

## ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ-ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΤΑΝΤΙ ΠΤΕΡΩΤΗΣ

Ε. Σταπουντζής, Κ. Υάκινθος, Α. Γούλας  
Γ. Χαραλάμπους

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Θυρίδα 443, Θεσσαλονίκη 540 06, Ελλάδα. Τηλ./fax: 0030 31 996033  
Email:erikos@eng.auth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά και αριθμητικά η επίδραση του απορεύματος ενός κυλίνδρου, στο φορτίο και το ροϊκό πεδίο μίας συμμετρικής πτέρυγας τοποθετημένης κατάντι του κυλίνδρου. Ο συντελεστής άνωσης της πτέρυγας μειώνεται αισθητά από την παρουσία του κυλίνδρου στο επίπεδο συμμετρίας αλλά λιγότερο όταν ο κύλινδρος τοποθετείται ασύμμετρα. Επιπλέον, η προσθήκη κλίσης ταχύτητας στη ροή, αναιρεί σταδιακά τα ανωτέρω φαινόμενα.

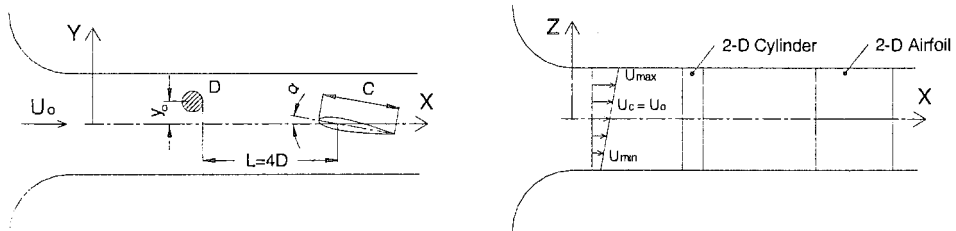
### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τελευταία, υπάρχει ενδιαφέρον για ανεμογεννήτριες κατάντι πτερωτής, οι οποίες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων όπως: α) δυνατότητα χρησιμοποίησης ελαστικών πτερωτών χωρίς περιορισμούς απόστασης από τον πύργο στήριξης β) μικρότερη διαταραχή στην ευαίσθητη πλευρά αναρρόφησης των πτερυγίων του ρότορα από το απόρευμα του και γ) φθηνότερος μηχανισμός προσανατολισμού. Η παρούσα εργασία είναι μέρος μόνο μίας ευρύτερης δραστηριότητας που ασχολείται με την αεροδυναμική αλληλεπίδραση του απορεύματος του πύργου στήριξης και των πτερυγίων του ρότορα. Ουσιαστικά είναι μία αναθεώρηση του προβλήματος μιας διαχωριστικής πλάκας πίσω από έναν κύλινδρο [1],[2]. Μερικά βασικά ερωτήματα εμφανίστηκαν: α) Είναι οι λεπτομέρειες της περιοχής δημιουργίας δινών [3] πίσω από τον κύλινδρο σημαντικές για την κατανομή της πίεσης επάνω στην πτέρυγα. β) Ποια είναι η επίδραση των εμφανιζομένων τριδιάστατων δομών στην διεύθυνση του εκπετάσματος της πτέρυγας ; Εργαστηριακές έρευνες για κάθε μία από αυτές της ροές με απομονωμένο κύλινδρο [4],[5],[6] έδειξαν την παρουσία σκέδασης δινών σε κύτταρα κατά την διεύθυνση του εκπετάσματος του κυλίνδρου, ενώ ο συνδυασμός κλίσης ταχύτητας, λέπτυνσης, και διαχωριστικής πλάκας μπορεί να οδηγήσουν σε σχεδόν διδιάστατο απόρευμα [2]. Σε αυτή την εργασία μελετάται η επίδραση μιας ισχυρής, σχεδόν ομοιογενούς, κλίσης ταχύτητας στην πλάγια διεύθυνση, σε σχέση με την φόρτιση της

πτέρυγας κατάντι του κυλίνδρου. Τα παρόντα δεδομένα έχουν σκοπό να δείξουν καταρχήν τις βασικές τάσεις αυτής της διάταξης ροής.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το πείραμα έγινε σε αεροσήραγγα αναρρόφησης διατομής  $0.3m \times 0.3m \times 1.8m$  εφοδιασμένη με γεννήτρια τυρβώδους κλίσης ταχύτητας. Η σχετική θέση του διδιάστατου κυλίνδρου και της διδιάστατης αεροτομής φαίνεται στο σχ. 1.



Σχ. 1. Διάταξη της αεροσήραγγας,  $D=60mm$ ,  $c=150mm$ , πτέρυγα NACA0012.

Οι μετρήσεις έγιναν σε αριθμούς Reynolds,  $Re=U_o D/\nu=10^5$  και  $4.5 \times 10^4$  χωρίς κλίση ταχύτητας και σε  $Re=4.5 \times 10^4$  με κλίση ταχύτητας. Στην τελευταία περίπτωση  $dU/dz \approx 44s^{-1}$ . Ο κύλινδρος τοποθετήθηκε σε διάφορες κάθετες θέσεις  $y_o$  π.χ.  $y_o=0.0D$ ,  $y_o=0.25D$  και  $y_o=0.5D$  σε σχέση με την πτέρυγα. Αυτή η γεωμετρική διάταξη αντιπροσωπεύει μία απλουστευμένη προσομοίωση της κίνησης του πτερυγίου του ρότορα πίσω από τον πύργο στήριξης. Στην πραγματικότητα η χορδή του πτερυγίου του ρότορα κοντά στο άκρο του είναι σχεδόν παράλληλη με την διεύθυνση  $z$ , αλλά η γωνία προσβολής είναι μικρή όπως φαίνεται στο σχ. 1. Δεν έγιναν διορθώσεις στις μετρήσεις πίεσης και ταχύτητας όσον αφορά την μείωση της ελεύθερης διατομής της αεροσήραγγας. Έτσι η σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων χρησιμεύει στην αποκάλυψη των συστηματικών σφαλμάτων.

## 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

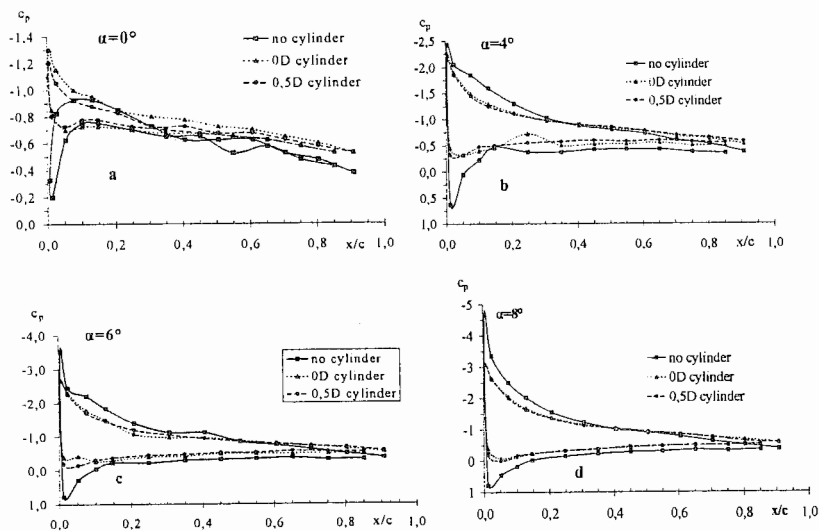
Κατά την υπολογιστική προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένας διδιάστατος κώδικας επίλυσης σταθών ροϊκών πεδίων που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Α.Π.Θ. Ο κώδικας βασίζεται στην τεχνική διόρθωσης της πίεσης και επιλύει τις διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής και συνέχειας στο γενικευμένο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων υπολογίζοντας τις τιμές για της βασικές μεταβλητές  $u, v, p$  (καρτεσιανές ταχύτητες και στατική πίεση ροής) στα κέντρα των όγκων ελέγχου που διαμορφώνουν το πλέγμα προσομοίωσης της ροής με την εισαγωγή της παρεμβολής της ορμής [7], [8], [9]. Οι τυρβώδεις ροές προσομοιώνονται με την εισαγωγή

του κλασσικού μοντέλου τύρβης  $k-\epsilon$ . Εξαιτίας της ασταθούς αλληλεπίδρασης του κυλίνδρου με την πτέρυγα, εισήχθη μια μεταβατική διαδικασία χρονικής επίλυσης του ροϊκού χρησιμοποιώντας χρονικό βήμα  $\Delta t=0.001$  sec. Για κάθε χρονικό βήμα θεωρήθηκε ότι το ροϊκό πεδίο είχε υπολογιστεί ορθώς όταν το σφάλμα μεταβλητών της ροής  $u, v, p, k$  ήταν μικρότερο του  $0.00001$ . Το δομημένο πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την ακριβή προσομοίωση του υπολογιστικού χώρου της πειραματικής διάταξης ήταν τύπου  $C$  με  $50 \times 600$  σημεία στις διευθύνσεις  $ij$ . Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος αποτελούνται από τις συνθήκες αδιαπέρατου τοιχώματος για τις επιφάνειες της αεροτομής, του κυλίνδρου καθώς και για τα τοιχώματα της αεροσήραγγας. Στους όγκους ελέγχου κοντά στα τοιχώματα εισήχθη η οριακή συνθήκη του λογαριθμικού νόμου για τις κατανομές των ταχυτήτων. Η είσοδος του αέρα στην αεροσήραγγα αποτέλεσε και την οριακή συνθήκη εισόδου για την υπολογιστική προσομοίωση του προβλήματος θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων  $11.27\text{m/s}$  η οποία αντιστοιχεί σε  $Re=11.2 \times 10^4$ . Μακριά και κατάντι της αεροτομής εισήχθη η οριακή συνθήκη εξόδου της ροής από τον υπολογιστικό χώρο.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

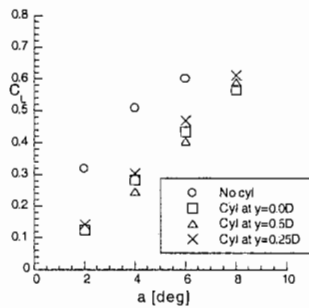
### 4.1 Πειραματικές μετρήσεις – Φόρτιση πτέρυγας

Η μέσης τιμές του  $C_p=(p-p_o)/(1/2\rho U_o^2)$ , γύρω από την πτέρυγα σε  $Re=10^5$  και γωνίες προσβολής  $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ , φαίνονται στα διαγράμματα a, b, c, d του σχ. 2.



Σχ. 2. Κατανομές μέσωσ επιφανειακών πιέσεων για ομοιόμορφη ροή στην είσοδο της αεροσήραγγας

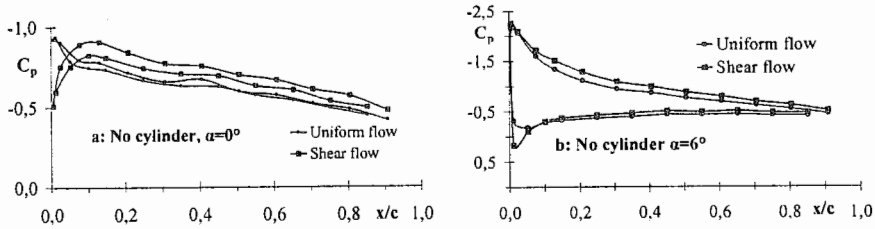
Το  $C_p$  απεικονίζεται για μεμονωμένη πτέρυγα, για κύλινδρο ευθυγραμμισμένο με αυτήν (κύλινδρος σε  $y_o=0.0D$ ), και για κύλινδρο τοποθετημένο κάθετα  $0.5D$  πάνω από τη μέση γραμμή. Φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες διαφορές στην κατανομή του  $C_p$  με και χωρίς τον κύλινδρο βρίσκονται στην ακμή προσβολής μέχρι περίπου  $\alpha/c \approx 0.25$ . Για μικρές γωνίες προσβολής  $\alpha$ , οι υψηλές θετικές τιμές του  $C_p$  κοντά στην ακμή προσβολής της πτέρυγας που οφείλονται στην παρουσία σημείου ανακοπής στην περιοχή καταστέλλονται. Σε γωνία προσβολής  $\alpha=8^\circ$  και οι θετικές και οι αρνητικές κορυφές κοντά στην ακμή προσβολής ελαττώνονται. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση του  $C_L$  της αεροτομής όταν αυτή βρίσκεται μέσα στο απόρευμα του κυλίνδρου, σχ. 3, όπου και παρατίθενται και οι συντελεστές άνωσης για πειραματικές μετρήσεις σε  $y_o=0.25D$ . Η κλίση του  $\partial C_L/\partial \alpha$  επίσης μειώνεται από περίπου 5.1 για μεμονωμένη πτέρυγα σε περίπου 4.0 μετά την εισαγωγή του κυλίνδρου. Φαίνεται όμως ότι όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος στο  $y_o=0.25D$  η μείωση της τιμής του  $\partial C_L/\partial \alpha$  είναι η ελάχιστη ( $\approx 4.5$  στη συγκεκριμένη περίπτωση).



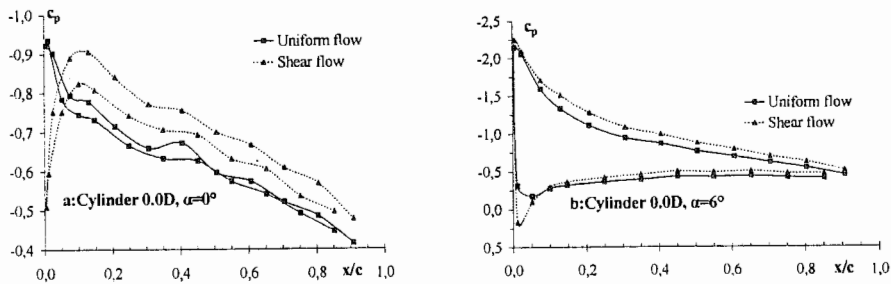
Σχ. 3. Πειραματικοί συντελεστές άνωσης

Ο λόγος για τον οποίο μειώνεται ο συντελεστής άνωσης από την παρουσία κυλίνδρου μπορεί να αποδοθεί στην ανομοιογενή ροή με κλίσεις ταχύτητας στην διεύθυνση  $y_o$  (απώλειες ταχύτητας απορεύματος) που προσπίπτει στην πτέρυγα. Η μέγιστη τοπική κλίση ταχύτητας του προφίλ του απορεύματος είναι της ίδιας τάξης με αυτή της τεχνητά παραγόμενης κλίσης ταχύτητας π.χ. περίπου  $40s^{-1}$ . Παρόμοια αποτελέσματα διαπιστώνονται για ομοιογενή ροή και σε χαμηλότερους αριθμούς  $Re=4.5 \times 10^4$ . Αυτά τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η καμπύλη  $C_L$ - $\alpha$  δεν διαφοροποιείται πολύ από ευθεία στο εύρος των γωνιών προσβολής που εξετάστηκαν παρά το γεγονός ότι η πτέρυγα βρέθηκε υπό ανομοιογενές πεδίο ταχυτήτων της τάξης μεγέθους της χορδής του. Στην περίπτωση της ροής με κλίση ταχύτητας, η ταχύτητα  $U_c$  στο μέσο του πλάτους (που αντιστοιχεί στο οριζόντιο επίπεδο των οπών δειγματοληψίας πίεσης) ισούται με τη μέση ταχύτητα της ελεύθερης ομοιογενούς ροής  $U_o$ . Για μεμονωμένη πτέρυγα η εισαγωγή της κλίσης ταχύτητας στην πλάγια διεύθυνση δεν προκαλεί

αξιοσημείωτες αλλαγές στην κατανομή του  $C_p$ , π.χ. εικόνες 4α,β για  $\alpha=0^\circ$  και  $6^\circ$ . Αντιθέτως μετά την εισαγωγή του κυλίνδρου υπάρχει διαφορά στην κατανομή του  $C_p$  ανάμεσα στην ομοιογενή ροή και την ροή με κλίση ταχύτητας, εικόνες 5α,β ( $\alpha=0^\circ$ ,  $6^\circ$ ). Φαίνεται ότι η εισαγωγή της κλίσης ταχύτητας και κυλίνδρου δρα προς την κατεύθυνση της αναίρεσης του κυλίνδρου π.χ. οι (κατασταλμένες) κορυφές του  $C_p$  στην ακμή προσβολής αποκαθίστανται.



Σχ. 4. Επίδραση της κλίσης ταχύτητας στην ροή, στο  $C_p$ , χωρίς κύλινδρο

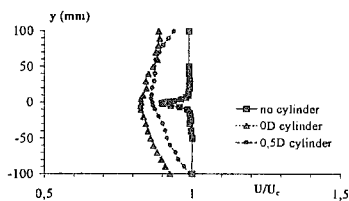
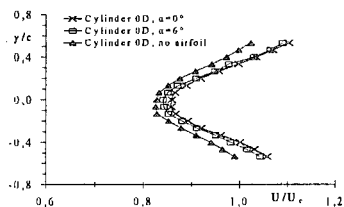


Σχ. 5. Επίδραση της κλίσης ταχύτητας στην ροή, στο  $C_p$ , με κύλινδρο

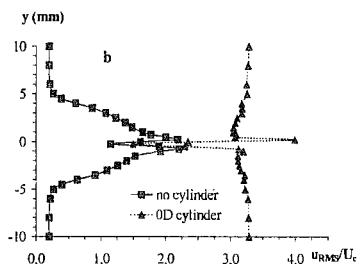
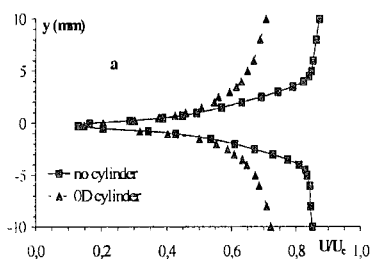
#### 4.2 Μετρήσεις ταχυτήτων απορεύματος

Στο σχ. 6 φαίνεται η κατανομή των μέσων ταχυτήτων στην περιοχή ανάμεσα στον κύλινδρο και την πτέρυγα. Το απόρευμα του κυλίνδρου δεν επηρεάζεται από την «δυναμική» ροή γύρω από την πτέρυγα. Υπάρχει μία μικρή αύξηση της ταχύτητας που μπορεί να αποδοθεί σε μείωση της ελεύθερης διατομής της αεροσήραγγας. Ομοίως αυξάνεται και η ένταση της τύρβης. Η επίδραση της γωνίας προσβολής είναι επίσης μικρή. Οι διανομές του απορεύματος κατάντι της πτέρυγας παρουσιάζονται στα σχ. 7 και 8. Στην ομοιόμορφη ροή για  $Re=10^5$  η κατανομή του απορεύματος φανερώνει σημαντική αλλαγή του απορεύματος της πτέρυγας από αυτό του κυλίνδρου, σχ. 7. Αυτό οφείλεται στη σχετικά αργή σκέδαση του απορεύματος του κυλίνδρου. Η ένταση της τύρβης υπερδιπλασιάζεται σε σχέση με αυτή του απορεύματος μόνο της πτέρυγας. Όταν ο κύλινδρος τοποθετείται εκτός της μέσης γραμμής ( $z_o=0.5D$ ) η κατανομές των προφίλ είναι μη συμμετρικές. Οι κατανομές ταχύτητας στην κάθετη διεύθυνση πολύ κοντά στην ακμή φυγής παρουσιάζουν όμοια σχέση. Φαίνεται ότι η παρουσία του απορεύματος του κυλίνδρου διευρύνει το απόρευμα της πτέρυγας εκτός από

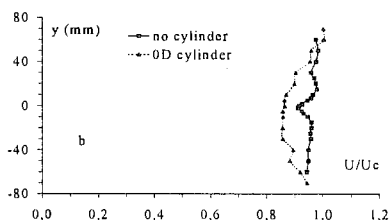
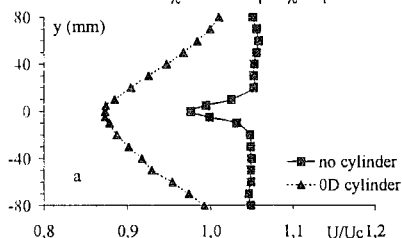
την περιοχή πολύ κοντά στην ακμή φυγής, σχ. 7α,β. Η συνδυασμένη δράση του απορεύματος του κυλίνδρου και της τυρβώδους κλίσης ταχύτητας φαίνεται στα σχ. 9α,β. Όπως σχολιάστηκε και πριν, η κλίση ταχύτητας ομαλοποιεί τις απώλειες ταχύτητας του απορεύματος του κυλίνδρου και η επίδραση του στη ροή γύρω από την πτέρυγα μειώνεται.



Σχ. 6. Μέση ταχύτητα 1,0c έναντι και 1.5c κατάντι της πτέρυγας,  $\alpha=0^\circ$



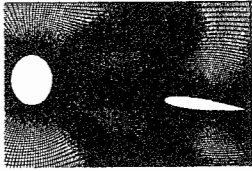
Σχ. 7. Μέση ταχύτητα και RMS κοντά στην ακμή φυγής της πτέρυγας,  $\alpha=0^\circ$



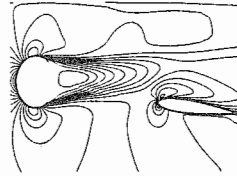
Σχ. 8. Μέση ταχύτητα 1.5c κατάντι της πτέρυγας,  $\alpha=0^\circ$

#### 4.3 Αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης του προβλήματος

Κατά την υπολογιστική προσομοίωση εξετάστηκαν οι αντίστοιχες περιπτώσεις γωνίας προσβολής της πτέρυγας και θέσης του κυλίνδρου και  $Re=11.2 \times 10^4$ . Ο στόχος ήταν να αναλυθούν τα αποτελέσματα για τις καμπύλες του  $C_p$  που δίδει η προσομοίωση προκειμένου να ελεγχθεί εάν όντως υπάρχει η διαφαινόμενη τάση στην συμπεριφορά του που προκύπτει από την πειραματική ανάλυση. Στο σχ. 9 φαίνεται το πλέγμα προσομοίωσης του υπολογιστικού χώρου που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση όπου η πτέρυγα τίθεται στην ροή με γωνία προσβολής  $6^\circ$  και ο κύλινδρος βρίσκεται τοποθετημένος σε απόσταση  $y_o=0.5D$ . Στο σχ. 10 φαίνεται το διάγραμμα ίσων ταχυτήτων κατά την διεύθυνση της ροής για μία χρονική στιγμή επίλυσης του ροϊκού πεδίου.

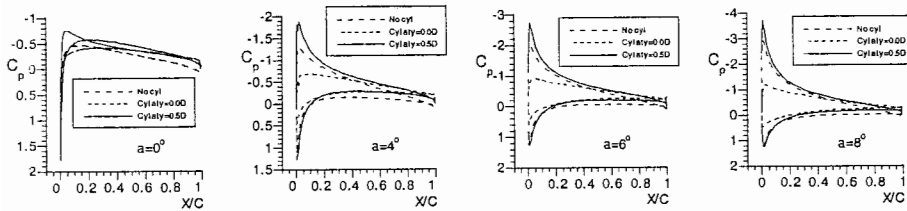


Σχ. 9. Το πλέγμα διακριτοποίησης, *CFD*,  $\alpha=6^\circ$ ,  $y_o=0.5D$ .



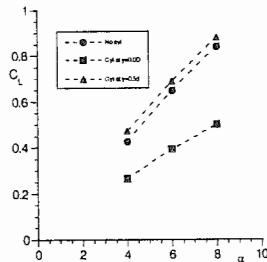
Σχ. 10. Διάγραμμα ίσων ταχυτήτων, *CFD*

Οι καμπύλες κατανομής του συντελεστή πίεσης για την επιφάνεια της πτέρυγας φαίνονται στο σχ. 11 όπου και παρατίθενται όλες οι αντίστοιχες με το πείραμα περιπτώσεις για ομοιόμορφη ροή στην είσοδο της αεροσήραγγας και κύλινδρο σε  $y_o=0.0D$  και  $y_o=0.5D$



Σχ. 11. Κατανομές του συντελεστή πίεσης για  $\alpha=0,4,6,8^\circ$  με και χωρίς κύλινδρο, *CFD*.

Αντίστοιχα, τα  $C_L$  συναρτήσει της γωνίας της πτέρυγας φαίνονται στο σχ. 12.



Σχ. 12. Συντελεστής άνωσης για  $\alpha=4,6,8^\circ$  με και χωρίς κύλινδρο, *CFD*

Βάσει του προηγούμενου διαγράμματος φαίνεται μία τάση να αυξηθεί ελάχιστα ο συντελεστής άνωσης της πτέρυγας όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος εκτός της γραμμής συμμετρίας, στο  $y_o=0.5D$ . Η τάση αυτή δεν εντοπίστηκε καθαρά στα πειραματικά δεδομένα παρόλο που εντοπίζεται η ίδια αύξηση της κλίσης του συντελεστή άνωσης με την ύπαρξη κυλίνδρου τοποθετημένου σε θέση  $y_o=0.5D$ , κυρίως λόγω της μικρής διαφοράς των πιέσεων που μετρήθηκαν εκεί. Απαιτείται λεπτομερέστερη πειραματική προσέγγιση προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα των υπολογισμών. Είναι γνωστό ότι η ροή γύρω από κυκλικό κύλινδρο είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε ασυμμετρίες (αυτές είναι υπεύθυνες και για τη δημιουργία του φαινομένου *Coanda*). Τέτοιου είδους ασυμμετρία προκαλείται από την έκκεντρη τοποθέτηση του κυλίνδρου και επομένως την σχετικά αυξημένη τιμή του  $\partial C_L / \partial a$  (ή του  $C_L$ )

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρουσία του κυλίνδρου και του ανομοιογενούς, με μεγάλες κλίσεις ταχύτητας, απορευμάτος του μπροστά από πτέρυγα συμμετρικής αεροτομής, προκαλεί γενική μείωση στην κατανομή της πίεσης και κυρίως στην περιοχή της ακμής προσβολής. Ο συντελεστής άνωσης και η κλίση του ελαττώνονται ανάλογα με την κάθετη θέση του κυλίνδρου σε σχέση με την πτέρυγα. Η εισαγωγή γραμμικής κλίσης ταχύτητας στη διεύθυνση του εκπετάσματος της πτέρυγας τείνει να εξομαλύνει τις επιδράσεις του απορευμάτος του κυλίνδρου αποκαθιστώντας την κατανομή της πίεσης γύρω από την πτέρυγα. Στο απόρευμα, σε κοντινή απόσταση από την πτέρυγα κυριαρχεί το απόρευμα του κυλίνδρου που εξασθενεί αργά. Η επίδραση της κλίσης ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα την εξομάλυνση των απωλειών της ταχύτητας στο απόρευμα της πτέρυγας που προκαλούνται από τον κύλινδρο. Τέλος, η υπολογιστική προσομοίωση έδειξε ότι όταν η πτέρυγα είναι τοποθετημένη στην γραμμή συμμετρίας του απορευμάτος του κυλίνδρου ο συντελεστής άνωσής της υφίσταται μία πτώση, ενώ όταν είναι τοποθετημένη εκτός γραμμής συμμετρίας παρατηρείται μία αύξηση του συντελεστού άνωσης σε σχέση με αυτόν που προκύπτει για πτέρυγα υπό γωνία και χωρίς την ύπαρξη κυλίνδρου ανάντι αυτής. Η τελευταία παρατήρηση χρήζει κάποιων επιπλέον και λεπτομερέστερων πειραματικών μετρήσεων για πιο αξιόπιστες συγκρίσεις.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. Unal and D. Rockwell, 1987, "On the Vortex Formation from a Cylinder, Part 2. Control by splitter-plate interference", *Journ. Fluid Mech.*, vol. 90, pp. 513-529.
- [2] E.A. Anderson and A.A. Szewczyk, 1997, "Effects of a Splitter Plate on the Near Wake of a Circular Cylinder in 2 and 3-Dimensional Flow Configurations", *Exp. In Fluids*, vol.23, pp. 161-174
- [3] J.H. Gerrard, 1996, "The Mechanisms of the Formation of Vortices Behind Bluff Bodies", *Journ. Fluid Mech.*, vol. 25, pp.401-413.
- [4] D.J. Maull and R.A. Young, 1973, "Vortex Shedding from Bluff Bodies in A Shear Flow", *Journ. Fluid Mech.*, vol. 60, pp. 401-409
- [5] U. Karmik, H. Stapountzis and S. Tavoularis, 1987, "Vortex Shedding from Bluff Cylinders in Strongly Sheared Turbulent Flows", *Journ. Wind Eng. Ind. Aerod.*, vol. 26, pp.165-178
- [6] A. Papangelou, 1992, "Vortex Shedding from Slender Cones at Low Re Numbers", *Journ. Fluid Mech.*, vol. 242, 299-321.
- [7] J.A.Zhu, 1991, "A Low Diffusive and Oscillation Free Convection Scheme", *Com. App. Num. Methods*, vol. 7.
- [8] C.M.Rhie and W.L. Chow, 1983, "A Numerical Study of The Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation", *AIAA Journ.*, vol. 21, pp. 1525-1532
- [9] Κ. Υάκινθος, 1997, «Ανάπτυξη Υπολογιστικής Μεθόδου Προσομοίωσης Ασυμπίεστων και Συμπιεστών Ροών», Διδ. Διατρ., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Α.Π.Θ.