

Πειραματική μελέτη αυτοδιεγερόμενων ταλαντώσεων πτέρυγας

Δημήτριος Γκιόλας, υποψήφιος διδάκτορας
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 7, Ζωγράφος 15773, Αθήνα
gkio.dimitris@gmail.com

Παναγιώτης Καπίρης, υποψήφιος διδάκτορας
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 7, Ζωγράφος 15773, Αθήνα
pkapiris@gmail.com

Δημήτριος Μαθιουλάκης, καθηγητής
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 7, Ζωγράφος 15773, Αθήνα
mathew@fluid.mech.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάζονται σε υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από αυτοταλαντούμενη πτέρυγα (NACA 64418, μήκους εκπετάσματος=1400 mm και μήκους χορδής=500 mm). Η πτέρυγα είναι τοποθετημένη σε βάση που της επιτρέπει μέσω ζεύγους ελατηρίων να εκτελεί ταυτόχρονα στρεπτική ταλάντωση (pitching) και γραμμική (plunging). Τοποθετώντας την πτέρυγα υπό γωνία πρόσπτωσης 15° και αυξάνοντας προοδευτικά την ταχύτητα του ρεύματος του αέρα, η πτέρυγα τίθεται σε αυτοταλάντωση με συχνότητα 3.5 Hz (που προκύπτει από την ταλαντούμενη μάζα και τις σταθερές των ελατηρίων) και σταθερό πλάτος το οποίο δεν εξαρτάται μονοσήμαντα από την ταχύτητα του αέρα. Χρησιμοποιώντας σύστημα 2D PIV με δυο κάμερες έγιναν εν φάσει μετρήσεις του πεδίου ταχυτήτων στην πλευρά υποπίεσεων στο μέτωπο προσβολής κοντά στο μέσον του μήκους του εκπετάσματος για αδιάστατη συχνότητα $k=0.40$ και $Re=4.3 \times 10^5$. Επίσης, χρησιμοποιώντας 30 αισθητήρες τύπου πιεζοαντίστασης στο μέσον του εκπετάσματος κατά μήκος της χορδής, έγινε καταγραφή του μη μόνιμου πεδίου πιέσεων για $k=0.36$ και $Re=4.8 \times 10^5$. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ροή παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά δυναμικής απώλειας στήριξης (dynamic stall) και συγκεκριμένα κατά την αύξηση της γωνίας pitching η ροή να είναι προσκολλημένη ενώ κατά τη φάση της μείωσης η ροής αποκολλάται από το μέτωπο προσβολής εκλύοντας δίνες διαφόρων μεγεθών (περίπτωση deep stall). Αντίστοιχα συμπεράσματα προέκυψαν από την κατανομή πιέσεων βάσει των οποίων υπολογίστηκε η άνωση συναρτήσει της γωνίας παρουσιάζοντας τον γνωστό βρόχο υστέρησης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πτερυγισμός (flutter) μιας πτέρυγας εκτεθειμένης σε ρεύμα ρευστού είναι ένα αεροδυναμικό φαινόμενο χαρακτηριζόμενο από αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις σταθερού ή μεταβλητού πλάτους της πτέρυγας. Το φαινόμενο αυτό θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνο δεδομένου ότι μπορεί να προκαλέσει κόπωση του υλικού ή ακόμη και καταστροφή της πτέρυγας στην περίπτωση ανεξέλεγκτης αύξησης του πλάτους ταλάντωσής της. Είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ρευστού με την

πτέρυγα στην περίπτωση που αυτή μπορεί να υποστεί ελαστική παραμόρφωση από τα ασκούμενα αεροδυναμικά φορτία ή να μετατοπιστεί λόγω ελαστικής έδρασης. Στην περίπτωση του λεγόμενου stall flutter που εξετάζεται στην εργασία αυτή, εμφανίζονται ταλαντώσεις σταθερού πλάτους (Limit Cycle Oscillations) οφειλόμενες στην περιοδική αποκόλληση και επανακόλληση της ροής από την επιφάνεια της πτέρυγας (dynamic stall, βλ. McCroskey 1981).

Μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με το φαινόμενο του πτερυγισμού (π.χ. Halfman et al 1951, Ham and Young 1966) αλλά λόγω της μη γραμμικότητάς του δεν είναι εύκολος ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής της ταχύτητας της ροής εμφάνισης του φαινομένου καθώς και της πρόλεξης του πλάτους ταλάντωσης. Επιπλέον, μικρές διαταραχές της ταχύτητας της ροής μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο πλάτος ταλάντωσης (Dimitriadis and Li, 2009) ώστε για παράδειγμα για την ίδια ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος να εμφανίζονται διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης, αναλόγως εάν έχει προηγηθεί αύξηση ή μείωση της ταχύτητας αυτής.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά με χρήση υποηχητικής αεροδυναμικής σήραγγας η συμπεριφορά μιας ορθογωνικής πτέρυγας εδραζόμενης ελαστικά, μέσω χρήσης δυο ζευγών ελατηρίων, που της επιτρέπουν ταυτόχρονα μια στρεπτική (pitching) και μια γραμμική (plunging) ταλάντωση. Με τη βοήθεια της μετρητικής τεχνικής 2D PIV και αισθητήρων πίεσης καταγράφεται το χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων στην περιοχή του μέσου του εκπετάσματος της πτέρυγας υπό συνθήκες ταλάντωσης σταθερού πλάτους υπολογίζοντας με εν φάσει μετρήσεις τα αντίστοιχα μέσα πεδία για συγκεκριμένες προεπιλεγμένες φάσεις του περιοδικού κύκλου.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το μοντέλο της πτέρυγας κατασκευάστηκε από 20 τεμάχια αλουμινίου με τη βοήθεια μηχανής CNC ώστε το μήκος του εκπετάσματος να είναι 1000 mm, το μήκος της χορδής 500 mm και το προφίλ της NACA 64-418 (σχ.1).



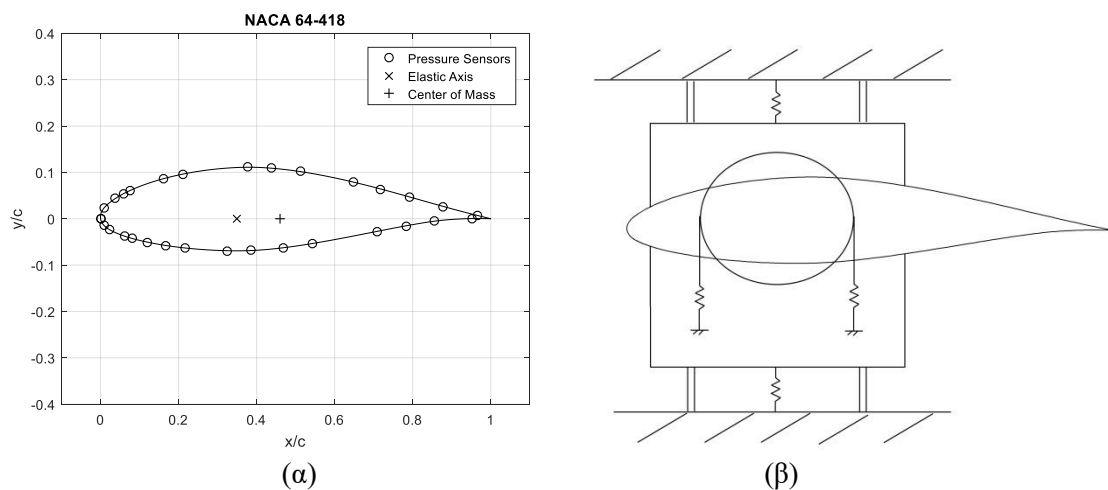
Σχ.1 Η πτέρυγα στην αεροδυναμική σήραγγα του ΕΜΠ

Για την μείωση του βάρους της κατασκευάστηκε κοίλη στο εσωτερικό με πάχος 5 mm κατά το περίγραμμα της αεροτομής με διάφορες ενισχύσεις κατά διαστήματα (σχ.2).



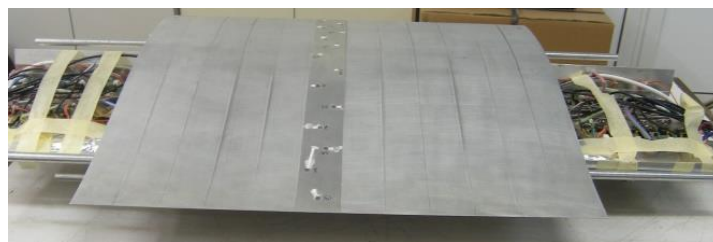
Σχ.2 Τμήμα της πτέρυγας με τοποθετημένους τους αισθητήρες πίεσης

Σε απόσταση 175 mm από το μέτωπο προσβολής προβλέφθηκε η τοποθέτηση άξονα περιστροφής (βλ. **σχ.3**) ενώ στο μέσο του εκπετάσματος ανοίχθηκαν κατάλληλες οπές για την τοποθέτηση 30 αισθητήρων πίεσης (**σχ.4**) οι οποίοι μετατρέπουν απευθείας την πίεση σε ηλεκτρικό σήμα.



Σχ3. Η αεροτομή και οι θέσεις μέτρησης της πίεσης (α). Τα δυο ζεύγη ελατηρίων της βάσης της πτέρυγας (β)

Με τον τρόπο αυτό αποκλείστηκαν τα σφάλματα μείωσης του πλάτους της καταγραφόμενης πίεσης και της γωνίας υστέρησης που εμφανίζονται όταν οι αισθητήρες πίεσης βρίσκονται σε απόσταση από τα σημεία μέτρησης. Περί το μέτωπο προσβολής τοποθετήθηκαν αισθητήρες τύπου Kulite XSC-062 λόγω του κυλινδρικού τους σχήματος και της μικρής σχετικά διαμέτρου τους (1.7 mm) ενώ στο υπόλοιπο τμήμα αισθητήρες τύπου Meggitt 8515C-15 διαμέτρου 6.3 mm. Και τα δυο αυτά είδη αισθητήρων είναι τύπου πιεζοαντίστασης υψηλής ιδιοσυχνότητας (μεγαλύτερη από 100 kHz) ώστε να θεωρούνται κατάλληλοι για τη μέτρηση χρονικά μεταβαλλόμενων πιέσεων. Για τη μέτρηση πιέσεων εύρους 2500 Pa κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο κατάλληλοι ενισχυτές για την ενίσχυση του σήματος των αισθητήρων και τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της πτέρυγας (**σχ. 4**).



Σχ. 4 Οι ενισχυτές των αισθητήρων στο εσωτερικό της πτέρυγας

Οι έξοδοι όλων των αισθητήρων κατέληγαν μέσω πολυπλέκτη σε αναλογικο- ψηφιακό μετατροπέα (A/D) (National Instruments NI 6031 E). Ένας σωλήνας Pitot-static τοποθετημένος ανάντι της πτέρυγας κατέγραφε την στατική p_{∞} και ολική πίεση p_0 του ελεύθερου ρεύματος βάσει των οποίων υπολογίστηκε ο συντελεστής πίεσης:

$$c_p = \frac{(p - p_{\infty})}{(p_0 - p_{\infty})} \quad (1)$$

Η πτέρυγα τοποθετήθηκε στο μικρό τμήμα δοκιμών του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ διατομής διαστάσεων 1800 mm (οριζόντια διάσταση) x 1400 mm (κατακόρυφη διάσταση). Στο τμήμα αυτό το επίπεδο τύρβης δεν υπερβαίνει το 0.2% και η ανομοιομορφία το 2%. Ο άξονας περιστροφής της πτέρυγας ήταν κατακόρυφος και τοποθετημένος σε φορείο (έξω από την σήραγγα) το οποίο μέσω γραμμικών εδράνων μπορούσε να ολισθαίνει οριζόντια και κάθετα προς τον διαμήκη άξονα της σήραγγας. Για τις ανάγκες του αεροελαστικού αυτού πειράματος τοποθετήθηκε ένα ζεύγος ελατηρίων συμπίεσης που εμπόδιζε την ανεξέλεγκτη κίνηση του φορείου και άλλο ένα ζεύγος ελατηρίων έλξης προσαρμοσμένο στον άξονα περιστροφής της πτέρυγας ώστε να περιορίζεται η στρεπτική της ταλάντωση. Το άλλο άκρο της πτέρυγας ήταν ελεύθερο. Οι σταθερές K των δυο διατάξεων υπολογίστηκαν βάσει στατικών βαθμονομήσεων και ήταν 60 kN/m για τη γραμμική μετατόπιση και 293 Nm/rad για τη στρεπτική. Μέσω πειραμάτων ελεύθερης ταλάντωσης καταγράφηκε επίσης η ιδιοσυχνότητα και ο συντελεστής απόσβεσης της στρεπτικής κίνησης που βρέθηκαν 3.39 Hz και 2.83% αντίστοιχα. Η γωνία περιστροφής της πτέρυγας καθώς και η γραμμική της μετατόπιση καταγράφονταν με δυο αισθητήρες σύρματος (Micro-Epsilon wire sensor WDS-150- P60 μέγιστου μήκους μετατόπισης 150 mm).

Το μη μόνιμο πεδίο ταχυτήτων μετρήθηκε με την τεχνική 2D PIV σε ένα οριζόντιο επίπεδο περί το μέσον του εκπετάσματος στην πλευρά υποπίεσεων της πτέρυγας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο κάμερες του συστήματος stereo PIV του εργαστηρίου, η μια δίπλα στην άλλη, καταγράφοντας το πεδίο διαστάσεων 190 mm x 100 mm περί το μέτωπο προσβολής της πτέρυγας. Οι κάμερες και η πηγή Laser του PIV ενεργοποιούνται με τη βοήθεια παλμού ηλεκτρικής τάσης που παρήγαγε ένας μικροελεγκτής Arduino όταν η γωνία pitching της αεροτομής έπαιρνε μια συγκεκριμένη τιμή. Με τον τρόπο αυτό έγινε καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων σε συγκεκριμένες στιγμές της περιόδου της κίνησης από τις οποίες προέκυψαν τα αντίστοιχα μέσα πεδία. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το εμπορικό λογισμικό INSIGHT 4G, TSI Inc.) χρησιμοποιώντας 64x64 pixel interrogation windows και 50% overlapping και στις δυο κατευθύνσεις.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή αποτελεί συνέχεια προηγούμενης προσπάθειας όπου η μελέτη του φαινομένου του πτερυγισμού είχε βασιστεί στη μέτρηση πιέσεων. Εδώ γίνεται επιπλέον η χρήση της τεχνικής PIV για την καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων σε συγκεκριμένες φάσεις του περιοδικού φαινομένου.

Για να περιοριστεί η επίδραση των εκλυομένων δινών από τα άκρα του πτερυγίου, τοποθετήθηκαν στο διάκενο μεταξύ του πτερυγίου και του άνω και κάτω τοιχώματος της σήραγγας ξύλινες προεκτάσεις με το ίδιο προφίλ (σχ.5). Με τον τρόπο αυτό η μάζα του πτερυγίου δεν αυξήθηκε σημαντικά (από 30.5 kg σε 35 kg) ενώ το διάκενο μειώθηκε σε 6 mm περίπου. Σημειώνεται ότι το κέντρο μάζας της πτέρυγας βρίσκεται σε απόσταση 46% της χορδής από το μέτωπο προσβολής ή 11% κατάντι του άξονα περιστροφής της πτέρυγας.

Η πτέρυγα τοποθετήθηκε αρχικά σε γωνία πρόσπτωσης 15° και η ταχύτητα της σήραγγας αυξήθηκε προοδευτικά. Όταν άρχισε η αυτοταλάντωση της πτέρυγας γύρω από τον άξονά της με μικρά αλλά όχι σταθερά πλάτη για μια δυναμική πίεση 110 Pa (ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος $U = 13.55$ m/s, αριθμός $Re = 4.3 \times 10^5$) δόθηκε μια στιγμιαία αύξηση στην γωνία πρόσπτωσης εξωτερικά και μετά αφέθηκε ελεύθερη θέτοντάς την σε μια περιοδική κίνηση με σταθερά πλάτη και ως προς την στρεπτική και ως προς τη γραμμική της ταλάντωση. Η ταλάντωση της πτέρυγας διατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος δηλαδή για διάστημα δυο περίπου ωρών με συχνότητα ταλάντωσης 3.5 Hz που αντιστοιχεί σε αδιάστατη συχνότητα $k = \pi f c / U = 0.40$. Το πλάτος της στρεπτικής ταλάντωσης ήταν 5°

ώστε η γωνία της πτέρυγας ως προς το ελεύθερο ρεύμα να μεταβάλλεται μεταξύ 10.5° και 20.5° ενώ το πλάτος της γραμμικής ταλάντωσης ήταν 1.5 mm (μέγιστη διαδρομή 3 mm).



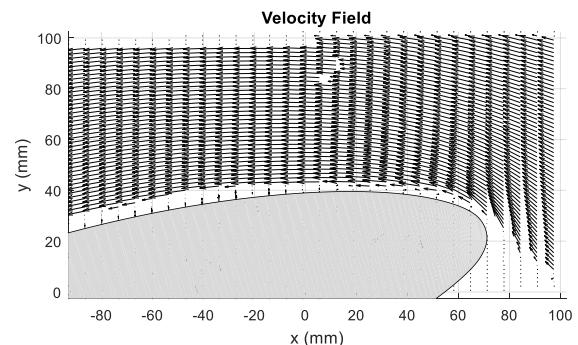
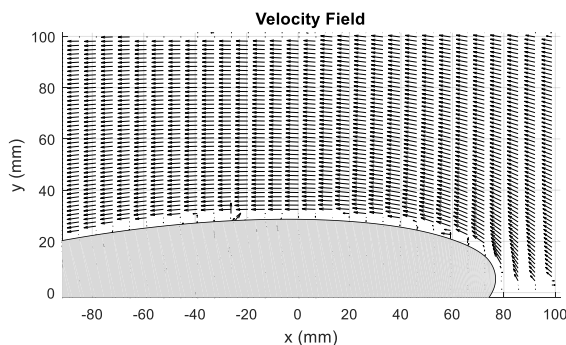
Σχ. 5 Η πτέρυγα με τις προεκτάσεις τοποθετημένη στην αεροδυναμική σήραγγα

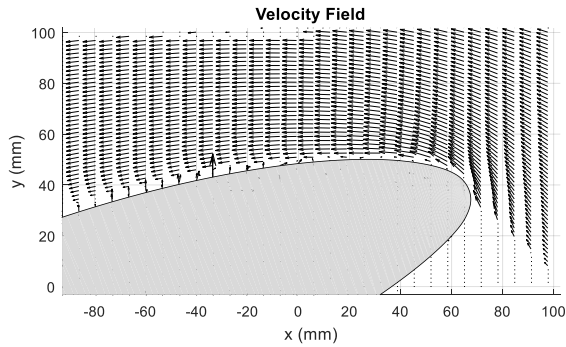
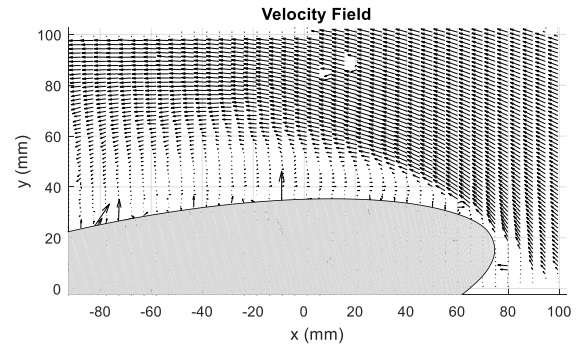
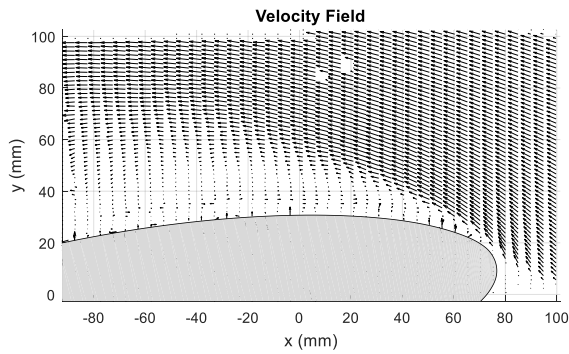
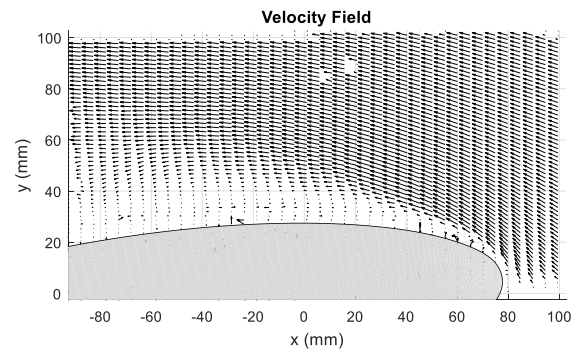
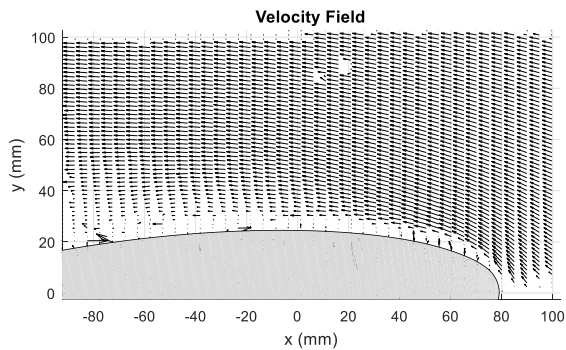
Λόγω της ταλάντωσης της πτέρυγας με σταθερά πλάτη και της σχετικά χαμηλής ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος δόθηκε ο χρόνος για διεξαγωγή μετρήσεων PIV χωρίς την ύπαρξη κινδύνου για την ασφάλεια της πειραματικής διάταξης. Πρέπει να τονιστεί ότι σε μεγαλύτερες ταχύτητες ελεύθερου ρεύματος το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνει εκθετικά με αποτέλεσμα τον τερματισμό των μετρήσεων για την προστασία του μοντέλου.

Χρησιμοποιώντας το σύστημα PIV μετρήθηκαν 50 πεδία ταχυτήτων για κάθε προεπιλεγμένη στρεπτική (pitching) γωνία της πτέρυγας βάσει των οποίων υπολογίστηκε το αντίστοιχο μέσο πεδίο. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα μέσα πεδία ταχυτήτων για 7 γωνίες, εκ των οποίων οι τρεις αναφέρονται στη φάση αύξησης της στρεπτικής γωνίας της πτέρυγας (upstroke) και οι τέσσερις στη φάση μείωσής της (downstroke). Στο **σχ. 6** παρουσιάζονται τα διανύσματα ταχύτητας και στο **σχ.7** τα μέτρα της.

$\theta=12.10^{\circ}$, upstroke

$\theta=15.63^{\circ}$, upstroke

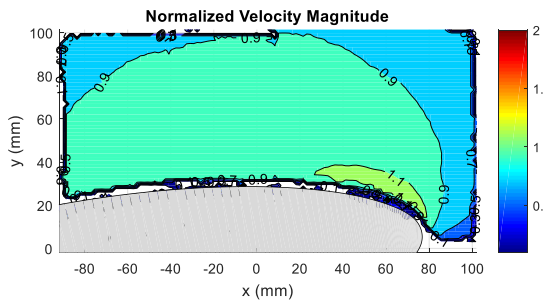
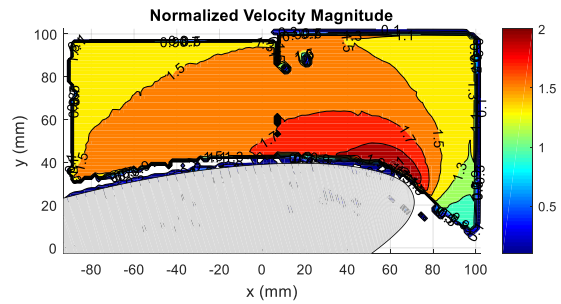
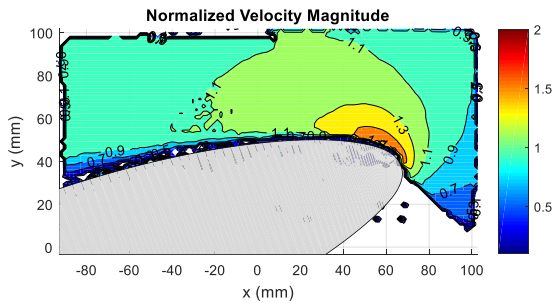
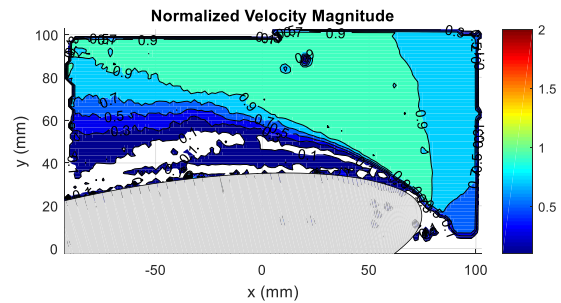
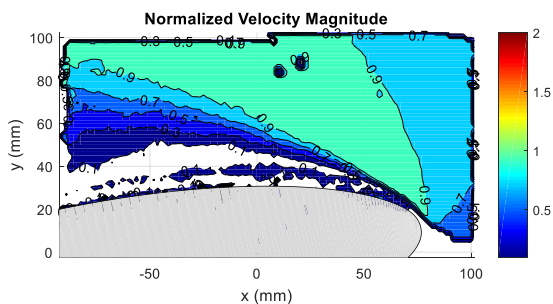
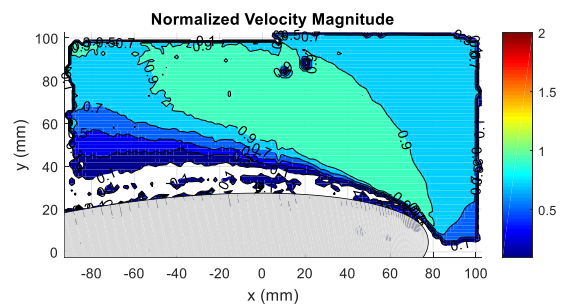


$\theta=19.68^\circ$, upstroke $\theta=17.11^\circ$, downstroke $\theta=15.66^\circ$, downstroke $\theta=14.21^\circ$, downstroke $\theta=12.70^\circ$, downstroke

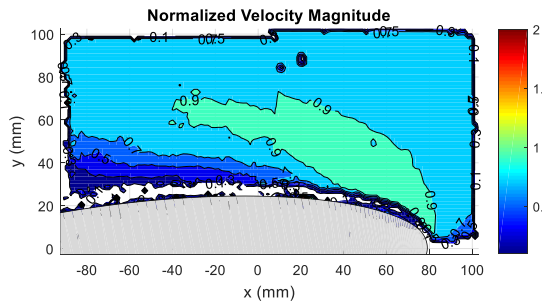
Σχ.6 Μέσο πεδίο ταχυτήτων σε διαφορετικές φάσεις της ταλάντωσης

Η πτέρυγα βρίσκεται στην κάτω πλευρά του κάθε σχήματος και η κατεύθυνση της ελεύθερης ροής είναι από δεξιά προς τα αριστερά. Βάσει των δυο αυτών σχημάτων διαπιστώνεται ότι κατά την φάση upstroke (από 10° προς 20°) η ροή είναι προσκολλημένη, επιταχυνόμενη περί το μέσον της διαδρομής (γωνία 15.6°) ώστε σε μια περιοχή εύρους 5% του μήκους της χορδής στο μέτωπο προσβολής να είναι μεγαλύτερη από διπλάσια του ελεύθερου ρεύματος ενώ λίγο πριν την μέγιστη γωνία δηλ για γωνία 19.7° να επιβραδύνεται πάλι. Κατά την φάση downstroke παρουσιάζεται μια εντυπωσιακή μεταβολή του πεδίου ροής ώστε η ροή πλέον να είναι έντονα αποκολλημένη από το μέτωπο προσβολής (γωνία

17.1⁰) και η εικόνα αυτή να διατηρείται και σε μικρότερες γωνίες (15.6⁰ και 14.2⁰) ενώ στη μικρότερη γωνία 12.7⁰ να τείνει να επανακολληθεί. Το χρονικά μεταβαλλόμενο αυτό πεδίο ροής σύμφωνα με τον McCroskey (1981) χαρακτηρίζεται ως η περίπτωση dynamic stall όπου η ροή είναι deep stall δηλαδή η ροή αποκολλάται κατά την downstroke φάση από το μέτωπο προσβολής προκαλώντας την έκλυση δινών οι οποίες κινούμενες κατάντι επηρεάζουν την άνωση της πτέρυγας. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης η περίπτωση αποκόλλησης της ροής μόνον κοντά στην ακμή φυγής όπου το σημείο αποκόλλησης μεταβάλλεται χρονικά και όχι με κάποιον περιοδικό τρόπο σημειώνοντας ότι στην περίπτωση αυτή το πλάτος της ταλάντωσης είναι μικρό και όχι τόσο σταθερό (Razak et al 2011).

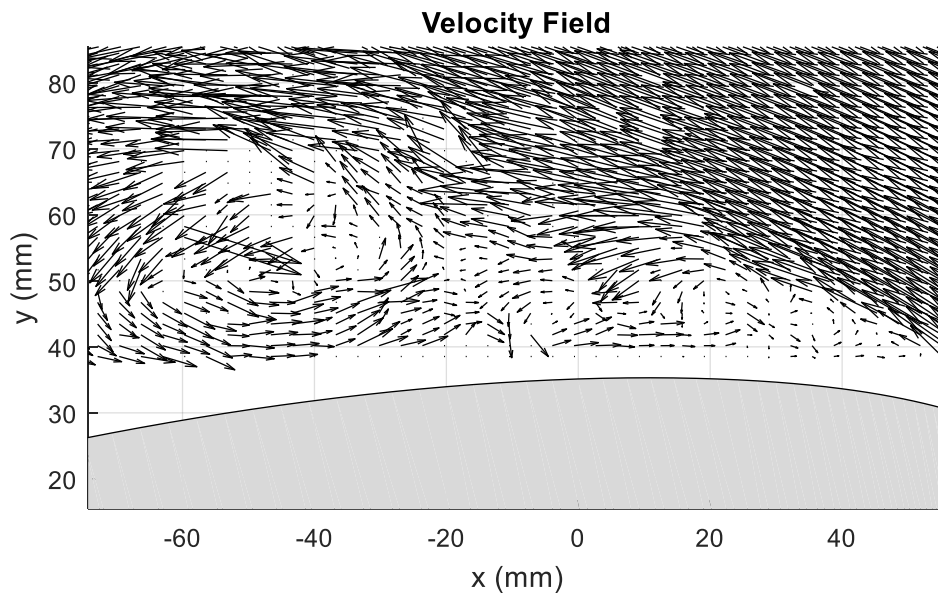
 $\theta=12.10^\circ$, upstroke $\theta=15.63^\circ$, upstroke $\theta=19.68^\circ$, upstroke $\theta=17.11^\circ$, downstroke $\theta=15.66^\circ$, downstroke $\theta=14.21^\circ$, downstroke

$\theta=12.70^\circ$, downstroke



Σχ.7 Ισοϋψείς καμπύλες αδιαστατοποιημένων μέτρων ταχύτητας σε διαφορετικές φάσεις της ταλάντωσης

Η δεύτερη αυτή περίπτωση δεν παρατηρήθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος αυτού. Η παρουσία δινών διαφόρων διαστάσεων (1 cm έως 4 cm) κατά τη φάση downstroke φαίνεται με σαφήνεια στο **σχ.8** όπου παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της ροής για τη γωνία 17.1° .

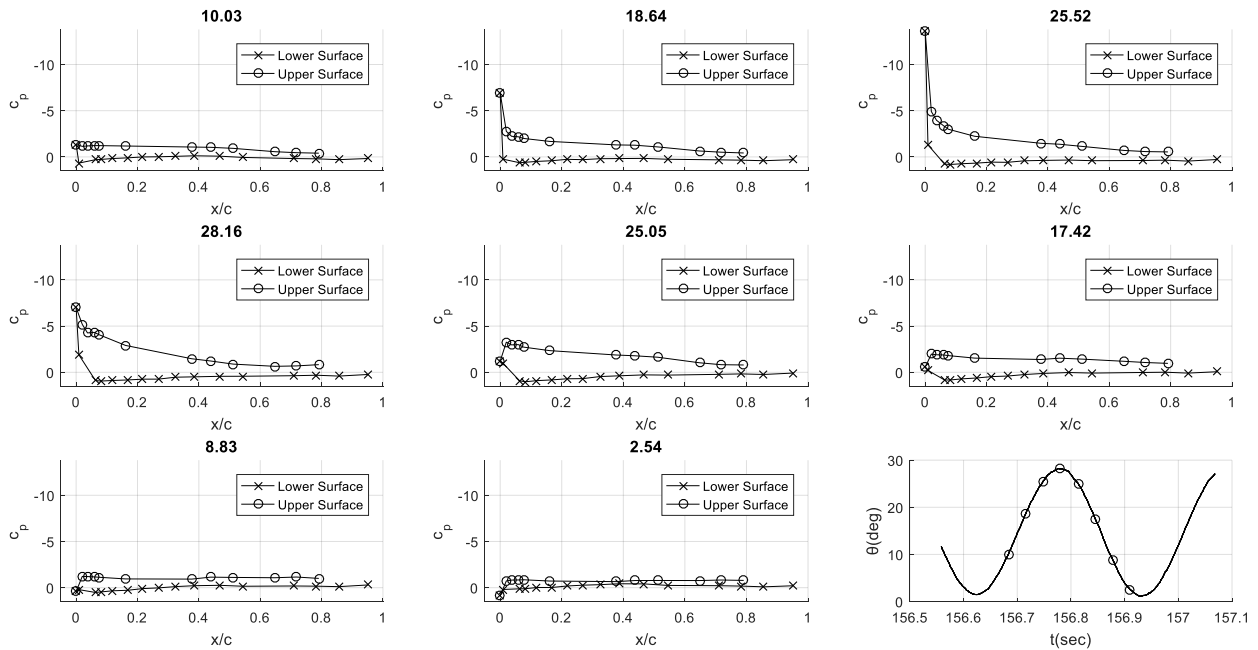


Σχ.8 Στιγμαίο πεδίο ταχυτήτων σε μειούμενη γωνία 17.1°

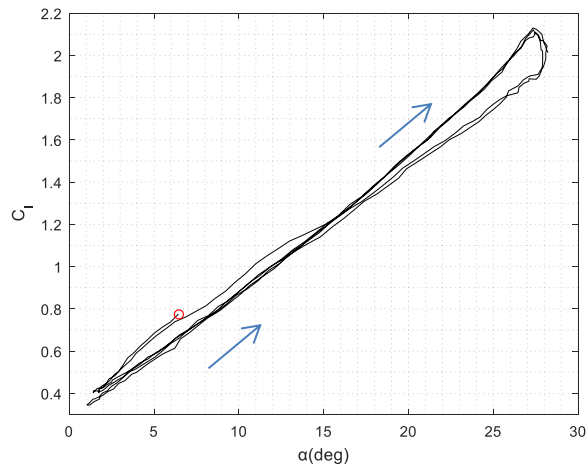
Για την προστασία των αισθητήρων πίεσης από το χρησιμοποιούμενο λάδι κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων ταχύτητας με την τεχνική PIV, οι αισθητήρες ήταν καλυμμένοι και επομένως δεν ήταν δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση ταχυτήτων και πιέσεων. Επαναλαμβάνοντας το πείραμα άλλη μέρα διαπιστώθηκε ότι ενώ οι συνθήκες όσον αφορά τον τρόπο στήριξης της πτέρυγας και την θερμοκρασία του αέρα ήταν οι ίδιες, οι ταλαντώσεις της πτέρυγας εμφανίστηκαν σε μεγαλύτερη ταχύτητα και συγκεκριμένα για δυναμική πίεση 138 Pa ($U=15.18$ m/s, $Re=4.8 \times 10^5$) και με την ίδια συχνότητα ($f=3.5$ Hz) ώστε αυτή τη φορά η αδιάστατη συχνότητα να είναι μικρότερη δηλ $k=0.36$. Η

συχνότητα ταλάντωσης παρέμεινε σταθερή διότι αυτή εξαρτάται από τη μάζα της πτέρυγας και τις σταθερές των ελατηρίων που προφανώς δεν άλλαξαν. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι αυτή τη φορά το πλάτος της στρεπτικής γωνίας ταλάντωσης της πτέρυγας ήταν σχεδόν τριπλάσιο μεταβαλλόμενο από 1.7° σε 28.1° δηλ με πλάτος 13.2° γύρω από τη μέση τιμή των 14.9° . Αυτό το φαινόμενο θα διερευνηθεί περαιτέρω στο επόμενο χρονικό διάστημα δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποια προφανής ερμηνεία του. Στο **σχ. 9** παρουσιάζονται οι κατανομές του συντελεστή πίεσης κατά μήκος της χορδής για οκτώ χρονικές στιγμές της περιόδου της κίνησης, τέσσερις κατά την αύξηση της γωνίας και τέσσερις κατά την μείωσή της.

Κατά την φάση αύξησης της στρεπτικής γωνίας (γωνίες 10.03° , 18.64° , 25.52°) παρατηρείται σημαντική μείωση των πιέσεων στην πλευρά υποπίεσεων της πτέρυγας ανάντι του μέσου της χορδής της που προφανώς σχετίζεται με την επιτάχυνση και επανακόλληση της ροής όπως πιστοποιήθηκε και από την τεχνική του PIV. Κατά την φάση μείωσης της γωνίας, οι πιέσεις αντίθετα αυξάνονται στην ίδια περιοχή ενώ η μεγάλη κλίση της πίεσης κατά μήκος της χορδής που υπήρχε πριν τώρα ελατώνεται σηματοδοτώντας την εμφάνιση αποκόλλησης της ροής. Ολοκληρώνοντας τις πιέσεις έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή άνωσης c_l ο οποίος παρουσιάζεται στο **σχ. 10** με τον χαρακτηριστικό βρόχο υστέρησης.



Σχ.9 Κατανομή πιέσεων σε διαφορετικές φάσεις της ταλάντωσης



Σχ.10 Sectional C_l – pitching angle during oscillation

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της πειραματικής αυτής εργασίας μελετήθηκαν χαρακτηριστικά της ροής γύρω από αυτοταλαντούμενη πτέρυγα εδραζόμενη σε βάση που της επέτρεπε να εκτελεί ταυτόχρονα στρεπτική (pitching) και γραμμική ταλάντωση (plunging) μέσα σε υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα μέσω δυο ζευγών ελατηρίων. Τοποθετώντας την πτέρυγα (αεροτομής NACA 64418) υπό γωνία πρόσπτωσης 15° και αυξάνοντας προοδευτικά την ταχύτητα του ρεύματος του αέρα τέθηκε σε αυτοταλάντωση σταθερής συχνότητας 3.5 Hz. Μέσω συστήματος PIV καταγράφηκε το πεδίο ταχυτήτων στην περιοχή του μετώπου προσβολής της πλευράς χαμηλών πιέσεων σε συγκεκριμένες φάσεις της περιοδικής κίνησης. Παρατηρήθηκε ότι κατά την αύξηση της στρεπτικής γωνίας η ροή είναι προσκολλημένη και επιταχυνόμενη ενώ κατά την μείωσή της αποκολλάται από το μέτωπο προσβολής εκλύοντας δίνες διαφόρων διαστάσεων. Δηλ παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του φαινομένου dynamic stall και μάλιστα ιδιαίτερα τα χαρακτηριστικά του deep stall. Με χρήση αισθητήρων πίεσης έγινε η καταγραφή των πιέσεων στο μέσο του εκπετάσματος της πτέρυγας από τις οποίες αποτυπώθηκε η χρονική εξέλιξη του φαινομένου και ο υπολογισμός του βρόχου υστέρησης άνωσης-γωνίας. Παράλληλα διαπιστώθηκε ότι το πλάτος ταλάντωσης της πτέρυγας και η ταχύτητα της ροής δεν αποτελεί μονοσήμαντη συνάρτηση λόγω της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Αναφορές

- Dimitriadis, G., and Li, J., “Bifurcation Behavior of an Airfoil Undergoing Stall Flutter Oscillations in a Low Speed Wind Tunnel.” AIAA Journal, Vol. 47, No. 11 (2009), pp. 2577–2596. doi:10.2514/1.39571
- Halfman, R. L., Johnson, H. C., and Haley, S. M., “Evaluation of High Angle-of-Attack Aerodynamic Derivative Data and Stall Flutter Prediction Techniques.” NACA TN 2533, 1951
- Ham, N. D., and Young, M. I. “Limit Cycle Torsional Motion of Helicopter Blades due to Stall.” Journal of Sound and Vibration, Vol. 4, No. 3 (1966), pp. 431–432
- McCroskey, W. J. “The Phenomenon of Dynamic Stall.” NASA TM 81264, 1981
- Norizham, R. A., Andrianne, T., and Dimitriadis., G. “Flutter and stall flutter of a rectangular wing in a wind tunnel.” AIAA journal 49.10 (2011): 2258-2271.
- Ramasamy, M., Wilson, J. S., McCroskey, W. J., and Marting, P. B. “Characterizing Cycle-to-Cycle Variations in Dynamic Stall Measurements.” J. of the American Helicopter Society 63 (2018), pp. 022002-1, 022002-25.