



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ : ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΑΠΟ ΤΑΛΑΝΤΩΜΕΝΗ ΑΕΡΟΤΟΜΗ

ΚΑΤΣΟΥΛΑΣ ΦΡΑΝΤΣΕΣΚΟ

ΑΜ : 52119013

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ :

ΡΙΖΙΩΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ,ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΥΠΟΨΗ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΑΡΚΑΤΟΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ ,ΙΟΥΝΙΟΣ 2021



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS

FACULTY OF CHEMICAL ENGINEERING

POST GRADUATE COURSE ON
COMPUTATIONAL MECHANICS

TITLE OF M.Sc THESIS :

COMPUTATIONAL STUDY OF AN OSCILLATING AIRFOIL IN THE POWER
EXTRACTION REGIME.

AUTHOR :

KATSOULAS FRANCESCO

SUPERVISORS:

NICOLAS MARKATOS, PROFESSOR EMERITUS NTUA

RIZIOTIS VASILIOS, ASSOCIATE PROFESSOR NTUA

ATHENS ,

JUNE 2021

Περίληψη

Εμπνευσμένοι από το φτερούγισμα των πτηνών και την κίνηση των θαλάσσιων όντων οι άνθρωποι μελέτησαν και υιοθέτησαν τις ταλαντούμενες πτέρυγες. Η ταλάντωση αυτή μπορεί να είναι αρμονική ή να ακολουθεί διάφορα άλλα είδη ταλάντωσης. Κατά την κίνηση αυτή, ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται από και προς την πτέρυγα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Όταν μιλάμε για απαγωγή ενέργειας από το ρευστό, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι περιπτώσεις όπου εμφανίζεται υψηλή απόδοση από το σύστημα βρίσκονται κοντά σε πλάτη ταλάντωσης περίπου ίσα με την χορδή της αεροτομής (για την μεταφορική ταλάντωση) και κοντά στις $76,3^\circ$ (για την γωνιακή ταλάντωση). Σε αυτήν την διπλωματική εργασία ερευνώνται, με την χρήση εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για δυο διαστάσεις (2D), βαθύτερα τα βέλτιστα πλάτη ταλάντωσης για μια αεροτομή NACA0015 ($c=1$) σε ροή αέρα με $Re=1100$ και σημείο περιστροφής στο ένα τρίτο της χορδής από την ακμή προσβολής ($s_{piv}=c/3$). Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις (συνδυασμοί) πλατών μεταφορικής και γωνιακής (αρμονικής) ταλάντωσης: i) $h=1[m]$, $\theta_0=71,3^\circ$ ii) $h=1[m]$, $\theta_0=76,3^\circ$ (βασική περίπτωση) iii) $h=1[m]$, $\theta_0=81,3^\circ$ iv) $h=0,9[m]$, $\theta_0=76,3^\circ$ v) $h=1,1[m]$, $\theta_0=76,3^\circ$ vi) $h=1,4[m]$, $\theta_0=81,3^\circ$. Σε όλες τις περιπτώσεις η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κινήσεων ήταν $\pi/2$ καθώς έχει βρεθεί πως είναι αυτή που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Για την μοντελοποίηση της μεταφορικής ταλάντωσης υιοθετήθηκε κινούμενο αδρανειακό σύστημα αναφοράς (heaving reference frame) ενώ η γωνιακή ταλάντωση εισήχθη μέσω άκαμπτου -περιστρεφόμενου πλέγματος το οποίο κινείται μαζί με την αεροτομή (rigid-sliding mesh). Σε όλες τις περιπτώσεις η ροή είναι στρωτή (Laminar) ενώ για την επίλυση και το στήσιμο της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 19.2 του λογισμικού Fluent. Σαν κεντρικό σημείο αναφοράς έχει ληφθεί η έρευνα των (Kinsey & Dumas, 2006) όπου αναφέρεται πως αποδόσεις της τάξης του 30% επιτυγχάνονται όταν το πλάτος της μεταφορικής και της γωνιακής ταλάντωσης κυμαίνονται στο $h=1$ και $\theta_0=76,3^\circ$, ενώ χρησιμοποιείται και ο ίδιος τρόπος εισαγωγής της μεταφορικής ταλάντωσης. Βρέθηκαν αποδόσεις της τάξης του $\approx 40\%$ για πλάτη μεταφορικής ταλάντωσης μεγαλύτερα της χορδής ($h=1,4c$) και γωνιακής μεγαλύτερα από τις $76,3^\circ$ αλλά και ικανοποιητική ταύτιση των αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία. Παρατηρήθηκε πως με αύξηση του πλάτους της μεταφορικής κίνησης αυξάνεται και η απόδοση, στις περισσότερες περιπτώσεις (και μέχρι κάποιο όριο). Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και για το πλάτος της γωνιακής κίνησης. Μελετήθηκε και επαληθεύτηκε η σημαντικότητα της έκλυσης δινών από την ακμή προσβολής (LEVs) για την αύξηση της απόδοσης και ο συγχρονισμός τους με την κίνηση της πτέρυγας. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι η συνεισφορά στην απαγωγή ενέργειας της μεταφορικής κίνησης είναι πολύ σημαντικότερη από εκείνη της γωνιακής.

Abstract

Inspired by the movements of aerial and sea creatures, humans started studying and adopting fluttering airfoils. That flutter could be a sinusoidal oscillation or other depending on the characteristics imposed, in order to extract energy from the flow or to produce thrust. When one is studying the energy extraction mode from the flow then the available literature dictates that for sinusoidal heaving and pitching of the airfoil the magnitude of heaving and pitching oscillations should be around 1 chord and 76.3° , respectively. Around these values of magnitude it is found that efficiency reaches its highest ratings. In the present work we tried to study comprehensively the optimization of the magnitude of oscillations with respect to efficiency, by using a commercial CFD code for the simulation of a 2D NACA0015 ($c=1$) airfoil in air flow at $Re=1100$ and pivot point on $1/3$ of the chord from the leading edge. The following cases have been investigated: i) $h=1[m]$, $\theta_0=71.3^\circ$ ii) $h=1[m]$, $\theta_0=76.3^\circ$ (basic case) iii) $h=1[m]$, $\theta_0=81.3^\circ$ iv) $h=0.9[m]$, $\theta_0=76.3^\circ$ v) $h=1.1[m]$, $\theta_0=76.3^\circ$ vi) $h=1.4[m]$, $\theta_0=81.3^\circ$. In all cases the phase difference between the two motions is $\pi/2$ as it has been found that it is the optimum (based on literature data review) for energy extraction (and $s_{piv}=1/3$). To take into account the heaving motion of the airfoil and to avoid complex mesh generation techniques the problem was set up in a heaving reference frame. The circular mesh around the foil is rotating with it (rigid-sliding mesh) and the rest of the mesh remains un-deformed. In this manner the airfoil is pitching in a heaving reference frame. For all the cases tested here the assumption of laminar flow has been made, and the commercial CFD code Fluent v. 19.2 was used. The work of (Kinsey & Dumas, 2006) has been used as a point of reference in order to compare the predicted efficiency, as the same solution strategy was implemented. In this study efficiencies as high as 30% are reported from heaving/pitching amplitudes of $1m/76.3^\circ$. We found efficiencies reaching $\approx 40\%$ for heaving amplitudes of $1.4c$ and pitching $>76.3^\circ$ which appear quite encouraging, but also good agreement with the existing literature data was found for the other cases. It was noticed that by increasing the heaving amplitude the efficiency was also increasing (up to a certain limit). This tendency was also noticed for the tested pitching amplitudes. The importance of LEV's (Leading Edge Vortex) was also studied and verified for its influence on increasing efficiency when occurring just before each half of the cycle ($t \approx 7T/8$ & $t \approx 3T/8$). This behavior was also in good agreement with the reference paper used in the present study. Finally, it was also noted that the heaving motion's contribution on the energy extraction is significantly larger than the contribution of the pitching motion.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που συνεχώς με στηρίζει από την στιγμή που μπήκα στην σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών μέχρι και σήμερα που τελειώνω το μεταπτυχιακό μου στην Υπολογιστική Μηχανική .

Θα ήθελα επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ομότιμο Καθηγητή και πρώην Πρύτανη του ΕΜΠ κ. Νικόλαο Μαρκάτο για την άψογη συνεργασία ,την σαφή καθοδήγηση και κυρίως για την αμεσότητα με την οποία απαντούσε σε οποιοδήποτε ερώτημα μου οποιαδήποτε ώρα .

Ευχαριστώ επίσης τον Αναπλ.Καθηγητή ΕΜΠ κ. Β. Ριζιώτη που ανέλαβε την ανάθεση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Εισαγωγή.....	14
Γενικά για τις ταλαντούμενες πτέρυγες	14
Κεφάλαιο 1.....	18
Βιβλιογραφική ανασκόπηση	18
Αεροδυναμική ταλαντευόμενων πτερύγων.....	18
Εξισώσεις και παράμετροι ταλαντευόμενων πτερύγων	20
Κινηματικές παράμετροι.....	21
Συχνότητα Ταλάντωσης και Διαφορά Φάσης.....	24
Επίδραση αριθμού Reynolds, πάχους και καμπυλότητας αεροτομής.....	24
Επίδραση Σημείου Περιστροφής Πτέρυγας-Πλάτους Γραμμικής Ταλάντωσης	25
Λόγος Επιμήκους (Aspect Ratio) -Μη ημιτονοειδής κινήσεις	26
Σχήματα.....	28
Κεφάλαιο 2.....	33
Υπολογιστικές Προσομοιώσεις	33
Φυσικό Πρόβλημα	33
Μαθηματικό Πρόβλημα - Υπολογιστικός Κώδικας	34
Υπολογιστικό πλέγμα - πεδίο	36
Μελέτη ανεξαρτησίας χρονικού βήματος.....	37
Μελέτη Ανεξαρτησίας Πλέγματος.....	38
Σχήματα.....	40
Κεφάλαιο 3.....	45
Χαρακτηριστικά Προσομοιώσεων.....	45
Κεφάλαιο 4.....	48
Αποτελέσματα.....	48
Κεφάλαιο 5.....	67
Συμπεράσματα-Προτάσεις Βελτίωσης	67
Παράρτημα Α . Συναρτήσεις Κίνησης Αεροτομής σε Γλώσσα C (UDF)	70
Παράρτημα Β.....	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση των δυνάμεων και της AoA κατά την διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής πρόωσης (a) και κατά την διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής ενέργειας-οπισθέλκουσας (b)-(John Young, 2014).....	28
Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση βασικών παραμέτρων κίνησης και ταχυτήτων κατα τη διάρκεια μισού κύκλου ταλάντωσης . (G.Dumas, 2014).....	28
Σχήμα 3. Δομή ομόρου που ευνοεί την παραγωγή ενέργειας και οπισθέλκουσας (drag-indicative wake) (Platzer & Jones, 1998).	29
Σχήμα 4. Δομή ομόρου που ευνοεί την παραγωγή πρόωσης (thrust-indicative) (Platzer & Jones, 1998)	29
Σχήμα 5. Συμφωνία μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου με υπόθεση μη συνεκτικού ρευστού και πειραμάτων (Platzer & Jones, 1998).....	30
Σχήμα 6. Το πλήρως παθητικό σύστημα a)πρώιμο σχέδιο από (Platzer & Bradley, 2009) b)&c) βελτιωμένος σχεδιασμός από τους (Platzer, Nesrin, Young, Ashraf, & Lai, 2014)	30
Σχήμα 7. Γεννήτρια που αποτελείται από ταλαντούμενες υδροτομές σε σειρά . (Platzer M. , Ashraf, Young, & Lai, 2009).....	31
Σχήμα 8. Διάφορα προφίλ γωνιακής ταλάντωσης που δοκιμάστηκαν από τους (Deng, Caulfield, & Shao, 2014) μέσω εισαγωγής της παραμέτρου β στις εξισώσεις αρμονικής ταλάντωσης	31
Σχήμα 9. Βασικές περιοχές του υπολογιστικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι συνοριακές συνθήκες .Στο υποσχήμα 1 φαίνεται και η διεπιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της γωνιακής κίνησης της αεροτομής ενώ στο υποσχήμα 2 φαίνεται το δομημένο πλέγμα για την σύλληψη του οριακού στρώματος της αεροτομής	40
Σχήμα 10. Το δομημένο πλέγμα πάνω στην αεροτομή .Από τα διανύσματα της ταχύτητας φαίνεται η ικανοποιητική "σύλληψη" του οριακού στρώματος	41
Σχήμα 11. Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 1500sec για κάθε ένα από τα χρονικά βήματα που δοκιμάστηκαν	42
Σχήμα 12. Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 2700sec για κάθε ένα από τα χρονικά βήματα που δοκιμάστηκαν	42
Σχήμα 13 . Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 2000sec για κάθε ένα από τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν	43
Σχήμα 14. Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 3000sec για κάθε ένα από τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν	43
Σχήμα 15 .Συντελεστής άντωσης (C_L) για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ,υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ πράσινης και κόκκινης καμπύλης.	52
Σχήμα 16 .Συντελεστής ροπής (C_M) υπολογισμένος γύρω από το κέντρο περιστροφής της αεροτομής για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ,υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ πράσινης και κόκκινης καμπύλης	53
Σχήμα 17 . Συντελεστής οπισθέλκουσας (C_D) για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ,υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ πράσινης και κόκκινης καμπύλης.....	53
Σχήμα 18 .Συντελεστής ισχύος (Coefficient of power , C_p) για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ταλάντωσης	54
Σχήμα 19 .Σύγκριση των συνεισφορών της μεταφορικής και της γωνιακής κίνησης στον συνολικό συντελεστή ισχύος (άρα και στην απόδοση)	54

Σχήμα 20 .Σύγκριση συντελεστών άντωσης και ισχύος για δυο διαφορετικές περιπτώσεις και επισημάνση της σημαντικότητας της έκλυσης δινών στην αύξηση της απόδοσης (με τα μαύρα βέλη) (σύγκριση με Σχήμα 23 & Σχήμα 25).....	55
Σχήμα 21 .Συντελεστής πίεσης για την χρονική στιγμή $t=7T/8$ όπου λαμβάνει χώρα έκλυση δίνης (η δεύτερη σε σειρά κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης ,βλέπε Σχήμα 19 , $t/T\approx 0,95$) .Απεικονίζονται για τις περιπτώσεις κίνησης με $h=1$, $\theta=71,3^\circ$ & $h=1$, $\theta=81,3^\circ$	55
Σχήμα 22. Ενεργή γωνία προσβολής για κάθε μια από τις περιπτώσεις ταλάντωσης για την διάρκεια ενός κύκλου	56
Σχήμα 23 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=71,3^\circ$	57
Σχήμα 24 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=76,3^\circ$	57
Σχήμα 25 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=81,3^\circ$	58
Σχήμα 26. Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=0,9$ & $\theta=76,3^\circ$	58
Σχήμα 27 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1,1$ & $\theta=76,3^\circ$	59
Σχήμα 28 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$	59
Σχήμα 29 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=71,3^\circ$	60
Σχήμα 30 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=76,3^\circ$	60
Σχήμα 31 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=81,3^\circ$	61
Σχήμα 32 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=0,9$ & $\theta=76,3^\circ$	61
Σχήμα 33 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1,1$ & $\theta=76,3^\circ$	62
Σχήμα 34 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$	62
Σχήμα 35 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=71,3^\circ$	63
Σχήμα 36 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=76,3^\circ$	63
Σχήμα 37 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=81,3^\circ$	64
Σχήμα 38 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=0,9$ & $\theta=76,3^\circ$	64
Σχήμα 39 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1,1$ & $\theta=76,3^\circ$	65
Σχήμα 40 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$	65

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.Μέγιστες διαφορές κάθε χρονικού βήματος συγκριτικά με το πιο πυκνό ,εκφρασμένες ως ποσοστό της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος, για δυο χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .Στις παρενθέσεις αναφέρονται οι μέγιστες ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων	38
Πίνακας 2.Μέγιστες διαφορές κάθε πλέγματος συγκριτικά με το πιο πυκνό εκφρασμένες σαν ποσοστό της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος, για δυο χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .Στις παρενθέσεις αναφέρονται οι μέγιστες ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των διαδοχικών πλεγμάτων	39
Πίνακας 3 .Αποδόσεις για κάθε μια από τις περιπτώσεις ταλάντωσης	52

ΣΥΜΒΟΛΑ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΟΡΙΣΜΟΣ
c	Μήκος χορδής αεροτομής
c_L	Συντελεστής άντωσης $c_L = \frac{L}{0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2 c}$
c_M	Συντελεστής ροπής $c_M = \frac{M}{0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2 c^2}$
c_p	Συντελεστής πίεσης $c_p = \frac{P - P_{\infty}}{0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2}$
c_D	Συντελεστής οπισθέλκουσας $c_D = \frac{D}{0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2 c}$
U_{∞}	Ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος αέρα
ρ_{∞}	Πυκνότητα ελεύθερου ρεύματος αέρα
L	Άντωση ,κάθετη στη φορά του ρεύματος αέρα
D	Δύναμη Οπισθέλκουσας
f	Συχνότητα(Hz)
f^*	Αδιάστατη Συχνότητα ($f^* = fc/U_{\infty}$)
h	Πλάτος γραμμικής ταλάντωσης (m)
θ_0	Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης (°)
p	Πίεση
p_{∞}	Πίεση ελεύθερου ρεύματος
s_{piv}	Σημείο περιστροφής πτέρυγας $s_{piv} = \frac{1}{3} c$
P_0	Εξαγόμενη ισχύς από το ρευστό $P_0 = L\dot{\gamma} + M\dot{\theta}$

P_a	Διαθέσιμη στο ρεύμα αέρα ισχύς $P_a = 0,5 \rho_{\infty} U_{\infty}^3 y_{tot}$
y_{tot}	Μέγιστη επιφάνεια σαρούμενη από ένα σημείο της αεροτομής (ακμή φυγής)
C_p	Στιγμιαίος Συντελεστής απαγόμενης ισχύος $C_p = \frac{P_0}{0,5 \rho_{\infty} U_{\infty}^3 c}$
$C_{p_{mean}}$	Μέσος συντελεστής απαγωγής ισχύος για έναν κύκλο ταλάντωσης $C_{p_{mean}} = \frac{1}{T} \int C_p(t) dt$
η	Απόδοση απαγωγής ενέργειας $\eta = \frac{P_0}{P_a} = \frac{C_{p_{mean}} c}{y_{tot}}$
T	Περίοδος ταλάντωσης $T=2\pi/\omega$
\dot{y}	Γραμμική ταχύτητα αεροτομής $\dot{y} = \frac{d}{dt}y(t)$
$y(t)$	Εξίσωση γραμμικής ταλάντωσης $y(t) = h \sin(\omega t)$
$\dot{\theta}$	Γωνιακή ταχύτητα αεροτομής $\dot{\theta} = \frac{d}{dt}\theta(t)$
$\theta(t)$	Εξίσωση γωνιακής ταλάντωσης $\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \varphi)$
φ	Διαφορά φάσης
M	Ροπή ,μετρούμενη γύρω από το κέντρο περιστροφής της πτέρυγας
Re	Reynolds βασισμένος στην χορδή $Re = \frac{\rho U_{\infty} c}{\mu}$
μ	Δυναμικό ιξώδες
ω	Γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης $\omega=2\pi f$
$\alpha(t)$	Γωνία προσβολής $\alpha(t) = \theta(t) - \tan^{-1}\left(\frac{\dot{y}}{U_{\infty}}\right)$

y^+	Νόμος του Τοιχώματος $y^+ = \frac{y u^*}{\nu}$
u^*	Friction Velocity $u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{0.5}$

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CFD : Υπολογιστική Ρευστοδυναμική .

LEV : Έκλυση Δινών από την Ακμή Προσβολής (Leading Edge Vortex)

TEV : Έκλυση δινών από ην ακμή Φυγής (Trailing Edge Vortex)

AoA : Angle of attack (Γωνία Προσβολής)

UDF : Συναρτήσεις σε Γλώσσα C για τον Ορισμό της Κίνησης της Αεροτομής (User Defined Functions)

Εισαγωγή

Γενικά για τις ταλαντούμενες πτέρυγες

Παρατηρώντας τα έμβια , ιπτάμενα και θαλάσσια , πλάσματα οι άνθρωποι υιοθέτησαν τον μηχανισμό των ταλαντούμενων πτερύγων ,οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν αποσπάσει μεγάλη προσοχή από την επιστημονική κοινότητα αφού έχουν ένα πολύ πλατύ εύρος εφαρμογών. Η ίδια η φύση εξάλλου μετά από εκατομμύρια χρόνια εξέλιξης και βελτιστοποίησης έχει επιλέξει και η ίδια αυτόν τον μηχανισμό ως τον πρωτεύοντα για την κίνηση των θαλάσσιων και αέριων πλασμάτων .Από την παραγωγή ενέργειας από αιολικές και θαλάσσιες-παλιρροιακές πηγές μέχρι την αξιοποίηση τους για προωθητικές εφαρμογές όπως πτήση μικρών εναέριων οχημάτων (MAV's ,micro aerial vehicles) αλλά και εφαρμογές σε συστήματα υποβοήθησης πρόωσης στον τομέα της ναυπηγικής (Belibassakis & Filippas, 2015),οι ταλαντευόμενες πτέρυγες είναι ένα ανερχόμενο μέσο αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και όχι μόνο .Λόγω της αστάθειας και πολυπλοκότητας του πεδίου ροής γύρω από τα σώματα αυτά, τα φυσικά φαινόμενα που τα συνοδεύουν αποτελούν αντικείμενο πολλών ερευνών τα τελευταία χρόνια .Ο (Theodorsen, 1979) ασχολήθηκε από νωρίς με τη μελέτη της ροής γύρω από γωνιακά και γραμμικά ταλαντευόμενη πτέρυγα αναπτύσσοντας τη θεωρία του που κάνει υπόθεση μη συνεκτικού ρευστού που ρέει γύρω από επίπεδη πλάκα (και με χρήση της συνθήκης Kutta) .Παρά το γεγονός ότι αυτή η θεωρία κάνει κάποιες σωστές προσεγγίσεις ,αδυνατεί να δώσει σωστά αποτελέσματα σε καταστάσεις όπου το ιξώδες παίζει σημαντικό ρόλο όπως είναι η περίπτωση αποκόλλησης της ροής .

Τα τελευταία χρόνια ο άνθρωπος βρίσκεται σε μια συνεχή αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας αλλά και νέων τρόπων για επιπλέον αξιοποίηση των υπαρχόντων.Ο αέρας ,η παλίρροια και τα ποτάμια είναι φορείς ανανεώσιμης ενέργειας .Η ενεργειακή κρίση που βιώνουμε τα τελευταία χρόνια και η τάση για χρήση αμιγώς ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε έκφανση της ζωής μας αυξάνει συνεχώς τις ανάγκες μας για αυτήν . Οι ταλαντούμενες πτέρυγες (flapping foils),που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις παραπάνω περιπτώσεις, μόλις τις τελευταίες δεκαετίες έχουν μπει στο προσκήνιο της έρευνας, κάτι το οποίο αποδεικνύεται από τα λίγα πρωτότυπα που έχουν κατασκευασθεί, αποσπώντας μεγάλο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα λόγω των πλεονεκτημάτων που έχουν απέναντι στα παραδοσιακά περιστρεφόμενα συστήματα (ανεμογεννήτριες) .Είχαν μελετηθεί και παλαιότερα σε θέματα ,όμως, που αφορούσαν την

αεροπλοΐα με σκοπό την αποφυγή επικίνδυνων ταλαντώσεων, από την αλληλεπίδραση αέρα - πτέρυγας, που θα ήταν καταστροφικές για τα πτερύγια των αεροσκαφών .

Μέχρι τώρα το κύριο μέσο εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ήταν τα περιστροφικά συστήματα όπως οι ανεμογεννήτριες. Λόγω των υψηλών λόγων ακροπερυγίου (tip speed ratio) αυτές παράγουν αρκετό θόρυβο αλλά μπορούν να αποτελέσουν και κίνδυνο για την πανίδα της περιοχής, κυρίως στις περιπτώσεις όπου η επιφάνεια σάρωσης είναι μεγάλη .Επίσης όταν οι διάμετροι τους μεγαλώνουν αρκετά ,γίνεται και πολυπλοκότερη η κατασκευή τους αυξάνοντας αρκετά το κόστος .Αυτοί είναι και μερικοί από τους λόγους για τους οποίους τα παλινδρομικά συστήματα έχουν μπει στο μικροσκόπιο της έρευνας όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας .

Μια ταλαντευόμενη πτέρυγα (fluttering wing) λειτουργεί σαν "μηχανή αέρα" (air engine) ή μηχανισμός όπου ενέργεια απορροφάται από το ρεύμα αέρα και μεταφέρεται στο ίδιο το πτερύγιο (Duncan, 1945). Αυτά τα συστήματα εργάζονται με τρόπο τέτοιο ώστε μέσα από την ίδια τους την κίνηση και την αλληλεπίδραση τους με το ρευστό να απάγουν ενέργεια από αυτό η οποία μέσα από συγκεκριμένους υδραυλικούς μηχανισμούς (οι οποίοι δεν είναι αναλύονται στην παρούσα εργασία) κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια και παράγει ρεύμα .Για παράδειγμα μέσα από συγκεκριμένους συνδυασμούς γωνιακής και γραμμικής ταλάντωσης ,αλλά και συχνότητας ταλάντωσης , η γωνία προσβολής που προκύπτει μπορεί να επιτρέψει στην άντωση να είναι ομόρροπη με τη φορά της κίνησης της πτέρυγας .Σε αυτή τη περίπτωση παράγεται έργο πάνω στη πτέρυγα (από το ρευστό) το οποίο μεταφράζεται σε ηλεκτρική ισχύς.

Υπάρχουν τρεις τρόποι μοντελοποίησης-λειτουργίας ενός τέτοιου ταλαντούμενου συστήματος οι οποίοι εξαρτώνται από το διεγέρτη της ταλάντωσης και το είδος της κίνησης .

i. Πλήρως Προδιαγεγραμμένη Κίνηση .

Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας (η οποία είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας) η αεροτομή εξαναγκάζεται με μηχανικά μέσα (πχ ηλεκτρικό κινητήρα) να κινηθεί γωνιακά (pitching) και γραμμικά (plunging) ενώ η κίνηση είναι πλήρως ελεγχόμενη .Αυτά τα συστήματα συνήθως εκτελούν ημιτονοειδείς ταλαντώσεις ενώ η μαθηματική τους μοντελοποίηση είναι απλούστερη λόγω της σαφήνειας των εξισώσεων της κίνησης .Μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες και αρχικές προσεγγίσεις για τα πραγματικά εγχειρήματα που βρίσκονται σε αρχικό στάδιο(πρωτότυπα) .Η απαγόμενη ενέργεια χαρακτηρίζεται από έναν μέσο συντελεστή ισχύος (cycle-averaged power coefficient) .Οι περισσότερες υπολογιστικές μελέτες βασίζονται σε αυτόν τον τρόπο μοντελοποίησης .

ii. Εξαναγκασμένη Γωνιακή Ταλάντωση και Επαγόμενη (από το ρευστό) Μεταφορική Κίνηση.

Σε αυτό το σχεδιασμό η γωνιακή κίνηση δίνεται στη πτέρυγα από έναν ηλεκτρικό κινητήρα και η μεταφορική προκύπτει από την αλληλεπίδραση ρευστού -πτερυγίου .Ενέργεια παράγεται μόνο όταν η απαγωγή ενέργειας από το ρευστό είναι μεγαλύτερη από τη δαπάνη ενέργειας για την γωνιακή κίνηση. Τα περισσότερα πρωτότυπα που έχουν κατασκευασθεί μέχρι σήμερα ακολουθούν αυτό το τρόπο λειτουργίας .

- iii. Αυτοκινούμενα Συστήματα. Σε αυτά τα μοντέλα η πτέρυγα είναι ελεύθερη να κινηθεί μέσα από τις αστάθειες τις ροής .Επομένως σε αυτή τη περίπτωση ενέργεια μπορεί μόνο να παραχθεί .Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι ,για τον λόγο αυτό, απλούστερος ενώ η ενέργεια που αποκομίζεται οφείλεται κυρίως στη μεταφορική κίνηση της πτέρυγας .Εδώ η συχνότητα της ταλάντωσης εξαρτάται μόνο από παραμέτρους όπως οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στη πτέρυγα και την αλληλεπίδραση της αεροτομής με το πεδίο στροβιλότητας το οποίο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας .

Γενικά υπάρχουν τρεις κατηγορίες ,όσον αφορά το αν η ενέργεια απάγεται από το ρευστό (power extraction regime),αν προκύπτει πρόωση (propulsion mode) ή καμία από τις δυο παραπάνω .Το αν απάγεται ή όχι ενέργεια ή το αν προκύπτει προωθητική δύναμη (δηλαδή δύναμη με φορά αντίθετη της οπισθέλκουσας) πάνω στη πτέρυγα περιγράφεται από τη παράμετρο "φτερουγίσματος" (feathering parameter) όπως αυτή ορίστηκε από τους (Anderson J.M., 1998):

$$\chi = \frac{\theta_o}{\tan^{-1} \frac{h\omega}{U_\infty}} \quad (1) .$$

Βασισμένη σε μια υπόθεση ημι-μόνιμης κατάστασης ,η οποία οδηγεί σε μια απαραίτητη αλλά όχι ικανή συνθήκη ,κάποιος μπορεί να πει πως για $\chi < 1$ η πτέρυγα λειτουργεί παράγοντας πρόωση ,για $\chi > 1$ λειτουργεί στην κατάσταση παραγωγής ενέργειας ενώ για $\chi = 1$ βρίσκεται σε μια ουδέτερη κατάσταση . Το Σχήμα 1 παριστάνει μια χρονική αναπαράσταση όπου το καρέ κινείται αντίθετα από το πεδίο ροής , και γίνεται εμφανής η γωνία προσβολής από την "διαδρομή" που ακολουθεί η πτέρυγα .Η δύναμη F_R είναι η συνισταμένη άντωσης και οπισθέλκουσας .Από το σχήμα (b) φαίνεται πως η συνισταμένη έχει την κάθετη συνιστώσα της η οποίας είναι ομόρροπη με την ταχύτητα της αεροτομής παράγοντας έτσι έργο και άρα ισχύς κατά την διάρκεια του κύκλου ($\chi > 1$). Στο σχήμα (a) βλέπουμε πως η άντωση είναι αντίρροπη από την φορά της κίνησης της αεροτομής κάτι το οποίο ευνοεί της παραγωγή πρόωσης ($\chi < 1$) .Για την καλύτερη κατανόηση της κινηματικής μιας ταλαντευόμενης πτέρυγας παρατίθεται το Σχήμα 2.

Κεφάλαιο 1

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μια παλλόμενης πτέρυγας. Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται αυτοί οι παράγοντες όπως ακριβώς αποτυπώθηκαν στη βιβλιογραφία μέσα από τις σχετικές μελέτες ανά τον κόσμο.

Αεροδυναμική ταλαντευόμενων πτερύγων

Έχουν γίνει διάφορες υπολογιστικές και πειραματικές μελέτες που είχαν ως στόχο την κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής γύρω από μια παλλόμενη πτέρυγα. Η θεωρητική εξήγηση του τρόπου παραγωγής πρόωσης από μια πτέρυγα πρώτα παρουσιάστηκε από τον (Knoller, 1909) και ξεχωριστά από τον (Betz, 1912). Παρατηρήθηκε πως, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης η γωνία προσβολής που βιώνει η πτέρυγα οδηγεί σε μια δύναμη που έχει συνιστώσες άντωσης και πρόωσης (αντίθετα στη φορά της ροής).

Ας θεωρήσουμε μια δισδιάστατη αεροτομή, βυθισμένη μέσα σε ροή ιδανικού ρευστού, η οποία ταλαντώνεται γραμμικά (plunge) και γωνιακά (pitch). Επειδή η κίνηση της πτέρυγας δεν είναι σταθερή συνεπάγεται πως και η άντωση που προκαλείται πάνω της θα είναι μεταβαλλόμενη. Εφόσον η άντωση σχετίζεται άμεσα με την κυκλοφορία (Γ) γύρω από την αεροτομή, η κυκλοφορία επίσης θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης. Σύμφωνα με την θεωρία του Helmholtz, η συνολική κυκλοφορία που σχετίζεται με μια αεροτομή, σχετικά με το χρόνο, σε ιδανική ροή πρέπει να παραμένει σταθερή. Επομένως, όταν η κυκλοφορία στην περιοχή της αεροτομής μεταβάλλεται πρέπει να υπάρχει και κάποια κυκλοφορία (στροβιλότητα) αντίθετου πρόσημου που διαχέεται στον ομόρου και μετριάζει αυτή την αλλαγή, με τη μορφή ενός πεδίου στροβιλότητας.

Ένα μοντέλο του τυρβώδους ομόρου πίσω από σώματα παρουσιάστηκε από τους (Von Karman & Burgers, 1943). Έδειξαν ότι οι δίνες στον ομόρου του σώματος είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε η επάνω σειρά των δινών να έχει τη φορά των δεικτών του ρολογιού ενώ στη χαμηλότερη σειρά να έχουν αντι-ωρολογιακή φορά. Σε αυτή τη περίπτωση η "συνισταμένη" ταχύτητα στον ομόρου έχει αντίθετη φορά από αυτή της ροής, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα "έλλειμμα" ορμής πίσω από το σώμα και επομένως το σώμα βιώνει μια οπισθέλκουσα δύναμη. Αυτή η δομή παρουσιάζεται πίσω από αεροτομές που επιστρατεύονται για ενεργειακές εφαρμογές. Οι (Platzler & Jones, 1998) με πειράματα οπτικοποίησης της ροής και με υπολογιστικές μελέτες με

την μέθοδο των συνοριακών στοιχείων για μια αεροτομή που ταλαντώνεται μόνο μεταφορικά επιβεβαιώνουν τους ισχυρισμούς του μοντέλου αυτού (βλέπε Σχήμα 3) .

Απο την άλλη πλευρά αν το σώμα ταλαντώνεται πέρα από ένα κατώφλι συχνότητας ,το πεδίο στροβιλότητας στον ομόρου αλλάζει σε αντίστροφη οδό Von Karman ,που σημαίνει ότι η επάνω σειρά δινών έχει αντι-ωρολογιακή φορά και η κάτω σειρά ωρολογιακή φορά .Τώρα η "συνισταμένη" ταχύτητα στον ομόρου έχει τη φορά του ελεύθερου ρεύματος δημιουργώντας έτσι ένα πλεονάσμα ορμής πίσω από το σώμα .Εξαιτίας αυτού του "πλεονάσματος" σε ορμή ,το προφίλ της ταχύτητας μοιάζει με jet και στο σώμα ασκείται μια προωθητική δύναμη .Αυτό το είδος ομόρου παρουσιάζεται πίσω από ταλαντούμενες αεροτομές που χρησιμοποιούνται σε προωθητικές εφαρμογές (βλέπε Σχήμα 4) .

Μια πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση από τους (Platzer & Jones, 1998) στο ίδιο άρθρο αναφέρει πως το γεγονός ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήσαν στις υπολογιστικές τους μελέτες - που κάνει υπόθεση μη συνεκτικού ρευστού- καταφέρνει να "μαντέψει" τόσο σωστά την εξέλιξη των δινών του ομόρου με δίνες ενδεχομένως να είναι ένδειξη πως η εξέλιξη των δομών αυτών δεν σχετίζονται με την συνεκτικότητα ενός ρευστού (βλέπε Σχήμα 5) .

Ένα άλλο φαινόμενο που έχει βρεθεί ότι επηρεάζει πολύ την συμπεριφορά μιας ταλαντούμενης αεροτομής (είτε αυτή χρησιμοποιείται για εξαγωγή ενέργειας είτε για προωθητικές εφαρμογές) είναι οι δίνες που εκλύονται από την ακμή προσβολής ή αλλιώς LEV. Ο (Simpson B. J., 2009) αναφέρει πως η έκλυση δινών και κυρίως LEV αποδείχθηκε πως είναι καθοριστική για την μεταφορά ενέργειας από το ρευστό στο πτερύγιο .Οι LEV έχουν αναγνωριστεί ως καθοριστικές για την δυνατότητα των εντόμων να παράγουν άντωση κατά την πτήση .Για ένα αεροδυναμικό σώμα όπως μια αεροτομή ,υπάρχει μια ισχυρή αναρρόφηση στην περιοχή κοντά στην ακμή προσβολής λόγω των υψηλών ταχυτήτων που παρουσιάζονται εκεί .Αυτή η υποπίεση δημιουργεί μια συνιστώσα της προκύπτουσας δύναμης με φορά αντίθετη από αυτή της ροής που συμβάλει στην παραγωγή πρόωσης από μια γραμμικά ταλαντούμενη αεροτομή .Όταν η κλίση της πίεσης σε αυτή τη περιοχή γίνει δυσμενής τότε υπάρχει αποκόλληση της ροής και δημιουργείται LEV . Η περιστροφή του ρευστού μέσα στη δίνη δημιουργεί υψηλές ταχύτητες που έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή πίεση στο πυρήνα της δίνης .Αυτή η χαμηλή πίεση ενισχύει την δύναμη που δέχεται το πτερύγιο η οποία είναι κάθετη στη ροή (άντωση) .Στην πτήση των εντόμων αυτή η ενίσχυση της άντωσης συνοδεύεται με αύξηση της δύναμης που πρέπει να βάλει το έντομο για να υπερνικήσει την αυξημένη οπισθέλκουσα.

Εξισώσεις και παράμετροι ταλαντούμενων πτερύγων

Με βάση τις περιπτώσεις κίνησης που περιγράφηκαν στην εισαγωγή, οι εξισώσεις για τις αεροτομές που πραγματοποιούν ημιτονοειδείς-αρμονικές κινήσεις δίνονται ως εξής :

$$y(t) = h \sin(\omega t) \quad (2)$$

για την μεταφορική κίνηση, και :

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

για την γωνιακή, όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα ($=2\pi f$), θ_0 και h , θ_0 τα πλάτη των ταλαντώσεων. Μια σημαντική παράμετρος είναι η συχνότητα k (reduced frequency) που ορίζεται ως :

$$k = \omega c / U_\infty \quad (4).$$

Η χρονικά μεταβαλλόμενη "ενεργή" γωνία προσβολής που προκύπτει κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, προσεγγίζεται από την εξίσωση :

$$\alpha(t) = \theta(t) - \tan^{-1} \frac{\dot{y}(t)}{U_\infty} \quad (5).$$

Η ενέργεια που "πήρε" η πτέρυγα από τη ροή μετράται με τον μέσο συντελεστή ισχύος :

$$C_{p_{\text{mean}}} = \frac{1}{T} \int C_p(t) dt \quad (6)$$

όπου

$$C_p(t) = C_L(t) \frac{\dot{y}(t)}{U_\infty} + C_M(t) \frac{\dot{\theta}(t) c}{U_\infty} \quad (7).$$

Η απόδοση εξαγωγής ενέργειας από το ρευστό δίνεται από τον τύπο :

$$\eta = \frac{P_o}{P_a} = \frac{C_{p_{\text{mean}}} c}{y_{\text{tot}}} \quad (8)$$

όπου P_a είναι η διαθέσιμη ενέργεια στο ρεύμα ρευστού και y_{tot} είναι η επιφάνεια που σαρώνεται από οποιοδήποτε σημείο της πτέρυγας, συνήθως ακμή φυγής. Στο Σχήμα 2 βλέπουμε για την διάρκεια μισής ταλάντωσης την γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων που περιγράφηκαν παραπάνω.

Κινηματικές παράμετροι

Για όλες τις περιπτώσεις κίνησης που περιγράφηκαν παραπάνω μια καθοριστική σειρά παραγόντων είναι οι κινηματικές παράμετροι ,δηλαδή το ιστορικό μεταφορικής και περιστροφικής κίνησης καθώς και η διαφορά φάσης τους .

Αριθμητικές-Υπολογιστικές Μελέτες

Οι περισσότερες μελέτες έχουν θεωρήσει πλήρως προδιαγεγραμμένη ημιτονοειδή κίνηση αν και υπάρχουν και άλλες που μελετούν τις επιρροές μη αρμονικών κινήσεων . Οι (Ashraf, Young, & Lai, 2011) και (Platzer M. , Ashraf, Young, & Lai, 2009) έκαναν αριθμητικές μελέτες συστημάτων με προδιαγεγραμμένες κινήσεις για ένα ή δυο πτερύγια (σε σειρά) με ημιτονοειδείς και μη-αρμονικές κινήσεις οι οποίες ερευνήθηκαν για διαφορετικές φάσεις μεταξύ των δύο κινήσεων και των δυο πτερυγίων και διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ αυτών .Ο (Ashraf M. , 2010) μέσα από τις 2D NS (Navier-Stokes) προσομοιώσεις του, για ημιτονοειδώς ταλαντευόμενη πτέρυγα , με $Re=20000$ και NACA0014 βρήκε πως η μέγιστη απόδοση καθώς και η μέγιστη "συγκομιδή" ενέργειας παρουσιάζεται για διαφορά φάσης $\varphi=90-100^\circ$ μεταξύ γραμμικής και γωνιακής ταλάντωσης. .Για την μη-αρμονική περίπτωση κίνησης η περιστροφική κίνηση μεταβλήθηκε έτσι ώστε να συμβαίνει στην άνω και κάτω ακραία θέση της μεταφορικής κίνησης με περιόδους σταθερής γωνίας ενδιάμεσα .Αυτή η τακτική αύξησε την απόδοση κατά 17% σε σχέση με την πλήρως καθορισμένη ημιτονοειδή κίνηση, και κατά 25% την απαγόμενη ενέργεια , αφού η πτέρυγα "ένιωθε" τη μεγαλύτερη γωνία προσβολής για το μεγαλύτερο μέρος της ταλάντωσης κάτι το οποίο έχει θετικές επιδράσεις στη φορά και στο μέγεθος των δυνάμεων και άρα την παραγωγή έργου.

Από τον ορισμό της γωνίας προσβολής (εξ .5) μπορούμε να αντιληφθούμε πως παρά το γεγονός ότι κρατάμε τη γωνία της πτέρυγας ($\theta(t)$) σε μια υψηλή τιμή (από ακραία σε ακραία θέση) αυτή μειώνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου λόγω της μεταφορικής ταχύτητας και μειώνεται περισσότερο όταν η μεταφορική ταχύτητα έχει τη μέγιστη τιμή της. Έχει νόημα λοιπόν να αυξήσουμε το γωνιακό εύρος κίνησης της πτέρυγας έτσι ώστε η γωνία προσβολής να παραμένει υψηλή ακόμα και με μέγιστη μεταφορική ταχύτητα. Οι (Hover, Haugsdal, & Triantafyllou, 2004) πειραματίστηκαν με τη γωνία προσβολής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου επιβάλλοντας στην αεροτομή διάφορα προφίλ γωνίας ($\alpha(t)$) .Έλυσαν ως προς $y'(t)$ την εξ.(5) για να έχουν την ίδια μεταφορική κίνηση κάθε φορά που άλλαζαν την $\alpha(t)$. Έκαναν διάφορες μελέτες με διαφορετικό προφίλ γωνίας $\alpha(t)$ η καθεμία και πειραματικά διερεύνησαν την επιρροή κάθε προφίλ για NACA0014 και $Re=3 \times 10^4$ ενώ η γωνιακή ταλάντωση ήταν ημιτονοειδής . Τα προφίλ που

λήφθηκαν υπόψη ήταν εκείνο που προκύπτει από την αρμονική γραμμική-γωνιακή κίνηση, συνημιτονοειδές, πριονωτό και ορθογώνιου κύματος (square wave) όλα με την ίδια μέγιστη τιμή $\alpha(t)$. Το τελευταίο προφίλ ήταν το χειρότερο σε απόδοση, το πριονωτό έδωσε τις μεγαλύτερες τιμές πρόωσης αλλά το συνημιτονοειδές έδωσε τον καλύτερο συνδυασμό πρόωσης και προωθητικής απόδοσης κάτι το οποίο απέδωσαν στο ότι αυτό το προφίλ δημιουργούσε αντίστροφη οδό Von Karman στον ομόρου. Οι (Simpson, Hover, Licht, & Triantafyllou, 2008), (Simpson, Licht, Hover, & Triantafyllou, 2008) υιοθέτησαν, επίσης, την ιδέα ελέγχου της γωνίας προσβολής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Όπως και οι (Hover, Haugsdal, & Triantafyllou, 2004) επέβαλαν ημιτονοειδή γωνιακή κίνηση στην πτέρυγα και ημιτονοειδές προφίλ για την γωνία προσβολής με NACA0014, $s_{pin}=1/3$ & $Re=13800$ με $\phi=90^\circ$. Η μεταφορική κίνηση της πτέρυγας ήταν προκαθορισμένη για να διατηρηθεί το επιθυμητό προφίλ για την γωνία προσβολής. Βρίσκουν απόδοση 45% (βασισμένη στην επιφάνεια που σαρώνει το σημείο περιστροφής της αεροτομής) με $h=0.75$ m και μέγιστη $\alpha=38,9^\circ$. Από αυτά προκύπτει πλάτος γωνιακής ταλάντωσης $\theta_0=72,11^\circ$ και η σαρούμενη επιφάνεια από την ακμή φυγής (μας χρειάζεται για να υπολογίσουμε την απόδοση με βάση τον ορισμό που δίνεται στην παρούσα εργασία) $y_{tot}/c=2,1149$ το οποίο σημαίνει απόδοση 32%.

Επιπλέον, οι (Simpson, Hover, Licht, & Triantafyllou, 2008) σε άλλη έρευνα τόνισαν πως: Η διάχυση δινών, και ειδικά LEV, παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά ενέργειας από το ρευστό στο πτερύγιο. Βρήκαν πως στις περιπτώσεις που παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, στον ομόρου υφίστανται δίνες δομής "2P" (δύο ζευγάρια δινών ανά κύκλο ταλάντωσης).

Μια πολύ σημαντική μελέτη στην οποία γίνεται συχνά αναφορά από άλλες έρευνες είναι η εργασία των (Kinsey & Dumas, 2006). Χρησιμοποιώντας κώδικα CFD FLUENT μοντελοποίησαν μια NACA0015 που εκτελεί γραμμική και γωνιακή ταλάντωση για $Re=500-2400$, $x_p = \frac{c}{3}$ εξέτασαν συχνότητες f^* (βλ. 1.3.4) από 0-0,25 και πλάτη γωνιακής ταλάντωσης 0-90° και $h=c$. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούμε στον τρόπο με τον οποίον μοντελοποίησαν το πρόβλημα. Αρχικά η γωνιακή και μεταφορική κίνηση της πτέρυγας πραγματοποιούνται με κίνηση του πλέγματος εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες αναδημιουργίας -δυναμικού πλέγματος (re-meshing, dynamic mesh) που παρέχει το λογισμικό. Αυτή η προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι επιβάλλει πρώτης τάξης χρονική ολοκλήρωση η οποία εισάγει σφάλμα αριθμητικής διάχυσης για τον έλεγχο του οποίου χρειάζεται πολύ μικρό χρονικό βήμα. Για την αντιμετώπιση αυτού το ζητήματος ακολουθήθηκε μια νέα στρατηγική η οποία εισήγαγε την μεταφορική κίνηση της πτέρυγας ως χρονικά μεταβαλλόμενη συνοριακή συνθήκη στα όρια του όγκου ελέγχου. Δηλαδή το σημείο αναφοράς ήταν η πτέρυγα (που δεν κινούταν μεταφορικά) της οποίας η μεταφορική κίνηση "πέρασε" στα σύνορα του πλέγματος. Η γωνιακή κίνηση μοντελοποιήθηκε μέσω στερεού

πλέγματος (rigid body) (σχήματος κύκλου) το οποίο κινούταν γωνιακά μαζί με την πτέρυγα (sliding mesh). Το πλέγμα έξω από τον κύκλο δεν κινείται. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει δευτέρας τάξης χρονική ολοκλήρωση (δηλαδή μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων). Βρέθηκε πως για τις περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη απόδοση παραγόταν και εκλυόταν LEV. Παρατηρήθηκαν αποδόσεις της τάξης του 34% για $f^* = 0.15$ και $\theta_0 = 75^\circ$. Για τις παραμέτρους που λήφθηκαν υπόψη, εξάχθηκε το συμπέρασμα πως για να επιτευχθεί απόδοση τουλάχιστον 20% πρέπει το ελάχιστο πλάτος γωνιακής ταλάντωσης να είναι περίπου 55° .

Πειραματικές Μελέτες

Οι (Platzer M., Ashraf, Young, & Lai, 2010) πρότειναν και κατασκεύασαν ένα πλήρως παθητικό σύστημα το οποίο δεν χρειάζεται κάποιον μηχανισμό για να επιβάλει διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κινήσεων ή να δημιουργήσει την κατάλληλη μη-αρμονική γωνιακή κίνηση. Το πτερύγιο κυλάει πάνω σε έναν οδηγό και το κέντρο περιστροφής του βρίσκεται πίσω από το μέσο της χορδής (προς την ακμή φυγής). Αυτό εξασφαλίζει πως η πτέρυγα είναι ασταθής και κατά τη διάρκεια της κίνησης έχει τη μέγιστη γωνία (pitch) μέχρι την επόμενη ακραία θέση όπου ξανά εκτρέπεται προς την αντίθετη κατεύθυνση (Σχήμα 6). Με αυτό το τρόπο η μεταφορική κίνηση "προκύπτει" από την δύναμη της άντωσης πάνω στο πτερύγιο ενώ η γωνιακή από τους κινηματικούς περιορισμούς στις ακραίες θέσεις του συστήματος.

Επίσης, οι (Platzer M., Ashraf, Young, & Lai, 2009) κατασκεύασαν και ανέπτυξαν μια γεννήτρια με δυο πτέρυγες σε σειρά. Η απόσταση μεταξύ τους ήταν 9.6c και η διαφορά της μεταξύ τους φάσης 90° ώστε όταν η μια πτέρυγα βρισκόταν στη φάση του κύκλου που δεν παρήγαγε ενέργεια η άλλη να βρίσκεται στο σημείο παραγωγής ενέργειας. Με αυτό το τρόπο το σύστημα μπορούσε να εκκινεί μόνο του χωρίς την προσθήκη ενέργειας από κάποια εξωτερική πηγή. Η διάταξη δοκιμάστηκε σε υδροδυναμική σήραγγα με λόγο επιμήκους πτερύγων 5.4. Η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης (Σχήμα 7) ήταν σημαντικά μικρότερη από αυτή της αντίστοιχης προσομοίωσης κάτι που αποδόθηκε στις μεγάλες μηχανικές τριβές που παρουσίαζε το σύστημα. Η παραπάνω διάταξη παρουσιάζει το προφανές ζήτημα του ότι το δεύτερο σε σειρά πτερύγιο αντιλαμβάνεται μικρότερες ταχύτητες από το πρώτο δεδομένου ότι βρίσκεται στον ομόρου του, και επομένως περιορίζεται ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από αυτό.

Από αυτή την ανασκόπηση δεν θα μπορούσε να λείπει ίσως η πρώτη πειραματική έρευνα (ορόσημο) πάνω στον τομέα των ταλαντευόμενων αεροτομών. Οι (McKinney & DeLaurier, 1981) ανέπτυξαν μια μικρή ($c=20$ cm, 105 cm πλάτος) παλλόμενη (μεταφορικά και γωνιακά) πτέρυγα η οποία έφτανε σε αποδόσεις της τάξης του 17% (λειτουργώντας με αέρα). Έγινε και θεωρητική ανάλυση με βάση τα αποτελέσματα της οποίας κατασκευάστηκε και το μοντέλο για αεροδυναμική

σήραγγα .Η μεταφορική και γωνιακή κίνηση είχαν συνδυαστεί σε ένα μόνο βαθμό ελευθερίας μέσω ενός μηχανισμού .Το πλάτος της γωνιακής ταλάντωσης ήταν σχετικά χαμηλό (30°) το οποίο οδήγησε σε χαμηλή μέγιστη γωνία προσβολής (15°) (χαμηλή σε σχέση με τα πρότυπα παραγωγής ενέργειας) .Σύγκριναν τα αποτελέσματα του πειράματος με την θεωρία του Schreger ,που αντιστοιχεί στην θεωρία του Theodorsen αλλά σε τρεις διαστάσεις .Τα θεωρητικά αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερη απόδοση από την πραγματική για ένα εύρος πλατών ταλάντωσης και φάσεων .

Συχνότητα Ταλάντωσης και Διαφορά Φάσης

Έχοντας ορίσει τη συχνότητα ταλάντωσης ως $f=\omega/2\pi$ αξίζει να αναφερθεί πως οι περισσότεροι ερευνητές χρησιμοποιούν δυο μορφές αδιάστατης συχνότητας την $f^* = \frac{fc}{U_\infty}$ και τον αριθμό Strouhal ($St=\frac{2fh}{U_\infty}$) .Διατηρώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές ,η απόδοση "συλλογής" ενέργειας αρχικά αυξάνεται με την αύξηση της f^* . Αφού φτάσει ένα μέγιστο ,μειώνεται απότομα με την επιπλέον αύξηση της f^* . Η συχνότητα εξαρτάται από άλλες κινηματικές παραμέτρους όπως το πλάτος γωνιακής-γραμμικής ταλάντωσης ,το ϕ μεταξύ τους ακόμα και το σημείο περιστροφής της πτέρυγας . Παρόλα αυτά έχει βρεθεί πως γενικά η μέγιστη απόδοση (σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς παραμέτρων) βρίσκεται μέσα στο εύρος $f^* = 0.1 - 0.15$.Από φυσικής άποψης αυτή η συμπεριφορά έχει εξηγηθεί σαν ένα σημείο πέρα από το οποίο ενεργοποιούνται οι πιο ασταθείς διαταραχές στον ομόρου (ZHU, 2011).

Όσον αφορά τη διαφορά φάσης έχει βρεθεί πως η μέγιστη συλλογή ενέργειας συμβαίνει όταν η μεταφορική και η γωνιακή ταλάντωση έχουν διαφορά φάσης 90° για $s_{piv}=1/3c$ (Kinsey & Dumas, 2008) .

Επίδραση αριθμού Reynolds, πάχους και καμπυλότητας αεροτομής

Οι μελέτη των (Ashraf, Young, & Lai, 2011) που είχε ως αντικείμενο την εύρεση της επιρροής αυτών των παραμέτρων πάνω στο σύστημα είχε τα εξής χαρακτηριστικά .Για ένα εύρος $Re=200-2\times 10^6$,συμμετρικά προφίλ NACA με πάχη 6,12,15,20,30,40 και 50% ,2D ανάλυση με εξεταζόμενες κινήσεις : αμιγώς μεταφορική ταλάντωση ($h=0.5$ & 0.25 m) και συνδυασμένη μεταφορική- γωνιακή ($\phi=90^\circ, \theta_0 = 15$ & $30^\circ, h=0.5$ m) .Για $Re=200$,στις περιπτώσεις όπου παραγόταν πρόωση τα λεπτά προφίλ ήταν πιο αποδοτικά από τα παχιά προφίλ εξαιτίας της πιο

μεγάλης στρογγυλεμένης περιοχής των τελευταίων .Για υψηλότερους Re ,για περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδης ροής βρέθηκε πως υπάρχει βέλτιστο πάχος .Για $Re=20000$ (στρωτή ροή) ,ο συντελεστής πρόωσης (c_T) αυξήθηκε κατά 372% για NACA0030 (αμιγώς μεταφορική ταλάντωση) συγκριτικά με την NACA0006 .Αυτή η αύξηση μειώθηκε στο 121% όταν χρησιμοποιήθηκε NACA0020 συγκριτικά με την NACA0006.Αυτό το πλεονέκτημα στην στρωτή ροή οφείλεται στην ισχυρότερη αναρρόφηση και αποκόλληση που δημιουργείται από τα πιο παχιά προφίλ λόγω της πιο μεγάλης εμπρόσθιας επιφάνειας .Από την άλλη πλευρά ο μηχανισμός για βέλτιστη απόδοση ,σε τυρβώδη ροή, είναι διαφορετικός . Για το πιο λεπτό προφίλ ,μια μεγάλη LEV παράγεται εξαιτίας της αιχμηρής ακμής προσβολής ,σε αντίθεση με τα πιο παχιά προφίλ που η LEV "εξασθενεί" λόγω της τύρβης κάτι που οδηγεί σε μείωση της αναρρόφησης με αύξηση του πάχους .Επίσης αποδείχθηκε ότι η καμπυλότητα ευνοεί λίγο έως καθόλου σε σχέση με τα συμμετρικά προφίλ σε ότι έχει να κάνει με πρόωση και προωθητική απόδοση .

Οι (Kinsey & Dumas, Eulerian simulations of oscillating airfoils in power extraction regime, 2006) σε μια παραμετρική μελέτη που έκαναν για την επίδραση του πάχους εξέτασαν δυο προφίλ NACA0002 & 0020 .Βρήκαν πως η απόδοση επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από το πάχος .Οι ίδιοι όσον αφορά τη μεταβολή του αριθμού Reynolds βρήκαν πως η απόδοση αυξάνεται κατά ένα μικρό ποσοστό με αύξηση του Re (500 σε 2400) από 32.7% σε 36% για τις περιπτώσεις όπου $\chi > 1$.

Επίδραση Σημείου Περιστροφής Πτέρυγας-Πλάτους Γραμμικής Ταλάντωσης

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω ,έχει κατανοηθεί από τους μελετητές ότι η επίδραση της γωνίας προσβολής στην συμπεριφορά της ταλαντευόμενης πτέρυγας είναι πολύ μεγάλη .Εφόσον το σημείο περιστροφής έχει σημαντική επίδραση στην γωνία προσβολής μόνο φυσικό επόμενο μπορεί να θεωρηθεί το ότι η επίδραση του σημείου περιστροφής της πτέρυγας είναι μεγάλη .Αυτό το επιχείρημα ενισχύεται και από τους (Zhu & Peng, 2009) οι οποίοι αποφάνθηκαν ότι το μέρος της ενέργειας που συνεισφέρει η γωνιακή κίνηση της πτέρυγας μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό ανάλογα με το αν η LEV που έχει παραχθεί κατά τη διάρκεια του κύκλου έχει "ταξιδέψει" πίσω από το σημείο περιστροφής (αλλάζοντας έτσι τη ροπή που δημιουργείται από την ύπαρξη της LEV σε θετική ή αρνητική) .Για δεδομένα πλάτη γωνιακής-γραμμικής ταλάντωσης το σημείο περιστροφής επηρεάζει επίσης την επιφάνεια που σαρώνεται η οποία με τη σειρά της επηρεάζει σημαντικά την απόδοση .

Οι (Kinsey & Dumas, 2008) πραγματοποίησαν NS προσομοιώσεις σε $Re=1100$ με προδιαγεγραμμένη ημιτονοειδή κίνηση ,NACA0015,και τρεις τιμές $s_{piv} = \frac{1}{4}, \frac{1}{3} & \frac{1}{2}$. Εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις μια υψηλής απόδοσης ($h=1, f^* = 0.14, \theta_0 = 76.3^\circ$) και μια χαμηλής απόδοσης ($h=1, f^* = 0.18, \theta_0 = 60^\circ$). Και για τις δυο περιπτώσεις το $s_{piv} = 1/3$ έδωσε υψηλότερη απόδοση .Για όλους τους επόμενους υπολογισμούς τους χρησιμοποίησαν το παραπάνω σημείο περιστροφής .Οι ίδιοι έδειξαν ότι η μεταβολή του σημείου περιστροφής έχει την ίδια επίδραση με την αλλαγή της διαφοράς φάσης .Οι επακόλουθη έρευνα του (Davids, 1999) πάνω σε αυτή τη σχέση ,όντως, δείχνει μια συσχέτιση .Έκανε προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας UPM (unsteady panel method) κώδικα με προδιαγεγραμμένες ημιτονοειδείς μεταφορικές και γραμμικές κινήσεις και NACA0012 .Για $\phi < 90^\circ$ το σημείο περιστροφής ,στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο c_p , υπάρχει πίσω από το μέσο της χορδής ενώ για $\phi > 90^\circ$ το βέλτιστο σημείο "μετακινείται" προς τα μπροστά (προς την ακμή προσβολής) .Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις μελέτες είναι ότι η υψηλότερη απόδοση εμφανίζεται όταν το κέντρο περιστροφής βρίσκεται ακριβώς μπροστά από το μέσο της χορδής .

Για ότι έχει να κάνει με την επιρροή του πλάτους της γραμμικής ταλάντωσης (h) στην παραγωγή ενέργειας αυτό συνήθως επιλέγεται να είναι συγκρίσιμο με το μήκος της χορδής της εκάστοτε πτέρυγας .Κρατώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές ,έχει βρεθεί πως όσο αυξάνεται το πλάτος ο συντελεστής ισχύος αυξάνεται γραμμικά ((Davids, 1999), (Kinsey & Dumas, 2006)).Αντίθετα ,αυτή η συμπεριφορά δεν παρατηρείται και για την απόδοση η οποία έχει βρεθεί ότι αυξάνεται όσο το πλάτος παραμένει μικρότερο από $\frac{c}{2}$ ενώ μόλις φτάσει $h=c$ αρχίζει και πέφτει αφού αυξάνεται και η σαρωμένη επιφάνεια (βλέπε ορισμό απόδοσης) .

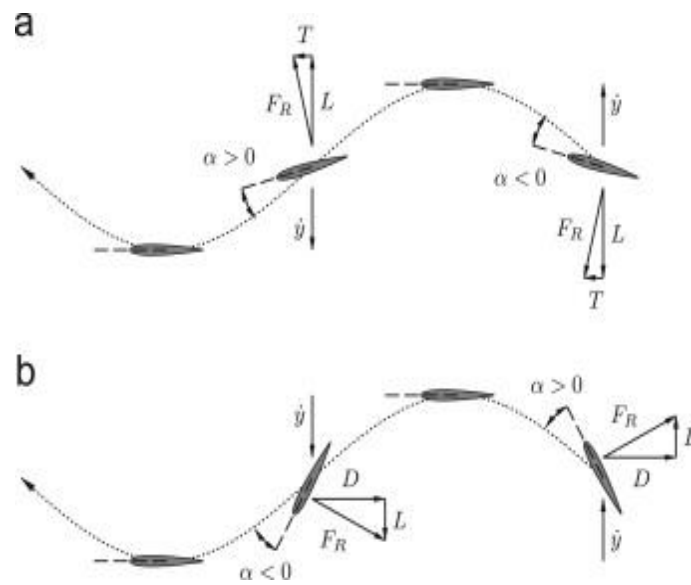
Λόγος Επιμήκους (Aspect Ratio) -Μη ημιτονοειδής κινήσεις

Αν και σε αυτήν την εργασία δεν διερευνάται το τρισδιάστατο φαινόμενο είναι χρήσιμο να γίνει μια αναφορά σε ένα σημαντικό παράγοντα όπως είναι ο λόγος επιμήκους και πως επηρεάζει την απόδοση παραγωγής ενέργειας από ένα ταλαντευόμενο σύστημα .Οι (Deng, Caulfield, & Shao, 2014) με αριθμητικές μελέτες για NACA0015 με $Re=1100$ διαπίστωσαν πως ο λόγος επιμήκους έχει μια βέλτιστη τιμή (στο εύρος 1-8) .Παρατήρησαν πως υπάρχει σημαντική αύξηση της απόδοσης όταν λόγος αυτός πάρει τιμές κοντά στο 4 ενώ περεταίρω αυξήσεις φέρνουν μόνο πολύ μικρές συνεισφορές στην απόδοση και επίσης κάνουν πιο δύσκολη την δημιουργία της ίδιας της κατασκευής .Επίσης ,όσο η τιμή του λόγου έπεφτε κάτω από 4 υπήρχε και πτώση της απόδοσης ενώ παρατηρούταν και ότι οι δύο χαρακτηριστικές κορυφές στον συντελεστή άντωσης (ανά ήμισυ

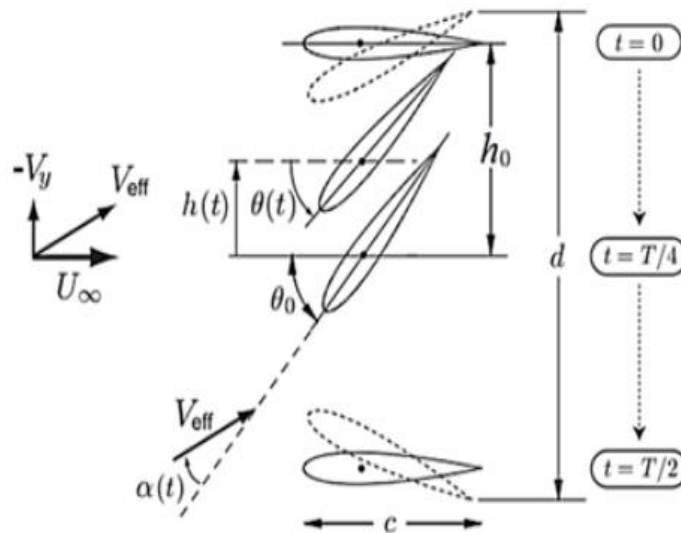
κύκλου) που συνήθως παρατηρούνται σε ημιτονοειδής ταλαντώσεις (βλέπε Σχήμα 15) περιορίζονταν σε μια .

Δοκίμασαν επίσης ,την μετατροπή των ημιτονοειδών κινήσεων σε άλλες (πχ με την μορφή προφίλ τραπεζίου) μέσω μιας παραμέτρου (β) η οποία μετατρέπει τα ημιτονοειδή προφίλ σε τραπεζοειδή (όσο αυξάνεται τόσο πιο πολύ τα προφίλ γίνονται "τετράγωνα") (βλέπε Σχήμα 8) . Βρήκαν πως η βέλτιστη παράμετρος για την παραγωγή ενέργειας είναι $\beta \approx 1,5$ με απόδοση της τάξης του 31,5% για $\theta_0 = 81,5^\circ$ και $h = 1,23c$.

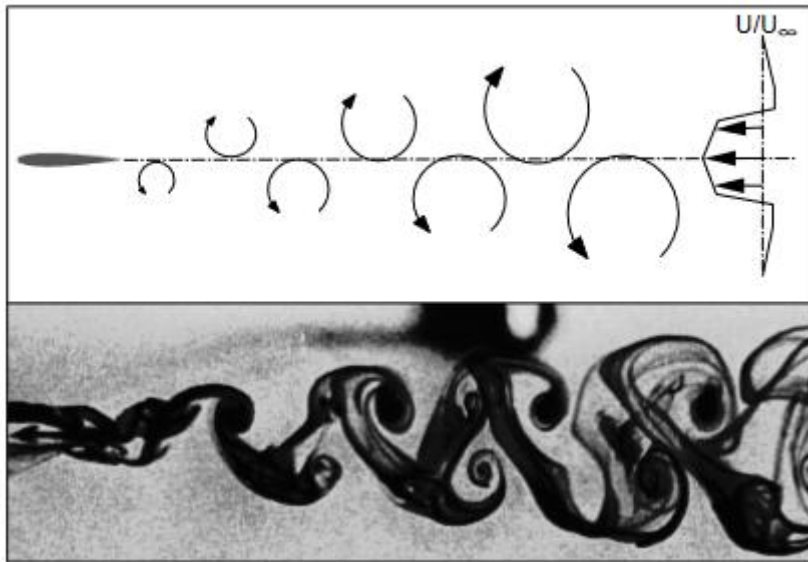
Σχήματα



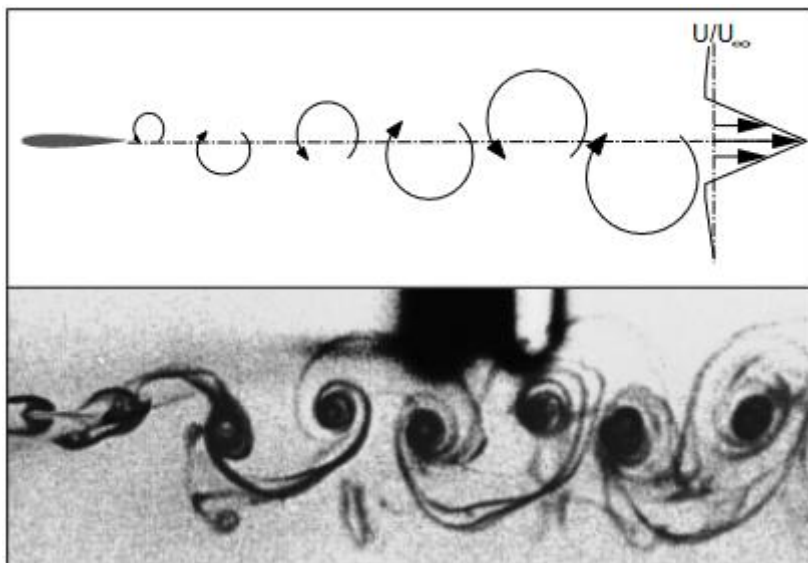
Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση των δυνάμεων και της ΑοΑ κατά την διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής πρόωσης (a) και κατά την διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής ενέργειας-οπισθέλκουσας (b)-(John Young, 2014)



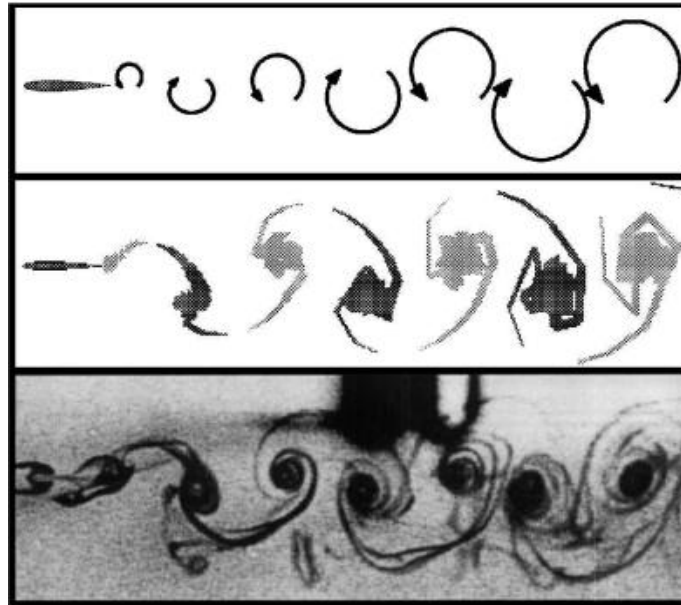
Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση βασικών παραμέτρων κίνησης και ταχυτήτων κατά τη διάρκεια μισού κύκλου ταλάντωσης . (G.Dumas, 2014)



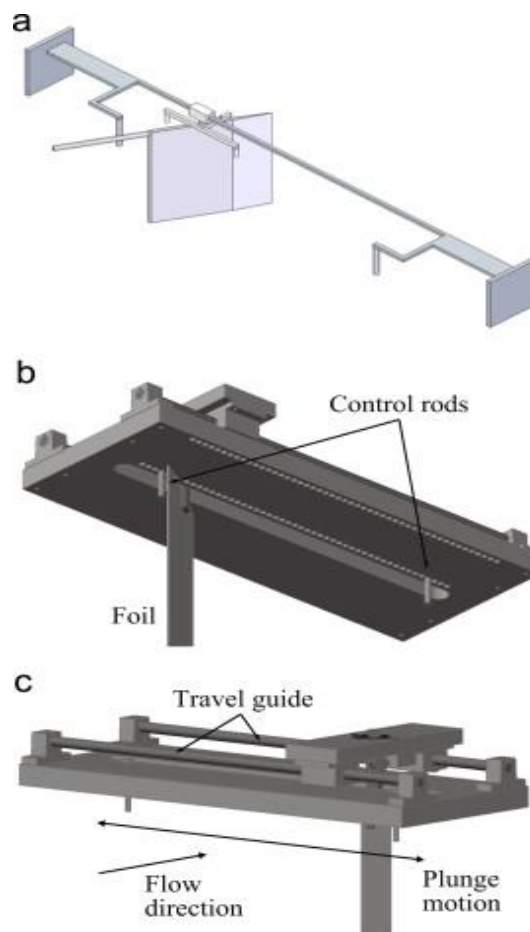
Σχήμα 3. Δομή ομόρου που ευνοεί την παραγωγή ενέργειας και οπισθέλκουσας (drag-indicative wake) (Platzer & Jones, 1998).



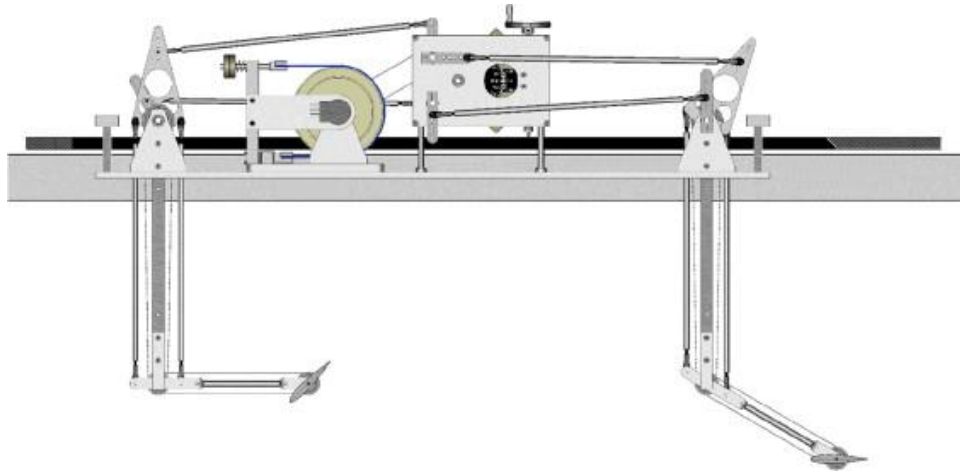
Σχήμα 4. Δομή ομόρου που ευνοεί την παραγωγή πρόωσης (thrust-indicative) (Platzer & Jones, 1998).



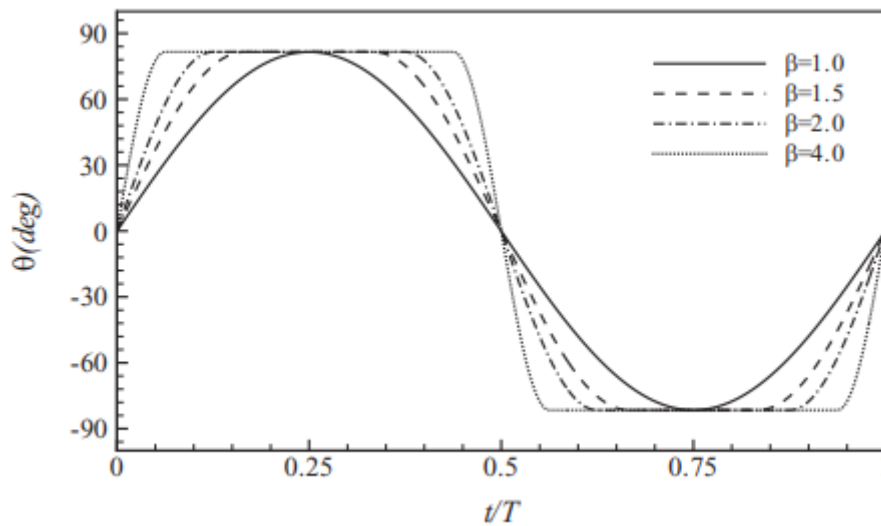
Σχήμα 5. Συμφωνία μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου με υπόθεση μη συνεκτικού ρευστού και πειραμάτων (Platzer & Jones, 1998).



Σχήμα 6. Το πλήρως παθητικό σύστημα α)πρώιμο σχέδιο από (Platzer & Bradley, 2009) b)&c) βελτιωμένος σχεδιασμός από τους (Platzer, Nesrin, Young, Ashraf, & Lai, 2014) .



Σχήμα 7. Γεννήτρια που αποτελείται από ταλαντούμενες υδροτομές σε σειρά . (Platzer M. , Ashraf, Young, & Lai, 2009)



Σχήμα 8. Διάφορα προφίλ γωνιακής ταλάντωσης που δοκιμάστηκαν από τους (Deng, Caulfield, & Shao, 2014) μέσω εισαγωγής της παραμέτρου β στις εξισώσεις αρμονικής ταλάντωσης .

Κεφάλαιο 2

Υπολογιστικές Προσομοιώσεις

Φυσικό Πρόβλημα

Το φυσικό πρόβλημα ,λοιπόν, που καλούμαστε να μοντελοποιήσουμε σε αυτήν την εργασία έχει μια φυσική υπόσταση η οποία είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητή ώστε να γίνουν κατανοητά ,με τη σειρά τους , τα φαινόμενα και στην συνέχεια τα μαθηματικά που την συνοδεύουν .

Το αντικείμενο που παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο αυτήν την εργασία είναι μια αεροτομή NACA0015 με μήκος χορδής 1 m .Βυθισμένη σε ένα ρεύμα αέρα με ταχύτητα 0,016 m/s ταλαντεύεται αρμονικά, μεταφορικά και γωνιακά με περίοδο $T=448,8s$ (ή 0,002) Hz ,με σκοπό να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης εκείνα που παράγουν την μέγιστη απόδοση ενέργειας .Η θερμοκρασία αέρα που επιλέχθηκε είναι 27 °C και η πίεση είναι ατμοσφαιρική .Η ροή είναι ισοθερμοκρασιακή και πουθενά μέσα στον όγκο ελέγχου δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας ή αύξηση θερμοκρασίας .

Ξεκινώντας από το σώμα (αεροτομή), το πιο βασικό είναι να πούμε πως αφού εκτελεί αρμονική ταλάντωση και οι δυνάμεις που θα ασκούνται από το ρευστό πάνω του θα είναι περιοδικές με περίοδο ίση με εκείνη της κίνησης του σώματος .Από αυτές τις δυνάμεις εκείνες που θα μας απασχολήσουν περισσότερο είναι εκείνες της άντωσης και της ροπής γύρω από το σημείο περιστροφής της πτέρυγας .Η οπισθέλκουσα παίζει σημαντικό ρόλο αλλά επειδή αυτό που μας απασχολεί κυρίως είναι οι δυνάμεις που μετέχουν στην παραγωγή ενέργειας δεν θα πρωταγωνιστεί σε αυτήν την εργασία (σε περίπτωση που η πτέρυγα λειτουργεί σε συνθήκες παραγωγής πρόωσης η οπισθέλκουσα είναι σημαντικός παράγοντας). Αυτές οι δυνάμεις πηγάζουν από την κατανομή της πίεσης πάνω στην αεροτομή (κατά την διάρκεια ενός κύκλου) και άρα τα πεδία ταχυτήτων/πιέσεων (στροβιλότητας κτλ.) παίζουν σημαντικό ρόλο για αυτό και γίνεται σημαντική αναφορά αργότερα σε αυτά και στο πώς επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας .

Όσον αφορά το ίδιο το ρευστό ,εξαιτίας των χαρακτηριστικών της ταλάντωσης της αεροτομής (τα οποία πηγάζουν από τον σκοπό της παραγωγής ενέργειας) ,στον ομόρου αυτής εμφανίζεται οδός Von Karman (βλέπε Σχήμα 3). Όπως περιγράφηκε στην βιβλιογραφική ανασκόπηση ,πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας παίζουν και οι δίνες που εκλύονται από τις ακμές προσβολής (LEV) και διαφυγής (TEV) καθώς ο "συγχρονισμός " τους με την κίνηση

της αεροτομής επηρεάζει άμεσα τις δυνάμεις και τα φορτία (κατανομή πίεσης) που "νιώθει" το σώμα . Εξαιτίας των μεγάλων γωνιών προβολής ,λοιπόν, που βιώνει η πτέρυγα κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης εμφανίζεται δυναμική αποκόλληση του οριακού στρώματος η οποία δημιουργεί τις εν λόγω δίνες .

Μαθηματικό Πρόβλημα - Υπολογιστικός Κώδικας

Η πλειονότητα των ροών που χρειάστηκε να μοντελοποιηθούν σε αυτή την διπλωματική είχαν τα χαρακτηριστικά μη-μόνιμης ροής ,ασυμπίεστης ($u_{\infty} \ll 1$ Mach) με αριθμό Reynolds της τάξης του 1100 (στρωτή) .Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Fluent 19.2 .

Για την μοντελοποίηση της γωνιακής κίνησης της αεροτομής χρησιμοποιήθηκε άκαμπτο-κινούμενο πλέγμα (sliding-rigid mesh) σχήματος κύκλου το οποίο είναι "πακτωμένο" πάνω στην πτέρυγα και κινείται μαζί της .Το υπόλοιπο πλέγμα ,που περιβάλλει την κυκλική περιοχή της αεροτομής ,αποτελείται από σταθερό -άκαμπτο πλέγμα . Για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων αλλά και χρόνου το πρόβλημα είναι στημένο πάνω σε ένα κινούμενο σύστημα αναφοράς που έχει ως κέντρο την αεροτομή και εκτελεί την μεταφορική ταλάντωση που θα εκτελούσε η αεροτομή (βλέπε συνοριακές συνθήκες στο Σχήμα 9). Οι επιπλέον όροι που εισάγονται στις εξισώσεις Navier-Stokes,λόγω αυτής της παραδοχής, αφορούν την μετατροπή των ταχυτήτων από το στάσιμο αδρανειακό σύστημα στο κινούμενο(εξηγείται στο τέλος της παραγράφου) .

Όσον αφορά τις αριθμητικές μεθόδους ,ο λύτης που χρησιμοποιήθηκε είχε τα εξής χαρακτηριστικά : Transient ,Pressure based και Laminar (χαμηλός Reynolds) .Οι χωρικές διακριτοποιήσεις (ορμής ,πίεσης) καθώς και χρονικές είναι δευτέρας τάξης ανάντη (second order upwind) . Για τον υπολογισμό της ροής κοντά στο τοίχωμα χρησιμοποιήθηκαν standard wall functions .

Για την σύζευξη του πεδίου των πιέσεων και των ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE .Επειδή η ροή μας είναι ασυμπίεστη η λεγόμενη σύζευξη μεταξύ πίεσης-ταχύτητας εισάγει έναν νέο περιορισμό : αν το σωστό πεδίο πιέσεων εφαρμόζεται στις εξισώσεις της ορμής τότε το προκύπτον πεδίο ταχυτήτων πρέπει και αυτό με τη σειρά του να ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας .Στον αλγόριθμο αυτόν χρησιμοποιούνται οι αρχικές "προβλέψεις" για το πεδίο ταχυτήτων ,έπειτα λύνονται οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής χρησιμοποιώντας "τυχαίες" τιμές για το πεδίο των πιέσεων (ώστε να λάβουμε το εκτιμώμενο πεδίο ταχυτήτων),αμέσως μετά ακόμα μια εξίσωση διόρθωσης του πεδίου πιέσεων (που πηγάζει από την εξίσωση συνέχειας)

λύνεται .Έχοντας τις διορθώσεις για κάθε τιμή πίεσης του πεδίου ανανεώνουμε τις πιέσεις και ταχύτητες (μέσα από τις διακριτοποιημένες εξ. ορμής με τις διορθωμένες πιέσεις) .Η διαδικασία είναι επαναληπτική και έχει ως σκοπό να βελτιώνει σταδιακά(μέχρι την σύγκλιση) τις αρχικές προβλέψεις για τα πεδία ταχυτήτων-πιέσεων που έγιναν αρχικά .

Στην περίπτωση που περιγράφεται σε αυτό το κείμενο οι κύριες εξισώσεις ροής που καλείται το λογισμικό να λύσει ,αφορούν δισδιάστατη -ασυμπίεστη ροή και συνοψίζονται παρακάτω (σε διαφορική-διανυσματική έκφραση) :

$$\bullet \nabla \cdot \vec{V} = 0 \text{ (Εξ. Συνέχειας) (9)}$$

$$\bullet \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{V} \otimes \vec{V}) = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{f} \text{ (Εξ. Διατ. Ορμής) (10)}$$

Όπου σ, f είναι οι συνεκτικές τάσεις και οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στον όγκο του ρευστού αντίστοιχα .Έχοντας στήσει το πρόβλημα σε κινούμενο σύστημα αναφοράς και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις :

$$\vec{V}_r = V - \vec{U}_r \text{ (11)}$$

$$\vec{U}_r = \vec{V}_t + \vec{\omega} \times \vec{r} \text{ (12)}$$

όπου \vec{V}_r είναι η ταχύτητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής που βρίσκεται πάνω στο κινούμενο σύστημα αναφοράς , V είναι η απόλυτη ταχύτητα και \vec{U}_r είναι η ταχύτητα του κινούμενου συστήματος αναφοράς σε σχέση με το ακίνητο ενώ \vec{V}_t είναι η μεταφορική ταχύτητα του κινούμενου και $\vec{\omega}$ η γωνιακή του ,οι εξισώσεις (9) και (10) παίρνουν την μορφή :

$$\nabla \cdot \vec{V}_r = 0 \text{ (13)}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}_r}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{V}_r \vec{V}_r) + \rho (2\vec{\omega} \times \vec{V}_r + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\alpha} \times \vec{r} + \vec{a}) = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{f} \text{ (14)}$$

$$\text{όπου } \vec{a} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \text{ και } \vec{\alpha} = \frac{d\vec{V}_t}{dt} .$$

Η νέα εξίσωση διατήρησης της ορμής περιέχει τέσσερις επιπλέον όρους επιτάχυνσης .Οι πρώτοι δυο όροι είναι η επιτάχυνση Coriolis ($2\vec{\omega} \times \vec{V}_r$) και η κεντρομόλος επιτάχυνση ($\vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}$) .Ο τρίτος ($\vec{\alpha} \times \vec{r}$) και ο τέταρτος όρος (\vec{a}) εμφανίζονται σε περιπτώσεις όπου η μεταφορική και η γωνιακή επιτάχυνση δεν είναι σταθερές (όπως στην περίπτωση μας δηλαδή) .

Επομένως η αεροτομή εκτελεί γωνιακή κίνηση μέσα σε ένα μεταφορικά κινούμενο σύστημα αναφοράς .

Όσον αφορά την κίνηση της πτέρυγας αυτή εισέρχεται στην μοντελοποίηση με τη χρήση UDF (user defined functions) που μας επιτρέπει να ορίσουμε την επιθυμητή ημιτονοειδή κίνηση .Αυτές οι συναρτήσεις είναι γραμμένες σε γλώσσα C και παρατίθενται στο Παράρτημα Α στο τέλος της εργασίας .

Υπολογιστικό πλέγμα - πεδίο

Το υπολογιστικό πεδίο είναι σχήματος ορθογωνίου με διαστάσεις $75C \times 70C$ (βλέπε Σχήμα 9) .Το πλέγμα αποτελείται από πλήθος ≈ 200.000 τριγωνικών στοιχείων .Απαρτίζεται από δυο κύριες ζώνες .Η πρώτη ζώνη (σχήματος κύκλου και ακτίνας $5C$) είναι πιο πυκνή και περιλαμβάνει την αεροτομή (και είναι εκείνη που περιστρέφεται μαζί με την αεροτομή) .Γύρω από την αεροτομή υπάρχει δομημένο πλέγμα με 30 στρώσεις ενώ το πρώτο κελί πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής έχει ύψος $1.3e-4$ m που για την περίπτωση μας αντιστοιχεί σε $y^+ < 1$ (Σχήμα 9) .Κάθε επιπλέον επίπεδο πέρα από το πρώτο κελί αυξάνεται κατά 10% σε ύψος σε σχέση με το προηγούμενο και το συνολικό ύψος του δομημένου πλέγματος "συλλαμβάνει" ικανοποιητικά το μέγεθος και την συμπεριφορά του οριακού στρώματος (Σχήμα 10). Για να υπάρχει η σωστή μεταφορά πληροφορίας στην διεπιφάνεια κινούμενης (που μοντελοποιεί την γωνιακή κίνηση) και σταθερής επιφάνειας του πλέγματος το μέγεθος των στοιχείων στα δυο σύνορα είναι το ίδιο (Fluent 19.2 User's Guide).Πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής είναι κατανομημένα 400 ορθογώνια στοιχεία .Το πλέγμα στο σύνολο του είναι άκαμπτο .

Μελέτη ανεξαρτησίας χρονικού βήματος

Για την χρονική ανεξαρτησία επιλέχθηκε μια κατακόρυφη γραμμή στην περιοχή του ομόρου της αεροτομής η οποία έχει μήκος 3.6 χορδές (με κέντρο το κέντρο της αεροτομής) πάνω στην οποία λήφθηκαν από δυο διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης τα προφίλ των ταχυτήτων .Η δειγματοληψία των ταχυτήτων έγινε από 100 ισαπέχοντα σημεία πάνω στην γραμμή αυτή .Από τις προσομοιώσεις που είχαν την χρονική διάρκεια 6.6 κύκλων ταλάντωσης (ή 3000 sec) ταχύτητες λήφθηκαν από τις χρονικές στιγμές 1500sec & 2700sec .

Μελετήθηκαν τέσσερα χρονικά βήματα : 0.3s ,0.2s ,0.1s & 0.05s .Το πλέγμα που εν τέλη χρησιμοποιήθηκε (το οποίο προέκυψε από την αντίστοιχη ανεξαρτητοποίηση που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο) ήταν το πλέγμα των 200.000 στοιχείων .

Παρατηρώντας τα Σχήμα 11 & Σχήμα 12 βλέπουμε πως το βήμα των 0.1s δίνει τα πλησιέστερα αποτελέσματα σε αυτό των 0.05s (που είναι εκείνο που θεωρητικά δίνει τα πιο ακριβοί αποτελέσματα) .Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δυο αποτελεί 1.8% (ή αλλιώς $3 \cdot 10^{-4}$ m/s) της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος για την στιγμή των 1500s ενώ για την στιγμή των 2700s η μέγιστη διαφορά ανεβαίνει στο 1,6% (ή αλλιώς $4,8 \cdot 10^{-4}$ m/s) της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος .

Αξίζει να αναφερθεί πως το πιο μεγάλο χρονικό βήμα των 0.3s είναι πιο κοντά στο βήμα 0.05s όσον αφορά τα αποτελέσματα σε σχέση με το 0.2s όπως φαίνεται και στα δυο σχήματα .Ενώ η γενικότερη τάση είναι η ελαχιστοποίηση του χρονικού βήματος για την επιτυχή περιγραφή μιας ροής εδώ φαίνεται πως κάποιες φορές ένα μικρότερο χρονικό βήμα δεν δίνει πάντοτε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα .Εφόσον το σχήμα χρονικής διακριτοποίησης είναι πεπλεγμένο (implicit) τα χρονικά βήματα τα οποία μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι αρκετά ,είναι προφανές όμως πως για μεγαλύτερη ακρίβεια ένα "μικρό" χρονικό βήμα είναι προτιμότερο .Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των διαδοχικών βημάτων καθώς και οι διαφορές κάθε βήματος συγκριτικά με το μικρότερο για να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα πάνω στην χρονική ανεξαρτησία .Βλέποντας τις τιμές του σφάλματος για το βήμα 0,1s καταλαβαίνει κάποιος πως ήταν εκείνο που συνδύαζε ικανοποιητική ακρίβεια και εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων .

Χρονικό Βήμα(s) Χρονική Στιγμή	Σφάλμα (% της U_{∞})	
	1500s	2700s
0,3	4,3 (3,2)	5 (1,4)
0,2	6,6 (4,9)	6 (3,6)
0,1	1,8	1,6
0,05		

Πίνακας 1.Μέγιστες διαφορές κάθε χρονικού βήματος συγκριτικά με το πιο πυκνό ,εκφρασμένες ως ποσοστό της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος, για δυο χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .Στις παρενθέσεις αναφέρονται οι μέγιστες ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων .

Μελέτη Ανεξαρτησίας Πλέγματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη ανεξαρτησίας από την χωρική διακριτοποίηση ήταν παρόμοια με εκείνη που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο .Με βάση το χρονικό βήμα των 0.2s εξετάστηκαν τα πλέγματα των : 100χιλ. ,156χιλ. 200χιλ. ,230χιλ. στοιχείων .

Ξανά, για την εξέταση της καταλληλότητας του κάθε πλέγματος λήφθηκαν δειγματοληπτικά τα προφίλ των ταχυτήτων στις χρονικές στιγμές των 2000s & 3000s (διάρκεια προσομοίωσης 3000s) πάνω σε μια κάθετη γραμμή στην οποία ήταν ισοκαταναμημένα 100 σημεία δειγματοληψίας . Το πιο αξιόπιστο πλέγμα με βάση το οποίο αξιολογήθηκαν και τα υπόλοιπα ήταν εκείνο των 230χιλ. στοιχείων καθώς ήταν και το πιο πυκνό .Το μέγεθος που άλλαζε με την μεταβολή του πλήθους των στοιχείων αφορούσε το μέγεθος των στοιχείων την ζώνη "1" (sliding mesh ,βλέπε Σχήμα 9) .Από 0,03 m για το πιο αραιό πλέγμα (100χιλ. στοιχεία) μέχρι 0,0175 m για το πιο πυκνό πλέγμα (230χιλ. στοιχεία) , τα μεγέθη αφορούν το μέσο μέγεθος στοιχείου της περιοχής αυτής . Η περιοχή αυτή είναι εκείνη μέσα στην οποία δημιουργούνται και συμβαίνουν οι περισσότερες διαταραχές στην ροή και για αυτό το μέγεθος των στοιχείων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο .

Σε γενικές γραμμές βλέπουμε καλή συμφωνία μεταξύ των πλεγμάτων εξαιρουμένου του πλέγματος των 100χιλ. στοιχείων το οποίο είναι εκείνο με τις μεγαλύτερες διαφορές .Πιο

συγκεκριμένα την χρονική στιγμή των 2000s (Σχήμα 13 . Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 2000sec για κάθε ένα από τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν .Σχήμα 13) βλέπουμε καλή συμφωνία για σχεδόν όλη την γραμμή πάνω στην οποία εξετάζουμε τις ταχύτητες και παρά μόνο στο τελείωμα της έχουμε κάποιες αποκλίσεις των δυο μεσαίων πλεγμάτων από το πυκνότερο της τάξης του 5,5% .Την χρονική στιγμή των 3000s το σφάλμα είναι 4,6% .

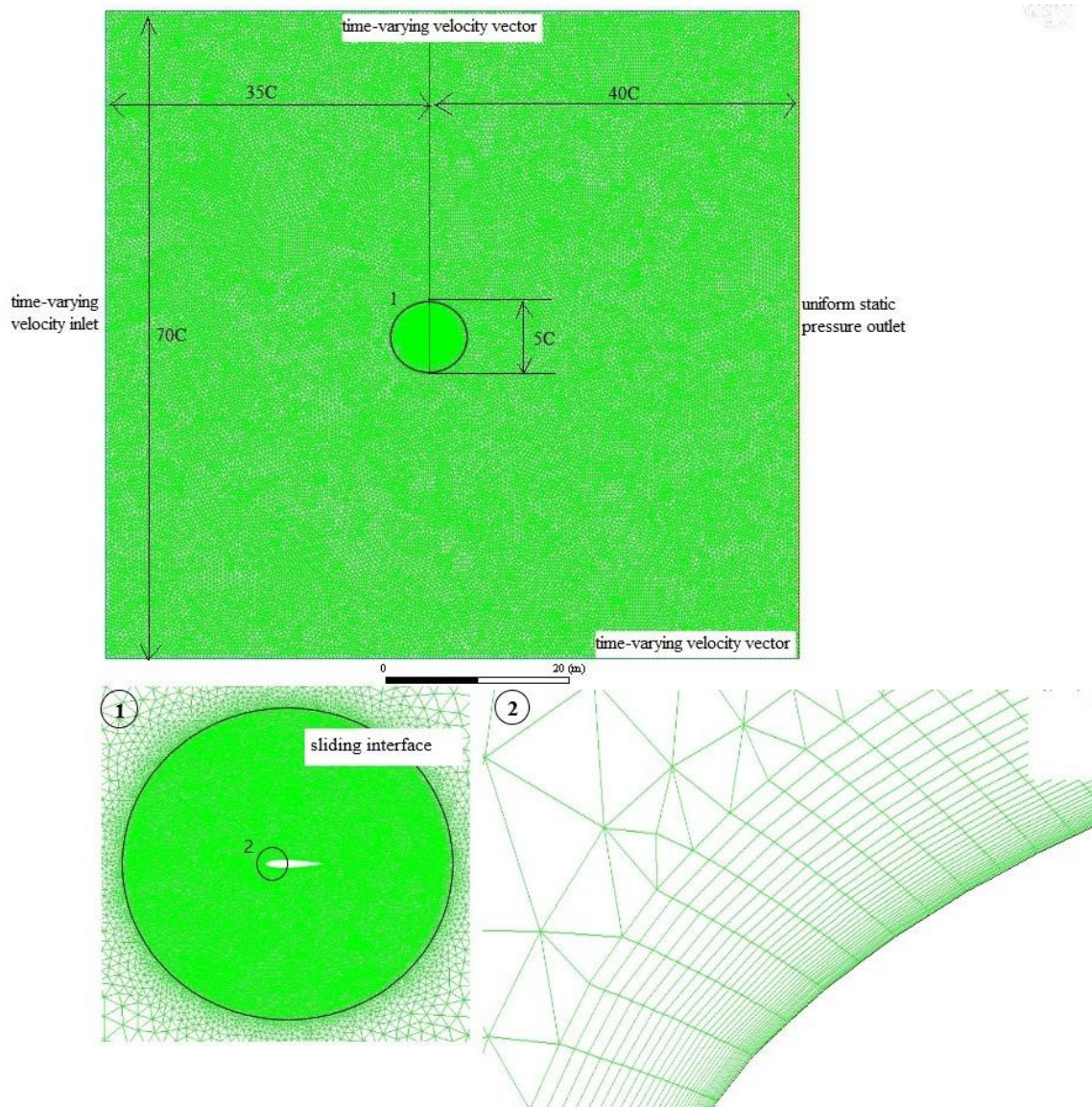
Για την διατήρηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων αλλά και για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων και χρόνου επιλέχθηκε το πλέγμα των 200.000 στοιχείων ως το βασικό πλέγμα που χρησιμοποιείται και μετέπειτα για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων και για την σύγκριση με το σχετικό άρθρο (Kinsey & Dumas, 2006) .

Πλέγμα Χρονική Στιγμή	Σφάλμα (% της U_{∞})	
	2000s	3000s
100.000	11,02 (11,8)	16,4 (14)
156.000	5,6 (2)	2,4 (7)
200.000	5,5	4,6
230.000		

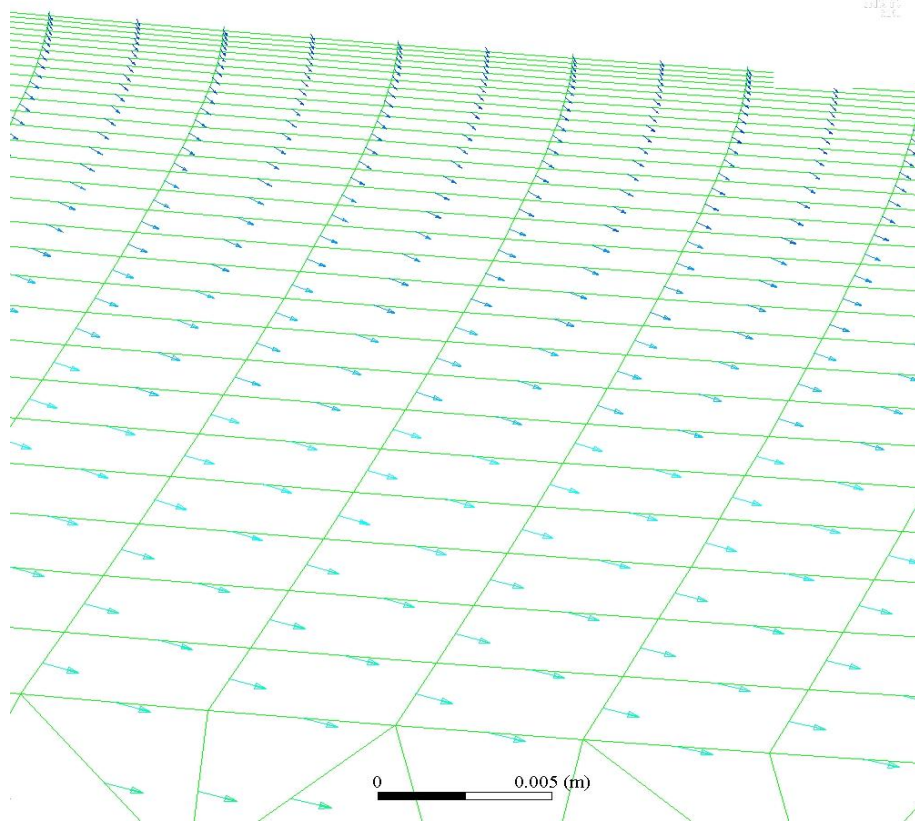
Πίνακας 2.Μέγιστες διαφορές κάθε πλέγματος συγκριτικά με το πιο πυκνό εκφρασμένες σαν ποσοστό της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος, για δυο χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .Στις παρενθέσεις αναφέρονται οι μέγιστες ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των διαδοχικών πλεγμάτων .

Παρατήρηση : Σε αυτήν την εργασία τα σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών πλεγμάτων αλλά και μεταξύ των χρονικών βημάτων εκφράζονται ως ποσοστό της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος γιατί αυτό είναι ένα αντικειμενικό κριτήριο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σύγκριση με άλλες παρόμοιες εργασίες με τα ίδια ροϊκά χαρακτηριστικά .Αν το σφάλμα εκφραζόταν ως προς το αποτέλεσμα του πιο πυκνού/μικρού πλέγματος/χρονικού βήματος το σφάλμα θα ήταν φαινομενικά μικρότερο .

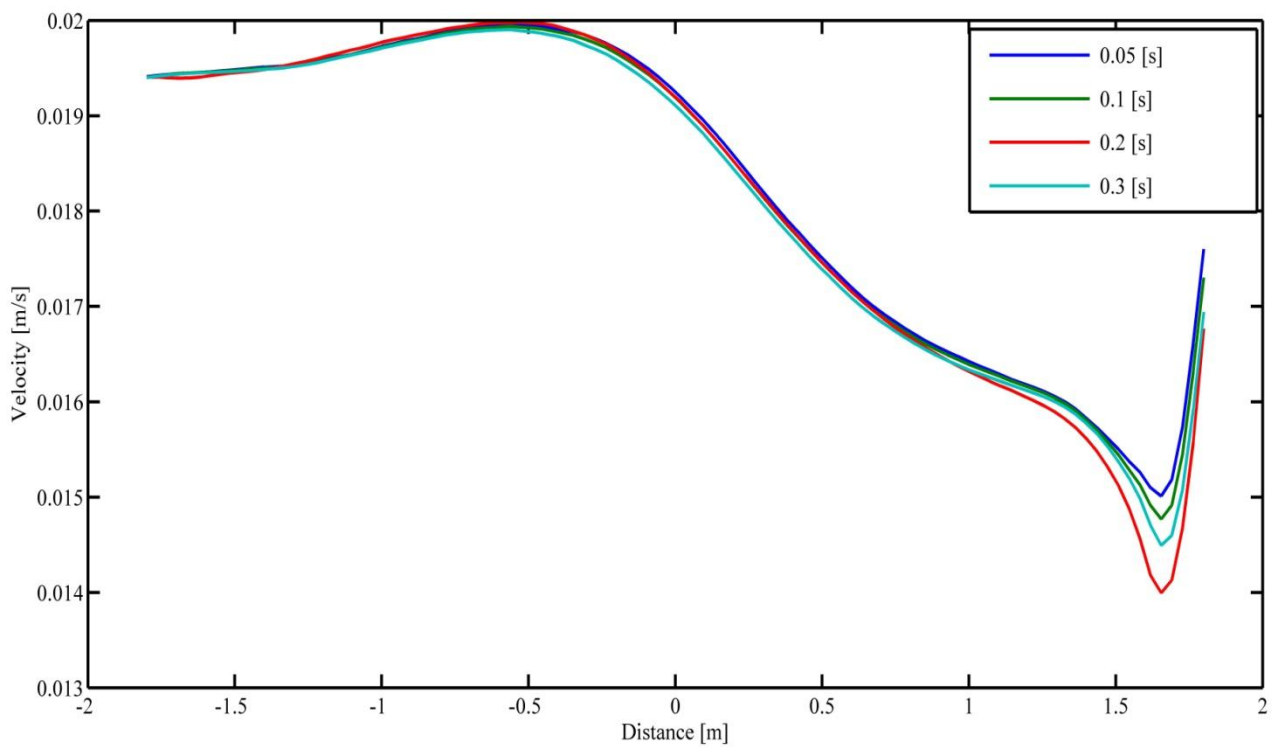
Σχήματα



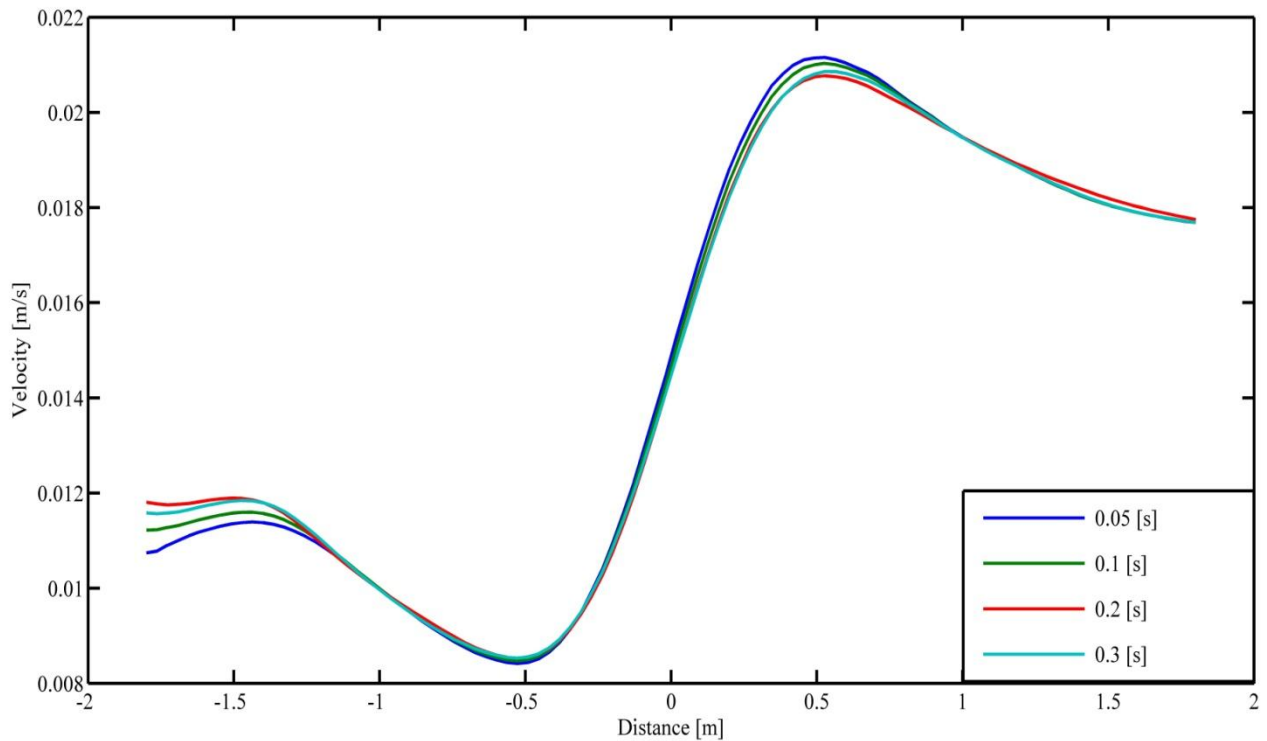
Σχήμα 9. Βασικές περιοχές του υπολογιστικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι συνοριακές συνθήκες. Στο υποσχήμα 1 φαίνεται και η διεπιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της γωνιακής κίνησης της αεροτομής ενώ στο υποσχήμα 2 φαίνεται το δομημένο πλέγμα για την σύλληψη του οριακού στρώματος της αεροτομής.



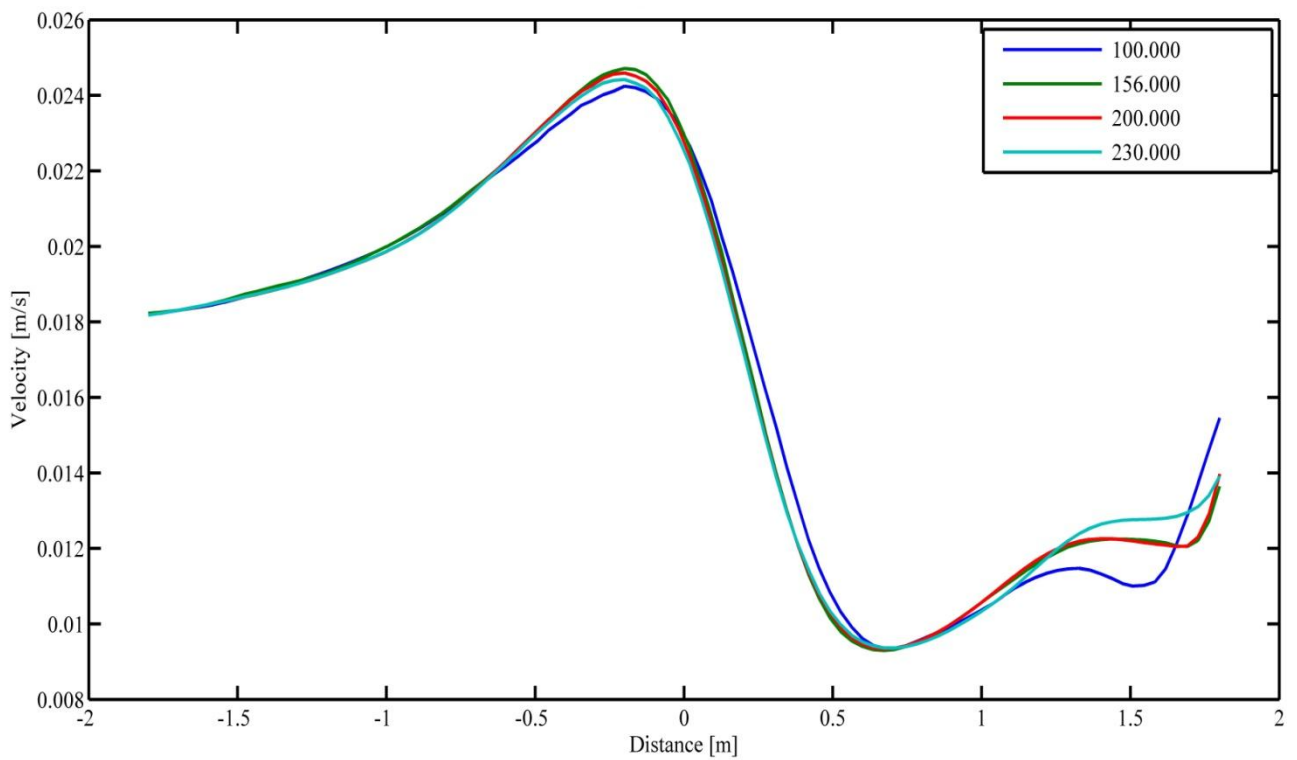
Σχήμα 10. Το δομημένο πλέγμα πάνω στην αεροτομή .Από τα διανύσματα της ταχύτητας φαίνεται η ικανοποιητική "σύλληψη" του οριακού στρώματος .



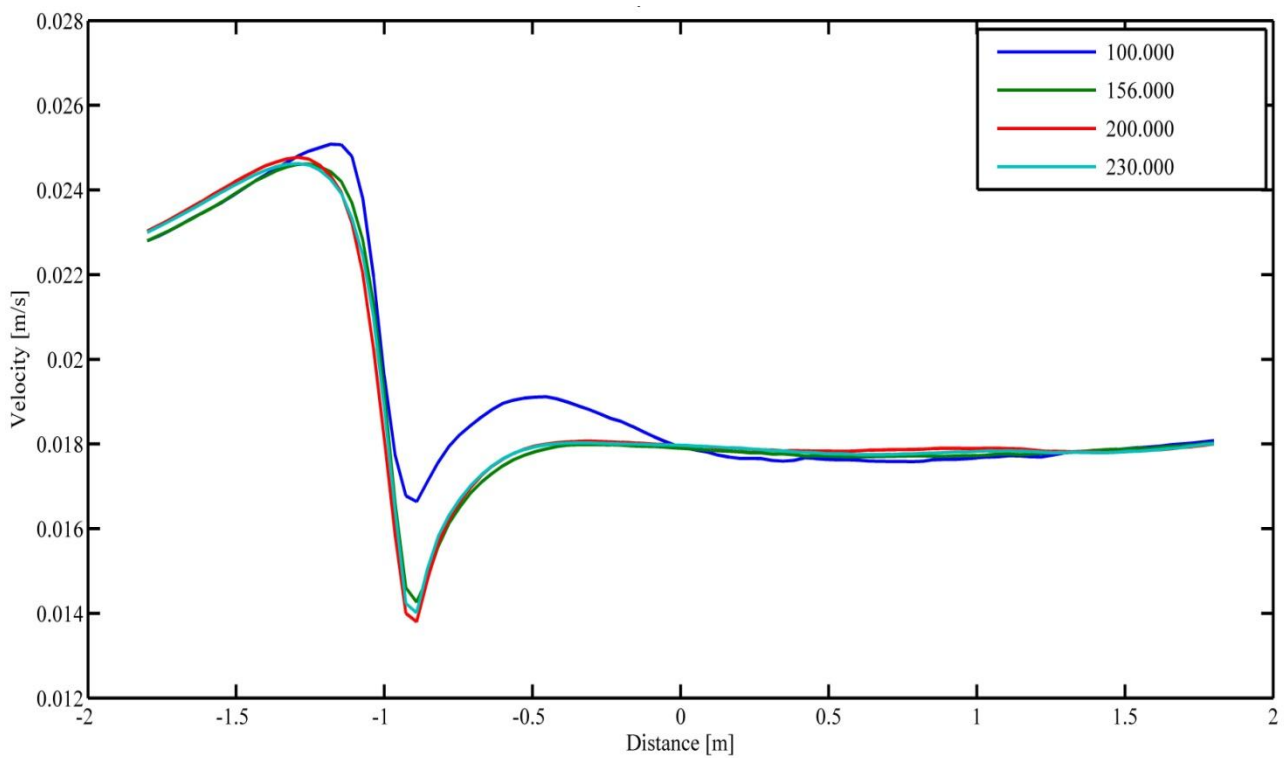
Σχήμα 11. Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 1500sec για κάθε ένα από τα χρονικά βήματα που δοκιμάστηκαν .



Σχήμα 12. Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 2700sec για κάθε ένα από τα χρονικά βήματα που δοκιμάστηκαν .



Σχήμα 13 . Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 2000sec για κάθε ένα από τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν .



Σχήμα 14. Προφίλ ταχυτήτων από την χρονική στιγμή 3000sec για κάθε ένα από τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν .

Κεφάλαιο 3

Χαρακτηριστικά Προσομοιώσεων

Με βάση την βιβλιογραφία (Kinsey & Dumas, 2006) η περιοχή βέλτιστης απόδοσης μιας ταλαντευόμενης αεροτομής με $Re=1100$ βρίσκεται για πλάτη ταλάντωσης περίπου μιας χορδής και 76.3° . Για τον λόγο αυτό τα κινηματικά χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων που μελετήθηκαν σε αυτήν την εργασία κυμαίνονται γύρω από τους αριθμούς αυτούς. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις πλατών μεταφορικής και γωνιακής ταλάντωσης :i) $h=1$ & $\theta=71.3^\circ$, ii) $h=1m$ & $\theta=76.3^\circ$, iii) $h=1m$ & $\theta=81.3^\circ$, iv) $h=0.9m$ & $\theta=76.3^\circ$, v) $h=1.1m$ & $\theta=76.3^\circ$.

Έχοντας εξετάσει τα αποτελέσματα των περιπτώσεων αυτών φάνηκε αμέσως η ισχυρή εξάρτηση της απόδοσης απαγωγής ενέργειας από την αύξηση του πλάτους. Για τον λόγο αυτό διερευνήθηκε και η περίπτωση με (vi) $h=1.4m$ & $\theta=81.3^\circ$ ώστε να εξακριβωθεί αν θα επιτευχθεί ακόμα καλύτερο αποτέλεσμα με ταυτόχρονη αύξηση και των δυο πλατών (αντί κάθε ενός ξεχωριστά).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι παραπάνω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με πλέγμα 200χιλ. στοιχείων και χρονικό βήμα 0.1s. Σε όλες τις περιπτώσεις κίνησης η μεταφορική και η γωνιακή ταλάντωση έχουν διαφορά φάσης $\pi/2$ με την μεταφορική να προηγείται. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι με την χρήση του αδρανειακού συστήματος με βάση το οποίο μοντελοποιείται η μεταφορική κίνηση, από τα άνω-κάτω όρια του υπολογιστικού πεδίου εισάγεται ρευστό με κάθετη συνιστώσα ταχύτητας ίση με την μεταφορική ταχύτητα που θα είχε η αεροτομή αν εκτελούσε η ίδια την κίνηση. Έγινε υπόθεση στρωτής ροής (Laminar) λόγω του χαμηλού Re . Εξάχθηκαν αποτελέσματα για τους συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας, ροπής και σχήματα με τις ισοΰψεις του πεδίου στροβιλότητας, πίεσης και ταχύτητας. Για λόγους πληρότητας παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις κίνησης της αεροτομής για την βασική περίπτωση ($h=1m$ & $\theta=76.3^\circ$) :

$$y(t) = 1\sin(0.014t + \pi/2) \quad (11)$$

$$\theta(t) = 1.33\sin(0.014t) \quad (12)$$

Για την εισαγωγή όμως της κίνησης στο λογισμικό Fluent απαιτείται η εισαγωγή υπό την μορφή ταχυτήτων ,οπότε οι παραπάνω εξισώσεις μετασχηματίζονται στις :

$$\dot{y}(t) = 0.014\cos(0.014t + \pi/2) \quad (13)$$

$$\dot{\theta}(t) = 0.014 \times 1.33\cos(0.014t) \quad (14)$$

όπου οι γωνίες και οι γωνιακές ταχύτητες είναι εκφρασμένες σε ακτίνια (για τις υπόλοιπες περιπτώσεις οι εξισώσεις είναι ίδιες με διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης απλώς) .

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα των αποτελεσμάτων αφορούν το στάδιο της ροής όπου θα λέγαμε ότι επικρατεί η μόνιμη κατάσταση (steady state) .Όπως αναφέρουν οι (Kinsey & Dumas, 2006) στο άρθρο τους, η μεταβατική περίοδος (transitory period) διαρκεί περίπου 20 "convective time units" τα οποία ορίζονται ως εξής :

$$1 \text{ c.t.u} = t_c = \frac{c}{u_\infty} \quad (14)$$

και με βάση τα χαρακτηριστικά που μελετώνται σε αυτήν την εργασία αντιστοιχούν σε 62,5s (c.t.u) ή αλλιώς 1250s (20 c.t.u) . Επομένως ,δεδομένου του ότι μια τυπική προσομοίωση διήρκεσε 3000sec η ανάλυση του τελευταίου κύκλου πλήρους ταλάντωσης (από 2244sec μέχρι 2692,8sec) θεωρούμε πως αντιπροσωπεύει την ροή γύρω από ένα σώμα όπου έχουν επικρατήσει πλέον σταθερές (περιοδικές) συνθήκες ροής (steady state) αφού είναι αρκετά μετέπειτα από τα 1250s .Από το χρονικό διάστημα του κύκλου που αναφέρεται παραπάνω λαμβάνονται οι σχετικές εικόνες με οκτώ στιγμιότυπα ανά κύκλο (κάθε T/8) καθώς και οποιοδήποτε αποτέλεσμα σχετικό με συντελεστές άντωσης, ροπής και οπισθέλκουσας που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή μεγεθών όπως απόδοση και συντελεστής ισχύος .

Κάτι που μέχρι τώρα έχουμε πάρει ως δεδομένο αλλά δεν έχουμε σχολιάσει είναι το μέγεθος του χρονικού βήματος .Σύμφωνα ξανά με το προαναφερθέν άρθρο ,για την εκτίμηση του μεγέθους του χρονικού βήματος λαμβάνεται υπόψη ο τύπος :

$$\Delta t = \min \left\{ \frac{T}{2000}; \frac{c}{100|V|} \right\} \quad (15)$$

όπου ,

$$\Delta t = \min\{0.223 ; 0.35\} \quad (16)$$

Με τον όρο $\|V\|$ περιγράφεται η Ευκλείδεια νόρμα του πίνακα των ταχυτήτων που περιλαμβάνει την μεταφορική και γωνιακή γωνιακή ταχύτητα της αεροτομής καθώς και την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος .

Αυτό που μας λέει η εξίσωση (15) είναι πως το χρονικό βήμα λαμβάνεται ως η ελάχιστη των δυο τιμών που βλέπουμε στην (16) . Η εν λόγω εξίσωση ,αν και εμπειρική ,δίνει σωστές προβλέψεις όπως αποδεικνύεται και στα αποτελέσματα αυτής της εργασίας (και φαίνεται πως χρησιμοποιείται και σε άλλες δημοσιευμένες εργασίες του είδους (Campobasso & Drofelnik, 2012)) .Παρά το γεγονός ότι επιλέξαμε το χρονικό βήμα 0,1s μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα σχήματα της χρονικής ανεξαρτησίας της προηγούμενης ενότητας (Σχήμα 11) πως το βήμα 0,2s αλλά και εκείνο των 0,3s δεν ξεφεύγουν και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκριτικά και με άλλα αρκετά μικρότερα όπως εκείνο των 0,05s . Παρά το γεγονός ότι ο τύπος αυτός δεν είχε ληφθεί αρχικά υπόψη , τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η ικανοποιητική ταύτιση τους με τα αποτελέσματα του άρθρου επαληθεύουν ότι έγιναν οι σωστές παραδοχές όσον αφορά το χρονικό βήμα .

Με βάση το πλέγμα που επιλέχθηκε και το χρονικό βήμα ,μια τυπική προσομοίωση του προβλήματος που περιγράφουμε , πραγματικού χρόνου ροής 3000 s διαρκεί περίπου 72 ώρες με επεξεργαστή i7 @ 2 Ghz και 8Gb ram . Ο CPU χρόνος αυξάνεται σημαντικά όταν το πλέγμα υπόκειται σε παραμορφώσεις , το οποίο και δικαιολογεί την μέθοδο μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε .

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

Θα ξεκινήσουμε την συζήτηση των αποτελεσμάτων σχολιάζοντας το μέγεθος που ενδιαφέρει περισσότερο σε περιπτώσεις συστημάτων που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ,την απόδοση . Η απόδοση εξαρτάται άμεσα από παράγοντες όπως το μέγεθος της ταχύτητας (μεταφορική και γωνιακή) ,το μέγεθος την δύναμης άντωσης και της ροπής γύρω από τον άξονα περιστροφής (εκφρασμένα από τους αντίστοιχους συντελεστές) και από την συνολική σαρωμένη επιφάνεια από την αεροτομή (βλέπε Σχήμα 2 και εξισώσεις (6,7,8)) .Προφανώς, οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στην πτέρυγα επηρεάζονται άμεσα από το πεδίο της ροής (δίνες ακμής προσβολής και διαφυγής όπως περιγράφηκε και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση) .

Όπως αναφέρθηκε και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση ,ο γενικός κανόνας (ειδικά για τον συντελεστή ισχύος) είναι πως όσο αυξάνεται το πλάτος της ταλάντωσης (ας εστιάσουμε στην μεταφορική) αυξάνεται και η απόδοση ,μέχρι κάποιο όριο προφανώς .Αυτή είναι μια συμπεριφορά που αποτυπώνεται ξεκάθαρα στον Πίνακας 3 .Αν προσέξουμε όμως ,θα δούμε πως η περίπτωση με $h=0,9$ m συγκριτικά με την $h=1$ m & $\theta_0=76,3^\circ$ έχει περίπου 1-2 % μεγαλύτερη απόδοση γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την γενική τάση .Η απόδοση όμως εξαρτάται τόσο από την μέγιστη ταχύτητα κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης όσο και από την συνολική σαρωμένη επιφάνεια .Οι δύο περιπτώσεις αυτές ,λοιπόν ,έχουν διαφορά στην μέγιστη μεταφορική ταχύτητα της τάξης του $1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s αλλά διαφορά της τάξης των 0,2 m όσον αφορά την επιφάνεια σάρωσης .Επειδή η επιφάνεια βρίσκεται στον παρανομαστή της απόδοσης (βλέπε ξανά εξ.8) η μεγαλύτερη αυτή διαφορά είναι που ευθύνεται για την συμπεριφορά αυτή της απόδοσης .

Με βάση αυτό το σκεπτικό εξετάστηκε η τελευταία περίπτωση του πίνακα .Με ταυτόχρονη αύξηση γωνιακής και μεταφορικής ταλάντωσης παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αύξηση για όλες τις περιπτώσεις . Αποδείχθηκε πως υπάρχουν και άλλα μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης ,με την ίδια αδιάστατη συχνότητα $f^* = 0,14$,που οδηγούν σε ενδεχομένως μεγαλύτερες αποδόσεις .Παρόλα αυτά δεν θα μπορούσαμε να αυξάνουμε συνεχώς το πλάτος της μεταφορικής ταλάντωσης καθώς κάτι τέτοιο θα μας έφερνε ,αναπόφευκτα, όλο και πιο κοντά στο λεγόμενο "όριο φτερουγίσματος" (βλέπε εξ. (1)) $\chi=1$.Για πλάτος ταλάντωσης $h=1,4$ m η παράμετρος αυτή είναι $\chi=1,5$ ενώ για $h=1$ είναι 1,8 . Κοντά στο όριο της μονάδας κάθε περαιτέρω αύξηση του πλάτους θα είχε αρνητικές συνέπειες και θα περνούσαμε σε συνθήκες παραγωγής πρόωσης από την αεροτομή .

Μπορούμε ,ακόμα ,μέσα από τον Πίνακα 3 να βγάλουμε ένα συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα που έχει κάθε αύξηση στα δυο διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης .Αυξάνοντας το πλάτος της γωνιακής ταλάντωσης κατά 5° αυξάνει την απόδοση κατά $\approx 1\%$.Αυξάνοντας όμως το πλάτος της μεταφορικής ταλάντωσης κατά 0,1 m (από 1 σε 1,1 m) βλέπουμε μια αύξηση του $\approx 5\%$.Επίσης κοιτώντας το Σχήμα 16 και το Σχήμα 15 μπορούμε να δούμε πως η μέγιστη τιμή C_L είναι 7 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του C_M (για την περίπτωση $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$) ,αυτό συμβαίνει την ίδια στιγμή που οι μέγιστες ταχύτητες (γωνιακές και μεταφορικές) είναι σχεδόν ίδιες σε μέγεθος (π.χ. εξισώσεις 13, 14).Αυτό επιβεβαιώνει τα λεγόμενα των (Kinsey & Dumas, 2006) ότι η συνεισφορά της μεταφορικής κίνησης στην παραγωγή ενέργειας είναι αρκετά σημαντικότερη από εκείνη της γωνιακής και ότι τελικά κάποιος θα μπορούσε να γράψει ότι $P(t) \approx \dot{\gamma}(t)L(t)$ (βλέπε Σχήμα 19).

Επίσης ,έχει αναφερθεί αρκετές φορές σε αυτήν την εργασία η σημαντικότητα που κατέχουν οι LEV στην παραγωγή ενέργειας . Κατά την διάρκεια ενός μέσου κύκλου σε αυτήν την εργασία οι ενεργές γωνιές προσβολής (effective angles of attack) αγγίζουν και τις 40° (για την περίπτωση με $h=1$ m & $\theta=81,3^\circ$) ,και επομένως είναι λογικό να προκαλείται δυναμική απώλεια στήριξης, δηλαδή αποκόλληση οριακού στρώματος ,πάνω στην αεροτομή με αποτέλεσμα την έκλυση των δινών αυτών. Αν και σε περιπτώσεις στατικής αεροδυναμικής η αποκόλληση του οριακού στρώματος οδηγεί σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα ,στην περίπτωση μας η δυναμική απώλεια στήριξης είναι επιθυμητή. Παρατηρώντας το Σχήμα 23 βλέπουμε πως είναι αισθητή η απουσία των δινών από το πεδίο της στροβιλότητας γύρω από την αεροτομή για την περίπτωση αυτή. Είναι εύλογο πως εξαιτίας του γεγονότος ότι μελετάμε την παραγωγή ενέργειας ξεκινώντας από χαρακτηριστικά ταλάντωσης που είναι γνωστό ότι είναι κοντά στα βέλτιστα ,όλες οι περιπτώσεις να έχουν σχετικά υψηλή απόδοση .Εκείνη όμως με την μικρότερη απόδοση είναι και αυτή από την οποία απουσιάζουν οι δίνες που με την χαμηλή πίεση που επικρατεί στο κέντρο τους όταν συγχρονίζονται με την κίνηση αυξάνουν την απόδοση .Στο Σχήμα 20 φαίνεται πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος της έκλυσης δινών από την ακμή προσβολής (LEV) για την αύξηση του συντελεστή άντωσης .Κάθε φορά που μια δίνη διαχέεται από την ακμή προσβολής (Σχήμα 25 ,στιγμές $t=3T/8$ & $t=7T/8$) έχουμε στιγμιαία αύξηση του συντελεστή άντωσης (οι στιγμές έκλυσης δινών που παρατηρήθηκαν συμφωνούν με την βιβλιογραφία (Deng, Caulfield, & Shao, 2014) , (Kinsey & Dumas, 2006)). Παρατηρούμε πως κάθε φορά που αυξάνεται το C_L υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση του συντελεστή ισχύος .Η σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν εκλύονται LEVs εξηγεί την διαφορά που υπάρχει στην απόδοση .Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις επιδράσεις των LEVs και από πλευράς πεδίου πίεσης (ή αλλιώς δυνάμεων επί της αεροτομής) θα μπορούσαμε να ανατρέξουμε και στις ισοϋψείς του πεδίου πίεσης που εξετάζουμε .Συγκρίνοντας το Σχήμα 29 με

το Σχήμα 31 βλέπουμε και την διαφορά στην έκταση των περιοχών χαμηλής πίεσης που σχηματίζονται γύρω από την αεροτομή (με μπλέ σκούρο χρώμα) .Η περίπτωση με την πιο έντονη στροβιλότητα ($h=1, \theta=81,3^\circ$) έχει μεγαλύτερες "φουσαλίδες" χαμηλής πίεσης γύρω της σε σχέση με την περίπτωση με μικρότερη στροβιλότητα ($h=1, \theta=71,3^\circ$) .Αυτές οι "φουσαλίδες" διευκολύνουν και την κίνηση της αεροτομής αφού δαπανάται και λιγότερη ενέργεια για αυτή ,καθώς αντιμετωπίζει λιγότερη "αντίσταση" κατευθυνόμενη προς την φουσαλίδα χαμηλής πίεσης .Για να αποτυπωθεί πρακτικά αυτή η διαφορά παρατίθεται το Σχήμα 21 όπου φαίνεται ο συντελεστής πίεσης για την χρονική στιγμή $t=7T/8$ όπου έχουμε έκλυση δίνης για την περίπτωση $h=1, \theta=81,3^\circ$ και απουσία δινών στην περίπτωση $h=1, \theta=71,3^\circ$.Βλέπουμε πως εξαιτίας της δίνης ο συντελεστής πίεσης (και άρα η δύναμη άντωσης) που ασκείται πάνω στην αεροτομή είναι μεγαλύτερος (η γραφική του παράσταση είναι πιο "πλατιά" σε σχέση με την περίπτωση χωρίς δίνες) .

Θέλοντας να αναλύσουμε ακόμα περισσότερο το διάγραμμα του συντελεστή άντωσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι κάθε γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο Σχήμα 15 παρουσιάζει 4 κορυφές (2 ανά ήμισυ κάθε κύκλου) .Αν και τα δυο ζεύγη κορυφών έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος (σε τιμή) μπορούμε να δούμε ότι ανάμεσα τους παρεμβάλλεται μια πτώση στην τιμή του συντελεστή (μια "κοιλιά") .Αυτό έρχεται επίσης σε συμφωνία με την βιβλιογραφία (Kinsey & Dumas, 2006) , (Deng, Caulfield, & Shao, 2014)) και μας προτρέπει να παρατηρήσουμε πως η μέγιστη τιμή της άντωσης έρχεται ακριβώς πριν την εμφάνιση απώλειας στήριξης .Άρα, όπως βλέπουμε και στο σχήμα ο συντελεστής άντωσης ακριβώς μετά την στιγμή που πιάνει για πρώτη φορά την μέγιστη τιμή του (σε ένα κύκλο ταλάντωσης) παρουσιάζει μια μείωση που είναι και περίπου η στιγμή που αποτυπώνεται στα αντίστοιχα σχήματα στροβιλότητας η έκλυση δινών λόγω της απώλειας στήριξης (της αποκόλλησης δηλαδή του οριακού στρώματος) .Το γεγονός έρχεται σε συμφωνία με την κλασσική θεωρία της αεροδυναμικής .

Επιστρέφοντας στην απόδοση και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της με παρόμοιες (2D) μελέτες τις βιβλιογραφίας (Kinsey & Dumas, 2006) , (Campobasso & Drofelnik, 2012)) όπου ίδιοι αριθμοί Re και ίδια χαρακτηριστικά κίνησης μελετήθηκαν ,παρατηρούμε πως υπάρχει μια διαφορά στην υπολογιζόμενη απόδοση για την βασική μας περίπτωση (με $h=1$ & $\theta_0=76,3^\circ$) της τάξης του $\approx 3-4\%$. Σημειώνεται επίσης ,πως οι περιπτώσεις υψηλής απόδοσης που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία έχουν το χαρακτηριστικό ότι η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος είναι περίπου ίση με την μέγιστη μεταφορική ταχύτητα της αεροτομής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ($\dot{Y}_{max}/U_\infty \approx 1$) αλλά και με την αδιάστατη συχνότητα της ταλάντωσης ($\frac{f_c}{u_\infty}$).

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται οι ενεργές γωνίες προσβολής για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε. Αντιπαραβάλλοντας το σχήμα με τον Πίνακα 3 μπορούμε να πούμε, πως για τις περιπτώσεις με $h=1$ m όσο αυξάνεται το μέγεθος της γωνίας προσβολής (με αύξηση του θ_0) αυξάνεται και η απόδοση. Αυτό το φαινόμενο είναι λογικό γιατί με την αύξηση απλώς του πλάτους της γωνιακής ταλάντωσης αυξάνεται η ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής της πτέρυγας (και άρα ο C_M) ενώ η σαρωμένη επιφάνεια μένει σχεδόν ίδια. Από την άλλη πλευρά, κρατώντας το γωνιακό πλάτος σταθερό $\theta_0=76,3^\circ$ και αυξάνοντας το πλάτος από 0,9 σε 1, 1,1 και 1,4 m ενώ η γωνία προσβολής μικραίνει συνεχώς η απόδοση αρχικά πέφτει και έπειτα με περαιτέρω αύξηση του μεταφορικού πλάτους αυξάνεται το οποίο οφείλεται στο γεγονός που περιγράφηκε στην δεύτερη παράγραφο της ενότητας αυτής (βλέπε και πίνακα απόδοσης).

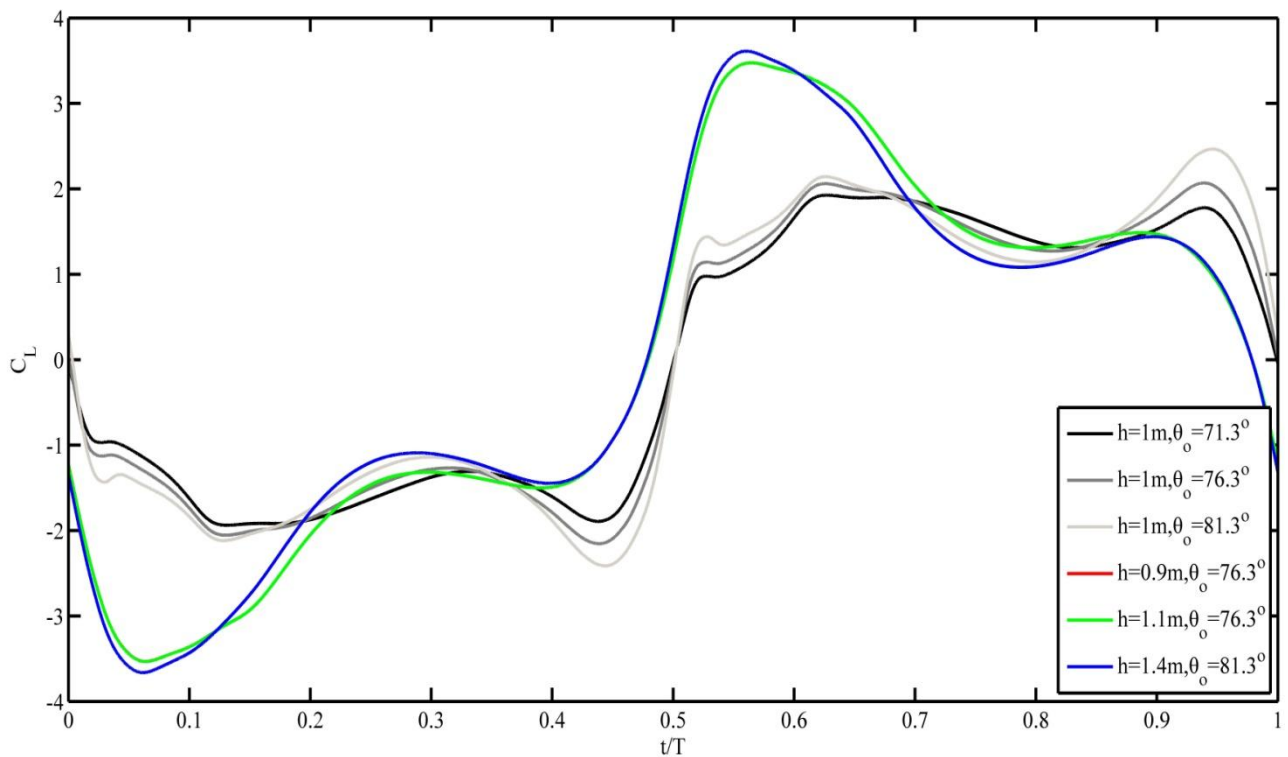
Δεν θα ήταν ορθό να κλείσουμε την ενότητα των αποτελεσμάτων χωρίς να σχολιάσουμε κάποια χαρακτηριστικά του συντελεστή οπισθέλκουσας κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης και την σύνδεση του με το πεδίο ροής. Παρατηρώντας το Σχήμα 17 βλέπουμε πως όσο αυξάνεται το πλάτος της γωνιακής ταλάντωσης έχουμε και αύξηση του συντελεστή. Αυτό είναι απολύτως λογικό αφού με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται και η μετωπική επιφάνεια της αεροτομής που αντιλαμβάνεται η ροή αυξάνοντας έτσι την συνιστώσα του C_D που πηγάζει από το πεδίο της πίεσης (ας μην ξεχνάμε ότι $C_D = C_{D,P} + C_{D,F}$, ειδικά όταν η ροή δεν είναι μεγάλου αριθμού Re). Από την άλλη πλευρά, βλέπουμε επίσης ότι όσο αυξάνεται η μέγιστη μεταφορική ταχύτητα της ταλάντωσης (μέσα από αύξηση του πλάτους) η οπισθέλκουσα μικραίνει (με σύγκριση των περιπτώσεων: $h=1$ m & $\theta_0=81,3^\circ$ με $h=1,4$ m & $\theta_0=81,3^\circ$, $h=1$ m & $\theta_0=76,3^\circ$ με $h=1,1$ m & $\theta_0=76,3^\circ$). Θα μπορούσαμε ενδεχομένως να συνδέσουμε το γεγονός αυτό με το πεδίο στροβιλότητας (Σχήμα 25 και Σχήμα 28) παρατηρώντας πως για τις χρονικές στιγμές $t=0T$ και $t=7T/8$ οι αναταραχές που δημιουργούνται γύρω από την αεροτομή μένουν πολύ κοντά σε αυτήν (για την περίπτωση $h=1$ m & $\theta_0=81,3^\circ$) και δεν διαχέονται στον ομόρου (όπως γίνεται στην $h=1,4$ m & $\theta_0=81,3^\circ$). Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τον συντελεστή οπισθέλκουσας καθώς η μεγαλύτερη ταχύτητα της πτέρυγας σημαίνει και μικρότερο, σε πάχος, οριακό στρώμα και άρα μικρότερη μετωπική επιφάνεια.

Θα μπορούσαμε, τελικά, να συγκεντρώσουμε κάποιες ιδιότητες/χαρακτηριστικά που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της ενέργειας από ένα ανάλογο σύστημα: (α) Η ταχύτητα και η άντωση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης πρέπει να είναι ομόρροπες ώστε να παράγεται και να μην καταναλώνεται ενέργεια από την κίνηση της αεροτομής. (β) Η ταχύτητα της αεροτομής να είναι ανάλογη με το πλάτος της μεταφορικής ταλάντωσης και την συχνότητα (φαίνεται πως υπάρχει αύξηση της απόδοσης με το πλάτος μέχρι κάποιο όριο) και (γ) Η ενεργή γωνία προσβολής έχει περίπλοκη επίδραση στην άντωση και στην απόδοση.

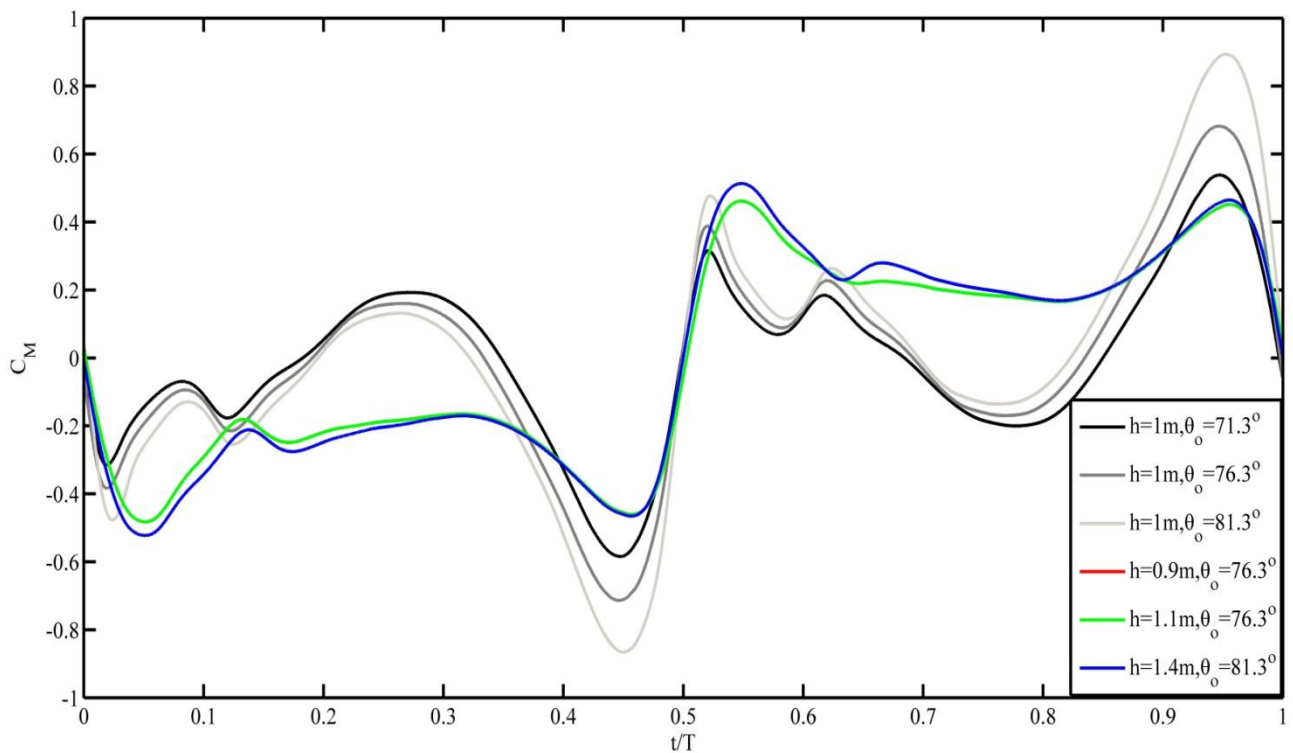
Σχήματα-Πίνακες

Πλάτη Ταλάντωσης	h=1 m $\theta=71,3^\circ$	h=1 m $\theta=76,3^\circ$	h=1 m $\theta=81,3^\circ$	h=0,9 m $\theta=76,3^\circ$	h=1,1 m $\theta=76,3^\circ$	h=1,4 m $\theta=81,3^\circ$
Απόδοση (η) (%)	28,51	29,6	30,25	31,5	34,07	40,14

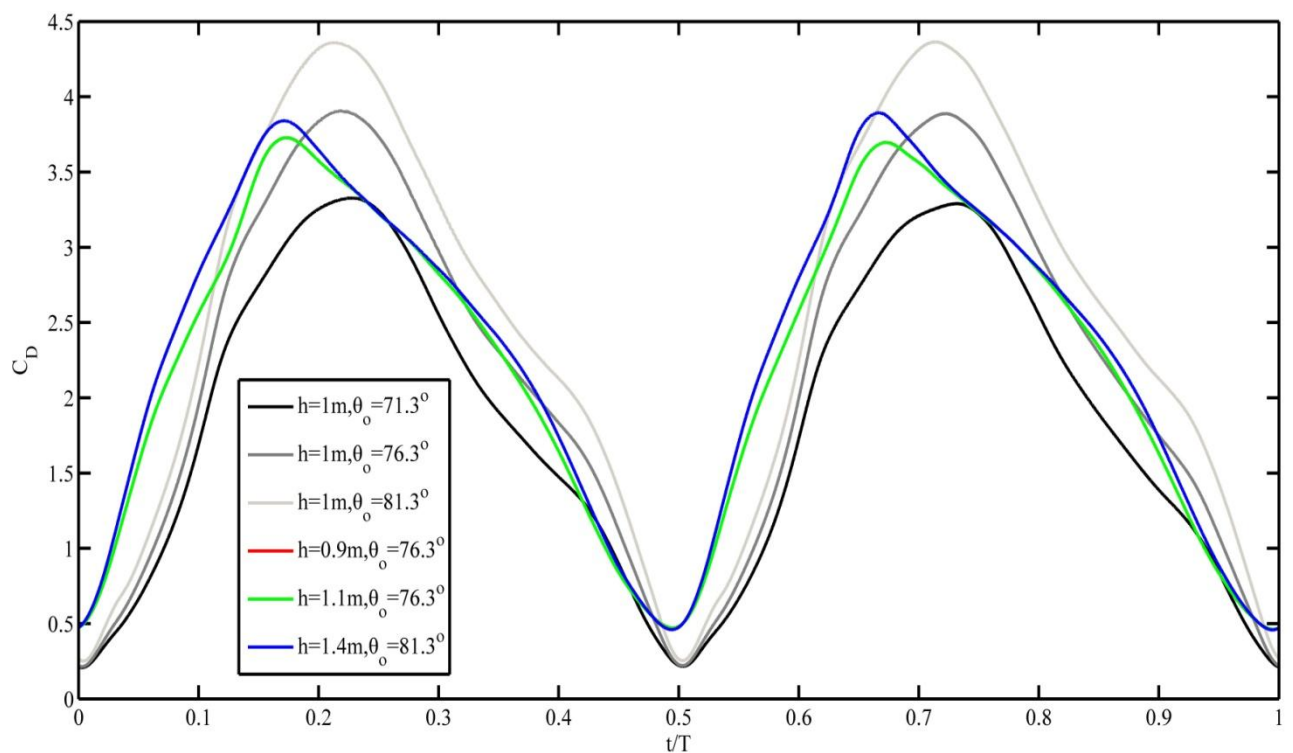
Πίνακας 3 .Αποδόσεις για κάθε μια από τις περιπτώσεις ταλάντωσης .



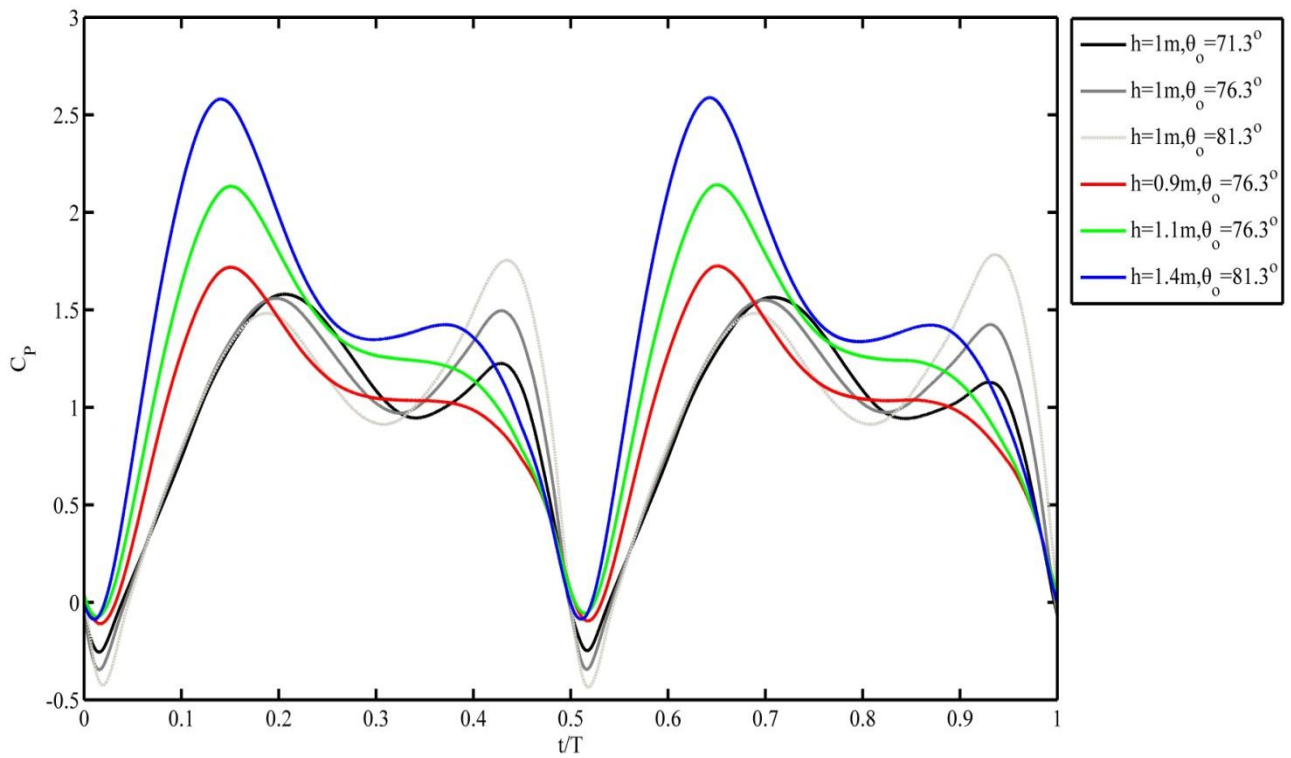
Σχήμα 15 .Συντελεστής άντωσης (C_L) για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ,υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ πράσινης και κόκκινης καμπύλης.



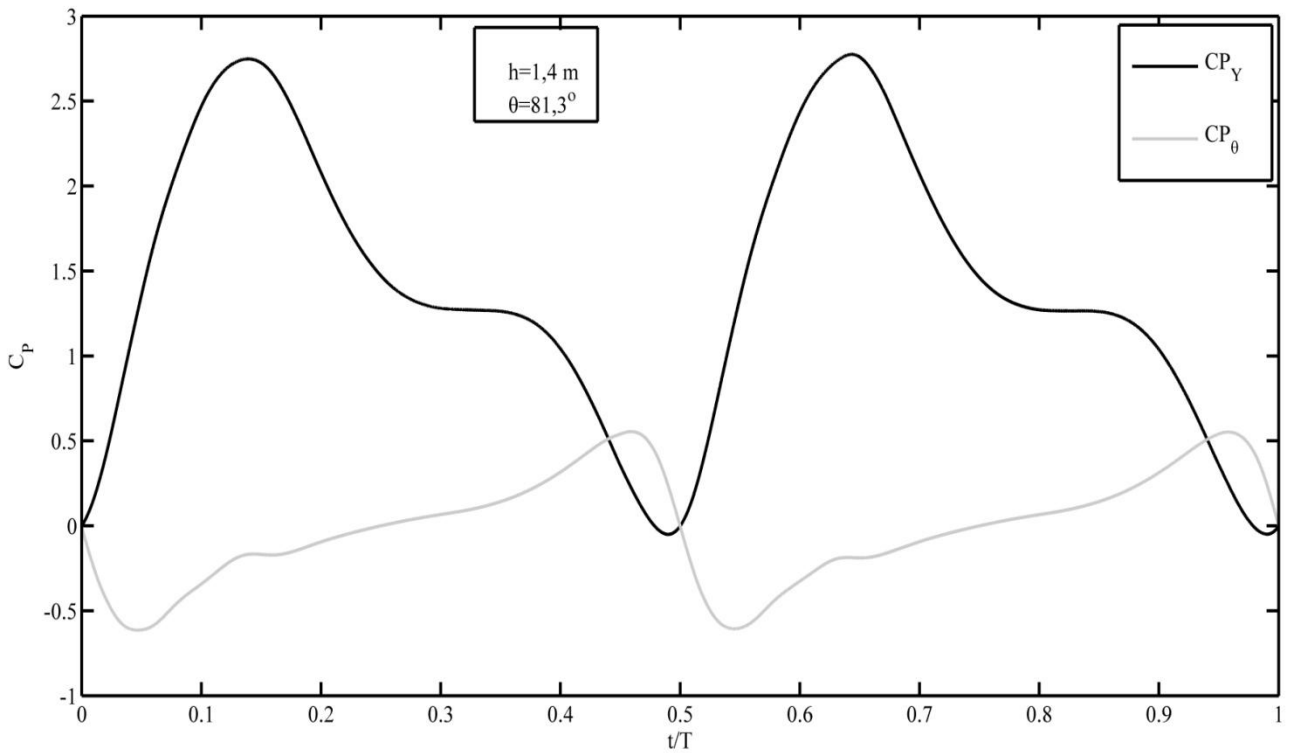
Σχήμα 16 . Συντελεστής ροπής (C_M) υπολογισμένος γύρω από το κέντρο περιστροφής της αεροτομής για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ,υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ πράσινης και κόκκινης καμπύλης .



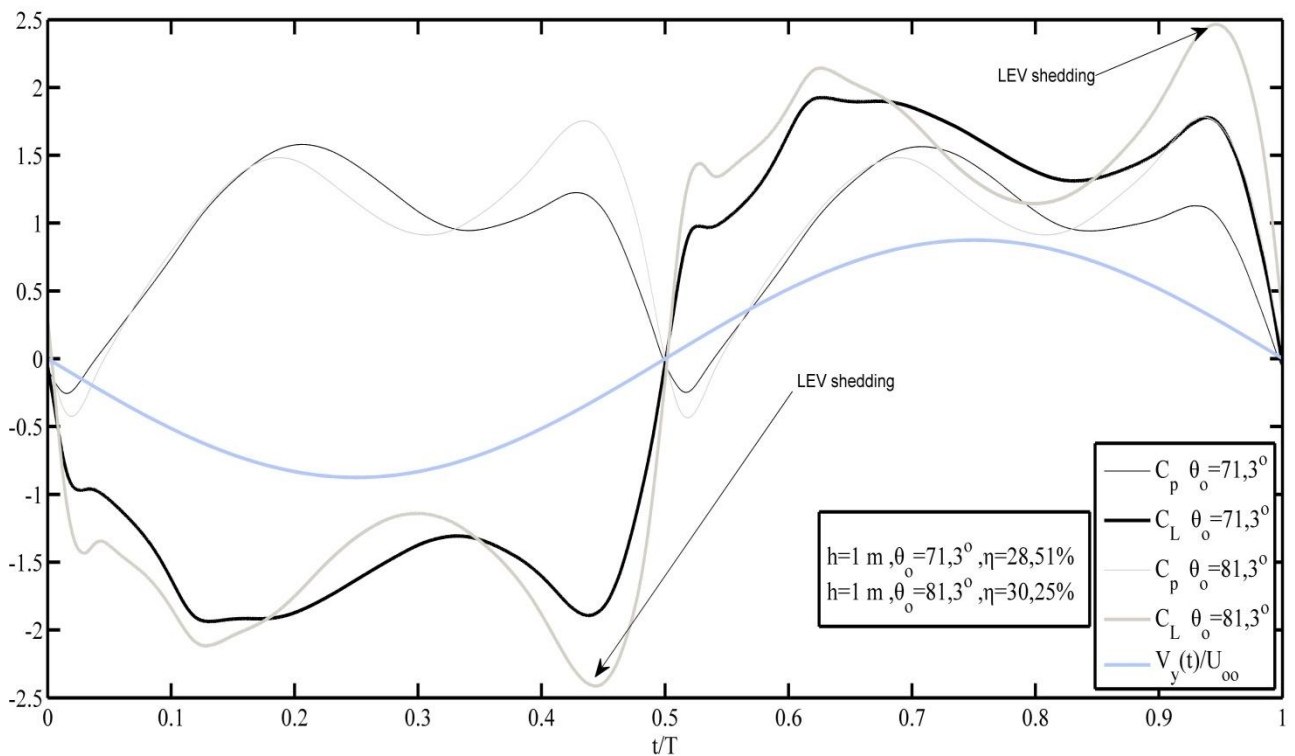
Σχήμα 17 . Συντελεστής οπισθέλκουσας (C_D) για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ,υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ πράσινης και κόκκινης καμπύλης.



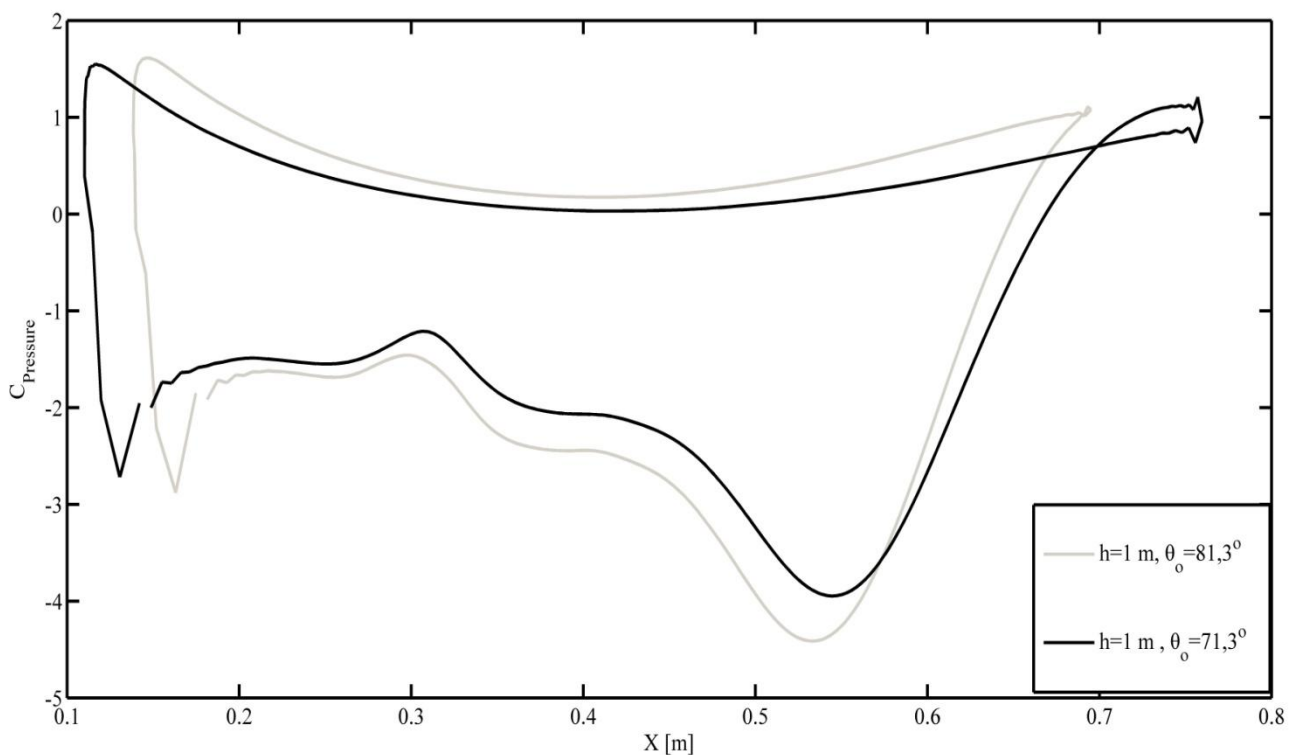
Σχήμα 18 .Συντελεστής ισχύος (Coefficient of power , C_p) για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ταλάντωσης .



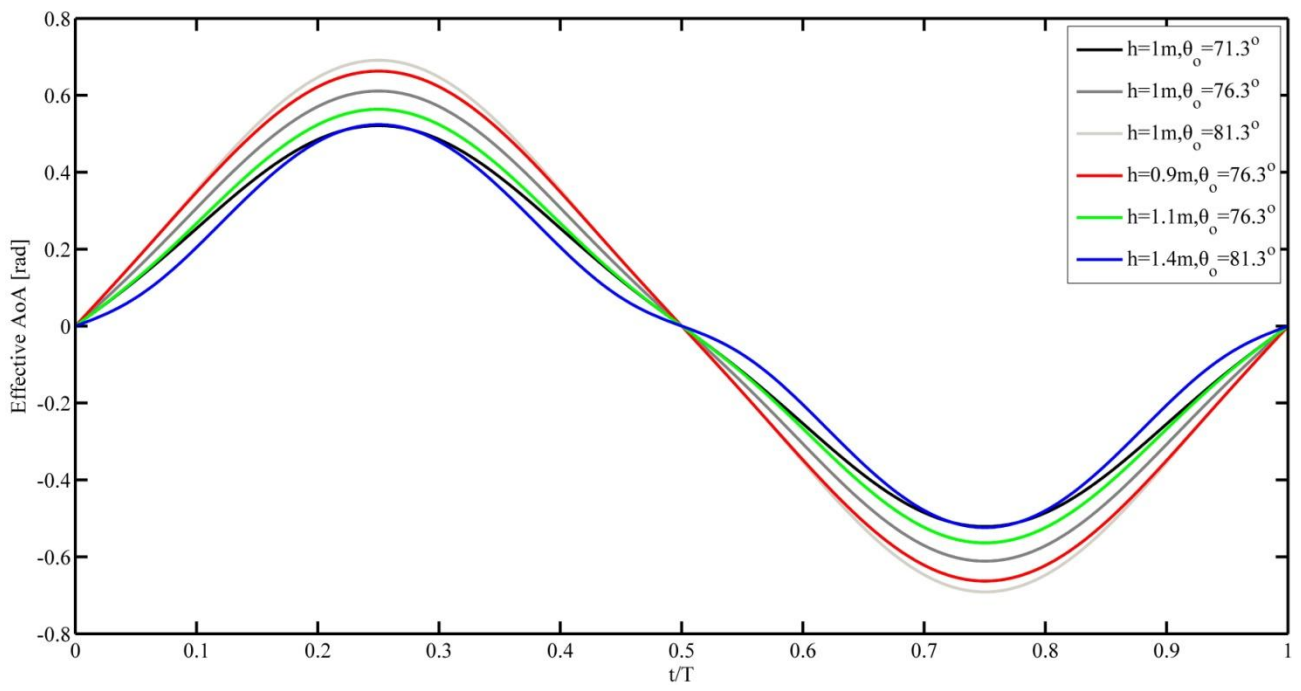
Σχήμα 19 .Σύγκριση των συνεισφορών της μεταφορικής και της γωνιακής κίνησης στον συνολικό συντελεστή ισχύος (άρα και στην απόδοση) .



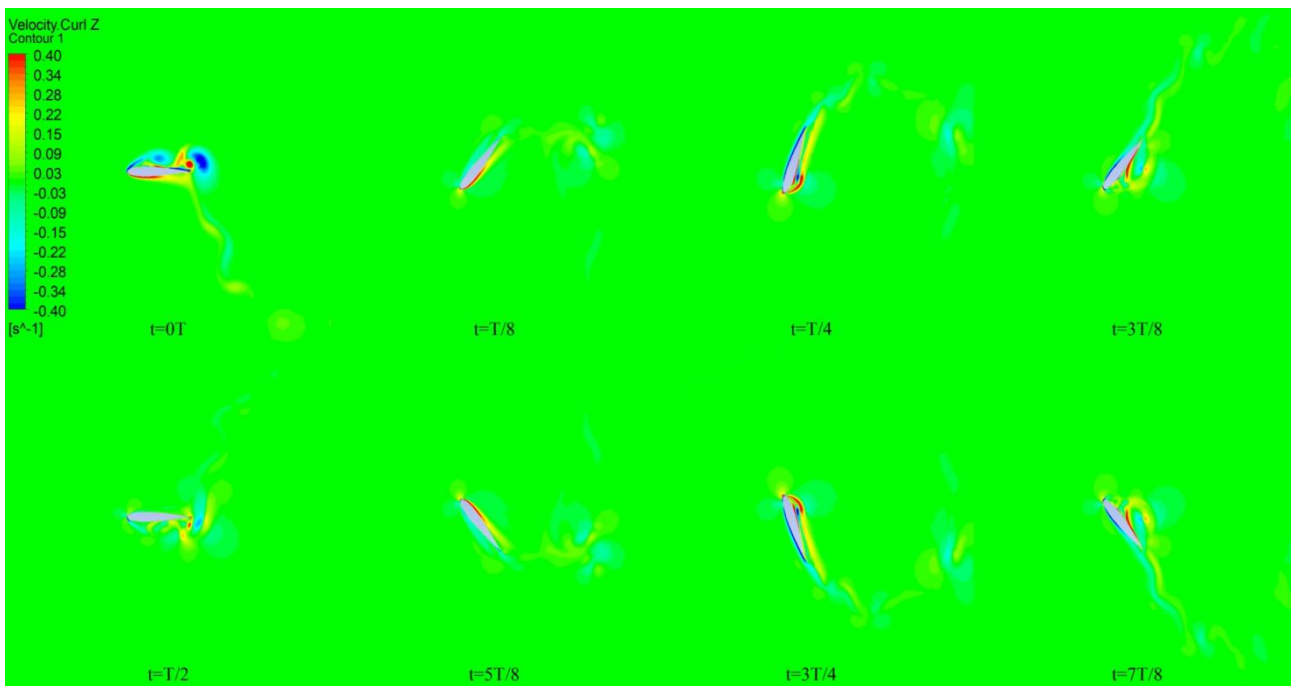
Σχήμα 20 .Σύγκριση συντελεστών άντωσης και ισχύος για δυο διαφορετικές περιπτώσεις και επισήμανση της σημαντικότητας της έκλυσης δινών στην αύξηση της απόδοσης (με τα μαύρα βέλη) (σύγκριση με Σχήμα 23 & Σχήμα 25).



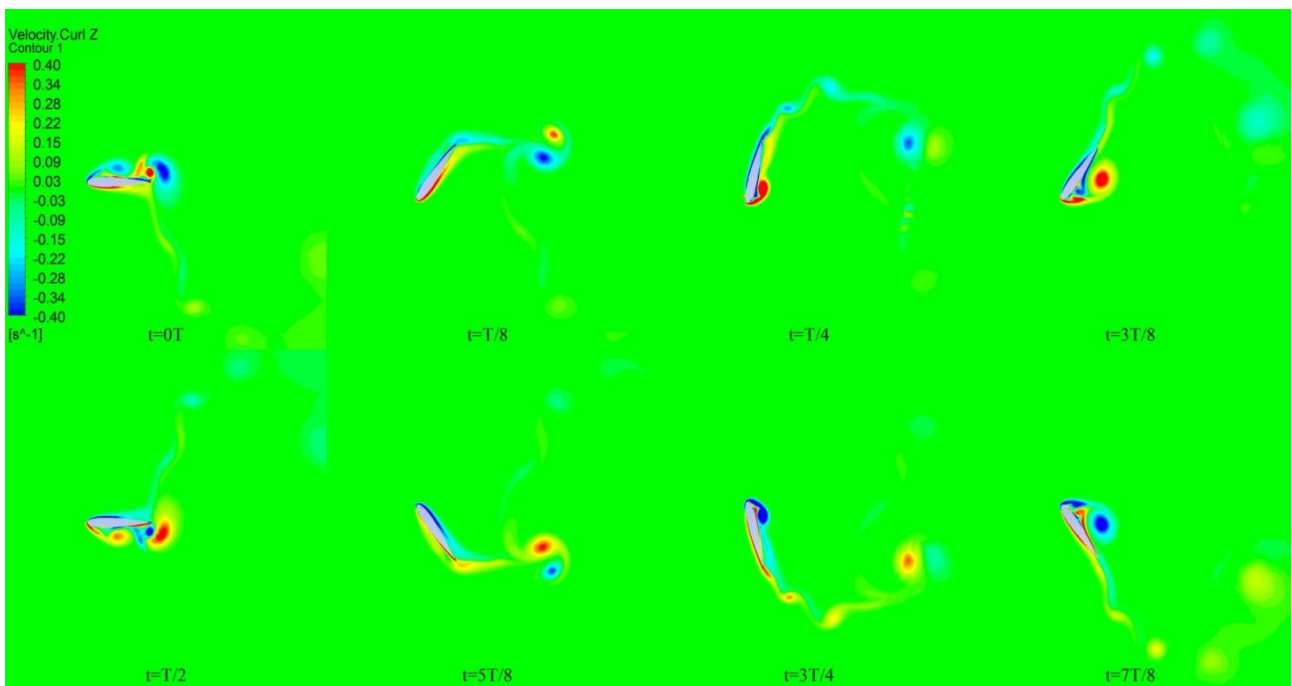
Σχήμα 21 .Συντελεστής πίεσης για την χρονική στιγμή $t=7T/8$ όπου λαμβάνει χώρα έκλυση δίνης (η δεύτερη σε σειρά κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης ,βλέπε Σχήμα 20 , $t/T \approx 0,95$) .Απεικονίζονται για τις περιπτώσεις κίνησης με $h=1$, $\theta_o=71,3^\circ$ & $h=1$, $\theta_o=81,3^\circ$.



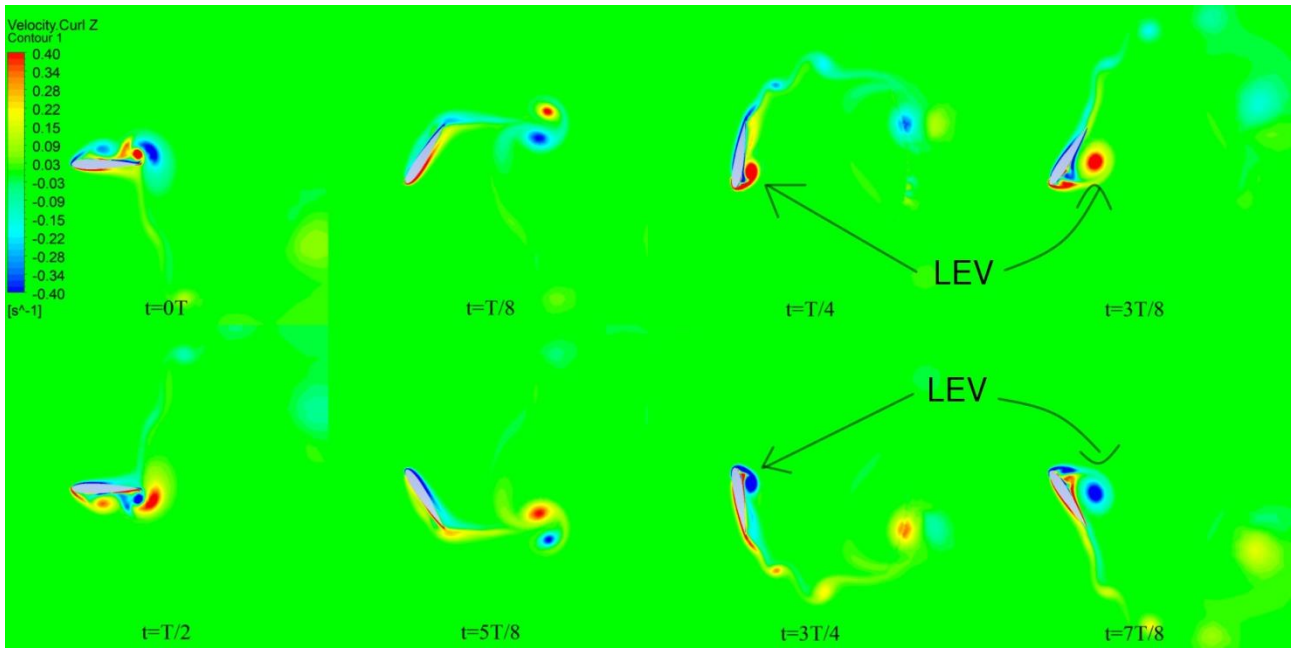
Σχήμα 22. Ενεργή γωνία προσβολής για κάθε μια από τις περιπτώσεις ταλάντωσης για την διάρκεια ενός κύκλου .



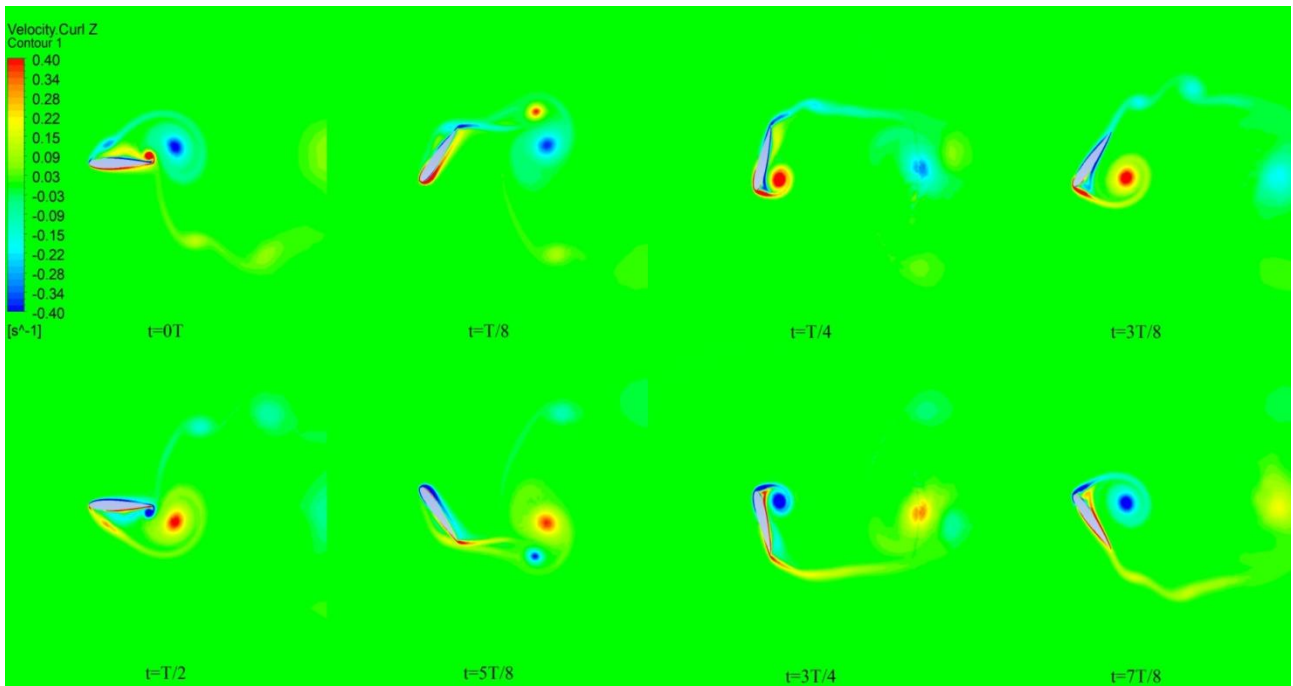
Σχήμα 23 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=71,3^\circ$.



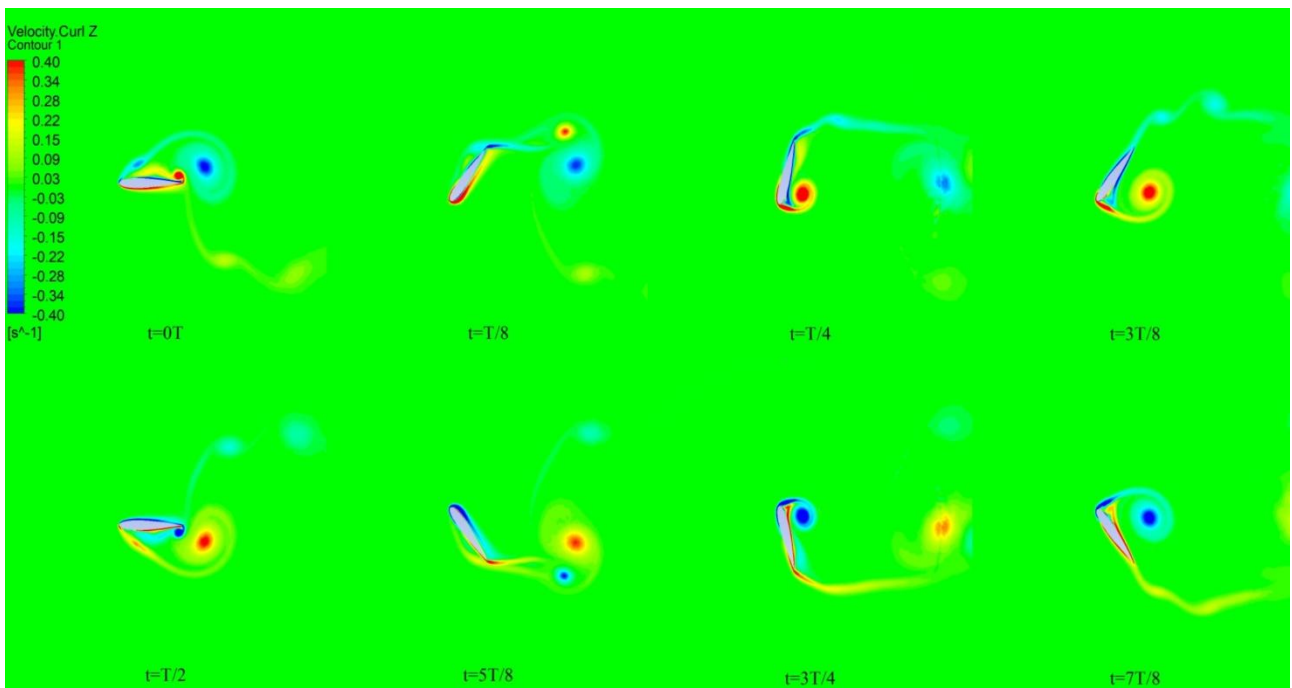
Σχήμα 24 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=76,3^\circ$.



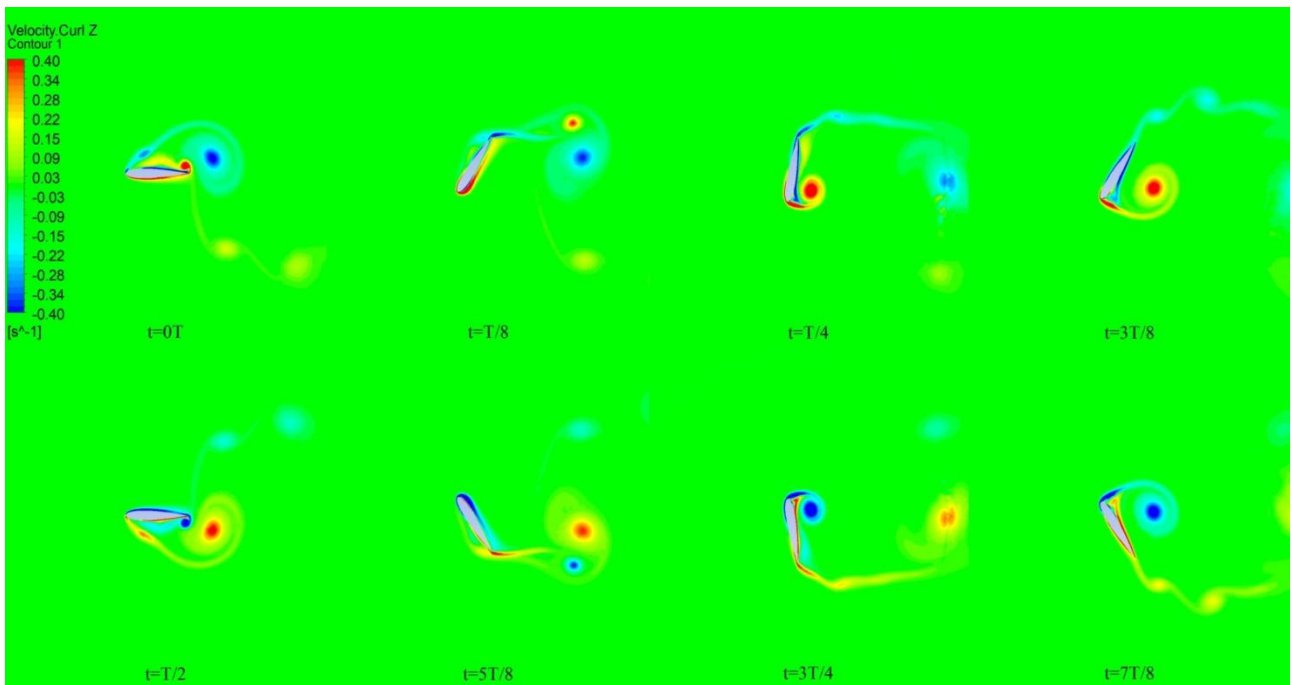
Σχήμα 25 . Ισοΰψεις καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=81,3^\circ$.



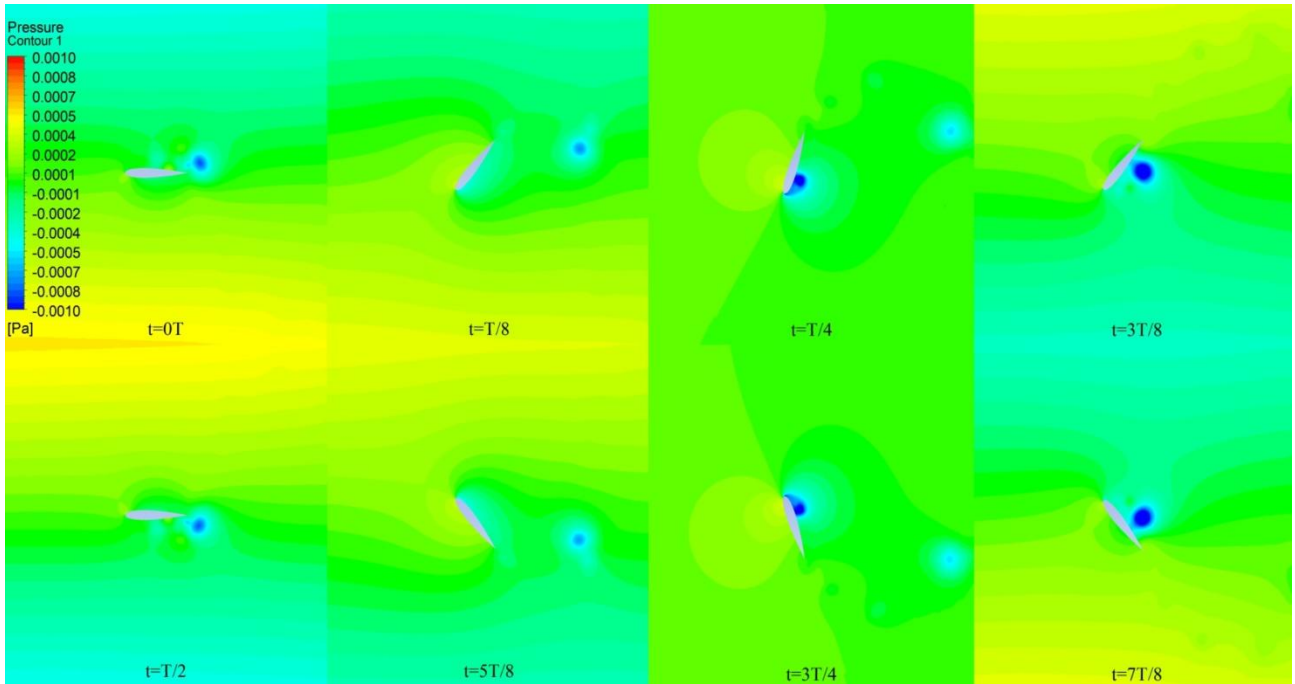
Σχήμα 26. Ισοΰψεις καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=0,9$ & $\theta=76,3^\circ$.



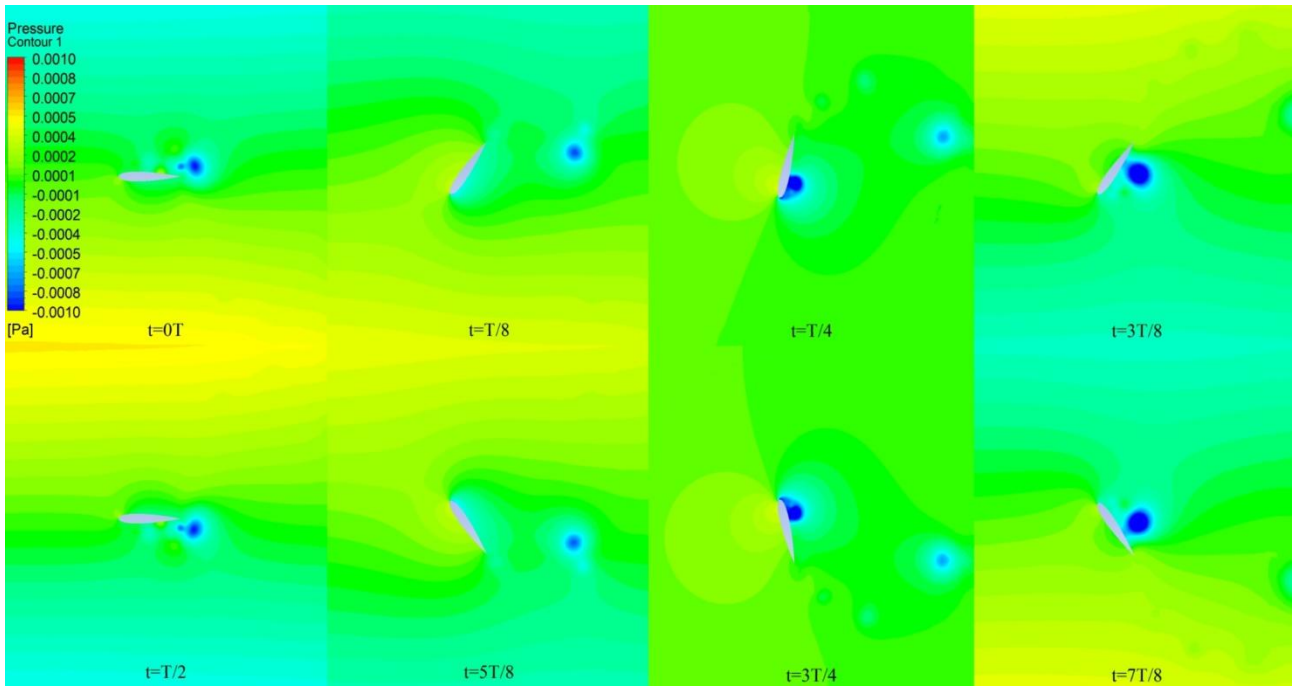
Σχήμα 27 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1,1$ & $\theta=76,3^\circ$.



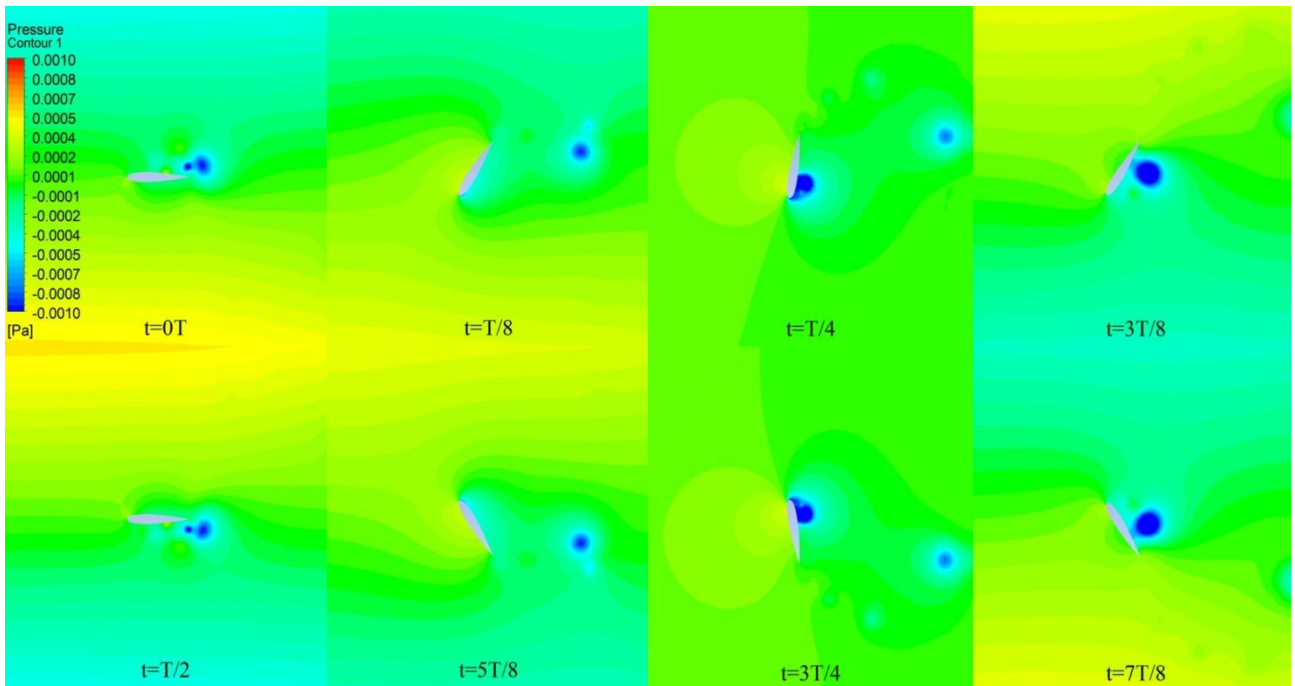
Σχήμα 28 . Ισοϋψείς καμπύλες διανυσματικού πεδίου στροβιλότητας για την περίπτωση με $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$.



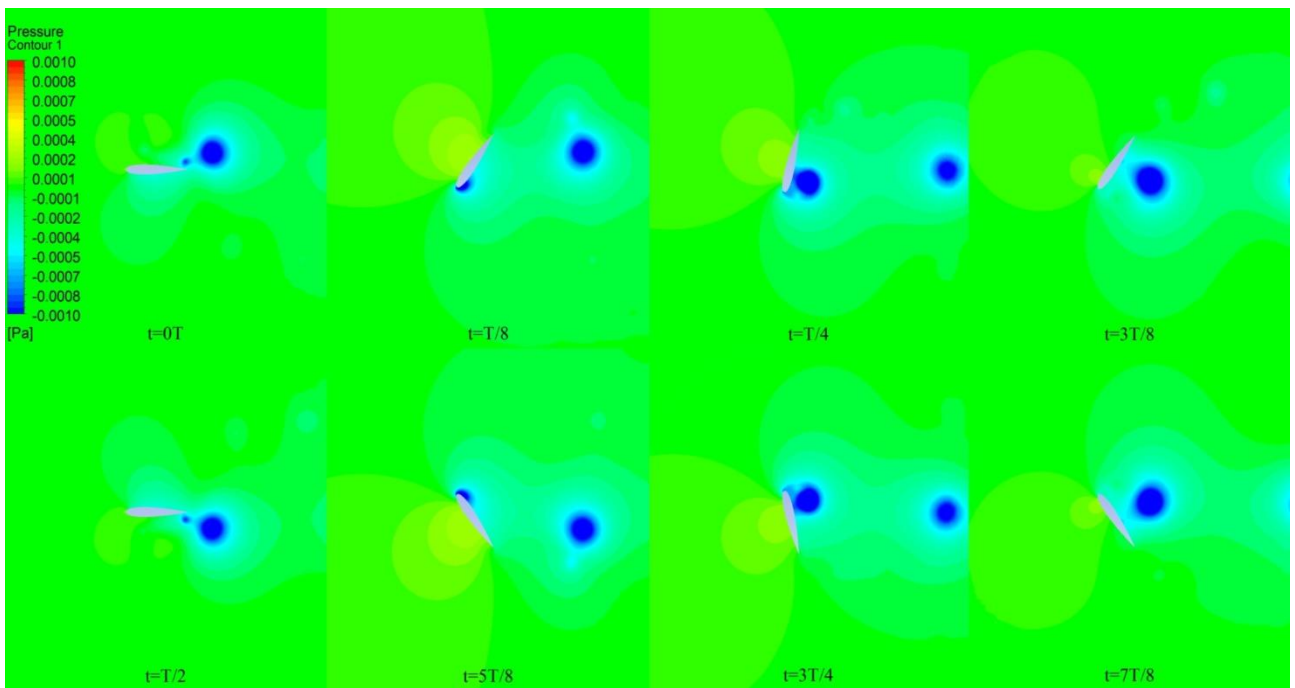
Σχήμα 29 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=71,3^\circ$.



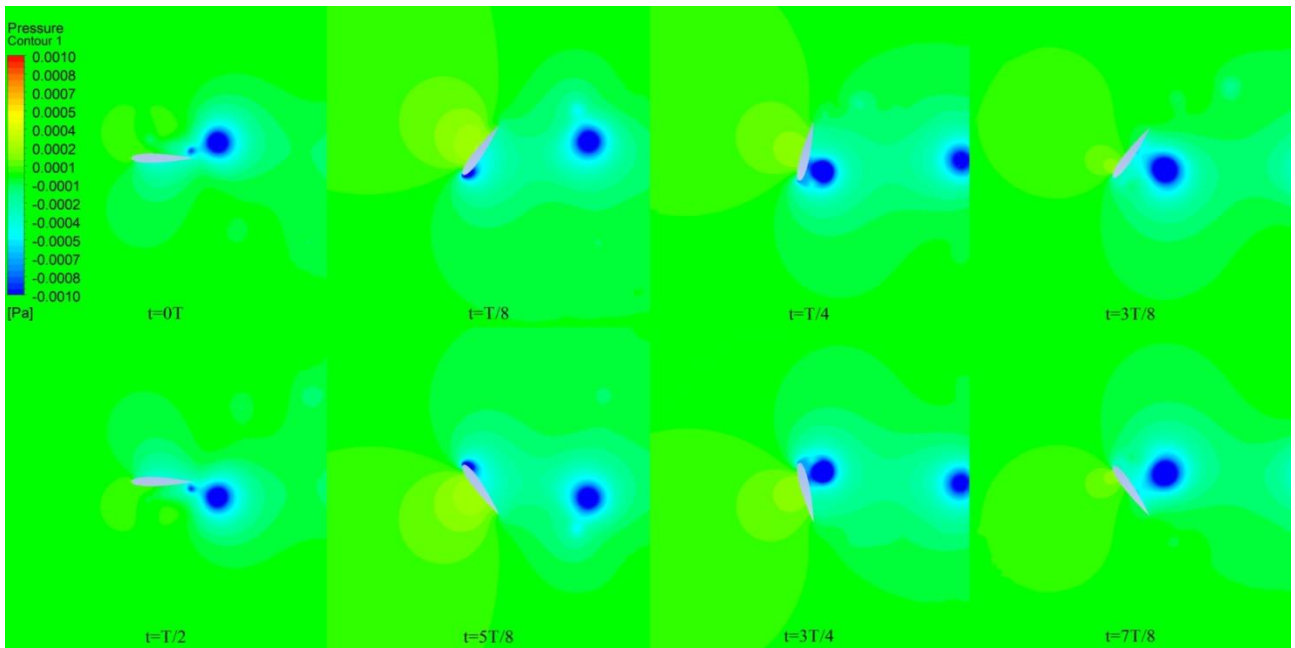
Σχήμα 30 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=76,3^\circ$.



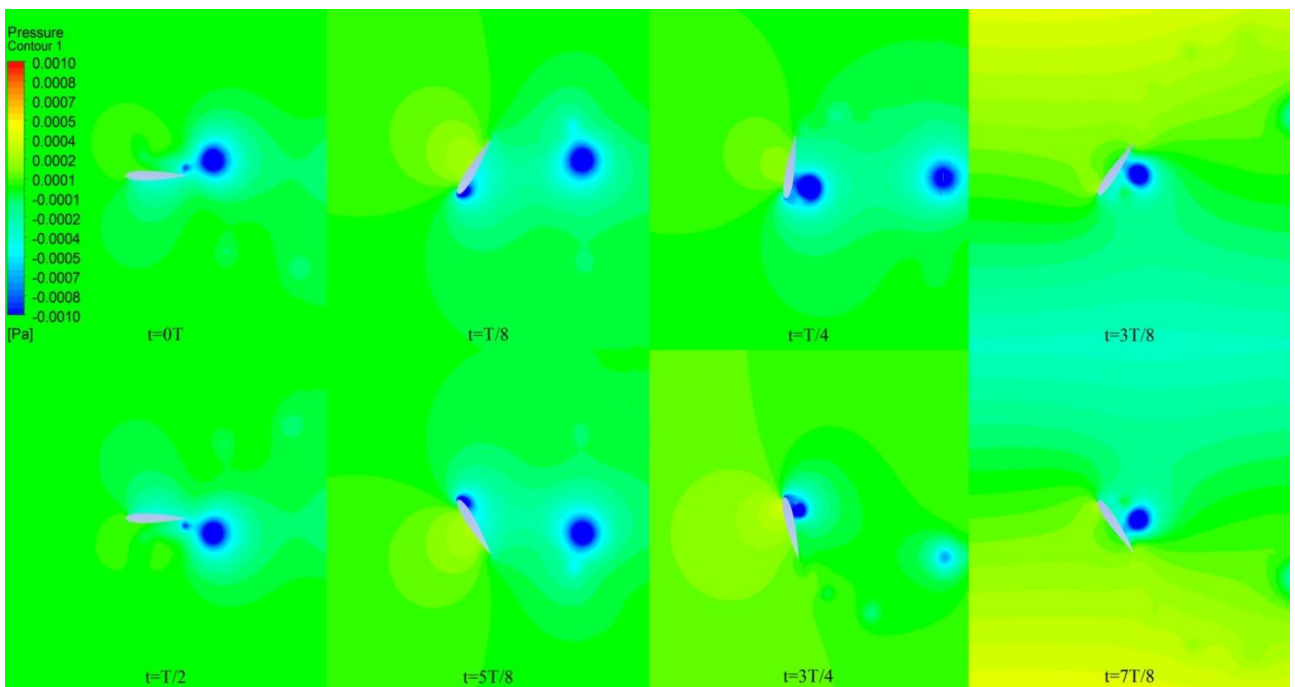
Σχήμα 31 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=81,3^\circ$.



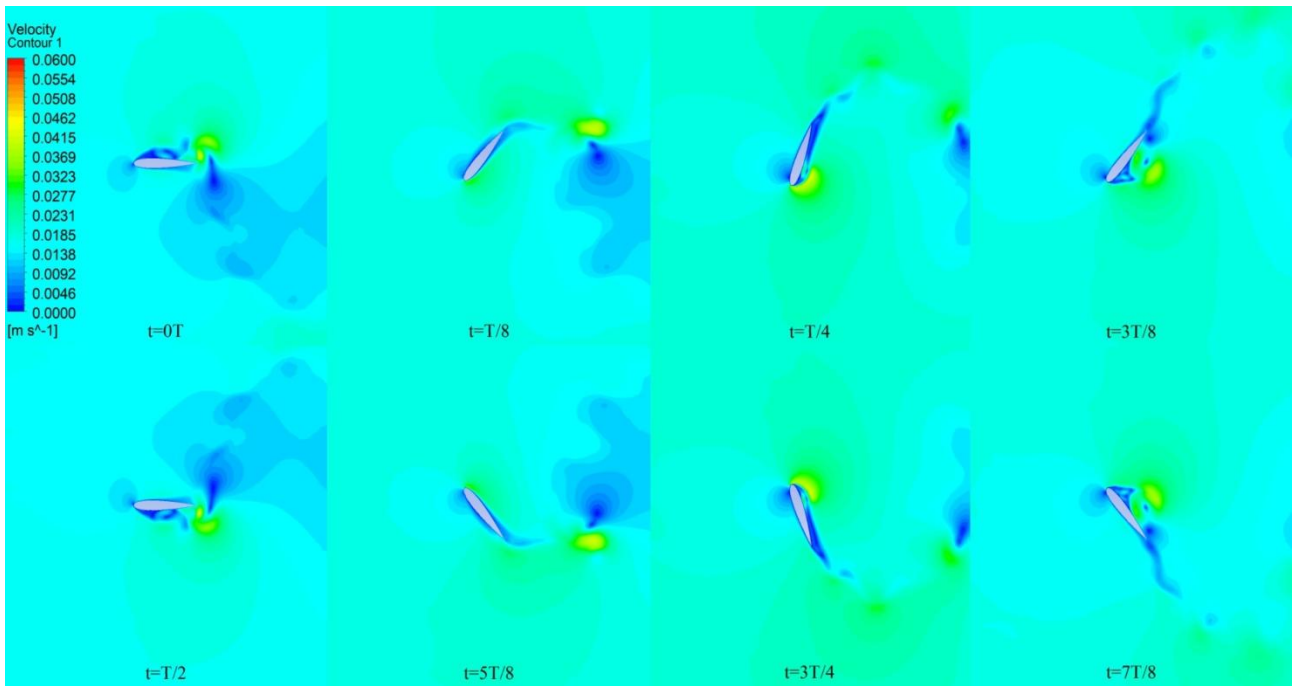
Σχήμα 32 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=0,9$ & $\theta=76,3^\circ$.



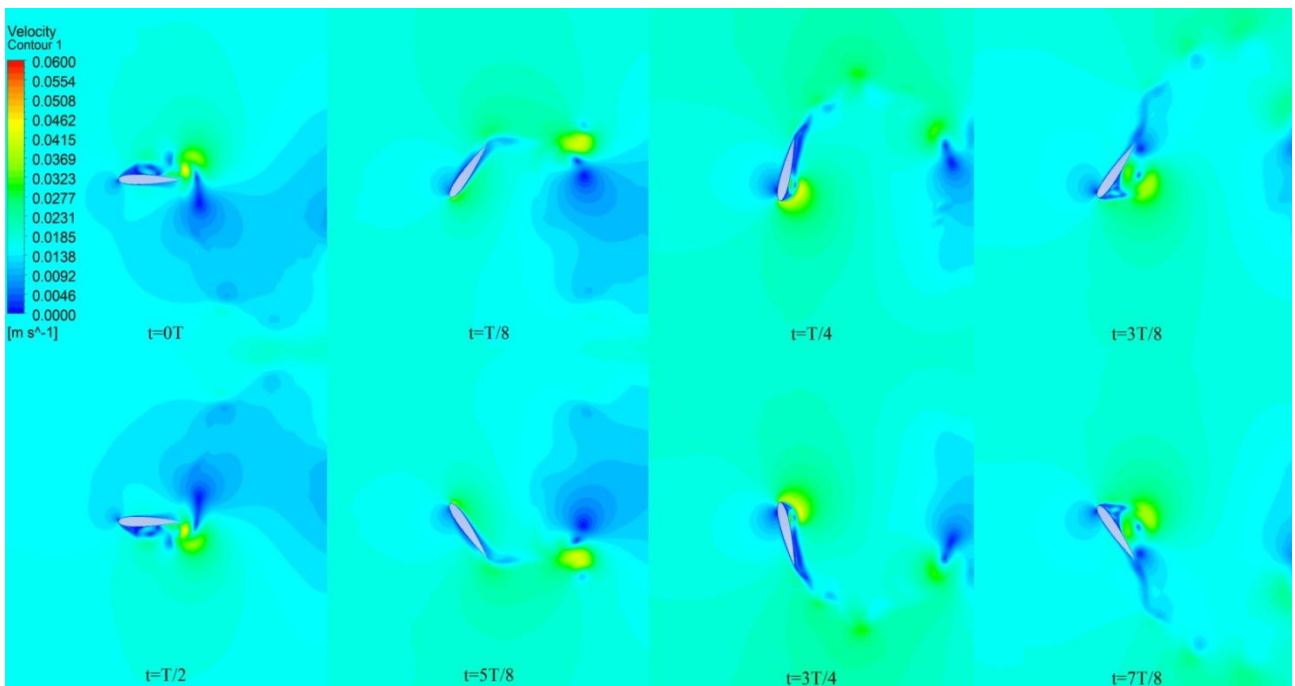
Σχήμα 33 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1,1$ & $\theta=76,3^\circ$.



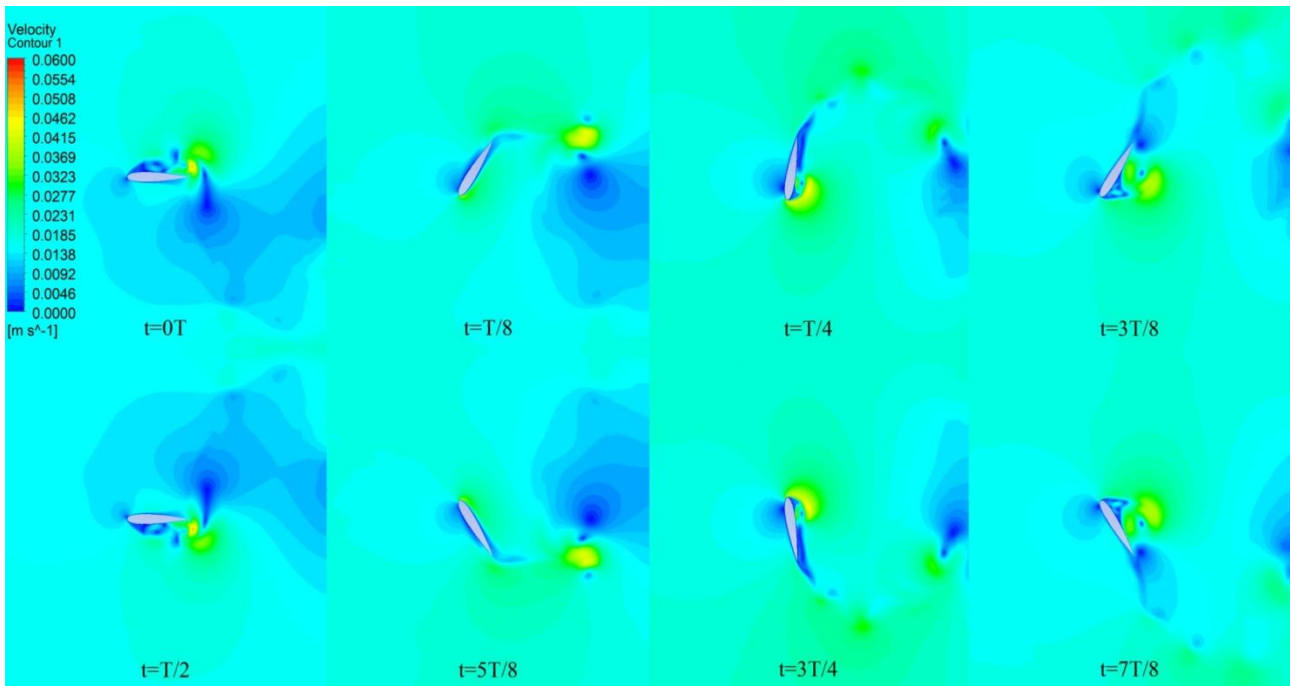
Σχήμα 34 . Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης για την περίπτωση με $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$.



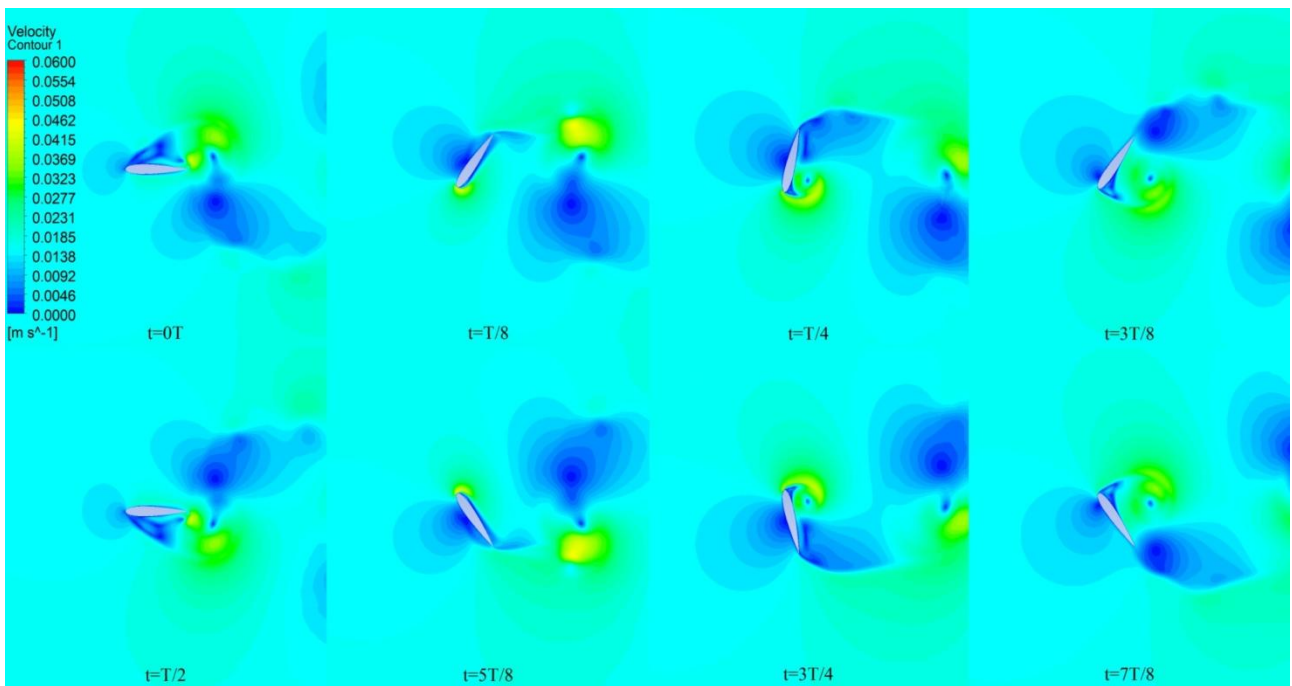
Σχήμα 35 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=71,3^\circ$.



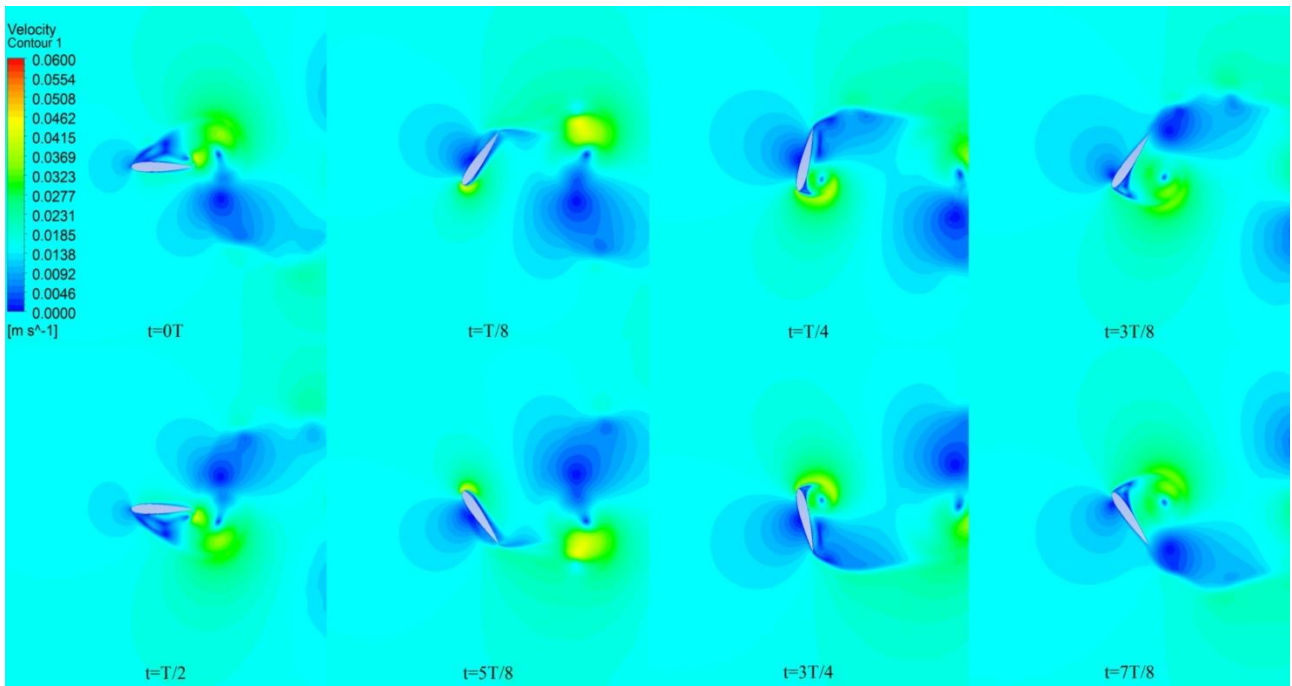
Σχήμα 36 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=76,3^\circ$.



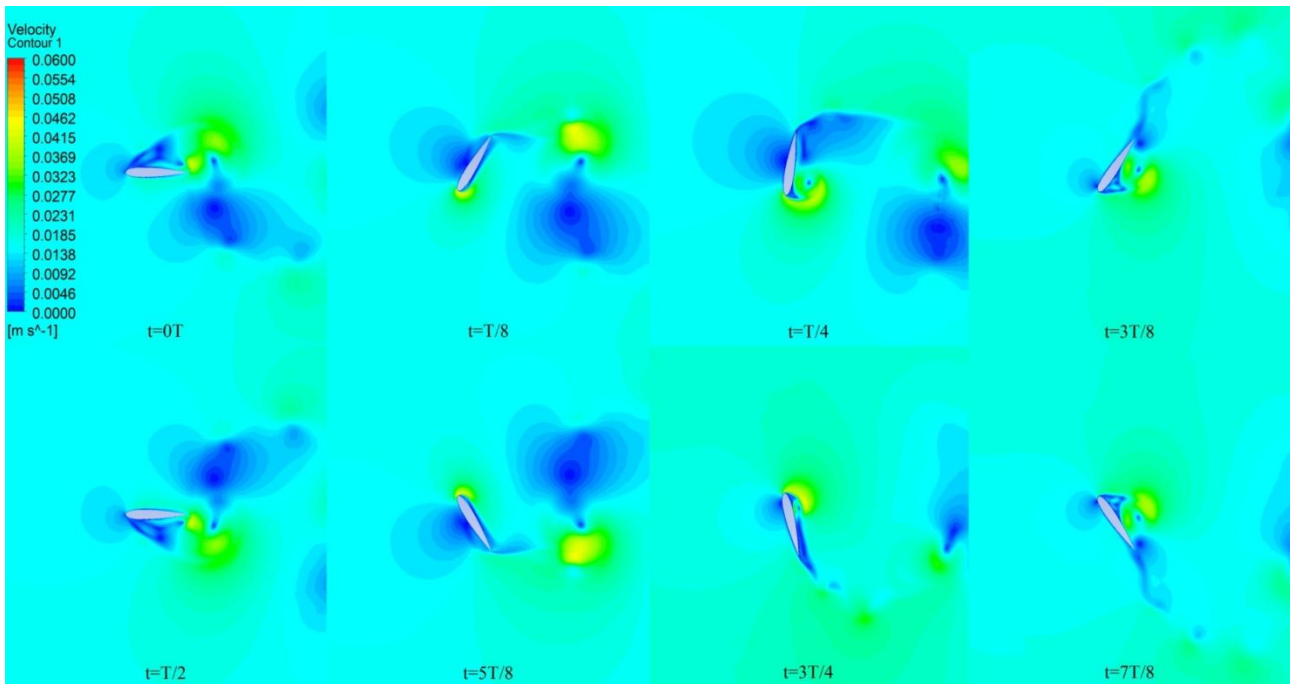
Σχήμα 37 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1$ & $\theta=81,3^\circ$.



Σχήμα 38 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=0,9$ & $\theta=76,3^\circ$.



Σχήμα 39 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1,1$ & $\theta=76,3^\circ$.



Σχήμα 40 . Ισοϋψείς καμπύλες μέτρου ταχύτητας για την περίπτωση με $h=1,4$ & $\theta=81,3^\circ$.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα-Προτάσεις Βελτίωσης

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε υπολογιστικά η ικανότητα μιας μεταφορικά και γωνιακά ταλαντευόμενης αεροτομής να παράξει ενέργεια από ένα ρεύμα αέρα σε συνθήκες με $Re=1100$ (πλήρως ενεργητικό σύστημα). Η ροή μοντελοποιήθηκε ως δισδιάστατη (2D) και στρωτή (laminar). Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι i) $h=1[m]$, $\theta_0=71,3^\circ$ ii) $h=1[m]$, $\theta_0=76,3^\circ$ (βασική περίπτωση) iii) $h=1[m]$, $\theta_0=81,3^\circ$ iv) $h=0,9[m]$, $\theta_0=76,3^\circ$ v) $h=1,1[m]$, $\theta_0=76,3^\circ$ vi) $h=1,4[m]$, $\theta_0=81,3^\circ$. Βρέθηκαν αποδόσεις (κατά μέσο όρο) της τάξης του 34 % ενώ παρατηρήθηκε πως με την αύξηση του πλάτους των δυο κινήσεων η απόδοση αυξάνεται ανάλογα. Επιπλέον διαπιστώθηκε η έντονη εξάρτηση της απόδοσης από την έκλυση δινών από την ακμή προσβολής (LEVs) και την διάχυση σε δυο στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου της ταλάντωσης (περίπου στις $t=0T$ & $t=T/2$) ενώ υπάρχει και ταύτιση των χρονικών στιγμών έκλυσης δινών μεταξύ των προσομοιώσεων και της αντίστοιχης υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Η δημιουργία και διάχυση τους επηρεάζει άμεσα τον συντελεστή άντωσης (αυξητικά) το οποίο σημαίνει την αύξηση της δύναμης πάνω στην πτέρυγα και άρα της απόδοσης. Η περίπτωση όπου δεν παρουσιάστηκαν δίνες ($h=1\text{ m}$ & $\theta_0=71,3^\circ$) ήταν και αυτή με την μικρότερη απόδοση. Επίσης, βρέθηκε ότι η μεταφορική κίνηση παρέχει (4-5 φορές) μεγαλύτερη συνεισφορά στην απαγόμενη από το ρευστό ενέργεια σε σχέση με την γωνιακή.

Όσον αφορά την συσχέτιση μεταξύ χαρακτηριστικών κίνησης πτέρυγας και συνθηκών περιβάλλοντος διαπιστώθηκε πως για ταχύτητα (μεταφορικής ταλάντωσης) ίση με την ταχύτητα U_∞ και για πλάτος ταλάντωσης ίσο (περίπου) με το μήκος της χορδής η απόδοση είναι αρκετά ικανοποιητική (και ενθαρρυντική).

Από την υπολογιστική σκοπιά του προβλήματος, είναι γνώμη του συγγραφέα πως η μοντελοποίηση του προβλήματος πάνω σε κινούμενο σύστημα αναφοράς (που προσομοιώνει τη μεταφορική κίνηση της αεροτομής) είναι πιο οικονομική χρονικά, πιο εύχρηστη και εισάγει λιγότερες παραμέτρους. Σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να υιοθετηθεί η μεθοδολογία του παραμορφώμενου πλέγματος (deforming mesh), για το πλέγμα που περιβάλλει την κυκλική περιοχή της αεροτομής, η οποία περιπλέκει ακόμα περισσότερο την διαδικασία καθώς πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα και κριτήρια για την διατήρηση της καλής/αρχικής ποιότητας του πλέγματος κατά την διάρκεια όλου του κύκλου και επιπλέον είναι και αρκετά δαπανηρή υπολογιστικά και

χρονικά (τα παραπάνω απορρέουν από προηγούμενες μελέτες του συγγραφέα (Κατσούλας & Κωνσταντινίδης, 2018).

Επίσης ,το γεγονός ότι η μοντελοποίηση του προβλήματος είναι 2D γνωρίζουμε ότι δίνει πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα από μια αντίστοιχη 3D και πόσο μάλλον από την πραγματικότητα .Δίνες ακροπτερυγίου και αλληλεπίδραση δινών και ως προς την z-διεύθυνση είναι φαινόμενα που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των φαινομένων που περιγράφηκαν σε αυτό το κείμενο .Έχει βρεθεί, επιπλέον ,πως ο λόγος επιμήκους της αεροτομής (aspect ratio) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και παρουσιάζει και αυτό μια βέλτιστη τιμή που ευνοεί περισσότερο την παραγωγή ενέργειας .Τα φαινόμενα αυτά δεν μπορούν να εισαχθούν (ή τουλάχιστον με αρκετά αξιόπιστο τρόπο) σε μια δισδιάστατη προσομοίωση .Παρά το γεγονός αυτό μια προσομοίωση σε δυο διαστάσεις μπορεί να είναι πολύ κατατοπιστική και να οδηγήσει στην αποσαφήνιση διάφορων φαινομένων .

Κάποιες μελλοντικές βελτιώσεις μια μελέτης σαν και αυτή θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν πρώτα και κύρια την τρισδιάστατη μοντελοποίηση .Σχετικά με την απόδοση έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον ,και έχει δώσει υψηλότερες αποδόσεις η χρήση σταθερής γωνίας προσβολής κατά την διάρκεια μετάβασης από την μια ακραία θέση μεταφορικής ταλάντωσης στην άλλη (η γραφική παράσταση της γωνιακής ταλάντωσης σε αυτήν την περίπτωση μοιάζει με το λεγόμενο "τραπεζοειδές προφίλ ",όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση) .Εξαιτίας της σταθερής γωνίας προσβολής λοιπόν η δυνάμεις που ασκούνται στην αεροτομή είναι σταθερά κοντά στην μέγιστη τιμή τους κατά την διάρκεια των φάσεων της ταλάντωσης (up-stroke & down-stroke) το οποίο οδηγεί σε αυξημένη απόδοση .

Τέλος ,οι ταλαντευόμενες αεροτομές (όπως ειπώθηκε και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση) παρέχουν και κάποια πλεονεκτήματα έναντι των ανεμογεννητριών ειδικά όταν οι τελευταίες λειτουργούν με μεγάλους λόγους ακροπτερυγίου ή όταν η σαρώμενη επιφάνεια είναι μεγάλη .Αποτελούν μια πιο φιλική λύση προς τα οικοσυστήματα του περιβάλλοντος εξαιτίας της ικανότητας τους να είναι αποδοτικές και σε χαμηλούς αριθμούς Re .Μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν πιο εύκολα σε υδάτινα περιβάλλοντα (θάλασσες ,ποταμούς, παλίρροιες) αλλά και σε μικρά βάθη αυξάνοντας έτσι την λειτουργικότητα τους και μικραίνοντας τον παράγοντα του κόστους λόγω της απλούστερης κατασκευής τους .

Παράρτημα Α . Συναρτήσεις Κίνησης Αεροτομής σε Γλώσσα C (UDF)

Μεταφορική κίνηση

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include "udf.h"
```

```
DEFINE_PROFILE(inlet_y_velocity, thread, position)
```

```
{
```

```
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
```

```
    real omg,ampl,t,phi;
```

```
    face_t f;
```

```
    omg = 0.014; /* angular freq in rad/s */
```

```
    ampl = 1; /*amplitude in meters */ Σχόλιο : Η τιμή αυτή αλλάζει κατά περίπτωση σε 0,9 ,
```

```
    t = CURRENT_TIME; 1,1 ή 1,4.
```

```
    phi = 4.712388; /*phase difference in radians*/
```

```
    begin_f_loop(f, thread)
```

```
    {
```

```
        F_CENTROID(x, f, thread);
```

```
        F_PROFILE(f, thread, position) = ampl*omg*cos(omg*t+phi);
```

```
    }
```

```
    end_f_loop(f, thread)
```

```
}
```

Γωνιακή Κίνηση

```
# include <stdio.h>

# include <math.h>

# include "udf.h"

DEFINE_CG_MOTION(define_motion_pitching,dt,vel,omega,time,dtime)
{
# if !RP_HOST

    real ampl,omg,phi;

    NV_S(vel,=,0.0);

    NV_S(omega,=,0.0);

    omg=0.014; /* angular frequency (1Hz) in rad per sec*/

    ampl=1.33; /* amplitude of rotation in radians (76.3deg) */ Σχόλιο : Η τιμή αυτή αλλάζει
    phi = 0; /* phase difference*/ κατά περίπτωση σε 1,24 ή 1,41.

    omega[2]=ampl*omg*cos(omg*time + phi);

# endif

}
```

Παράρτημα Β

Χαρακτηριστικά της Ροής:

Ρευστό : Αέρας

Πίεση : 101325 [Pa]

Ταχύτητα εισόδου Ρευστού: 0,016 [m/s]

Θερμοκρασία : 300 [K]

Πυκνότητα : 1,225[kg/m³]

Δυναμικό Ιξώδες : 1,8 x 10⁵ [kg/ms]

Solver :

Ακρίβεια : Double Precision

Διαστάσεις : 2D

Transient Formulation : Δεύτερης Τάξης Ρητό Σχήμα

Μοντέλο Τύρβης : Laminar (Χωρίς μοντέλο τύρβης)

Solution Controls :

Under-Relaxation :

Pressure : 0.3

Momentum: 0.7

Density : 1

Body Forces : 1

Spatial Descritization :

Pressure : 2nd order

Momentum : 2nd order Upwind

Pressure-Velocity Coupling : SIMPLE

Convergence Absolute Criteria :

x-continuity : 10^{-5}

y-continuity : 10^{-5}

Momentum : 10^{-5}

Χαρακτηριστικά Dynamic Mesh :

Spring Constant Factor : 0.01

Convergence Tolerance : 0.001

Number of iterations : 20

Πλέγμα :

Method: All triangles method

Face sizing (fluid) : 0.4 [m]

Face sizing (sliding mesh) : 0.02 [m]

Edge sizing on airfoil (number of divisions): 200

Bias Factor (on airfoil) : 1

Edge Sizing(στα όρια του sliding mesh) : 0.02 [m]

Inflation(on airfoil surface) :

First Layer Height: $1.3e - 4$ [m]

Maximum Layers : 30

Growth Rate : 1.1

Στατιστικά :

Size : 195.000 elements

Maximum Skewness : 0,88

Average Skewness : 0,06

Minimum Skewness : 10^{-7}

Standard Deviation : 0,071

Maximum Orthogonal Quality : 1

Average Orthogonal Quality : 0,97

Minimum Orthogonal Quality : 0,063

Standard Deviation : 0,041

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson J.M., S. K. (1998, November 17). Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of fluid mechanics* ,vol.360 , σσ. 41-72.
- Ashraf, M. (2010). *Numerical Simulation of the Flow Over Flapping Foils In Propulsion and Power Extraction Regime*. School of Engineering and Information Technology ,The University of New South Wales .
- Ashraf, M., Young, J., & Lai, J. (2011, July). Numerical Analysis of an Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator. *AIAA*,vol.49,No.7 , σσ. 1374-1386.
- Ashraf, M., Young, J., & Lai, J. (2011, January). Reynolds number, thickness and camber effects on lapping airfoil propulsion. *Journal of Fluids and Structures* 27 , σσ. 145-160.
- Belibassakis, K., & Filippas, E. (2015, April 24). Ship propulsion in waves by actively controlled flapping foils . *Applied Ocean Research* , σσ. 1-11.
- Betz, A. (1912, January). Ein Beitrag zur Erklärung des Segelfluges. *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*, Vol. 3 , σσ. 269-272.
- Campobasso, M., & Drofelnik, J. (2012, August). Compressible Navier–Stokes analysis of an oscillating wing in a power-extraction regime using efficient low-speed preconditioning. *Computers & Fluids*,Volume 67 , σσ. 26-40.
- Dauids, S. (1999). *A computational and experimental investigation of a flutter generator*. Monterey, CA: Naval Post Graduate School.
- Deng, J., Caulfield, C., & Shao, X. (2014, April 28). Effect of aspect ratio on the energy extraction efficiency of three-dimensional flapping foils. *Physics Of Fluids* (26) .
- Duncan, W. (1945, January). The fundamentals of flutter . *Aircraft Engineering* , σσ. 16-20.
- Fluent 19.2 User's Guide* . Ansys.
- G.Dumas, T. (2014, August 6). Optimal Operating Parameters for an Oscillating Foil Turbine at Reynolds Number 500,000. *AIAAJ* , σσ. 1885-1895.
- Hover, F., Haugsdal, & Triantafyllou, M. (2004, January). Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion. *Journal of Fluids and Structures*,Vol.19(1) , σσ. 37-47.
- John Young, J. C. (2014, January 6). A review of progress and challenges in flapping foil power generation. *Progress in Aerospace Sciences* , σ. 27.
- Jones, D. (1999). Oscillating wing power generation. *3rd ASME/JSME Fluids Engineering Conference*. San Francisco,CA.
- Kinsey, T., & Dumas, G. (2006). Eulerian simulations of oscillating airfoils in power extraction regime. *Advances In Fluid Mechanics IV* , σσ. 245-254.

- Kinsey, T., & Dumas, G. (2008, June). Parametric Study of an Oscillating Airfoil in a Power-Extraction Regime. *AIAA Journal* 46 (3) , σ. 1318.
- Knoller, R. (1909). Die Gesetze des Luftwiderstandes. σσ. 1-7.
- Lindsey, K. (2002). Feasibility study of oscillating wing power generators. [*M.Sc. Thesis*] . Monterey, California: United States Naval Postgraduate School.
- McKinney, W., & DeLaurier, J. (1981, March). Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill. *AIAA vol.5* (2) .
- Platzer, F., & Bradley, R. (2009, May 14). Oscillating-wing power generator with flow-induced pitch–plunge phasing. *Patent Application Publication* .
- Platzer, M., & Jones, K. (1998, July). Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Betz Effect. *AIAA Journal*(36)7 , σσ. 1240-1248.
- Platzer, M., & Sarigul, K. (2009). A novel approach to extract power from freeflowing water and high altitude jet streams. *3rd ASME energy sustainability conference*. San Francisco.
- Platzer, M., Ashraf, M., Young, J., & Lai, J. (2009). Development of a New Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*.
- Platzer, M., Ashraf, M., Young, J., & Lai, J. (2010). Extracting power in jet streams: Pushing the performance of flapping wing technology. *27TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES*. Nice ,France.
- Platzer, M., Nesrin, S., Young, J., Ashraf, M., & Lai, J. (2014, June). Renewable hydrogen generation using sailing ships. *Journal of Energy Resources Technology vol.136* .
- Simpson, B. J. (2009). *Experimental studies of flapping foils for energy extraction*. Massachusetts,USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Simpson, B., Hover, S., Licht, S., & Triantafyllou, M. (2008). Energy extraction through flapping foils. *ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (σσ. 389-395). Estoril, Portugal: ASME.
- Simpson, B., Licht, S., Hover, F., & Triantafyllou, M. (2008). *Experiments in direct energy extraction through flapping foils*. Massachusetts , USA: Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Theodorsen, T. (1979). *General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter* . Langley Field,United States: NASA Ames Research Center Classical Aerodynamics Theory.
- Von Karman, T., & Burgers, J. (1943). General Aerodynamic Theory—Perfect fluids. *Julius–Springer,Vol.2* , σ. 8.
- ZHU, Q. (2011, March). Optimal frequency for flow energy harvesting of a flapping foil. *Journal Of Fluid Mechanics* , σσ. 495-517.

Zhu, Q., & Peng, Z. (2009, February). Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil. *Physics of Fluids* 21 (3) .

Κατσούλας, Φ., & Κωνσταντινίδης, Ε. (2018). Υπολογιστική μελέτη του πεδίου ροής γύρω από σταθερή και ταλαντούμενη αεροτομή. *11 η Επιστημονική Συνάντηση ,Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών "ΡΟΗ"*, (σσ. 1-10). 23-24 Νοεμβρίου ,Κοζάνη.