

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Ρευστών

«Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από πτέρυγα» - "Computational modeling of the flow around a wing"

Διπλωματική Εργασία

Δημήτρης Παπαδογιάννης

Επιβλέπων Διπλωματικής: Καθηγητής Σ. Τσαγγάρης

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Πίνακας περιεχομένων

1.Εισαγωγή2
2.Η χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής3
3.Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή ρευστού σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων
4.Μοντελοποίηση της τύρβης7
5.Το πρόβλημα της ροής γύρω από πτέρυγα και των δινών ακροπτερυγίων10
5.1 Ανάλυση πτέρυγας με χρήση της θεωρίας γραμμής Άνωσης12
5.2 Ανάλυση πτέρυγας με χρήση της μεθόδου των δινοπλεγμάτων13
5.3 Πειραματικές Μελέτες Πτερύγων14
5.4 Οι δίνες ακροπτερυγίων σε πτέρυγες15
5.5 Περιορισμός των δινών ακροπτερυγίων17
6. Υπολογιστική μοντελοποίηση πτερύγων20
6.1 Εισαγωγή20
6.2 Κατασκευή γεωμετρίας και υπολογιστικού χωρίου
6.3 Κατασκευή Πλέγματος23
6.4 Τύποι Πλεγμάτων23
6.5 Κατασκευή πλέγματος πτέρυγας με λόγο επιμήκους 1
6.6 Κατασκευή πλέγματος πτέρυγας με λόγο επιμήκους 333
6.7 Τελική Μοντελοποίηση και επίλυση στο ANSYS FLUENT
7. Αποτελέσματα και Σχολιασμός41
7.1 Αποτελέσματα και σχολιασμός για απλή ορθογωνική πτέρυγα με λόγο επιμήκους 1 (πυκνό πλέγμα)41
7.2 Αποτελέσματα και σχολιασμός για ορθογωνική πτέρυγα με λόγο επιμήκους 1 (αραιότερο πλέγμα)53
7.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός για ορθογωνική πτέρυγα με λόγο επιμήκους 3 και στοιχειώδη ακροπτερύγια65
8. Βελτίωση μοντέλου και αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα76
9. Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή

Ο στόχος μίας πτέρυγας είναι η παραγωγή άνωσης, με ταυτόχρονο περιορισμό της αντίστασης. Μία πτέρυγα μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργείται από μία επιφάνεια μέσων γραμμών και μία τρισδιάστατη κατανομή πάχους γύρω από τη μέση επιφάνεια αυτή. Καταλυτικό ρόλο στα χαρακτηριστικά μίας πτέρυγας επιτελεί η αεροτομή που επιλέγεται για το σχηματισμό της (μπορεί να επιλεγούν και διαφορετικές αεροτομές κατά μήκος της πτέρυγας).

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της ροής ρευστού, υπό διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, γύρω από πεπερασμένη ορθογωνική πτέρυγα με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Τέτοιες πτέρυγες αρχίζουν και γίνονται ξανά δημοφιλείς σε εφαρμογές όπως μη επανδρωμένα κατασκοπευτικά αεροσκάφη (UAV = Unmanned Aerial Vehicles), όπου η ανάγκη για πολύπλοκες οπισθοκλινείς πτέρυγες μεγάλης άνωσης και υψηλών ταχυτήτων δεν είναι σημαντική. Μία τέτοια μελέτη περιέχει πολλές προκλήσεις, αφού απαιτείται πλήρης τρισδιάστατη ανάλυση της ροής, η γεωμετρία είναι αρκετά σύνθετη, η διαδικασία πλεγματοποίησης πολύπλοκη και χρονοβόρα, ενώ απαιτείται και μεγάλος υπολογιστικός χρόνος, ώστε η ανάλυση να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις ροής και το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται, ενώ γίνεται και βιβλιογραφική ανασκόπηση των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης πτέρυγας και του φαινομένου των στροβίλων ακροπτερυγίων.

Μελετούνται 2 πτέρυγες διαφορετικού λόγου επιμήκους (aspect ratio), ώστε να καταδειχθεί και η επίδραση του μεγέθους αυτού στους συντελεστές άνωσης και αντίστασης (σχετίζεται άμεσα με την τρισδιάστατη απόδοση της αεροτομής). Οι πτέρυγες μοντελοποιούνται με πολύ απλές διατάξεις ακροπτερυγίων, για να υπάρχει μεγαλύτερος ρεαλισμός στη μοντελοποίηση και να γίνει πιο ευδιάκριτο το φαινόμενο των στροβίλων ακροπτερυγίων (wing tip vortices). Η αεροτομή των πτερύγων που αναλύονται είναι η συμμετρική NACA 0012, που έχει εφαρμογές σε πτέρυγες με στόχο την αύξηση της ευστάθειας σε αεροσκάφη, όπως αυτές που βρίσκονται στο κάθετο και οριζόντιο σταθερό των αεροσκαφών (fin, horizontal stabilizers etc).

Ως πρόταση για συνέχεια της διπλωματικής αυτής, είναι ο έλεγχος ροής σε πτέρυγες, βάσει του μοντέλου που δημιουργήθηκε, το οποίο και δίνει επαρκώς ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας την εισαγωγή, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Σ. Τσαγγάρη για την πολύτιμη καθοδήγηση και καθοριστική βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της διπλωματικής εργασίας μου. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές του τομέα Ρευστών για τη σημαντική συμβολή τους στην επιστημονική μου κατάρτιση.

2. Η χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής ^{[1],[2]}

Σκοπός της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD = Computational Fluid Dynamics) είναι να επιλύσει αριθμητικά, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, τις διαφορικές εξισώσεις που εκφράζουν μαθηματικά το πεδίο ροής. Η επίλυση αυτή αποτελεί οδηγό για τη σχεδίαση-βελτίωση σε πολλούς τομείς:

- Αεροδυναμική
- Υδροδυναμική
- Καύση
- Βιορευστομηχανική
- Υπερπλήρωση
- Περιβαλλοντικές ροές, ρύπανση κτλ





Η υπολογιστική ρευστομηχανική αποτελεί την 3ⁿ πιθανή προσέγγιση ενός προβλήματος μηχανικής των ρευστών, με τις άλλες 2 να είναι το πείραμα και οι αναλυτικές λύσεις. Το πείραμα είναι το πιο αξιόπιστο μέσο μελέτης που υπάρχει. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα ακριβό, απαιτεί μεγάλη προετοιμασία και πόρους και δεν επιτρέπει εύκολα τροποποιήσεις. Οι αναλυτικές μέθοδοι δίνουν γρήγορες εκτιμήσεις, αλλά είναι αναξιόπιστες μιας και περιέχουν σημαντικές παραδοχές (απλοποίηση γεωμετρίας, μη συνεκτικό ρευστό, ασυμπίεστο ρευστό κτλ).

Η υπολογιστική ρευστομηχανική, αν και δεν μπορεί αν αντικαταστήσει τις άλλες 2 προσεγγίσεις, αναπτύσσεται ραγδαία, αφού κατά ένα τρόπο αποτελεί μία "μεταφερόμενη αεροσήραγγα", μιας και είναι εύκολα διαθέσιμη (χρειάζεται ένας απλός υπολογιστής) και επιτρέπει γρήγορες τροποποιήσεις και δοκιμές. Δεδομένου ότι σε μία αεροπορική κατασκευή η βελτίωση της αεροδυναμικής της πτέρυγας, έστω και κατά ελάχιστο, αποτελεί μεγάλη βελτίωση των επιδόσεων ή/και εξοικονόμηση χρημάτων (άλλωστε η αεροδυναμική αποτελεί ίσως το βασικότερο τμήμα της κατασκευής ενός αεροσκάφους), οδηγεί σε όλο και πιο εκτεταμένη χρησιμοποίηση CFD μεθόδων. Μία καλή εκτίμηση των ζητούμενων μεγεθών σε ένα πρόβλημα με CFD, η οποία θα επαληθευτεί στη συνέχεια με πείραμα, αποτελεί τεράστια εξοικονόμηση πόρων σε σχέση με τις αλλεπάλληλες πειραματικές δοκιμές και καταδεικνύει ότι οι σχεδιαστές κινούνται εντός των εκάστοτε προδιαγραφών.

Επιπλέον, τα σημερινά πακέτα λογισμικού CFD επιτρέπουν την στενή συνεργασία ανάμεσα σε CFD μεθόδους και μεθόδους Πεπερασμένων Στοιχείων, που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τις κατασκευάστριες εταιρείες για τον καθορισμό των φορτίων που ασκούνται και, συνεπώς, των δομικών απαιτήσεων πτερύγων, ατράκτων κτλ. Αυτό καθιστά ακόμα πιο ευέλικτη την μέθοδο.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή ρευστού σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ^[3]

Η ροή ρευστού σε κάθε κατάσταση περιγράφεται από ένα συνδυασμό εξισώσεων: Την εξίσωση διατήρησης της μάζας, τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής (οι οποίες καταλήγουν στις εξισώσεις Navier-Stokes) και την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Ωστόσο, οι εξισώσεις αυτές συνήθως δεν έχουν αναλυτικές λύσεις. Για αυτό το λόγο, συχνά, πραγματοποιούνται παραδοχές, ώστε να απλοποιηθεί το εκάστοτε πρόβλημα και να παραχθούν γρήγορα λύσεις. Ωστόσο, κάτι τέτοιο εισάγει σημαντικά σφάλματα π.χ μια συχνή παραδοχή είναι αυτή του μη συνεκτικού ρευστού, η οποία, όμως, οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα στον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης (μέγεθος που σχετίζεται, κυρίως, με τη συνεκτικότητα του ρευστού).

Στην εργασία αυτή, αντί να γίνουν παραδοχές που θα επιτρέψουν την αναλυτική λύση των εξισώσεων Navier Stokes, θα γίνει αριθμητική επίλυση των εξισώσεων με κατάλληλη διακριτοποίηση.

Η γενική μορφή των εξισώσεων Navier Stokes είναι:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \nabla T + f$$

Η παραδοχές που γίνονται σε αυτή την εργασία είναι αυτή του ασυμπίεστου ρευστού, μιας και οι ταχύτητες της ροής είναι αρκετά κάτω του Mach 0.3, και αυτής της έλλειψης βαρυτικών δυνάμεων. Επιπλέον, η ροή είναι χαμηλής τύρβης, αφού τα αποτελέσματα που θα λάβουμε θα συγκριθούν με πειραματικά, τα οποία λήφθηκαν από αεροσήραγγα χαμηλής τύρβης. Συνεπώς, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή έχουν την εξής μορφή:

Εξίσωση διατήρησης μάζας:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

Εξισώσεις Navier Stokes για το ασυμπίεστο ρευστό, σταθερού ιξώδους:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \mu \Delta u - \frac{\partial p}{\partial x}$$
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \mu \Delta v - \frac{\partial p}{\partial y}$$
$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \mu \Delta w - \frac{\partial p}{\partial z}$$

Όπου Δ ο τελεστής Laplace: $\Delta = \frac{\theta^2}{\partial \chi^2} + \frac{\theta^2}{\partial y^2} + \frac{\theta^2}{\partial z^2}$

Οι παραπάνω εξισώσεις δημιουργούν το σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει το πρόβλημα και το οποίο στη συνέχεια θα διακριτοποιηθεί και θα λυθεί πάνω στο πλέγμα που δημιουργήσαμε. Στις παραπάνω εξισώσεις:

- t = ο χρόνος (για μη μόνιμη ανάλυση)
- u, v, w = οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά την x, y, z κατεύθυνση αντίστοιχα
- p = η πίεση(λόγω ασυμπίεστου ρευστού θερμοδυναμική και μηχανική πίεση ταυτίζονται)

Αν αναλύσουμε την υλική παράγωγο, κάνουμε τις παραγωγίσεις και εισάγουμε τις διατμητικές τάσεις τότε οι εξισώσεις μετατρέπονται στις:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$
$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}$$
$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}$$

Ο Pressure Based Solver του Fluent που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί διακριτοποιήσεις και μεθόδους που προτιμούν την γραφή των παραπάνω εξισώσεων σε ολοκληρωματική μορφή:

Εξίσωση Συνέχειας:

$$\oint_E \rho \, \vec{u} \, d\vec{A} = 0$$

Εξισώσεις Διατήρησης Ορμής:

$$\oint_E \rho \vec{u} \vec{u} d\vec{A} = -\oint_E pI \cdot d\vec{A} + \oint_E \bar{\tau} d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV$$

4. Μοντελοποίηση της Τύρβης ^{[4],[5],[16]}

Αν και στις προσομοιώσεις που ακολουθούν η ροή είναι χαμηλής τύρβης (για καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών του πειράματος με το οποίο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων), η μοντελοποίηση της αποτελεί βασική ανάγκη για την επίτευξη σωστής προσομοίωσης της ροής.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής είναι: α) η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο μεταβάλλεται χρονικά (μη μόνιμη ροή) και εμφανίζονται τυχαίες διαταραχές, β) Τα στοιχεία του ρευστού σε τυρβώδη ροή ακολουθούν ακανόνιστες και τυχαίες τροχιές, ενώ στη στρωτή ροή παράλληλες τροχιές με τα γειτονικά τους, γ) Η μεταβολή της ταχύτητας στο οριακό στρώμα είναι πολύ εντονότερη σε σχέση με τη μεταβολή στη στρωτή ροή, δ) Υπάρχει εξάρτηση των κατανομών ταχυτήτων από την τραχύτητα της επιφάνειας της πτέρυγας και τον αριθμό Reynolds.

Γενικά, οι τυχαίες διαταραχές που εμφανίζονται στα τυρβώδη πεδία ροής προκαλούν σε συνδυασμό με τη βασική ροή ένα εξαιρετικά περίπλοκο φαινόμενο, το οποίο δεν δύναται να επιλυθεί αναλυτικά με κάποιο μαθηματικό τρόπο. Κατά κάποιο τρόπο η επίδραση της τυρβώδους ροής μέσα στο οριακό στρώμα ισοδυναμεί με αύξηση της συνεκτικότητας του ρευστού αν επρόκειτο για στρωτή ροή.

Η λεπτομερής συμπεριφορά της τύρβης δεν δύναται να υπολογιστεί, ακόμα και αν υπήρχε η δυνατότητα αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes, αφού η τύρβη δεν μπορεί να προβλεφθεί. Έστω και μία μικρή διαταραχή να εισαχθεί στο πεδίο ροής, η επίδρασή της είναι τυχαία και εν τέλει θα έχει κάποια επίδραση στο πεδίο, η οποία είναι αδύνατον να προβλεφθεί. Αυτό οδηγεί στην χρησιμοποίηση των μοντέλων τύρβης. Αντί να ενδιαφερόμαστε για τα ακριβή μεγέθη της ροής, τα οποία είναι απρόβλεπτα, ασχολούμαστε με τα μέσα χρονικά μεγέθη, τα οποία δεν επηρεάζονται άμεσα.

Για να ληφθούν οι μέσες χρονικά εξισώσεις Navier Stokes και μέση χρονικά εξίσωση διατήρησης μάζας θεωρούμε πως κάθε μέγεθος που υπάρχει σε αυτές γράφεται ως το άθροισμα της μέσης τιμής και της διαταραχής του. Έτσι, έστω το ροϊκό μέγεθος g:

$$g = \bar{g} + g'$$

Εισάγοντας αυτή την έννοια στην μέση χρονικά εξίσωση διατήρησης της μάζας έχουμε:

$$\frac{\overline{\partial u}}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \iff \frac{\overline{\partial (\bar{u} + u')}}{\partial x} + \frac{\overline{\partial (\bar{v} + v')}}{\partial y} + \frac{\overline{\partial (\bar{w} + w')}}{\partial z} = 0$$
$$\Leftrightarrow \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} = 0$$

αφού η μέση τιμή κάθε διαταραχής θεωρείται μηδενική.

Λειτουργώντας με τον ίδιο τρόπο στις εξισώσεις Navier Stokes καταλήγουμε να πάρουμε τις μέσες χρονικά Navier Stokes:

$$\begin{split} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \bar{u} \bar{u} + \rho \overline{u'u'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \bar{u} \bar{v} + \rho \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \bar{u} \overline{w} + \rho \overline{u'w'} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\tau_{xx}}}{\partial x} \\ &- \frac{\partial \overline{\tau_{xy}}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\tau_{xz}}}{\partial z} = 0 \end{split}$$

$$\begin{split} \rho \frac{\partial v}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \bar{v} \bar{u} + \rho \overline{v'u'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \bar{v} \bar{v} + \rho \overline{v'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \bar{v} \overline{w} + \rho \overline{v'w'} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\tau_{yy}}}{\partial y} \\ &- \frac{\partial \overline{\tau_{xy}}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\tau_{yz}}}{\partial z} = 0 \end{split}$$

$$\begin{split} \rho \frac{\partial w}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \overline{w} \overline{u} + \rho \overline{w'u'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \overline{w} \overline{v} + \rho \overline{w'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \overline{w} \overline{w} + \rho \overline{w'w'} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \\ &- \frac{\partial \overline{\tau_{zz}}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{\tau_{zy}}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\tau_{xz}}}{\partial x} = 0 \end{split}$$

Παρατηρούμε ότι μέσα στις εξισώσεις αυτές υπάρχουν όροι της μορφής –*ρu*₁u₁, οι οποίοι ονομάζονται τάσεις Reynolds. Όλοι οι όροι των μέσων χρονικά Navier Stokes εξισώσεων ουσιαστικά εκφράζουν τους ρυθμούς μεταφοράς ορμής μέσω της τύρβης, όπως οι συνεκτικοί όροι των εξισώσεων εκφράζουν τη μεταφορά ορμής μέσω της μοριακής κίνησης. Το ζητούμενο είναι η μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds.

Ο Boussinesq πρότεινε την εισαγωγή ενός νέου μεγέθους, της τυρβώδους συνεκτικότητας μ_t (eddy viscosity), το οποίο, όπως ο συντελεστής συνεκτικότητας μ σε στρωτές ροές συσχετίζει τον τανυστή των τάσεων με τον τανυστή παραμορφώσεων, θα συσχετίζει μία τάση Reynolds με εκείνο το ρυθμό παραμόρφωσης, που θα προκαλούσε ίδια τάση αν είχαμε στρωτή ροή. Συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds γίνεται:

$$-\rho \overline{u'_{i}u'_{j}} = \mu_{t} \left(\frac{\partial \overline{u_{i}}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \overline{u_{j}}}{\partial i}\right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k$$

Όπου, k η τυρβώδης κινητική ενέργεια.

Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα τύρβης με βάση την παραδοχή του Boussinesq, τα οποία μοντελοποιούν διαφορετικά το καθένα τον συγκεκριμένο συντελεστή και έχει το καθένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, σε σχέση πάντα με το είδος της ροής η οποία αναλύεται. Το FLUENT διαθέτει μία μεγάλη βάση δεδομένων με μοντέλα τύρβης. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Spalart-Allmaras. Αυτό το μοντέλο τύρβης αναπτύχθηκε ειδικά για αεροναυπηγικές εφαρμογές και δίνει καλά αποτελέσματα σε εφαρμογές με μεγάλους αριθμούς Reynolds και μεγάλες κλίσεις πίεσης στο οριακό στρώμα.

Το μοντέλο αυτό λύνει την παρακάτω εξίσωση από την οποία παίρνει την τυρβώδη κινηματική συνεκτικότητα \tilde{v} , την οποία στη συνέχεια τη μεταφράζει στη τυρβώδη συνεκτικότητα. Στις περιοχές κοντά στο τοίχωμα, όπου υπάρχουν έντονα συνεκτικά φαινόμενα, επιλύεται η εξίσωση αυτή.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{v}u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{v}) \frac{\partial\tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho(\frac{\partial\tilde{v}}{\partial x_j})^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}}$$

Στην παραπάνω εξίσωση υπάρχουν οι εξής συντελεστές:

- *G_v*: Παραγωγή τυρβώδους συνεκτικότητας
- Υ_ν: Καταστροφή τυρβώδους συνεκτικότητας
- *S*_õ: Όρος πηγής της τυρβώδους συνεκτικότητας
- v = Μοριακή κινηματική συνεκτικότητα
- C_{b2} και σ_v σταθερές

Το μοντέλο Spalart Allmaras δεν υπολογίζει την τυρβώδη κινητική ενέργεια τύρβης. Μετά τον υπολογισμό του $\tilde{\boldsymbol{v}}$, η τυρβώδης συνεκτικότητα μ_t υπολογίζεται από τη σχέση: $\mu_t = \rho \tilde{\boldsymbol{v}} f_{v1}$, όπου f_{v1} η συνάρτηση τυρβώδους απόσβεσης:

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}$$

ενώ, $\chi = \tilde{v}/v$.

Ο όρος παραγωγής G_v υπολογίζεται ως: $G_v = C_{b1}\rho \tilde{S}\tilde{v}$, όπου $\tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}$, ενώ

 $f_{\nu 2} = \frac{\chi}{1 + \chi f_{\nu 1}}$. Τα μεγέθη C_{b1} και κ είναι σταθερές, ενώ d είναι η απόσταση από τον τοίχο. S είναι ένα βαθμωτό μέτρο του τανυστή παραμορφώσεων.

Ο όρος καταστροφής υπολογίζεται ως εξής:

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w (\frac{\tilde{v}}{d})^2$$

Όπου $f_w = g \left[\frac{1+C_{WB}}{g^6+C_{WB}^6}\right]^{1/6}$, g = r + C_{w2}(r⁶-r) και $r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S}k^2d^2}$. Τα C_{w1}, C_{w2} και C_{w3} είναι σταθερές.

Οι σταθερές του μοντέλου, οι οποίες χρησιμοποιούνται και από το λογισμικό είναι οι ακόλουθες:

$$C_{b1}$$
=0.1355, C_{b2} =0.622, σ_v =2/3, C_{v1} =7.1,
 C_{w1} = 3.21, Cw2=0.3, C_{w3} =2, κ =0.4187

5. Το πρόβλημα της ροής γύρω από πτέρυγα και των δινών ακροπτερυγίων^[7]

Σε κάθε τρισδιάστατη πτέρυγα που βρίσκεται υπό γωνία πρόσπτωσης, στο επάνω μέρος της επικρατούν χαμηλότερες πιέσεις σε σύγκριση με το κάτω μέρος (στο άνω μέρος έχουμε επιτάχυνση του ρευστού μεγαλύτερη σε σχέση με το κάτω και δημιουργείται η άνωση). Αυτό, όμως, κάνει εύκολα αντιληπτό ότι ρευστό τείνει να περάσει από την κάτω μεριά στην πάνω μέσο του ακροπτερυγίου, δημιουργώντας μία εγκάρσια κυκλοφορία και εξισώνοντας στα ακροπτερύγια τη διαφορά πίεσης, όπως φαίνεται και σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.1, Ροή σε πτέρυγα όπου φαίνεται η δημιουργία της εγκάρσιας κυκλοφορίας



Σχήμα 5.2, Οπτικοποιημένη ροή ρευστού γύρω από αεροσκάφος, όπως φαίνεται από πίσω. Φαίνεται η εγκάρσια κυκλοφορία του αέρα στις πτέρυγες και οι δίνες που δημιουργούνται

Διαπιστώνεται ότι σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στην πτέρυγα το ρευστό έχει αντίθετη ταχύτητα κατά τον άξονα γ για z<0 και z>0, δηλαδή στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας οι εγκάρσιες ταχύτητες του ρευστού είναι αντίθετες. Η κίνηση αυτή του ρευστού προκαλεί μεταβολή της πραγματικής γωνίας πρόσπτωσης που «βλέπει» η πτέρυγα.



Σχήμα 5.3, Μεταβολή της πραγματικής γωνίας πρόσπτωσης λόγω προσθήκης της γωνίας α_i

Η μεταβολή αυτή δημιουργεί μία επαγόμενη αντίσταση. Η σημασία της αντίστασης αυτής είναι μεγάλη, αφού για ένα τυπικό αεροσκάφος σε πλεύση μπορεί να φτάσει και το 40% της συνολικής αντίστασης, ενώ το ποσοστό αυτό μεγαλώνει περαιτέρω σε μικρές ταχύτητες.

Οι πτέρυγες, και όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτές, μπορούν να μελετηθούν με πολλές διαφορετικές μεθόδους. Μία από τις πιο διαδεδομένες είναι η απευθείας επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της ροής με διακριτοποίησή τους σε πλέγμα που αναπτύσσεται και με χρήση κάποιων μοντέλων τύρβης και όσων

παραδοχών είναι επιθυμητές, ανάλογα με το πρόβλημα (DNS). Ωστόσο, υπάρχουν και εναλλακτικές μέθοδοι, ειδικά αν η παραδοχή του μη συνεκτικού ρευστού δεν επηρεάζει σημαντικά το πρόβλημα.



Σχήμα 5.4, Μελέτη οπισθοκλινούς πτέρυγας και κατανομές ταχυτήτων σε αυτήν με απευθείας επίλυση των εξισώσεων της ροής

5.1 Ανάλυση πτέρυγας με χρήση της θεωρίας γραμμής Άνωσης^[7]

Μία εύκολη και χρήσιμη μέθοδος είναι αριθμητικά/αναλυτικά με τη μέθοδο της γραμμής άνωσης. Σε αυτή τη μέθοδο αντικαθιστάται η πτέρυγα από ένα σύστημα δινοσωλήνων που βρίσκονται πάνω σε μία επιφάνεια, που ορίζεται από τις μέσες γραμμές των αεροτομών από τη γραμμή φυγής της πτέρυγας και από την επ' άπειρο ταχύτητα. Έτσι, η πτέρυγα αντικαθίσταται από ένα σύστημα 2 φύλλων στροβιλότητας που το πρώτο είναι σταθερά δεμένο στην πτέρυγα και το δεύτερο που είναι ελεύθερο και περιλαμβάνει τους ελεύθερους ή ακολουθούντες δινοσωλήνες. Το ελεύθερο αυτό φύλλο στροβιλότητας εκτείνεται από τη γραμμή φυγής μέχρι το άπειρο. Υπολογίζοντας στη συνέχεια τις ταχύτητες που επάγονται από τους στροβίλους των δινοσωλήνων, μέσω του νόμου των Biot-Savart, και εφαρμόζοντας την εξίσωση του μονοπλάνου μπορούμε να υπολογίσουμε τα μεγέθη της άνωσης και της επαγόμενης αντίστασης της πτέρυγας, μέσω της θεωρίας της γραμμής άνωσης.



Σχήμα 5.5, Δινοσωλήνες για μελέτη πτέρυγας [23]

Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος υποθέτει ασυμπίεστο και μη συνεκτικό ρευστό, αποτελεί μία καλή πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα της τρισδιάστατης πτέρυγας και των δινών που δημιουργεί.

5.2 Ανάλυση πτέρυγας με χρήση της μεθόδου των δινοπλεγμάτων^[7]

Μία βελτιωμένη αριθμητική μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της ροής γύρω από πτέρυγες είναι με τη μέθοδο των δινοπλεγμάτων. Η θεωρία της γραμμής άνωσης δεν έχει μεγάλη αξιοπιστία για πτέρυγες με μικρό λόγο επιμήκους (aspect ratio) ή για πτέρυγες στις οποίες η γραμμή c/4 δεν είναι ευθεία. Η μέθοδος των δινοπλεγμάτων, εν αντιθέσει, προσφέρει σημαντική αξιοπιστία σε μία ευρύτατη περιοχή γεωμετρικών μορφών πτερύγων και μπορεί να επιλύσει επιτυχώς αριθμητικά μόνιμες και μη μόνιμες ροές μη συνεκτικού ρευστού γύρω από πτέρυγες. Στη μέθοδο αυτή η πτέρυγα χωρίζεται σε τμήματα τραπεζοειδούς μορφής, πλαίσια. Σε κάθε τέτοιο πλαίσιο τοποθετείται κλειστός δινοσωλήνας μετατοπισμένος, όμως, κατά την κατεύθυνση χ κατά ε/4, όπου ε η διάσταση κατά την κατεύθυνση χ του πλαισίου, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Ορίζεται ως θετική η φορά περιγραφής του πλαισίου, αυτή των δεικτών του ωρολογίου. Στα πλαίσια που συνορεύουν με τα ακροπτερύγια η πλευρά του προσδεδεμένου δινοσωλήνα που βρίσκεται πάνω στο ακροπτερύγιο είναι μετατοπισμένη προς το εσωτερικό της πτέρυγας κατά το ¼ της διάστασης δ του πλαισίου, όπως στο παρακάτω σχήμα:

Στα οριακά πλαίσια προς την γραμμή φυγής της πτέρυγας οι «κλειστοί» δινοσωλήνες που αντιστοιχούν, λόγω της απαίτησης διατήρησης της κυκλοφορίας του ομόρου έχουν πεταλοειδή μορφή, δηλαδή οι οριακοί αυτοί δινοσωλήνες είναι ανοικτοί και τείνουν προς το άπειρο. Οι ελεύθεροι δινοσωλήνες έχουν την κατεύθυνση της ταχύτητας της ροής, δηλαδή της U.



Σχήμα 5.6, Οι κλειστοί και ανοικτοί δινοσωλήνες σε πτέρυγα [7]

Έτσι, δημιουργείται ένα σύστημα δινοπλεγμάτων με το οποίο αντικαθίσταται η πτέρυγα, η οποία θεωρείται απείρως λεπτή. Αν η πτέρυγα είχε πάχος τότε θα έπρεπε να τοποθετηθούν σημειακές πηγές πάνω στην πτέρυγα και να βρεθεί το πεδίο ταχυτήτων με εφαρμογή της μεθόδου των πλαισίων, δηλαδή να επιλυθεί το αστρόβιλο πρόβλημα πρώτα. Στη συνέχεια επιλέγονται σημεία ελέγχου πάνω στην πτέρυγα, πάνω στα οποία εφαρμόζεται η συνθήκη μη εισχώρησης. Έτσι, δημιουργείται ένα πρόβλημα με τόσες εξισώσεις όσο και το πλήθος των σημείων ελέγχου, που είναι ίδιο με το πλήθος των κλειστών δινοσωλήνων. Επιπλέον, η συνθήκη Kutta-Jukowski ικανοποιείται στα σημεία ελέγχου κοντά στη γραμμή φυγής της πτέρυγας.



Σχήμα 5.7, Πτέρυγα με τα πλαίσια και το σύστημα των πεταλοειδών δινοσωλήνων [7]

Η μέθοδος των δινοπλεγμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εύρεση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών πτέρυγας σε πλαγιολίσθηση. Παρακάτω παρατίθενται κάποια αποτελέσματα υπολογισμών ροής γύρω από πτέρυγες ελλειπτικής και τραπεζοειδούς μορφής.

5.3 Πειραματικές Μελέτες Πτερύγων^{[13],[14]}

Η μελέτη μίας πτέρυγας με αριθμητικές μεθόδους δεν είναι αρκετή για να προκύψουν τα απαραίτητα συμπεράσματα σε σχέση με μία πιθανή εφαρμογή της σε πραγματική κατασκευή ή όχι. Μια καλή αριθμητική μέθοδος και τα αποτελέσματά της οδηγεί στο επόμενο βήμα, την πειραματική μελέτη της πτέρυγας, εφ' όσον τα αποτελέσματα των αριθμητικών μεθόδων δείχνουν την πτέρυγα να ικανοποιεί τις ζητούμενες προδιαγραφές. Στην πειραματική μελέτη, αν και

υπεισέρχονται διάφορα σφάλματα και απαιτούνται διορθώσεις των αποτελεσμάτων (επίδραση τοιχωμάτων αεροσήραγγας, ακρίβεια οργάνων μέτρησης κτλ), το πρόβλημα βρίσκεται στις πιο κοντινές συνθήκες σε σχέση με την πραγματικότητα. Συνεπώς, αποτελεί το τελευταίο βήμα πριν την υλοποίηση.

Έχει πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών μελετών πτερύγων από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ώστε να ελεγχθούν διάφορες διαμορφώσεις πτερύγων (οπισθοκλινείς, εμπροσθοκλινείς, πτέρυγες δέλτα, πτέρυγες με διάφορες διαμορφώσεις πτερυγίων καμπυλότητας χείλους προσβολής και εκφυγής) και τα χαρακτηριστικά τους. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία οι πειραματικές μελέτες εστιάζουν σε ειδικές συνθήκες (αποκολλημένη ροή, εκλύσεις στροβίλων, αλληλεπιδράσεις ροϊκών φαινομένων κτλ) και ειδικές διαμορφώσεις πτερύγων, όπως πτέρυγες για μη επανδρωμένα αεροσκάφη.

5.4 Οι δίνες ακροπτερυγίων σε πτέρυγες^{[8],[9],[11],[14],[15]}

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στην πτέρυγα το ρευστό έχει αντίθετη ταχύτητα κατά τον άξονα γ για z<0 και z>0, δηλαδή στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας οι εγκάρσιες ταχύτητες του ρευστού είναι αντίθετες. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί δίνες στα ακροπτερύγια οι οποίες αποκολλώνται από την πτέρυγα και επεκτείνονται στον ομόρου, μέχρι κάποια στιγμή να αποσβεστούν.



Σχήμα 5.8, Δημιουργία δινών στα ακροπτερύγια και επίδραση στην ταχύτητα [7]

Η εξέταση αυτών των δινών είναι μεγάλης σημασίας, αφού τέτοιες δίνες αυξάνουν την οπισθέλκουσα του αεροσκάφους σημαντικά. Επιπλέον, δίνες που προέρχονται από αεροσκάφη ενδέχεται να επηρεάσουν άλλα, τα οποία διέρχονται από τον ομόρου τους σε σχετικά κοντινή απόσταση. Ο καθορισμός ασφαλούς απόστασης ανάμεσα σε αεροσκάφη είναι κομβικής σημασίας σε αεροδρόμια, ειδικά υψηλής κίνησης, όπου υπάρχει ανάγκη για συνεχείς προς/απογειώσεις. Η μελέτη των δινών έχει σημασία και στο κοντινό ομόρου της πτέρυγας, όπως π.χ στα ελικόπτερα όπου οι έλικες, που κατ' ουσία είναι πτέρυγες, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρή απόσταση. Συνεπώς, οι πτέρυγες και οι δίνες αυτές έχουν τύχει εκτεταμένης μελέτης, ενώ έχουν προταθεί πολλές διατάξεις ακροπτερυγίων (κυρίως wingtip fences αλλά πλέον και swept wing tips) ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο. Σε μεγάλα πολιτικά αεροσκάφη υπολογίζεται ότι η προσθήκη τέτοιων ακροπτερυγίων, με τη μείωση της επαγόμενης αντίστασης που προκαλούν, οδηγούν σε εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 2-5%, ανάλογα τη διάταξη. Το πολύ μεγάλο αυτό μέγεθος καθιστά εμφανή την επίδραση των αναπτυσσόμενων δινών.

Η φύση αυτών των δινών είναι εξαιρετικά σύνθετη. Κατ' αρχάς, δεν υπάρχει σύντομη απόσβεσή τους και μπορούν να συναντηθούν ακόμα και σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πτέρυγα. Υπάρχει συνδυασμός τρισδιάστατων τυρβωδών φαινομένων, αποκολλήσεων από την πτέρυγα και αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε δίνες. Αρχικές αναλυτικές μελέτες η έδειχναν αύξηση της αξονικής ταχύτητας μετά από κάποιο διάστημα στον πυρήνα των δινών, αύξηση που οδηγούσε σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας ροής. Η αύξηση αυτή προέκυπτε από την έντονη περιστροφή, η οποία δημιουργούσε χαμηλές πιέσεις στο κέντρο της δίνης.





Πέραν των αναλυτικών/αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού του ομόρου πτέρυγας και των συγκεκριμένων δινών, έχουν γίνει και εκτεταμένες πειραματικές μελέτες για διάφορες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης τέτοιων δεινών. Ωστόσο, η ακριβής φύση των φαινομένων δεν έχει επεξηγηθεί πλήρως, ιδιαίτερα σε μακρινές αποστάσεις από την πτέρυγα. Τέτοιες πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η ένταση και η δραστηριότητα των δινών αυτών σχετίζεται και με τα οριακά στρώματα στην πτέρυγα από την οποία οι δίνες αποκολλώνται. Αρχικά η δίνη τροφοδοτείται με τύρβη από τα τυρβώδη οριακά στρώματα που αναπτύσσονται στο ακροπτερύγιο της πτέρυγας, παράγοντας δίνη με μεγάλο ποσοστό τύρβης. Ωστόσο, μία δίνη η οποία δεν αλληλεπιδρά με άλλες γειτονικές μετά από κάποια απόσταση θεωρείται ότι έχει στον πυρήνα της στρωτή ροή, αφού όσο η δίνη απομακρύνεται από την πτέρυγα η ροή στον πυρήνα γίνεται στρωτή λόγω της περιστροφής του ρευστού, ενώ δεν δημιουργεί τύρβη από μόνη της.



Σχήμα 5.10, Πειραματική διάταξη μελέτης δινών από ακροπτερύγια [8]

Μετά τα πειράματα αυτά έχει γίνει μία καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που συμβαίνουν στον ομόρου πτερύγων και έχουν ήδη υλοποιηθεί βελτιώσεις, με βάση τις μελέτες αυτές.



Σχήμα 5.11, Πτέρυγα ONERA με στρεβλωμένο ακροπτερύγιο [10]

5.5 Περιορισμός των δινών ακροπτερυγίων^{[12],[13]}

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες, αναλυτικές και πειραματικές, για πιθανές διατάξεις που περιορίζουν τα τρισδιάστατα φαινόμενα και μειώνουν την αντίσταση που αναπτύσσεται σε πτέρυγες.



Σχήμα 5.12, Φράχτες ακροπτερυγίων σε αεροσκάφος Airbus A320

Παλαιότερα, βελτίωση επιτυγχανόταν απλά με αύξηση του εύρους της πτέρυγας, δηλαδή αυξάνοντας το aspect ratio της πτέρυγας. Κάτι τέτοιο, όπως θα φανεί και στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, οδηγεί σε μία πιο δισδιάστατη προσέγγιση της πτέρυγας. Άλλες προσπάθειες, κυρίως σε μικρότερα αεροσκάφη αφορούσαν το σχήμα της πτέρυγας. Σύμφωνα με τη θεωρία γραμμής άνωσης, που περιγράφηκε παραπάνω, η πτέρυγα που επιτυγχάνει ελλειπτική φόρτιση παράγει τη μικρότερη δυνατή επαγόμενη αντίσταση. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει ακριβώς όπως περιγράφεται στη θεωρία.

Οι πιο σύγχρονες θεωρίες αφορούν την εφαρμογή διατάξεων ακροπτερυγίων, η οποίες κατ' ουσία αναδιανέμουν τύρβη μακριά από την πτέρυγα και τον ομόρου της, αφού στο ακροπτερύγιο έχουμε μεγάλη συγκέντρωση τύρβης. Αρχικά μελετήθηκε η απλή τοποθέτηση κάθετων πλακών στα ακροπτερύγια. Ωστόσο, η ανάγκη για διατάξεις που και θα μειώνουν την αντίσταση και δεν θα επιβαρύνουν τις πτέρυγες με πρόσθετες ροπές, οδήγησε στην εφαρμογή διατάξεων που αποτελούνται από μικρές πτέρυγες υψηλού λόγου επιμήκους. Τέλος, έχουν μελετηθεί και διατάξεις box, δηλαδή διπλάνων, όπου οι πτέρυγες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους.



Σχήμα 5.13, Διάφορες διατάξεις πτερύγων για εξάλειψη των τρισδιάστατων φαινομένων [22]

Γενικά, δεν υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις που να μπορούν να προβλέπουν την επίδραση μίας διάταξης στα ακροπτερύγια στην αντίσταση της πτέρυγας. Η επίδραση εξαρτάται άμεσα από τη μορφή της πτέρυγας και τα χαρακτηριστικά. Αυτό σημαίνει πως κάθε απόπειρα βελτίωσης των χαρακτηριστικών μίας πτέρυγας οδηγεί σε ένα πλήθος πειραμάτων που μελετούν διαφορετικές διατάξεις, ενώ η διάταξη που προκρίνεται δεν μπορεί να έχει γενική εφαρμογή. Επιπλέον, οι κατασκευάστριες εταιρείες πρέπει να επιλέξουν ανάμεσα στη βελτιωμένη αεροδυναμική και στα αυξημένα φορτία της πτέρυγας. Παρ' όλα αυτά, είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη η εφαρμογή τέτοιων διατάξεων σε όλα σχεδόν τα μεγάλα σύγχρονα επιβατικά αεροσκάφη.



Σχήμα 5.14, Ακροπτερύγιο του Boeing 737-700

6 Υπολογιστική Μοντελοποίηση Πτερύγων

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας παρουσιάζεται η υπολογιστική μοντελοποίηση των υπό ανάλυση πτερύγων. Πρόκειται, όπως αναφέρεται και προηγουμένως, για 2 πτέρυγες ορθογωνικές. Και οι 2 παράγονται με αεροτομή την συμμετρική ΝΑCA 0012. Η μία πτέρυγα έχει λόγω επιμήκους 1 και η άλλη έχει λόγω επιμήκους 3. Έτσι, θα γίνει φανερή η επίδραση του μεγέθους αυτού στα χαρακτηριστικά της πτέρυγας. Η μελέτη γίνεται για χαμηλές ταχύτητες και αριθμό Reynolds = 2 *10⁶, ο οποίος είναι αντιπροσωπευτικός για πτέρυγες αεροπορικών κατασκευών.

Η μοντελοποίηση και αριθμητική επίλυση του προβλήματος γίνεται από το πακέτο λογισμικού ANSYS (Design Modeler και Meshing) και ANSYS Fluent, αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα πακέτα είναι ενσωματωμένα στο ANSYS Workbench, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία γρήγορη και συστηματική, ενώ επιτρέπει και τροποποιήσεις σε οποιοδήποτε βήμα της διαδικασίας, χωρίς περαιτέρω ανάγκη για επέμβαση του χρήστη και στα υπόλοιπα κομμάτια. Επιπλέον, έγινε χρήση και της δυνατότητας για παράλληλη επεξεργασία με έναν διπύρηνο επεξεργαστή, εγκατεστημένο σε προσωπικό υπολογιστή.

Το συγκεκριμένο λογισμικό θεωρείται από τα πιο αξιόλογα, είναι αρκετά εύχρηστο (user friendly) και δίνει στο χρήστη πολλές επιλογές. Αυτό το καθιστά εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα στη διεθνή βιβλιογραφία, και αποτελεί μία καλή εναλλακτική του πειράματος, όταν το κόστος, οι πόροι και η ανεπαρκής ευελιξία που αυτό συνεπάγεται το καθιστούν αδύνατο. Μειονέκτημα του συγκεκριμένου πακέτου είναι οι χρονοβόρες λύσεις για τρισδιάστατα σύνθετα προβλήματα, ειδικά σε συμβατικούς προσωπικούς υπολογιστές.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται υφίστανται επεξεργασία και από τον Post Processor του Fluent, καθώς και από τον CFX-Post Processor, ώστε να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για τη ροή γύρω από τις πτέρυγες, ενώ γίνεται και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα που βρέθηκαν κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ένα NACA Research Memorandum [19]. Αυτό επιτρέπει την ασφαλέστερη τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων, ενώ αποτελεί και επιβεβαίωση για το μοντέλο που υιοθετήθηκε, ώστε αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω μελέτη, όπως έλεγχο ροής γύρω από αντίστοιχες πτέρυγες.

6.2 Κατασκευή γεωμετρίας και Υπολογιστικού Χωρίου

Για την κατασκευή της γεωμετρίας και του υπολογιστικού χωρίου έγινε χρήση του ANSYS Design Modeler, το οποίο είναι το λογισμικό CAD που διατίθεται με το

ANSYS. Φυσικά, υπάρχει και η δυνατότητα για εισαγωγή γεωμετρίας από άλλα σχεδιαστικά πακέτα λογισμικού. Δεδομένου, όμως, ότι η πτέρυγες που αναλύονται είναι ορθογωνικές, χωρίς κάποια σύνθετη διάταξη ακροπτερυγίων ώστε να απαιτείται η χρήση εξειδικευμένου CAD λογισμικού.

Αρχικά, για το σχεδιασμό της πτέρυγας απαιτείται η εισαγωγή της αεροτομής. Η αεροτομή είναι σύνθετη γεωμετρία, η οποία δημιουργείται βάση σημείων με συγκεκριμένες συντεταγμένες και μία παρεμβολή με κάποια καμπύλη (συνήθως splines). Στο διαδίκτυο υπάρχει πληθώρα αρχείων με τις συντεταγμένες για σχηματισμό αεροτομών και το λογισμικό διαθέτει τη δυνατότητα να κάνει εισαγωγή σημείων από .txt και .dat αρχεία με συγκεκριμένη μορφή. Οι συντεταγμένες αυτές είναι σε αδιαστατοποιημένη μορφή. Χρησιμοποιήθηκε αρχείο με πολλά σημεία, 130 για την ακρίβεια, για την περιγραφή της αεροτομής, ώστε να περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό οξείες ακμές, οι οποίες και είναι ανακριβείς και εισάγουν σφάλματα κατά τη λύση του προβλήματος. Επιπροσθέτως, δεν έγινε διαστατοποίηση των συντεταγμένων για την κυρίως πτέρυγα, μόνο για τα ακροπτερύγια.

Μετά την εισαγωγή των σημείων, δημιουργείται το περίγραμμα της αεροτομής με χρήσης της 3d καμπύλης που υπάρχει στο Design Modeler. Έπειτα, το περίγραμμα δημιουργεί την επιφάνεια της αεροτομής. Ακολούθως, γίνεται extrude της επιφάνειας αυτής στο επιθυμητό εύρος, δηλαδή 1 και 3 μέτρων στις περιπτώσεις που αναλύθηκαν.

Στις περιπτώσεις που υπήρχε και στοιχειώδης διάταξη ακροπτερυγίων δημιουργήθηκαν ακόμα 2 επιφάνειες αεροτομών, οι οποίες ήταν το 60% της διάστασης της αρχικής. Στην περίπτωση της πτέρυγας με λόγο επιμήκους 1 τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2 εκατοστών από το κάθε άκρο και στην περίπτωση με λόγο επιμήκους 3 σε απόσταση 5 εκατοστών. Στη συνέχεια συνδέθηκαν με την κυρίως πτέρυγα με την εντολή skin/loft, που δημιουργεί μία επιφάνεια σύνδεσης των 2 άκρων. Έτσι, έγινε ένα ακροπτερύγιο, το οποίο δεν ήταν τόσο απότομο και προσέγγιζε περισσότερο την πραγματικότητα (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1, Πτέρυγα και ακροπτερύγια

Το υπολογιστικό χωρίο γύρω από την εκάστοτε πτέρυγα έγινε δημιουργώντας, αρχικά, μία επιφάνεια η οποία είναι ημικυκλική στο σημείο εισόδου της ροής και ορθογωνική στη συνέχεια, καθώς μία τέτοια μορφή ενδείκνυται από τη βιβλιογραφία. Η επιφάνεια αυτή γίνεται extruded ώστε να καλύψει πλήρως την πτέρυγα και στη συνέχεια η πτέρυγα αποκόπτεται από το εσωτερικό, δημιουργώντας το υπολογιστικό χωρίο. Το χωρίο αυτό, το οποίο θα πλεγματοποιηθεί στη συνέχεια, είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να συμπεριλαμβάνει πλήρως κάθε φαινόμενο που αναπτύσσεται στην πτέρυγα, καθώς και τον ομόρου, ο οποίος περιλαμβάνει σημαντική πληροφορία, ιδιαίτερα για τους στροβίλους στα ακροπτερύγια και για την αεροδυναμική αντίσταση.



Σχήμα 6.2, Πτέρυγα και υπολογιστικό χωρίο πριν το extrusion που θα επικαλύψει την πτέρυγα

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2, το χωρίο έχει ύψος 16 φορές το μήκος της χορδής της πτέρυγας και μήκος 23 φορές το μήκος της χορδής. Το πλάτος του χωρίου ήταν όσο το εύρος της πτέρυγας με την προσθήκη εύρους άλλου ενός μήκους χορδής σε κάθε μεριά της πτέρυγας.

6.3 Κατασκευή Πλέγματος [6]

Η κατασκευή του πλέγματος αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα σε κάθε πρόβλημα υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Με την κατασκευή του πλέγματος, διαιρείται το υπολογιστικό χωρίο σε μικρούς πεπερασμένους όγκους (elements), καθένας με συγκεκριμένο αριθμό κόμβων (nodes). Οι διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται σε αυτούς τους όγκους. Όπως είναι εύκολα φανερό, η ακρίβεια της λύσης, η ταχύτητα επίλυσης, η σύγκλιση ή μη των ζητούμενων μεγεθών εξαρτώνται από το πλέγμα. Υπάρχουν πολλοί τύποι πλέγματος. Η βασική κατηγοριοποίηση είναι το δομημένο και το αδόμητο πλέγμα.

6.4 Τύποι Πλεγμάτων

Το δομημένο πλέγμα χαρακτηρίζεται από τετράπλευρα στοιχεία (elements) σε δισδιάστατη ανάλυση και εξάπλευρα σε τρισδιάστατη ανάλυση, τα οποία δημιουργούνται βάσει κάποιου αλγορίθμου. Τα στοιχεία στρέφονται και παραμορφώνονται ώστε να συμμορφωθούν με το χωρίο που πλεγματοποιείται, ενώ παράλληλα υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για την εξομάλυνση πλέγματος. Απαιτείται σημαντική συμβολή από το χρήστη για τη δημιουργία αξιόλογου δομημένου πλέγματος.



Σχήμα 6.3, Δομημένο πλέγμα C τυπικό για δισδιάστατη ανάλυση αεροτομής [21]

Το αδόμητο πλέγμα, αντιθέτως, σχηματίζεται διαφορετικά. Χρησιμοποιεί τριγωνικά και τετράπλευρα στοιχεία για δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση. Το πρόγραμμα γεμίζει το υπολογιστικό χωρίο με αυτά τα στοιχεία, τα οποία παραμορφώνονται και στρέφονται, όπως και στο δομημένο πλέγμα, ενώ το μέγεθός τους καθορίζεται από τη θέση τους και τις επιλογές του χρήστη. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα και για αδόμητο πλέγμα που δεν σέβεται απολύτως τη γεωμετρία του χωρίου, ώστε να μειωθούν οι παραμορφώσεις των στοιχείων, οι οποίες σε ακραία



Σχήμα 6.4, Αδόμητο πλέγμα γύρω από αεροσκάφος

Μία σύγκριση των 2 πλεγμάτων δείχνει ότι τα δομημένα πλέγματα υπερέχουν, αφού με μικρότερο αριθμό στοιχείων προκύπτει αντίστοιχη πυκνότητα πλέγματος με το αδόμητο πλέγμα, ενώ τα στοιχεία παραμορφώνονται πιο εύκολα και με μικρότερες συνέπειες. Ωστόσο, ένα καλό αδόμητο πλέγμα δεν είναι πάντα εφικτό

και όταν είναι, αυτό απαιτεί μεγάλο input από το χρήστη. Τα αδόμητα πλέγματα απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων και συχνά δεν είναι τόσο ακριβή, ωστόσο μπορούν να δημιουργηθούν εύκολα και γρήγορα και να δώσουν γρήγορες εκτιμήσεις.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις οδήγησαν στη δυνατότητα κατασκευής υβριδικών πλεγμάτων, δηλαδή πλεγμάτων που συνδυάζουν δομημένο και αδόμητο. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται από το χρήστη να ορίσει τις περιοχές στις οποίες θα υπάρξει το κάθε είδος πλέγματος και να κάνει και τις κατάλληλες ενέργειες ώστε τα 2 πλέγματα να συνδέονται ομαλά. Τα υβριδικά πλέγματα συνήθως επιλύουν πολλά από τα μειονεκτήματα του κάθε είδους ξεχωριστά. Ωστόσο, απαιτούνται αρκετές εντολές από το χρήστη και ενδεχομένως κάποια στοιχεία σε περιοχές πυκνού πλέγματος να παραμορφώνονται σημαντικά, οδηγώντας σε πτώση της ποιότητας του πλέγματος και πιθανή απόκλιση της λύσης.





6.5 Κατασκευή πλέγματος για πτέρυγα με λόγο επιμήκους 1

Εξετάστηκαν 2 πτέρυγες με λόγο επιμήκους 1, μία χωρίς κάποιο ιδιαίτερο ακροπτερύγιο και μία με απλή στένωση της πτέρυγας στο ακροπτερύγιο. Δοκιμάστηκαν ένα πλήθος διαφορετικών πλεγμάτων, σε μία προσπάθεια να γίνει μία εξισορρόπηση μεταξύ της ακρίβειας της λύσης και του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.

Αρχικά έγινε απόπειρα δημιουργίας πλήρους δομημένου πλέγματος και γύρω από την πτέρυγα και στον ομόρου. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν μπορούσε να δώσει ποιοτικό πλέγμα, καθώς απαιτούνταν η δημιουργία σύνθετων γεωμετριών, οι οποίες στη συνέχεια εμπόδιζαν τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου πλέγματος γύρω από την πτέρυγα, αφού δεν υπήρχε κάποια συνέχεια ανάμεσα στις γεωμετρίες.

Η δημιουργία πλήρως αδόμητου πλέγματος ήταν μεν εύκολη, ωστόσο αύξανε κατακόρυφα τον αριθμό των στοιχείων που απαιτούνταν για μία ακριβή λύση, γεγονός που καθιστούσε αυτό το πλέγμα απαγορευτικό. Επιπλέον, απαιτούσε τη διαίρεση του υπολογιστικού χωρίου σε αρκετά μικρότερα, ώστε να μπορεί να γίνει, κατ' εντολή του χρήστη, πύκνωση του πλέγματος στα σημεία που απαιτούνταν (ακμές, ομόρους ακροπτερυγίων). Αυτό αναπόφευκτα οδηγεί σε επιπλέον εντολές από το χρήστη, οι οποίες, πέραν της αύξησης των στοιχείων, δυσκολεύουν και την κατασκευή πλέγματος και την επεξεργασία μετά. Επιπροσθέτως, η ύπαρξη έντονων συνεκτικών φαινομένων πάνω στην επιφάνεια της πτέρυγας είναι προτιμότερη.

Αυτό οδήγησε στην προτίμηση ενός υβριδικού πλέγματος. Γύρω από την πτέρυγα και στην είσοδο της ροής, όπου οι γεωμετρία του χωρίου είναι σύνθετη, δημιουργήθηκε ένα αρκετά πυκνό αδόμητο πλέγμα, ενώ στον ομόρου της πτέρυγας φτιάχτηκε δομημένο πλέγμα, το οποίο επιτρέπει την προσομοίωση του ομόρου με μικρότερο αριθμό στοιχείων. Επιπλέον, στην επιφάνεια της πτέρυγας δημιουργήθηκε ένα λεπτό ομοιόμορφο πλέγμα για την προσομοίωση του οριακού στρώματος. Η δυνατότητα αυτή του Mesher του ANSYS βελτιστοποίησε την απόδοση του πλέγματος και έδωσε τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα όλων των ειδών πλέγματος, αφού αν χρησιμοποιούνταν τετράπλευρα στοιχεία και για την μοντελοποίηση του οριακού στρώματος, θα υπήρχε γενικότερη πύκνωση στο πλέγμα (ισχύει ότι τα τετράπλευρα στοιχεία διαφορές σε μέγεθος με τα γειτονικά τους) και μειωμένη ακρίβεια αποτελεσμάτων γύρω από την πτέρυγα.

Για την κατασκευή αυτού του πλέγματος, το υπολογιστικό χωρίο διαχωρίστηκε σε 2 μικρότερα. Το πρώτο περιλαμβάνει την είσοδο και την πτέρυγα και το δεύτερο τον ομόρου. Ωστόσο, το χωρίου του ομόρου δεν αρχίζει στο χείλος εκφυγής της πτέρυγας, αλλά 20cm πιο πίσω, ώστε να μπορεί να υπάρξει ομαλή μετάβαση από το αδόμητο στο δομημένο πλέγμα.

Αρχικά, επιλέχτηκε η ποιότητα που ζητείται από το πλέγμα. Σε όλες τις περιπτώσεις ήταν fine, δηλαδή πυκνό. Επιπροσθέτως, επιλέγεται και ένα relevance πλέγματος, δηλαδή πόσο fine θέλει ο χρήστης να είναι το πλέγμα. Το relevance είναι ενδοεπιλογή της ποιότητας του πλέγματος που αρχικά ζητήθηκε, δηλαδή ένα αραιό πλέγμα με μεγάλο relevance δεν οδηγεί σε ένα fine πλέγμα. Στα πλέγματα που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκε relevance 50, με το μέγιστο να είναι 100.

Τα επιπλέον εργαλεία που διαθέτει το ANYS Mesher και χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του πλέγματος ήταν κυρίως τα edge sizings, δηλαδή χειροκίνητα ορίζονταν ο αριθμός των διαμελίσεων σε ακμές που απαιτούσαν πυκνό πλέγμα. Έτσι, ορίστηκαν στις ακμές της πτέρυγας 250 διαμερίσεις, οι οποίες είναι αρκετές για ένα πυκνό πλέγμα στα άκρα της πτέρυγας, όπου και υπάρχει απαίτηση για πυκνότερο πλέγμα. Επίσης, ορίστηκε μεγάλος αριθμός διαμελίσεων και στο κάθετο σύνορο του δομημένου και αδόμητου πλέγματος (με έμφαση στο κέντρο που βρίσκεται ο ομόρους της πτέρυγας), ώστε να υπάρχει ομαλή συνέχεια στις 2 επιφάνειες, αφού στο αδόμητο πλέγμα είχαμε πολύ μικρά στοιχεία. Μιας και ο ομόρους αποτελείται από δομημένο πλέγμα, η επιλογή αυτή καθορίζει πλήρως το πλέγμα του ομόρου της πτέρυγας. Αν και δίνεται η δυνατότητα μέσω του προγράμματος να οριστούν το μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων και σφαίρες επιρροής, στις οποίες πυκνώνει σημαντικά το πλέγμα, κάτι τέτοιο δεν πραγματοποιήθηκε γιατί αυτές οι επιλογές οδηγούν σε πολύ μεγάλους χρόνους επεξεργασίας και κατασκευής του πλέγματος, χωρίς το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Η επιλογή που χρησιμοποιήθηκε στην πτέρυγα με AR 1 και χωρίς ακροπτερύγια είναι το Mapped Face Meshing στις επιφάνειες της πτέρυγας. Η επιλογή αυτή διαβάζει τα edge sizings που ορίστηκαν στις ακμές της πτέρυγας και εφόσον αυτά ταιριάζουν (απέναντι πλευρές έχουν διαχωριστεί ομοιόμορφα) δημιουργεί ένα ομοιόμορφο πλέγμα με βάση τις επιλογές αυτές γύρω από όλη την πτέρυγα. Η εντολή αυτή, αν και απαιτεί πολύ μεγάλο χρόνο επεξεργασίας, δημιουργεί ένα σαφώς καλύτερο, αλλά και σημαντικά πιο χρονοβόρο προς επίλυση, πλέγμα.

Ακολουθούν εικόνες των πλεγμάτων που κατασκευάστηκαν. Τα σχήματα 6.6 έως 6.9 αφορούν την πτέρυγα χωρίς ιδιαίτερα ακροπτερύγια και στην συνέχεια, τα σχήματα 6.10 έως 6.13 αποτελούν εικόνες του πλέγματος της πτέρυγας, στην οποία έχουν δημιουργηθεί κάποια βασικά ακροπτερύγια, τα οποία προκύπτουν από μία μικρή μείωση του μήκους της χορδής της πτέρυγας στα άκρα κατά 30%. Στις εικόνες του πλέγματος φαίνεται στις άκρες της πτέρυγας η διαφορά στις 2 περιπτώσεις.



Σχήμα 6.6, Γενική άποψη υπολογιστικού χωρίου πτέρυγας με υβριδικό πλέγμα, χωρίς ιδιαίτερα ακροπτερύγια



Σχήμα 6.7, Προβολή πλέγματος κοντά στην πτέρυγα, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο εύρος της πτέρυγας.



Σχήμα 6.8, Προβολή πλέγματος κοντά στην πτέρυγα, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο χορδή της πτέρυγας. Φαίνονται οι άκρες τις πτέρυγας χωρίς ιδιαίτερα ακροπτερύγια



Σχήμα 6.9, Προβολή πλέγματος πτέρυγας και συνόρων δομημένου-αδόμητου πλέγματος του ομόρου, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο εύρος της πτέρυγας.



Σχήμα 6.10, Προβολή πλέγματος κοντά στην δεύτερη πτέρυγα με aspect ratio 1, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο εύρος της πτέρυγας. Στο βάθος φαίνεται το ακροπτερύγιο και η διαμόρφωσή του.



Σχήμα 6.11, Προβολή πλέγματος κοντά στην πτέρυγα, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο χορδή της πτέρυγας. Φαίνονται οι άκρες τις πτέρυγας με τα ακροπτερύγια.



Σχήμα 6.12, Προβολή πλέγματος κοντά στο αριστερό άκρο της πτέρυγας, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο χορδή της πτέρυγας.



Σχήμα 6.13, Προβολή πλέγματος πτέρυγας και συνόρων δομημένου-αδόμητου πλέγματος του ομόρου, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο εύρος της πτέρυγας.

Γίνεται φανερό πως το πλέγμα που κατασκευάστηκε για την περίπτωση χωρίς ιδιαίτερα ακροπτερύγια είναι πολύ πυκνό, ιδιαίτερα στην περιοχή που αναμένεται η ύπαρξη του οριακού στρώματος. Αυτό δεν ισχύει και για την 2^η περίπτωση πτέρυγας, όπου το πλέγμα είναι σαφέστατα πιο αραιό. Η διαφορά αυτή υπάρχει γιατί στο αραιό πλέγμα δεν είναι ενεργοποιημένη η επιλογή που δίνει ομοιόμορφο πλέγμα γύρω από την πτέρυγα, αφού μετά τη λύση του προβλήματος με το 1^ο πλέγμα έγινε φανερό πως το πυκνό πλέγμα απαιτεί υπολογιστικούς πόρους που δεν ήταν διαθέσιμοι και ως εκ τούτου η λύση έτρεξε μόνο λίγες επαναλήψεις, παρά το μεγάλο χρονικό διάστημα που διατέθηκε.

Μετά την κατασκευή του πλέγματος πρέπει να ορίσουμε και τις επιφάνειες που θα εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες, αφού κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό να συμβεί μέσα στο fluent. Έτσι, ορίζουμε τις 2 επιφάνειες εισόδου (αριστερή επιφάνεια και κάτω, αφού η ροή θα εισέρχεται υπό γωνία), τις 2 επιφάνειες εξόδου (δεξιά και άνω) και την συνολική επιφάνεια της πτέρυγας. Οι υπόλοιπες επιφάνειες θα είναι επιφάνειες εισόδου (αριστερή ολίσθησης, οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε κάτι άλλο.



Σχήμα 6.14, Με πράσινο χρώμα φαίνονται οι επιφάνειες εισόδου (inlets) της ροής



Σχήμα 6.15, Με πράσινο χρώμα και κόκκινο βελάκια φαίνονται οι επιφάνειες εξόδου (outlets) της ροής

6.6 Κατασκευή πλέγματος πτέρυγας με λόγο επιμήκους 3

Στην πτέρυγα με αυξημένο εύρος ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως και πριν, αλλά δεδομένου ότι το υπολογιστικό χωρίο τριπλασιάζεται και συνεπώς τριπλασιάζονται και τα στοιχεία, δεν έγινε απόπειρα για ένα πολύ πυκνό πλέγμα, αφού ήδη το πλέγμα που προέκυψε περιλαμβάνει πάνω από 3 εκατομμύρια κόμβους. Και πάλι στα edge sizings των ακμών της πτέρυγας χρησιμοποιήθηκαν 250 διαμελίσεις. Ωστόσο, λόγο του αυξημένου εύρους του υπολογιστικού χωρίου (τριπλασιάστηκε σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση) έγινε σαφέστερος ορισμός του αριθμού των διαμελίσεων που επιθυμούμε στα σύνορα δομημένου και αδόμητου πλέγματος, για να αποφευχθεί τυχόν αραίωση στον ομόρου της πτέρυγας.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η πτέρυγα είχε λίγο μεγαλύτερες διατάξεις ακροπτερυγίων (αφού λόγω του αυξημένου εύρους ήταν μικρή η επιρροή τους στο AR), γεγονός που βοήθησε στην λίγο μεγαλύτερη ομαλότητα του πλέγματος. Αυτό βοήθησε σε μία πιο ομαλή σύνδεση του δομημένου πλέγματος του οριακού στρώματος με το αδόμητο κομμάτι έξω από αυτό. Επιπλέον, μειώθηκε κατά 1cm το πάχος του δομημένου πλέγματος γύρω από την πτέρυγα, αφού κρίθηκε από την προηγούμενη περίπτωση ότι αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των στοιχείων χωρίς δραματική επίπτωση στα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Ακολουθούν εικόνες του πλέγματος του υπολογιστικού χωρίου γύρω από την πτέρυγα (σχήμα 6.16 έως 6.19).



Σχήμα 6.16, Γενική άποψη υπολογιστικού χωρίου για πτέρυγα με aspect ratio 3, μετά την πλεγματοποίηση



Σχήμα 6.17, Προβολή πλέγματος κοντά στην δεύτερη πτέρυγα με aspect ratio 3, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο εύρος της πτέρυγας. Στο βάθος φαίνεται το ακροπτερύγιο



Σχήμα 6.18, Προβολή πλέγματος κοντά στην πτέρυγα με aspect ratio 3, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο χορδή της πτέρυγας. Φαίνονται οι άκρες τις πτέρυγας με τα ακροπτερύγια.



Σχήμα 6.19, Προβολή πλέγματος κοντά στο αριστερό άκρο της πτέρυγας, όπως φαίνεται σε τομή κάθετη στο χορδή της πτέρυγας.
6.7 Τελική μοντελοποίηση και επίλυση στο ANSYS FLUENT

Η επίλυση των προβλημάτων γίνεται με το Fluent. Το Fluent αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά επίλυσης ρευστοδυναμικών προβλημάτων. Διαθέτει δυνατότητες επίλυσης ροής συνεκτικής, συμπιεστής/ασυμπίεστης, προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας, προβλημάτων χημικών αντιδράσεων, διφασικών ροών, προβλημάτων καύσης κτλ. Διαθέτει ενσωματωμένα πολλά μοντέλα τύρβης, ώστε να διαχειρίζεται και ζητήματα τυρβώδους ροής. Επιπλέον, έχει δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας σε πολλαπλούς πυρήνες επεξεργαστών.

Επειδή το πρόβλημα είναι ασυμπίεστης ροής (ο αέρας ρέει με ταχύτητα 29.2 m/s, πολύ κάτω των 100 m/s που είναι περίπου το όριο μέχρι το οποίο η υπόθεση της μη συμπιεστότητας ισχύει) χωρίς μεταφορά θερμότητας, επιλέγουμε το Fluent να λύσει μόνο τις εξισώσεις διατήρησης της μάζας και ορμής και όχι την εξίσωση διατήρησης ενέργειας. Επιλέγουμε διπλή ακρίβεια και τρισδιάστατο πρόβλημα, ενώ μόλις γίνει εισαγωγή του πλέγματος, ελέγχουμε το πλέγμα και την ποιότητά του, ώστε να καταδειχθεί εάν το πρόγραμμα μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα στο εισαχθέν πλέγμα. Στη συνέχεια, λόγω της ασυμπίεστης ροής επιλέγουμε η λύση να γίνει με τον Pressure Based Solver.

Το μέσο που θα διατρέχει το χωρίο είναι αέρας και γίνεται η αντίστοιχη επιλογή στο πρόγραμμα. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι η πυκνότητα του αέρα (ασυμπίεστος), $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, επιλέγεται σταθερή συνεκτικότητα μ=1.7894 *10⁻⁵ kg/ms, ενώ το μήκος χορδής της κάθε πτέρυγας είναι c=1m. Το πείραμα με το οποίο θα γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων στο τέλος διενεργήθηκε για διάφορους αριθμούς Reynolds. Επιλέγεται να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα με αριθμό Reynolds Re=2*10⁶. Αυτό μας δίνει αυτόματα την ταχύτητα της ροής, η οποία προκύπτει U=19.2 m/s, αφού Re = c*ρ*U/μ. Σε κάθε πτέρυγα η προσομοίωση γίνεται για 2 γωνίες ροής, 4 μοίρες και 6 μοίρες. Το πρόβλημα σε τέτοιες γωνίες μπορεί να θεωρηθεί μόνιμο, αφού για πτέρυγα με αεροτομή NACA 0012 είναι πειραματικά αποδεδειγμένο ότι σε αυτές τις γωνίες δεν έχουμε αποκόλληση ροής και, συνεπώς, δεν έχουμε μη μόνιμες εκλύσεις στροβίλων από το χείλος εκφυγής της πτέρυγας.

Για τη μοντελοποίηση της τύρβης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras, που είναι από τα πλέον κατάλληλα για αεροδυναμικές ροές και δουλεύει πολύ καλά σε αριθμούς Reynolds, όπως αυτός ο οποίος χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση. Οι σταθερές του μοντέλου αναλύονται παραπάνω. Ορίζουμε πίεση αναφοράς (όλες οι πιέσεις θα είναι εκφρασμένες προς αυτή την πίεση) την περιβαλλοντική πίεση p=101325 Pa. Δεδομένου ότι το πείραμα με το οποίο θα γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σε αεροσήραγγα χαμηλής τύρβης, επιλέγουμε ως αρχική συνθήκη για την τύρβη, το modified turbulent viscosity = 10^{-5} .

Συνοψίζοντας, οι συνθήκες στις οποίες θα διεξαχθούν τα πειράματα είναι :

Πυκνότητα ρ	1.225 kg/ m ³
Ταχύτητα ροής U	29.2 m/s
Συνεκτικότητα μ	1.7894 *10 ⁻⁵ kg/ms
Πίεση αναφοράς ρ	101325 Pa
Μοντέλο Τύρβης	Spalart-Allmaras
Modified Turbulent Viscosity	10 ⁻⁵
Reynolds number Re	2*10 ⁶
Γωνίες ροής που θα	4° και 6°
προσομοιωθούν	
Λόγοι επιμήκους πτερύγων	1 και 3

Στο Fluent θα χρειαστεί να ορίσουμε τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Αυτές είναι ίδιες ανεξαρτήτως της πτέρυγας που αναλύεται (αφού οι επιφάνειες στις οποίες θα επιβληθούν δεν μεταβάλλονται πέραν του μεγέθους τους). Στις επιφάνειες που έχουμε είσοδο ροής (inlet) χρειάζεται να βάλουμε την ταχύτητα της ροής βρίσκοντας τις συνιστώσες της ταχύτητας σε κάθε γωνία πρόσπτωσης (υπάρχουν μόνο x και y συνιστώσες). Έτσι έχουμε:

	Γωνία 4°	Γωνία 6°
cos	0.99756	0.99452
sin	0.0349	0.10453
Συνολική ταχύτητα	29.2 m/s	29.2 m/s
x συνιστώσα ταχύτητας	29.1289 m/s	29.04 m/s
y συνιστώσα ταχύτητας	2.0369 m/s	3.052 m/s

Σε αυτό τη σημείο ζητείται και να ορίσουμε το Modified Turbulent Viscosity. Στις επιφάνειες εξόδου της ροής (outlets) που έχουμε ορίσει, επιλέγουμε οριακή συνθήκη pressure outlet, η οποία δεν ζητάει κάποια άλλη είσοδο από το χρήστη. Την επιφάνεια της πτέρυγας την έχουμε ονομάσει wingwalls, και το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται αμέσως ότι πρόκειται για τοίχο χωρίς ολίσθηση (no slip wall), οπότε δεν απαιτείται κάποια περαιτέρω ενέργεια. Τα υπόλοιπα τοιχώματα πρέπει να οριστούν ως τοιχώματα ελεύθερης ολίσθησης, πράγμα που επιτυγχάνεται ορίζοντας τα ως τοιχώματα με επιτρεπόμενη ολίσθηση και μηδενικών διατμητικών τάσεων. Το εσωτερικό του πλέγματος γίνεται απευθείας αντιληπτό ως το εσωτερικό του πλέγματος.

Αφού ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες, μπορούν να επιλεγούν οι αριθμητικές παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν κατά την επίλυση. Αρχικά, επιλέγεται η χρήση του αλγορίθμου SIMPLE για τη λύση του προβλήματος.

Ο αλγόριθμος SIMPLE είναι ένας ευρέως διαδεδομένος αλγόριθμος για CFD λογισμικά που συσχετίζει πιέσεις και ταχύτητες. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί μία σχέση ανάμεσα σε διορθώσεις ταχύτητας και πίεσης για να επιβάλει την συνθήκη

διατήρησης της μάζας και να υπολογίσει το πεδίο πιέσεων. Αρχικά, αν οι εξισώσεις διατήρησης της ορμής υπολογιστούν με βάση ένα αρχικό πεδίο πιέσεων p* που έχει οριστεί, η παροχή μάζας στις επιφάνειες των στοιχείων J_f* που θα προκύψει δεν θα ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της μάζας. Έτσι απαιτείται η εισαγωγή ενός όρου διόρθωσης της παροχής μάζας J_f' , ώστε $J_f = J_f^* + J_f'$. Ο αλγόριθμος SIMPLE γράφει το J'_{f} ως: $J'_{f} = d_{f}(p'_{c0} - p'_{c1})$, όπου p' είναι η διόρθωση της πίεσης σε κάθε κελί. Ο αλγόριθμος στη συνέχεια υποκαθιστά τις εξισώσεις που περιγράφουν τη διόρθωση της παροχής J στη διακριτοποιημένη εξίσωση ορμής ώστε να λάβει μία διακριτοποιημένη διατύπωση της διόρθωσης της πίεσης στο κελί: $a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}' + b$, όπου b είναι η καθαρός ρυθμός παροχής μάζας στο κελί και α_P ο συντελεστής υποχαλάρωσης για την πίεση. Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση με κάποια αριθμητική μέθοδο υπολογίζεται η διόρθωση της πίεσης σε κάθε κελί και η διόρθωση της παροχής: $p = p^* + a_p p'$ και $J_f = J'_f + d_f (p'_{c0} - p'_{c1})$.

Για καλύτερη ακρίβεια λύσης, επιλέγεται 2^{ης} τάξης σχήματα διακριτοποίησης για όλα τα μεγέθη, δηλαδή την πίεση, την ταχύτητα και την τυρβώδη συνεκτικότητα (όπου γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου τύρβης Spalart-Allmaras που αναλύθηκε παραπάνω). Επιπλέον, πρέπει να επιλεγούν συντελεστές υποχαλάρωσης. Χρησιμοποιήθηκαν οι default του προγράμματος, δηλαδή 0.3 για την πίεση, 1 για την πυκνότητα, 0.7 για την ορμή και 1 για τις δυνάμεις που ασκούνται σε στερεά σώματα.

Τώρα θα χρειαστεί να επιλέξουμε τα monitors που θέλουμε να μας δίνει το Fluent, τα οποία θα δείξουν κατά πόσο έχει επιτευχθεί σύγκλιση της λύσης, ενώ παράλληλα έχουν και άμεσο ενδιαφέρον, μιας και στα monitors που μπορούν να παρασταθούν είναι ο συντελεστής αντίστασης και ο συντελεστής άνωσης, οι οποίοι αποτελούν και τα βασικά μεγέθη που μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε. Αρχικά, επιλέγεται η προβολή των residuals, δηλαδή των μεταβολών της ταχύτητας σε κάθε επανάληψη σε σχέση με την προηγούμενη. Εδώ μπορούμε να επιλέξουμε και κριτήριο σύγκλισης, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν επιλέχθηκε καθώς οι επαναλήψεις που εκτελούνταν σε κάθε πείραμα ήταν περιορισμένες και αρκούσε η προσωπική επίβλεψη των τιμών των residuals.

Μετά επιλέγουμε ως monitors και τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης της πτέρυγας. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα συντεταγμένων που έχει οριστεί κατά την πλεγματοποίηση έχει την αρχή των αξόνων στο χείλος προσβολής και στο άκρο της πτέρυγας. Η άνωση και αντίσταση είναι οι 2 συνιστώσες της δύναμης που ασκείται στην πτέρυγα, αναλυμένης στο διάνυσμα της ταχύτητας. Έτσι, για να υπολογιστεί η ζητούμενη άνωση και αντίσταση (μιας και η ταχύτητα δεν είναι οριζόντια αλλά εισέρχεται υπό γωνία στο πρόβλημα). Συνεπώς, πρέπει να ορίσουμε κάποιους συντελεστές, ώστε να συσχετίζονται οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης που θέλουμε να υπολογίσουμε με αυτούς που υπολογίζει το Fluent για κάθε γωνία ροής.

Οι δυνάμεις που ασκούνται φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

Οι δυνάμεις Ν, Α σχετίζονται με το σύστημα συντεταγμένων του Fluent, ενώ ζητούνται οι δυνάμεις L, D. Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης ορίζονται ως:

$$c_L = L / (0.5*\rho*U^{2*}c*b)$$

 $c_D = D / (0.5*\rho*U^{2*}c*b),$

όπου c το μήκος της χορδής και b το εκπέτασμα της πτέρυγας.

Έτσι, οι σχέσεις που συνδέουν του ζητούμενους συντελεστές άνωσης και ταχύτητας με αυτούς που υπολογίζει το Fluent είναι οι:

$$c_L = c_N * \cos \alpha - c_A * \sin \alpha$$

 $c_D = c_N * \sin \alpha - c_A * \cos \alpha$

Μετά τον ορισμό των monitors, θα εισάγουμε τα μεγέθη αδιαστατοποίησης, ώστε να γίνει σωστά ο υπολογισμός των συντελεστών δυνάμεων. Θέτουμε να γίνει ο υπολογισμός τους από το inlet του υπολογιστικού χωρίου, και έτσι το πρόγραμμα παίρνει τις απαραίτητες τιμές αδιαστατοποίησης από τις τιμές που τέθηκαν στην είσοδο της ροής. Συγκεκριμένα, ταχύτητα 29.2 m/s, 1.225 kg/m³ για την πυκνότητα, 1m για το χαρακτηριστικό μήκος χορδής, με βάση το οποίο υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds από το πρόγραμμα και 1 ή 3 m² για την χαρακτηριστική επιφάνεια (ανάλογα την πτέρυγα που αναλύεται, αφού η πτέρυγα με AR 3 θέλει 3m², αφού το εύρος της πτέρυγας είναι 3πλάσιο του μήκους της).

Πλέον, μπορεί να γίνει αρχικοποίηση του μόνιμου προβλήματος, ώστε στη συνέχεια να επιλυθεί. Για μεγαλύτερη ακρίβεια αρχικοποίησης, θα γίνουν 2 στάδια. Αρχικά, γίνεται μία πολύ απλή αρχικοποίηση του προβλήματος θέτοντας σε όλους τους κόμβους του υπολογιστικού χωρίου την ταχύτητα και την πίεση της επιφάνειας εισόδου της ροής (inlet). Ωστόσο, αυτή η αρχικοποίηση είναι πάρα πολύ μακριά από την πραγματική λύση του προβλήματος (το c_L είναι τιμή άνω του 3, αντί για το αναμενόμενο 0.1 της πτέρυγας με AR 3). Συνεπώς, απαιτούνται σημαντικά περισσότερες χρονοβόρες επαναλήψεις για να έχουμε σύγκλιση της λύσης. Αυτό, οδήγησε στην περαιτέρω βελτίωση των αρχικών τιμών με χρήση του Full Multi-Grid Initialization.

To Full Multi-Grid Initialization όταν ενεργοποιηθεί (γίνεται μέσα από τη γραμμή εντολών: solve – initialize – FMG) επιλύει τις εξισώσεις Euler στο χωρίο, αφού πρώτα γίνει μία αραίωση του υπάρχοντος πλέγματος (με χρήση της μεθόδου Reverse Cuthill-McKee) και κάνει γραμμική παρεμβολή στα ενδιάμεσα σημεία που παραλήφθηκαν. Αν και δεν δίνει τιμές για τα μεγέθη της τύρβης, δίνει πολύ πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις για τα μεγέθη της πίεσης, όπως μπορεί να φανεί από τον Post Processor του Fluent. Η δυνατότητα να επισκοπηθούν τα αποτελέσματα στον

Post Processor είναι σημαντική, αφού μπορεί να φανεί πριν την πλήρη επίλυση του προβλήματος, αν έχει μοντελοποιηθεί σωστά ή αν έχει παραληφθεί κάτι. Αν και το FMG απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο σε σχέση με την απλή αρχικοποίηση, συμφέρει σημαντικά καθώς η λύση των εξισώσεων Euler είναι αρκετά γρήγορη και μειώνει σημαντικά τον αριθμό των απαιτούμενων επαναλήψεων στο πλήρες πλέγμα.

Μετά την αρχικοποίηση μπορεί να γίνει πλήρης επίλυση του προβλήματος. Αρχικά επιλέγεται το Check Case, το οποίο θα παρουσιάσει τυχόν ενστάσεις ή συμβουλές από το Fluent για τη μοντελοποίηση που έγινε. Στη συνέχεια, εισάγεται ο αριθμός των επαναλήψεων που επιθυμείται να γίνουν και συγκεκριμένα 40, αφού τόσες είναι αρκετές για ικανοποιητική σύγκλιση αν και απαιτούν σημαντικό χρόνο.

Μετά την επίλυση γίνεται post processing των δεδομένων που ενδιαφέρουν στο Fluent και στο CFD-Post του ANSYS, ώστε να αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν, να συγκριθούν με τα πειραματικά και να εξαχθούν συμπεράσματα. Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης (ο συντελεστής άνωσης συγκρίνεται με τον πειραματικό), οι κατανομές πιέσεων άνω και κάτω από την πτέρυγα, τα διανύσματα των ταχυτήτων και οι στρόβιλοι από τα ακροπτερύγια. Τα αποτελέσματα συζητούνται στη συνέχεια.

7 Αποτελέσματα και σχολιασμός

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από το Fluent και σχολιάζονται, μετά και από την μετεπεξεργασία στο Fluent και στο CFD Post του ANSYS. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση και με τα πειραματικά δεδομένα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία.

Τα πειραματικά δεδομένα που έχουμε για ορθογωνική πτέρυγα με αεροτομή NACA 0012 έχουν ληφθεί για ένα μεγάλο εύρος αριθμών Reynolds (από 0.5*10⁶ έως 3*10⁶) και για διάφορες γωνίες. Στην παρούσα εργασία η ανάλυση της ροής σε κάθε πτέρυγα γίνεται για 2 γωνίες ροής, 4 και 6 μοιρών. Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για κάθε πτέρυγα δεν επιλύθηκε το πρόβλημα και για άλλες γωνίες ή για γωνίες στις οποίες αναμένεται αποκόλληση ροής. Σε αυτές τις γωνίες δεν περιμένουμε να έχουμε αποκολλήσεις της ροής (flow separation), οπότε και η ανάλυση είναι για μόνιμο πρόβλημα. Ο αριθμός Reynolds που επιλέχθηκε είναι 2 * 10⁶. Θα γίνουν γραφικές παραστάσεις σύγκρισης των συντελεστών άνωσης c_L που προέκυψαν από το Fluent και τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό σημαίνει πως θα γίνει μία σύγκριση των δεδομένων που προκύπτουν από το Fluent με τις εκτιμήσεις του c_D που προκύπτουν από αναλυτικές μεθόδους.

7.1 Αποτελέσματα και σχολιασμός για απλή ορθογωνική πτέρυγα με λόγο επιμήκους 1 (πυκνό πλέγμα)

Για την απλή ορθογωνική πτέρυγα με aspect ratio 1, όπως περιγράφηκε σε άλλη ενότητα, έχει δημιουργηθεί ένα αρκετά πυκνό πλέγμα, με ιδιαίτερη έμφαση στο πλέγμα του οριακού στρώματος της πτέρυγας. Όπως θα φανεί τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι αρκετά ικανοποιητικά όσο αφορά κυρίως την παραγόμενη άνωση, αν και μπορεί να δεχθεί περαιτέρω βελτιώσεις, οι οποίες, ωστόσο, θα επιβαρύνουν περισσότερο τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για επίλυση. Αυτές θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.

Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί πως στην επίλυση της πτέρυγας έγιναν σχετικά λίγες επαναλήψεις. Αυτό συνέβη λόγω του εκτεταμένου χρόνου που απαιτούσε ένα τόσο πυκνό πλέγμα για επίλυση (περίπου 4.000.000 κόμβοι στο υπολογιστικό χωρίο και πολλές χειροκίνητες εντολές κατά τη διάρκεια της κατασκευής πλέγματος, γεγονός που δημιούργησε τοπικά πυκνά πλέγματα, τα οποία αποδείχθηκε ότι καθυστερούν ακόμα περισσότερο την επίλυση). Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση αυτή δεν επετεύχθη ικανοποιητική σύγκλιση της λύσης. Ο συντελεστής αντίστασης απέχει αρκετά από τη σύγκλιση αφού μέχρι και τη διακοπή των επαναλήψεων δεν είχε σταθεροποιηθεί αλλά έτεινε να προσεγγίσει τις αναλυτικές λύσεις. Τα residuals των ταχυτήτων απείχαν αρκετά από τη σύγκλιση, η οποία θα έδινε μία πλήρως ικανοποιητική απεικόνιση των πεδίων ροής. Αυτό σημαίνει πως τα contours των ταχυτήτων, πιθανώς, να μην εκφράζουν πλήρως το πραγματικό πεδίο ταχυτήτων, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, ιδιαίτερα για την περίπτωση με γωνία πρόσπτωσης 6 μοιρών. Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης που υπολογίστηκαν είναι:

Γωνία ροής	4 μοίρες	6 μοίρες
Αριθμός Reynolds	2*10 ⁶	2*10 ⁶
CL	0,10934	0,18806
C _D	0,02051	0,02781

Ακολουθεί το διάγραμμα σύγκρισης του συντελεστή άνωσης μεταξύ της πειραματικής και της αριθμητικής λύσης.



Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής άνωσης που υπολογίστηκε πειραματικά και αριθμητικά είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τον συντελεστή άνωσης της δισδιάστατης αεροτομής που έχει υπολογιστεί πειραματικά και προσεγγίζει το 0.5. Αυτή η μεγάλη διαφορά εξηγείται από το γεγονός ότι για μία τρισδιάστατη πτέρυγα μεγάλου εύρους οι δίνες που δημιουργούνται δημιουργούν έντονα κατωρεύματα στο χείλος προσβολής, τα οποία μεταβάλλουν την πραγματική γωνία πρόσπτωσης. Αυτό οδηγεί σε πτώση της άνωσης και αύξηση της αντίστασης (επαγόμενης). Μία πτέρυγα με μικρό aspect ratio, όπως αυτή που αναλύεται θα έχει κυρίαρχα τέτοια φαινόμενα, με αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση της άνωσης και αύξηση της αντίστασης.

Παρατηρείται ότι η απόκλιση μεταξύ της πειραματικής τιμής και της τιμής που υπολογίστηκε με το Fluent είναι πολύ μικρή. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι το υπολογιστικό μοντέλο υπολογίζει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια την άνωση της πτέρυγας, που ήταν ένας από του βασικούς στόχους της εργασίας αυτής. Παρατηρείται ότι με βάση τα πειραματικά δεδομένα, η σχέση της άνωσης με τη

γωνία πρόσπτωσης δεν είναι γραμμική, παρά το ότι δεν βρισκόμαστε σε γωνίες που προκαλούν αποκόλληση της ροής. Αυτό οφείλεται στο ότι σφάλματα υπεισέρχονται και στις πειραματικές μετρήσεις.

Για το συντελεστή αντίστασης δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, μπορεί να συγκριθεί η τιμή που προέκυψε από την επίλυση στο Fluent με τιμή του συντελεστή αντίστασης που υπολογίζεται αναλυτικά:

$$C_{Do\lambda i\kappa \acute{o}} = C_D + \frac{C_L^2}{\pi \ AR \ e}$$

όπου AR το aspect ratio της πτέρυγας, e ο συντελεστής Oswald ίσος με 0.7, c_D ο συντελεστής αντίστασης της αεροτομής της πτέρυγας και c_L ο συντελεστής άνωσης της πτέρυγας. Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς λαμβάνουμε τον εξής πίνακα σύγκρισης του C_D .

Γωνία ροής	C _D αεροτομής	C _D αναλυτικό	C _D Fluent
4 μοίρες	0,011	0,0165	0,02151
6 μοίρες	0,014	0,02873	0,026808

Παρατηρείται ότι οι υπολογιστικές τιμές του συντελεστή αντίστασης διαφέρουν σε σχέση τις αναλυτικές, ιδιαίτερα για γωνία ροής 4 μοιρών. Όταν τελείωσαν οι επαναλήψεις δεν είχε συγκλίνει ακόμα πλήρως ο συντελεστής αντίστασης, γεγονός που εξηγεί τη διαφορά. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπολογιστικές τιμές όταν ελήφθησαν ακολουθούσαν πορεία προσέγγισης των αναλυτικών. Φυσικά, οι αναλυτικές τιμές είναι και αυτές απλά προσεγγίσεις του πραγματικού συντελεστή αντίστασης, αφού για τον υπολογισμό τους λαμβάνονται διάφορες παραδοχές. Ωστόσο, μπορούν να αποτελέσουν ενδεικτικό του κατά πόσο το μοντέλο είναι ακριβές.

Μετά την παράθεση των αποτελεσμάτων για τους συντελεστές αντίστασης και άνωσης παρατίθενται διαγράμματα και contours για τις πιέσεις και ταχύτητες γύρω από την πτέρυγα. Μεγάλης σημασίας είναι και η παρουσίαση των δινών στα ακροπτερύγια της πτέρυγας, ώστε να γίνει εμφανές κατά πόσο η υπολογιστική μοντελοποίηση που εκτελέστηκε είναι σε θέση να απεικονίσει με ακρίβεια όλα τα φαινόμενα. Ωστόσο, δεν υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα άμεσης σύγκρισης στις συνθήκες που έγινε η υπολογιστική επίλυση των προβλημάτων.

Στα σχήματα 7.1 έως 7.4, παρατίθενται διαγράμματα της πίεσης από το άνω και κάτω μέρος της πτέρυγας για τομές της πτέρυγας στη μέση και στα ακροπτερύγια και για κάθε γωνία ροής που αναλύθηκε.



Σχήμα 7.1, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στη μέση της πτέρυγας για γωνία ροής 4 μοιρών



Σχήμα 7.2, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στο ακροπτερύγιο για γωνία ροής 4 μοιρών



Σχήμα 7.3, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στη μέση της πτέρυγας για γωνία ροής 6 μοιρών



Pressure distribution

Σχήμα 7.4, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στο ακροπτερύγιο για γωνία ροής 6 μοιρών

Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα της πίεσης για τομή στη μέση της πτέρυγας παρουσιάζουν την τυπική μορφή που θα έπρεπε να έχουν και είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα εάν είχαμε δισδιάστατη αεροτομή (στη μέση της πτέρυγας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προσεγγίζεται η δισδιάστατη ροή). Στην ακμή προσβολής παρατηρείται η μέγιστη πίεση, μιας και εκεί βρίσκεται το σημείο ανακοπής, όπως αναμένεται. Δεδομένου ότι η αεροτομή της πτέρυγας είναι συμμετρική και το ρευστό επιταχύνεται και στις 2 μεριές της πτέρυγας, παρατηρούμε μία όχι τόσο μεγάλη απόκλιση των διαγραμμάτων για την άνω και κάτω μεριά της πτέρυγας και για αυτό το λόγο έχουμε και το μικρό σχετικά συντελεστή άνωσης. Όσο αφορά τη σύγκριση ανάμεσα στις 2 γωνίες ροής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για μεγαλύτερη γωνία ροής (δηλαδή 6 μοίρες) η διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς της πτέρυγας είναι μεγαλύτερη, οδηγώντας και σε μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης.

Στο ακροπτερύγιο η κατάσταση είναι σαφέστατα διαφορετική. Εκεί έχουμε και τα φαινόμενα της εγκάρσιας κίνησης του ρευστού που δημιουργούν αυτή την διαφορετική κατανομή της πίεσης, ενώ παράλληλα δεν έχει διαμορφωθεί κάποια ειδική επιφάνεια ακροπτερυγίου. Επιπλέον, το πλέγμα παύει να είναι τόσο ομαλό όσο στη μέση της πτέρυγας, αφού σχηματίζεται οξεία γωνία, επιδρώντας στα αποτελέσματα.

Μία μικρή απόκλιση από τα φυσιολογικά παρατηρούμε κοντά στην ακμή εκφυγής. Αυτό ενδεχομένως προκύπτει λόγω της κακής σύγκλισης της λύσης, μιας και όπως είπαμε δεν έτρεξαν πολλές επαναλήψεις. Αντίστοιχα προβλήματα παρατηρήθηκαν και σε παρόμοιες αναλύσεις στη βιβλιογραφία, όπου δεν είχε επιτευχθεί σύγκλιση των residuals.

Ακολουθούν contours των πιέσεων της πτέρυγας, όπου φαίνεται ότι η κατανομή των πιέσεων είναι φυσιολογική και για τις 2 γωνίες ροής. Επιπλέον, παρατηρείται ότι στο χείλος προσβολής που έχουμε την ανακοπή του ρευστού, η μέγιστη σχετική πίεση είναι περίπου όσο η δυναμική πίεση του ρευστού της ροής (δηλαδή ½ ρU² = 520Pa). Στο χείλος εκφυγής και στα ακροπτερύγια παρατηρείται και στα διαγράμματα και στα contours ότι εφαρμόζεται η συνθήκη Kutta-Jukowski και υπάρχει εξίσωση των πιέσεων από τις 2 πλευρές της πτέρυγας.





Σχήμα 7.6, Κατανομή πίεσης πάνω στα τοιχώματα της πτέρυγας και σημείο ανακοπής, γωνία ροής 6 μοίρες

Στη συνέχεια παρατίθενται contours και διαγράμματα που παρουσιάζουν τα διανύσματα της ταχύτητας σε σημεία και τομές της πτέρυγας (σχήματα 7.7 έως 7.11), ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την κίνηση της ροής και τους στροβίλους στα ακροπτερύγια.

4.01e+01			ANSYS
3.81e+01			
3.61e+01			
3.41e+01			
3.21e+01			
3.01e+01			
2.80e+01			
2.60e+01			
2.40e+01			
2.20e+01			
2.00e+01			
1.80e+01		 - Andrew Constant	
1.60e+01			
1.40e+01			
1.20e+01			
1.00e+01			
8.01e+00			
6.01e+00			
4.01e+00	Y		
2.00e+00	z—x		
0.00e+00			



Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)



Σχήμα 7.7, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο εύρος της, γωνία ροής 4 μοίρες

Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Σχήμα 7.8, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο μήκος χορδής της. Φαίνεται η ακμή πρόσπτωσης, γωνία ροής 4 μοίρες

4.09e+01		ANSYS
3.89e+01		
3.68e+01		
3.48e+01		
3.27e+01		
3.07e+01		
2.87e+01		
2.66e+01		
2.46e+01		
2.25e+01		
2.05e+01		
1.84e+01		
1.64e+01		
1.43e+01		
1.23e+01		
1.02e+01		
8.19e+00		
6.14e+00		
4.09e+00	Y	
2.05e+00	z—x	
0.00e+00		

Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Σχήμα 7.9, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο εύρος της, γωνία ροής 6 μοίρες



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Σχήμα 7.10, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο μήκος χορδής της. Φαίνεται η ακμή πρόσπτωσης, γωνία ροής 6 μοίρες

Βλέπουμε ότι το contour της ταχύτητας σε μία κάθετη στο εύρος της πτέρυγας τομή (στη μέση της πτέρυγας, σχήμα 7.7, 7.9) δείχνει μία κατανομή ταχυτήτων παρόμοια με αεροτομής. Στο χείλος προσβολής, όπου είναι και το σημείο ανακοπής, έχουμε μηδενισμό της ταχύτητας. Η ροή επιταχύνεται και στις 2 πλευρές της πτέρυγας, ωστόσο επιταχύνεται περισσότερο στην άνω πλευρά, όπως είναι αναμενόμενο. Επιπλέον, για γωνία 6 μοιρών η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη επιτάχυνση για γωνία 4 μοιρών, δίνοντας μεγαλύτερη άνωση. Παράλληλα, είναι εμφανές το σημείο ανακοπής που βρίσκεται στο σημείο πρόσπτωσης, όπως αναμενόταν.

To contour της ταχύτητας σε τομή κάθετη στο μήκος χορδής στην ακμή πρόσπτωσης (σχήμα 7.8, 7.10) δείχνει τη γραμμή ανακοπής στην πτέρυγα και την εγκάρσια ταχύτητα στις άκρες τις πτέρυγας. Φαίνονται, επίσης, οι μεγαλύτερες διαφορές ταχυτήτων για γωνία ροής 6 μοιρών σε σχέση με τη γωνία ροής 4 μοιρών.





Στο σχήμα 7.11 φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής στον ομόρου της πτέρυγας σε μία απόσταση μισού μέτρου από την πτέρυγα. Τα διανύσματα φαίνονται υπό γωνία όσο και της ροής, ώστε να είναι ξεκάθαρη η ανάγνωσή τους. Παρατηρείται ότι η ροή εμφανίζει έντονη κίνηση και κατά την κατεύθυνση z. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στον ομόρου των ακροπτερυγίων τα διανύσματα της ταχύτητας φαίνεται να διαμορφώνουν δύο κύκλους. Οι κύκλοι αυτοί αποτελούν ενδεικτικό των δινών που διαμορφώνονται από τα ακροπτερύγια. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από το ότι τα κέντρα των κύκλων φαίνεται ότι βρίσκονται στις άκρες της πτέρυγας. Ακολουθούν εικόνες από streamlines (σχήματα 7.12 έως 7.15), που καθιστούν εμφανέστερα τα φαινόμενα στις άκρες τις πτέρυγας. Αυτές ξεκινούν από σφαίρα ακτίνας 1 εκατοστού στο κάθε ακροπτερύγιο, στο σημείο όπου υπάρχει η μέγιστη εγκάρσια ταχύτητα, δηλαδή εκεί που θεωρητικά δημιουργούνται οι δίνες των ακροπτερυγίων, ενώ πάνω στην πτέρυγα παρουσιάζεται η πίεση.



Σχήμα 7.12, Εικόνα από γραμμές ροής που ξεκινούν από σφαίρα ακτίνας 1 εκατοστού στο κάθε ακροπτερύγιο και διαγράφουν σπειροειδή τροχιά στον ομόρου, όπως φαίνονται από μπροστά απ' την πτέρυγα, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.13, Εικόνα από τις γραμμές ροής, όπως φαίνονται από πίσω από την πτέρυγα, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.14, Εικόνα από τις γραμμές ροής, εστιασμένη στο ακροπτερύγιο, όπου εκεί δημιουργούνται οι δίνες, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.15, Εικόνα από τις γραμμές ροής, όπως φαίνονται από πίσω από την πτέρυγα, γωνία ροής 6 μοίρες

Παρατηρούνται ξεκάθαρα streamlines από διάφορες θέσεις στην κάτω πλευρά του ακροπτερυγίου να διαγράφουν μία σπειροειδή τροχιά, στη συνέχεια ανεβαίνουν από την άνω πλευρά της πτέρυγας και εκεί να αλληλεπιδρούν με την κυρίως ροή. Η κίνηση αυτή δημιουργεί τις δίνες ακροπτερυγίων που αποκολλώνται από το ακροπτερύγιο και συνεχίζουν με τη ροή. Περνάνε στον ομόρου, όπως αναμενόταν, προωθώντας τις δίνες παρακάτω, ενώ παράλληλα οι δίνες φαίνεται σταθερά να μεγαλώνουν. Το υπολογιστικό χωρίο που δημιουργήθηκε είχε για ομόρου 15 μέτρα, δηλαδή 15 μήκη χορδής. Είναι εμφανές πως σε αυτή την απόσταση δεν έχει υπάρξει ακόμη απόσβεση των δινών, γεγονός που συμβαδίζει με τη θεωρία των πτερύγων, η οποία αναφέρει πως οι δίνες αυτές μπορεί να μην έχουν αποσβεστεί και εκατοντάδες μήκη χορδής πίσω από την πτέρυγα.

7.2 Αποτελέσματα και σχολιασμός για ορθογωνική πτέρυγα με λόγο επιμήκους 1 (αραιότερο πλέγμα)

Μετά την ανάλυση της απλής ορθογωνικής πτέρυγας με aspect ratio 1, για το ίδιο μοντέλο δημιουργήθηκαν στοιχειώδη ακροπτερύγια προσθέτοντας 2 εκατοστά στο εύρος της κάθε πτέρυγας. Σε αυτά τα 2 εκατοστά το μήκος χορδής σταδιακά μειώνεται μέχρι να φτάσει το 70% του αρχικού μήκους. Αυτό έγινε ώστε το πλέγμα να είναι ομαλότερο (οξείες γωνίες, όπως είχαμε πριν στο ακροπτερύγιο, δυσκολεύουν τη λύση και δημιουργούν σφάλματα). Επιπλέον, αυτή η γεωμετρία είναι λίγο πιο ρεαλιστική, αφού οι πτέρυγες στην πραγματικότητα είναι blunt,

δηλαδή στα ακροπτερύγια δεν διακόπτονται απότομα και δημιουργούν καμπύλες. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται παραπάνω δεν είναι πολύ πυκνό, ώστε να εξαχθούν πιο γρήγορα τα συμπεράσματα και να παρουσιαστούν οι διαφορές ανάμεσα στις 2 περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται, δεδομένου του πλέγματος, είναι σαφέστατα ικανοποιητικά μιας και ο χρόνος που απαιτήθηκε για την επίλυση του πεδίου ροής ήταν κατά πολύ μικρότερος.

Στην επίλυση της πτέρυγας έγιναν περίπου 80 επαναλήψεις. Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης που υπολογίστηκαν είναι:

Γωνία ροής	4 μοίρες	6 μοίρες
Αριθμός Reynolds	2*10 ⁶	2*10 ⁶
CL	0,1136	0,1783
C _D	0,01603	0,02213

Ακολουθεί το διάγραμμα σύγκρισης του συντελεστή άνωσης μεταξύ της πειραματικής και της αριθμητικής λύσης.



Παρατηρείται ότι η απόκλιση μεταξύ της πειραματικής τιμής και της τιμής που υπολογίστηκε με το Fluent είναι και εδώ αρκετά μικρή, αν και λίγο μεγαλύτερη σε σχέση με πριν. Το υπολογιστικό μοντέλο υπολογίζει με αρκετή ακρίβεια την άνωση της πτέρυγας, ωστόσο δεν μπορούμε να πούμε ότι το πλέγμα προσφέρει αντίστοιχη ακρίβεια σε σχέση με το πυκνότερο. Η εντολή Mapped Face Meshing και το πλέγμα που δημιουργεί φαίνεται ότι, αν και χρονοβόρο στην επίλυσή του, δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά το γεγονός ότι μπόρεσαν και εκτελέστηκαν πολλές επαναλήψεις επέτρεψε συνολικά καλύτερα σύγκλιση της λύσης, η οποία όπως θα φανεί παρακάτω παρουσιάζει ρεαλιστικά το γενικό πεδίο ροής. Για το συντελεστή αντίστασης, όπως και πριν, δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, μπορεί να συγκριθεί η τιμή που προέκυψε από την επίλυση στο Fluent με τιμή του συντελεστή αντίστασης που υπολογίζεται αναλυτικά.

Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, λαμβάνουμε τον εξής πίνακα σύγκρισης του C_D .

Γωνία ροής	C _D αεροτομής	C _D αναλυτικό	C _D Fluent
4 μοίρες	0,011	0,0165	0,01603
6 μοίρες	0,014	0,02873	0,02313

Παρατηρείται ότι οι υπολογιστικές τιμές του συντελεστή αντίστασης διαφέρουν σε σχέση με πριν. Για γωνία ροής 4 μοιρών το γεγονός ότι εκτελέστηκαν πολλές επαναλήψεις επέτρεψε σημαντική σύγκλιση της τιμής προς την αναλυτική. Για γωνία ροής 6 μοιρών, ωστόσο, αυτό δεν συνέβη καθώς δεν υπήρχε ακόμα ικανοποιητική σύγκλιση, παρά το χρόνο που διατέθηκε. Συνεπώς, ένα πιο αραιό πλέγμα, εφ' όσον είναι σχετικά πυκνό στα σημεία που απαιτείται, μπορεί να επιτρέψει την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων και για την άνωση και για την αντίσταση, αν και δεν μπορεί να προσεγγίσει την ακρίβεια του πυκνότερου πλέγματος.

Στα σχήματα 7.16 έως 7.19, παρατίθενται διαγράμματα της πίεσης από το άνω και κάτω μέρος της πτέρυγας για τομές της πτέρυγας στη μέση και στα ακροπτερύγια και για κάθε γωνία ροής που αναλύθηκε.



Σχήμα 7.16, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στη μέση της πτέρυγας για γωνία ροής 4 μοιρών



Σχήμα 7.17, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στο ακροπτερύγιο για γωνία ροής 4 μοιρών



Σχήμα 7.18, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στη μέση της πτέρυγας για γωνία ροής 6 μοιρών



Σχήμα 7.19, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στο ακροπτερύγιο για γωνία ροής 6 μοιρών

Παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση τα διαγράμματα της πίεσης για τομή στη μέση της πτέρυγας παρουσιάζουν την τυπική μορφή που θα έπρεπε να έχουν και είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα εάν είχαμε δισδιάστατη αεροτομή (στη μέση της πτέρυγας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε δισδιάστατη ροή). Στην ακμή προσβολής παρατηρείται η μέγιστη πίεση, μιας και εκεί βρίσκεται το σημείο ανακοπής, όπως αναμένεται. Όσο αφορά τη σύγκριση ανάμεσα στις 2 γωνίες ροής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για μεγαλύτερη γωνία ροής (δηλαδή 6 μοίρες) και στις 2 θέσεις η διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς της πτέρυγας είναι μεγαλύτερη.

Στα ακροπτερύγια τα διαγράμματα δεν είναι τόσο σταθερά όσο αυτά στη μέση της πτέρυγας, ενώ και η μορφή είναι ελαφρώς διαφορετική. Αυτό είναι λογικό για 2 λόγους. Ο βασικότερος λόγος είναι ότι το πλέγμα σε αυτή τη θέση δεν είναι τόσο ομαλό όσο στη μέση της πτέρυγας, λόγω των γωνιών που δημιουργούνται στην πτέρυγα. Παράλληλα, έχουν προστεθεί μικρά ακροπτερύγια τα οποία διαφοροποιούν τη ροή σε σχέση με πριν. Επιπλέον, λόγω της εγκάρσιας κίνησης της ροής που φαίνεται έντονα σε αυτή τη θέση και κυρίως προς το χείλος πρόσπτωσης, καθώς εκεί έχουμε τη μέγιστη διαφορά πίεσης, η ροή δεν είναι ομαλή. Αυτό οδηγεί στη διαφορετική μορφή του διαγράμματος και στην πίεση που φαίνεται να μην ακολουθεί μία εντελώς λεία μορφή.

Τα σχήματα 7.20 και 7.21 αποτελούν contours των πιέσεων στην άνω και κάτω μεριά της πτέρυγας, όπου φαίνεται ότι η κατανομή των πιέσεων είναι φυσιολογική και για τις 2 γωνίες ροής. Παρά το αραιότερο πλέγμα, παρατηρείται ότι στο χείλος

προσβολής που έχουμε την ανακοπή του ρευστού, η μέγιστη σχετική πίεση είναι όσο η δυναμική πίεση του ρευστού της ροής (δηλαδή ½ ρU² = 520Pa). Στο χείλος εκφυγής και στα ακροπτερύγια παρατηρείται ότι εφαρμόζεται η συνθήκη Kutta-Jukowski και υπάρχει εξίσωση των πιέσεων από τις 2 πλευρές της πτέρυγας.



Σχήμα 7.20, Κατανομή πίεσης πάνω στα τοιχώματα της πτέρυγας και σημείο ανακοπής, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.21, Κατανομή πίεσης πάνω στα τοιχώματα της πτέρυγας και σημείο ανακοπής, γωνία ροής 6 μοίρες

Στη συνέχεια παρατίθενται contours και διάγραμματα (σχήματα 7.22 έως 7.26) με τα διανύσματα της ταχύτητας σε σημεία και τομές της πτέρυγας, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την κίνηση της ροής και τους στροβίλους στα ακροπτερύγια.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

3.85e+01 3.66e+01 3.47e+01 3.28e+01 3.08e+01 2.89e+01 2.70e+01 2.51e+01 2.31e+01 2.12e+01 1.93e+01 1.73e+01 1.54e+01 1.35e+01 1.16e+01 9.63e+00 7.71e+00 5.78e+00 3.85e+00 1.93e+00 7 0.00e+00

Σχήμα 7.22, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο εύρος της, γωνία ροής 4 μοίρες

Contours of Velocity Magnitude (m/s)



Σχήμα 7.23, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο μήκος χορδής της. Φαίνεται η ακμή πρόσπτωσης, γωνία ροής 4 μοίρες

Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

3 93e+01		ANSVS
3 730+01		010
5.7 JE + 01		
3.54e+01		
3.34e+01		
3.14e+01		
2.95e+01		
2.75e+01		
2.55e+01		
2.36e+01		
2.16e+01		
1.96e+01	And the second	
1.77e+01		
1.57e+01		
1.37e+01		
1.18e+01		
9.82e+00		
7.86e+00		
5.89e+00		
3.93e+00	Y	
1.96e+00	x_7	
0.00e+00		

Σχήμα 7.24, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο εύρος της, γωνία ροής 6 μοίρες

Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 25, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A) Σχήμα 7.25, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο μήκος χορδής της. Φαίνεται η ακμή πρόσπτωσης, γωνία ροής 6 μοίρες

Βλέπουμε ότι το contour της ταχύτητας σε μία κάθετη στο εύρος της πτέρυγας τομή (στη μέση της πτέρυγας, σχήμα 7.22 και 7.24) δείχνει μία κατανομή ταχυτήτων παρόμοια με αεροτομής. Στο χείλος προσβολής, όπου είναι και το σημείο ανακοπής, έχουμε μηδενισμό της ταχύτητας. Η ροή επιταχύνεται και στις 2 πλευρές της πτέρυγας, ωστόσο επιταχύνεται περισσότερο στην άνω πλευρά, όπως είναι αναμενόμενο. Επιπλέον, για γωνία 6 μοιρών η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη επιτάχυνση για γωνία 4 μοιρών, δίνοντας μεγαλύτερη άνωση. Παράλληλα, είναι και εδώ εμφανές το σημείο ανακοπής που βρίσκεται προς στο σημείο πρόσπτωσης, όπως αναμενόταν.

To contour της ταχύτητας σε τομή κάθετη στο μήκος χορδής στην ακμή πρόσπτωσης (σχήμα 7.23 και 7.25) δείχνει τη γραμμή ανακοπής στην πτέρυγα και την εγκάρσια ταχύτητα στις άκρες τις πτέρυγας. Και εδώ φαίνονται οι μεγαλύτερες διαφορές ταχυτήτων για γωνία ροής 6 μοιρών σε σχέση με τη γωνία ροής 4 μοιρών.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που έδωσαν τα 2 διαφορετικά πλέγματα για την ίδια πτέρυγα, είναι προφανές ότι το πυκνότερο πλέγμα παρουσιάζει ομαλότερα διαγράμματα και contours, ιδιαίτερα στο οριακό στρώμα όπου και έχουμε τη μεγαλύτερη αραίωση, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν μπορούμε να βασιστούμε στο αραιότερο πλέγμα για αναλυτικότερα συμπεράσματα.



Σχήμα 7.26, Διανύσματα της ταχύτητας της ροής στον ομόρου της πτέρυγας, γωνία ροής 4 μοίρες

Στο σχήμα 7.26 φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής στον ομόρου της πτέρυγας σε μία απόσταση μισού μέτρου από την πτέρυγα. Τα διανύσματα φαίνονται υπό γωνία όσο και της ροής, ώστε να είναι ξεκάθαρη η ανάγνωσή τους. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι η ροή εμφανίζει έντονη κίνηση και κατά την κατεύθυνση z. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στον ομόρου των ακροπτερυγίων τα διανύσματα της ταχύτητας φαίνεται να διαμορφώνουν δύο κύκλους. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι κύκλοι αυτοί αποτελούν ενδεικτικό των δινών που διαμορφώνονται από τα ακροπτερύγια, των οποίων τα κέντρα φαίνεται ότι βρίσκονται στις άκρες της πτέρυγας. Ακολουθούν τα σχήματα 7.27 έως 7.30 με εικόνες από γραμμές ροής, που καθιστούν εμφανέστερα τα φαινόμενα στις άκρες τις πτέρυγας. Αυτές ξεκινούν, όπως και προηγουμένως, από σφαίρα ακτίνας 1 εκατοστού στο κάθε ακροπτερύγιο, στο σημείο όπου υπάρχει η μέγιστη εγκάρσια ταχύτητα, δηλαδή εκεί που θεωρητικά δημιουργούνται οι δίνες των ακροπτερυγίων, ενώ πάνω στην πτέρυγα παρουσιάζεται η πίεση.



Σχήμα 7.27, Εικόνα από γραμμές ροής που ξεκινούν από σφαίρα ακτίνας 1 εκατοστού στο κάθε ακροπτερύγιο και διαγράφουν σπειροειδή τροχιά στον ομόρου, όπως φαίνονται από μπροστά απ' την πτέρυγα, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.28, Εικόνα από τις γραμμές ροής, όπως φαίνονται από πίσω από την πτέρυγα να δημιουργούν τις δίνες από τα ακροπτερύγια, γωνία ροής 4 μοίρες







Σχήμα 7.30, Οπίσθια άποψη γραμμών ροής, όπως φαίνονται να δημιουργούν τις δίνες από τα ακροπτερύγια, γωνία ροής 6 μοίρες

Παρατηρείται ότι και με την επίδραση των μικρών ακροπτερυγίων φαίνονται ξεκάθαρα streamlines από διάφορες θέσεις στην κάτω πλευρά του ακροπτερυγίου να διαγράφουν μία σπειροειδή τροχιά, στη συνέχεια ανεβαίνουν από την άνω πλευρά της πτέρυγας και εκεί να αλληλεπιδρούν με την κυρίως ροή. Στη συνέχεια περνάνε στον ομόρου, όπως αναμενόταν, προωθώντας τις δίνες παρακάτω, ενώ παράλληλα οι δίνες φαίνεται σταθερά να μεγαλώνουν. Στο τέλος του υπολογιστικού χωρίου δεν έχει υπάρξει ακόμη απόσβεση των δινών, γεγονός που συμβαδίζει με τη θεωρία των πτερύγων, η οποία αναφέρει πως οι δίνες αυτές μπορεί να μην έχουν αποσβεστεί και εκατοντάδες μήκη χορδής πίσω από την πτέρυγα.

7.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός για ορθογωνική πτέρυγα με λόγο επιμήκους 3 και στοιχειώδη ακροπτερύγια

Μετά την ανάλυση 2 περιπτώσεων απλής ορθογωνικής πτέρυγας με λόγο επιμήκους 1, αναλύθηκε μία πτέρυγα μεγαλύτερου εύρους ώστε να γίνει εμφανές αν το μοντέλο που αναπτύχθηκε πριν μπορεί να έχει εφαρμογή και σε πιο πλατιές πτέρυγες με αντίστοιχη ακρίβεια. Η πτέρυγα έχει εύρος 3 φορές το μήκος χορδής της, δηλαδή λόγο επιμήκους 3. Επιπλέον, έχει και σε αυτή την περίπτωση στοιχειώδη ακροπτερύγια προσθέτοντας 5 εκατοστά στο εύρος της κάθε πτέρυγας. Σε αυτά τα 5 εκατοστά το μήκος χορδής σταδιακά μειώνεται μέχρι να φτάσει το 60% του αρχικού μήκους. Τα ακροπτερύγια αυτά είναι λίγο μεγαλύτερα σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, αφού η αύξηση τους δεν οδηγεί σε σοβαρή μεταβολή του λόγου επιμήκους. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται παραπάνω δεν είναι πολύ πυκνό, μιας και η αύξηση του εύρους (ο τριπλασιασμός του για την ακρίβεια) μεγαλώνει πολύ το υπολογιστικό χωρίο και πολλαπλασιάζει τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος. Έτσι, οποιαδήποτε απόπειρα πύκνωσης του δημιουργεί μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Συνεπώς, αποφασίστηκε να μην γίνει απόπειρα κατασκευής πολύ πυκνού πλέγματος. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι αρκετά ικανοποιητικά, μιας και σε πτέρυγες μεγαλύτερου εύρους τα τρισδιάστατα φαινόμενα είναι λιγότερο σημαντικά, βελτιώνοντας την προσέγγιση των συντελεστών χωρίς κάποια σημαντική πύκνωση του πλέγματος, ιδιαίτερα στο κέντρο της πτέρυγας.

Στην επίλυση της πτέρυγας εκτελέστηκαν περίπου 30 επαναλήψεις. Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης που υπολογίστηκαν είναι:

Γωνία ροής	4 μοίρες	6 μοίρες
Αριθμός Reynolds	2*10⁶	2*10 ⁶
CL	0,2036	0,3119
CD	0,01937	0,02976

Παρατηρείται ότι έχουμε σαφέστατα μεγαλύτερο συντελεστή άνωσης σε σχέση με την πτέρυγα με aspect ratio 1. Αυτό συμβαίνει γιατί σε πτέρυγες μεγαλύτερου εύρους τα τρισδιάστατα φαινόμενα, που δημιουργούν κατωρεύματα, τις δίνες στα ακροπτερύγια και μειώνουν το συντελεστή άνωσης, περιορίζονται και η πτέρυγα αρχίζει και συμπεριφέρεται πιο πολύ ως δισδιάστατη αεροτομή, προσεγγίζοντας περισσότερο την τιμή του συντελεστή άνωσης για αεροτομή.



Ακολουθεί το διάγραμμα σύγκρισης του συντελεστή άνωσης μεταξύ της πειραματικής και της αριθμητικής λύσης.

Παρατηρείται ότι η απόκλιση μεταξύ της πειραματικής τιμής και της τιμής που υπολογίστηκε με το Fluent είναι εξαιρετικά μικρή. Το υπολογιστικό μοντέλο υπολογίζει με ακρίβεια την άνωση της πτέρυγας, που αποτελεί βασική παράμετρο. Για το συντελεστή αντίστασης, όπως και πριν, δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, μπορεί να συγκριθεί η τιμή που προέκυψε από την επίλυση στο Fluent με τιμή του συντελεστή αντίστασης που υπολογίζεται αναλυτικά.

Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, λαμβάνουμε τον εξής πίνακα σύγκρισης του C_D.

Γωνία ροής	C _D αεροτομής	C _D αναλυτικό	C _D Fluent
4 μοίρες	0,011	0,01766	0,01937
6 μοίρες	0,014	0,02857	0,02976

Παρατηρείται ότι οι υπολογιστικές τιμές του συντελεστή αντίστασης για την φαρδύτερη πτέρυγα είναι ικανοποιητικές, παρά τον μικρό αριθμό επαναλήψεων που έγιναν. Και για τις 2 γωνίες ροής, υπάρχει μία ικανοποιητική σύγκλιση των συντελεστών αντίστασης που δίνει το Fluent, με αυτών που υπολογίζονται αναλυτικά. Συνεπώς, και αυτό το πλέγμα, παρά το ότι δεν είναι ιδιαιτέρως καλό, μπορεί να επιτρέψει την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων και για την άνωση και για την αντίσταση. Γενικά, φαίνεται ότι στη φαρδύτερη πτέρυγα το Fluent ανταποκρίνεται ακόμα καλύτερα σε σχέση με τη πτέρυγα με λόγο επιμήκους 1.

Στα σχήματα 7.31 έως 7.34 παρατίθενται διαγράμματα της πίεσης από το άνω και κάτω μέρος της πτέρυγας για τομές της πτέρυγας στη μέση και στα ακροπτερύγια και για κάθε γωνία ροής που αναλύθηκε.



Σχήμα 7.31, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στη μέση της πτέρυγας για γωνία ροής 4 μοιρών



Σχήμα 7.32, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στο ακροπτερύγιο για γωνία ροής 4 μοιρών



Σχήμα 7.33, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στη μέση της πτέρυγας για γωνία ροής 6 μοιρών



Σχήμα 7.34, Κατανομή πίεσης στο άνω και κάτω τμήμα στο ακροπτερύγιο για γωνία ροής 6 μοιρών

Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα της πίεσης για τομή στη μέση της πτέρυγας παρουσιάζουν περίπου την τυπική μορφή που θα έπρεπε να έχουν και είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα εάν είχαμε δισδιάστατη αεροτομή (στη μέση της

πτέρυγας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε δισδιάστατη ροή). Κάποιες διαφορές και ασυνέχειες εξηγούνται από τις αδυναμίες του πλέγματος και τις λίγες επαναλήψεις που εκτελέστηκαν κατά την επίλυση. Στην ακμή προσβολής παρατηρείται η μέγιστη πίεση, μιας και εκεί βρίσκεται το σημείο ανακοπής, όπως αναμένεται. Δεδομένου ότι η αεροτομή της πτέρυγας είναι συμμετρική και το ρευστό επιταχύνεται και στις 2 μεριές της πτέρυγας, παρατηρούμε μία όχι τόσο μεγάλη απόκλιση των διαγραμμάτων για την άνω και κάτω μεριά της πτέρυγας και για αυτό το λόγο έχουμε και το μικρό σχετικά συντελεστή άνωσης. Όπως είναι προφανές, μιας και έχουμε το μέγιστο C_L από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, οι διαφορές πιέσεων είναι οι μέγιστες σε σχέση με τις άλλες πτέρυγες που εξετάστηκαν. Όσο αφορά τη σύγκριση ανάμεσα στις 2 γωνίες ροής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για μεγαλύτερη γωνία ροής (δηλαδή 6 μοίρες) η διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς της πτέρυγας είναι μεγαλύτερη.

Στα ακροπτερύγια τα διαγράμματα και πάλι δεν είναι τόσο σταθερά όσο αυτά στη μέση της πτέρυγας, ενώ και η μορφή είναι ελαφρώς διαφορετική για τους ίδιους λόγους με την περίπτωση της στενότερης πτέρυγας με το αραιό πλέγμα. Άλλωστε, οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αρκετά παρόμοιες. Παρατηρείται, ωστόσο, και εδώ η εντονότερη διαφορά πιέσεων σε σχέση με την στενότερη πτέρυγα.

Στο σχήμα 7.35 παρουσιάζεται, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, contour των πιέσεων στην επιφάνεια της πτέρυγας, όπου φαίνεται ότι η κατανομή των πιέσεων είναι φυσιολογική και για τις 2 γωνίες ροής. Παρά το αραιότερο πλέγμα, παρατηρείται ότι στο χείλος προσβολής που έχουμε την ανακοπή του ρευστού, η μέγιστη σχετική πίεση είναι όσο η δυναμική πίεση του ρευστού της ροής (δηλαδή ½ ρU² = 520Pa), με μία μικρή απόκλιση 6 Pascal. Στο χείλος εκφυγής και στα ακροπτερύγια παρατηρείται ότι εφαρμόζεται η συνθήκη Kutta-Jukowski και υπάρχει εξίσωση των πιέσεων από τις 2 πλευρές της πτέρυγας



Σχήμα 7.35, Κατανομή πίεσης πάνω στα τοιχώματα της πτέρυγας και σημείο ανακοπής, γωνία ροής 4 μοίρες

Στη συνέχεια παρατίθενται contours και διαγράμματα (σχήματα 7.36 έως 7.40) που παρουσιάζουν τα διανύσματα της ταχύτητας σε σημεία και τομές της πτέρυγας, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την κίνηση της ροής και τους στροβίλους στα ακροπτερύγια.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jun 26, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Σχήμα 7.36, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο εύρος της, γωνία ροής 4 μοίρες

3.91e+01		ANSYS
3.72e+01		
3.52e+01		
3.33e+01		
3.13e+01		
2.93e+01		
2.74e+01		
2.54e+01		
2.35e+01		
2.15e+01		
1.96e+01		
1.76e+01		
1.56e+01		
1.37e+01		
1.17e+01		
9.78e+00		
7.82e+00		
5.87e+00		
3.91e+00	Y .	
1.96e+00	z—x	
0.00e+00		

Jun 26, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 7.37, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο μήκος χορδής της. Φαίνεται η ακμή πρόσπτωσης, γωνία ροής 4 μοίρες



Jun 26, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 7.38, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο εύρος της, γωνία ροής 6 μοίρες
3.96e+01	ANSYS
3.76e+01	
3.56e+01	
3.36e+01	
3.17e+01	
2.97e+01	
2.77e+01	
2.57e+01	
2.37e+01	
2.18e+01	
1.98e+01	
1.78e+01	
1.58e+01	
1.39e+01	
1.19e+01	
9.90e+00	
7.92e+00	
5.94e+00	
3.96e+00	Y
1.98e+00	z—x
0.00e+00	



Jun 26, 2010 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, S-A)

Σχήμα 7.39, Contour της ταχύτητας σε τομή της πτέρυγας κάθετη στο μήκος χορδής της. Φαίνεται η ακμή πρόσπτωσης, γωνία ροής 6 μοίρες

Βλέπουμε ότι το contour της ταχύτητας σε μία κάθετη στο εύρος της πτέρυγας τομή (στη μέση της πτέρυγας, σχήμα 7.36, 7.38) δείχνει μία κατανομή ταχυτήτων παρόμοια με αεροτομής. Στο χείλος προσβολής, όπου είναι και το σημείο ανακοπής, έχουμε μηδενισμό της ταχύτητας. Η ροή επιταχύνεται και στις 2 πλευρές της πτέρυγας, ωστόσο επιταχύνεται περισσότερο στην άνω πλευρά, όπως είναι αναμενόμενο. Επιπλέον, για γωνία 6 μοιρών η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη επιτάχυνση για γωνία 4 μοιρών, δίνοντας μεγαλύτερη άνωση.

To contour της ταχύτητας σε τομή κάθετη στο μήκος χορδής στην ακμή πρόσπτωσης (σχήμα 7.37 και 7.39) δείχνει τη γραμμή ανακοπής στην πτέρυγα και την εγκάρσια ταχύτητα στις άκρες τις πτέρυγας. Και εδώ φαίνονται οι μεγαλύτερες διαφορές ταχυτήτων για γωνία ροής 6 μοιρών σε σχέση με τη γωνία ροής 4 μοιρών. Παρατηρούνται επιπλέον κάποιες ατέλειες προς το κέντρο της πτέρυγας. Αυτές υπάρχουν γιατί κατά την κατασκευή του πλέγματος είχε οριστεί ο αριθμός των στοιχείων προς το κέντρο της πτέρυγας, όπου δεν υπάρχουν έντονα φαινόμενα, να είναι μικρότερος από ότι στα άκρα, ενώ δεν ήταν ενεργοποιημένη και η εντολή mapped face meshing. Συνεπώς, η λύση δεν ήταν τόσο ακριβής σε αυτό το σημείο.



Σχήμα 7.40, Διανύσματα της ταχύτητας της ροής στον ομόρου της πτέρυγας, γωνία ροής 4 μοίρες

Στο σχήμα 7.40 φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής στον ομόρου της πτέρυγας σε μία απόσταση μισού μέτρου από την πτέρυγα. Τα διανύσματα φαίνονται υπό γωνία όσο και της ροής, ώστε να είναι ξεκάθαρη η ανάγνωσή τους. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι η ροή εμφανίζει έντονη κίνηση και κατά την κατεύθυνση z και διαμορφώνουν κύκλους που είναι ενδεικτικοί των δινών που εκβάλλονται από τα ακροπτερύγια. Το γεγονός ότι η πτέρυγα αυτή τη φορά είναι φαρδύτερη μεταβάλλει σχετικά τα διανύσματα, δίνοντας τους την παραπάνω μορφή. Ακολουθούν εικόνες από γραμμές ροής (σχήματα 7.41 έως 7.43), που καθιστούν εμφανέστερα τα φαινόμενα στις άκρες τις πτέρυγας. Αυτές ξεκινούν, από σφαίρα ακτίνας 2 εκατοστών στο κάθε ακροπτερύγιο, στο σημείο όπου υπάρχει η μέγιστη εγκάρσια ταχύτητα, δηλαδή εκεί που θεωρητικά δημιουργούνται οι δίνες των ακροπτερυγίων.



Σχήμα 7.41, Εικόνα από γραμμές ροής που ξεκινούν από σφαίρα ακτίνας 2 εκατοστών στο κάθε ακροπτερύγιο και διαγράφουν σπειροειδή τροχιά στον ομόρου, όπως φαίνονται από μπροστά απ' την πτέρυγα, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.42, Εικόνα από τις γραμμές ροής, εστιασμένη στο ακροπτερύγιο, όπου εκεί δημιουργούνται οι δίνες, γωνία ροής 4 μοίρες



Σχήμα 7.43, Οπίσθια άποψη γραμμών ροής, όπως φαίνονται να δημιουργούν τις δίνες από τα ακροπτερύγια, γωνία ροής 6 μοίρες

Παρατηρούνται και πάλι streamlines από διάφορες θέσεις στην κάτω πλευρά του ακροπτερυγίου διαγράφουν μία σπειροειδή τροχιά, ανεβαίνουν από την άνω πλευρά της πτέρυγας και εκεί αλληλεπιδρούν με την κυρίως ροή. Αυτό που ξεχωρίζει είναι ότι σε αυτή την περίπτωση, λόγω ανεπαρκούς σύγκλισης της λύσης, υπάρχει μία αρκετά γρήγορη απόσβεση του φαινομένου και ενσωμάτωση στην κυρίως ροή, γεγονός που δείχνει ότι δεν έχουμε ολοκληρωμένη απεικόνιση των φαινομένων. Περισσότερες επαναλήψεις βελτιώνουν την απεικόνιση και παρουσιάζουν ρεαλιστικότερα τη ροή, όπως έγινε στις άλλες 2 περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

8 Βελτίωση μοντέλου και αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα παραπάνω μοντέλα που δημιουργήθηκαν μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω. Κατ' αρχάς μπορεί να γίνει πυκνότερο πλέγμα, ιδιαίτερα στις 2 περιπτώσεις που το πλέγμα ήταν αραιότερο. Η εντολή mapped face meshing που δίνει ομοιόμορφο δομημένο πλέγμα σε μία μικρή περιοχή γύρω από ολόκληρη την πτέρυγα βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα και σε συνδυασμό με μία πύκνωση στα άκρα μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια ακόμα και το συντελεστή αντίστασης. Αυτό φυσικά συνεπάγεται και αύξηση του απαραίτητου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται στην επίλυση του προβλήματος.

Μία δυνατότητα για ταχύτερη επίλυση είναι να μην γίνει ανάλυση ολόκληρης της πτέρυγας αλλά ανάλυση της ημιπτέρυγας, με εκμετάλλευση της συμμετρίας που προσφέρουν οι ορθογωνικές πτέρυγες. Παράλληλα, σκόπιμη είναι η κατασκευή ενός ακροπτερυγίου που θα εξαλείψει τυχόν γωνίες στη γεωμετρία. Αυτό θα επιτρέψει ένα ομαλότερο πλέγμα με σαφέστατα καλύτερη απεικόνιση των πιέσεων, ταχυτήτων, γραμμών ροής και των υπολοίπων μεγεθών που ενδιαφέρουν στα ακροπτερύγια, περιοχή ιδιαίτερα ευαίσθητη και απαραίτητη για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά της πτέρυγας. Μία τέτοια διάταξη θα ήταν απλά το κλείσιμο της άκρης της πτέρυγας με ένα καπάκι που δημιουργείται από την προβολή των συντεταγμένων της αεροτομής σε διάφορες γωνίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1, Ακροπτερύγιο ημιπτέρυγας κατασκευασμένο από προβολές του άνω μέρους της αεροτομής σε 3 γωνίες

Ένας άλλος τομέας πιθανής βελτίωσης είναι το υπολογιστικό χωρίο. Το χωρίο που χρησιμοποιήθηκε κρίνεται αρκετά μεγάλο, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το

μέγεθος του πλέγματος και τον αριθμό των στοιχείων. Αυτό έχει ιδιαίτερα σημαντική επίδραση στον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για όλες τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται, δηλαδή την πλεγματοποίηση, την αρχικοποίηση του προβλήματος και την επίλυσή του. Εφόσον δεν κρίνεται σημαντική η μελέτη των δινών από τα ακροπτερύγια μακριά από την πτέρυγα (far field), μιας και έχουν ήδη γίνει πολλές πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σε αυτόν τον τομέα, η συρρίκνωση του υπολογιστικού χωρίου στο μισό θα επιτρέψει τη μείωση των στοιχείων του πλέγματος και την καλύτερη κατανομή τους σε σημεία όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως για παράδειγμα στο οριακό στρώμα, με ελάχιστη απώλεια πληροφορίας (ο ομόρους επηρεάζει κυρίως το συντελεστή αντίστασης και για αυτό απαιτείται το χωρίο να συμπεριλαμβάνει τον κοντινό ομόρου της πτέρυγας). Συνεπώς, θα υπάρχει σημαντικά πιο ακριβής απεικόνιση των μεγεθών της πτέρυγας και μεγαλύτερη ανάλυση των δινών που εκλύονται. Ένα αντίστοιχο υπολογιστικό χωρίο φαίνεται στο σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2, Μικρό υπολογιστικό χωρίο για ανάλυση ροής σε ημιπτέρυγα και εύρεση βασικών χαρακτηριστικών της

Περαιτέρω Έρευνα

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για μη μόνιμη ανάλυση ροής γύρω από πτέρυγα. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε η ροή σε γωνίες όπου δεν παρουσιάζεται αποκόλληση της πάνω στην πτέρυγα, φαινόμενο έντονα μη μόνιμο που συνδυάζεται με έκλυση επιπλέων στροβίλων, γεγονός που επέτρεψε τη μόνιμη ανάλυση του φαινομένου. Μπορεί, ωστόσο, να γίνει μελέτη και μεγαλύτερων γωνιών ροής με χρήση του μη μόνιμου λύτη και των ίδιων πλεγμάτων και ρυθμίσεων που χρησιμοποιήθηκαν και στη μόνιμη ανάλυση, ώστε να αποκτηθεί μία πιο ολοκληρωμένη άποψη για την ακρίβεια και την αξιοπιστία του μοντέλου. Ικανοποιητική ακρίβεια των υπολογιζόμενων μεγεθών θα σημαίνει ότι υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του μοντέλου και των ρυθμίσεων για ακριβή πρόβλεψη των βασικών μεγεθών και χαρακτηριστικών ορθογωνικών πτερύγων για χαμηλές ταχύτητες ροής.

Μία άλλη πρόταση είναι μετά τη μη μόνιμη ανάλυση να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για κάποιου είδους έλεγχο ροής, όπως με έκλυση ή απορρόφηση ρευστού. Αν και το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σύνθετο, το Fluent μπορεί να αντιμετωπίσει τέτοια προβλήματα και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για διάφορες μεθόδους και την αποτελεσματικότητά τους στον έλεγχο της αποκόλλησης του ρευστού από την πτέρυγα.

9 Βιβλιογραφία

1. J. D. Anderson "Computational Fluid Dynamics: The Basics with applications" Mc Graw Hill

2. Γ. Μπεργελές "Υπολογιστική Ρευστομηχανική" Εκδόσεις Συμεών Αθήνα 2006

- 3. Σ. Τσαγγάρης "Μηχανική των Ρευστών" Εκδόσεις Συμεών Αθήνα 2005
- 4. Δ. Μαθιουλάκης "Σημειώσεις Μηχανικής Ρευστών 2" Αθήνα 2006

5. P. R. Spalart S. R. Allmaras "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 30th Reno, NV, Jan. 6-9, 1992, 23 p., AIAA-1992-349

6. Κ. Χ. Γιαννάκογλου, "Συνεκτικές Ροές στις Στροβιλομηχανές", Αθήνα 2004

7. Γ. Μπεργελές "Η αεροδυναμική του υποηχητικού αεροσκάφου" Εκδόσεις Παπασωτηρίου Αθήνα 1995

8. Γ. Μπεργελές "Μηχανική Πτήσης: Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Αεροσκάφους" Αθήνα 2000

9. W. J. Devenport, M. C. Rife, S. I. Liapis, G. J. Follin "The structure and development of a wing-tip vortex" Journal of Fluid Mechanics vol. 312 pp. 67-106 1996

10. X. Huang, H. Igarashi, P. Durbin, H. Hu "Wind tunnel effects on wingtip vortices" Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 48th Orlando, FL, Jan. 4-7, AIAA 2010-235

11. G. R. Srinivasan, W. J. McCroskey "Tip Vortices of wings in subsonic and transonic flow: a numerical simulation" NASA Technical Memorandum 88334 July 1986

12. A. Revell, G. Iaccarino, X. Wu "Advanced RANS modeling of wingtip cortex flows" Centre for Turbulence Research, Proceedings of the summer programme 2006

13. I. Kroo "Drag due to lift: Concepts for Prediction and reduction" Annual Review Fluid Mechanics 2001. 33:587-617

14. P. R. Spalart "Airplane Trailing Vortices" Annual Review Fluid Mechanics 1998. 30:107-38

15. J. Dacles-Mariani, G. G. Zilliac, J. S. Chow "Numerical/Experimental study of a wingtip vortex in the near field" AIAA Journal, Vol. 33, No. 9, September 1995

16. J. S. Chow, G. G. Zilliac, P. Bradshaw "Mean and Turbulence Measurements in the near field of a wingtip vortex" AIAA Journal, Vol. 35, No. 10, October 1997

17. Σ. Δεμεσούκας "Ενεργητικός έλεγχος ροής σε αεροτομές – Υπολογιστική μοντελοποίηση" Διπλωματική Εργασία Ιούλιος 2009

18. I. H. Abbott, A. E. Von Doenhoff "Theory of Wing Sections including a summary of airfoil data" Dover Publications New York

19. G. W. Jones "Investigations of the effects of variations in the Reynolds number between $0.4 * 10^6$ and $3.0 * 10^6$ on the low-speed aerodynamic characteristics of three low aspect ratio symmetrical wings with rectangular plan

forms" NACA Research Memorandum RM L52G18 Langley Aeronautical Laboratory September 22, 1952

- 20. Theory Guide, FLUENT
- 21. http://www.ansys.com/products/icemcfd.asp
- 22. <u>http://www.abovetopsecret.com/forum/thread192824/pg1</u>
- 23. <u>http://www.aerospaceweb.org/question/nature/q0237.shtml</u>
- 24. vienna.bioengr.uic.edu/research/research.html