



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ  
ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΗ ΥΔΡΟΤΟΜΗ

ΚΑΤΣΟΥΛΑΣ ΦΡΑΝΤΣΕΣΚΟ-ΗΛΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ , ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΑΠΟ ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΗ ΥΔΡΟΤΟΜΗ

ΚΑΤΣΟΥΛΑΣ ΦΡΑΝΤΣΕΣΚΟ-ΗΛΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ , ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρατηρώντας τα έμβια , ιπτάμενα και θαλάσσια , πλάσματα οι άνθρωποι υιοθέτησαν τον μηχανισμό των ταλαντούμενων πτερυγών ,οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν αποσπάσει μεγάλη προσοχή απο την επιστημονική κοινότητα αφού έχουν ένα πολύ πλατύ εύρος εφαρμογών .Απο την παραγωγή ενέργειας απο αιολικές και θαλάσσιες-παλιρροιακές πηγές μέχρι την αξιοποίηση τους για προωθητικές εφαρμογές όπως πτήση μικρών εναέριων οχημάτων ( MAV's ,micro aerial vehicles ) ,οι ταλαντούμενες πτέρυγες είναι ένα ανερχόμενο μέσο αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και όχι μόνο .Λόγω της αστάθειας και πολυπλοκότητας του πεδίου ροής γύρω απο τα σώματα αυτά, τα φυσικά φαινόμενα που τα συνοδεύουν δεν έχουν αναλυθεί και αποσαφηνιστεί πλήρως .Ο Theodorsen (1937) ασχολήθηκε απο νωρίς με τη μελέτη της ροής γύρω απο γωνιακά και γραμμικά ταλαντούμενη πτέρυγα αναπτύσσοντας τη θεωρία του που κάνει υπόθεση μη συνεκτικού ρευστού που ρέει γύρω απο επίπεδη πλάκα .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 .

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην υπολογιστική μελέτη μιας πτέρυγας που υπόκειται σε ημιτονοειδή-αρμονική γραμμική και γωνιακή ταλάντωση μέσα σε ρεύμα αέρα .Μελετήθηκαν τέσσερις περιπτώσεις :α)Ακίνητη πτέρυγα σε μη-μόνιμη ροή για ένα εύρος γωνιών απο 0°μέχρι 18° (με βήμα 1°) β) Συμφωνία φάσης γωνιακής και γραμμικής ταλάντωσης γ)Διαφορά φάσης  $\pi/2$  (με την γωνιακή να προηγείται ) μεταξύ των δυο κινήσεων και τέλος δ)Αμιγώς γωνιακή ταλάντωση .Για την προσέγγιση του πειράματος υπολογιστικά χρησιμοποιήθηκε κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) FLUENT 15.0 .Για την μοντελοποίηση της ροής και την εύρεση των απαραίτητων μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε η υπόθεση στρωτής ροής (Laminar) και το μοντέλο τύρβης Realizable k-ε .Μελετήθηκαν οι ασταθείς δυνάμεις που ασκούνται πάνω στη πτέρυγα κατα τη διάρκεια της ταλάντωσης της και το πεδίο ροής γύρω απο αυτή .Η γεωμετρία του πειράματος μοντελοποιήθηκε σε δυο διαστάσεις για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων .Παρά το γεγονός ότι τα τρισδιάστατα φαινόμενα είναι σημαντικά για την πρόβλεψη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών μιας ταλαντούμενης αεροτομής ,τα δισδιάστατα πειράματα και υπολογισμοί όντως παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση των ασταθών φυσικών φαινομένων της ροής που σχετίζονται με τις ταλαντούμενες αεροτομές (Shyy et al.). Η διατομή της πτέρυγας είναι η NACA 64418 και λειτουργεί σε αριθμό Reynolds ίσο με  $0,85 \times 10^6$  ενώ η ταχύτητα του ρεύματος αέρα μέσα στο οποίο λειτουργεί η πτέρυγα είναι  $26,4 \frac{m}{s}$  .

Προκειμένου να διαπιστωθεί η ευστάθεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα του ίδιου πειράματος που πραγματοποιήθηκε στην μεγάλη αεροδυναμική σήραγγα κλειστού κυκλώματος του TMM του ΕΜΠ απο τους Μαθιουλάκη ,Γκιόλα και Γιασεμίδη [26] .

## ABSTRACT

In this study we conduct computational simulations of a NACA64418 wing ( $c=0.5$ ) immersed in an airflow stream at  $Re=0,85 \times 10^6$ . We take a deeper insight at the physics of the flow around the wing by examining the vorticity and pressure field around it while comparing these with drag, lift and pressure coefficients. The modes of the wing motion that were put into perspective are the following: i) Stationary wing at different angles of attack,  $\alpha=0-18^\circ$  ii) Heaving and Pitching oscillating wing with zero phase difference between the two movements iii) Heaving and Pitching with  $\pi/2$  phase difference iv) Pure pitching motion. The flow was modeled in two different ways by using the Realizable  $k-\varepsilon$  model and the Laminar condition. For the first two of the motion modes additional experiments were carried out in order to emphasize-clarify the importance of the temporal discretization scheme (first & second order) while alternating the time step size. As for the computational field it was divided in two separate regions: i) a rigid-sliding mesh which allows for the movement of the wing and captures the flow around it and a ii) deformable mesh which surrounds the sliding. Time step and grid independence tests were carried out in order to ensure the accuracy of the results. An explanation of the energy-producing capabilities is given for the oscillatory situations in comparison with the resulted coefficients and phase difference. Finally we discuss about the advantages and disadvantages between the turbulence model and the Laminar condition for the given flow. The CFD code used to simulate the experiment was Fluent 15.0 and the results from this thesis were compared with the equivalent-real experiment: An experimental flow study over a periodically moving wing by Giolas, Giasemidis, Mathioulakis.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Δεν θα μπορούσα να μην απευθύνω τις πρώτες και θερμότερες ευχαριστίες στην οικογένεια μου, τον πατέρα μου, την μητέρα μου και τον αδερφό μου που με υποστήριξαν με όλους τους δυνατούς τρόπους σε αυτό μου το εγχείρημα που διήρκησε πέντε και κάτι χρόνια, ήταν συνεχώς δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια. Επίσης να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντινίδη που με καθοδήγησε και με ενθάρρυνε καθ' όλη το διάστημα διεκπεραίωσης της διπλωματικής αυτής αλλά και για τα πολύ ενδιαφέροντα πράγματα που μας δίδαξε στο μάθημα της μηχανικής ρευστών από τα οποία πήρα το ερέθισμα για αυτήν την διπλωματική. Τέλος να ευχαριστήσω και τον κ. Πανάρα που μου παρείχε την βοήθεια του οικιοθελώς όταν το είχα ανάγκη παραθέτοντας μου απαραίτητο υπολογιστικό υλικό.

Σας ευχαριστώ όλους θερμά.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	10
1.1 Γενικά για τις ταλαντούμενες πτέρυγες .....	10
1.2 Σκοπός Αυτής της Εργασίας .....	12
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	13
1.3.1 Αεροδυναμική ταλαντούμενων πτερύγων .....	13
1.3.2 Εξισώσεις και παράμετροι ταλαντούμενων πτερύγων.....	15
1.3.3 Κινηματικές παράμετροι .....	15
1.3.4 Συχνότητα Ταλάντωσης και Διαφορά Φάσης.....	19
1.3.5 Επίδραση αριθμού Reynolds, πάχους και καμπυλότητας αεροτομής.....	19
1.3.6 Επίδραση Σημείου Περιστροφής Πτέρυγας-Πλάτους Γραμμικής Ταλάντωσης .....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ .....	21
2.1 Υπολογιστικός Κώδικας.....	21
2.2 Υπολογιστικό πλέγμα - πεδίο.....	22
2.3 Μελέτη ανεξαρτητοποίησης πλέγματος - χρονικού βήματος .....	25
2.4 Η Σημασία της Χρονικής Διακριτοποίησης.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	28
3.1 Σταθερή Πτέρυγα .....	28
3.2 Συνδυασμένη Ταλάντωση Με $\Delta\Phi=0$ .....	29
3.3 Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=\pi/2$ .....	30
3.4 Αμιγώς Γωνιακή Ταλάντωση.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	31
4.1 Σταθερή Πτέρυγα .....	31
4.1.1 Περίπτωση με Realizable k-ε .....	31
4.1.2 Περίπτωση Laminar .....	32
4.2 Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=0$ .....	33
4.2.1 R k-ε .....	33
4.2.2 Laminar .....	34
4.2.3 Σύγκριση R k-ε S.O. & Laminar S.O.....	35
4.3 Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=\pi/2$ .....	37
4.3.1 Σύγκριση R k-ε S.O. & Laminar S.O.....	37
4.4 Αμιγώς Γωνιακή Ταλάντωση.....	39
4.4.1 Σύγκριση R k-ε S.O & Laminar S.O .....	39

4.5 ΣΧΗΜΑΤΑ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ .....	41
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ C ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ (UDF) .....	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΗΣ -SOLVER-ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ .....	93
ΑΝΑΦΟΡΕΣ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	96

## 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 $c_D = \frac{D}{0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2 c}$
$U_{\infty}$	Ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος αέρα
$\rho_{\infty}$	Πυκνότητα ελεύθερου ρεύματος αέρα
L	Άντωση ,κάθετη στη φορά του ρεύματος αέρα
D	Δύναμη Οπισθέλκουσας
f	Συχνότητα(Hz)
h	Πλάτος γραμμικής ταλάντωσης (cm)
$\theta_0$	Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης (°)
p	Πίεση
$p_{\infty}$	Πίεση ελεύθερου ρεύματος
$s_{piv}$	Σημείο περιστροφής πτέρυγας $s_{piv} = \frac{1}{3} c$
$P_0$	Εξαγώμενη ισχύς απο το ρευστό $P_0 = L\dot{y} + M\dot{\theta}$
$P_a$	Διαθέσιμη στο ρεύμα αέρα ισχύς $P_a = 0,5 \rho_{\infty} U_{\infty}^3 \gamma_{tot}$
$\gamma_{tot}$	Μέγιστη επιφάνεια σαρούμενη απο ένα σημείο της αεροτομής (ακμή φυγής ή προσβολής)
$C_p$	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 $C_{p_{mean}} = \frac{1}{T} \int C_p(t) dt$
$\eta$	Απόδοση απαγωγής ενέργειας $\eta = \frac{P_0}{P_a} = \frac{C_{p_{mean}} c}{\gamma_{tot}}$
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 $\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \varphi)$
$\varphi$	Διαφορά φάσης
M	Ροπή ,μετρούμενη γύρω απο το κέντρο περιστροφής της πτέρυγας



Re	Reynolds ελεύθερου ρεύματος $Re = \frac{\rho U_{\infty} c}{\mu}$
$\mu$	Δυναμικό ιξώδες
$\omega$	Γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης $\omega = 2\pi f$
$\alpha(t)$	Χρονικά Μεταβαλλόμενη Γωνία προσβολής
$y^+$	Νόμος του Τοιχώματος $y^+ = \frac{y \times u^*}{\nu}$
$u^*$	Friction Velocity $u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{0.5}$

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CFD : Υπολογιστική Ρευστοδυναμική .

$\Delta\Phi$  : Διαφορά Φάσης

F.O. : Πρώτης Τάξης (first order)

S.O. : Δεύτερης Τάξης (second order)

LEV : Έκλυση Στροβιλότητας απο την Ακμή Προσβολής (Leading Edge Vortex)

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

R k-ε : Μοντέλο Τύρβης ( Realizable k-ε )

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά για τις ταλαντούμενες πτέρυγες

Όπως είναι γνωστό 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 τα τελευταία χρόνια έχουν μπει στο προσκήνιο της έρευνας, κάτι το οποίο αποδεικνύεται απο τα λίγα πρωτότυπα που έχουν κατασκευασθεί, αποσπώντας μεγάλο ενδιαφέρον απο 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, απο 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 ακροπτερυγίου (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 απο τους λόγους για τους οποίους προτιμώνται τα παλινδρομικά συστήματα .

Μια ταλαντούμενη πτέρυγα (fluttering wing) λειτουργεί σαν "μηχανή αέρα" (air engine) ή μηχανισμός όπου ενέργεια απορροφάται απο το ρεύμα αέρα και μεταφέρεται στο ίδιο το πτερύγιο (Duncan,1945) . Αυτά τα συστήματα εργάζονται με τρόπο τέτοιο ώστε μέσα απο την ίδια τους την κίνηση και την αλληλεπίδραση τους με το ρευστό να απάγουν ενέργεια απο αυτό η οποία μέσα απο συγκεκριμένους υδραυλικούς μηχανισμούς (οι οποίοι δεν είναι αναλύονται στην παρούσα εργασία ) κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια και παράγει ρεύμα .Για παράδειγμα μέσα απο 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 (απο το ρευστό ) το οποίο μεταφράζεται σε ηλεκτρική ισχύς.

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

#### i. Πλήρως Προδιαγεγραμμένη Κίνηση .

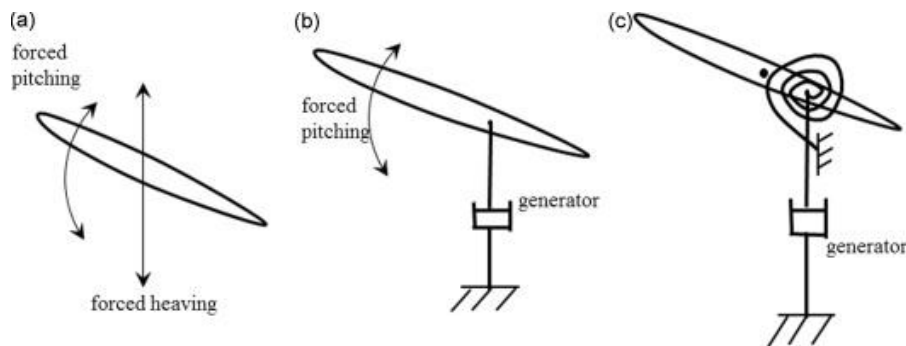
Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας (η οποία είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας) η αεροτομή εξαναγκάζεται με μηχανικά μέσα (πχ ηλεκτρικό κινητήρα) να κινηθεί γωνιακά (pitching) και γραμμικά (plunging) ενώ η κίνηση είναι πλήρως ελεγχόμενη .Αυτά τα συστήματα συνήθως εκτελούν ημιτονοειδείς ταλαντώσεις 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). Εξ' αιτίας των πλήρως προδιαγεγραμμένων κινήσεων η παραγόμενη ενέργεια ταυτίζεται με εκείνη που έχει προσδοθεί στη πτέρυγα εξ' αρχής.

- 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 της 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.

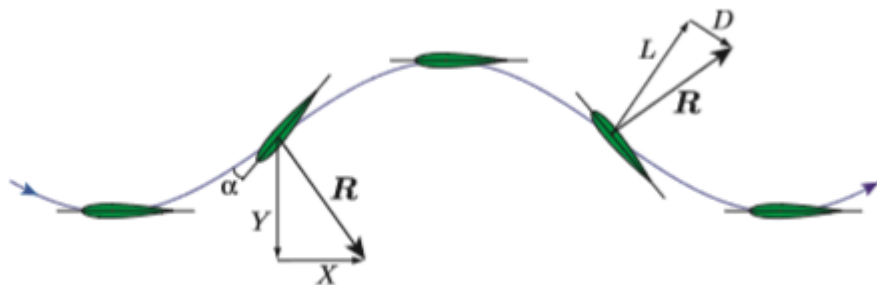


Σχήμα 1.1. Σχηματική απεικόνιση των τριών τρόπων λειτουργίας μιας ταλαντούμενης πτέρυγας. α) Πλήρως προδιαγεγραμμένη κίνηση β) προδιαγεγραμμένη γωνιακή κίνηση και ελεύθερη γραμμική γ) Αυτοκινούμενο σύστημα. [23] Q.Xiao, Q.Zhu

Γενικά υπάρχουν τρεις κατηγορίες, όσον αφορά το αν η ενέργεια παράγεται από το ρευστό (power extraction regime), αν προκύπτει προωθητική λειτουργία (propulsion mode) ή καμία από τις δύο παραπάνω. Το αν παράγεται 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 et al. (1998) :

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

Βασισμένη σε μια απλή 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 επόμενο σχήμα παριστάνει μια χρονική αναπαράσταση όπου το καρέ κινείται με το πεδίο ροής , και γίνεται εμφανής η γωνία προσβολής απο την "διαδρομή" που ακολουθεί η πτέρυγα .Η δύναμη  $R$  είναι η συνισταμένη άντωσης και οπισθέλκουσας και έπειτα διασπάται σε X-Y συνιστώσες (αριστερό μέρος) .Κάποιος καταλαβαίνει ότι η  $R$  έχει μια κάθετη συνιστώσα που είναι παράλληλη με τη μεταφορική κίνηση της πτέρυγας ,παράγοντας έτσι έργο πάνω σε αυτή .



Σχήμα 1.2.Σχηματική αναπαράσταση μια ταλαντούμενης αεροτομής που λειτουργεί παράγοντας ενέργεια  $\chi > 1$  . Παρατηρούμε πως η κάθετη στη ροή δύναμη που ασκείται στην πτέρυγα είναι παράλληλη στην μεταφορική της κίνηση .Φορά ανάγνωσης σχήματος απο δεξιά προς αριστερά . G.Dumas & T.Kinsey [13].

## 1.2 Σκοπός Αυτής της Εργασίας

Αυτή η εργασία μελετάει την αεροδυναμική συμπεριφορά μιας ταλαντούμενης πτέρυγας που βρίσκεται βυθισμένη σε ένα ρεύμα αέρα με  $Re = 0,85 \times 10^6$  .Δεδομένου ότι οι περισσότερες μελέτες αναφέρονται σε ροές με χαμηλούς αριθμούς  $Re$  ,η εργασία αυτή αποσκοπεί στην εξερεύνηση των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στη πτέρυγα σε οριακά (σχεδόν) τυρβώδη ροή .

Πιο συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση :

1. Των δυνάμεων άντωσης ( $L$ ) , οπισθέλκουσας ( $D$ ) και του συντελεστή πίεσης της αεροτομής καθώς και των πεδίων στροβιλότητας και πίεσης .  
Οι τιμές λαμβάνονται απο τη μέση τιμή πολλών κύκλων ταλάντωσης(για την Laminar περίπτωση) έτσι ώστε μια ολοκληρωμένη εικόνα να λαμβάνεται κάθε φορά ενώ για τα αποτελέσματα του μοντέλου τύρβης αναλύονται οι τιμές απο έναν κύκλο καθώς ,όπως θα διαπιστώσουμε στη συνέχεια ,οι διαφορές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα απο κύκλο σε κύκλο είναι αμελητέες .
2. Της επιρροής του μοντέλου τύρβης στην προσέγγιση του πραγματικού πειράματος σε σχέση με την Laminar περίπτωση .  
Στις προσομοιώσεις που έγιναν υπήρξαν δυο τρόποι προσέγγισης του πραγματικού πειράματος ,με βάση την χρήση ή όχι μοντέλου τύρβης .Μέσα απο αυτή τη διαδικασία

μπορεί να διαπιστωθεί η επιρροή του μοντέλου και η ευστάθεια της μοντελοποίησης χωρίς μοντέλο τύρβης .

3. Του βαθμού στον οποίο μεταβάλλονται τα αποτελέσματα ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται πρώτη ή δεύτερης τάξης χρονική διακριτοποίηση .
4. Μελετάται η επίδραση της διαφοράς φάσης μεταξύ των δυο ταλαντώσεων που χαρακτηρίζουν τη κίνηση (γωνιακή- μεταφορική ) στις δυνάμεις που επάγονται στη πτέρυγα .

### 1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

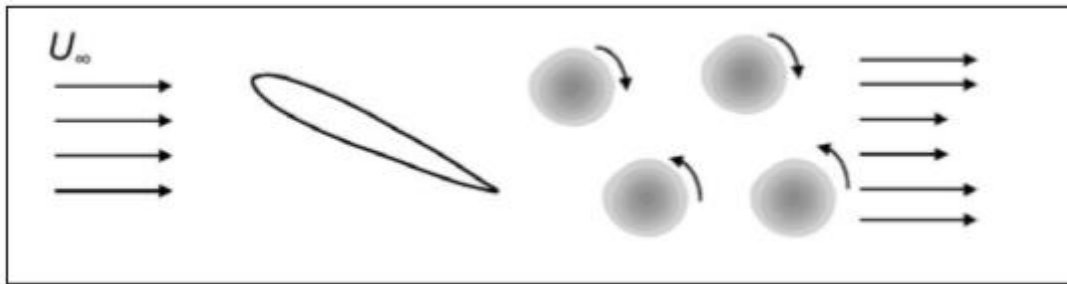
Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μια παλλόμενης πτέρυγας .Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται αυτοί οι παράγοντες όπως ακριβώς αποτυπώθηκαν στη βιβλιογραφία μέσα απο τις σχετικές μελέτες ανά τον κόσμο.

#### 1.3.1 Αεροδυναμική ταλαντούμενων πτερυγών

Έχουν γίνει διάφορες υπολογιστικές και πειραματικές μελέτες που είχαν ως στόχο την κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής γύρω απο μια παλλόμενη πτέρυγα. Η θεωρητική εξήγηση του τρόπου παραγωγής πρόωσης απο μια πτέρυγα πρώτα παρουσιάστηκε απο τον Knoller (1909) και ξεχωριστά απο τον Betz (1912) .Παρατηρήθηκε πως ,κατα 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) .

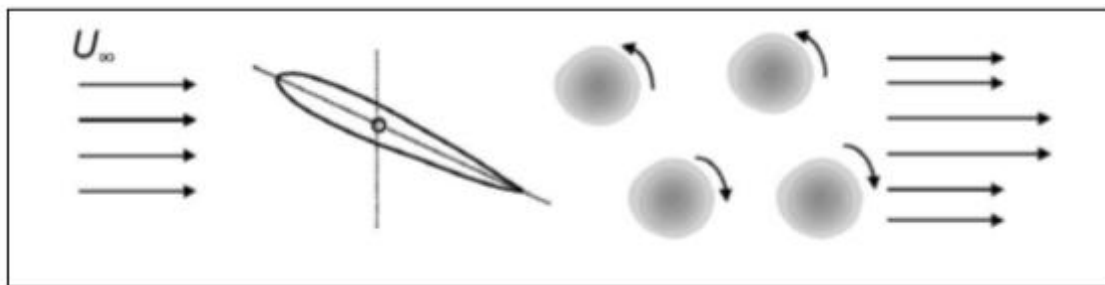
Ας θεωρήσουμε μια δισδιάστατη αεροτομή ,βυθισμένη μέσα σε ροή ιδανικού ρευστού, η οποία ταλαντώνεται γραμμικά (plunge) και γωνιακά (pitch) .Αφού η κίνηση της πτέρυγας δεν είναι σταθερή συνεπάγεται πως και η άντωση που προκαλείται πάνω της θα είναι μεταβαλλόμενη .Εφόσον η άντωση σχετίζεται άμεσα με την κυκλοφορία (  $\Gamma$  ) γύρω απο την αεροτομή ,η κυκλοφορία επίσης θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης .Σύμφωνα με το νόμο του Kelvin ,η συνολική κυκλοφορία που σχετίζεται με μια αεροτομή ,σχετικά με το χρόνο, σε ιδανική ροή πρέπει να παραμένει μηδέν. Επομένως ,όταν η κυκλοφορία 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 απο σώματα παρουσιάστηκε απο τους Von Karman και Burgers (1934) .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 απο αυτή της ροής ,το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα "έλλειμα" ορμής πίσω απο το σώμα και επομένως το σώμα βιώνει μια οπισθέλκουσα δύναμη .Αυτή η δομή παρουσιάζεται πίσω απο αεροτομές που επιστρατεύονται για ενεργειακές εφαρμογές .



Σχήμα 1.3.Ομόρους που ευνοεί την παραγωγή οπισθέλκουσας δύναμης (drag producing wake). Ashraf [14]

Απο την άλλη πλευρά αν το σώμα ταλαντώνεται πέρα απο ένα κατώφλι συχνότητας ,το πεδίο στροβιλότητας στον ομόρου αλλάζει σε αντίστροφη οδό Von Karman ,που σημαίνει ότι η επάνω σειρά δινών έχει αντιωρολογιακή 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 απο 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 απο ταλαντούμενες αεροτομές που χρησιμοποιούνται σε προωθητικές εφαρμογές .



Σχήμα 1.4.Ομόρους που ευνοεί την παραγωγή πρόωσης (thrust producing wake). Ashraf [14]

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 απο την ακμή προσβολής ή αλλιώς LEV . Ο Simpson [15] αναφέρει πως η έκλυση δινών και κυρίως LEV αποδείχθηκε πως είναι καθοριστική για την μεταφορά ενέργειας απο το ρευστό στο πτερύγιο .Η LEV έχει αναγνωριστεί ως καθοριστική 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 απο αυτή της ροής που συμβάλει στην παραγωγή πρόωσης απο 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 .

### 1.3.2 Εξισώσεις και παράμετροι ταλαντούμενων πτερύγων

Με βάση τις περιπτώσεις κίνησης που περιγράφηκαν στην ενότητα 1.1 ,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  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα ( $=2\pi f$ ),  $\theta_0$  και  $h$  ,  $\theta_0$  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 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 :

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

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 :

$$\eta = \frac{P_0}{P_a} = \frac{C_{p_{mean}} c}{y_{tot}} \quad (8)$$

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 προσβολής ή φυγής .

### 1.3.3 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 .

Οι περισσότερες μελέτες έχουν θεωρήσει πλήρως προδιαγεγραμμένη ημιτονοειδή κίνηση αν και υπάρχουν και άλλες που μελετούν τις επιρροές μη αρμονικών κινήσεων . Οι Ashraf et. al. [2] ,[1] και Platzler et al. [3] 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 πτερυγών και διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ αυτών .Ο Ashraf [14] μέσα απο τις 2D NS (Navier-Stokes) προσομοιώσεις του,για ημιτονοειδώς ταλαντούμενη πτέρυγα , με  $Re=20000$  και NACA0014 βρήκε πως η μέγιστη απόδοση καθώς και η μέγιστη "συγκομιδή" ενέργειας παρουσιάζεται για διαφορά φάσης  $\phi=90-100^\circ$  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( απο 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 et al. [4] 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 απο 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 et al. [5,6] υιοθέτησαν ,επίσης, την ιδέα ελέγχου της γωνίας προσβολής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου .Όπως και οι Hover et al., επέβαλαν ημιτονοειδή γωνιακή κίνηση στην πτέρυγα και ημιτονοειδές προφίλ για την γωνία προσβολής με NACA0014 , $spin=1/3$  &  $Re=13800$  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  $\alpha=38,9^\circ$ .Απο αυτά προκύπτει πλάτος γωνιακής ταλάντωσης  $\theta_0=72,11^\circ$  και η σαρούμενη επιφάνεια απο 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, ο Simpson [5] σε άλλη έρευνα τόνισε πως: Η διάχυση δινών, και ειδικά LEV, παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά ενέργειας από το ρευστό στο πτερύγιο. Βρήκε πως στις περιπτώσεις που παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, στον ομόρου υφίστανται δίνες δομής "2P" (δυο ζευγάρια δινών ανά κύκλο ταλάντωσης).

Μια πολύ σημαντική μελέτη στην οποία γίνεται συχνά αναφορά από άλλες έρευνες είναι η εργασία των Kinsey & Dumas [13]. 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 (remeshing, 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 δεύτερης τάξης χρονική ολοκλήρωση (δηλαδή μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων). Βρέθηκε πως για τις περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη απόδοση παραγόταν και εκλύονταν 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°.

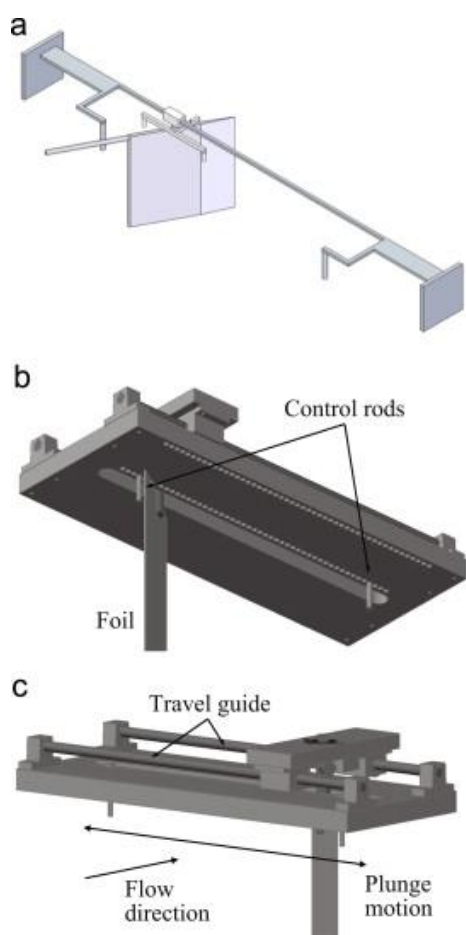
### *Πειραματικές Μελέτες*

Οι Platzer et al. [7-10] 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 1.5). 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.

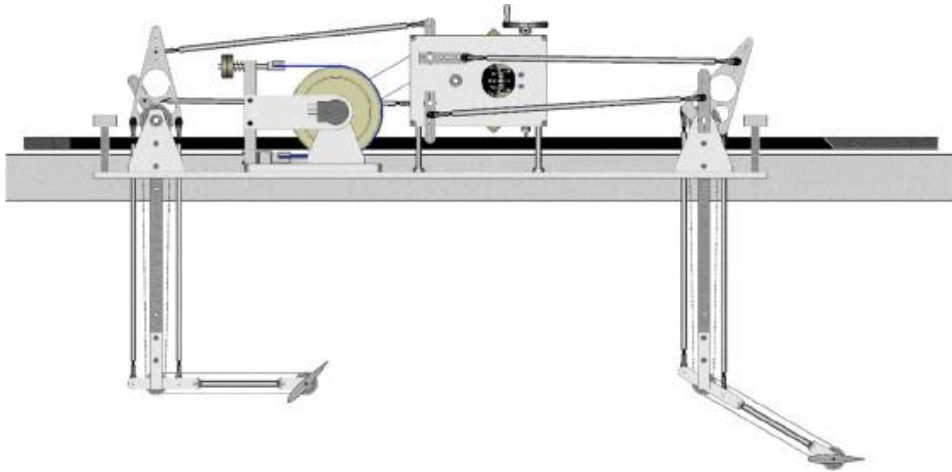
Επίσης, οι Jones et al. [11] & Lindsey et al. [12] κατασκεύασαν και ανέπτυξαν μια γεννήτρια με δυο πτέρυγες σε σειρά. Η απόσταση μεταξύ τους ήταν 9.6c και η διαφορά της μεταξύ τους φάσης 90° ώστε όταν η μια πτέρυγα βρισκόταν στη φάση του κύκλου που δεν παρήγαγε ενέργεια η άλλη να βρίσκεται στο σημείο 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

περύγων 5.4 .Η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης (Σχήμα 1.6) ήταν σημαντικά μικρότερη απο 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 απο το πρώτο δεδομένου ότι βρίσκεται στον ομόρου του ,και επομένως περιορίζεται ενέργεια που μπορεί να παραχθεί απο αυτό .

Απο αυτή την ανασκόπηση δεν θα μπορούσε να λείπει ίσως η πρώτη πειραματική έρευνα (ορόσημο) πάνω στον τομέα των ταλαντούμενων αεροτομών .Οι McKinney & DeLaurier [20] ανέπτυξαν μια μικρή (  $c=20$  cm ,105 cm πλάτος) παλούμενη (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 Schreerer ,που αντιστοιχεί στην θεωρία του Theodorsen αλλά σε τρεις διαστάσεις .Τα θεωρητικά αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερη απόδοση απο την πραγματική για ένα εύρος πλατών ταλάντωσης και φάσεων .



Σχήμα 1.5.Το πλήρως παθητικό σύστημα των Platzer et al. a)πρώιο σχέδιο απο Platzer & Bradley [7] b)&c) βελτιωμένος σχεδιασμός απο τους Platzer et al.[10]



Σχήμα 1.6. Γεννήτρια που αποτελείται από ταλαντούμενες υδροτομές σε σειρά .Jones et al. [11] Lindsey et al.[12].

#### 1.3.4 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  $\phi$  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 [21]).

Όσον αφορά τη διαφορά φάσης έχει βρεθεί πως η μέγιστη συλλογή ενέργειας συμβαίνει όταν η μεταφορική και η γωνιακή ταλάντωση έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$ .

#### 1.3.5 Επίδραση αριθμού Reynolds, πάχους και καμπυλότητας αεροτομής

Οι μελέτη των Ashraf et al. [16] που είχε ως αντικείμενο την εύρεση της επιρροής αυτών των παραμέτρων πάνω στο σύστημα είχε τα εξής χαρακτηριστικά. Για ένα εύρος  $Re = 200 - 2 \times 10^6$ , NACA συμμετρικά προφίλ 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 εώς καθόλου σε σχέση με τα συμμετρικά προφίλ σε ότι έχει να κάνει με πρόωση και προωθητική απόδοση.

Οι Kinsey & Dumas [13] 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  $\chi > 1$ .

### 1.3.6 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 ταλαντούμενης 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 [17] 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 [18] 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 [19] πάνω σε αυτή τη σχέση, όντως, δείχνει μια αλληλοσυσχέτιση. Έκανε προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας UPM ( unsteady panel method ) κώδικα με προδιαγεγραμμένες ημιτονοειδείς μεταφορικές και γραμμικές κινήσεις και NACA0012. Για  $\varphi < 90^\circ$  το σημείο περιστροφής, στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο  $c_p$ , υπάρχει πίσω από το μέσο της χορδής ενώ για  $\varphi > 90^\circ$  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 οτι 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 [19] ,Dumas & Kinsey [13]).Αντίθετα ,αυτή η συμπεριφορά δεν παρατηρείται και για την απόδοση η οποία έχει βρεθεί ότι αυξάνεται όσο το πλάτος παραμένει μικρότερο απο  $\frac{c}{2}$  ενώ μόλις φτάσει h=c αρχίζει και πέφτει αφού αυξάνεται και η σαρωμένη επιφάνεια (βλέπε ορισμό απόδοσης) .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

### 2.1 Υπολογιστικός Κώδικας

Η μη-μόνιμη ,ασυμπίεστη ροή γύρω απο την NACA64418 για τις περιπτώσεις που ήταν ακίνητη αλλά και για τις περιπτώσεις που εκτελούσε ημιτονοειδή ταλάντωση προσομοιώθηκε με κώδικα FLUENT 15.0

Για τις περιπτώσεις όπου η πτέρυγα ήταν σταθερή το πλέγμα παρέμενε σταθερό και απαραμόρφωτο .Για τις προσομοιώσεις όπου η πτέρυγα ταλαντωνόταν, ένα μέρος του πλέγματος κινούταν μαζί με την πτέρυγα (sliding-rigid mesh) για την γωνιακή ταλάντωση ενώ ένα μέρος απο το υπόλοιπο δεχόταν τη παραμόρφωση απο τη μεταφορική κίνηση της πτέρυγας (dynamic mesh) .

Οι εξισώσεις NS λύθηκαν με pressure-based solver ,coupled pressure-velocity scheme , δευτέρας τάξης ανάντι χωρική διακριτοποίηση (second order upwind spatial discretization ),second order transient formulation και πρώτης τάξης χρονική ολοκλήρωση (first order time integration) .Η τελευταία μέθοδος ολοκλήρωσης πρέπει να συνοδεύεται απο μικρό χρονικό βήμα για ελεγχθεί το σφάλμα αριθμητικής διάχυσης που εισάγει (στην περίπτωση της κινούμενης πτέρυγας ) .Για τον υπολογισμό των κλίσεων (π.χ. πίεσης) χρησιμοποιήθηκε least squares cell based μέθοδος .Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε (καθώς βρισκόμαστε οριακά στη περιοχή μετάβασης , $Re=0,85 \times 10^6$  ) είναι το k-ε Realizable ενώ κοντά στο τοίχωμα της αεροτομής επικρατεί η συνθήκη μη-ολίσθησης με enhanced wall treatment functions . Προσομοιώνοντας αυτό το πρόβλημα το fluent καλείται να λύσει 5 εξισώσεις :

- $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$

Η εξίσωση αυτή είναι η εξίσωση συνέχειας με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων κατά Reynolds (Reynolds averaged continuity) .

- $\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \overline{f_{turb,x}}$

- $\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \overline{f_{turb,y}}$

Οι δυο τελευταίες εξισώσεις αποτελούν τις Reynolds -averaged NS εξισώσεις στις X-Y διευθύνσεις ενώ οι τελευταίοι όροι των εξισώσεων υφίστανται εξαιτίας των λεγόμενων διατμητικών τάσεων Reynolds .Αυτοί οι όροι για να υπολογιστούν χρειάζεται να γνωρίζουμε την παράμετρο  $\mu_t$  που ονομάζεται eddy viscosity ,και δεν είναι ιδιότητα του ρευστού. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται απο την εμπειρική εξίσωση

$$\frac{\mu_t}{\rho} \approx \frac{c_{\mu} k^2}{\varepsilon}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το είδος ιξώδους τόσο μεγαλύτερες είναι οι διατμητικές τάσεις που δέχονται τα σωματίδια του ρευστού εξαιτίας της τύρβης. Για τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων Reynolds(και άρα και της παραμέτρου  $\mu_t$ ) στο μοντέλο τύρβης έχουν εισαχθεί οι παράμετροι  $k$  &  $\varepsilon$ .

- Εξίσωση διατήρησης για το  $k$ .  
Το  $k$  παριστάνει την τυρβώδη κινητική ενέργεια και είναι ένα μέτρο της ενέργειας που περιλαμβάνεται στις διαταραχές .
- Και εξίσωση διατήρησης για το  $\varepsilon$ .  
Ονομάζεται μέτρο διάχυσης τύρβης και είναι ένα μέτρο του πόσο γρήγορα οι διαταραχές αυτές διαχέονται .Όσο μεγαλύτερο είναι το  $\varepsilon$  τόσο πιο γρήγορα "κοπάζουν" οι διαταραχές.

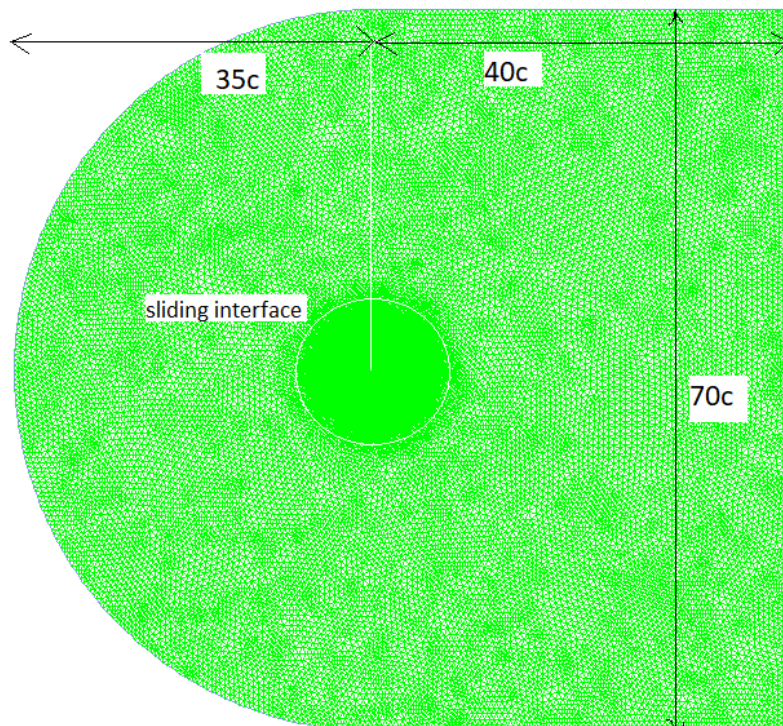
Επομένως έχουμε ένα σύστημα πέντε διαφορικών εξισώσεων με 5 αγνώστους ( $\bar{u}, \bar{v}, k, \varepsilon, \bar{p}$ ) . Στις περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύρβης λύθηκαν απλώς οι εξισώσεις NS (Laminar περίπτωση).

Όσον αφορά την κίνηση της πτέρυγας αυτή εισέρχεται στο πρόβλημα 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 .

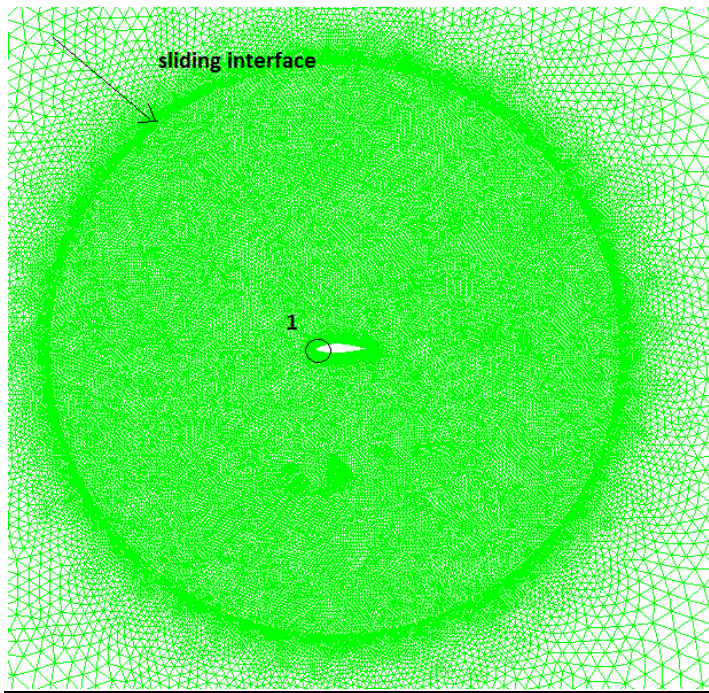
## 2.2 Υπολογιστικό πλέγμα - πεδίο

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε πλέγμα τύπου C (C type grid) ,όχι δομημένο ,με τριγωνικά στοιχεία .Η είσοδος του πεδίου βρίσκεται 35 χορδές ανάντι της αεροτομής και η έξοδος 40 χορδές κατάντι .Η απόσταση απο το άνω και κάτω μέρος της εισόδου είναι 35 χορδές η καθεμία .Το πλήθος των στοιχείων που αποτελούν το πλέγμα είναι περίπου 164000,αριθμός ο οποίος επιλέχθηκε ύστερα απο μελέτη ανεξαρτητοποίησης του πλέγματος. Χρησιμοποιήθηκαν δυο υπολογιστικά πεδία .Το κυκλικό πλέγμα μέσα στο οποίο βρίσκεται η αεροτομή ,έχει ακτίνα 5 χορδές(sliding mesh ) και το υπόλοιπο πλέγμα (fluid) το οποίο είναι σταθερό αλλά παραμορφώσιμο στις περιπτώσεις όπου η πτέρυγα εκτελεί ταλάντωση. Τα στοιχεία που βρίσκονται μέσα στο κύκλο είναι πολύ πιο πυκνά απο το υπόλοιπο πεδίο ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια στο μέρος του πεδίου που συμβαίνουν οι περισσότερες αναταραχές τις ροής (δηλαδή γύρω και κυρίως πίσω απο τη πτέρυγα) . Στα Σχήματα 2.1-2.3 φαίνονται τα χαρακτηριστικά που διέπουν το πλέγμα .Απο την Σχήμα 2.3 φαίνεται ότι έχει χρησιμοποιηθεί δομημένο πλέγμα κοντά στο τοίχωμα της αεροτομής ώστε να αποδοθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η συμπεριφορά του οριακού στρώματος .Για αυτόν ακριβώς το λόγο χρησιμοποιήθηκε  $y^+ = 1$  .Το ύψος του πρώτου κελιού απο την επιφάνεια της αεροτομής απέχει  $1,3 \times 10^{-5} \text{ m}$  . Για τα επόμενα στρώματα πλέγματος το ύψος αυξάνει κατά 1,1(growth rate).Μέσα στο οριακό στρώμα βρίσκονται 30 στρώματα που καταλαμβάνουν όλη την έκταση του .Πάνω στην πτέρυγα είναι διανεμημένα 1878 σημεία (με μήκος στοιχείου  $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}$ ) .Το Σχήμα 2.4 δείχνει πως το δομημένο πλέγμα κοντά στο τοίχωμα

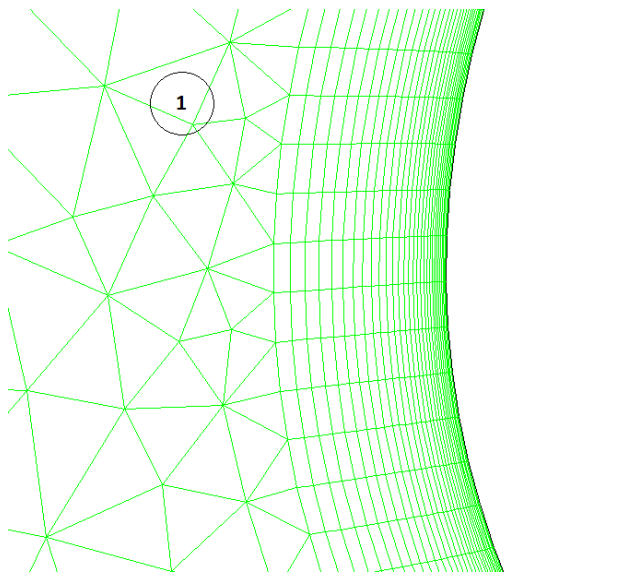
"συλλαμβάνει" με επιτυχία το οριακό στρώμα . (Περισσότερα για το πλέγμα στο Παράρτημα B).



Σχήμα 2.1. Το υπολογιστικό πεδίο των προσομοιώσεων .Στο κέντρο φαίνεται το στερεό sliding mesh αλλά και οι διαστάσεις του πεδίου .Με μπλε χρώμα φαίνεται η είσοδος (inlet) και με κόκκινο η έξοδος (outlet) .

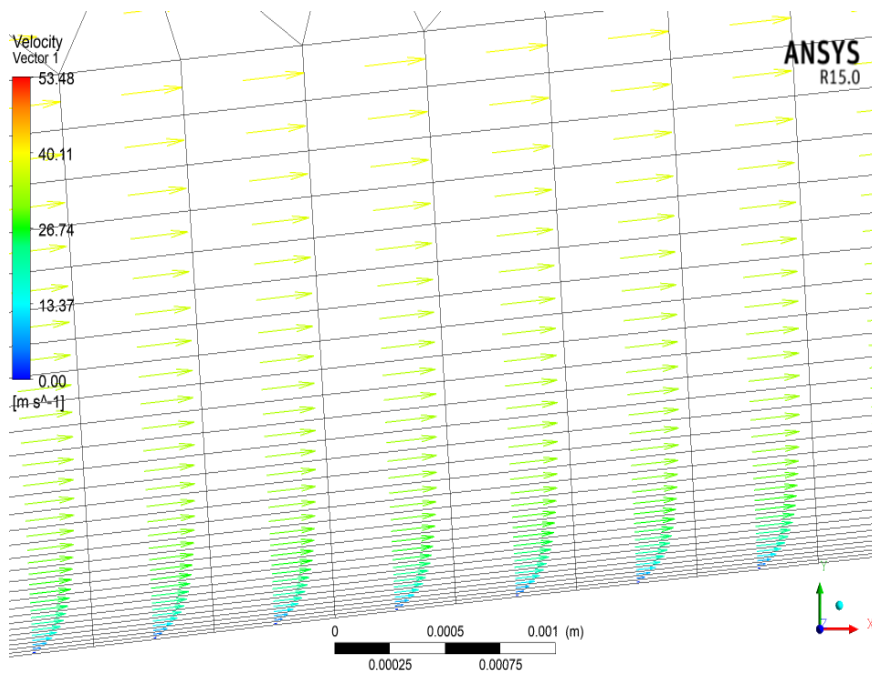


Σχήμα 2.2.Κοντινή λήψη του sliding mesh .1:Βλέπε Σχήμα 2.3 .



Σχήμα 2.3.1:Σε αυτήν την εικόνα φαίνεται το δομημένο πλέγμα που έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του οριακού στρώματος.





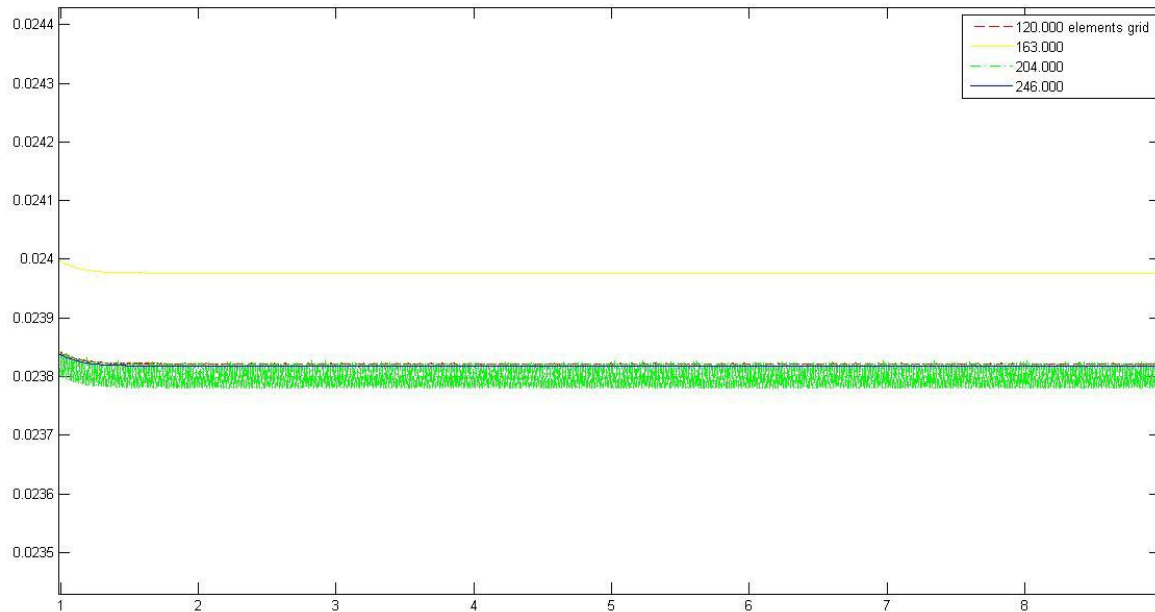
Σχήμα 2.4 .Στην εικόνα φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων για NACA64418 κοντά στην ακμή προσβολής για ταχύτητα 26,4 m/s. Φαίνεται πως το δομημένο πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε κοντά στην αεροτομή καταφέρνει να "συλλάβει" το οριακό στρώμα με επιτυχία .

### 2.3 Μελέτη ανεξαρτητοποίησης πλέγματος - χρονικού βήματος

Όσον αφορά την ανεξαρτητοποίηση του πλέγματος δοκιμάστηκαν τέσσερα διαφορετικά πλέγματα με 120.000, 165.000, 205.000 και 245.000 χιλιάδες στοιχεία. Οι συνθήκες προσομοίωσης για τη μελέτη ήταν ακίνητη πτέρυγα σε γωνία προσβολής  $5^\circ$ ,  $Re=0.85 \times 10^6$  και time step 0.001 s με χρονική διάρκεια εννέα δευτερολέπτων και first order χρονική διακριτοποίηση (βλέπε επόμενη ενότητα ). Για να εξακριβωθεί εάν ένα σωματίδιο του ρευστού(που την  $t=0$  είναι στην είσοδο) προλαβαίνει να εξέλθει από το πεδίο σε αυτό το χρόνο χρησιμοποιήθηκε ο εξής υπολογισμός:

$$\Delta t = \frac{37,5 \text{ m}}{26.4 \text{ m/s}} = 1.4 \text{ s} .$$

Όλα τα πλέγματα έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα σε σχέση με το πιο πυκνό. Τελικά επιλέχθηκε το πλέγμα με τα 164.000 στοιχεία καθώς το σφάλμα συγκριτικά με το πυκνότερο πλέγμα είναι μικρότερο από 1% και συμβάλλει και στην εξοικονόμηση χρόνου που είναι πολύ σημαντικός .Οι διαφοροποιήσεις στους συντελεστές οπισθέλκουσας και άντωσης για τα διαφορετικά πλέγματα εντοπίζονταν από το 4 δεκαδικό στοιχείο και έπειτα .Τα αποτελέσματα των μέσων τιμών για τα τελευταία οκτώ από τα εννέα δευτερόλεπτα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .



Σχήμα 2.5.  $C_D$  για όλα τα δοκιμασμένα πλέγματα .

Στην ανεξαρτητοποίηση απο το χρονικό βήμα χρησιμοποιήθηκαν τρια χρονικά βήματα 0,0005 , 0,001 & 0,002 σε συνδυασμό με το πλέγμα 164.000 .Η χρονική διάρκεια ήταν επίσης εννέα δευτερόλεπτα .

Πίνακας 2.1.  $C_D$  για διαφορετικά πλέγματα και χρονικά βήματα .

Ανάλυση	Πλήθος Στοιχείων	$C_D$	Σφάλμα (%)
Ανεξαρτητοποίηση Πλέγματος	246.000	0,023	-----
	204.000	0,023	<1%
	164.000	0,023	<1%
	120.000	0,023	<1%
Ανεξαρτητοποίηση Χρονικού Βήματος	Χρ. Βήμα		
	0,0005	0,023	-----
	0,001	0,023	<1%
	0,002	0,023	<1%

Οι περισσότερες έρευνες στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούν τρία δεκαδικά ψηφία στα αποτελέσματα τους και αυτή η μέθοδος υιοθετήθηκε και σε αυτή την εργασία .Στο παρακάτω Σχήμα 2.5 φαίνεται η συμπεριφορά του  $C_D$  για τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν .Για το πλέγμα 204.000 στοιχεία παρατηρείται μια "έντονη"(αν και με μικρό πλάτος) ταλάντωση γύρω απο μια μέση τιμή .Εξαιρώντας το πυκνότερο πλέγμα ,το πλέγμα που διαλέξαμε (με τα 163.000 ) έχει την πιο σταθερή συμπεριφορά ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει με ακρίβεια τα αποτελέσματα και είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις με ακίνητη και παλούμενη πτέρυγα .

## 2.4 Η Σημασία της Χρονικής Διακριτοποίησης

Στην παρούσα εργασία οι περισσότερες προσομοιώσεις γίνονται με δευτέρας τάξης χρονική διακριτοποίηση. Ως χρονική διακριτοποίηση ορίζεται η επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος με βάση το οποίο θα ολοκληρώνονται οι όροι των εξισώσεων που μεταβάλλονται με το χρόνο σε μια μη -μόνιμη ροή. Προηγήθηκαν όμως προσομοιώσεις, κατά τη διάρκεια διεκπεραίωσης της διπλωματικής αυτής, οι οποίες έγιναν χρησιμοποιώντας πρώτης τάξης χρονική διακριτοποίηση και ίσως να μην έδωσαν τα επιθυμητά αποτελέσματα ή τουλάχιστον να μην ικανοποιούσαν κάποιες προσδοκίες που θα είχε κάποιος από μια ροή γύρω από αεροτομή σε αυτές τις ταχύτητες αέρα (όπως παρουσιάζεται και στο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα για ακίνητη και ταλαντούμενη αεροτομή).

Με αυτό το τρόπο λοιπόν οι προσομοιώσεις υιοθέτησαν την διακριτοποίηση δευτέρας τάξης οι οποία έδειξε να ανταποκρίνεται περισσότερο στη φύση της πραγματικής ροής (τουλάχιστον για τη Laminar περίπτωση).

Σε αυτό το σημείο όμως αναδύεται η ερώτηση του τί σημαίνουν οι όροι : πρώτης και δευτέρας τάξης ; Μια γενική έκφραση για την χρονική μεταβολή μιας μεταβλητής  $\varphi$  ως προς το χρόνο δίνεται από :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = F(\varphi)$$

όπου η συνάρτηση  $F$  παριστάνει κάθε χωρική διακριτοποίηση. Αν η χρονική παράγωγος διακριτοποιείται (ανάπτυγμα Taylor) χρησιμοποιώντας κατάντι διαφορές τότε η πρώτη τάξης χρονική διακριτοποίηση παίρνει την εξής μορφή :

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F(\varphi)$$

και η δευτέρας τάξης την ακόλουθη :

$$\frac{3\varphi^{n+1} - 4\varphi^n + \varphi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\varphi)$$

όπου :  $\varphi$ : βαθμωτό μέγεθος

$n+1$  : τιμή στην επόμενη χρονική επανάληψη,  $t + \Delta t$

$n-1$  : τιμή στην προηγούμενη χρονική επανάληψη,  $t - \Delta t$

$n$  : τιμή στην τρέχουσα χρονική επανάληψη,  $t$

Αφού η χρονική παράγωγος έχει διακριτοποιηθεί αυτό που απομένει είναι να επιλεγεί ποια τιμή της  $\varphi$  θα χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση της  $F$ . Με βάση αυτό το κριτήριο το Fluent δίνει της εξής επιλογές στον χρήστη : Implicit Time Integration και Bounded Second Order Implicit. Στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η πρώτη επιλογή καθώς η δεύτερη δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί σε παραμορφώσιμα πλέγματα και επιπλέον δεν παρέχει επιπλέον ακρίβεια αλλά μόνο επιπλέον σταθερότητα κατά τη διάρκεια της επίλυσης κάτι που δεν αντιμετωπίστηκε ως πρόβλημα σε αυτή την εργασία. Για αυτό το λόγο λοιπόν θα αναλύσουμε μόνο την πρώτη επιλογή. Αυτό που αναφέρεται επομένως ως Implicit Time Integration δηλώνει την επαλήθευση της συνάρτησης  $F$  χρησιμοποιώντας την επόμενη χρονική επανάληψη. Αν λάβουμε υπόψη μας δηλαδή την διακριτοποίηση πρώτης τάξης (για λόγους απλότητας) θα έχουμε την επόμενη έκφραση :

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F(\varphi^{n+1}).$$

Η παραπάνω εξίσωση λύνεται επαναληπτικά πριν την αλλαγή χρονικού βήματος .Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρέχει σταθερότητα ανεξάρτητα απο το μέγεθος του χρονικού βήματος (σταθερότητα όμως δεν σημαίνει και ακρίβεια ) .

Πως όμως τα παραπάνω σχετίζονται και πως επηρεάζουν την περίπτωση που αναλύεται στην παρούσα εργασία ;Μια γενικότερη συμβουλή είναι ότι σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια προτείνεται η χρήση της δεύτερης τάξης διακριτοποίησης [22] παρά το γεγονός ότι η πρώτη τάξης είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές . Αυτή η συμβουλή επιβεβαιώνεται σε αυτή την εργασία και γίνεται αρκετά εμφανής στην περίπτωση της ταλαντούμενης πτέρυγας με  $\Delta\Phi=0$  όπου η περίπτωση Lamina-first order δεν παρουσιάζει δίνες στον ομόρου ενώ με την υιοθέτηση της second order σχηματίζεται η αναμενόμενη συμπεριφορά μιας ροής πίσω απο πτέρυγα ,δηλαδή ο σχηματισμός δινών με αντίθετη φορά στροβιλότητας .

Συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε πως το σφάλμα που υπεισέρχεται σε μια προσομοίωση με χρήση πρώτης τάξης είναι μεγαλύτερο απο αυτό που δημιουργείται με χρήση δευτέρας τάξης .Αυτό συμβαίνει διότι η τάξη της προσέγγισης που χρησιμοποιούμε εισάγει σφάλμα ανάλογο με το μέγεθος της διακριτοποίησης υψωμένο στη αντίστοιχη δύναμη .Επειδή το σφάλμα τείνει στο μηδέν ,όταν χρησιμοποιείται δεύτερη τάξη θα τείνει στο μηδέν "πιο γρήγορα" σε σχέση με αυτό της πρώτης τάξης .Αυτός είναι και ο λόγος που καταφέρνει να "μοντελοποιήσει" καλύτερα τη ροή .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

### 3.1 Σταθερή Πτέρυγα

Η πρώτη φάση προσομοιώσεων που διεκπεραιώθηκε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής ήταν αυτές για σταθερή πτέρυγα . Αυτές βοηθούν στο να διαπιστωθεί αρχικά αν υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ πραγματικού πειράματος και υπολογιστικού .

Πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την περίπτωση Lamina και το μοντέλο R k-ε αμφότερα με δευτέρας τάξης χρονική διακριτοποίηση . Σε κάποιες περιπτώσεις χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν "τρεξίματα" με πολύ μικρότερο χρονικό βήμα απο το επιλεγμένο και πρώτης τάξης χρονική διακριτοποίηση για τη διερεύνηση ορισμένων φαινομένων .Για παράδειγμα με το μοντέλο R k-ε έλαβαν χώρα κάποιες προσομοιώσεις με  $\alpha=9^\circ$  και 10 φορές μικρότερο χρονικό βήμα για να αποσαφηνισθεί η αιτία της αδυναμίας του να μοντελοποιήσει την έκλυση δινών .

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές επιλύσεις για κάθε γωνία στο εύρος απο 0 εως  $18^\circ$  και για τις δυο περιπτώσεις (Lamina & R k-ε) .Η διάρκεια τους αντιστοιχεί σε 5 δευτερόλεπτα πραγματικής ροής ενώ κάθε μία διήρκεσε 5-6 ώρες .Εξάχθηκαν αποτελέσματα για τους συντελεστές άντωσης ,οπισθέλκουσας, πίεσης και σχήματα για τις ισοϋψείς του πεδίου στροβιλότητας και του πεδίου πίεσης ενώ για τη Lamina περίπτωση υπολογίστηκε και ο αριθμός Strouhal . Η συχνότητα δειγματοληψίας δεδομένων, κατα τη διάρκεια των

προσομοιώσεων για τους συντελεστές ,είναι ίση με το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε .Αυτό σημαίνει πως κάθε χρονικό βήμα λαμβάνεται μια τιμή για τους συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και πίεσης . Το τελευταίο ισχύει για όλες τις περιπτώσεις σε αυτή τη διπλωματική .

### 3.2 Συνδυασμένη Ταλάντωση Με $\Delta\Phi=0$

Σε αυτή την ενότητα μελετήθηκε η συνδυασμένη ταλάντωση της αεροτομής με τη μεταφορική και τη γωνιακή ταλάντωση να είναι σε συμφωνία . Αυτό σημαίνει ότι οι εξισώσεις (2),(3) παίρνουν την εξής μορφή στην περίπτωση αυτή :

$$y(t) = 0,05 \times \sin(2 \times \pi \times t) \quad (9)$$

$$\theta(t) = 1 + 4 \times \sin (2 \times \pi \times t) \quad (10)$$

αντίστοιχα .

Και εδώ πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τις δυο περιπτώσεις Laminar & R k-ε με πρώτης και δεύτερης τάξης χρονική διακριτοποίηση (first & second order) προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της διακριτοποίησης στα αποτελέσματα .

Για τις εκδοχές με συνδυασμένη ταλάντωση εξάχθηκαν οι τιμές για τους ίδιους συντελεστές με τη σταθερή πτέρυγα και τα ίδια είδη σχημάτων .Για έναν κύκλο ταλάντωσης αποτυπώνονται στα σχήματα στιγμιότυπα ανα  $T/4$  δηλαδή κάθε 0,25 s αφού η περίοδος είναι  $T = 1$  s .Επομένως στα στιγμιότυπα της αντίστοιχης ενότητας στην ενότητα των αποτελεσμάτων η πτέρυγα βρίσκεται στις εξής γωνίες προσβολής :  $t_1 = +1^\circ$  ,  $t_2 = +5^\circ$  ,  $t_3 = +1^\circ$  ,  $t_4 = -3^\circ$  .Το σημείο περιστροφής της πτέρυγας για όλες τις περιπτώσεις ταλάντωσης είναι  $s_{piv} = \frac{c}{3}$  .Οι προσομοιώσεις αυτές αντιστοιχούν χρονικά σε μια πραγματική ροή διάρκειας 9 s ενώ διήρκεσαν 9-11 ώρες η κάθε μια .Για τις Laminar περιπτώσεις προκειμένου να ληφθεί μια συνολική εικόνα ,στα γραφήματα όπου παρουσιάζονται οι συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και πίεσης ενώ οι τιμές αντιστοιχούν στους μέσους όρους των τριών τελευταίων κύκλων .Έτσι απεικονίζεται μια ομαλή συμπεριφορά ενώ ταυτόχρονα γίνεται και πιο κατανοητή .Για R k-ε μοντέλο δεν υπήρξε τέτοια ανάγκη καθώς οι διαφοροποιήσεις απο κύκλο σε κύκλο των συντελεστών ήταν πολύ μικρές οπότε απο έναν κύκλο ταλάντωσης κάποιος μπορεί να εξάγει μια συνολική εικόνα για τη συμπεριφορά του .Η συχνότητα  $k$  (reduced frequency) ,όπως προκύπτει απο την εξίσωση (4) είναι 0,12 για όλες τις περιπτώσεις .Εδώ να αναφέρουμε πως στην εργασία αυτή δεν γίνεται διαχωρισμός μεταξύ γεωμετρικής γωνίας προσβολής ( $\theta(t)$ ) και χρονικά μεταβαλλόμενης γωνίας προσβολής ( $\alpha(t)$ ) .Παρά το γεγονός ότι αυτές οι γωνίες είναι διαφορετικές γενικά, στην παρούσα εργασία σχεδόν ταυτίζονται .Η αιτία αυτού είναι απλή .Διαβάζοντας τον ορισμό της  $\alpha(t)$  (Εξ. (5)) ο δεύτερος όρος αποτελεί το τόξο εφαπτομένης της παραγώγου της μεταφορικής κίνησης προς τη ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος .Η μέγιστη τιμή που παίρνει η παράγωγος του αριθμητή είναι 0,1 το οποίο διαιρούμενο με το 26,4 m/s μας δίνει κάτι πολύ μικρό .Το τόξο της εφαπτομένης αυτού του αποτελέσματος επομένως είναι πολύ κοντά στο μηδέν ,κάτι το οποίο

καθιστά αμελητέο τον δεύτερο όρο της εξίσωσης 5 .Επομένως στην εργασία αυτή οι δυο γωνίες σχεδόν ταυτίζονται και δεν υπάρχει ουσιαστικός λόγος διαχωρισμού .

### 3.3 Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=\pi/2$

Αυτή η περίπτωση είναι παρόμοια με την παραπάνω με τη διαφορά ότι η γωνιακή ταλάντωση προηγείται της μεταφορικής κατά  $\pi/2$  .Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις (2),(3) να παίρνουν την εξής μορφή :

$$y(t) = 0,05 \times \sin(2 \times \pi \times t) \quad (9)$$

$$\theta(t) = 1 + 4 \times \sin(2 \times \pi \times t + \pi/2) \quad (11)$$

αντίστοιχα .

Απο τις παραπάνω γίνεται κατανοητό πως η πτέρυγα ξεκινά κάθε κύκλο ταλάντωσης με  $\alpha= +5^\circ$  . Για έναν κύκλο ταλάντωσης αποτυπώνονται στις εικόνες στιγμιότυπα ανά  $T/4$  δηλαδή κάθε 0,25 s αφού η περίοδος είναι  $T=1$  s .Οι συντελεστές και τα είδη των σχημάτων που εξάχθηκαν είναι ίδια με της περίπτωσης όπου έχουμε συμφωνία φάσης ,οπότε τα στιγμιότυπα που απεικονίζονται στα σχήματα αντιστοιχούν στις εξής γωνίες προσβολής :  $t_1= +5^\circ$  , $t_2= +1^\circ$  , $t_3= -3^\circ$  , $t_4= +1^\circ$  . Επίσης και εδώ για να ληφθεί μια συνολικότερη εικόνα απο τη Laminaρ περίπτωση πάρθηκε ο μέσος όρος απο τους τρεις τελευταίους κύκλους για τους εκάστοτε συντελεστές .Η εν λόγω διαφορά φάσης στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως δίνει τους μεγαλύτερους συντελεστές άντωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες και για αυτό προτιμάται σε εφαρμογές που αποσκοπούν στην παραγωγή ενέργειας (Q. Xiao,Q. Zhu [23]) . Παράγει επομένως μεγαλύτερη δύναμη παράλληλα στη φορά της κίνησης της πτέρυγας που σημαίνει και μεγαλύτερο έργο .

### 3.4 Αμιγώς Γωνιακή Ταλάντωση

Όπως δηλώνει και ο τίτλος εδώ η πτέρυγα εκτελεί μόνο γωνιακή ταλάντωση που υπακούει στην εξίσωση (10) με την εξής διαφορά :

$$\theta(t) = 1 + 4 \times \sin(2 \times \pi \times t + \pi) \quad (12) .$$

Δηλαδή η πτέρυγα ξεκινώντας τη ταλάντωση της κινείται προς τις αρνητικές γωνίες προσβολής .Επομένως τα στιγμιότυπα που αναφέρονται στα σχήματα της αντίστοιχης ενότητας στο κεφάλαιο 4 έχουν ως εξής :  $t_1= +1^\circ$  , $t_2= -3^\circ$  , $t_3= +1^\circ$  , $t_4= +5^\circ$  .Ισχύουν τα ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις για την Laminaρ & R k-ε περίπτωση όσον αφορά τη δειγματοληψία και τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 Σταθερή Πτέρυγα

#### 4.1.1 Περίπτωση με Realizable k-e

Το μοντέλο ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά στον υπολογισμό των συντελεστών άντωσης ,οπισθέλκουσας και πίεσης . Το σημείο απώλειας στήριξης βρέθηκε περίπου στις ίδιες μοίρες (Σχήμα 4.22) σε σχέση με το πραγματικό πείραμα (αν και με υπερεκτίμηση του συντελεστή άντωσης κατά 0,4 μονάδες) ενώ όλες οι τιμές όλων των συντελεστών είχαν μια λογική συνέχεια χωρίς "αναταράξεις" από γωνία σε γωνία. Η διαφορά της γραφικής παράστασης του  $C_L$  από το πείραμα αρχικά είναι 0,1 περίπου μονάδες (στις  $0^\circ$ ) ενώ στις  $+18^\circ$  φτάνει στις 0,4 μονάδες .Επομένως αυξάνοντας τη γωνία προσβολής αυξάνεται και η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές .Το "μόνο" μειονέκτημα που εντοπίστηκε ήταν η αδυναμία του μοντέλου να "συλλάβει" τις δίνες που δημιουργούνται στον ομόρου (Σχήμα 4.1 έως 4.4 ) .Για την εξερεύνηση αυτού του γεγονότος έγιναν επιπλέον προσομοιώσεις για την γωνία των  $9^\circ$  με 10 φορές μικρότερο χρονικό βήμα ( $10^{-4}$  s) για την second & για την first order περίπτωση .Τα αποτελέσματα δεν έδωσαν κάτι διαφορετικό από αυτό που είχε ήδη υπολογιστεί ενώ οι τιμές των συντελεστών που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με το δέκα φορές μικρότερο χρονικό βήμα διαφέρουν λιγότερο από 10 % (Σχήμα 4.11 ) από αυτές με το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε στην παράγραφο 2.3 κάτι που αποδεικνύει ξανά ότι έχει επιτευχθεί χρονική ανεξαρτητοποίηση .

Για την στροβιλότητα του πεδίου ροής θα μπορούσαμε να πούμε πως η first order περίπτωση (με  $10^{-3}$  χρονικό βήμα) παρουσιάζει πιο έντονη στροβιλότητα σε απόσταση 2-3 χορδές πίσω από την αεροτομή (βλέπε Σχήμα 4.1) ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις η "έντονη" στροβιλότητα περιορίζεται μέχρι τη μια χορδή πίσω από την αεροτομή όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα σχήματα .Κάτι άλλο που θα μπορούσαμε να προσθέσουμε εδώ αφορά την ζώνη αποκόλλησης που παρα το γεγονός ότι δεν είναι εμφανέστατη φαίνεται καθαρά πως για την first order περίπτωση (με  $10^{-3}$  χρονικό βήμα) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες (Σχήμα 4.1 ως 4.4) όπου σχεδόν είναι ελάχιστη .Παρόλα αυτά η ροή γύρω από την αεροτομή αποτυπώνεται ομαλή χωρίς αναταράξεις.

Επίσης παρατηρώντας το πεδίο πίεσης γύρω από τη πτέρυγα μπορούμε να δούμε εμφανώς τις διαφορές ανάμεσα σε πρώτης (με χρονικό βήμα  $10^{-3}$  s ) και δεύτερης τάξης διακριτοποίηση με την πρώτη να "βρίσκει " μικρότερη πίεση στο μεγαλύτερο μέρος της αεροτομής στην πλευρά πίεσης (Σχήμα 4.5 & Σχήμα 4.6 στην ενότητα των αποτελεσμάτων) .Αυτό γίνεται εμφανές και στο Σχήμα 4.9 όπου η γραφική παράσταση της πρώτης τάξης με  $10^{-3}$  χρονικό βήμα δίνει "στενότερη" γραφική παράσταση από τις υπόλοιπες που ταυτίζονται (Σχήμα 4.10) . Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις το πεδίο είναι πανομοιότυπο.

Η πρώτης τάξης διακριτοποίηση δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την δεύτερας αν χρησιμοποιηθεί το χρονικό βήμα  $10^{-4}$  s .Από αυτό το γεγονός μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι υιοθετώντας την second order μέθοδο σε συνδυασμό με ένα "αποδοτικό" χρονικό βήμα, μπορεί να εξοικονομηθεί αρκετός υπολογιστικός χρόνος αφού με τη χρήση του πολύ μικρότερου βήματος αυτός ανεβαίνει σημαντικά .Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι

οι προσομοιώσεις με βήμα  $10^{-3}$  διήρκησαν 5 -6 περίπου ώρες για σταθερή πτέρυγα ενώ με βήμα  $10^{-4}$  ,9- 10 ώρες για προσομοιώσεις πραγματικής διάρκειας μόλις 5 δευτερολέπτων .

#### 4.1.2 Περίπτωση Laminar

Η περίπτωση Laminar second order φάνηκε να ήταν εκείνη που μπόρεσε να έχει την πιο "φυσιολογική" συμπεριφορά όσον αφορά το ομόρου αλλά και τους συντελεστές οι οποίοι δεν ήταν τόσο "τεχνητά" σταθεροί όσο τους παρουσίαζε το μοντέλο τύρβης ( Σχήμα 4.19 ως 4.23) . Η ίδια περίπτωση με first order παρουσίασε έναν ασταθή ομόρου με κάποιου είδους δίνες ο οποίος βελτιώθηκε και έδωσε ξεκάθαρα δίνες στη δεύτερη περίπτωση . Το σημείο απώλειας στήριξης παρουσιάζεται γύρω στις  $12^\circ$  σε σχέση με το R k-ε και το πραγματικό πείραμα που το εμφανίζουν περίπου στις  $15^\circ$  (Σχήμα 4.22). Τόσο το  $C_L$  όσο και το  $C_D$  παρουσιάζουν κάποια "σκαμπανεύσματα" στο εύρος που μελετήθηκε . Για παράδειγμα το  $C_D$  από τις  $3^\circ$  έως τις  $5^\circ$  βρίσκεται πάνω από τη γραμμή του πειράματος στη συνέχεια περνά από κάτω της ενώ αργότερα στις  $11^\circ$  (περίπου από το σημείο απώλειας στήριξης και ύστερα) παραμένει από πάνω της ενώ η διαφορά της από τη γραμμή του πειράματος αρχίζει να μεγαλώνει από αυτό το σημείο και μετά συγκριτικά με το μοντέλο τύρβης(Σχήμα 4.23) . Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι από το σημείο απώλειας στήριξης και έπειτα τα τυρβώδη φαινόμενα αρχίζουν να γίνονται πιο έντονα , με τις δυνάμεις αδράνειας να υπερσχύουν των δυνάμεων ιξώδους , καθώς η φυσαλίδα αποκόλλησης στην πλευρά αναρρόφησης σπάει και αρχίζουν δίνες να διαχέονται στον ομόρου. Το μοντέλο τύρβης διατηρεί μια πιο στενή "επαφή" με το πείραμα κάτι το οποίο μπορεί να έχει ως αίτιο τις δυο επιπλέον εξισώσεις διατήρησης για την μοντελοποίηση της τύρβης .

Από την άλλη πλευρά όσον αφορά τον συντελεστή άντωσης (Σχήμα 4.22) η πρόβλεψη του μοντέλου είναι πιο μακριά από αυτή της Laminar περίπτωσης με το πρώτο να προβλέπει καλύτερα το σημείο απώλειας στήριξης .

Από τα σχήματα που απεικονίζουν το πεδίο πίεσης φαίνονται εμφανώς οι ζώνες χαμηλής πίεσης που δημιουργούνται στην πλευρά αναρρόφησης (Σχήμα 4.16-4.17) οι οποίες αντικατοπτρίζονται και στο σχήμα που απεικονίζει τον συντελεστή πίεσης (Σχήμα 4.19) . Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.17 απεικονίζονται τρεις ζώνες χαμηλής πίεσης από το κέντρο της αεροτομής προς τα πίσω , που έχουν κυκλικό σχήμα , και οι οποίες αντιστοιχούν στις τρεις κορυφές της κόκκινης γραμμής του Σχήματος 4.19 στις αντίστοιχες θέσεις . Επιπλέον μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως η first order περίπτωση , όπως και για το μοντέλο R k-ε , υπολογίζει χαμηλότερη πίεση στην πλευρά πίεσης της πτέρυγας ενώ βρίσκει υψηλότερη πίεση στην πλευρά αναρρόφησης σε σχέση με τη second order (Σχήμα 4.16-4.17) . Από αυτό το γεγονός κανείς θα περίμενε ο συντελεστής πίεσης να έχει μια πιο "στενή" γραφική παράσταση καθώς προκύπτει ότι η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών είναι μικρότερη από αυτή της second order περίπτωσης . Αυτό ακριβώς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.19. Αυτό έχει ως επακόλουθο ο συντελεστής άντωσης που προβλέπει η πρώτη τάξης περίπτωση να είναι μικρότερος από εκείνον της δεύτερης (όπως και φαίνεται στο Σχήμα 4.20 ) καθώς τα δυο μεγέθη(συντελεστής άντωσης και πίεσης) είναι αλληλένδετα αφού εξαρτώνται από το ολοκλήρωμα της πίεσης πάνω στην αεροτομή.



Τέλος ,για την παρούσα περίπτωση υπολογίστηκε και ο αριθμός Strouhal με τα δεδομένα που παρείχε το Σχήμα 4.18 .Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι :

$$St = \frac{f \times c}{U_{\infty}} = \frac{46 \times 0.5}{26.4} = 0.87 ,$$

όπου η τιμή 46 αντιστοιχεί στον άξονα X της συχνότητας με τη μεγαλύτερη τιμή Power Spectral Density .

## 4.2 Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=0$

### 4.2.1 R k-ε

Για την περίπτωση με το μοντέλο τύρβης και τη συνδυασμένη κίνηση ,όπως και με ακίνητη πτέρυγα, δεν παρουσιάστηκαν δίνες ούτε για την first ούτε για την second order περίπτωση .Το μοντέλο ανταποκρίθηκε αρκετά καλά όσον αφορά το κομμάτι του υπολογισμού των συντελεστών με "σταθερή" θα λέγαμε συμπεριφορά .

Το πεδίο στροβιλότητας (Σχήμα 4.24 & 4.28) θα μπορούσε κάποιος να πει πως είναι αρκετά όμοιο για τις δυο περιπτώσεις ,ενώ δεν παρατηρείται κάποια περιοχή αποκόλλησης .Το ίδιο συμβαίνει και όσον αφορά το πεδίο πίεσης το οποίο ,επίσης ,προκύπτει σχεδόν ίδιο για τις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 4.25 & 4.29). Οι παραπάνω παρατηρήσεις διαπιστώνονται και βλέποντας το Σχήμα 32 όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με εκείνα του πραγματικού πειράματος .Οι γραφικές παραστάσεις των περιπτώσεων πρώτης και δεύτερης τάξης είναι σχεδόν η μία πάνω στην άλλη . Μια διαφορά παρατηρείται τη χρονική στιγμή t2 ( $\alpha=+5^\circ$ ) όπου η κόκκινη γραμμή αγγίζει μεγαλύτερη υποπίεση στην πλευρά αναρρόφησης .Το αντίκτυπο αυτού του γεγονότος μπορεί να το δει κανείς στα Σχήματα 4.26 & 4.30 ,όπου παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των συντελεστών άντωσης και οπισθέλκουσας .Για την περίπτωση second order φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο μέγιστος συντελεστής άντωσης κατά τη διάρκεια του κύκλου φτάνει στην τιμή 0,8 ενώ η first order για την ίδια χρονική στιγμή (t2) έχει την τιμή 0,73 .Ο συντελεστής οπισθέλκουσας φαίνεται να έχει περίπου την ίδια τιμή και στις δυο περιπτώσεις.

Στα Σχήματα 4.27 & 4.33 γίνεται ξεκάθαρη η σταθερότητα με την οποία το μοντέλο τύρβης μοντελοποιεί τη ροή .Οι αλλαγές απο κύκλο σε κύκλο για την ίδια χρονική στιγμή είναι αμελητέες .Αυτός είναι και ο λόγος που όσον αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου δεν λήφθηκε η μέση τιμή κάποιων κύκλων . Παρά το γεγονός ότι φαίνεται καθαρά στα σχήματα ,αξίζει και να σημειωθεί πως η μέγιστη τιμή της άντωσης προκύπτει όταν η πτέρυγα βιώνει η μεγαλύτερη γωνία προσβολής κατά τη διάρκεια του κύκλου ,δηλαδή στις  $+5^\circ$  ενώ η ελάχιστη τιμή της παρουσιάζεται όταν η πτέρυγα βρίσκεται στην "κάτω ακραία " θέση δηλαδή στις  $-3^\circ$  .Η οπισθέλκουσα απο την άλλη πλευρά οφείλει τις χαμηλές τιμές που αγγίζει στο ότι η πτέρυγα κατά την διάρκεια της ταλάντωσης δεν παίρνει ποτέ μεγάλες τιμές γωνίας προσβολής .Παρόλα αυτά φαίνεται να έχει δυο κορυφές σε κάθε κύκλο με αυτές να προηγούνται ελαφρώς των μεγίστων της άντωσης .Αυτό αποδεικνύεται με ανάγνωση του Σχήματος 4.31 στο οποίο κάποιος μπορεί να διαπιστώσει πως ανάμεσα σε δυο ακραίες τιμές του συντελεστή οπισθέλκουσας βρίσκεται μια μέγιστη για το συντελεστή άντωσης (στο πάνω μέρος του σχήματος) ενώ όταν ο συντελεστής άντωσης λάβει την ελάχιστη τιμή του ο συντελεστής οπισθέλκουσας βρίσκεται στο μέσο του εύρους του .

	First order	Second Order
$CL_{max}$	0.75	0.8
$CL_{min}$	-0.02	0.02

Πίνακας 4.1 . Σύγκριση συντελεστών άντωσης ανάμεσα σε πρώτης και δεύτερης τάξης χρονική διακριτοποίηση για την R k-ε περίπτωση .

#### 4.2.2 Laminar

Συνεχίζοντας στη Laminar περίπτωση ,η συμπεριφορά αρχίζει να προσεγγίζει λίγο περισσότερο την φύση μιας πραγματικής ροής αφού ακόμα και στην πρώτης τάξης περίπτωση παρουσιάζεται μια ζώνη αποκόλλησης τις χρονικές στιγμές  $t_2, t_3$  (Σχήμα 4.34) .Στον ομόρου ακόμα δεν βλέπουμε δίνες ωστόσο αρχίζουν να εμφανίζονται "ασταθείς" δομές έστω και εξασθενημένες .

Σε αυτή την ενότητα μπορούμε εμφανέστατα να δούμε την επίδραση πρώτης και δεύτερης τάξης χρονικής διακριτοποίησης στα σχήματα που απεικονίζουν τη στροβιλότητα (Σχήματα 4.34 & 4.38) . Η εικόνα του ομόρου είναι τελείως διαφορετική για τις δύο περιπτώσεις αλλά και όλες τις περιπτώσεις που έχουμε δει μέχρι στιγμής .Εμφανίζονται ξεκάθαρα δίνες και οι ζώνες αποκόλλησης είναι ευκρινείς τις  $t_2$  και  $t_3$  .Επειδή το σχήμα της αεροτομής που έχει επιλεχθεί έχει "πλατύ" προφίλ είναι λογικό ακόμα και σε μικρές γωνίες προσβολής η ροή να εμφανίζει περιοχές αποκόλλησης καθώς περνά απο πάνω της απο τη μέση προς τα πίσω .Αυτό μπορεί να το εξακριβώσει κανείς κοιτώντας το στιγμιότυπο  $t_1$  του Σχήματος 4.39 .Εμφανίζονται μικρές φυσαλίδες και στην πλευρά αναρρόφησης και στην πλευρά πίεσης στην τοποθεσία που αναφέρθηκε .Το πεδίο της πρώτης τάξεως περίπτωσης δεν παρουσιάζει τέτοια φαινόμενα ενώ την  $t_2$  υπολογίζει μικρότερη υποπίεση στην πλευρά αναρρόφησης σε σχέση με second order περίπτωση όπου φυσαλίδες δημιουργούνται εξαιτίας του σχήματος της αεροτομής και διαχέονται στον ομόρου .Στην πλευρά πίεσης για άλλη μια φορά η first order περίπτωση υπολογίζει μικρότερη πίεση σε σχέση με τη second order τις συνέπειες του οποίου θα τις παρατηρήσουμε στις τιμές των συντελεστών που προκύπτουν .Συνεχίζοντας το σχολιασμό του πολύ ενδιαφέροντος πεδίου πίεσης που προέκυψε ,την  $t_3$  η πρώτης τάξης περίπτωση παρουσιάζει περίπου τις ίδιες τιμές πίεσης για την πάνω και κάτω πλευρά με μια διαφορά στην έκταση των περιοχών χαμηλής πίεσης ενώ απο την άλλη η δεύτερης τάξης εμφανίζει χαμηλότερη πίεση στην πλευρά αναρρόφησης το οποίο έχει και την εξής αιτία ,εκείνη τη χρονική στιγμή η αεροτομή περνά απο τη θέση ισορροπίας της γραμμικής ταλάντωσης με ταχύτητα που έχει καθοδική φορά .Επομένως έχουμε μια συνιστώσα ταχύτητας που επιβάλλει στο ρευστό να διασχίσει το πεδίο ροής κάθετα και να περάσει απο την κάτω στην πάνω πλευρά της αεροτομής ενισχύοντας την περιοχή χαμηλής πίεσης που προϋπάρχει απο την πρωτεύουσα ροή .Την  $t_4$  η ροή γύρω απο την πτέρυγα έχει πιο ομαλά χαρακτηριστικά και για τις δυο περιπτώσεις καθώς η γωνία προσβολής  $-3^\circ$  βοηθά στην εξισορρόπηση της πίεσης μεταξύ των δυο πλευρών .

Στο Σχήμα 4.40 απεικονίζονται όλα αυτά που είπαμε παραπάνω .Η κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται πολύ πιο σταθερή σε σχέση με τη μπλε απο την οποία δεν λείπουν οι "αναταράξεις" του συντελεστή πίεσης στις θέσεις όπου προέκυψαν οι φυσαλίδες που διακρίναμε στις ισοϋψείς της πίεσης .

Συγκρίνοντας του συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας (Σχήμα 4.36 & 4.41) φαίνεται πως η first order περίπτωση έχει "υποτιμήσει" συνολικά τις τιμές όπως φαίνεται στο παρακάτω Πίνακα 4.2 . Επίσης το γράφημα της πρώτης τάξεως περίπτωσης είναι πολύ πιο ομαλό σε σχέση με της δεύτερης κάτι το οποίο επαληθεύει την "αδυναμία" του να "συλλάβει " όλες τις ευαισθησίες της ροής .

	First order	Second Order
$CL_{max}$	0.45	0.75
$CL_{min}$	-0.25	-0.08

Πίνακας 4.2.Σύγκριση συντελεστών άντωσης ανάμεσα σε πρώτης και δεύτερης τάξης χρονική διακριτοποίηση για την Laminar περίπτωση .

Τις συνέπειες των παραπάνω διαφορών στις τιμές μπορεί να τις βρεί κάποιος επίσης στο Σχήμα 4.40 ( όπου παρουσιάζεται ο συντελεστής πίεσης) όπως έχουν αναλυθεί επαρκώς και σε προηγούμενη περίπτωση (Παράγραφος 4.1.2). Εδώ να σημειώσουμε πως η Laminar first order περίπτωση ήταν η μόνη που υπολόγισε ξεκάθαρα (και όχι οριακά) αρνητικό  $C_L$  κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης .

#### 4.2.3 Σύγκριση R k-ε S.O. & Laminar S.O.

Βλέποντας το Σχήμα 4.43 μπορούμε να πούμε πως η περίπτωση χωρίς μοντέλο τύρβης βρίσκεται συστηματικά λίγο χαμηλότερα απο το μοντέλο με διαφορά περίπου 0,05 μονάδες όσον αφορά το  $C_L$  .Η αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται στο συντελεστή οπισθέλκουσας (Σχήμα 4.44) με το μοντέλο να υπολογίζει μικρότερες συνολικά τιμές κατά τη διάρκεια του κύκλου .

Τα σχήματα που ακολουθούν θα μας απασχολήσουν αρκετά καθώς παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού ποσοτικοποιούν την απόδοση των προσομοιώσεων στο να αντικατοπτρίσουν την πραγματικότητα όπως αυτή παρουσιάζεται στο πραγματικό πείραμα .

Στο Σχήμα 4.45 φαίνονται οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής άντωσης ανάλογα με τη γωνία προσβολής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης .Η Laminar εκδοχή παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις ενώ εξαιτίας αυτών δεν είναι και κλειστή καμπύλη ,απο την άλλη (όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ) το R k-ε είναι πιο σταθερό και έχει μια συνοχή στις τιμές του οι οποίες μοιάζουν περισσότερο με αυτές του πειράματος .Παρόλα αυτά και οι δυο εκδοχές υπερεκτιμούν τις τιμές του πειράματος .

Στα Σχήματα 4.46 εως 4.49 παρουσιάζονται οι ποσοτικοποιημένες απόλυτες διαφορές μεταξύ  $C_p$  προσομοιώσεων και πειράματος .Για να γίνει απόλυτα κατανοητός ο στόχος αυτών των σχημάτων ,το ιδανικό θα ήταν όλες οι καμπύλες που παρουσιάζονται να ήταν όσο το δυνατό πιο κοντά στο μηδέν (αν θεωρήσουμε ότι οι πειραματικές τιμές αντιπροσωπεύουν επαρκώς μια πραγματική ροή ) .Σε αυτή τη περίπτωση το  $C_p$  των προσομοιώσεων θα ταυτιζόταν με εκείνο του πειράματος .Την  $t1=0T$  (Σχήμα 4.46) μπορούμε να πούμε πως η

Laminar περίπτωση είναι πιο κοντά στη πραγματικότητα σε σχέση με την  $R_{k-\epsilon}$  για το μεγαλύτερο μέρος της αεροτομής και για τις δύο πλευρές της ,με εξαίρεση να αποτελεί η τιμή για περίπου  $x/c=0.65$  περίπου όπου έχουμε μια κορυφή στο γράφημα (suction side Laminar) καθώς υφίστανται οι φυσαλίδες στην πλευρά αναρρόφησης που σχολιάσαμε προηγουμένως .Τις χρονικές στιγμές  $t_2, t_3$  τα εν λόγω σχήματα μοιάζουν, με τις διαφορές να είναι αρχικά αυξημένες και στη συνέχεια να φθίνουν .Δεν είναι τυχαίο πως και για το μοντέλο τύρβης και για τη Laminar περίπτωση οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες στην πλευρά αναρρόφησης αφού είναι πλευρά με τις περισσότερες αναταράξεις τις περισσότερες φορές .Παρόλα αυτά και στις δυο αυτές στιγμές για την πλευρά αναρρόφησης η Laminar έδωσε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα ξανά με εξαίρεση τις κορυφές που είναι αποτέλεσμα των "κέντρων" χαμηλής πίεσης που δημιουργούνται μετέπειτα της πιο πλατιάς περιοχής της αεροτομής .Την στιγμή  $t_4=3T/4$  οι καμπύλες των προσομοιώσεων βρίσκονται κοντά μεταξύ τους ενώ παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις της πλευράς πίεσης της αεροτομής τείνουν να είναι μεγαλύτερες απο εκείνες της πλευράς αναρρόφησης και για τις δυο περιπτώσεις .Αυτό συμβαίνει διότι έχει γίνει μια εναλλαγή "ρόλων" μεταξύ πλευρών πίεσης και αναρρόφησης εξαιτίας της αρνητικής γωνίας προσβολής .Αυτός είναι και ο λόγος που στο Σχήμα 4.50, την  $t_4$ , βλέπουμε οι αντίστοιχες γραμμές να διασταυρώνονται και η μια να περνά κάτω απο την άλλη .Στο ίδιο σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο δίνει υψηλότερες μέγιστες τιμές για το συντελεστή πίεσης το οποίο συνδυάζεται και με την μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή άντωσης που μας υπολογίζει .Γενικότερα δεν θα μπορούσαμε να διατυπώσουμε την άποψη ότι κάποια απο τις δυο περιπτώσεις είναι ξεκάθαρα καλύτερη απο κάποια άλλη (όπως θα συζητήσουμε και στην ενότητα των συμπερασμάτων ) .

Ενδεικτικά ,αφού δεν είναι ο στόχος αυτής της εργασίας η ενεργειακή απόδοση του συστήματος ,αναφέρονται ο συντελεστής ισχύος και η απόδοση απαγωγής ενέργειας απο το ρευστό όπως αυτά προκύπτουν απο τις εξισώσεις (6) ,(8) :

	R k-ε S.O.	Laminar S.O
$C_{p_{mean}}$ (%)	0.075	-0.16
$\eta$ (%)	0.37	-0.8

Πίνακας 4.3.Συντελεστής ισχύος και απόδοση απαγωγής ενέργειας απο το ρευστό για τις περιπτώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης για  $\Delta\Phi=0$ .

Απο τον παραπάνω πίνακα τονίζεται πως τα χαρακτηριστικά του πειράματος δεν ευνοούν την παραγωγή ενέργειας αφού μάλιστα για την περίπτωση χωρίς μοντέλο τύρβης η απόδοση προέκυψε αρνητική που σημαίνει ότι η πτέρυγα όχι μόνο δεν απάγει ενέργεια αλλά οριακά δαπανάται επιπλέον ενέργεια για την κίνηση της . Παρά το γεγονός ότι δεν ορίζεται αρνητική απόδοση ας μας επιτραπεί η χρήση της εδώ για λόγους κατανόησης και ερμηνείας του γεγονότος δαπάνης επιπλέον ενέργειας για την κίνηση του συστήματος .

### 4.3 Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=\pi/2$

Απο εδώ και στη συνέχεια ,όπως προαναφέρθηκε ,οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο με δεύτερης τάξης χρονική διακριτοποίηση και για τις δυο περιπτώσεις .Οπότε ουσιαστικότερο είναι να προχωρήσουμε απευθείας στη σύγκριση αυτών μεταξύ τους αλλά και με την περίπτωση όπου  $\Delta\Phi=0$  .

#### 4.3.1 Σύγκριση R k-ε S.O. & Laminar S.O.

Αξίζει για άλλη μια φορά να σημειώσουμε τη διαφορετικότητα του ομόρου που παρουσιάζουν οι δυο εκδοχές με την Laminar να "ηγείται" απο την οπτική γωνία ότι η εικόνα του ομόρου ανταποκρίνεται πιο πολύ στην πραγματικότητα (Σχήμα 4.53) .Βλέπουμε να διαχέονται δυο μονές δίνες ("2 S") αντίθετης στροβιλότητας ,με την πάνω πλευρά να παράγει τις δίνες αρνητικής και την κάτω να παράγει θετικής στροβιλότητας (οδός Von Karman).Ωστόσο απο το πεδίο στροβιλότητας όλων των περιπτώσεων που εξετάζονται εκλείπει ο σχηματισμός LEV που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας .Ακόμα και τις χρονικές στιγμές που η γωνία προσβολής είναι η μέγιστη δεν είναι αρκετή για να βοηθήσει στο σχηματισμό της . Με το σχηματισμό της εν λόγω φυσαλίδας το σύστημα εκμεταλλεύεται τη χαμηλή πίεση που επικρατεί μέσα σε αυτή οπότε δαπανάται και λιγότερη ενέργεια για την κίνηση της πτέρυγας . Να αναφέρουμε ωστόσο ένα στοιχείο όχι τόσο εμφανές .Αναφερόμενοι στο ξανά στο προφίλ της αεροτομής μπορούμε να πούμε ότι αυτό απο μόνο του δεν ευνοεί τη δημιουργία LEV καθώς είναι σχετικά πλατύ κάτι που σημαίνει πιο "στρογγυλεμένη" ακμή προσβολής .Ένα λεπτότερο προφίλ αεροτομής με πιο "οξεία" ακμή προσβολής θα ευνοούσε περισσότερο ,όπως είναι λογικό ,το σχηματισμό αποκόλλησης κατά τη διάρκεια του κύκλου .

Όπως διαπιστώνεται στο Σχήμα 4.56 το μοντέλο τύρβης έχει την τάση να υπολογίζει μεγαλύτερες υποπίεσεις αφού όπως φαίνεται η γραφική παράσταση της πλευράς αναρρόφησης είναι πάντα ελαφρώς υψηλότερα σε όλες τις χρονικές στιγμές ,ενώ όσο αφορά την πλευρά πίεσης οι δυο γραφικές αλληλοκαλύπτονται σχεδόν σε όλες τις στιγμές για το μεγαλύτερο μέρος της πτέρυγας .Εξαίρεση πάντα αποτελούν οι θέσεις στις οποίες η Laminar περίπτωση εμφανίζει κέντρα (φυσαλίδες) χαμηλής πίεσης κυρίως στο πίσω μέρος της αεροτομής ,όπου αντίστοιχα εμφανίζονται και οι προεξέχουσες κορυφές στο Σχήμα 4.56 .Επομένως εξηγείται και το γεγονός υπολογισμού συστηματικά υψηλότερου συντελεστή άντωσης απο το μοντέλο (Σχήμα 4.57) ενώ ξανά και ο συντελεστής οπισθέλκουσας για τη Laminar περίπτωση είναι υψηλότερος .Εδώ να αναφέρουμε πως ο μέγιστος συντελεστής άντωσης προέκυψε μικρότερος κατά περίπου 0,05 μονάδες απο την περίπτωση με μηδενική διαφορά φάσης .Αυτό έρχεται σε αντίθεση με αυτά που έχουν ειπωθεί στη βιβλιογραφία [23] αλλά και η παρούσα εργασία διαφέρει απο μόνη της αρκετά απο αυτές που έχουν ήδη δημοσιευθεί αφού εξετάζει μικρά πλάτη γραμμικής ταλάντωσης και μικρές γωνίες προσβολής σε αντίθεση με το υπάρχον ερευνητικό υλικό που επικεντρώνεται σε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης αφού μελετά την παραγωγή ενέργειας .Και στο πραγματικό πείραμα (όπως διαπιστώνεται και απο τη σύγκριση των σχημάτων 4.45 & 4.58) η περίπτωση με τη διαφορά φάσης  $\pi/2$  δίνει επίσης ελάχιστα

υψηλότερο μέγιστο  $C_L$  (0,27 και 0,26 αντίστοιχα) . Στο Σχήμα 4.58 βλέπουμε πως τελικά προσομοιώνοντας τη ροή χωρίς μοντέλο τύρβης δίνει αφενός καλύτερη προσέγγιση (ελαφρώς) των πραγματικών τιμών αφετέρου όμως εξακολουθεί να βρίσκεται κατά 0,2 μονάδες περίπου μακριά από αυτές .Εδώ να σημειώσουμε πως στη γραφική παράσταση του πειράματος στο εν λόγω σχήμα έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο οι τιμές ανα  $T/4$  για τις γωνίες προσβολής της πτέρυγας ενώ στις γραφικές παραστάσεις των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται οι τιμές για κάθε γωνία (μόνο ακέραιες τιμές) που βιώνει η πτέρυγα .

Στα Σχήματα 4.59 έως 4.62 βλέπουμε πως στις περιοχές όπου η ροή δεν αποκολλάται (π.χ στο εμπρός μέρος της πτέρυγας) η Laminaρ περίπτωση δίνει αν όχι ίδια, καλύτερα (πλησιέστερα) αποτελέσματα σε αυτά του πειράματος .Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.59 ( $t=t1$ ) όπου  $\alpha=+5^\circ$  η περίπτωση χωρίς μοντέλο τύρβης παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις από το μοντέλο μόνο εκεί όπου υπάρχουν περιοχές αποκόλλησης ,δηλαδή (όπως φαίνεται και από τα πεδία πίεσης και στροβιλότητας Σχήματα 4.53 & 4.54) από  $x/c=0.55$  έως  $x/c=0.8$  .Το ίδιο ισχύει και για τη χρονική στιγμή  $t3$ (Σχήμα 4.61) για την πλευρά πίεσης όπου εξαιτίας της αρνητικής γωνίας προσβολής έχει χαμηλότερη πίεση από την πλευρά αναρρόφησης (βλέπε Σχήμα 4.56 , $t=t3$ ).

Εξηγώντας τις αποκλίσεις της Laminaρ περίπτωσης από το πραγματικό πείραμα αξίζει να ειπωθεί (υπέρ της παρούσας εργασίας) πως τα σημεία δειγματοληψίας που λαμβάνει το λογισμικό πάνω στην πτέρυγα για τον υπολογισμό του συντελεστή πίεσης είναι 1878 συνολικά σε αντίθεση με τους αισθητήρες πίεσης που τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια της πραγματικής πτέρυγας για τη λήψη μετρήσεων όπου υπήρχαν 15 στην πλευρά πίεσης και 17 στην πλευρά αναρρόφησης .Στον αντίποδα κάποιος μπορεί να διατυπώσει ,δικαίως την άποψη πως είναι αδύνατο και από τεχνικής άποψης να τοποθετηθούν τόσο πολλοί αισθητήρες σε ένα πραγματικό πείραμα .Αυτό όμως είναι και το πλεονέκτημα των υπολογιστικών προσομοιώσεων .Να καθιστούν εφικτά πράγματα που δεν γίνονται (τεχνικά) ή είναι αρκετά δύσκολο να γίνουν στην πραγματικότητα .Επομένως οι λεγόμενες αποκλίσεις ,όπως χαρακτηρίζονται στην παρούσα εργασία ,στις περιοχές όπου η Laminaρ περίπτωση προβλέπει αποκόλληση(ή και φουσαλίδες) θα μπορούσαν να είναι και "αδυναμίες" του πραγματικού πειράματος να συλλάβει αυτές τις δομές από την άποψη ότι είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες πίεσης τόσο πυκνά τοποθετημένοι με σκοπό την σύλληψη όλων των δομών που λαμβάνουν χώρα σε μια ροή.

Όπως και στην περίπτωση με  $\Delta\Phi=0$  έτσι και εδώ παρουσιάζονται ενδεικτικά ο συντελεστής ισχύος και η απόδοση απαγωγής ενέργειας :

	R k-ε S.O.	Laminaρ S.O
$C_{p_{mean}}$ (%)	0.073	-0.067
$\eta$ (%)	0.36	-0.33

Πίνακας 4.4. Συντελεστής ισχύος και απόδοση απαγωγής ενέργειας από το ρευστό για τις περιπτώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης για  $\Delta\Phi=\pi/2$ .

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα είναι ελαφρώς μικρότερες από εκείνες του Πίνακα 4.3 αν και οι διαφορές είναι αμελητέες θα λέγαμε .Από την τιμή του συντελεστή ισχύος μπορούμε έμμεσα να συμπεράνουμε μια πολύ ουσιαστική πληροφορία αν λάβουμε υπόψη μας και την εξίσωση που τον ορίζει (7).Ο συντελεστής αυτός έμμεσα μας παρουσιάζει για ποιο μέρος (ποσοστό)

του κύκλου της ταλάντωσης η δύναμη της άντωσης είχε την ίδια φορά με την ταχύτητα (άρα και την κίνηση της αεροτομής) . Για να αναλύσουμε περισσότερο την παραπάνω φράση και να κατανοήσουμε γιατί τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης του πειράματος δεν ευνοούν την παραγωγή ενέργειας , θα χωρίσουμε τον κύκλο σε τέσσερα μέρη με διάστημα  $T/4$  . Το χρονικό διάστημα από  $t_1$  έως  $t_2$  η αεροτομή (όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.57 ) έχει φορά προς την άνω ακραία θέση (της γραμμικής ταλάντωσης) και η άντωση είναι θετική δηλαδή ωθεί την αεροτομή προς τη θέση αυτή . Σε αυτό το χρονικό διάστημα ενέργεια μπορεί να παραχθεί . Το επόμενο χρονικό διάστημα  $t_2$  έως  $t_3$  η αεροτομή κατευθύνεται από την άνω ακραία θέση προς τη θέση ισορροπίας με τη γωνία προσβολής να κυμαίνεται από  $+1^\circ(t_2)$  έως  $-3^\circ(t_3)$  . Παρά την (ελαφρώς αρνητική) γωνία προσβολής η άντωση δεν αλλάζει φορά (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.57 από  $t_2$  έως  $t_3$ ) με αποτέλεσμα και ο συντελεστής (προφανώς) να παραμένει θετικός . Η δύναμη επομένως αντιστέκεται στη φορά της κίνησης κάτι το οποίο έχει ως συνέπεια την επιπλέον δαπάνη ενέργειας για την κίνηση της αεροτομής . Το ίδιο συμβαίνει και στο χρονικό διάστημα  $t_3$  έως  $t_4$  . Από την  $t_4$  έως την εκκίνηση του επόμενου κύκλου ταλάντωσης η άντωση "συμβαδίζει" με τη φορά της κίνησης με τη γωνία προσβολής να έχει τιμές  $+1^\circ(t_4)$  έως  $+5^\circ$  . Τελικά συμπεραίνουμε δηλαδή πως ένας κύκλος ταλάντωσης είναι σχεδόν ισόποσα χωρισμένος ανάμεσα σε δαπάνη και συγκομιδή ενέργειας . Για αυτό το λόγο και ο συντελεστής ισχύος είναι τόσο κοντά στο μηδέν . Αυτό είναι και το αίτιο στο οποίο οφείλονται οι μεγάλες γωνίες προσβολής που λαμβάνουν αντίστοιχα συστήματα που έχουν ως καθαρό σκοπό της συλλογή ενέργειας από το ρευστό . Τη μεταβολή δηλαδή της φοράς της άντωσης ώστε να συμβαδίζει με την κίνηση και να παράγεται έργο .

#### 4.4 Αμιγώς Γωνιακή Ταλάντωση

Η περίπτωση αυτή φάνηκε να έχει την καλύτερη συμφωνία με το πείραμα όπως αποτυπώνεται και στα αντίστοιχα σχήματα . Αυτό πολύ πιθανόν να οφείλεται και στην απλότητα της αφού πραγματοποιεί μόνο ένα είδος ταλάντωσης .

##### 4.4.1 Σύγκριση R k-ε S.O & Laminar S.O

Παρατηρήθηκαν οι ίδιες συμπεριφορές από άποψη πεδίων πίεσης και στροβιλότητας των δύο περιπτώσεων . Στο Σχήμα 4.70 είναι η μόνη φορά που η διαφορά μεταξύ προσομοιώσεων και πειράματος έφτασε μέχρι και τις 0,1 μονάδες με το μοντέλο τύρβης να κρατάει σχεδόν σταθερή τη διαφορά του για όλες τις γωνίες ενώ η Laminar περίπτωση σε κάποιες γωνίες ταυτίστηκε με το πείραμα ενώ σε άλλες αύξησε τη διαφορά της . Για άλλη μια φορά βλέπουμε πως στις περιοχές όπου παρουσιάζονται αναταράξεις η περίπτωση χωρίς μοντέλο τύρβης αυξάνει τοπικά τη διαφορά της (Σχήματα 4.71 έως 4.74) . Συνεχίζοντας στα ίδια σχήματα βλέπουμε πως σε καμία περίπτωση οι διαφορές μεταξύ των  $C_p$  δεν ξεπέρασαν τις 0,4 περίπου μονάδες τη στιγμή που στις άλλες περιπτώσεις οι διαφορές αυτές άγγιζαν και την τιμή 2 μονάδων . Αξίζει να παρατηρήσουμε πως οι υπολογιζόμενοι μέγιστοι συντελεστές άντωσης για τις δύο περιπτώσεις αγγίζουν τις τιμές της συνδυασμένης ταλάντωσης (Σχήμα 4.69) .

	Αμιγώς Γωνιακή Ταλάντωση		Συνδυασμένη με $\Delta\Phi=0$	
	R k-ε	Laminar	R k-ε	Laminar
$CL_{max}$	0.8	0.75	0.8	0.75
$CL_{min}$	0	-0.05	0	-0.05

Πίνακας 4.5. Σύγκριση συντελεστών άντωσης ανάμεσα σε αμιγώς γωνιακή και συνδυασμένη ταλάντωση τη Laminar και R k-ε περίπτωση .

Αυτό μπορούμε να πούμε πως είναι ενθαρρυντικό αφού σημαίνει ότι με πιο απλούς μηχανισμούς και γενικά με ένα πιο απλό σύστημα μπορεί να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα (απο άποψη δυνάμεων) με ένα πιο περίπλοκο σύστημα .Εδώ να αναφέρουμε πως αυτό το εύρημα ισχύει για τις περιπτώσεις που εξετάζουμε εμείς όπου έχουμε μικρά πλάτη ταλάντωσης .Σε περιπτώσεις όπως αυτές που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία(για σύνθετη ταλάντωση) όπου τα πλάτη ταλάντωσης είναι αρκετά μεγαλύτερα αρκεί απλώς να αναφέρουμε πως η συνεισφορά της γωνιακής ταλάντωσης στην παραγωγή ενέργειας είναι πολύ μικρότερη απο τη συνεισφορά της γραμμικής ταλάντωσης εξαιτίας των αρκετά μεγαλύτερων δυνάμεων που προκύπτουν στη δεύτερη .Παρατηρείται η ίδια απόδοση όσον αφορά τους συντελεστές απόδοσης και ισχύος .

	R k-ε S.O.	Laminar S.O.
$C_{p_{mean}}$ (%)	0.086	-0.018
$\eta$ (%)	0.43	-0.091

Πίνακας 4.6. Συντελεστής ισχύος και απόδοση απαγωγής ενέργειας απο το ρευστό για τις περιπτώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης για αμιγώς γωνιακή ταλάντωση.

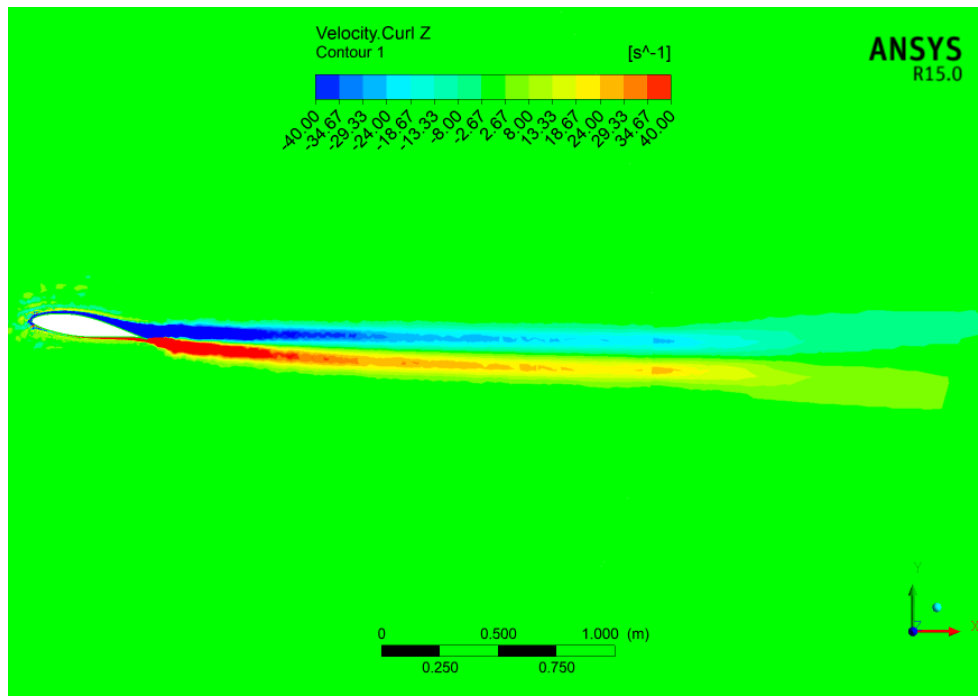
Να προσθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή απο την Εξίσωση 7 που ορίζει τον συντελεστή μηδενίζεται ο πρώτος όρος καθώς δεν έχουμε γραμμική ταλάντωση .Επομένως η μόνη κίνηση που ωφελεί την παραγωγή έργου είναι η γωνιακή .Στην προκειμένη λοιπόν επιθυμούμε τον συντελεστή ροπής (δηλαδή τη ροπή που επάγεται πάνω στην αεροτομή ) να έχει την ίδια φορά με τη γωνιακή κίνηση ,ακριβώς δηλαδή όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις .



#### 4.5 ΣΧΗΜΑΤΑ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

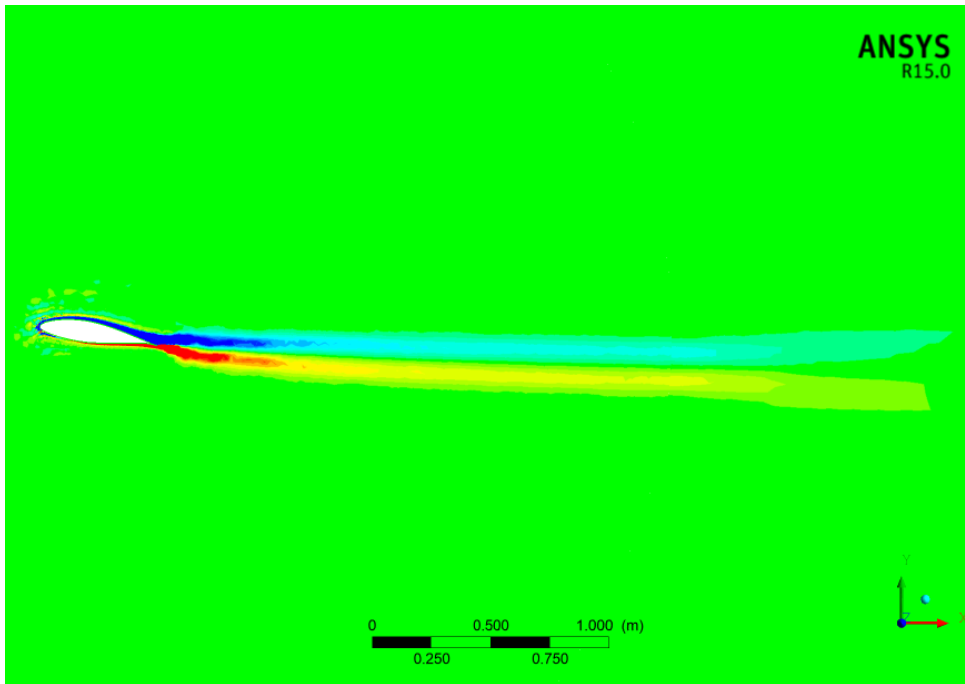
## Σταθερή Πτέρυγα

### Περίπτωση R k-ε

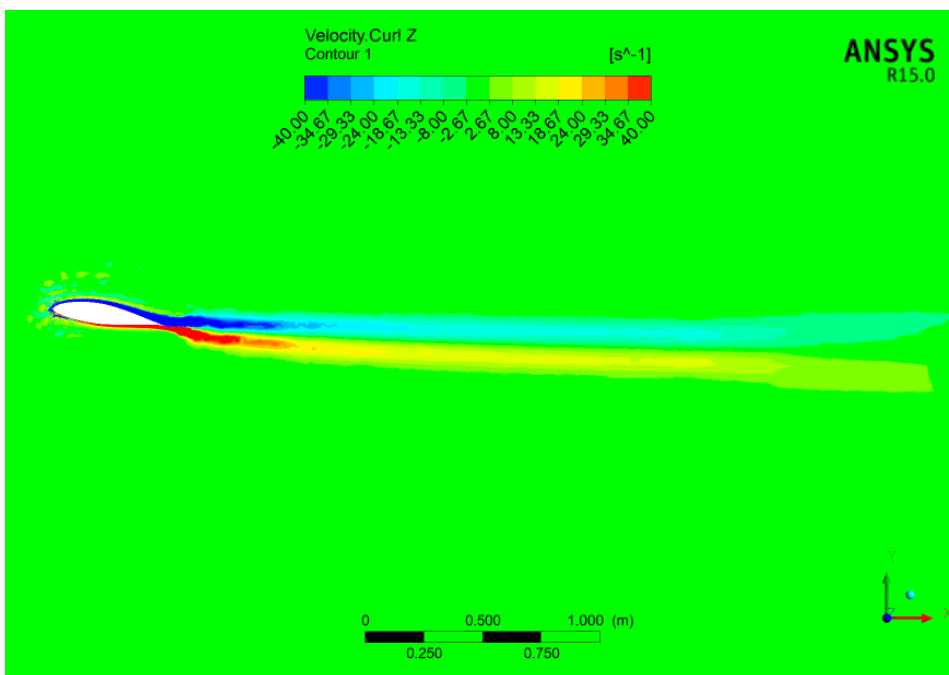


Σχήμα 4.1 .Ισοψείς στροβιλότητας (velocity curl z), $\alpha= 9^\circ$  .

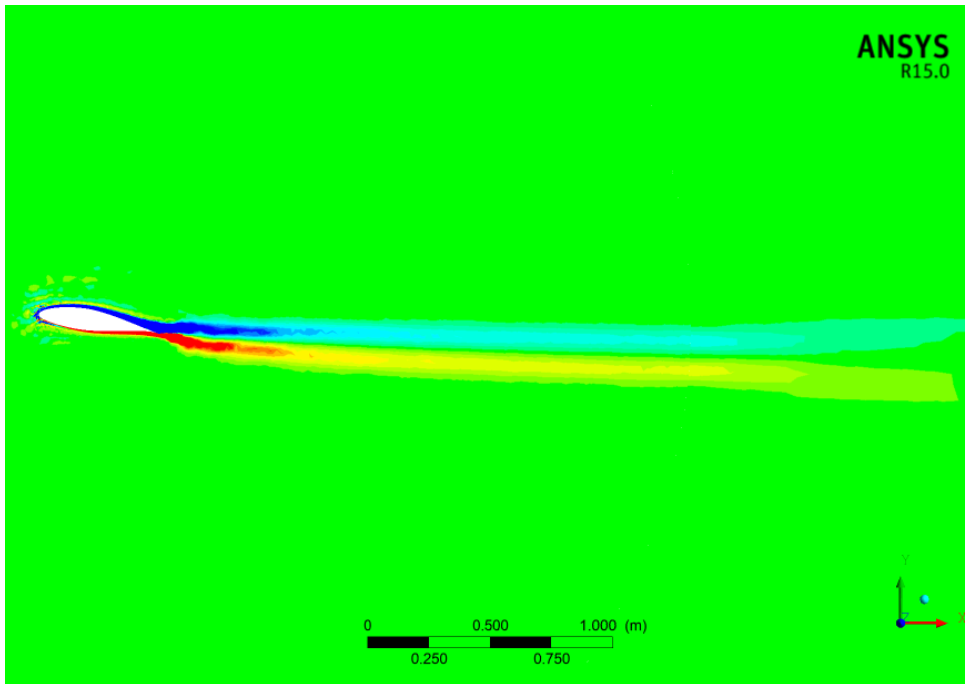
R k-ε ,First Order . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



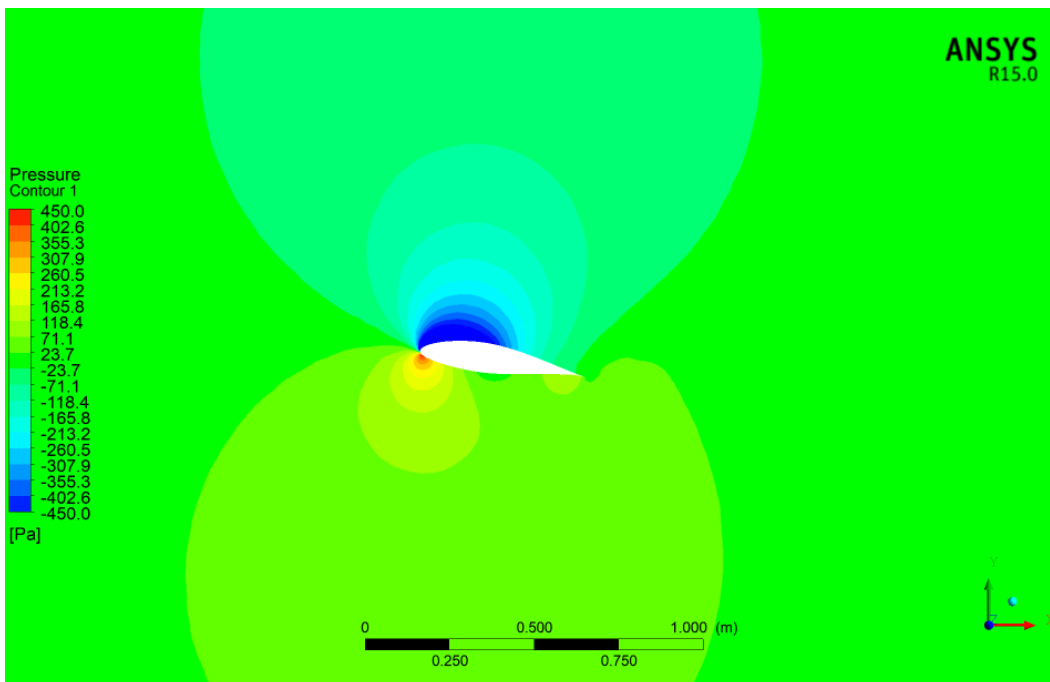
Σχήμα 4.2. Ισοϋψείς στροβιλότητας,  $\alpha = 9^\circ$ . R k-ε, Second Order. Διάρκεια προσομοίωσης 5s. Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα.



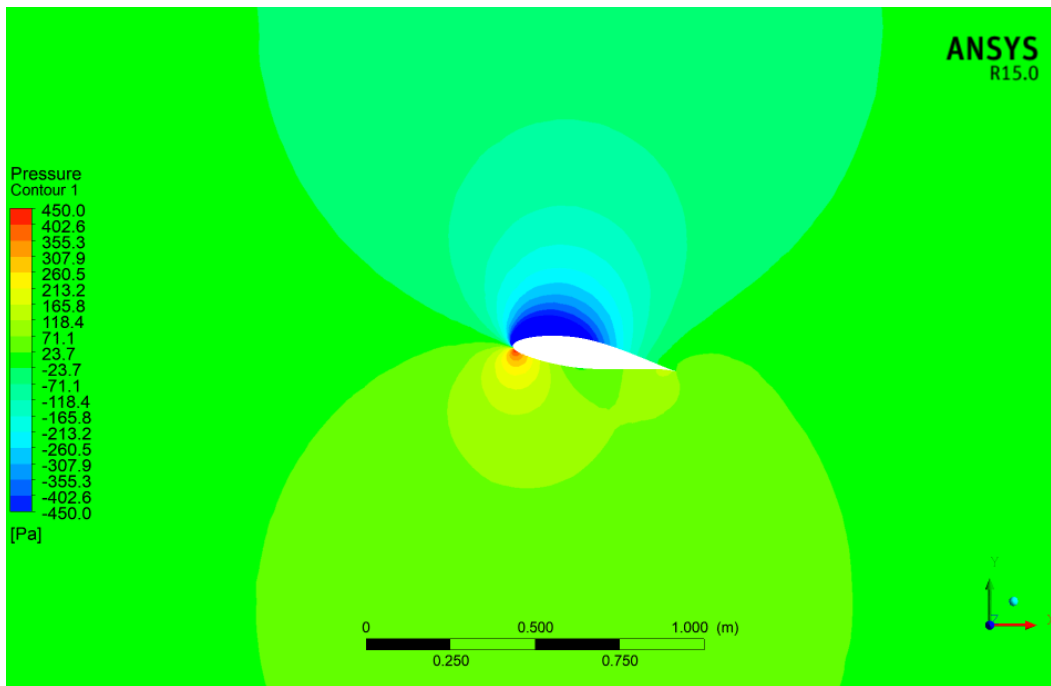
Σχήμα 4.3. Ισοϋψείς στροβιλότητας,  $\alpha = 9^\circ$ . R k-ε, First order. Time step :  $10^{-4}$  s. Διάρκεια προσομοίωσης 5s. Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα.



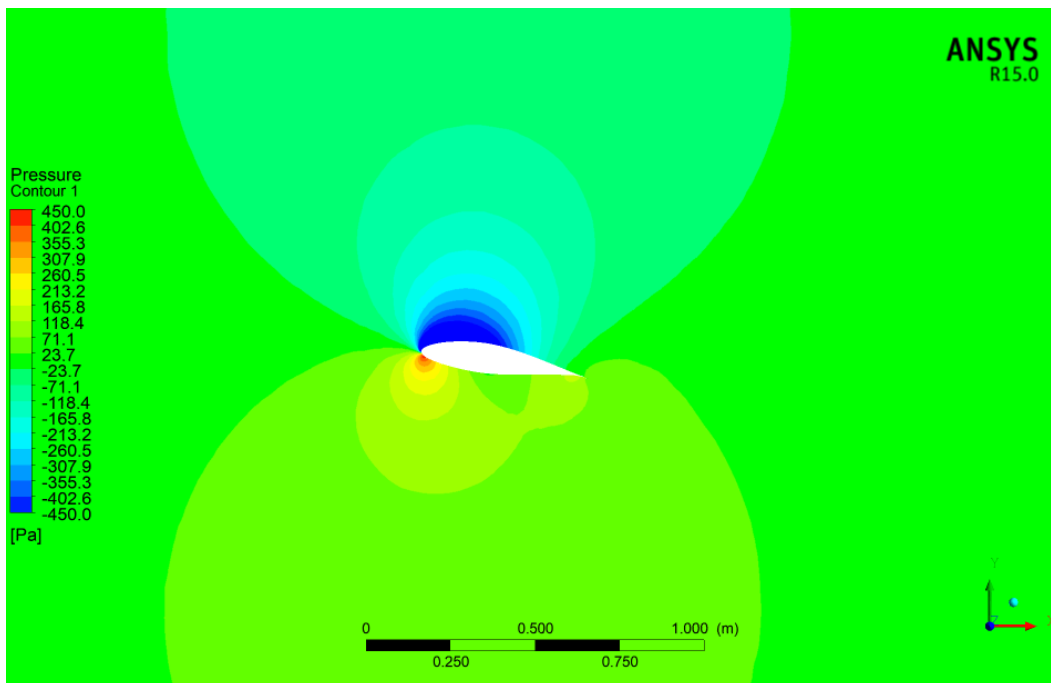
Σχήμα 4.4.Ισοϋψείς στροβιλότητας .R k-ε Second order .Time Step :  $10^{-4}$ s . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



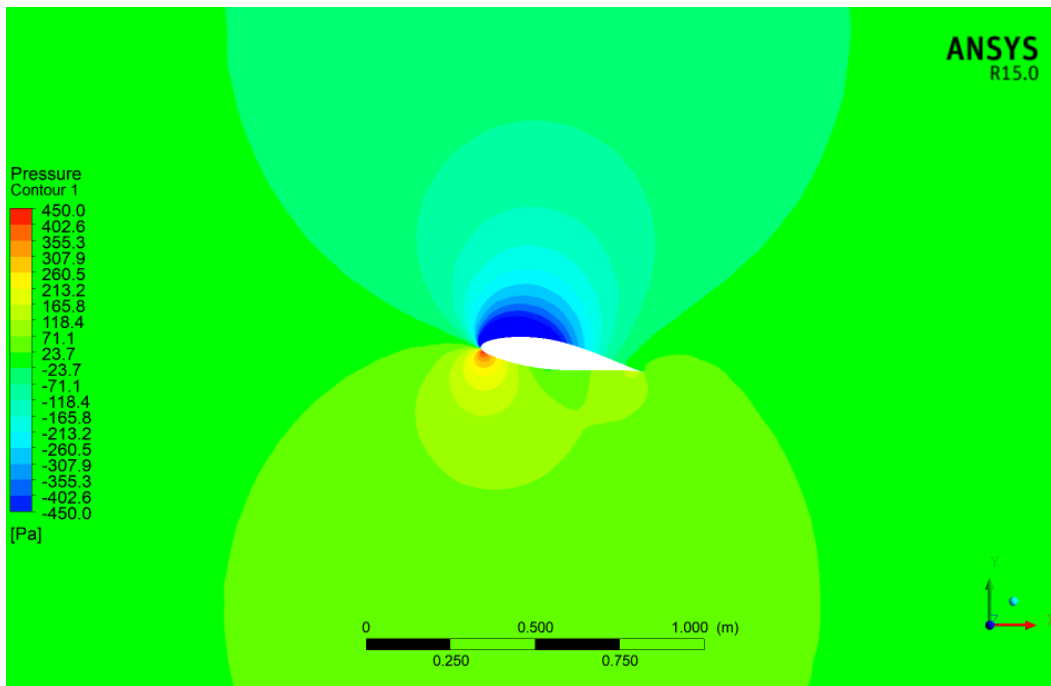
Σχήμα 4.5.Ισοϋψείς Πίεσης R k-ε ,First Order . $\alpha=9^\circ$  . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



Σχήμα 4.6. Ισοϋψείς Πίεσης R k-ε ,Second Order . $\alpha=9^\circ$  . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .

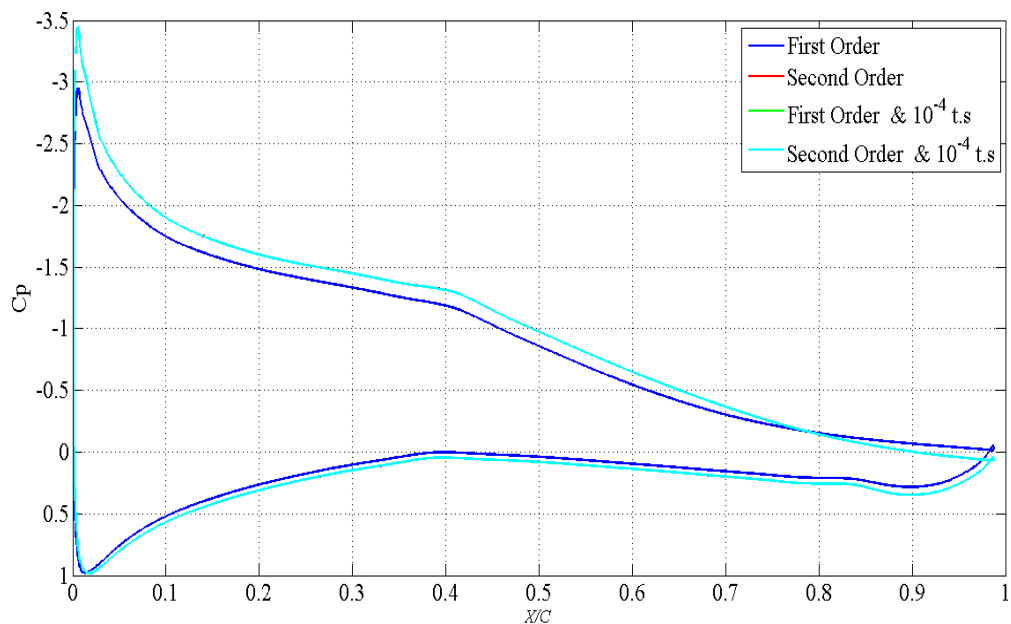


Σχήμα 4.7. Ισοϋψείς Πίεσης R k-ε ,First Order .  $\alpha=9^\circ$  . Time Step :  $10^{-4}s$ . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .

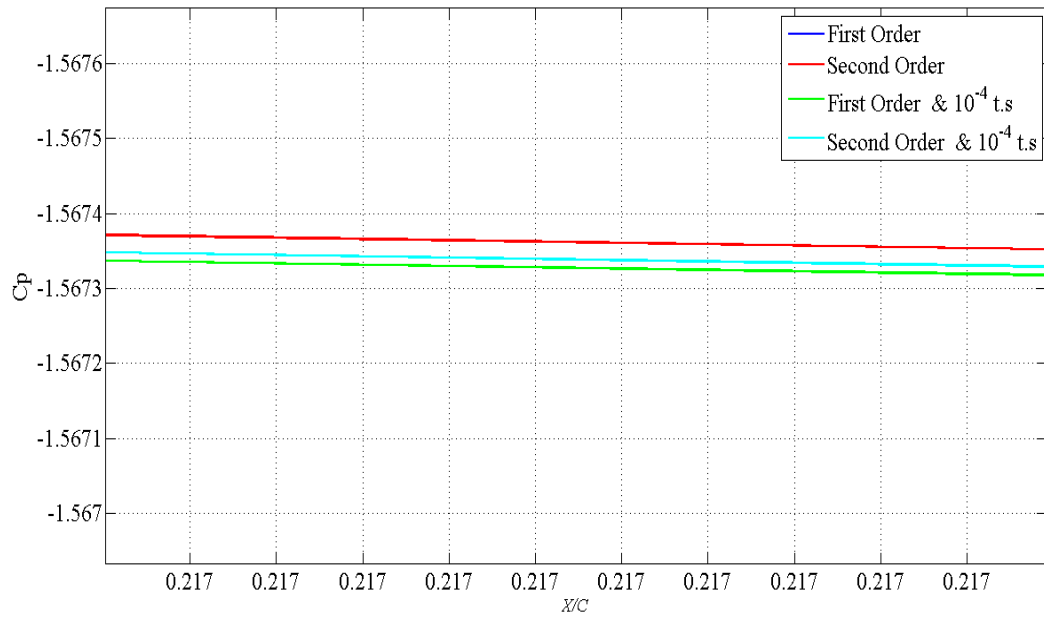


Σχήμα 4.8. Ισοϋψείς Πίεσης R k-ε ,Second Order .  $\alpha = 9^\circ$ . Time Step :  $10^{-4}$ s

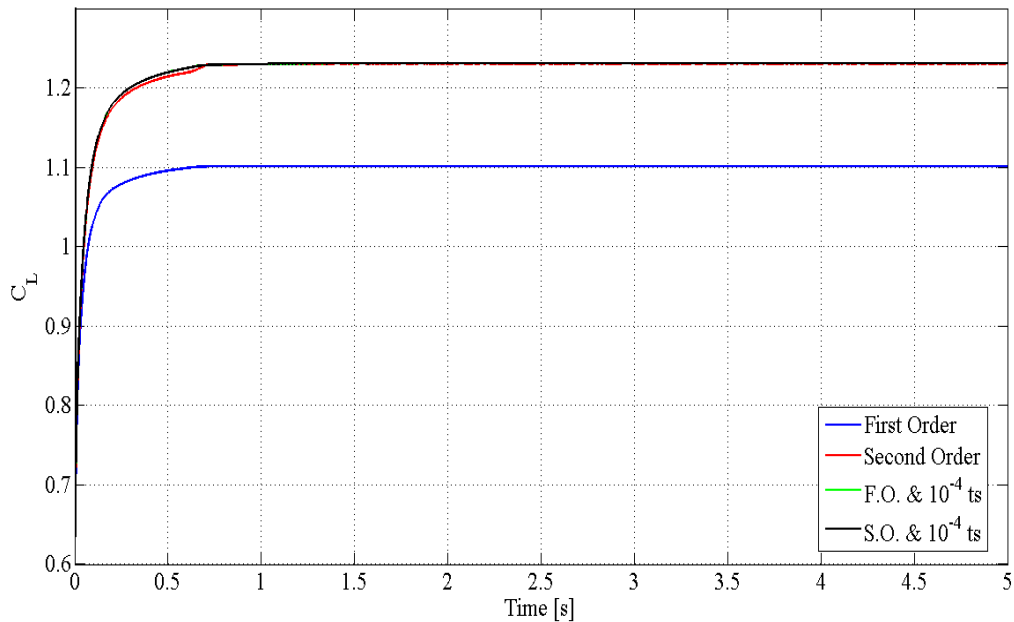
Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



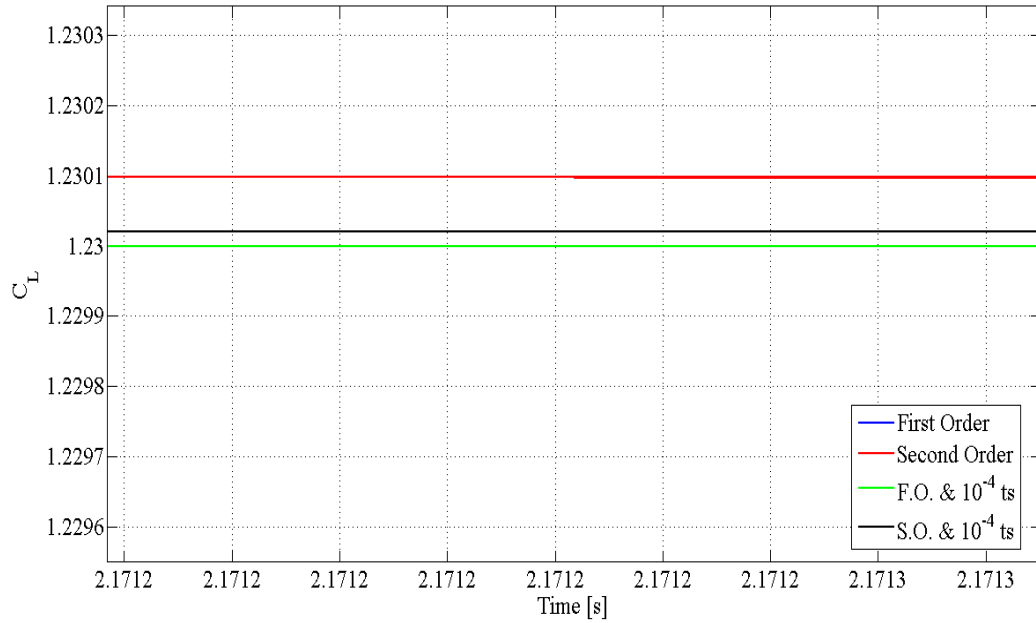
Σχήμα 4.9.Κατανομή του συντελεστή  $C_p$  κατα μήκος της πτέρυγας. Για first & second order με  $10^{-3}$  &  $10^{-4}$  s χρονικό βήμα .Οι γραφικές της δεύτερης και τρίτης περίπτωσης ,όπως αυτές αναγράφονται στο υπόμνημα , "κρύβονται" πίσω απο την κυανή γραμμή ,όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 .



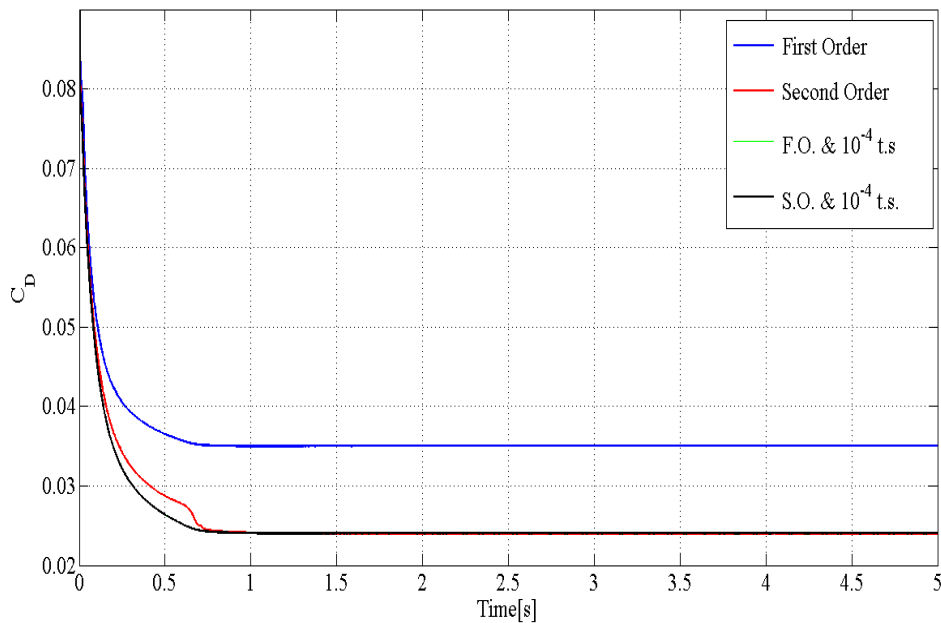
Σχήμα 4.10. Οι τιμές του συντελεστή  $C_p$  για τις περιπτώσεις second order trans. form R k-ε , first order με  $10^{-4}$  και second order με  $10^{-4}$ s δίνουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα .



Σχήμα 4.11. Χρονοσειρές του  $C_L$  για τις τέσσερις περιπτώσεις : 1) R k-ε First Order 2) R k-ε Second Order 3) R k-ε First Order  $10^{-4}$  s 4) R k-ε Second Order  $10^{-4}$  s .  $\alpha = 9^\circ$ .



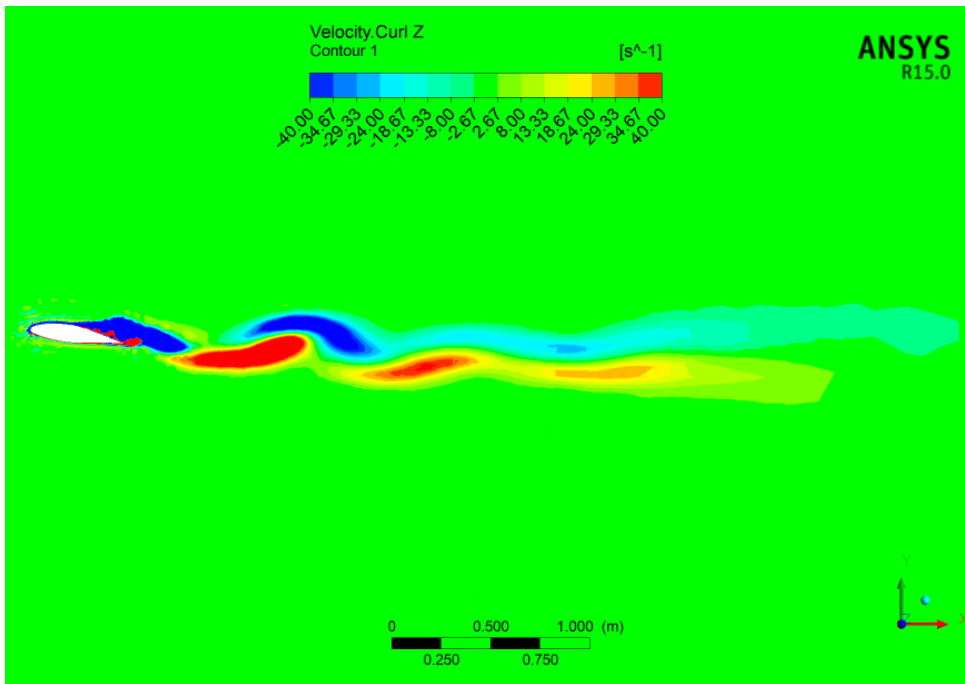
Σχήμα 4.12. Και στο  $C_L$  αποτελέσματα των περιπτώσεων FO με χρονικό βήμα  $10^{-4}$  και SO με το ίδιο χρονικό βήμα έχουν σχεδόν ίδιες τιμές .



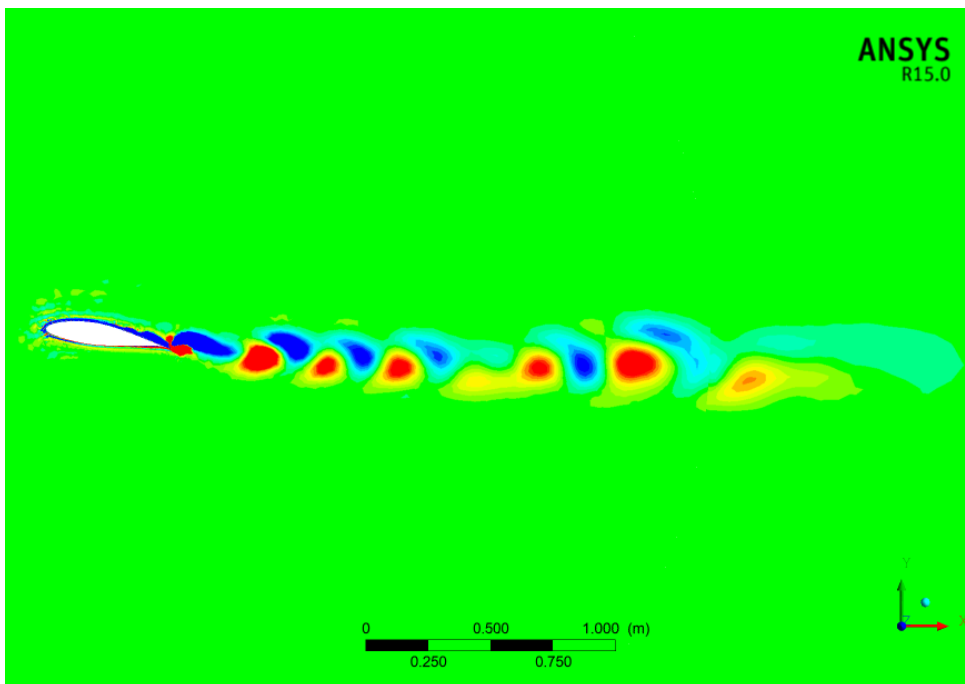
Σχήμα 4.13 .Χρονοσειρές του CD για τις τέσσερις περιπτώσεις : 1) R k-ε First Order 2) R k-ε Second Order 3) R k-ε First Order  $10^{-4}$  s 4) R k-ε Second Order  $10^{-4}$  s .  $\alpha = 9^\circ$  .



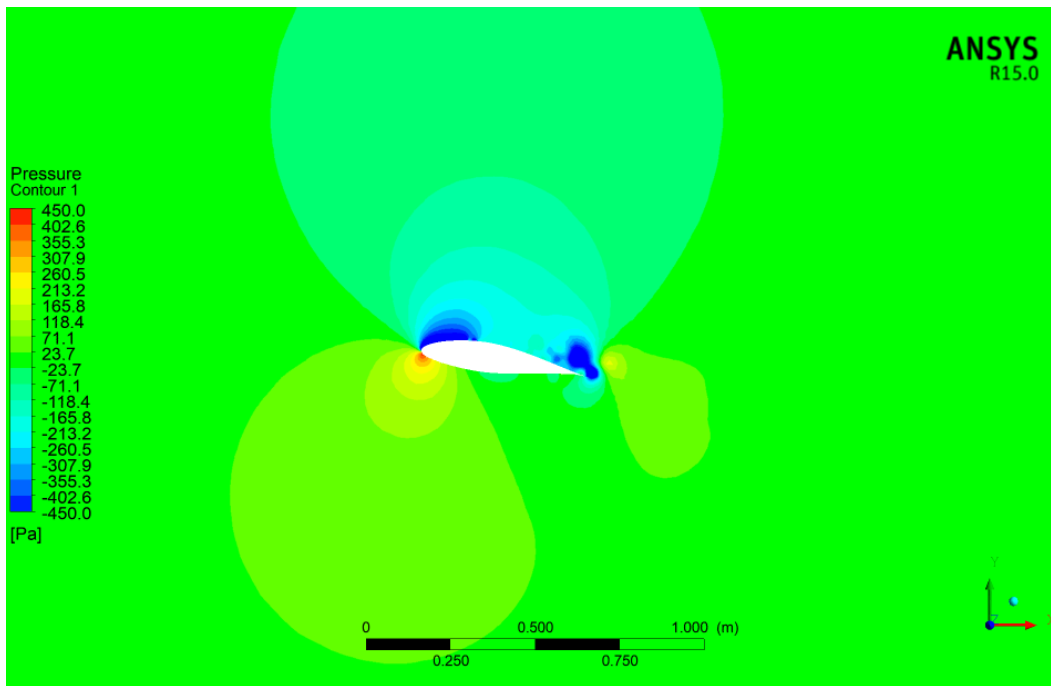
## Laminar



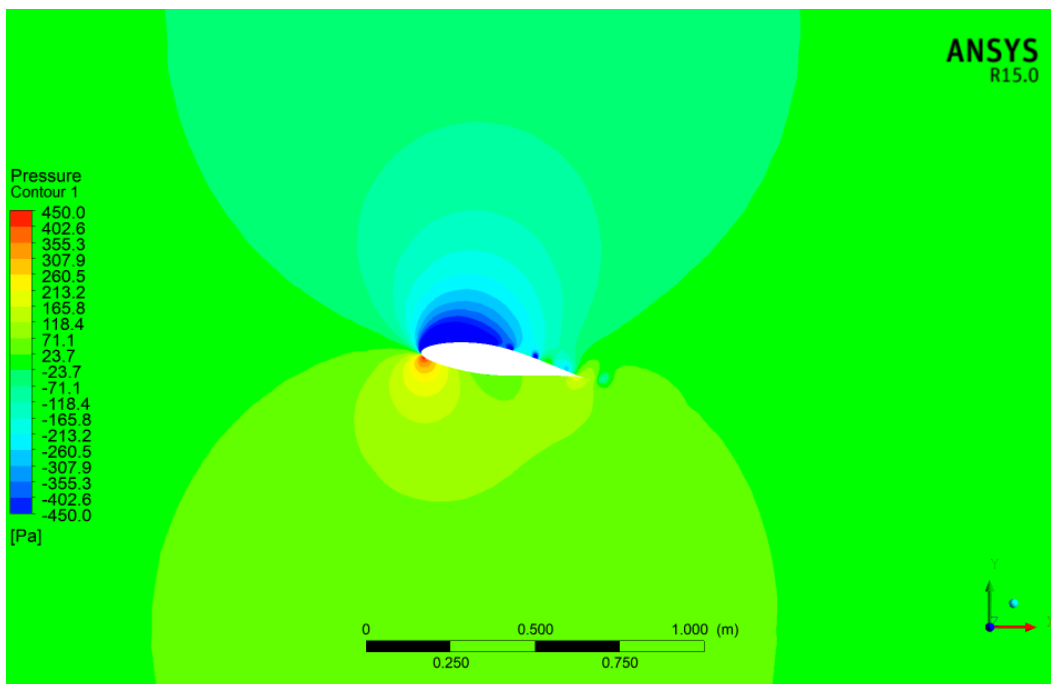
Σχήμα 4.14. Ισοϋψείς στροβιλότητας  $\alpha = 9^\circ$ . Laminar , First order . Διάρκεια προσομοίωσης 5s . Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



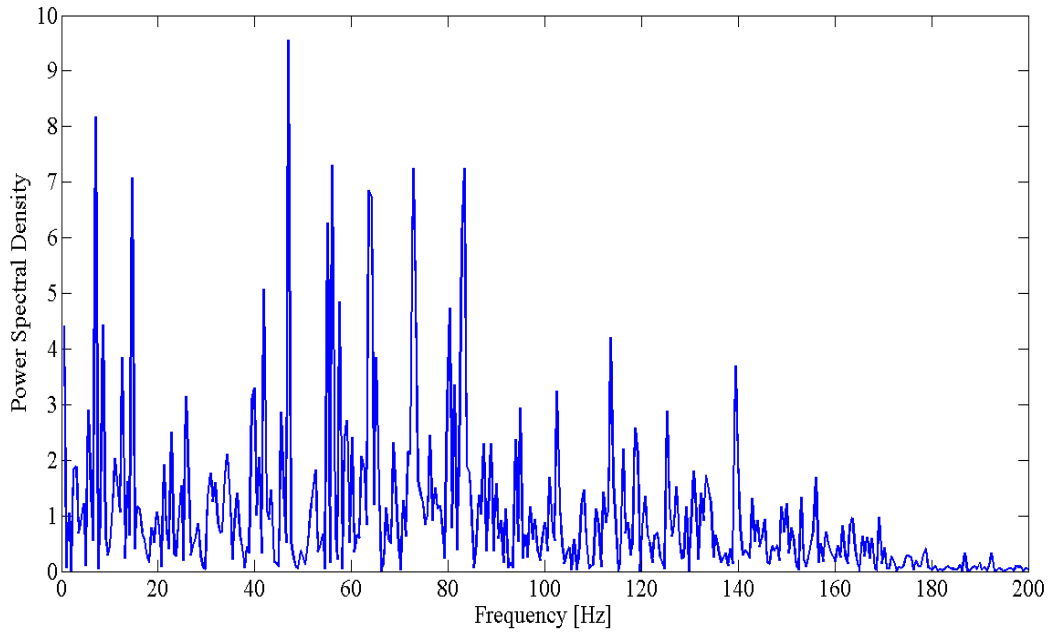
Σχήμα 4.15. Ισοϋψείς Στροβιλότητας .  $\alpha = 9^\circ$ . Laminar , Second order . Διάρκεια προσομοίωσης 5s . Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



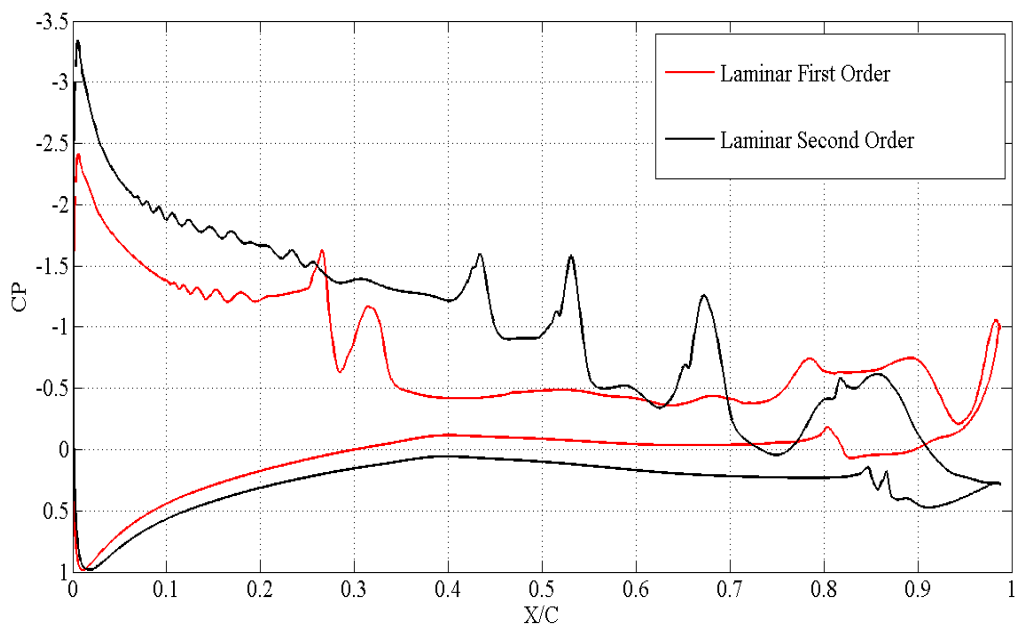
Σχήμα 4.16. Ισοϋψείς Πίεσης Laminar ,First Order .  $\alpha=9^\circ$ . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



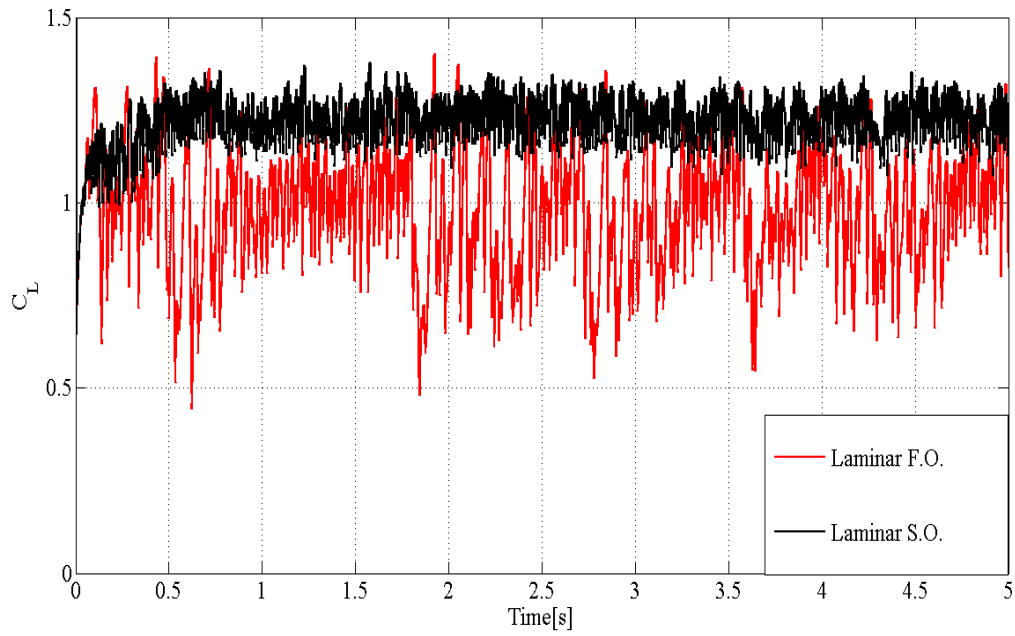
Σχήμα 4.17. Ισοϋψείς Πίεσης Laminar ,Second Order .  $\alpha=9^\circ$ . Διάρκεια προσομοίωσης 5s .Στιγμιότυπο απο το τελευταίο χρονικό βήμα .



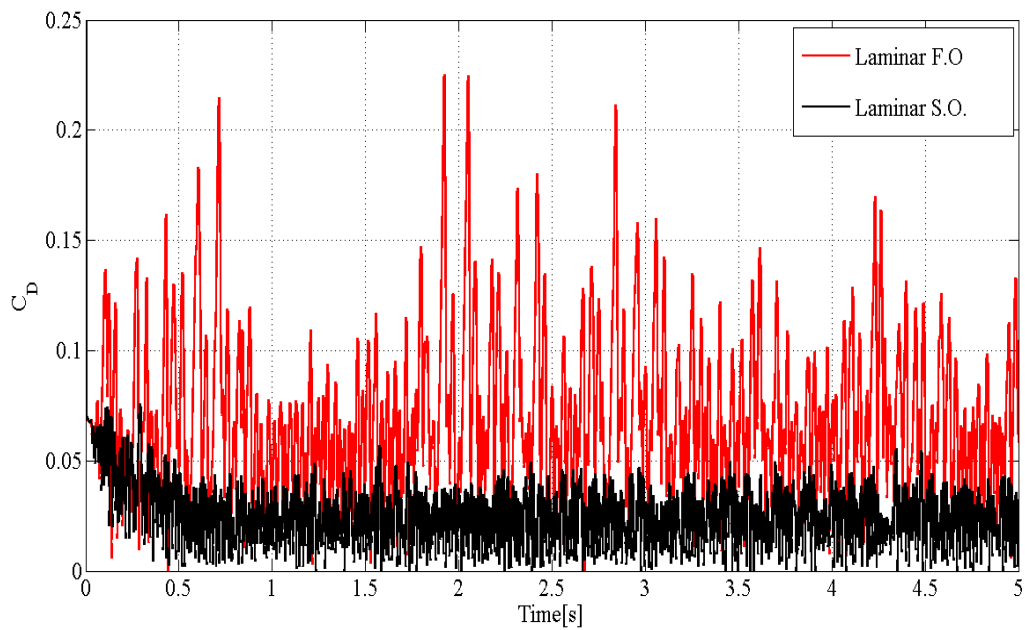
Σχήμα 4.18. Κατανομή της "ενέργειας" ενός σήματος που μετρά την στροβιλότητα σε σημείο πίσω από την αεροτομή που έχει σαν σκοπό την εκτίμηση του ρυθμού έκλυσης δινών από την αεροτομή .



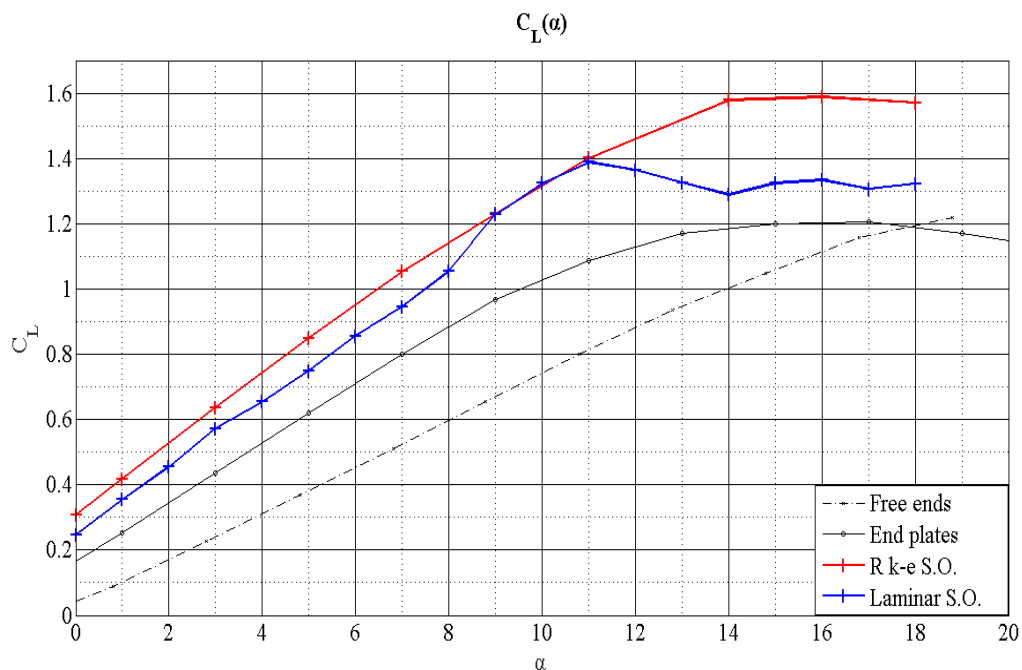
Σχήμα 4.19. Κατανομή Cp κατά μήκος της αεροτομής για την Laminar περίπτωση , First & Second Order .  $\alpha = 9^\circ$



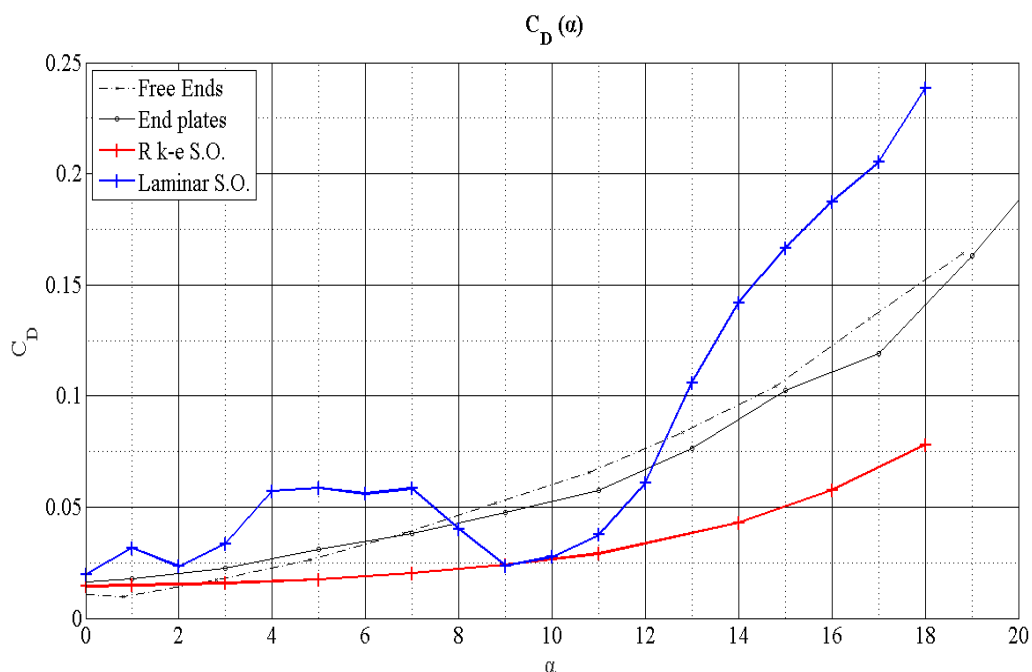
Σχήμα 4.20.Χρονοσειρά του CL για τη Laminar περίπτωση , First & Second Order  $\alpha=9^\circ$ .



Σχήμα 4.21.Χρονοσειρά του CD για τη Laminar περίπτωση , First & Second Order  $\alpha=9^\circ$ .



Σχήμα 4.22. Μέσες τιμές του  $C_L$  για τις γωνίες που εξετάστηκαν για τη Laminar (S.O.) περίπτωση και το μοντέλο R k-ε (S.O.) .Στο γράφημα φαίνονται και οι αντίστοιχες τιμές του πραγματικού πειράματος .Εύρος προσομοιώσεων 0-18°.



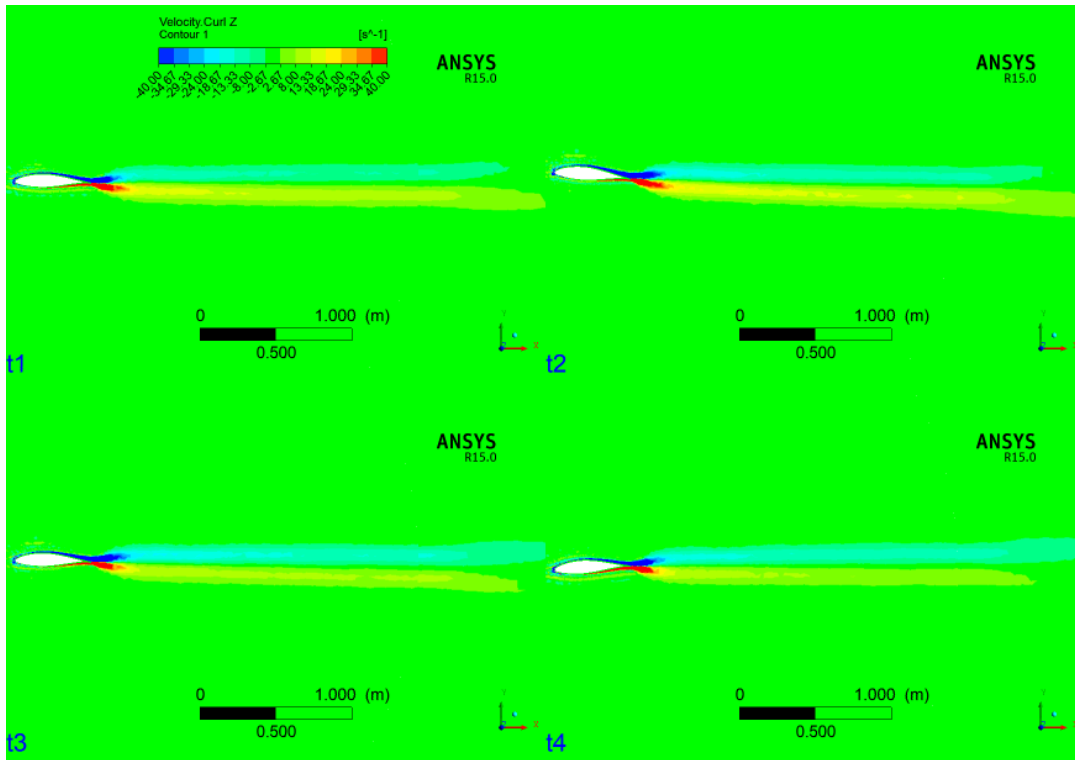
Σχήμα 4.23. Μέσες τιμές του  $C_D$  για τις γωνίες που εξετάστηκαν για τη Laminar (S.O.) περίπτωση και το μοντέλο R k-ε (S.O.) Στο γράφημα φαίνονται και οι αντίστοιχες τιμές του πραγματικού πειράματος Εύρος προσομοιώσεων 0-18°.



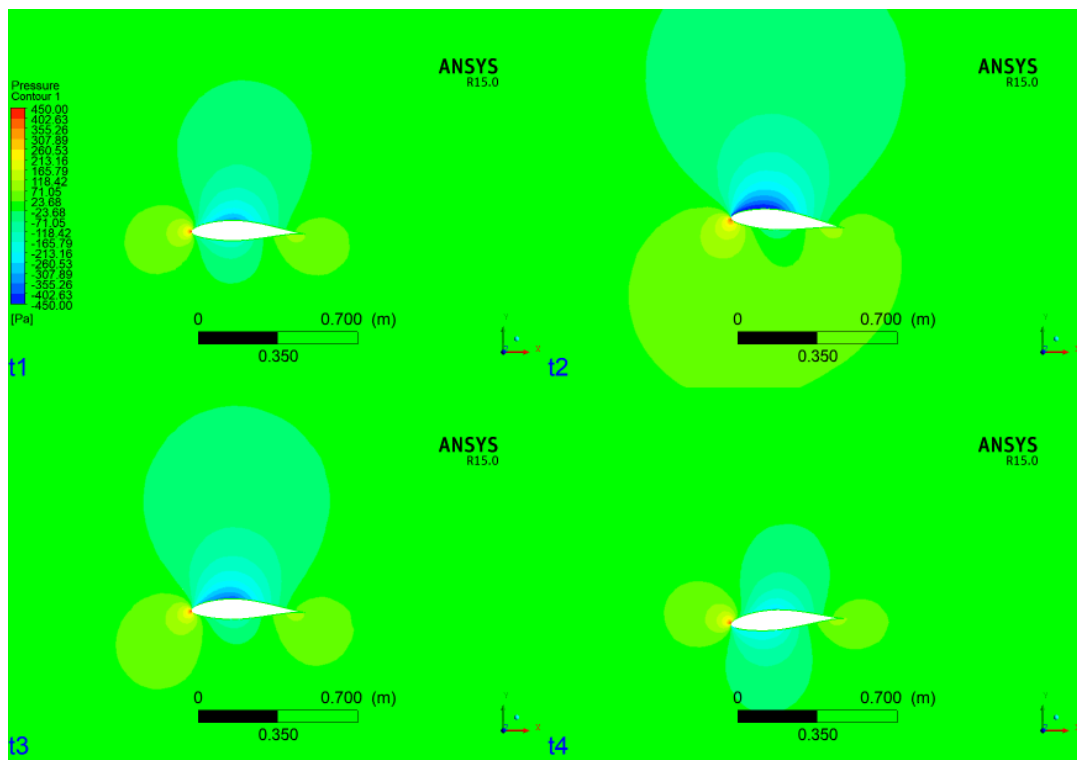
## Συνδυασμένη Ταλάντωση με $\Delta\Phi=0$

R k-ε

First Order

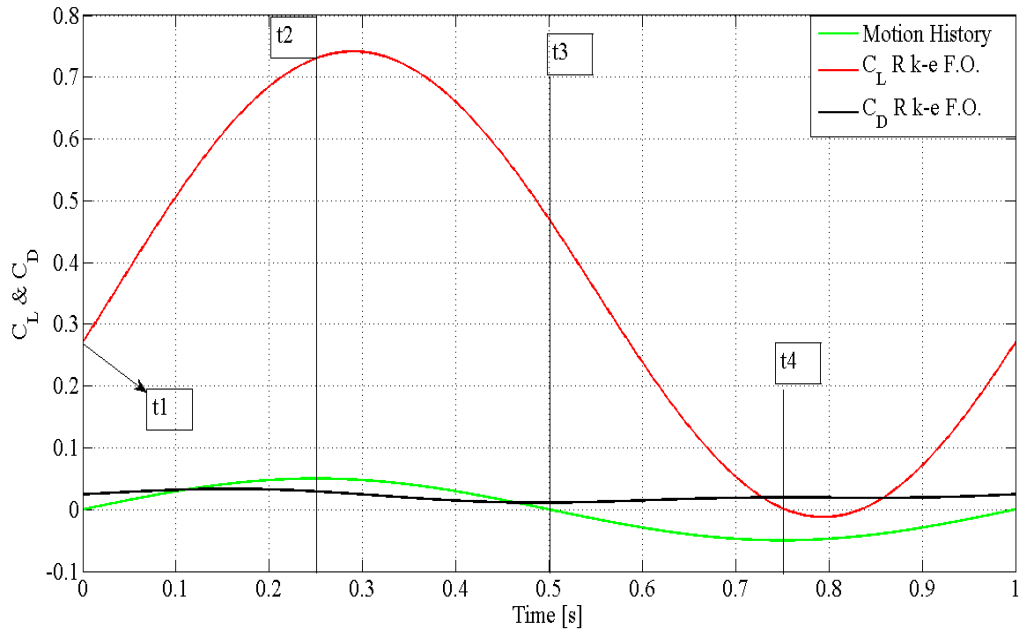


Σχήμα 4.24. Ισοϋψείς στροβιλότητας για την περίπτωση R k-ε , First Order. Στιγμιότυπα από τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$ ,  $t_2=T/4$ ,  $t_3=T/2$ ,  $t_4=3T/4$ . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης:  $4^\circ$ , Πλάτος γραμμικής: 0,05 m. Διάρκεια προσομοίωσης 9 s.

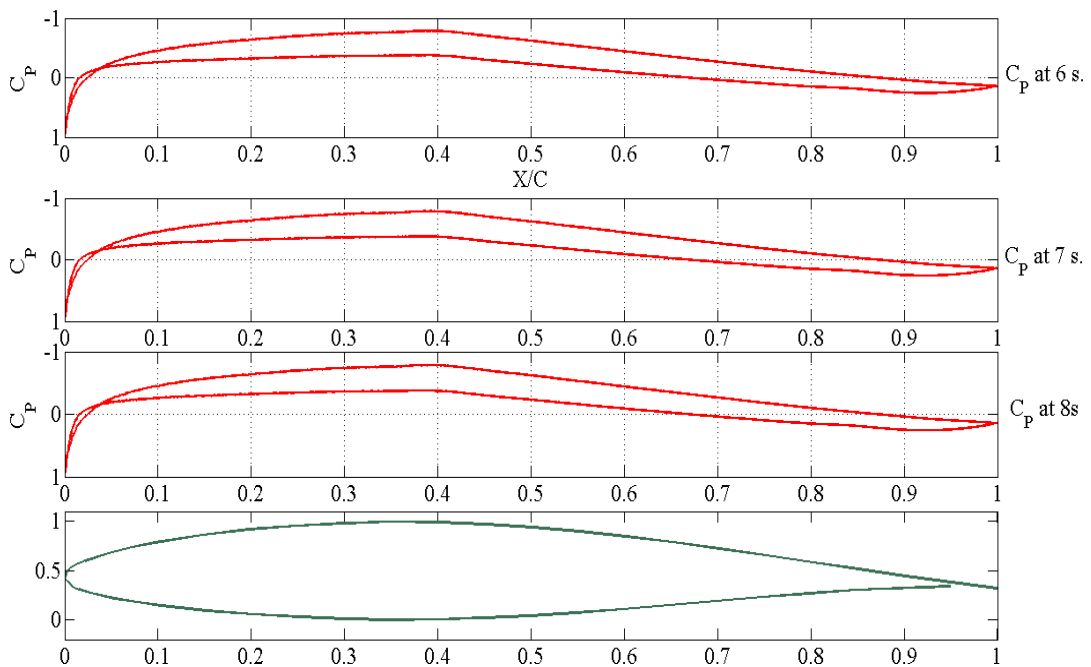


Σχήμα 4.25. Ισοϋψείς Πίεσης για την περίπτωση R k-ε , First Order . Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  , Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .



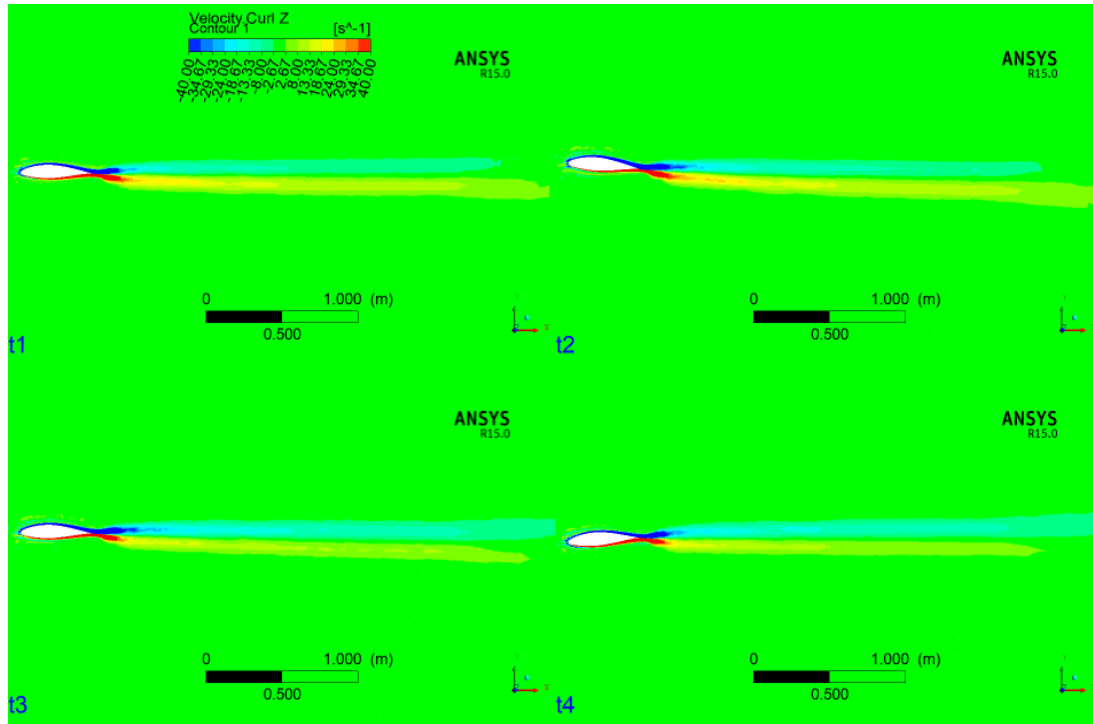


Εικόνα 4.26.Χρονοσειρές CL & CD για την περίπτωση R k-ε F.O. Οι χρονικές στιγμές που επισημαίνονται αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα των εικόνων.  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .

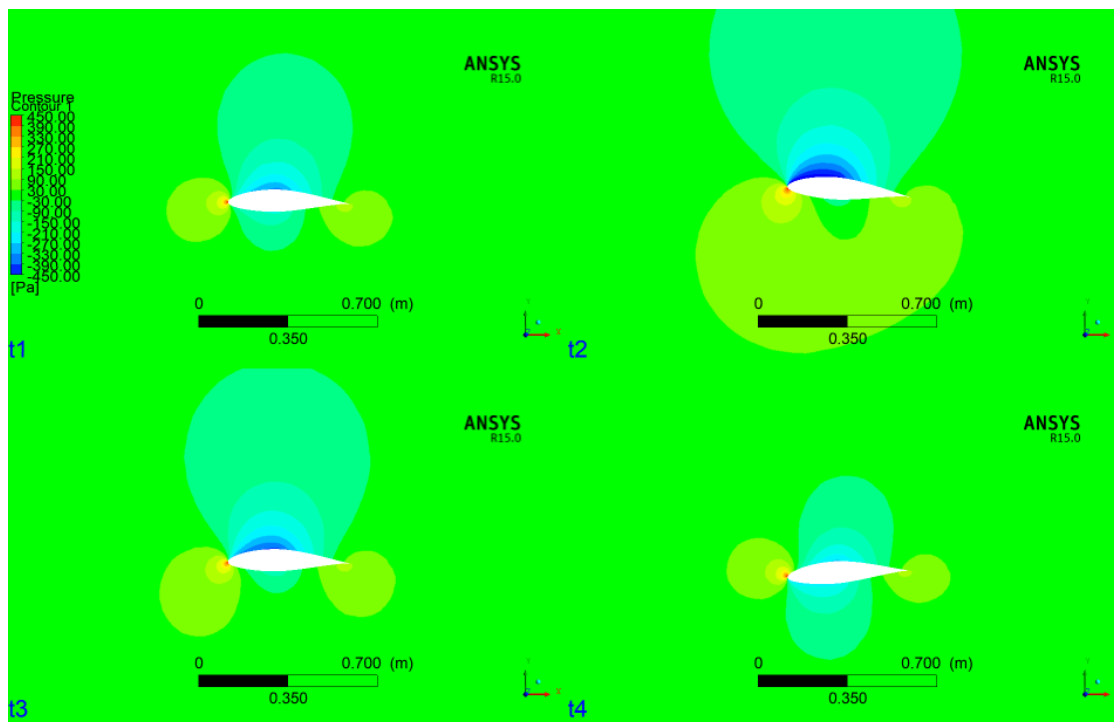


Σχήμα 4.27.Κατανομή του CP κατα μήκος της πτέρυγας για την  $t_1$  ( $T=0$ ) για τρεις διαφορετικούς κύκλους ταλάντωσης .R k-ε F.O

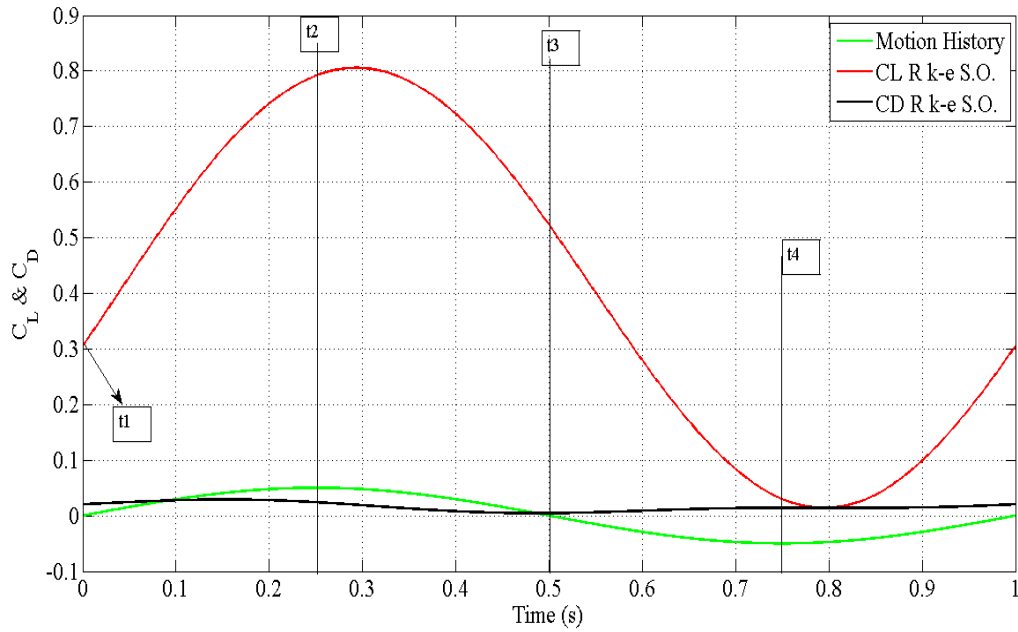
## Second Order



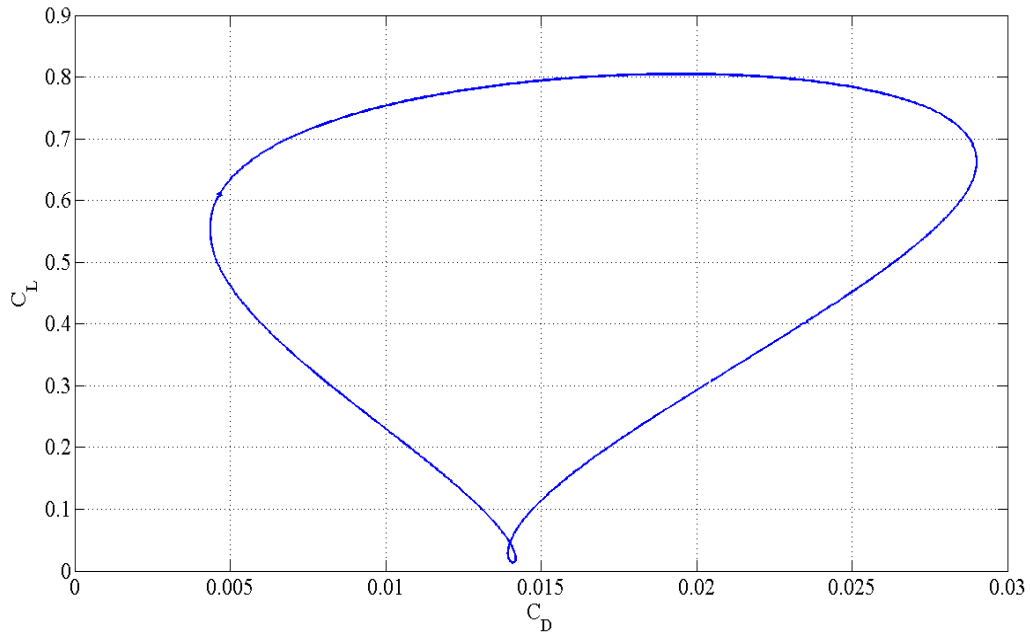
Σχήμα 4.28. Ισοϋψείς στροβιλότητας. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  , Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s . R k-ε , Second Order .



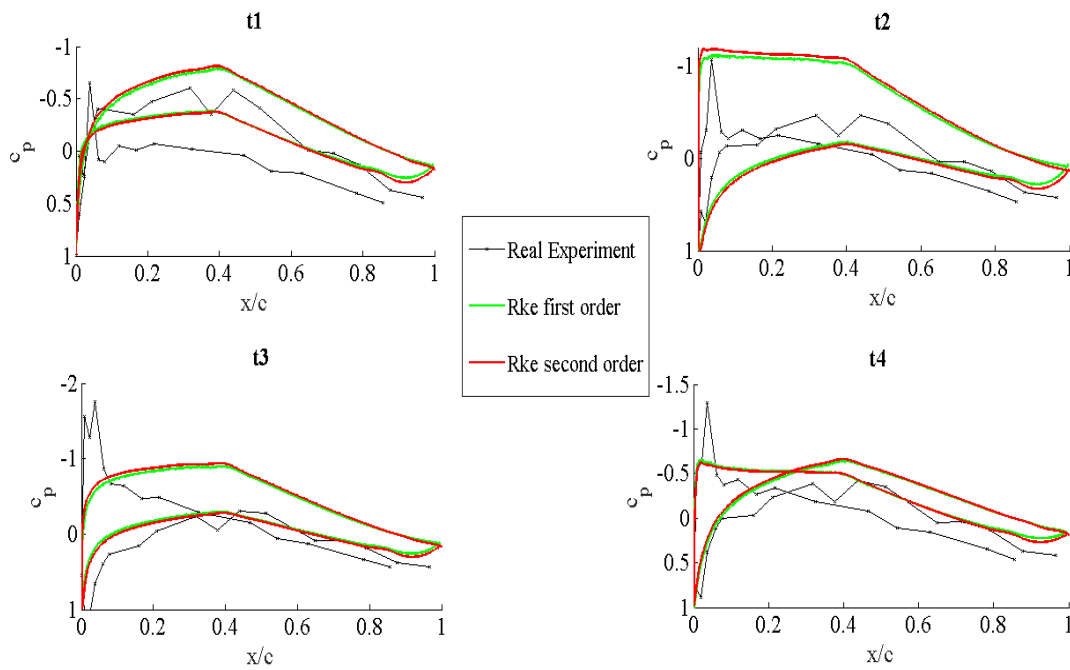
Σχήμα 4.29. Ισοϋψείς πίεσης γύρω απο την αεροτομή .Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης της προσομοίωσης . Οι χρονικές στιγμές που επισημαίνονται:  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  .Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s . R k-ε , Second Order.



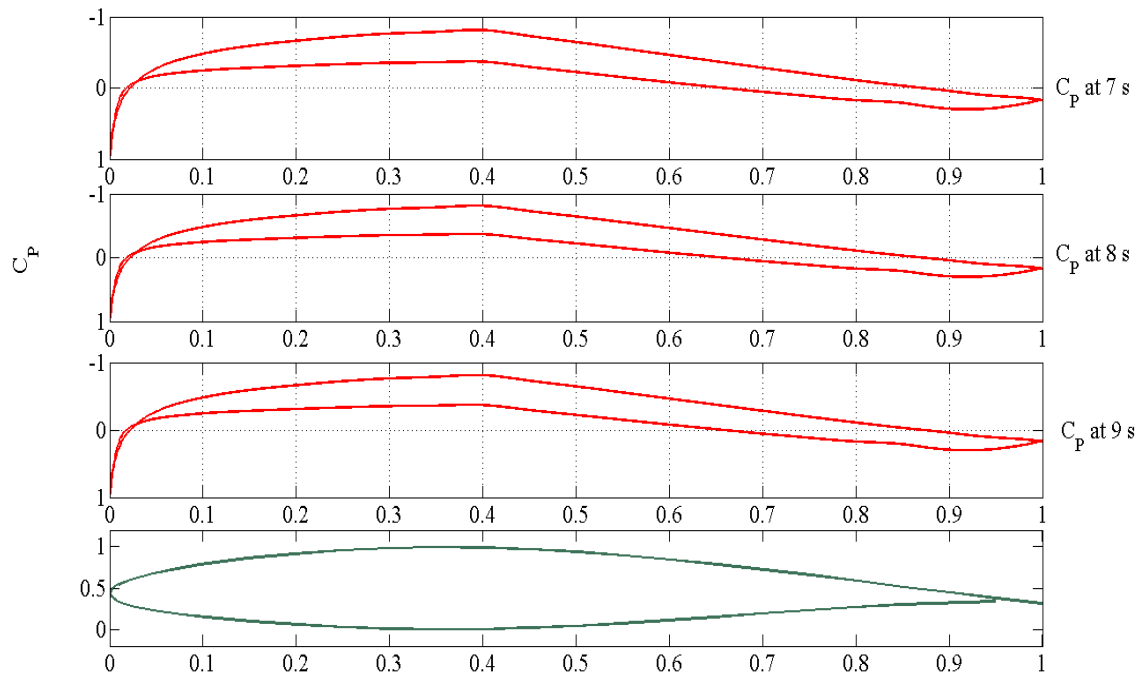
Σχήμα 4.30.Χρονοσειρές CL & CD για την περίπτωση R k-ε S.O. Οι χρονικές στιγμές που επισημαίνονται αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα των εικόνων.  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  . Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης της προσομοίωσης. Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .



Σχήμα 4.31.  $C_L$  -  $C_D$  για την περίπτωση R k-ε S.O. Φορά διαγράμματος δεξιόστροφη .Οι τιμές αντιστοιχούν στον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης .



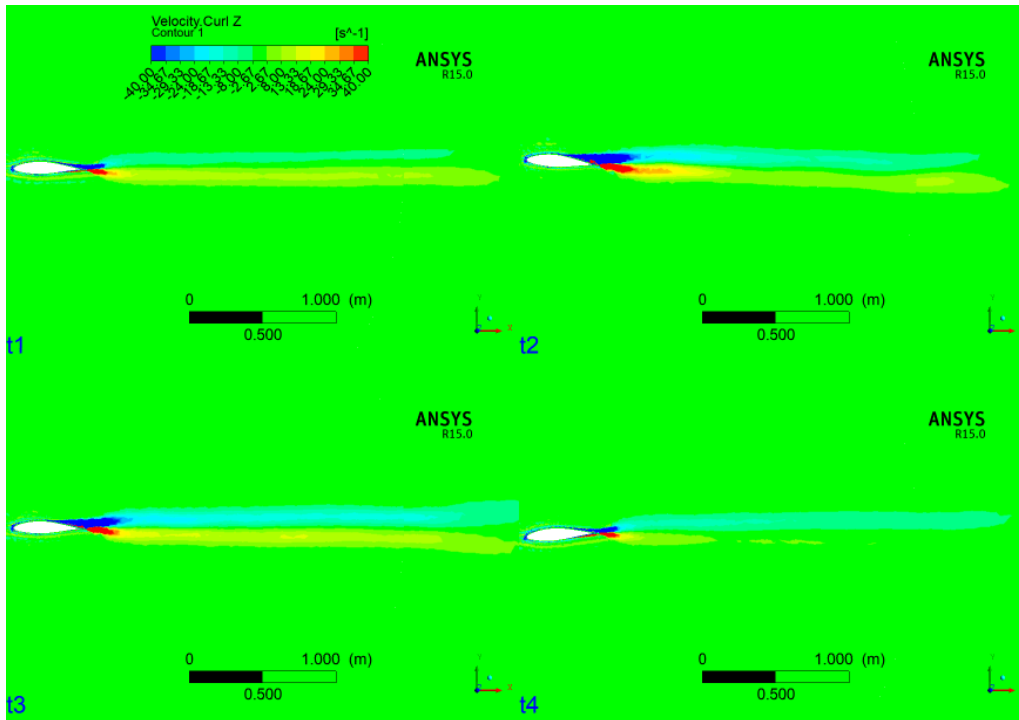
Σχήμα 4.32. Κατανομή του  $C_p$  κατά μήκος της πτέρυγας για τις περιπτώσεις R k-ε F.O & S.O .



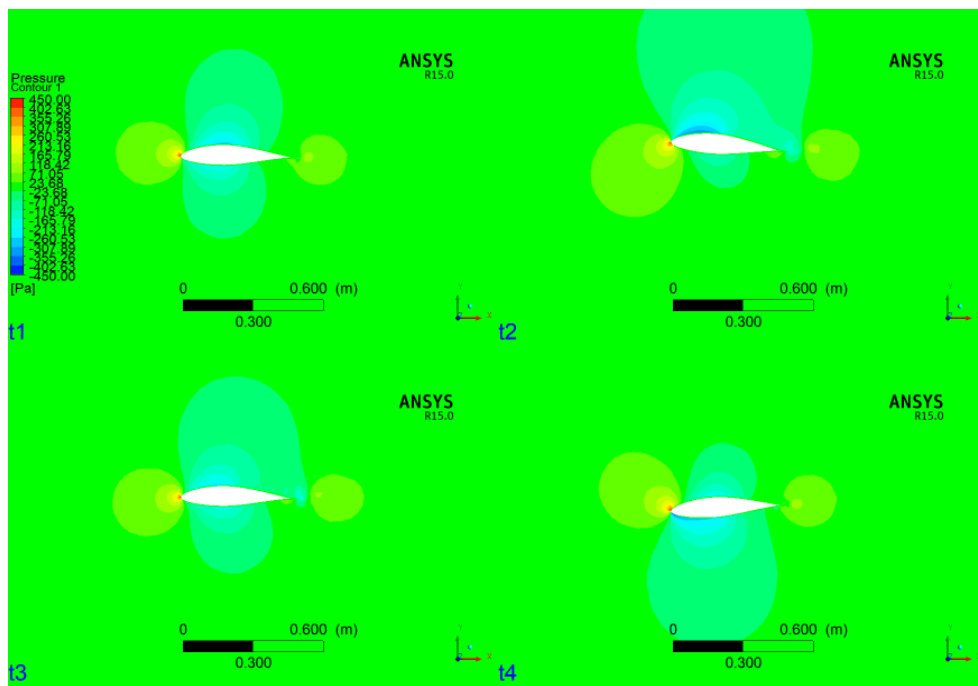
Σχήμα 4.33. Κατανομή του  $C_p$  κατά μήκος της πτέρυγας για την  $t_1$  ( $T=0$ ) για τρεις διαφορετικούς κύκλους ταλάντωσης .R k-ε S.O

## Laminar

### First order

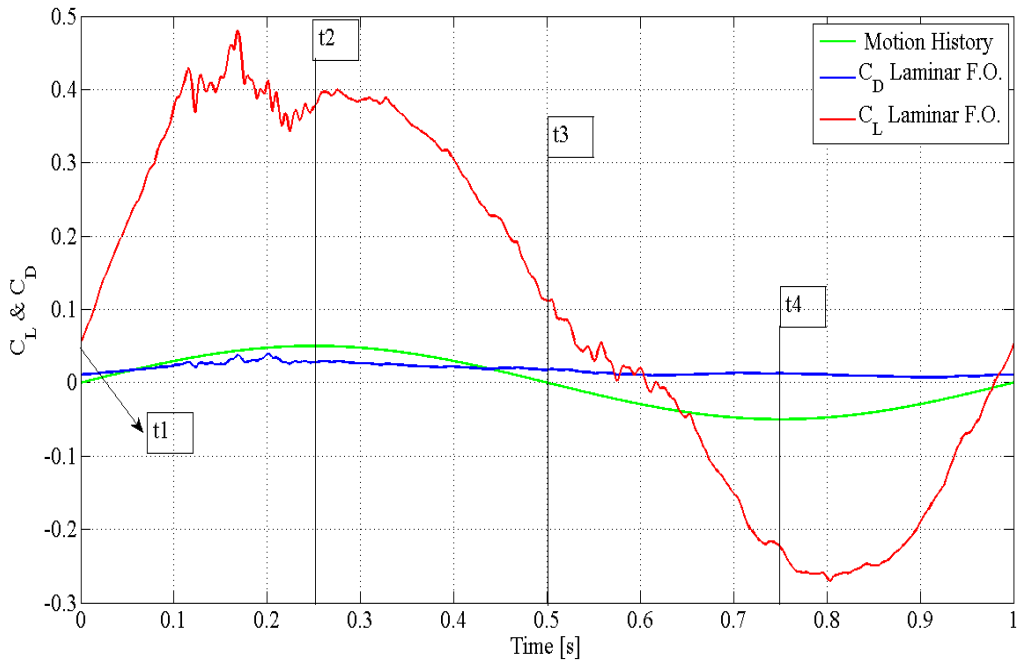


Σχήμα 4.34. Ισοϋψείς Στροβιλότητας για την Laminar F.O περίπτωση .Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  .Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 8 s .

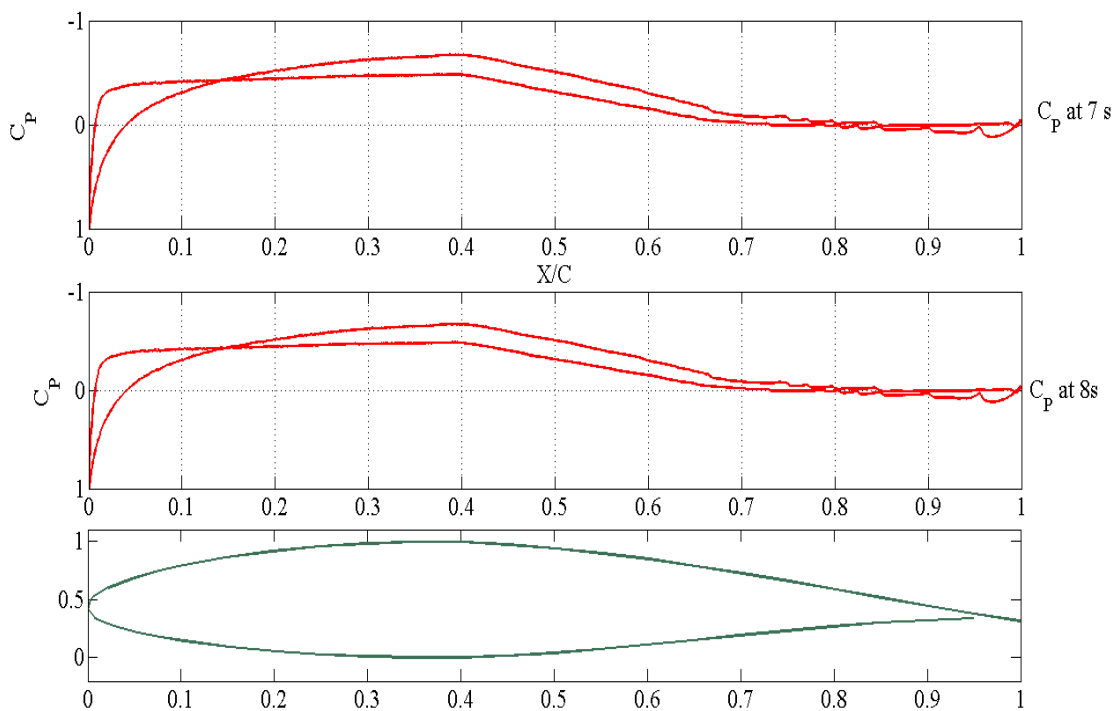


Σχήμα 4.35. Ισοϋψείς Πίεσης για την περίπτωση Laminar F.O. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  , Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 8 s .



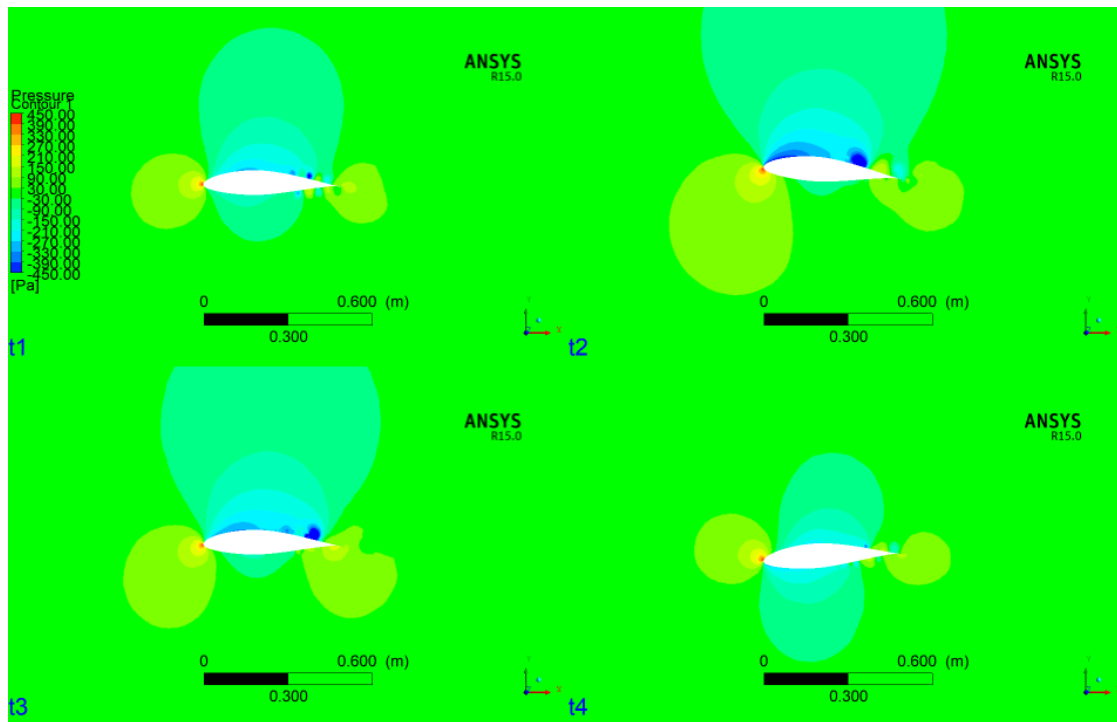


Σχήμα 4.36.Χρονοσειρές CL & CD και κίνησης για την περίπτωση Laminar F.O.H γραφική παράσταση των συντελεστών είναι αποτέλεσμα μέσου όρου για τους δυο τελευταίους κύκλους .  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  .Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 8 s .

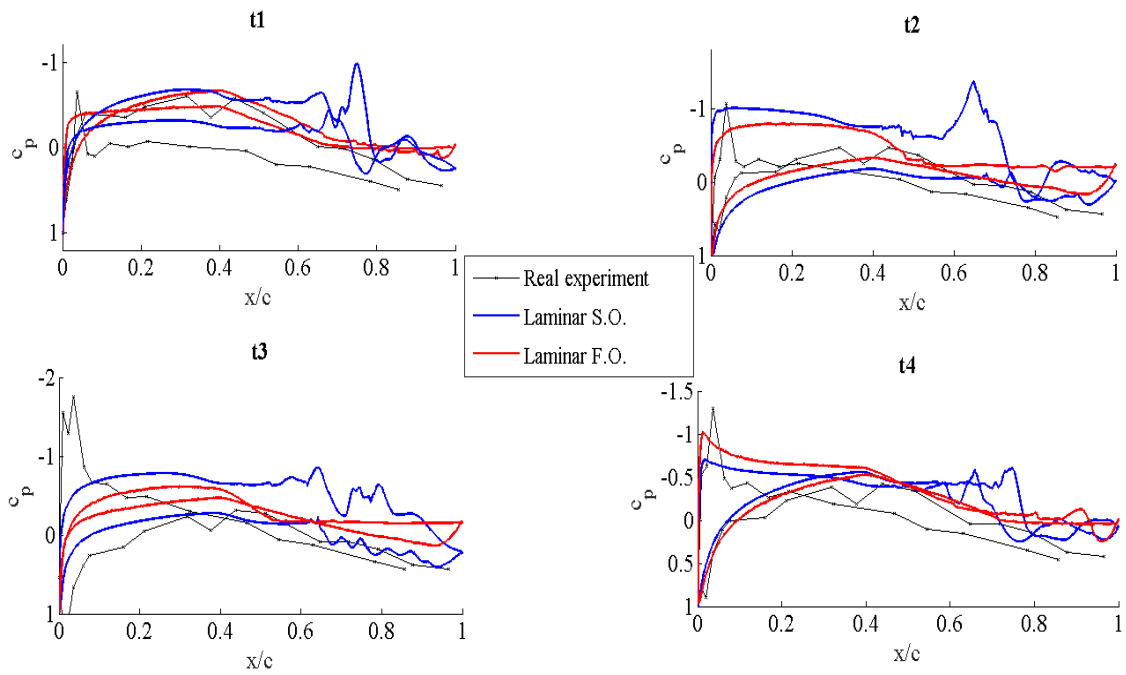


Σχήμα 4.37.Κατανομή του CP κατα μήκος της πτέρυγας για την  $t_1$  ( $T=0$ ) για δυο διαφορετικούς κύκλους ταλάντωσης για την περίπτωση Laminar F.O

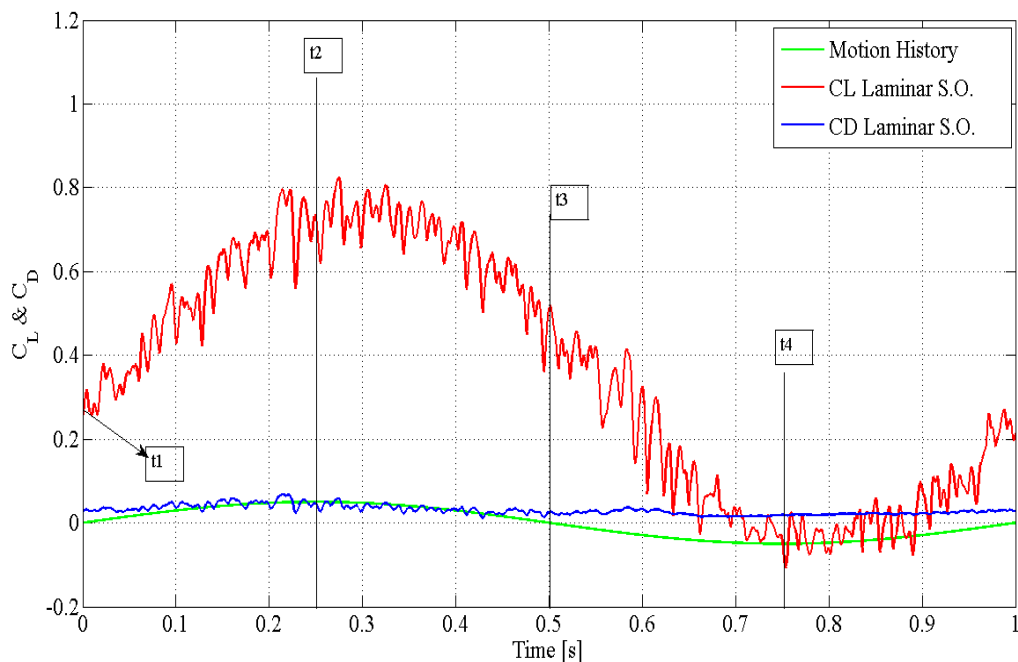




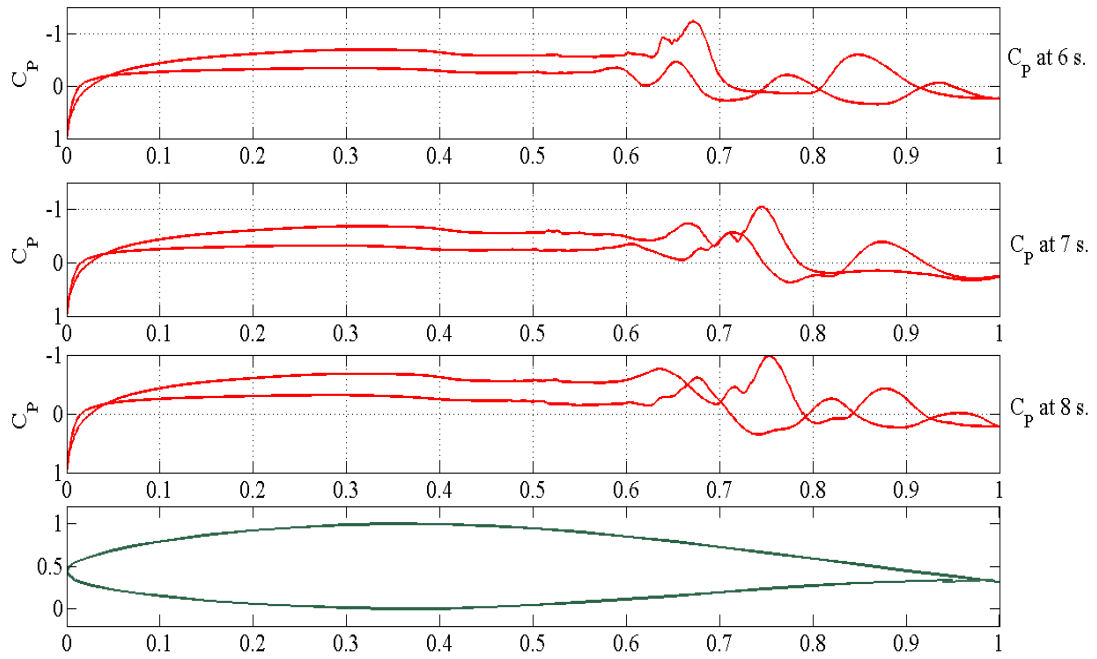
Σχήμα 4.39. Ισοϋψείς Πίεσης για την περίπτωση Laminar S.O. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  , Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .



Σχήμα 4.40. Σύγκριση συντελεστών  $C_p$  κατα μήκος της αεροτομής ανάμεσα σε πείραμα, F.O. & S.O. για τη Laminar περίπτωση. Οι γραφικές παραστάσεις προέκυψαν από τον μέσο όρο των τελευταίων τριών κύκλων για την περίπτωση S.O. & των δυο τελευταίων για την F.O.

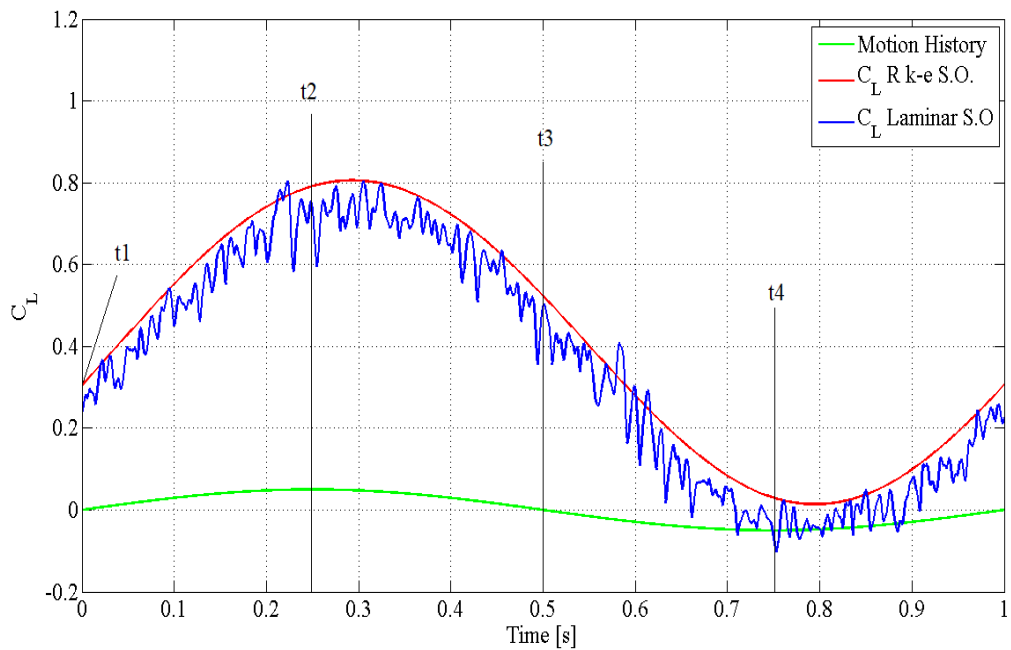


Σχήμα 4.41. Χρονοσειρές  $C_L$  &  $C_D$  για τη Laminar περίπτωση με S.O. Οι γραφικές παραστάσεις προέκυψαν από τον μέσο όρο των τελευταίων τριών κύκλων.

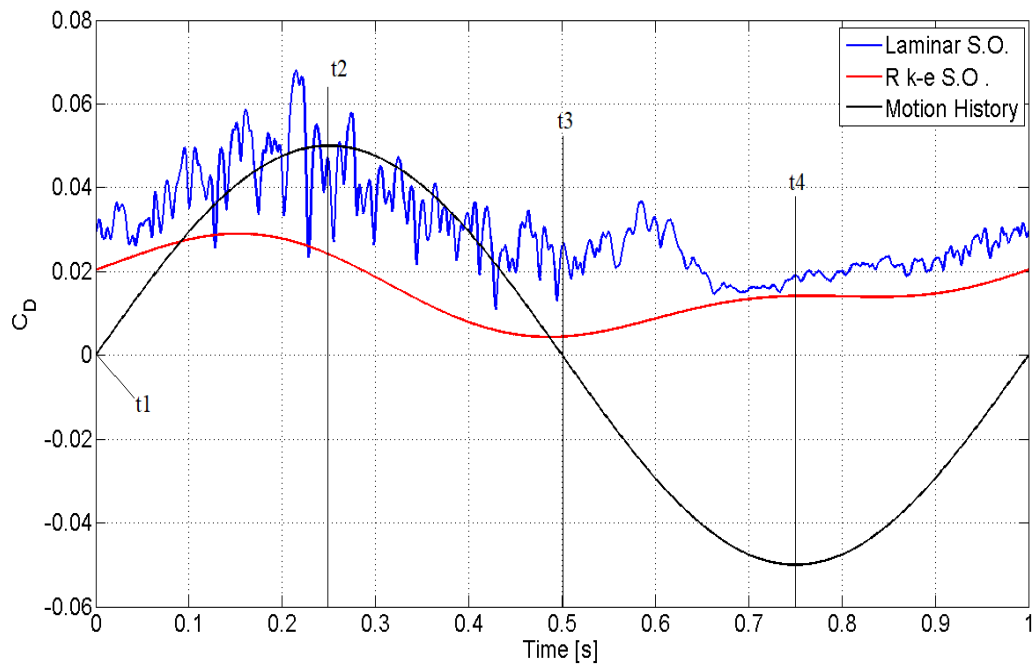


Σχήμα 4.42. Κατανομή του  $C_p$  κατά μήκος της πτέρυγας για την  $t_1$  ( $T=0$ ) για τρεις διαφορετικούς κύκλους ταλάντωσης για την περίπτωση Laminar S.O

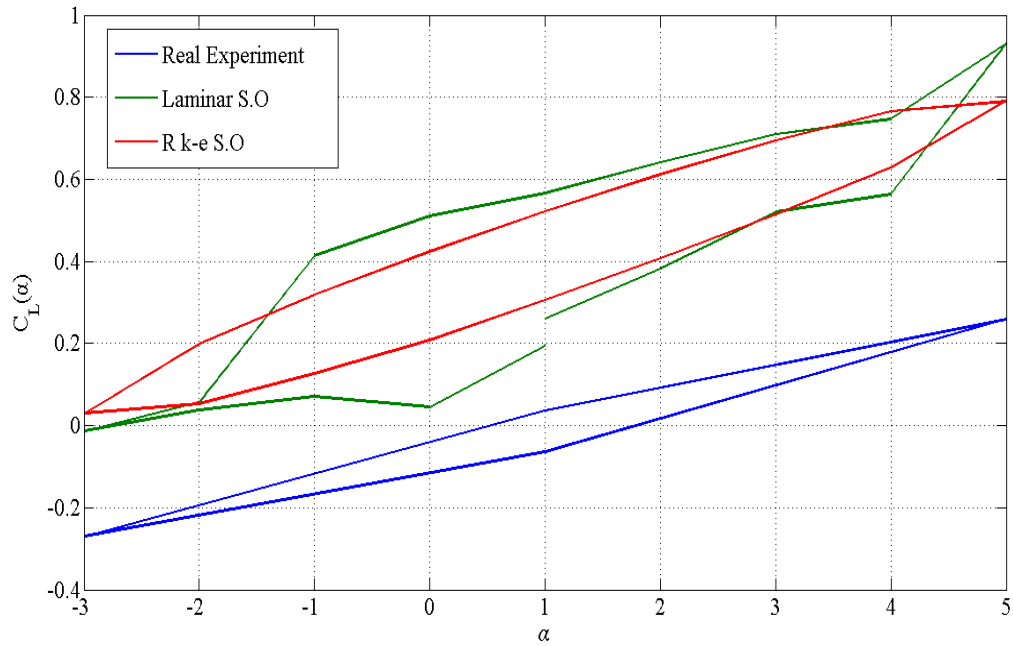
Σύγκριση Αποτελεσμάτων Για Τις Περιπτώσεις Laminar S.O - R k-ε S.O , $\Delta\Phi = 0$  .



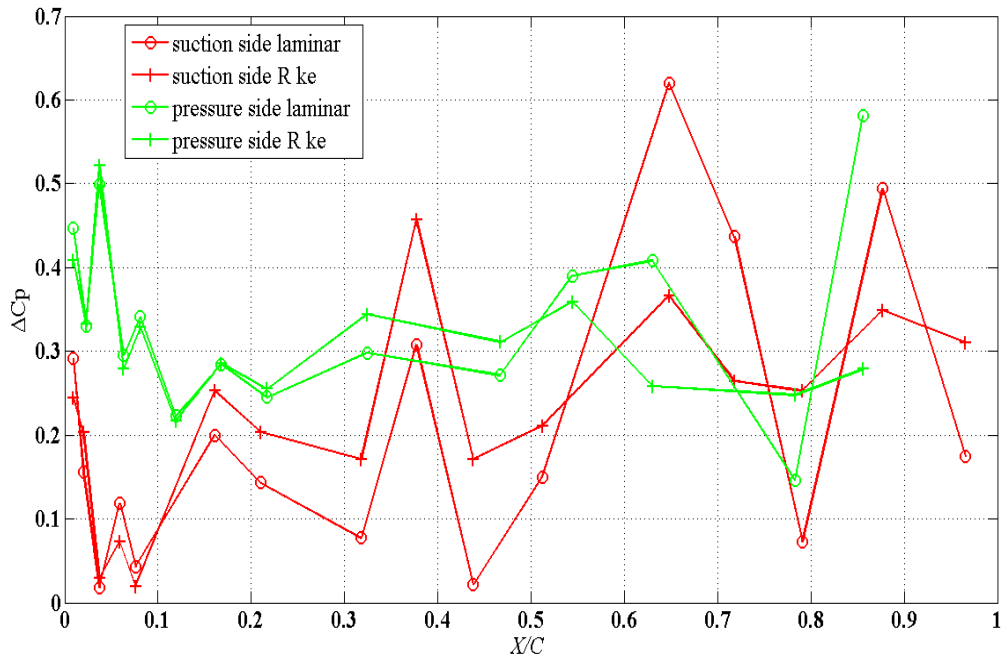
Σχήμα 4.43. Σύγκριση του  $C_L$  για τα δυο διαφορετικά μοντέλα R k-ε & Laminar S.O .



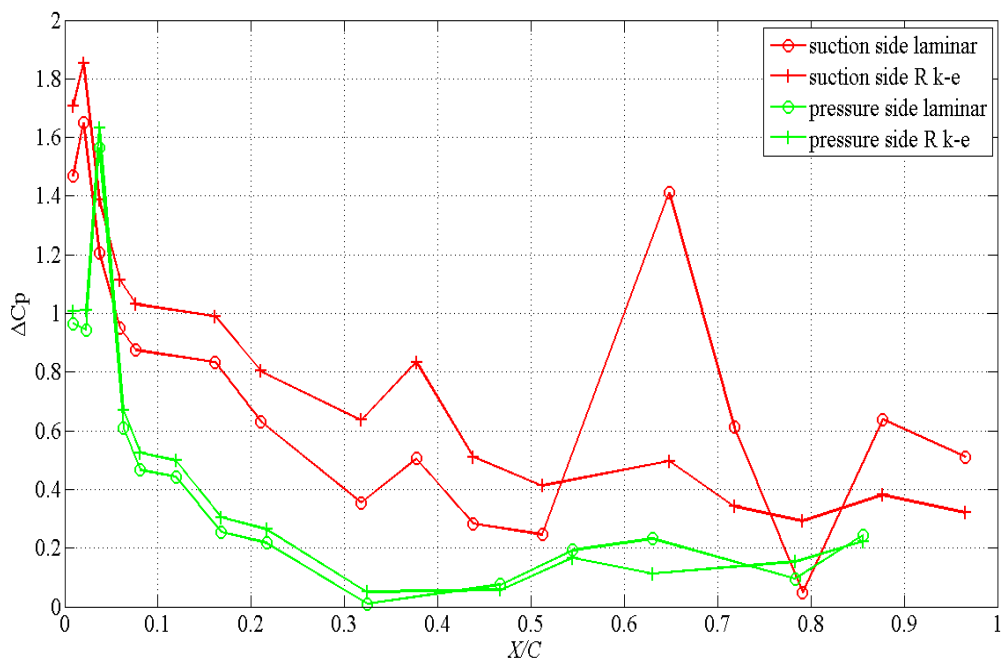
Σχήμα 4.44. Σύγκριση του  $C_D$  για τα δυο διαφορετικά μοντέλα R k-ε & Laminar S.O .



Σχήμα 4.45. Διακριτές τιμές του CL για κάθε γωνία (ακέραιες τιμές) κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης. Σύγκριση των δυο περιπτώσεων με το πραγματικό πείραμα. Είναι εμφανές ότι η γραφική παράσταση Laminar δεν κλείνει διότι την  $t=0$  και την  $t=T$  η τιμές διαφέρουν αρκετά από κύκλο σε κύκλο. Η φορά ανάγνωσης του σχήματος είναι αριστερόστροφη.

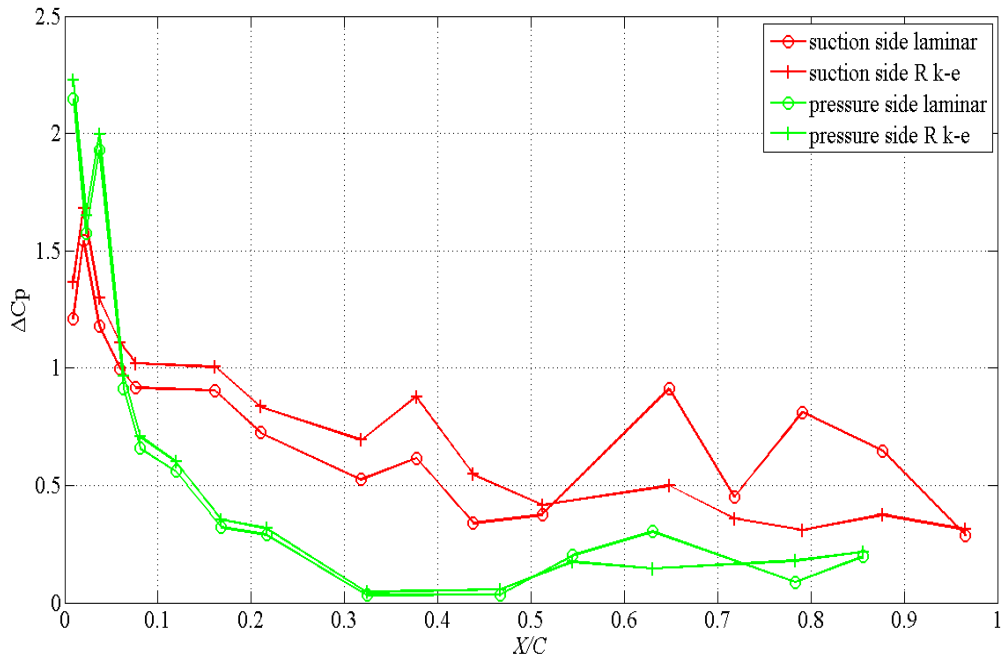


Σχήμα 4.46.Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_1 = 0$  .Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha=+1^\circ)$

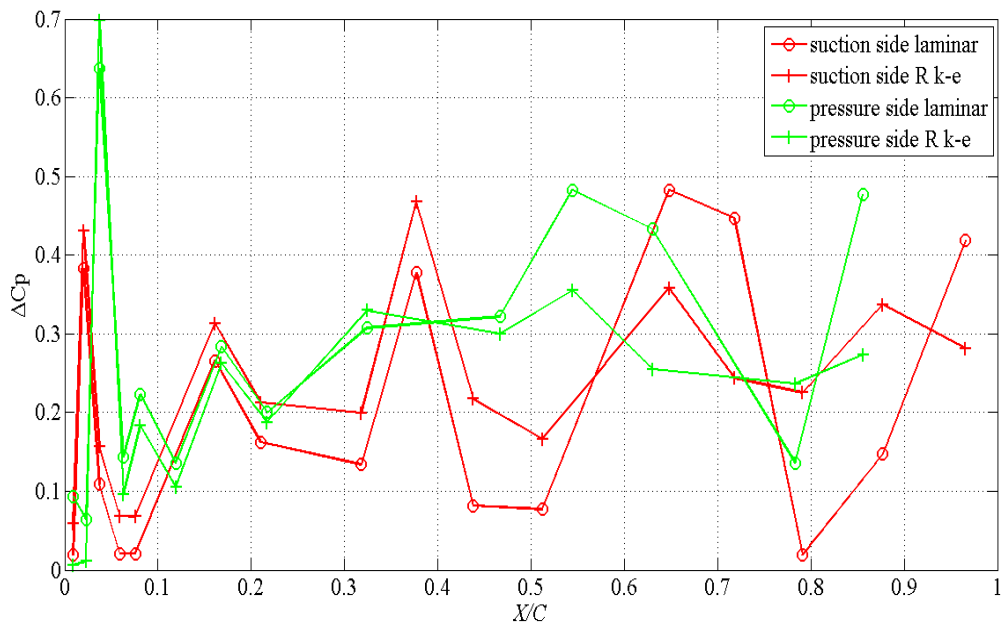


Σχήμα 4.47.Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_2 = T/4$  .Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha=+5^\circ)$

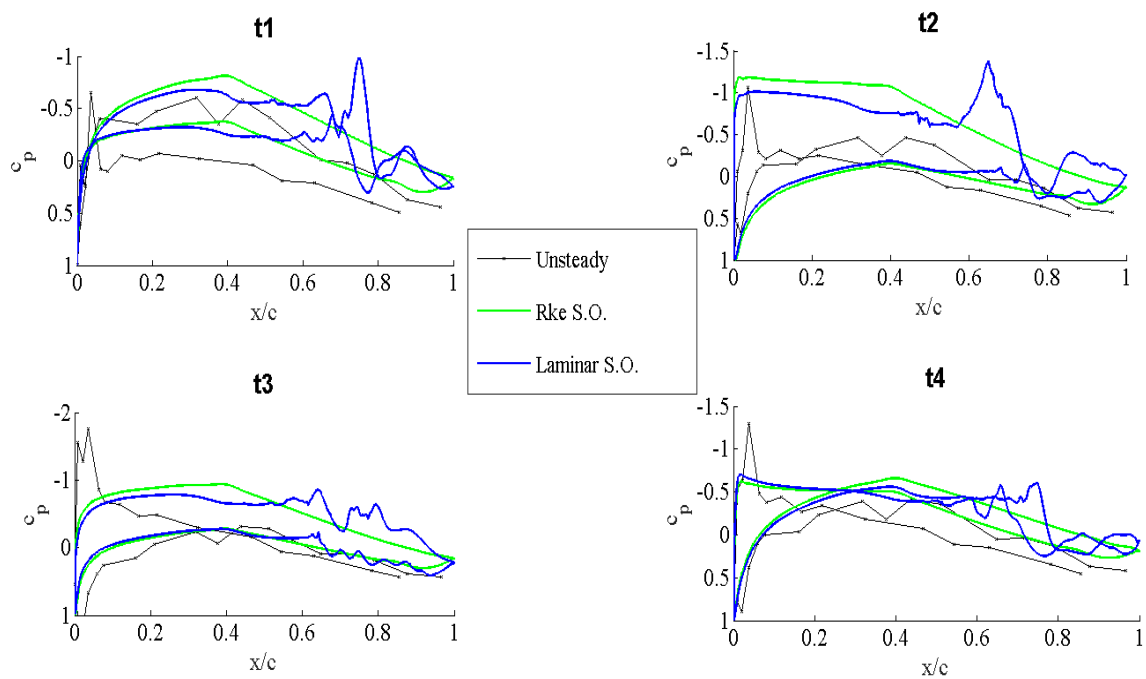




Σχήμα 4.48. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_3 = T/2$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha = +1^\circ)$



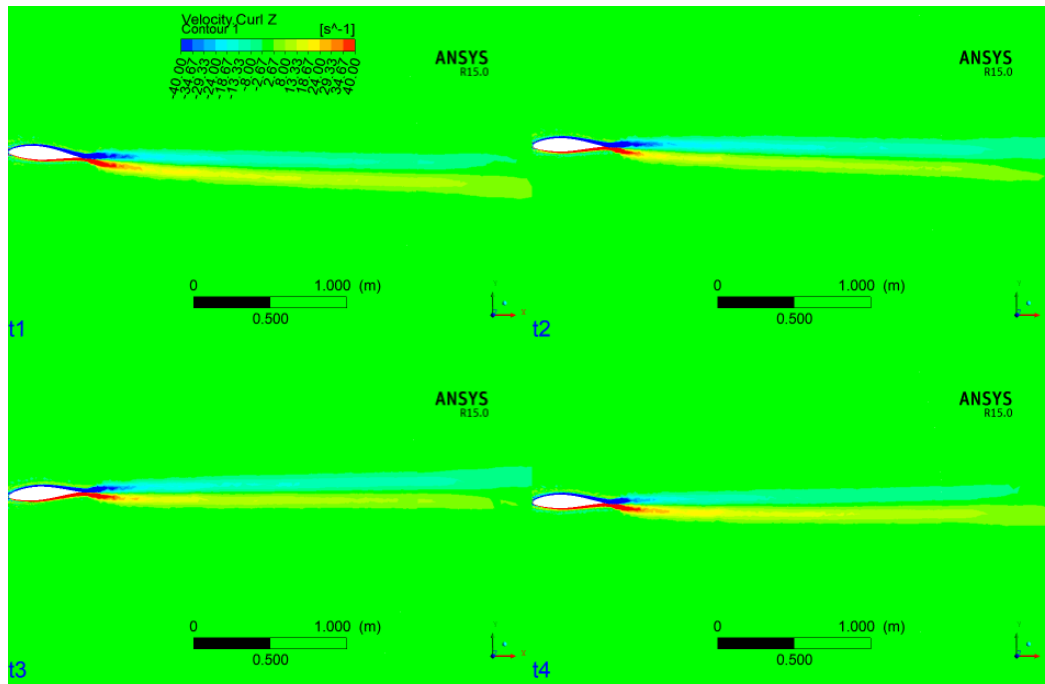
Σχήμα 4.49. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_4 = 3T/4$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha = -3^\circ)$



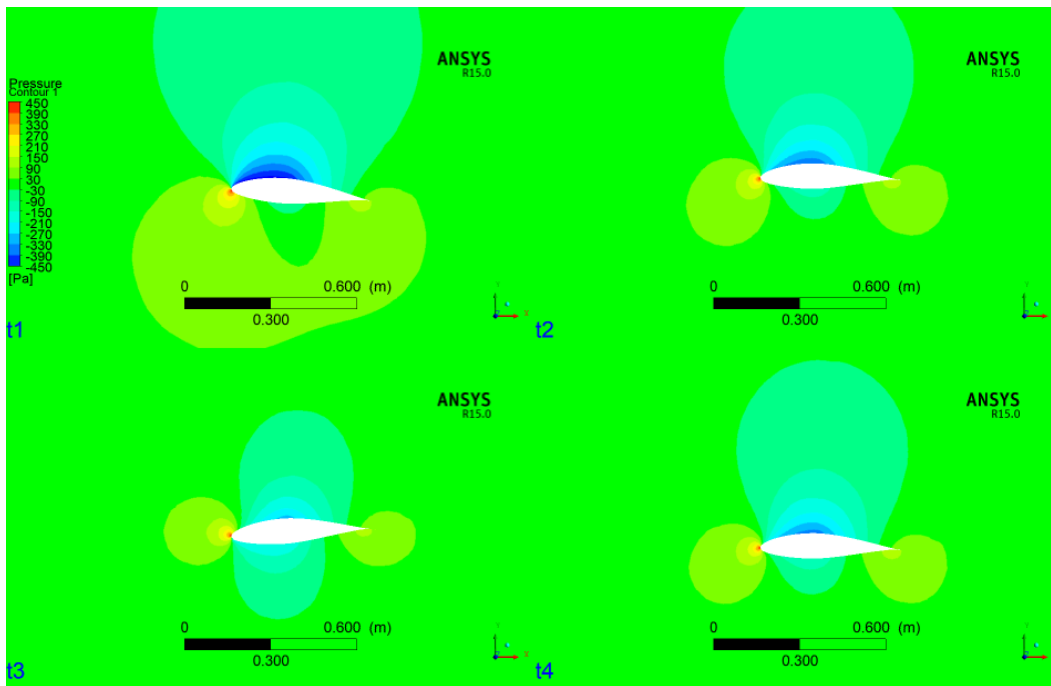
Σχήμα 4.50. Σύγκριση  $C_p$  για τη Laminar & R k-ε , Second Order και του πραγματικού πειράματος για τέσσερις στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου .Για την Laminar περίπτωση η τιμές του  $C_p$  λήφθηκαν απο τον μέσο όρο για τους τρεις τελευταίους κύκλους .

Συνδυασμένη με  $\Delta\Phi = \pi/2$

R k-ε

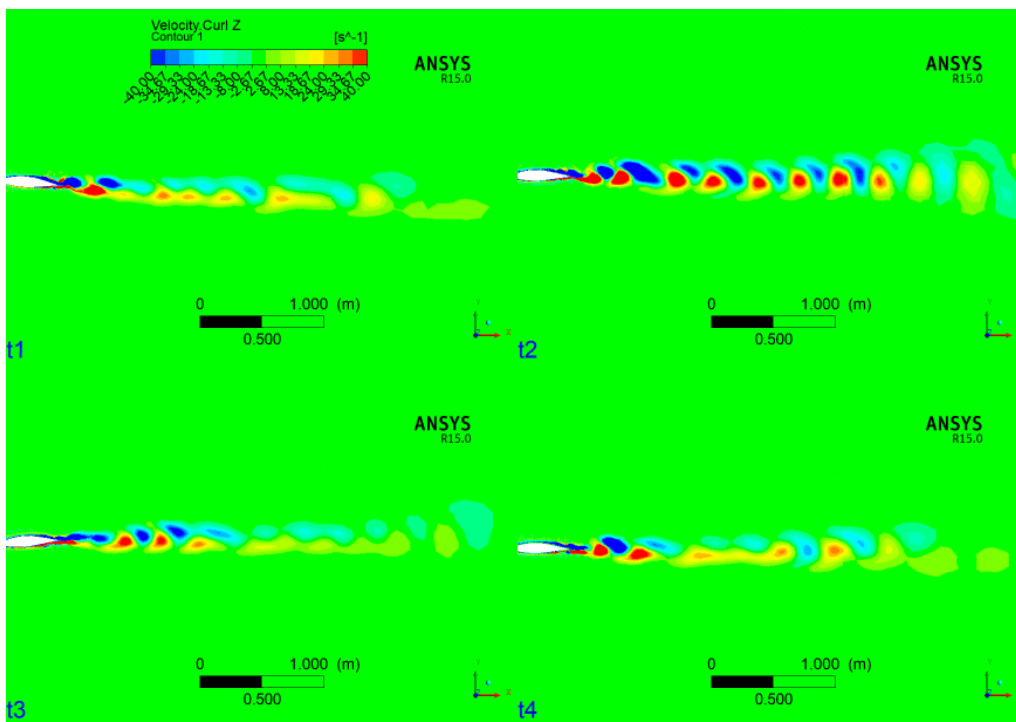


Σχήμα 4.51. Ισοϋψείς στροβιλότητας για την περίπτωση R k-ε S.O. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης .  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  , Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s.  $\Delta\Phi=\pi/2$ .

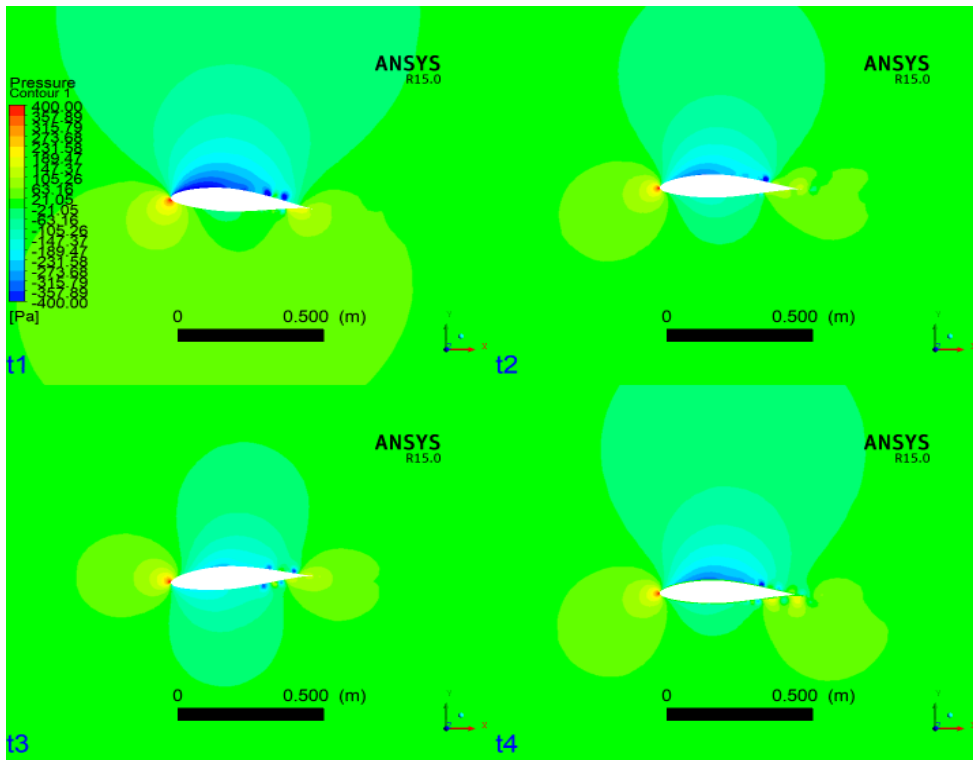


Σχήμα 4.52. Ισοϋψείς Πίεσης για την περίπτωση R k-ε S.O. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  .Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .  $\Delta\Phi=\pi/2$ .

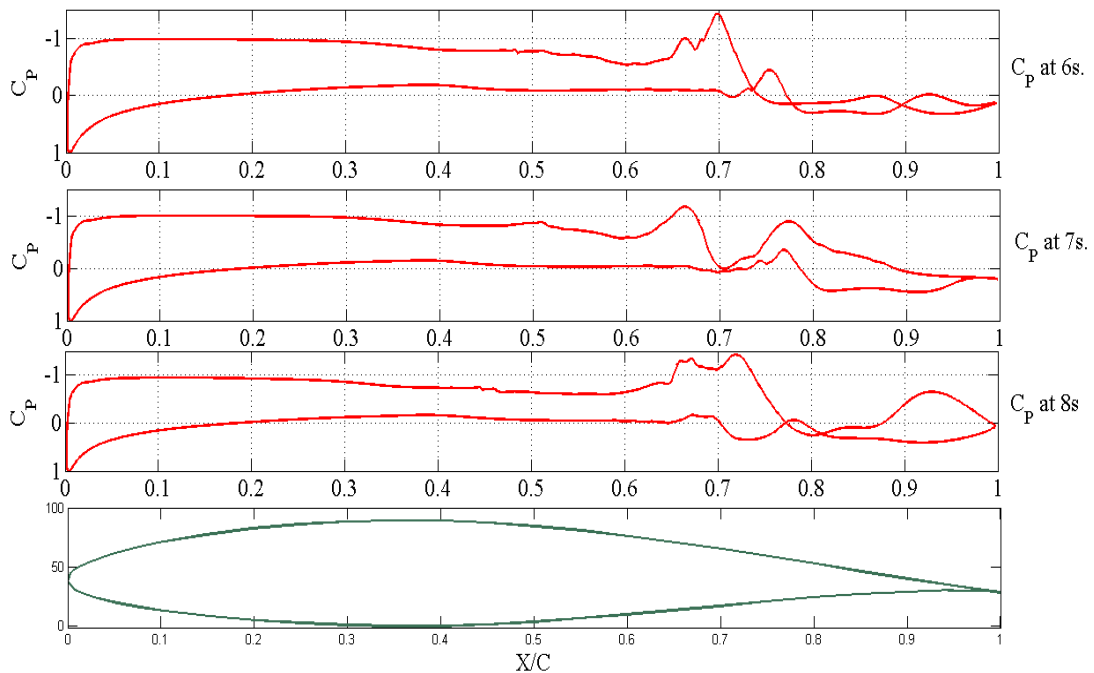
### Laminar



Σχήμα 4.53.Ισοϋψείς στροβιλότητας. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης .  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  .Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .  $\Delta\Phi=\pi/2$ .

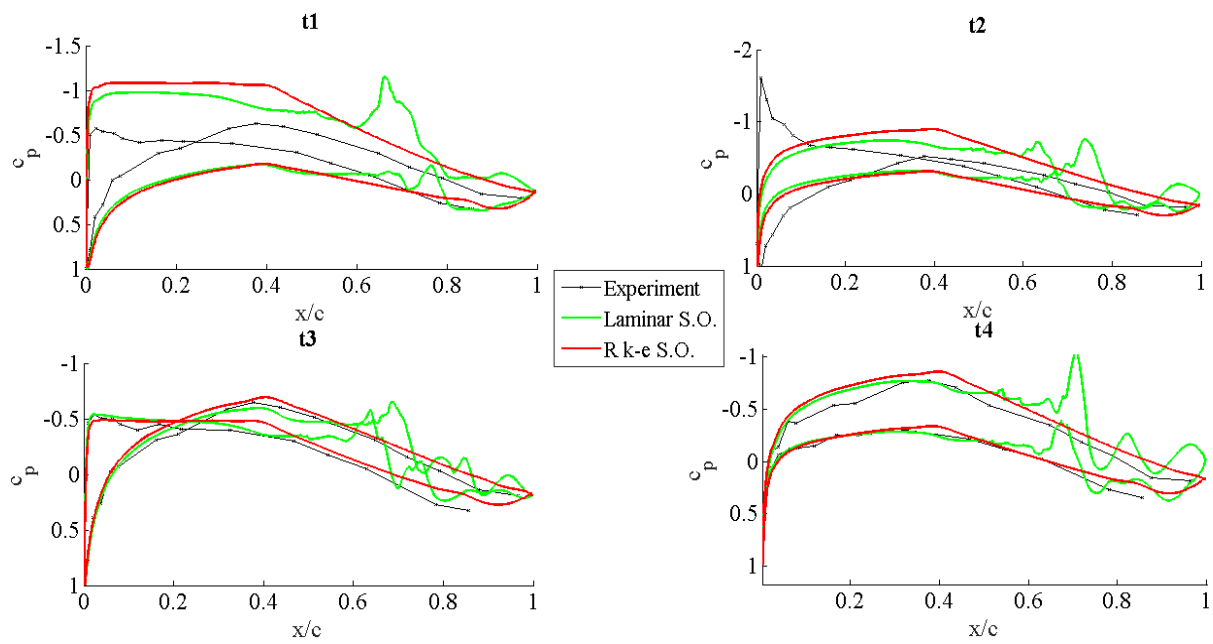


Σχήμα 4.54. Ισοϋνείς Πίεσης για την περίπτωση Laminar S.O . Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  , $t_2=T/4$  , $t_3=T/2$  , $t_4=3T/4$  .Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης : $4^\circ$  ,Πλάτος γραμμικής: 0,05 m . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s . $\Delta\Phi=\pi/2$ .

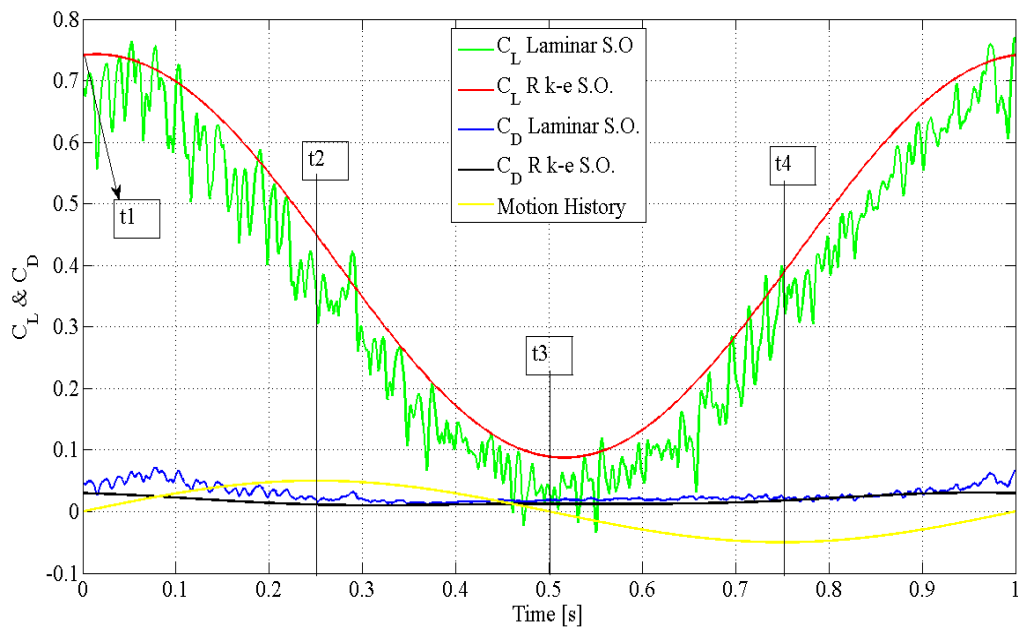


Σχήμα 4.55.Κατανομή του  $C_P$  κατα μήκος της πτέρυγας για την  $t_1$  ( $T=0$ ) για τρεις διαφορετικούς κύκλους ταλάντωσης για την περίπτωση Laminar S.O , $\Delta\Phi=\pi/2$  .

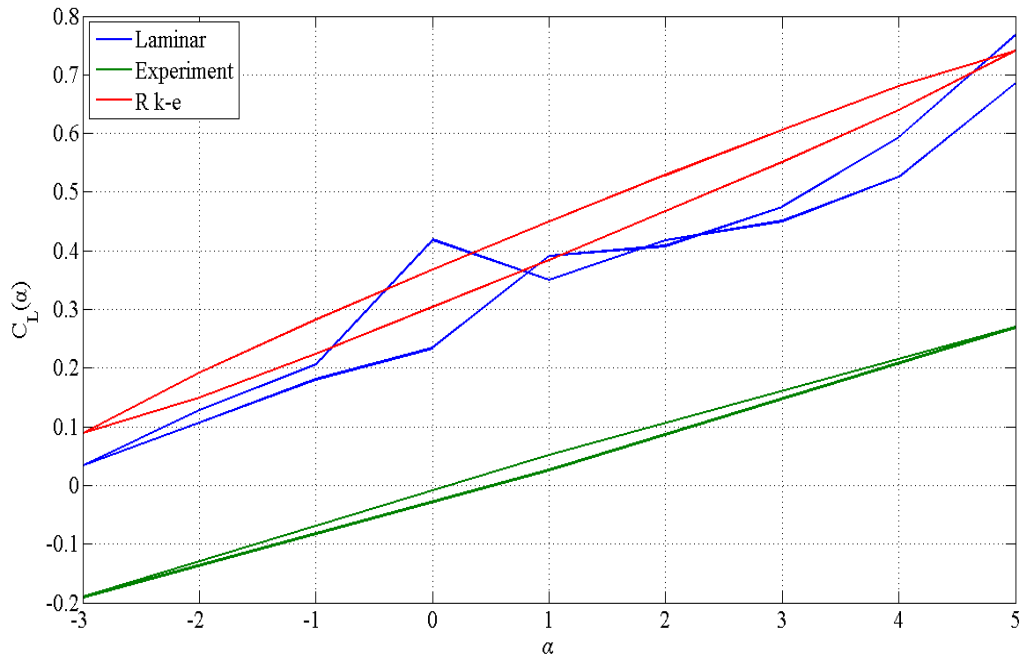
Σύγκριση Αποτελεσμάτων για  $\Delta\Phi = \pi/2$



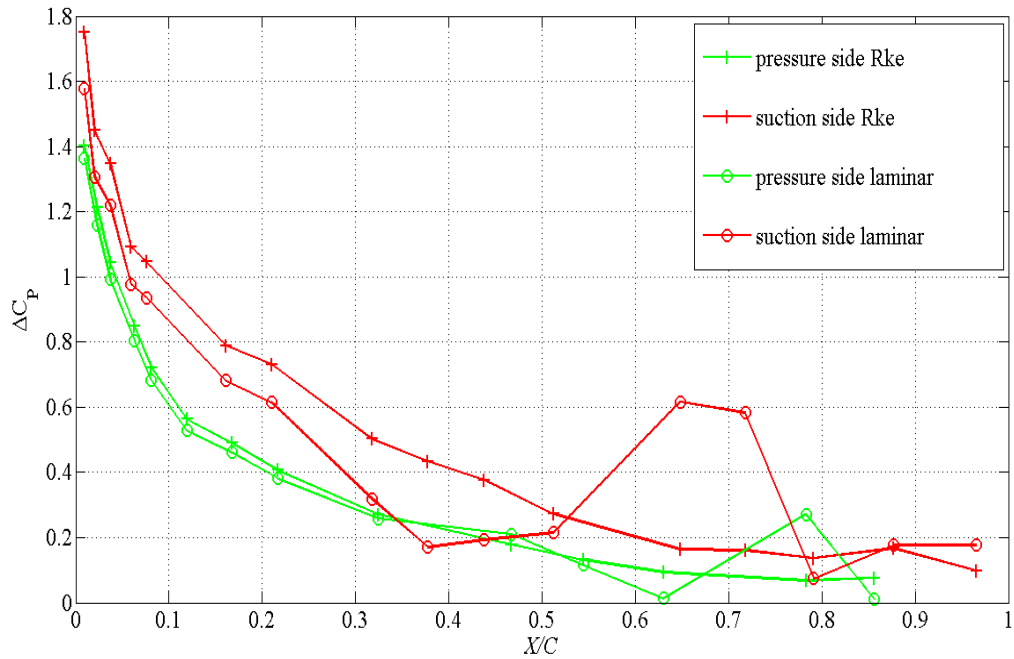
Σχήμα 4.56. Σύγκριση CP για τη Laminar & R k-ε, Second Order και του πραγματικού πειράματος για τέσσερις στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου. Για την Laminar περίπτωση η τιμές του  $C_p$  λήφθηκαν από τον μέσο όρο για τους τρεις τελευταίους κύκλους.



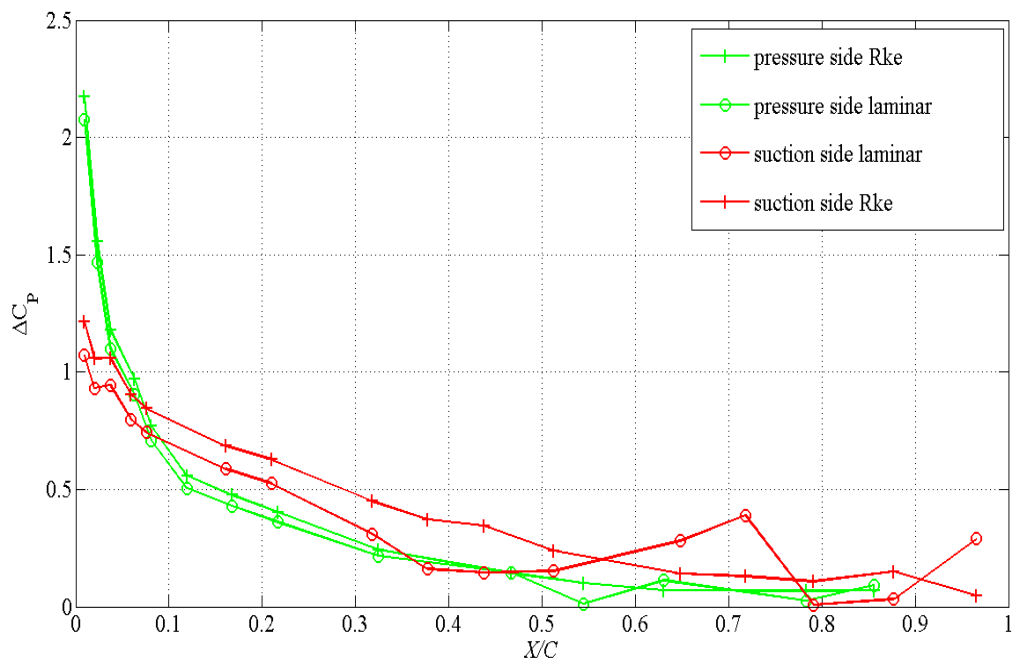
Σχήμα 4.577. Χρονοσειρές  $C_L$  &  $C_D$  για  $\Delta\Phi = \pi/2$ , για τις δυο περιπτώσεις Laminar & R k-ε S.O. Η γραφική παράσταση της Laminar περίπτωσης αντιστοιχεί στο μέσο όρο των τριών τελευταίων κύκλων.



Σχήμα 4.58. Διακριτές τιμές του CL για κάθε γωνία (ακέραιες τιμές) κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης. Σύγκριση των δυο περιπτώσεων με το πραγματικό πείραμα. Είναι εμφανές ότι η γραφική παράσταση Laminar δεν κλείνει διότι την  $t=0$  ( $\alpha=+5^\circ$ ) και την  $t=T$  ( $\alpha=+5^\circ$ ) οι τιμές διαφέρουν, ακόμα και μετά από τον υπολογισμό του μέσου όρου.

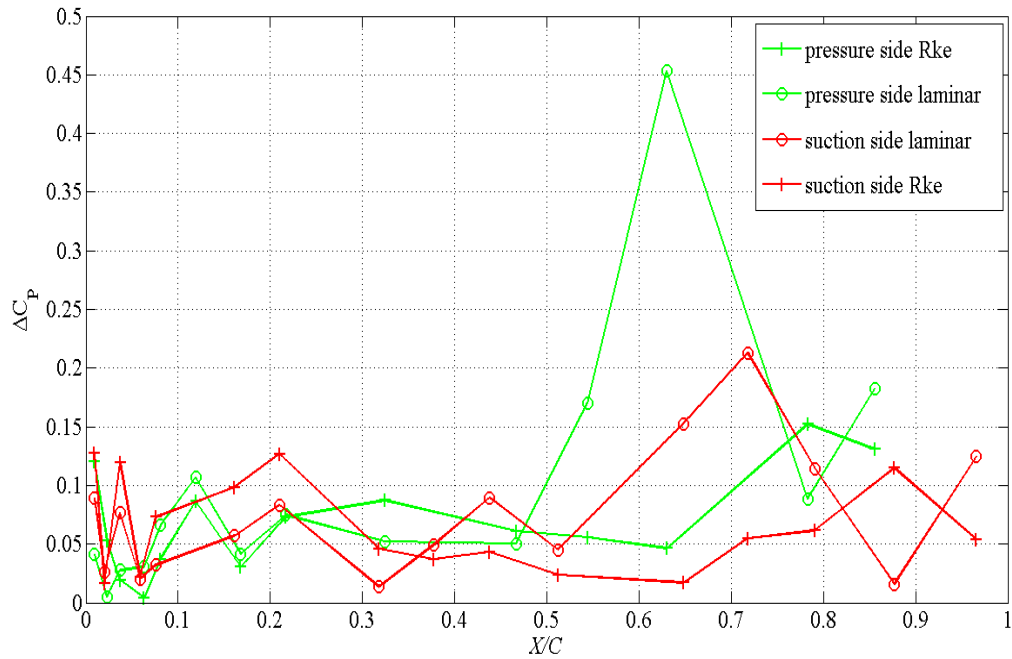


Σχήμα 4.59. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_1 = 0T$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha = +5^\circ)$

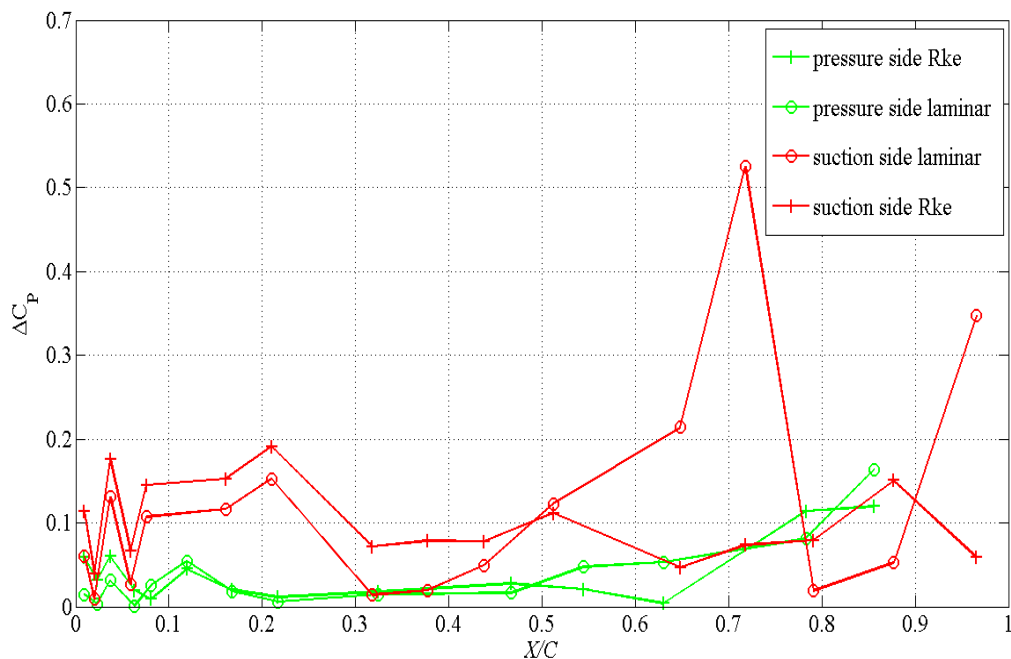


Σχήμα 4.60. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_2 = T/4$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha = 1^\circ)$ .





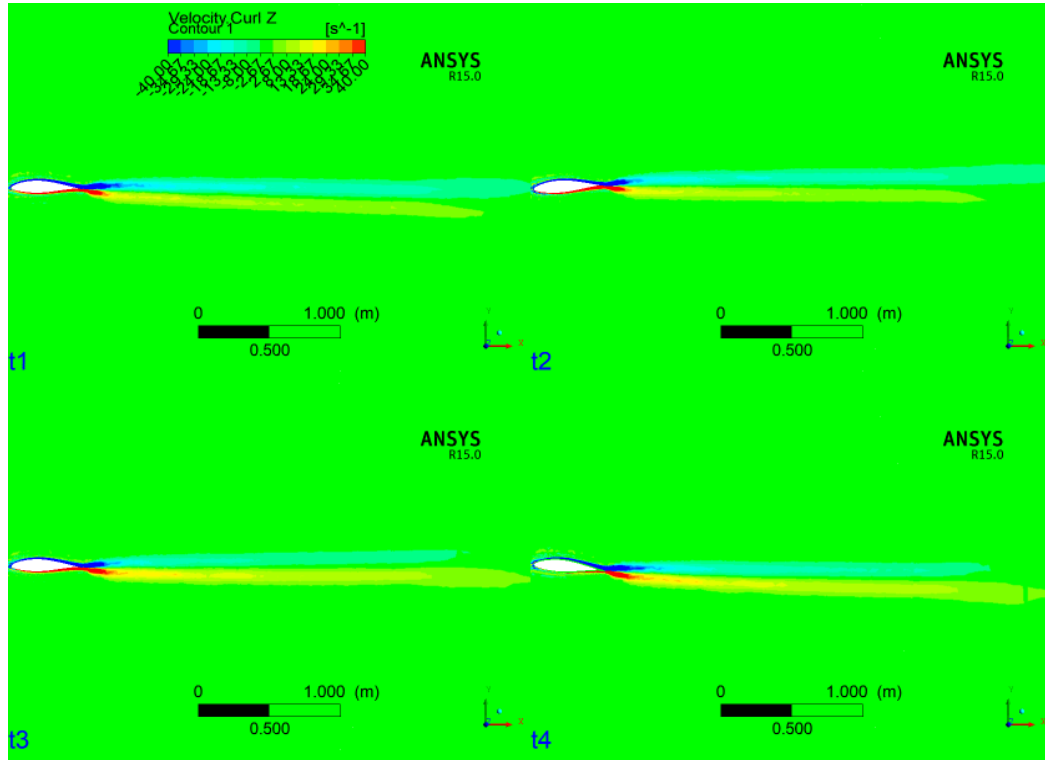
Σχήμα 4.61. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_3 = T/2$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο. ( $\alpha = -3^\circ$ )



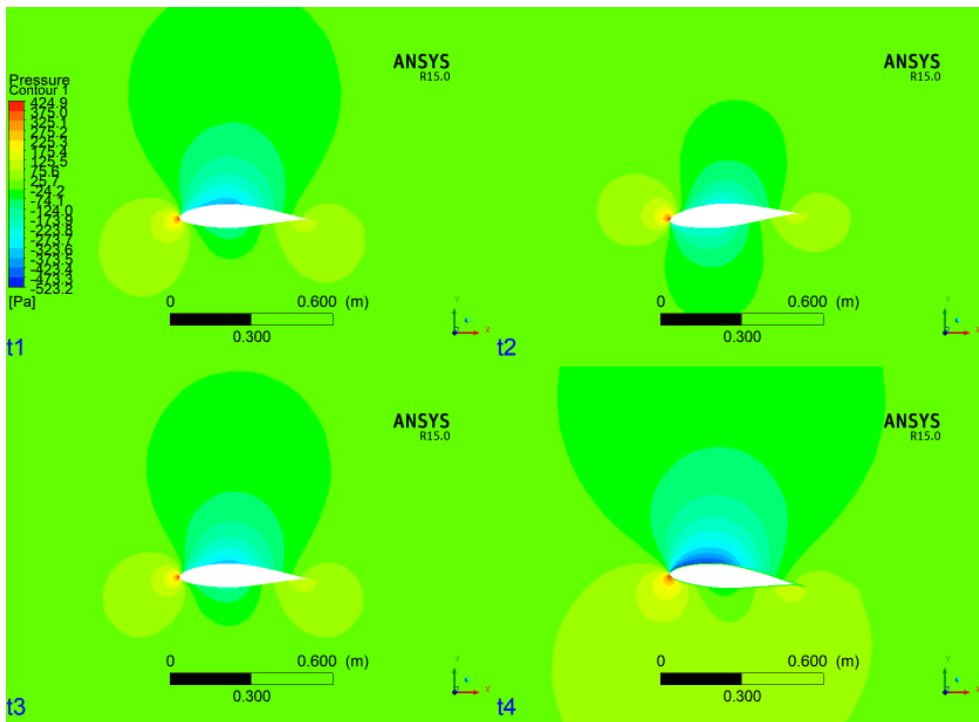
Σχήμα 4.62. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t_4 = 3T/4$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο. ( $\alpha = +1^\circ$ )

# Αμγώς Γωνιακή Ταλάντωση

R k-ε

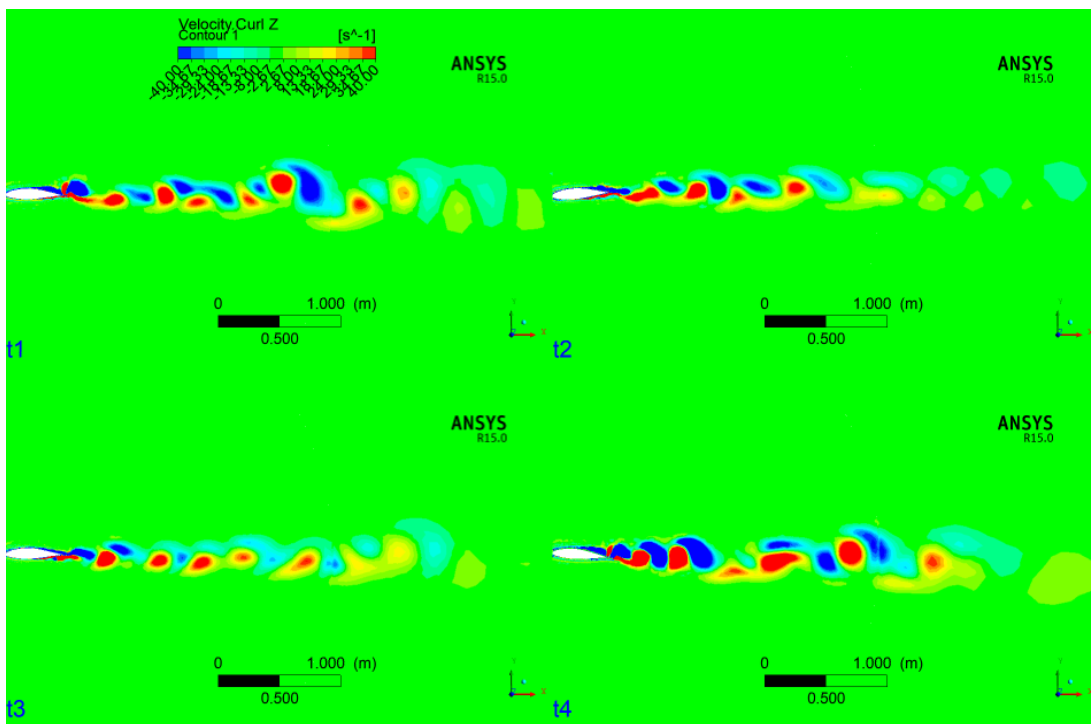


Σχήμα 4.63. Ισοϋψείς στροβιλότητας. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης .  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  Διάρκεια προσομοίωσης 9 s. R k-ε S.O

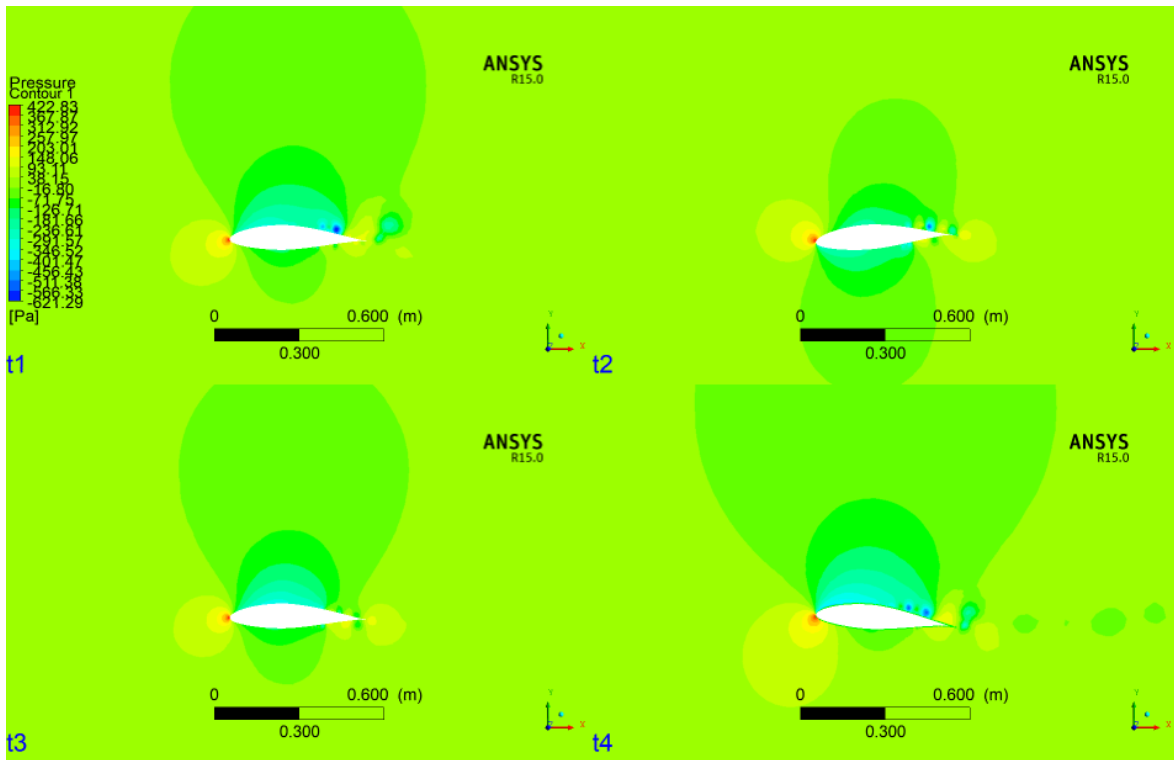


Σχήμα 4.64. Ισοϋψείς Πίεσης για την περίπτωση R k-ε S.O . Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .

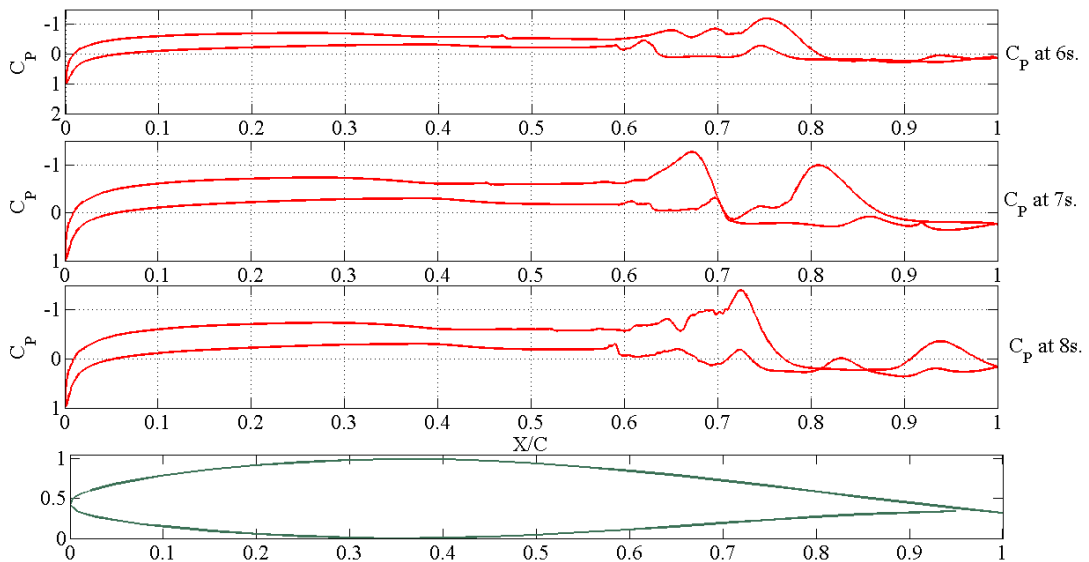
Laminar



Σχήμα 4.65. Ισοϋψείς στροβιλότητας. Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης .  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  Διάρκεια προσομοίωσης 9 s. Laminar S.O .

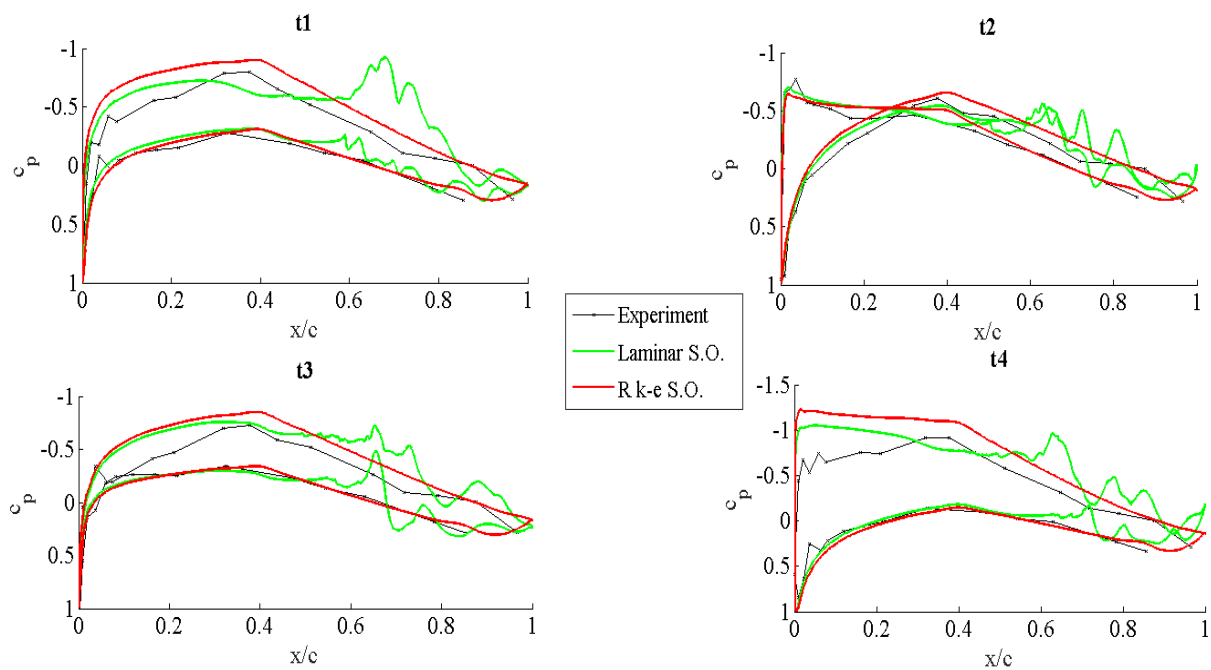


Σχήμα 4.66. Ισοϋψείς Πίεσης για την περίπτωση Laminar S.O . Στιγμιότυπα απο τον τελευταίο κύκλο ταλάντωσης.  $t_1=0T$  ,  $t_2=T/4$  ,  $t_3=T/2$  ,  $t_4=3T/4$  . Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης :  $4^\circ$  . Διάρκεια προσομοίωσης 9 s .

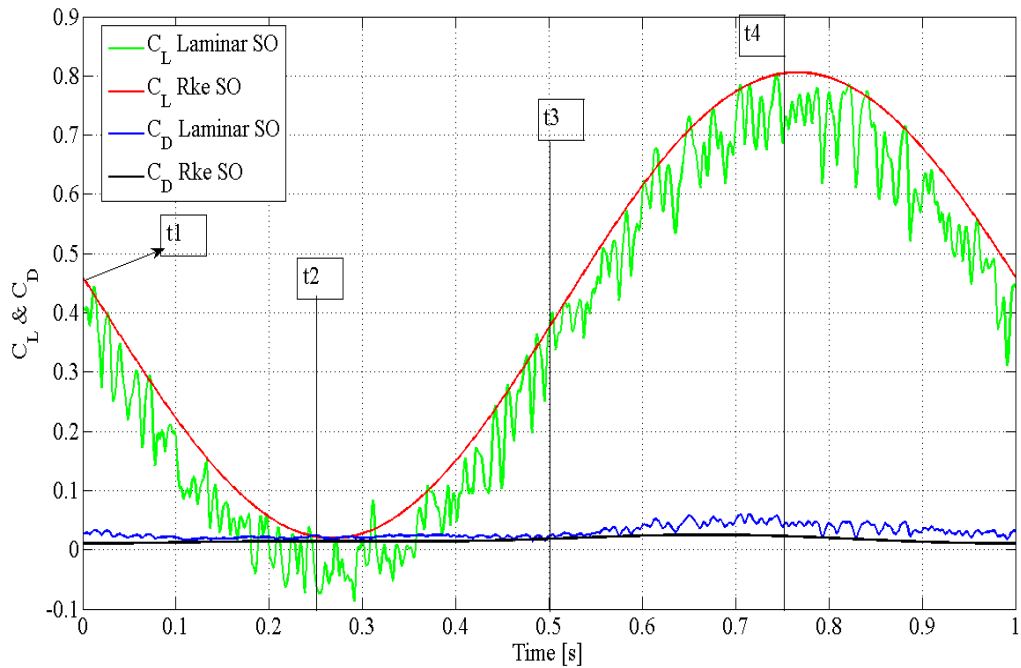


Σχήμα 4.67. Κατανομή του  $C_p$  κατα μήκος της πτέρυγας για την  $t_1$  ( $T=0$ ) για τρεις διαφορετικούς κύκλους ταλάντωσης για την περίπτωση Laminar S.O . ( $\alpha = +1^\circ$ ) . Αμιγώς Γωνιακή Ταλάντωση .

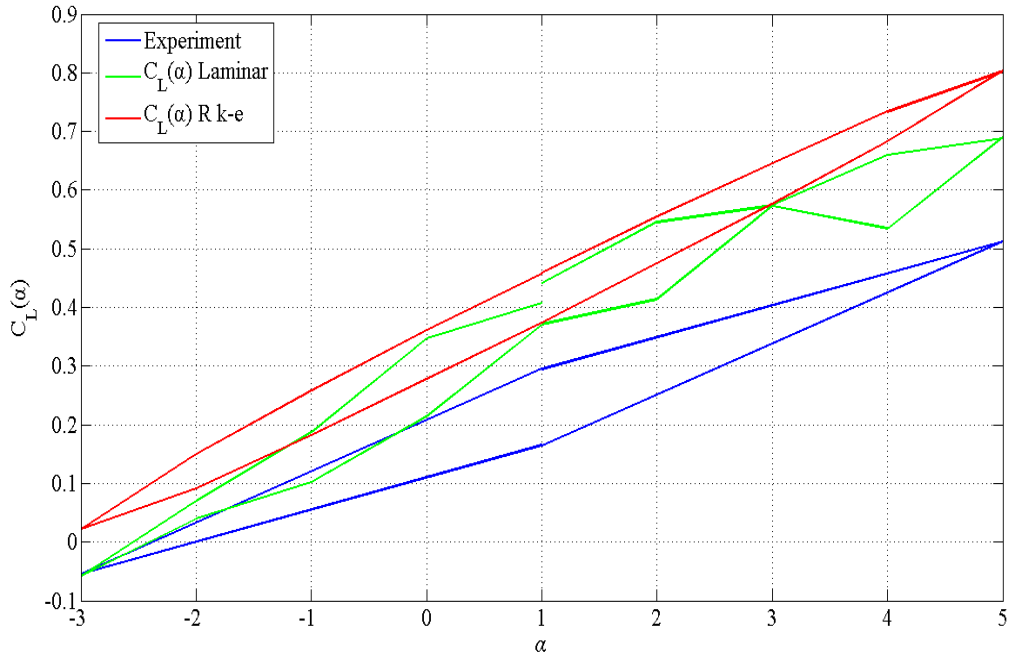
### Σύγκριση Αποτελεσμάτων για Αμγώς Γωνιακή Ταλάντωση .



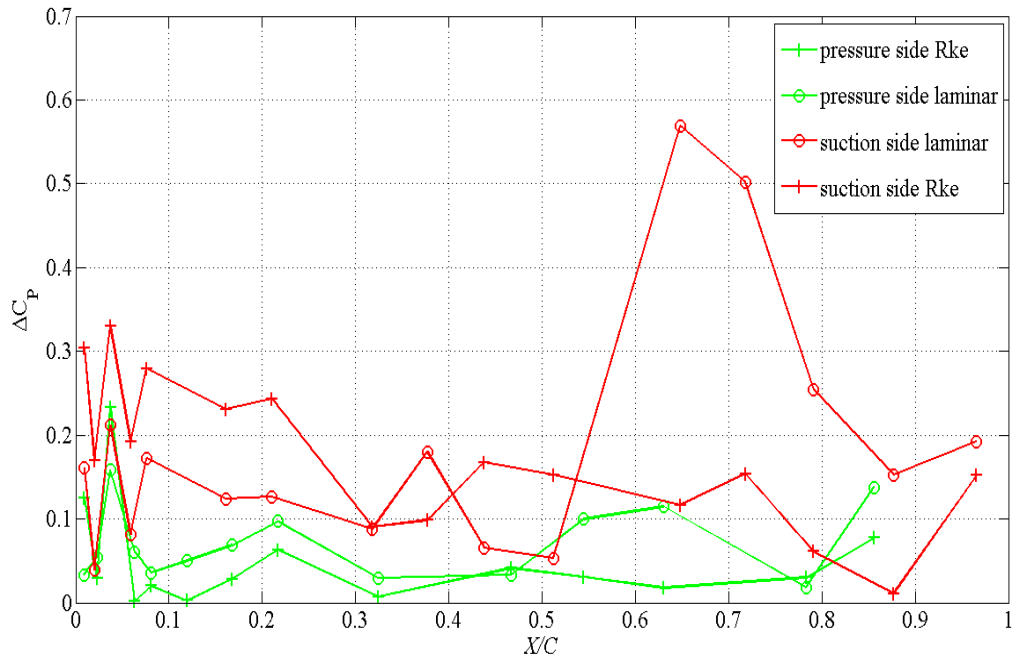
Σχήμα 4.68 Σύγκριση  $C_p$  για τη Laminar & R k-ε , Second Order και του πραγματικού πειράματος για τέσσερις στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου .Για την Laminar περίπτωση η τιμές του  $C_p$  λήφθηκαν απο τον μέσο όρο για τους τρεις τελευταίους κύκλους .



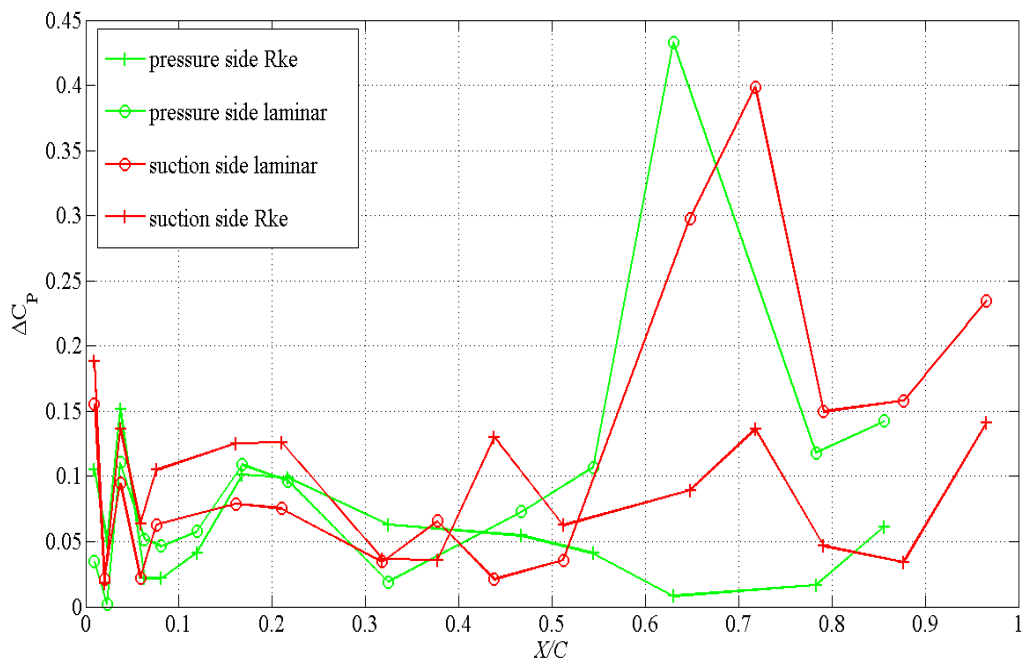
Σχήμα 4.69. Χρονοσειρές  $C_L$  &  $C_D$  για αμιγώς γωνιακή ταλάντωση ,για τις δυο περιπτώσεις Laminar & R k-ε S.O .Η γραφική παράσταση της Laminar περίπτωσης αντιστοιχεί στο μέσο όρο των τριών τελευταίων κύκλων .



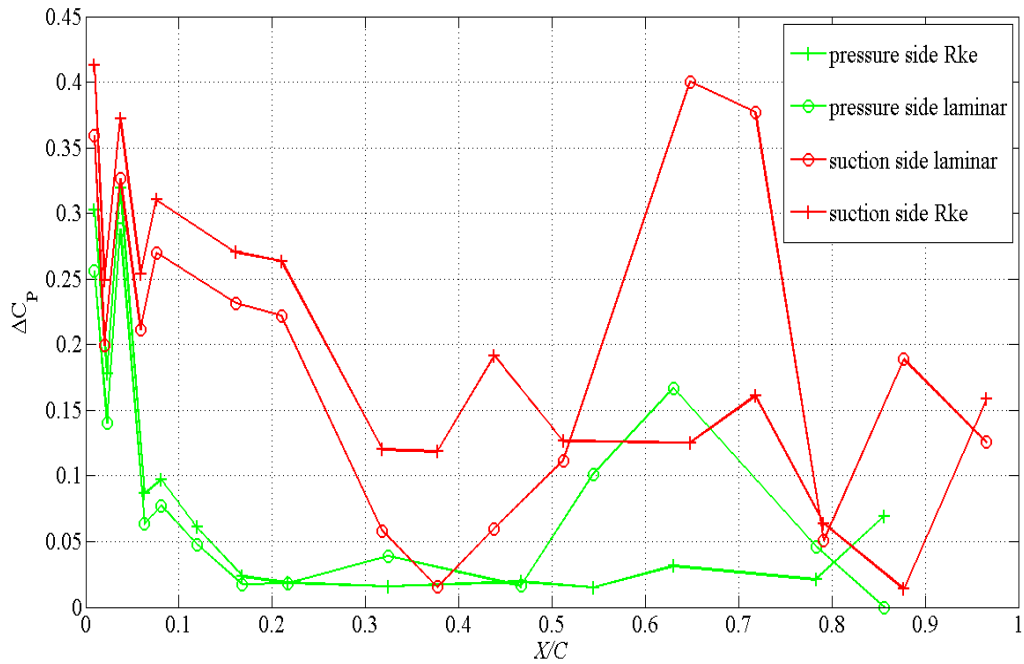
Σχήμα 4.70. Διακριτές τιμές του  $C_L$  για κάθε γωνία (ακέραιες τιμές) κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης .Σύγκριση των δυο περιπτώσεων με το πραγματικό πείραμα .Είναι εμφανές ότι η γραφική παράσταση Laminar δεν κλείνει διότι την  $t=0$  και την  $t=T$  η τιμές διαφέρουν απο κύκλο σε κύκλο .



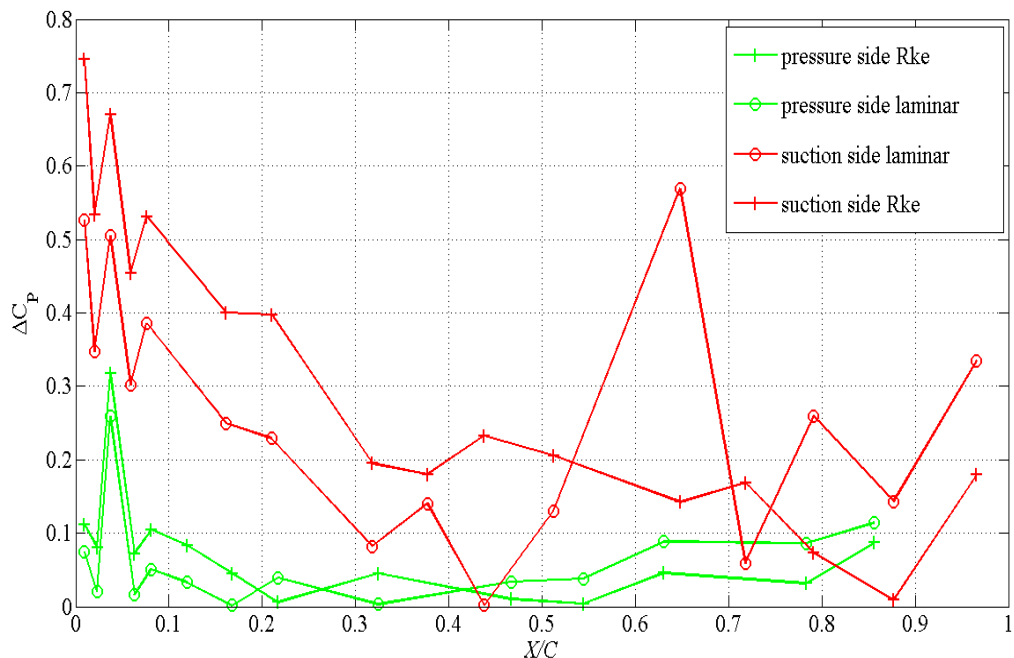
Σχήμα 4.71. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t = 0$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο. ( $\alpha = +1^\circ$ )



Σχήμα 4.72. Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t = T/4$ . Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο. ( $\alpha = -3^\circ$ )



Σχήμα 4.73.Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t = T/2$  .Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha = +1^\circ)$



Σχήμα 4.74.Γραφικές παραστάσεις απεικόνισης των διαφορών μεταξύ των  $C_p$  του πραγματικού πειράματος και των  $C_p$  των προσομοιώσεων την  $t = 0$  .Απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές για την πλευρά πίεσης και αναρρόφησης ξεχωριστά και για κάθε μοντέλο  $(\alpha = +5^\circ)$ .



## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Απο την ενότητα των συμπερασμάτων της διπλωματικής αυτής δεν θα μπορούσαν να λείπουν κάποια σχόλια -συμπεράσματα που να αφορούν το μοντέλο τύρβης και τον τρόπο μοντελοποίησης του πειράματος .

Η χρήση του μοντέλου R k-ε προήλθε μετά απο μελέτη και άλλων παρόμοιων εργασιών [24] όπου για παρόμοιες εφαρμογές ανταποκρίθηκε με επιτυχία και σε χαμηλότερους αριθμούς Re .Παρά το γεγονός αυτό πρέπει να προστεθεί πως στη δική μας περίπτωση η ροή δεν ήταν πλήρως τυρβώδης ( $Re < 10^6$ ) αλλά βρισκόταν οριακά ακόμα στην περιοχή μετάβασης .Η χρήση λοιπόν αυτού του μοντέλου δεν είναι ξεκάθαρη σε όλες τις περιπτώσεις .Αξίζει ,δε, να διατυπώσουμε πως κατά τη διάρκεια διεκπεραίωσης της εργασίας αυτής δοκιμάστηκαν και άλλα πιο "κατάλληλα" για κάποιες γνώμες μοντέλα (όπως kw-SST, Spalart Almaras) χωρίς καλύτερα αποτελέσματα .

Συγκρίνοντας τους δυο τρόπους με τους οποίους αναλύθηκε η πραγματική ροή σε αυτήν την εργασία (Laminar,Rk-e) δεν μπορούμε να δώσουμε μια σαφή απάντηση ως προς το ποιο ανταποκρίθηκε καλύτερα .Μπορούμε όμως σίγουρα να πούμε πως η περίπτωση χωρίς μοντέλο τύρβης προσομοίωσε με πολλή μεγαλύτερη "φυσικότητα" τη δομή του ομόρου και τη ροή γύρω απο την αεροτομή . Σε ότι αφορά τον υπολογισμό των συντελεστών εδώ οι δυο εκδοχές βρίσκονται οριακά πολύ κοντά μεταξύ τους με την Laminar να βρίσκεται ελάχιστα πιο κοντά στις τιμές του πραγματικού πειράματος .Απο την άλλη πλευρά ωστόσο η σταθερότητα του μοντέλου το καθιστά πιο καθοριστικό στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων ,καθώς οι διακυμάνσεις που παρουσίασαν τα αποτελέσματα του απο κύκλο σε κύκλο ήταν αμελητέες .

Επίσης να επισημάνουμε τη σημαντικότητα της χρήσης δεύτερης τάξης χρονικής διακριτοποίησης στην εξερεύνηση της οποίας αφιερώθηκε αρκετός χρόνος στην παρούσα εργασία .Ο συνδυασμός της επιλογής αυτής με ένα "αρκετά" πυκνό πλέγμα και ένα επαρκώς μικρό χρονικό βήμα μπορεί να εξοικονομήσει αρκετό χρόνο απο τις υπολογιστικές προσομοιώσεις και παράλληλα να προσδώσει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα .

Τέλος να αναφερθούμε και στις ιδιότητες των χαρακτηριστικών του πειράματος που το αποτρέπουν να έχει καλή απόδοση στην παραγωγή ενέργειας .Είναι εμφανές ότι τα πλάτη της γωνιακής και γραμμικής ταλάντωσης είναι πάρα πολύ μικρά για να είναι αποδοτικά ενεργειακά. Αποτέλεσμα του μικρού πλάτους γωνιακής ταλάντωσης είναι η έλλειψη σχηματισμού LEV ,η οποία ευνοεί αρκετά την παραγωγή ενέργειας , κατα τη διάρκεια της ταλάντωσης ,όπως αναφέρθηκε και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση .Είναι χαρακτηριστικό αυτό που αναφέρουν οι Kinsey & Dumas [13] σε δημοσίευση τους επί του θέματος : "προκειμένου μια ταλαντούμενη αεροτομή να έχει απόδοση της τάξεως του 20% πρέπει να βιώνει γωνίες προσβολής τουλάχιστον 55 μοιρών κατά τη διάρκεια της κίνησης της" .Απο τη παραπάνω φράση προκύπτουν τα απαραίτητα συμπεράσματα που απαντούν στο ερώτημα της αδυναμίας του συστήματος να παράγει ενέργεια . Παρόλα αυτά απο τη βιβλιογραφία λείπουν μελέτες που να εξερευνούν τις δυνατότητες των συστημάτων με μικρά εύρη ταλάντωσης .Η παρούσα εργασία έρχεται να μειώσει αυτό το "κενό" ή και να συμπληρώσει τα ευρήματα που ήδη υπάρχουν πάνω στον έτσι και αλλιώς κάπως ανεξερεύνητο κόσμο των ταλαντούμενων αεροτομών .

Θα κλείσω αυτό το κείμενο με μια έκραση του Frank M.White : "Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι σαν τη χρήση ενός υπολογιστή τσέπης αλλά απαιτούν φροντίδα και

αφοσίωση απο το χρήστη .Η χρήση του κώδικα χρειάζεται τέχνη και εμπειρία ειδικά όταν η ροή μεταβαίνει απο στρωτή σε τυρβώδης " .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ C ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ (UDF)

```
/******ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ******/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "udf.h"

DEFINE_CG_MOTION(define_motion_parallel, dt, vel, omega, time, dtime)
{

#if !RP_HOST
    real ampl, disp, omg, phi;
    NV_S(vel,=, 0.0);
    NV_S(omega,=, 0.0);
    phi = 0;
    ampl = 0.06981; /* amplitude of rotation in radians (4deg) */
    omg = 6.283185; /* angular frequency (1Hz) in rad per sec */
    omega[2] = ampl * omg * cos(omg * time + phi);

#endif
}

/******ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ ΔΦ=0******/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "udf.h"

DEFINE_CG_MOTION(define_motion_new1_parallel, dt, vel, omega, time, dtime)
{
#if !RP_HOST
    real ampl, disp, omg, phi, ampl1;
    NV_S(vel,=, 0.0);
    NV_S(omega,=, 0.0);
    phi = 0;
    ampl1 = 0.05; /*amplitude of translation in m*/
    omg = 6.283185; /* angular frequency (1Hz) in rad per sec*/
    /*disp1=ampl1*sin(omg*time) resultant translational displacement*/
    vel[1] = ampl1 * omg * cos(omg * time + phi);
    ampl = 0.06981; /* amplitude of rotation in radians (4deg) */
    omg = 6.283185; /* angular frequency (1Hz) in rad per sec */
    omega[2] = -ampl * omg * cos(omg * time + phi);
#endif
}
```

```
}
```

```
/******ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ  
ΔΦ=π/2******/
```

```
# include <stdio.h>  
# include <math.h>  
# include "udf.h"
```

```
DEFINE_CG_MOTION(define_motion_new1_pi_2_parallel, dt, vel, omega, time,  
dtime)
```

```
{  
#if !RP_HOST  
    real ampl, disp, omg, phi, ampl1;  
    NV_S(vel,=, 0.0);  
    NV_S(omega,=, 0.0);  
    ampl1 = 0.05; /*amplitude of translation in m*/  
    omg = 6.283185; /* angular frequency (1Hz) in rad per sec*/  
    /*disp1=ampl1*sin(omg*time) resultant translational displacement*/  
    vel[1] = ampl1 * omg * cos(omg * time);  
    ampl = 0.06981; /* amplitude of rotation in radians (4deg) */  
    omg = 6.283185; /* angular frequency (1Hz) in rad per sec */  
    phi = 1.570796; /*pi/2 phase difference*/  
    omega[2] = -ampl * omg * cos(omg * time + phi);  
#endif
```

```
}
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΗΣ -SOLVER-ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Χαρακτηριστικά της Ροής:

Πίεση : 101325 [Pa]

Ταχύτητα εισόδου Ρευστού: 26,4 [m/s]

Θερμοκρασία : 303 [K]

Πυκνότητα : 1,225[kg/m<sup>3</sup>]

Δυναμικό Ιξώδες : 1,79 x 10<sup>5</sup> [kg/ms]

Solver :

Ακρίβεια : Double Precision

Διαστάσεις : 2D

Χρονική Διακριτοποίηση : Δεύτερης Τάξης (εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά )

Μοντέλο Τύρβης : Laminar / R k-ε

Solution Controls :

Relaxation :

Pressure : 0.75

Momentum: 0.75

Density : 1

Body Forces : 1

Descritization :

Pressure : 2<sup>nd</sup> order

Momentum : 2<sup>nd</sup> order Upwind

Pressure-Velocity Coupling : Coupled

Convergence Absolute Criteria :

x-continuity :  $10^{-5}$

y-continuity :  $10^{-5}$

Momentum :  $10^{-5}$

k :  $10^{-5}$

$\varepsilon$ :  $10^{-5}$

Χαρακτηριστικά Dynamic Mesh :

Spring Constant Factor : 0.01

Convergence Tolerance : 0.001

Number of iterations : 20

Remeshing :

Minimum Length Scale : 0

Maximum Cell Skewness : 0.7

Πλέγμα :

Method: All triangles method

Face sizing (fluid) : 0.5 [m]

Face sizing (sliding mesh) : 0.025 [m]

Edge sizing (on airfoil): 0.0005 [m]

Bias Factor (on airfoil) : 1

Edge Sizing(στα όρια του sliding mesh) : 0.025 [m]

Inflation(on airfoil edge) :

First Layer Height:  $1.3 \times 10^{-5}$  [m]

Maximum Layers : 30

Growth Rate : 1.1

Στατιστικά :

Size : 170.000 elements ( $\pm 10.000$  ανάλογα με την περίπτωση )

Maximum Skewness : 0.75

Average Skewness: 0.07

Average Orthogonal Quality : 0.97

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "A review of progress and challenges in flapping foil power generation" .  
John Young , Joseph C.S. Laia, Max F. Platzer . Progress in Aerospace Sciences 67 (2014) 2–28
- [2] "Numerical analysis of an oscillating wing wind and hydropower generator."  
Ashraf MA, Young J, Lai JCS, Platzer MF. AIAA J 2011;49(7):1374–1386  
<http://dx.doi.org/10.2514/1.J050577>.
- [3] Platzer M, Ashraf M, Young J, Lai J. "Development of a new oscillating-wing wind and hydropower generator."  
In: 47th AIAA aerospace sciences meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, [http:// dx.doi.org/10.2514/6.2009-1211](http://dx.doi.org/10.2514/6.2009-1211), 2009.
- [4] Hover FS, Haugsdal Ø, Triantafyllou MS." Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion."  
J Fluids Struct 2004;19(1):37–47, [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.jfluidstruct.2003.10.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstruct.2003.10.003).
- [5] Simpson BJ, Licht S, Hover FS, Triantafyllou MS. "Energy extraction through flapping foils."  
In: Proceedings of the ASME 27th international conference on offshore mechanics and Arctic engineering (OMAE2008), Estoril, Portugal, 15–20 June, OMAE2008-58043, 2008.
- [6] Simpson BJ, Licht S, Hover FS, Triantafyllou MS. "Experiments in direct energy extraction through flapping foils."  
In: 18th International offshore ocean and polar engineering (ISOPE) conference, Vancouver, Canada, 6–11 July, ISOPE2008-FSH-03, 2008.
- [7] Platzer MF, Bradley RA." Oscillating-wing power generator with flow-induced pitch–plunge phasing."  
U.S. Patent 2009/0121490 A1; 2009
- [8] Platzer MF, Sarigul-Klijn N." A novel approach to extract power from freeflowing water and high altitude jet streams." .  
In: 3rd ASME energy sustainability conference, San Francisco, 19–23 July 2009.
- [9] Platzer MF, Ashraf MA, Young J, Lai JCS." Extracting power in jet streams: pushing the performance of flapping wing technology. " .  
In: 27th International congress of the aeronautical sciences (ICAS), Nice, France, 19–24 September 2010.
- [10] Platzer MF, Sarigul-Klijn N, Young J, Ashraf MA, Lai JCS. "Renewable hydrogen generation using sailing ships."  
In: ASME International mechanical engineering congress & exposition (IMECE), Denver, Colorado, 11–17 November 2011
- [11] Jones KD, Davids ST, Platzer MF." Oscillating wing power generation." .  
In: 3rd ASME/JSME joint fluids engineering conference, San Francisco, CA, 18–23 July, FEDSM99-7050, 1999.
- [12] Lindsey K. A "Feasibility study of oscillating-wing power generators".  
[M.Sc. thesis]. United States Naval Postgraduate School, Monterey, California; 2002
- [13] G.Dumas & T.Kinsey ."Eulerian simulations of oscillating airfoils in power extraction regime".



W IT Transactions on Engineering Sciences, Vol 52, www.witpress.com, ISSN 1743-3533  
(on-line)

[14] M.A. Ashraf. "Numerical simulation of the flow over flapping airfoils in propulsion and power extraction regimes".

[15] Simpson BJ. " Experimental studies of flapping foils for energy extraction"

[M.Sc. thesis]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts; 2009.

[16] Ashraf ,Young ,Lai. "Reynolds number, thickness an camber effects on flapping airfoil propulsion". Journal of Fluids and Structures 27 (2011) 145–160146

[17] Zhu Q, Peng Z. "Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil."

Phys Fluids 2009;21(3):033601-1–033601-10, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3092484>.

[18] Kinsey T, Dumas G. "Parametric study of an oscillating airfoil in a power extraction regime." AIAA J 2008;46(6):1318–1330, <http://dx.doi.org/10.2514/1.26253>.

[19] Davids S.T. "A computational and experimental investigation of a flutter generator."

[M.Sc. thesis]. United States Naval Postgraduate School, Monterey, California; 1999.

[20] McKinney & DeLaurier . "The wingmill:An oscillating-wing windmill."

J Energy 1981;5(2):109–115, <http://dx.doi.org/10.2514/3.62510>.

[21] Zhu Q. 2011."Optimal frequency for flow energy harvesting of a flapping foil." J Fluid Mech 2011;675:495–517, <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112011000334>.

[22] ANSYS 15.0 Help-User's Manual .

[23] Q.Xiao,Q.Zhu ."A review on flow energy harvesters based on flapping foils."

[24] M. M. Metwally El-Sakka."Design of an oscillating wing for wind energy applications"  
M.sc. Thesis,

Faculty of Engineering in Port Side, Suez Canal University, 2009 .

[25] Frank M. White : "Fluid Mechanics" .McGraw-Hill Publications

[26] Δ.Γκιόλας ,Δ.Γιασεμίδης ,Δ.Μαθιουλάκης ."Πειραματική μελέτη ροής γύρω απο  
περιοδικά κινούμενη πτέρυγα ".POH 2016