



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΣΤΑΘΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΚΑΙ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΡΟΗΣ**

υπό

ΚΑΠΤΣΙΑΝΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑΣ

Επιβλέπων : Σταπουντζής Ερρίκος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Τίτλου Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Βόλος, Ιούλιος 2009



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

Αριθ. Εισ.: 7320/1

Ημερ. Εισ.: 10-07-2009

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: Δ

620.106 4

ΚΑΠ

© 2009 Καπψσιανού Δήμητρα

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής Δρ. Σταματέλλος Αναστάσιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Τέταρτος εξεταστής Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πέμπτος εξεταστής Δρ. Πετρόπουλος Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα Ζησιμάτου Αφροδίτη για τη βοήθεια της κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την ηθική υποστήριξή της κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Τέλος, ευχαριστώ το φοιτητή Κατσαμά Γεώργιο για τη βοήθεια του καθώς και τον τεχνικό του τμήματος Βέργο Αθανάσιο για την ουσιαστική βοήθεια του στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πεδίο ροής και τα ασταθή αεροδυναμικά φορτία μελετήθηκαν πειραματικά και υπολογιστικά σε πτερύγιο NACA 0015 χορδής $c=125\text{mm}$ το οποίο ταλαντώνεται στη διεύθυνση της ροής. Η μελέτη του πεδίου πραγματοποιήθηκε με οπτικοποίηση με καπνό σε αεροσήραγγα. Κυρίως μελετήθηκε η επίδραση της γωνίας προσβολής και της συχνότητας ταλάντωσης στο πεδίο ροής, στην επιφάνεια αναρρόφησης και στο κοντινό απόρρευμα. Για τη μέτρηση των ασταθών αεροδυναμικών φορτίων χρησιμοποιήθηκε τριαξονικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας.

Από τις μετρήσεις της ασταθούς άνωσης που πραγματοποιήθηκαν προκύπτουν αποκλίσεις από τη ψευδοστατική συμπεριφορά καθώς η διαφορά φάσης μεταξύ της σχετικής ταχύτητας U_R και της ασταθούς άνωσης είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Παρατηρήθηκε επίσης αύξηση της άνωσης με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας. Η ασταθής οπισθέλκουσα με αύξηση της συχνότητας αυξάνεται κάτι που επαληθεύεται και από τη διάταξη των δινών στο απόρρευμα του πτερυγίου.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών επιβεβαίωσαν σε μεγάλο βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	14
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΤΑΙ ΣΕ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ.....	15
2.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΣΤΑΘΩΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	41
3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης	41
3.1.1. Αεροσήραγγα	44
3.1.2 Συλλέκτης - Εισαγωγή αέρα	45
3.1.3. Τμήμα δοκιμών.....	45
3.1.4 Φυσητήρας	47
3.1.5 Διαχύτης	47
3.2 Μετρητικά όργανα και συσκευές	47
3.2.1 Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot - wire anemometer C.T.A.).....	48
3.2.4 Μέθοδος μετρήσεων με θερμοανεμόμετρο (HOT-WIRE)	50
3.2.4.1 Βαθμονόμηση θερμοανεμομέτρου (HOT-WIRE)	50
3.2.5 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων[Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog-digital)].....	50
3.2.6 Μανόμετρο και σωλήνας Pitot - Static	51
3.2.7 Παλμογράφος.....	52
3.2.8 Ταλαντωτικός μηχανισμός.....	52
3.2.9 Ενισχυτής	53
3.2.10 Γεννήτρια συχνοτήτων.....	54
3.2.11 Σύστημα μέτρησης εύρους	54
3.2.12 Τριαξονικός αισθητήρας KISTLER	55
3.2.13 Ενισχυτής φορτίου KISTLER 5011B	56
3.2.14 Laser –Πολυγωνικό κάτοπτρο	56
3.2.12 Camera.....	57
3.3 Πειραματικές διάταξεις οπτικοποίησης της ροής.....	57
3.3.1 Πειραματική διάταξη οπτικοποίησης ροής στην αεροσήραγγα	57
3.3.2 Πειραματική διάταξη οπτικοποίησης ροής σε δεξαμενή νερού	57
Έλεγχος της συχνότητας ταλάντωσης	58
Αποθήκευση frames	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ANSYS CFX 10.....	62
4.1 Εισαγωγή στο λογισμικό ANSYS CFX 10	62
4.1.1 Οριακές συνθήκες	62
4.1.2 Αρχικές συνθήκες	63
4.1.3 Πλέγμα	63
4.1.4 Υπολογιστική στρατηγική	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	65

5.1 Εισαγωγή	65
5.2 Οπτικοποίηση ροής στο πτερύγιο	65
5.2.1 Οπτικοποίηση της ροής γύρω από πτερύγιο NACA 0015 σε αέρα	65
5.2.2 Οπτικοποίηση της ροής γύρω από πτερύγιο NACA 0015 σε νερό.....	79
5.3 Ταχύτητες στο απόρρευμα του πτερυγίου	82
5.3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ U/U_∞	82
5.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ u_{RMS}/U_∞	87
5.4 Μεθοδολογία μέτρησης δυνάμεων στο πτερύγιο	91
5.4.1 Υπολογισμός διαφοράς φάσης από φασματική ανάλυση (cross power spectral density / coherence)-Πρόγραμμα phase1	93
5.4.2 Αποτελέσματα του υπολογισμού διαφοράς φάσης από φασματική ανάλυση	93
5.5 Αποτελέσματα μέτρησης ασταθών φορτίων στο πτερύγιο	98
5.6 Αποτελέσματα υπολογισμών	104
5.6.1 Οπτικοποίηση ροής	104
5.6.2 Ταχύτητες στο απόρρευμα	112
5.6.3 Ασταθή αεροδυναμικά φορτία	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΜΑΤΑ.....	124
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	126

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

α γωνία προσβολής

k ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης, $k = \frac{\pi * f * c}{U_{\infty}}$

h ανηγμένο εύρος ταλάντωσης, $h = \frac{s * \omega}{U_{\infty}}$

Re_c αριθμός Reynolds, $Re_c = \frac{U_{\infty} * c}{\nu}$

U_{∞} ταχύτητα της ελεύθερης ροής

f συχνότητα ταλάντωσης (Hz)

s εύρος ταλάντωσης (m)

c χορδή του πτερυγίου (m)

ν κινηματικό ιξώδες

U_R σχετική ταχύτητα (m/s)

U_w μέγιστη ταχύτητα (m/s)

U_{π} ταχύτητα στερεού σώματος (m/s)

T περίοδος ταλάντωσης $T = \frac{1}{f}$

ω κυκλική συχνότητα

x, y, z οι συντεταγμένες του καρτεσιανού συστήματος

St Αριθμός Strouhal $St = \frac{f * L}{U_{\infty}}$

θ_0 εύρος ταλάντωσης

ψ γωνία φάσης μεταξύ δύο κινήσεων

t χρόνος (s)

C_L συντελεστής άνωσης

C_D συντελεστής οπισθέλκουσας

C_m συντελεστής ροπής

$F(t)$ κατακόρυφη δύναμη (N)

$L(t)$ άνωση (N)

F_y δύναμη στη διεύθυνση y

F_z δύναμη στη διεύθυνση z

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 2.1 Κανονικοποιημένα προφίλ ταχύτητας στη διεύθυνση της ροής με $k=0.26$, $\alpha_0=5^\circ$, $Re=2.6 \cdot 10^5$, $U_\infty=19.5\text{m/s}$

Γράφημα 2.2 Σύγκριση μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων για το προφίλ της ταχύτητας

Γράφημα 2.3 Η μεταβολή της συχνότητας έκχυσης των δινών σε σταθερό πτερύγιο με τη γωνία προσβολής

Γράφημα 2.4 Το έλλειμμα της άνωσης και οι κλίσεις της οπισθέλκουσας των NACA 63₂-2XX σε διαφορετικό πάχος

Γράφημα 2.5 Συντελεστής άνωσης (1) και (2) υπολογισμοί και πείραμα για $k=0.16$ και $Re=4.4 \cdot 10^4$ και (3) πείραμα για $k=0.153$ και $Re=4.8 \cdot 10^4$

Γράφημα 2.6 Η επίδραση της μεταβολής της ανηγμένης συχνότητας στην ασταθή άνωση

Γράφημα 2.7 Επίδραση της μέσης γωνίας προσβολής στο συντελεστή άνωσης:
 $\bar{\alpha} = 8^\circ$, $k=0.0785$, $TI=1.1\%$

Γράφημα 2.8 Επίδραση της τύρβης στο συντελεστή άνωσης, $\tilde{\alpha} = 8^\circ$, $\bar{\alpha} = 12^\circ$, $k=0.183$

Γράφημα 2.9 Επίδραση της ανηγμένης συχνότητας στην πίεση $\alpha_0 = 5^\circ$, $\bar{\alpha} = 2^\circ$, $k = 0.03$

Γράφημα 3.1 Καμπύλες βαθμονόμησης του θερμοανεμομέτρου

Γράφημα 5.1 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=5\%c$

Γράφημα 5.2 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=10\%c$

Γράφημα 5.3 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=15\%c$

Γράφημα 5.4 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=10\%c$

Γράφημα 5.5 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=15\%c$

Γράφημα 5.6 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=10.61\text{Hz}$

Γράφημα 5.7 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=3,183\text{Hz}$

Γράφημα 5.8 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=8\text{Hz}$

Γράφημα 5.9 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=10.61\text{Hz}$

Γράφημα 5.10 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=5\%c$

Γράφημα 5.11 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=10\%c$

Γράφημα 5.12 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=5\%c$

Γράφημα 5.13 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $10\%c$

Γράφημα 5.14 Φασματική πυκνότητα ταχύτητας στο απόρευμα, $\alpha=2^\circ$, $s=15\%c$, $f=8\text{Hz}$

Γράφημα 5.15 Φασματική πυκνότητα ταχύτητας στο απόρευμα, $\alpha=0^\circ$, $s=5\%c$, $f=8\text{Hz}$

Γράφημα 5.16 Χρονοσειρά κατακόρυφης δύναμης F (μπλε, με θόρυβο) και σχετικής ταχύτητας U_n (κόκκινο) στην διάρκεια τριών κύκλων. Η διαφορά φάσης υπολογίζεται στατιστικά από το πρόγραμμα phase1

Γράφημα 5.17 Φάσμα κατακόρυφης δύναμης F . Η αιχμή είναι στην συχνότητα ταλάντωσης της πτέρυγας

Γράφημα 5.18 Παράδειγμα cross power spectral density C_{xy} και φάσης PHASE μεταξύ δυο σημάτων που έχουν περιοδικό περιεχόμενο περίπου στα 4 Hz (narrowband) 160 Hz (broadband). Οι αντίστοιχες διαφορές φάσης είναι περίπου 60° και 30°

Γράφημα 5.19 Μεταβολή της διαφοράς φάσης με την συχνότητα και την γωνία προσβολής.

Γράφημα 5.20 Φασματικές πυκνότητες σχετικής ταχύτητας U_n (ο αισθητήρας ταχύτητας κινείται σε φάση μαζί με την πτέρυγα)

Γράφημα 5.21 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς άνωσης σε $\alpha = 13^\circ$, $k=0.11$, $h = 0.042$

Γράφημα 5.22 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς άνωσης σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.11$, $h=0.042$

Γράφημα 5.23 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς άνωσης σε $\alpha = 13^\circ$, $k=0.29$, $h = 0.042$

Γράφημα 5.24 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς άνωσης σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.29$, $h=0.042$

Γράφημα 5.25 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha = 13^\circ$, $k=0.11$, $h = 0.042$

Γράφημα 5.26 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.11$, $h=0.042$

Γράφημα 5.27 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha = 13^\circ$, $k=0.29$, $h = 0.042$

Γράφημα 5.28 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.29$, $h=0.042$

Γράφημα 5.29 Η ταχύτητα στο απόρευμα και σε απόσταση δύο χορδών από την ακμή φυγής σε συχνότητα ταλάντωσης 10,61Hz, σε γωνία προσβολής 0° και σε τρεις τιμές του εύρους 5%, 10% και 15% της χορδής

Γράφημα 5.30 Η ταχύτητα στο απόρευμα και σε απόσταση δύο χορδών από την ακμή φυγής σε συχνότητα ταλάντωσης 10,61Hz, σε γωνία προσβολής 2° και σε δύο τιμές του εύρους 10% και 15% της χορδής

Γράφημα 5.31 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c, 30\%c$

Γράφημα 5.32 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

Γράφημα 5.33 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

Γράφημα 5.34 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c, 30\%c$

Γράφημα 5.35 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

Γράφημα 5.36 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 10.61Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

Γράφημα 5.37 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.38 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.39 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.40 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.41 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.42 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.43 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.44 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.45 Ο συντελεστής άνωσης σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

Γράφημα 5.46 Ο συντελεστής οπισθέλκουσας σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k, 0.11, 0.27$ και 0.42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

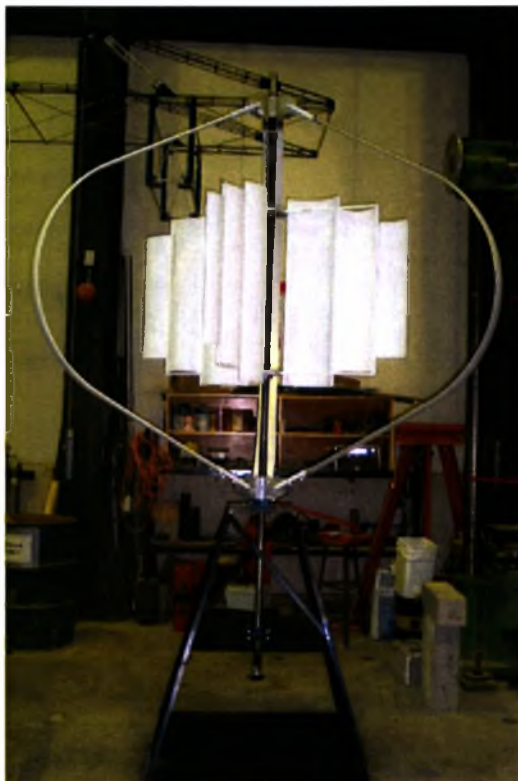
Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει βαθιές τις ρίζες της στο χρόνο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όμως αναπτύχθηκε ουσιαστικά στα τέλη του 20^{ου} αιώνα λόγω της εξέλιξης της σχετικής τεχνολογίας, της ραγδαία αυξανόμενης τάσης για εκμετάλλευση των εναλλακτικών-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και της ανάγκης πλέον να διαφυλαχθεί το οικοσύστημα. Οι μεγάλες εμπορικές ανεμογεννήτριες συμβάλλουν ώστε το ευρύ κοινό να αποδεχτεί την ανανεώσιμη ενέργεια και στις αρχές του 21^{ου} αιώνα πιστεύεται ότι θα είναι μια από τις κυρίαρχες τεχνολογίες που μαζί με την πυρηνική και τα ορυκτά καύσιμα θα ικανοποιήσουν τη ζήτηση σε ενέργεια τις επόμενες δεκαετίες.

Το έτος 2005 εγκαταστάθηκαν μονάδες ισχύος 11531 MW οι οποίες αντιπροσωπεύουν αύξηση 40.5% σε ετήσιο επίπεδο στην παγκόσμια αγορά. Στην Ευρώπη η εγκατεστημένη ισχύς είναι 40500 MW ποσό που αποτελεί το 69% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ είναι η Δανία με 3122 MW, η Γερμανία με 18428 MW και η Ισπανία με 10027 MW, ενώ η Ελλάδα έχει εγκατεστημένη ισχύ , υστερεί σημαντικά (1,4 %).

Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των συστημάτων αφορά ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα στις οποίες ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους (Εικόνα 1) ενώ λίγες είναι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που χρησιμοποιούνται πλέον στις οποίες ο άξονας παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους (*Darrieus type*, Εικόνα 2).



Εικόνα 1.1: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα



Εικόνα 1.2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα παρουσιάζουν διάφορα αεροδυναμικά προβλήματα όπως δυναμική απώλεια στήριξης και ταλαντώσεις. Οι τελευταίες διακρίνονται σε ταλαντώσεις κάθετα (plunging ή flapwise) και παράλληλα (lead-lag ή edgewise) στην σχετική ταχύτητα ως προς το πτερύγιο (Σχήμα 1).

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην κατανόηση των μηχανισμών που υπεισέρχονται στην εμφάνιση ασταθών φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών, τα οποία είναι μεγάλες κατασκευές με διατομή που μοιάζει με αεροτομή, όταν αυτά υπόκεινται σε ταλάντωση τύπου lead-lag. Λόγω της εξαιρετικής δυσκολίας μέτρησης φορτίων σε κινούμενα πτερύγια αλλά και των σχετικά μικρών γωνιών προσβολής που παρουσιάζονται στη λειτουργία ανεμογεννητριών η έρευνα εστιάζεται κυρίως σε διαμήκεις ταλαντώσεις σε ελεγχόμενες δηλαδή ευθύγραμμες κινήσεις κατά τη διεύθυνση του ανέμου.

Επίσης επιχειρείται αποσύνδεση από τις άλλες δυνατές μορφές ταλαντώσεων (εγκάρσιες, στροφικές).

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε αεροσήραγγα με πτερύγιο NACA 0015 το οποίο πραγματοποιεί αρμονικές ταλαντώσεις στη διεύθυνση της ροής σε διάφορες συχνότητες και εύρη ταλάντωσης και διάφορες γωνίες προσβολής.

Το ίδιο πρόβλημα μελετήθηκε υπολογιστικά με εμπορικό κώδικα CFD ANSYS-CFX 10 ώστε να καταστεί δυνατός ο χωρισμός της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων όπως η συχνότητα και το εύρος ταλάντωσης και η γωνία προσβολής.



Σχήμα 1 Κίνηση του πτερυγίου παράλληλα στη σχετική ταχύτητα του πτερυγίου (lead-lag)

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μελέτη της βιβλιογραφίας που έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές σε πτερύγια που υπόκεινται σε διάφορες μορφές ταλάντωσης. Η έρευνα περιλαμβάνει πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες όπου παρουσιάζεται η ανάπτυξη του πεδίου ροής καθώς και τα αεροδυναμικά φορτία σε διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αεροελαστικότητα είναι η μελέτη των αεροδυναμικών φορτίων σε ελαστικά αεροδυναμικά σώματα. Ένα από τα ενδιαφέροντα προβλήματα στην αεροελαστικότητα είναι η σταθερότητα μιας κατασκευής στον άνεμο. Τα αεροδυναμικά φορτία αυξάνουν ραγδαία με την ταχύτητα του ανέμου μπορεί να υπάρξει μια κρίσιμη ταχύτητα στην οποία η κατασκευή γίνεται ασταθής.

Μια πρόκληση για τους αναλυτές είναι να χρησιμοποιήσουν συμπληρωματικές πειραματικές μετρήσεις και τεχνικές μοντελοποίησης για την καλύτερη κατανόηση των αεροδυναμικών προβλημάτων που συναντώνται στις ανεμογεννήτριες για την ανάπτυξη περισσότερο ανθεκτικών μοντέλων.

Οι ανεμογεννήτριες το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα λειτουργούν σε ασταθή περιβαλλοντική ροή και έτσι υπόκεινται σε περίπλοκες περιβαλλοντικές επιδράσεις όπως είναι η ατμοσφαιρική τύρβη, η επίδραση τους εδάφους στο οριακό στρώμα, κατευθυντήριες και χωρικές αποκλίσεις από διατμητικές δυνάμεις του ανέμου, θερμικές διαστρωματώσεις και πιθανές επιδράσεις από το ανάντι ασταθές απόρρευμα από τον πύργο στήριξης με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ασταθή αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια τα οποία σε συνδυασμό με το μέγεθος το οποίο πλέον υπολογίζεται σε αρκετές δεκάδες μέτρα υπόκεινται σε διάφορες μορφές ταλαντώσεων οι περισσότερες από τις οποίες έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια.

Η μη δυναμική απώλεια στήριξης είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από ξαφνική μείωση της δύναμης η οποία ασκείται κάθετα στην επιφάνεια του πτερυγίου και ακολουθείται από αύξηση της γωνίας προσβολής που προκαλεί αποκόλληση της ροής.

Η δυναμική απώλεια στήριξης είναι το ασταθές φαινόμενο κατά το οποίο το πτερύγιο ταλαντώνεται γύρω από τη στατική γωνία απώλειας στήριξης καθώς η κάθετη δύναμη συνεχίζει να αυξάνει πάνω από τη μέγιστη τιμή που καταγράφεται σε συνθήκες μη απώλειας στήριξης. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με το σχηματισμό δίνης στην ακμή προσβολής, η οποία ονομάζεται δίνη δυναμικής απώλειας στήριξης, κινείται στη επιφάνεια του πτερυγίου καθώς μεγαλώνει και τελικά αποκολλάται στην ακμή φυγής.

Αρχικά καταγράφηκε στη βιομηχανία ελικοπτέρων όπου μεγάλες ταλαντώσεις στρέψης είχαν παρατηρηθεί και αποδόθηκαν στην περιοδική απώλεια στήριξης του κάθε πτερυγίου. Θεωρήθηκε σοβαρό πρόβλημα καθώς μείωνε την εμπρόσθια ταχύτητα των ελικοπτέρων (Crimi 1973) [1].

Πολλές πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι η ασταθής ροή διαχωρίζεται και προσκολλάται ξανά σε μεγάλο τμήμα της πάνω επιφάνειας της

αεροτομής όπου το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της δυναμικής απώλειας στήριξης είναι ο σχηματισμός, η έκχυση και η μετάδοση στην πάνω επιφάνεια του πτερυγίου μιας διαταραχής που μοιάζει με δίνη από την ακμή προσβολής της αεροτομής η οποία προκαλεί ένα μη γραμμικό πεδίο αυξομειούμενης πίεσης και παροδικές μεταβολές στις δυνάμεις και ροπές που η διαφορά τους από τις αντίστοιχες σε στατική κατάσταση είναι σημαντική. Στη συνέχεια οι δίνες της ακμής προσβολής περνούν την ακμή φυγής και συναντούν το απόρευμα με τη ροή να είναι σε κατάσταση πλήρους αποκόλλησης στην άνω επιφάνεια. Η κατάσταση αυτή συνοδεύεται από ξαφνική μείωση της άνωσης. Επιπλέον όταν και αν η γωνία προσβολής γίνει αρκετά μικρή η ροή θα προσκολληθεί ξανά στην ακμή προσβολής.

Για κίνηση της ροής από αριστερά προς τα δεξιά αυτό το φαινόμενο περιλαμβάνει την παραγωγή δεξιόστροφων δινών οι οποίες παράγονται από τη μεγάλη ποσότητα συνεκτικών δινών που δημιουργούνται κοντά στην περιοχή της ακμής προσβολής (leading edge). Καθώς η γωνία προσβολής περνάει από τη στατική γωνία απώλειας στήριξης οι δίνες αρχίζουν να μεγαλώνουν και να μεταδίδονται στην επιφάνεια αναρρόφησης.

Σύμφωνα με τους Carr και Chandrasekhara [2] η διαδικασία της δυναμικής απώλειας στήριξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία της αεροτομής, ειδικά το σχήμα της ακμής προσβολής, τον αριθμό Mach, το βαθμό αστάθειας της ροής, την κατάσταση του οριακού στρώματος, τον τύπο κίνησης της αεροτομής, τη γωνία προσβολής α , τη συχνότητα ταλάντωσης.

Η εξάρτηση της δυναμικής απώλειας στήριξης από όλους τους παράγοντες που αναφέρθηκαν καθιστούν δύσκολη την υπολογιστική πρόβλεψη της με χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes καθώς είναι χρονοβόρα διαδικασία και γίνεται δυσκολότερη από την ανάγκη να συμπεριλάβει τη μοντελοποίηση του μηχανισμού μετάβασης του οριακού στρώματος.

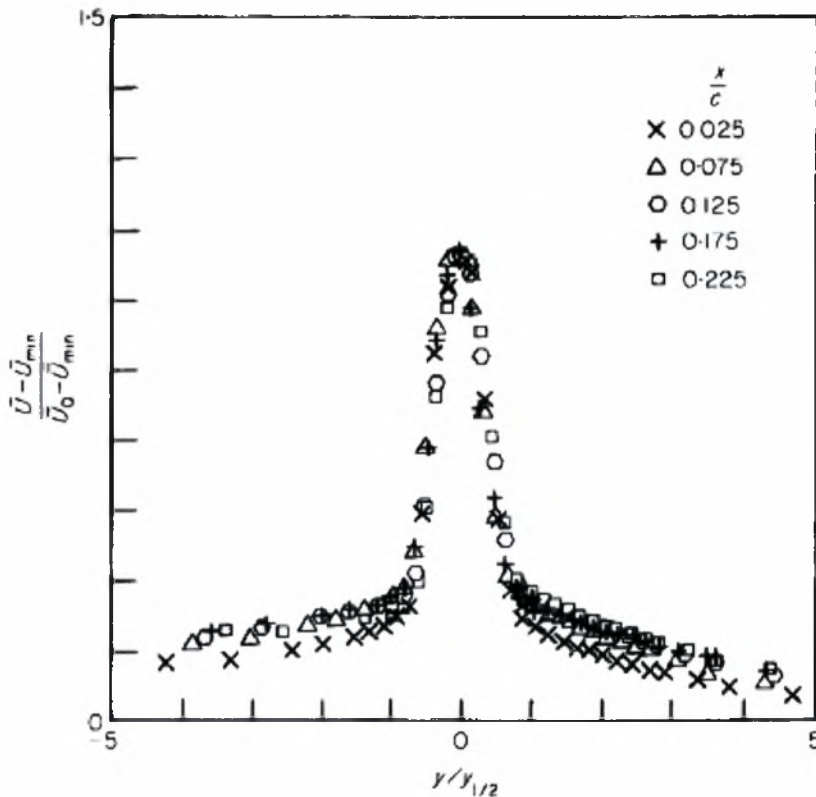
2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΤΑΙ ΣΕ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ

Πολλή δουλειά έχει γίνει και προς την κατεύθυνση της οπτικοποίησης της ροής γύρω από κινούμενο πτερύγιο με σκοπό τον προσδιορισμό των ταχυτήτων στο απόρευμα και τον τρόπο με τον οποίο το απόρευμα συνεισφέρει στην εμφάνιση αεροδυναμικών φαινομένων.

Η μελέτη του πεδίου ταχύτητας στο απόρευμα δίνει σημαντικές πληροφορίες τόσο για την ανάπτυξη των φορτίων στο πτερύγιο αλλά και για τη συμπεριφορά του οριακού στρώματος.

Επίσης η μελέτη της ροής γύρω από το πτερύγιο συνεισφέρει στην κατανόηση των μηχανισμών των διάφορων αεροδυναμικών φαινομένων. Ένας αριθμός κρίσιμων περιοχών της ροής γύρω από πτερύγια υπάρχουν σε μεγάλο βαθμό λόγω της αποκόλλησης της ροής. Αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται από μείωση της άνωσης, απώλεια της απόσβεσης και εμφάνιση των αυτοεπιβαλλόμενων ταλαντώσεων. Για το λόγο αυτό η μελέτη αυτών των περιοχών αποτελεί αντικείμενο πολλών ερευνών.

Το 1986 οι Chen και Ho [3] μελέτησαν το πεδίο ταχύτητας κοντά στην ακμή φυγής ενός πτερυγίου NACA 0012 το οποίο εκτελεί ταλάντωση βύθισης (plunge). Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το πεδίο ταχύτητας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την μεταβολή των παραμέτρων ταλάντωσης όπως η συχνότητα ταλάντωσης, το εύρος και η γωνία προσβολής. Στο απόρευμα κοντά στην ακμή φυγής σημειώνεται μια μικρή εσωτερική περιοχή με μεγάλο έλλειμμα ταχύτητας η οποία προέρχεται από τα οριακά στρώματα και μια μεγάλη εξωτερική με μικρό έλλειμμα ταχύτητας (γράφημα 2.1).



Γράφημα 2.1 Κανονικοποιημένα προφίλ ταχύτητας στη διεύθυνση της ροής με $k=0.26$, $\alpha_0=5^\circ$, $Re=2.6 \cdot 10^5$, $U_\infty=19.5\text{m/s}$

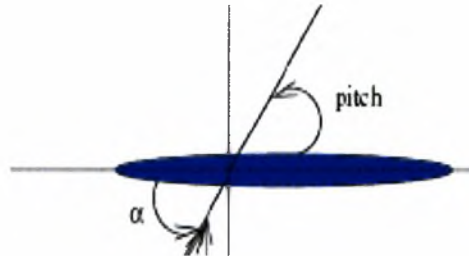
Το 1988 οι Stapountzis et. al. [4] πραγματοποίησαν πειράματα σε πτερύγιο που υπόκειται σε ημιτονοειδής στροφική ταλάντωση με σκοπό τη μελέτη της ροής γύρω από το πτερύγιο και των χαρακτηριστικών του απορεύματος. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχυτήτων στο απόρευμα με τη βοήθεια θερμού σύρματος όπου παρατηρήθηκε ότι απουσία του πτερυγίου το προφίλ ταχυτήτων είναι ομοιόμορφο σε ποσοστό 40% της χορδής στη z κατεύθυνση και όταν εισάγεται το πτερύγιο η ροή παρουσιάζει ασυμμετρία. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για μεγάλο εύρος ταλάντωσης σε μεγάλη μέση γωνία προσβολής καθυστερείται η αντιστροφή της ροής και αυξάνονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας.

Το 1989 οι O. Daube et. al. [5] μελέτησαν την ασταθή ροή γύρω από πτερύγιο το οποίο εκτελεί στροφική ταλάντωση με μεγάλο εύρος και μεγάλη συχνότητα. Τα

πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή με νερό όπου έγινε οπτικοποίηση ροής.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση στη γωνία προκαλεί την ανάπτυξη δευτερευόντων δινών οι οποίες λειτουργούν ανασταλτικά στην έκχυση δινών από την ακμή προσβολής.

Το 1994 οι Panda & Zaman [6] μελέτησαν το πεδίο ροής πτερυγίου το οποίο ταλαντώνεται εκτελώντας στροφική κίνηση (pitch) (Σχήμα 2.1) μεταξύ των γωνιών προσβολής 5° και 25° .



Σχήμα 2.1 Στροφική ταλάντωση

Από τη μελέτη του πεδίου ροής παρατηρήθηκε η ανάπτυξη δίνης δυναμικής απώλειας στήριξης κοντά στην ακμή προσβολής και η ανάπτυξη δίνης στην ακμή φυγής. Με τη αύξηση της ανηγμένης συχνότητας ταλάντωσης το πεδίο ροής γίνεται πιο περίπλοκο. Από τις μετρήσεις στην άνωση προέκυψε ότι οι μεγάλες τιμές της άνωσης σημειώνονται κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της δίνης δυναμικής απώλειας στήριξης ενώ η ξαφνική πτώση στην άνωση σημειώνεται όταν η δίνη αφήνει την επιφάνεια του πτερυγίου.

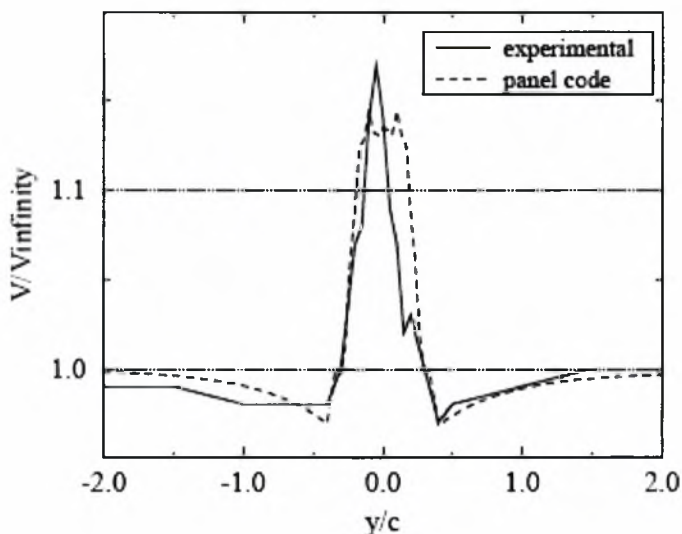
Το 1995 οι Raffel, Kompenhans και Wernert [7] μελέτησαν το πεδίο ροής πάνω από πτερύγιο NACA 0012 το οποίο εκτελεί στροφική ταλάντωση και σε συνθήκες μεγάλης δυναμικής απώλειας στήριξης.

Από τις μετρήσεις της ταχύτητας στο πεδίο ροής προέκυψε ότι κατά την κίνηση του πτερυγίου προς τα πάνω ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της δυναμικής απώλειας στήριξης, η καθυστέρηση της απώλειας στήριξης στις μεγάλες γωνίες προσβολής, παρατηρήθηκε. Καθώς η γωνία αυξάνεται η δίνη που αναπτύσσεται στην ακμή προσβολής και που συνδέεται με τη δυναμική απώλεια στήριξης μεγαλώνει και κινείται κατάντη. Όσο μεγαλώνει η γωνία η δίνη καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της πάνω επιφάνειας του πτερυγίου. Στη μέγιστη γωνία προσβολής το πεδίο ροής αλλάζει. Η δίνη αποκολλάται από το πτερύγιο και ένας αριθμός δινών αποσπώνται από την ακμή προσβολής. Την ίδια στιγμή δίνες με φορά αντίθετη από αυτής του ρολογιού διεισδύουν από την ακμή φυγής στο απόρρευμα. Τα παραπάνω δεν παρατηρούνται κατά την κίνηση του πτερυγίου προς κάτω.

Το 1996 οι Jones et. al. [8] μελέτησαν υπολογιστικά και πειραματικά τη δομή του απορεύματος πίσω από πτερύγιο που εκτελούν κίνηση βύθισης (plunge).

Τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης ροής έδειξαν συμφωνία μεταξύ των υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν στη γεωμετρία του απορεύματος. Η συμφωνία αυτή δεν ισχύει σε χαμηλές ταχύτητες βύθισης. Επίσης οι τιμές της ταχύτητας που μετρήθηκαν με τη μέθοδο LDV συμφωνούν με

τις υπολογιστικές για ένα μεγάλο αριθμό συχνοτήτων και για διάφορα εύρη ταλάντωσης.



Γράφημα 2.2 Σύγκριση μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων για το προφίλ της ταχύτητας

Το 2000 οι Kuo και Hsieh [9] μελέτησαν την ασταθή δομή των δινών πάνω από πτερύγιο NACA 0012 το οποίο πραγματοποιεί στροφική ταλάντωση. Η έρευνα έγινε με μετρήσεις ταχυτήτων και οπτικοποίηση της ροής.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι ο σχηματισμός και η ανάπτυξη της δίνης στην ακμή προσβολής καθώς και η έκχυση των δινών από την ακμή φυγής πραγματοποιείται στη μέγιστη γωνία προσβολής. Επίσης παρατηρήθηκε ότι τα φαινόμενα υστέρησης της ασταθούς ροής εμφανίζονται επίσης όταν το πτερύγιο ταλαντώνεται με μεγάλη ανηγμένη συχνότητα.

Τέλος προέκυψε ότι η μετακίνηση του άξονα ταλάντωσης δεν επηρεάζει τη δομή της ροής όταν το πτερύγιο ταλαντώνεται με μεγάλη ανηγμένη συχνότητα.

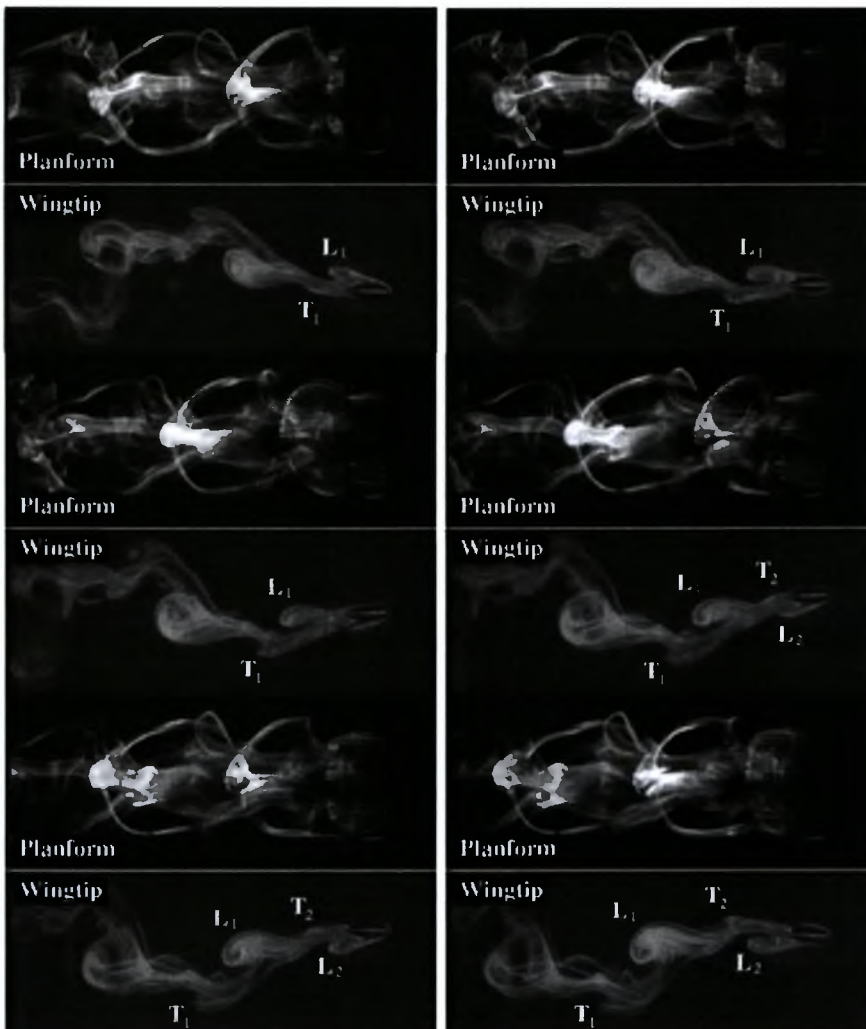
Το 2002 οι Berton et. al. [10] μελέτησαν ποσοτικά και ποιοτικά τη φυσική της ασταθούς αποκολλημένης ροής γύρω από ένα πτερύγιο NACA 0012 το οποίο εκτελεί στροφική ταλάντωση σε συνθήκες απώλειας στήριξης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη δυναμική δομή του πεδίου ροής όταν η φουσαλίδα σχηματίζεται, αναπτύσσεται και εκρήγνυται καθώς η γωνία προσβολής αυξάνεται και μειώνεται. Επιπλέον θέματα για μελέτη αποτέλεσαν ο σχηματισμός και η έκχυση των δινών που αναπτύσσονται κατά τη δυναμική απώλεια στήριξης.

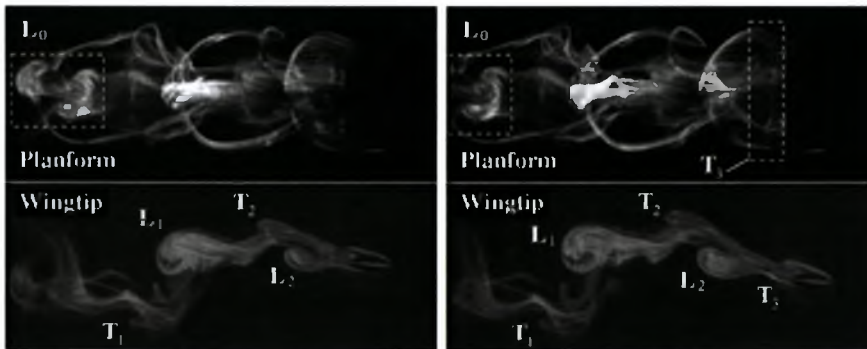
Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η επίδραση της μεταβολής του αριθμού Reynolds δεν είναι σημαντική. Η επανακόλληση του οριακού στρώματος κατά την κίνηση του πτερυγίου προς τα κάτω πραγματοποιείται από την ακμή προσβολής μέχρι και την ακμή φυγής ενώ κατά τη διάρκεια της κίνησης προς τα πάνω η αποκόλληση συμβαίνει σε γωνία 10° και μέχρι τη μέγιστη γωνία πρόσπτωσης σημειώνονται πολύ μεγάλες τιμές της άνωσης.

Το 2002 ο Ellenrieder et. al. [11] πραγματοποίησαν οπτικοποίηση της ροής με τη βοήθεια βαφής σε πτερύγιο που υπόκειται σε συνδυασμό δύο ταλαντώσεων, βύθισης και στροφική. Με μια σειρά εικόνων δόθηκε η τρισδιάστατη δομή της ροής.

Η διακύμανση του θ_0 , του St και του ψ είχαν ορατές επιδράσεις στη δομή του απορεύματος όπου θ_0 , είναι το εύρος της στροφικής και ψ είναι η γωνία φάσης μεταξύ των δύο κινήσεων.

Στην εικόνα 2.1 εμφανίζεται η ανάπτυξη της ροής για $\theta_0=5^\circ$, $\psi=90^\circ$ και $St=0.35$. Με L σημειώνονται οι δίνες που εκχύνονται από την ακμή προβολής και με T εκείνες που εκχύνονται από την ακμή φυγής.





Εικόνα 2.1 Η ανάπτυξη της ροής για $\theta_0=5^\circ$, $\psi=90^\circ$, $St=0.35$

Το 2002 οι Lee & Gerontakos [12] μελέτησαν τα χαρακτηριστικά του ασταθούς οριακού στρώματος και της απώλειας στήριξης με τη μέθοδο της οπτικοποίησης της ροής σε πτερύγιο το οποίο υπόκειται σε ταλάντωση. Επίσης με ολοκλήρωση προέκυψαν τα αεροδυναμικά φορτία και οι ροπές. Η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στις θέσεις μετάβασης του οριακού στρώματος από τη στρωτή στην τυρβώδη περιοχή καθώς και στις θέσεις αποκόλλησης αλλά και στις θέσεις επανακόλλησης και στρωματοποίησης σε σχέση με εκείνες σε στατικό πτερύγιο. Η έρευνα έγινε για διάφορες συχνότητες και εύρη ταλάντωσης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά της απώλειας στήριξης.

Από τα συμπεράσματα προκύπτει ότι η δίνη στην ακμή προσβολής και οι δευτερεύουσες δίνες πάντα εκτείνονται προς τα πίσω σε 45% της U_∞ και 30% της U_∞ αντίστοιχα και δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της ανηγμένης συχνότητας. Οι συνθήκες μετά την απώλεια στήριξης χαρακτηρίζονται από τη επανακόλληση της ροής και τη μεταβολή του οριακού στρώματος σε στρωτή κατάσταση για το υπόλοιπο του κύκλου ταλάντωσης. Η άνωση της απώλειας στήριξης σημειώθηκε όταν η δίνη στην ακμή προσβολής έφτασε το 90% της χορδής. Επιπλέον η δυναμική απώλεια στήριξης της ακμής προσβολής προήλθε από πτώση της τύρβης σε μικρή απόσταση κατάντη της ακμής προσβολής.

Σε συνθήκες ταλάντωσης μικρής απώλειας στήριξης η αναστροφή της ροής εκτάθηκε στο 40% της χορδής κατάντη της ακμής προσβολής και συνοδεύτηκε από πτώση της τύρβης περίπου στο 30% της χορδής καθώς το πτερύγιο εκτελούσε στροφική ταλάντωση κινούμενο προς τα πάνω προκαλώντας το σχηματισμό μιας δίνης σε διαταραχή ή περιοχή κυκλοφορίας με μήκος περίπου 30% της χορδής. Η δίνη δεν είχε το χρόνο ν' αναπτυχθεί και απομακρύνθηκε όταν το πτερύγιο άρχισε να κινείται προς τα κάτω.

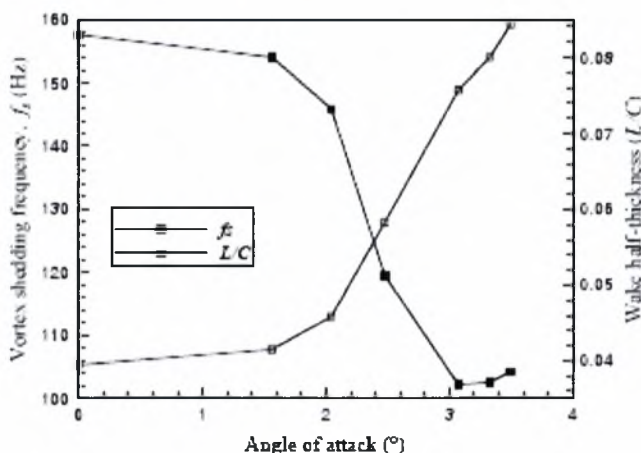
Το 2002 οι Fuchiwaki και Tanaka [13] μελέτησαν την ασταθή αποκόλληση της ροής γύρω από δύο διαφορετικά πτερύγια που πραγματοποιούν στροφική ταλάντωση με οπτικοποίηση της ροής με χρωστική ουσία και με τη μέθοδο Schlieren.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η δυναμική συμπεριφορά των γραμμών ροής εξαρτάται από τη γεωμετρία του πτερυγίου και η αστάθεια οδήγησε στο σχηματισμό διακριτής δίνης. Το μέγεθος της δίνης αυτής που εκχύθηκε από την ακμή προσβολής ήταν περίπου $\frac{1}{4}$ της χορδής και δεν έδειχνε να επηρεάζεται από τη γεωμετρία του πτερυγίου.

Οι Jung&Park το 2003 [14] πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων σε πτερυγίο που υπόκειται σε αρμονική στροφική ταλάντωση σε τέσσερις διαφορετικές τιμές της ανηγμένης συχνότητας και με αριθμό $Re=27000$. Τα πειράματα περιλάμβαναν μετρήσεις ταχυτήτων στο απόρρευμα με θερμοανεμόμετρο (hot-wire) και οπτικοποίηση της ροής. Κύριος σκοπός ήταν η σύνδεση της ροής του οριακού στρώματος με τη διακύμανση της συχνότητας έκχυσης και η εξακρίβωση του τρόπου με τον οποίο η συχνότητα έκχυσης αλλάζει με την ταλάντωση του πτερυγίου σε χαμηλές ανηγμένες συχνότητες.

Η ταλαντωτική φύση της ροής του οριακού στρώματος σε ταλαντούμενο πτερυγίο μελετήθηκε αφού οι δίνες στο απόρρευμα επηρεάζονται από το οριακό στρώμα και αντίθετα.

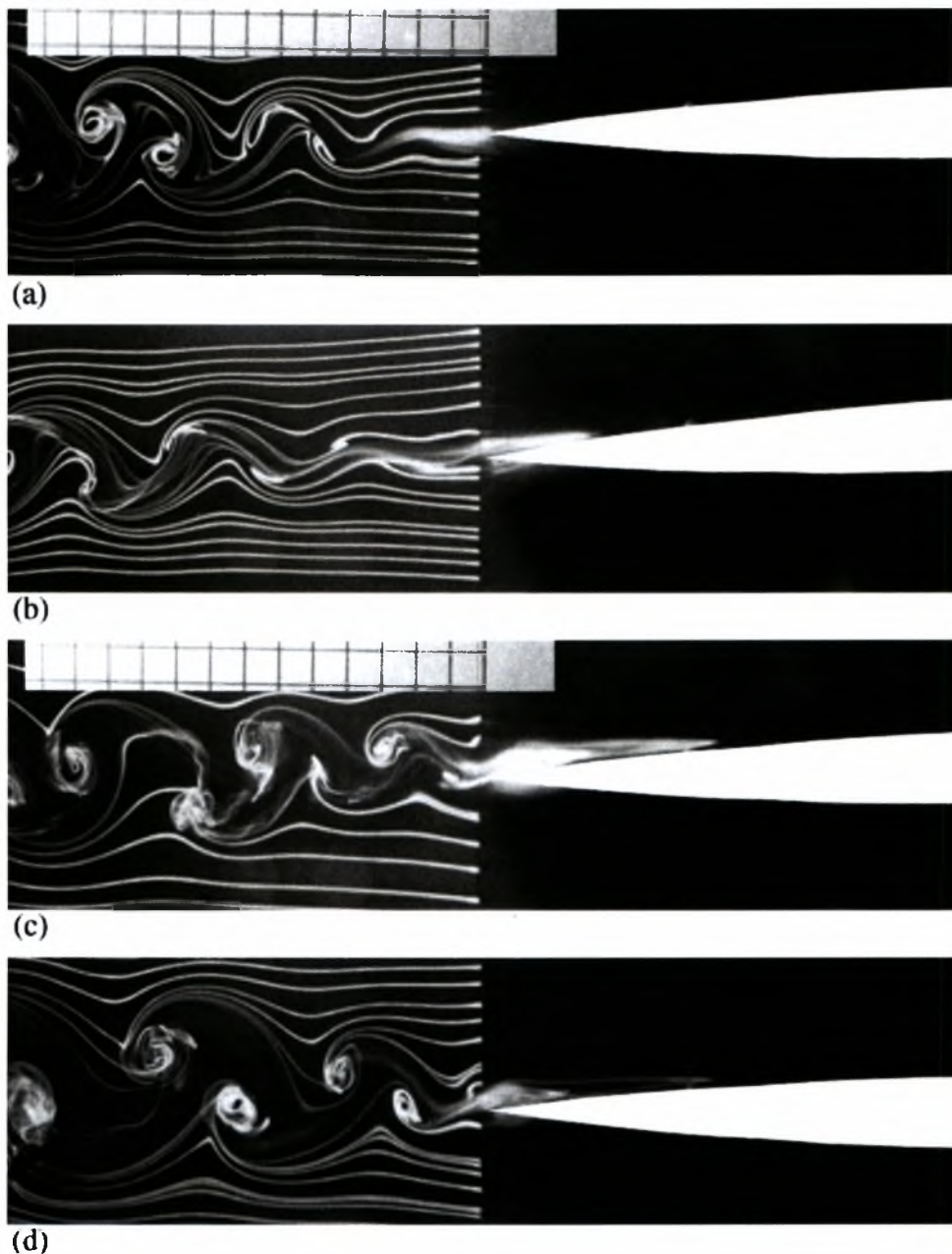
Σαν προκαταρκτική δουλειά και για λόγους σύγκρισης ελήφθησαν μετρήσεις στο απόρρευμα σταθερού πτερυγίου σε διάφορες γωνίες προσβολής και σε σταθερό αριθμό Reynolds. Σε σταθερό πτερυγίο η θέση έναρξης της αποκόλλησης για συγκεκριμένο αριθμό Reynolds κινείται ανάντη ενώ το πάχος του οριακού στρώματος στην ακμή φυγής αυξάνει και η συχνότητα έκχυσης μειώνεται καθώς αυξάνει η γωνία προσβολής.



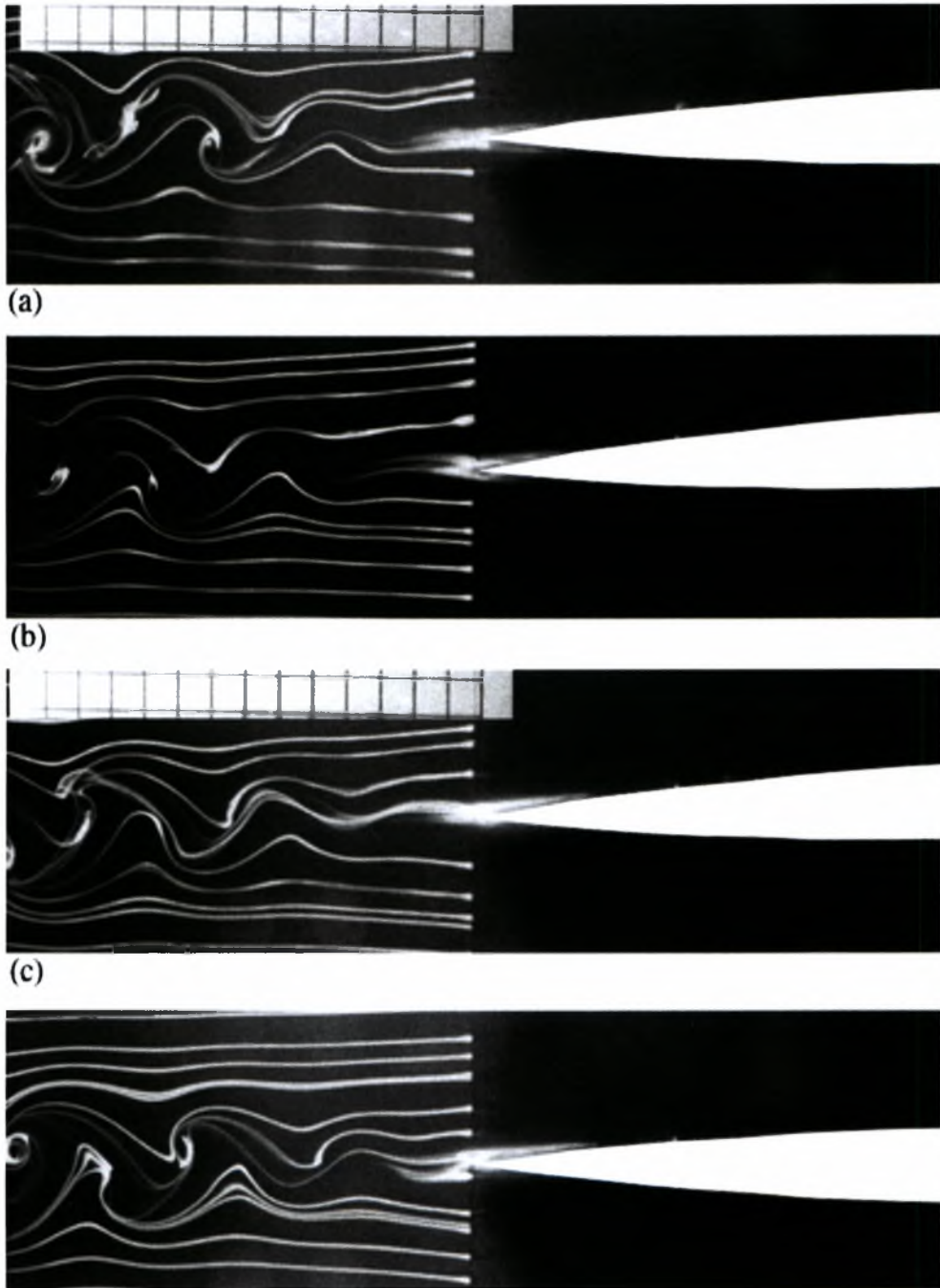
Γράφημα 2.3 Η μεταβολή της συχνότητας έκχυσης των δινών σε σταθερό πτερυγίο με τη γωνία προσβολής

Η έκχυση δινών στο απόρρευμα είναι στενά συνδεδεμένη με τη συμπεριφορά του οριακού στρώματος στην επιφάνεια του πτερυγίου. Επειδή η μεταβολή του πάχους του οριακού στρώματος μπορεί να προκύψει από το πάχος του απορρεύματος εξετάστηκε επίσης η μεταβολή του μισού πάχους του απορρεύματος σε σχέση με τη γωνία προσβολής. Προέκυψε ότι η συχνότητα έκχυσης των δινών μειώνεται καθώς η γωνία προσβολής αυξάνεται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή μεγάλης μείωσης της συχνότητας συμπίπτει με την περιοχή ραγδαίας αύξησης του πάχους του απορρεύματος.

Σε ταλαντούμενο πτερυγίο το πρότυπο των δινών του απορρεύματος αποτελεί παράδειγμα αναστροφών δινών Karman όπως φαίνεται στις εικόνες 2 και 3 όπου απεικονίζεται χρονολογικά η ροή γύρω από το πτερυγίο.



Εικόνα 2.2: Το απόρευμα του πτερυγίου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης ($k=0.2$): (a) $\alpha=1.5^\circ$, $\omega t=30^\circ$, (b) $\alpha=3^\circ$, $\omega t=90^\circ$, (c) $\alpha=1.5^\circ$, $\omega t=150^\circ$, (d) $\alpha=0^\circ$, $\omega t=180^\circ$ $Re=27000$. Η διεύθυνση της ροής είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά



Εικόνα 2.3: Το απόρρευμα του περυγίου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης ($k=0.4$): (a) $\alpha=1.5^\circ$, $\omega t=30^\circ$, (b) $\alpha=3^\circ$, $\omega t=90^\circ$, (c) $\alpha=2.1^\circ$, $\omega t=135^\circ$, (d) $\alpha=0^\circ$, $\omega t=180^\circ$ $Re=27000$. Η διεύθυνση της ροής είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά

Παρατηρήθηκε ότι η ροή στο απόρευμα δεν είναι τυρβώδης και ότι το πάχος του απορεύματος μεταβάλλεται περισσότερο με τη φασική γωνία από ότι με τη μεταβολή της γωνίας προσβολής. Επίσης φαίνεται ότι ο βαθμός αλλαγής της μορφής του απορεύματος και της ροής του οριακού στρώματος με τη στιγμιαία γωνία προσβολής γίνεται μικρότερος όσο το k αυξάνει κάτι που παρατηρήθηκε και στη παρούσα εργασία.

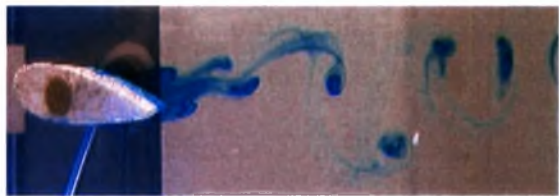
Το 2004 ο Lau et. al. [15] πραγματοποίησαν οπτικοποίηση ροής σε περύγιο η οποία υπόκειται σε συνδυασμό ταλαντώσεων, βύθισης και στροφικής, σε υδροσήραγγα με σκοπό να μελετηθεί η διακύμανση του απορεύματος σε σχέση με τον αριθμό Strouhal.

Ένα περύγιο που υπόκειται στην συνδυασμένη κίνηση που προαναφέρθηκε έχει αποδειχθεί ότι παράγει ώση πολύ αποδοτικά (πάνω από 80% υπό ορισμένες συνθήκες) και αυτό συμβαίνει σε αριθμό Strouhal περίπου 0.25 όπου το απόρευμα προκύπτει μια αντίστροφη μορφή των δινών von-Karman.

Από τα πειράματα προέκυψαν διαφορετικές μορφές απορεύματος για μια σειρά αριθμών Strouhal οποία μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις περιοχές , μια περιοχή οπισθέλκουσας, μια περιοχή μετάβασης ή ισορροπίας και μια περιοχή ώσης με την περιοχή μετάβασης να εμφανίζεται στην περιοχή $0.2 < St < 0.3$ (Εικόνα 2.4).



α. Κανονική μορφή δινών von-Karman



β. Δίνες von-Karman



γ. Ζεύγος δινών σε σειρά



δ. Ζεύγος δινών



ε. Ανάστροφη μορφή δινών von-Karman

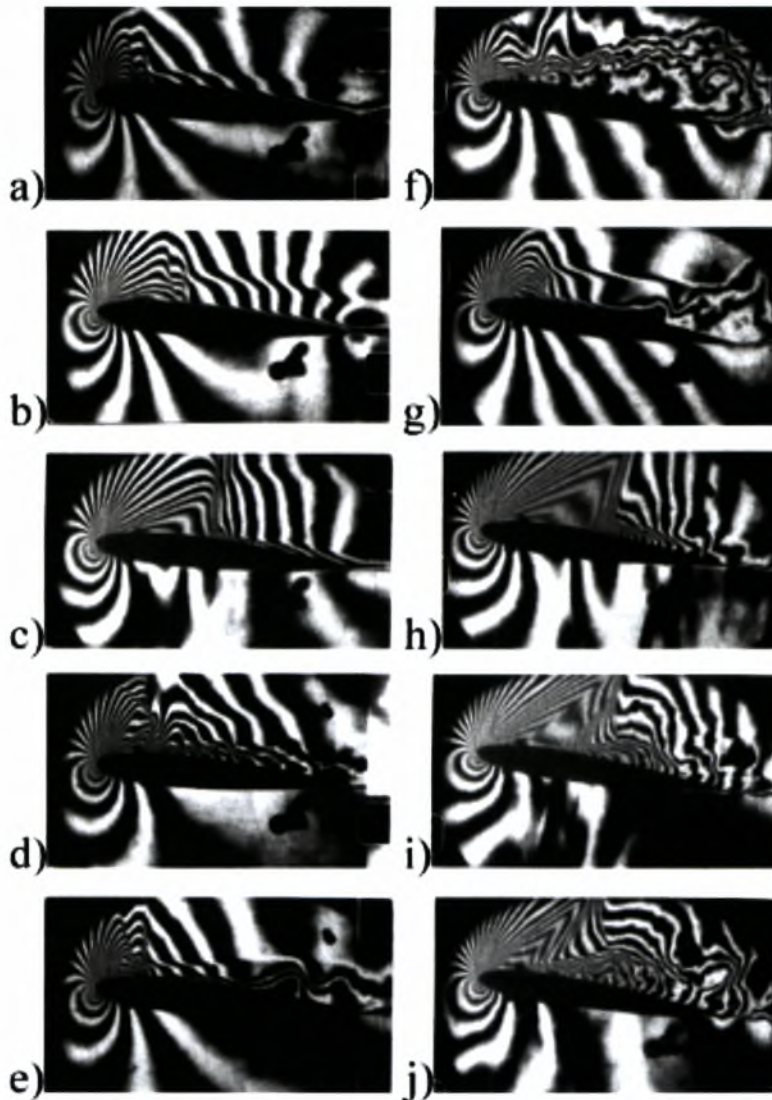
Εικόνα 2.4: Δομή δινών στο απόρευμα περυγίου που εκτελεί συνδυασμένη ταλάντωση

Το 2004 ο Lua et. al. [16] μελέτησαν την επίδραση της διακύμανσης της ανηγμένης συχνότητας στη δομή του απορεύματος πίσω από πτερύγιο που υπόκειται σε βύθιση. Σκοπός της έρευνας ήταν ο προσδιορισμός των συνθηκών κάτω από τις οποίες μια αντίστροφη μορφή δινών von-Karman παράγεται.

Παρατηρήθηκαν τρεις δομές απορεύματος από τις οποίες η πρώτη είναι μια απλή μορφή δινών Karman. Η δεύτερη δομή είναι μια αντίστροφη μορφή δινών Karman η οποία προκάλεσε την κίνηση της ροής μεταξύ των δινών σε κατεύθυνση κατάντη έτσι ώστε να σχηματίζει jet δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ώση και η τρίτη ήταν μια δομή διπλού απορεύματος όπου οι δίνες του ίδιου πρόσημου εκχύνονταν σε κάθε μισό κύκλο ταλάντωσης.

Μεταβάλλοντας τη ανηγμένη συχνότητα της ταλάντωσης βρέθηκε ότι απαιτούνται μόνο μικρές τιμές της για την καθυστέρηση της έναρξης των φαινομένων του οριακού στρώματος και σημαντικές μεταβολές στις μέγιστες τιμές των C_L, C_D, C_m .

Μια ακόμη σειρά πειραμάτων αφορά τη μελέτη της ασταθούς ροής γύρω από το πτερύγιο σε ροή που υπόκειται σε ταλάντωση και την ασταθή φόρτιση του. Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η προσκολλημένη και η διαχωρισμένη ροή σε δύο συχνότητες ταλάντωσης.



Εικόνα 2.5: Ροή γύρω από πτερύγιο το οποίο εκτελεί ταλάντωση βύθισης (a-e) Προσκολλημένη ροή ($\alpha=4^\circ$), (f-j) Διαχωρισμένη ροή ($\alpha=8.5^\circ$)

Από τα πειράματα προκύπτει διαφοροποίηση της φόρτισης για μικρές και μεγάλες γωνίες προσβολής όπου το εύρος παραμένει σταθερό για μικρές γωνίες και αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας της ταλάντωσης της ροής για μεγάλες γωνίες προσβολής.

Το 2006 οι Fuchiwaki και Tanaka [17] μελέτησαν τη δυναμική συμπεριφορά των δινών που εκχύνονται από την ακμή προσβολής πτερυγίου που υπόκειται σε στροφική (pitch) ταλάντωση και σε πτερύγιο που υπόκειται σε ταλάντωση βύθισης καθώς και τον αριθμό τους και τη κλίμακά τους.

Από την οπτικοποίηση της ροής που πραγματοποιήθηκε παρατηρήθηκε η έκχυση μικρών διακριτών δινών από την ακμή προσβολής και από τα δύο πτερύγια σε ροή με μικρό αριθμό Reynolds. Διακριτές δίνες παρουσιάστηκαν όταν ο αδιάστατος ρυθμός και των δύο ταλαντώσεων έγινε μεγάλος.

Επίσης ο αριθμός των δινών από την ακμή προσβολής σε ένα κύκλο στροφικής ταλάντωσης εξαρτάται από τον αδιάστατο ρυθμό της ταλάντωσης ενώ είναι ανεξάρτητος από την αεροτομή, τη μέση γωνία προσβολής και το εύρος της ταλάντωσης.

Σε μικρό ρυθμό στροφικής (pitch) ταλάντωσης ένας αριθμός διακριτών δινών εκχύνονται από την ακμή προσβολής μικρής κλίμακας. Αντίθετα όταν ο αδιάστατος ρυθμός μεγαλώνει ο αριθμός των δινών γίνεται μικρότερος αλλά είναι της κλίμακας του $\frac{1}{4}$ της χορδής ανεξάρτητα από την αεροτομή.

2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα τελευταία χρόνια πολλοί αναλυτές έχει επεκτείνει την γκάμα των υπολογιστικών μοντέλων που βασίζονται στις απλές θεωρίες ορμής και στοιχείου πτερυγίου/ ορμής Boundary Element Method (BEM), διαμέσου «μηχανικών μοντέλων» βασισμένα στο στοιχείο πτερυγίου και στις μεθόδους εισροής ή δινών στο απόρευμα, στις μεθόδους υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD) που επιλύουν αριθμητικά τις εξισώσεις Euler ή Navier-Stokes.

Μια από τις προκλήσεις για τους αναλυτές είναι η χρησιμοποίηση συμπληρωματικών πειραματικών αποτελεσμάτων και τεχνικών μοντελοποίησης με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των αεροδυναμικών προβλημάτων και την ανάπτυξη μοντέλων που να εφαρμόζονται σε περισσότερες περιπτώσεις.

Το 1999 οι Hamdani & Sun [18] μελέτησαν τις δομές της ροής και υπολόγισαν τα αεροδυναμικά φορτία σε ένα πτερύγιο NACA 0012 το οποίο εκτελούσε ασταθείς κινήσεις σε πολύ μικρό αριθμό Reynolds.

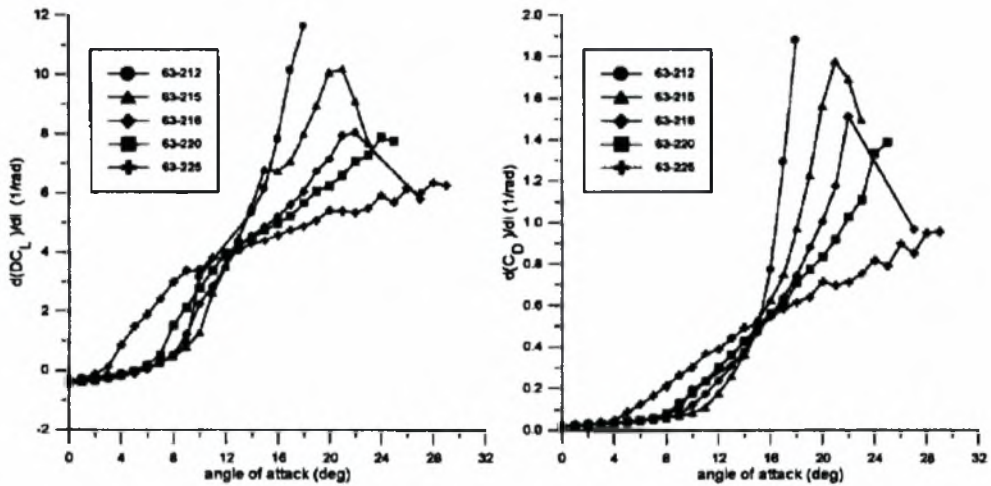
Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όταν το πτερύγιο επιταχύνεται ή επιβραδύνεται από τη μια ταχύτητα στην άλλη μεγάλο αεροδυναμικό φορτίο αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια και για μια χρονική περίοδο μετά την επιβολή της κίνησης. Μεγάλο αεροδυναμικό φορτίο επίσης παρατηρήθηκε κατά την επιβολή γρήγορης στροφικής ταλάντωσης σε σταθερή ταχύτητα ροής.

Κατά τη διάρκεια των ασταθών κινήσεων νέες δίνες αναπτύσσονται στην πάνω και κάτω επιφάνεια του πτερυγίου και οι οποίες είναι η αιτία για τα μεγάλα αεροδυναμικά φορτία που μετρήθηκαν. Οι μεγάλης κλίμακας δομές και η κίνηση των νέων δινών είναι όμοιες με εκείνες που αναπτύσσονται σε ροές με μεγάλο αριθμό Reynolds.

Το 1999 οι Akbari & Price [19] προσομοίωσαν αριθμητικά την ασυμπίεστη ροή γύρω από ελλειπτικά πτερύγια που υπόκεινται σε στροφική ταλάντωση σε μεγάλες γωνίες προσβολής όπου παρουσιάζεται η αποκόλληση της ροής και σε αριθμό Reynolds 3000. Μια μέθοδος vortex χρησιμοποιείται για την επίλυση των δισδιάστατων εξισώσεων Navier-Stokes.

Το 1999 ο Chaviaropoulos [20] μελέτησε υπολογιστικά την αεροελαστική σταθερότητα πτερυγίων NACA 63₂-2XX που εκτελούν συνδυασμένη ταλάντωση παράλληλα και (flap/lead-lag). Το αεροδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το διαφορικό μοντέλο δυναμικής απώλειας στήριξης που αναπτύχθηκε στην ONERA. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για αριθμό Reynolds $3 \cdot 10^6$.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το έλλειμμα της άνωσης και οι παράγωγοι της οπισθέλκουσας γίνονται μεγαλύτερες όταν μειώνεται το πάχος του πτερυγίου (γράφημα 2.4).



Γράφημα 2.4 Το έλλειμμα της άνωσης και οι κλίσεις της οπισθέλκουσας των NACA-63₂-2XX σε διαφορετικό πάχος.

Τα ΔC_{Li} και C_{Di} είναι όμοια παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή κοντά στην περιοχή μετά την απώλεια στήριξης η οποία μετατοπίζεται για μεγαλύτερες γωνίες στήριξης καθώς το πάχος αυξάνει.

Το 2000 οι Korotkov & Shumskii [21] ανέπτυξαν μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της ασταθούς αποκολλημένης ροής γύρω από πτερύγιο που εκτελεί στροφική ταλάντωση (pitch). Ένα από τα βασικά κομμάτια της μελέτης αποτέλεσε και η δυναμική απώλεια στήριξης στο πτερύγιο.

Η μεγάλη αύξηση στην άνωση που καταγράφηκε συνδέθηκε με την ανάπτυξη της δίνης που αφορά στη δυναμική απώλεια στήριξης. Η επανακόλληση της δίνης οδηγεί σε μείωση της άνωσης.

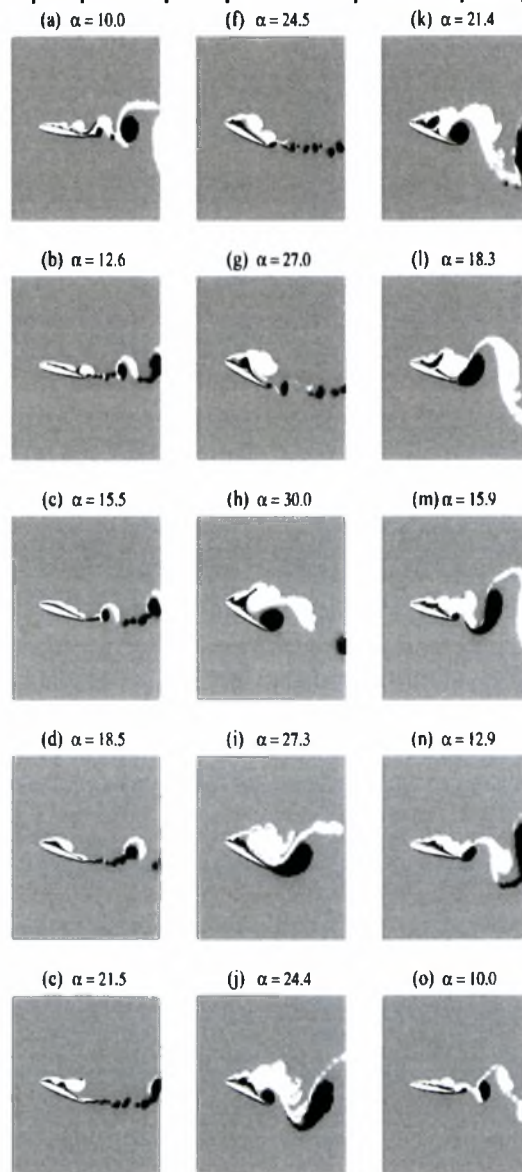
Το 2001 οι Akbari & Price [22] μελέτησαν την επίδραση ορισμένων παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της δυναμικής απώλειας στήριξης σε πτερύγιο NACA 0012 το οποίο εκτελεί στροφική ταλάντωση (pitch).

Παρατηρήθηκε ότι η αποκόλληση ξεκίνησε από την ακμή προσβολής που συνοδεύεται από το σχηματισμό και τη μεταφορά δίνης στην επιφάνεια του πτερυγίου. Επίσης σχηματίστηκαν δίνες στην ακμή φυγής και αποσπάρθηκαν από το πτερύγιο. Κατά τη διάρκεια της κίνησης προς τα κάτω του πτερυγίου μία ή περισσότερες δευτερεύουσες δίνες σχηματίστηκαν στην επάνω επιφάνεια ακολουθώντας την αρχική δίνη.

Η ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης βρέθηκε ότι έχει μεγάλη επίδραση στο πεδίο ροής και στους συντελεστές των δυνάμεων. Η αποκόλληση της ροής πραγματοποιείται καθυστερημένα σε μεγάλες γωνίες με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας. Η μεγαλύτερη τιμή της κάθετης δύναμης σημειώθηκε στη μεγαλύτερη γωνία προσβολής με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η μέγιστη κάθετη δύναμη αυξάνεται με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας.

Ο αριθμός Reynolds είχε πολλή μικρή επίδραση στα χαρακτηριστικά της δυναμικής απώλειας στήριξης.

Η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης προκάλεσε αποκόλληση της ροής πιο νωρίς κατά τη διάρκεια του κύκλου ταλάντωσης ακόμη και σε μικρότερες γωνίες προσβολής. Το πεδίο ροής σε αυτή την περίπτωση εμφανίστηκε περισσότερο περιδινητικό και το απόρρευμα ευρύτερο και περισσότερο ορμητικό. (Εικόνα 2.6)



Εικόνα 2.6: Το πεδίο ροής σε διάφορες γωνίες προσβολής σε $k=0.25$, $\Delta\alpha=10^\circ$, $\bar{\alpha} = 20^\circ$

Η μετακίνηση του άξονα ταλάντωσης προς τα πίσω από το ένα τέταρτο της χορδής στο μέσο έχει ελάχιστη επίδραση στο πεδίο ροής όσον αφορά την αποκόλληση της ροής και το χρόνο σχηματισμού και απελευθέρωσης των δινών από την ακμή προσβολής και την ακμή φυγής.

Το 2002 οι Lewin & Haj-Hariri [23] ανέπτυξαν ένα υπολογιστικό μοντέλο για δισδιάστατη ροή γύρω από πτερύγιο που υπόκειται σε ημιτονοειδή ταλάντωση βύθισης σε διάφορες συχνότητες και εύρος ταλάντωσης. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της ροής και οι συντελεστές ισχύος στο πτερύγιο όταν αυτό ταλαντώνεται στις παραπάνω συνθήκες. Οι λύσεις που προέκυψαν ήταν περιοδικές και απεριοδικές. Προέκυψε ότι για συγκεκριμένο αριθμό Strouhal η μέγιστη απόδοση σε ενδιάμεση συχνότητα ταλάντωσης γεγονός που είναι αντίθετο με τα ιδανικά μοντέλα ροής στα οποία η απόδοση αυξάνει καθώς η συχνότητα μειώνεται. Επίσης, σύμφωνα με τον Wang (2000), η αποκόλληση των δινών στην ακμή προσβολής σε χαμηλές συχνότητες ταλάντωσης οδηγεί σε μείωση της ώσης και της απόδοσης.

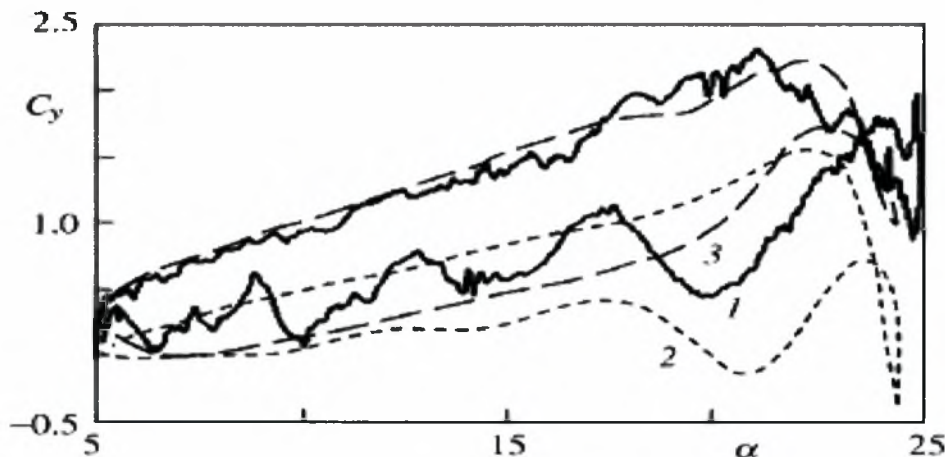
Το 2003 οι Barakos & Drikakis [24] μελέτησαν υπολογιστικά τυρβώδεις ροές γύρω από ταλαντούμενα και κεκλιμένα πτερύγια σε συνθήκες δυναμικής απώλειας στήριξης. Η μελέτη βασίστηκε σε μέθοδο Godunov υψηλής ανάλυσης. Οι υπολογισμοί δίνουν ομοιότητες μεταξύ στρωτών και υψηλού αριθμού Reynolds ροών δυναμικής απώλειας στήριξης στις περιπτώσεις τόσο των κεκλιμένων όσο και των ταλαντούμενων πτερυγίων.

Το 2004 οι Hansen et. al. [25] μελέτησαν ένα ασταθές αεροδυναμικό μοντέλο με σκοπό την περιγραφή των ασταθών αεροδυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται σε πτερύγιο το οποίο υπόκειται σε τυχαία κίνηση σε ροή.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τις επιδράσεις από τις δίνες που εκχύνονται από την ακμή φυγής (Theodorsen theory) και του ασταθούς σημείου αποκόλλησης. Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές και γραμμικοποιούνται για μια σταθερή κατάσταση για εφαρμογή σε αναλύσεις ευστάθειας.

Το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο δίνει τα ίδια αποτελέσματα με τις λύσεις της μη ιξώδους ροής για την περιοχή της προσκολλημένης ροής και παρουσιάζει τα αναμενόμενα δυναμικά χαρακτηριστικά όπως η υπέρβαση της άνωσης στην περιοχή της απώλειας στήριξης και το γραμμικοποιημένο μοντέλο δίνει όμοια αποτελέσματα με το πλήρες μοντέλο για μικρό εύρος ταλάντωσης.

Το 2006 οι Guvernuyuk & Dynnikov [26] ανέπτυξαν την Lagrangian vortex method για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για τη μοντελοποίηση της ασταθούς ροής πτερυγίου NACA 0012 που ταλαντώνεται. Στη μέγιστη γωνία προσβολής καταγράφεται μείωση στην άνωση τη στιγμή της αρνητικής κυκλοφορίας των δινών και μετά αύξηση κατά τη θετική κυκλοφορία των δινών (γράφημα 2.5).



Γράφημα 2.5 Συντελεστής άνωσης (1) και (2) υπολογισμοί και πείραμα για $k=0.16$ και $Re=4.4 \cdot 10^4$ και (3) πείραμα για $k=0.153$ και $Re=4.8 \cdot 10^4$

2.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΣΤΑΘΩΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Ένα από τα θέματα με το οποίο έχουν ασχοληθεί πολλοί επιστήμονες είναι ο υπολογισμός των ασταθών φορτίων που αναπτύσσονται στα πτερύγια καθώς υπόκεινται στις διάφορες μορφές ταλαντώσεων σε διάφορες γωνίες προσβολής και σε σταθερή ή ασταθής ροή. Πολλοί επίσης ασχολήθηκαν με τη μέτρηση των φορτίων που αναπτύσσονται κατά την κίνηση πτερυγίων μέσα σε νερό.

Οι περισσότεροι επιστήμονες που μελέτησαν ασταθή αεροδυναμικά φορτία επικέντρωσαν την έρευνά τους στους παράγοντες που συντελούν στην μεταβολή των φορτίων.

Μερικοί από τους παράγοντες που έχουν μελετηθεί είναι η μεταβολές της γωνίας προσβολής, ο αριθμός Strouhal, η ταχύτητα της ροής.

Ο υπολογισμός των φορτίων πραγματοποιήθηκε με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η ολοκλήρωση των ασταθών πιέσεων που εμφανίζονται στα πτερύγια. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες για τους οποίους θα γίνει εκτεταμένη αναφορά στη συνέχεια.

Το 1927 ο Reid [27] πραγματοποίησε πειράματα σε πτερύγιο που υπόκειται σε ταλάντωση στροφική με σκοπό την μέτρηση της άνωσης.

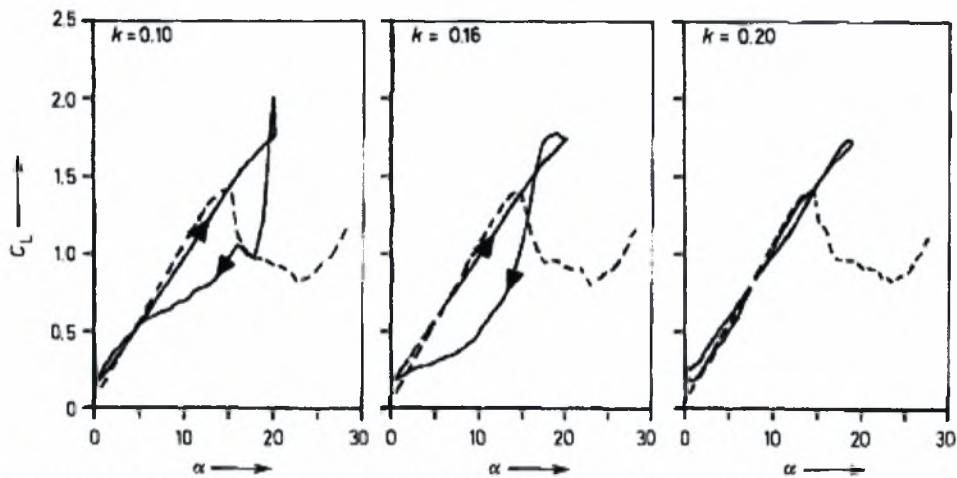
Από τα πειράματα προέκυψε ότι η άνωση σε πτερύγιο που υπόκειται σε ταλάντωση στροφική η άνωση είναι πιο μικρή σε σχέση με αυτή σε σταθερό πτερύγιο. Ωστόσο το αντίθετο είναι εφικτό όταν η άνωση είναι μικρή ή όταν η γωνία προσβολής μειώνεται με ταχύ ρυθμό.

Η μελέτη της δυναμικής απώλειας στήριξης που προκαλείται από αρμονικές ταλαντώσεις είναι πολύ σημαντική καθώς μπορεί να επηρεάσει την αεροδυναμική απόδοση του ρότορα δημιουργώντας μεγάλες ασταθείς τάσεις στα πτερύγια και στις ρίζες τους και μπορεί επίσης να επηρεάσει την σταθερότητα της ανεμογεννήτριας. Μελετείται ευρέως με σκοπό την βελτίωση στο σχεδιασμό πτερυγίων ελικοπτέρων, στην αεροναυπηγική και πρόσφατα στις ανεμογεννήτριες.

Με σκοπό τη μελέτη των χαρακτηριστικών της δυναμικής απώλειας στήριξης πτερυγίου που υπόκειται σε στροφική ταλάντωση το 1990 ο Leishman [28] πραγματοποίησε πειράματα.

Τα δεδομένα λαμβάνονταν από 30 πολύ μικρούς μετατροπείς πίεσης Kulite και Entran οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε ένα αφαιρούμενο τμήμα στο μέσο του πτερυγίου. Ο κάθε μετατροπέας ήταν τοποθετημένος σε μια εγκοπή ακριβώς κάτω από μια οπή διαμέτρου 1mm στην επιφάνεια του πτερυγίου όπου παρέμεινε στεγανά κλεισμένος.

Παρατηρήθηκε ότι η αποκόλληση εμφανίζεται στην ακμή προσβολής του πτερυγίου και χαμηλές συχνότητες ταλάντωσης απαιτούνται για να αποτρέψουν την αποκόλληση από την ακμή φυγής (γράφημα 2.6).



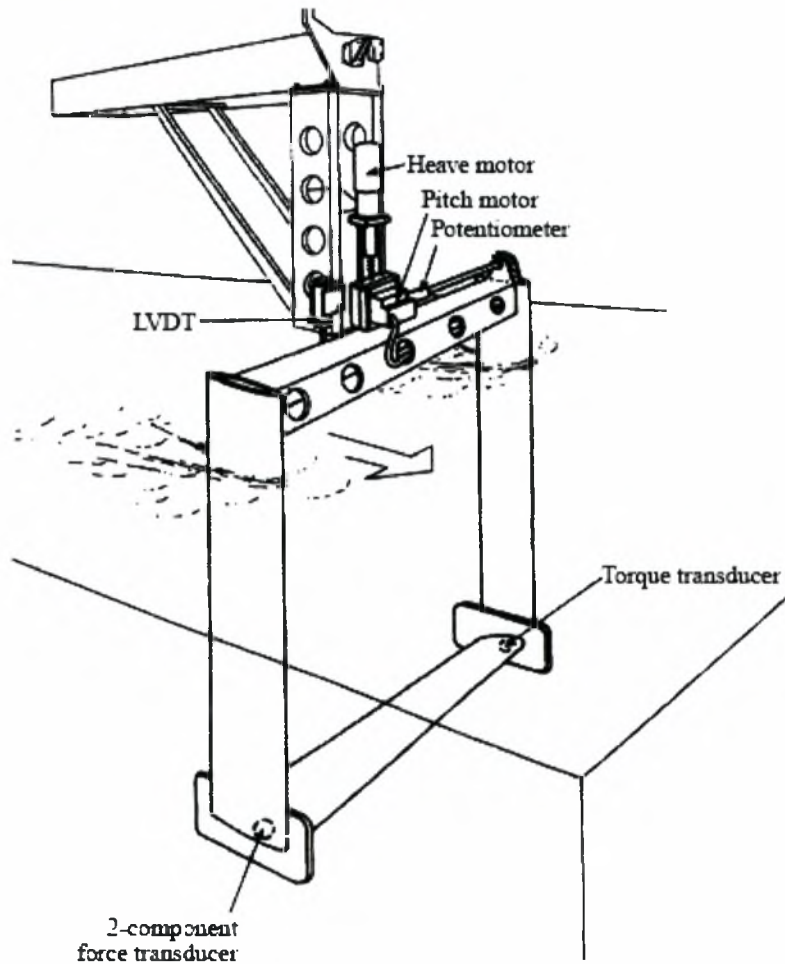
Γράφημα 2.6 Η επίδραση της μεταβολής της ανηγμένης συχνότητας στην ασταθή άνωση

Επίσης παρατηρήθηκαν μεγάλες αυξήσεις στους συντελεστές της άνωσης και της στροφικής ροπής οι οποίες προκλήθηκαν από την έκχυση δινών από τη ακμή προσβολής κατά τη διάρκεια της δυναμικής απώλειας στήριξης.

Μετρήσεις στο οριακό στρώμα με τη βοήθεια hot film έδειξαν ότι η αντιστροφή στην επιφανειακή ροή μπορεί να παρουσιαστεί στο πτερύγιο ακριβώς πριν από την έναρξη σημαντικής αποκόλλησης της ροής είτε από την ακμή προσβολής είτε από την ακμή φυγής.

Το 1997 οι Anderson et. al. [29] μελέτησαν πτερύγιο που κινείται εκτελώντας συνδυασμένη ταλάντωση βύθισης και στροφική με σκοπό την ταξινόμηση των κύριων χαρακτηριστικών στη ροή γύρω και στο απόρευμα του πτερυγίου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φορτίων και ισχύος και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές προβλέψεις και βρέθηκε ότι υπάρχει καλή συμφωνία για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων.

Η μέτρηση των φορτίων πραγματοποιήθηκε με πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα KISTLER 9117 ο οποίος τοποθετήθηκε στο ένα άκρο του πτερυγίου ενώ η ροπή υπολογίστηκε μετρώντας τη δύναμη που μεταδίδεται στην αλυσίδα μέσω ενός δεύτερου μετατροπέα KISTLER 9065 (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση δυνάμεων

Προέκυψε ο συνδυασμός των παραμέτρων στον οποίο έχουμε την καλύτερη απόδοση σε ώση όπου για συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων η απόδοση έφτασε το 87%.

Το 2001 ο Read et. al. [30] μελέτησαν πτερόγιο που κινείται εκτελώντας την συνδυασμένη ταλάντωση βύθισης και στροφική ώστε να ορισθεί η απόδοσή του στη παραγωγή μεγάλων δυνάμεων πρόωσης και αποτελεσματικών ελιγμών. Τοποθετήθηκαν κελιά φορτίου KISTLER για τη μέτρηση της ροπής και των δυνάμεων.

Ο συνδυασμός των παραμέτρων που εξετάστηκε είναι το εύρος της ταλάντωσης, ο αριθμός Strouhal, η γωνία προσβολής και η γωνία φάσης μεταξύ των δύο κινήσεων ταλάντωσης και προκύπτει από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων ότι για συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων ικανοποιητική παραγωγή ώσης ενώ για μεγάλους αριθμούς Strouhal παρατηρήθηκε μεγάλη πτώση του συντελεστή ώσης εξαιτίας του γεγονότος ότι η γωνία προσβολής παύει να είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου. Οι μέσες τιμές

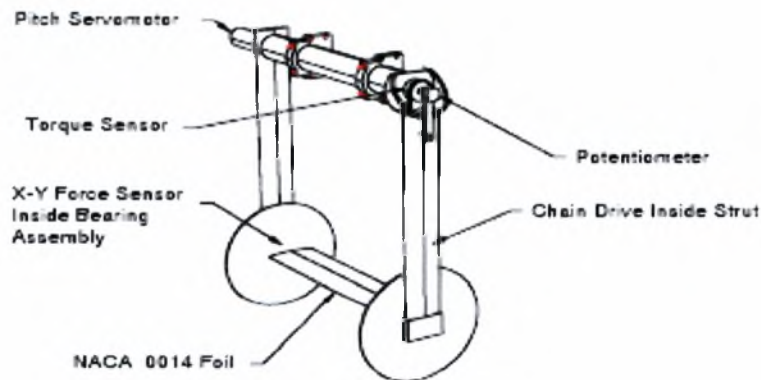
του συντελεστή άνωσης που καταγράφηκαν είναι 5.5, στιγμιαία προέκυψαν τιμές πάνω από 16 ενώ μεγαλύτερες τιμές δείχνουν πιθανές σε μεγαλύτερους αριθμούς St.

Το 2003 οι Gaunaa & Sorensen [31] μελέτησαν τα ασταθή αεροδυναμικά φορτία σε πτερύγιο NACA 0015 το οποίο υπόκειται σε αρμονική μεταφορική κίνηση (translatory).

Παρατηρήθηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα στα φορτία όπως είχε αναφερθεί νωρίτερα από τους Bak et al. Το πρώτο επίπεδο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη άνωση. Σε αυτή την περίπτωση η ροή είναι πλήρως τυρβώδης και δεν υπάρχει φυσαλίδα αποκόλλησης. Στο δεύτερο επίπεδο σημειώνεται μικρότερη άνωση αλλά σε αυτό το στάδιο η ροή είναι στρωτή στην ακμή προσβολής και υπάρχει και η φυσαλίδα αποκόλλησης κοντά στην αιχμή αναρρόφησης του πτερυγίου. Η χαμηλότερη άνωση οφείλεται στην παρουσία της φυσαλίδας. Στο τρίτο επίπεδο η άνωση είναι σημαντικά μικρότερη και αυτό οφείλεται στην μεγάλη αποκόλληση που ξεκινάει από την ακμή προσβολής. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σαν πολλαπλή η διπλή απώλεια στήριξης.

Το 2003 ο Hover et. al. [32] μελέτησε πειραματικά την επίδραση που έχει η μορφή της συνάρτησής της γωνίας προσβολής στην πρόωση σε πτερύγιο NACA 0014 που υπόκειται σε συνδυασμό ταλάντωσης βύθισης και στροφική. Εξετάστηκαν τέσσερις συναρτήσεις της γωνίας προσβολής οι οποίες είναι: α) λόγω της αρμονικής κίνησης και στις δύο κινήσεις β) τετραγωνική γ) τριγωνική δ) συνημιτονοειδής συνάρτηση.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την πειραματική διάταξη που περιγράφεται παρακάτω με το πτερύγιο να είναι τοποθετημένο με ρουλεμάν μεταξύ των δοκών (σχήμα 2.3).

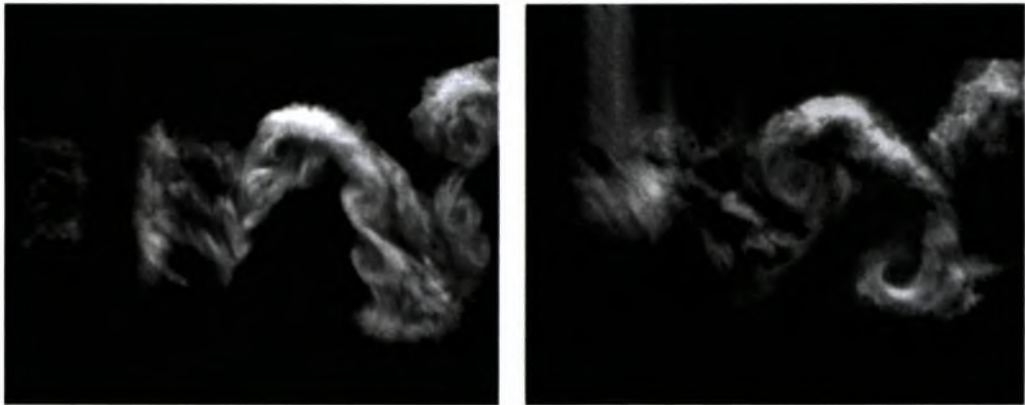


Σχήμα 2.3 Πειραματική διάταξη

Για την μέτρηση της άνωσης και της ώσης χρησιμοποιήθηκε τριαξονικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας. Το σύνολο των σημάτων που καταγράφονται είναι: οι X και Y συνιστώσες της δύναμης, η στροφική ροπή, η γωνία σε κάθε θέση και η θέση βύθισης.

Από τα πειράματα προέκυψε ότι ο έλεγχος της συνάρτησης της γωνίας προσβολής μπορεί να αυξήσει την ώση και την απόδοση σε σύγκριση με την ημιτονοειδή ταλάντωση. Η οπτικοποίηση της ροής επιβεβαιώνει ότι η

συνημιτονοειδής μορφή της γωνίας προσβολής παράγει δύο δίνες ώσης ακόμη και σε μεγάλους αριθμούς St σε αντίθεση με την αρμονική που παράγει έξι δίνες σε μεγάλους αριθμούς St οι οποίες καταστρέφουν το απόρρευμα και προκαλούν διακοπή στην αντίστροφη μορφή των δινών von-Karman.



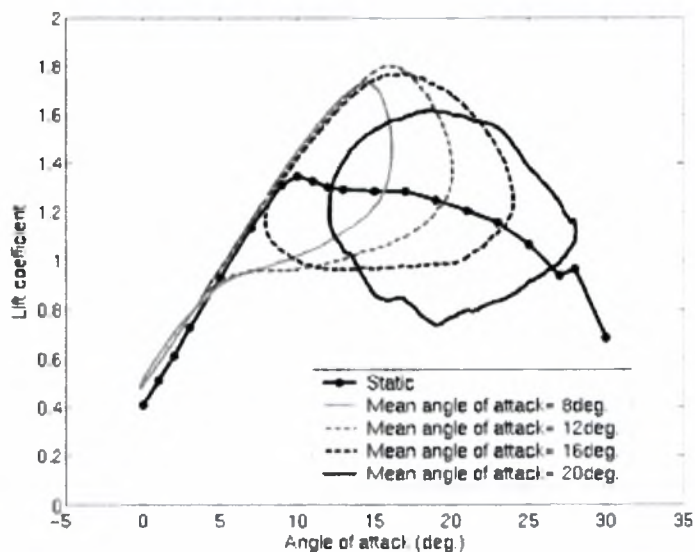
Εικόνα 2.7: Οπτικοποίηση της ροής για απλή αρμονική κίνηση (αριστερά) και σημιτοειδής μορφή της γωνίας προσβολής (δεξιά), $St=0.55$, $\alpha_{max}=20^\circ$

Το 2004 οι Amandolese & Szechenyi [33] μελέτησαν την επίδραση της τύρβης σε πτερύγιο NACA 63₄ 421 το οποίο υπόκειται σε στροφική ταλάντωση (pitch) σε ροή αέρα με αριθμό Reynolds 10^6 .

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε τρία επίπεδα τύρβης, σε διάφορες γωνίες προσβολής και εύρη ταλάντωσης και σε διάφορες τιμές της ανηγμένης συχνότητας. Τα αεροδυναμικά φορτία ελήφθησαν με μετρήσεις των ασταθών επιφανειακών πιέσεων.

Η ασταθής άνωση, η ροπή και οι κατανομές τις πίεσης αναλύθηκαν και οι επιδράσεις των χαρακτηριστικών της κίνησης και της τύρβης μελετήθηκαν.

Από τη μελέτη της επίδρασης της γωνίας προσβολής προέκυψε ότι δεν υπάρχουν δίνες, που συνδέονται με τη δυναμική απώλεια στήριξης, κοντά στην ακμή προσβολής οι οποίες οδηγούν σε αύξηση της μέγιστης άνωσης όπως σημειώθηκε σε πτερύγιο NACA 0012 σε δυναμική απώλεια στήριξης.



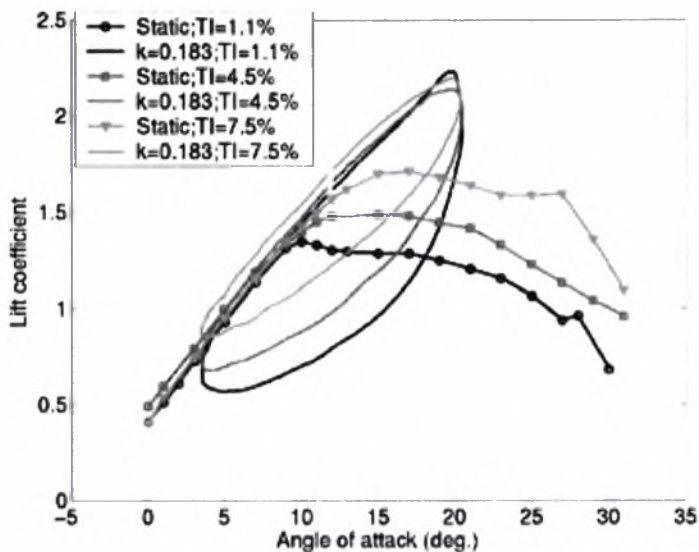
Γράφημα 2.7 Επίδραση της μέσης γωνίας προσβολής στο συντελεστή άνωσης:
 $\bar{\alpha} = 8^\circ$, $k=0.0785$, $Tl=1.1\%$

Μια ακόμη παράμετρος που μελετήθηκε είναι η μεγάλη αύξηση της άνωσης (overshoot) η οποία ορίζεται ως εξής: $overshoot = \frac{\max(C_L^{dynamic}) - \max(C_L^{static})}{\max(C_L^{static})}$

Μελετώντας την αύξηση της άνωσης σε συνάρτηση με την ανηγμένη συχνότητα παρατηρήθηκε ότι αυξάνει με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας φτάνοντας το 70% του μέγιστου συντελεστή άνωσης για σταθερό πτερύγιο για τη μέγιστη συχνότητα στα παρόντα πειράματα. Σε γωνία προσβολής 8° η αύξηση είναι μικρότερο για τη μέγιστη ανηγμένη συχνότητα γεγονός που οφείλεται στο ότι το πτερύγιο δεν είναι ακόμη σε απώλεια στήριξης στη μέγιστη γωνία προσβολής των 16° .

Σε συνάρτηση με το εύρος ταλάντωσης η αύξηση κανονικοποιημένο με το εύρος σε μοίρες είναι σχεδόν σταθερό για τις τέσσερις τιμές του εύρους.

Από τη μελέτη της επίδρασης του επιπέδου της τύρβης στην αύξηση προέκυψε ότι αυξάνει γραμμικά με την ανηγμένη συχνότητα για επίπεδα τύρβης Tl 1.1%, 4.5% και 7.5%. Προέκυψε ότι αυξάνει σχεδόν γραμμικά σε συνάρτηση με την ανηγμένη συχνότητα αλλά η κλίση της ευθείας μειώνεται όσο η τύρβη αυξάνει πράγμα που σημαίνει ότι όσο περισσότερη είναι η τύρβη τόσο μικρότερο είναι και η αύξηση. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μέγιστος συντελεστής άνωσης στον οποίο εμφανίζεται η δυναμική απώλεια στήριξης για τη μέγιστη ανηγμένη συχνότητα διαφοροποιείται ελάχιστα με τη αύξηση της τύρβης όπως φαίνεται στο γράφημα που ακολουθεί.



Γράφημα 2.8 Επίδραση της τύρβης στο συντελεστή άνωσης, $\tilde{\alpha} = 8^\circ$, $\bar{\alpha} = 12^\circ$, $k=0.183$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω πολλές έρευνες επικεντρώνονται στη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την αεροδυναμική απόσβεση. Ένας από αυτούς τους παράγοντες είναι και οι διάφοροι τρόποι απώλειας στήριξης (stall modes) ο οποίος μελετήθηκε πειραματικά σε συνδυασμό με μια σειρά γωνιών προσβολής, διευθύνσεως κίνησης και εύρους ταλάντωσης σε πτερύγιο που υπόκειται σε ενός βαθμού ταλάντωση (Gaunaa-Sorensen) προέκυψε ότι κάποιοι συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων επηρεάζουν σημαντικά την αεροδυναμική απόσβεση.

Το 2004 οι Hoo et. al. [34] μελέτησαν μεταξύ άλλων και την επίδραση της ανηγμένης συχνότητας στη μεταβολή της άνωσης σε πτερύγιο το οποίο υπόκειται σε στροφική ταλάντωση (pitch). Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι η μεταβολή της ανηγμένης συχνότητας έχει μεγάλη επίδραση στην άνωση που οφείλεται στη δυναμική απώλεια στήριξης ενώ η αύξηση της μέγιστης γωνίας προσβολής εμφανίζεται να ενισχύει την επίδραση της δυναμικής απώλειας στήριξης.

Το 2005 ο Benaissa et. al. [35] πραγματοποίησαν πειράματα σε πτερύγιο το οποίο αποτελείται από δύο κομμάτια από το οποία το ένα είναι εύκαμπτο. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του δυναμικού ροϊκού πεδίου και της κίνησης του πτερυγίου σε ελεύθερη ροή και πίσω από πλέγμα που παράγει τύρβη αποτέλεσαν την κύρια μελέτη. Περισσότερο βάρος δόθηκε στις μεγάλες δομές που παράγονται στη ροή πίσω από το πτερύγιο λόγω της κίνησής του.

Με τη βοήθεια θερμού σύρματος μετρήθηκε το στιγμιαίο πεδίο ταχύτητας και ταυτόχρονα καταγράφηκαν οι διακυμάνσεις των φορτίων σε μια περίοδο με και χωρίς την παρουσία του πλέγματος για την παραγωγή τύρβης.

Το πτερύγιο που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα αποτελείται από δύο κομμάτια στο κέντρο των οποίων έχει προσαρμοστεί σύστημα ισορροπίας για τη μέτρηση των ασταθών αεροδυναμικών φορτίων.

Αυτό επέτρεψε τη μέτρηση δύο ορθογώνιων δυνάμεων, μία κάθετη στη χορδή και μία παράλληλη σ' αυτή οι οποίες μόνο σε γωνία $\alpha=0^\circ$ γίνονταν ίσες με τη άνωση και την οπισθέλκουσα αντίστοιχα. Σε οποιαδήποτε άλλη γωνία η άνωση και η οπισθέλκουσα προέκυπταν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$L = F_N \cos a - F_p \sin a$$

$$D = F_p \cos a + F_N \sin a$$

Η μέτρηση των φορτίων έγινε ταυτόχρονα με τη μέτρηση δύο συνιστωσών της ταχύτητας σε τέσσερις γωνίες προσβολής 0° , 1° , 8° και 12° .

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η παρουσία του πλέγματος αλλάζει το απόρρευμα πίσω από το πτερύγιο. Αρχικά η u συνιστώσα της ταχύτητας παρουσιάζει μια καθαρή τυρβώδη συμπεριφορά με μια γραμμική περιοχή που εκτείνεται περισσότερο από μια δεκάδα. Σε αυτή την περίπτωση τα spectra τόσο πίσω από το εύκαμπτο κομμάτι όσο και πίσω από το σταθερό είναι όμοια πράγμα που σημαίνει ότι η τύρβη πίσω από το πλέγμα ελέγχει τη ροή στο απόρρευμα.

Στη μεγάλη γωνία προσβολής $\alpha=12^\circ$ δεν παρατηρείται η μείωση στη συχνότητα εκροής η οποία παρατηρήθηκε στη γωνία $\alpha=0^\circ$.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το πλέγμα δεν επηρεάζει την άνωση η οποία παραμένει η ίδια σε όλες τις γωνίες προσβολής. Παρατηρήθηκε επίσης μεγαλύτερη τυρβώδης δραστηριότητα πίσω από το εύκαμπτο μέρος με την παρουσία του πλέγματος να επιφέρει μεγάλες αλλαγές στο απόρρευμα. Επίσης η ταλάντωση του πτερυγίου επηρεάζει την συχνότητα έκχυσης σε μικρές γωνίες προσβολής. Όταν η γωνία προσβολής γίνεται μεγαλύτερη από τη γωνία απώλειας στήριξης η επίδραση της ταλάντωσης στην έκχυση δινών μειώνεται.

Το 2005 ο Shen et. al. [36] πραγματοποίησαν μέτρηση αεροδυναμικών φορτίων σε πτερύγιο που υπόκειται σε μεταφορική και περιστροφική κίνηση.

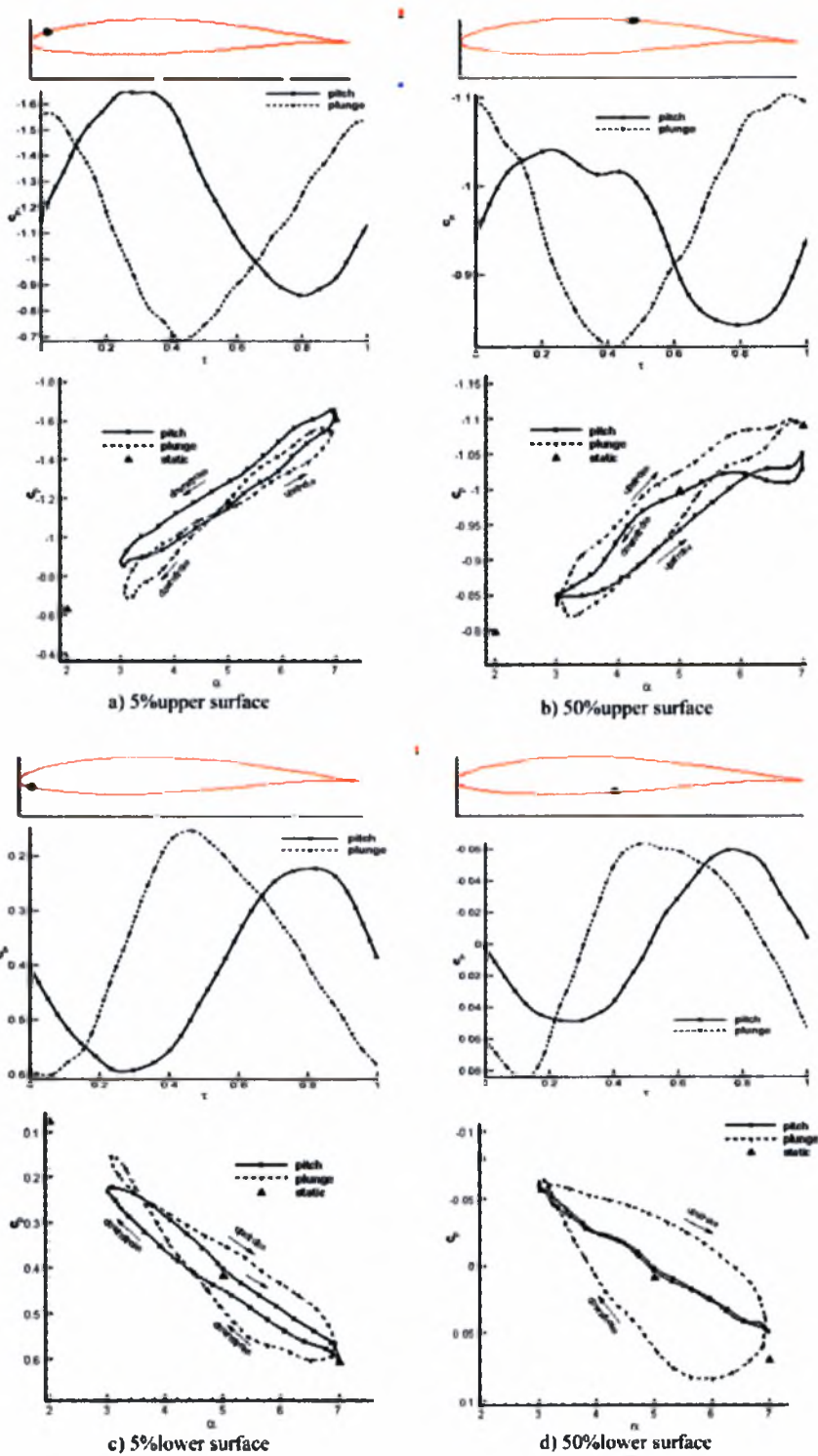
Ένας αισθητήρας φορτίου ο οποίος τοποθετήθηκε στη ρίζα του πτερυγίου μέτρησε την κάθετη δύναμη στην επιφάνεια του πτερυγίου και ένα κατά προσέγγιση αποτέλεσμα της άνωσης και της οπισθέλκουσας στο πτερύγιο πραγματοποιήθηκε με κατάλληλο μετασχηματισμό του συστήματος των συντεταγμένων. Ο αισθητήρας είναι σχεδόν ανεπηρέαστος από τη θέση του φορτίου. Για να προκύψουν τα αεροδυναμικά φορτία απομονώθηκαν τα αδρανειακά με την αντικατάσταση του πτερυγίου από μια μικρή ράβδο αλουμινίου στην οποία λόγω πολύ μικρής επιφάνειας τα αεροδυναμικά φορτία που αναπτύσσονται είναι πολύ μικρά.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι οι μέγιστες τιμές για τους συντελεστές C_L και C_D καταγράφονται στο μέσο της διαδρομής που κάνει το πτερύγιο.

Οι Soltani et. al. το 2007 [37] πραγματοποίησαν μετρήσεις πιέσεων από όπου προέκυψαν και τα αεροδυναμικά φορτία σε πτερύγιο που υπόκειται σε συνδυασμό δύο μορφών ταλάντωσης, στροφική (pitch) και βύθιση (plunge), σε τρεις διαφορετικούς αριθμούς Reynolds και σε διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης.

Η κατανομή της πίεσης και τα αεροδυναμικά φορτία προέκυψε ότι επηρεάζονται από το εύρος της κίνησης, τη συχνότητα της ταλάντωσης και τη μέση γωνία προσβολής. Επίσης από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της πίεσης για τις δύο

κινήσεις φάνηκε ότι η στροφική ταλάντωση έχει μεγαλύτερη επίδραση στην πίεση σε συνθήκες κοντά και μετά την απώλεια στήριξης.



Γράφημα 2.9 Επίδραση της ανηγμένης συχνότητας στην πίεση $\alpha_0 = 5^\circ$, $\alpha^- = 2^\circ$, $k = 0.03$

Όπως προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας η λιγότερο μελετημένη κίνηση είναι η ταλάντωση στην οποία υπόκειται ένα πτερόγιο παράλληλα στην σχετική ταχύτητα της ροής (edgewise/lead-lag) τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά το 2000 οι Thomsen et. al.[38] ανέπτυξαν μέθοδο πειραματικού υπολογισμού της ενεργούς απόσβεσης, προκειμένου να καθοριστούν οι παράμετροι που κάνουν αρνητική την αεροδυναμική απόσβεση, λαμβάνοντας υπόψη ότι η μετρούμενη ενεργή απόσβεση είναι το άθροισμα της δομικής και της αεροδυναμικής απόσβεσης.

Δεν έχει πραγματοποιηθεί επομένως μελέτη της φόρτισης των πτερυγίων και του πεδίου ροής κατά την ταλάντωση τύπου lead-lag.

Στην παρούσα μελέτη θα επιχειρηθεί μελέτη της συγκεκριμένης κίνησης με αποσύνδεσή της από τις άλλες μορφές ταλαντώσεων με σκοπό την κάλυψη των κενών που έχουν επισημανθεί στην διεθνή βιβλιογραφία εξετάζοντας και μεταβάλλοντας παραμέτρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την μελέτη των φορτίων, των ταχυτήτων στο απόρρευμα καθώς και για την οπτικοποίηση της ροής. Ακολουθεί περιγραφή της διάταξης ταλάντωσης του πτερυγίου, οπτικοποίησης της ροής και τέλος παρουσιάζονται οι μέθοδοι λήψης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα δεδομένα της αεροσήραγγας η περιγραφή της οποίας γίνεται παρακάτω αποφασίστηκε να σχεδιασθεί η πειραματική διάταξη (Σχήμα 1) ώστε να περιορισθεί κατά το δυνατόν η αεροδυναμική αλληλεπίδραση (aerodynamic interference), να επιτευχθεί υψηλός αριθμός Reynolds (της τάξεως του 100000), ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k = \pi f c / U_\infty$ μέχρι περίπου 0.5, ανηγμένο εύρος ταλάντωσης $h = s/c$ της τάξεως του 0.2 και γωνίες προσβολής α μέχρι την απώλεια στήριξης της πτέρυγας. Στην βιβλιογραφία δεν υπάρχουν μελέτες για πτέρυγα NACA 0015 και υψηλό ποσοστό τύρβης (στην παρούσα αεροσήραγγα είναι της τάξης του 0.3 %).

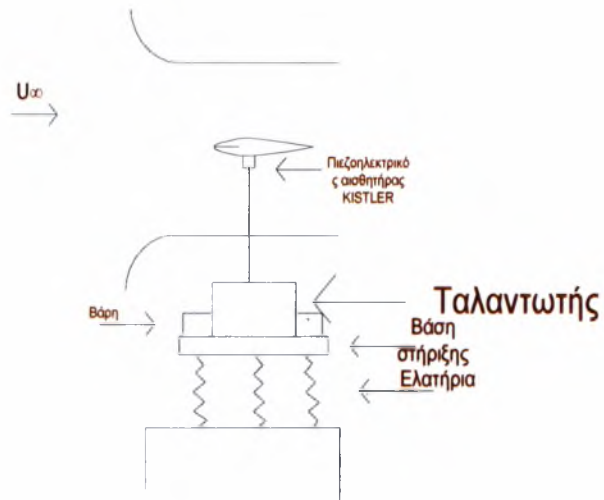
Έτσι επελέγη πτέρυγα NACA 0015 ορθογωνικής κατατομής με διάταμα 300m και χορδή 125mm χωρίς ακραίες πλάκες (end plates) η οποία είναι κατασκευασμένη από ξύλο και τοποθετείται παράλληλα στην ροή σε διάφορες γωνίες προσβολής (εικόνα 3.1).

Για τη μέτρηση των αεροδυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται στο πτερύγιο κατά την ταλάντωση χρησιμοποιήθηκε τριαξονικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας KISTLER μοντέλο 9017B ο οποίος προσαρμόστηκε στην πτέρυγα στο ένα τέταρτο της χορδής και συνδέεται με τον ενισχυτή φορτίου KISTLER 5011B που περιέχει ψηφιακό φίλτρο και βαθμονομητή σε Newton.

Για την στήριξη του αισθητήρα φορτίου και την αλλαγή γωνίας προσβολής κατασκευάστηκε προσαρμογέας ο οποίος βιδώνεται στο κάτω μέρος της πτέρυγας και εν συνεχεία συνδέεται με μακρά κυλινδρική – κωνική ράβδο στήριξης που διαπερνά το πάτωμα της αεροσήραγγας και βιδώνεται επάνω στον ταλαντωτή με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η ταλάντωση.

Πρόκειται για ηλεκτρομαγνητικό ταλαντωτή υψηλής ακρίβειας μοντέλο 113 ELECTRO-SEIS της εταιρίας APS Dynamics, Inc. ο οποίος παραχωρήθηκε από το εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του ΤΜΜΒ. Η μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης και του εύρους γίνεται ηλεκτρονικά με ειδικό ενισχυτή και γεννήτρια συχνοτήτων. Ο σχεδιασμός του πειράματος βασίστηκε στον συγκεκριμένο ταλαντωτή.

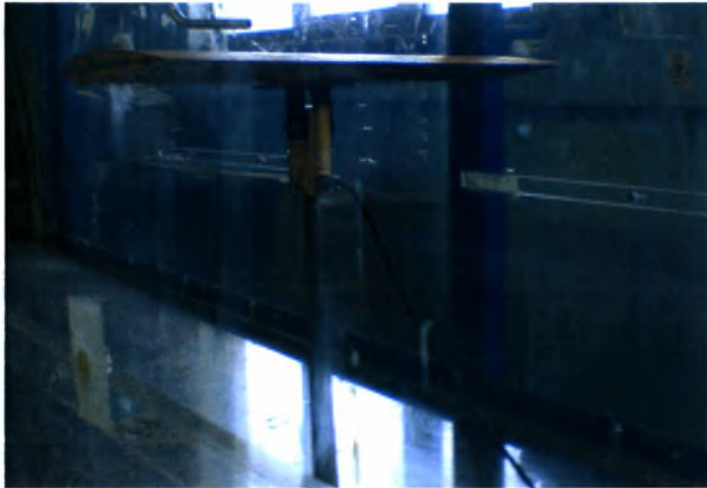
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ειδική βάση στήριξης όπου βιδώθηκε ο ταλαντωτής και η οποία είναι εφοδιασμένη με ελατήρια ιδιοσυχνότητας χαμηλότερης εκείνης της ελάχιστης συχνότητας διέγερσης, έμβολα απορρόφησης κραδασμών (αμορτισέρ) και τεμάχια σιδήρου βάρους άνω των 2000 N (με σκοπό την μείωση όσο το δυνατόν της ιδιοσυχνότητας ταλάντωσης της βάσης και αύξηση της αδράνειάς της) (Εικόνα 3.4).



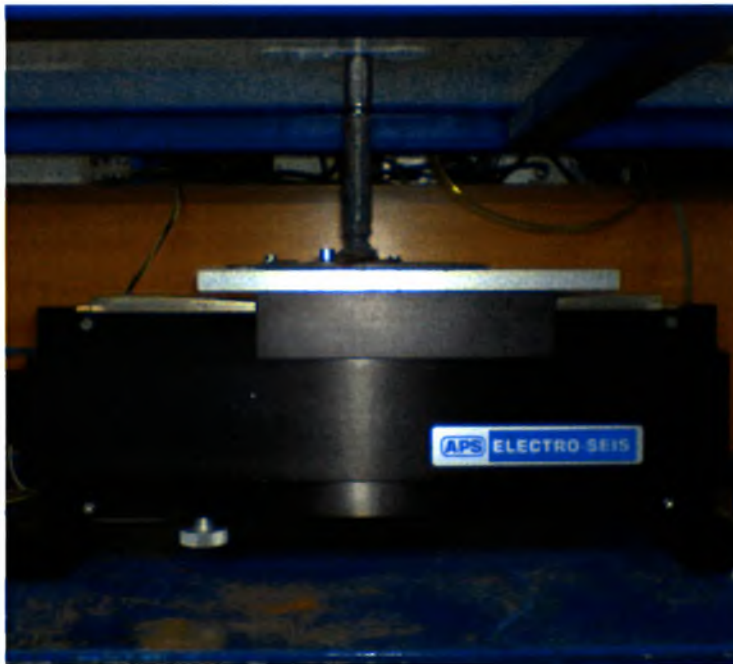
Σχήμα 1 Πειραματική διάταξη



Εικόνα 3.1 Μοντέλο πτέρυγας και προσαρμογέας αισθητήρα



Εικόνα 3.2 Ράβδος σύνδεσης



Εικόνα 3.3 Σύνδεση της ράβδου στήριξης με τον ηλεκτρομαγνητικός ταλαντωτή



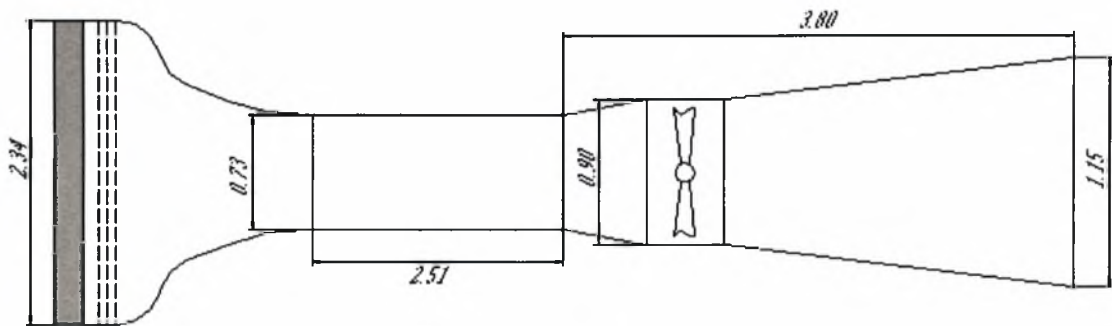
Εικόνα 3.4 Βάση στήριξης και απομόνωσης κραδασμών

3.1.1. Αεροσήραγμα

Η αεροσήραγμα του Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β, η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι ανοικτού κυκλώματος και λειτουργεί με αναρρόφηση. Αποτελείται από το συλλέκτη, το τμήμα δοκιμών, το τμήμα του ανεμιστήρα και το διαχύτη. Στην εικόνα 3.5 φαίνεται η αεροσήραγμα. Η μέγιστη επιτυγχανόμενη ταχύτητα είναι της τάξης των 20 m/s.



Εικόνα 3.5 Η αεροσήραγμα του εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών & Στροβιλομηχανών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας



Σχήμα 3.1 Κύριες διαστάσεις της αεροσήραγγας

3.1.2 Συλλέκτης - Εισαγωγή αέρα

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

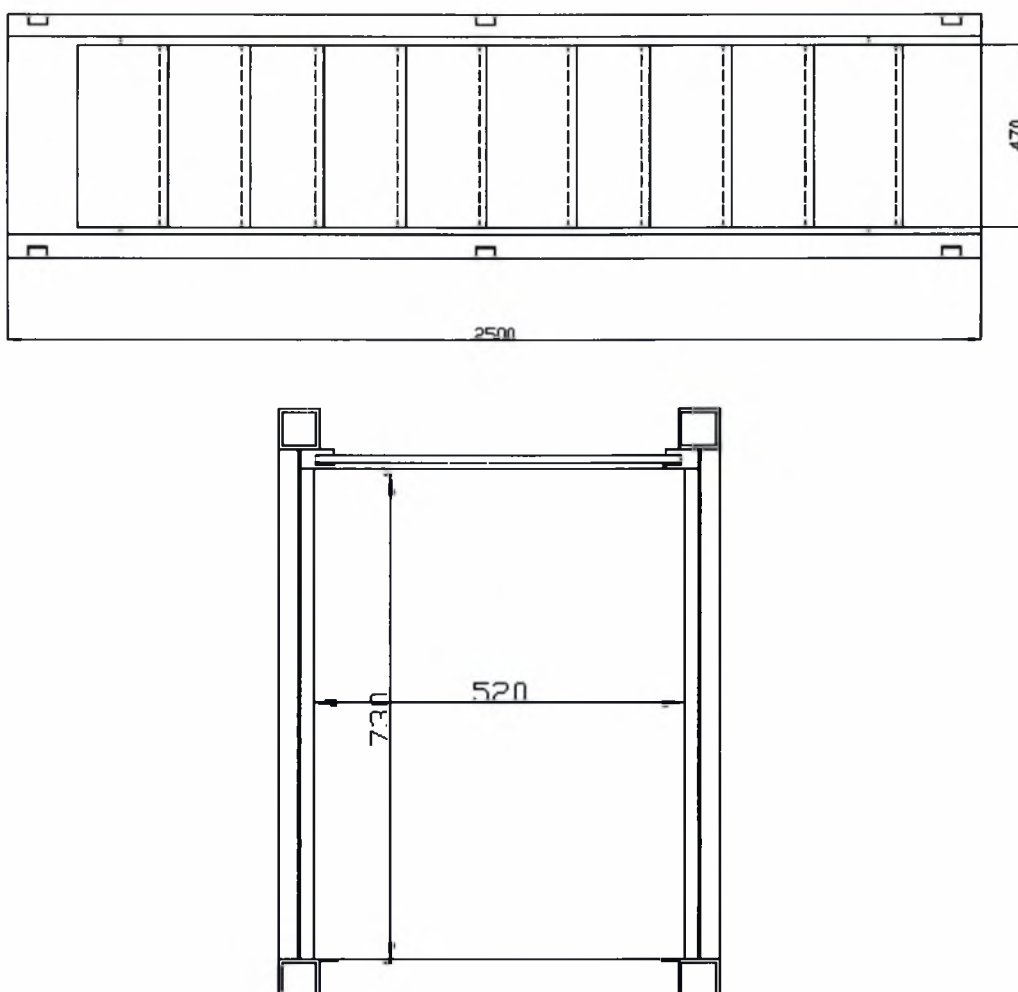


Εικόνα 3.6 Συλλέκτης

3.1.3. Τμήμα δοκιμών

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

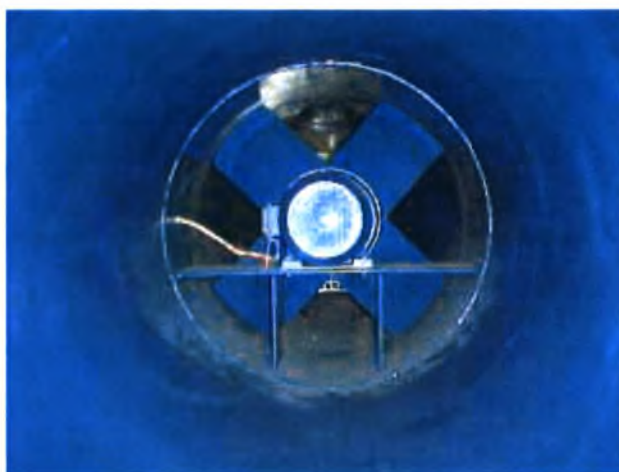
τρεις πλευρές του μεταλλικού φορέα είναι τοποθετημένα τα τοιχώματα από plexiglass πάχους 20mm. Αυτό επιτρέπει στον ερευνητή την οπτική παρατήρηση των πειραμάτων και την οπτικοποίηση της ροής όποτε το επιθυμεί. Στην επάνω πλευρά το τοίχωμα αποτελείται από πλάκες MDF κατάλληλα διαμορφωμένες διαστάσεων 520x220 mm οι οποίες μπορούν να ολισθαίνουν στις δύο ειδικά διαμορφωμένες ράγες που βρίσκονται σε κάθε μια από τις πάνω διαμήκεις λάμες, και να αποσπώνται αφήνοντας ελεύθερο όλο τον χώρο του πλαισίου για πρόσβαση στον χώρο μετρήσεων. Στα δύο άκρα του θαλάμου υπάρχουν φλάντζες για την σύνδεση του με το ακροφύσιο και τον διαχύτη αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται η κάτοψη (α) και η κάθετη τομή (β) του τμήματος δοκιμών.



Σχήμα 3.2 (α) Κάτοψη & (β) Κάθετη τομή του τμήματος δοκιμών

3.1.4 Φυσητήρας

Ανάμεσα στο τμήμα δοκιμών και το διαχύτη βρίσκεται ο φυσητήρας ο οποίος εδράζεται στον ηλεκτροκινητήρα και φέρει τέσσερα μεταλλικά πτερύγια στερεωμένα στον άξονα του ρότορα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι ασύγχρονος τριφασικός, ονομαστικής ισχύος 7.5 kW, τροφοδοτούμενος από τριφασικό ρεύμα 380 Volts μέσω του μετατροπέα της συχνότητας του ρεύματος (Inverter). Έτσι υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της παροχής και άρα της ταχύτητας της αεροσήραγγας μέσω μεταβολής του αριθμού στροφών του κινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι στερεωμένος στο εσωτερικό της αεροσήραγγας μέσω τριών μεταλλικών ορθογωνικών ελασμάτων σχήματος αεροτομής, που βρίσκονται πίσω από τον ανεμιστήρα. Στην εικόνα 3.7 φαίνεται ο ανεμιστήρας.



Εικόνα 3.7 Ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας

3.1.5 Διαχύτης

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

3.2 Μετρητικά όργανα και συσκευές

Στην αεροσήραγγα χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω μετρητικά όργανα και οι συσκευές:

- Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot-wire)
- Μανόμετρο και σωλήνας Pitot
- Ταλαντωτικός μηχανισμός
- Γεννήτρια συχνοτήτων
- Ενισχυτής ταλαντωτικού μηχανισμού
- Τριαξονικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας KISTLER

- Ενισχυτής πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα
- Παλμογράφος

3.2.1 Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot - wire anemometer C.T.A.)

Το AN-1005 αποτελεί ιδανική λύση για τις περισσότερες ρευστοδυναμικές και αεροδυναμικές μετρήσεις. Βασισμένο σε βελτιωμένη τεχνική θερμοανεμομετρία και ανεμομετρίας ψυχρού σύρματος το σύστημα μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις στη ροή, ταχύτητα αέρα και τύρβης και διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο είτε σώζοντας τα δεδομένα σε δίσκο είτε εμφανίζοντας τα και αναλύοντας τα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμόμετρο θερμού σύρματος παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Εύρος τιμών εξόδου των volt	+ -12V
Κέρδος ενισχυτή	1-20
Ακρίβεια κέρδους	0,5%
DC offset	0-10V
Εμπέδηση εξόδου	100Ohm
Εμπέδηση εισόδου	10K Ohm
Θόρυβος στο σήμα εισόδου	30nV/Σφάλμα! Τα αντικείμενα δεν μπορούν να δημιουργηθούν από την επεξεργασία κωδικών πεδίων.
Πεδίο συχνοτήτων	DC-100KHz

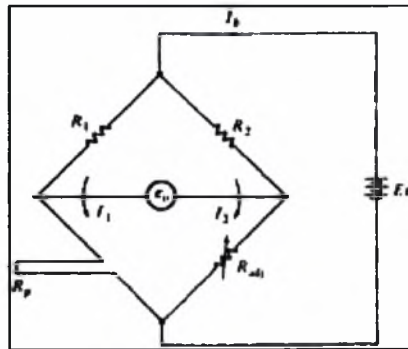
Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμόμετρο θερμού σύρματος

Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος παρέχουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για την βαθμονόμησή τους με τη μορφή γραφικών παραστάσεων, έτσι ώστε η ταχύτητα του αέρα να μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις μέσες τιμές τάσης ή ρεύματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν μεγάλο εύρος ταχυτήτων, από πολύ μικρές (π.χ. 0.03 m/s) έως υπερηχητικές. Μπορεί να είναι σχετικά ακριβότερα από τους σωλήνες Pitot αλλά έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία και μπορούν να μετρούν ροές που είναι ασταθείς. Χάρη την πολύ μεγάλη τους ευαισθησία μπορούν και ανιχνεύουν την συχνότητα των διακυμάνσεων της ροής.

3.2.2 Αρχή λειτουργίας του θερμοανεμόμετρου (hot-wire):

Το ανεμόμετρο αποτελείται από ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone (C.T.A.) στην οποία το hot-wire είναι η μια αντίσταση από τις τέσσερις (Σχήμα 3.3). Η αρχή λειτουργίας στην οποία στηρίζεται είναι το ότι αν γύρω από ένα θερμό σώμα ρέει

ένα αέριο, το θερμό σώμα θα ψυχθεί και επομένως ο ρυθμός ψύξης του σχετίζεται με την ταχύτητα του αερίου. Η συσκευή του ανεμομέτρου ρυθμίζει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στα άκρα της αντίστασης του σύρματος, έτσι ώστε να διατηρείται πάντα σταθερή η αντίσταση του θερμονήματος και η θερμοκρασία του. Για αυτό και ονομάζεται Ανεμόμετρο Σταθερής Θερμοκρασίας (Constant Temperature Anemometer).



Σχήμα 3.3 Γέφυρα Wheatstone σε κύκλωμα θερμικής ανεμομετρίας

Συνεπώς όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα ροής τόσο πιο έντονη αποβολή θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή, άρα τείνει η θερμοκρασία του σύρματος να ελαττωθεί λόγω της ψύξης. Επομένως θα προκληθεί αλλαγή της έντασης I , του ρεύματος, στα άκρα της αντίστασης του hot-wire, καθώς η γέφυρα Wheatstone τείνει να επαναφέρει το σύρμα στην θερμοκρασία λειτουργίας του (200 οC) (από τον τύπο: $P=I^2 \cdot R$ με $R=const.$). Έτσι υπάρχει μια συσχέτιση της έντασης του ρεύματος με την ταχύτητα του αέρα. Όταν η γέφυρα Wheatstone ηρεμεί, τότε το θερμό σύρμα έχει την αντίσταση που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή ως αντίσταση λειτουργίας (αντιστοιχεί συνήθως σε θερμοκρασία 180 - 200 οC). Από την μεταβολή της έντασης του ρεύματος παράγεται μια διαφορά δυναμικού η οποία διαβάζεται από τον Η/Υ και αντιστοιχείται στην ταχύτητα με ένα ειδικό λογισμικό στον Η/Υ της National Instruments, το οποίο στην δική μας περίπτωση υπολογίζει την μέση τιμή της ταχύτητας και της τύρβης από την λήψη των δεδομένων από το ανεμόμετρο, η οποία γινόταν με PC μέσω κάρτας Analog-Digital.

3.2.3 Σύστημα μετακίνησης θερμοανεμομέτρου (HOT-WIRE)

Το θερμοανεμόμετρο (hot-wire) έχει τη δυνατότητα μετακίνησης και στις τρεις κατευθύνσεις με ένα σύστημα βερνιέρων το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω σε τράπεζα που μπορεί να μετακινείται πάνω στις ράγες στην οροφή της αεροσήραγγας.

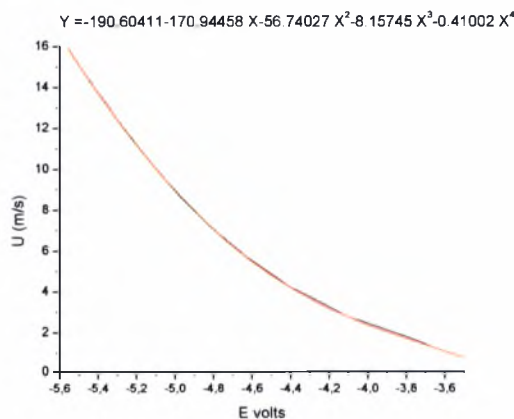
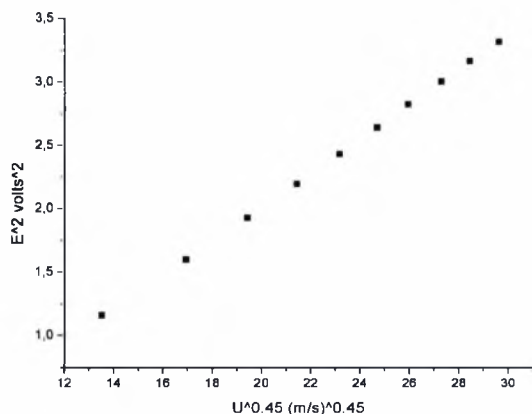
3.2.4 Μέθοδος μετρήσεων με θερμοανεμόμετρο (HOT-WIRE)

Πριν από τις μετρήσεις των ταχυτήτων στο απόρρευμα του περυγίου πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του ανεμόμετρου που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.4.1 Βαθμονόμηση θερμοανεμομέτρου (HOT-WIRE)

Η βαθμονόμηση του θερμοανεμομέτρου (hot wire) είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική. Τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση το hot wire και ένας σωλήνας Pitot-static. Οι καταγραφές των δύο οργάνων (ο σωλήνας Pitot-static χρησιμεύει σαν σημείο αναφοράς – reference) συσχετίζονται είτε με την μορφή ακέραιου πολυωνύμου 4^{ου} βαθμού με προσδιοριστές σταθερές A, B, C, D, E, είτε χρησιμοποιώντας την σχέση King : $E^2 = A + B U^{0.45}$ όπου E η ένδειξη του θερμοανεμομέτρου σε volts και U η ένδειξη του σωλήνα Pitot-static σε m/s και A, B προσδιοριστέοι συντελεστές. Η βαθμονόμηση γινόταν αρκετά συχνά και ιδίως μετά από σημαντικές αλλαγές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

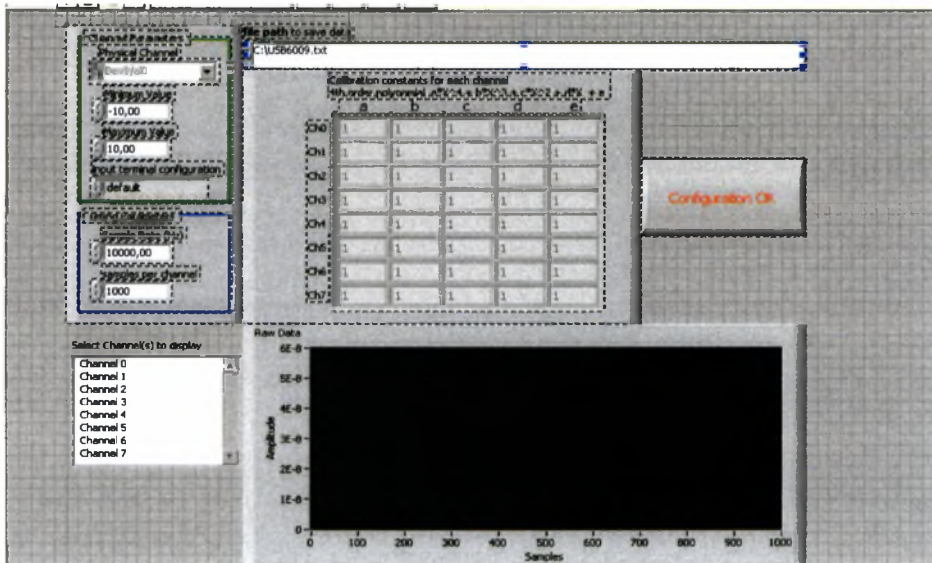
Προέκυψαν τελικά οι παρακάτω καμπύλες βαθμονόμησης:



Γράφημα 3.1 Καμπύλες βαθμονόμησης του θερμοανεμομέτρου

3.2.5 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων [Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog-digital)]

Η δειγματοληψία και η αποθήκευση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικής κάρτας της National Instruments. Πρόκειται για την κάρτα NI USB-6009 με δυνατότητα λήψης 8 καναλιών ταυτόχρονα στο εύρος $\pm 10V$. Η κάρτα τοποθετήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και το λογισμικό επικοινωνίας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον LABVIEW.



Εικόνα 3.8 Εισαγωγή του πολυωνύμου 4^{ου} βαθμού το οποίο προέκυψε από τη βαθμονόμηση του θερμοανεμόμετρου

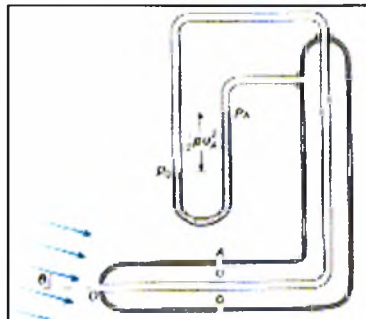
3.2.6 Μανόμετρο και σωλήνας Pitot - Static

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



Εικόνα 3.9: Το μανόμετρο οιοπνεύματος

Ο σωλήνας Pitot-Static (Prandtl), αποτελεί συνδυασμό σωλήνων στατικής πίεσης και Pitot και χρησιμοποιείται ως όργανο μέτρησης της ταχύτητας. Μια τυπική μορφή σωλήνα Pitot-Static (Prandtl) εικονίζεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.4 Σωλήνας Pitot-Static (Prandtl)

3.2.7 Παλμογράφος

Για να έχουμε μια εικόνα των σημάτων που προκύπτουν από διάφορους αισθητήρες σε κάθε σημείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος.

3.2.8 Ταλαντωτικός μηχανισμός

Ο ταλαντωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ELECTRO-SEIS Shaker της APS Dynamics. Πρόκειται για ηλεκτροδυναμικό διεγέρτη ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών διάφορων κατασκευών στην περιοχή των σεισμικών συχνοτήτων. Στην ουσία πρόκειται για έναν γεννήτρια δύναμης. Η

αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην εφαρμογή δύναμης σε έναν αγωγό ρεύματος ο οποίος βρίσκεται σε ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος. Η ασκούμενη δύναμη είναι ανάλογη της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος. Ο συγκεκριμένος ταλαντωτής μπορεί να παράγει οποιαδήποτε κυματομορφή δύναμης σε συμφωνία με κυματομορφή του ρεύματος που παρέχεται σ' αυτόν.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ταλαντωτή παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Φάσμα συχνοτήτων	0 έως 200 Hz
Ταχύτητα	762mm/s
Βάρος οπλισμού	2.27Kg
Βάρος Σώματος	35Kg
Συνολικό βάρος ταλαντωτή	38Kg

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ταλαντωτή

3.2.9 Ενισχυτής

Ο ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση του ταλαντωτή είναι ο APS Dynamics Model 124-EP DUAL MODE Power Amplifier. Πρόκειται για ενισχυτή διπλής λειτουργίας (dual mode) καθώς έχει τη δυνατότητα ενίσχυσης σήματος δυναμικού (volt) και σήματος ρεύματος. Η λειτουργία σε voltage χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του ταλαντωτή. Αυτή η λειτουργία παράγει απόκριση σταθερής ταχύτητας ως συνάρτηση της συχνότητας στην περιοχή της συχνότητας συντονισμού του οπλισμού του ταλαντωτή. Αυτή η λειτουργία προκαλεί υψηλή απόσβεση στην κίνηση του οπλισμού του ταλαντωτή.

Η λειτουργία σε ρεύμα χρησιμοποιείται για test excitation ή όταν πρέπει ο ταλαντωτής να έχει ελάχιστη επίδραση στην απόσβεση του συστήματος. Σε αυτή τη λειτουργία ο ταλαντωτής έχει απόκριση σταθερής δύναμης.

Στην παρούσα διατριβή ο ενισχυτής χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδότης δυναμικού για τον ταλαντωτή.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι λειτουργίας του ενισχυτή

Output	250 V-A rms
Μέγιστο ρεύμα	8 A rms
Current peak	16.6 A peak
Συχνότητες λειτουργίας	0-2000 Hz
Μέγιστο σήμα εισόδου	2 V peak
Εμπέδηση εισόδου	100 K ohm
Θόρυβος	-80 dB
Current Monitor output	125 mV/A

Ισχύς εισόδου	230 V, 50/60 Hz, 760 W
Βάρος	11.3 kg
Μέγεθος	133x432x337 mm
Θερμοκρασίες λειτουργίας	5-50 °C
Θερμοκρασίες αποθήκευσης	-40-85 °C
Υγρασία	90% RH Maximum

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ενισχυτή

3.2.10 Γεννήτρια συχνοτήτων

Για τη διέγερση του ταλαντωτή εκτός από τον ενισχυτή χρησιμοποιήθηκε και μια γεννήτρια συχνοτήτων καθώς το πλάτος της ταλάντωσης προκύπτει ως γινόμενο του σήματος σε volts που δίνει ο ενισχυτής και του σήματος της γεννήτριας:

πλάτος ταλάντωσης=volts (ενισχυτή)*volts (γεννήτριας)

Η γεννήτρια συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου Escort EGC0. Με τη συγκεκριμένη γεννήτρια, εκτός από το πλάτος, ρυθμιζόταν και η συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος.



Εικόνα 3.10 Ενισχυτής ταλαντωτή, γεννήτρια συχνοτήτων, ενισχυτής φορτίου, καπνογόνο

3.2.11 Σύστημα μέτρησης εύρους

Για τη μέτρηση του εύρους κατασκευάστηκε διάταξη η οποία αποτελείται από δύο κάθετα κομμάτια μετάλλου τα οποία στηρίζονται σε δύο μαγνήτες. Χρησιμοποιήθηκαν οι μαγνήτες ως βάση έτσι ώστε να υπάρχει και καλή στήριξη και εύκολη μετακίνηση των δύο κομματιών. Σε κάθε κομμάτι μετάλλου έχει προσαρμοστεί μια βίδα μήκους 10cm σε οριζόντια θέση και η οποία έχει δυνατότητα μετακίνησης τόσο στην x όσο και στην y κατεύθυνση όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το σύστημα συμπληρώνει μια ηλεκτρονική διάταξη που αποτελείται από δύο ζεύγη ελασμάτων και δύο λαμπάκια. Η διάταξη αυτή

προσαρμόζεται στον ταλαντωτικό μηχανισμό έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης μετακινούμε τις βίδες και τη στιγμή που κάθε μια από αυτές κάνει επαφή με το κάθε ζεύγος ελασμάτων κλείνει το ηλεκτρικό κύκλωμα και ανάβουν τα λαμπάκια. Επομένως μετρώντας την απόσταση ανάμεσα στις βίδες γνωρίζουμε το εύρος ταλάντωσης.

Χρησιμοποιήθηκε επίσης μαγνητικός αισθητήρας θέσης ο οποίος παραχωρήθηκε από το εργαστήριο Δυναμικής Μηχανών αλλά μετά από προσπάθειες βαθμονόμησης του και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων θεωρήθηκε ακατάλληλος για τη μέτρηση του εύρους καθώς η μεγάλη ποσότητα σιδήρου της κατασκευής επηρέαζε το μαγνητικό του πεδίο.

3.2.12 Τριαξονικός αισθητήρας KISTLER

Ο τριαξονικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για δυναμικές και ψευδοστατικές μετρήσεις των τριών συνιστωσών κάθε δύναμης που επιδρά πάνω στον αισθητήρα.

Ο αισθητήρας χαρακτηρίζεται από υψηλή σταθερότητα και για το λόγο αυτό έχει υψηλή φυσική συχνότητα. Η μεγάλη του ανάλυση δίνει τη δυνατότητα μέτρησης πολύ μικρών αλλαγών στις μεγάλες δυνάμεις.

Ο αισθητήρας μετρά τη δρώσα δύναμη ανεξάρτητα από το σημείο εφαρμογής της. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν τόσο ως προς τη μέση αλλά και τις διακυμάνσεις της δύναμης.

Ο άξονας που περνάει από το κέντρο του αισθητήρα είναι ο άξονας y.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του αισθητήρα

Range	Fx, Fy (kN)	-1...1
	Fz (kN)	-2...2
Υπερφόρτιση	Fx, Fy (kN)	-1.2/1.2
	Fz (kN)	-2.4/2.4
Ονομαστική ευαισθησία	Fx, Fy (pC/N)	=-26
	Fz (pC/N)	=-11.5
Γραμμικότητα σε κάθε άξονα	%FSO	<=+-1
Υστέρηση σε κάθε άξονα	%FSO	<=1
Cross talk	Fz->Fx, Fy (%)	<=+-1.5
	Fx<->Fy (%)	<=+-3.5
	Fx, Fy->Fz (%)	<=+-3.5
Μέγιστες ροπές	Mx, My (Nm)	-5/5
	Mz (Nm)	-5/5
Θερμοκρασία λειτουργίας	(°C)	-50...120
Βάρος	g	8.5

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του τριαξονικού αισθητήρα KISTLER 9017B

3.2.13 Ενισχυτής φορτίου KISTLER 5011B

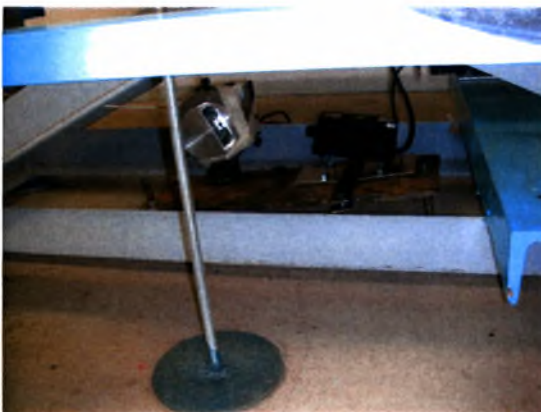
Ο αισθητήρας προσαρμόζεται στην πτέρυγα όπως θα δειχθεί στην συνέχεια και συνδέεται με τον ενισχυτή φορτίου KISTLER 5011B που περιέχει ψηφιακό φίλτρο και βαθμονομητή σε Newton.



Εικόνα 3.11 Ενισχυτής φορτίου KISTLER 5011B

3.2.14 Laser –Πολυγωνικό κάτοπτρο

Το laser που χρησιμοποιήθηκε είναι Argon-ion με ισχύ 1120 mW στα 532nm. Το πέπλο φωτός δημιουργήθηκε με τη βοήθεια πολυγωνικού περιστρεφόμενου καθρέφτη μοντέλο SOS-BB10.



Εικόνα 3.12 Argon ion laser και περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο για παραγωγή ομοιόμορφης δέσμης φωτός

3.2.12 Camera

Η camera που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση της ροής είναι μια home camera η οποία έχει συχνότητα δειγματοληψίας 25 frames/s.

3.3 Πειραματικές διατάξεις οπτικοποίησης της ροής

3.3.1 Πειραματική διάταξη οπτικοποίησης ροής στην αεροσήραγγα

Η οπτικοποίηση πραγματοποιήθηκε με έγχυση καπνού μέσω ακροφυσίου κυκλικής διατομής το οποίο τοποθετήθηκε κοντά στην ακμή προσβολής της πτέρυγας και η φορά του καπνού ακολουθούσε τη φορά της ροής του αέρα.

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

Μέρος της διάταξης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.13:

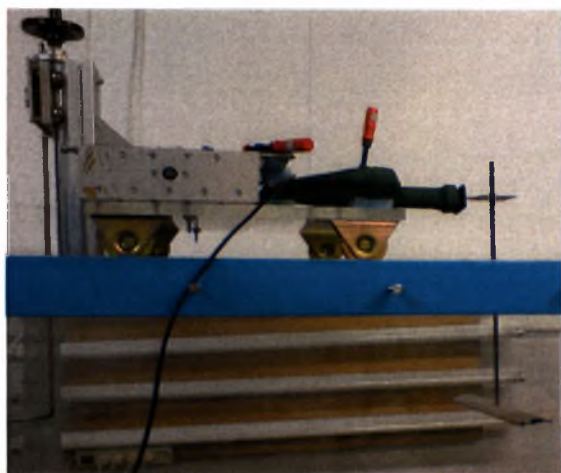


Εικόνα 3.13 Διάταξη έγχυσης καπνού στην αεροσήραγγα

3.3.2 Πειραματική διάταξη οπτικοποίησης ροής σε δεξαμενή νερού

Σε δεξαμενή νερού τοποθετήθηκε κυλιόμενη πλατφόρμα επάνω στην οποία προσαρμόσθηκε ο μηχανικός ταλαντωτής και το μοντέλο της πτέρυγας. Η

ταχύτητα της κυλιόμενης πλατφόρμας άρα και της σχετικής ταχύτητας του μοντέλου ως προς την ροή ελεγχόταν από μοτέρ με ρυθμιζόμενες στροφές. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται ο μηχανισμός και το μοντέλο.



Εικόνα 3.14 Κυλιόμενη τράπεζα, μοντέλο μη συμμετρικής πτέρυγας, μηχανικός ταλαντωτής, φωτισμός με κοινό λευκό φώς για οπτικοποίηση σε νερό

Έλεγχος της συχνότητας ταλάντωσης

Όπως αναφέρθηκε η συχνότητα ταλάντωσης δινόταν στο σύστημα από μια γεννήτρια συχνοτήτων. Για την επιβεβαίωση της συχνότητας δημιουργήθηκε πρόγραμμα σε περιβάλλον Labview όπου επιλέγοντας μια περιοχή pixels ενός τμήματος της διάταξης που ταλαντώνεται επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της συχνότητας ταλάντωσης.

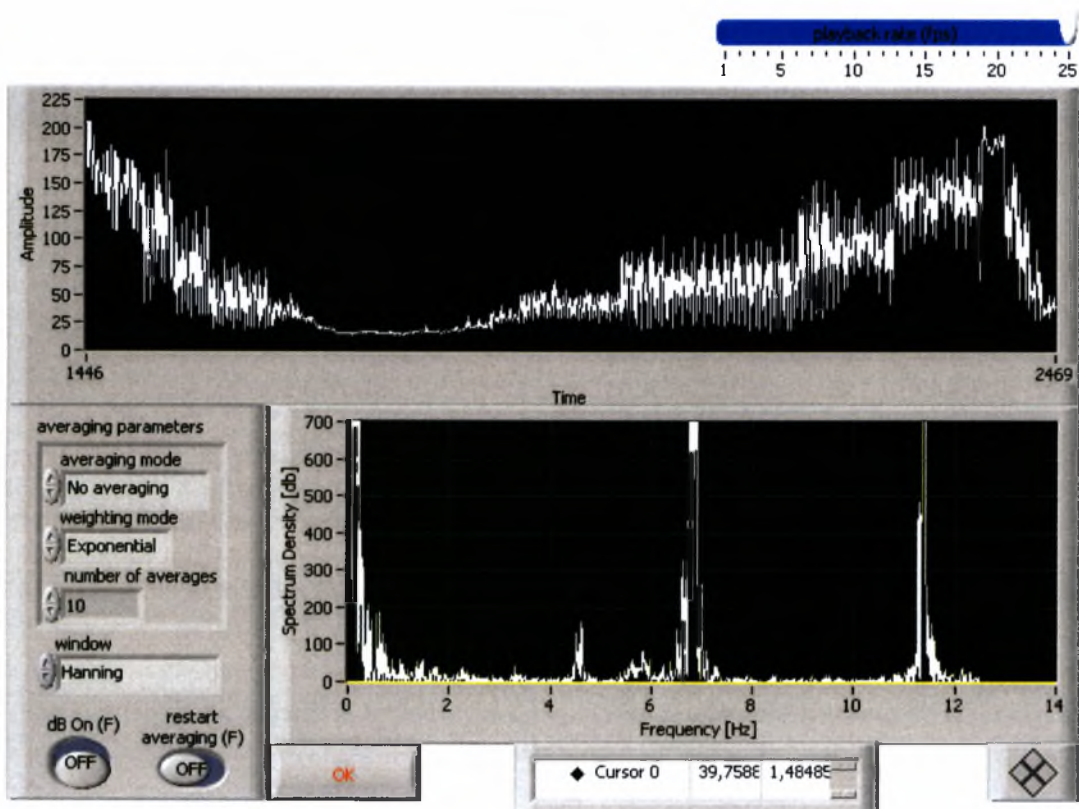
Παρουσίαση του προγράμματος όπου περιγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται:



Εικόνα 3.15 Εισαγωγή του video και επεξεργασία του



Εικόνα 3.16 Επιλογή περιοχής και εκτέλεση του προγράμματος



3.17 Εμφάνιση του φάσματος

Αποθήκευση frames

Για την αποθήκευση frames με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία τους δημιουργήθηκε και το πρόγραμμα το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω.



3.18 Εισαγωγή του video και αποθήκευση των frames επιλογής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ANSYS CFX 10

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η υπολογιστική προσέγγιση του προβλήματος που ερευνήθηκε πειραματικά με τη χρήση του εμπορικού πακέτου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS CFX 10.

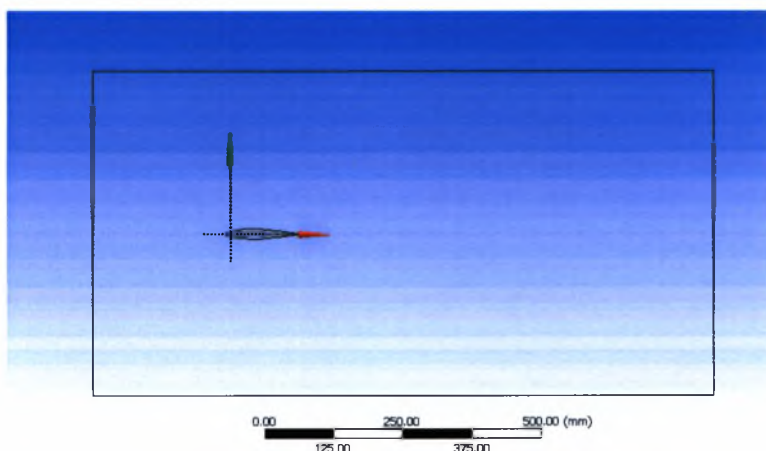
Η αριθμητική προσέγγιση έχει σαν σκοπό την υποστήριξη της πειραματικής εργασίας. Προσομοιώθηκε το ακριβές 2-D πρόβλημα που μελετήθηκε πειραματικά διατηρώντας τις διαστάσεις του μοντέλου και τις διαστάσεις της αεροσήραγγας. Μελετήθηκε η επίδραση της συχνότητας και του εύρους ταλάντωσης στην ταχύτητα στο απόρευμα και στις αεροδυναμικές δυνάμεις.

4.1 Εισαγωγή στο λογισμικό ANSYS CFX 10

Η ροή που έχει μοντελοποιηθεί είναι σταθερή και μεταβατική ροή γύρω από ένα διδιάστατο NACA πτερύγιο. Το πτερύγιο μοντελοποιήθηκε είτε σταθερό είτε ταλαντούμενο στην x κατεύθυνση υποκείμενο σε ταλάντωση στη διεύθυνση της ροής (edgewise vibration).

Το πτερύγιο που μελετήθηκε είναι τύπου NACA 0015 συμμετρικό και συμπληρωματικά έγιναν δοκιμές και με μη συμμετρικό πτερύγιο NACA 4415.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η υπολογιστική περιοχή που χρησιμοποιήθηκε για όλους τους υπολογισμούς σε αυτή τη μελέτη. Η διεύθυνση x αντιστοιχεί στη διεύθυνση της εισερχόμενης ροής.



Εικόνα 4.1 Υπολογιστική περιοχή

4.1.1 Οριακές συνθήκες

Τα τοιχώματα του πτερυγίου μοντελοποιήθηκαν σαν ιξώδη τοιχώματα. Το όριο εισροής ορίστηκε σαν εισροή ταχύτητας. Το ρευστό εισέρχεται στην περιοχή

μελέτης κάθετα στο επίπεδο εισροής. Ορίστηκαν οι τιμές της ταχύτητας του αέρα στην είσοδο, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k_t , και της χωρικής κλίμακας της τύρβης. Το πεδίο μακριά στο απόρρευμα αντιστοιχεί στα τείχη της αεροσήραγγας. Το κατάντη όριο ορίστηκε σαν το όριο εξόδου με μέση στατική πίεση τα 0 Pa.

4.1.2 Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς του στατικού πτερυγίου και για τους υπολογισμούς της ταλαντούμενης πτέρυγας χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω σαν αρχικές συνθήκες.

4.1.3 Πλέγμα

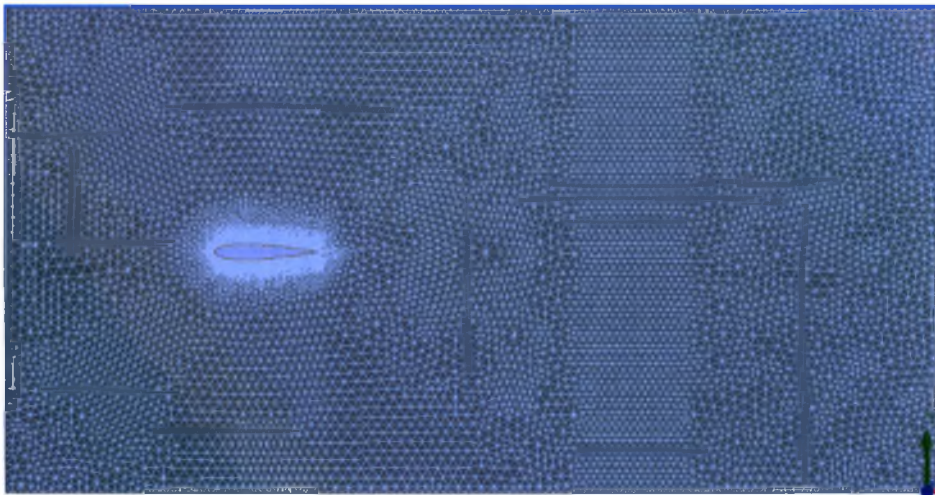
Ένα διδιάστατο πλέγμα δημιουργήθηκε με το CFX mesher και αποτελείται από τρίγωνα και πολύγωνα. Καθώς το CFX είναι τρισδιάστατος κώδικας το πλέγμα εκτείνεται στη z κατεύθυνση. Το τελικό πλέγμα αποτελείται από:

Συνολικός αριθμός κόμβων: 30950

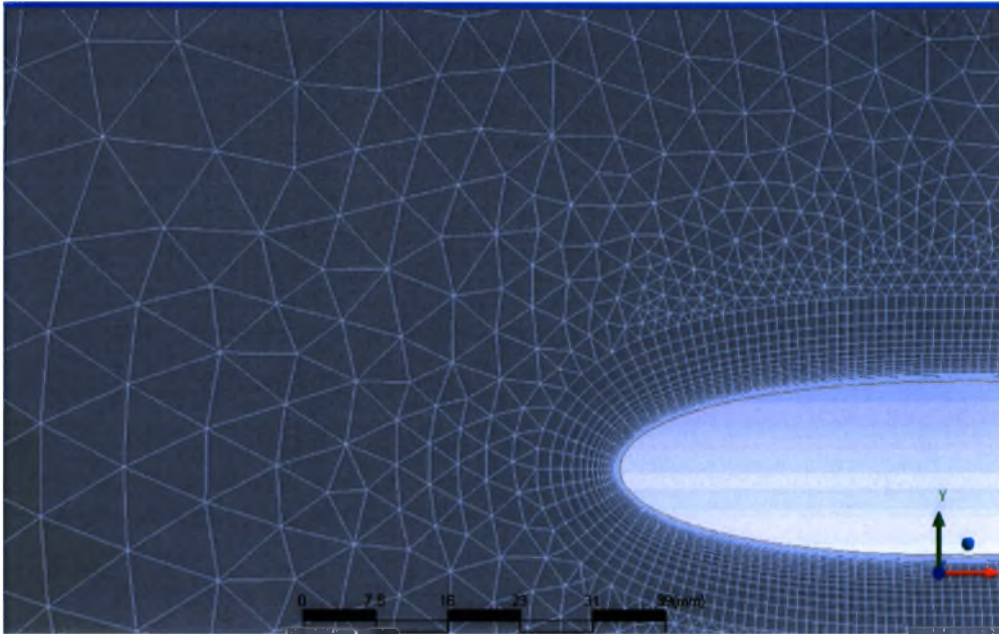
Συνολικός αριθμός στοιχείων :24661

Συνολικός αριθμός πρισμάτων:19026

Συνολικός αριθμός εξαέδρων: 5635



Εικόνα 4.2 Υπολογιστικό πλέγμα



Εικόνα 4.3 Λεπτομέρεια του υπολογιστικού πλέγματος κοντά στην ακμή προσβολής

4.1.4 Υπολογιστική στρατηγική

Για τους υπολογιστικό κομμάτι της ταλάντωσης του πτερυγίου χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα $T/40$ όπου T είναι η περίοδος ταλάντωσης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για χρονικό διάστημα $10T$ και εύρος του πεδίου $b = 4\text{mm}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αφορούν στη μελέτη των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στο απόρρευμα της ροής. Επίσης έγινε η μέτρηση των δυνάμεων, F_y , F_z που αναπτύσσονται πάνω σε πτέρυγα χορδής $c=125$ mm και εκπετάσματος $s=300$ mm πραγματοποιήθηκε οπτικοποίηση της ροής στην πτέρυγα.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην αεροσήραγγα που υπάρχει στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β. Πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες πειραμάτων. Η πρώτη περιλαμβάνει μετρήσεις ταχυτήτων με τη χρήση θερμοανεμόμετρου (hot-wire) το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση δύο χορδών πίσω από την ακμή φυγής του πτερυγίου. Η ταχύτητα της ελεύθερης ροής U_∞ ορίστηκε στα 10m/s που αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds 83300.

Η δεύτερη ομάδα περιλάμβανε μετρήσεις ασταθών φορτίων δηλαδή της κατακόρυφης δύναμης $F(t)$ και ακολούθως της άνωσης $L(t)$ στην αεροσήραγγα για διάφορες τιμές της συχνότητας ταλάντωσης f , της διαδρομής ταλαντωτή (stroke) s και γωνίας προσβολής α στην πτέρυγα NACA 0015.

Τέλος πραγματοποιήθηκε οπτικοποίηση της ροής στο πτερύγιο η οποία πραγματοποιούσε ταλάντωση οι παράμετροι της οποίας ορίστηκαν σε εύρος 25mm, σε συχνότητα 2,65Hz και 6,8Hz και σε γωνία προσβολής 0° , 6° και 13° . Η ταχύτητα της ροής ορίστηκε στο 1m/s που αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds 10000. Η camera τοποθετήθηκε σε απόσταση 30cm από το τοίχωμα της αεροσήραγγας και το argon ion laser τοποθετήθηκε στην οροφή της αεροσήραγγας δημιουργώντας πέπλο φωτός κάθετο στη διεύθυνση της ροής.

5.2 Οπτικοποίηση ροής στο πτερύγιο

5.2.1 Οπτικοποίηση της ροής γύρω από πτερύγιο NACA 0015 σε αέρα

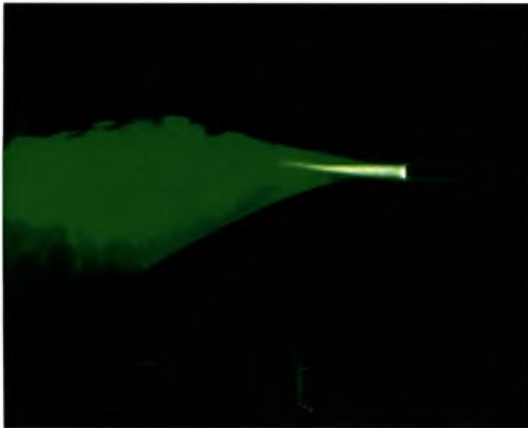
Στα πλαίσια της μελέτης του πεδίου ροής στην περιοχή γύρω από το πτερύγιο πραγματοποιήθηκε οπτικοποίηση της ροής στην αεροσήραγγα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.

Οι αδιάστατες παράμετροι οι οποίες μελετήθηκαν είναι η ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης $k = \frac{\pi f c}{U_\infty} = \frac{\omega c}{2U_\infty}$ όπου $\omega=2\pi f$ είναι η κυκλική συχνότητα και το

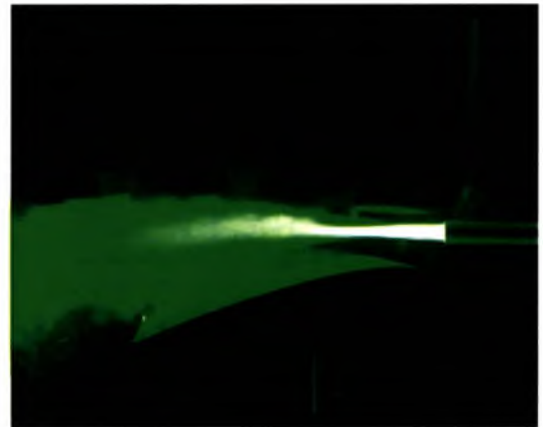
ανηγμένο εύρος ταλάντωσης $h = \frac{s\omega}{U_\infty}$.

Στη μελέτη που ακολουθεί το k κυμαίνεται μεταξύ 0 και 4.16. Η γωνία προσβολής είναι $\alpha=0^\circ$, 6° , 13° και ο αριθμός Reynolds 10000.

Στις εικόνες που ακολουθούν το πτερύγιο είναι σταθερό. Στην εικόνα 5.1 α) η γωνία προσβολής είναι στις 13° και όπως φαίνεται το πτερύγιο βρίσκεται σε περιοχή πλήρους απώλειας στήριξης ενώ στην εικόνα β) η γωνία προσβολής είναι στις 6° και το πτερύγιο βρίσκεται σε περιοχή μερικής απώλειας στήριξης.



α)



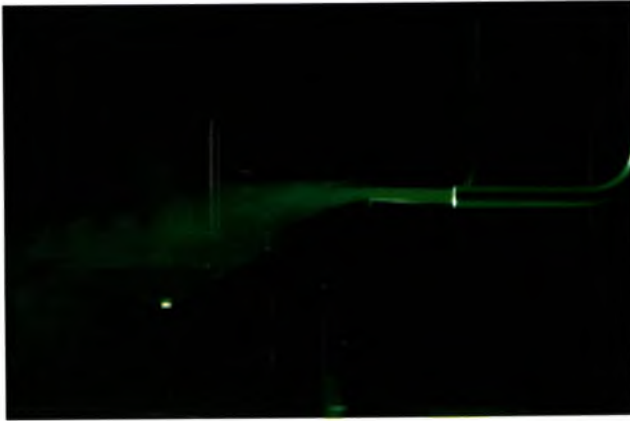
β)

Εικόνα 5.1 Οπτικοποίηση ροής σε σταθερό πτερύγιο σε γωνία προσβολής α) $\alpha=13^\circ$ και β) $\alpha=6^\circ$

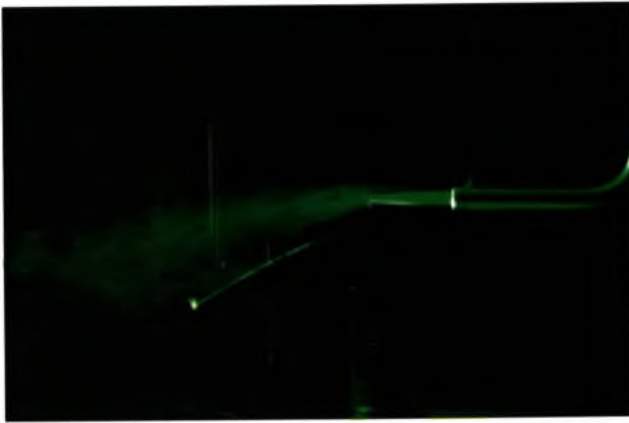
Στις φωτογραφίες που ακολουθούν οι οποίες προέκυψαν από την ψηφιοποίηση των video παρουσιάζονται οι δίνες του καπνού σε σταθερό και ταλαντούμενο πτερύγιο σε διάφορες στιγμές σε έναν πλήρη κύκλο με περίοδο $T=1/f$.

Τη χρονική στιγμή $t=0$ το πτερύγιο βρίσκεται στο μέσο της διαδρομής του με τη μέγιστη ταχύτητα U_w ($U_w < 0$) αντίθετα στη φορά του ανέμου. Η σχετική ταχύτητα είναι $U_R = U_\infty - U_w$. Τη χρονική στιγμή $t=T/4$ το πτερύγιο σταματά (η ταχύτητα του μηδενίζεται) και κινείται σε απόσταση s από το κέντρο και επιταχύνει με θετική ταχύτητα U_w . Τη χρονική στιγμή $t=T/2$ το πτερύγιο βρίσκεται στο κέντρο ξανά αλλά με τη ελάχιστη σχετική ταχύτητα κινούμενο στην ίδια κατεύθυνση με τη ροή. Τελικά τη χρονική στιγμή $t=3T/4$ η $U_w=0$ και το πτερύγιο κινείται προς το κέντρο με τη μέγιστη επιτάχυνση.

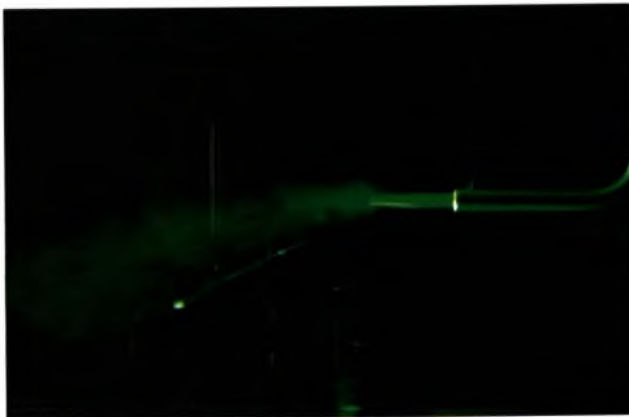
Η πρώτη σειρά εικόνων αφορά την περίπτωση $f = 6.8 \text{ Hz}$, $s = 25\text{mm}$, $\alpha = 13^\circ$



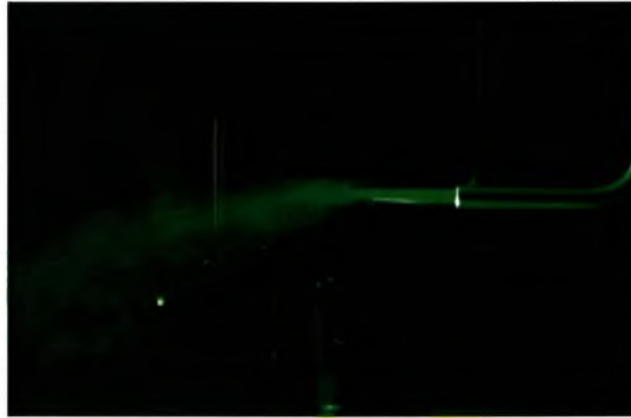
α) $t=0$



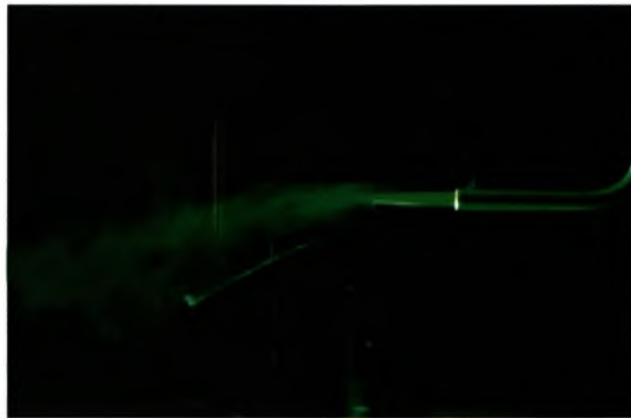
β) $t = T/4$



γ) $t = T/2$



δ) $t = 3T/4$



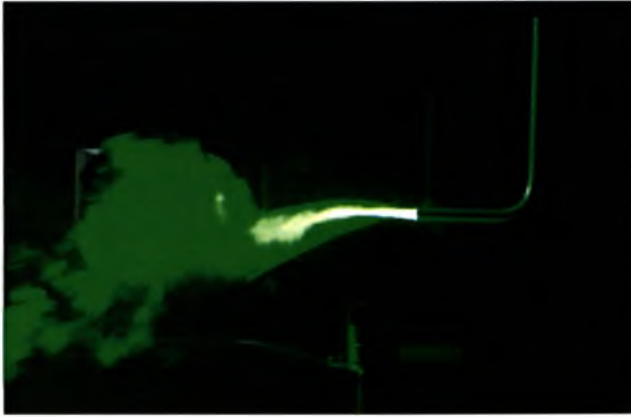
ε) $t = T$

Εικόνα 5.2 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz, γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$ και εύρος 25mm στη διάρκεια ενός κύκλου

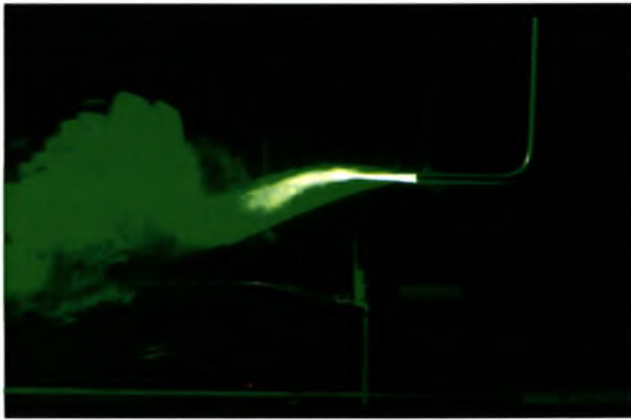
Παρατηρείται ότι όταν το πτερύγιο βρίσκεται στη θέση $T/4$ κινούμενο αντίθετα στη διεύθυνση της ροής αναπτύσσεται δίνη δεξιόστροφα κοντά στην ακμή φυγής η οποία μεγαλώνει και κινείται στο απόρευμα.

Επίσης κατά την κίνηση του πτερυγίου αντίθετα στη διεύθυνση της ροής έχουμε αποκόλληση της ροής στο μεγαλύτερο μέρος της επάνω επιφάνειας του πτερυγίου ενώ παρατηρήθηκε σχεδόν πλήρη επανακόλληση της ροής όταν το πτερύγιο αποκτά την ακραία θέση του κατά την κίνηση του κατά τη διεύθυνση της ροής.

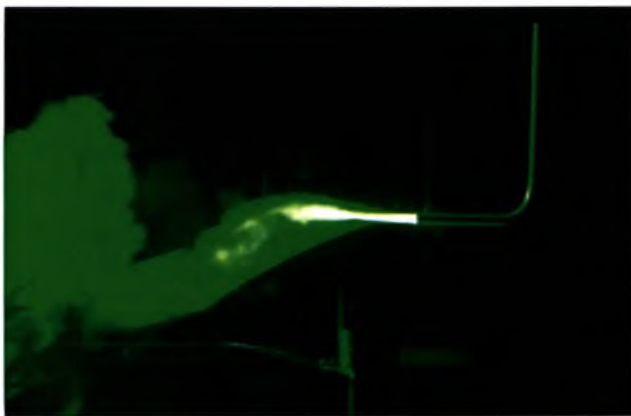
Ακολουθεί η περίπτωση $f = 2.65 \text{ Hz}$, $s = 25\text{mm}$, $\alpha = 13^\circ$



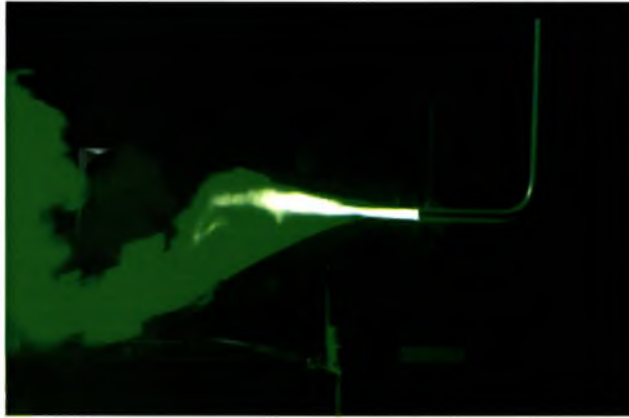
α) $t=0$



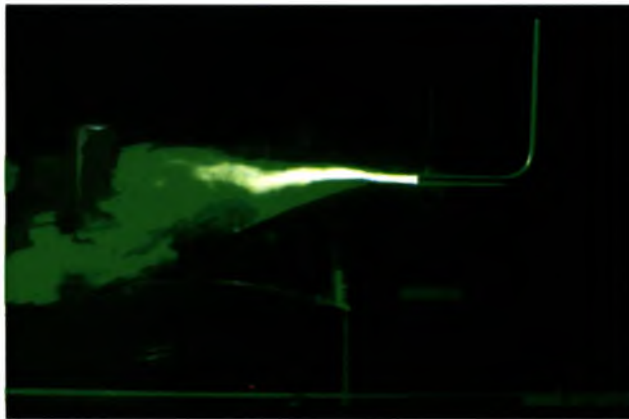
β) $t = T/4$



γ) $t = T/2$



δ) $t = 3T/4$



ε) $t = T$

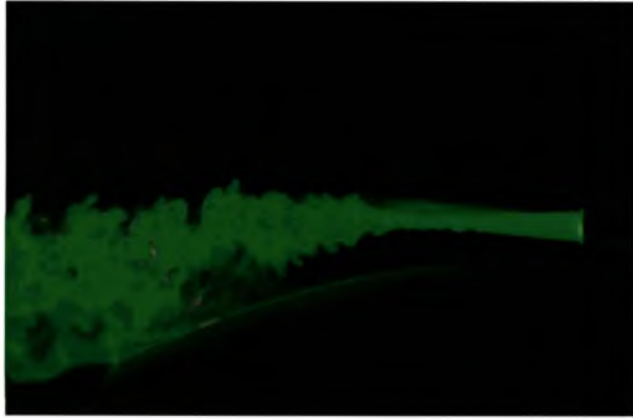
Εικόνα 5.3 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz, γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$ και εύρος 25mm στη διάρκεια ενός κύκλου

Δεν παρατηρείται αποκόλληση της ροής καθώς το πτερύγιο κινείται αντίθετα στη διεύθυνση της ροής και κατά την κίνησή του στη διεύθυνση της ροής και στη θέση T καθώς επανέρχεται στη θέση ισορροπίας παρατηρείται μικρή αποκόλληση πολύ κοντά στην ακμή φυγής.

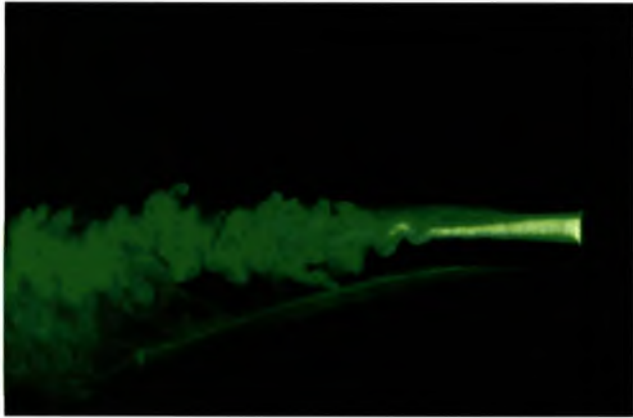
Παρατηρείται επίσης ο σχηματισμός μεγάλης δίνης στην ακμή φυγής του πτερυγίου στις θέσεις $T/4$, $T/2$ και $3T/4$ και η οποία έχει δεξιόστροφη φορά η οποία στη συνέχεια εκχύνεται στο απόρρευμα.

Με την αύξηση της ανηγμένης συχνότητας η αποκόλληση της ροής διαφοροποιείται καθώς σε μεγάλη ανηγμένη συχνότητα η αποκόλληση είναι εκτεταμένη στην επάνω επιφάνεια του πτερυγίου.

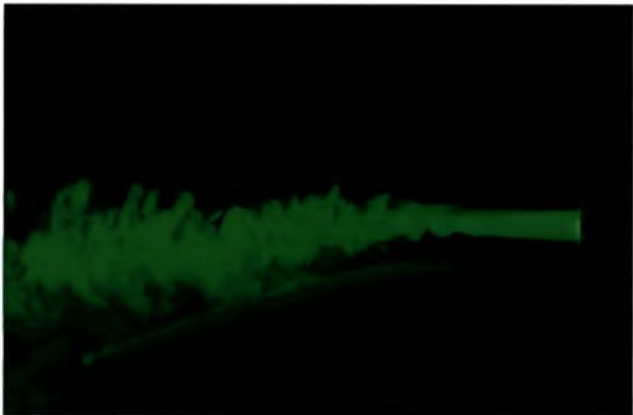
Ακολουθεί η περίπτωση $f = 6.8 \text{ Hz}$, $s = 25\text{mm}$, $\alpha = 6^\circ$



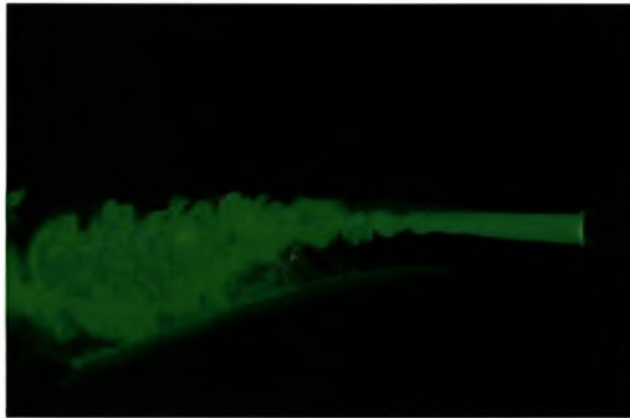
α) $t=0$



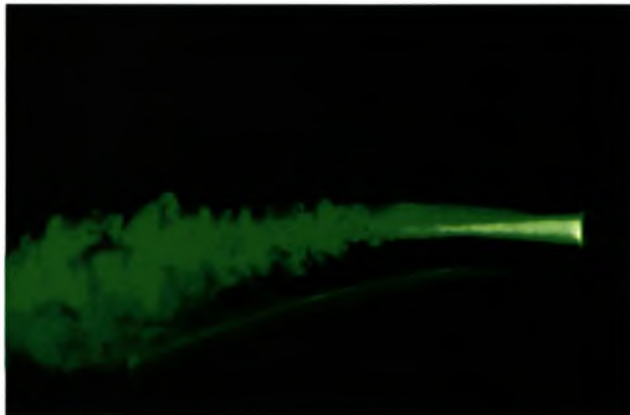
β) $t = T/4$



γ) $t = T/2$



δ) $t = 3T/4$

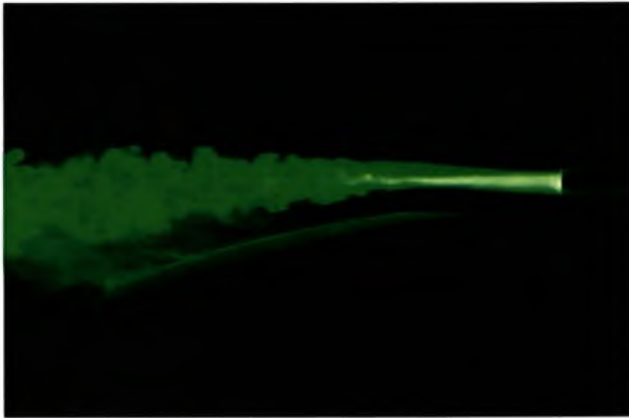


ε) $t = T$

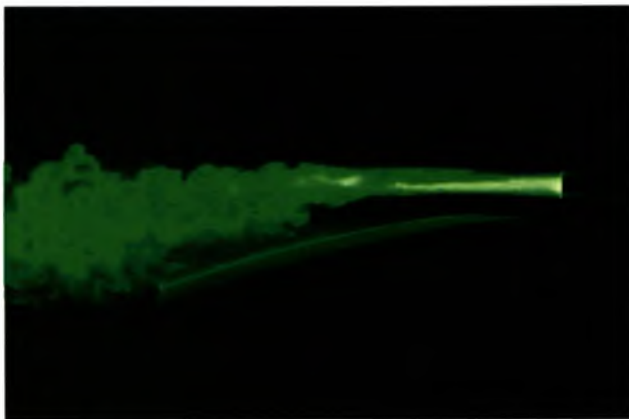
Εικόνα 5.4 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz, γωνία προσβολής $\alpha=6^\circ$ και εύρος 25mm στη διάρκεια ενός κύκλου

Παρατηρείται αποκόλληση της ροής καθώς το πτερύγιο κινείται σε κατεύθυνση αντίθετη από τη φορά της ροής.

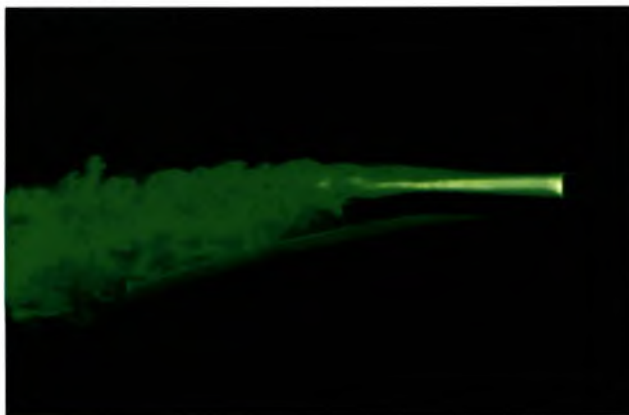
Ακολουθεί η περίπτωση $f = 2.65 \text{ Hz}$, $s = 25\text{mm}$, $\alpha = 6^\circ$



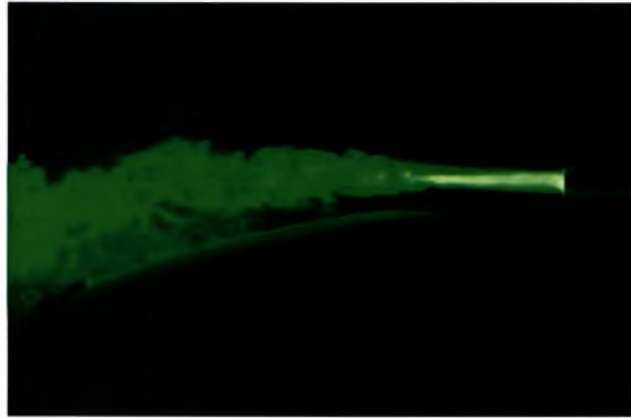
α) $t=0$



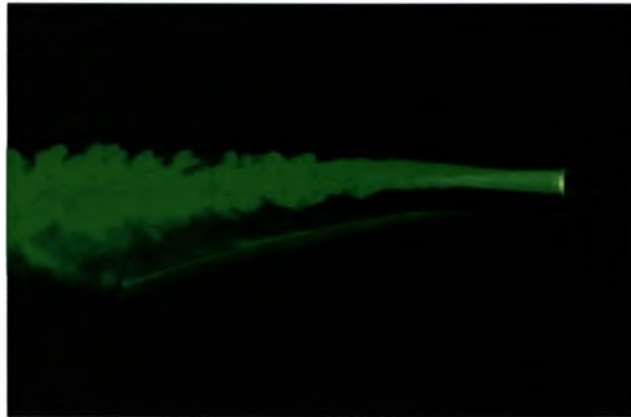
β) $t = T/4$



γ) $t = T/2$



δ) $t = 3T/4$



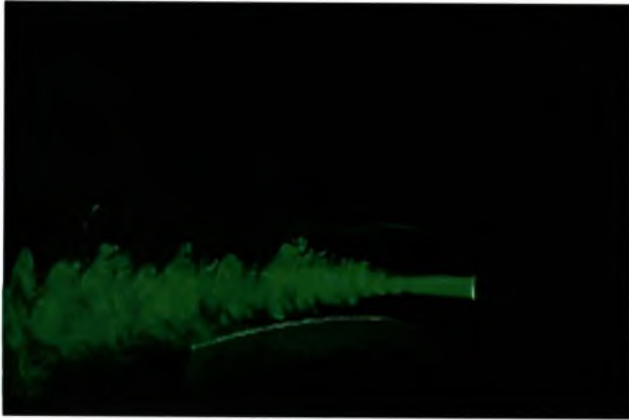
ε) $t = T$

Εικόνα 5.5 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz, γωνία προσβολής $\alpha=6^\circ$ και εύρος 25mm στη διάρκεια ενός κύκλου

Παρατηρείται αποκόλληση της ροής στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου και επανακόλληση της ροής στις θέσεις $T/2$ και $3T/4$ με σχηματισμό δινών στην επιφάνεια.

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις για το σταθερό και για το πτερύγιο που εκτελεί ταλάντωση (εικόνες 5.1 α) και 5.3 α)) φαίνεται ότι οι ασταθείς επιδράσεις σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα περιορίζουν την περιοχή της απώλειας στήριξης. Αυτό γίνεται περισσότερο έντονο όσο αυξάνει η συχνότητα ταλάντωσης. Παρόμοια φαινόμενα παρουσιάζονται και σε γωνία προσβολής $\alpha=6^\circ$.

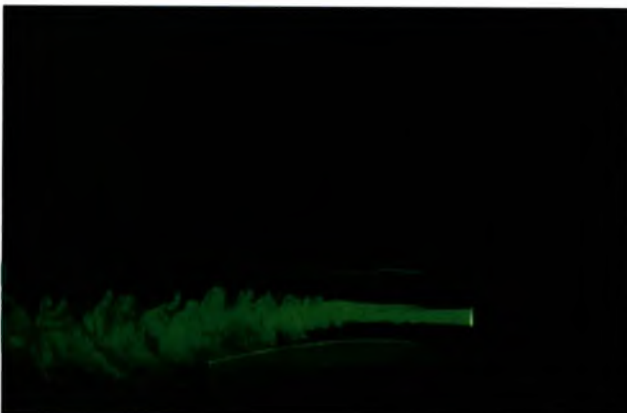
Ακολουθεί η περίπτωση $f = 2.65 \text{ Hz}$, $s = 25\text{mm}$, $\alpha = 0^\circ$.



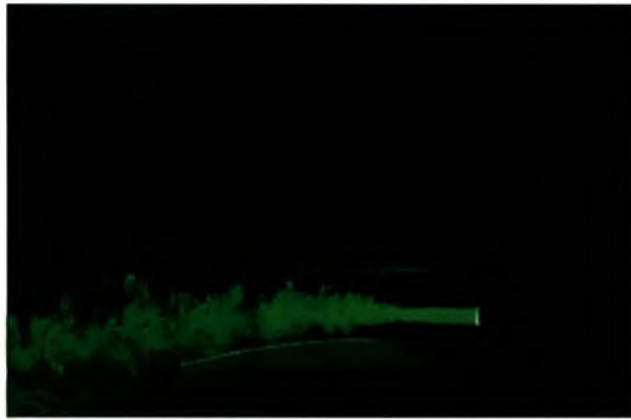
α) $t=0$



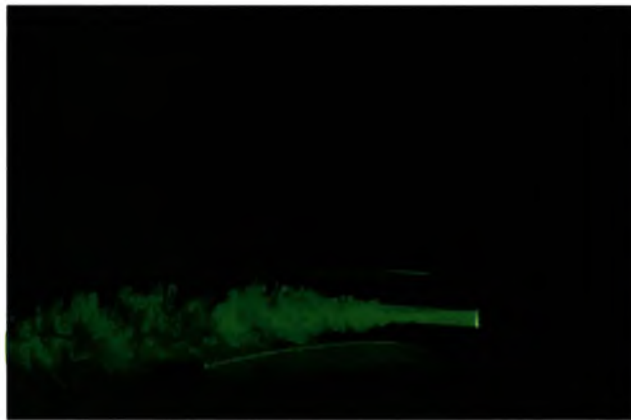
β) $t = T/4$



γ) $t = T/2$



δ) $t = 3T/4$

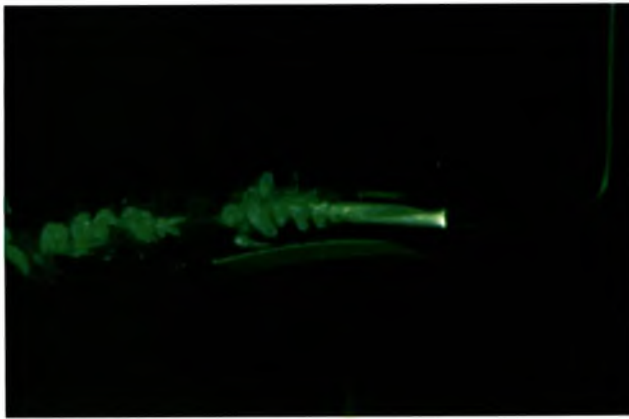


ε) $t = T$

Εικόνα 5.6 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz, γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και εύρος 25mm στη διάρκεια ενός κύκλου

Παρατηρείται σχηματισμός δινών στην επιφάνεια.

Ακολουθεί η περίπτωση $f = 6.8 \text{ Hz}$, $s = 25 \text{ mm}$, $\alpha = 0^\circ$



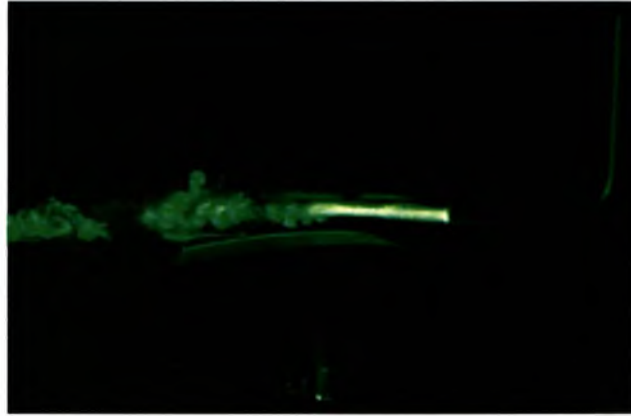
α) $t=0$



β) $t = T/4$



γ) $t = T/2$



δ) $t = 3T/4$

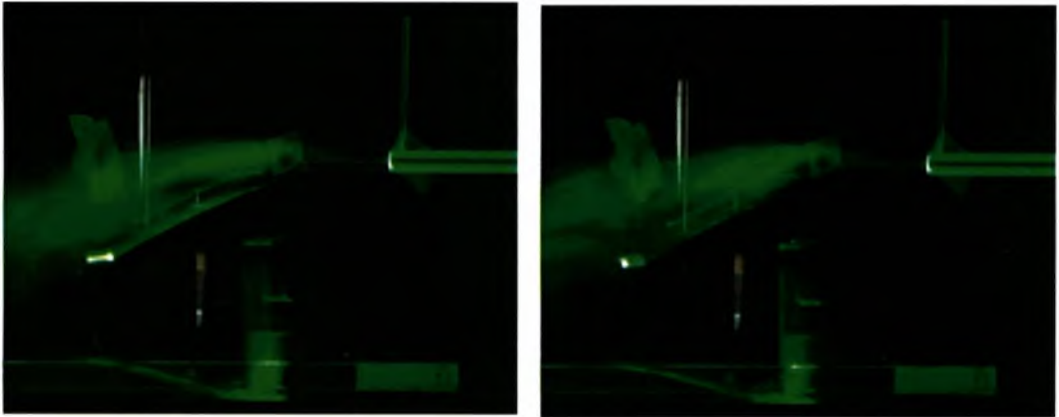


ε) $t = T$

Εικόνα 5.7 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz, γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και εύρος 25mm στη διάρκεια ενός κύκλου

Παρατηρείται σχηματισμός δινών στο απόρευμα.

Στις εικόνες που ακολουθούν η οπτικοποίηση της ροής γίνεται για συχνότητα ταλάντωσης 10.61Hz που αντιστοιχεί σε $k=0.45$ όπου παρατηρείται ότι οι επιδράσεις στην περιοχή της απώλειας στήριξης είναι μεγαλύτερες από αυτές που σημειώθηκαν παραπάνω.



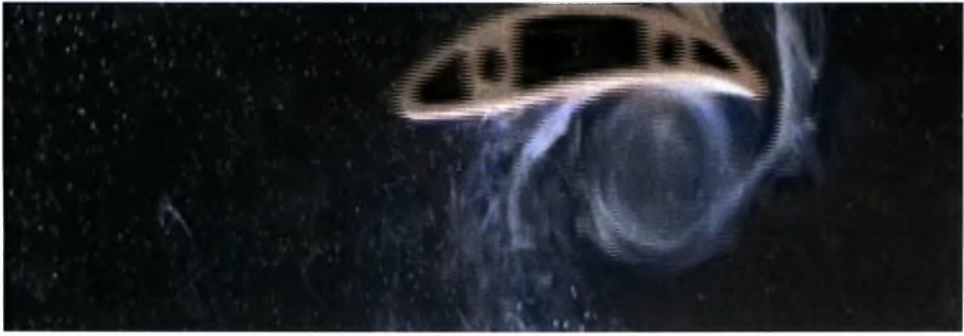
Εικόνα 5.8 Οπτικοποίηση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης 10.61Hz, γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$ και εύρος 25mm στις θέσεις $T/4$ και $3T/4$ αντίστοιχα

5.2.2 Οπτικοποίηση της ροής γύρω από πτερόγιο NACA 0015 σε νερό

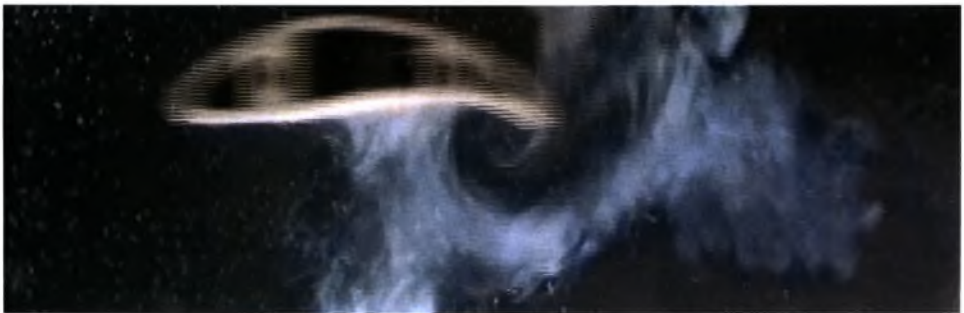
Η οπτικοποίηση στο νερό έγινε με δέσμη λευκού φωτός και δοκιμές με laser. Χρησιμοποιήθηκε λευκή χρωστική (εικόνες α, β, γ, δ, ε) και methyl blue (εικόνες ζ, η). Από την ανάλυση του video, με ακίνητη την video camera, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μεγάλο εύρος ταλάντωσης $s = c/2$, και μεγάλη ανηγμένη συχνότητα. $k = 3.5$, αριθμό $Re = 26000$. Λόγω της υψηλής τιμής του s παρατηρείται ισχυρή αναστροφή της σχηματιζόμενης στην ακμή φυγής δίνης που αποσπάται και οδεύει κατάντη αναπτυσσόμενη σε μέγεθος και διαχεόμενη σε σύντομο διάστημα όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



α)



β)



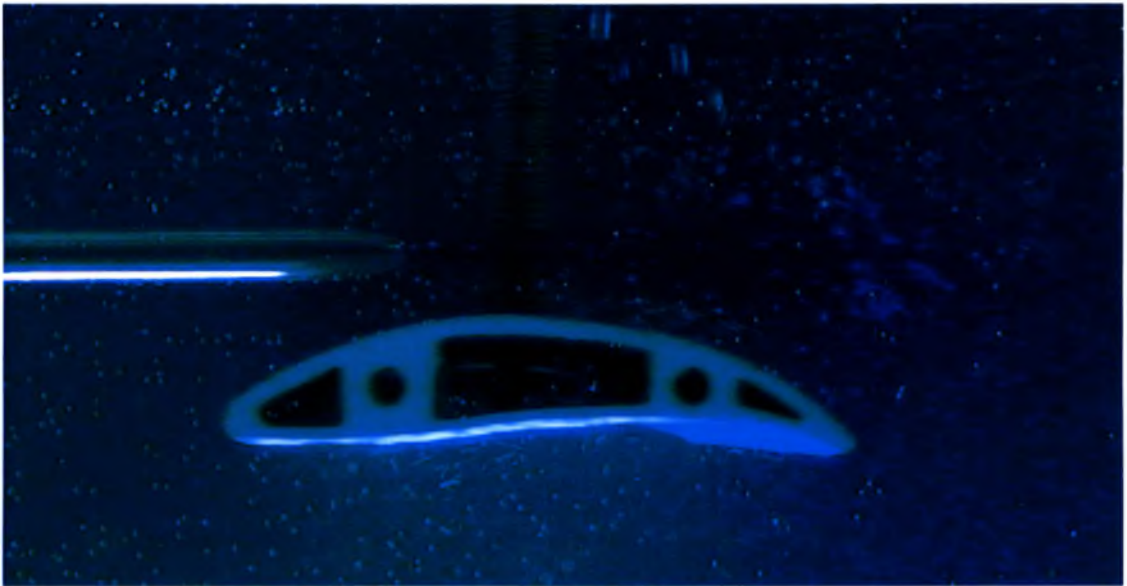
γ)



δ)



ε)



ζ)



η)

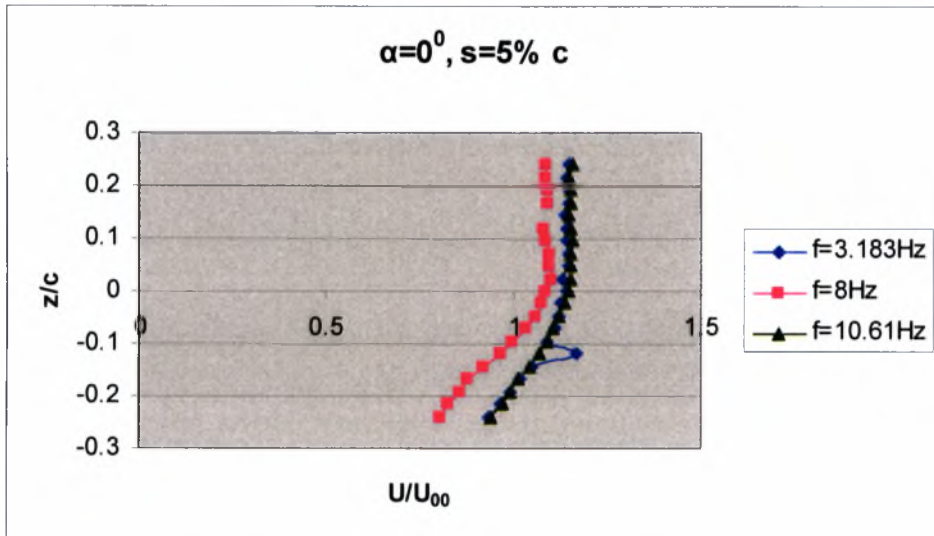
Εικόνα 5.9 Οπτικοποίηση της ροής στο νερό με τη χρήση λευκή χρωστική (εικόνες α, β, γ, δ, ε) και methyl blue (εικόνες ζ, η)

5.3 Ταχύτητες στο απόρευμα του περυγίου

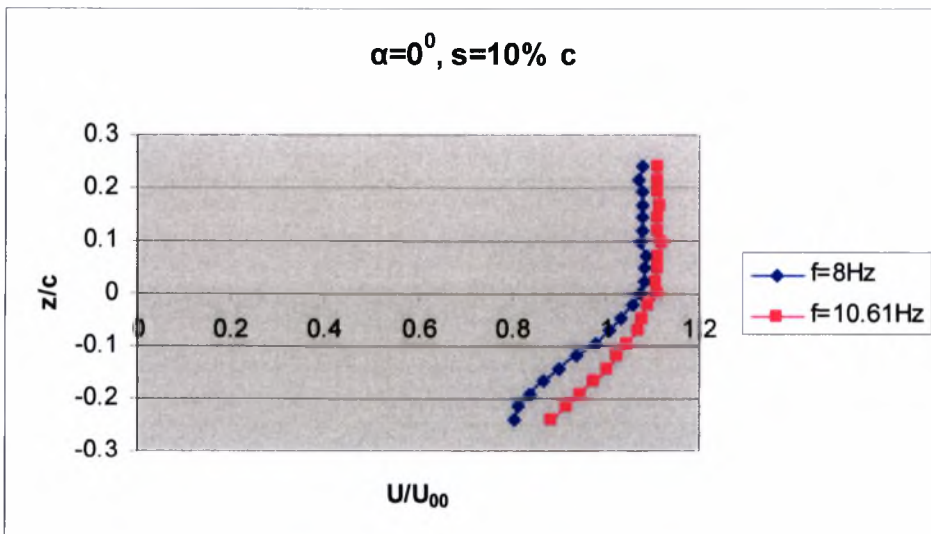
Οι συχνότητες ταλάντωσης στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις είναι $f = 3.183, 8$ και 10.61Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s/c = 0.05, 0.10, 0.20$, οι δε γωνίες προσβολής $\alpha = 0^\circ$ και 2° . Δεν επιχειρήθηκε μέτρηση σε μεγαλύτερες γωνίες προσβολής τόσο κοντά στην ακμή φυγής επειδή το ανεμόμετρο θα ευρισκόταν πιθανόν σε περιοχή ανεστραμένης ροής και δεν θα έδινε σωστές ενδείξεις. Σε κάποιες περιπτώσεις επίσης δεν ελήφθησαν μετρήσεις και για τις τρεις τιμές του εύρους καθώς παρατηρήθηκε συντονισμός της πειραματικής διάταξης.

5.3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ U/U_∞

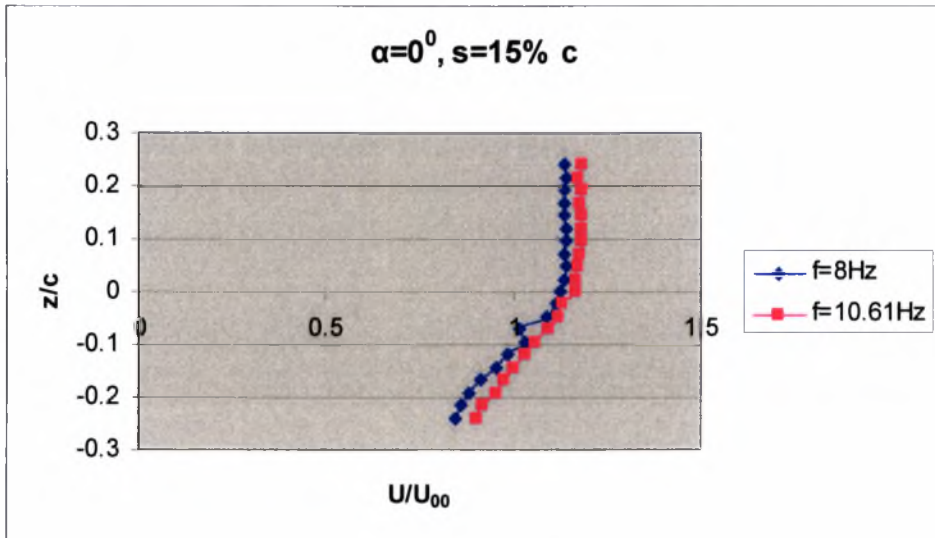
Παρουσιάζονται πρώτα οι κατανομές των ταχυτήτων U/U_∞ στο απόρευμα με παράμετρο την συχνότητα ταλάντωσης f για δυο γωνίες προσβολής α και εύρη s . Ακολούθως τα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται με παράμετρο το εύρος ταλάντωσης.



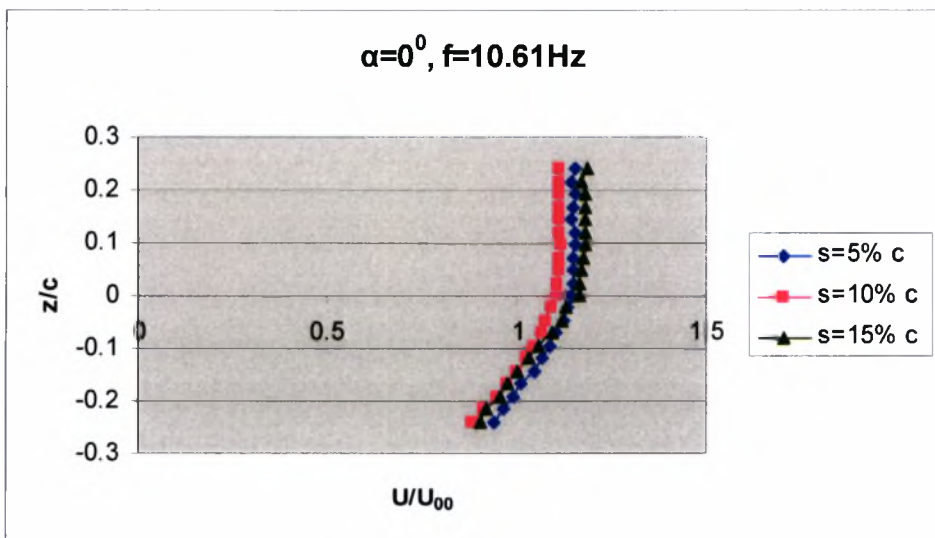
Γράφημα 5.1 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=5\%c$



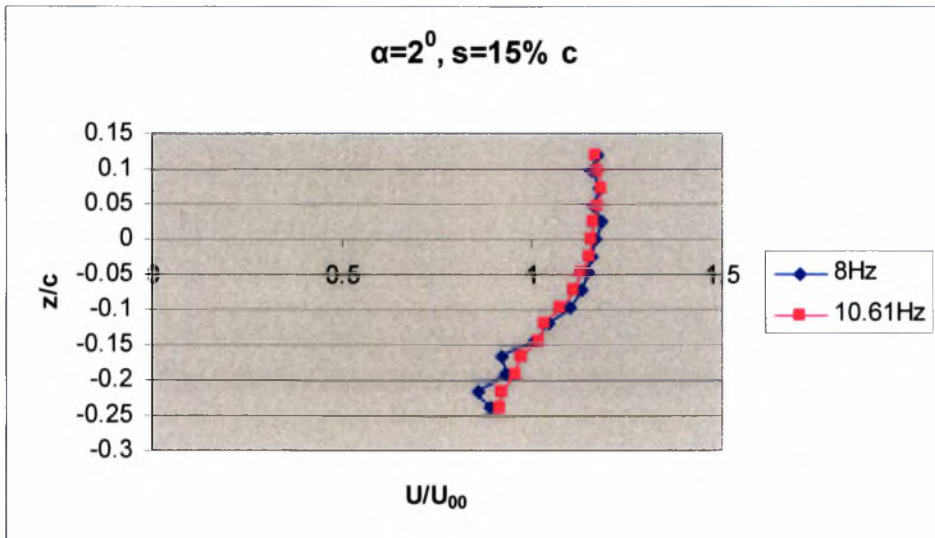
Γράφημα 5.2 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=10\%c$



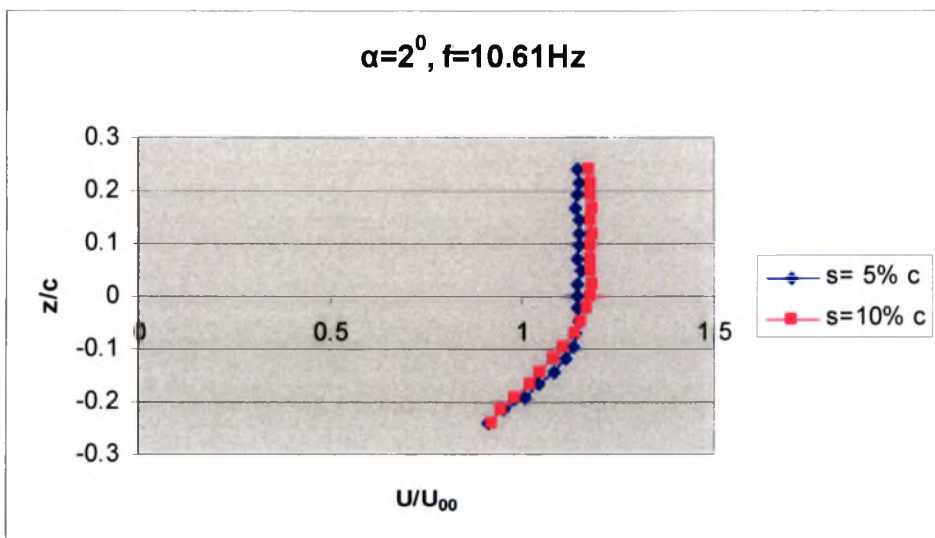
Γράφημα 5.3 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=15\%c$



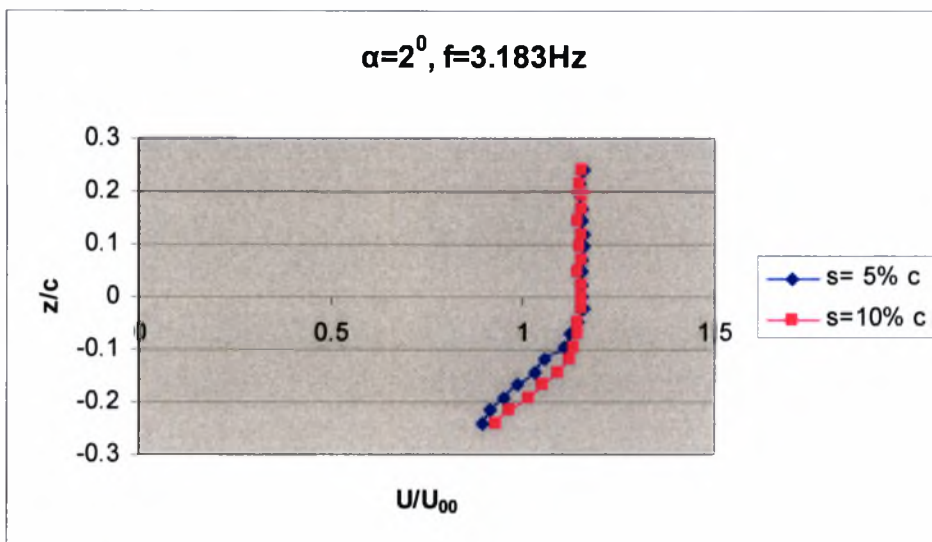
Γράφημα 5.4 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και σε εύρος ταλάντωσης $s=10\%c$



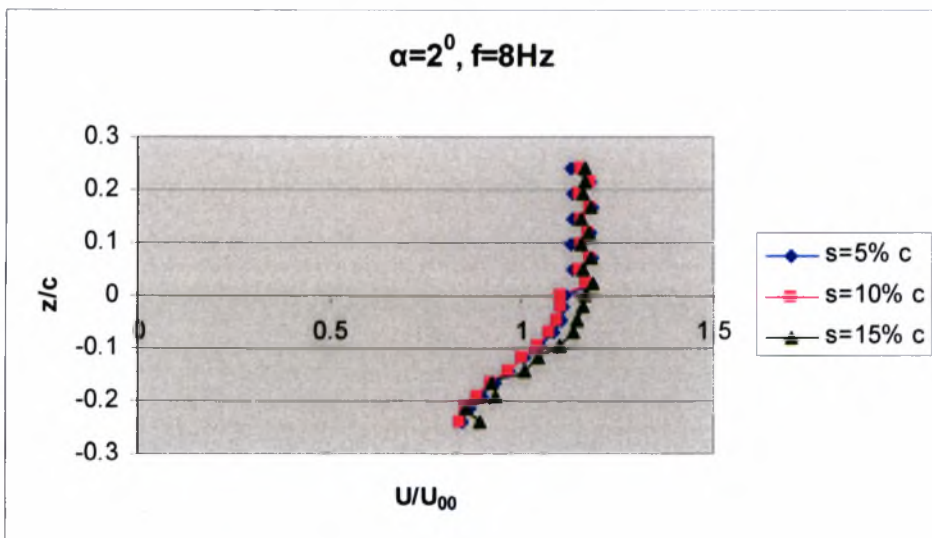
Γράφημα 5.5 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=15\% c$



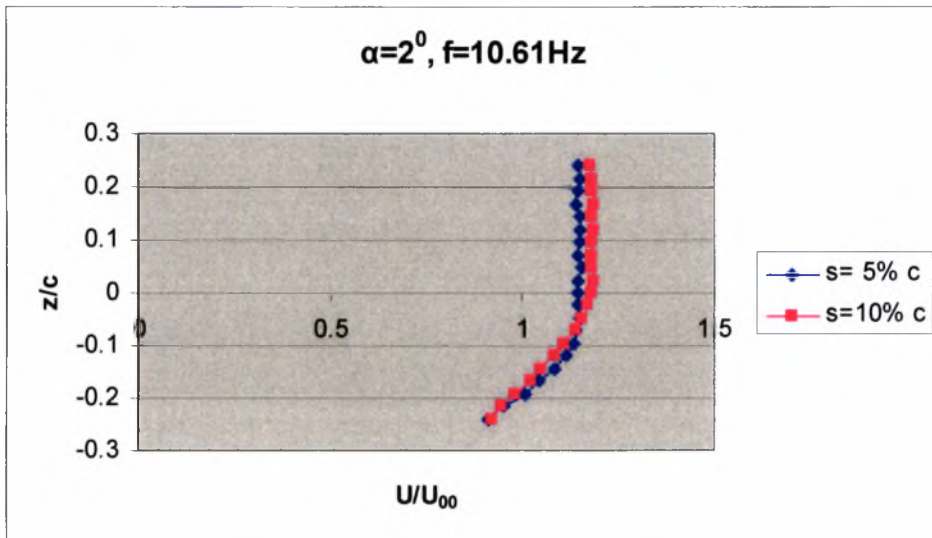
Γράφημα 5.6 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=10.61\text{Hz}$



Γράφημα 5.7 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^{\circ}$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=3,183\text{Hz}$



Γράφημα 5.8 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^{\circ}$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=8\text{Hz}$



Γράφημα 5.9 Κατανομή ταχύτητας σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και συχνότητα ταλάντωσης $f=10.61\text{Hz}$

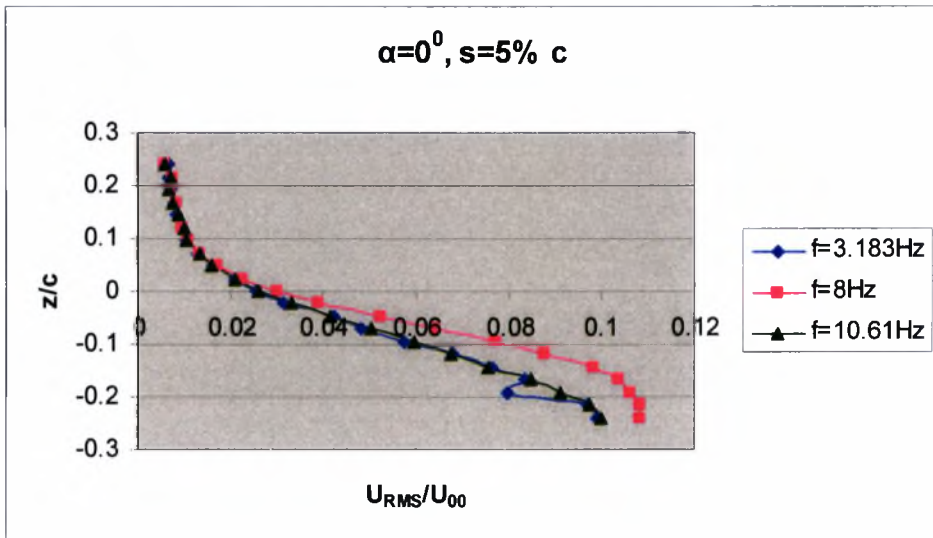
Σε γωνία προσβολής 0° και για συχνότητα ταλάντωσης 8Hz παρατηρείται μείωση των τιμών της ταχύτητας σε σχέση με τις άλλες συχνότητες η οποία γίνεται μικρότερη με την αύξηση του εύρους ταλάντωσης. Το ίδιο παρατηρείται και για γωνία προσβολής 2° κυρίως στις τιμές κάτω από την ακμή φυγής.

Επίσης στην συχνότητα 8Hz παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας κυρίως πάνω από την ακμή φυγής η οποία γίνεται μικρότερη με την αύξηση του εύρους.

Οι σχετικά χαμηλές τιμές της μέσης ταχύτητας κάτω από την κεντρική γραμμή ($z < 0$) αποδίδονται στην παρουσία της κυλινδρικής ράβδου στήριξης του πτερυγίου (απόρρευμα ράβδου στήριξης).

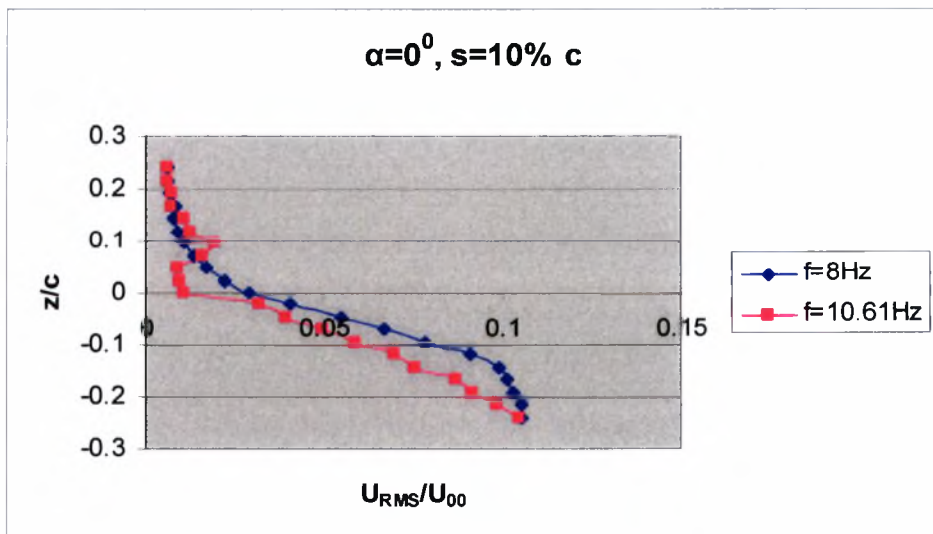
5.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ u_{RMS}/U_∞

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης της τύρβης στο απόρευμα του πτερυγίου και σε μήκος δύο χορδών πίσω από την ακμή φυγής. Η μελέτη έγινε για των ίδιο συνδυασμό παραμέτρων που παρουσιάστηκε και παραπάνω για την μέση ταχύτητα.

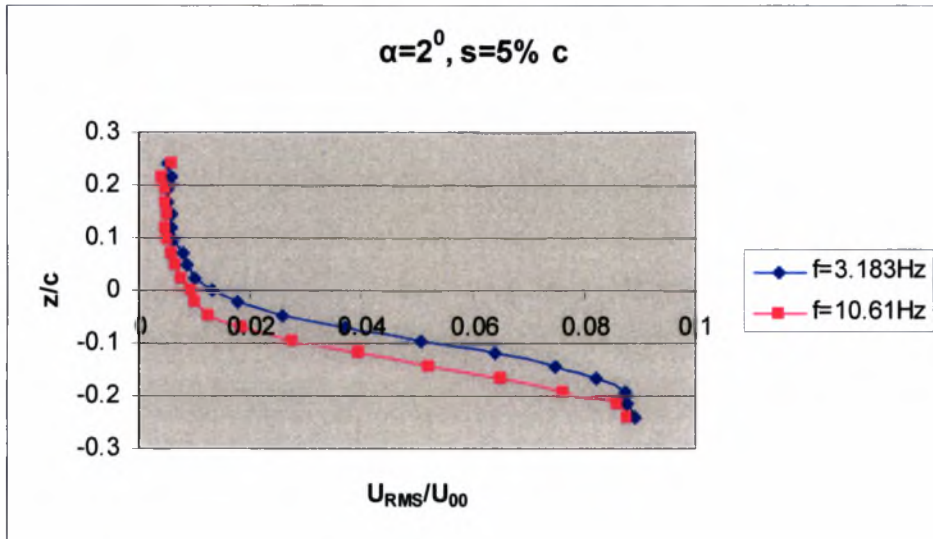


Γράφημα 5.10 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=5\%c$

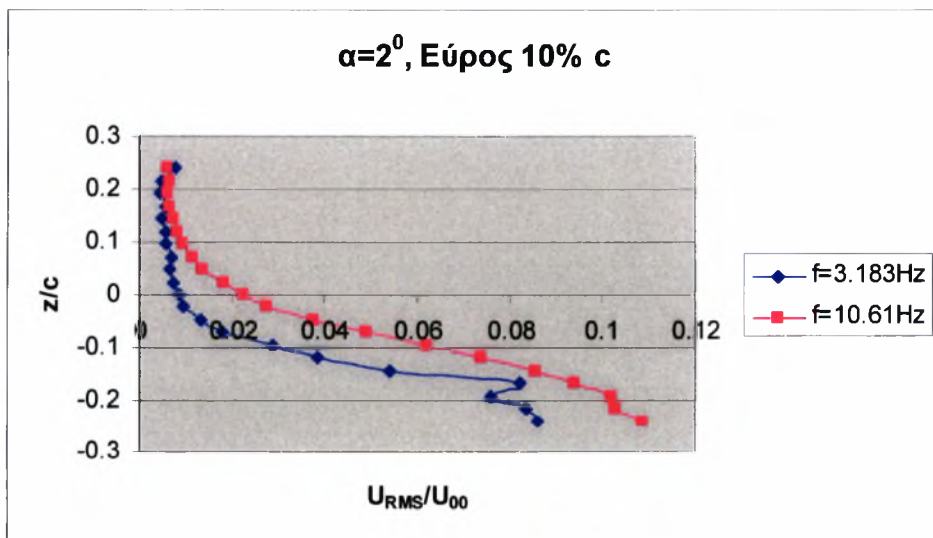
Παρατηρήθηκε αύξηση της τύρβης κατά τα αρνητικά z (θεωρώντας σαν αρνητική τη διεύθυνση κάτω από την ακμή φυγής) για συχνότητα ταλάντωσης 8Hz σε ποσοστό περίπου 8%. Αντίθετα παρατηρήθηκε σχεδόν ταύτιση των τιμών για τις συχνότητες 3.183 και 10.61Hz. Η παρουσία της ράβδου στήριξης αυξάνει την τύρβη (αρνητικά z)



Γράφημα 5.11 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=0^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=10\%c$



Γράφημα 5.12 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $s=5\%c$

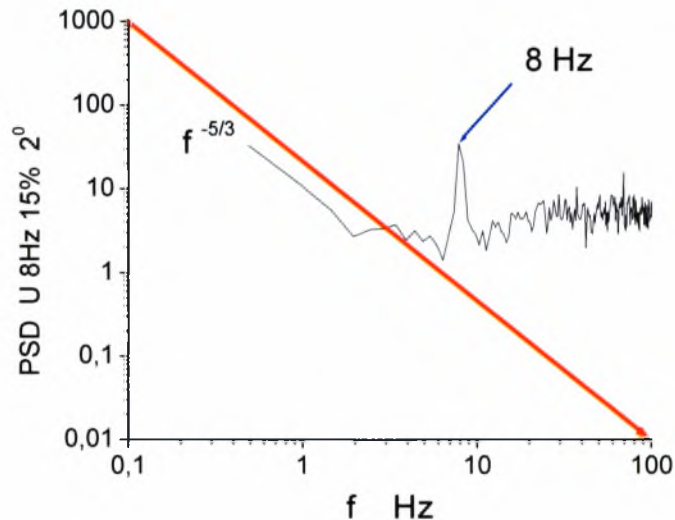


Γράφημα 5.13 Κατανομή έντασης τύρβης σε γωνία προσβολής $\alpha=2^\circ$ και εύρος ταλάντωσης $10\%c$

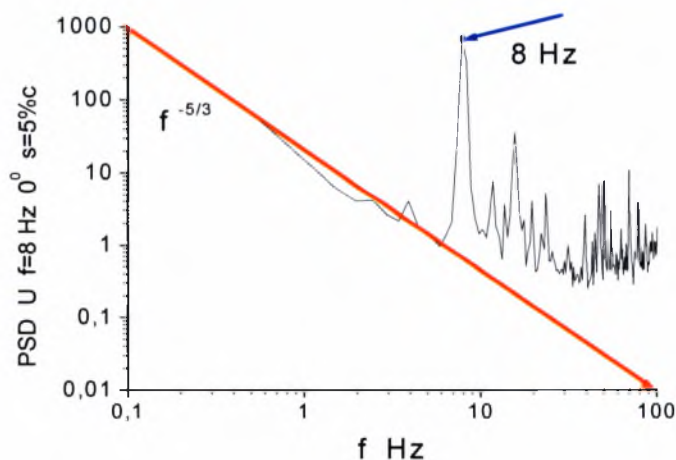
Σε γωνία προσβολής 2° παρατηρείται αύξηση της έντασης της τύρβης με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης σε μεγάλο εύρος ταλάντωσης ενώ παρατηρείται μείωση της έντασης της τύρβης για τη μεγάλη συχνότητα, 10.61Hz, στο μικρό εύρος ταλάντωσης 0.6cm.

Σε γωνία προσβολής 0° παρατηρείται αύξηση της έντασης της τύρβης για συχνότητα ταλάντωσης 8Hz.

Οι φασματικές πυκνότητες των ταχυτήτων στο απόρευμα εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό τύρβης από ότι οι σχετικές ταχύτητες U_{π} λόγω της αποκολλημένης ροής, των τυρβωδών οριακών στρωμάτων και της τύρβης στο απόρευμα της ράβδου στήριξης.



Γράφημα 5.14 Φασματική πυκνότητα ταχύτητας στο απόρευμα, $\alpha=2^\circ$, $s=15\%c$, $f=8\text{Hz}$



Γράφημα 5.15 Φασματική πυκνότητα ταχύτητας στο απόρευμα, $\alpha=0^\circ$, $s=5\%c$, $f=8\text{Hz}$

5.4 Μεθοδολογία μέτρησης δυνάμεων στο πτερύγιο

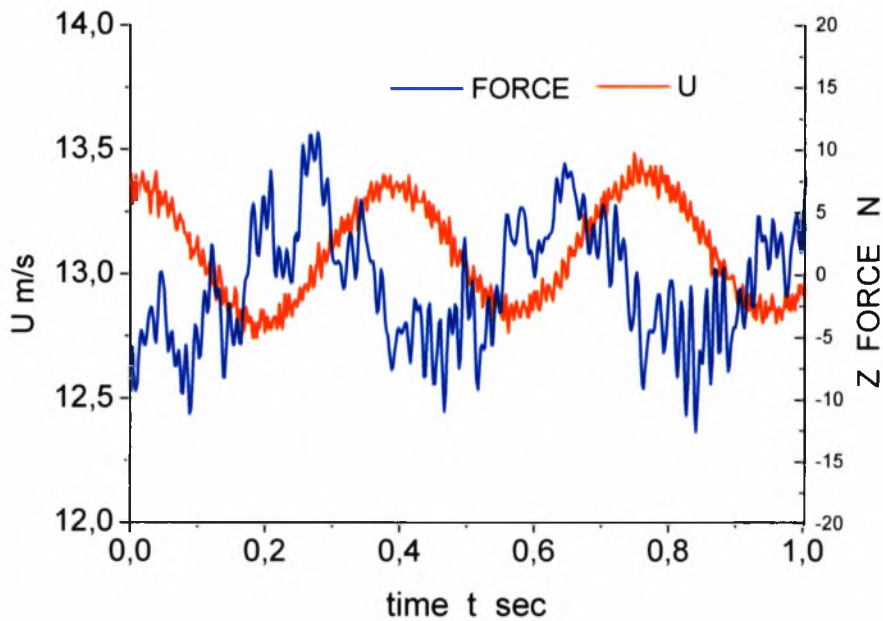
Η μέτρηση των φορτίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τριαξονικού πιεζοηλεκτρικού KISTLER ο οποίος τοποθετήθηκε στο πτερύγιο όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις καταγραφόταν και το σήμα που θα προσδιόριζε την φάση μεταξύ άνωσης και θέσης (ή ταχύτητας) της πτέρυγας και το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν η ταχύτητα $U_z(t)$ του στελέχους του θερμοανεμομέτρου το οποίο κινούνταν μαζί (σε φάση) με την ράβδο στήριξης του πτερυγίου.

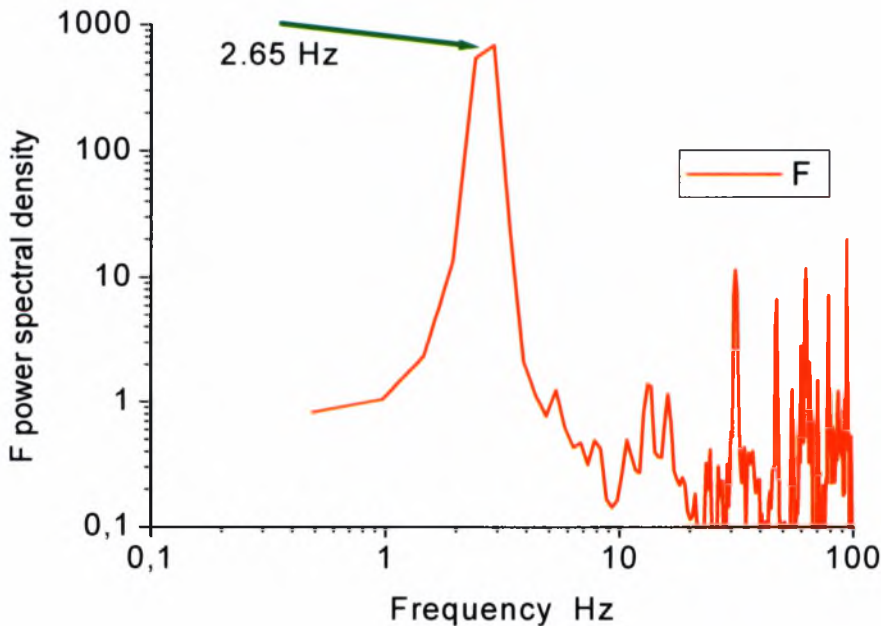
Η κατακόρυφη δύναμη περιέχει τις κατακόρυφες αδρανειακές δυνάμεις και τις αεροδυναμικές (άνωση). Κάθε μέτρηση επαναλαμβανόταν με και χωρίς ροή στην αεροσήραγγα ώστε να προκύψει η καθαρή τιμή της άνωσης με αφαίρεση. Η αφαίρεση των χρονοσειρών γινόταν αφού προσδιορίζονταν πρώτα η διαφορά φάσης μεταξύ της κίνησης της πτέρυγας και του αντίστοιχου κατακόρυφου φορτίου.

Κριτήριο για την σωστή αφαίρεση των τιμών των δυο χρονοσειρών κατακόρυφης δύναμης με και χωρίς ροή, ώστε να απαλειφθούν οι αδρανειακές δυνάμεις και να προκύψει η καθαρή ασταθής άνωση, είναι η πτέρυγα να βρίσκεται χρονικά (άρα και φασικά) στην ίδια γεωμετρική θέση κατά την διάρκεια του κύκλου ταλάντωσης (με / χωρίς ροή U). Η γεωμετρική θέση προσδιορίζεται από τον υπολογισμό της ταχύτητας U_n στερεού σώματος (της άκαμπτης πτέρυγας) σε κάθε χρονική στιγμή. Οι τρεις τρόποι για να ευρεθεί η U_n είναι α) από την ένδειξη του ανεμομέτρου (σχετική ταχύτητα της πτέρυγας ως προς την U), β) από την ένδειξη του αισθητήρα θέσης με παραγωγή και γ) από το video με ψηφιακή ανάλυση.

Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνονται οι στιγμιαίες τιμές της κατακόρυφης δύναμης $F(t)$ και της ταχύτητας του θερμοανεμομέτρου $U(t)$ για $f=2.65$ Hz, $\alpha=0^\circ$ και ονομαστική ταχύτητα 13 m/s. Η διαφορά φάσης προσδιορίζεται με το πρόγραμμα phase1 στην συχνότητα ταλάντωσης ώστε να εξαλειφθούν οι επιδράσεις της τύρβης της αεροσήραγγας και των οριακών στρωμάτων της πτέρυγας και της τυχόν αποκολλημένης ροής (ιδιαίτερα για μεγαλύτερες γωνίες προσβολής). Το αντίστοιχο φάσμα της F φαίνεται κατωτέρω.



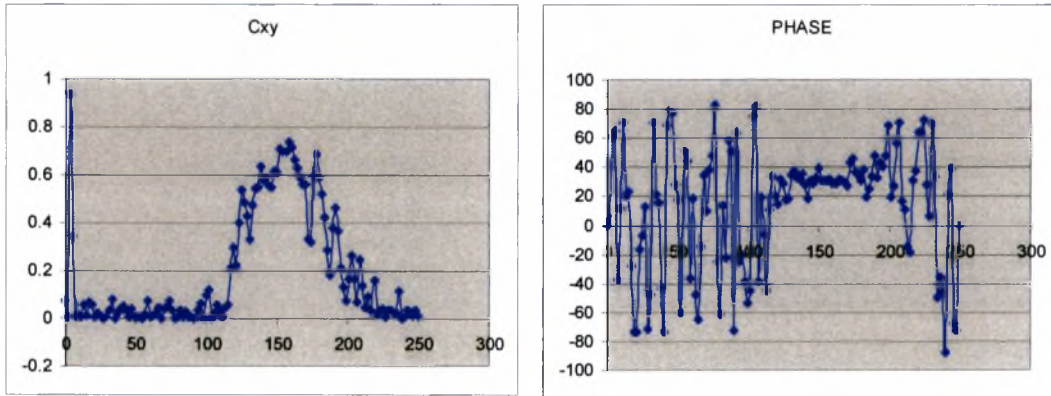
Γράφημα 5.16 Χρονοσειρά κατακόρυφης δύναμης F (μπλε, με θόρυβο) και σχετικής ταχύτητας U_{η} (κόκκινο) στην διάρκεια τριών κύκλων. Η διαφορά φάσης υπολογίζεται στατιστικά από το πρόγραμμα phase1



Γράφημα 5.17 Φάσμα κατακόρυφης δύναμης F . Η αιχμή είναι στην συχνότητα ταλάντωσης της πτέρυγας

5.4.1 Υπολογισμός διαφοράς φάσης από φασματική ανάλυση (cross power spectral density / coherence)-Πρόγραμμα phase1

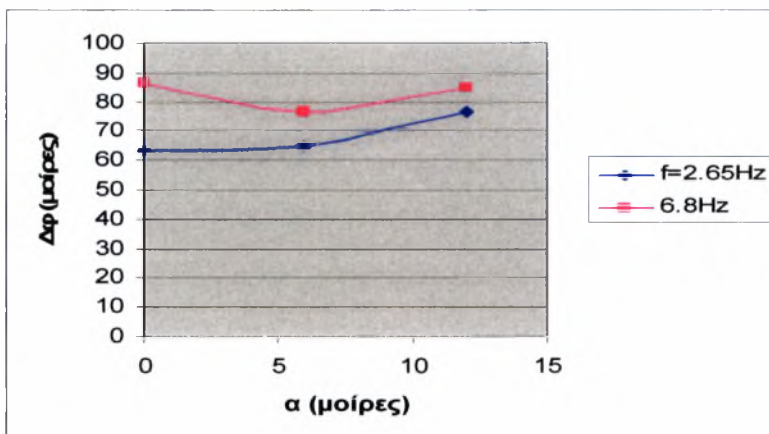
Το πρόγραμμα phase1 δημιουργήθηκε σε περιβάλλον MATLAB με σκοπό τον προσδιορισμό της διαφοράς φάσης μεταξύ της άνωσης και της θέσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.



Γράφημα 5.18 Παράδειγμα cross power spectral density C_{xy} και φάσης PHASE μεταξύ δυο σημάτων που έχουν περιοδικό περιεχόμενο περίπου στα 4 Hz (narrowband) 160 Hz (broadband). Οι αντίστοιχες διαφορές φάσης είναι περίπου 60° και 30° .

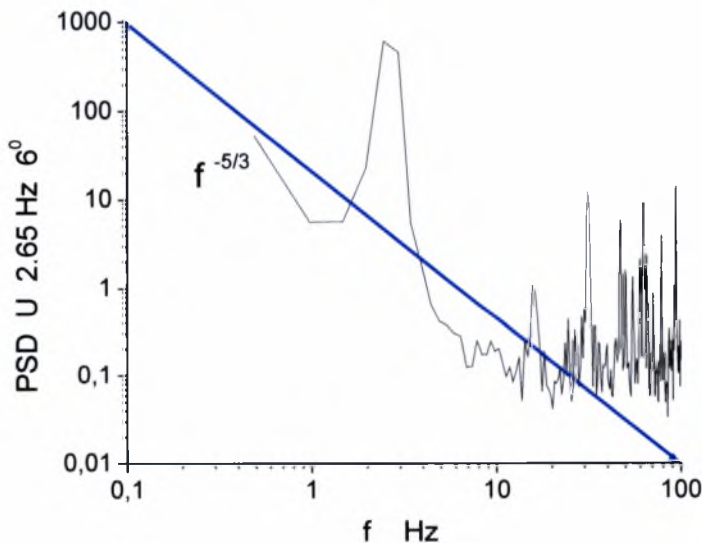
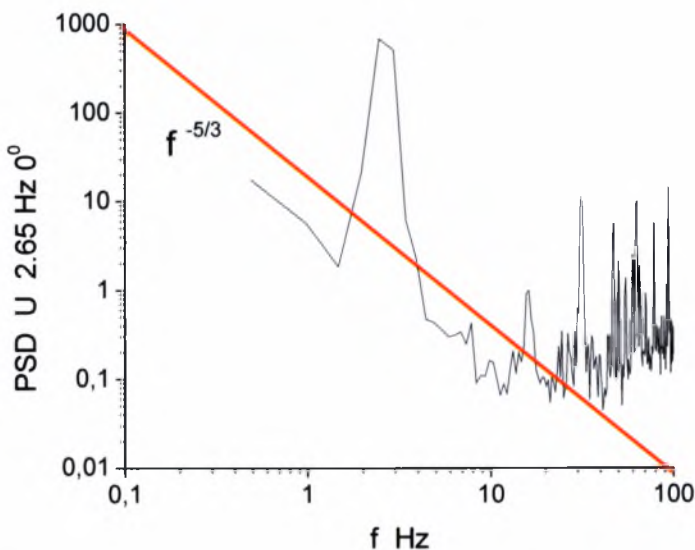
5.4.2 Αποτελέσματα του υπολογισμού διαφοράς φάσης από φασματική ανάλυση

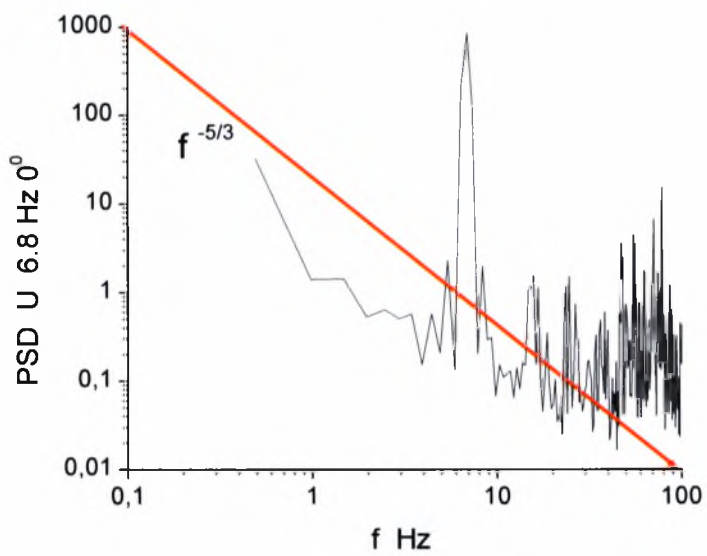
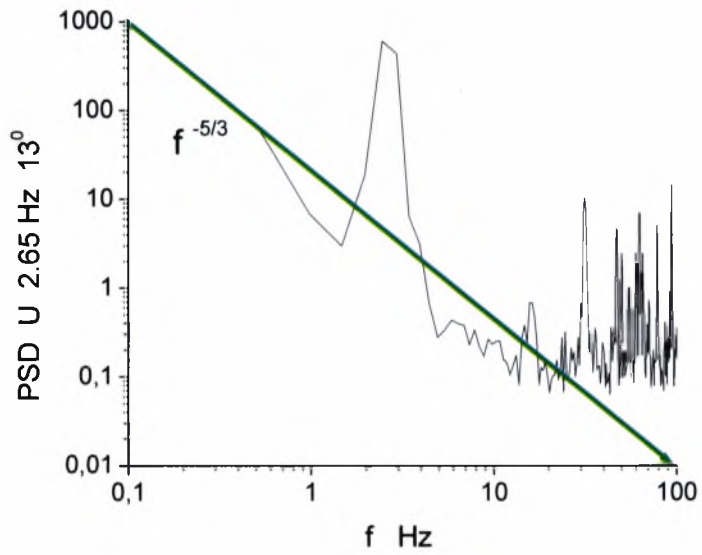
Η μεταβολή της διαφοράς φάσης με την συχνότητα και την γωνία προσβολής φαίνεται στο γράφημα που ακολουθεί. Αύξηση της συχνότητας f και της ανηγμένης συχνότητας k οδηγεί σε αύξηση της διαφοράς φάσης. Καθώς προσεγγίζεται η αποκόλληση του οριακού στρώματος και η απώλεια στήριξης η διαφορά φάσης επίσης αυξάνεται.

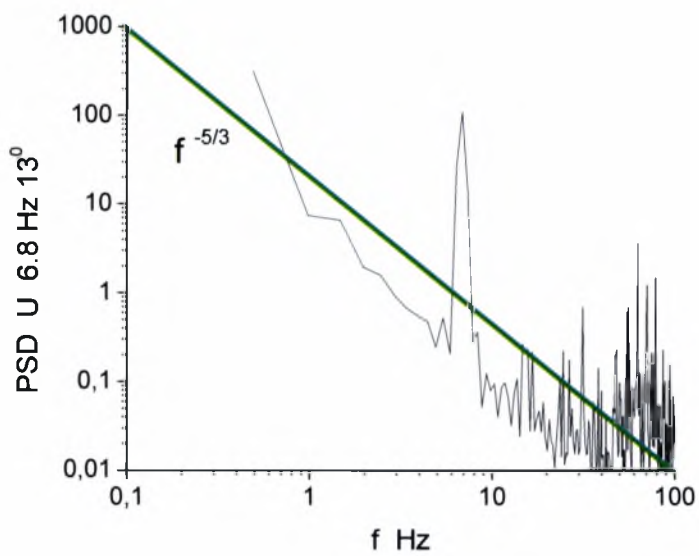
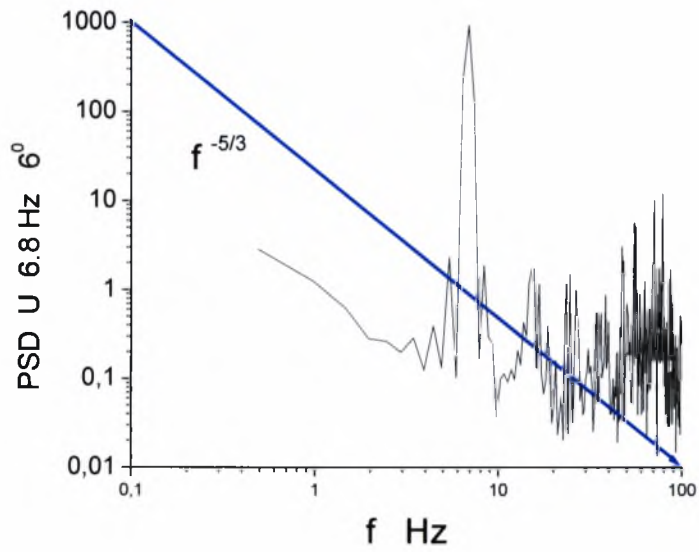


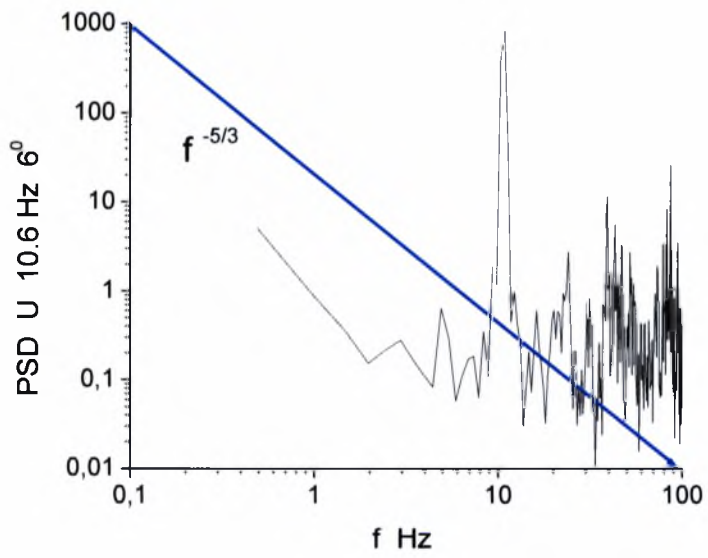
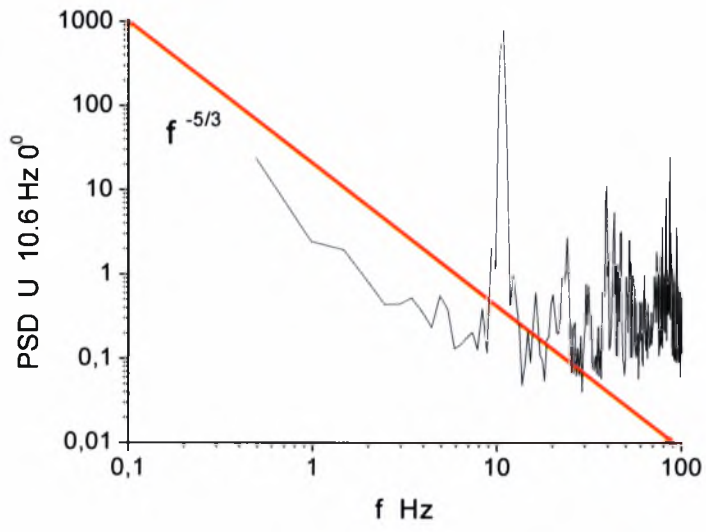
Γράφημα 5.19 Μεταβολή της διαφοράς φάσης με την συχνότητα και την γωνία προσβολής

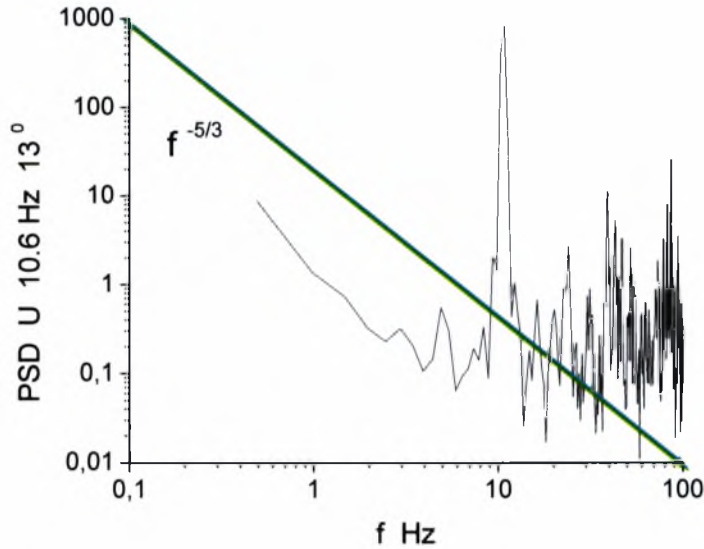
Οι φασματικές πυκνότητες των ταχυτήτων U_H δεν επηρεάζονται σημαντικά από την γωνία προσβολής όπως δείχνουν τα κατωτέρω διαγράμματα. Φαίνεται επίσης η τύρβη της αεροσήραγγας και θόρυβος και πιθανόν μηχανικές ταλαντώσεις σε υψηλότερες συχνότητες.











Γράφημα 5.20 Φασματικές πυκνότητες σχετικής ταχύτητας U_R (ο αισθητήρας ταχύτητας κινείται σε φάση μαζί με την πτέρυγα).

5.5 Αποτελέσματα μέτρησης ασταθών φορτίων στο περύγιο

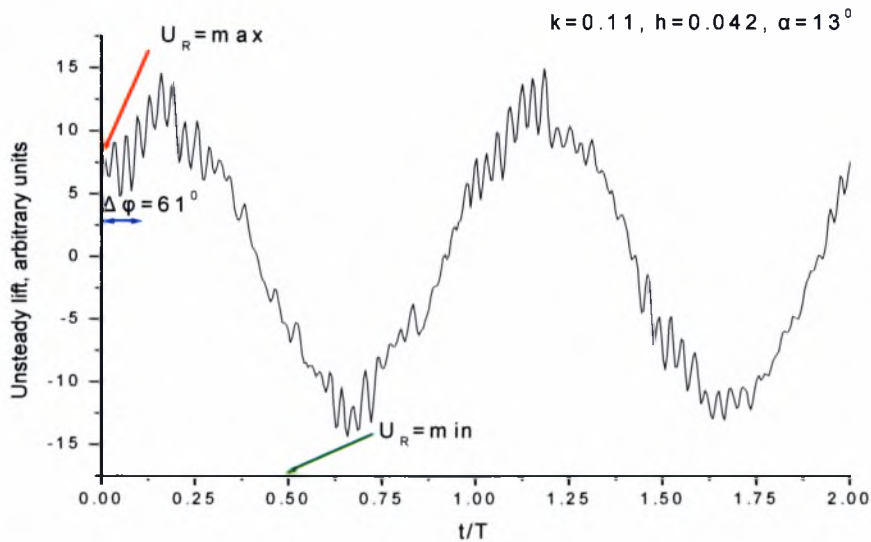
Οι αδιάστατες παράμετροι σχετικές με τα ασταθή φαινόμενα είναι η ανηγμένη

συχνότητα ταλάντωσης $k = \frac{\pi f c}{U_\infty} = \frac{\omega c}{2U_\infty}$ όπου $\omega = 2\pi f$ είναι η κυκλική συχνότητα

$$h = \frac{s\omega}{U_\infty}$$

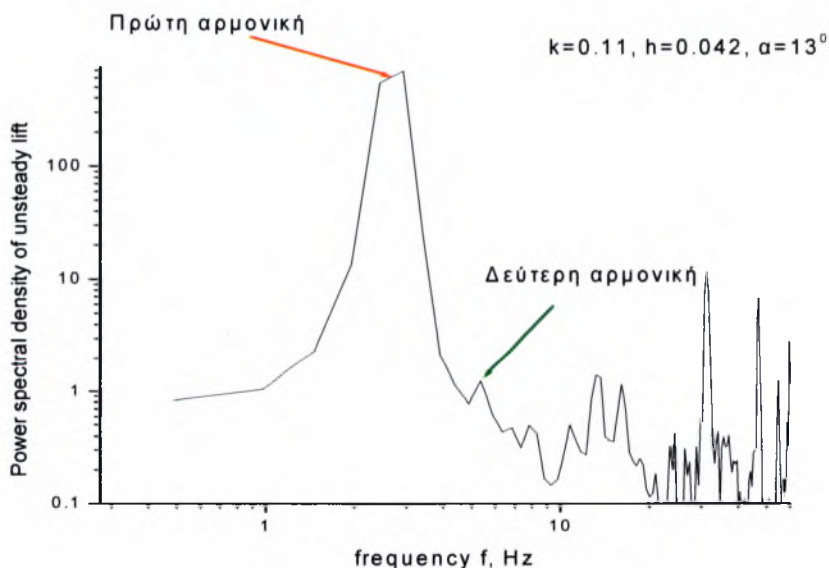
και το ανηγμένο εύρος ταλάντωσης h . Στη συγκεκριμένη δουλειά το k παίρνει τις τιμές 0.11 και 0.29 και το h είναι ίσο με 0.042 Η γωνία προσβολής είναι $\alpha = 13^\circ$ για τιμή του αριθμού Reynolds 10000.

Στο γράφημα που ακολουθεί παρατηρείται ότι αν και η ανηγμένη συχνότητα και το εύρος είναι μικρά υπάρχει απόκλιση από τη ψευδοστατική συμπεριφορά καθώς η διαφορά φάσης μεταξύ της ασταθούς άνωσης και της σχετικής ταχύτητας U_R είναι διαφορετική του μηδενός ($\Delta\phi = 61^\circ$). Ο λόγος είναι ότι οι ταλαντώσεις πραγματοποιούνται πολύ κοντά στην γωνία απώλειας στήριξης, η απόκριση είναι μη γραμμική λόγω της δυναμικής απώλειας στήριξης, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της συνολικής άνωσης.



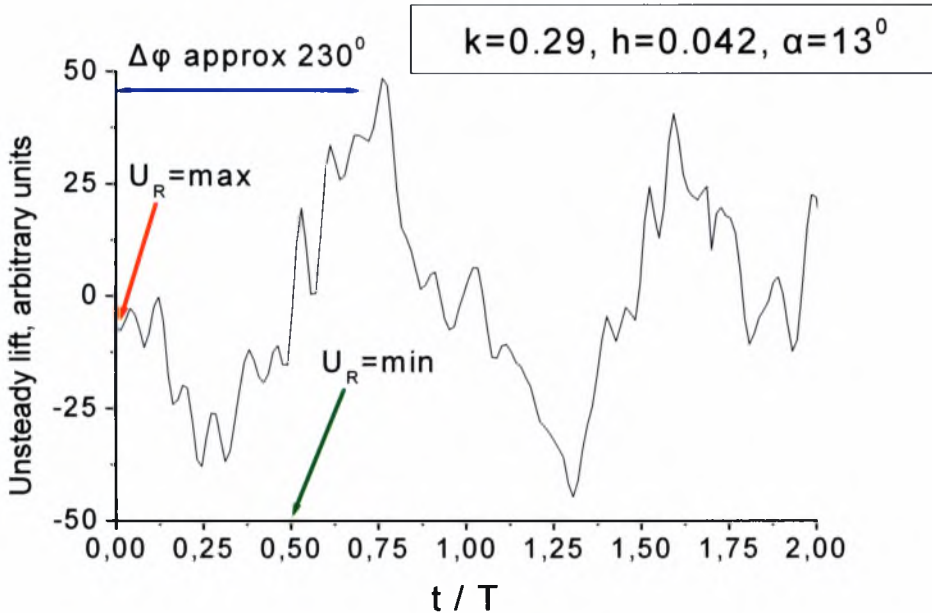
Γράφημα 5.21 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς άνωσης σε $\alpha = 13^\circ$, $k=0.11, h = 0.042$

Η αποκόλληση της ροής μειώνει την αιχμηρότητα του φάσματος όπως φαίνεται παρακάτω

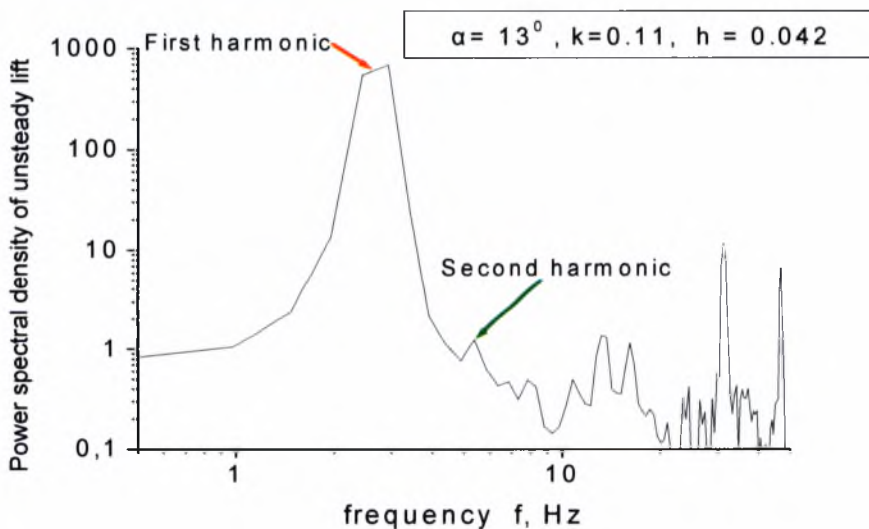


Γράφημα 5.22 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς άνωσης σε $\alpha=13^\circ, k=0.11, h=0.042$

Το πλάτος της ασταθούς δύναμης αυξάνει καθώς το k γίνεται ίσο με 0,29 και η διαφορά φάσης είναι 230° . Η διακύμανση της άνωσης είναι ξανά μεγαλύτερη από αυτή της ανταπόκρισης σε ψευδοστατική κατάσταση.



Γράφημα 5.23 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς άνωσης σε $\alpha = 13^\circ$, $k=0.29$, $h = 0.042$



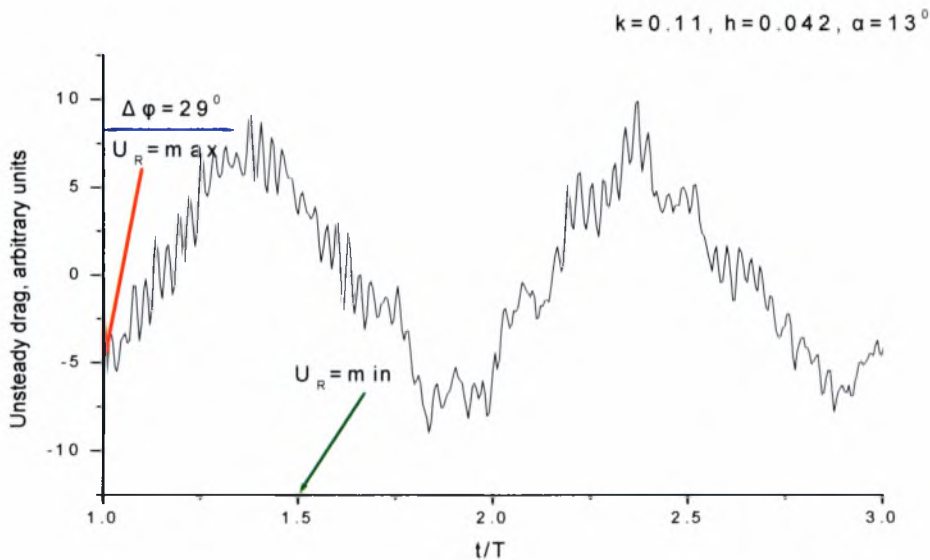
Γράφημα 5.24 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς άνωσης σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.29$, $h=0.042$

Η ανηγμένη συχνότητα, όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω, φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην διακύμανση της ασταθούς άνωσης. Αύξηση της ανηγμένης συχνότητας οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της ασταθούς άνωσης.

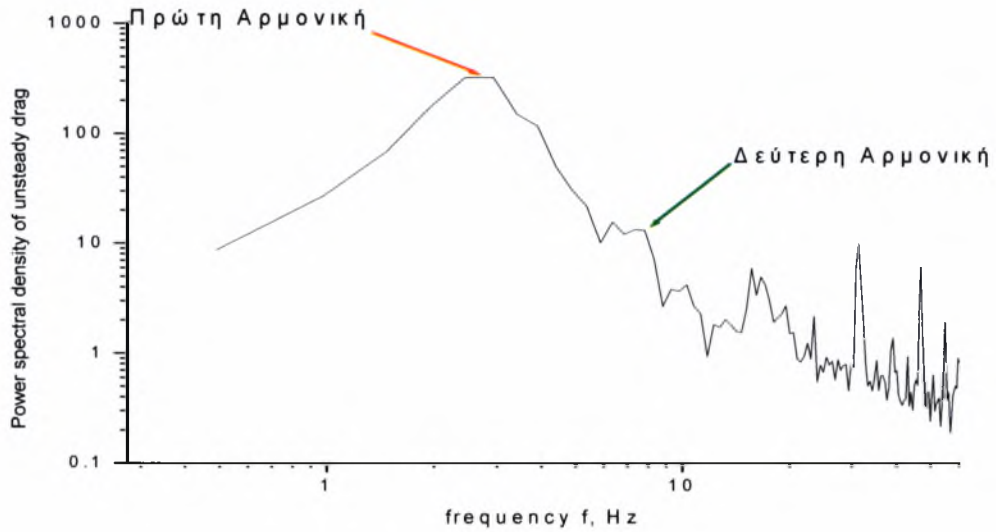
Αναλύοντας τη μεταβολή της άνωσης σε συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την οπτικοποίηση της ροής τη χρονική στιγμή $T/4$ η ασταθής άνωση αυξάνει σημειώνοντας και τη μέγιστη τιμή της καθώς η δίνη στην ακμή φυγής έχει σχηματιστεί πλήρως και δίνει μια επίδραση αναρρόφησης στην επάνω επιφάνεια.

Τις χρονικές στιγμές $T/2$ και $3T/4$ η ασταθής άνωση μειώνεται καθώς παρατηρείται αποκόλληση της ροής. Τη χρονική στιγμή T σημειώνεται αύξηση της άνωσης αφού η ροή επανακολλάται στο μεγαλύτερο μέρος της επάνω επιφάνειας.

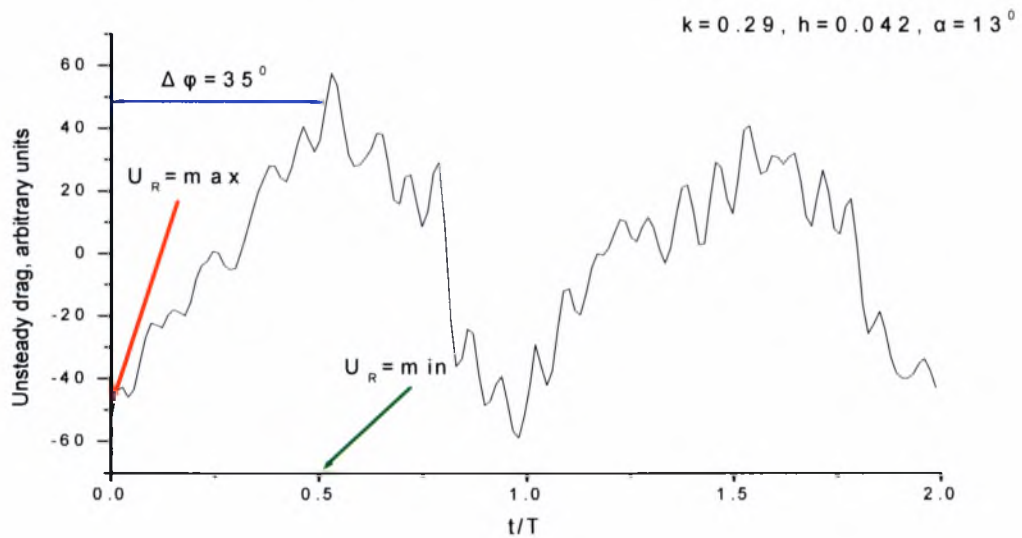
Σε συχνότητα 6.8Hz η άνωση αυξάνεται τη χρονική στιγμή $T/2$ και $3T/4$ όπου η ροή επανακολλάται.



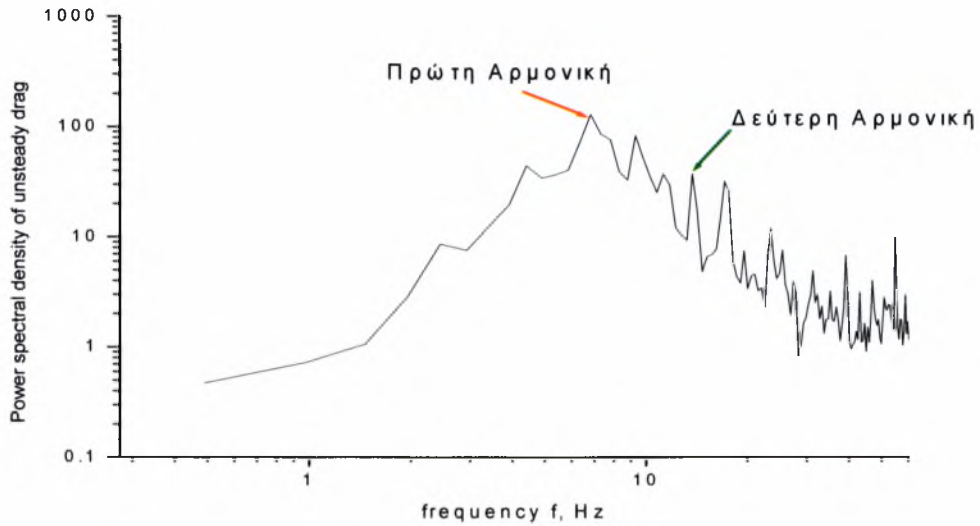
Γράφημα 5.25 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha = 13^\circ$ $k=0.11, h = 0.042$



Γράφημα 5.26 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.11$, $h=0.042$



Γράφημα 5.27 Το μεταβαλλόμενο μέρος της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha = 13^\circ$ $k=0.29$, $h = 0.042$



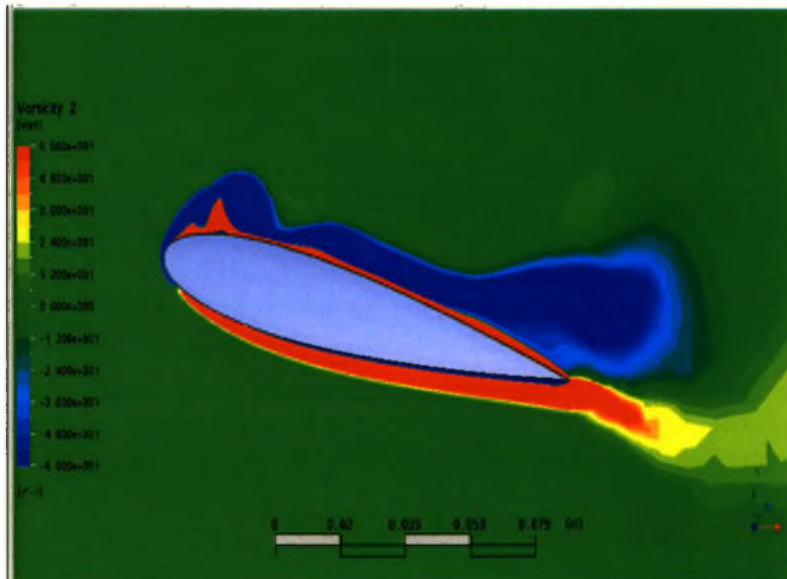
Γράφημα 5.28 Η φασματική πυκνότητα της ασταθούς οπισθέλκουσας σε $\alpha=13^\circ$, $k=0.29$, $h=0.042$

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι με αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης η οπισθέλκουσα αυξάνεται γεγονός που επαληθεύεται από την οπτικοποίηση της ροής όπου η διάταξη των δινών στο απόρρευμα είναι χαρακτηριστική της παραγωγής οπισθέλκουσας.

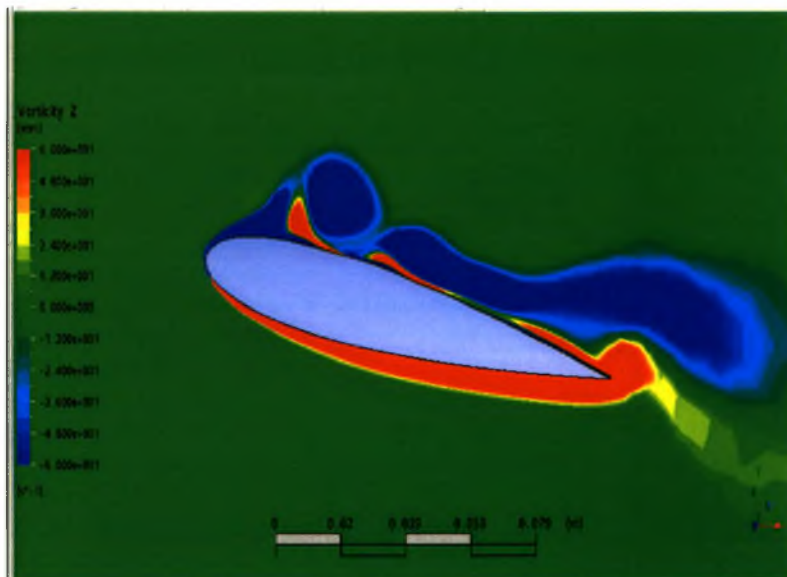
5.6 Αποτελέσματα υπολογισμών

5.6.1 Οπτικοποίηση ροής

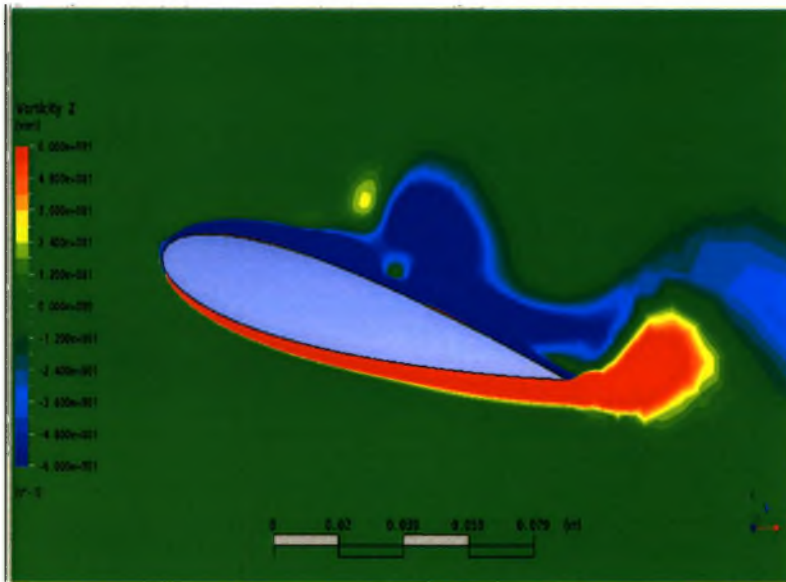
Με τη χρήση του CFX πραγματοποιήθηκε μελέτη του πεδίου ροής με τις παραμέτρους που μελετήθηκαν και πειραματικά.



α)

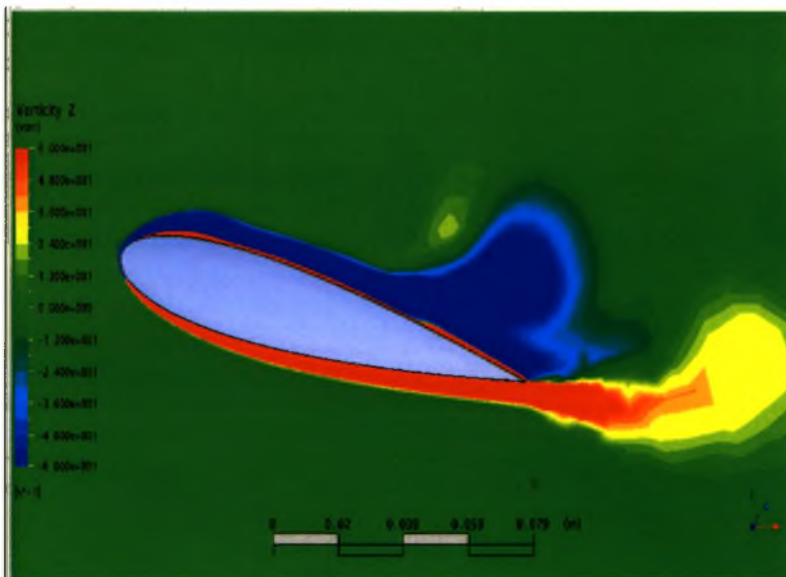


β)

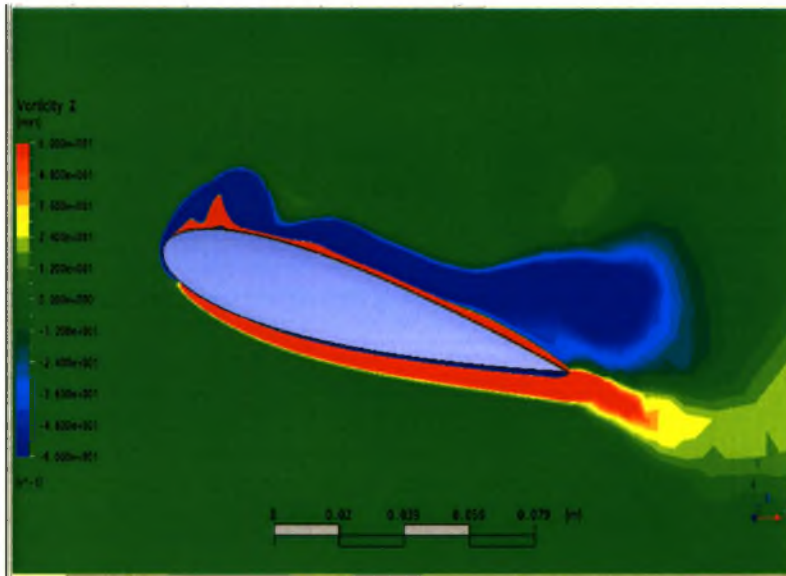


γ)

Εικόνα 5.10 Οπτικοποίηση της ροής κατά την ταλάντωση του πτερυγίου στις χρονικές στιγμές 0, T/4, T/2 (α,β,γ αντίστοιχα) 6.8 Hz, $s=0.2c$, $\alpha = 13^\circ$. Μέση εικόνα ροής



δ)



ε)

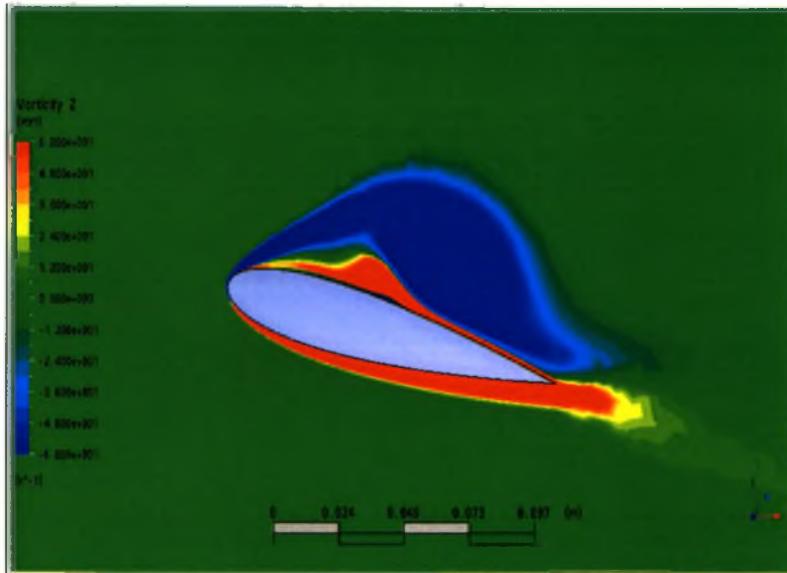
Εικόνα 5.11 Οπτικοποίηση της ροής κατά την ταλάντωση του πτερυγίου στις χρονικές στιγμές $3T/4$, T (δ , ϵ αντίστοιχα) 6.8 Hz , $s=25\text{mm}$, $\alpha = 13^\circ$. Μέση εικόνα ροής

Στη θέση 0 παρατηρείται αποκόλληση της ροής κοντά στην ακμή φυγής και κοντά στην ακμή προσβολής έχουμε το σχηματισμό δίνης η οποία στη συνέχεια αποκολλάται και προχωράει ενώ η ροή είναι αποκολλημένη στην επιφάνεια αναρρόφησης.

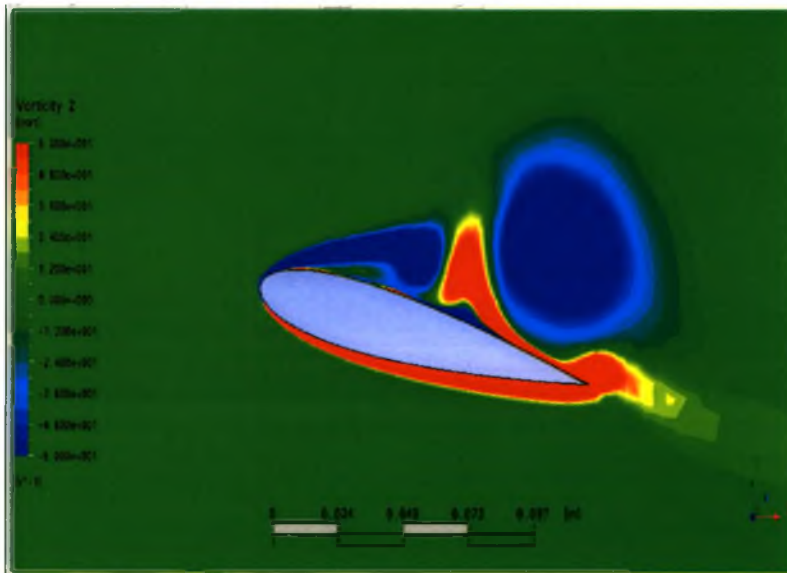
Παρατηρείται επίσης σχηματισμός δίνης αντίθετης φοράς στην ακμή φυγής τη χρονική στιγμή $T/4$ η οποία αναπτύσσεται και εκχύνεται στο απόρρευμα

Παρατηρείται εκτεταμένη αποκόλληση της ροής στην επιφάνεια αναρρόφησης σχεδόν από την ακμή προσβολής κάτι που είχε εμφανιστεί και στο πειραματικό μέρος και σχηματισμός δινών στην επιφάνεια του πτερυγίου.

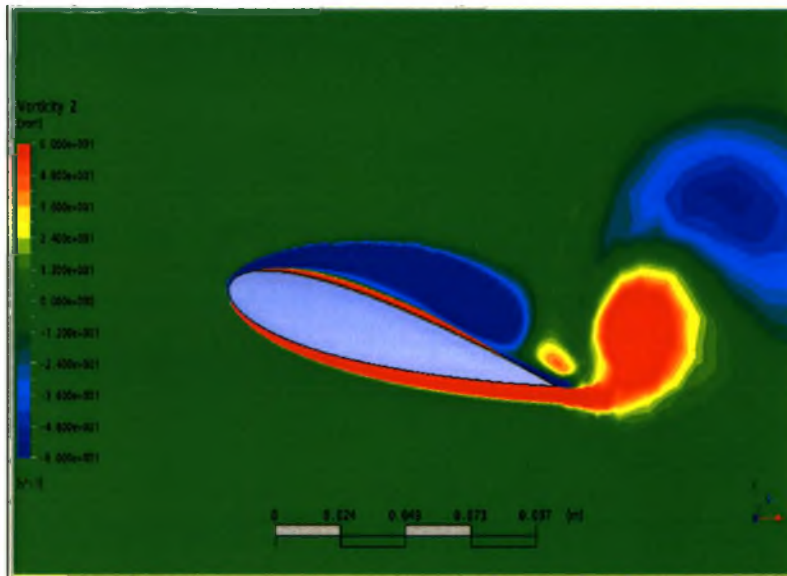
Ακολουθεί απεικόνιση της ροής σε συχνότητα ταλάντωσης του πτερυγίου 2.65Hz , εύρος ταλάντωσης 25mm και γωνία προσβολής 13°



α)

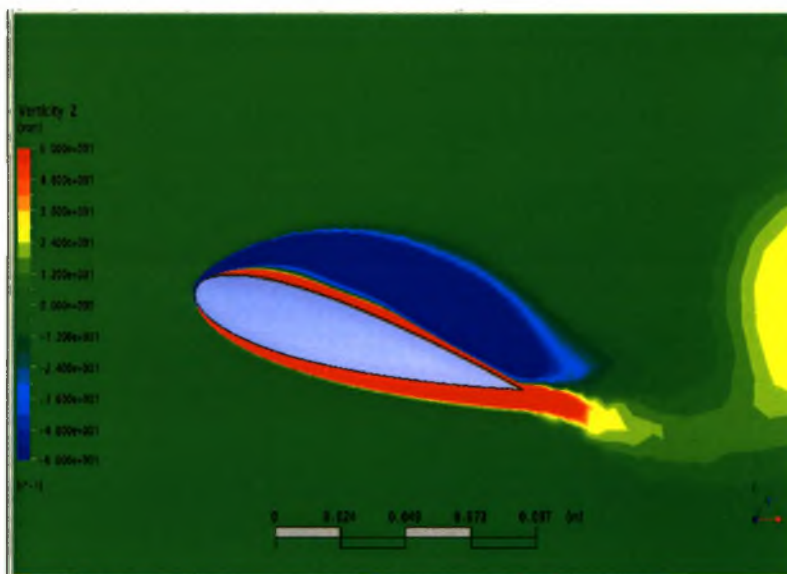


β)

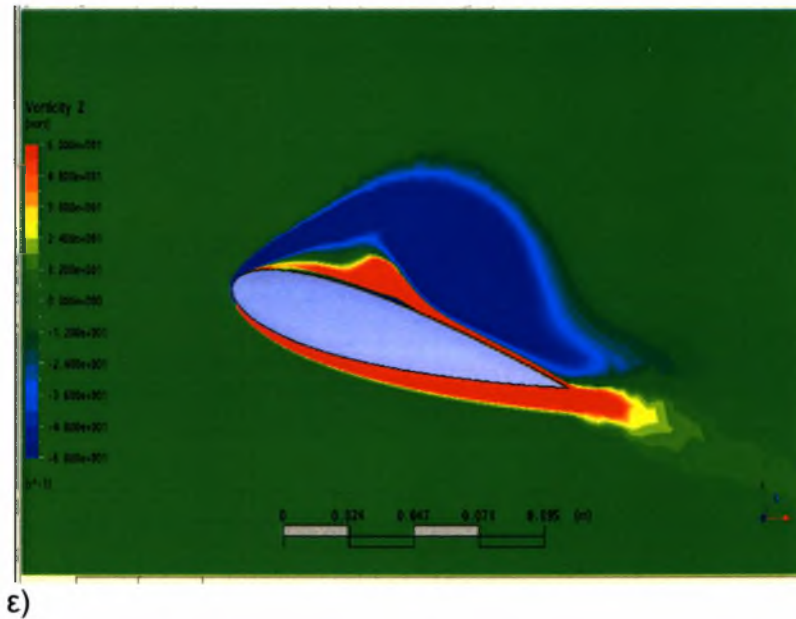


γ)

Εικόνα 5.12 Οπτικοποίηση της ροής κατά την ταλάντωση του πτερυγίου στις χρονικές στιγμές 0, T/4, T/2 (α,β,γ αντίστοιχα) 2.65 Hz, $s=0.2c$, $\alpha = 13^\circ$. Μέση εικόνα ροής.



δ)

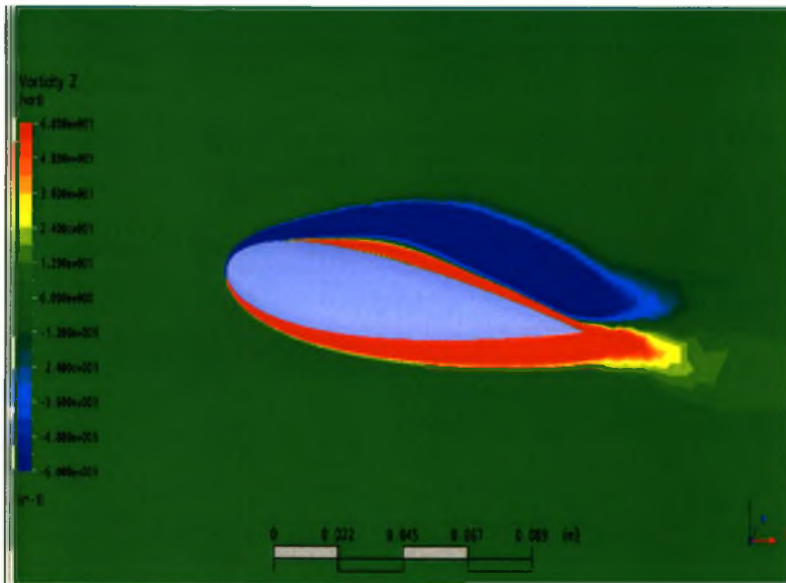


ε)

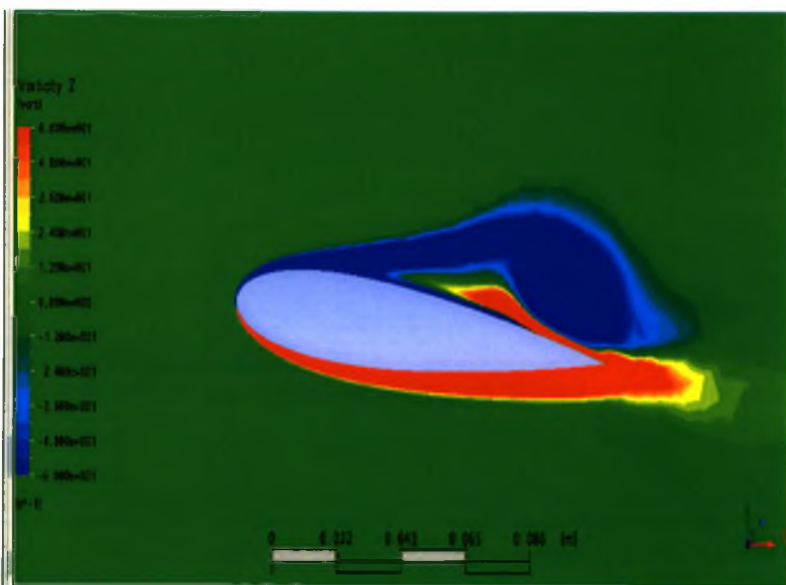
Εικόνα 5.13 Οπτικοποίηση της ροής κατά την ταλάντωση του πτερυγίου στις χρονικές στιγμές $3T/4$, T (δ , ϵ αντίστοιχα) 2.65 Hz , $s=0.2c$, $\alpha = 13^\circ$. Μέση εικόνα ροής

Παρατηρείται αποκολλημένη ροή καθώς και σχηματισμός δινών μεγαλύτερων διαστάσεων από ότι στην συχνότητα των 6.8 Hz , στην επιφάνεια του πτερυγίου και στο απόρευμα όταν η ροή αφήνει την ακμή φυγής.

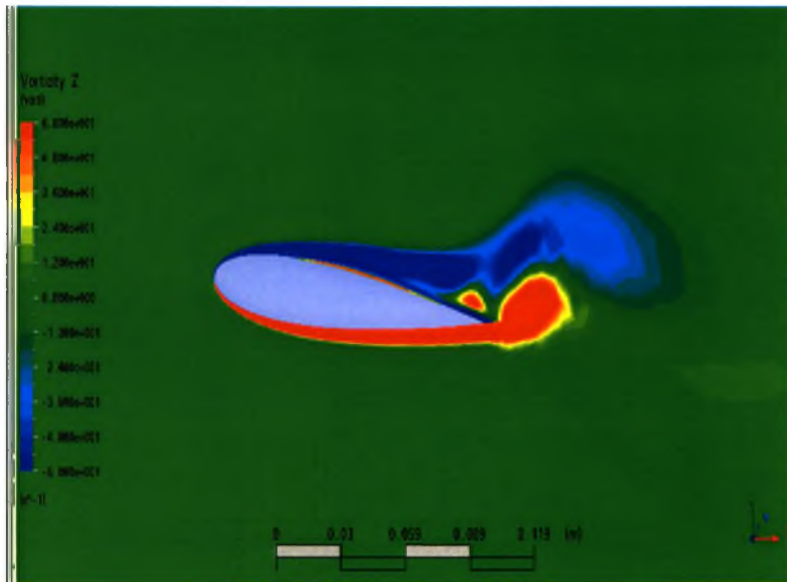
Στη θέση $T/4$ μια μεγάλη δίνη έχει αποκολληθεί ήδη από την επιφάνεια του πτερυγίου η οποία στην επόμενη θέση έχει απομακρυνθεί ενώ μια δίνη σχηματίζεται στην ακμή φυγής και η ροή έχει επανακολληθεί στο μεγαλύτερο μέρος της επάνω επιφάνειας και στην επόμενη θέση η ροή είναι πλήρως προσκολλημένη στην επιφάνεια.



a)

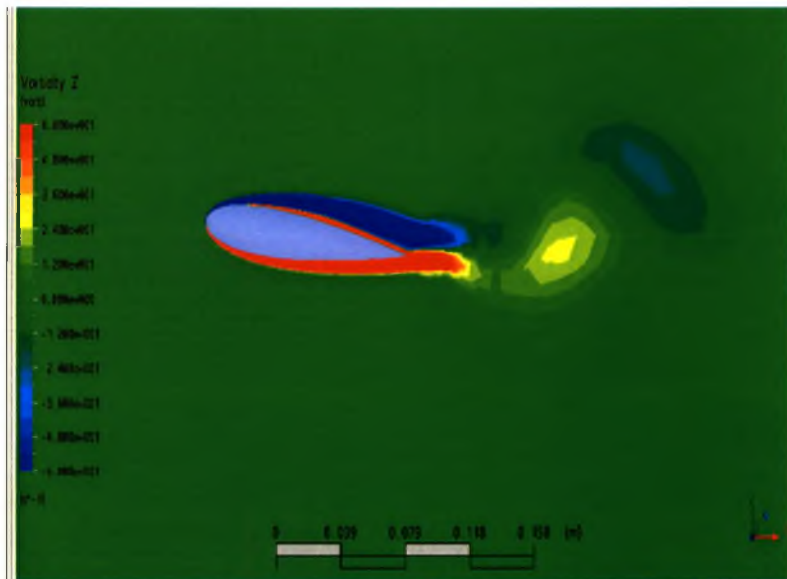


β)

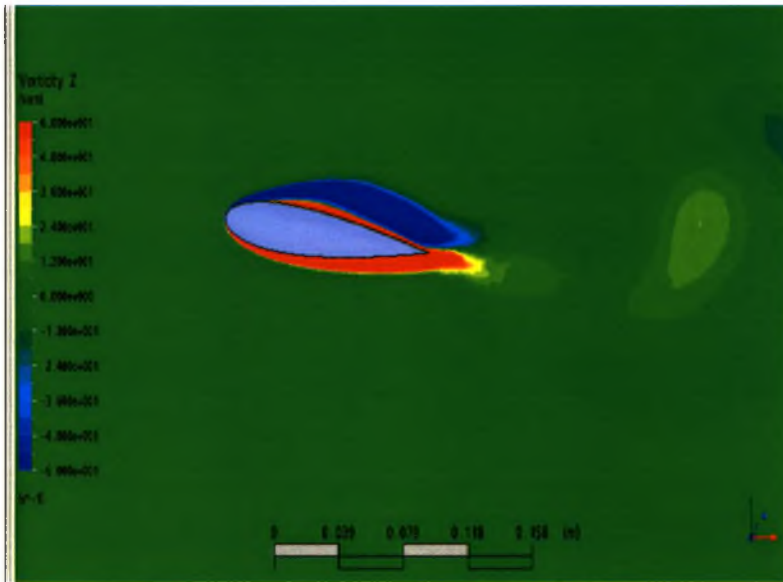


γ)

Εικόνα 5.14 Οπτικοποίηση της ροής κατά την ταλάντωση του πτερυγίου στις χρονικές στιγμές 0, $T/4$, $T/2$ (α,β,γ αντίστοιχα) 2.65 Hz, $s=0.2c$, $\alpha = 6^\circ$. Μέση εικόνα ροής.



δ)



ε)

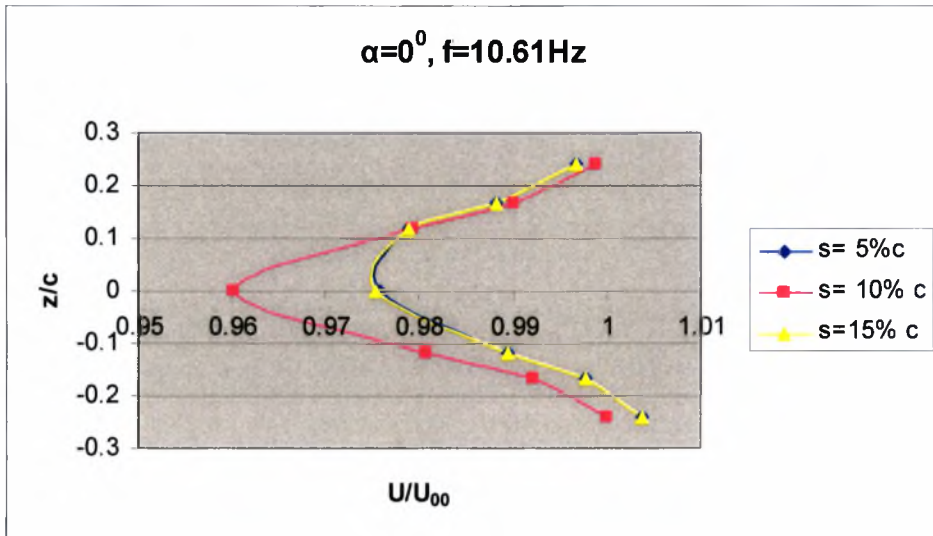
Εικόνα 5.15 Οπτικοποίηση της ροής κατά την ταλάντωση του πτερυγίου στις χρονικές στιγμές $3T/4$, T (δ , ϵ αντίστοιχα) 2.65 Hz , $s=0.2c$, $\alpha = 6^\circ$. Μέση εικόνα ροής

Παρατηρείται αποκόλληση της ροής και στη θέση $T/4$ σχηματίζεται δίνη με φορά δεξιόστροφη. Στη θέση $T/4$ η ροή έχει επανακολληθεί στο μεγαλύτερο μέρος της επάνω επιφάνειας και η δίνη έχει εκχυθεί στο απόρευμα ενώ μια αριστερόστροφη δίνη σχηματίζεται στην ακμή φυγής.

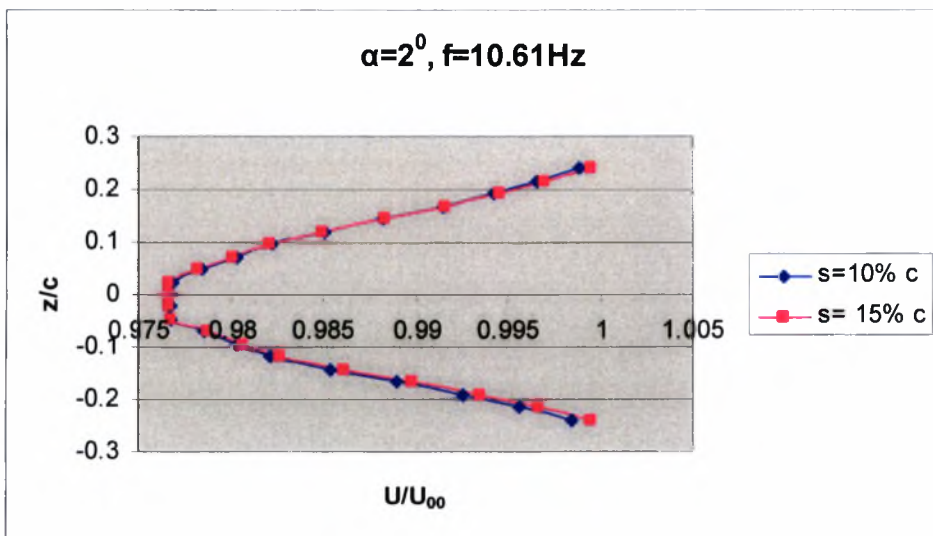
5.6.2 Ταχύτητες στο απόρευμα

Το πεδίο ταχυτήτων στο απόρευμα μελετήθηκε και υπολογιστικά και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά.

Η ταχύτητα ροής είναι 10 m/s , η γωνία προσβολής είναι 0° και 2° , η συχνότητα ταλάντωσης είναι 10.61 Hz και το εύρος είναι στο 5% , 10% και 15% της χορδής c .



Γράφημα 5.29 Η ταχύτητα στο απόρευμα και σε απόσταση δύο χορδών από την ακμή φυγής σε συχνότητα ταλάντωσης 10,61Hz, σε γωνία προσβολής 0° και σε τρεις τιμές του εύρους 5%, 10% και 15% της χορδής

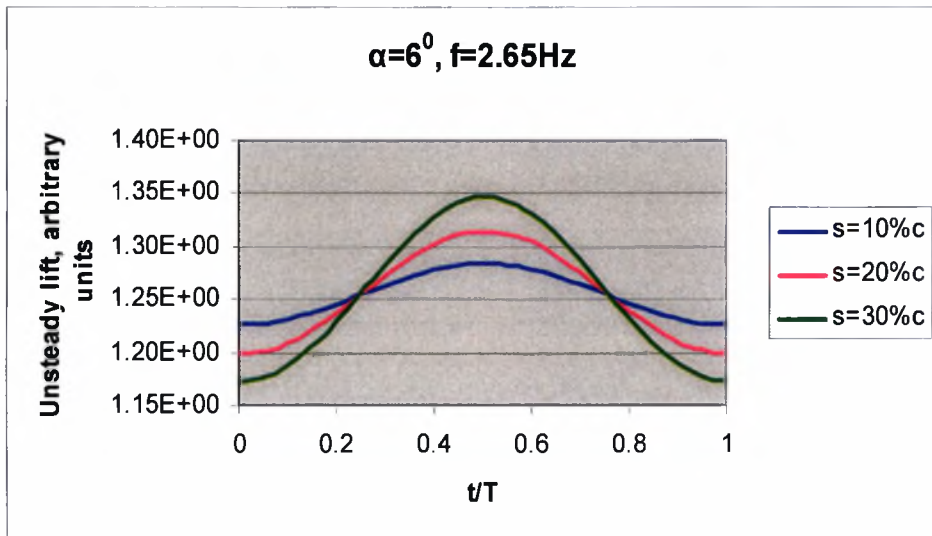


Γράφημα 5.30 Η ταχύτητα στο απόρευμα και σε απόσταση δύο χορδών από την ακμή φυγής σε συχνότητα ταλάντωσης 10,61Hz, σε γωνία προσβολής 2° και σε δύο τιμές του εύρους 10% και 15% της χορδής

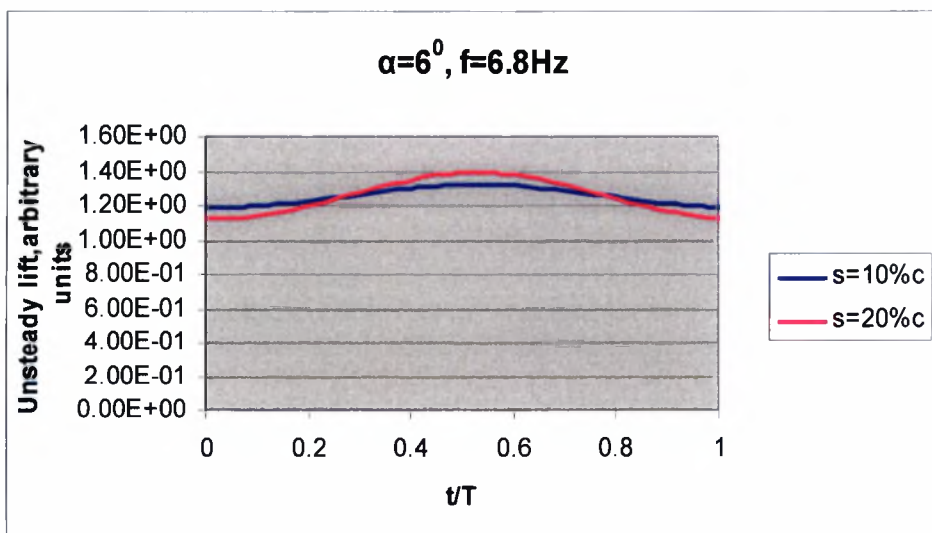
Παρατηρείται συμμετρία πάνω και κάτω από την ακμή φυγής. Η συχνότητα ταλάντωσης και το εύρος δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τις ταχύτητες στο απόρευμα.

5.6.3 Ασταθή αεροδυναμικά φορτία

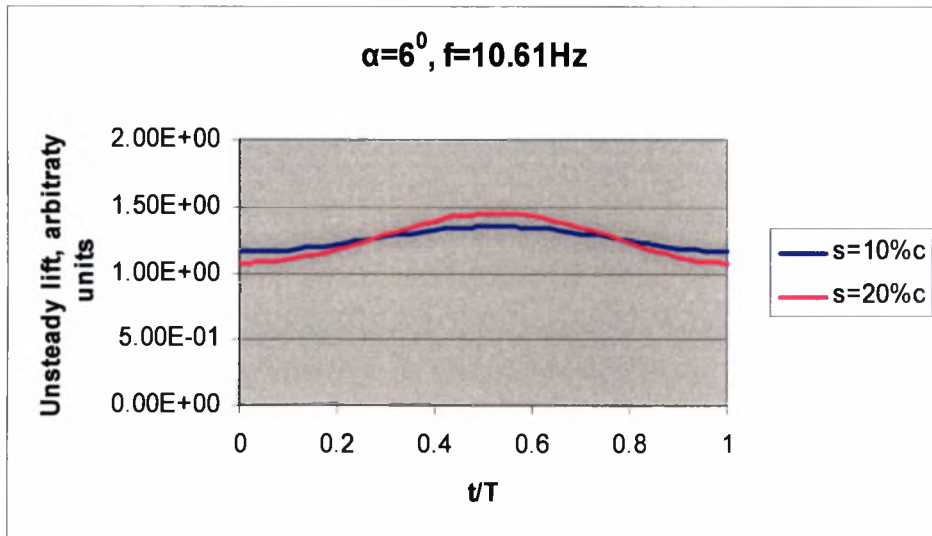
Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται διαγράμματα άνωσης και οπισθέλκουσας για διάφορες συχνότητες και διάφορα εύρη ταλάντωσης.



Γράφημα 5.31 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c, 30\%c$

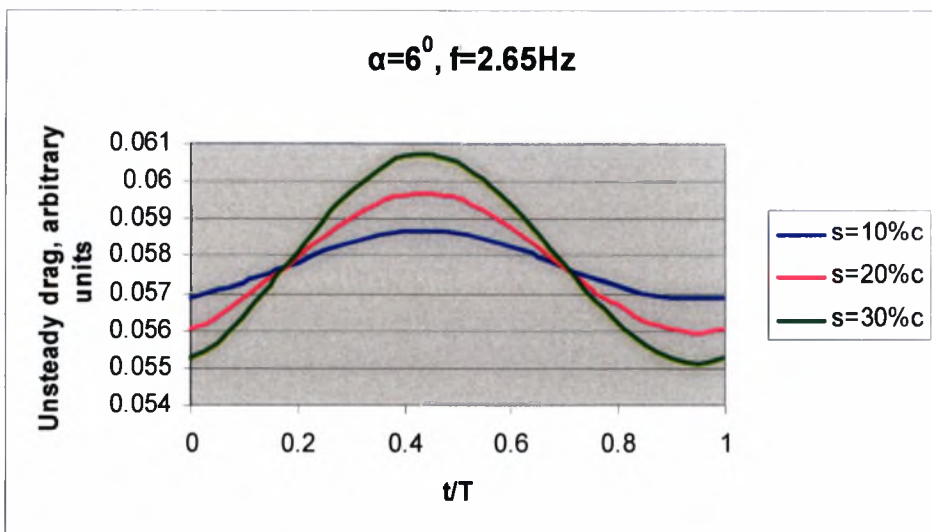


Γράφημα 5.32 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

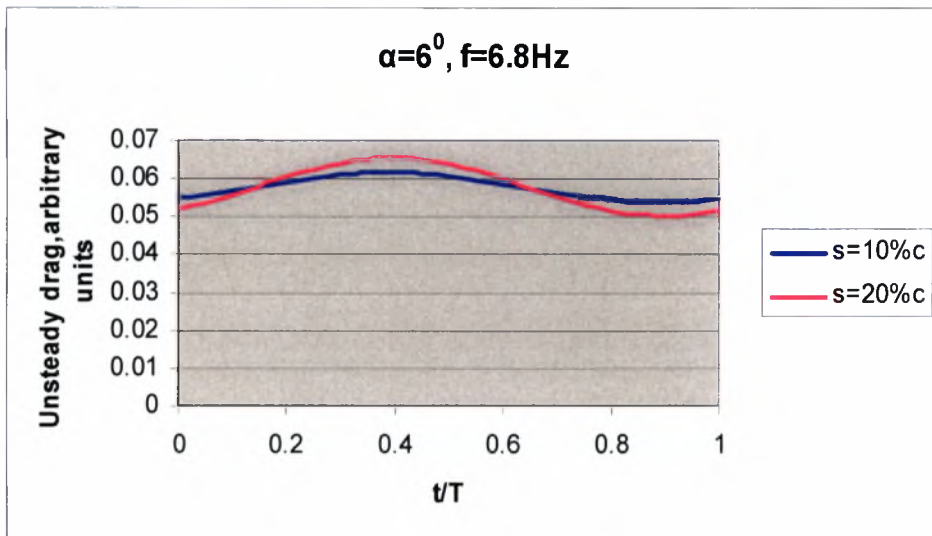


Γράφημα 5.33 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

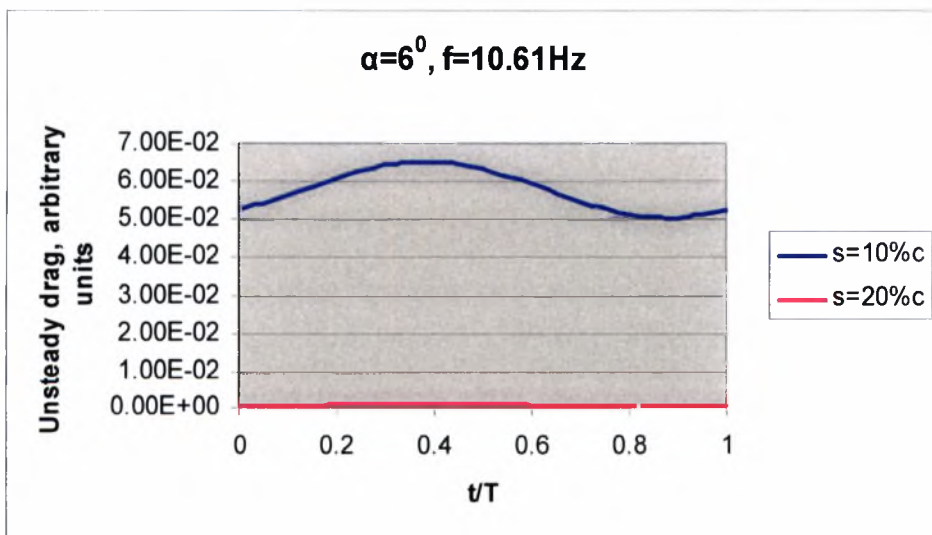
Παρατηρείται ότι κατά τη θέση $T/2$, στη μέση δηλαδή της διαδρομής του πτερυγίου η ασταθής άνωση αυξάνεται με τη μεταβολή του εύρους της ταλάντωσης ενώ στην αρχική και την τελική θέση η άνωση μειώνεται με τη αύξηση του εύρους. Στις δύο ακραίες θέσεις δεν υπάρχει μεταβολή. Η αύξηση της άνωσης με τη μεταβολή του εύρους στη χρονική στιγμή $T/2$ είναι μεγαλύτερη με τη την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης ενώ τη χρονική στιγμή 0 η άνωση μειώνεται με αύξηση της συχνότητας.



Γράφημα 5.34 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 2.65Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c, 30\%c$



Γράφημα 5.35 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 6.8Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

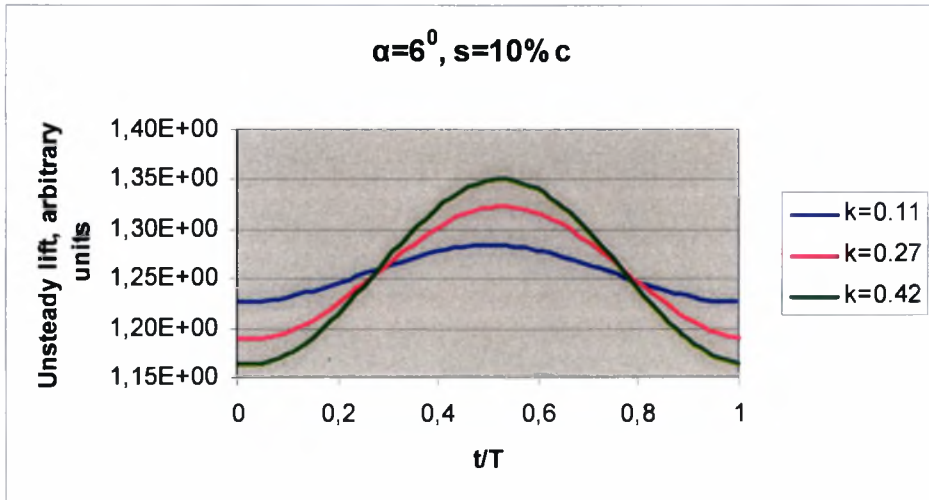


Γράφημα 5.36 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, συχνότητα ταλάντωσης 10.61Hz και σε εύρος ταλάντωσης $s = 10\%c, 20\%c$

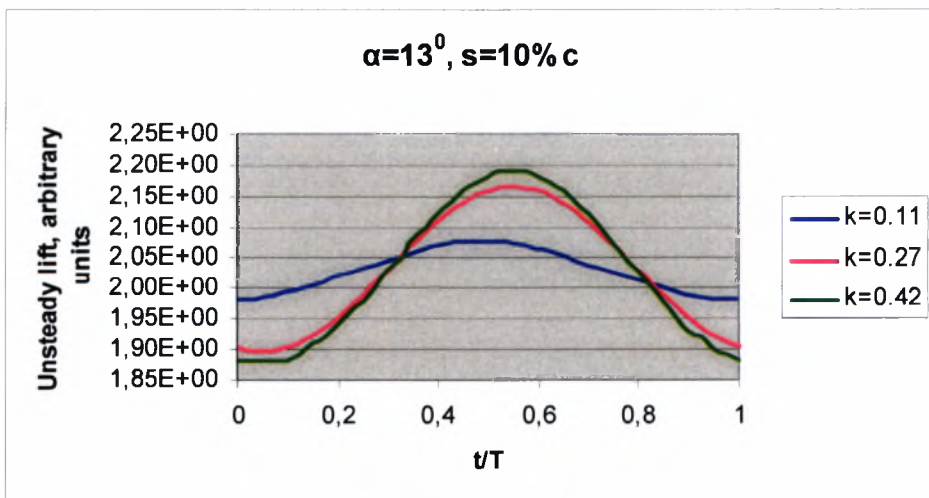
Τη χρονική στιγμή $T/2$ παρατηρείται αύξηση της οπισθέλκουσας με αύξηση του εύρους της ταλάντωσης σε συχνότητα 2,65Hz.

Με αύξηση της συχνότητας και σε 6,8Hz παρατηρείται μείωση της οπισθέλκουσας με αύξηση του εύρους στις θέσεις 0, 3T/4 και T ενώ προκύπτει αύξηση της στις θέσεις T/4 και T/2.

Σε συχνότητα 10,61Hz η αύξηση σε όλες τις χρονικές στιγμές είναι μεγάλη με αύξηση του εύρους.

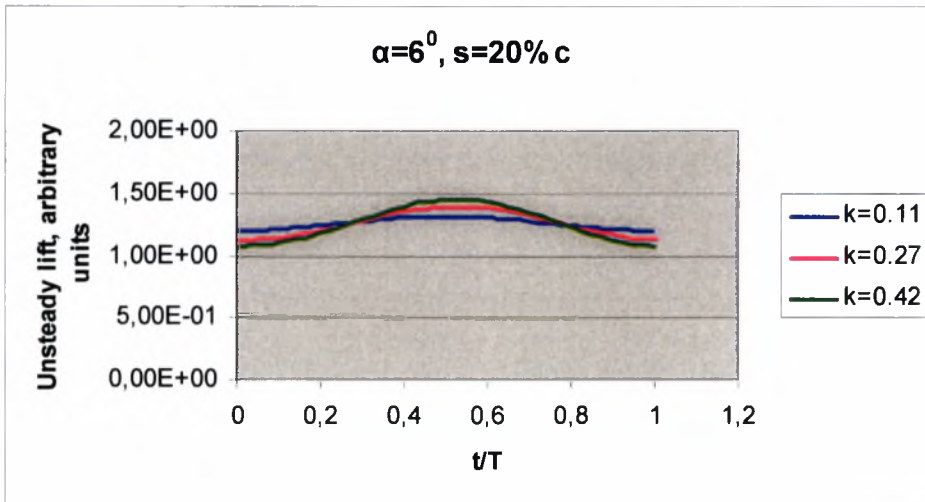


Γράφημα 5.37 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0,11, 0,27 και 0,42

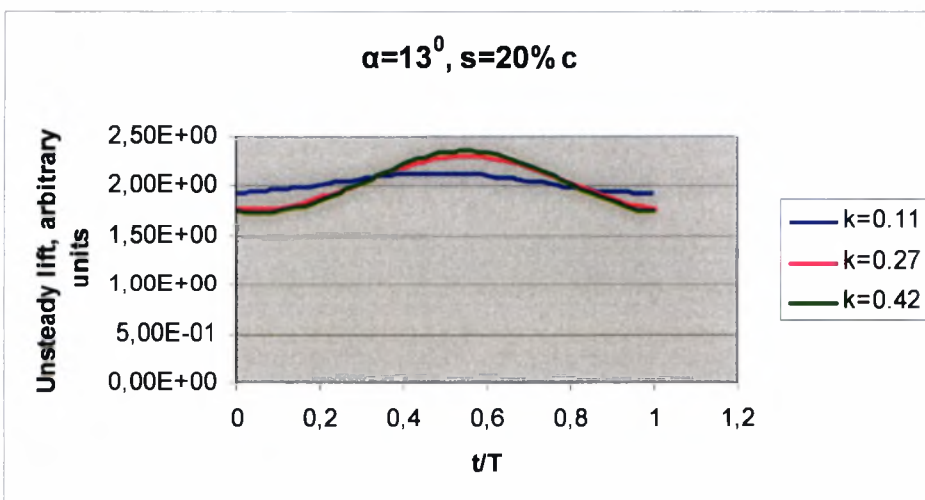


Γράφημα 5.38 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0,11, 0,27 και 0,42

Παρατηρείται ότι σε γωνία 6° οι τιμές της άνωσης είναι πιο μικρές και η επίδραση της ανηγμένης συχνότητας είναι περισσότερο εμφανής σε αυτή την περίπτωση απ' ό,τι σε αυτή με γωνία προσβολής 13°

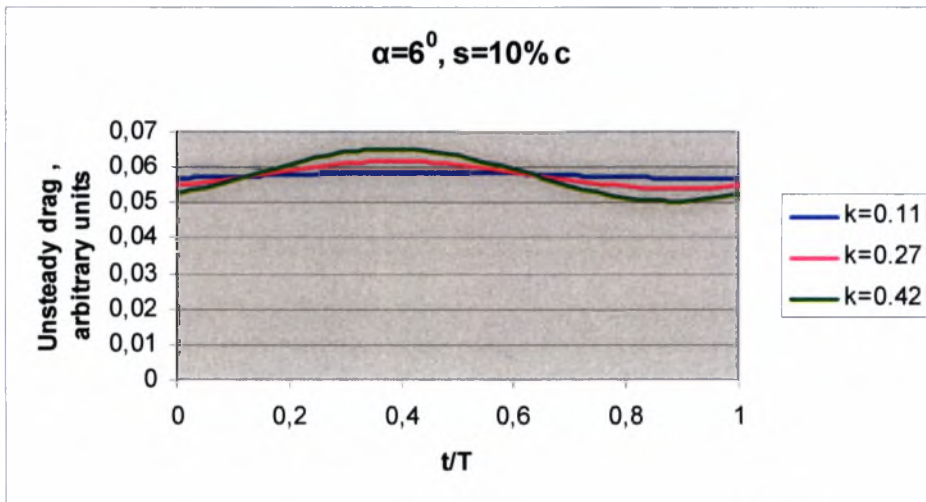


Γράφημα 5.39 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

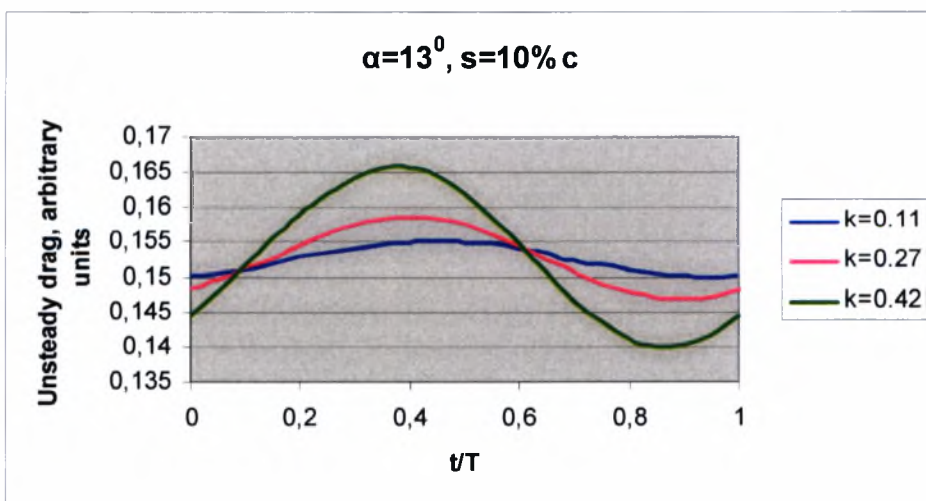


Γράφημα 5.40 Η άνωση σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

Από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτει ότι με αύξηση του εύρους σημειώνεται αύξηση της άνωσης για τις δύο γωνίες. Σε εύρος 20% της χορδής φαίνεται ότι η επίδραση της ανηγμένης συχνότητας είναι λιγότερο εμφανής από την περίπτωση όπου το εύρος είναι 10%.

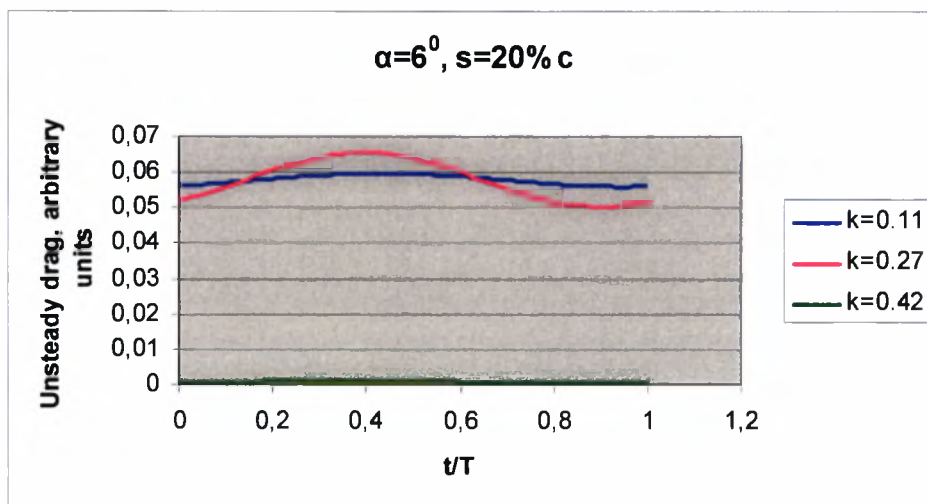


Γράφημα 5.41 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^{\circ}$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

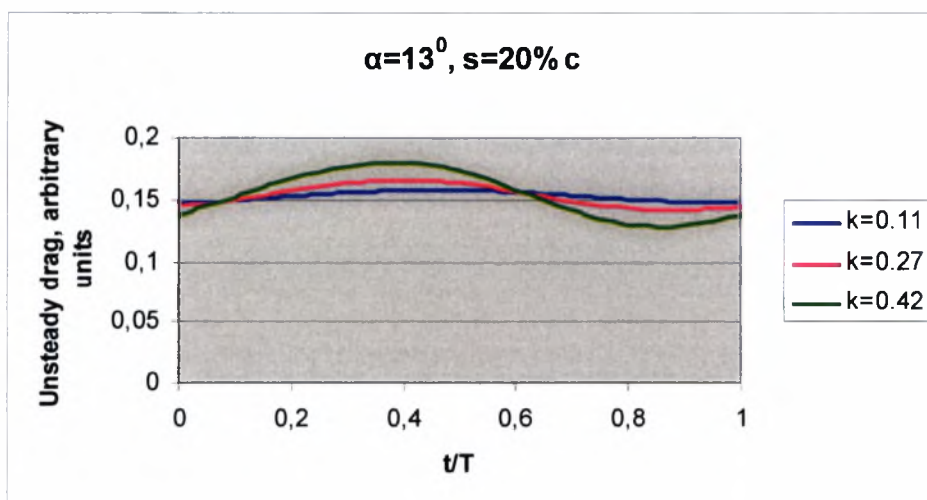


Γράφημα 5.42 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^{\circ}$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

Για την οπισθέλκουσα η αυξητική επίδραση της ανηγμένης συχνότητας είναι περισσότερο αισθητή στην περίπτωση των 13° .



Γράφημα 5.43 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

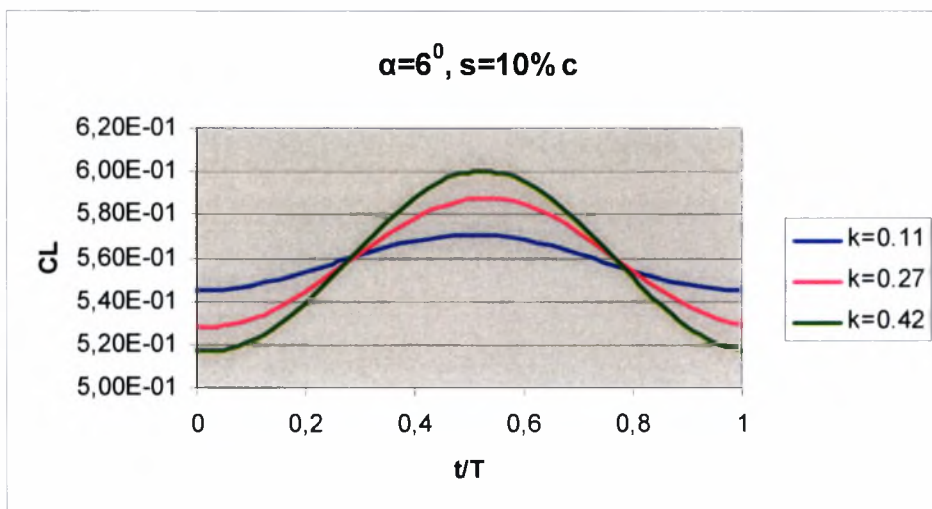


Γράφημα 5.44 Η οπισθέλκουσα σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

Για την οπισθέλκουσα παρατηρείται αύξηση με την αύξηση της γωνίας. Επίσης για γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$ προκύπτει σημαντική αύξηση με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης.

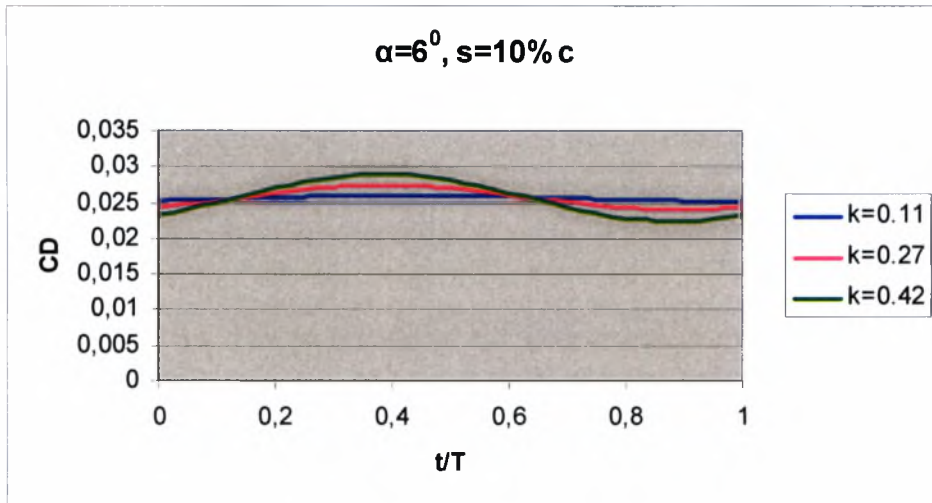
Σε εύρος ταλάντωσης 20% της χορδής σημειώνονται σχεδόν μηδενικές τιμές για την οπισθέλκουσα σε γωνία $\alpha=6^\circ$ ενώ δεν προκύπτουν σημαντικές μεταβολές με αύξηση της συχνότητας σε γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$.

Τέλος δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή της οπισθέλκουσας και στις δύο γωνίες προσβολής.



Γράφημα 5.45 Ο συντελεστής άνωσης σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=6^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

Παρατηρείται ότι ο ελάχιστος συντελεστής άνωσης μειώνεται με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας.

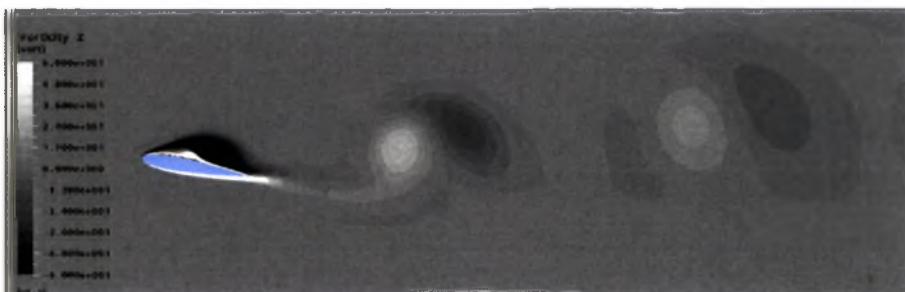


Γράφημα 5.46 Ο συντελεστής οπισθέλκουσας σε ένα κύκλο ταλάντωσης σε γωνία $\alpha=13^\circ$, εύρος ταλάντωσης 10% της χορδής και ανηγμένη συχνότητα ταλάντωσης k , 0.11, 0.27 και 0.42

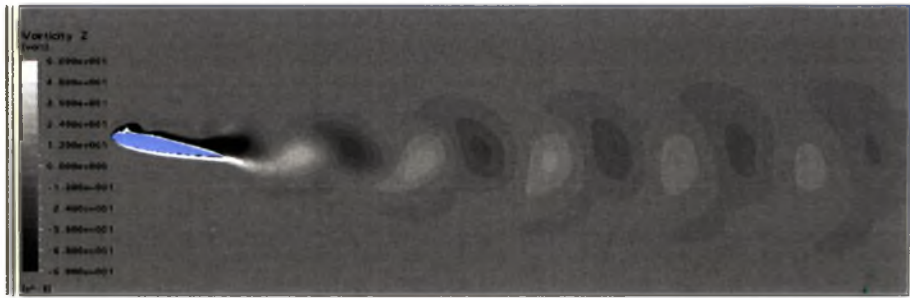
Στο συντελεστή οπισθέλκουσας παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές με αύξηση της ανηγμένης συχνότητας

Αναλύοντας την άνωση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης και συνδέοντας τη με τη μελέτη της οπτικοποίησης της ροής που πραγματοποιήθηκε νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο σημειώνεται ότι η μεγαλύτερη αύξηση και για τις δύο γωνίες προσβολής προκύπτει στη θέση $T/2$ όπου παρατηρείται ο σχηματισμός δίνης στην ακμή φυγής δίνοντας μια επίδραση αναρρόφησης στην επάνω επιφάνεια. Στις θέσεις 0 και T η τιμή της άνωσης είναι μικρότερη λόγω της αποκόλλησης της ροής.

Με την απεικόνιση του απορεύματος του πτερυγίου για συχνότητες ταλάντωσης 2.65Hz και 6.8Hz επαληθεύεται και η αύξηση της οπισθέλκουσας με την αύξηση της συχνότητας όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν όπου η διάταξη των δινών στο απόρευμα είναι χαρακτηριστική της ανάπτυξης οπισθέλκουσας.



Εικόνα 5.16 Το απόρευμα του πτερυγίου σε συχνότητα 2.65Hz, εύρος 25mm και γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$. Οι δίνες δείχνουν ανάπτυξη οπισθέλκουσας



Εικόνα 5.17 Το απόρρευμα του πτερυγίου σε συχνότητα 6.8Hz, εύρος 25mm και γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$. Η διάταξη των δινών είναι χαρακτηριστική της ανάπτυξη οπισθέλκουσας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη μελετήθηκε το πεδίο ροής γύρω από πτερύγιο NACA 0015 το οποίο εκτελεί ταλάντωση παράλληλη στην σχετική ταχύτητα ως προς το πτερύγιο (lead-lag). Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχυτήτων στο απόρρευμα και των αεροδυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται στο πτερύγιο σε διάφορες παραμέτρους ταλάντωσης. Από την ανάλυση και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Πεδίο ροής

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της οπτικοποίησης για σταθερό και πτερύγιο που εκτελεί ταλάντωση φαίνεται ότι οι ασταθείς επιδράσεις σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα περιορίζουν την περιοχή της απώλειας στήριξης και αυτό γίνεται περισσότερο έντονο όσο αυξάνει η συχνότητα ταλάντωσης.

Σε συχνότητα ταλάντωσης $f=2.65\text{Hz}$ που αντιστοιχεί σε $k=0.11$ και σε γωνία προσβολής $\alpha=13^\circ$ τη χρονική στιγμή T καθώς το πτερύγιο επανέρχεται στη θέση ισορροπίας παρατηρείται αποκόλληση στην ακμή φυγής. Τις χρονικές στιγμές $T/4$, $3T/4$ και $T/2$ σχηματίζεται μεγάλη δίνη στην ακμή φυγής με δεξιόστροφη φορά.

Σε συχνότητα $f=6.8\text{Hz}$ τη χρονική στιγμή $T/4$ αναπτύσσεται μεγάλη δίνη δεξιόστροφα κοντά στην ακμή φυγής η οποία μεγαλώνει και κινείται στο απόρρευμα. Καθώς το πτερύγιο κινείται αντίθετα στη διεύθυνση της ροής παρατηρείται αποκόλληση στο μεγαλύτερο μέρος της επάνω επιφάνειας ενώ η ροή επανακολλάται πλήρως κατά την κίνηση στη διεύθυνση της ροής στην ακραία θέση.

Σε γωνία προσβολής $\alpha=6^\circ$ και σε συχνότητα $f=6.8\text{Hz}$ σημειώνεται αποκόλληση τη ροής όταν το πτερύγιο κινείται αντίθετα από τη ροή ενώ στη συχνότητα $f=2.65\text{Hz}$ η ροή είναι αποκολλημένη στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου ταλάντωσης και στις ακραίες θέσεις επανακολλάται με σχηματισμό δινών στη επιφάνεια. Τέλος όταν η γωνία προσβολής είναι ίση με 0° παρατηρείται σχηματισμός δινών στον απόρρευμα και στην επιφάνεια του πτερυγίου και για τις δύο συχνότητες.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του πεδίου ροής επιβεβαιώνουν τα πειραματικά.

Πεδίο ταχυτήτων στο απόρρευμα του πτερυγίου

Η μέτρηση των ταχυτήτων έγινε σε απόσταση δύο χορδών πίσω από την ακμή φυγής του πτερυγίου με την ταχύτητα της ροής του αέρα U_∞ να είναι ίση με 10m/s . Παρατηρήθηκε μείωση των τιμών της ταχύτητας σε συχνότητα 8Hz η οποία γίνεται μικρότερη με την αύξηση του εύρους ταλάντωσης.

Οι σχετικά χαμηλές τιμές της μέσης ταχύτητας κάτω από την κεντρική γραμμή ($z<0$) αποδίδονται στην παρουσία της κυλινδρικής ράβδου στήριξης του πτερυγίου (απόρρευμα ράβδου στήριξης).

* Ο υπολογισμός της τύρβης έδειξε αύξηση της κατά τα αρνητικά z κάτι που οφείλεται στην παρουσία της ράβδου στήριξης. Η τύρβη αυξάνεται με αύξηση της γωνίας προσβολής και της συχνότητας ταλάντωσης σε μεγάλο εύρος ταλάντωσης.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα πειραματικά.

Μέτρηση αεροδυναμικών φορτίων

Από την παραμετρική ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων προκύπτει ότι με αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης σημειώθηκε αύξηση της άνωσης και της οπισθέλκουσας.

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης με τη μέτρηση των φορτίων για συχνότητα 2.65Hz προκύπτει ότι τη χρονική στιγμή $T/4$ η άνωση παίρνει τη μέγιστη τιμή της καθώς η δίνη στην ακμή φυγής έχει σχηματιστεί πλήρως και δίνει μια επίδραση αναρρόφησης στην επάνω επιφάνεια. Τις χρονικές στιγμές $T/2$ και $3T/4$ η ασταθής άνωση μειώνεται καθώς παρατηρείται αποκόλληση της ροής. Τη χρονική στιγμή T σημειώνεται αύξηση της άνωσης αφού η ροή επανακολλάται στο μεγαλύτερο μέρος της επάνω επιφάνειας.

Σε συχνότητα 6.8Hz η άνωση αυξάνεται τη χρονική στιγμή $T/2$ και $3T/4$ όπου η ροή επανακολλάται.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν να επαληθεύουν τα πειραματικά.

Προτάσεις

Η επίδραση της γωνίας προσβολής, του εύρους ταλάντωσης και της καμπυλότητας του πτερυγίου στη φόρτιση του αποτελεί ενδιαφέρον αντικείμενο προς διερεύνηση.

Η μελέτη του πεδίου ροής στο απόρευμα του πτερυγίου σε αέρα ή και σε νερό θα μπορούσε να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τα φορτία που αναπτύσσονται.

Τέλος η αριθμητική επίλυση με υπολογιστικά πακέτα αποτελεί χρήσιμο εργαλείο το οποίο θα μπορούσε χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω ανάλυση του 2-Δ προβλήματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Crimi 1973 Dynamic stall. AGARD-AG-172
- [2] Carr και Chandrasekhara 1959. Theory of Airfoil Sections. Abbott I. H., von Doenhoff A. E. Dover 1959
- [3] S. H. Chen, C. M. Ho 1986. Near wake of an unsteady symmetric airfoil. Journal of Fluids and Structures 1, 151-164
- [4] N. Albanis, A. Carpetis, A. Goulas, H. Stapountzis 1988. Hot wire measurements in the wake of an oscillating airfoil. AIAA Journal
- [5] O. Daube, L. Ta Phuoc, A. Dulieu, M. Coutanceau, K. Ohmi, A. Texier 1989. Numerical simulation and hydrodynamic visualization of transient viscous flow around an oscillating aerofoil. International Journal for numerical methods in fluids 9, 891-920
- [6] J. Panda, K. B. M. Q. Zaman 1994. Experimental investigation of the flow field of an oscillating airfoil and estimation of lift from wake surveys. Journal of Fluid Mechanics 265, 65-95
- [7] M. Raffel, J. Kompenhans, P. Wernert 1995. Investigation of the unsteady flow velocity field above an airfoil pitching under deep dynamic stall conditions. Experiments in Fluids 19, 103-111
- [8] K. D. Jones, C. M. Dohring, M. F. Platzer 1996. Wake structures behind plunging airfoils: A comparison of numerical and experimental results. AIAA Journal 96-0078 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 15-18, 1996 / Reno, NV
- [9] Cheng-Hsiung Kuo, J. K. Hsieh 2000. Unsteady flow structure and vorticity convection over the airfoil oscillating at high reduced frequency. Experimental Thermal and Fluid Science 24, 117-129
- [10] E. Berton, D. Favier, C. Maresca, A. Benyahia 2002. Flow field visualizations around oscillating airfoils. Scientific and Technical Aerospace Reports

- [11] K. D. von Ellenrieder, K. Parker, J. Soria 2002. Flow structures behind a heaving and pitching finite-span wing. *Journal of Fluid Mechanics*, 490, 129-138
- [12] T. Lee, P. Gerontakos 2002. Investigation of flow over an oscillating airfoil. *Journal of Fluid Mechanics* 512, 313-341
- [13] M. Fuchiwaki, K. Tanaka 2002. Vortex scale of unsteady separation on a pitching airfoil. *Annals New York Academy of Sciences*. 972, 61-66
- [14] Y. W. Jung, S. O. Park 2003. Vortex-shedding characteristics in the wake of an oscillating airfoil at low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures* 20 (2005), 451-464
- [15] T. C. W. Lau, K. R. Malcolm, E. R. Hassan 2004. Flow visualization of a pitching and heaving hydrofoil. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia, 13-17 December 2004
- [16] G. Y. Oo, K. B. Lua, K. S. Yeo, T. T. Lim 2004. Wake structures of a heaving airfoil. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia, 13-17 December 2004
- [17] M. Fuchiwaki, K. Tanaka 2006. Vortex structure and scale on an unsteady airfoil. *JSME International Journal Series B*, 49, 1056-1063
- [18] H. Hamdani, M. Sun 1999. Aerodynamic forces and flow structures of an airfoil in some unsteady motions at small Reynolds number. *Acta Mechanica*, 145 (2000), 173-187
- [19] M. H. Akbari, S. J. Price 1999. Simulation of the flow over elliptic airfoils oscillating at large angles of attack. *Journal of Fluids and Structures*, 14 (2000), 757-777
- [20] P.K. Chaviaropoulos 1999. Flap/Lead-lag Aeroelastic Stability of wind turbine blade sections. *Wind Energy* 2, 99-112
- [21] O. Yu. Korotkov, G. M. Shumskii 2000. Calculation of dynamic stall on an oscillating airfoil. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* 41, 452-455
- [22] M. H. Akbari, S. J. Price 2001. Simulation of dynamic stall for a NACA 0012 airfoil using a vortex method. *Journal of Fluids and Structures* 17, 855-874
- [23] G. C. Lewin, H. Haj-Hariri 2002. Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 492 (2003), 339-362

- [24] G. N. Barakos, D. Drikakis 2003. Computational study of unsteady turbulent flows around oscillating and ramping aerofoils. *International Journal for numerical methods in Fluids*, 42, 163-186
- [25] M. H. Hansen, M. Gaunaa, H. A. Madsen 2004. A Beddoes-Leishman type dynamic stall model in state-space and indicial formulations. Technical Report Risø-R-1354(EN), Risø National Laboratory, 2004
- [26] S. V. Guvernuyuk, G. Ya. Dynnikova 2006. Modeling the flow past an oscillating airfoil by the method of viscous vortex domains. *Fluid Dynamics* 42, 1-11
- [27] E. G. Reid 1927. Airfoil lift with changing angle of attack. Technical notes, National advisory committee for aeronautics
- [28] J. G. Leishman 1990. Dynamic stall experiments on the NACA 23012 aerofoil. *Experiments in Fluids*, 9 (1990), 49-58
- [29] J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett, M. S. Triantafyllou 1997. Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, 360, 41-72
- [30] D. A. Read, F. S. Hover, M. S. Triantafyllou 2001. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering. *Journal of Fluids and Structures*, 17, 163-183
- [31] M. Gaunaa, J. N. Sorensen 2003. Experimental Investigation of Unsteady Aerodynamic Forces on Airfoil in Harmonic Translatory Motion.
- [32] F. S. Hover, O. Haugsdal, M. S. Triantafyllou 2003. Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion. *Journal of Fluid and Structures*, 19, 37-47
- [33] X. Amandolese, E. Szechenyi 2004. Experimental study of the effect of turbulence on a section model blade oscillating in stall. *Wind Energy*, 7, 267-282
- [34] E. Hoo, K. D. Do, J. Pan 2004. An investigation on the lift force of a wing pitching in dynamic stall for a comfort control vessel. *Journal of Fluids and Structures* 21, 707-730
- [35] A. Benaissa, D. Faux, D. Poirel 2005. Effect of Airfoil Vibration Due to Airflow on Aerodynamic Forces. The 8th Symposium on Fluid Control, Measurements and Visualization 2005
- [36] G. X. Shen, B. X. Kan, Ke Yu, Y. Q. Ren 2005. Force measurements of flapping wing in air. The 8th International Symposium on Fluid Control, Measurements and Visualization 2005

[37] M. R. Soltani, M. Seddighi, F. Rasi Marzabadi 2007. Comparison of Pitching and Plunging Effects on the Surface Pressure Variation of a Wind Turbine Blade Section. *Wind Energy* 12, 213-223

[38] Thomsen, K., Petersen, J.T., Nim, E., Oye, S. and B. Petersen 2000. A method for determination of damping for edgewise blade vibrations. **Wind Energy Vol. 3**, pp. 233-246.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091862