το διάγραμμα 51 φαίνεται πως η τοποθέτηση του μοντέλου σε 12° προκαλεί υψηλή τύρβη λόγω της αποκολλημένης ροής σε ένα μεγάλο μέρος της πτέρυγας που σε συνδυασμό με τα blockage effects η μέγιστη τιμή της εντάσεως φθάνει το 14,5%, ενώ αλλάζει και η μορφή της καμπύλης.

4.1.2.α Κατανομή ταχυτήτων σε στρωτή ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση

Εφόσον εξετάσθηκε η κατανομή ταχυτήτων σε στρωτή ροή με το μοντέλο ακίνητο σειρά έχει η ίδια εργασία για την περίπτωση που αυτό ταλαντεύεται. Οι θέσεις-σταθμοί μέτρησης στον άξονα y δεν άλλαξαν σημαντικά αλλά απλώθηκαν σε μεγαλύτερη έκταση ώστε να καλύψουν περιοχές που πιθανώς να επηρεασθούν από την ταλάντωση του πτερυγίου. Οι διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης ήταν 6 και το διάγραμμα 53 δείχνει την κατανομή ταχυτήτων σε κάθε περίπτωση. Η ταχύτητα και σε αυτό το διάγραμμα είναι το αποτέλεσμα της διαίρεσης της μέσης τιμής με αυτή της ελεύθερης ροής.



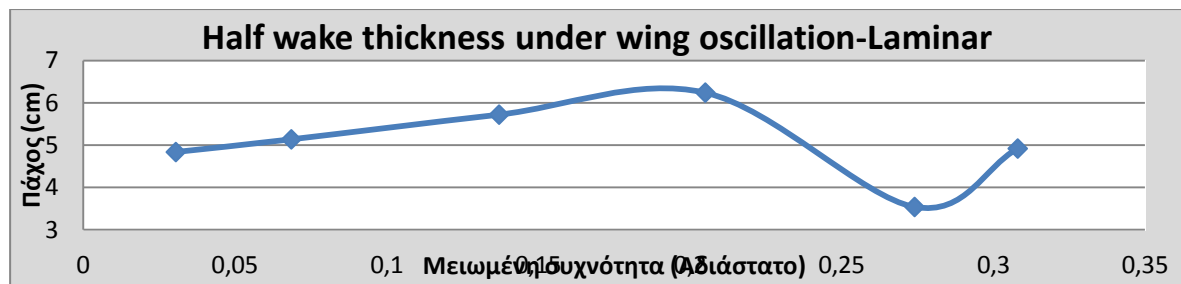
Διάγραμμα 53. Κατανομή ταχυτήτων απορεύματος για 6 διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η μορφή της καμπύλης δεν άλλαξε σημαντικά σε σχέση με αυτή των στατικών προφίλ, με εξαίρεση όμως την περιοχή κοντά

στο κέντρο όπου φαίνεται να υπάρχει μια μικρή επιτάχυνση της ροής. Το φαινόμενο αυτό πιθανολογείται ότι οφείλεται στην αλληλεπίδραση των δύο οριακών στρωμάτων σε συνδυασμό με την εξίσωση κίνησης του μοντέλου. Είναι γεγονός ότι στις δύο ακραίες θέσεις, -12° και 12° , η πτέρυγα μένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τη μηδενική θέση. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται δύο θέσεις στην περιοχή του απορεύματος όπου η ταχύτητα παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο και μία θέση στο κέντρο όπου η καμπύλη έχει τοπικό μέγιστο. Μάλιστα, σε όλες τις συχνότητες η περιοχή αυτή του άξονα y βρέθηκε να είναι μεταξύ του -1cm και 1cm . Μία άλλη πιθανή αιτία μπορεί να είναι σφάλμα του θερμομήματος (hot wire) το οποίο δε ξεχωρίζει αντίθετη ροή με αποτέλεσμα οι δίνες που δημιουργούνται λόγω ταλάντωσης να δίνουν τοπικά μία ψευδό-επιτάχυνση. Πάντως, μετά τα 6 Hz ή $k=0,205$ η καμπύλη ταχυτήτων όλο και στενεύει πράγμα το οποίο συμφωνεί με όσο είπε ο Park et al 1990 [13] και φαίνονται στα διαγράμματα τις [22].

Επιπρόσθετα, η ταχύτητα μακριά από τη μηδενική θέση έχει το 90% της ταχύτητας της ελεύθερης ροής, και φθάνει κοντά στο 85% όταν έχει τη χαμηλότερη τιμή της. Στα blockage effects οφείλεται η μικρή απόκλιση της ταχύτητας από το 100%, των σημείων που βρίσκονται μακριά από την περιοχή που επηρεάζει το μοντέλο και στη μη συμμετρική γεωμετρία της αεροτομής οφείλεται η διαφορά της ταχύτητας εκατέρωθεν του κεντρικού σημείου (95% στη μια πλευρά 90% στην άλλη). Ακόμη, παρατηρείται μία αλλαγή της τάσης στη μεταβολή των κατανομών καθώς αυξάνεται η συχνότητα ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, και πάλι μετά τα 6 Hz , η καμπύλη ανεβαίνει αντί να κατεβαίνει.

Η αλλαγή αυτή μπορεί να φανεί καλύτερα μέσω της εξέλιξης του πάχους του απορεύματος. Όπως στο υποκεφάλαιο 4.1.1.α έτσι και σε αυτό θα παρουσιασθεί η εξέλιξη του μισού πάχους (half wake width/thickness) συναρτήσει της μειωμένης συχνότητας, το οποίο υπολογίστηκε με τον ίδιο τρόπο.

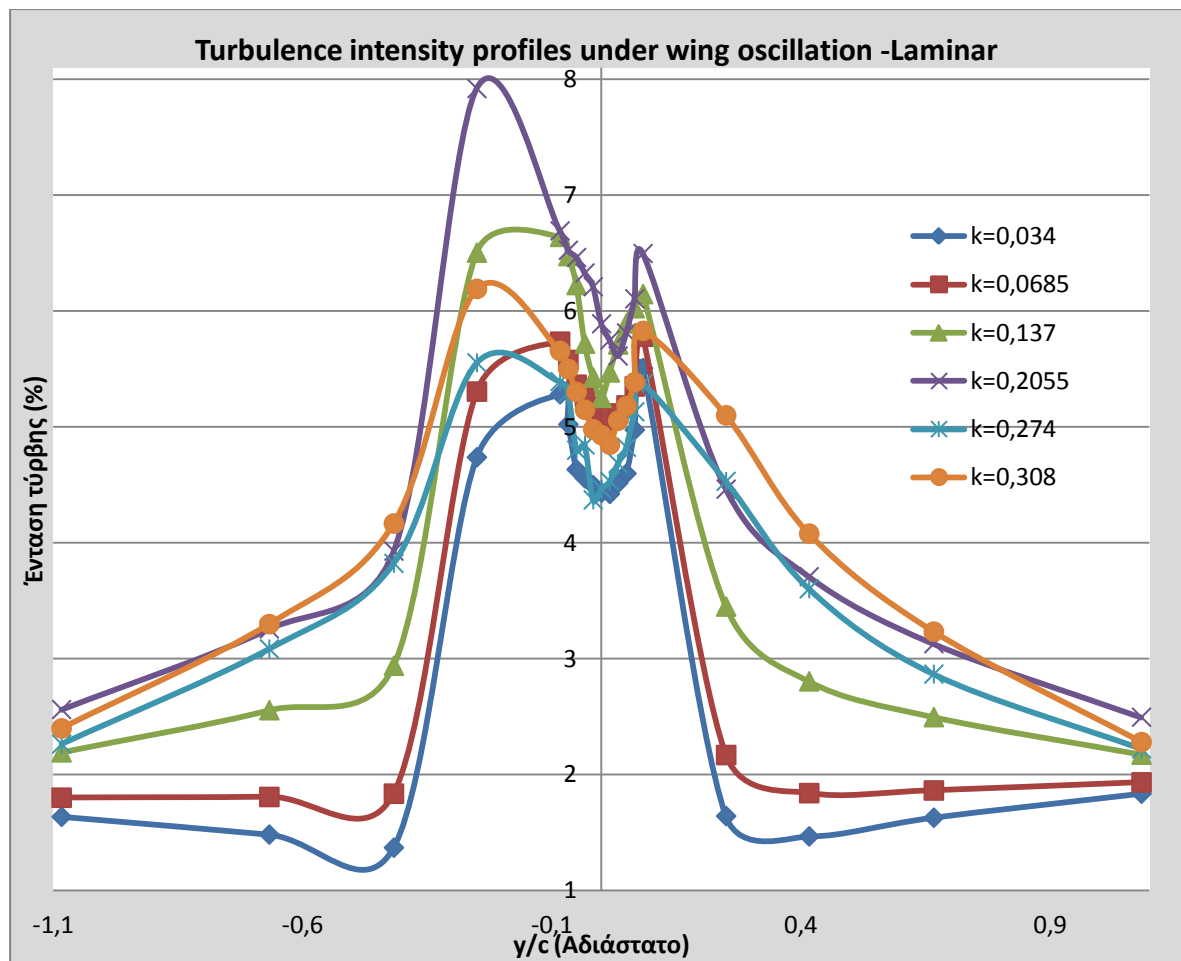


Διάγραμμα 54. Εξέλιξη του μισού πάχους του απορεύματος συναρτήσει της μειωμένης συχνότητας k

Αρχικά, βγαίνει τα συμπεράσμα ότι η τάξη μεγέθους του συνολικού πάχους του απορεύματος είναι 10cm, δηλαδή περίπου 5 φορές μεγαλύτερο του μέγιστου πάχους της αεροτομής πράγμα το οποίο οφείλεται στο εύρος κίνησης της πτέρυγας. Η αύξηση του πάχους έχει περίπου γραμμική συμπεριφορά με τη μειωμένη συχνότητα, παρόλα αυτά μετά την τιμή των 0,205 (ή 8Hz συχνότητα ταλάντωσης) υπάρχει μια αλλαγή, με το πάχος να μειώνεται. Ακόμη και στα 9Hz που σημειώνεται και πάλι αύξηση, αυτή δεν ξεπερνά κατά πολύ την τιμή της περίπτωσης 1Hz. Είναι μία ακόμη ένδειξη ότι η μειωμένη συχνότητα είναι καθοριστικός παράγοντας στα ασταθή φαινόμενα ιδιαίτερα όταν είναι της τάξης του 1. Αυτή η μετάπτωση στο απόρευμα θα πρέπει να είναι εμφανής και στο κεφάλαιο απεικόνισης της ροής (flow visualization).

4.1.2.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο σε ταλάντωση και ροή στρωτή

Όπως και στην περίπτωση που το μοντέλο ήταν ακίνητο έτσι και στην περίπτωση που αυτό ταλαντεύεται είναι χρήσιμη και απαραίτητη η προβολή του διαγράμματος έντασης τύρβης σε συνάρτηση με τη μειωμένη συχνότητα, στην περιοχή του απορεύματος. Έτσι, δημιουργείται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη συμβολή της μειωμένης συχνότητας στα ασταθή φαινόμενα. Όπως και στα στατικά προφίλ τύρβης, έτσι και σε αυτά διαιρείται η RMS τιμή της u_x με τη μέση της ελεύθερης ροής, δηλαδή 11m/s.



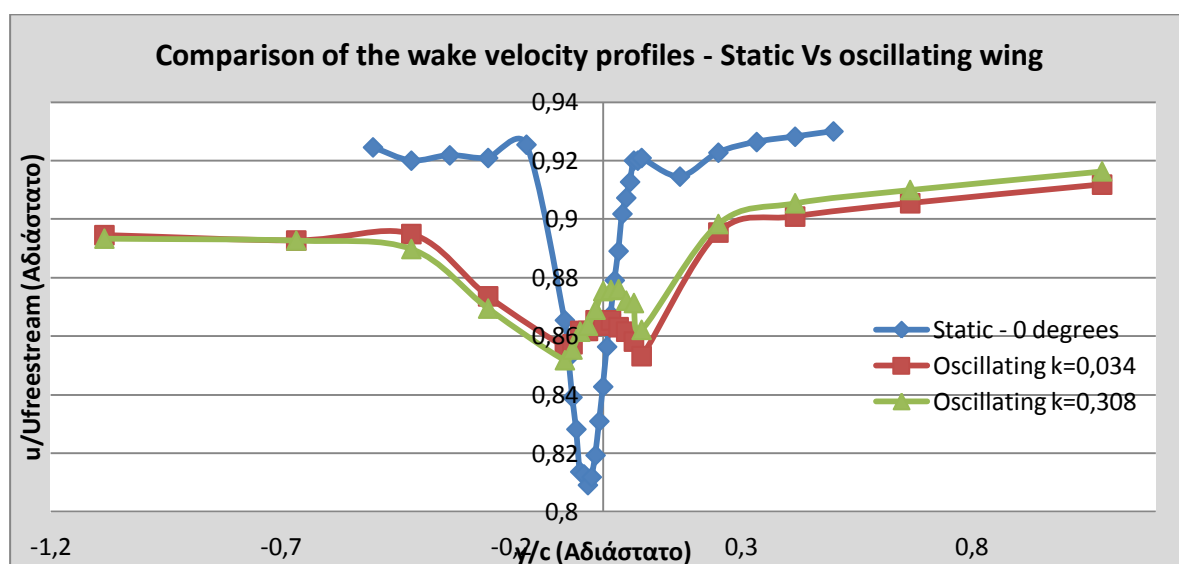
Διάγραμμα 55. Ένταση τύρβης συναρτήσει μειωμένης συχνότητας

Η καμπύλες του διαγράμματος 55 έχουν διαφορετική μορφή από αυτές των διαγραμμάτων 51 και 52 καθώς παρουσιάζουν δύο ευδιάκριτα μέγιστα. Έχουν όμως, σημαντικές ομοιότητες με τα διαγράμματα της εργασίας [22] που αναφέρονται στην RMS τιμή της κάθετης ταχύτητας U_y διαιρεμένη με αυτή της ελεύθερης ροής. Η θέση των μεγίστων κάθε καμπύλης δεν είναι τυχαία και καθορίζεται από την εξίσωση κίνησης του μοντέλου (τις ακραίες θέσεις) και την γεωμετρία της αεροτομής. Το ένα μέγιστο σε όλες τις περιπτώσεις είναι στο 1cm, ενώ το άλλο μεταβάλλεται με τη μειωμένη συχνότητα ταλάντωσης από το -1cm για $k=0,034$ και $k=0,0685$ και πλησιάζει τα -3cm για συχνότητες μεγαλύτερες των 6Hz ή $k=0,205$. Γενικά πάντως, η ένταση της τύρβης στην ευρύτερη περιοχή(-13cm έως -5cm & 3cm έως 13cm) του απορεύματος αυξάνεται με την αύξηση της

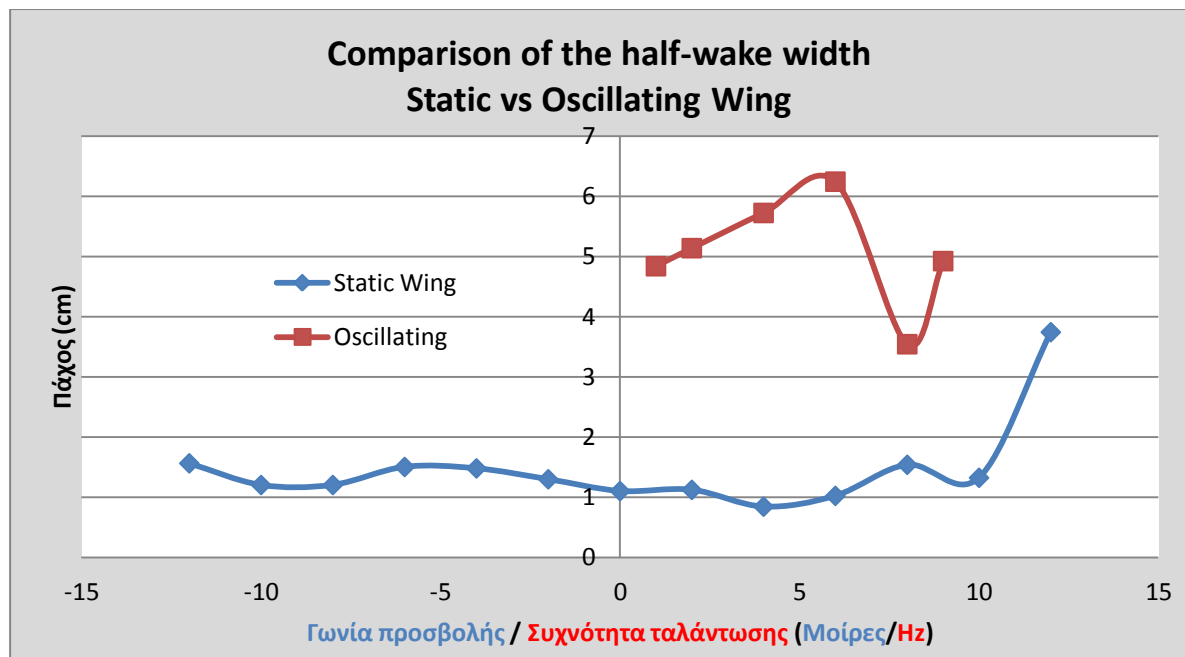
μειωμένης συχνότητας. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο για την στενή περιοχή των δύο μεγίστων όπου μετά τα 6Hz ή $k=0,205$ η τύρβη μειώνεται, όπως παρατήρησε και ο Park et al 1990 [13] αλλά και οι Jung & Park [22]. Η προηγούμενη παρατήρηση φυσικά συσχετίζεται με την αντίστοιχη για το μισό πάχος στο 4.1.2.α. Τέλος, η τιμή της έντασης για την ευρύτερη περιοχή έχει τιμή από 1,3% έως 5% και ενώ στην πιο στενή ζώνη 4,5% έως 8% και είναι αρκετά υψηλότερες σε σχέση με την ένταση της ελεύθερης ροής που είναι 0,687%.

4.1.3. Σύγκριση των απορευμάτων ακίνητης και ταλαντευόμενης πτέρυγας σε στρωτή ροή

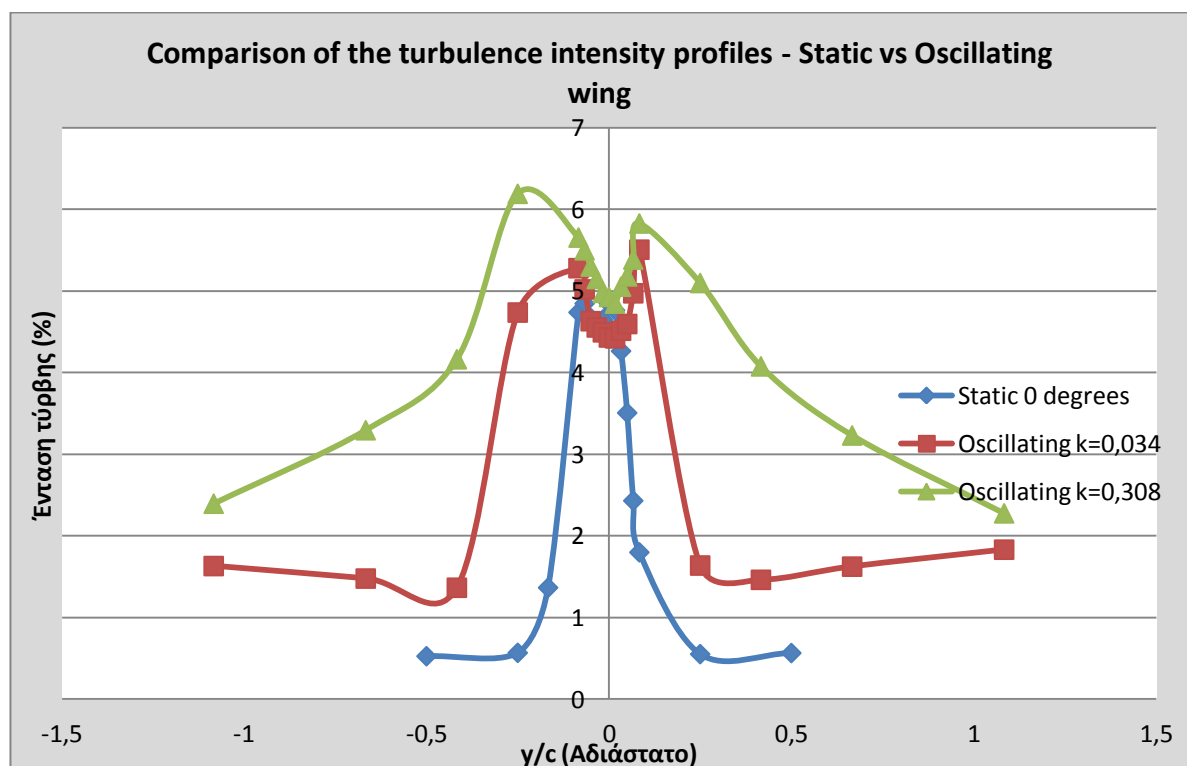
Για την σύγκριση των δύο καθεστώτων κίνησης του μοντέλου ώστε να φανεί η επίδραση της ταλάντωσης στα διαγράμματα των ταχυτήτων, του μισού-πάχους και της εντάσεως τύρβης στο απόρευμα, ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα 56, 57 και 58. Αυτά αποτελούνται από την καμπύλη των 0° της ακίνητης πτέρυγας (ως η μεσαία θέση) καθώς και από τις καμπύλες των 1Hz / $k=0,034$ και 9Hz / $k=0,308$ της ταλαντευόμενης πτέρυγας.



Διάγραμμα 56. Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων του απορεύματος για ακίνητη και ταλαντευόμενη πτέρυγα



Διάγραμμα 57. Σύγκριση του μισού πάχους του απορεύματος για ακίνητη και ταλαντευόμενη πτέρυγα



Διάγραμμα 58. Σύγκριση των προφίλ εντάσεως τύρβης για ακίνητη και ταλαντευόμενη πτέρυγα

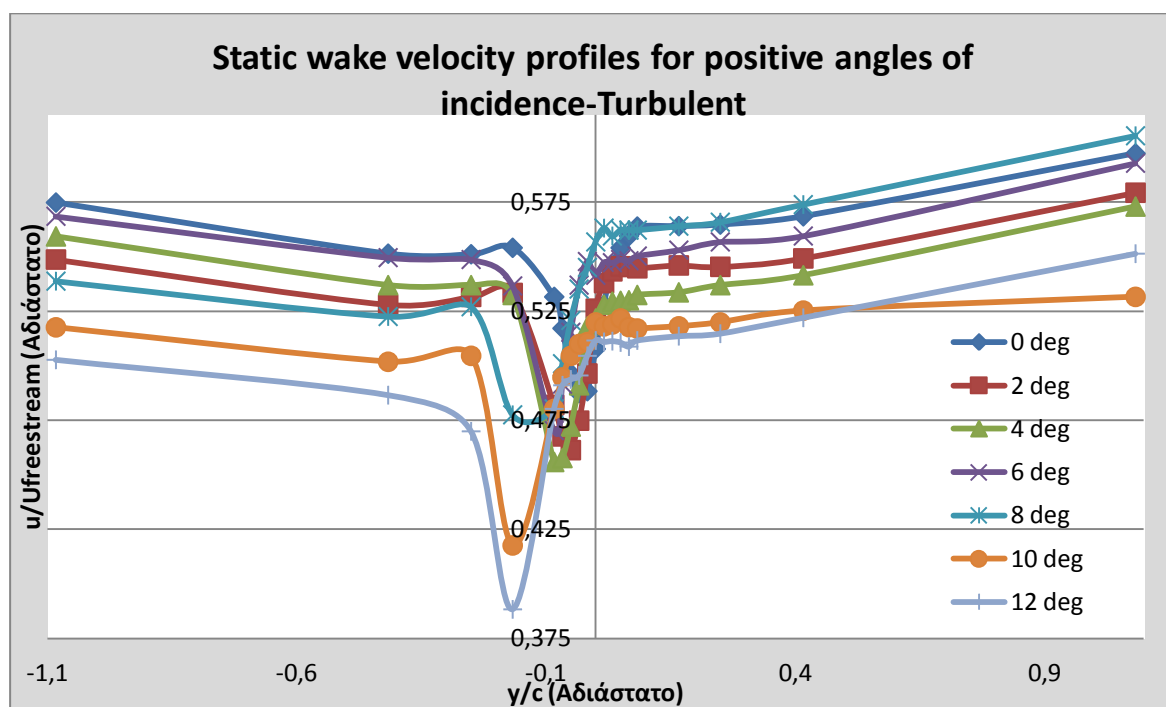
Από την ανάγνωση των διαγραμμάτων είναι εύκολα αντιληπτό ότι η ταλαντευόμενη κίνηση επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό όλα τα προς μελέτη μεγέθη. Αναφορικά με το διάγραμμα 56, φαίνεται πως η ταλάντωση της πτέρυγας μειώνει αισθητά την ταχύτητα στην ευρύτερη περιοχή του απορεύματος. Επιπρόσθετα, η στενότερη περιοχή (εκεί όπου τα φαινόμενα είναι πιο έντονα) έχει σαφώς μεγαλύτερο μήκος στην ταλαντευόμενη κατάσταση από ότι στην ακίνητη και μάλιστα στην περιοχή όπου η ταχύτητα για την ακίνητη κατάσταση μειώνεται δραματικά, στην ταλάντωση σημειώνεται μια ελαφρά επιτάχυνση. Σε συνέχεια των άνωθι παρατηρήσεων στο διάγραμμα 57 η κίνηση του μοντέλου, όπως είναι φυσικό, αυξάνει κατά πολύ (έως και 6 φορές) την τιμή του μισού πάχους. Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι το μισό πάχος είναι περίπου ίσο στην περίπτωση των 12° (όπου είναι σημαντικά τα blockage effects) με αυτή του $k=0,274$ ή 8 Hz. Τέλος, η ταλάντωση οδηγεί σε σοβαρή αύξηση της τύρβης στο απόρευμα της πτέρυγας αν και στην στενή περιοχή (από -1cm έως 1cm) η έντασή της είναι περίπου ίδια ή και χαμηλότερη σε ορισμένα μόνο σημεία.

4.2 Μετρήσεις ταχυτήτων-ένταση τύρβης σε τυρβώδη ροή

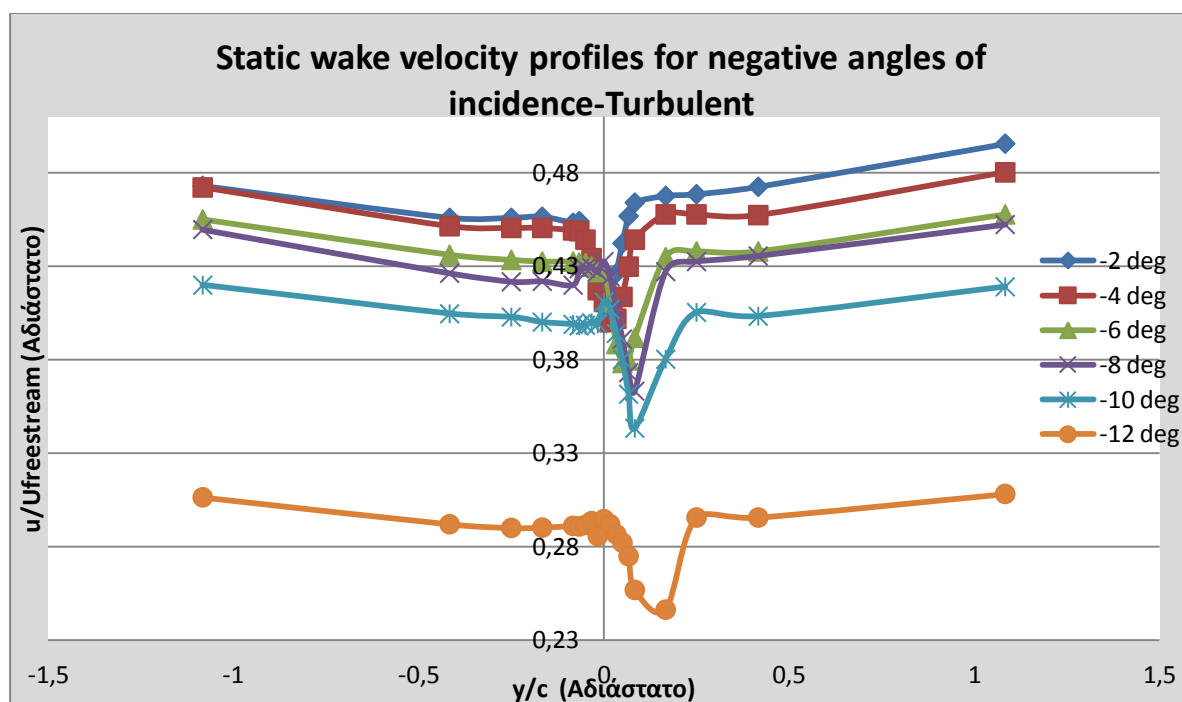
4.2.1.α Κατανομή ταχυτήτων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο ακίνητο

Η δομή και τα περιεχόμενα αυτού του υποκεφαλαίου δε διαφέρουν ουσιαστικά με τα αντίστοιχα του 4.1, μόνο που σε αυτή την περίπτωση η ελεύθερη ροή έχει αρκετά υψηλότερη τύρβη (5,8%), μετά και την προσθήκη του πλέγματος στην αεροσήραγγα. Αρχικά, παρουσιάζεται η κατανομή των ταχυτήτων του απορεύματος σε αδιαστατοποιημένη μορφή, όπως στα διαγράμματα 46 και 47, για όλο το εύρος κίνησης του μοντέλου. Οι θέσεις στον άξονα y είναι ελαφρώς διαφοροποιημένες σε σύγκριση με αυτές της στρωτής ροής ώστε να απεικονίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τη μορφή του απορεύματος τώρα που η ροή

είναι πιο ‘αναστατωμένη’. Συγκεκριμένα, καλύπτουν μεγαλύτερο μήκος φθάνοντας τα 26cm από τα 10cm που είχε η πρώτη περίπτωση.



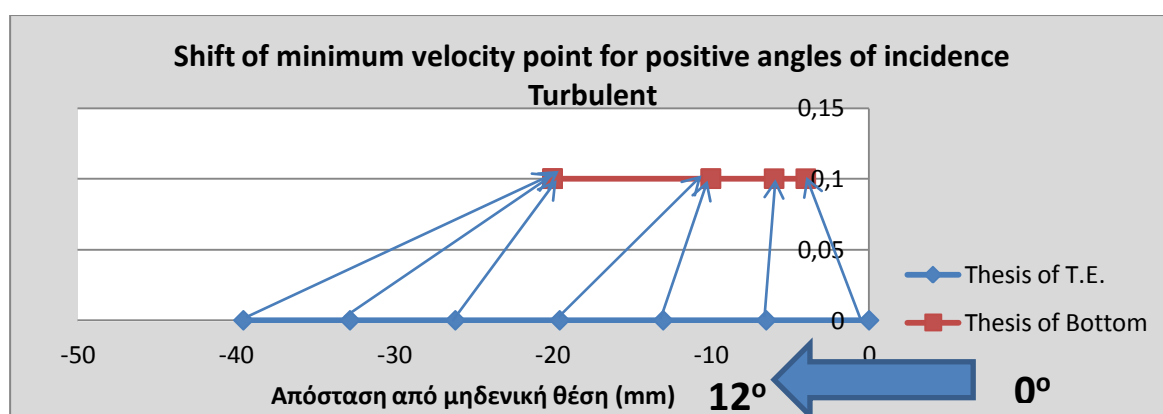
Διάγραμμα 59. Κατανομή ταχυτήτων απορεύματος για γωνίες προσβολής 0,2,4,6,8,10,12.



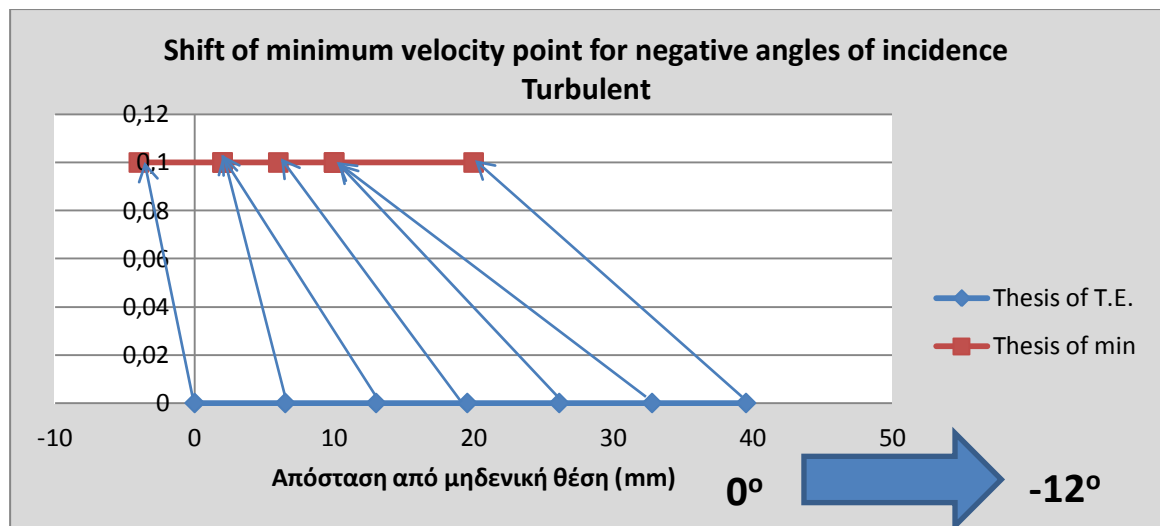
Διάγραμμα 60. Κατανομή ταχυτήτων απορεύματος για γωνίες προσβολής -2, -4, -6, -8, -10, -12.

Από τη μελέτη των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων διαπιστώνεται ότι η μορφή των καμπύλων είναι η γνωστή [22], καθώς αποτελείται από μια στενή περιοχή (κοιλάδα) όπου οι ταχύτητες μειώνονται σημαντικά σε σχέση με την ευρύτερη περιοχή του απορεύματος. Είναι όμως αξιοσημείωτο ότι η πτώση είναι μεγάλη αφού οι ταχύτητες σε όλο το εύρος μέτρησης, ακόμη και στις άκρες, είναι κοντά στο 50% της ταχύτητας της ελεύθερης ροής. Επίσης, η μείωση αυτή των ταχυτήτων είναι όλο και μεγαλύτερη καθώς αυξάνεται η απόλυτη τιμή της γωνίας προσβολής. Η παραπάνω διαπίστωση είναι ευδιάκριτη και στα δύο διαγράμματα με μία μόνο εξαίρεση στο 59 όπου για τις 6 και 8 μοίρες δε συμβαίνει μείωση, αλλά μικρή αύξηση των ταχυτήτων, πράγμα το οποίο ίσως να οφείλεται στα blockage effects της αεροσήραγγας. Στο διάγραμμα 60 δεν παρουσιάζονται τα φαινόμενα αυτά πιθανώς λόγω της γεωμετρίας της αεροτομής, όμως, όταν η γωνία λάβει τιμή -12° η πτώση ταχύτητας είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη γιατί πρέπει να υποβαθμίζεται η αεροδυναμική απόδοση της φτερωτής εξαιτίας της θέσης της πτέρυγας.

Στη συνέχεια προβάλλονται τα διαγράμματα μετατόπισης του σημείου ελάχιστης ταχύτητας σε συνάρτηση με τη θέση του χείλους εκφυγής της πτέρυγας - τη γωνία προσβολής του μοντέλου ξεχωριστά για θετικές και αρνητικές γωνίες προσβολής.



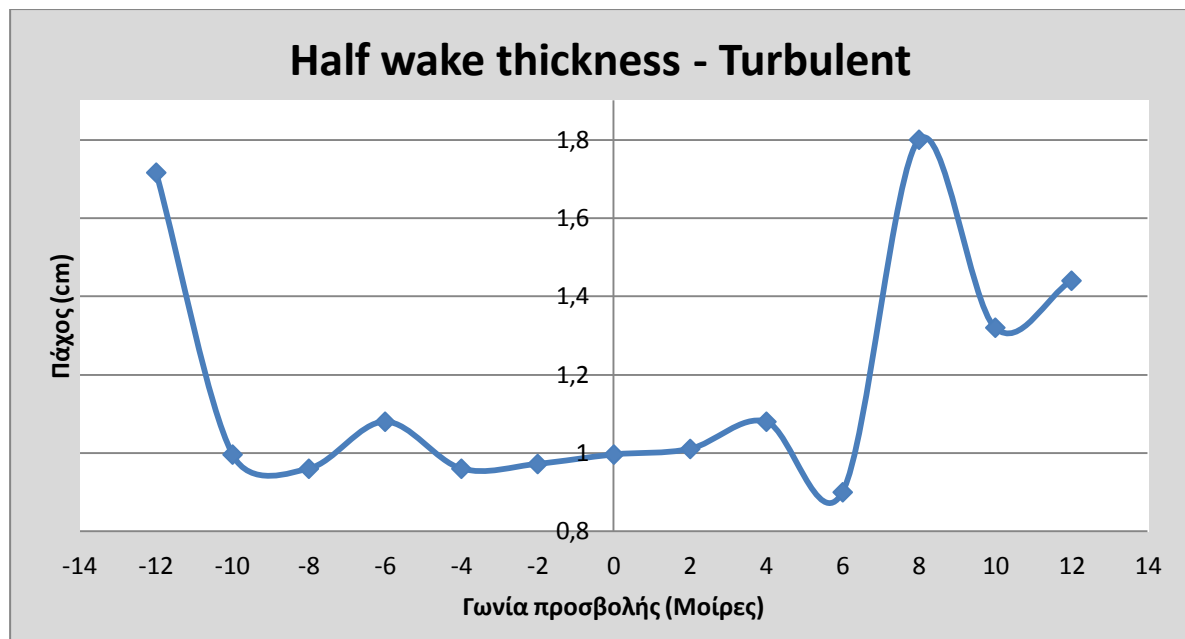
Διάγραμμα 61. Μετατόπιση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας με κίνηση της πτέρυγας από τις 0° στις 12° .



Διάγραμμα 62. Μετατόπιση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας με κίνηση της πτέρυγας από τις 0° στις -12°.

Η σχέση που υπάρχει μεταξύ της θέσης αλλά και της φοράς κίνησης του χείλους εκφυγής της πτέρυγας είναι εύκολα κατανοητή. Τα οριακά στρώματα του μοντέλου, λόγω της γεωμετρίας της αεροτομής του, ενώνονται στα αρνητικά του άξονα y όταν η γωνία είναι 0° και έπειτα το σημείο ένωσης κινείται προς τη φορά που επιβάλλει η γωνία προσβολής της πτέρυγας. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει μια αυστηρή σχέση που να συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη καθώς για κάποιες μοίρες η θέση του σημείου της ελάχιστης ταχύτητας είναι η ίδια. Η προέκταση του χείλους εκφυγής μετακινείται από το κεντρικό σημείο στα 40mm ή -40mm ανάλογα, ενώ το σημείο ελάχιστης ταχύτητας από τα -4mm στα -20mm, για το πρώτο διάγραμμα και από τα -4mm στα 20mm αντίστοιχα για το δεύτερο διάγραμμα. Φυσικά, τα blockage effects της αεροσήραγγας θα επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό τα σημεία των διαγραμμάτων.

Όπως και στο υποκεφάλαιο 4.1.1.α με τη στρωτή ροή, σειρά έχει το διάγραμμα μεταβολής του πάχους του απορεύματος, ή καλύτερα του μέσου πάχους, σε συνάρτηση με τη γωνία προσβολής της πτέρυγας σε τυρβώδη ροή.



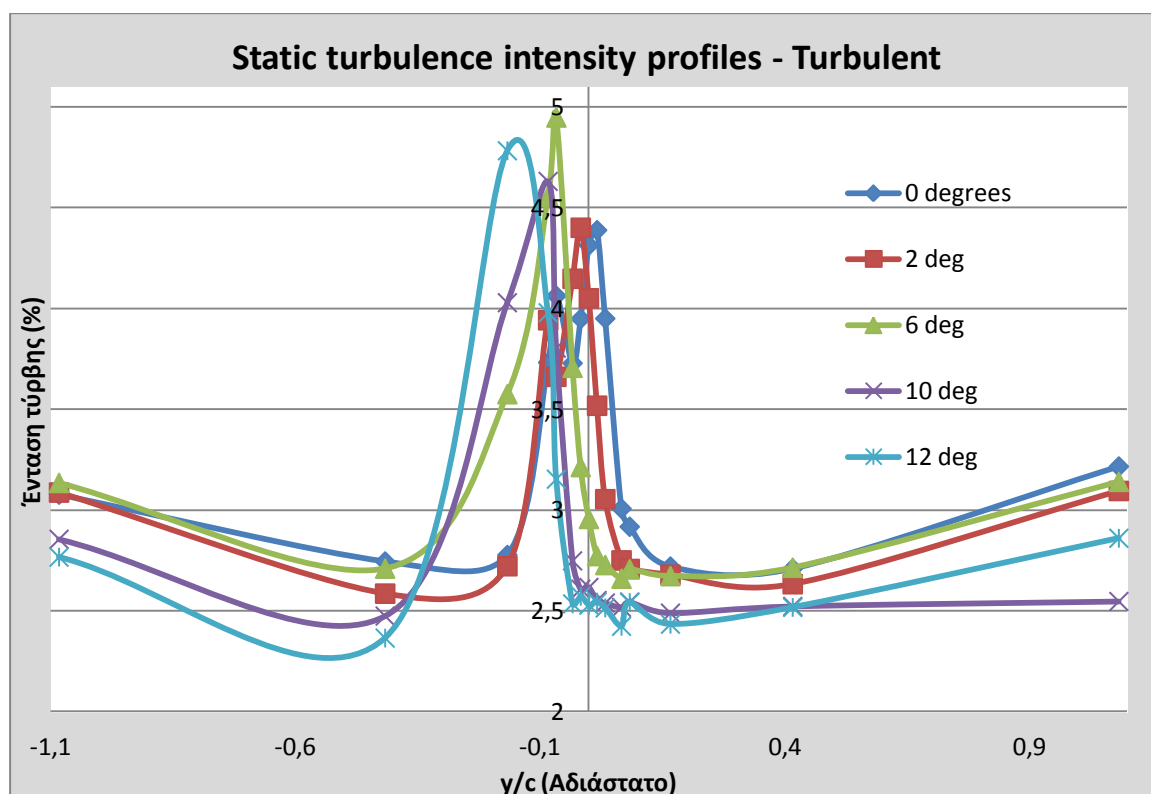
Διάγραμμα 63. Το μισό πάχος του απορεύματος συναρτήσει της γωνίας προσβολής

Το διάγραμμα 63 δείχνει πως η τιμή του πάχους του απορεύματος για τις περισσότερες γωνίες κινείται κοντά στο 1cm, δηλαδή ίσο με το μισό του μέγιστου πάχους της αεροτομής, ενώ στις ακραίες θέσεις κυμαίνεται στις τιμές 1,4 έως 1,8cm. Παράλληλα, από τις -4° έως τις 2° η καμπύλη παρουσιάζει σχεδόν γραμμική συμπεριφορά και μάλιστα με θετική κλίση αφού καθώς αυξάνει η γωνία προσβολής αυξάνεται και το πάχος του απορεύματος. Στις περιοχές όμως των -4° έως -12° καθώς και των 2° έως 8° είναι φανερό πως η συμπεριφορά του πάχους δεν είναι η ίδια. Αρχικά, σημειώνεται μια αισθητή αύξηση του μεγέθους, την οποία διαδέχεται μια μικρή μείωση και τελικά καταλήγει σε μια μεγαλύτερη αύξηση από την πρώτη. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής; στο πρώτο στάδιο το πάχος μεγαλώνει φυσιολογικά εφόσον μετατοπίζεται το σημείο αποκόλλησης της ροής προς τα εμπρός, ενώ, στο δεύτερο στάδιο επιδρούν τα blockage effects της αεροσήραγγας συμπιέζοντας σε μικρό βαθμό το απόρευμα της πτέρυγας. Στο τελευταίο στάδιο (-12° και 8°) η αποκόλληση έχει προχωρήσει σε τέτοιο βαθμό που υπερνικά τα προαναφερθέντα φαινόμενα και διπλασιάζει σχεδόν το πάχος. Παρόλα αυτά, το δεύτερο στάδιο επαναλαμβάνεται στις τελευταίες μοίρες των θετικών γωνιών προσβολής (10° και 12°)

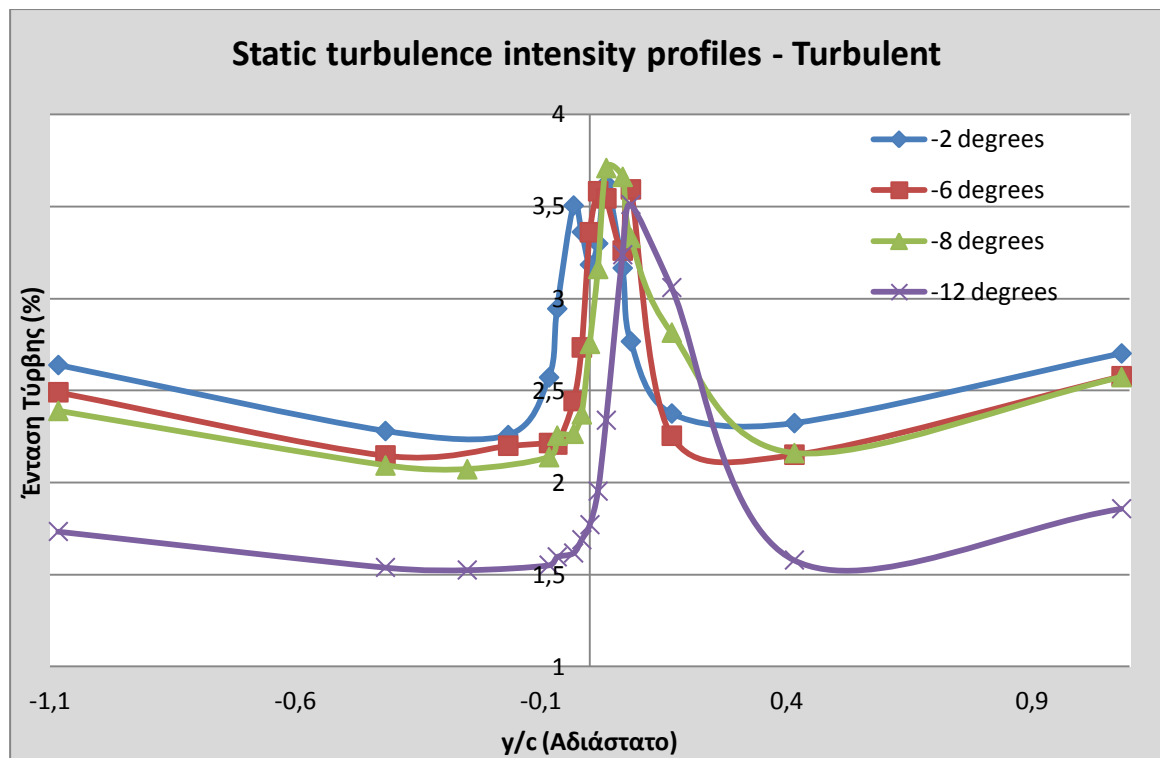
κάνοντας έτσι αντιληπτό το γεγονός ότι η εξέλιξη του πάχους του απορεύματος, εξαρτάται άμεσα από τη γωνία προσβολής της πτέρυγας και επηρεάζεται σημαντικά από τα φαινόμενα εμποδισμού που μπορεί να προκύψουν σε μία αεροσήραγγα.

4.2.1.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο ακίνητο σε τυρβώδη ροή

Έχει ειπωθεί από τα εισαγωγικά κεφάλαια (2.1.2) πως με την προσθήκη του πλέγματος τύρβης στην αρχή της αεροσήραγγας η έντασή της στην ελεύθερη ροή έφθασε την τιμή των 5,8%. Είναι επομένως απαραίτητο να υπολογισθεί και η ένταση της τύρβης στο απόρευμα της πτέρυγας ώστε να φανεί η εξέλιξη του εν λόγω μεγέθους στην σημαντική αυτή περιοχή. Τα διαγράμματα 64 και 65 παρουσιάζουν τις κατανομές της τύρβης u_x/U_∞ σε επιλεγμένες θέσεις του άξονα y και γωνίες προσβολής 0° , 2° , 6° , 10° , 12° και -2° , -6° , -8° , -12° αντίστοιχα.



Διάγραμμα 64. Κατανομή εντάσεως τύρβης u_x/U_∞ (%) στο απόρευμα για 0° , 2° , 6° , 10° , 12°



Διάγραμμα 65. Κατανομή εντάσεως τύρβης $u_x/U_\infty(\%)$ στο απόρευμα για -2° , -6° , -8° , -12°

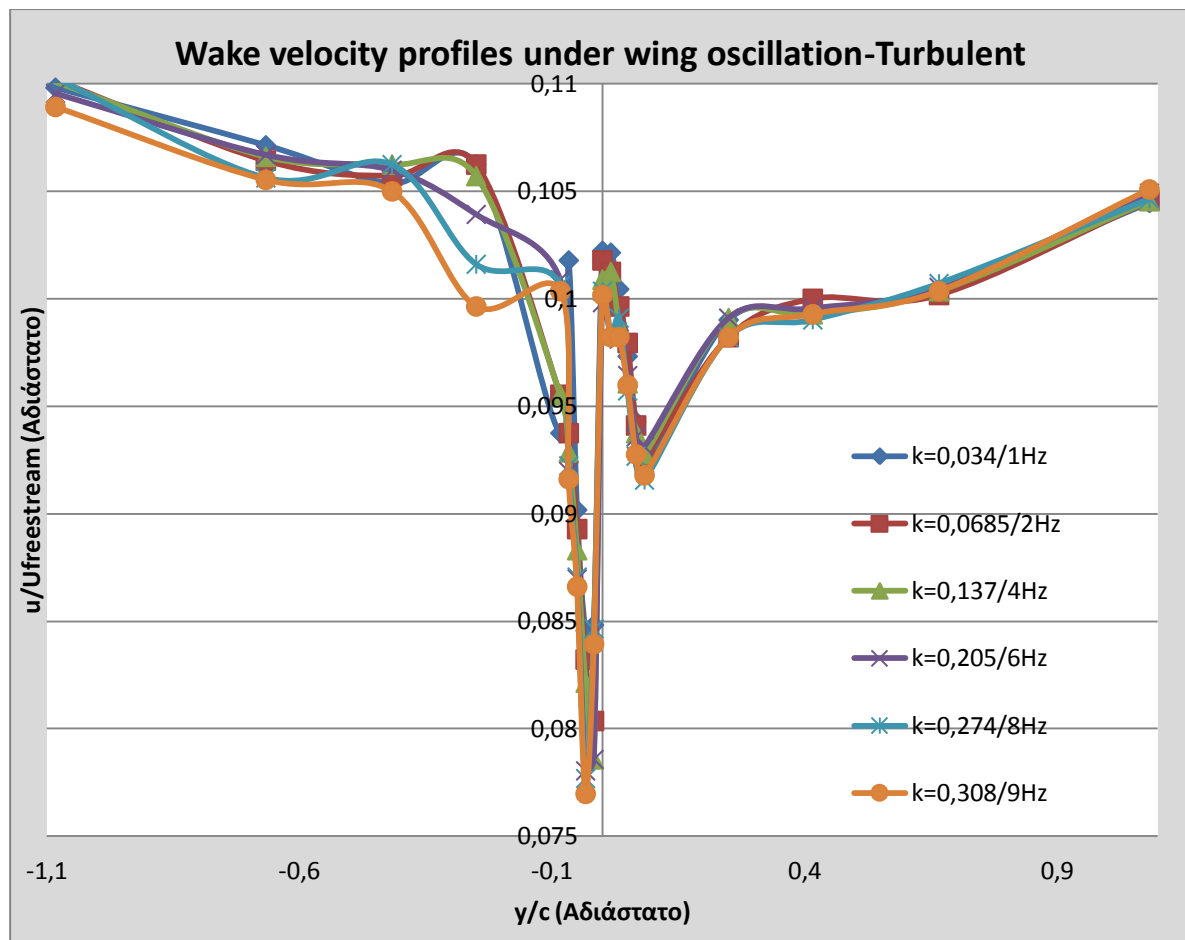
Με την παρατήρηση των προηγούμενων διαγραμμάτων είναι εξ αρχής φανερό ότι η ένταση της τύρβης στην περιοχή του απορεύματος υφίσταται μια αισθητή μείωση σε σχέση με την ελεύθερη ροή. Στην ευρύτερη περιοχή, η τύρβη κυμαίνεται από 2,5% έως 3% για τις θετικές γωνίες προσβολής και από 1,5% έως 2,5% για τις αρνητικές γωνίες. Αντίθετα, στην στενότερη περιοχή ενδιαφέροντος η τύρβη κυμαίνεται σε τιμές από 2% έως 5%. Η πτώση της έντασης στην ευρύτερη περιοχή πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή καθώς περνά από το σημείο που είναι τοποθετημένη η πτέρυγα στην αεροσήραγγα ευθυγραμμίζεται ως ένα βαθμό εξαλείφοντας έτσι κάποιες από τις δίνες. Μολονότι, στη στενότερη περιοχή, η ένταση διατηρεί την τιμή της υψηλά καθώς εκεί συμβαίνει η ένωση των δύο οριακών στρωμάτων.

Όσον αφορά τη μορφή των καμπύλων φαίνεται πως κατά κύριο λόγο έχουν ένα ευδιάκριτο μέγιστο - (ή δύο κυρίως σε χαμηλές μοίρες) - στην στενότερη περιοχή του απορεύματος ενώ επίσης, κινούνται προς τη φορά κίνησης του χείλους εκφυγής της

πτέρυγας, κάνοντάς τες όμοιες αλλά αντίθετες με τις καμπύλες των προφίλ ταχυτήτων. Το παράδοξο, εκτός από τη γενική μείωση της έντασης της τύρβης στο απορεύμα, είναι ότι καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής κατά απόλυτη τιμή, ξεκινώντας από τις 0° η τύρβη αρχικά μειώνεται, στη συνέχεια αυξάνεται και μετά πάλι μειώνεται. Αν μελετηθούν τα διαγράμματα 64 και 65 σε συνδυασμό με το 63 θα φανεί πως υπάρχει μια σχέση μεταξύ του πάχους του απορεύματος και της έντασης της τύρβης. Συγκεκριμένα, το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι όταν αυξάνεται το πάχος απορεύματος μειώνεται η ένταση της τύρβης, κυρίως στη στενότερη περιοχή, αλλά και αντίστροφα. Αυτό μπορεί να έχει την εξής εξήγηση: τα δύο οριακά στρώματα έχοντας υψηλή ενέργεια αλλά και μεγαλύτερο πάχος καθώς λόγω της τυρβώδους διάχυσης, κινούνται προς τα πίσω και ανάμεσά τους δημιουργούν μια ‘απομονωμένη’ από την εξωτερική ροή, περιοχή αποτρέποντας έτσι να προστεθεί περαιτέρω τύρβη σε αυτή. Με αυτό τον τρόπο, όταν αυξάνεται το πάχος του απορεύματος λιγότερη εξωτερική τύρβη προστίθεται στην στενότερη περιοχή και η καμπύλη στο διάγραμμα χαμηλώνει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η καμπύλη στις -12° όπου το πάχος σύμφωνα με το διάγραμμα 63 είναι μέγιστο οπότε η ένταση της τύρβης μειώνεται στο ελάχιστο και δεν ξεπερνά το 1%.

4.2.2.α Κατανομή ταχυτήτων σε τυρβώδη ροή με το μοντέλο σε ταλάντωση

Μετά την περίπτωση του ακίνητου πτερυγίου σειρά έχει η περίπτωση της ταλάντωσης όπου οι θέσεις μέτρησης στον άξονα y δεν άλλαξαν σε σχέση με πριν, όπως επίσης και η μέση ταχύτητα ελεύθερης ροής. Το διάγραμμα 66 δείχνει τις κατανομές ταχυτήτων για τις 6 γνωστές διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης.

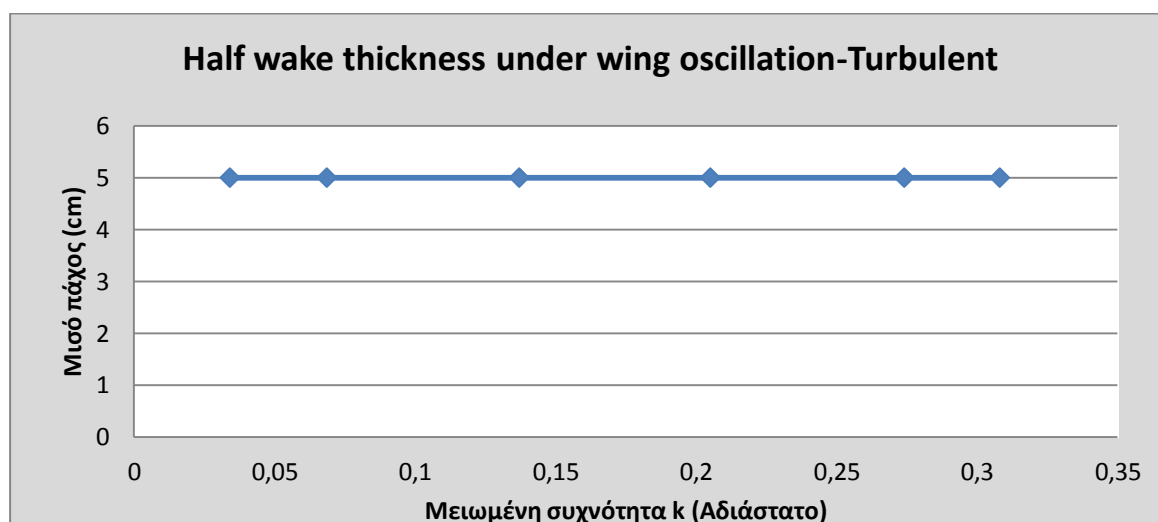


Διάγραμμα 66. Κατανομή ταχυτήτων απορεύματος για 6 διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης

Η ταλάντωση της πτέρυγας οδηγεί σε αξιοσημείωτα συμπεράσματα όσον αφορά το προφίλ ταχυτήτων του απορεύματος. Είναι γεγονός πως δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις μορφές των καμπύλων παρότι με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης σημειώνεται μια μικρή μείωση της ταχύτητας. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει η μείωση της ταχύτητας u_x είναι δραματική και η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ του 8% και 11% επί της ταχύτητας της ελεύθερης ροής. Παράλληλα, στην στενότερη περιοχή του απορεύματος, από τα -5cm έως τα 5cm, παρατηρούνται δύο τοπικά ελάχιστα ταχύτητας στις θέσεις -4mm και 1cm και ένα μέγιστο στη θέση 0. Τα ελάχιστα πρέπει να καθορίζονται από τις δύο ακραίες θέσεις που επιβάλλει η εξίσωση κίνησης του μοντέλου και το μέγιστο να οφείλεται σε τοπική επιτάχυνση της ροής εξαιτίας των παραγόμενων από το χείλος εκφυγής, δινών. Το μέγιστο

όμως, θα μπορούσε να οφείλεται και σε σφάλμα μέτρησης του θερμονήματος καθώς είναι ευαίσθητο όσον αφορά την κατεύθυνση της ταχύτητας και στην περιοχή του απορεύματος υπάρχει αρκετή ‘αναστάτωση’ στη ροή. Για πιο ασφαλή συμπεράσματα θα πρέπει να μελετηθούν και τα βίντεο από την απεικόνιση της ροής.

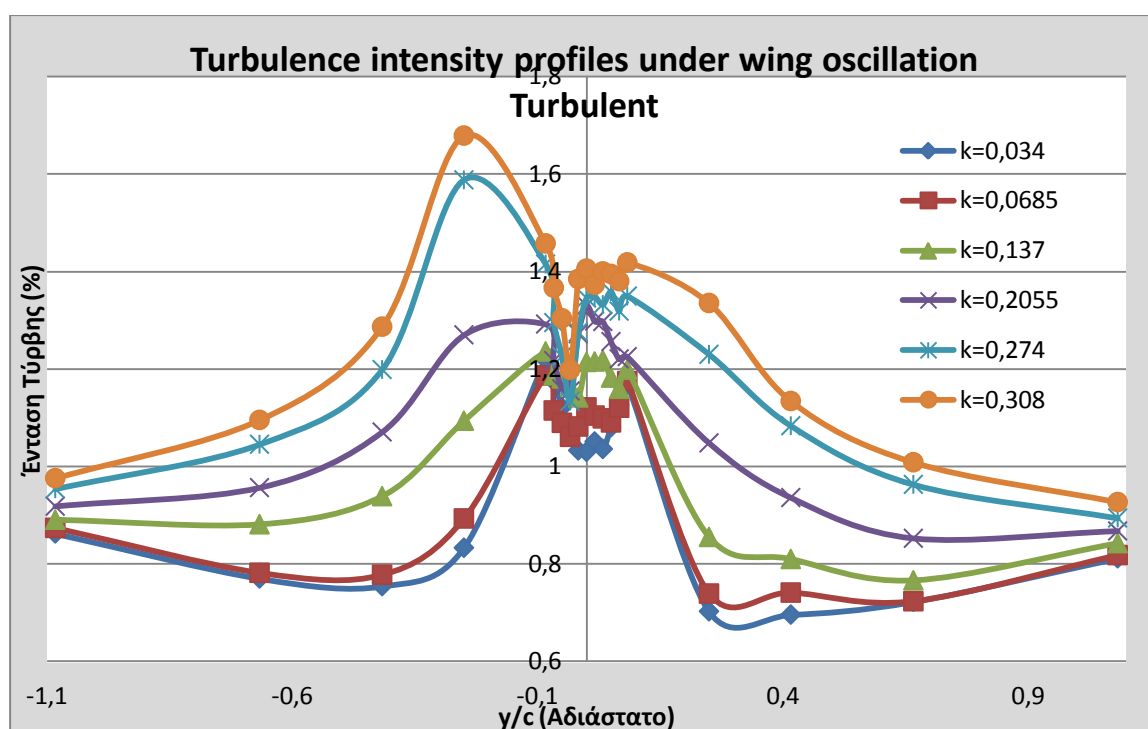
Αναφορικά με την εξέλιξη του μισού πάχους του απορεύματος είναι φυσικό αυτό να αλλάζει ελάχιστα με τη συχνότητα. Με υπολογισμούς όπως και για την στρωτή ροή η τιμή του βρέθηκε να είναι 6mm (λόγω της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζουν τα προφίλ ταχυτήτων να είναι ‘μυτερά’). Προφανώς η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή έτσι η τάξη μεγέθους του μισού πάχους εκτιμήθηκε με άλλο τρόπο. Σύμφωνα με την εργασία [15] το πάχος του απορεύματος μπορεί να ληφθεί ως το μήκος της περιοχής όπου συμβαίνει αισθητή πτώση της ταχύτητας u_x . Όπως, σημειώθηκε και προηγουμένως η περιοχή εκτείνεται από τα -5cm έως τα 5cm, επομένως, μία τάξη μεγέθους του πάχους είναι 10cm και του μισού πάχους 5cm. Δηλαδή, το πάχος του απορεύματος είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερο του μέγιστου πάχους της αεροτομής. Έτσι σχηματίζεται το διάγραμμα 67 με το μισό πάχος να έχει μία προσεγγιστική τιμή και λόγω της ομοιότητας των προφίλ να μην αλλάζει σημαντικά.



Διάγραμμα 67. Προσεγγιστική τιμή του μισού πάχους για τις 6 διαφορετικές μειωμένες συχνότητες.

4.2.2.β Ένταση τύρβης απορεύματος με το μοντέλο σε ταλάντωση και ροή τυρβώδη

Μετά από την προβολή των κατανομών ταχυτήτων στο απόρευμα οι οποίες δεν έδωσαν αισθητές διαφορές ανάμεσα στις διάφορες μειωμένες συχνότητες ακολουθούν τα προφίλ εντάσεως τύρβης με το διάγραμμα 68.



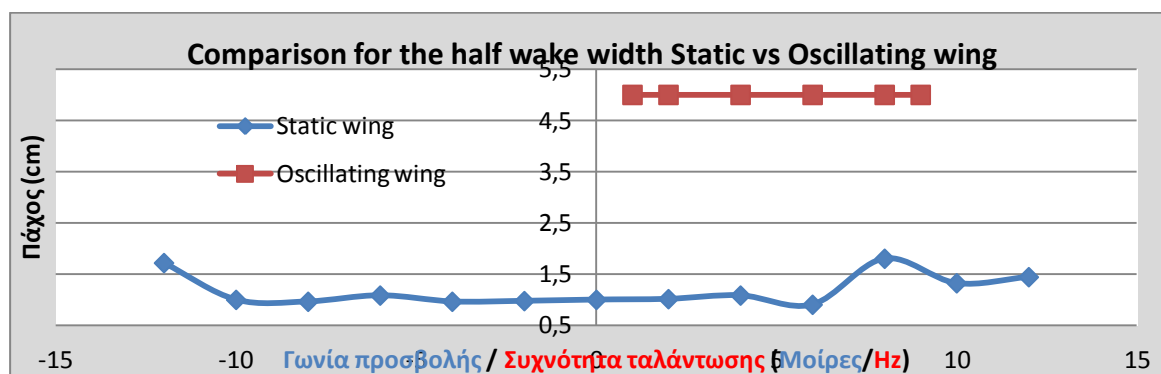
Διάγραμμα 68. Ένταση τύρβης συναρτήσει μειωμένης συχνότητας

Η διαπίστωση που γίνεται εξ αρχής είναι ότι τα επίπεδα τύρβης είναι πολύ χαμηλά σε σχέση με αυτό της ελεύθερης ροής και μάλιστα σε όλο το εύρος των μετρήσεων. Η τιμή της δε, ξεκινά από 0,7% και φθάνει ως 1,6%. Το συμπέρασμα είναι ότι η ταλαντευόμενη κίνηση της πτέρυγας σε συνδυασμό με την τυρβώδη ροή δημιουργεί πίσω της μία περιοχή όπου η ταχύτητα επιβραδύνεται σε μεγάλο βαθμό ως προς τη x κατεύθυνση και η ένταση της τύρβης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια οι αστάθειες ως προς τον άξονα x είναι μικρές. Παρόλα αυτά, η κατανομή κάθε περίπτωσης παρουσιάζει δύο μέγιστα όπως και στην [22]

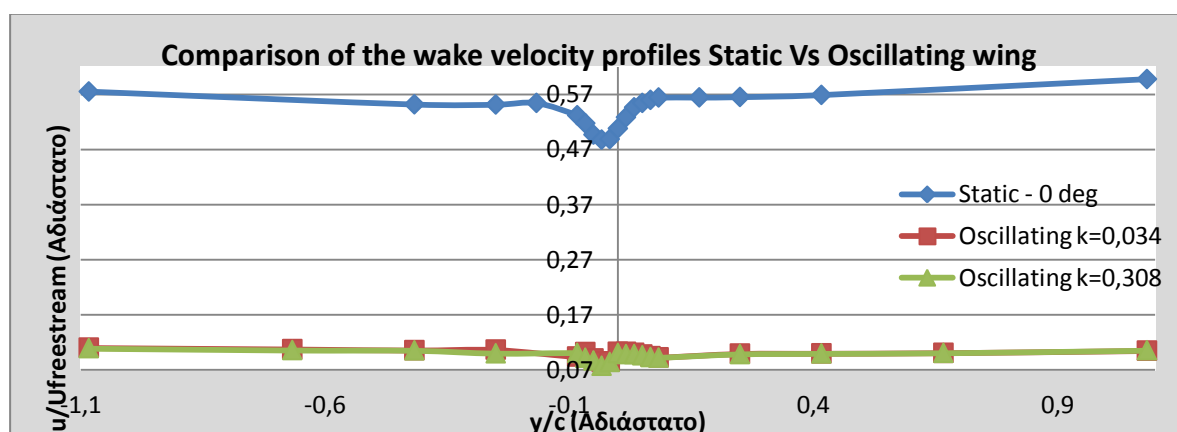
και υπάρχει αυξητική τάση της τύρβης αλλά και του πάχους της περιοχής, με την αύξηση της μειωμένης συχνότητας και κυρίως μετά τα 4Hz ή $k=0,137$.

4.2.3. Σύγκριση των απορευμάτων ακίνητης και ταλαντευόμενης πτέρυγας σε τυρβώδη ροή

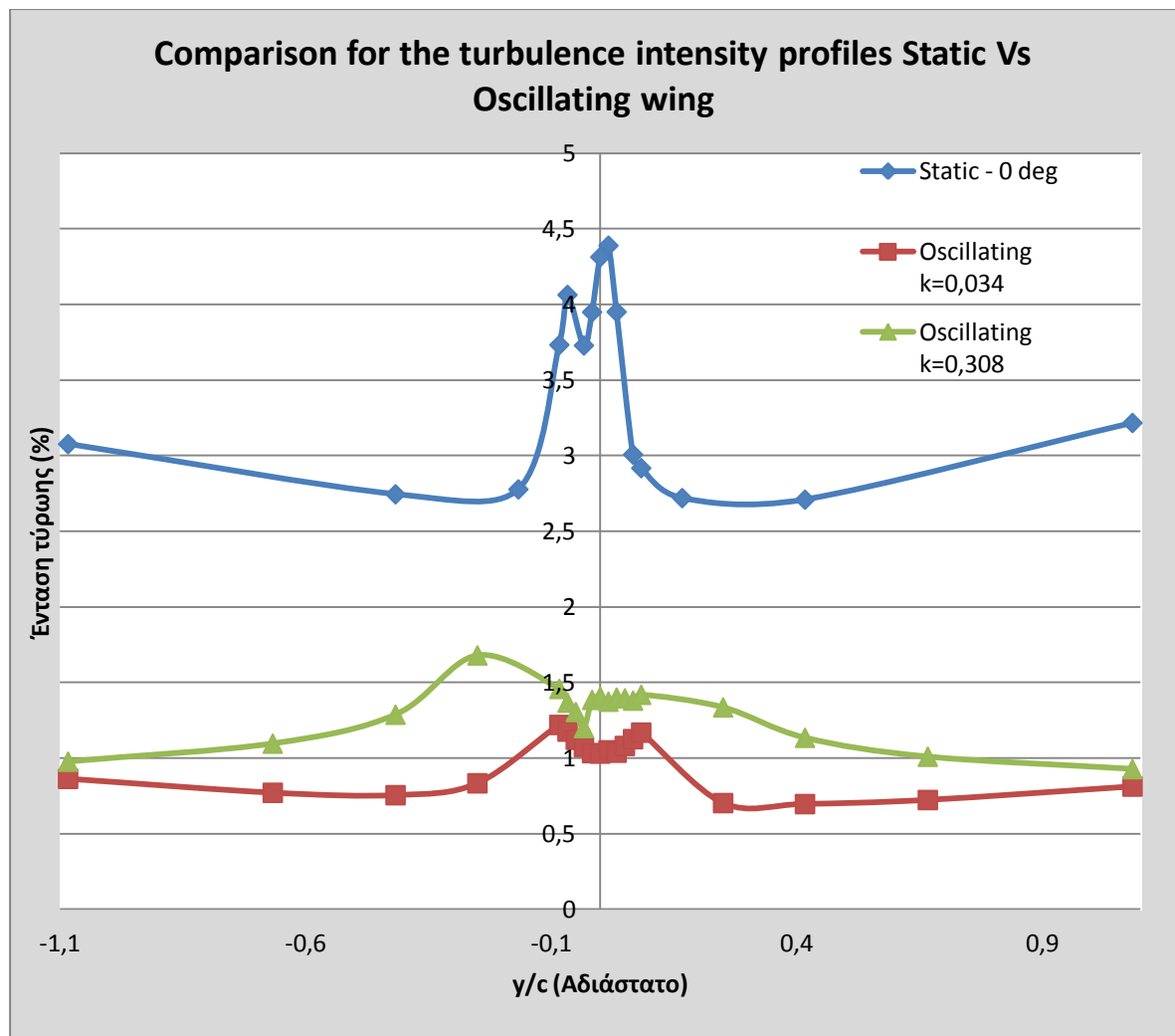
Όπως έγινε και στη στρωτή ροή, η σύγκριση θα γίνει στα προφίλ ταχύτητας, μισού πάχους και στα προφίλ εντάσεως τύρβης προκειμένου να φανεί η επίδραση της ταλάντωσης του μοντέλου όταν η ροή είναι τυρβώδης. Η καμπύλη για την ακίνητη περίπτωση αφορά τις 0° και για την ταλαντευόμενη προβάλλονται οι δύο ακραίες μειωμένες συχνότητες.



Διάγραμμα 69. Σύγκριση του μισού πάχους του απορεύματος για ακίνητη και ταλαντευόμενη πτέρυγα



Διάγραμμα 70. Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων του απορεύματος για ακίνητη και ταλαντευόμενη πτέρυγα



Διάγραμμα 71. Σύγκριση των προφίλ εντάσεως τύρβης για ακίνητη και ταλαντευόμενη πτέρυγα

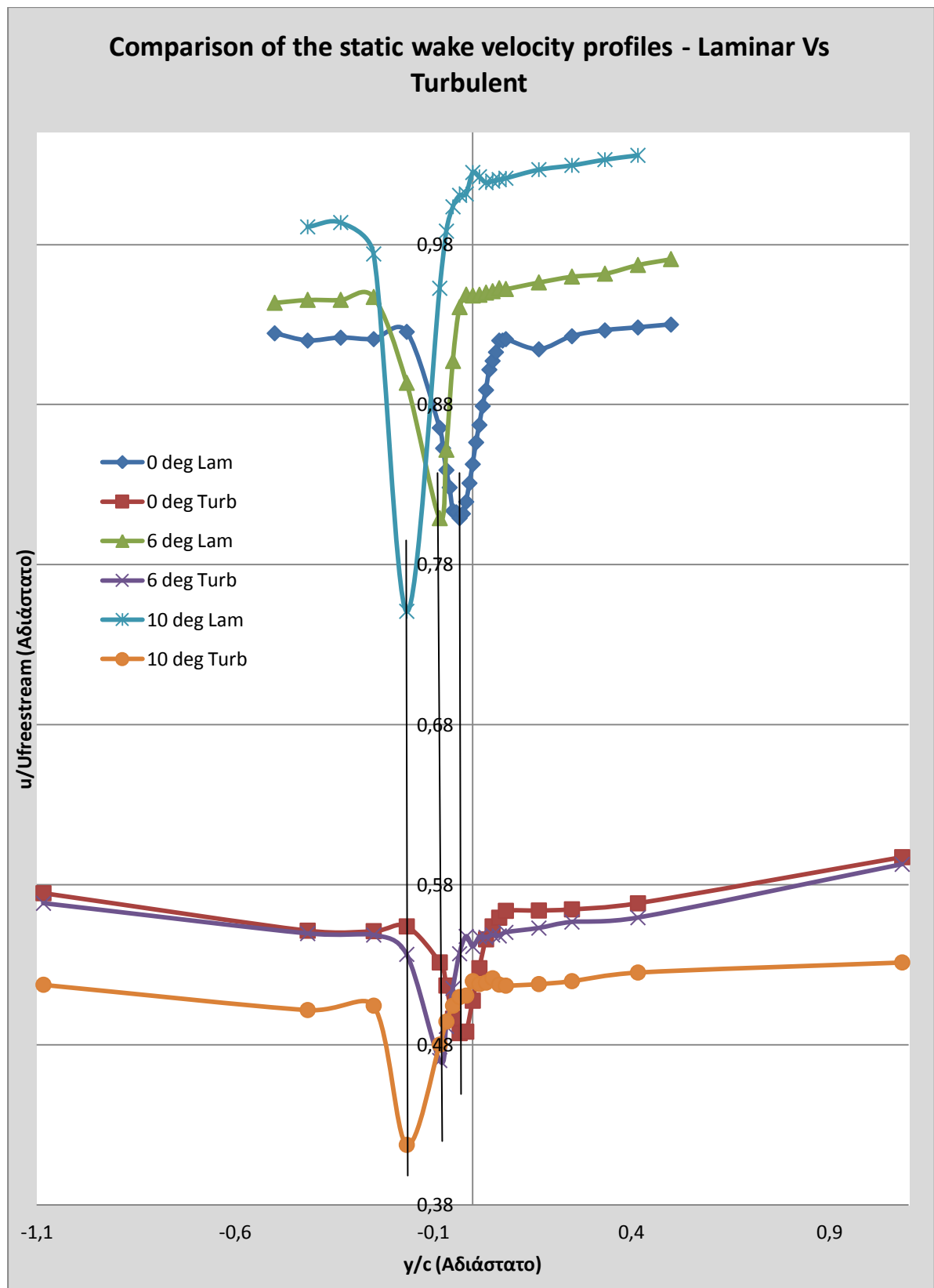
Συγκρίνοντας τις καμπύλες των διαγραμμάτων 69, 70 και 71 προκύπτουν σημαντικά αποτελέσματα για την τυρβώδη ροή. Τόσο η ταχύτητα όσο και η ένταση τύρβης κατά την ταλάντωση μειώνονται. Αυτό αποδίδεται στην δημιουργία μιας περιοχής με μικρές αστάθειες ως προς τον άξονα x , ως αποτέλεσμα του συνδυασμού τυρβώδους ροής και ταλάντωσης). Από την άλλη πλευρά, το πάχος του απορεύματος αυξάνεται σε σχέση με την ακίνητη περίπτωση όπως ήταν αναμενόμενο και συγκεκριμένα έως και 5 φορές.

4.3 Σύγκριση των απορευμάτων της στρωτής ροής με αυτά της τυρβώδους

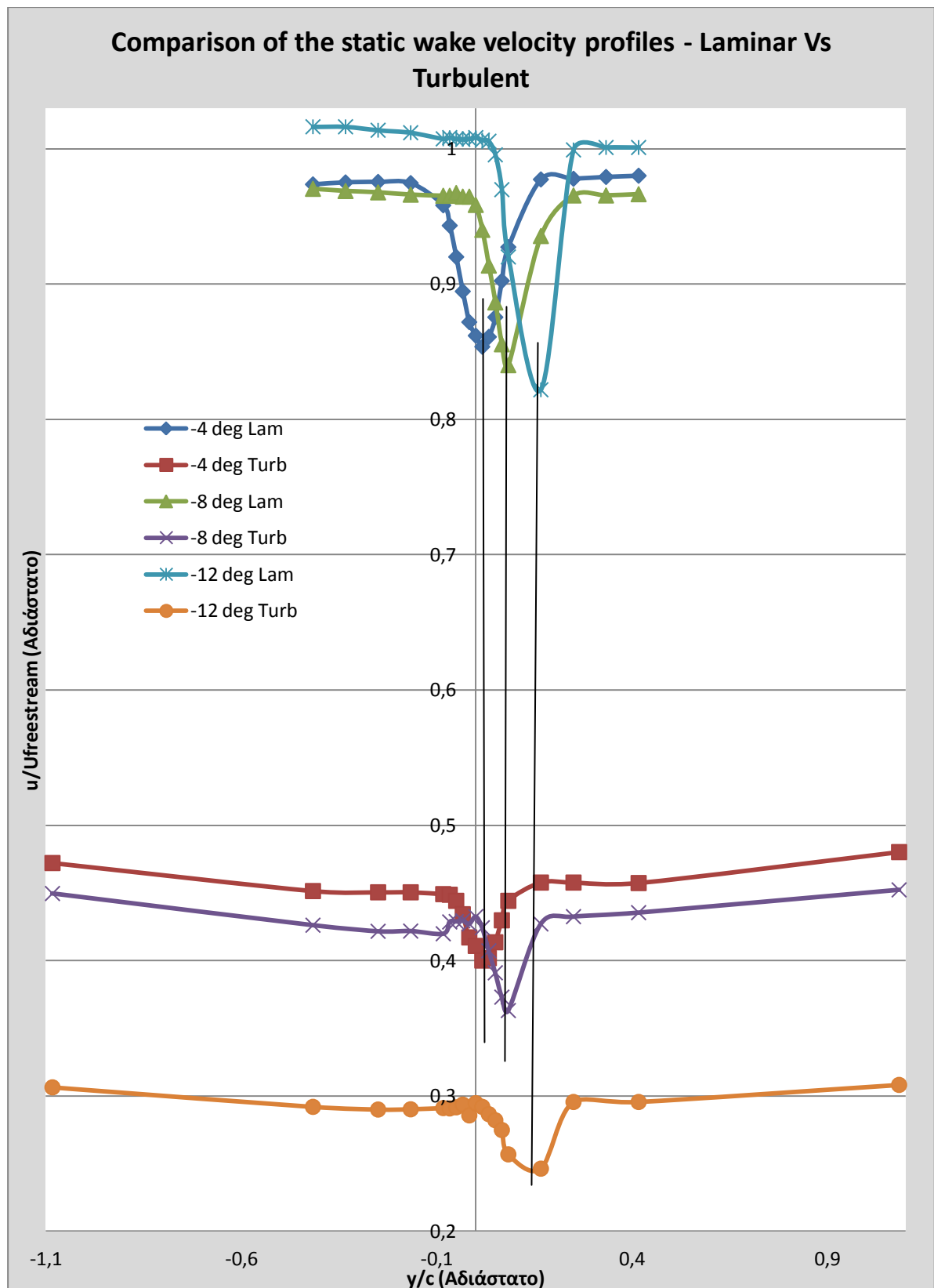
Η σύγκριση θα γίνει σε δύο μέρη, με το πρώτο να αναφέρεται στην ακίνητη κατάσταση του μοντέλου (4.3.1) και το δεύτερο στην ταλαντευόμενη (4.3.2). Σε καθένα από τα υποκεφάλαια θα συγκριθούν τα προφίλ ταχυτήτων, τα διαγράμματα μισού πάχους απορεύματος και τέλος οι κατανομές της τύρβης.

4.3.1 Σύγκριση απορευμάτων στρωτής και τυρβώδους ροής για ακίνητο μοντέλο

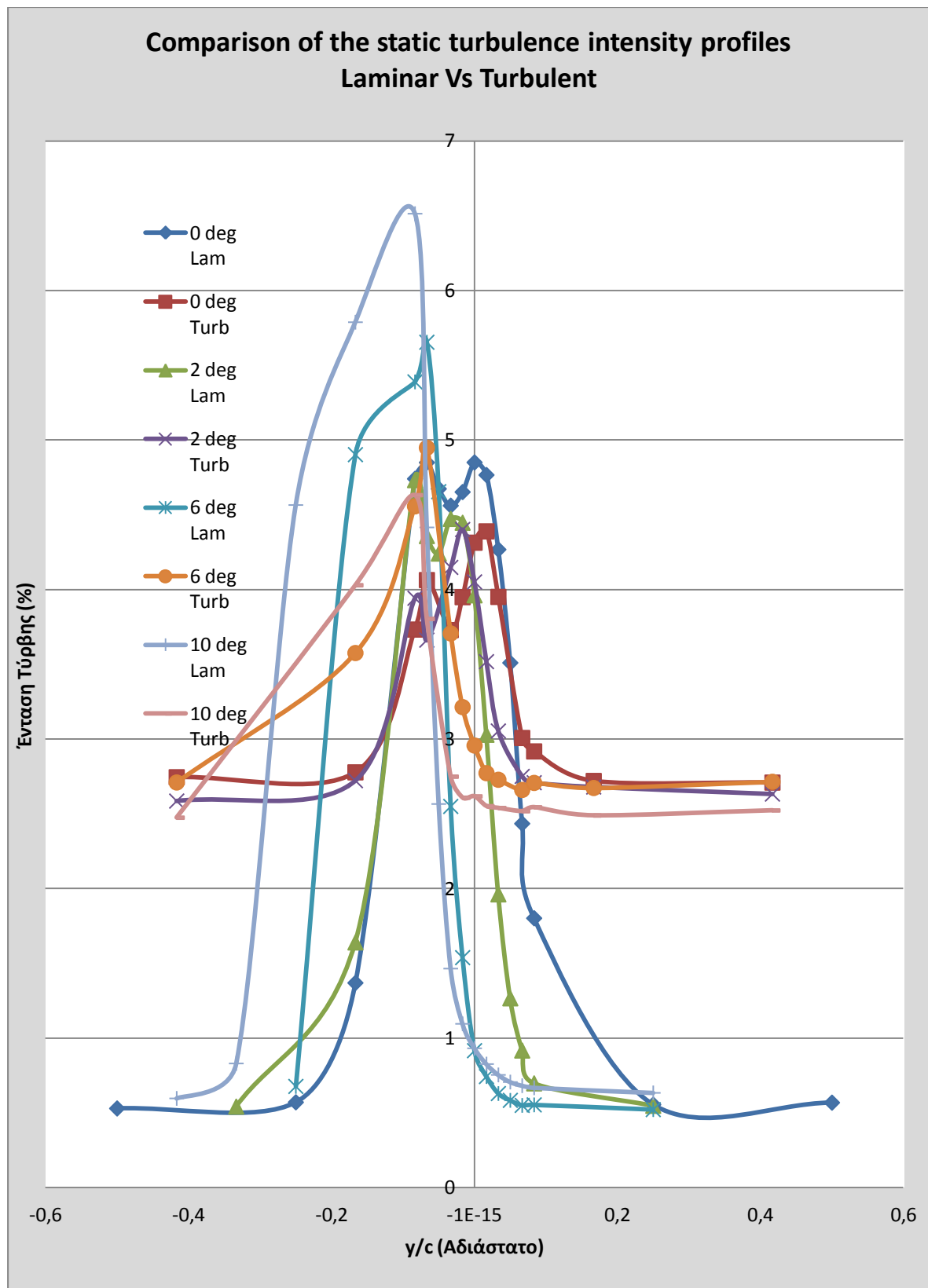
Αρχικά, παρουσιάζονται τα στατικά προφίλ ταχύτητας μέσω των διαγραμμάτων 72 και 73 τα οποία αναφέρονται στις γωνίες προσβολής 0° , 6° και 10° καθώς επίσης και στις -4° , -8° και -12° αντίστοιχα. Σε κάθε γωνία από τις παραπάνω, αντιστοιχούν δύο καμπύλες · μία για τη στρωτή ροή και μία για την τυρβώδη. Στη συνέχεια, προβάλλονται τα γραφήματα 74 και 75 που αφορούν τις κατανομές τύρβης στο απόρευμα σε γωνίες προσβολής 0° , 2° , 6° , 10° , 12° και -2° , -6° , -10° , -12° αντίστοιχα και τέλος, η σύγκριση ολοκληρώνεται με το διάγραμμα 76 που απεικονίζει το μισό πάχος του απορεύματος σε όλο το εύρος κίνησης της πτέρυγας σε στρωτή και τυρβώδη ροή.



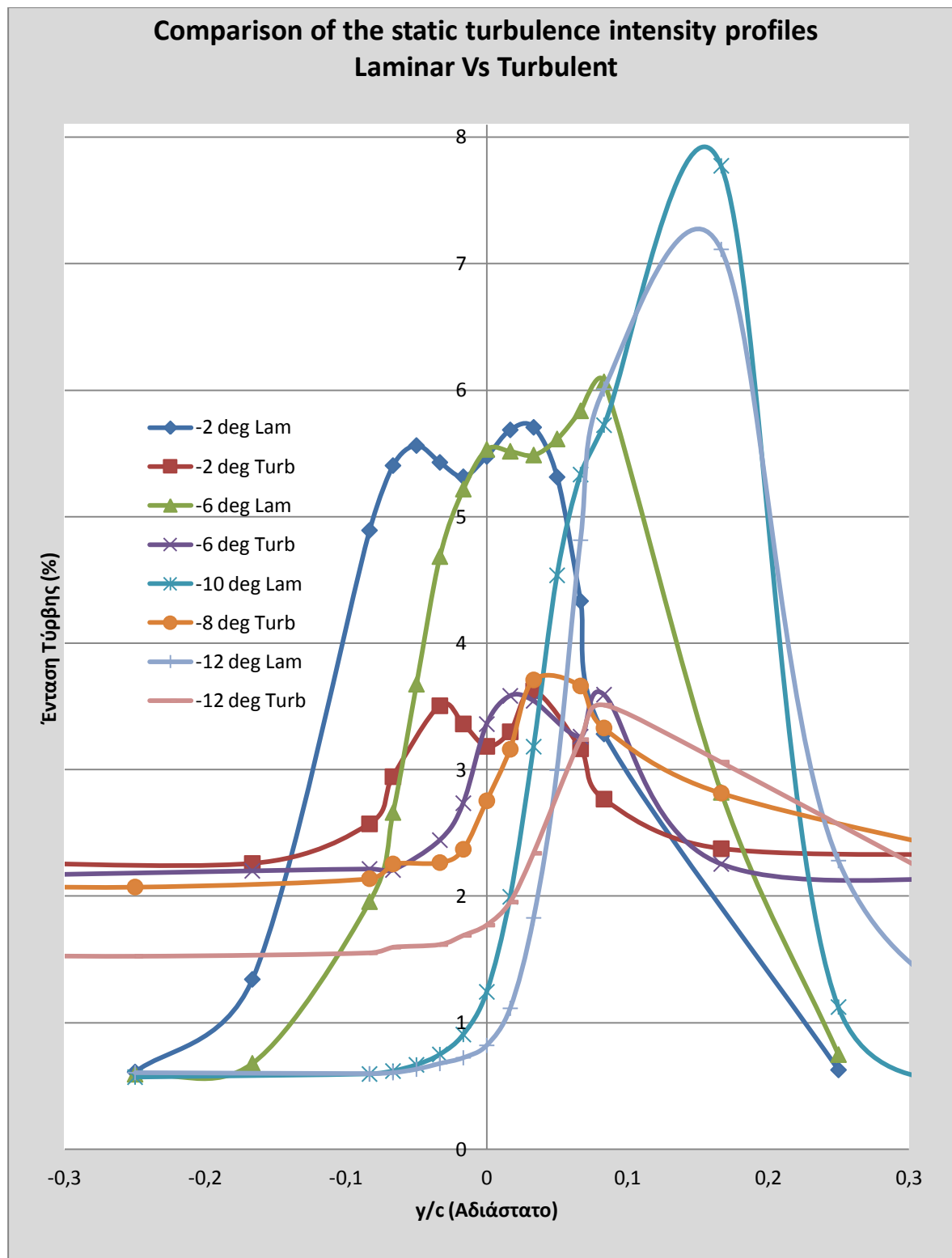
Διάγραμμα 72. Σύγκριση των κατανομών ταχύτητας για 0° , 6° και 10° σε στρωτή και τυρβώδη ροή



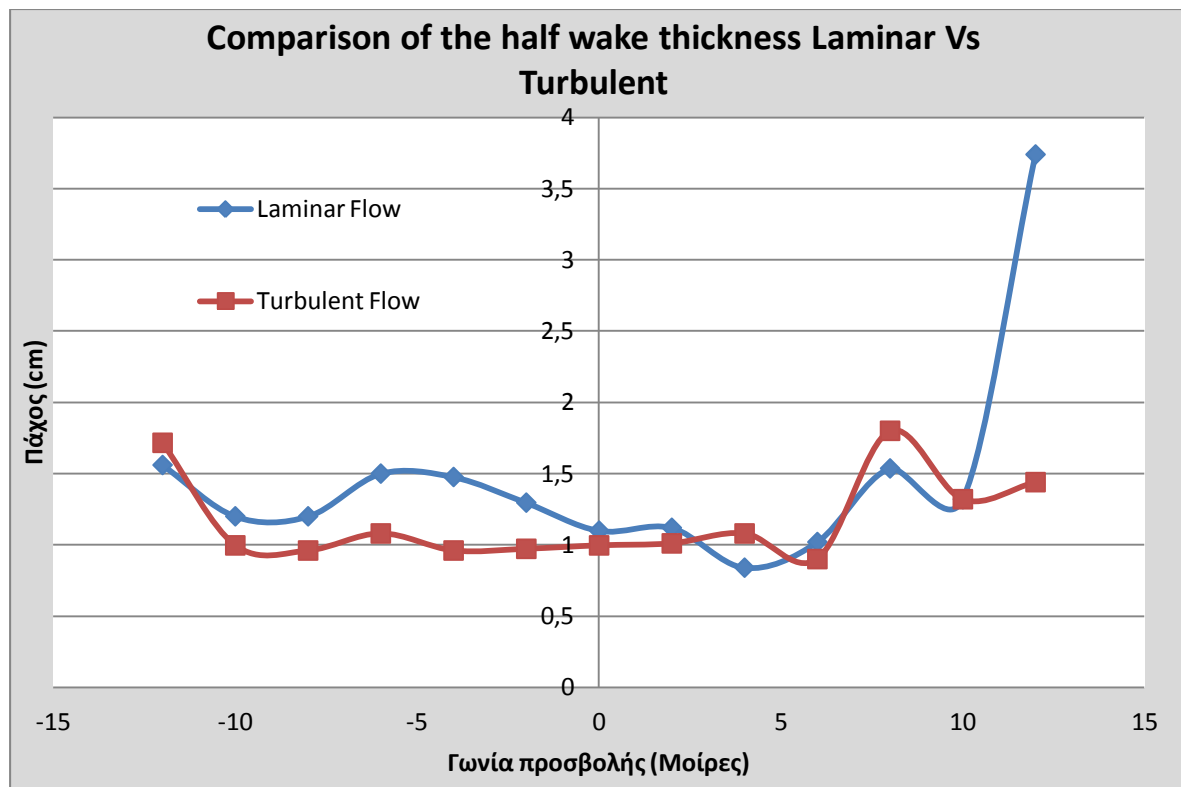
Διάγραμμα 73. Σύγκριση των κατανομών ταχύτητας του απορεύματος για -4° , -8° και -12° σε στρωτή και τυρβώδη ροή



Διάγραμμα 74. Σύγκριση των κατανομών τύρβης του απορεύματος για 0°, 2°, 6° και 10° σε στρωτή και τυρβώδη ροή



Διάγραμμα 75. Σύγκριση των κατανομών τύρβης του απορεύματος για -2° , -6° , -10° / -8° και -12° σε στρωτή και τυρβώδη ροή



Διάγραμμα 76. Σύγκριση των τιμών του μισού πάχους του απορεύματος για στρωτή και τυρβώδη ροή σε όλο το εύρος κίνησης της πτέρυγας

Από τα πρώτα δύο διαγράμματα που αναφέρονται στο προφίλ ταχυτήτων του απορεύματος φαίνεται πως υπάρχουν αρκετές ομοιότητες. Οι καμπύλες έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν ένα ευδιάκριτο ελάχιστο στην στενότερη περιοχή του απορεύματος που προφανώς σχετίζεται με την ένωση των δύο οριακών στρωμάτων που διατρέχουν την πτέρυγα. Μάλιστα, το ελάχιστο σημείο βρίσκεται στην ίδια θέση του άξονα y (όπως δείχνουν οι ευθείες που προστέθηκαν στο διάγραμμα) και μετατοπίζεται το ίδιο καθώς αυξάνεται η απόλυτη τιμή της γωνίας προσβολής του μοντέλου. Παράλληλα, αύξηση της γωνίας σημαίνει και για τις δύο περιπτώσεις ροής, σχεδόν ίση μείωση της ταχύτητας στο 'στενό' απόρευμα.

Από την άλλη πλευρά, οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως στις τιμές των ταχυτήτων καθώς στην τυρβώδη ροή εμφανίζονται αισθητά χαμηλότερες, της τάξης του 35% επί της

ταχύτητας της ελεύθερης ροής, για τις θετικές γωνίες και 50% για τις αρνητικές. Λογικά, η μείωση είναι μεγαλύτερη στις αρνητικές γωνίες επειδή η αεροτομή είναι μη συμμετρική και η ροή διαταράσσεται περισσότερο. Ακόμα, διαφορές υπάρχουν και στο ευρύτερο απόρευμα με τη στρωτή ροή να ευνοεί τα φαινόμενα εμποδισμού στην αεροσήραγγα και η τυρβώδη όχι, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μία επιτάχυνση στις άκρες καθώς μεταβάλλεται η γωνία του μοντέλου.

Συνεχίζοντας με την ανάλυση των άλλων δύο διαγράμματα που δείχνουν την κατανομή της τύρβης είναι εύκολα αντιληπτό πως υπάρχει μία μεγάλη αντίθεση. Περνώντας ο αέρας από την πτέρυγα με ένταση τύρβης της τάξης του 0,68%, η τιμή της αυξάνεται πέραν του 4,4% σε αντίθεση με την τυρβώδη ροή που η ένταση από 5,8% μειώνεται ελαφρώς, στο 5%. Συγκεκριμένα, στη δεύτερη περίπτωση, ακόμη και στην ευρύτερη περιοχή του απορεύματος η τύρβη συνεχίζει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα της τάξης του 3% και δεν ανεβαίνει σε αυτά της ελεύθερης ροής. Για τη στρωτή ροή η εξήγηση που μπορεί να δοθεί για την αύξηση της έντασης, είναι ότι ο αέρας διαταράσσεται από την παρουσία του πτερυγίου και αναπόφευκτα αναπτύσσονται κάποιες δίνες που ανεβάζουν την τύρβη. Αντίθετα, για την τυρβώδη ροή φαίνεται πως στο απόρευμα του πτερυγίου δημιουργείται μία περιοχή ηπιότερης κυκλοφορίας του αέρα που οριοθετείται από τα δύο οριακά στρώματα υψηλής ενέργειας αποτρέποντας την είσοδο επιπλέον τύρβης από την ελεύθερη ροή. Επιπρόσθετα, στις πιο απομακρυσμένες θέσεις του άξονα y η τύρβη είναι και πάλι χαμηλότερη εξαιτίας ίσως της ευθυγράμμισης που υφίσταται ο αέρας κατά τη διέλευσή του ανάμεσα από τα τοιχώματα της αεροσήραγγας και το μοντέλο.

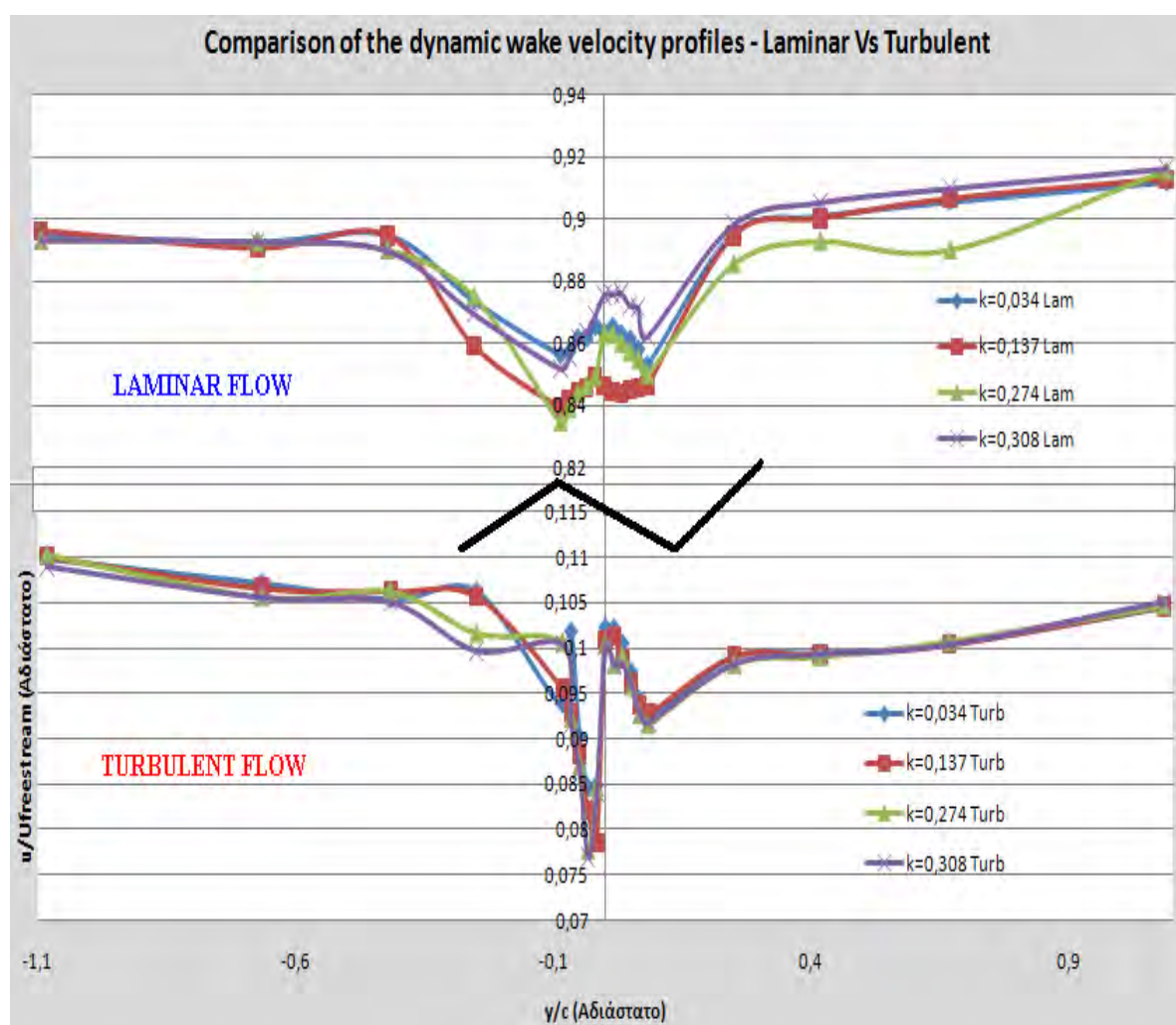
Αναλύοντας, περαιτέρω τα διαγράμματα τύρβης παρατηρείται μία ομοιότητα στη μορφή των καμπύλων. Πιο ειδικά, οι κατανομές ξεκινούν με διπλές κορυφές (peaks) για τις μικρές γωνίες και καταλήγουν να έχουν μία κορυφή, ενώ παράλληλα, μετατοπίζονται και αυτές σύμφωνα με τη φορά κίνησης του χείλους εκφυγής του μοντέλου. Όμως, τα μέγιστα των

καμπύλων της στρωτής ροής δε συμπίπτουν απόλυτα αλλά έχουν μια μικρή απόκλιση με αυτά της τυρβώδους, φαινόμενο που δεν ισχύει στις κατανομές ταχυτήτων. Επίσης, οι κατανομές δε μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο συναρτήσει της γωνίας προσβολής. Στην περίπτωση που απουσιάζει το πλέγμα από την αεροσήραγγα, τα επίπεδα έντασης τύρβης στο απόρευμα, αυξάνονται αισθητά με αύξηση της απόλυτης τιμής της γωνίας προσβολής, με αποτέλεσμα στην τελική θέση (+/- 12°) να έχει προστεθεί 2% επιπλέον τύρβη συγκριτικά με την αρχική (0°). Το αντίθετο όμως συμβαίνει στην τυρβώδη ροή όπου η γενικότερη τάση είναι ελαφρώς φθίνουσα και μία πιθανή αιτία έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 4.2.1.β.

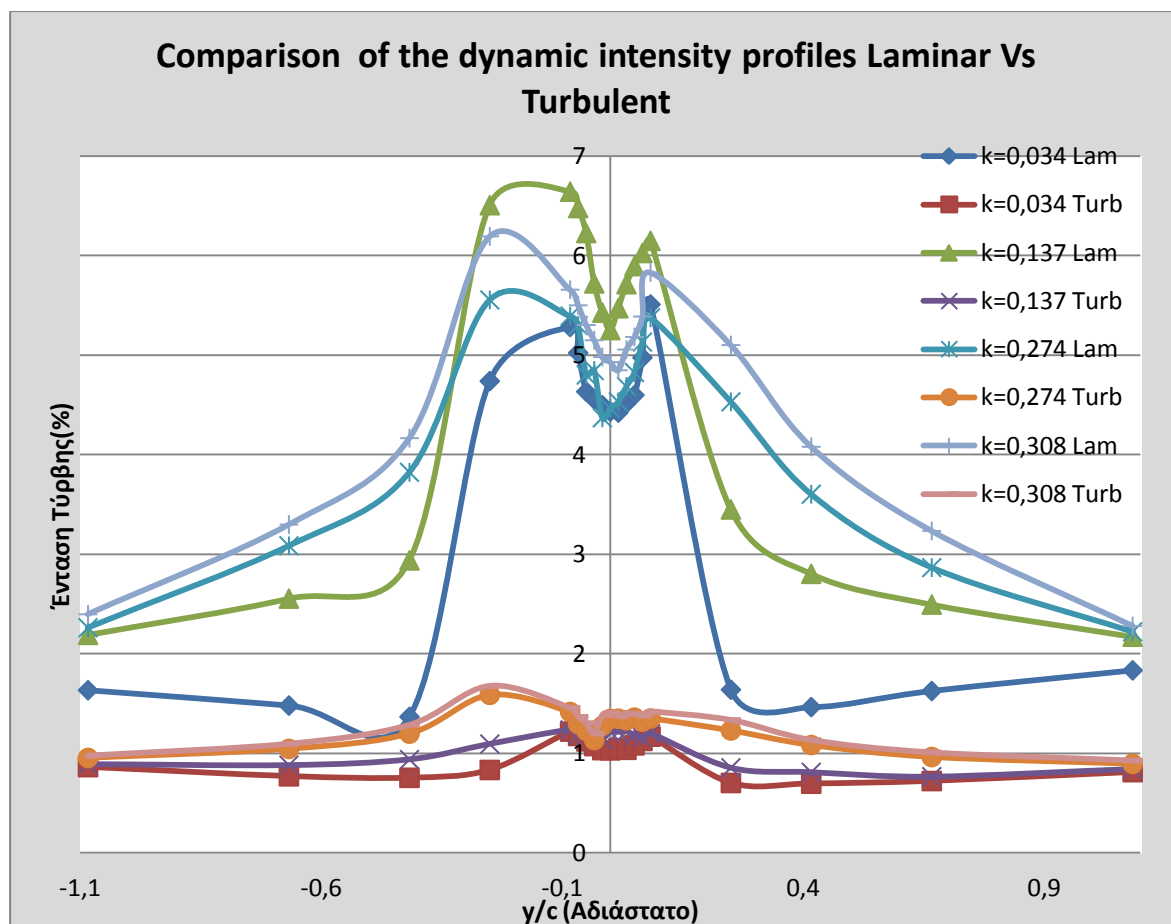
Η σύγκριση για την περίπτωση που η πτέρυγα είναι ακίνητη τελειώνει με το διάγραμμα 76 που απεικονίζει το μισό πάχος σε όλες τις πιθανές θέσεις αυτής. Το συμπέρασμα είναι ότι, με εξαίρεση τρεις γωνίες πρόσπτωσης, το πάχος είναι γενικώς πιο λεπτό στην τυρβώδη ροή. Εξήγηση μπορεί να δοθεί από τη θεωρία σύμφωνα με την οποία το τυρβώδες οριακό στρώμα έχοντας υψηλότερη ενέργεια από το στρωτό αντέχει περισσότερο στις αποκόλλήσεις. Αυτό έχει ως συνέπεια, η αποκόλληση της ροής να γίνεται πιο κάτω στην πτέρυγα και το προκύπτον απόρευμα να έχει μικρότερο πάχος. Στη στρωτή ροή, υπάρχει μία καθυστέρηση μετατροπής του οριακού στρώματος από στρωτό σε τυρβώδες και η αποκόλληση γίνεται νωρίτερα. Το φαινόμενο είναι πιο αισθητό στις μεγαλύτερες γωνίες προσβολής, εξάλλου ο αριθμός Re του πειράματος δεν είναι τόσο μεγάλος (86000) ώστε να ευνοεί προσκολλημένη ροή σε όλο το μήκος της πτέρυγας. Παρόλα αυτά, οι καμπύλες μεταβάλλονται σχεδόν ταυτόχρονα, πράγμα που σημαίνει ότι η τύρβη δεν επηρεάζει τόσο την εξέλιξη του απορεύματος όσο την τιμή του.

4.3.2 Σύγκριση απορευμάτων στρωτής και τυρβώδους ροής για ταλαντευόμενο μοντέλο

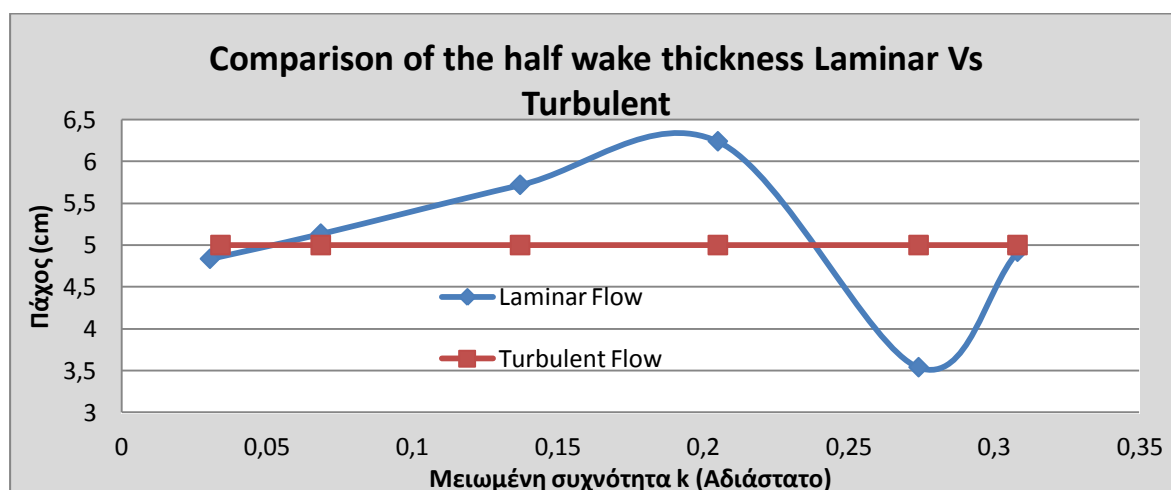
Η δομή και τα συγκρινόμενα μεγέθη αυτού του υποκεφαλαίου είναι ουσιαστικά ίδια σε σχέση με το προηγούμενο. Λόγω όμως της ταλάντωσης, οι καμπύλες των διαγραμμάτων είναι ως προς τις μειωμένες συχνότητες / συχνότητες ταλάντωσης, αντί για τις γωνίες της πτέρυγας. Το διάγραμμα 77 αναφέρεται στις κατανομές ταχυτήτων του απορεύματος, το 78 στις κατανομές τύρβης αυτού και το 79 στο μισό πάχος του.



Διάγραμμα 77. Σύγκριση των κατανομών ταχύτητας του απορεύματος για μειωμένη συχνότητα $k=0,034$ / $k=0,137$ / $k=0,274$ / $k=0,308$ σε στρωτή και τυρβώδη ροή



Διάγραμμα 78. Σύγκριση των κατανομών τύρβης του απορεύματος για μειωμένη συχνότητα $k=0,034 / k=0,137 / k=0,274 / k=0,308$ σε στρωτή και τυρβώδη ροή.



Διάγραμμα 79. Σύγκριση των τιμών του μισού πάχους του απορεύματος για στρωτή και τυρβώδη ροή σε όλο το εύρος μειωμένων συχνοτήτων.

Από τα διαγράμματα σύγκρισης φαίνεται αμέσως πως η ταλάντωση εισάγει σημαντικότερες διαφοροποιήσεις στα μεγέθη, μεταξύ των δύο ειδών ροής. Ξεκινώντας από το διάγραμμα 77, φαίνεται πως η ταλάντωση δίνει στην τυρβώδη ροή, προφίλ με ελάχιστες διαφορές καθώς αυξάνεται η μειωμένη συχνότητα. Αντίθετα, στη στρωτή ροή τα προφίλ αρχικά πέφτουν και μετά ανεβαίνουν στο διάγραμμα. Επίσης, σημαντικά διαφορετική είναι και η τάξη μεγέθους των ταχυτήτων του απορεύματος στα δύο είδη ροών με την τιμή αυτών να κινείται μεταξύ του 84% και 92% επί της ταχύτητας της ελεύθερης ροής στην περίπτωση χαμηλής τύρβης ενώ, στη ροή υψηλής τύρβης να κυμαίνεται από 8% έως 11%. Εκτός όμως των διαφορών, παρατηρούνται και κάποιες ομοιότητες στην περιοχή του στενότερου απορεύματος. Η μορφή των καμπύλων στις δύο ροές είναι όμοιες καθότι έχουν δύο τοπικά ελάχιστα σχεδόν στα ίδια σημεία του άξονα y και ένα τοπικό μέγιστο για $y=0$. Με άλλα λόγια, είναι φανερό μια τοπική επιτάχυνση στην περιοχή κοντά στη μηδενική θέση που πιθανώς έχει να κάνει με τις παραγόμενες δίνες που συνεισφέρουν στην αύξηση της u_x ταχύτητας. Ακόμη, φαίνεται πως η έκταση της περιοχής όπου συμβαίνουν σημαντικές μεταβολές στην ταχύτητα τόσο για τη στρωτή όσο και για την τυρβώδη ροή οριοθετείται από τα ίδια σημεία.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων τύρβης στο απόρευμα βγαίνει το συμπέρασμα ότι στην τυρβώδη ροή μειώνεται η ένταση της τύρβης καθώς ο αέρας περνά από το ταλαντευόμενο πτερύγιο ενώ στη στρωτή αυξάνεται. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και η αντιπαραβολή των αντίστοιχων διαγραμμάτων για την ακίνητη κατάσταση. Στην προκειμένη σύγκριση όμως η διαφορά είναι πολύ μεγαλύτερη και αυτό οφείλεται κυρίως στις χαμηλές τιμές τύρβης στο απόρευμα της τυρβώδους ροής (1,5%) διότι υπολογίσθηκε ως προς την ταχύτητα της ελεύθερης ροής (11m/s) και όχι ως προς την τοπική ταχύτητα που είναι αρκετά μικρότερη. Ανεξάρτητα όμως από την παραπάνω διαπίστωση είναι γεγονός ότι στο απόρευμα σχηματίζεται μια περιοχή ήπιας κυκλοφορίας του αέρα ή διαφορετικά μειώνονται

οι αστάθειες ως προς τον άξονα x . Ακόμη, διαφορές έχουν και οι μεταβολές των προφίλ καθώς αυξάνεται η μειωμένη συχνότητα, παρότι οι μορφές των σε κάθε περίπτωση είναι ίδια. Συγκεκριμένα στη στρωτή ροή η τύρβη αρχικά αυξάνεται και κατόπιν μειώνεται όπως παρατήρησαν και οι Park et Al(1990) ενώ αντίθετα στην τυρβώδη ροή η τύρβη συνεχώς αυξάνεται κυρίως στο ευρύτερο απόρευμα (για το εύρος μετρήσεων του πειράματος) και μάλιστα μετά από $k=0,137$ η αύξηση είναι πιο αισθητή.

Τελειώνοντας με το διάγραμμα 79, όπου η τιμή του μισού πάχους για την τυρβώδη μόνο ροή εκτιμήθηκε διαφορετικά φαίνεται πως το πάχος δεν παρουσιάζει αισθητές μεταβολές στο εύρος συχνοτήτων του πειράματος, σε αντίθεση με αυτό της στρωτής ροής το οποίο ακολουθεί τη μεταβολή των προφίλ τύρβης. Τα τυρβώδη οριακά στρώματα ως πιο ανθεκτικά δεν αλλάζουν εύκολα το πάχος του απορεύματος. Γενικά όμως, η τάξη μεγέθους του μισού πάχους και για τα δύο είδη ροών είναι ίση με 5cm με ελαφρώς μεγαλύτερη να είναι η μέση τιμή της στρωτής ροής.

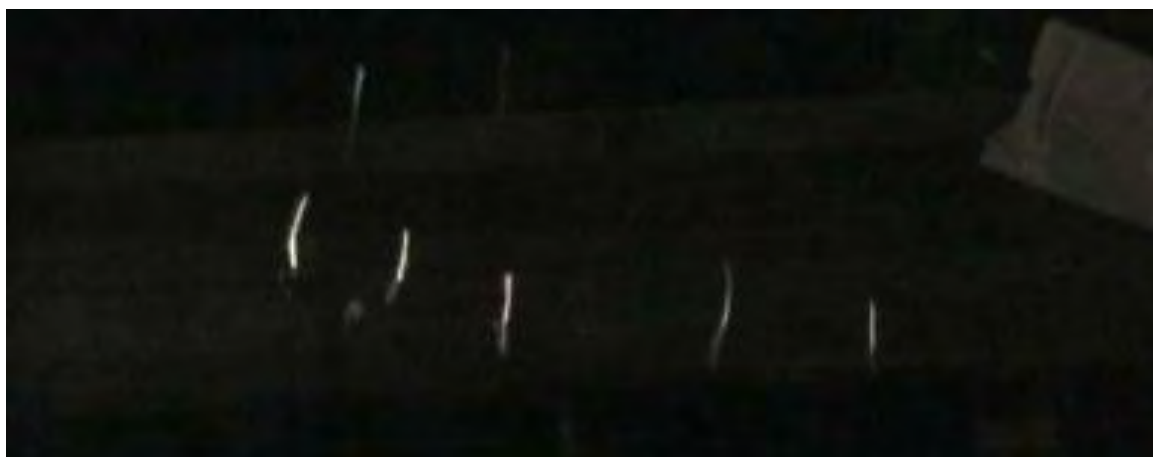
Κεφάλαιο 5 Απεικόνιση ροής-Flow visualization

Το κεφάλαιο 5, το οποίο είναι και το τελευταίο κεφάλαιο, χωρίζεται σε δύο υποκεφάλαια, το 5.1 και το 5.2. Σκοπό έχει την καλύτερη κατανόηση των συμπερασμάτων που βγαίνουν από τα διαγράμματα ταχυτήτων και πιέσεων. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται στιγμιότυπα της ροής με το μοντέλο ακίνητο ώστε να φανεί η γωνία απώλειας στήριξης (το στατικό stall) σε στρωτή και σε τυρβώδη ροή και μάλιστα με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος αφορά τη συνδυασμένη χρήση συσκευής παραγωγής φωτεινού επιπέδου laser και συσκευή παραγωγής καπνού και η δεύτερη αφορά τη χρήση κατάλληλων νηματίων επάνω στην πτέρυγα. Στο δεύτερο μέρος, με την υιοθέτηση μόνον της πρώτης μεθόδου προβάλλονται τα μοτίβα του απορεύματος για τις μειωμένες συχνότητες του πειράματος και στα δύο είδη ροής. Περισσότερες λεπτομέρειες για της μεθόδους απεικόνισης εμπεριέχονται στο υποκεφάλαιο 2.7.3.

5.1 Απεικόνιση της ροής για ακίνητη πτέρυγα

5.1.1 Απεικόνιση της ροής για ακίνητη πτέρυγα - Στρωτή ροή

Το μέρος ξεκινά με την επίδειξη των φωτογραφιών σε στρωτή ροή από τη μέθοδο με τα νημάτια και συνεχίζει με αυτή του καπνού-laser. Η τιμή της ταχύτητας της ελεύθερης ροής σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις κυμαίνεται από 10 έως 11 m/s.



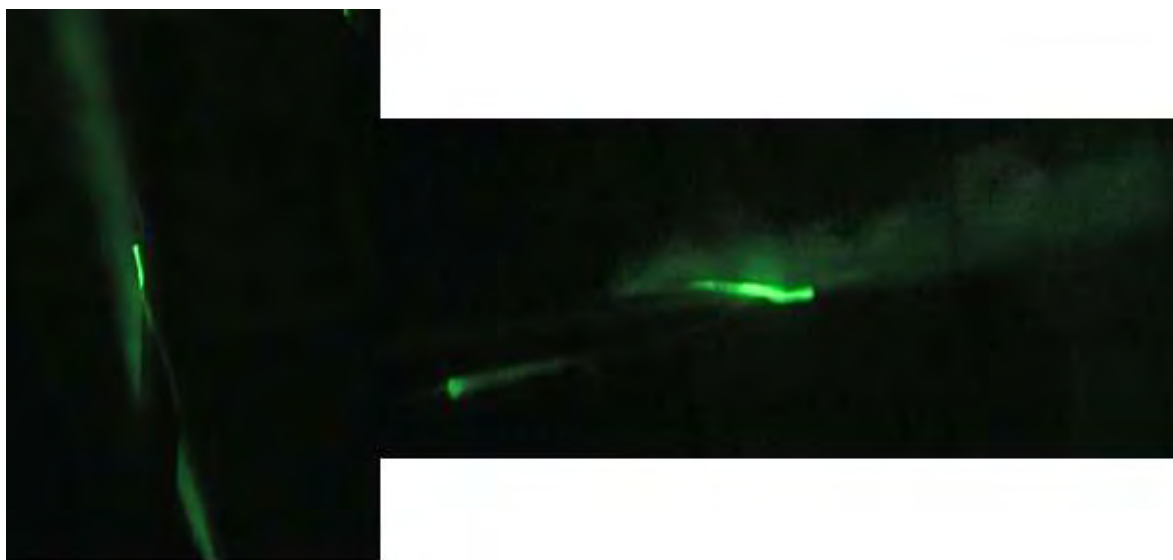
Φωτογραφία 24. Τα νημάτια μακριά από την απώλεια στήριξης (0° - 13°) σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 25. Τα νημάτια λίγο πριν την απώλεια στήριξης (14° - 15°) σε στρωτή ροή



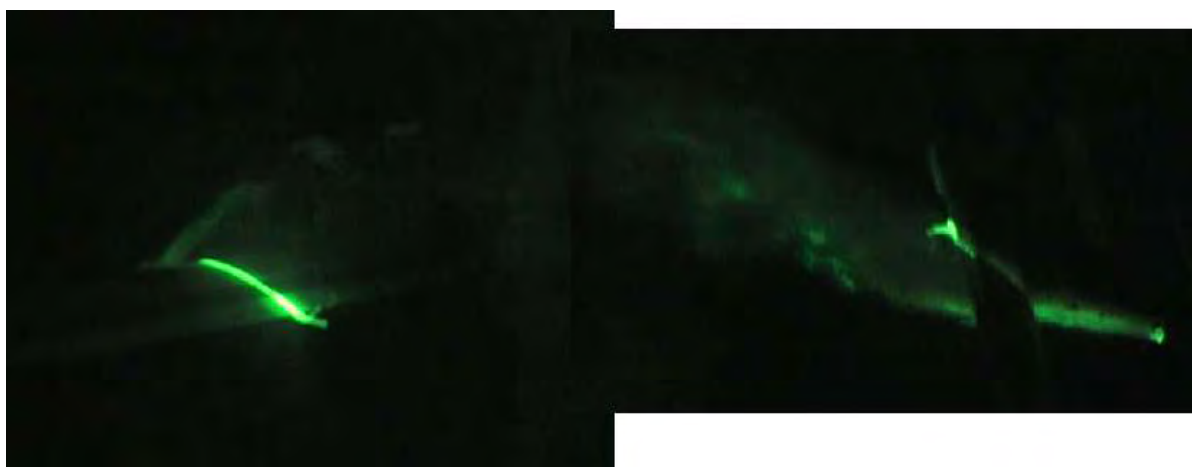
Φωτογραφία 26. Τα νημάτια μετά την απώλεια στήριξης (16° +) σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 27. Η ροή πριν την απώλεια στήριξης (0° - 13°) σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 28. Η ροή λίγο πριν την απώλεια στήριξης (15°) σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 29. Η ροή μετά την απώλεια στήριξης ($16^{\circ}+$) σε στρωτή ροή

5.1.2 Απεικόνιση της ροής για ακίνητη πτέρυγα - Τυρβώδης ροή



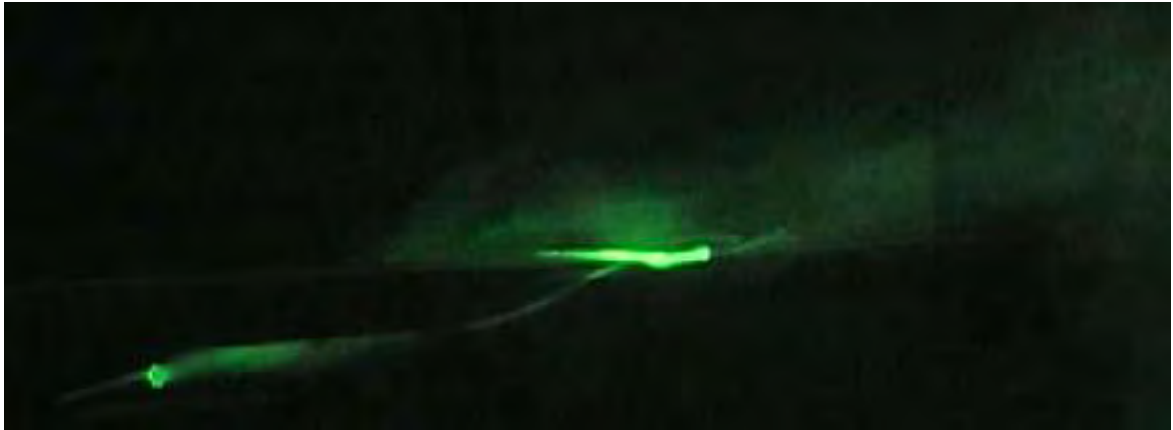
Φωτογραφία 30. Τα νημάτια μακριά από την απώλεια στήριξης (0° - 15°) σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 31. Τα νημάτια λίγο πριν την απώλεια στήριξης (16° - 17°) σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 32. Τα νημάτια μετά την απώλεια στήριξης (18° +) σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 33. Η ροή πριν την απώλεια στήριξης (0° - 15°) σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 34. Η ροή λίγο πριν την απώλεια στήριξης (18°) σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 35. Η ροή μετά την απώλεια στήριξης (19°) σε τυρβώδη ροή

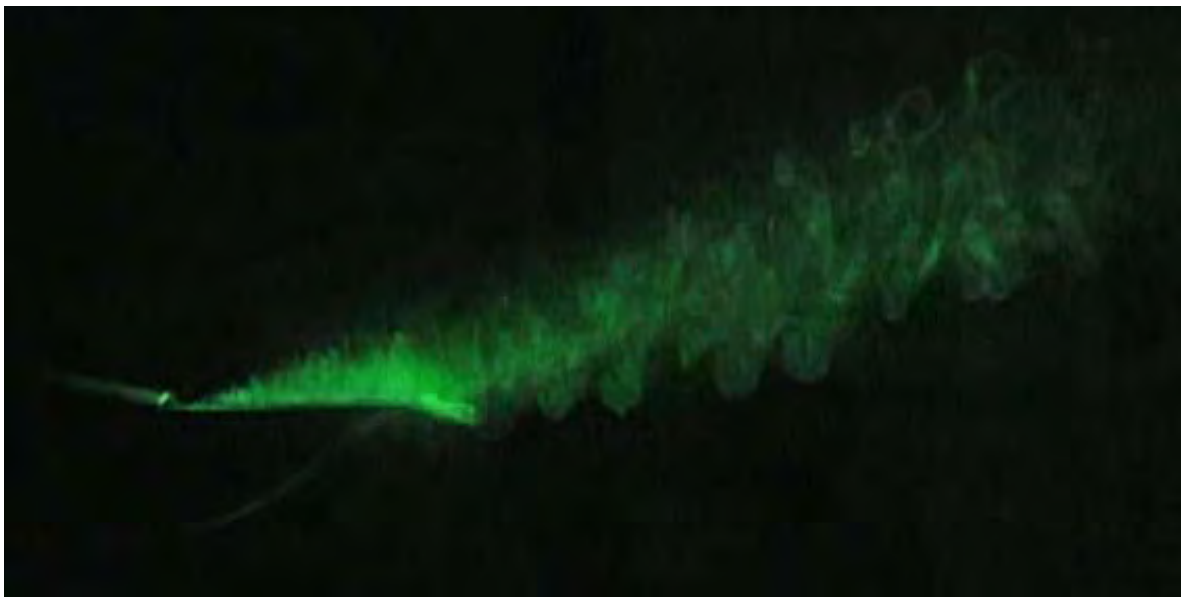
Από τη μελέτη των φωτογραφιών γίνεται σαφές ότι στην τυρβώδη ροή η απώλεια στήριξης της πτέρυγας του πειράματος συμβαίνει 2° γωνίας προσβολής αργότερα. Αυτό είναι ένα γενικότερο συμπέρασμα που βασίζεται στη θεωρία ότι τα τυρβώδη οριακά στρώματα είναι πιο ανθεκτικά στις αποκόλλσεις. Επίσης, η χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων έγινε για να αναδειχθούν πιο καθαρά συγκεκριμένες πτυχές του φαινομένου της στατικής απώλειας στήριξης.

Η μέθοδος με τα νημάτια δείχνει που περίπου βρίσκεται το σημείο αποκόλλησης της ροής καθώς το νημάτιο που είναι κοντά σε αυτό έχει αρχίσει να κάμπτεται με χαρακτηριστική τη φωτογραφία 31 και το τρίτο νημάτιο από το χείλος εκφυγής. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι ότι μετά την απώλεια στήριξης, για γωνίες προσβολής έως 22° και στις δύο ροές, το πρώτο μόνο νημάτιο φαίνεται να μην επηρεάζεται αισθητά αφού η ροή είναι ακόμη προσκολλημένη κοντά στο χείλος προσβολής. Αντίθετα, η μέθοδος με το καπνογόνο δείχνει το πόσο πολύ αυξάνεται το πάχος του απορεύματος όταν συμβεί το εν λόγω φαινόμενο με χαρακτηριστικές τις φωτογραφίες 29 και 35.

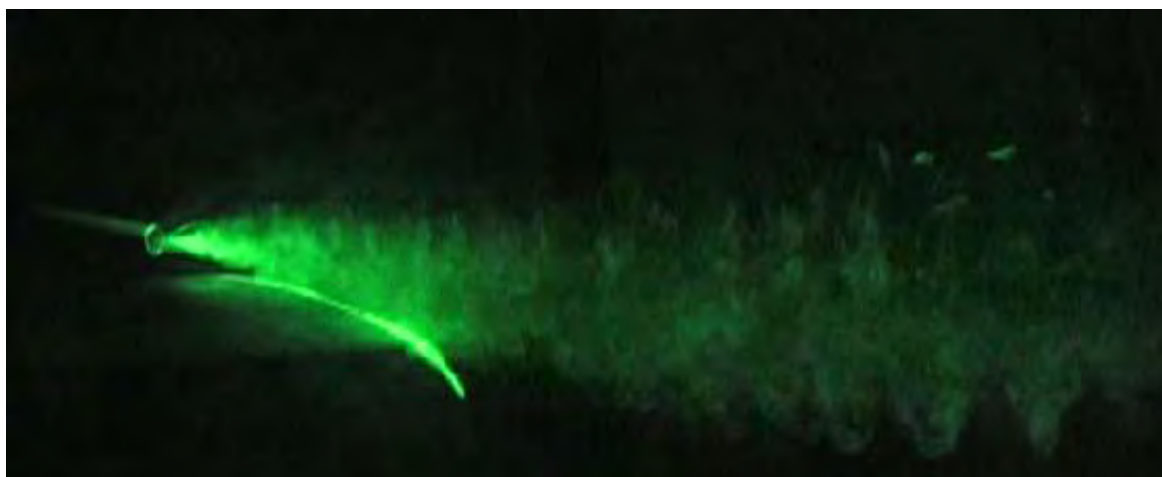
5.2. Απεικόνιση της ροής για ταλαντευόμενη πτέρυγα

5.2.1. Απεικόνιση της ροής για ταλαντευόμενη πτέρυγα – στρωτή ροή

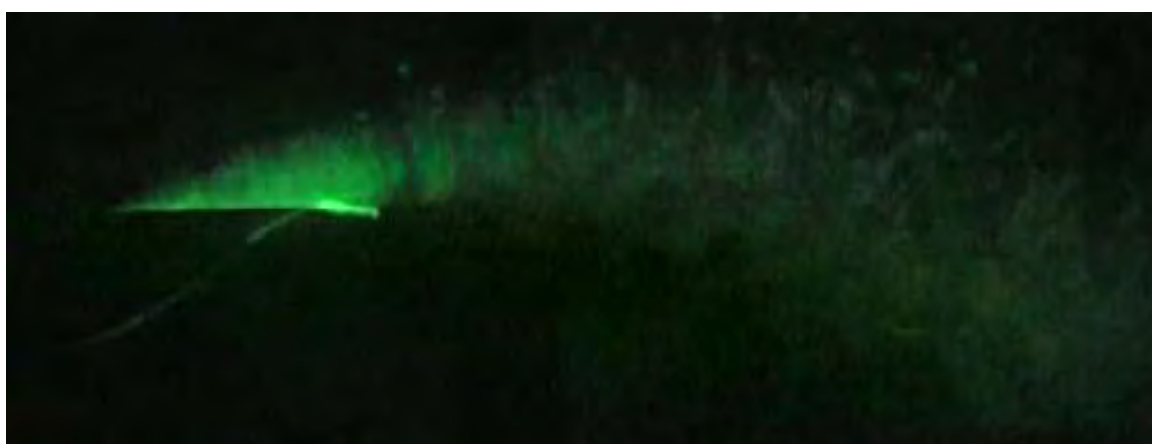
Στο μέρος αυτό θα προβληθούν στιγμιότυπα του απορεύματος για όλες τις μειωμένες συχνότητες του πειράματος και σε διάφορες φάσεις του ταλαντευόμενου μοντέλου, κυρίως στις ακραίες θέσεις του. Η ταχύτητα της ελεύθερης ροής επιλέχθηκε στα 1,2m/s ώστε ο καπνός να μην διαχυθεί γρήγορα στον αέρα και γίνουν δυσδιάκριτες οι μορφές του απορεύματος. Καπνός έρεε μόνο στην κυρτή πλευρά της πτέρυγας (suction side) στην οποία λαμβάνουν χώρα και οι περισσότερες αποκολλήσεις.



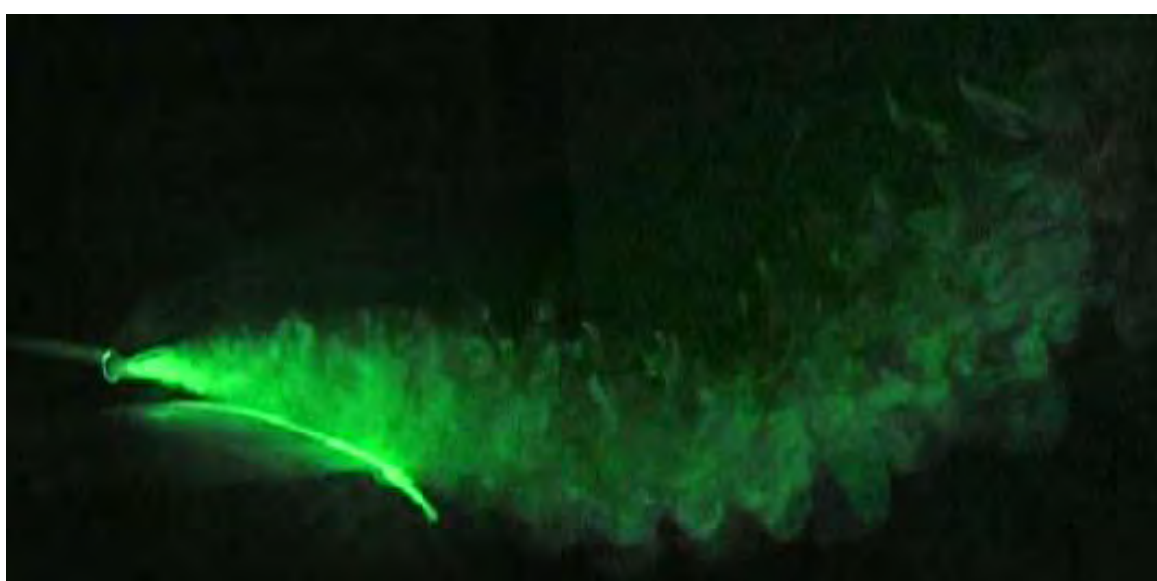
Φωτογραφία 36. Ταλάντωση με $f = 1\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε στρωτή ροή



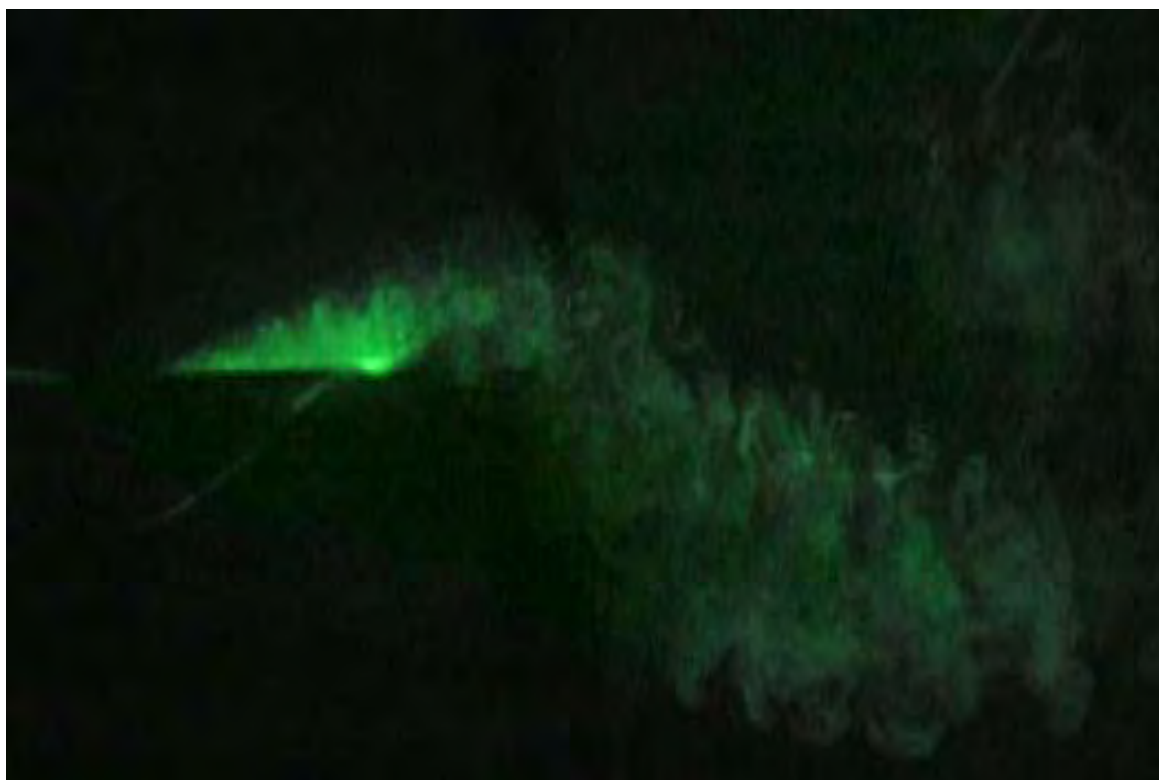
Φωτογραφία 37. Ταλάντωση με $f = 1\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε στρωτή ροή



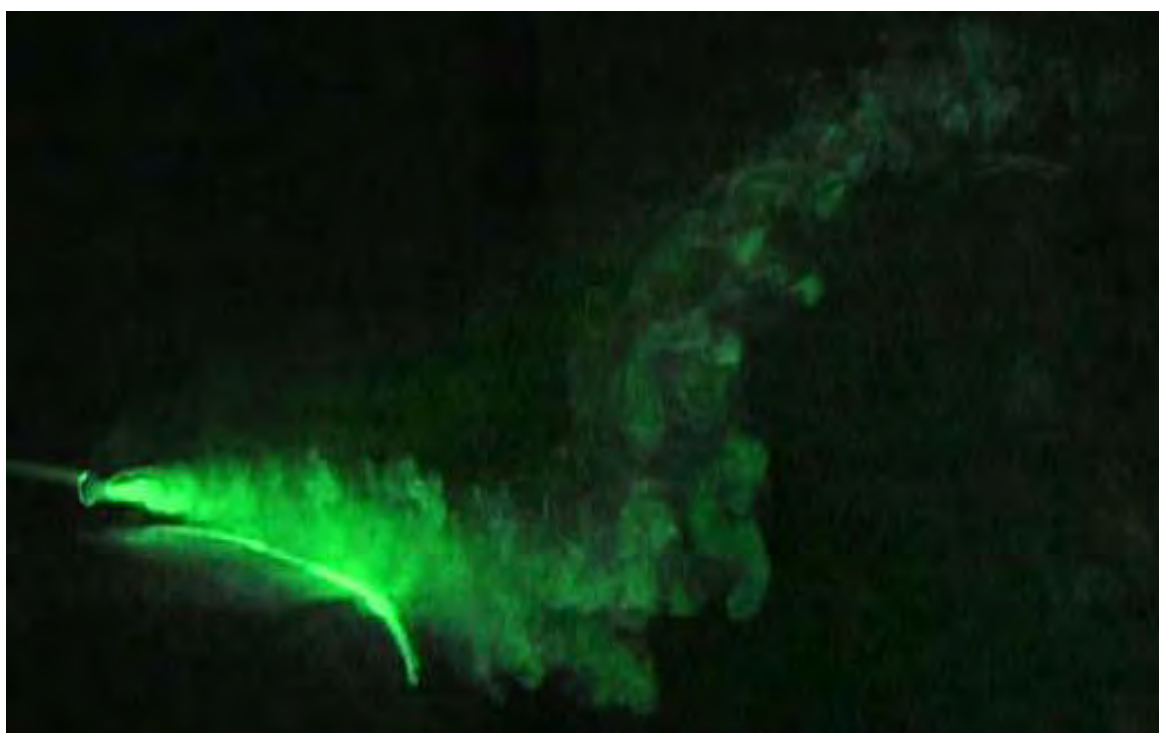
Φωτογραφία 38. Ταλάντωση με $f = 2\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε στρωτή ροή



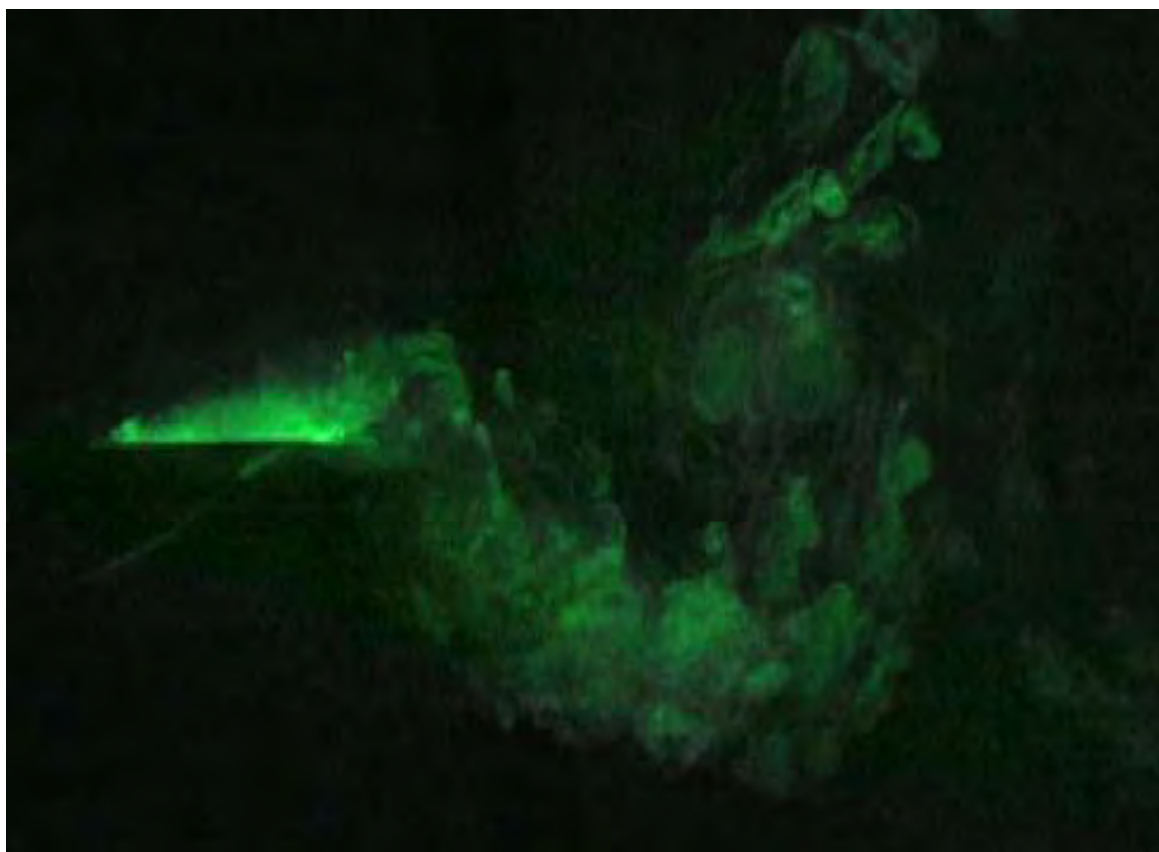
Φωτογραφία 39. Ταλάντωση με $f = 2\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε στρωτή ροή



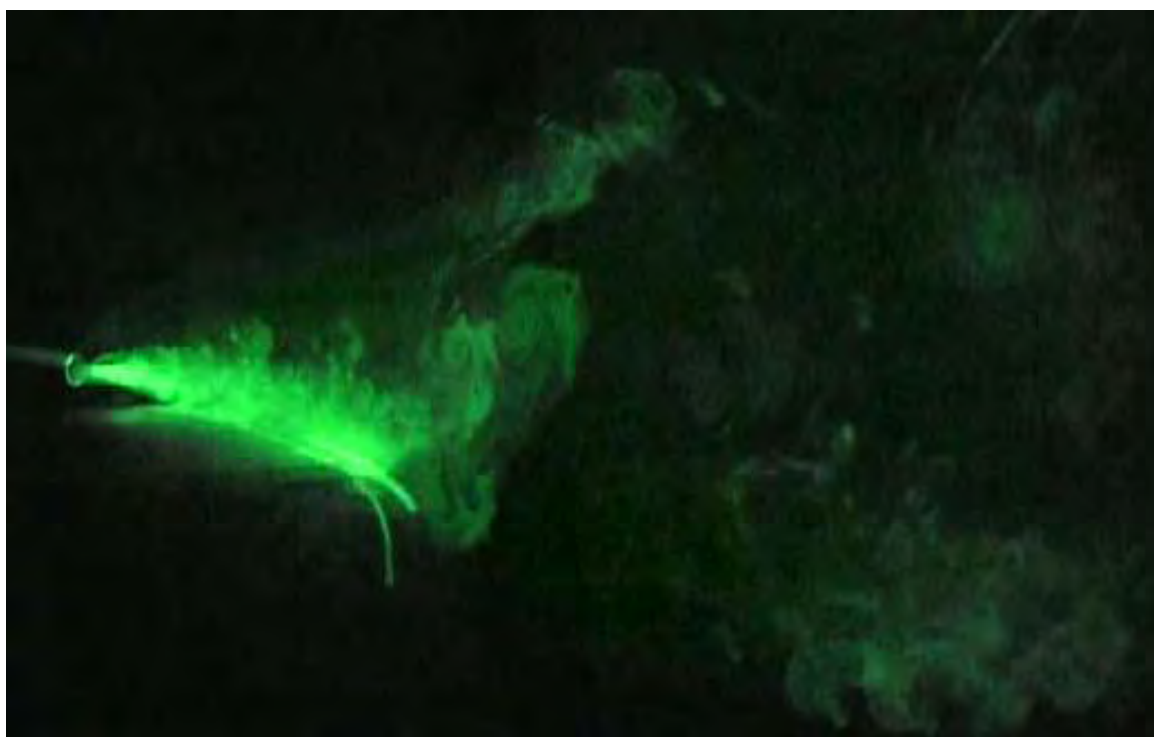
Φωτογραφία 40. Ταλάντωση με $f = 4\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε στρωτή ροή



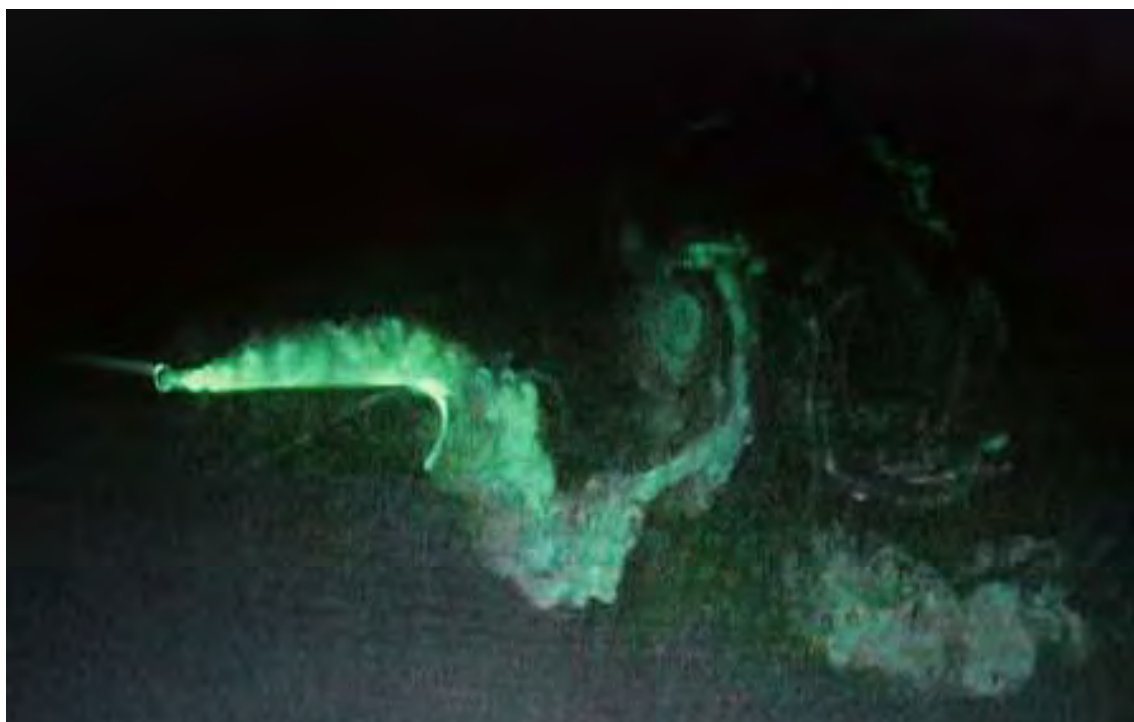
Φωτογραφία 41. Ταλάντωση με $f = 4\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε στρωτή ροή



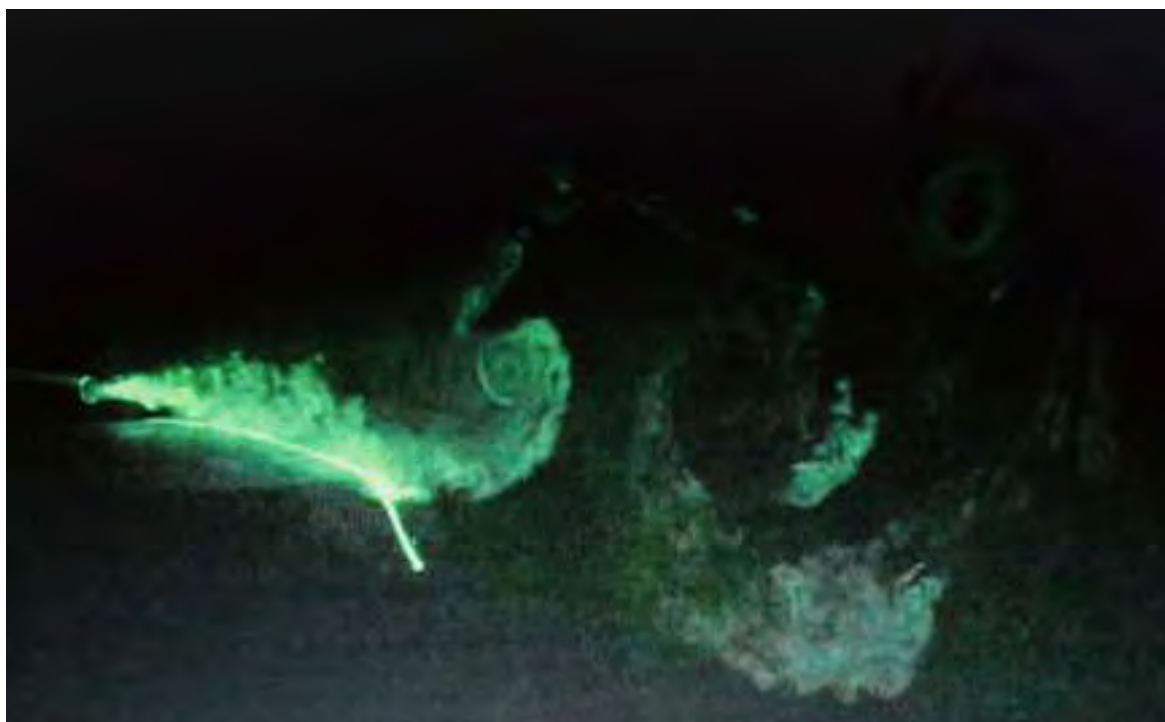
Φωτογραφία 42. Ταλάντωση με $f = 6\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε στρωτή ροή



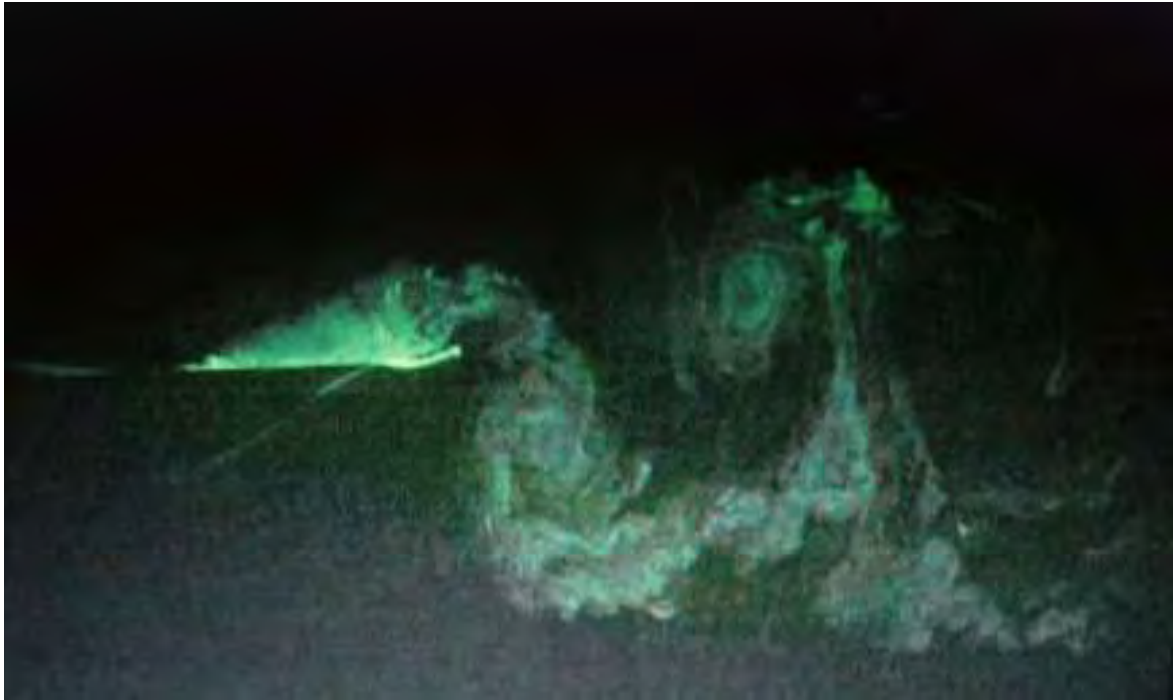
Φωτογραφία 43. Ταλάντωση με $f = 6\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε στρωτή ροή



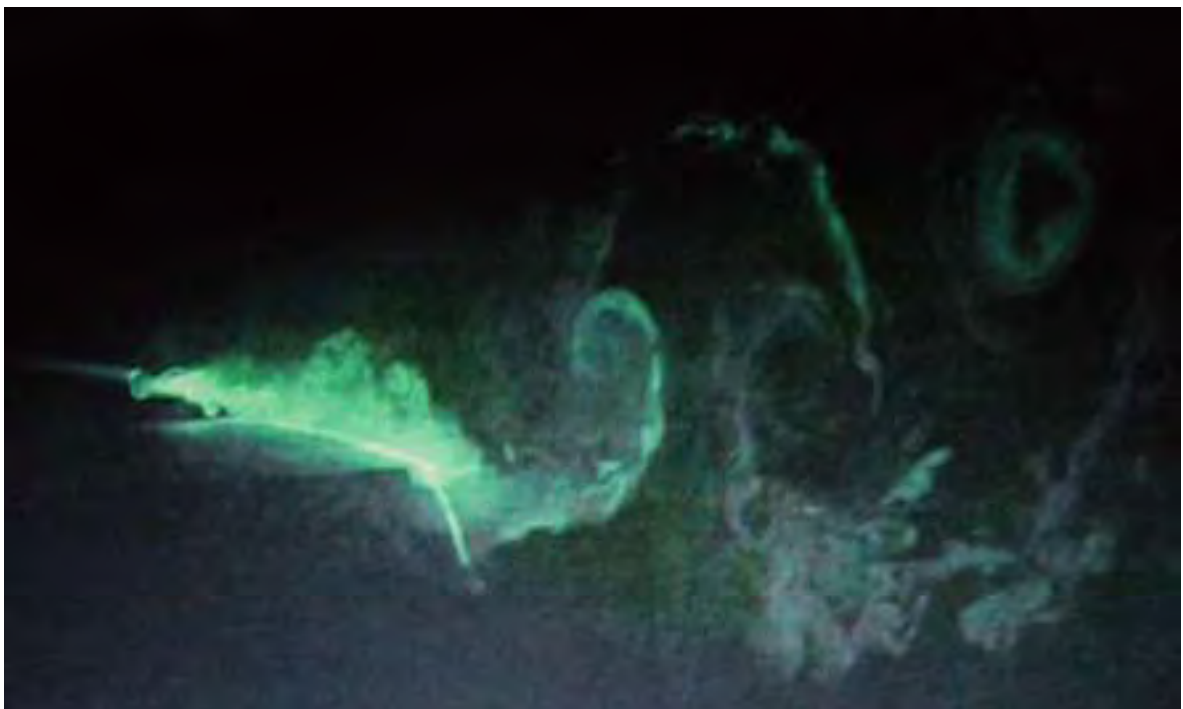
Φωτογραφία 44. Ταλάντωση με $f = 8\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 45. Ταλάντωση με $f = 8\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 46. Ταλάντωση με $f = 9\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε στρωτή ροή



Φωτογραφία 47. Ταλάντωση με $f = 9\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε στρωτή ροή

5.2.2 Απεικόνιση της ροής για ταλαντευόμενη πτέρυγα - Τυρβώδης ροή

Για την τυρβώδη ροή προβάλλονται στιγμιότυπα από δύο μόνο μειωμένες συχνότητες και αυτό γιατί ο καπνός διαχέεται πιο εύκολα από ότι στη στρωτή ροή. Η μέση ταχύτητα διατηρήθηκε στα 1,2 m/s.



Φωτογραφία 48. Ταλάντωση με $f = 4\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 49. Ταλάντωση με $f = 4\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 50. Ταλάντωση με $f = 9\text{Hz}$ / γωνία προσβολής -12° / σε τυρβώδη ροή



Φωτογραφία 51. Ταλάντωση με $f = 9\text{Hz}$ / γωνία προσβολής $+12^\circ$ / σε τυρβώδη ροή

Η μελέτη των παραπάνω φωτογραφιών οδηγεί σε ένα ξεκάθαρο συμπέρασμα · η συχνότητα ταλάντωσης και κατ' επέκταση η μειωμένη συχνότητα διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στη μορφή του απορεύματος. Η ανάλυση όμως παρακάτω δε γίνεται με βάση τη μειωμένη συχνότητα καθότι η ταχύτητα ροής άλλαξε σε σχέση με αυτή των μετρήσεων ταχυτήτων (κεφάλαιο 4) παρόλα αυτά μπορούν ακόμη να γίνουν συσχετίσεις μεταξύ των δύο κεφαλαίων.

Όσον αφορά τα στιγμιότυπα της στρωτής ροής φαίνεται πως για μικρές τιμές συχνότητας, $f = 1\text{Hz}$, $f = 2\text{Hz}$ και $f = 4\text{Hz}$ η ροή καθορίζεται από την κίνηση του μοντέλου και δημιουργείται ένα ημιτονοειδές μοτίβο πίσω από αυτό το οποίο αυξάνει σε πάχος με την αύξηση του f . Όταν η συχνότητα ταλάντωσης φθάσει την τιμή $f = 6\text{Hz}$ αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτες μεγάλες δίνες που είναι αποτέλεσμα δύο συνιστωσών. Από τη μια η κίνηση του χείλους εκφυγής είναι τόσο γρήγορη που η ροή προσπαθώντας να την παρακολουθήσει και να αναπληρώσει το κενό που δημιουργείται γυρίζει αντίστροφα, ενώ από την άλλη, η ταχύτητα u_x στο απόρευμα μειώνεται με την αύξηση του f άρα και του k (πβ διάγραμμα 53) και η ροή κατά κάποιον τρόπο 'στριμώχεται' (έτσι εξηγείται και η σταδιακή αύξηση του πάχους του απορεύματος). Για συχνότητα ταλάντωσης $f = 8\text{Hz}$ και $f = 9\text{Hz}$ οι δίνες γίνονται πιο δυνατές και μπορούν να δικαιολογήσουν στο διάγραμμα 53 την τοπική επιτάχυνση στο κέντρο του άξονα y αλλά και την γενικότερη αύξηση της έντασης της τύρβης στην περιοχή του απορεύματος. Επίσης, στα στιγμιότυπα των τριών προηγούμενων συχνοτήτων φαίνεται στην κάτω πλευρά του απορεύματος να ταξιδεύει μία πυκνή μάζα καπνού που πιθανώς δικαιολογεί στο διάγραμμα 55 των εντάσεων τύρβης την αύξηση της στα αρνητικά του άξονα y .

Μελέτες όπως η [22], σε αεροτομή NACA 0012 έδειξαν παρόμοια απορεύματα για συγκεκριμένες τιμές μειωμένης συχνότητας ενώ άλλες κάνουν λόγο για πρόωση που προκύπτει από την ταλάντωση μιας πτέρυγας όταν η ροή πίσω της έχει μονοπάτι αντίθετο

από αυτό του Von Karman (reverse Von Karman street) [23], [24] & [25]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διατριβή των Τριανταφύλλου et Al [23], οι οποίοι ύστερα από πειράματα βρήκαν τις προϋποθέσεις με τις οποίες μεγιστοποιείται η προωθητική απόδοση συνδυάζοντας ταλάντωση της γωνίας προσβολής αλλά και του ύψους της πτέρυγας με ορισμένη φασική διαφορά. Παρατηρώντας τα μοτίβα των απορευμάτων του παρόν πειράματος, για συχνότητες ταλάντωσης 6Hz , 8Hz και 9Hz ή μειωμένες συχνότητες αντιστοίχως k 1,88 2,5 και 2,82 φαίνεται πως και αυτά τα απορεύματα ακολουθούν το αντίθετο μονοπάτι του Von Karman οπότε και εδώ σημειώνεται πρόωση. Κοιτώντας από αριστερά προς τα δεξιά, έχουν την ανθρωπολογιακή δίνη πιο πάνω από την αντίστοιχη ωρολογιακή.

Τέλος, με τις φωτογραφίες από την τυρβώδη ροή, για δύο από τις έξι περιπτώσεις, μπορεί να βγει με ασφάλεια το συμπέρασμα ότι για τα 9Hz ταλάντωσης ($k = 2,82$) το απόρευμα είναι και πάλι προωθητικό και οι μεγάλες δίνες εξηγούν την τοπική επιτάχυνση στο διάγραμμα ταχυτήτων 66. Αντίστοιχα, οι σχετικά πιο πυκνές μάζες καπνού που ταξιδεύουν στην κάτω πλευρά του απορεύματος αυξάνουν την τύρβη στα αρνητικά του άξονα y (πβ διάγραμμα 68). Αναφορικά με το απόρευμα για τα 4 Hz, αυτό φαίνεται να έχει μικρότερο πάχος στην τυρβώδη ροή από ότι στη στρωτή και γενικότερα ο πιο αραιός καπνός θα μπορούσε να είναι σημάδι μιας περιοχής ήπιας κυκλοφορίας αέρα με χαμηλότερη τύρβη σε σύγκριση με την αντίστοιχη στη στρωτή ροή.

Ένα γενικότερο όμως συμπέρασμα που αναφέρεται σε όλες τις περιπτώσεις και στα δύο είδη ροών, είναι ότι παρά το μικρό αριθμό Re (περίπου 8600) της ροής αυτή παραμένει προσκολλημένη σε όλο το μήκος της πτέρυγας κατά την ταλαντευόμενη κίνησή της το οποίο συμφωνεί και με το συμπέρασμα της [22].

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Μία πειραματική ανάλυση έγινε σε ακίνητο και ταλαντευόμενο, ελαφρώς τροποποιημένο πτερύγιο της σειράς NACA 2816, σε ροή υψηλής και χαμηλής έντασης τύρβης με αριθμό Re 86000. Η ταλάντωση γινόταν μόνο ως προς τη γωνία προσβολής του, με εξίσωση κίνησης $\varphi(t) = 12^\circ \sin \omega t$ και σε 6 διαφορετικές συχνότητες. Οι μετρήσεις αφορούσαν την μέση διαφορική πίεση σε τέσσερα επιλεγμένα ζεύγη οπών σε πρώτο στάδιο και σε δεύτερο, τις τοπικές ταχύτητες σε συγκεκριμένα σημεία του απορεύματος με χρήση θερμονήματος (hot wire).

Από τις μετρήσεις πιέσεων υπολογίσθηκε ο συντελεστής διαφορικής πίεσης και κατ' επέκταση, η κατανομή του στην αεροτομή για τις διάφορες περιπτώσεις κίνησης αλλά και ροής. Η μελέτη ξεκίνησε με στατικές μετρήσεις σε στρωτή ροή και σε όλο το εύρος κίνησης του πτερυγίου ώστε να γίνει σύγκριση με τη βιβλιογραφία. Από την διασταύρωση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη θεωρία, που αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες ροής, επιβεβαιώθηκε καλή σύγκλιση.

Στη συνέχεια εξετάσθηκε η επίδραση της ταλάντωσης στην κατανομή πίεσης της αεροτομής και βρέθηκε ότι για το εύρος συχνοτήτων του πειράματος και σε στρωτή ροή υπάρχει μία σαφής μείωση των συντελεστών πίεσης, οπότε και της παραγόμενης άντωσης, σε σχέση με τις 0° γωνίας προσβολής - όμως η κατανομή εξακολουθεί να είναι ψηλότερα από αυτή των -2° . Παράλληλα, το σημείο μέγιστης άντωσης μετακινήθηκε ελαφρώς πιο πίσω ενώ ευδιάκριτη αύξηση παρουσίασαν οι συντελεστές διαφορικής πίεσης κοντά στο χείλος προσβολής και εκφυγής όταν η μειωμένη συχνότητα έγινε της τάξης του 1 (στο

πείραμα όταν το k ξεπέρασε την τιμή 0,2055). Τα αμέσως προηγούμενα συμπεράσματα συμφωνούν με τις μελέτες των McCroskey και Mani et Al , [20] και [10] αντίστοιχα. Ακόμη, μπορεί να υποτεθεί ότι επιβεβαιώνεται τόσο στην ακίνητη όσο και στην ταλαντευόμενη κατάσταση η συνθήκη των kutta – Joukowski που θέλει τη διαφορά πίεσης στο χείλος εκφυγής να είναι μηδέν – αφού στο 90% της χορδής ο μετρούμενος διαφορικός συντελεστής πίεσης δεν ξεπερνά το 0,17.

Με την προσθήκη του πλέγματος παραγωγής τύρβης η έντασή της στην ελεύθερη ροή ανέβηκε στο 5,8%, από 0,68% που ήταν χωρίς αυτό. Η ανάλυση των διαγραμμάτων έδειξε ότι η ταλάντωση επιδρά περίπου με τον ίδιο τρόπο στην κατανομή των πιέσεων χαμηλώνοντας την καμπύλη σε σχέση με τις στατικές συνθήκες αλλά και πάλι συνεχίζει να βρίσκεται ψηλότερα από αυτή των -2° . Η μορφή της κατανομής δεν άλλαξε, αυξήθηκε όμως μόνο ο συντελεστής στο χείλος προσβολής όταν η μειωμένη συχνότητα έλαβε τις τιμές 0,274 και 0,308 (της τάξης του 1). Η συνθήκη των kutta – Joukowski φαίνεται και πάλι να ισχύει αφού ο συντελεστής κοντά στο χείλος εκφυγής δεν ξεπερνά το 0,17.

Αναφορικά με την επίδραση της τύρβης στις κατανομές πίεσης της πτέρυγας παρατηρήθηκε ότι αυτή είναι ευνοϊκή και στις στατικές συνθήκες αλλά και στις δυναμικές. Μάλιστα, οι μετρήσεις πίεσης κοντά στο χείλος εκφυγής του πτερυγίου για την τυρβώδη ροή υπήρξαν σχετικά σταθερές σε όλο το εύρος γωνιών και συχνοτήτων ως αποτέλεσμα των ενισχυμένων οριακών στρωμάτων σε αντίθεση με τη στρωτή ροή που η τιμή της ήταν πιο ευάλωτη στις αλλαγές. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι με την τυρβώδη ροή στην αεροσήραγγα τα φαινόμενα εμποδισμού (blockage effects) είχαν πιο ασθενική επίδραση στις μετρήσεις από ότι στις αντίστοιχες με τη στρωτή ροή.

Η διατριβή συνεχίστηκε με την ανάλυση των προφίλ ταχύτητας, εντάσεως τύρβης και μισού πάχους απορεύματος που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων ταχύτητας. Έτσι, στη στρωτή ροή η εισήγηση ταλαντευόμενης κίνησης στο πτερύγιο άλλαξε την

κατανομή των ταχυτήτων στο απόρευμα. Δηλαδή όσον αφορά τις τιμές, σημειώθηκε μια γενικότερη μείωση και όσον αφορά τη μορφή παρουσιάστηκε τοπική επιτάχυνση στο κέντρο του άξονα μετρήσεων y . Η ένταση της τύρβης αυξήθηκε σημαντικά σε όλο το μήκος του απορεύματος και μαζί της αυξήθηκε σημαντικά και το πάχος του (έως 6 φορές).

Από την άλλη πλευρά στην τυρβώδη ροή, η ταλάντωση έφερε λίγο διαφορετικά αποτελέσματα. Οι ταχύτητες και η ένταση τύρβης στο απόρευμα σημείωσαν δραματική μείωση σε αντίθεση με το πάχος του, το οποίο αυξήθηκε έως και 5 φορές σε σύγκριση με τις στατικές συνθήκες. Φαίνεται πως δημιουργήθηκε μία περιοχή ήπιας κυκλοφορίας στο απόρευμα του ταλαντευόμενου πτερυγίου και με πολύ μικρές ταχύτητες ως προς τη διεύθυνση ροής x .

Το τελευταίο συμπέρασμα ενισχύεται από τη σύγκριση όλων των προφίλ του πειράματος, στατικών και δυναμικών, της στρωτής ροής με τα αντίστοιχα της τυρβώδους. Στην τυρβώδη ροή το απόρευμα πίσω από την πτέρυγα έχει μικρότερο μήκος, μικρότερη τύρβη και μικρότερη ταχύτητα.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων κλείνει με τα στιγμιότυπα των απορευμάτων για ταχύτητα ροής 1,2 m/s σε στρωτή και τυρβώδη ροή. Οι φωτογραφίες με το μοντέλο σταθερό έδειξαν ότι η τυρβώδης ροή καθυστερεί περίπου 2° τη στατική απώλεια στήριξης και όταν συμβεί αυτό το φαινόμενο το πάχος του απορεύματος αυξάνεται σημαντικά. Ωστόσο, οι φωτογραφίες με το ταλαντευόμενο πτερύγιο έδειξαν ότι από μία συχνότητα και πάνω σχηματίζονται μεγάλες δίνες και με την προϋπόθεση ότι αυτές έχουν μονοπάτι αντίθετο από του Von Karman (Von Karman reverse street) τότε παράγεται πρόωση. Επίσης, η ταλάντωση κάνει τα οριακά στρώματα να είναι προσκολλημένα για μεγαλύτερο εύρος γωνιών προσβολής – στο συγκεκριμένο πείραμα σε όλο το εύρος.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Σε συνέχιση της παρούσας εργασίας μπορούν να αλλάξουν κάποια χαρακτηριστικά όπως η εξίσωση κίνησης του μοντέλου. Δηλαδή, η μέση γωνία προσβολής να είναι διάφορη του μηδενός και το εύρος ταλάντωσης μεγαλύτερο από αυτό του πειράματος ώστε να ξεπερασθεί το στατικό stall. Μπορεί να συνεχισθεί η έρευνα σε μεγαλύτερη ένταση τύρβης, διαφορετικό αριθμό Re και σε υψηλότερες μειωμένες συχνότητες - πιο κοντά στο 1. Επίσης, είναι ενδιαφέρον να εκτιμηθεί η ασταθής διαφορική πίεση $(P_A - P_B)(t)$ ώστε να φανεί η επίδραση φαινομένων όπως είναι το δυναμικό stall. Τέλος, όλα τα παραπάνω είναι καλό να γίνουν σε μία αεροσήραγγα μεγαλύτερων διαστάσεων ώστε να αποφευχθούν τυχόν φαινόμενα εμποδισμού.

Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφία - Αναφορές

- [1] K. E. Swalwell, J. Sheridan and W. H. Melbourne , 2001 December 14, ‘The effect of turbulence intensity on Stall of the NACA 0012 airfoil’ , Monash University, Clayton, Victoria, Australia, 14th Australasian Fluid Mechanics Conference.
- [2] K. E. Swalwell, J. Sheridan and W. H. Melbourne, ‘The effect of turbulence scale and intensity on stall of a NACA 4412 airfoil, Monash University, Clayton, Victoria, Australia.
- [3] Theodorsen, T., ‘General Theory of Aerodynamic Instability and the mechanism of Flutter/ NACA TR 496 .
- [4] Von Karman, T., and Sears , W.R. , 1983, August , ‘Airfoil Theory for Non-Uniform motion’, Journal of the Aeronautical Sciences , Vol 5, No.10 , pp 379-390
- [5] Lighthill, 1975, ‘Mathematical Bio-fluid dynamics, SIAM, Philadelphia.
- [6] Wu, T. Y, 1971, ‘Hydromechanics of Swimming of fishes and Cetaceans’, Advances in Applied Mechanics Vol 11, pp 1-63.
- [7] McCroskey, W. J., 1977 March ‘Some Current Research in Unsteady Fluid Dynamics’ ASME Transactions , Journal of Fluid Engineering , Vol 99, pp 8-39.
- [8] Carr, L. W, 1988 Jan , ‘Progress in Analysis and Prediction of Dynamic Stall’, Journal of Aircraft, Vol 25, pp 6-17.
- [9] Tolouei E, Mani M, Soltani M. R, Broomand M, 2004 August 19, ‘Flow Analysis around a Pitching Airfoil’ Paper No AIAA-2004-5200, Rhode Island USA , 23rd Applied Aerodynamic conference.
- [10] Mani M, Ajalli F, Soltani M. R, 2008 May 23, ‘Experimental Investigation of the reduced frequency effects into pressure coefficients of a plunging airfoil’, 7th International Conference on Advances in Fluid Mechanics.

- [11] Satyanarayana B, 1977 May, 'Unsteady Wake Measurements of Airfoil and Cascades, AIAA Journal, Vol 15, pp 613-618.
- [12] Koochesfahani M, 1989 September 'Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil', AIAA Journal, Vol 27, No 9, pp 1200-1205.
- [13] Park, S. O, Kim, J. S, Lee, B. I, 1989, 'Hot Wire Measurements of Near Wake Behind an Oscillating Airfoil', AIAA Journal, Vol 28, No 1 .
- [14] Mani M, Gudarzi F, Karimian S.M.H, 2008 July 2, 'Wake Analysis of a Plunging Airfoil', South Africa, 6th International Conference on heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics.
- [15] Sadeghi H, Mani M and Ardakani M. A, 2008, 'Effect of Amplitude and mean Angle of Attack on Wake of an Oscillating Airfoil', World Academy of Science, Engineering and Technology.
- [16] Fernecioglu Idil, Cetiner Oksan, 2008 July 10, 'Flow Structures around an Oscillating Airfoil in Steady Current', Lisbon Portugal, 14th International Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.
- [17] Berton E, Favier D, Maresca C, Benyahia A, 'Flow Field Visualizations Around Oscillating Airfoils', Marseille France.
- [18] Dimitriadis G, 'Experimental Aerodynamics' – Lecture 3: Wind Tunnel Corrections, [power point slides], Retrieved from Universite de Liege.
- [19] Muller Thomas J., 1999 September 17 'Aerodynamic Measurements at Low Reynolds Numbers for Fixed Wing Micro-Air Vehicles', IN 46556, USA, University of Notre Dame.
- [20] Stepniewski W. Z, Keys C. N, 1984, 'Rotary Wing Aerodynamics' , two Vol Bound as one, pp 330, USA, Dover Publications.

- [21] Amandolese X, Szechenyi E, 2004, 'Experimental Study of the Effect of Turbulence on a Section Model Blade Oscillating in stall', Saint Cyr France, Institut Aero Technique.
- [22] Jung Y. W, Park S. O, 2003 August 6, 'Vortex shedding characteristics in the wake of an oscillating airfoil at Low Reynolds number', Journal of fluids and structures, ELSEVIER.
- [23] Triantafyllou M. S, Anderson J. M, Streitlien K, Barrett D. S, 1996 April 17, 'Oscillating foils of high propulsive efficiency', Vol 360, pp 41-72, UK, Cambridge University Press.
- [24] 'Chapter 5 - Plunging Airfoil Wake Structures', Retrieved 2010 November 23 from University of Louisville website: <louisville.edu/speed/cfdlab/files/06chapter5.pdf>
- [25] Triantafyllou M. S, Triantafyllou G. S, Gopalkrishnan R, 1991 'Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils' Physics of Fluids 3, 2835-2837.
- [26] Ira H. Abbott & Albert E. Von Doenhoff, 1959, 'Theory of wing sections', New York, Dover Publications
- [27] Ερρίκος Σταπουρντζής, 2007 Σεπτέμβριος, 'Σημειώσεις Συμπιεστής και Ασυμπίεστης Αεροδυναμικής', Βόλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας
- [28] Gemba Kay, 2007 March, 'Measurement of boundary layer on a flat plate', Long Beach, California State University