

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΗ ΑΕΡΟΤΟΜΗ

Φ. Κατσούλας, Ε. Κωνσταντινίδης
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Μπακόλα και Σιαλβέρα, Κοζάνη 50132,
fkatsoulas@gmail.com, ekonstantinidis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται το πεδίο ροής γύρω από σταθερή και κινούμενη αεροτομή τύπου NACA64418 σε αριθμό Reynolds 0.85×10^6 . Η μελέτη βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων κίνησης του ρευστού σε ένα δισδιάστατο υπολογιστικό πεδίο με χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS-Fluent. Εξετάστηκαν δύο προσεγγίσεις: Navier–Stokes χωρίς μοντέλο τύρβης και Reynolds Averaged Navier–Stokes με μοντέλο τύρβης realizable $k-\epsilon$. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα τόσο για σταθερή όσο και κινούμενη αεροτομή. Τα αποτελέσματα για την περίπτωση σταθερής αεροτομής έδειξαν ότι η χρήση μοντέλου τύρβης οδηγεί σε υστερημένη αποκόλληση και οι προλέξεις της μεταβολής του συντελεστή άντωσης με τη γωνία προσβολής είναι σε καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις χωρίς μοντέλο τύρβης. Από την άλλη πλευρά, όταν δεν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης διαμορφώνεται μη-μόνιμο πεδίο ροής λόγω δημιουργίας και έκλυσης δινών στον ομόρρου, το οποίο αντιπροσωπεύει ορθότερα τη φυσική των φαινομένων σε αντίθεση με τις προσομοιώσεις με μοντέλο τύρβης όπου διαμορφώνεται μόνιμο πεδίο ροής. Για την περίπτωση κινούμενης αεροτομής, οι προσομοιώσεις προλέγουν ικανοποιητικά το βρόχο υστέρησης του διαγράμματος του συντελεστή άντωσης με τη στιγμιαία γωνία προσβολής και τη μη-γραμμική επίδραση της διαφοράς φάσης όπως παρατηρείται και στα πειραματικά δεδομένα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο συντελεστής άντωσης υπερεκτιμάται από τις δισδιάστατες προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης σε σύγκριση με τις πειραματικά ευρεθείσες τιμές.

Λέξεις Κλειδιά: Μη-μόνιμη αεροδυναμική, αποκόλληση ροής, μετάβαση, μοντέλα τύρβης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

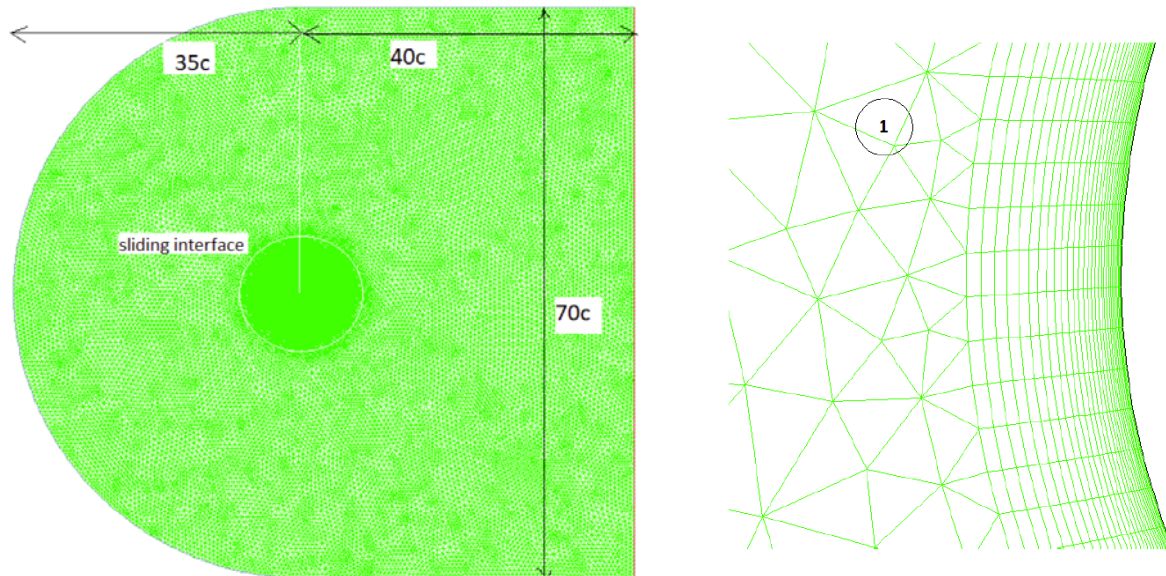
Οι κινούμενες αεροτομές αποτελούν πεδίο σημαντικής έρευνας την τελευταία δεκαετία καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μηχανισμός συγκομιδής της κινητικής ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες που βασίζονται σε σταθερά περιστρεφόμενες αεροτομές, ή ακόμη και ως μηχανισμός πρόωσης. Αν θεωρήσουμε μια δισδιάστατη αεροτομή, υπάρχουν διάφοροι τρόποι λειτουργίας τέτοιων μηχανισμών ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας της κίνησης, π.χ. γραμμική, περιστροφική ή συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική ταλάντωση, ή ανάλογα με το εάν κάθε ανεξάρτητη κίνηση είναι αυτό-διεγείρομενη ή εξαναγκασμένη. Όταν η αεροτομή ταλαντώνεται περιοδικά διαμορφώνεται ένα μη-μόνιμο πεδίο ροής στον ομόρρου το οποίο με τη σειρά του προκαλεί μη-μόνιμα αεροδυναμικά φορτία. Η διαφορά φάσης μεταξύ των χρονικά μεταβαλλόμενων δυνάμεων και ροπών και των αντίστοιχων κινήσεων της αεροτομής καθορίζει εάν μεταφέρεται ενέργεια από το ρευστό στην αεροτομή, ή αντιστρόφως. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός σχετικών μελετών μια σύνοψη των οποίων παρουσιάζεται από τους Xiao και Zhu (2014).

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι για την πρόβλεψη του βαθμού απόδοσης συστημάτων, είτε συγκομιδής ενέργειας είτε πρόωσης, απαιτείται γνώση των μη-μόνιμων αεροδυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται σε ταλαντούμενες αεροτομές. Στην παρούσα εργασία διερευνάται το πεδίο ροής γύρω από σταθερή και ταλαντούμενη αεροτομή με τη χρήση εργαλείων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Εδώ εστιάζουμε στη διερεύνηση διαφορετικών προσεγγίσεων του προβλήματος επιλύοντας αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης του ρευστού με και χωρίς μοντελοποίηση της τύρβης. Η διαμόρφωση των προσομοιώσεων βασίστηκε στην πειραματική εργασία των Γκιόλα *et al.* (2016) ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα από την αεροδυναμική σήραγγα κλειστού κυκλώματος της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η υπολογιστική μελέτη βασίζεται στη διακριτοποίηση των εξισώσεων κίνησης του ρευστού σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων και έγινε με χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent. Επιλέχθηκε ένα υπολογιστικό πεδίο τύπου C με μη-δομημένο πλέγμα το οποίο παρουσιάζεται στην αριστερή εικόνα στο Σχήμα 1. Η είσοδος του πεδίου βρίσκεται 35c ανάντη και η έξοδος 40c κατάντη του μέσου της αεροτομής ενώ η απόσταση του άνω και κάτω ορίου είναι 35c (70c συνολικά) όπου c είναι το μήκος της χορδής της αεροτομής. Η αεροτομή είναι τύπου NACA64418 όπως και στα πειράματα των Γκιόλα *et al.* (2016). Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από ένα εσωτερικό κυκλικό πλέγμα με ακτίνα 5c το οποίο περικλείει την αεροτομή και μπορεί να κινείται (sliding mesh) μέσα σε ένα σταθερό εξωτερικό πλέγμα. Η διαμόρφωση αυτή επιλέχθηκε ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση κινούμενης αεροτομής. Για την εισαγωγή της κίνησης της αεροτομής δημιουργήθηκε κώδικας σε γλώσσα C (user-defined function). Γύρω ακριβώς από την αεροτομή διαμορφώθηκε ένα δομημένο πλέγμα με τετράπλευρα στοιχεία (κελιά) όπου ο πλησιέστερος κόμβος βρίσκεται σε απόσταση $y^+=1$ από το τοίχωμα ενώ η απόσταση των επόμενων κόμβων αυξάνει κατά 10% για τα επόμενα 30 στοιχεία όπως παρουσιάζεται στη δεξιά εικόνα στο Σχήμα 1. Το υπόλοιπο τμήμα του εσωτερικού πλέγματος καθώς και το εξωτερικό πλέγμα αποτελούνται από μη-δομημένα τρίπλευρα στοιχεία. Στα όρια εισόδου, η συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλα με την ελεύθερη ροή τέθηκε ίση με 26.4 m/s ενώ η κάθετη συνιστώσα ίση με μηδέν. Στα όρια εξόδου, η πίεση τέθηκε ίση με μηδέν. Ο αριθμός Reynolds βασιζόμενος στη χορδή διατηρήθηκε σε σταθερή τιμή 8.5×10^5 σε όλες τις προσομοιώσεις.

Για την επίλυση πεδίου ροής χρησιμοποιήθηκαν δύο προσεγγίσεις: η πρώτη προσέγγιση βασίστηκε στις εξισώσεις Unsteady Reynolds Averaged Reynolds Navier–Stokes με το μοντέλο τύρβης Realizable $k-\epsilon$, η οποία είναι συνήθης προσέγγιση από τη σκοπιά του μηχανικού. Η δεύτερη προσέγγιση βασίστηκε στις εξισώσεις Navier–Stokes χωρίς μοντέλο τύρβης (laminar). Σημειώνεται εδώ ότι, σε αντίθεση με άλλες υπολογιστικές μελέτες (π.χ. Kinsey and Dumas, 2008), ο αριθμός Reynolds είναι αρκετά υψηλός ώστε να είναι δυνατή η μετάβαση σε τυρβώδες οριακό στρώμα κατά μήκος της χορδής, το οποίο θεωρητικά καθιστά απαραίτητη τη μοντελοποίηση της τύρβης σε κλίμακες μικρότερες από το μέγεθος των υπολογιστικών κελιών. Αρχικά, έγιναν προκαταρκτικές μελέτες της εξάρτησης των αποτελεσμάτων από το πλήθος των στοιχείων όπου διαπιστώθηκε ότι πρακτικά υπάρχει ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων την πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος. Η μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος έγινε για την περίπτωση ακίνητης πτέρυγας σε γωνία προσβολής 5° . Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε τελικά περιλαμβάνει περί τα 164 χιλιάδες στοιχεία. Το χρονικό βήμα είναι 0.001 s για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξετάστηκαν οι περιπτώσεις χρονικής διακριτοποίησης πρώτης και δεύτερης τάξης. Διαπιστώθηκε ότι η τάξη προσέγγισης της χρονικής παραγωγού είχαν αξιοσημείωτη επίδραση στα αποτελέσματα τόσο με το μοντέλο τύρβης Realizable $k-\epsilon$ όσο και χωρίς μοντέλο τύρβης. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία ελήφθησαν με την προσέγγιση δεύτερης τάξης καθότι διαπιστώθηκε ότι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με προσομοιώσεις όπου το χρονικό βήμα έχει μειωθεί στο 1/10 όταν η αεροτομή ταλαντώνεται περιοδικά.



Σχήμα 1. Το υπολογιστικό πεδίο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη στο σύνολο του (αριστερά) και λεπτομέρεια του κοντά στην αεροτομή (δεξιά) όπου φαίνεται η μετάβαση από δομημένο σε αδόμητο πλέγμα. Στα αριστερά παρουσιάζονται με μπλε και κόκκινο χρώμα τα όρια όπου χρησιμοποιήθηκαν συνθήκες εισόδου και εξόδου αντιστοίχως.

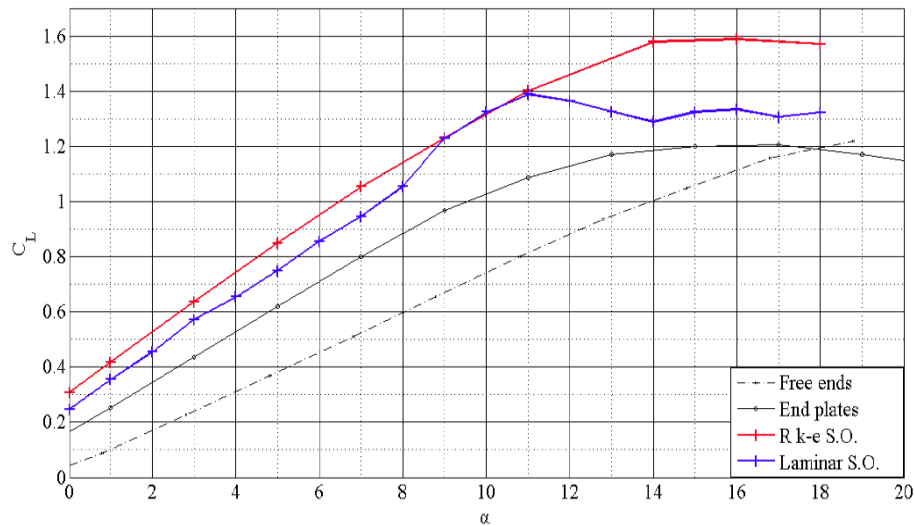
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Σταθερή αεροτομή

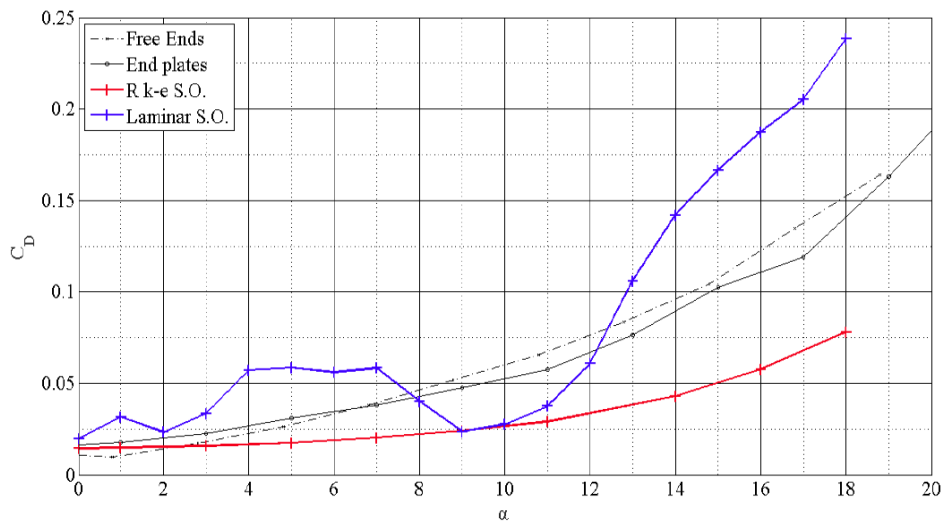
Τα Σχήματα 2 και 3 παρουσιάζουν τη μεταβολή του μέσου συντελεστή άντωσης, C_L , και του μέσου συντελεστή αντίστασης, C_D , με τη γωνία προσβολής, α , από τις προσομοιώσεις καθώς και από τις μετρήσεις των Γκιόλα *et al.* (2016). Τα πειραματικά σημεία που ενώνονται με διακεκομμένη μαύρη γραμμή αφορούν μετρήσεις όπου τα άκρα της αεροτομής είναι ελεύθερα ενώ η συνεχής μαύρη γραμμή αφορά πειράματα όπου είχαν τοποθετηθεί λεπτές πλάκες στα άκρα (end plates) ώστε να ενισχυθεί η ομοιογένεια του πεδίου ροής κατά μήκος του εκπετάσματος της αεροτομής. Συνεπώς, οι προσομοιώσεις του δισδιάστατου πεδίου ροής γύρω από την αεροτομή αναμένεται να είναι πιο κοντά στις μετρήσεις με λεπτές πλάκες στα άκρα.

Γενικά, οι προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης υπερεκτιμούν το C_L όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, κάτι το οποίο είναι μερικώς αναμενόμενο λόγω της προσέγγισης σε δύο διαστάσεις. Ωστόσο, οι τιμές του C_L χωρίς μοντέλο τύρβης είναι πιο κοντά στις πειραματικές τιμές. Το σημείο απώλειας στήριξης, το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο του συντελεστή άντωσης, εμφανίζεται στις 16° με το μοντέλο Realizable $k-\epsilon$ και στις 11° χωρίς μοντέλο τύρβης σε σχέση με τις 17° στο πείραμα. Δηλαδή, φαίνεται ότι η χρήση του μοντέλου τύρβης δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά την έναρξη της αποκόλλησης της ροής από ότι η μη-χρήση μοντέλου τύρβης.

Ο μέσος συντελεστής αντίστασης εκτιμάται ικανοποιητικά από τις προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης για μηδενική γωνία προσβολής ($C_D \approx 0.02$) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Για μεγαλύτερες γωνίες προσβολής, ο C_D υποεκτιμάται στις προσομοιώσεις με μοντέλο τύρβης ενώ αντίθετα οι προσομοιώσεις χωρίς μοντέλο τύρβης παρουσιάζουν σημαντικές αυξομειώσεις γύρω από τις πειραματικές μετρήσεις. Αυτές οι μη-ομαλές αυξομειώσεις στα αποτελέσματα θα σχολιαστούν περισσότερο στη συνέχεια.

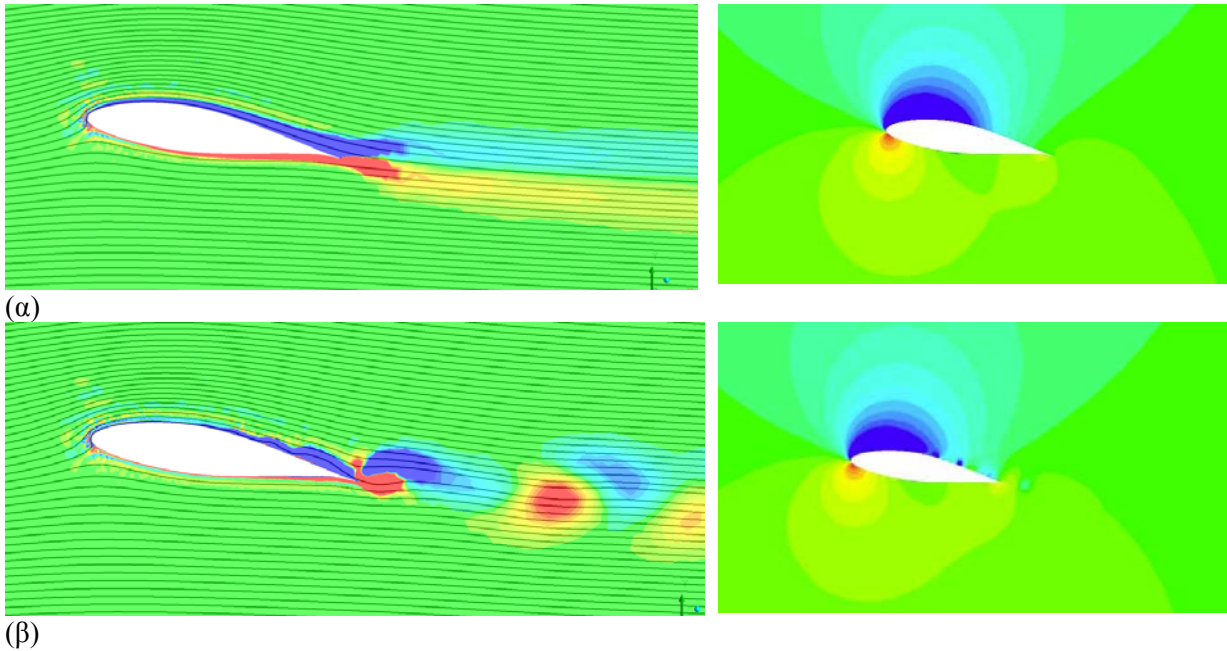


Σχήμα 2. Μεταβολή του μέσου συντελεστή άντωσης με τη γωνία προσβολής για σταθερή πτέρυγα.



Σχήμα 3. Μεταβολή του μέσου συντελεστή αντίστασης με τη γωνία προσβολής για σταθερή πτέρυγα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με και χωρίς μοντέλο τύρβης για τους συντελεστές C_D και C_L , παρατηρείται ότι ενώ η μεταβολή αυτών των μεγεθών με τη γωνία προσβολής είναι ομαλή και ανάλογη με αυτή των πειραματικών μετρήσεων στην πρώτη περίπτωση (με μοντέλο τύρβης), στη δεύτερη περίπτωση (χωρίς μοντέλο τύρβης) η μεταβολή τους εμφανίζει μη-ομαλές διακυμάνσεις. Αυτές οι διακυμάνσεις πιθανόν να οφείλονται στον σχετικά περιορισμένο χρόνο ολοκλήρωσης των εξισώσεων, ο οποίος δεν είναι αρκετά μεγάλος για να δώσει συγκλίνοντα στατιστικά μεγέθη. Αυτό είναι σημαντικό καθότι το πεδίο ροής στον ομόρροο είναι πρακτικά μόνιμο όταν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης, ενώ όταν δεν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης τότε το πεδίο ροής είναι ασταθές. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για την περίπτωση $\alpha = 9^\circ$. Είναι εμφανές ότι σε αυτή την περίπτωση η προσομοίωση με το μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$ δίνει μόνιμη ροή και χωρίς αποκόλληση από την επάνω πλευρά της αεροτομής (Σχήμα 4α). Από την άλλη όταν γίνεται προσομοίωση χωρίς μοντέλο τύρβης, το οριακό στρώμα στην επάνω πλευρά της αεροτομής εμφανίζει αστάθεια καθώς δημιουργούνται δίνες οι οποίες στη συνέχεια εκλύονται κατάντι (Σχήμα 4β). Η ύπαρξη των δινών είναι περισσότερο εμφανής από το πεδίο πιέσεων όπου εμφανίζονται τοπικά περιοχές πολύ χαμηλών αρνητικών τιμών. Επιστρέφοντας στην επίδραση του χρόνου ολοκλήρωσης στα αποτελέσματα, μπορούμε τώρα να συμπεράνουμε ότι απαιτούνται πολύ μεγαλύτεροι χρόνοι ολοκλήρωσης για την επίτευξη συγκλινόντων στατιστικών μεγεθών όταν το πεδίο ροής είναι ασταθές, ήτοι στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύρβης.



Σχήμα 4. Γραμμές ροής και κατανομή της στροβιλότητας (αριστερά) και κατανομή της πίεσης (δεξιά) γύρω από σταθερή αεροτομή σε γωνία προσβολής $\alpha = 9^\circ$ από προσομοιώσεις (α) με μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$ και (β) χωρίς μοντέλο τύρβης.

3.2 Περιοδικά κινούμενη αεροτομή

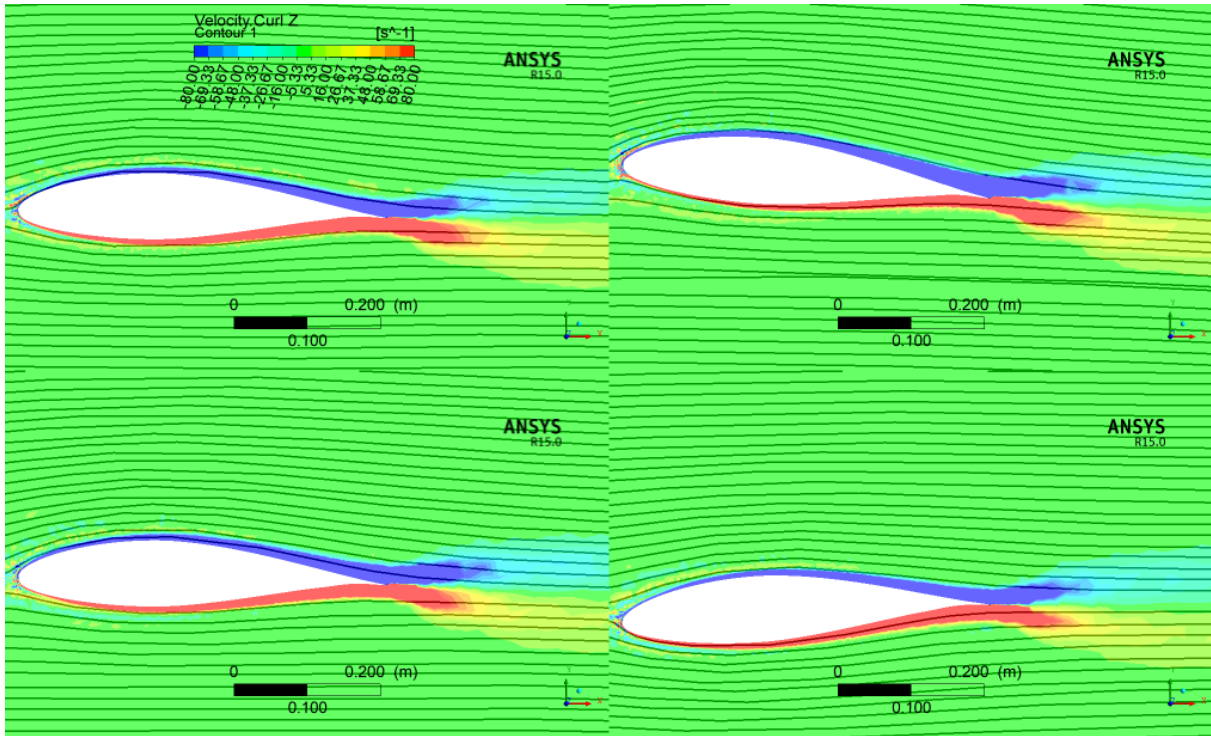
Η περιοδική κίνηση αφορά μια αεροτομή που εκτελεί συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική ταλάντωση της μορφής, αντιστοίχως

$$h(t) = \hat{h} \sin(2\pi f_h t) \quad \text{και} \quad \theta(t) = \theta_0 + \hat{\theta} \sin(2\pi f_\theta t + \phi). \quad (1)$$

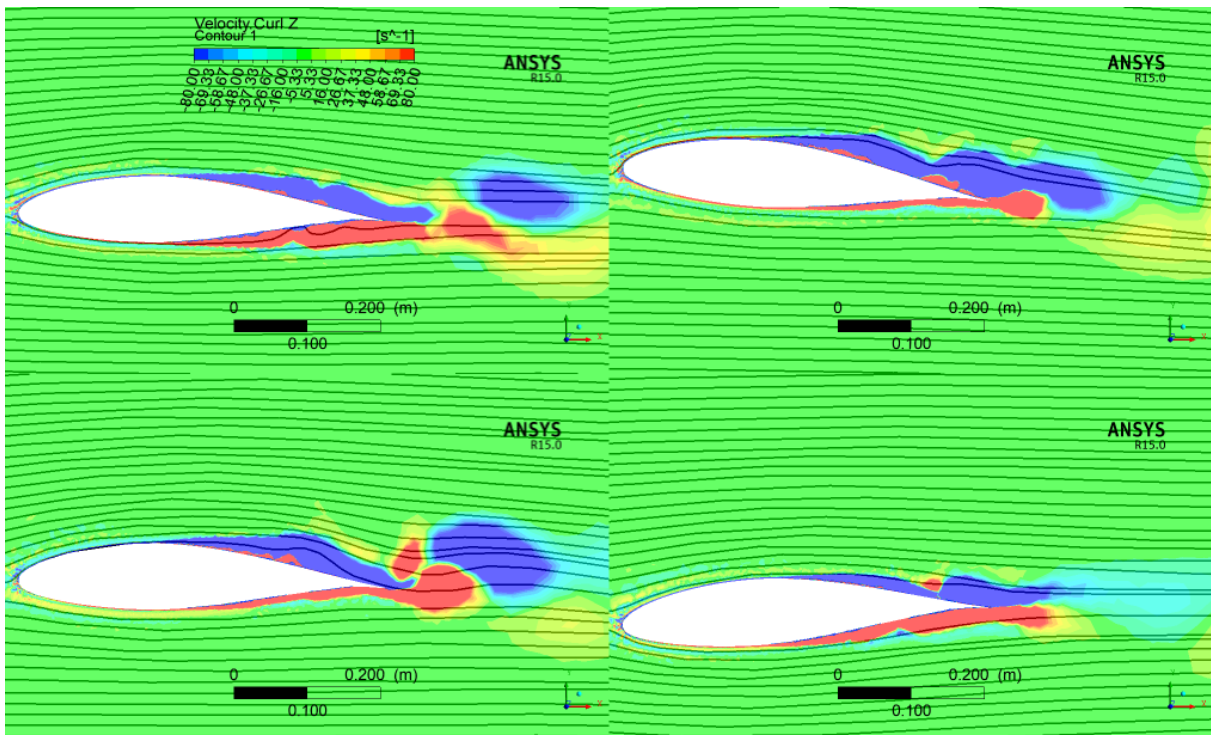
Οι συχνότητες γραμμικής και περιστροφικής ταλάντωσης εδώ είναι ίσες μεταξύ τους $f_h = f_\theta = 1$ Hz, και αντιστοιχούν σε αριθμό Strouhal, $S = f c / U_\infty = 0.019$. Τα πλάτη γραμμικής και περιστροφικής ταλάντωσης είναι $\hat{h}/c = 0.01$ και $\hat{\theta} = 4^\circ$ αντιστοίχως. Η περιστροφή γίνεται ως προς ένα σταθερό σημείο στο $1/4$ της χορδής ενώ οι ταλαντώσεις είναι γύρω από μια αρχική γωνία προσβολής $\theta_0 = 1^\circ$. Μελετήθηκαν δύο διαφορές φάσης μεταξύ της γραμμικής και περιστροφικής κίνησης, $\phi = 0$ και $\pi/2$. Οι παραπάνω συνθήκες είναι όμοιες με αυτές των εργαστηριακών μετρήσεων των Γκιόλα *et al.* (2016) με τις οποίες θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Όπως έγινε και στην περίπτωση σταθερής αεροτομής, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα από προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$.

3.2.1 Συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική ταλάντωση με $\phi = 0$

Το πεδίο ροής γύρω από κινούμενη αεροτομή για μηδενική διαφορά φάσης από προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης παρουσιάζονται αντιστοίχως στα Σχήματα 5 και 6. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αφορούν τον τελευταίο (ένατο) πλήρη κύκλο κίνησης της αεροτομής. Όπως και στην περίπτωση σταθερής αεροτομής, παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης δεν εμφανίζεται αστάθεια του πεδίου ροής (Σχήμα 5). Επίσης, στο ίδιο σχήμα δεν είναι εμφανής αποκόλληση της ροής από την επάνω πλευρά της αεροτομής. Αντίθετα, όταν δεν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης παρατηρείται ότι το πεδίο ροής είναι ασταθές και είναι εμφανής η περιοχή αποκόλλησης της ροής ειδικά για το στιγμιότυπο με τη μεγαλύτερη γωνία προσβολής, $\alpha = 5^\circ$ (Σχήμα 6). Είναι επίσης εμφανές ότι ο σχηματισμός δινών και η έκλυση τους στον ομόρρου της αεροτομής λαμβάνει χώρα με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με τη συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης της αεροτομής, κάτι άλλωστε το οποίο είναι αναμενόμενο καθότι η τελευταία αντιστοιχεί σε πολύ χαμηλό αριθμό Strouhal.

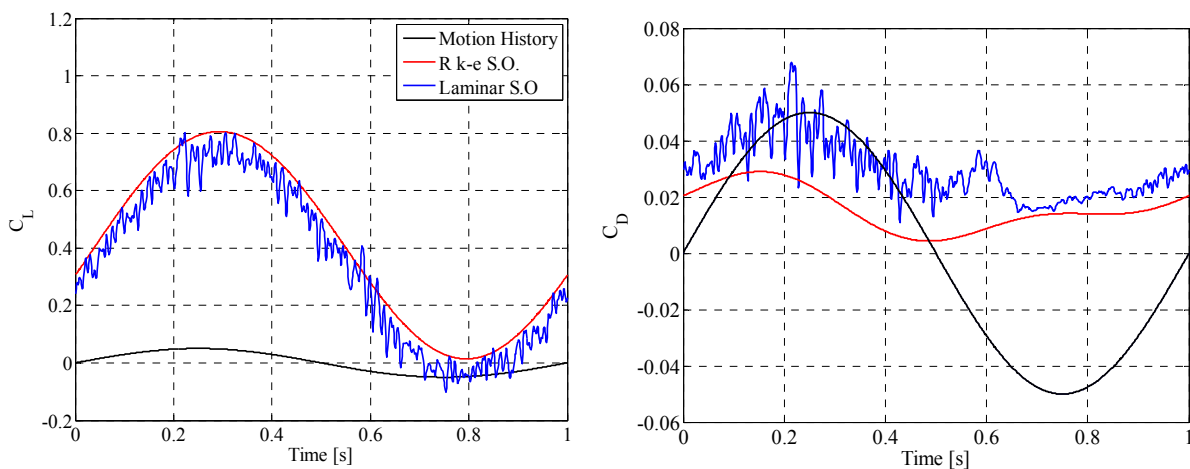


Σχήμα 5. Στιγμιότυπα του πεδίου ροής (ροϊκές γραμμές και κατανομή στροβιλότητας) σε τέσσερα ισαπέχοντα χρονικά σημεία του περιοδικού κύκλου γύρω από περιοδικά κινούμενη αεροτομή για μηδενική διαφορά φάσης ($\phi = 0$) από προσομοιώσεις με το μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$. Τα στιγμιότυπα αντιστοιχούν με ωρολογιακή φορά σε γωνίες προσβολής $\alpha = 1, 5, 1$ και -3° .



Σχήμα 6. Στιγμιότυπα του πεδίου ροής (ροϊκές γραμμές και κατανομή στροβιλότητας) σε τέσσερα ισαπέχοντα χρονικά σημεία του περιοδικού κύκλου γύρω από περιοδικά κινούμενη αεροτομή για μηδενική διαφορά φάσης ($\phi = 0$) από προσομοιώσεις χωρίς μοντέλο τύρβης. Τα στιγμιότυπα αντιστοιχούν με ωρολογιακή φορά σε γωνίες προσβολής $\alpha = 1, 5, 1$ και -3° .

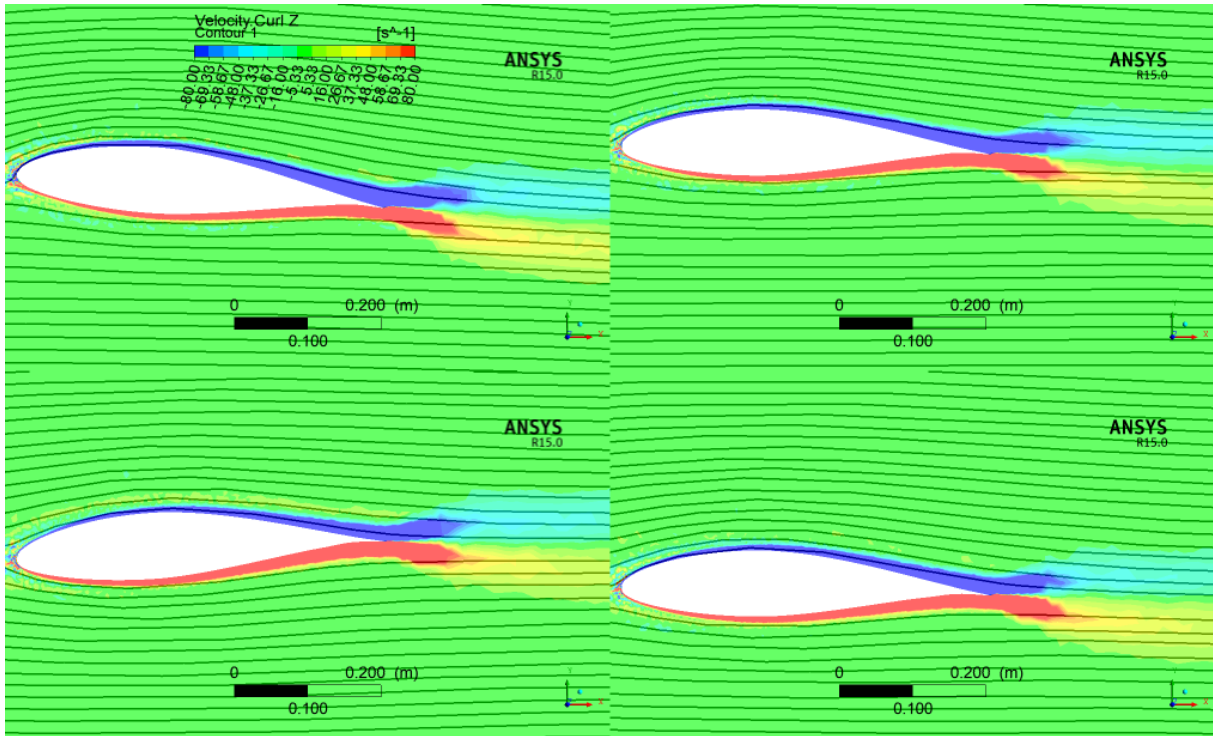
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των συντελεστών άντωσης και αντίστασης. Παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα ότι όταν δεν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης τα ασκούμενα αεροδυναμικά φορτία εμφανίζουν χασοτικές διακυμάνσεις οι οποίες υπερτίθενται στις ομαλές μεταβολές τους λόγω της περιοδικής κίνησης της αεροτομής. Ο κινούμενος μέσος όρος του συντελεστή άντωσης και αντίστασης από τις προσομοιώσεις χωρίς μοντέλο τύρβης φαίνεται να είναι σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες μεταβολές τους με το χρόνο από τις προσομοιώσεις με μοντέλο τύρβης, λαμβάνοντας αντίστοιχα λίγο χαμηλότερες και λίγο υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις προσομοιώσεις με μοντέλο τύρβης. Η χρονική μεταβολή του C_L έχει σχεδόν την ίδια φάση με τη γραμμική και περιστροφική κίνηση της αεροτομής. Η χρονική μεταβολή του C_D (χωρίς μοντέλο τύρβης) παρουσιάζει λιγότερο έντονες διακυμάνσεις κατά το τελευταίο 1/3 του περιοδικού κύκλου, το οποίο ενδεχομένως να υποδηλώνει μια τάση απόσβεσης των ασταθειών στον ομόρρου της αεροτομής. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με το πεδίο ροής στο Σχήμα 6 όπου φαίνεται ότι ελαχιστοποιείται η αποκόλληση της ροής από την επάνω πλευρά της αεροτομής κατά το τελευταίο διάστημα του κύκλου.



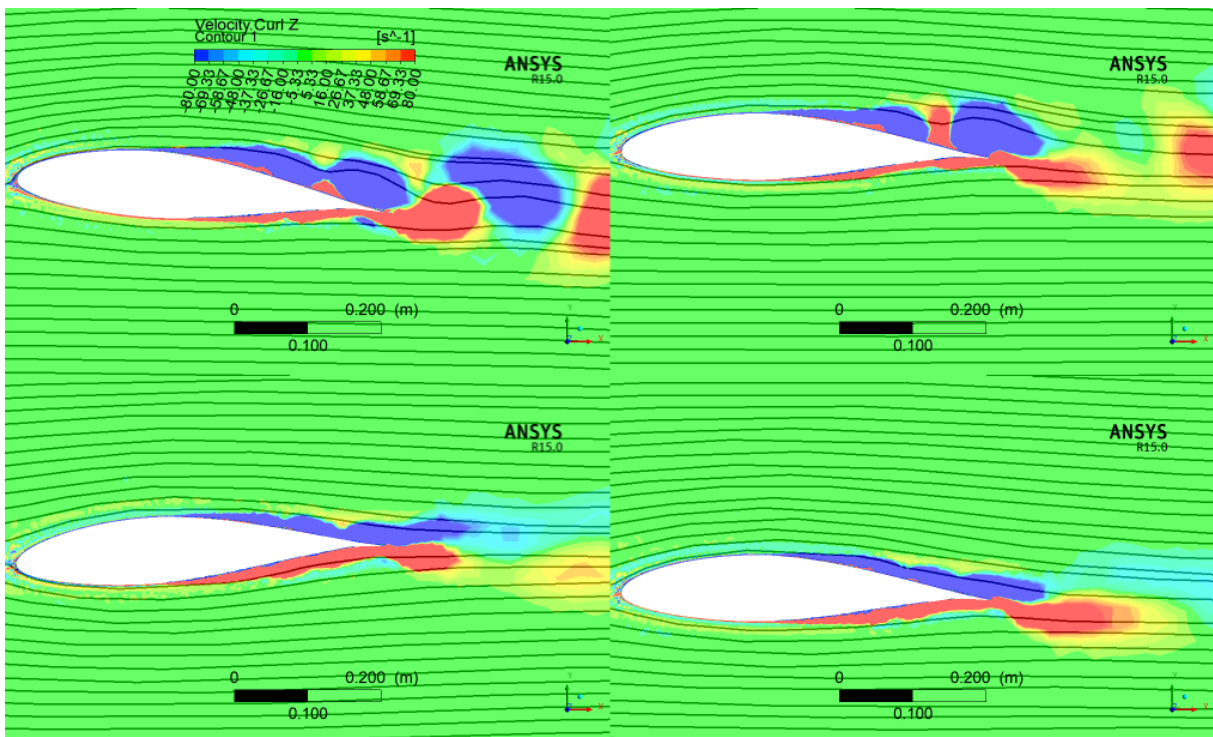
Σχήμα 7. Χρονική εξέλιξη των συντελεστών άντωσης, C_L (αριστερά) και αντίστασης, C_D (δεξιά) από προσομοιώσεις με μοντέλο τύρβης (κόκκινη γραμμή) και χωρίς μοντέλο τύρβης (μπλε γραμμή) για συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική κίνηση με $\phi = 0$. Η μαύρη γραμμή δείχνει τη γραμμική μετατόπιση της αεροτομής με το χρόνο ως σήμα αναφοράς.

3.2.2 Συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική ταλάντωση με $\phi = \pi/2$

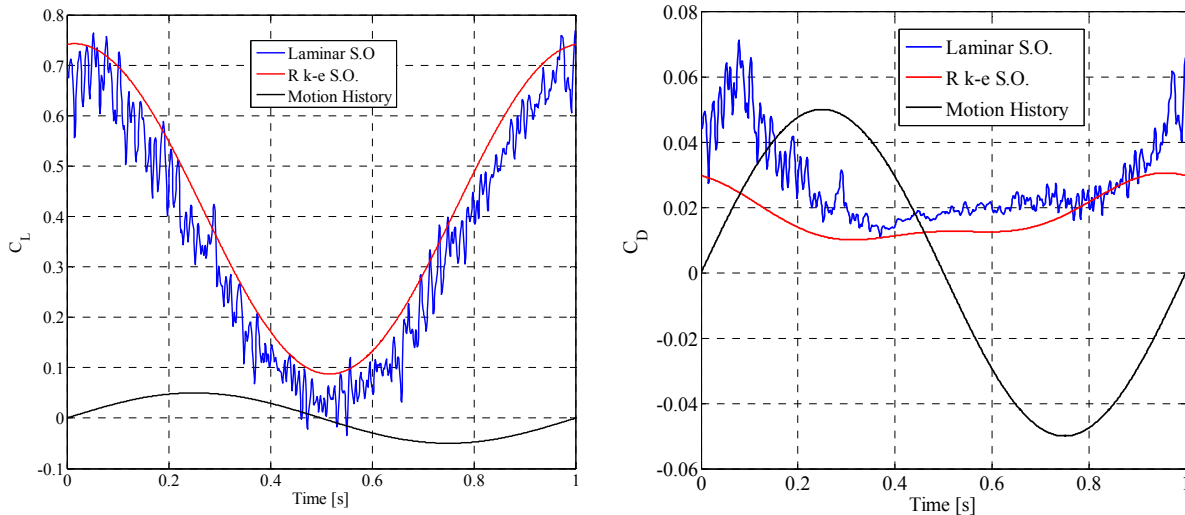
Τα αποτελέσματα για διαφορά φάσης $\phi = \pi/2$ παρουσιάζονται στα Σχήματα 8 έως 10. Όπως και στη περίπτωση μηδενικής διαφοράς φάσης, η σύγκριση των αποτελεσμάτων για το πεδίο ροής από τις προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα, ήτοι η χρήση μοντέλου τύρβης έχει σταθεροποιητική δράση και το οριακό στρώμα τείνει να παραμείνει προσκολλημένο στην επιφάνεια της αεροτομής (Σχήμα 8), ενώ από την άλλη πλευρά η μη-χρήση μοντέλου τύρβης έχει αποσταθεροποιητική δράση και είναι εμφανής η αποκόλληση του οριακού στρώματος (Σχήμα 9). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις δύο διαφορές φάσης από τις προσομοιώσεις χωρίς μοντέλο τύρβης (Σχήματα 7 και 9) παρατηρείται ότι η αποκόλληση της ροής είναι έντονη σε διαφορετικά χρονικά σημεία, τα οποία αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή της αποτελεσματικής γωνίας προσβολής (effective angle of attack, α_{eff}). Αξίζει να σημειωθεί ότι η α_{eff} καθορίζεται κυρίως από την περιστροφική κίνηση της αεροτομής καθώς η γραμμική μετατόπιση έχει συγκριτικά χαμηλή ταχύτητα. Η ανάπτυξη ή μη ασταθειών έχει παρόμοια επίδραση στη χρονική εξέλιξη των αεροδυναμικών συντελεστών όπως και στην περίπτωση μηδενικής διαφοράς φάσης (Σχήμα 10). Η χρονική μεταβολή του C_L έχει πάλι σχεδόν την ίδια φάση με τη περιστροφική κίνηση της αεροτομής, το οποίο υποδηλώνει οιονεί-στατική συμπεριφορά.



Σχήμα 8. Στιγμιότυπα του πεδίου ροής (ροϊκές γραμμές και κατανομή στροβιλότητας) σε τέσσερα ισαπέχοντα χρονικά σημεία του περιοδικού κύκλου γύρω από περιοδικά κινούμενη αεροτομή για μηδενική διαφορά φάσης ($\phi = \pi/2$) από προσομοιώσεις με το μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$. Τα στιγμιότυπα αντιστοιχούν με ωρολογιακή φορά σε γωνίες προσβολής $\alpha = 5, 1, -3$ και 1° .



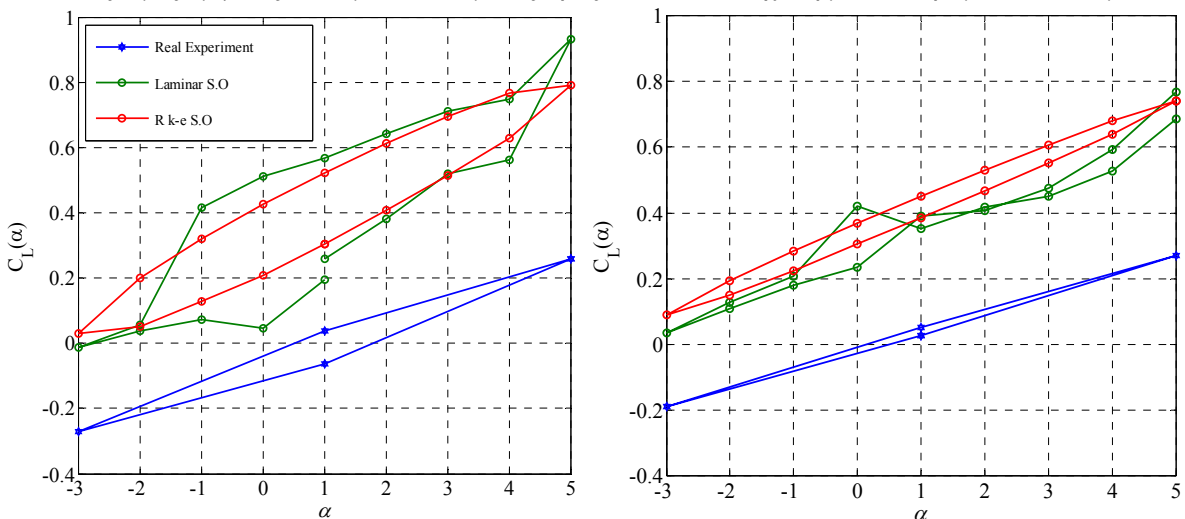
Σχήμα 9. Στιγμιότυπα του πεδίου ροής (ροϊκές γραμμές και κατανομή στροβιλότητας) σε τέσσερα ισαπέχοντα χρονικά σημεία του περιοδικού κύκλου γύρω από περιοδικά κινούμενη αεροτομή για μηδενική διαφορά φάσης ($\phi = 0$) από προσομοιώσεις χωρίς μοντέλο τύρβης. Τα στιγμιότυπα αντιστοιχούν με ωρολογιακή φορά σε γωνίες προσβολής $\alpha = 5, 1, -3$ και 1° .



Σχήμα 10. Χρονική εξέλιξη του συντελεστή άντωσης, C_L (αριστερά) και του συντελεστή αντίστασης, C_D (δεξιά) από προσομοιώσεις με μοντέλο τύρβης (κόκκινη γραμμή) και χωρίς μοντέλο τύρβης (μπλε γραμμή) για συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική κίνηση με $\phi = \pi/2$. Η μαύρη γραμμή δείχνει τη γραμμική μετατόπιση της αεροτομής με το χρόνο ως σήμα αναφοράς.

3.2.3 Σύγκριση με πειράματα

Στο Σχήμα 11 συγκρίνονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης με τα πειραματικά δεδομένα για κινούμενη αεροτομή. Στην περίπτωση $\phi = 0$, ο συντελεστής άντωσης C_L διαγράφει ένα βρόχο με αντί-ωρολογιακή φορά όπως φαίνεται στο αριστερό διάγραμμα. Οι προσομοιώσεις με και χωρίς μοντέλο τύρβης προλέγουν σωστά αυτή τη συμπεριφορά αλλά οι απόλυτες τιμές του συντελεστή άντωσης είναι υψηλότερες σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ στο πείραμα ο C_L παίρνει αρνητικές τιμές για αρνητικές γωνίες προσβολής, κάτι ανάλογο δεν παρατηρείται στις προσομοιώσεις. Όταν δεν χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης, ο βρόχος $C_L(\alpha)$ είναι ανοικτός λόγω της αστάθειας του πεδίου ροής και των μη-απόλυτα περιοδικών επαγόμενων δυνάμεων. Στην περίπτωση $\phi = \pi/2$, ο βρόχος στο διάγραμμα $C_L(\alpha)$ ίσα που διακρίνεται, το οποίο συμφωνεί με την παρατήρηση ότι η συμπεριφορά είναι οιονεί στατική (ψευδό-στατική). Και σε αυτή την περίπτωση, οι προσομοιώσεις προλέγουν ικανοποιητικά το βρόχο $C_L(\alpha)$ αλλά και πάλι οι απόλυτες τιμές εμφανίζονται μετατοπισμένες προς τα πάνω σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 11. Μεταβολή του συντελεστή άντωσης με τη στιγμιαία γωνία προσβολής για αεροτομή που εκτελεί συνδυασμένη γραμμική και περιστροφική κίνηση με διαφορά φάσης $\phi = 0$ (αριστερά) και $\phi = \pi/2$ (δεξιά). Η κόκκινη και η πράσινη γραμμή δείχνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αντιστοίχως με και χωρίς μοντέλο τύρβης ενώ η μπλε γραμμή δείχνει τα πειραματικά δεδομένα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πεδίο ροής γύρω από σταθερή και κινούμενη αεροτομή τύπου NACA64418 σε αριθμό Reynolds 0.85×10^6 . Το συγκεκριμένο πρόβλημα εμφανίζει δυσκολίες στην αντιμετώπιση του καθώς ο αριθμός Reynolds είναι αρκετά υψηλός ώστε να παρουσιαστεί μετάβαση σε τυρβώδες οριακό στρώμα κατά μήκος της χορδής, για τον οποίο λόγο χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις με και χωρίς μοντελοποίηση της τύρβης. Από τη μια πλευρά, η χρήση μοντέλου τύρβης οδήγησε σε υστερημένη αποκόλληση, κάτι το οποίο φαίνεται να είναι σε συμφωνία με τα πειράματα όσον αφορά τη γωνία προσβολής όπου εμφανίζεται απώλεια στήριξης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο τύρβης δεν επιτρέπει την ανάπτυξη ασταθειών στο οριακό στρώμα, το οποίο οδήγησε στη διαμόρφωση σταθερού ομόρρου χωρίς έκλυση δινών. Από την άλλη πλευρά, όταν δεν χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύρβης έγινε εμφανής η ανάπτυξη ασταθειών στο οριακό στρώμα και η περιοδική έκλυση δινών στον ομόρρο της αεροτομής καθώς και η ανάπτυξη χρονικά-μεταβαλλόμενων αεροδυναμικών φορτίων λόγω της αστάθειας του πεδίου ροής. Ωστόσο, η ανάπτυξη των ασταθειών στο οριακό στρώμα φαίνεται να είναι πρόωμη σε σχέση με την πραγματική ροή. Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε προβλήματα αεροελαστικότητας και εξόρυξης της κινητικής ενέργειας, η αδυναμία πρόβλεψης του μη-μόνιμου πεδίου ροής ενδέχεται να οδηγήσει σε λιγότερο αξιόπιστα συμπεράσματα ως προς τη φυσική των φαινομένων και τη μεταφερόμενη ενέργεια μεταξύ αεροτομής και ροής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τον καθηγητή κ. Δημήτριο Μαθιουλάκη και τους υποψήφιους διδάκτορες κκ. Δημήτριο Γκόλια και Δημήτριο Γιασεμίδη για την διάθεση των πειραματικών δεδομένων από μετρήσεις στην αεροδυναμική σήραγγα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γκιόλας, Δ., Γιασεμίδης, Δ. και Μαθιουλάκης, Δ. (2016) “Πειραματική μελέτη ροής γύρω από περιοδικά κινούμενη πτέρυγα,” 10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών, ΡΟΗ 2016, 2-3 Δεκεμβρίου, Πάτρα.

Kinsey T, and Dumas G. (2008) “Parametric study of an oscillating airfoil in a power extraction regime,” AIAA J 46(6):1318–1330, <https://dx.doi.org/10.2514/1.26253>.

Xiao, Q. and Zhu, Q. (2014) “A review on flow energy harvesters based on flapping foils,” J. Fluids Struct. 46: 174-191, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.01.002>.