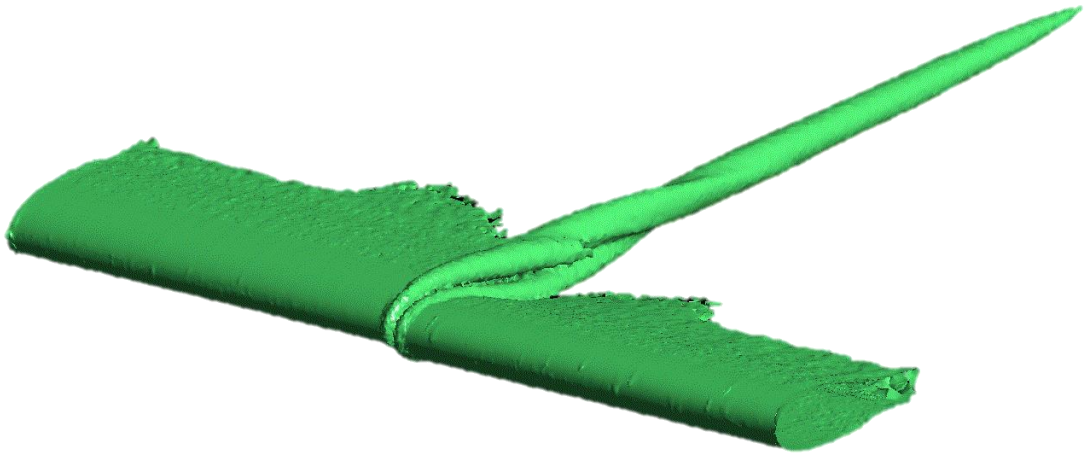
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΤΕΡΥΓΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΚΩΔΙΚΑ CFD ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



ΓΙΑΝΝΑΡΟΣ ΣΟΦΟΚΛΗΣ - ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρών τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας. Το αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη του πεδίου ροής γύρω από τρισδιάστατη πτέρυγα σε διαφορετικές γωνίες προσβολής και διαφορετική διάταξη. Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη:

1. Μελέτη του πεδίου ροής γύρω από τρισδιάστατη πτέρυγα σε διαφορετικές γωνίες προσβολής.
2. Μελέτη του πεδίου ροής γύρω από δύο ίδιες τρισδιάστατες πτέρυγες τοποθετημένες σε ίσες και αντίθετες γωνίες προσβολής.

Από αυτή τη θέση θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πρώτα απ' όλα θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για την στήριξη της, τόσο οικονομική όσο και ψυχολογική, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Θερμά ευχαριστήρια θέλω να αποδώσω στον αδερφό μου Ανδρέα Γιάνναρο, που αποτέλεσε στήριγμα σε δύσκολες στιγμές, αλλά και πολύτιμη βοήθεια με τις γνώσεις του. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ σε φίλους σε και συγγενείς που με βοήθησαν να πραγματοποιήσω τις επιθυμίες μου και ήταν εκεί όταν τους χρειάστηκα.

Ένα ευχαριστώ ξεχωριστό στον επιβλέποντα της πτυχιακής εργασίας, κ. Αλέξανδρο Καλαράκη, που δέχτηκε να συνεργαστούμε, και με καθοδήγησε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής. Επίσης θέλω να ευχαριστώ τον κ. Αλέξανδρο Ρωμαίο ο οποίος με βοήθησε με στοχευμένες παρατηρήσεις ιδιαίτερα στην αρχή της διαδικασίας.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω ξεχωριστά τον κ. Στέφανο Τσινόπουλο, ο οποίος με βοήθησε σε πολλές πτυχές κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και πίστεψε σε μένα και στις δυνατότητες μου.

Αφιερωμένη στην οικογένεια μου

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχει επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνει υπεύθυνα ότι είναι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχει δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν και λήφθηκαν ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνει επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχει ενσωματώσει στην εργασία προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, έχει πλήρως αναγνωρισθεί ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχει αναφερθεί ανελλιπώς το όνομά του και η πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

Σοφοκλής Αθανάσιος Γιάνναρος

……..……

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει θέμα την μελέτη του πεδίου ροής γύρω από τρισδιάστατες πτέρυγες σε διαφορετικές γωνίες προσβολής. Η αεροδυναμική παίζει καθοριστικό ρόλο στην σχεδίαση και στην ανάπτυξη νέων πιο αποδοτικών πτερύγων, με σκοπό τη αύξηση της ασφάλειας στην αεροπορική βιομηχανία αλλά και τη μείωση του κόστους των αερομεταφορών. Στη παρούσα εργασία η μελέτη του ροικού πεδίου πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Ansys Fluent. Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε διαφορετικά κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μίας αεροτομής και εξηγούνται οι βασικές αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν σε αυτή, και ορίζονται οι αεροδυναμικοί συντελεστές που καθορίζουν τη απόδοση της. Επίσης γίνεται μία αναφορά – εισαγωγή στη μέθοδο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και στη διαδικασία που ακολουθείται για την υλοποίηση της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται και εξηγούνται για λόγους εποπτείας οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη κίνηση των ρευστών. Ακόμα, πραγματοποιείται αναφορά στη θεωρία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και στη μέθοδο που ακολουθεί το Ansys Fluent. Επίσης παρουσιάζονται οι διάφοροι αλγόριθμοι που είναι διαθέσιμοι στο λογισμικό καθώς και εξηγούνται οι διάφορες επιλογές που μπορούμε να βρούμε σε αυτό.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση μίας πτέρυγας NACA 0030 σε διαφορετικές γωνίες προσβολής σε συνθήκες μόνιμης ροής. Εξετάζονται οι δυνάμεις που δρουν πάνω σε αυτή και πως αυτές μεταβάλλονται με την αύξηση της γωνίας προσβολής. Επίσης διερευνάται και η μεταβολή των αδιάστατων συντελεστών άντωσης, οπισθέλκουσας και πίεσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε για δύο τρισδιάστατες πτέρυγες NACA 0030 σε ίσες και αντίθετες γωνίες προσβολής. Βασικός σκοπός του κεφαλαίου είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα με σκοπό να κρίνουμε αν το υπολογιστικό μοντέλου μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται μελλοντικές προτάσεις για επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

CFD, πτέρυγα, στρόβιλος, αεροδυναμική, υπολογιστική ρευστοδυναμική

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ iii
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ 1
1.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ 2
1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ 7
1.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ CFD 8
1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΙΑ 11
2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ 11
2.2 ΤΥΡΒΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ 14
2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΥΡΒΗ 14
2.2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ 16
2.2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ RANS 18
2.3 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ 20
2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ 20
2.3.2 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ 21
2.3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ 24
2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΓΙΑ CFD ΑΝΑΛΥΣΗ 26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ NACA 0030 33
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 33
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 33
3.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ 36
3.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 39
3.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ 39
3.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 40
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΖΕΥΓΟΥΣ ΟΜΟΡΡΟΠΑ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ 56
4. 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 56
4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 57
4.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ 58
4.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 59

4.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 60
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 76
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 76
5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΛΕΨΕΙΣ 77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 79

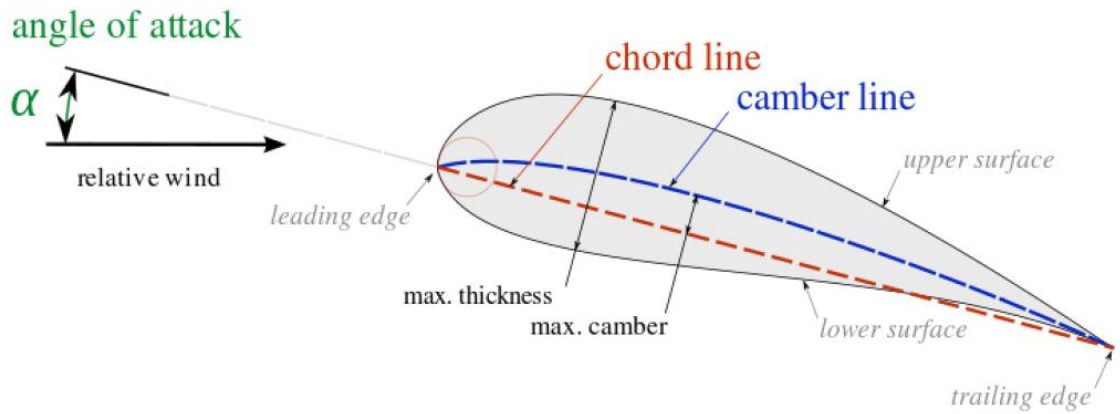
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

Η αεροδυναμική αποτελεί έναν υποκλάδο της μηχανικής των ρευστών και βασικό αντικείμενο μελέτης, αποτελεί η διερεύνηση του ροικού πεδίου γύρω από διάφορα σώματα, είτε αυτά είναι ακίνητα, είτε κινούνται. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η κατανόηση των δυνάμεων που ασκούνται στα σώματα αυτά, έτσι ώστε αφενός να μπορεί να προβλεφθεί η κίνηση των σωμάτων μέσα στο πεδίο ροής, και αφετέρου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός αυτών, προς τον επιδιωκόμενο στόχο. Συνήθως, οι στόχοι που επιδιώκονται είναι δύο:

1. Μείωση της αντίστασης που προκαλείται από την κίνηση του σώματος μέσα στο πεδίο ροής.
2. Αύξηση της άντωσης, αν πρόκειται για αντωτικές επιφάνειες όπως είναι η αεροτομή και η πτέρυγα.

Η αεροτομή είναι το σχήμα της πτέρυγας ή του πτερυγίου όπως φαίνεται σε εγκάρσια τομή στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 *: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής[1]*

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά μίας αεροτομής είναι τα ακόλουθα.

- **Επιφάνεια πίεσης (pressure surface):** Είναι η επιφάνεια στην οποία το ρευστό κινείται με μικρότερη ταχύτητα και έχει υψηλότερη στατική πίεση (σε σύγκριση με την επιφάνεια αναρρόφησης). Στην περίπτωση της αεροτομής που παράγει άντωση, η επιφάνεια πίεσης είναι η κάτω επιφάνεια (lower surface).
- **Επιφάνεια αναρρόφησης (suction surface):** Είναι η επιφάνεια στην οποία το ρευστό κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη απ' ότι στην επιφάνεια πίεσης και έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη στατική πίεση.
- **Χείλος προσβολής (leading edge):** Είναι το σημείο στο μπροστινό μέρος της αεροτομής που έχει τη μέγιστη καμπυλότητα. Αυτό το σημείο έρχεται πρώτο σε επαφή με το ρευστό όταν η αεροτομή βρίσκεται σε κίνηση.

- **Χείλος εκφυγής (trailing edge):** Είναι το σημείο στο πίσω μέρος της αεροτομής με τη μέγιστη καμπυλότητα.
- **Γραμμή χορδής (chord line):** Είναι μία ευθεία νοητή γραμμή που ενώνει το χείλος προσβολής με το χείλος εκφυγής. Το μήκος της χορδής (c) είναι χαρακτηριστική διάσταση της κάθε αεροτομής.
- **Μέση γραμμή καμπυλότητας (mean camber line)**: Ορίζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που βρίσκονται στο μέσο μεταξύ των επιφανειών αναρρόφησης (suction surface) και πίεσης (pressure surface).

- **Γωνία προσβολής α (angle of attack)**: Είναι η γωνία που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την διεύθυνση της ελεύθερης ροής.

Το πάχος της αεροτομής δεν είναι σταθερό και διαφέρει κατά μήκος της χορδής. Στη βιβλιογραφία το πάχος της αεροτομής ορίζεται με δύο τρόπους.

- Πάχος μετρούμενο κάθετα προς τη γραμμή μέσης καμπυλότητας (αμερικανική σύμβαση).
- Πάχος μετρούμενο κάθετα προς τη γραμμή χορδής (αγγλική σύμβαση).

Δύο ακόμα παράμετροι που χρησιμοποιούνται συχνά στην βιβλιογραφία για την περιγραφή της αεροτομής εκφρασμένες ως ποσοστό του πάχους είναι:

- Μέγιστο πάχος εκφρασμένο ως ποσοστό της χορδής
- Η θέση στην οποία βρίσκεται το μέγιστο πάχος εκφρασμένο ως ποσοστό της χορδής.

Χαρακτηριστικά σημεία επίσης πάνω στη χορδή της αεροτομής στα οποία συνήθως θεωρούμε ότι επενεργεί το ισοδύναμο σύστημα δυνάμεων (Lift, Drag) και ροπής (Moment) (μεγέθη τα οποία αναλύονται στη συνέχεια) είναι το χείλος προσβολής και το κέντρο πίεσης.

Το **κέντρο πίεσης (center of pressure)** ορίζεται ως το σημείο της χορδής στο οποίο η ροπή πρόνευσης Μ μηδενίζεται.

1.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Οι αεροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή είναι αποτέλεσμα δύο βασικών πηγών:

1. Της διαφοράς πίεσης που υπάρχει μεταξύ της επιφάνειας αναρρόφησης και της επιφάνειας πίεσης. Καθώς ένα ρευστό κινείται γύρω από μία αεροτομή, ακολουθεί το σχήμα της. Ως συνέπεια αυτού, το ρευστό που κινείται στην επιφάνεια αναρρόφησης έχει μεγαλύτερη ταχύτητα απ’ ότι το ρευστό που κινείται στην επιφάνεια πίεσης. Σαν αποτέλεσμα, η στατική πίεση στην επιφάνεια αναρρόφησης είναι μικρότερη απ’ ότι στην επιφάνεια πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης δημιουργεί μία δύναμη η οποία δρα κάθετα στην διεύθυνση της ελεύθερης ροής και ονομάζεται **άντωση (lift)**.

2. Της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας της αεροτομής και του εν κινήσει ρευστό. Η διατμητική τάση που δημιουργείται προκαλεί μία δύναμη που ονομάζεται **οπισθέλκουσα (drag)**.

Οι αεροδυναμικοί συντελεστές είναι αριθμοί οι οποίοι εκφράζουν σε αδιάστατη μορφή την εξάρτηση των αεροδυναμικών δυνάμεων από τις συνθήκες του ροικού πεδίου. Υπάρχουν τέσσερις βασικοί αεροδυναμικοί συντελεστές: ο συντελεστής πίεσης C_p, ο συντελεστής άντωσης C_l, ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_d και ο συντελεστής ροπής πρόνευσης. Με τη χρήση των παραπάνω αεροδυναμικών συντελεστών γίνεται δυνατή η σύγκριση αεροτομών διαφορετικών μεγεθών και σχημάτων.

Συντελεστής πίεσης C_p (Pressure Coefficient)

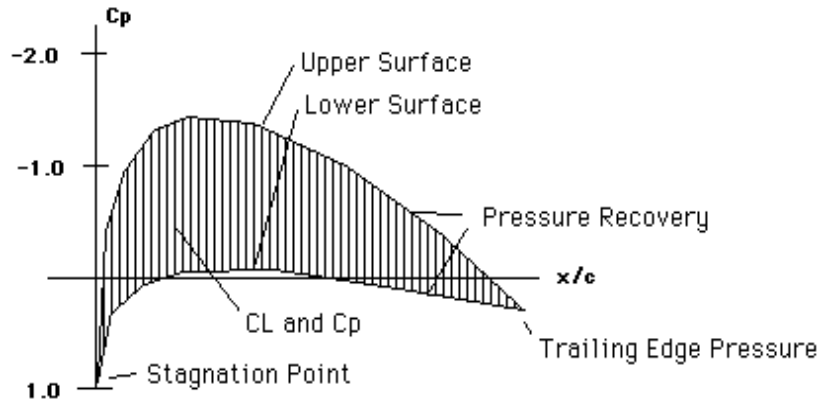
Η πίεση του πεδίου ροής αδιαστατοποιείται συνήθως με την δυναμική πίεση $\frac{1}{2}\rho_\infty {V_\infty}^2$. Συνήθως η πίεση που ασκείται στην επιφάνεια της αεροτομής εκφράζεται με τον συντελεστή πίεσης ο οποίος ορίζεται ως εξής[2]

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty {V_\infty}^2} \tag{1.1}$$

Όπου $P_\infty, \rho_\infty, V_\infty$ είναι η πίεση η πυκνότητα και η ταχύτητα της ελεύθερης ροής αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται η εξίσωση Bernoulli, η οποία συνδέει τη κατάσταση της ελεύθερης ροής $P_\infty, \rho_\infty, V_\infty$ με οποιοδήποτε σημείο γύρω από την αεροτομή P, ρ, V.

$$P_\infty + \rho_\infty gh + \frac{1}{2}\rho {V_\infty}^2 = P + \rho gh + \frac{1}{2}\rho V^2 \tag{1.2}$$

Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα κατανομής C_p γύρω από την αεροτομή. Η επιφάνεια που περικλείεται από τις καμπύλες της πάνω και της κάτω επιφάνειας της αεροτομής εκφράζει την άντωση που ασκείται στην αεροτομή.



Σχήμα 1.2 *: Τυπική μεταβολή του συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής. Το εμβαδόν της κλειστής επιφάνειας αποτελεί την άντωση της αεροτομής[3]*

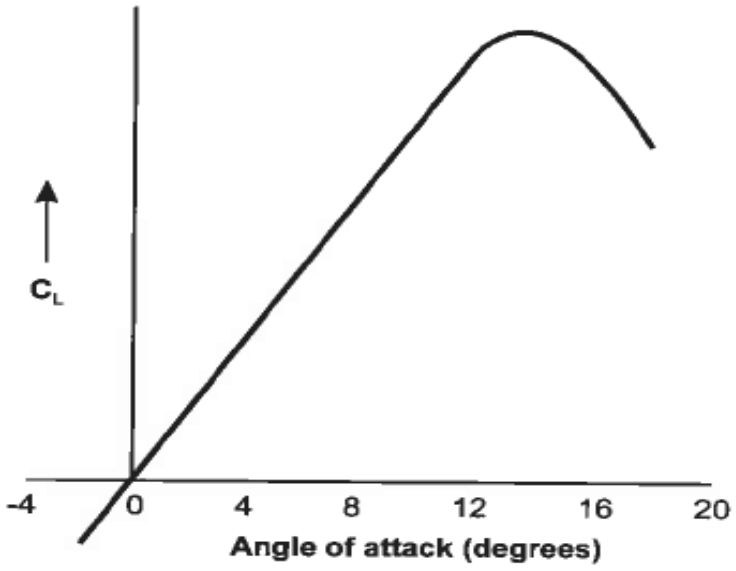
Συντελεστής άντωσης C_l (Lift Coefficient)

Ο συντελεστής άντωσης μίας αεροτομής ορίζεται ως εξής[2]:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho_\infty {V_\infty}^2 S} \tag{1.3}$$

Όπου S είναι η επιφάνεια της κάτοψης της αεροτομής και L η παραγόμενη άντωση.

Ο συντελεστής άντωσης είναι συνάρτηση της γωνία προσβολής καθώς και άλλων παραγόντων μεταξύ των οποίων είναι ο αριθμός Reynolds (ορίζεται στο κεφάλαιο 2), η συμπιεστότητα της ροής (αριθμός Mach) και η τραχύτητα της επιφάνειας.



Σχήμα 1.3 *: Τυπική μεταβολή του συντελεστή άντωσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής[4]*

Στο Σχήμα 1.3 παριστάνεται τυπική μεταβολή του συντελεστή άντωσης με τη γωνία προσβολής για μη συμμετρική αεροτομή. Με βάση αυτή τη καμπύλη ορίζονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

- *Γωνία μηδενικής άντωσης* $\alpha_L = 0$ *(Zero-Lift Angle):* Είναι η γωνία προσβολής για την οποία η άντωση της αεροτομής είναι μηδέν.
- *Κλίση της καμπύλη άντωσης* $\alpha_0 = \frac{dc_l}{da}$ *(Lift Curve Slope):* Είναι η κλίση της καμπύλης του συντελεστή άντωσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής της αεροτομής.
- *Μέγιστος συντελεστής άντωσης* $C_{l,max}$: Είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή άντωσης. Η γωνία προσβολής η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη άντωση ονομάζεται *Γωνία Απώλειας Στήριξης (Stall Angle).* Για μεγαλύτερες γωνίες εμφανίζεται σημαντική αποκόλληση του οριακού στρώματος στην επιφάνεια αναρρόφησης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση της παραγόμενης άντωσης.

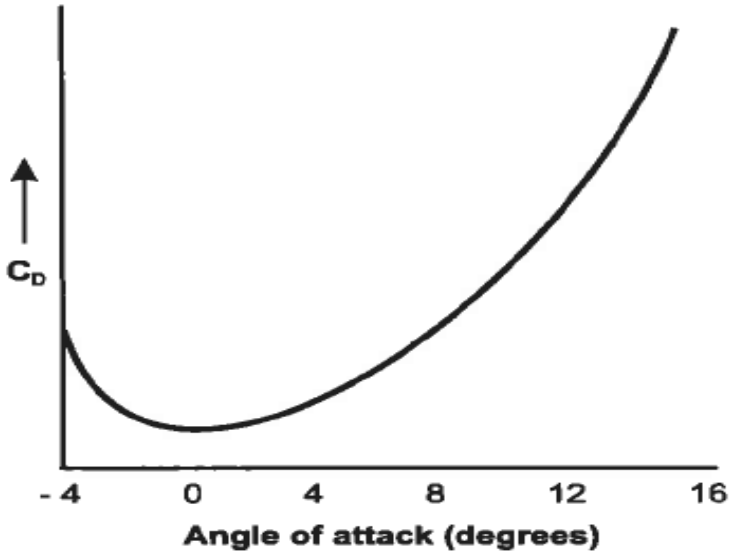
- *Συντελεστής Άντωσης* $C_{l,0}$ *:* είναι η τιμή του συντελεστή άντωσης για μηδενική γωνία προσβολής.

Συντελεστής οπισθέλκουσας C_d (Drag Coefficient)

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας μίας αεροτομής ορίζεται ως εξής[2]:

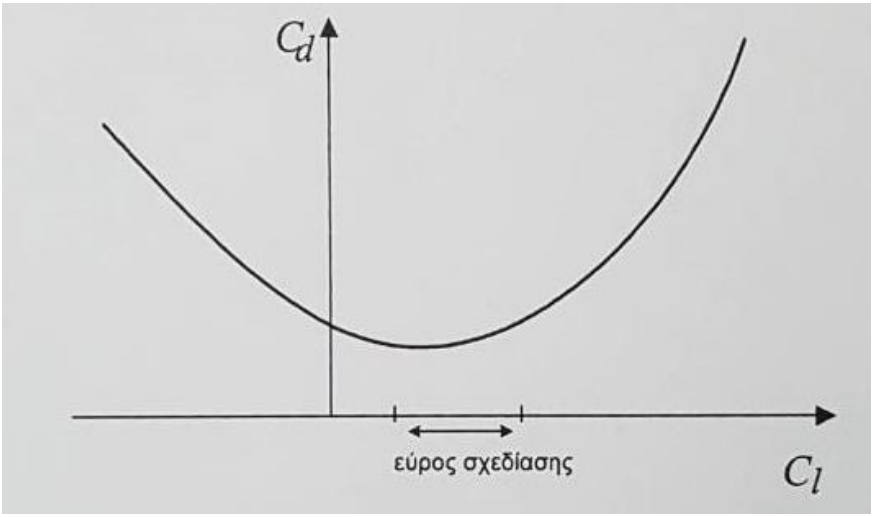
$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_\infty {V_\infty}^2 S} \tag{1.4}$$

όπου D είναι η οπισθέλκουσα που παράγεται από την πτέρυγα. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας προσβολής. Παρατηρείται ότι για μικρές γωνίες προσβολής η τιμή του C_d είναι μικρή, ενώ για μεγάλες γωνίες αυξάνεται απότομα.



Σχήμα 1.4 *: Τυπική μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας προσβολής[5].*

Η συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή άντωσης και του συντελεστή οπισθέλκουσας απεικονίζεται με το διάγραμμα του Σχήματος 1.5 στο οποίο, παρουσιάζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_d συναρτήσει του συντελεστή άντωσης C_l. Βασικός στόχος στο σχεδιασμό αεροτομών είναι η επίτευξη του μέγιστου συντελεστή άντωσης με τον ελάχιστο συντελεστή οπισθέλκουσας.



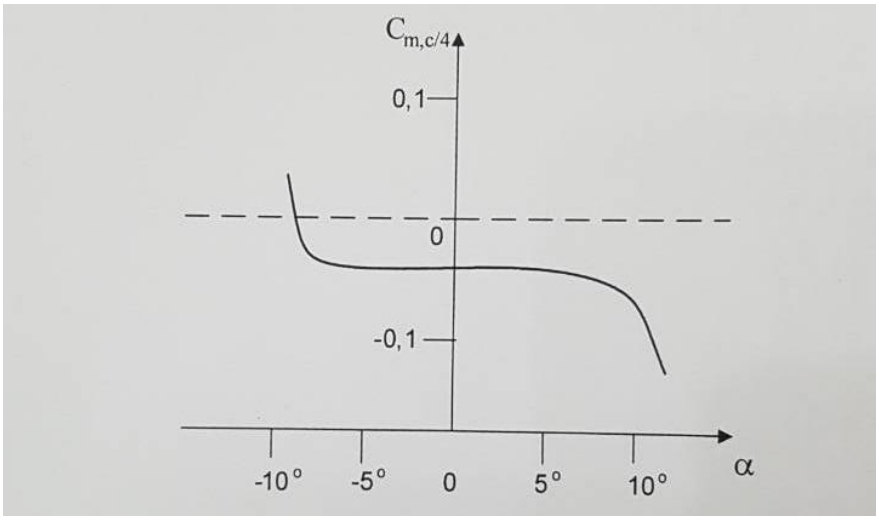
Σχήμα 1.5 *: Τυπική μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας προσβολής[2]*

Συντελεστής ροπής πρόνευσης C_m (Pitching Moment Coefficient)

Ο συνδυασμός των δυνάμεων άντωσης και οπισθέλκουσας που ενεργούν στις επιφάνειες της αεροτομής, δημιουργούν μία ροπή η οποία ονομάζεται ροπή πρόνευσης (pitching moment) και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία θεωρείται είτε ως προς το χείλος προσβολής είτε ως προς το κέντρο πίεσης. Ο συντελεστής ροπής πρόνευσης C_m ορίζεται ως εξής[2]

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho_\infty {V_\infty}^2 S \cdot c} \tag{1.5}$$

Παρατηρείται ότι στον ορισμό του συντελεστή ροπής πρόνευσης εμφανίζεται το χαρακτηριστικό μήκος της χορδής c (στον παρονομαστή). Το μήκος της χορδής της πτέρυγας, χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση του μοχλοβραχίονα της ροπής. Στο Σχήμα 1.6 παριστάνεται τυπική μεταβολή του συντελεστή C_m συναρτήσει της γωνίας προσβολής.



Σχήμα 1.6 *: Τυπική μεταβολή του συντελεστή ροπής πρόνευσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής[2].*

1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

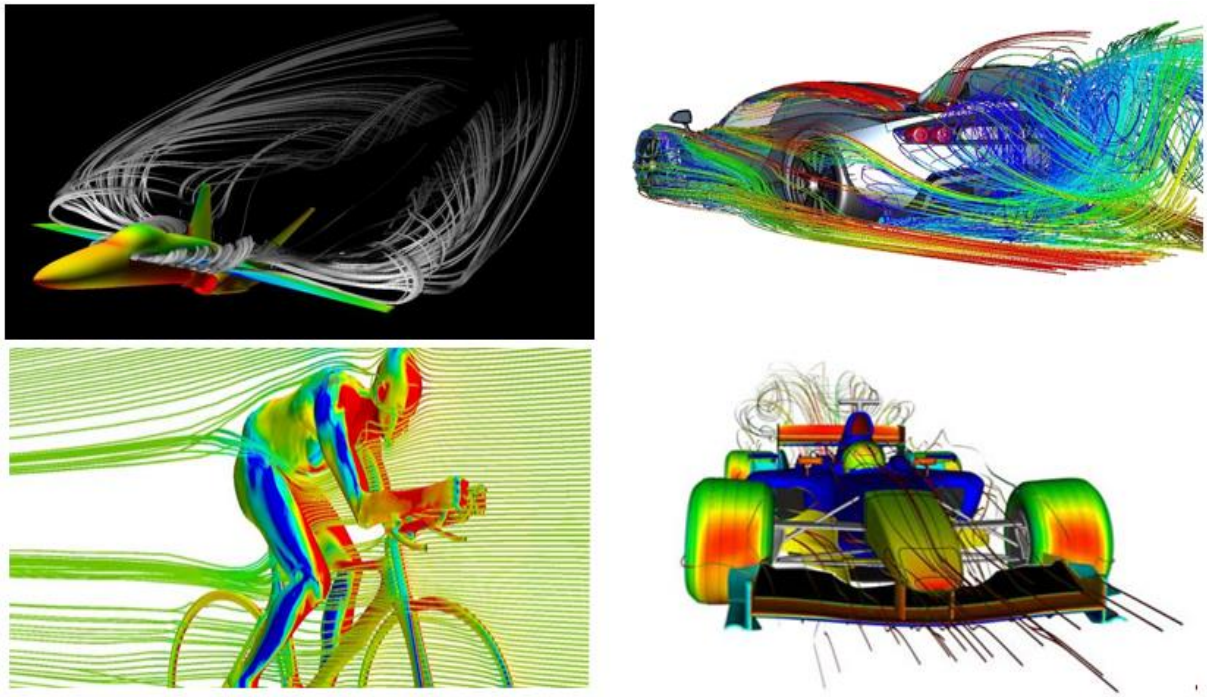
Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD - Computational Fluid Dynamics) αποτελεί μέθοδο προσέγγισης των προβλημάτων που εμπεριέχουν ροή ρευστών, μετάδοση θερμότητας και παρόμοια φαινόμενα όπως χημικές διεργασίες μέσω προσομοίωσης σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον. Η μέθοδος αυτή γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη κατά την διάρκεια του περασμένου αιώνα εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας των υπολογιστών. Η προσεγγίσεις προβλημάτων που εμπεριείχαν ροή ρευστών μέχρι τότε ήταν δύο: η θεωρητική προσέγγιση και η πειραματική προσέγγιση.

Η θεωρητική προσέγγιση όμως αδυνατεί να δώσει ακριβείς λύσεις εξαιτίας των πολύπλοκων μερικών διαφορικών εξισώσεων που κυβερνάνε τέτοια προβλήματα και για αυτό το λόγο ακριβείς λύσεις μπορούσαν να εξαχθούν μόνο για απλοποιημένα προβλήματα (ασυμπίεστη, ατριβή ροή σε δύο διαστάσεις).

Από την άλλη πλευρά, η πειραματική προσέγγιση της ροής των ρευστών μπορεί να δώσει ακριβείς απαντήσεις σε προβλήματα όπου πολύπλοκα φαινόμενα λάμβαναν χώρα, αλλά ο εξοπλισμός που χρειαζόταν καθιστούσε τα πειράματα πολυδάπανα.

Με τη μέθοδο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής τα πειράματα πλέον γίνονται σε ένα υπολογιστή με αρκετές φορές μικρότερο κόστος από ότι αν γινόντουσαν στη πραγματικότητα. Επίσης το υπολογιστικό περιβάλλον όπου παίρνουν μέρος οι προσομοιώσεις δίνει τη δυνατότητα στους σχεδιαστές και στου μηχανικούς να εξετάσουν διάφορα μοντέλα με πληθώρα τροποποιήσεων με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου προϊόντος (μεγιστοποίηση της άντωσης και ταυτόχρονα ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας στην περίπτωση της πτέρυγας). Για τους παραπάνω λόγους πληθώρα βιομηχανιών στράφηκαν στην μέθοδο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής όπως[6]:

- Αεροναυπηγική βιομηχανία
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Θαλάσσια βιομηχανία
- Μετεωρολογία
- Κατασκευαστές αεριοστρόβιλων
- Αθλητισμός (μηχανοκίνητα σπορ, ποδηλασία, κολύμβηση)



Σχήμα 1.7 *: Τυπικά παραδείγματα χρήσης λογισμικών CFD σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς[7][8][9][10]*

1.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ CFD

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφοροι κώδικες CFD μεταξύ των οποίων είναι FLUENT, CFX, STARR CCM+, OPEN FOAM. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο ANSYS FLUENT CFD. Παρά το πλήθος των διαφόρων λογισμικών που κυκλοφορούν με σκοπό την ανάλυση της ροής των ρευστών, όλοι οι κώδικες περιέχουν την ίδια φιλοσοφία και κύριες διεργασίες. Έτσι, ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί τη μέθοδο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής χρησιμοποιεί την παρακάτω μεθοδολογία[6]

- **Preprocessing** (επεξεργασία πριν την επίλυση): Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται η εισαγωγή του φυσικού προβλήματος στο λογισμικό. Αναλυτικότερα οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτή φάση είναι:

  - Δημιουργία του υπολογιστικού πεδίου (Computational Domain) στο οποίο θα αναλυθεί το υπό εξέταση πρόβλημα. Η δημιουργία της γεωμετρίας μπορεί να περιλαμβάνει, είτε σχεδιασμό της γεωμετρίας από το μηδέν, είτε απλοποίηση ενός ήδη υπάρχοντος μοντέλου, όπως για παράδειγμα διαγραφή μικρών καμπυλών που δεν επηρεάζουν τα υπό μελέτη φαινόμενα αλλά δυσκολεύουν τη δημιουργία ενός υπολογιστικού πλέγματος με αποδεκτή από τον επιλυτή ποιότητα. Για αυτό το λόγο πολλά πακέτα λογισμικού CFD παρέχονται με το δικό τους λογισμικό CAD.

  - Δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος (grid generation or meshing): Εδώ το φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε μαθηματικό μοντέλο χωρίζοντας το

υπολογιστικό πεδίο σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (elements). Αυτό το βήμα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα βήματα σε μία CFD ανάλυση, καθώς περισσότερο από το 50% του χρόνου σε μία ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ξοδεύεται στην δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Μεγάλος αριθμός στοιχείων σημαίνει πιο ακριβής λύση όμως ταυτόχρονα μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Για αυτό το λόγο γίνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ακρίβεια της λύσης που απαιτείται και στην υπολογιστική ισχύ που είναι διαθέσιμη.

- Επιλογή των φαινομένων που πρόκειται να μελετηθούν και να προσομοιωθούν και πύκνωση των στοιχείων (elements) στις περιοχές όπου εμφανίζονται τα υπό μελέτη φαινόμενα. Για παράδειγμα αν σε μία ανάλυση ενός αεροπλάνου η αεροδυναμική αντίσταση είναι το εξεταζόμενο μέγεθος, τότε θα πρέπει τα στοιχεία που απαρτίζουν το υπολογιστικό πεδίο να είναι πιο πυκνά γύρω από το αεροπλάνο και στις επιφάνειες αυτού. Αντίθετα αν ο στρόβιλος απορρέματος που δημιουργείται σε μία πτέρυγα υπό κλίση αποτελεί το υπό μελέτη φαινόμενο τότε η περιοχή όπου τα στοιχεία πυκνώνουν θα πρέπει να επεκτείνεται πίσω από τη πτέρυγα.

- **Solver (Επιλυτή):** Τα περισσότερα υπολογιστικά πακέτα χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για τη διακριτοποίηση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση των ρευστών (Finite Volume Method - FVM). Οι μερικές αυτές διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται στους πεπερασμένους όγκους αναφοράς, επομένως οι ίδιες αρχές που ισχύουν για το φυσικό πρόβλημα σε ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο (αρχή διατήρησης της μάζας, ορμής, ενέργειας…) ισχύουν για κάθε ένα πεπερασμένο όγκο ξεχωριστά. Μετά την διακριτοποίηση οι μερικές διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε αλγεβρικές εξισώσεις (εξισώσεις πεπερασμένων όγκων) το σύστημα των οποίων επιλύεται χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους. Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται για το κέντρο του κάθε κελιού (element). Έτσι αν σε ένα πρόβλημα οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν είναι τέσσερις (u,v,w,P) και το πλέγμα αποτελείται από 1,000,000 στοιχεία το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που θα επιλυθούν σε κάθε μία επανάληψη θα είναι 4,000,000. Η λύση των εξισώσεων πεπερασμένων όγκων απαιτείται να είναι επαναληπτική εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης των φαινομένων που αναπτύσσονται στις ροές των ρευστών.

- **Post Processing (Επεξεργασία Αποτελεσμάτων):** Η φάση αυτή περιλαμβάνει την ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν από τον επιλυτή με σκοπό μία φυσική αναπαράσταση της λύσης. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι καθώς μέσα από την οπτικοποίηση της λύσης μπορούν να εξαχθούν πολύ σημαντικά συμπεράσματα (όπως που συμβαίνει η αποκόλληση του οριακού στρώματος, που δημιουργούνται διάφοροι στρόβιλοι, τα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται όταν η ροή γίνεται υπερηχητική…). Για αυτό το λόγο σχεδόν όλοι οι κώδικες εμπεριέχουν τα δικά τους λογισμικά για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη:

1. Υπολογιστική προσομοίωση μίας συμμετρικής τρισδιάστατης πτέρυγας (NACA 0030) σε διαφορετικές γωνίες προσβολής
2. Υπολογιστική προσομοίωση ομόρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων απορρέματος που δημιουργούνται από δύο τρισδιάστατες πτέρυγες (NACA 0030) τοποθετημένες σε ίσες και αντίθετες γωνίες προσβολής.

Στο *πρώτο μέρος* σχεδιάστηκε με το Design Modeler που εμπεριέχεται στο λογισμικό Ansys μία τρισδιάστατη πτέρυγα NACA 0030. Οι διαστάσεις της πτέρυγας που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και οι συνθήκες ροής που εισήχθησαν, είναι ίδιες με εκείνες, στις οποίες πραγματοποιήθηκε πείραμα από τον Αλέξανδρο Ρωμαίο το 2009 στο εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής και Εφαρμογών Στατιστικής Μηχανικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής. Το υπολογιστικό πεδίο που χρησιμοποιήθηκε έχει τις ίδιες διαστάσεις με την αεροσήραγγα στην οποία διεξήχθη το πείραμα. Σε αυτό το μέρος σκοπός είναι ο υπολογισμός του συντελεστή άντωσης C_l και του συντελεστή οπισθέλκουσας C_d, καθώς επίσης και η εξαγωγή διαγραμμάτων για την μεταβολή του συντελεστή πίεσης C_p στην επιφάνεια της πτέρυγας. Οι παραπάνω συντελεστές υπολογίζονται για πέντε διαφορετικές γωνίες προσβολής (0^o, 2^o, 4^o, 6^o, 8^o).

Στο *δεύτερο* μέρος πραγματοποιείται προσομοίωση των ομόρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων απορρέματος που δημιουργούνται από τη τοποθέτηση δύο τρισδιάστατων πτερύγων NACA 0030 σε ίσες και αντίθετες γωνίες προσβολής. Σε αυτό το μέρος σκοπός είναι η προσομοίωση του παραπάνω φαινομένου και η πιστοποίηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, συγκρίνοντας τα με αυτά του πειράματος[11]. Η σημασία του στροβίλου απορρέματος έχει καταστεί πολύ σημαντική, καθώς πολλά ατυχήματα αεροσκαφών έχουν αποδοθεί στο φαινόμενο αυτό. Αυτό σε συνάρτηση με την έλευση μεγαλύτερων και γρηγορότερων αεροσκαφών καθιστούν αρκετά σημαντική την ερμηνεία και τον περιορισμό του φαινομένου αυτού. Για τον περιορισμό του φαινομένου τα αεροσκάφη πρέπει να πετάνε σε συγκεκριμένες αποστάσεις ασφαλείας με αποτέλεσμα να είναι περιορισμένος ο αριθμός προσγειώσεων και απογειώσεων σε ένα αεροδρόμιο και επίσης οι παράλληλοι διάδρομοι πρέπει να είναι σε συγκεκριμένες αποστάσεις για να είναι ασφαλείς από το απόρρεμα των στροβίλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΙΑ

2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των ρευστών, βασίζονται σε τρεις βασικές αρχές και είναι οι ακόλουθες:

1. Αρχή διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας)
2. Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα (εξίσωση ορμής)
3. Αρχή διατήρησης της ενέργειας ($1^{ος}$ Θερμοδυναμικός νόμος)

Εξίσωση διατήρησης της μάζας

Η εξίσωση διατήρηση της μάζας εκφράζει τον πρώτο βασικό νόμο της κλασικής μηχανικής, σύμφωνα με τον οποίο η μάζα δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται από το μηδέν και γράφεται ως εξής [6]:

$$\frac{\theta\rho}{\theta t} + div\left(\rho\vec{V}\right) = S_m \tag{2.1}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη γενική μορφή της αρχής διατήρησης της μάζας και ισχύει τόσο για συμπιεστές ροές (Mach>0.3) όσο και για ασυμπίεστες (Mach<0.3). Ο όρος S_m αποτελεί το ποσό της μάζας που προστίθεται στη συνεχή φάση από την εν διασπορά δεύτερη φάση (π.χ. λόγω εξάτμισης των σταγονιδίων του ρευστού, ή από τυχόν άλλες πηγές που ορίζονται από το εκάστοτε πρόβλημα). Η εξίσωση της συνέχειας, διατυπωμένη σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, για έναν όγκο ελέγχου του ρευστού, σε συντηρητική μορφή παίρνει την παρακάτω μορφή [6]:

$$\frac{\theta\rho}{\theta t} + \frac{\theta(\rho u)}{\theta x} + \frac{\theta(\rho v)}{\theta y} + \frac{\theta(\rho w)}{\theta z} = 0 \tag{2.2}$$

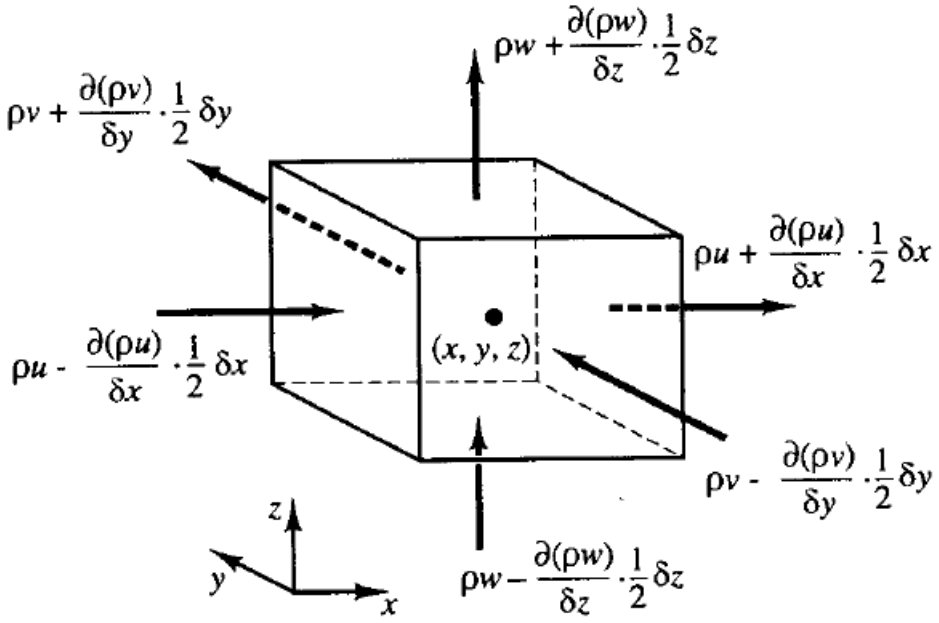
Όπου

u είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα χ

v είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα y

w είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα z

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού



Σχήμα 2.1 *: Ροή μάζας από και προς έναν όγκο ελέγχου ρευστού σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων[6]*

Εξίσωση διατήρησης της ορμής

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής εκφράζει το δεύτερο βασικό νόμο της κλασικής μηχανικής, δηλαδή το δεύτερου νόμου του Νεύτωνα, δηλαδή ότι η χρονική μεταβολή της ορμής ενός σώματος ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που δρουν πάνω σε αυτό. Όσον αφορά την κίνηση ενός ρευστού στις τρεις διαστάσεις η παραπάνω εξίσωση διατυπώνεται ως εξής:

Συνιστώσα x	$\rho\frac{Du}{Dt} = \frac{\theta(-p+\tau_{xx})}{\theta x} + \frac{\theta\tau_{yx}}{\theta y} + \frac{\theta\tau_{zx}}{\theta z} + S_{m,x}$
Συνιστώσα y	$\rho\frac{Dv}{Dt} = \frac{\theta(-p+\tau_{yy})}{\theta y} + \frac{\theta\tau_{xy}}{\theta x} + \frac{\theta\tau_{zy}}{\theta z} + S_{m,y}$
Συνιστώσα z	$\rho\frac{Dw}{Dt} = \frac{\theta(-p+\tau_{zz})}{\theta z} + \frac{\theta\tau_{xz}}{\theta x} + \frac{\theta\tau_{yz}}{\theta y} + S_{m,z}$

(2.3)

Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Σύμφωνα με τον 1ο θερμοδυναμικό νόμο, η ενέργεια δεν δημιουργείται από το μηδέν ούτε καταστρέφεται, αλλά διατηρείται κατά την κίνηση του ρευστού. Εφαρμόζοντας την εξίσωση της ενέργειας σε έναν όγκο ελέγχου του ρευστού παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση[6]

$$\rho\frac{DE}{Dt} = -div(pu) + \left[\frac{\theta(u\tau_{xx})}{\theta x} + \frac{\theta(u\tau_{yx})}{\theta y} + \frac{\theta(u\tau_{zx})}{\theta z} + \frac{\theta(v\tau_{xy})}{\theta x} + \frac{\theta(v\tau_{yy})}{\theta y} + \frac{\theta(v\tau_{zx})}{\theta z} + \frac{\theta(w\tau_{xz})}{\theta x} + \frac{\theta(w\tau_{yz})}{\theta y} + \frac{\theta(w\tau_{zz})}{\theta z}\right] + div(k\ grad\ T) + S_E \quad (2.4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με Ε συμβολίζεται η ειδική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα μάζας, που προκύπτει από το άθροισμα της ειδικής εσωτερικής ενέργειας (e) και της ειδικής κινητικής ενέργειας. Δηλαδή είναι:

$$E = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (2.5)$$

Η κίνηση ενός ρευστού στις τρεις διαστάσεις περιγράφεται πλήρως από ένα σύστημα που περιλαμβάνει πέντε διαφορικές εξισώσεις (1 εξίσωση συνέχειας, 3 εξισώσεις διατήρησης της ορμής, 1 εξίσωση διατήρησης της ενέργειας). Μεταξύ των αγνώστων εμπεριέχονται και τέσσερις θερμοδυναμικές μεταβλητές: πυκνότητα (ρ), πίεση (p), ειδική εσωτερική ενέργεια (e), και θερμοκρασία (T). Εξισώσεις για τον συσχετισμό των παραπάνω τεσσάρων θερμοδυναμικών μεταβλητών μπορούν να εξαχθούν μέσω της υπόθεσης της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Παρόλο που κατά τη κίνηση ενός ρευστού οι αλλαγές στην ταχύτητά του μπορεί να είναι μεγάλες, συνήθως είναι αρκετά μικρές, που αν και οι ιδιότητες των σωματιδίων του ρευστού αλλάζουν στο χώρο, το ρευστό μπορεί να προσαρμοστεί άμεσα σε αυτές τις νέες συνθήκες τόσο γρήγορα, ώστε οι αλλαγές αυτές να θεωρηθούν ότι γίνονται στιγμιαία. Σαν αποτέλεσμα το ρευστό παραμένει πάντα σε θερμοδυναμική ισορροπία. Εξαιρέσεις της παραπάνω διατύπωσης μπορούν να βρεθούν σε συγκεκριμένες ροές όπου παρουσιάζονται μεγάλα κρουστικά κύματα.

Η κατάσταση μίας ουσίας μπορεί να περιγραφεί σε θερμοδυναμική ισορροπία χρησιμοποιώντας μόνο δύο καταστατικές μεταβλητές. Οι εξισώσεις αυτές που προκύπτουν ονομάζονται καταστατικές εξισώσεις. Για παράδειγμα, για ένα ιδανικό αέριο χρησιμοποιούνται οι παρακάτω δύο γνωστές καταστατικές εξισώσεις[6]:

$$P = \rho RT\ \kappa\alpha\iota\ e = C_v T \quad (2.6)$$

όπου

R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων

T είναι η θερμοκρασία του ρευστού

Cv είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού υπό σταθερό όγκο

Για μία **συμπιεστή ροή**, η χρήση των καταστατικών εξισώσεων παρέχει τη σύνδεση μεταξύ της εξίσωσης ενέργειας από τη μία και των εξισώσεων συνέχειας και ορμής από την άλλη. Αυτή η σύνδεση είναι εφικτή λόγω της δυνατότητας που υπάρχει να υφίσταται μεταβολή η πυκνότητα του ρευστού, σαν αποτέλεσμα μεταβολής της πίεσης και της θερμοκρασίας του ροικού πεδίου.

Για μία **ασυμπίεστη ροή**, εξ' ορισμού δεν υπάρχει μεταβολή της πυκνότητας. Αυτό δημιουργεί ένα πρόβλημα καθώς δεν υπάρχει κάποια σύνδεση μεταξύ των εξισώσεων ορμής και συνέχειας με την εξίσωση ενέργειας. Παρόλα αυτά, συνήθως στις ασυμπίεστες ροές, δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας στο ροϊκό πεδίο, και ως εκ τούτου η εξίσωση ενέργειας δεν είναι απαραίτητο να επιλυθεί. Η εξίσωση ενέργειας θα πρέπει να επιλυθεί, μόνο εάν το πρόβλημα περιλαμβάνει και μεταφορά θερμότητας.

2.2 ΤΥΡΒΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ

2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΥΡΒΗ

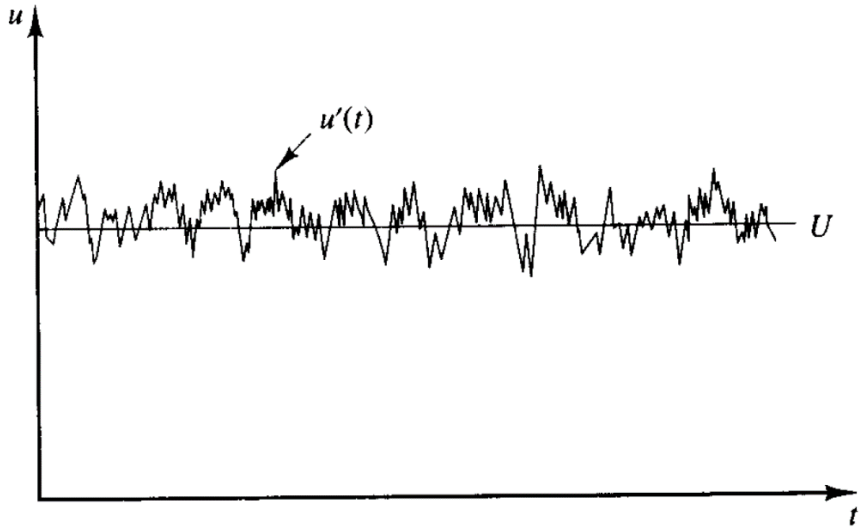
Όλες οι ροές που εμπλέκονται στο αντικείμενο της μηχανολογίας, από τις πιο απλές όπως είναι η δισδιάστατη ροή μέσα σε αγωγούς, ή σε μία επίπεδη πλάκα, μέχρι τις πιο πολύπλοκες όπως είναι οι τρισδιάστατες ροές γίνονται πάνω από έναν συγκεκριμένο αριθμό Reynolds, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$R = \frac{\vec{V}L}{\nu} \tag{2.7}$$

όπου $\vec{V}$ είναι η ταχύτητα της κύριας ροής, L το χαρακτηριστικό μήκος, και *ν* είναι το κινηματικό ιξώδες. Για μικρούς αριθμούς Reynolds οι ροές είναι στρωτές, ενώ για μεγάλους αριθμούς Reynolds οι ροές γίνονται τυρβώδεις. Μία χαοτική και τυχαία κίνηση των μορίων του ρευστού παρατηρείται για τις τυρβώδεις ροές, στην οποία η ταχύτητα και η πίεση αλλάζουν συνεχώς, τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο.

Ο αριθμός Reynolds είναι μία πολύ σημαντική αδιάστατη ποσότητα καθώς δείχνει τη σχέση μεταξύ των δυνάμεων αδράνειας με των δυνάμεων ιξώδους. Σε πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει αποδειχθεί ότι κάτω από ένα συγκεκριμένο αριθμό Reynolds (κρίσιμος αριθμός Reynolds) η ροή είναι **στρωτή**, δηλαδή η ροή είναι ομαλή και τα διαδοχικά στρώματα του ρευστού κινούνται μεταξύ τους χωρίς τη δημιουργία στροβίλων και περιδινήσεων. Για τιμές που ξεπερνούν το κρίσιμο αριθμό Reynolds μία σειρά από πολύπλοκα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα τα οποία οδηγούν σε δραματική αλλαγή της συμπεριφοράς του ρευστού. Η κίνηση των μορίων του ρευστού γίνεται εξαιρετικά ασταθής, ακόμα και όταν οι οριακές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Η ταχύτητα και όλες οι άλλες ιδιότητες του ρευστού αλλάζουν με έναν τυχαίο και χαοτικό τρόπο. Αυτή η περιοχή όπου ρέει το ρευστό καλείται **τυρβώδης** και κύρια χαρακτηριστικό της είναι η τυχαία και μη προβλέψιμη κίνηση του ρευστού.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται μία τυπική μεταβολή της ταχύτητας σε ένα σημείο ενός ροικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 2.2 *: Τυπική μεταβολή ταχύτητας σε ένα σημείο ενός πεδίου τυρβώδης ροής[6]*

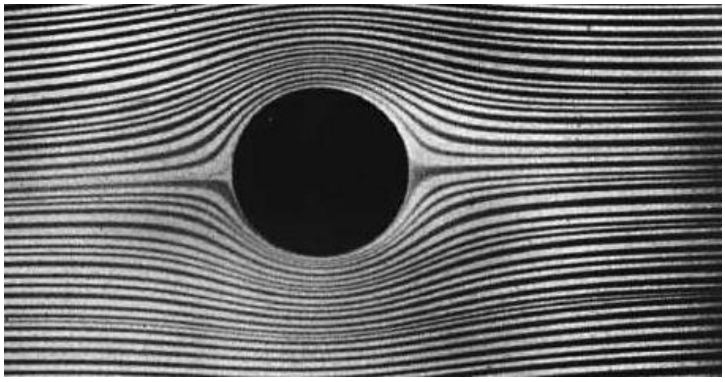
Η τυχαία φύση της κίνησης του ρευστού φαίνεται στην τυχαία αλλαγή της ταχύτητάς του με την πάροδο του χρόνου. Προσπαθώντας να βρεθεί ένας τρόπος για την ανάλυση τέτοιων πολύπλοκών φαινομένων όπως είναι η τυρβώδης ροή, η ταχύτητα του ρευστού μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: τη μέση χρονικά τιμή $\bar{V}$ και τη διακύμανση της ταχύτητας V'. Έτσι μπορεί να γραφθεί ότι $V = \bar{V} + V'$ [6]:

όπου η μέση χρονικά τιμή της ταχύτητας ορίζεται ως εξής:

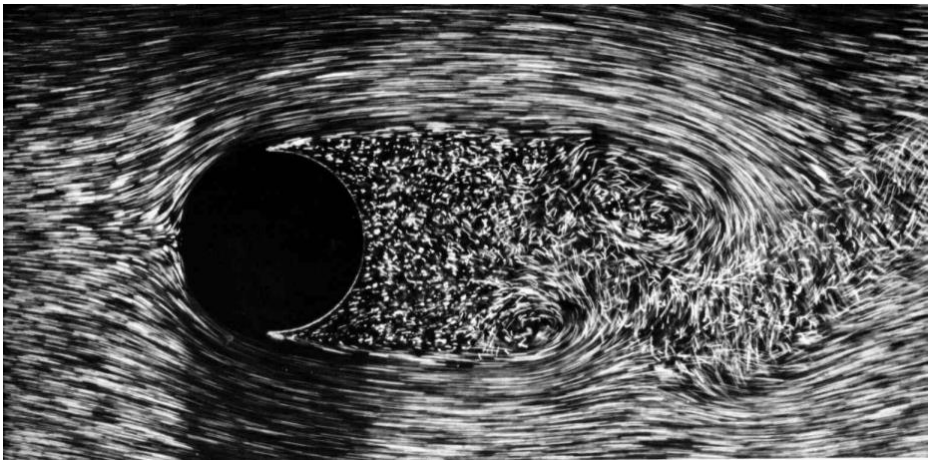
$$\overline{\mathrm{V}} = \frac{1}{\mathrm{T}} \int_0^T V(t)dt \tag{2.8}$$

Το ίδιο μπορεί να γραφθεί και τις υπόλοιπες ιδιότητες του ρευστού, δηλαδή να χωρισθούν σε μία μέση χρονικά τιμή και σε μία στατιστική ιδιότητα, η οποί δείχνει τη μεταβολή τους στο χρόνο. Άρα μπορεί να γραφθεί για παράδειγμα:

$$\mathrm{u} = \bar{u} + u', \mathrm{v} = \bar{v} + v', \mathrm{w} = \bar{w} + w', \mathrm{p} = \bar{p} + p'$$



Σχήμα 2.3 *: Στρωτή ροή γύρω από κύλινδρο[12]*



Σχήμα 2.4 *: Τυρβώδης ροή γύρω από έναν κύλινδρο[12]*

Όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.3 και 2.4 παραπάνω, στην τυρβώδη ροή φαίνεται να δημιουργούνται διάφοροι στρόβιλοι, οι οποίοι έχουν τυχαίο μέγεθος και κινούνται με διαφορετική συχνότητα. Ένα τυπικό υπολογιστικό πεδίο 100X100cm, στο οποίο ο αριθμός Reynolds είναι τόσο μεγάλος ώστε η ροή να είναι τυρβώδης, μπορεί να περιέχει στροβίλους, τόσο μικρούς, της τάξης των 10 με 100 μm. Το πλέγμα που θα χρειαζόταν για την προσομοίωση και τον υπολογισμό τέτοιας τάξης στροβίλων θα αποτελούνταν από 10^9 με 10^{12} κελιά. Ένα τέτοιο υπολογιστικό πλέγμα, θα χρειαζόταν χρόνια για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή του ρευστού. Επομένως η άμεση λύση των εξισώσεων Navier-Stokes σε υψηλούς αριθμούς Reynolds, με τα τωρινά δεδομένα στην επιστήμη των υπολογιστών, είναι αδύνατη, από άποψης βιομηχανικού ενδιαφέροντος, όπου πρέπει να επιλύονται τα προβλήματα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

2.2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ

Εισάγοντας τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων του ρευστού στις εξισώσεις Navier-Stokes, παίρνουμε ένα καινούριο σετ εξισώσεων, τις λεγόμενες Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). Σε αυτές τις εξισώσεις εμφανίζονται επιπλέον άγνωστες ιδιότητες οι οποίες λέγονται τάσεις Reynolds (Reynolds stresses). Για τις τάσεις αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν ακριβής μαθηματικές σχέσεις που να μπορούν να τις υπολογίσουν. Για αυτό ακριβώς το λόγο, οι τάσεις αυτές πρέπει να μοντελοποιηθούν κατάλληλα. Για την μοντελοποίηση αυτών των τάσεων χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα μοντέλα τύρβης (turbulence models).

Ένα μοντέλο τύρβης είναι μία υπολογιστική διαδικασία για να κλείσουμε το πρόβλημα που δημιουργείται με τις άγνωστες τάσεις Reynolds. Για τις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές, δεν είναι αναγκαίο να επιλυθούν και να μοντελοποιηθούν οι λεπτομέρειες των διακυμάνσεων των ιδιοτήτων του ρευστού. Αυτό που κατά βάση έχει σημασία είναι η επίδραση των μέσων τιμών χρονικά των ιδιοτήτων στο εκάστοτε πρόβλημα. Για να μπορεί ένα μοντέλο τύρβης να είναι χρήσιμο στην υπολογιστική ρευστοδυναμική πρέπει:

1. Να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών που περιλαμβάνουν κίνηση ρευστών, και να μην περιορίζεται η χρήση του μόνο για συγκεκριμένα προβλήματα.
2. Να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

3. Να είναι οικονομικό από υπολογιστικής απόψεως.

Οι παραπάνω απαιτήσεις, καθιστούν την εξαγωγή ενός καθολικού μοντέλου τύρβης το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές δίνοντας ακριβή αποτελέσματα ιδιαίτερα δύσκολο γεγονός. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά μοντέλα τύρβης και τεχνικές όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια[13].

Μέθοδοι άμεσης αριθμητικής επίλυσης DNS (Direct Numerical Solution)

Με αυτή τη μέθοδο υπολογίζονται τόσο οι μέσες τιμές των συνιστωσών της ροής όσο και οι διακυμάνσεις αυτών. Οι χρονικά μεταβαλλόμενες εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται σε χωρικά πλέγματα τα οποία είναι λεπτά διακριτοποιημένα έτσι ώστε να μπορούν να επιλύσουν με επιτυχία όλους τους στροβίλους διαφορετικών μεγεθών που δημιουργούνται, καθώς επίσης επιλύονται με πολύ μικρά χρονικά βήματα (timesteps) για να μπορέσουν να μοντελοποιήσουν την γρήγορη μεταβολή των διακυμάνσεων. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται με αυτή τη μέθοδο έχουν πολύ υψηλό υπολογιστικό κόστος και για αυτό δεν ενδείκνυται η χρήση της σε μεγάλα και πολύπλοκα προβλήματα της ρευστοδυναμικής(υψηλοί αριθμοί Reynolds). Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς.

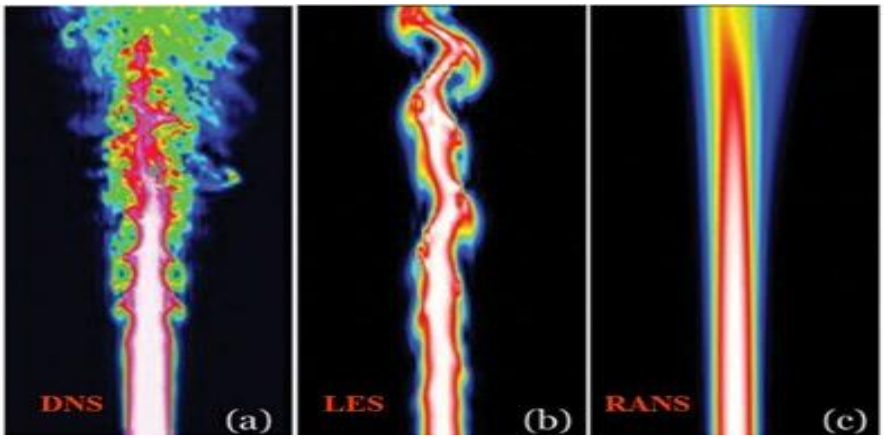
Τεχνικές LES (Large Eddy Simulation)

Είναι μια τεχνική ενδιάμεσης μορφής υπολογισμών της τύρβης της ροής η οποία παρακολουθεί τη συμπεριφορά των μεγαλύτερων δινών. Η μέθοδος φιλτράρει χωρικά το πεδίο, πριν την επίλυση των εξισώσεων NS, απορρίπτοντας τις μικρές δίνες και επιτρέποντας τη επίλυση των μεγαλύτερων. Το αποτέλεσμα στο πεδίο ροής είναι να επιλυθούν και οι μικρότερες δίνες με ένα μοντέλο υποχωρίων. Παρόλο που η LES τεχνική δίνει μια καλύτερη φυσική αναπαράσταση της τυρβώδους ροής είναι ακόμη περιορισμένη σε προβλήματα ροής με μεσαίους αριθμούς Reynolds, λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους. Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί την επίλυση των χρονικά μεταβαλλόμενων εξισώσεων NS με μικρό χρονικό βήμα με αποτέλεσμα να απαιτούνται υψηλοί υπολογιστικοί πόροι, καθιστώντας το με αυτό το τρόπο ιδιαίτερα χρονοβόρο για υψηλούς αριθμούς Reynolds.

Στις παραπάνω δύο περιπτώσεις οι εξισώσεις όπου επιλύονται από το εκάστοτε λογισμικό είναι οι εξισώσεις Navier Stokes και όχι οι Reynolds Averaged Navier Stokes.

Μοντέλα τύρβης για την επίλυση των RANS εξισώσεων

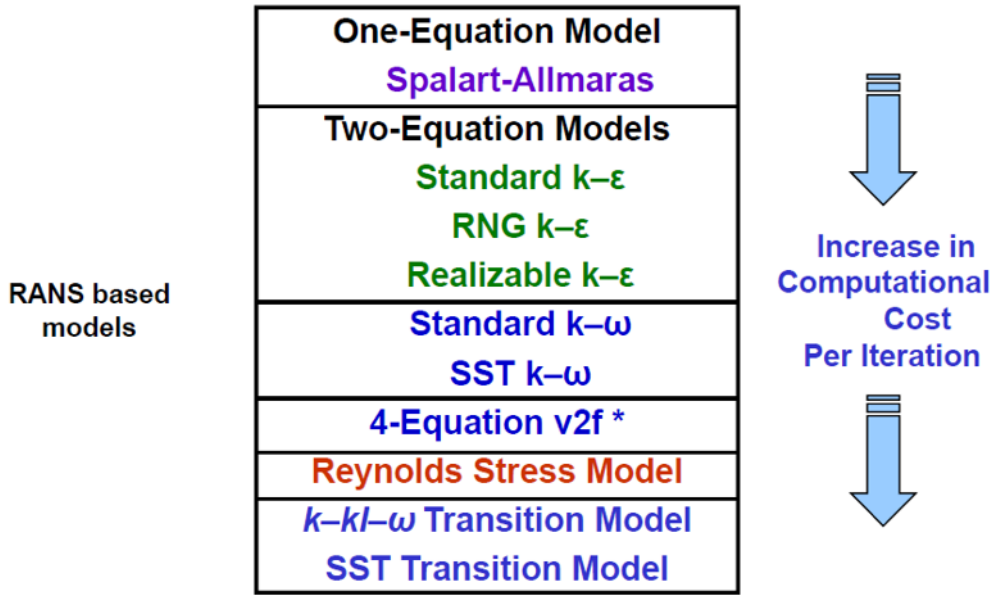
Η συγκεκριμένη τεχνική επικεντρώνεται στην επίλυση των μέσων χρονικά τιμών των ιδιοτήτων της ροής στην οποία γίνεται επίλυση διαφόρων μοντέλων τύρβης για να συμπεριληφθεί και η επιρροή αυτής. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται τα αποτελέσματα της τύρβης και όχι αυτή καθαυτή. Ουσιαστικά μελετάται το φαινόμενο της τύρβης σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα απ' ότι είναι στην πραγματικότητα, αγνοώντας τις διακυμάνσεις των ταχυτήτων σε μικρές χρονικές περιόδους, δεδομένου ότι δεν προσφέρουν σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματα. Η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για την επίλυση των εξισώσεων με ικανοποιητική ακρίβεια είναι σχετικά χαμηλή, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο ιδιαίτερα ελκυστική από τη βιομηχανικής απόψεως.



Σχήμα 2.5 *: Σύγκριση διαφορετικών μοντέλων τύρβης[14]*

2.2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ RANS

Με σκοπό τον υπολογισμό και την προσομοίωση της τυρβώδης ροής με τα μοντέλα τύρβης RANS είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν μοντέλα τύρβης που να υπολογίζουν τις τάσεις Reynolds ώστε να ολοκληρωθεί το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει την κίνηση των ρευστών. Τα κυριότερα μοντέλα τύρβης RANS που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6 *: Διαφορετικά μοντέλα τύρβης RANS[14]*

Μοντέλο τύρβης Spalart-Almaras

Το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras αποτελεί ένα απλό μοντέλο τύρβης το οποίο επιλύει μία επιπλέον εξίσωση. Το μοντέλο Spalart-Allmaras έχει αποδειχθεί ότι δίνει καλά αποτελέσματα για οριακά στρώματα που υποβάλλονται σε δυσμενείς μεταβολές των πιέσεων (μεγάλες γωνίες προσβολής)[15]. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως σε εφαρμογές στροβιλομηχανών. Στο FLUENT το μοντέλο Spalart-Allmaras έχει εφαρμοστεί για να χρησιμοποιείται όταν η ανάλυση του πλέγματος δεν είναι επαρκώς ικανοποιητική. Για τον παραπάνω λόγο, αυτό θα μπορούσε να είναι η καλύτερη επιλογή για πλέγματα τα οποία δεν υπάρχει η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς ώστε να πυκνωθούν όσο θα έπρεπε ώστε να μην επηρεάζουν την λύση. Το συγκεκριμένο μοντέλο, επιλέχθηκε για τη παρούσα πτυχιακή εργασία, εξαιτίας του μικρού υπολογιστικού κόστους καθώς επίσης και της δυνατότητας του να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Μοντέλο τύρβης k-ε

Το μοντέλο k–ε εισάχθηκε από τους Launder και Spalding το 1974. Το συγκεκριμένο μοντέλο, βασίζεται στη μοντελοποίηση των εξισώσεων μεταφοράς που αφορούν την τυρβώδη κινητική ενέργεια καθώς επίσης και το ρυθμό καταστροφής της (dissipation rate). Το k-ε μοντέλο χρησιμοποιείται ευρέων σε βιομηχανικές εφαρμογές. Παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα σε ευρεία γκάμα εφαρμογών, είναι οικονομικό όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται, όμως είναι πιο απαιτητικό από το Spalart – Almaras καθώς επιλύει δύο και όχι μια επιπλέον εξίσωση. Έχει αποδειχθεί μέσα από την εφαρμογή του σε διάφορε εφαρμογές ότι δεν αποδίδει καλά σε ροές που υπόκεινται σε μεγάλες μεταβολές της πίεσης, παρουσιάζουν ισχυρή αποκόλληση, και μεγάλες κλίσεις των ροϊκών γραμμών[13]. Απαιτεί 2 επιπλέον εξισώσεις για την επίλυση της ροής.

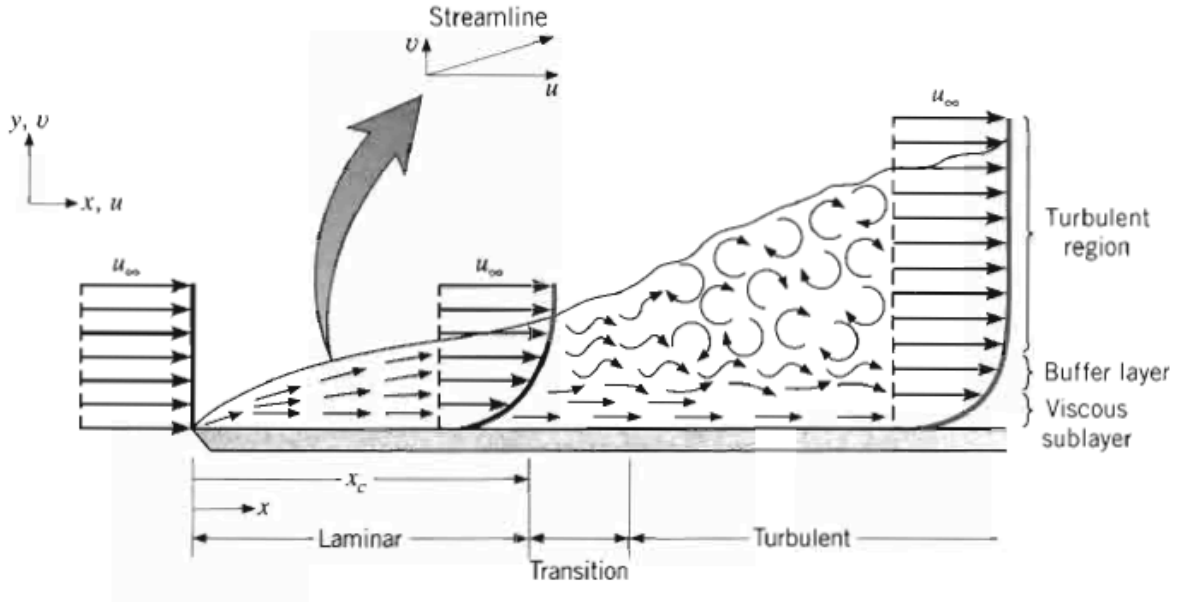
Μοντέλο τύρβης k-ω

Το μοντέλο k-ω είναι ένα εμπειρικό μοντέλο που μοντελοποιεί τις εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k καθώς επίσης και τον ειδικό ρυθμό καταστροφής της (specific dissipation rate). Το μοντέλο τύρβης k-ω σε σχέση με το k-ε δίνει καλύτερα αποτελέσματα για ροές κοντά σε τοιχώματα όπου έχουμε δημιουργία οριακών στρωμάτων. Απαιτεί 2 επιπλέον εξισώσεις για την επίλυση της ροής[13]

2.3 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ

2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Η έννοια του οριακού στρώματος προτάθηκε πρώτη φορά από τον Prandtl στις αρχές του 20^{ου} αιώνα[16]. Με αυτή τη θεωρία (θεωρία οριακού στρώματος) κατέστη δυνατή η σύνδεση μεταξύ της ροής ενός ιδανικού ρευστού, με τη ροή ενός πραγματικού ρευστού. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ροών παρουσιάζεται στο γεγονός ότι στη ροή του πραγματικού ρευστού εμφανίζονται ιξώδεις δυνάμεις οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της ροής. Σύμφωνα με τη θεωρία του οριακού στρώματος, στην περίπτωση κίνησης πραγματικών ρευστών γύρω από στερεά σώματα, εξαιτίας του ιξώδους σχηματίζεται ένα πολύ λεπτό στρώμα ρευστού κοντά στην επιφάνεια του στερεού σώματος. Αυτό το λεπτό στρώμα καλείται *οριακό στρώμα*. Μακριά από το οριακό στρώμα, στην περιοχή έξω από αυτό οι ιξώδεις δυνάμεις παύουν να παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και διαμόρφωση της ροής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το πεδίο ροής ενός πραγματικού ρευστού μπορεί να χωρισθεί σε δύο περιοχές: (α) το οριακό στρώμα και (β) την περιοχή εκτός του οριακού στρώματος. Στην δεύτερη περιοχή οι δυνάμεις αδράνειας και οι δυνάμεις πίεσης είναι αυτές όπου καθορίζουν τη ανάπτυξη της ροής (οι ιξώδεις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του ίδιου του ρευστού μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες). Εντός του οριακού στρώματος, αντίθετα, η ροή, εκτός από τις δυνάμεις αδράνειας και τις δυνάμεις πίεσης ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό και από τις ιξώδεις δυνάμεις, που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ρευστού και των επιφανειών του στερεού σώματος.



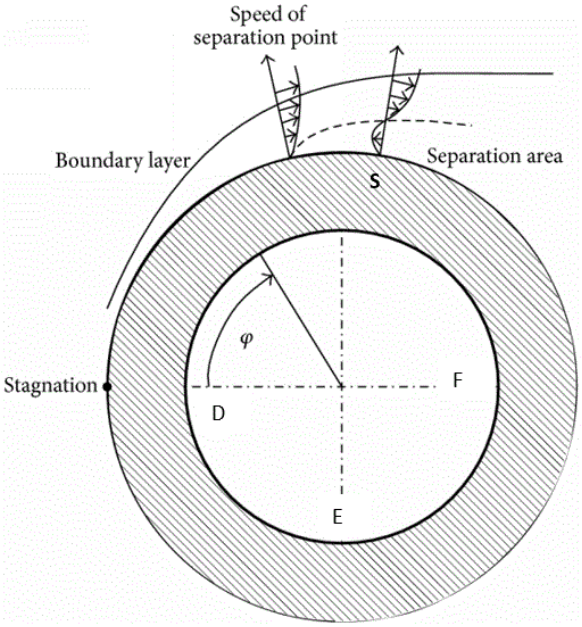
Σχήμα 2.7 *: Ανάπτυξη του οριακού στρώματος πάνω σε μία επίπεδη πλάκα[17]*

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, μέχρι το ρευστό να φτάσει στη μπροστινή άκρη της επίπεδης πλάκας έχει ομοιόμορφη ταχύτητα V_∞. Λόγου των ιξωδών δυνάμεων που αναπτύσσονται, η παρουσία της πλάκας έχεις σαν συνέπεια το μηδενισμό της ταχύτητας πάνω σε αυτήν από τη θέση x=0 και έπειτα, και επομένως την ανάπτυξη διατμητικής τάσης η οποία με τη σειρά της προκαλεί επιβράδυνση της ροής κοντά στην επιφάνεια της πλάκας. Επιλέγοντας τώρα μία τυχαία θέση x, παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται από μηδενική πάνω στη πλάκα, όσο απομακρυνόμαστε από αυτή μέχρι ως ότου να γίνει ίση με την ταχύτητα της ελεύθερης ροής V_∞. Αυτή η περιοχή όπου συμβαίνει μεταβολή της ταχύτητα (γειτονικά της πλάκας) ονομάζεται οριακό στρώμα. Το πάχος του οριακού στρώματος δεν διατηρείται σταθερό κατά της διεύθυνσης της ροής, αλλά αυξάνεται καθώς μεγαλύτερες ποσότητες ρευστού επιβραδύνονται υπό την επίδραση των διατμητικών τάσεων που αντπτύσσονται εντός του οριακού στρώματος.

Στην περιοχή αμέσως μετά της αρχής της πλάκας, η ροή εντός του οριακού στρώματος είναι στρωτή. Το *στρωτό οριακό στρώμα (laminar boundary layer)* αναπτύσσεται μέχρι μία ορισμένη θέση x_c (x critical). Έπειτα η ροή εντός του οριακού στρώματος είναι ασταθής κατά διαστήματα, γι' αυτό το λόγο η περιοχή αυτή καλείται *μεταβατική περιοχή (transition region).* Η έκταση αυτής της περιοχής εξαρτάται από τη ύπαρξη βαθμίδας πίεσης κατά την διεύθυνση της ροής, δηλαδή αν η πίεση αυξάνεται κατά αυτή τη διεύθυνση, από την ταχύτητα της επιφάνειας της πλάκας, την ύπαρξη ή όχι μεταφοράς θερμότητας, και τις διαταραχές του ελεύθερου ρεύματος. Μετά το πέρας της μεταβατικής περιοχής η ροή πλέον δεν είναι στρωτή και μετατρέπεται σε τυρβώδης. Η περιοχή όπου η τυρβώδης ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη ονομάζεται *τυρβώδες οριακό στρώμα (turbulent boundary layer)*. Το τυρβώδες οριακό στρώμα μπορεί να αναπτυχθεί αμέσως μετά την αρχή της πλάκας αν η τραχύτητα της επιφάνειας είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Από το Σχήμα 2.7 φαίνεται ότι στο τυρβώδες οριακό στρώμα η κατανομή των μέσων χρονικά τιμών της ταχύτητας του ρευστού είναι πιο ομοιόμορφη και το πάχος του είναι μεγαλύτερο από ότι στο στρωτό οριακό στρώμα.

2.3.2 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

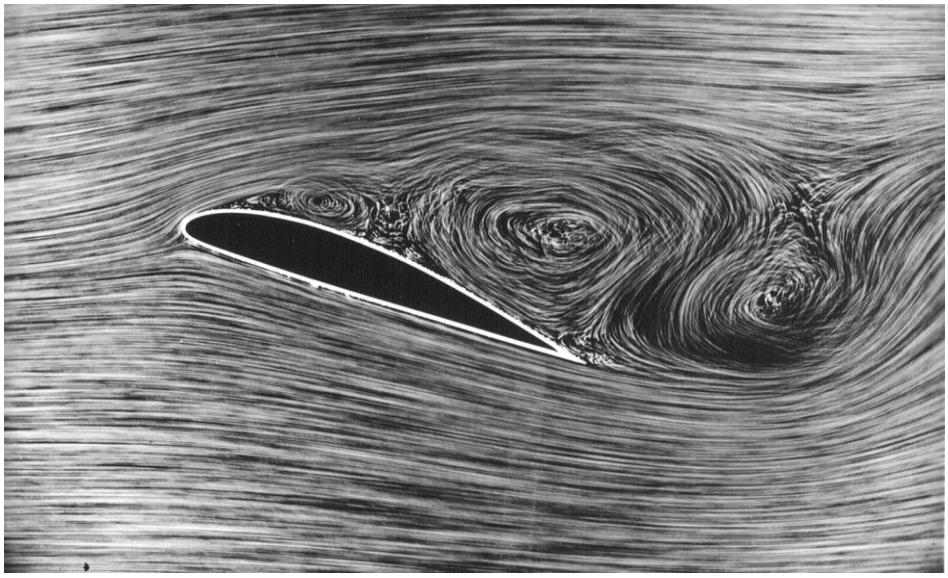
Το οριακό στρώμα κοντά σε μία επίπεδη πλάκα παράλληλη στη ροή όπως αυτή στο Σχήμα 2.7, είναι εύκολο στην ανάλυσή του διότι η στατική πίεση παραμένει σταθερή σε όλο το πεδίο ροής. Αφού εκτός του οριακού στρώματος η ταχύτητα παραμένει σταθερή, το ίδιο ισχύει και για την πίεση αφού για την ροή χωρίς τριβές, η εξίσωση του Bernoulli εξακολουθεί να ισχύει. Επιπλέον, η πίεση παραμένει μία ευαίσθητη μεταβλητή σε σχέση με το πλάτος του οριακού στρώματος για μία δεδομένη απόσταση x από την αρχή της πλάκας. Συνεπώς η πίεση κατά το πλάτος του οριακού στρώματος, έχει την ίδια τιμή με αυτή εκτός του οριακού στρώματος για την ίδια απόσταση x. Έτσι για τη περίπτωση ροής σε επίπεδη πλάκα η πίεση παραμένει σταθερή κατά μήκος αυτής. Το φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος συνδέεται άμεσα με την κατανομή πίεσης σε αυτό.



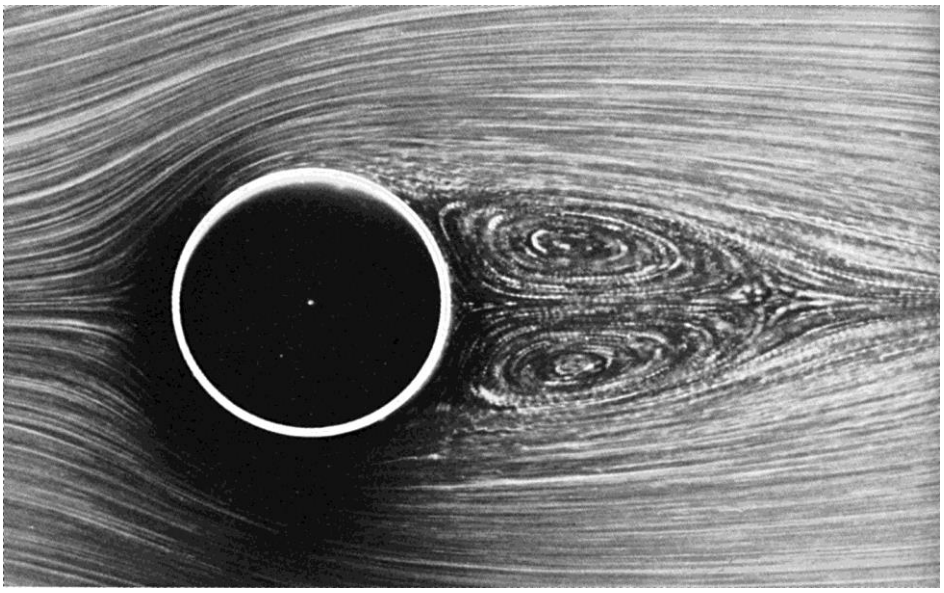
***Σχήμα 8** : Απεικόνιση αποκόλλησης του οριακού στρώματος σε κύλινδρο[18]*

Έστω ροή γύρω από κύλινδρο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Σε ροή χωρίς τριβές, τα σωματίδια του ρευστού, επιταχύνονται από το σημείο D έως το σημείο E (λόγω ότι μειώνεται η διατομή)και επιβραδύνονται από τα σημεία E έως F. Επομένως η στατική πίεση μειώνεται από το σημείο D στο E και αυξάνεται το σημείο E στο F. Όταν η ροή αρχίζει, η κίνηση αρχικά είναι σχεδόν χωρίς τριβές και παραμένει έτσι όσο το οριακό στρώμα είναι λεπτό. Εκτός του οριακού στρώματος γίνεται μία μετατροπή της πίεσης σε κινητική ενέργεια από το σημείο D στο E, με την αντίστροφη διαδικασία να λαμβάνει χώρα στο τμήμα EF κατά τέτοιο τρόπο ώστε ένα σωματίδιο να φτάνει στο σημείο F με την ίδια ταχύτητα με την οποία ξεκινά από το σημείο D. Ένα σωματίδιο ρευστού, το οποίο κινείται πολύ κοντά στο τοίχωμα, μέσα στο οριακό στρώμα, παραμένει υπό την επίδραση του ίδιου πεδίου πίεσης που υπάρχει και εκτός του οριακού στρώματος διότι η εξωτερική πίεση «αποτυπώνεται» και στο οριακό στρώμα. Λόγω των ισχυρών δυνάμεων τριβής μέσα στο λεπτό οριακό στρώμα, το σωματίδιο αναλώνει ένα μεγάλο ποσοστό της κινητικής του ενέργειας για την κίνηση από το D στο E, ώστε η εναπομένουσα είναι ανεπαρκής για να περάσει το σωματίδιο από το «εμπόδιο πίεσης» από το E στο F. Ένα τέτοιο σωματίδιο δεν μπορεί να διανύσει όλη την απόσταση EF όπου η πίεση αυξάνεται και μοιραία η κίνησή του σταματά. Στη συνέχεια λόγω της εξωτερικής πίεσης κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στο σημείο αυτό, το οποίο είναι γνωστό ως *σημείο αποκόλλησης του οριακού στρώματος*, η κλίση της ταχύτητας είναι μηδέν. Επομένως για να υπάρξει αποκόλληση του οριακού στρώματος από την επιφάνεια του στερεού, η ταχύτητα του ρευστού κοντά στο τοίχωμα πρέπει να είναι μηδέν ή αρνητική. Αυτός ο τύπος κατανομής της ταχύτητας προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σημείου καμπής μέσα στο οριακό στρώμα. Όμως τέτοιου είδους κατανομή ταχύτητας υπάρχει μόνο στην περίπτωση ροής γύρω από καμπύλες επιφάνειες. Για αυτό το λόγο δεν υπάρχει αποκόλληση του οριακού στρώματος πάνω από μία επίπεδη πλάκα σε σταθερή ροή. Η αποκόλληση του οριακού στρώματος γίνεται αιτία δημιουργίας στροβίλων και συνοδεύεται με σημαντικές απώλειες κινητικής ενέργειας. Επίσης, σε ροές γύρω από στερεά σώματα συνοδεύεται από μεγάλη αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αποκόλληση είναι ένα φαινόμενο το οποίο δεν είναι

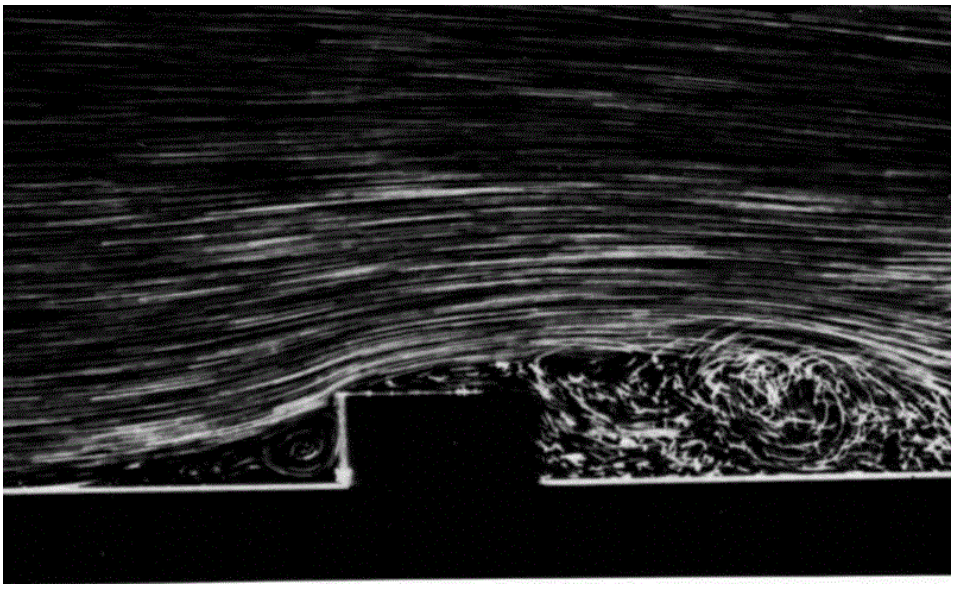
επιθυμητό, ιδιαίτερα στην περίπτωση των πτερύγων, αφού συνοδεύεται και με απότομη μείωση της παραγόμενης άντωσης. Ακολουθούν μερικές εικόνες όπου δείχνουν την αποκόλληση του οριακού στρώματος σε διάφορα πειράματα που διεξήχθησαν.



Σχήμα 2.9 : *Αποκόλληση οριακού στρώματος σε πτέρυγα[12]*



Σχήμα 2.10 *: Αποκόλληση οριακού στρώματος σε κύλινδρο[12]*



Σχήμα 2.11 *: Αποκόλληση οριακού στρώματος σε κύβο[12]*

2.3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, και όπως έχει διαπιστωθεί και μέσα από πειράματα που έχουν διεξαχθεί, το τυρβώδες οριακό στρώμα χωρίζεται σε τρεις επιμέρους περιοχές (κατά το πάχος του).

1. Ιξώδης ζώνη (viscous sublayer).
2. Μεταβατική ζώνη (buffer layer)
3. Τυρβώδης ζώνη (turbulent region)

Η ιξώδης ζώνη είναι πολύ λεπτή για αυτό το λόγο μπορεί να θεωρηθεί ότι η διατμητική τάση (τ_w) μεταβάλλεται ομοιόμορφα. Η διατμητική τάση ορίζεται ως εξής [16]:

$$\tau_w = \mu \frac{dU_x}{dy} \Rightarrow \tau_w dy = \mu dU_x \tag{2.9}$$

Και ολοκληρώνοντας έχουμε

$$U_x = \frac{\tau_w}{\mu} y + c \tag{2.10}$$

Εξ 'ορισμού όμως η ταχύτητα πάνω στην επιφάνεια ενός στερεού σώματος είναι μηδέν επομένως $c = 0$. Άρα η σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$U_x = \frac{\tau_w}{\mu} y \Longrightarrow U_x = \frac{\rho\, \tau_w}{\rho\, \mu} y \Longrightarrow U_x = \frac{y\, \tau_w}{\nu\, \rho} \tag{2.11}$$

Ο συνδυασμός των μεταβλητών $\frac{\tau_w}{\rho}$ έχει μονάδες $\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$,δηλαδή τετραγώνου ταχύτητας. Για αυτό το λόγο αυτό το καινούριο μέγεθος ορίζεται ως διατμητική ταχύτητα και ισούται με

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{2.12}$$

Συνδυάζοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις έχουμε

$$\frac{U_x}{U_\tau} = \frac{y}{\nu} U_\tau \tag{2.13}$$

Στη παραπάνω σχέση και τα δύο μέλη της εξίσωσης είναι αδιαστατοποιημένα μεγέθη τα οποία συμβολίζονται

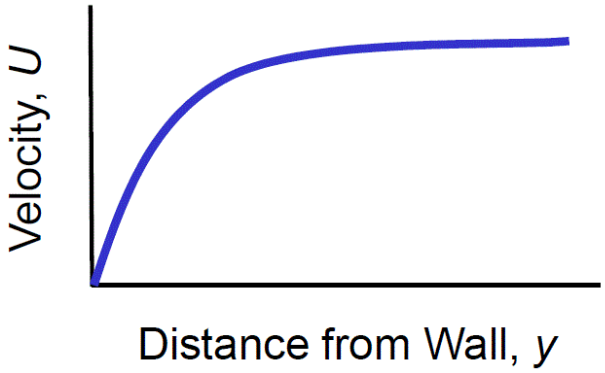
ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	$\frac{U_x}{U_\tau}$ συμβολίζεται με U_x^+
ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ	$\frac{y}{\nu} U_\tau$ συμβολίζεται με y^+

Επομένως η τελευταία σχέση μπορεί να γραφτεί ως

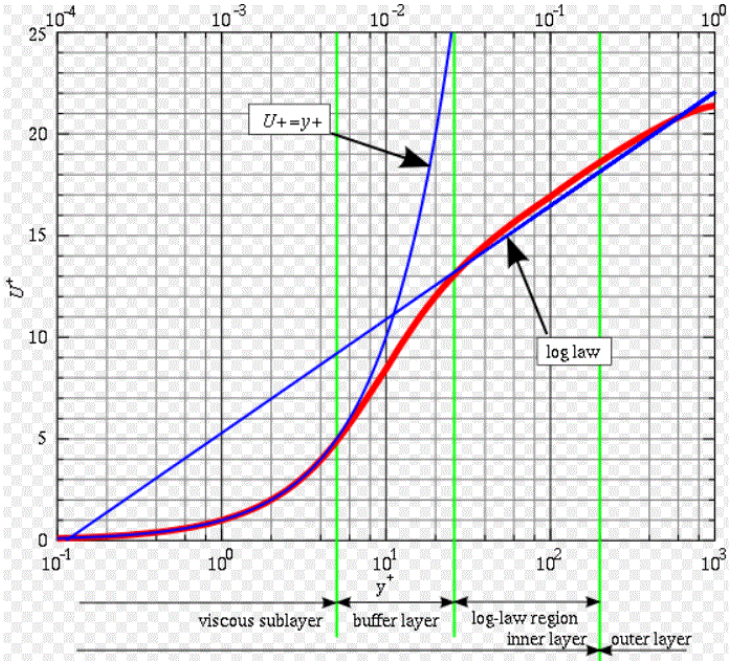
$$U_x^+ = y^+ \tag{2.14}$$

Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι η παραπάνω σχέση ισχύει για $0 \leqq y^+ \leqq 5$

Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του στερεού σώματος. Αν αντικαταστήσουμε στον άξονα x την απόσταση από την επιφάνεια του στερεού σώματος με την αδιάστατη απόσταση y^+, και στον άξονα y την ταχύτητα U με την αδιάστατη ταχύτητα U_x^+, τότε παίρνουμε το διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.12 : *Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του στερεού σώματος εντός του οριακού στρώματος[14]*



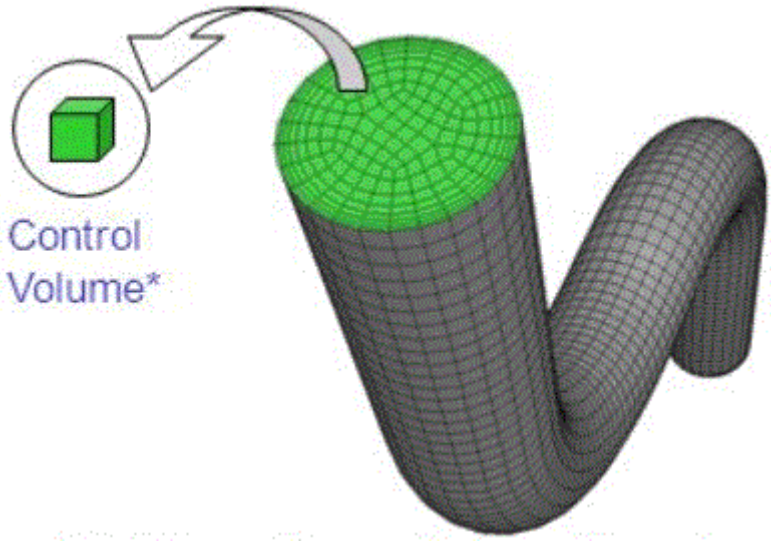
Σχήμα 9 *: Μεταβολή τη αδιάστατης ταχύτητας U_x^+ συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης y^+ εντός του οριακού στρώματος[19]*

Η τιμή της αδιάστατης απόστασης y^+ εξαρτάται από την επιλογή που θα γίνει στο μοντέλο τύρβης. Σύμφωνα με το manual του Fluent στην περίπτωση όπου επιλεγεί το μοντέλο τύρβης Spalart-Almaras η τιμή y^+ πρέπει να είναι $y^+ < 5$.

2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΓΙΑ CFD ΑΝΑΛΥΣΗ

Με τη μέθοδο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics ή CFD) επιλύονται προβλήματα ροών ρευστών, μεταφοράς μάζας και θερμότητας, χημικές αντιδράσεις και διάφορα άλλα σχετικά φαινόμενα λύνοντας ένα σύστημα εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα με τη βοήθεια του υπολογιστή. Στη παρούσα πτυχιακή εργασία, οι εξισώσεις που λύνονται, είναι οι εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes και οι εξισώσεις μεταφοράς του μοντέλου τύρβης (στη περίπτωση της παρούσας πτυχιακή μία επιπλέον εξίσωση μεταφοράς επιλύεται αφού το μοντέλο τύρβης Spalart-Almaras είναι μοντέλο τύρβης μίας εξίσωσης). Η προσομοίωση ενός προβλήματος με τη χρήση CFD δεν αντικαθιστά τις πειραματικές μεθόδους, οι οποίες είναι αναγκαίες για να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων, αλλά καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και κόστος.

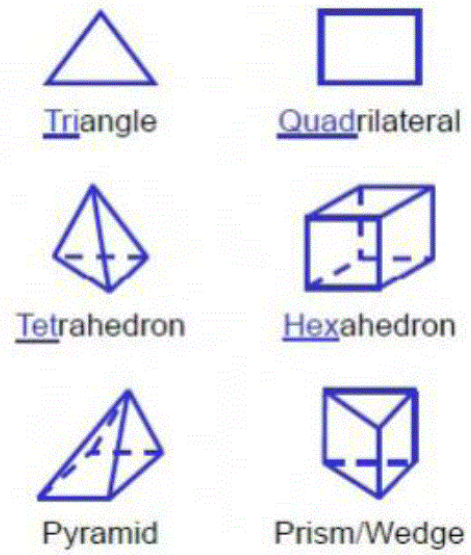
Στο Fluent για την μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές και την επίλυση των δεύτερων χρησιμοποιείται η μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method – FVM), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην υπολογιστική ρευστοδυναμική. Με τη μέθοδο αυτή, το υπολογιστικό πεδίο, διακριτοποιείται σε ένα σύνολο από πεπερασμένους όγκους ελέγχου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14. Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του ρευστού λύνονται στο σύνολο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (κελιά). Οι Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις διακριτοποιούνται σε ένα σύστημα από Αλγεβρικές Εξισώσεις, οι οποίες ονομάζονται εξισώσεις πεπερασμένων όγκων.



Σχήμα 10 *: Παράδειγμα διακριτοποίησης του χώρου όπου ρέει το ρευστό μέσα σε έναν αγωγό[14]*

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 1, το σύνολο των πεπερασμένων όγκων που αποτελούν τη γεωμετρία του προβλήματος που έχει διακριτοποιηθεί, ονομάζεται πλέγμα (meshing ή grid). Για μία ορθή προσομοίωση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής το πλέγμα που δημιουργείται από το χρήστη πρέπει να είναι κατάλληλο , ώστε να μπορεί το μοντέλο να δώσει ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελέσματα. Αύξηση του αριθμού των κελιών του πλέγματος οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα όμως ταυτόχρονα αυξάνει το υπολογιστικό κόστος. Γι αυτό το λόγο το πλέγμα πρέπει να πυκνωθεί επιλεκτικά, δηλαδή σε περιοχές όπου έχουμε μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας, της πίεσης, της θερμοκρασίας, ή γενικότερα των μεταβλητών που μελετώνται στο εκάστοτε διαθέσιμο πρόβλημα. Συνήθως, όταν προσομοιώνονται ροές ρευστών γύρω από στερεό σώμα, το πλέγμα πρέπει να πυκνώσει γύρω από τις επιφάνειες του στερεού σώματος, γιατί εκεί αναμένεται να υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στα μεγέθη ενδιαφέροντος (ταχύτητα, πίεση…) Η τεχνική αυτή στο Fluent ονομάζεται «inflation».

Στο λογισμικό Fluent υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα στοιχεία πεπερασμένων όγκων τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.15. Για δισδιάστατα πλέγματα χρησιμοποιούνται τα τριγωνικά και τα τετράπλευρα στοιχεία για τη δημιουργία του πλέγματος ενώ αντίθετα για τρισδιάστατα χρησιμοποιούνται τα τετράεδρα, τα εξάεδρα, τα στοιχεία πυραμίδας και τα πρισματικά. Τα τετράπλευρα και τα εξάεδρα δίνουν καλύτερης ποιότητας αποτελέσματα με λιγότερα κελιά από ότι τα τριγωνικά και τα τετράεδρα αντίστοιχα, απαιτείται όμως μεγαλύτερη προσπάθεια από το χρήστη για τη δημιουργία του πλέγματος με τετράπλευρα ή εξάεδρα.

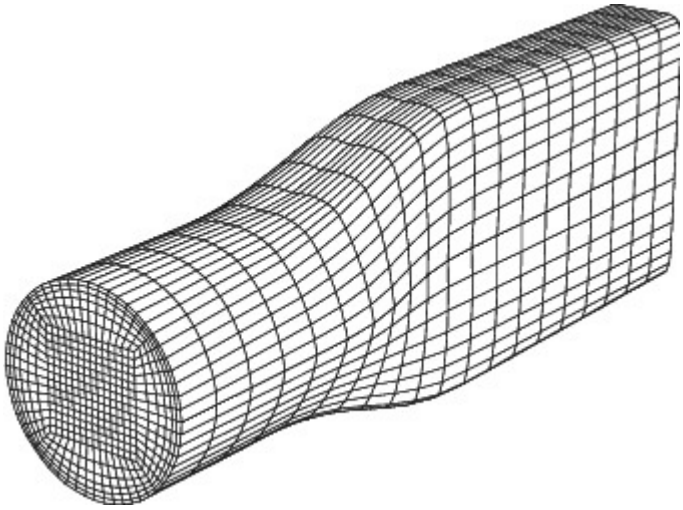


Σχήμα 11 *: Στοιχεία πεπερασμένων όγκων[14]*

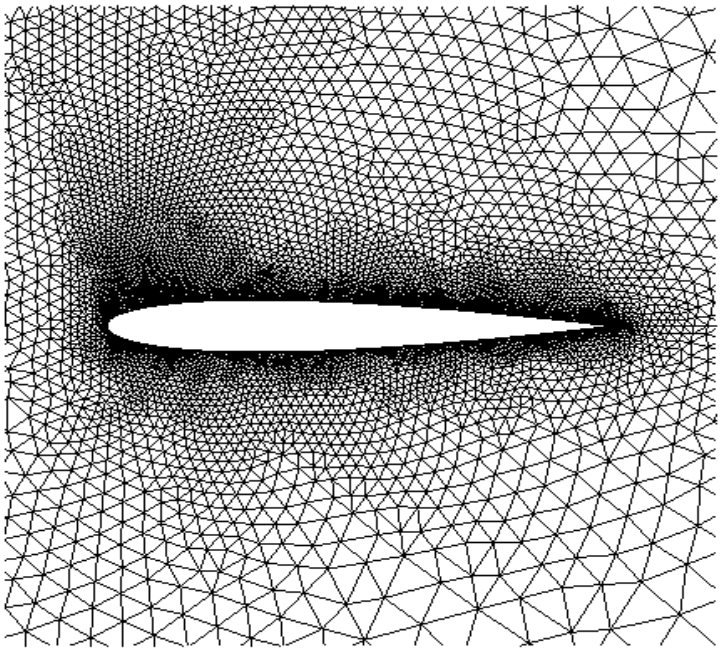
Τα πλέγματα που δημιουργούνται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες

- δομημένα (structured)
- μη-δομημένα (unstructured).

Τα πρώτα (Σχήμα 2.16) είναι ομοιόμορφα, ώστε η θέση κάθε κελιού να περιγράφεται με δυο ή τρεις δείκτες (για δισδιάστατη και τρισδιάστατη τοπολογία, αντίστοιχα). Αντίθετα, τα μη-δομημένα πλέγματα (Σχήμα 2.17) είναι ακανόνιστα, αλλά σε αντίθεση με τα δομημένα, παρέχουν ευελιξία σε πολύπλοκες γεωμετρίες.



Σχήμα 12 *: Δομημένο πλέγμα σε αγωγό με μεταβλητή τρισδιάστατη γεωμετρία[13]*



Σχήμα 13 *: Μη δομημένο πλέγμα σε δισδιάστατη αεροτομή[20]*

Μετά τη διακριτοποίηση και τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος, σειρά στη μεθοδολογία που ακολουθείται για μία CFD ανάλυση, έχει να οριστούν οι φυσικές πτυχές του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί (σωστές οριακές και αρχικές συνθήκες, κατάλληλος προσδιορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού…). Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1, η διαδικασία επίλυσης των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση είναι επαναληπτική, εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης των προβλημάτων που περιλαμβάνουν κίνηση ρευστών. Στο λογισμικό Fluent δίνεται η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δύο αλγορίθμους για την επαναληπτική διαδικασία που θα ακολουθηθεί.

1. Pressure Based Solver
2. Density Based Solver

Η μέθοδος με βάση την πίεση αναπτύχθηκε για ασυμπίεστες ροές χαμηλής ταχύτητας , ενώ η μέθοδος με βάση την πυκνότητα κυρίως για συμπιεστές ροές υψηλής ταχύτητας. Παρ’ όλα αυτά με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξης της μεθόδου CFD και οι δύο μέθοδοι έχουν αναδιαμορφωθεί κατάλληλα για να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ροής πέρα από τον αρχικό σκοπό τους, παράγοντας ταυτόχρονα αξιόπιστα αποτελέσματα. Και στις δύο παραπάνω μεθόδους η ταχύτητα υπολογίζεται από τις εξισώσεις Navier – Stokes. Στον Pressure Based Solver, η εξίσωση συνέχειας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας, ενώ το πεδίο της πίεσης καθορίζεται από καταστατικές εξισώσεις. Στον Density Based Solver αντίθετα, το πεδίο πίεσης υπολογίζεται επιλύοντας μία εξίσωση πίεσης η οποία λαμβάνεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Σε οποιαδήποτε από τις δύο παραπάνω προσεγγίσεις , το FLUENT επιλύει τις εξισώσεις για τη διατήρηση της μάζας και ορμής, και κατά περίπτωση για την ενέργεια (εξαρτάται αν λαμβάνει χώρα και μετάδοση θερμότητας στο πρόβλημα), και άλλα μεγέθη όπως η τύρβη. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται μια τεχνική ελέγχου με βάση τον όγκο η οποία αποτελείται από τα εξής τρία κύρια βήματα:

- Διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου σε διακριτούς όγκους ελέγχου χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πλέγμα που έχει κατασκευαστεί.
- Ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων στους επιμέρους όγκους ελέγχου για την κατασκευή των αλγεβρικών εξισώσεων για τις διακριτές εξαρτημένες μεταβλητές , όπως είναι η πίεση, η ταχύτητα, η θερμοκρασία…
- Γραμμικοποίηση των διακριτοποιημένων εξισώσεων και επίλυση της προκύπτουσας εξίσωσης γραμμικού συστήματος για τον υπολογισμό των τελικών τιμών των εξαρτημένων μεταβλητών.

Οι δύο αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούν παρόμοια διαδικασία διακριτοποίησης (πεπερασμένοι όγκοι ελέγχου), αλλά η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την γραμμικοποίηση και την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων είναι διαφορετική.

Pressure Based Solver

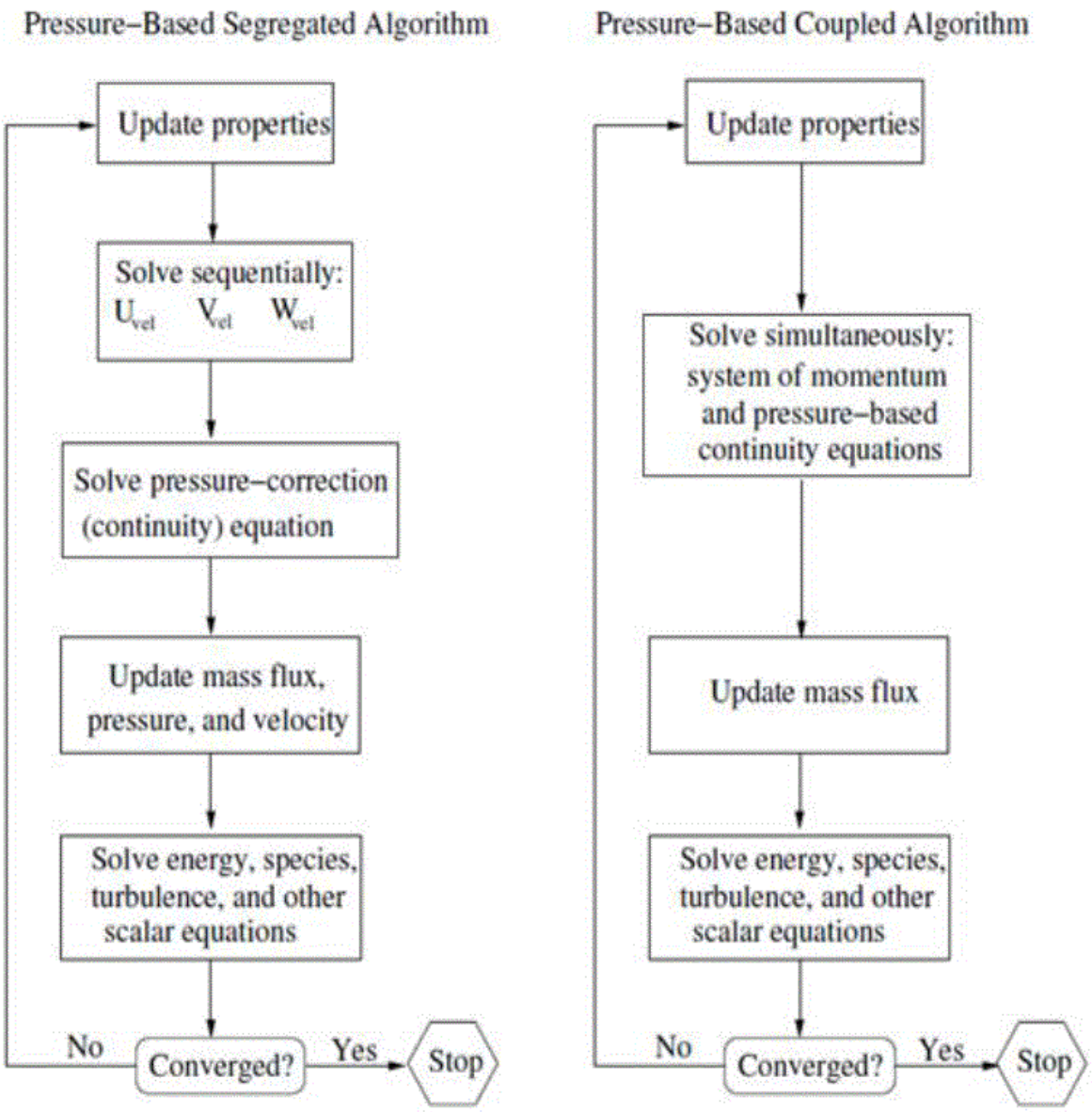
Στον pressure-based solver, η μέθοδος που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για να επιλύσει τις εξισώσεις ονομάζεται μέθοδος προβολής. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, η πυκνότητα προσδιορίζεται επιλύοντας μία εξίσωση πίεσης (ή ονομάζεται και εξίσωση διόρθωση πίεσης). Η εξίσωση αυτή προέρχεται από τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας με τέτοιο τρόπο ώστε το πεδίο ταχύτητας, που διορθώθηκε από την πίεση, να ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας. Εξαιτίας της μη γραμμικότητας και του ότι οι εξισώσεις ροής είναι συζευγμένες απαιτούνται επαναλήψεις μέχρι να συγκλίνει η λύση (δηλαδή να μην αλλάζει πλέον σημαντικά με την πάροδο επιπλέον επαναλήψεων). Αυτή η αριθμητική μέθοδος, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: (a) Pressure-Based Segragated Solver και (β) Pressure-Based Coupled Solver.

Pressure Based Segragated Solver

Σε αυτή τη κατηγορία , οι αλγεβρικές εξισώσεις που απαιτούνται για τη εξαγωγή της λύσης λύνονται ξεχωριστά. Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας κάθε εξίσωσή είναι «αποσυζευγμένη» από τις άλλες. Συνέπεια αυτού είναι, ο συγκεκριμένος αλγόριθμός να είναι οικονομικός σε μνήμη, αλλά να καθυστερεί ιδιαίτερα στη σύγκλιση (σε σχέση με τον Pressure-Based Coupled Solver). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.18, τα βήματα που ακολουθούνται στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, είναι τα εξής:

1. Ενημέρωση των ιδιοτήτων του ρευστού που μας ενδιαφέρουν βασιζόμενες στις τιμές τις οποίες έχει ορίσει ο χρήστης (οριακές, αρχικές συνθήκες…)
2. Υπολογισμός των επιμέρους εξισώσεων ορμής διαδοχικά (πρώτα για τη συνιστώσα στον x άξονα, έπειτα για τη συνιστώσα στον y άξονα, και τέλος για τη συνιστώσα στον z άξονα), χρησιμοποιώντας τις τιμές από το προηγούμενο βήμα σαν αρχικές και οριακές συνθήκες.
3. Υπολογισμός της διορθωτικής εξίσωσης πίεσης, κάνοντας χρήση του πεδίου ταχύτητας και τη ροής μάζας που υπολογίστηκαν στο βήμα 2.
4. Διόρθωση της ροής μάζας και του πεδίο ταχύτητας, χρησιμοποιώντας την διορθωτική εξίσωση του βήματος 3, με τέτοιο τρόπο ώστε η διορθωτική εξίσωση πίεσης να ικανοποιεί το πεδίο ταχύτητας.
5. Υπολογισμός επιπλέον ιδιοτήτων (εάν υπάρχουν) όπως ποσότητα τύρβης, ενέργεια…
6. Υπολογισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων φάσεων (εάν η ανάλυση εμπεριέχει πολυφασική ροή)
7. Έλεγχος για τη σύγκλιση των εξισώσεων.

Τα παραπάνω βήματα (τα οποία παριστάνονται στο Σχήμα 2.18) συνεχίζονται, μέχρι τα κριτήρια σύγκλισης (τα οποία ορίζονται από το χρήστη να τηρούνται).



Σχήμα 14 *: Η διαδικασία επίλυσης στους αλγόριθμους Segragated και Coupled[21]*

Pressure Based Coupled Solver

Σε αυτήν την κατηγορία, οι αλγεβρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του πεδίου ροής και της ροής μάζας λύνονται ταυτόχρονα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρουσιάζει σημαντικά ταχύτερη σύγκλιση, από δύο έως τρεις φορές γρηγορότερη σε σχέση με τον Segragated αλγόριθμο. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι το σύνολο των εξισώσεων για τον υπολογισμό της ροής μάζας και του πεδίου ταχύτητας λύνονται ταυτόχρονα, αυξάνει μιάμιση έως δύο φορές την απαιτούμενη μνήμη RAM. Τα βήματα για τον συγκεκριμένο αλγόριθμο παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.18.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method – FVM) οι τιμές από τις εξισώσεις που επιλύονται, αποθηκεύονται στο κέντρο του κάθε κελιού. Για να μπορεί να ορισθούν, πλήρως όμως οι ιδιότητες του ρευστού σε όλο το υπολογιστικό πεδίο με ακρίβεια πρέπει να είναι γνωστές και οι τιμές στις έδρες των κελιών (faces). Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της παρεμβολής. Στο Fluent είναι διαθέσιμες διάφορες μέθοδοι παρεμβολής οι οποίες είναι[14]:

- First Order Upwind: Εύκολη σύγκλιση, περιορισμένη όμως ακρίβεια γιατί αποτελεί μέθοδο πρώτης τάξης.
- Second Order Upwind: Πιο αργή σύγκλιση σε σχέση με τη προηγούμενη, αλλά σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια. Σύμφωνα με τον manual του Fluent[22] είναι η προτεινόμενη μέθοδος για υπολογιστικά πλέγματα αποτελούμενα από τριγωνικά (δισδιάστατα) ή τετράεδρα (τρισδιάστατα) κελιά. Αυτή είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή.
- Power Low: Δίνει καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με της πρώτης τάξης αλλά περιορίζεται για μικρούς αριθμούς Reynolds
- Quadratic Upwind Interpolation: Δίνει ακρίβεια τρίτης τάξης και προτείνεται να χρησιμοποιηθεί σε υπολογιστικά πλέγματα που αποτελούνται από τετραγωνικά (δισδιάστατα) ή εξάεδρα κελιά (τρισδιάστατα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ NACA 0030

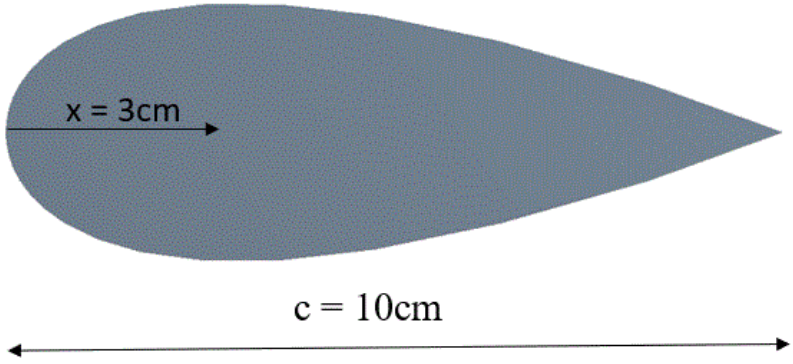
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τρίτο κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αποτελεί την προσομοίωση του πεδίου ροής γύρω από την τρισδιάστατη πτέρυγα NACA 0030, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Ansys. Η πτέρυγα σχεδιάστηκε σε λογισμικό CAD, το Design Modeler, το οποίο εμπεριέχεται στο Ansys. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου ροής, χρησιμοποιώντας το Ansys Mechanical. Ο επιλυτής (solver) που επιλέχθηκε είναι το Fluent, και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό CFD-Post. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση πέντε διαφορετικών γωνιών προσβολής (0^o,2^o,4^o,6^o,8^o). Οι γωνίες προσβολής περιορίσθηκαν σε πέντε διαφορετικές τιμές, λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς που ήταν διαθέσιμη, η οποία είναι ένας Intel i7 τετραπύρηνος επεξεργαστής και 16 GB μνήμη RAM. Ο αριθμός Reynolds στον οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις είναι $\mathrm{Re} = 133000$ και το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε είναι το Spalart-Almaras, το οποίο όχι μόνο έχει μικρότερο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με τα μοντέλα τύρβης k-ε, k-ω κ.α., καθώς επιλύει μόνο μια επιπλέον εξίσωση για την περιγραφή της τυρβώδους ροής, αλλά έχει αποδειχθεί επαρκές για προσομοίωση πεδίου ροής σε πτερύγια[15].

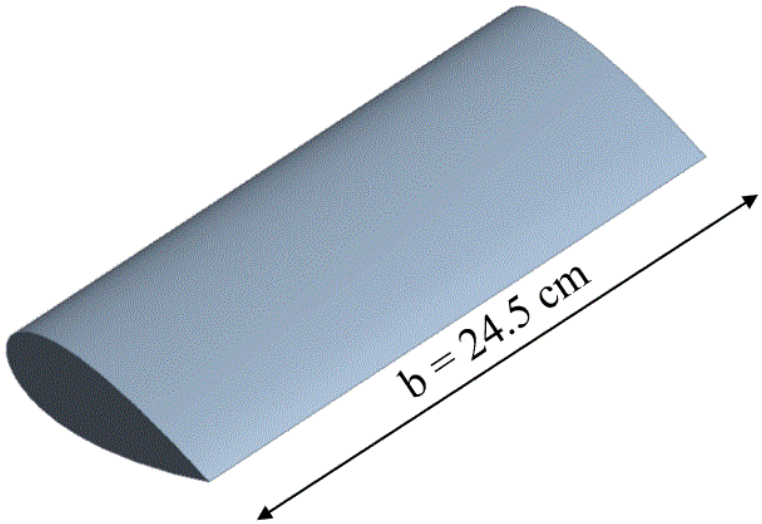
Επίσης η ροή όπου προσομοιώνεται είναι ασυμπίεστη και μόνιμη (steady state). Βασικός σκοπός στον παρόν κεφάλαιο είναι ο υπολογισμός των συντελεστών άντωσης (C_l) και οπισθέλκουσας (C_d) και η εξαγωγή διαγραμμάτων για την μεταβολή του συντελεστή πίεσης (C_p) συναρτήσει της επιφάνειας της πτέρυγας, για τις διαφορετικές γωνίες προσβολής που επιλέχθηκαν. Επίσης πραγματοποιήθηκε μελέτη για να αποφανθεί αν το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά πυκνό, ώστε να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα (mesh independence study). Τέλος, έγινε προσπάθεια να αναλυθεί ο στρόβιλος απορρέματος που δημιουργείται, ως αποτέλεσμα της διαφορετικής πίεσης μεταξύ της επιφάνειας αναρρόφησης και της επιφάνειας πίεσης της πτέρυγας.

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η πτέρυγα η οποία επιλέχθηκε είναι η NACA 0030. Τα δύο πρώτα ψηφία υποδηλώνουν ότι το προφίλ της πτέρυγας είναι συμμετρικό. Πιο συγκεκριμένα το πρώτο ψηφίο περιγράφει τη μέγιστη καμπυλότητα ως ποσοστό της χορδής (στη συγκεκριμένη περίπτωση 0), ενώ το δεύτερο ψηφίο περιγράφει την απόσταση της μέγιστης καμπυλότητας, από το χείλος εκφυγής, ως ποσοστό της χορδής. Άμεση απόρια των παραπάνω, είναι το γεγονός ότι για την παραγωγή άντωσης στη συγκεκριμένη πτέρυγα είναι αναγκαίο, να υπάρχει μία θετική γωνίας προσβολής. Τα δύο τελευταία ψηφία δηλώνουν ότι το μέγιστο πάχος της πτέρυγας ισούται με το 30% της τιμής της χορδής. Η χορδή της πτέρυγας ισούται με $c = 10\ cm$. Η γεωμετρία της πτέρυγας σχεδιάστηκε στο λογισμικό CAD, Design Modeler. Αρχικά σχεδιάστηκε το προφίλ της πτέρυγας (αεροτομή) χρησιμοποιώντας διακόσια (200) σημεία για τη μέγιστη ακρίβεια. Τέλος, το εκπέτασμα της πτέρυγας (span) είναι b = 24.5 cm. Η γεωμετρία της πτέρυγας παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.1 και 3.2 παρακάτω.

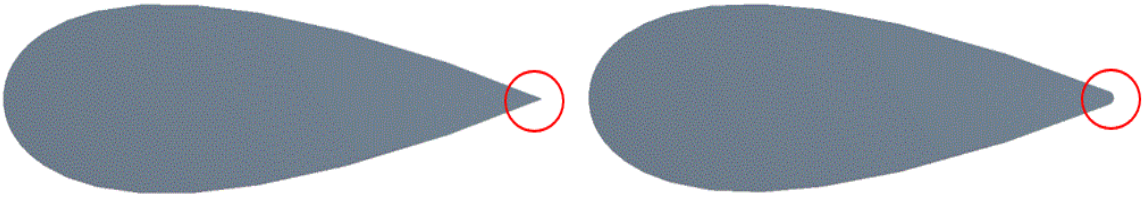


Σχήμα 3.1 *: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά NACA 0030. Το μέγιστο πάχος της πτέρυγας βρίσκεται σε απόσταση 3cm από το χείλος προσβολής.*



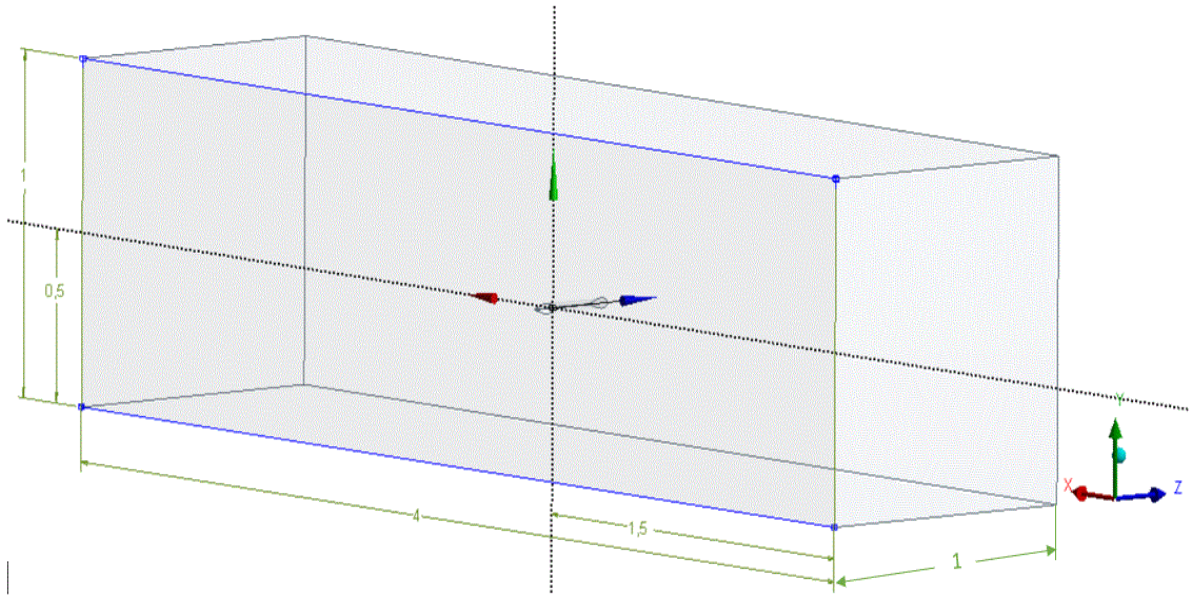
Σχήμα 3.2 *: Τρισδιάστατη απεικόνιση πτέρυγας NACA 0030*

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, το χείλος εκφυγής καταλήγει σε μία μικρή γωνία. Το γεγονός αυτό, δυσχεραίνει την διακριτοποίηση και οδηγεί στη δημιουργία κελιών με χαμηλή ποιότητα. Γιαυτό το λόγο, στο χείλος εκφυγής δημιουργήθηκε μία καμπυλότητα ακτίνας 1mm για να βοηθήσει στη δημιουργία του πλέγματος. Η μετατροπή αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.3.



Σχήμα 3.3 *: Δημιουργία καμπυλότητας στο χείλος εκφυγής για τη καλύτερη διακριτοποίηση στο σημείο αυτό*

Εφόσον σχεδιάστηκε η γεωμετρία της πτέρυγας, σειρά έχει ο σχεδιασμός του υπολογιστικού πεδίου στο οποίο ρέει το ρευστό (στη συγκεκριμένη περίπτωση αέρας). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κάποιος κανόνας, ο οποίος ορίζει το μέγεθος του απαιτούμενου υπολογιστικού πεδίου. Για την σωστή διαστασιοποίηση του υπολογιστικού πεδίου σημαντικό ρόλο παίζει η εμπειρία του χρήστη. Για να μπορούν να προσομοιωθούν όσο γίνεται καλύτερα τα φαινόμενα που αναπτύσσονται, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι τα όρια του υπολογιστικού πεδίου δεν επηρεάζουν την εξαγόμενη λύση. Η συγκεκριμένη πτέρυγα, με αυτές τις διαστάσεις, είχε χρησιμοποιηθεί σε πείραμα στο εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών. Ο λόγος που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες διαστάσεις για την πτέρυγα, είναι να μην επηρεάζει η γεωμετρίας της το πεδίο ροής γύρω από αυτήν. Για αυτό το λόγο, οι διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου που επιλέχθηκαν στην παρούσα ανάλυση, είναι οι διαστάσεις της αεροσήρραγας στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Το υπολογιστικό πεδίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 *: Απεικόνιση του υπολογιστικού πεδίου. Όλες οι διαστάσεις που αναγράφονται είναι σε χιλιοστά*

3.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Για τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου, χρησιμοποιηθήκαν τετράεδρα κελιά. Εφόσον σκοπός είναι ο υπολογισμός των συντελεστών άντωσης, οπισθέλκουσας και πίεσης πρέπει το πλέγμα να είναι πιο πυκνό στη περιοχή γύρω από την πτέρυγα. Επίσης, θέλοντας να μελετηθεί και ο στρόβιλος απορρέματος που δημιουργείται η περιοχή πύκνωσης επεκτάθηκε στα 70 cm πίσω από την πτέρυγα. Στην περιοχή γειτονικά της πτέρυγας το μέγεθος των κελιών ξεκίνησε από 10mm και μειώθηκε διαδοχικά στα 5mm (mesh independence study). Επίσης στις επιφάνειες της πτέρυγας (επιφάνεια αναρρόφησης και πίεσης) και στο χείλος εκφυγής, τα κελιά που δημιουργήθηκαν έχουν μέγεθος 1.5mm και 0.5mm αντίστοιχα.

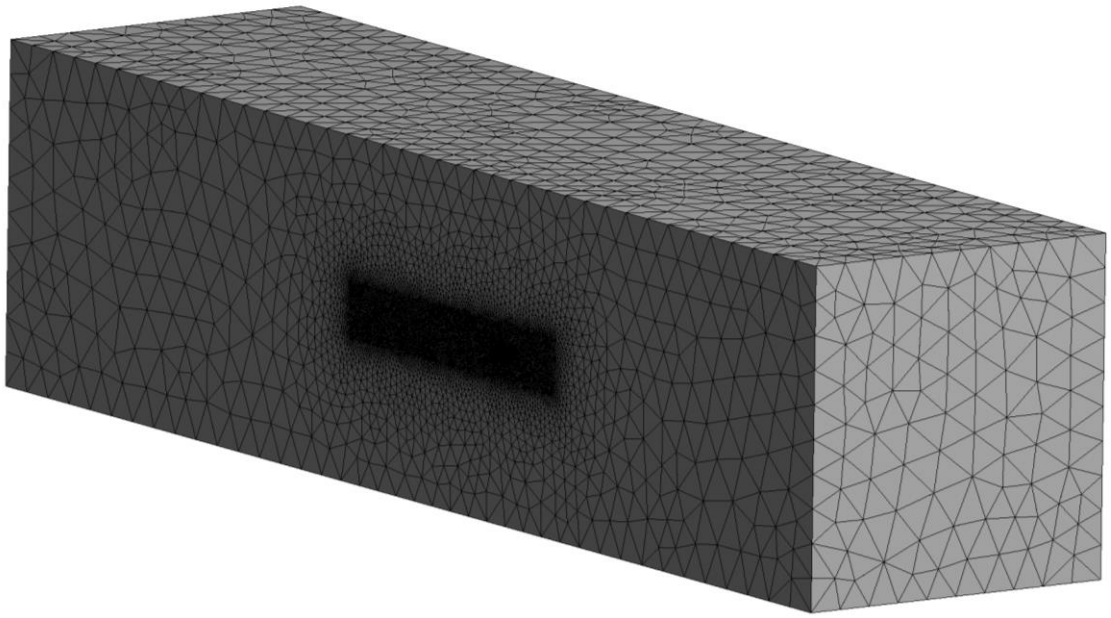
Για την σωστή μοντελοποίηση του οριακού στρώματος, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική inflation layer. Με αυτή τη τεχνική, ακριβώς γύρω από τις επιφάνειες της πτέρυγας, δημιουργούνται εξάεδρα κελιά τα οποία γενικά θεωρούνται καλύτερης ποιότητας επειδή δεν παραμορφώνονται κατά την κατανομή τους στο πλέγμα. Το πλήθος των στρωμάτων που χρησιμοποιήθηκε είναι δεκαπέντε, ενώ η απόσταση του πρώτου κελιού από την επιφάνεια της πτέρυγας είναι 0.045mm. Αυτή η τιμή εξασφαλίζει ότι η τιμή του y_+ *είναι μικρότερη από* 5, όπως προτείνεται από το Fluent όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο τύρβης Spalart-Almaras.

Σύμφωνα με το manual του Fluent, στις αναλύσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, τα κελιά που δημιουργούνται πρέπει να τηρούν ορισμένα κριτήρια προκειμένου να έχουμε μία αξιόπιστη λύση. Επομένως, σύμφωνα με το Fluent, το κυριότερο κριτήριο για το υπολογιστικό πλέγμα είναι το skewness. Το skewness ορίζεται ως η διαφορά όγκου (επιφάνειας αν πρόκειται για δισδιάστατη ανάλυση) μεταξύ ενός κελιού που δημιουργείται, με το αντίστοιχο κελί που κατέχει τον ίδιο όγκο με αυτό και έχει όλες τις επιφάνειες ίσες. Υψηλές τιμές skewness μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια και ευστάθεια την εξαγόμενης λύσης. Το εύρος τιμών που δέχεται αυτό το κριτήριο είναι από μηδέν μέχρι ένα. Όσο πιο κοντά είναι η τιμή του skewness για κάποιο element κοντά στο μηδέν τόσο πιο πολύ προσεγγίζει το ιδανικό κελί. Αντίθετα, όσο η τιμή είναι κοντά στη μονάδα τότε το κελί αυτό είναι ιδιαίτερα παραμορφωμένο και δεν μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Ο επιλυτής του Fluent δέχεται πλέγματα τα οποία έχουν μέγιστη τιμή skewness μικρότερη από 0.95, ενώ η μέση τιμή βρίσκεται κάτω από 0.33.

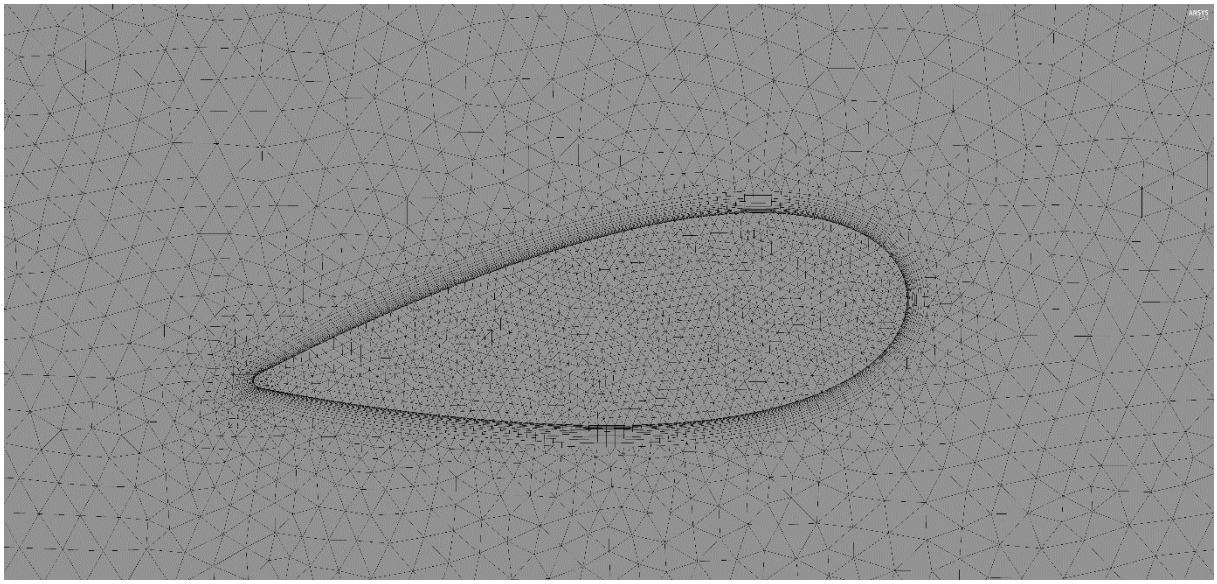
Σε όλα τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν η μέγιστη τιμή skewness είναι στα 0.89 και η μέγιστη μέση τιμή βρίσκεται στα 0.24. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι από άποψη ποιότητας η διακριτοποίηση είναι επαρκής. Για να μπορέσει όμως να γίνει και μελέτη της επίδρασης που έχει η πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος στη λύση, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά πλέγματα.

	Πλέγμα 1	**Πλέγμα 2**	**Πλέγμα 3**	**Πλέγμα 4**
Κελιά	1,574,285	3,028,041	4,802,988	6,334,770
Max Skewness	0.84	0.89	0.87	0.86
Averaged Skewness	0.24	0.23	0.22	0.22

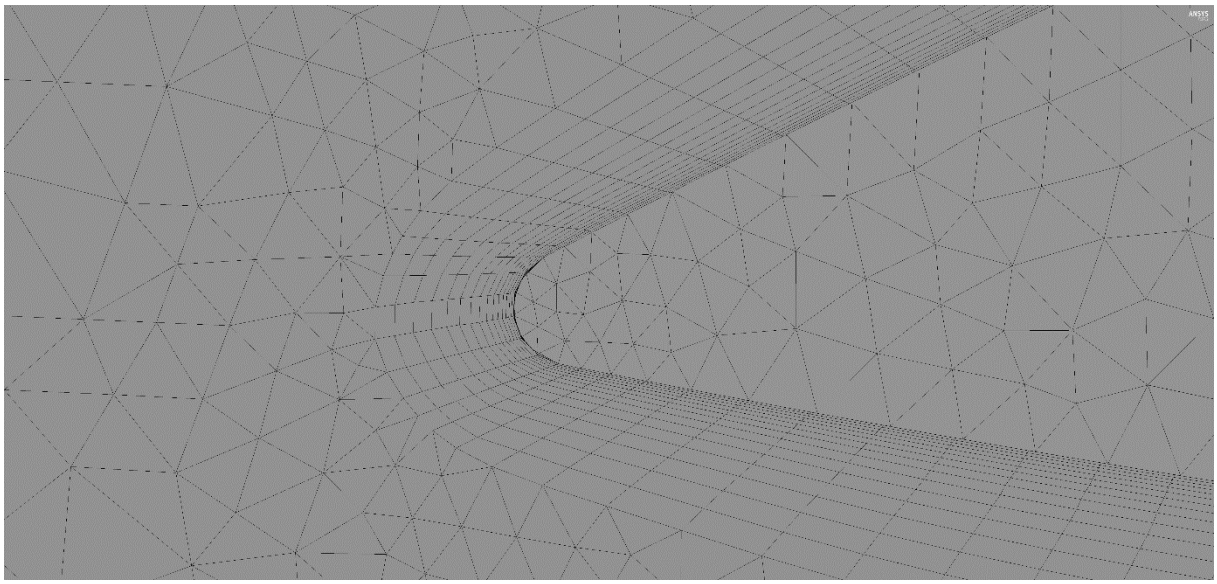
Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορες εικόνες από το πλέγμα 4.



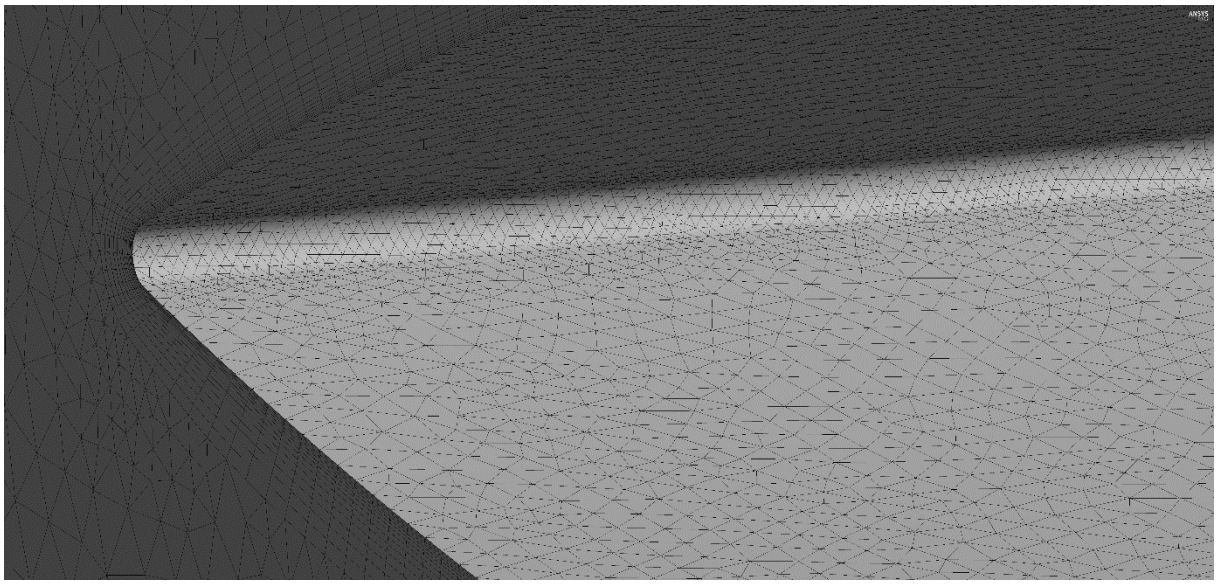
Σχήμα 15 *: Διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου*



Σχήμα 16 *: Διακριτοποίηση κοντά στην επιφάνεια της πτέρυγας. Παρατηρείται η τεχνική* inflation *που έχει χρησιμοποιηθεί για να "πιάσει" το οριακό στρώμα.*



Σχήμα 17 *: Διακριτοποίηση στο χείλος εκφυγής*



Σχήμα 18 *: Διακριτοποίηση στις επιφάνειες της πτέρυγας*

3.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, οι διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου εξασφαλίζουν ότι τα όρια του δεν επηρεάζουν το πεδίο ροής γύρω από την πτέρυγα. Γι' αυτό το λόγο, οι τέσσερις έδρες περιμετρικά του υπολογιστικού πεδίου ορίσθηκαν ως περιοχή συμμετρίας. Στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου ορίσθηκε η οριακή συνθήκη velocity inlet η οποία σύμφωνα με το Fluent είναι η προτεινόμενη οριακή συνθήκη εισόδου για ασυμπίεστες ροές. Στην έξοδο του πεδίου ορίσθηκε η οριακή συνθήκη pressure outlet στη οποία δόθηκε ότι η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης που ισούται με 101325 Pa. Τέλος, στις επιφάνειες της πτέρυγας, ορίσθηκε η συνθήκη μη ολίσθησης, όπου ισχύει και στη πραγματικότητα (non slip wall condition). Οι οριακές συνθήκες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Είσοδος	Velocity Inlet	$\upsilon = 20\frac{m}{s}$
Έξοδος	Pressure Outlet	$P = 101325\ Pa$
Επιφάνειες πτέρυγας	Non-slip Wall	-
Τέσσερις επιφάνειες περιμετρικά (στην πραγματικότητα οι τοίχοι της αεροσήρραγας)	Symmetry	-

3.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Η πτέρυγα η οποία χρησιμοποιήθηκε έχει μήκος χορδής $c = 10\ cm$. Επίσης η ταχύτητα της ελεύθερης ροής τέθηκε $V_\infty = 20\frac{m}{s}$. Δεδομένου ότι θέλουμε να προσομοιώσουμε τη ροή για $Re = 133{,}000$, και σε θερμοκρασία 20ºC στο επίπεδο της θάλασσας, η πυκνότητα του αέρα ισούται με $\rho = 1.225\frac{kg}{m^3}$. Μπορούμε, πλέον να υπολογίσουμε το δυναμικό ιξώδες του ρευστού ως εξής:

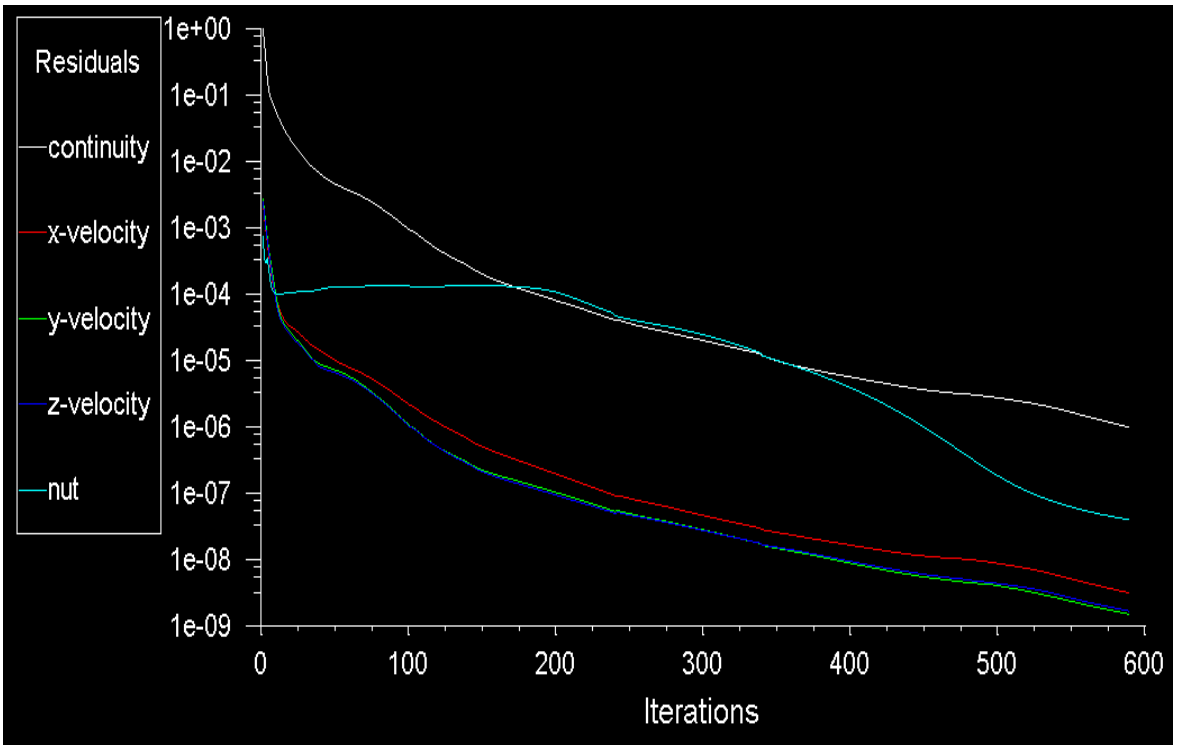
$$Re = \frac{\rho\, V_\infty\, c}{\mu} \Rightarrow \mu = \frac{\rho\, V_\infty\, c}{Re} = \frac{1.225\frac{kg}{m^3}\ 20\frac{m}{s}\ 0.1\,m}{133{,}000} \Longrightarrow \mu = 1.8421 \cdot 10^{-5}\ Pa\ s$$

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η ροή όπου προσομοιώνεται είναι ασυμπίεστη. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Pressure Based Coupled Solver. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης παρακολουθούνταν η τιμή των συντελεστών Cl και Cd. Όταν οι τιμές αυτών των συντελεστών αρχίζουν να μην αλλάζουν πλέον με τη πάροδο των επαναλήψεων, τότε μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα. Επίσης η τιμή των residuals (υπολειπόμενο) τέθηκε στα 10^{-6}. Σαν «residual» ενός υπολογιζόμενου μεγέθους ορίζεται η διαφορά μεταξύ της τιμής του μεγέθους σε n επανάληψη, με τη τιμή του μεγέθους σε n+1 επανάληψη. Επομένως, όταν τα residuals φτάσουν στα επίπεδα του 10^{-6} θεωρούμε ότι τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν όσο προχωράνε οι επαναλήψεις. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των residuals, που υπολογίζονται από το Fluent είναι RMS (Root Mean Square values).

3.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

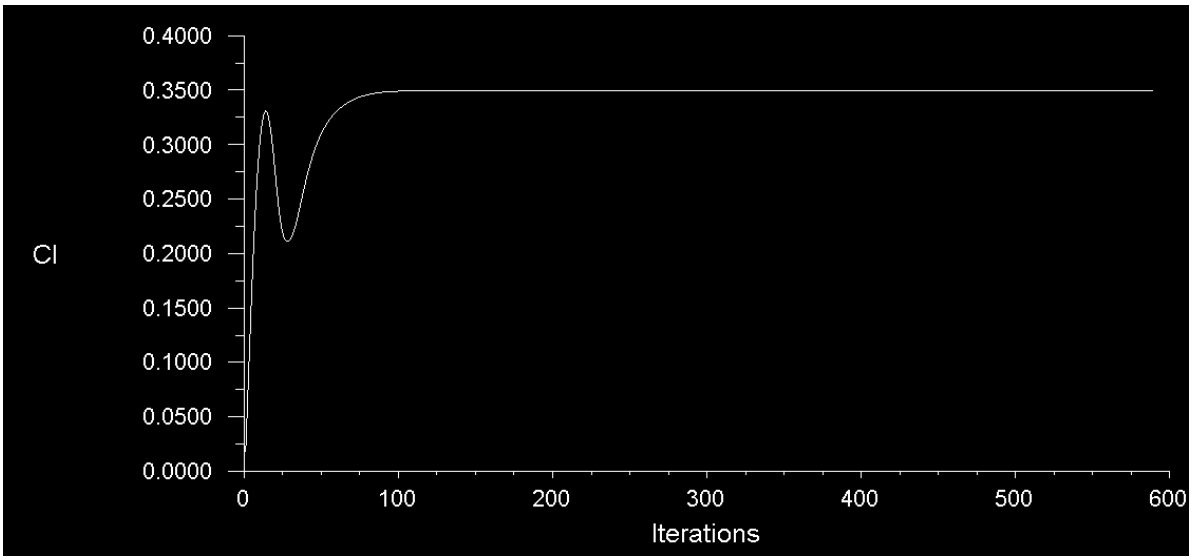
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων (verification) μπορούμε να εξετάσουμε τρία πράγματα.

1. Residuals: Πρέπει οι τιμές των residuals να έχουν φθάσει το όριο που έχει ορίσει ο χρήστης.
2. Παρακολούθηση κάποιων υπολογιζόμενων τιμών κατά τη διάρκεια της λύσης (Monitor point).
3. Επαλήθευση ότι ισχύει η διατήρηση της μάζας. Μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροή μάζας στην είσοδο, με τη βοήθεια του fluent η οποία πρέπει να έχει μία διαφορά της τάξης του 1% με τη ροή μάζας στην έξοδο, για να θεωρήσουμε ότι η λύση μας είναι σωστή.
4. Mesh Independence Study: Πρέπει να δοκιμασθούν διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα, και να επιβεβαιωθεί ότι από ένα σημείο και πέρα, όσο πιο πυκνό γίνεται το πλέγμα, τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν.

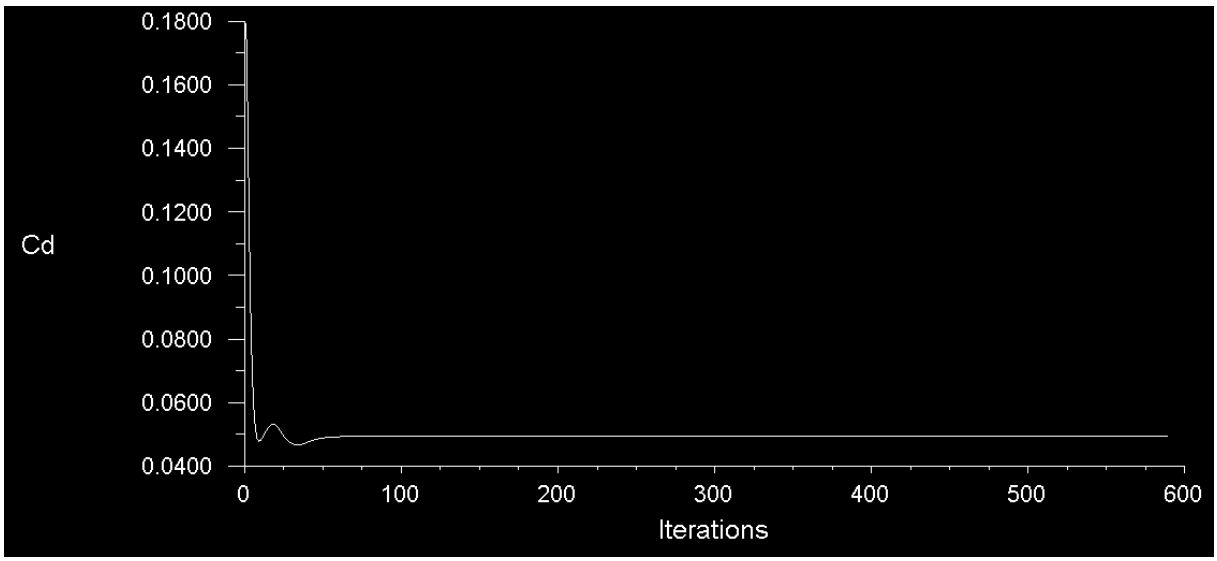


Σχήμα 19 *: Καταγραφή των residuals για το πλέγμα 4*

Στο σχήμα 3.9 παρατηρούμε ότι τα residuals έχουν φθάσει την επιθυμητή τιμή. Οπότε είμαστε σίγουροι ότι τα αποτελέσματα δεν έχουν διαφορά αν συνεχίσουμε για επιπλέον επαναλήψεις.

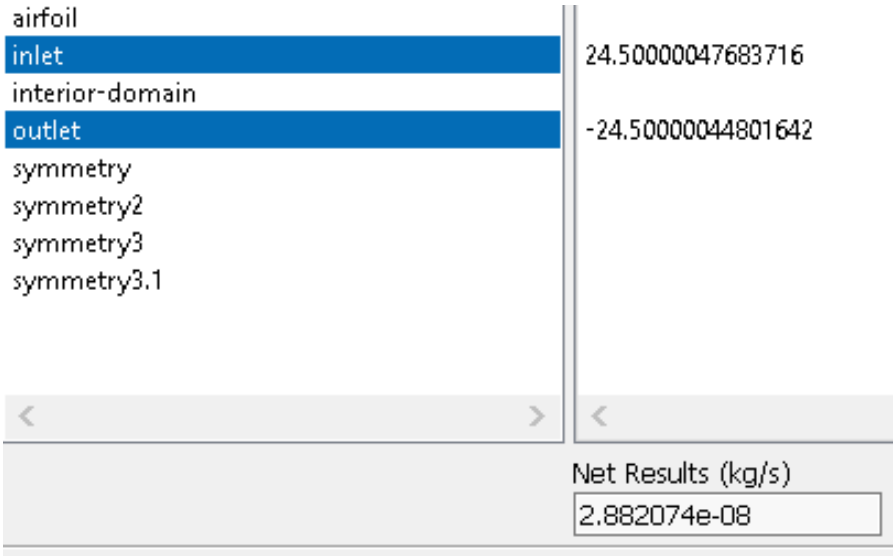


Σχήμα 20 *: Καταγραφή του συντελεστή άντωσης κατά τη πάροδο των επαναλήψεων για γωνία προσβολής 8 μοίρες*



Σχήμα 21 *: Καταγραφή του συντελεστή οπισθέλκουσας κατά τη πάροδο των επαναλήψεων για γωνία προσβολής 8 μοίρες*

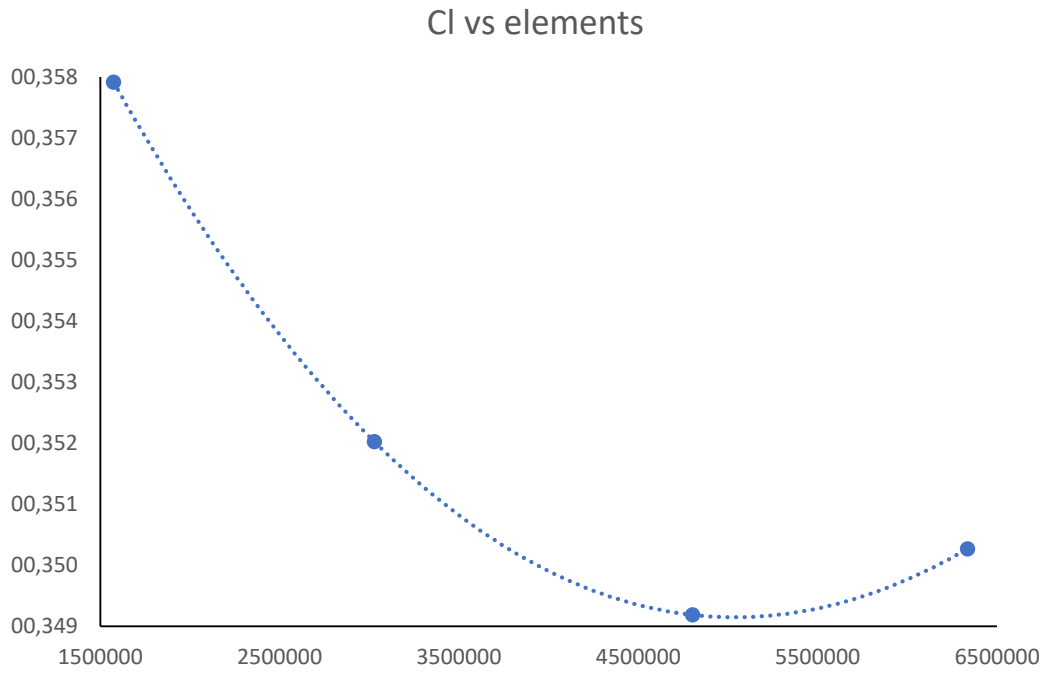
Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 φαίνεται ότι μετά την εκατοστή επανάληψη οι συντελεστές δεν αλλάζουν με την πάροδο των επαναλήψεων.



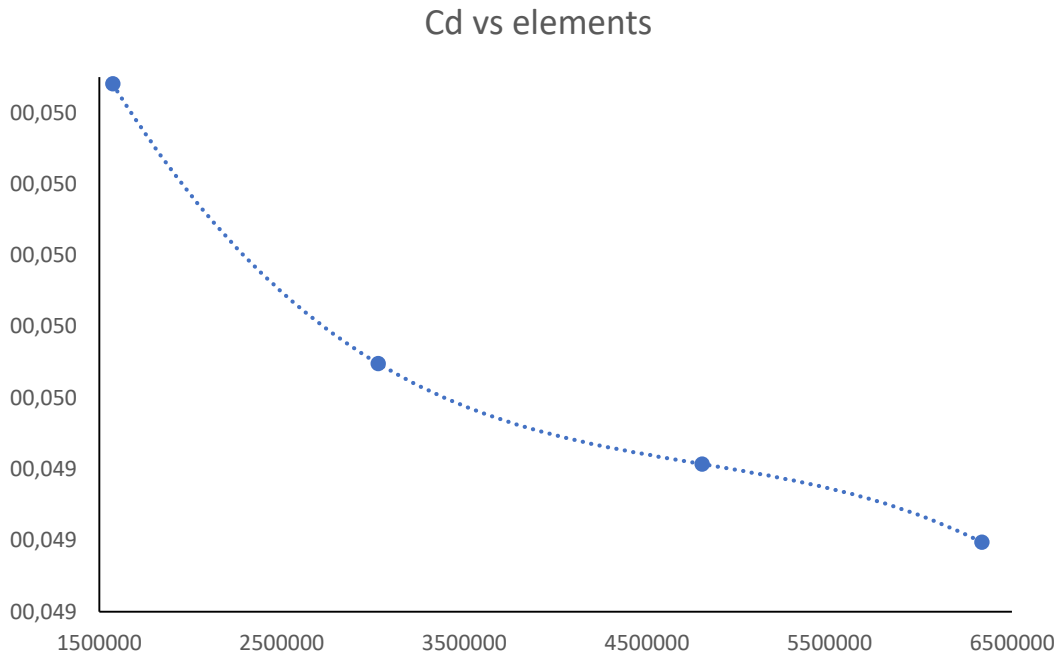
Σχήμα 22 *: Υπολογισμός της ροής μάζας στην είσοδο και την έξοδο για γωνία προσβολής 8 μοιρών*

Στο Σχήμα 3.12 φαίνεται ότι η διαφορά μεταξύ της ροής μάζας στην είσοδο και της ροής μάζας στην έξοδο είναι της του 10^{-8}.

Τέλος, για να είμαστε βέβαιοι ότι έχουμε ένα αξιόπιστο μοντέλο το οποίο δίνει ακριβή αποτελέσματα, πρέπει να ελέγξουμε τη μεταβολή των τιμών των συντελεστών Cl και Cd όσο αυξάνουμε την πυκνότητα του πλέγματος



Σχήμα 23 *: Μεταβολή του συντελεστή άντωσης συναρτήσει του αριθμού των κελιών, για γωνία προσβολής 8 μοιρών.*



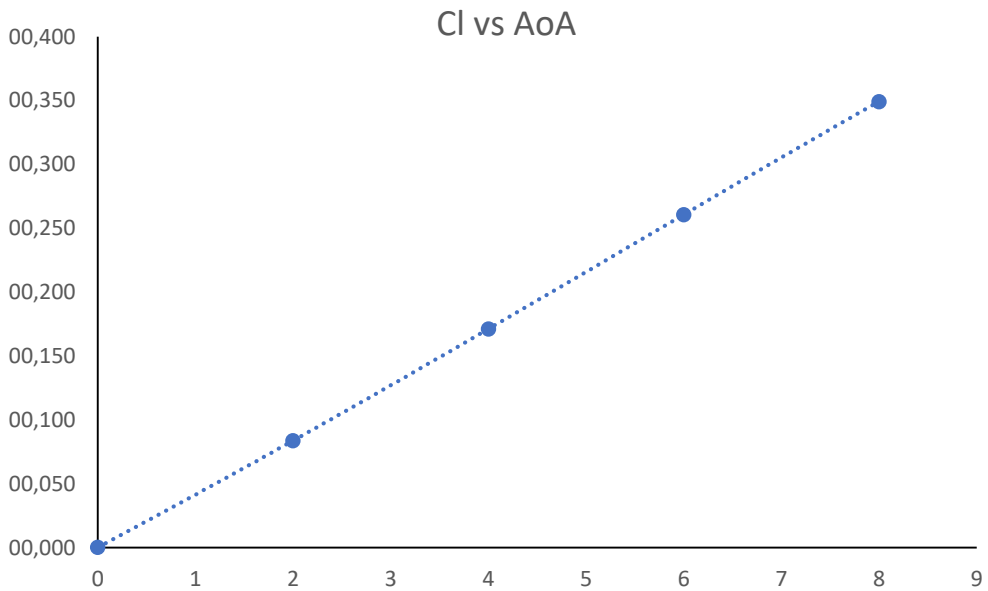
Σχήμα 24 *: Μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει του αριθμού των κελιών για γωνία προσβολής 8 μοιρών*

Πλέγμα 1		**Πλέγμα 2**		**Πλέγμα 3**		**Πλέγμα 4**	
Κελιά	1574285	**Κελιά**	3028041	**Κελιά**	4802988	**Κελιά**	6334770
Lift [N]	2.0878	**Lift [N]**	2.0534	**Lift [N]**	2.0368	**Lift [N]**	2.0431
Drag [N]	0.2945	**Drag [N]**	0.2899	**Drag [N]**	0.2882	**Drag [N]**	0.2870
Cl	0.3579	**Cl**	0.3520	**Cl**	0.3492	**Cl**	0.35027
Cd	0.0505	**Cd**	0.0497	**Cd**	0.0494	**Cd**	0.04919

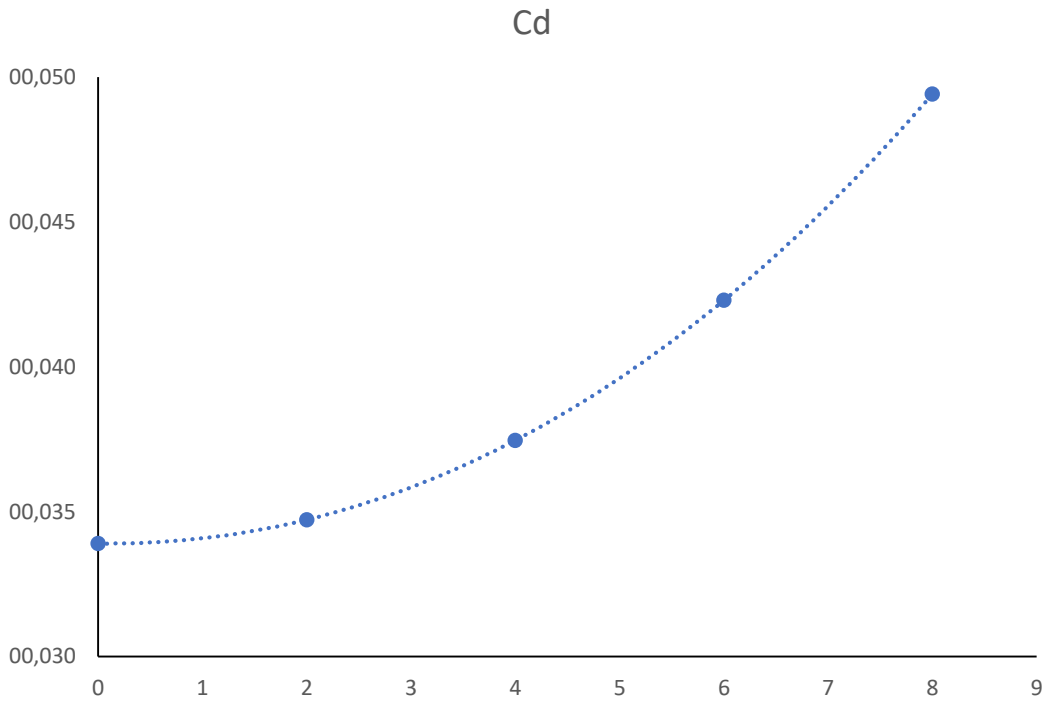
	Mesh Independence Study			
	% διαφορά			
	Lift	**Cl**	**Drag**	**Cd**
Πλέγμα 1	1,65%	1,65%	1,55%	1,55%
Πλέγμα 2	0,81%	0,81%	0,57%	0,57%
Πλέγμα 3	0,31%	0,31%	0,44%	0,44%
Πλέγμα 4	-	-	-	-

Από τους δύο παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι στο τέταρτο πλέγμα η επί τοις εκατό διαφορά των μεγεθών είναι μικρότερη από 0.45%. Δεδομένης της υπολογιστής ισχύς που είναι διαθέσιμη, η διαφορά αυτή θεωρείται ικανή για να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το τρίτο κατά σειρά πλέγμα, είναι ανεξάρτητα της διακριτοποίησης.

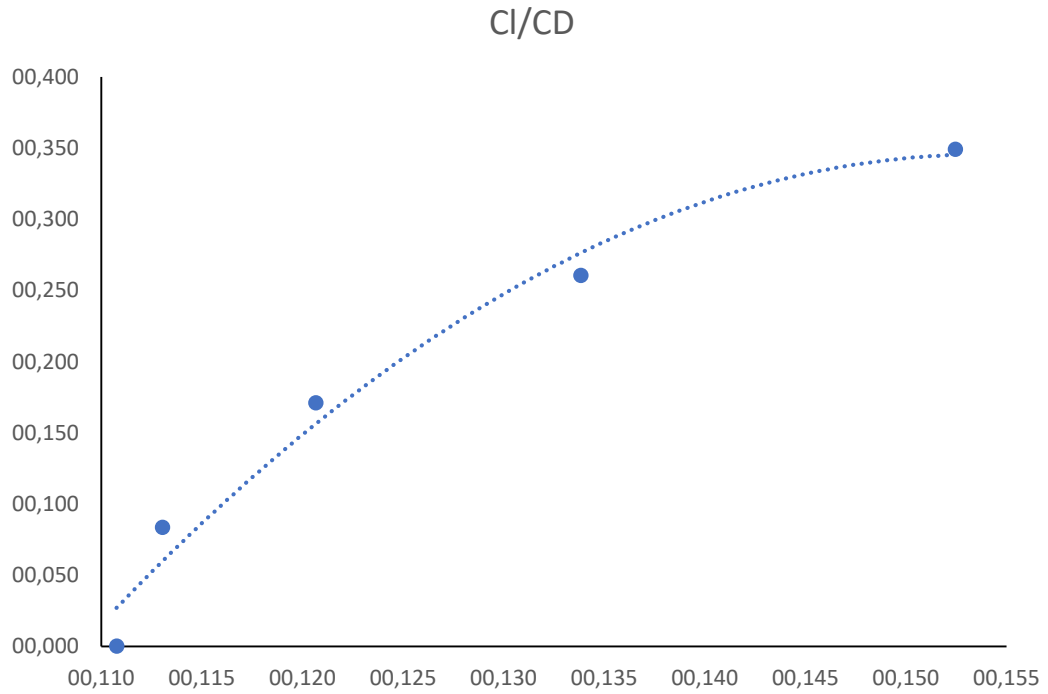
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 3.15 *: Μεταβολή του συντελεστή άντωσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής*

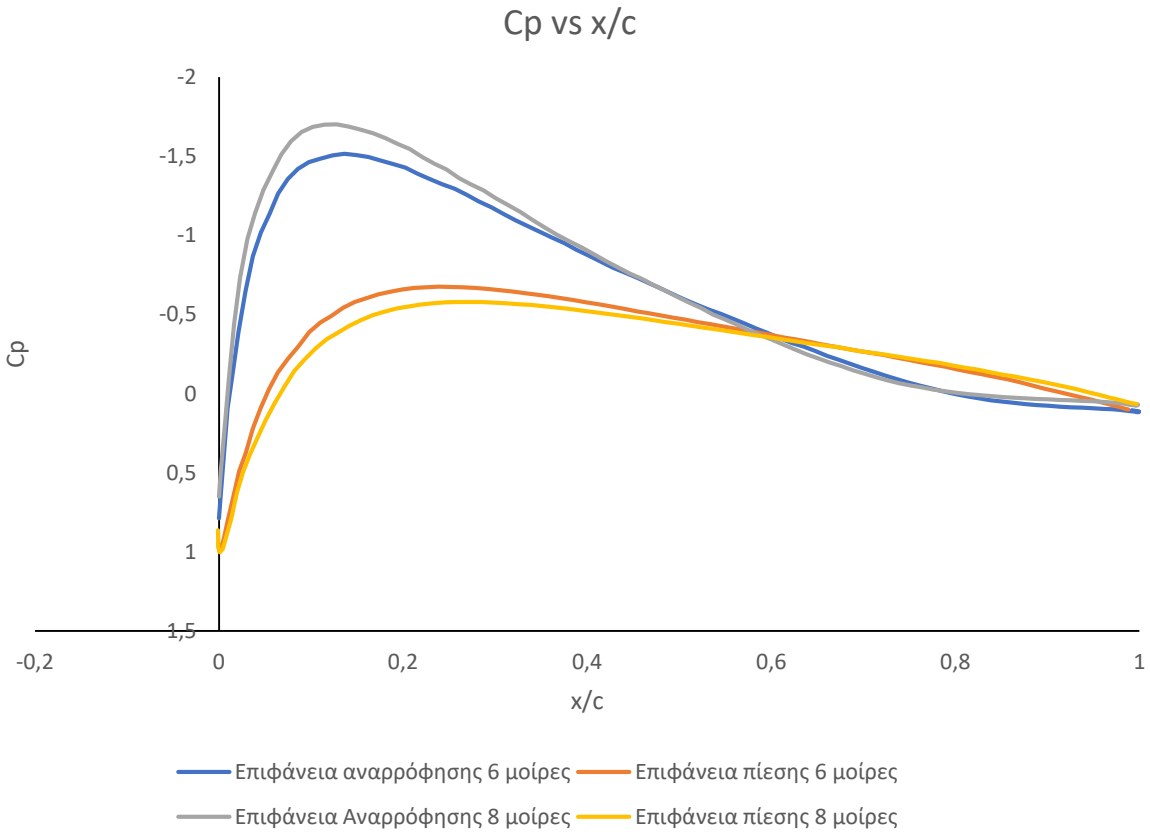


Σχήμα 3.16 *: Μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας προσβολής*



Σχήμα 3.17 *: Μεταβολή του συντελεστή άντωσης συναρτήσει του συντελεστή οπισθέλκουσας*

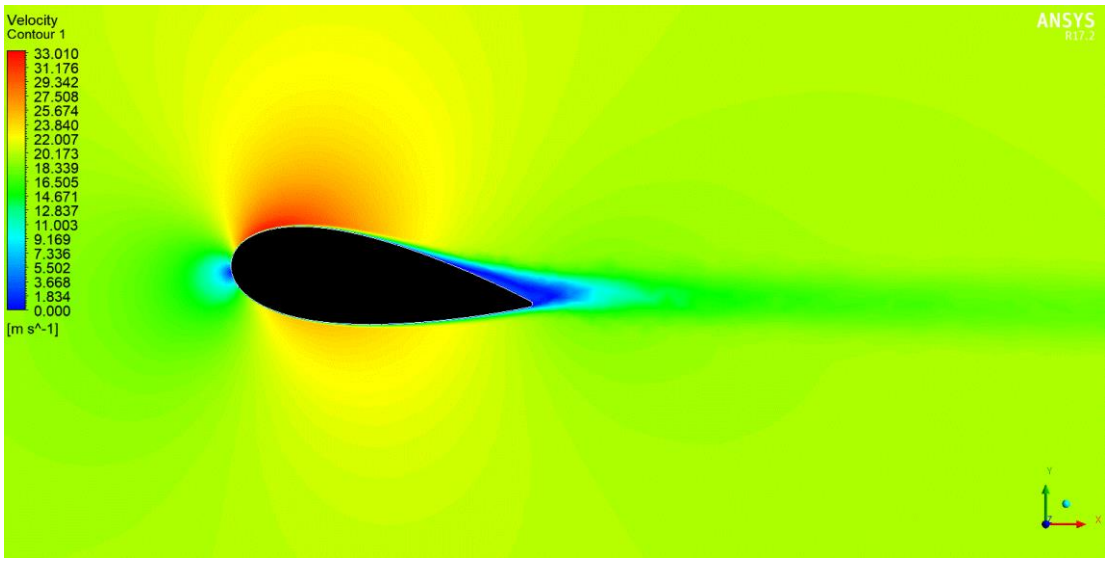
Στα σχήματα 3.15 μέχρι 3.17 βλέπουμε τις μεταβολές των αεροδυναμικών συντελεστών συναρτήσει της γωνίας προσβολής. Βλέπουμε ότι και τα τρία γραφήματα συμφωνούν με τα θεωρητικά που έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 1. Η μεταβολή του συντελεστή άντωσης είναι γραμμική, ενώ η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας είναι παραβολική, ακριβώς όπως ορίζει η θεωρία. Να σημειωθεί, ότι μέχρι τη γωνία προσβολής των 8^{o} παρατηρείται αύξηση του συντελεστή άντωσης. Να σημειωθεί ότι, δεν πραγματοποιήθηκαν επιπλέον προσομοιώσεις για μεγαλύτερη γωνία προσβολής λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς που ήταν διαθέσιμη.



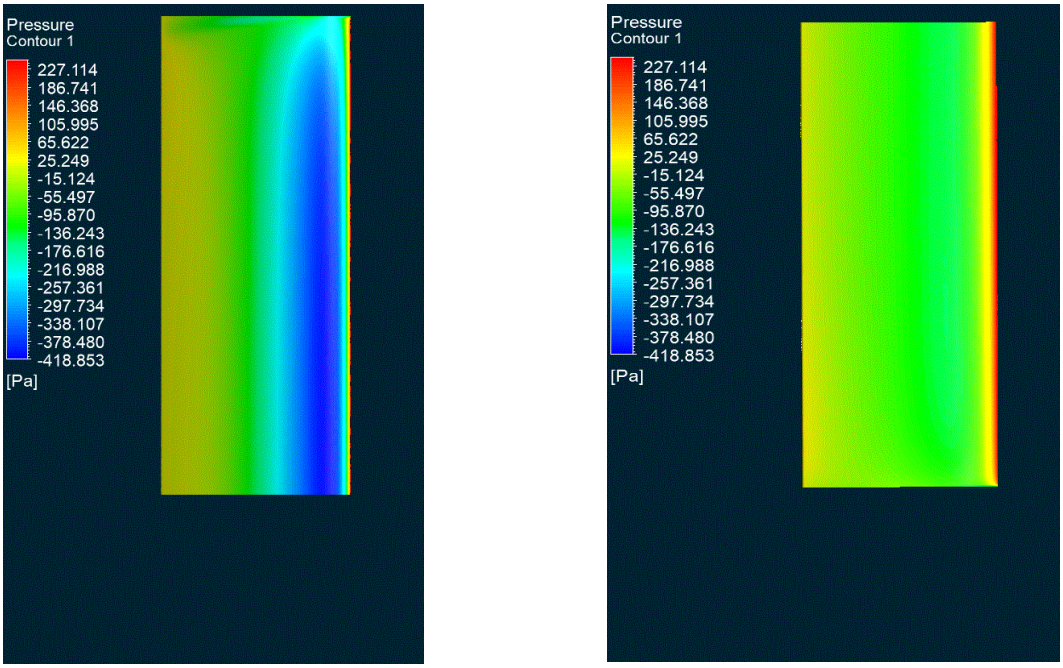
Σχήμα 3.18 *: Μεταβολή του συντελεστή πίεσης πάνω στην επιφάνεια της πτέρυγας*

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή πίεσης ενδεικτικά για γωνίες προσβολής 6 και 8 μοιρών, επάνω στην επιφάνεια της πτέρυγας. Παρατηρώντας τις επιφάνειες αναρρόφησης βλέπουμε ότι αρχικά η πίεση (στατική) μειώνεται ενώ στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται πάλι. Το αντίθετο συμβαίνει στην επιφάνεια πίεσης, κάτι το οποίοι αναμενόταν όπως περιγράφθηκε στο κεφάλαιο 2. Όπως παρατηρούμε στο γράφημα, η επιφάνεια που περικλείεται από τις καμπύλες των 8 μοιρών είναι μεγαλύτερη απότι η επιφάνεια που περικλείεται από τις καμπύλες των 6 μοιρών. Αυτός είναι και ο λόγος όπου η τιμή της άντωσης και του συντελεστή άντωσης είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερες γωνίες προσβολής

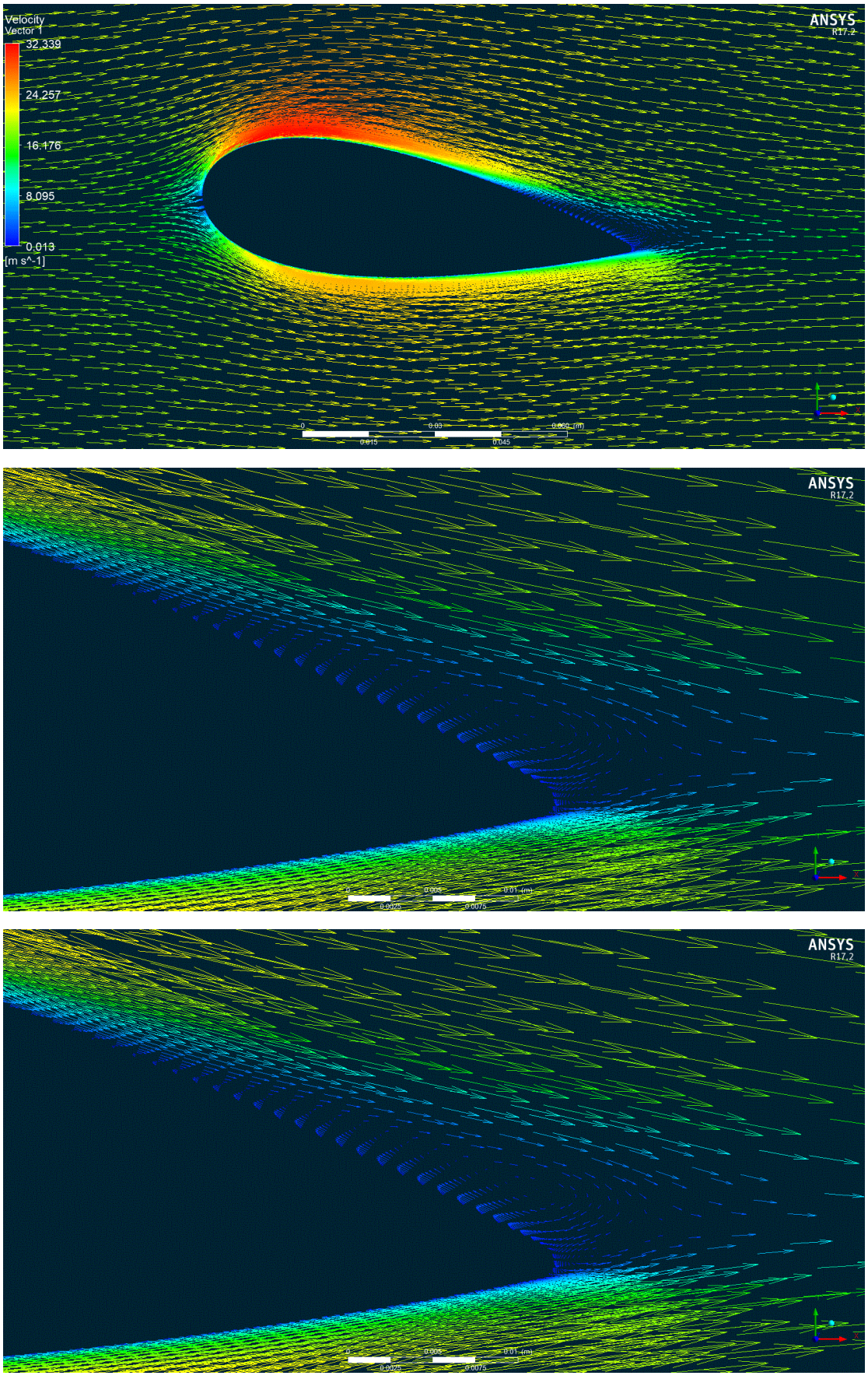
Στη συνέχεια παραθέτονται κάποια contours για την οπτικοποίηση της ροής γύρω από την πτέρυγα.



Σχήμα 3.19 *: Στιγμιότυπο της ταχύτητας για γωνίας προσβολής 8 μοιρών*

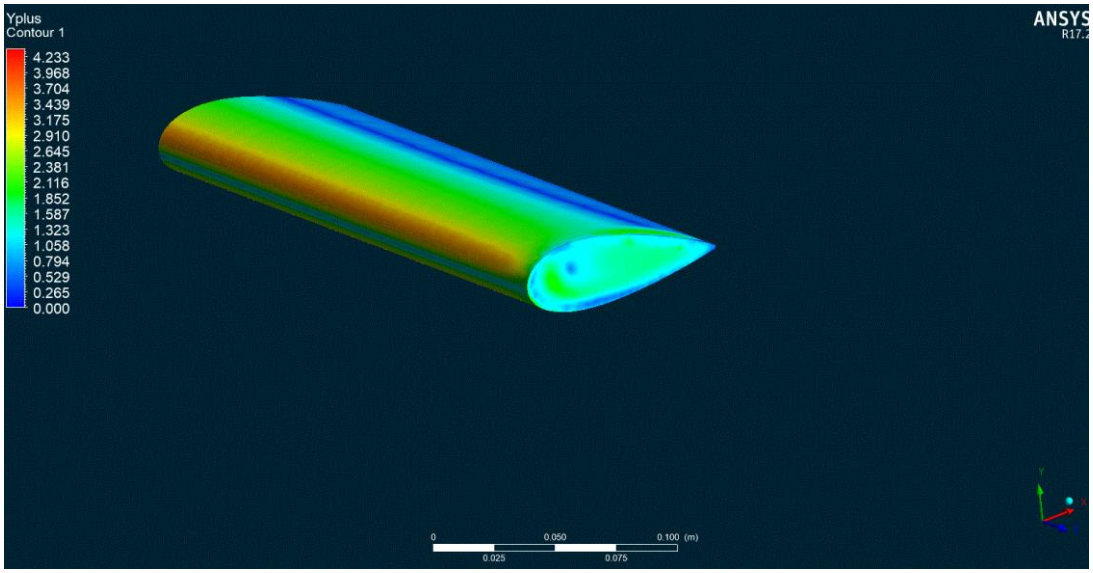


Σχήμα 25 *: Κατανομή της πίεση στις επιφάνειες αναρρόφησης (αριστερά) και πίεσης (δεξιά) για γωνίας προσβολής 8 μοιρών*

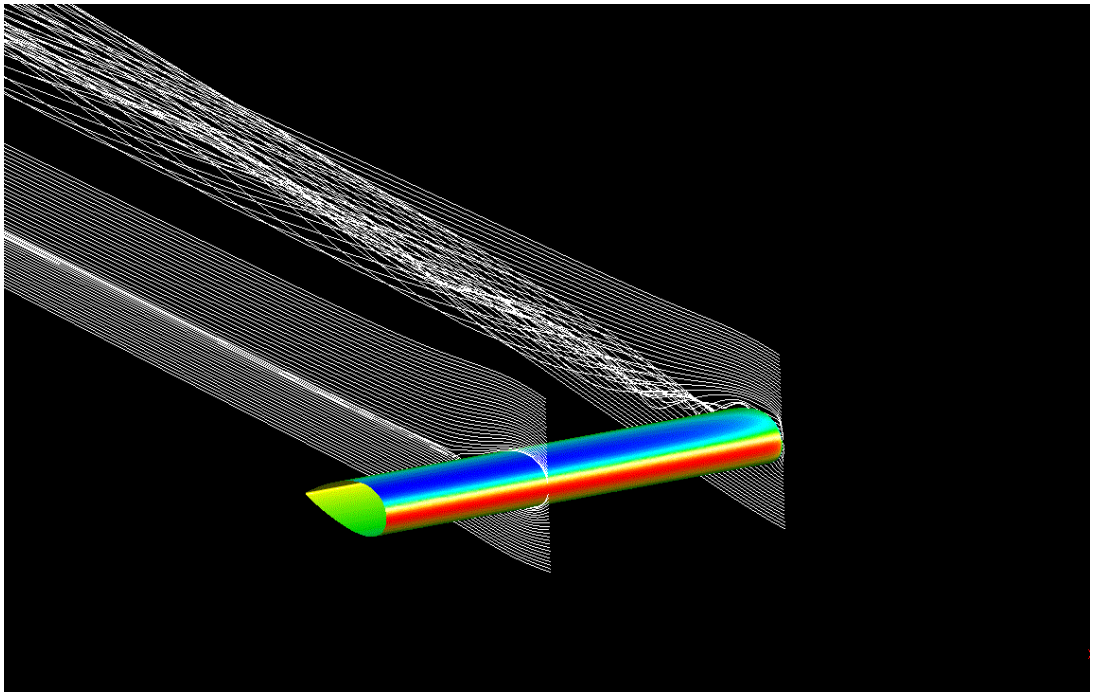


Σχήμα 3.21 *: Στιγμιότυπο του διανύσματος της ταχύτητας για γωνία προσβολής 8 μοίρες*

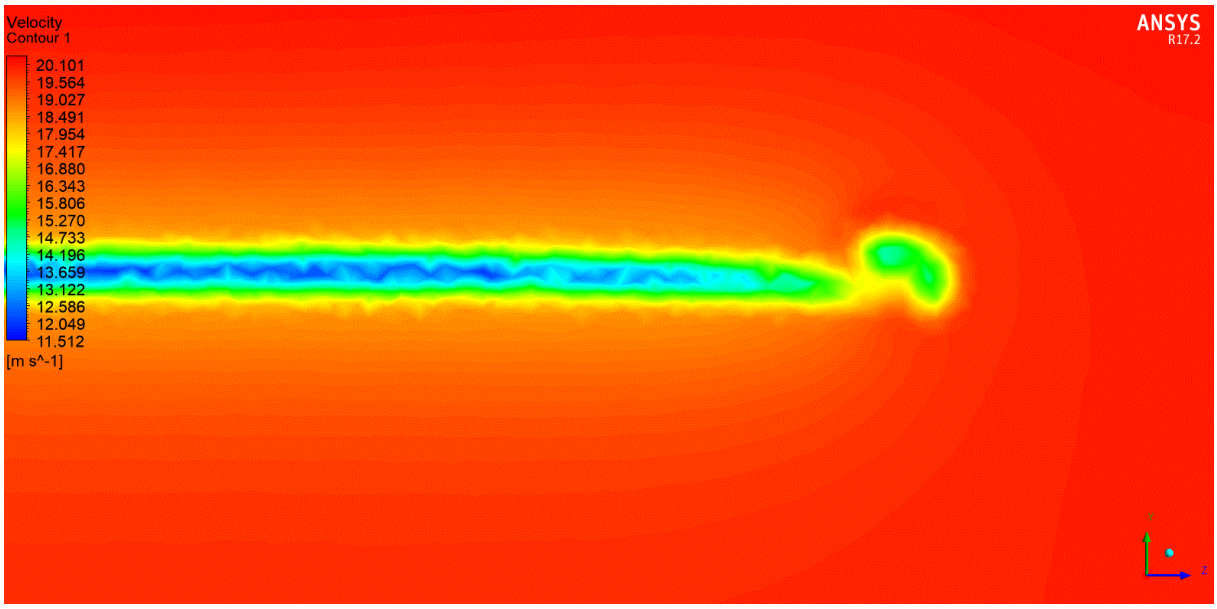
Στο Σχήμα 3.21 απεικονίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας για γωνία προσβολής 8^{o}. Παρατηρείται στις εικόνες όπου είναι μεγεθυμένες ότι η ταχύτητα σε ένα σημείο αρχίζει να αντιστρέφεται. Αυτό οφείλεται στο ότι η κινητική ενέργεια που έχει το ρευστό εντός του οριακού στρώματος δεν είναι επαρκής για να ξεπεράσει το εμπόδιο πίεσης που υπάρχει σε αυτό σημείο, λόγω της ανασχετικής κλίσης της πίεσης. Γιαυτό το λόγο, σε αυτό το σημείο λαμβάνει χώρα αποκόλληση του οριακού στρώματος, ακριβώς όπως είχε περιγραφεί στο κεφάλαιο 2.



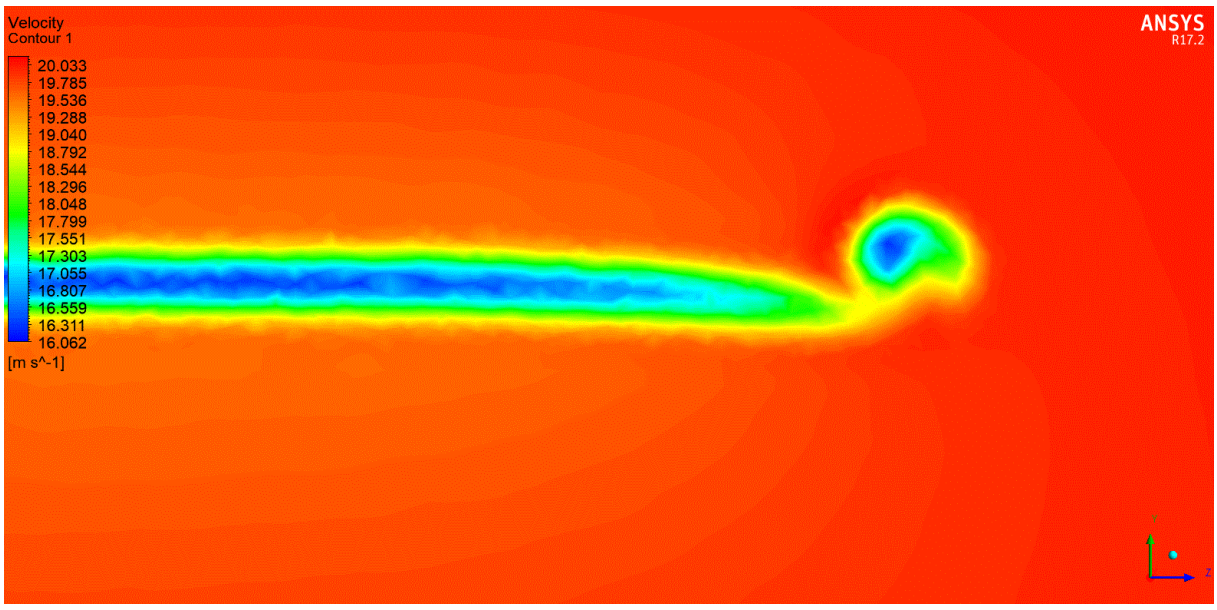
Σχήμα 3.22 : *Απεικόνιση της αδιάστατης απόστασης y^{+} στις επιφάνειες της πτέρυγας. Παρατηρούμε ότι η τιμή του y^{+} είναι μικρότερη του πέντε, ακριβώς όπως πρότεινε το Fluent για την ορθή χρήση του μοντέλου τύρβης Spalart-Almaras. Η γωνία προσβολής στο συγκεκριμένο σχήμα είναι 8 μοίρες.*



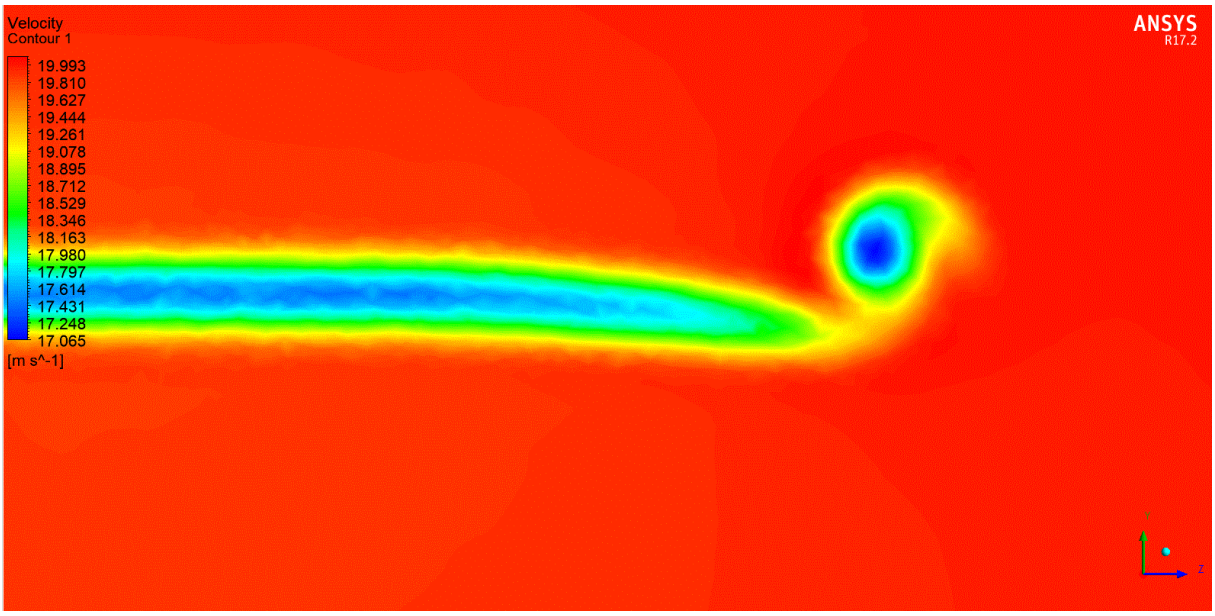
Σχήμα 3.23 : *Απεικόνιση της ροής στην άκρη της πτέρυγας (wingtip) με τη χρήση streamlines. Παρατηρείται η δημιουργία του στροβίλου απορρέματος (wingtip vortex),ως αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης μεταξύ της επιφάνειας αναρρόφησης και της επιφάνειας πίεσης. Η γωνίας προσβολής είναι 8 μοίρες.*



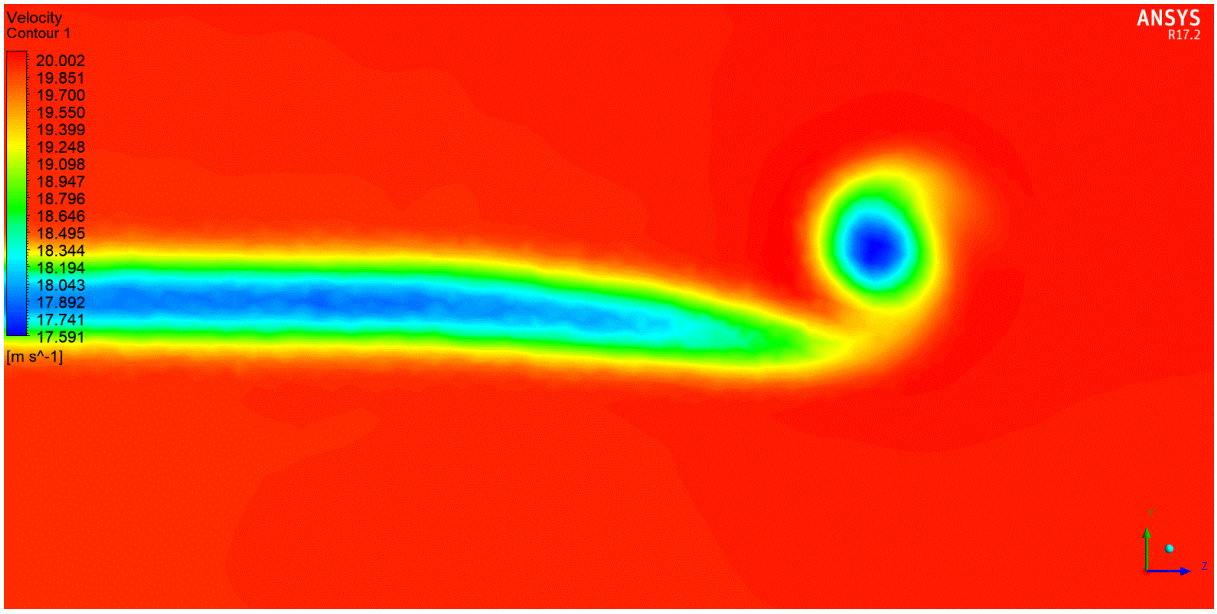
Σχήμα 3.24 : *Απεικόνιση του στροβίλου απορρέματος με χρήση της ταχύτητας για τη θέση x=3cm πίσω από τη πτέρυγα. Η γωνία προσβολής είναι 8 μοίρες.*



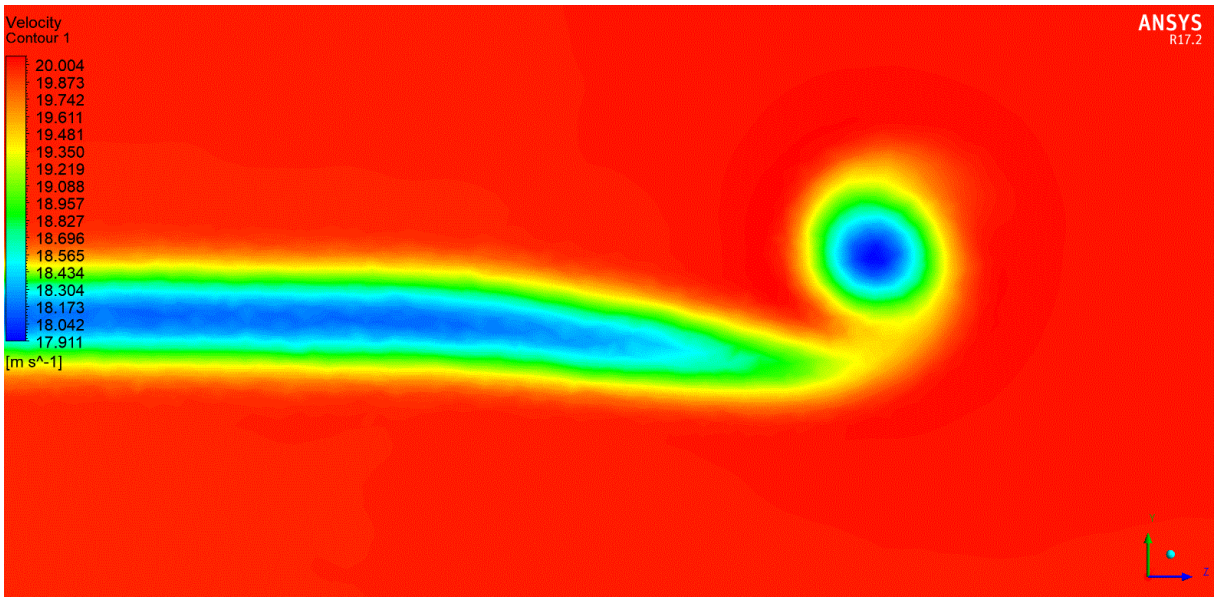
Σχήμα 3.25 : *Απεικόνιση του στροβίλου απορρέματος με χρήση της ταχύτητας για τη θέση x=10cm πίσω από τη πτέρυγα. Η γωνία προσβολής είναι 8 μοίρες.*



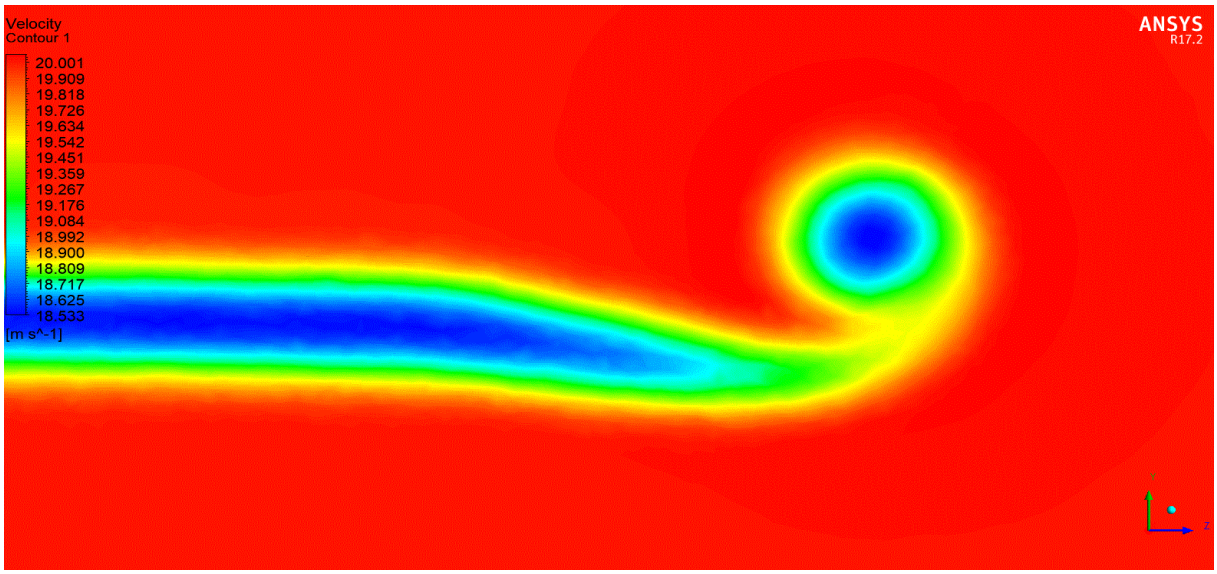
Σχήμα 3.26 : *Απεικόνιση του στροβίλου απορρέματος με χρήση της ταχύτητας για τη θέση x=20cm πίσω από τη πτέρυγα. Η γωνία προσβολής είναι 8 μοίρες.*



Σχήμα 3.27 : *Απεικόνιση του στροβίλου απορρέματος με χρήση της ταχύτητας για τη θέση x=30cm πίσω από τη πτέρυγα. Η γωνία προσβολής είναι 8 μοίρες.*



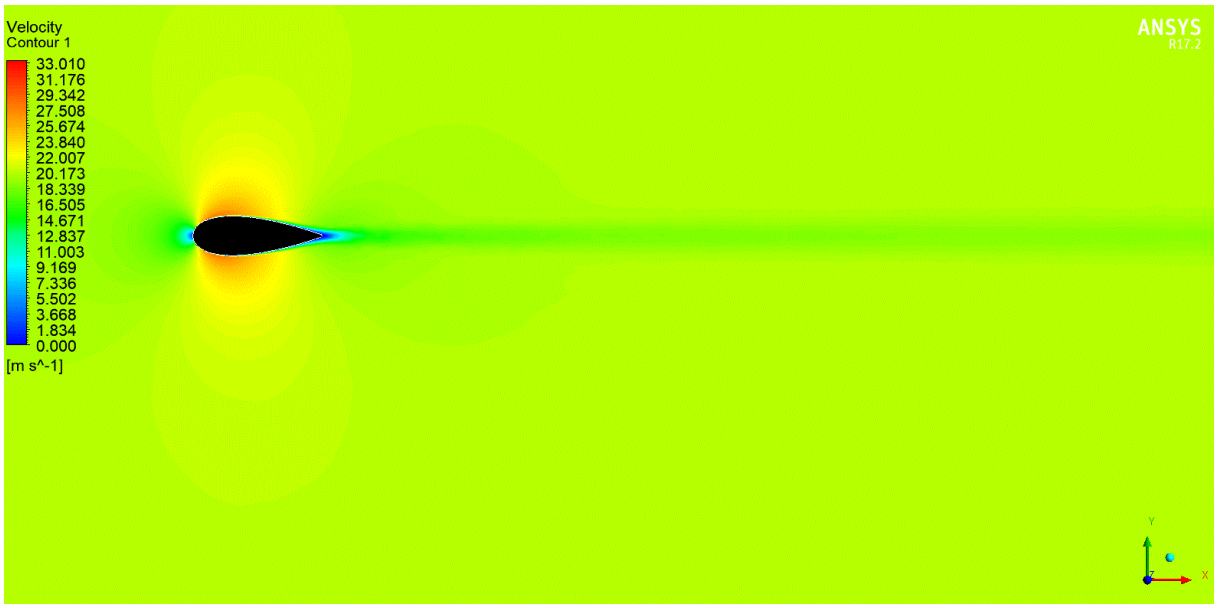
Σχήμα 3.27 : Απεικόνιση του στροβίλου απορρέματος με χρήση της ταχύτητας για τη θέση x=40cm πίσω από τη πτέρυγα. Η γωνία προσβολής είναι 8 μοίρες.



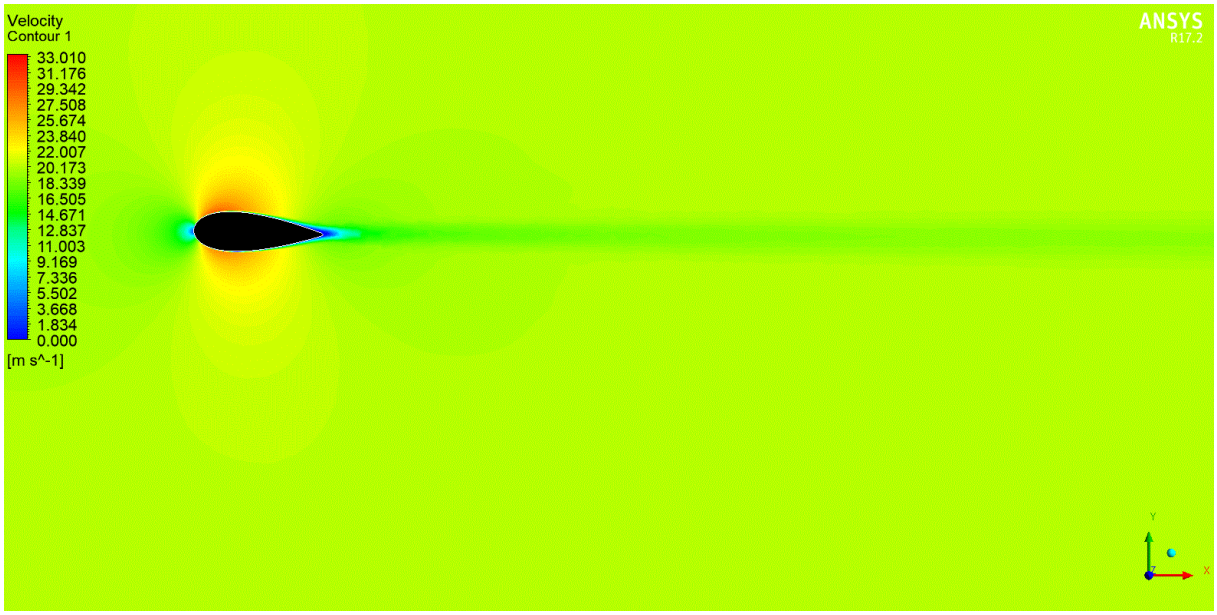
Σχήμα 3.28 : Απεικόνιση του στροβίλου απορρέματος με χρήση της ταχύτητας για τη θέση x=70cm πίσω από τη πτέρυγα. Η γωνία προσβολής είναι 8 μοίρες.

Στα σχήματα 3.23 έως 3.28 απεικονίζεται η εξέλιξη του στροβίλου απορρέματος που δημιουργείται στο πεδίο ροής. Παρατηρούμε ότι στην αρχή της δημιουργίας του, η ταχύτητα στο κέντρο του είναι στα 17 m/s. Όσο ο στρόβιλος απομακρύνεται προς τα θετικά του άξονα x η ένταση του μειώνεται, και η ταχύτητα στο κέντρο του τείνει να φτάσει την ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Αν συνεχίσουμε να απεικονίζουμε το στρόβιλο πέρα από τα 70cm πίσω από την πτέρυγα τότε η δομή του «καταστρέφεται», όπως φαίνεται στο σχήμα 3.29. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι ο στρόβιλος καταστρέφεται στην πραγματικότητα, αλλά βγαίνει από την πυκνή περιοχή του υπολογιστικού πλέγματος. Να σημειωθεί ότι ο λόγος που το πυκνό πλέγμα επεκτάθηκε μέχρι αυτή τη θέση είναι καθαρά θέμα υπολογιστικού κόστους. Μέσα από το λογισμικό CFD-Post μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά ότι η διάμετρος του στροβίλου

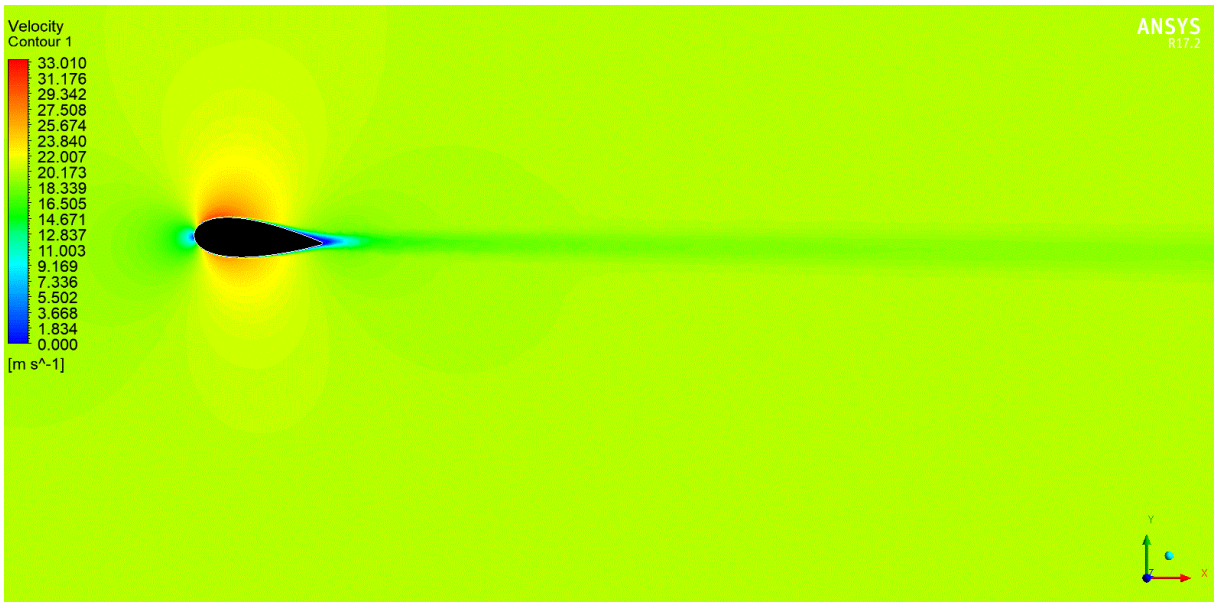
ξεκινάει από περίπου 2cm ακριβώς μετά την πτέρυγα, και μέχρι τα 70cm πίσω από τη πτέρυγα φτάνει τα 4 με 5 cm.



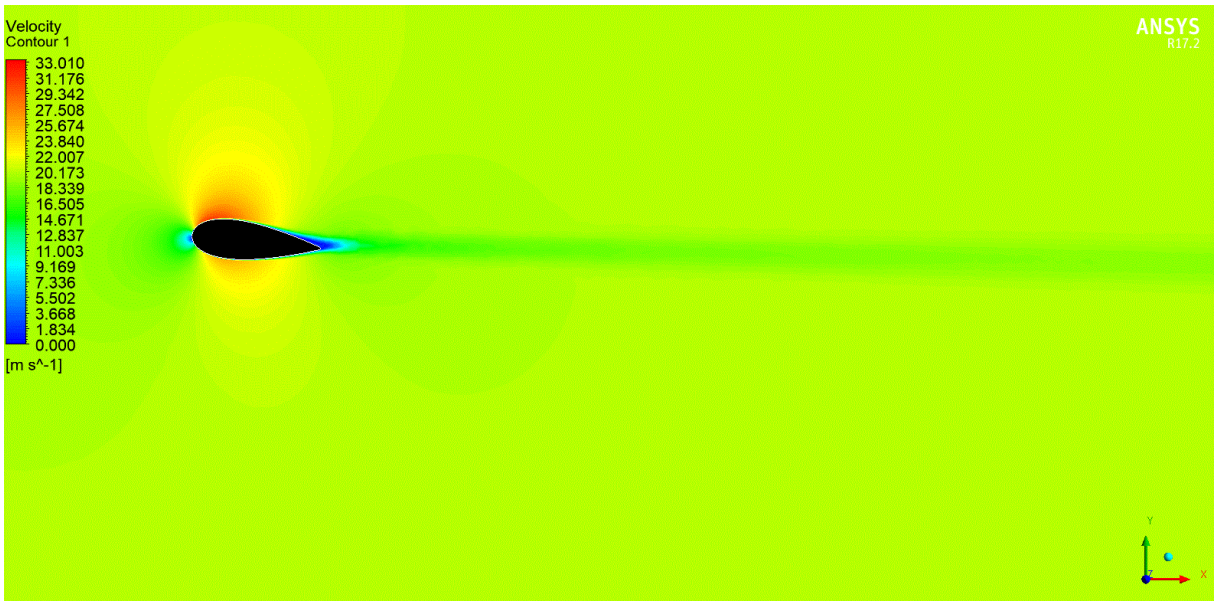
Σχήμα 3.29 : Απεικόνιση του πεδίου ροής με βάση τη ταχύτητα για γωνία προσβολής 0^o.



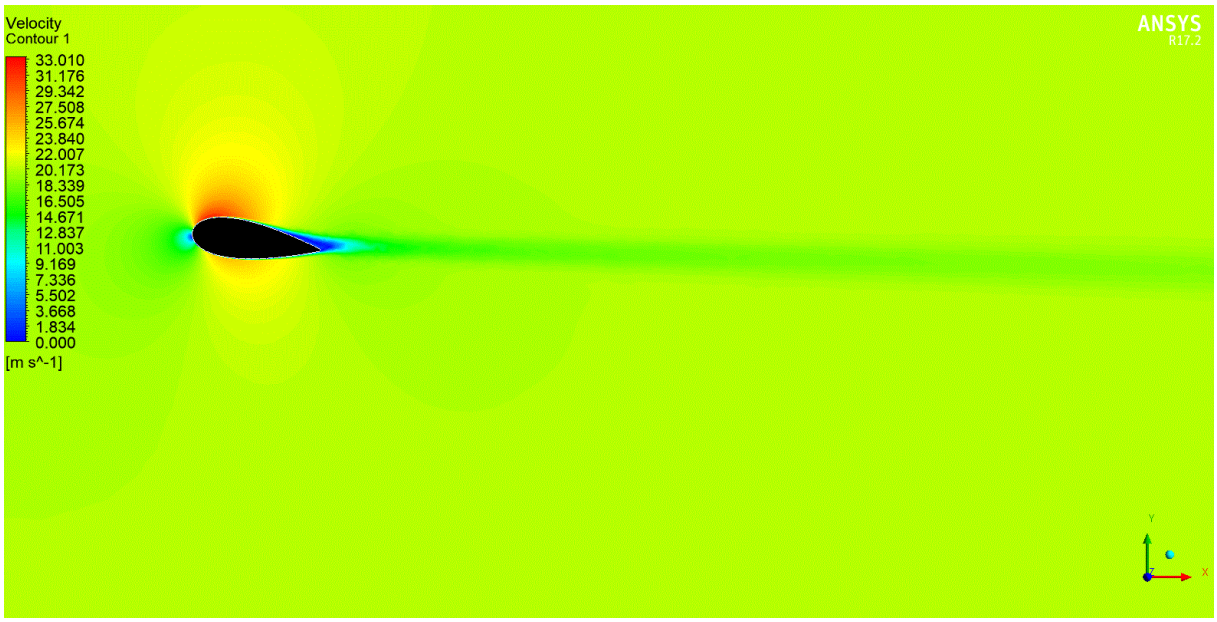
Σχήμα 3.30 : *Απεικόνιση του πεδίου ροής με βάση τη ταχύτητα για γωνία προσβολής 2^o.*



Σχήμα 3.31 : *Απεικόνιση του πεδίου ροής με βάση τη ταχύτητα για γωνία προσβολής 4^o.*



Σχήμα 3.32 : *Απεικόνιση του πεδίου ροής με βάση τη ταχύτητα για γωνία προσβολής 6^o.*

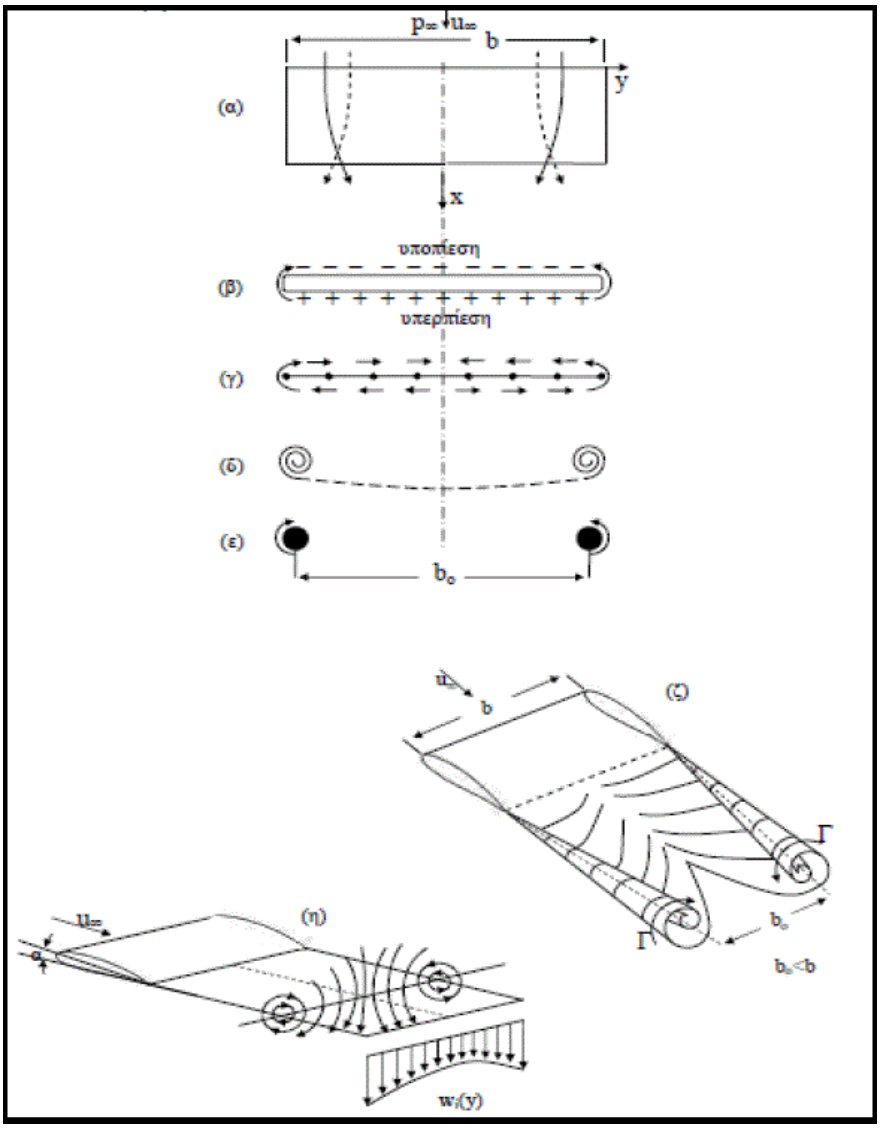


Σχήμα 3.33 : *Απεικόνιση του πεδίου ροής με βάση τη ταχύτητα για γωνία προσβολής* 8^o.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΖΕΥΓΟΥΣ ΟΜΟΡΡΟΠΑ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία[11], σε οποιαδήποτε αντωτική επιφάνεια, σαν αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης μεταξύ των επιφανειών πίεσης και αναρρόφησης, δημιουργείται ένας στρόβιλος. Στην περίπτωση της πτέρυγας πεπερασμένου μήκους, δημιουργείται ένα ζεύγος αντίρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 παρακάτω.



Σχήμα 4.1 *: Δημιουργία του στροβίλου απορρέματος στη πτέρυγα πεπερασμένου μήκους[2]*

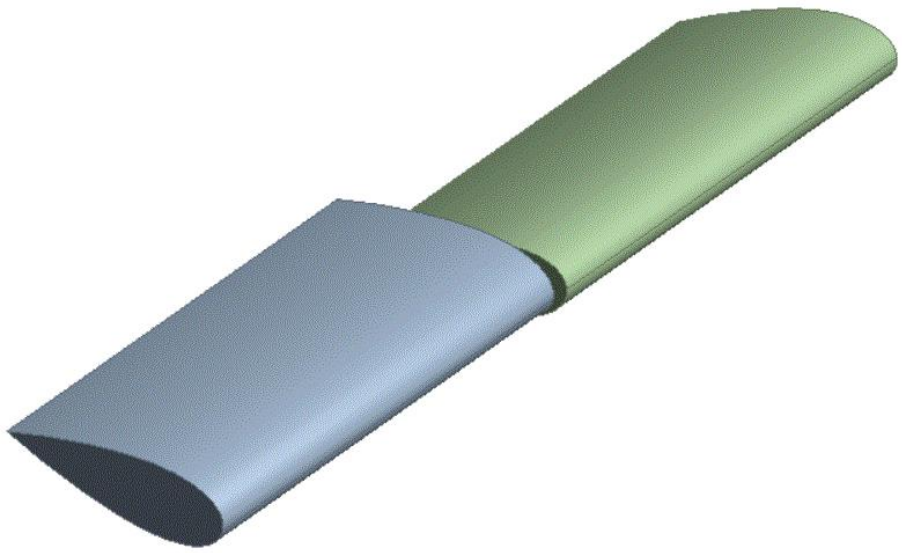
Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η ροή πάνω και κάτω (με διακεκομμένη γραμμή) από την πτέρυγα. Η ροή στο κάτω μέρος, όπου επικρατεί υπερπίεση, αποκλίνει προς τα έξω και στο πάνω μέρος όπου επικρατεί υποπίεση προς τα μέσα όπως φαίνεται. Η κίνηση αυτή γίνεται συνεχώς όσο διαρκεί η ροή και αμέσως πίσω από την πτέρυγα δημιουργούνται άπειροι μικροί

στρόβιλοι (ή στρώμα στροβίλων) το οποίο τυλίγεται συνεχώς, σχηματίζοντας σε κάποια απόσταση από την πτέρυγά τους, δύο χαρακτηριστικούς ελεύθερους στροβίλους.

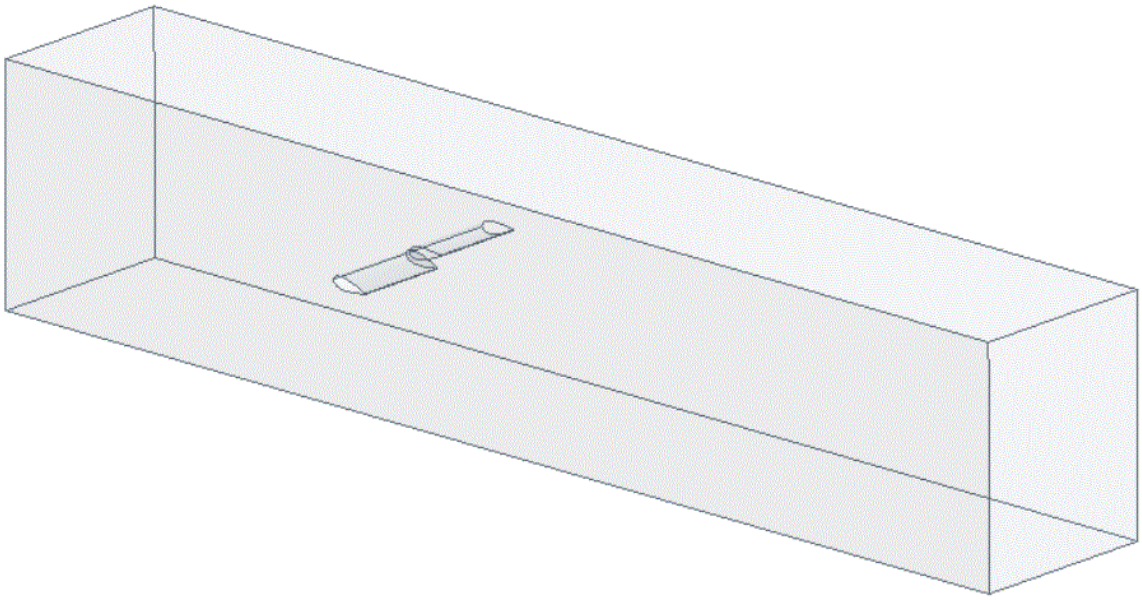
Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται το πείραμα το οποίο διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο Πατρών στο εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής και Εφαρμογών Στατιστικής Μηχανικής (Ρωμαίος 2009)[11]. Σε αυτό το πείραμα, εξετάζεται η δημιουργία, και η συμπεριφορά δύο ομόρροπα στροβίλων μέχρι τη τελική τους συγχώνευση (merging). Για τη δημιουργία των ομόρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων, χρησιμοποιήθηκαν δύο αεροτομές NACA 0030 (ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το κεφάλαιο 3) τοποθετημένες σε ίση και αντίθετη γωνίας προσβολής ($\pm 8^o$). Ο αριθμός Reynolds για τη συγκεκριμένη ροή είναι 133000. Σκοπός της προσομοίωσης είναι η εξαγωγή στιγμιότυπων (contours) που παριστάνουν τις συνιστώσες της ταχύτητας u,v,w (μέσες χρονικά τιμές – RANS), και η σύγκριση τους με παρόμοια contours από το πείραμα. Το σύστημα του μοντέλου (setup) αποτελεί ίδιο με αυτό στο κεφάλαιο 3.

4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Το σύστημα των πτερύγων που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το υπολογιστικό πεδίο στο οποίο αναλύθηκε η ροή έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3, και αποτελεί «αντίγραφο» της αεροσήρραγας στην οποία έλαβε χώρα το συγκεκριμένο πείραμα[11].



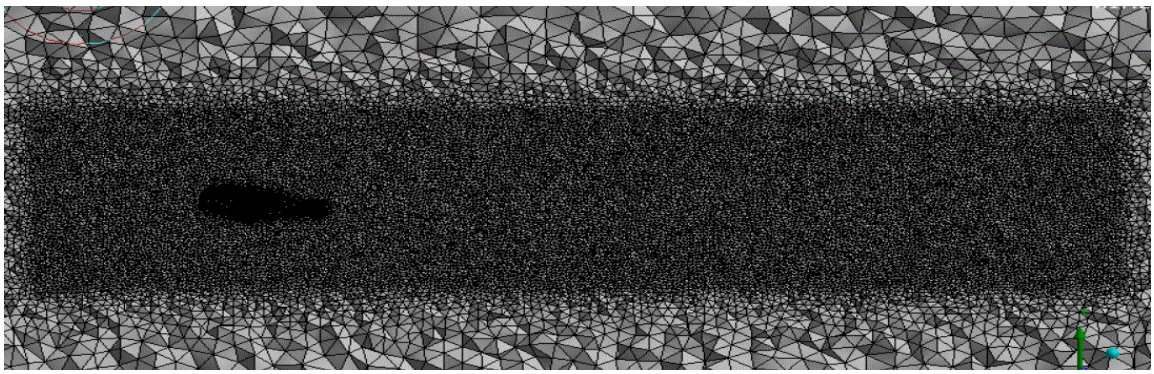
Σχήμα 4.2 : *Πτέρυγες NACA 0030 τοποθετημένες σε ίση και αντίθετη γωνία προσβολής ($\pm 8^o$)*



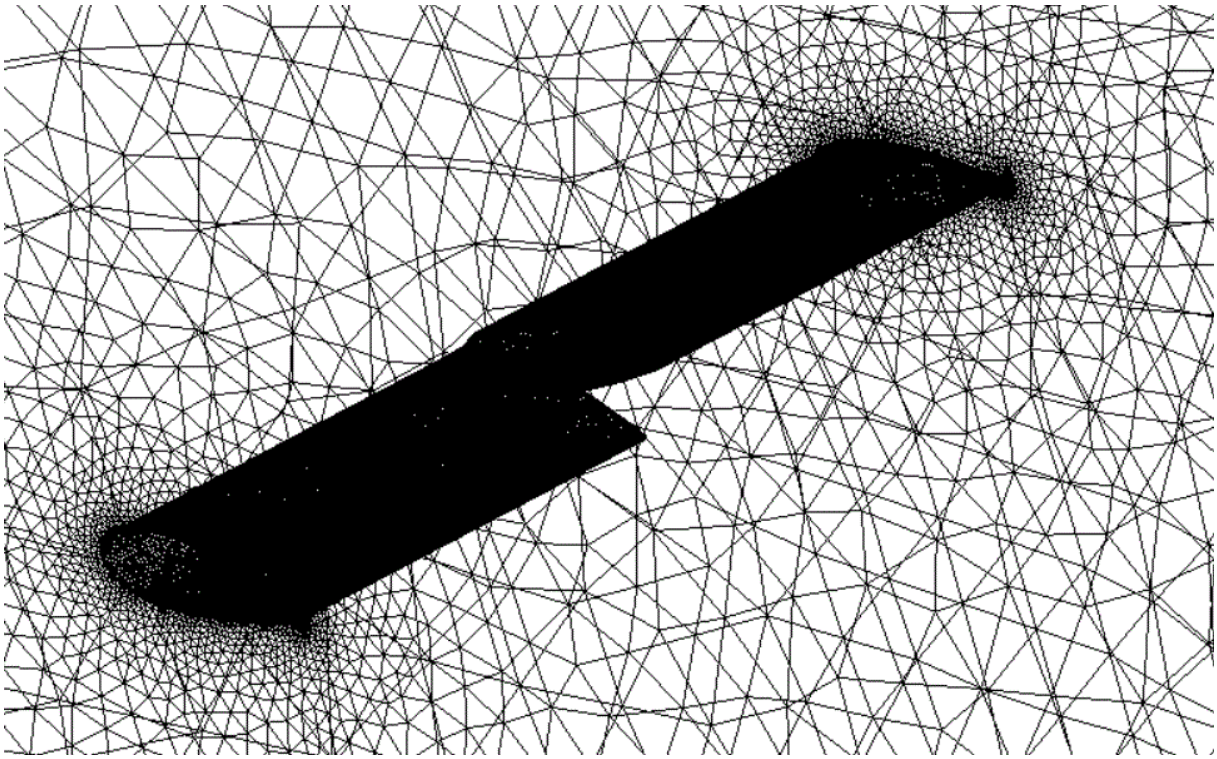
Σχήμα 4.3 *: Υπολογιστικό πεδίο*

4.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3 αποτέλεσε σημαντική βοήθεια για τη διακριτοποίηση που έπρεπε να γίνει ώστε να μπορεί να προσομοιωθεί κατάλληλα το ζεύγος των στροβίλων που δημιουργείται. Να σημειωθεί εδώ, πως οι στρόβιλοι που δημιουργούνται, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα είναι της τάξης των 2cm. Αυτό καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικό το πλέγμα, καθώς το μέγεθος των κελιών που πρέπει να χρησιμοποιηθεί (ειδικά στην αρχή δημιουργίας των στροβίλων) θα πρέπει να είναι της τάξης των mm. Για αυτό το λόγο, στο απόρρεμα της πτέρυγα χρησιμοποιήθηκαν κελιά μεγέθους 4mm (μέγιστο). Το μέγεθος των κελιών, με τα οποία διακρητιποιήθηκαν οι επιφάνειες είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3. Να σημειωθεί, ότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν πραγματοποιήθηκε μελέτη για την επίδραση του υπολογιστικού πλέγματος πυκνώνοντάς το (mesh independence study), λόγω του ήδη αυξημένου υπολογιστικού κόστους του παρόντος μοντέλου.



Σχήμα 4.4: *Πύκνωση του πλέγματος γύρω από τη πτέρυγα και πίσω από αυτή*



Σχήμα 4.5 *: Διακριτοποίηση στις επιφάνειες των πτερύγων*

Αριθμός Κελιών	8,261,604
Max Skewness	0.86
Averaged Skewness	0.22

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, τα «χαρακτηριστικά ποιότητας» των κελιών είναι μέσα στο εύρος όπου ο επιλυτής Fluent κάνει αποδεκτά.

4.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

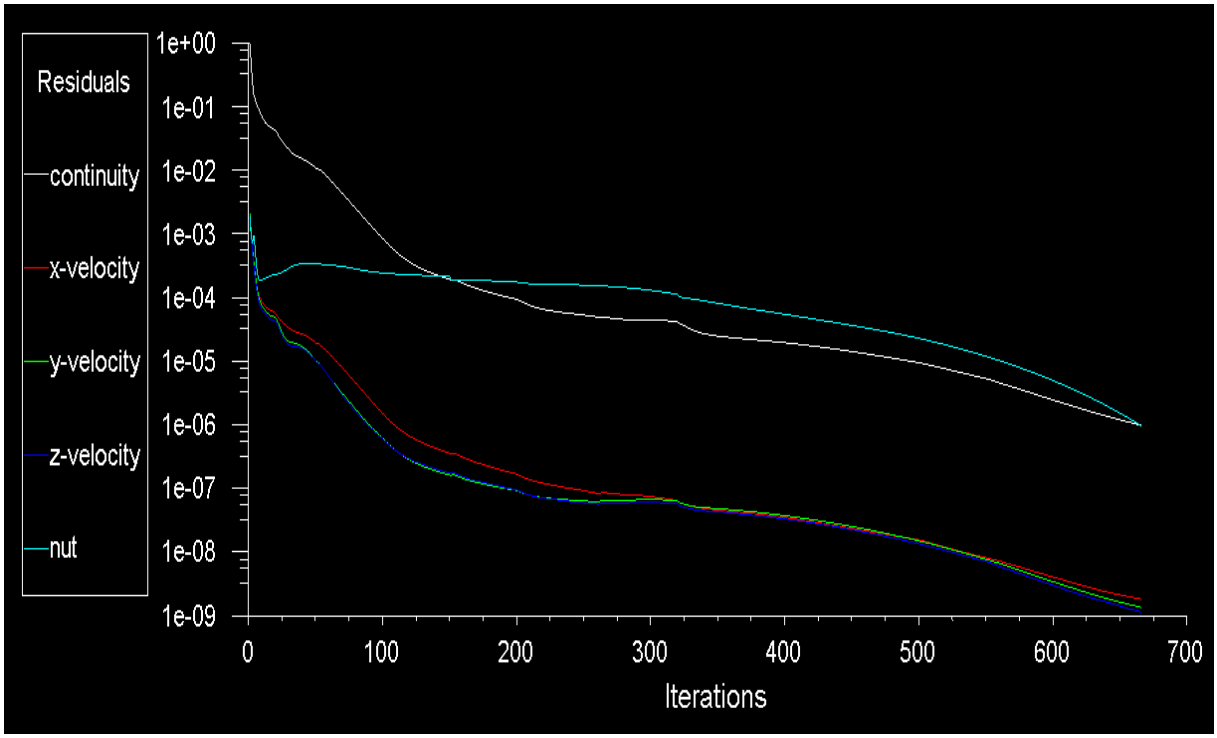
Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω

Είσοδος	Velocity Inlet	$\upsilon = 20 \frac{m}{s}$
Έξοδος	Pressure Outlet	$P = 101325\ Pa$
Επιφάνειες πτέρυγας	Non-slip Wall	-
Τέσσερις επιφάνειες περιμετρικά (στην πραγματικότητα οι τοίχοι της αεροσήρραγας)	Symmetry	-

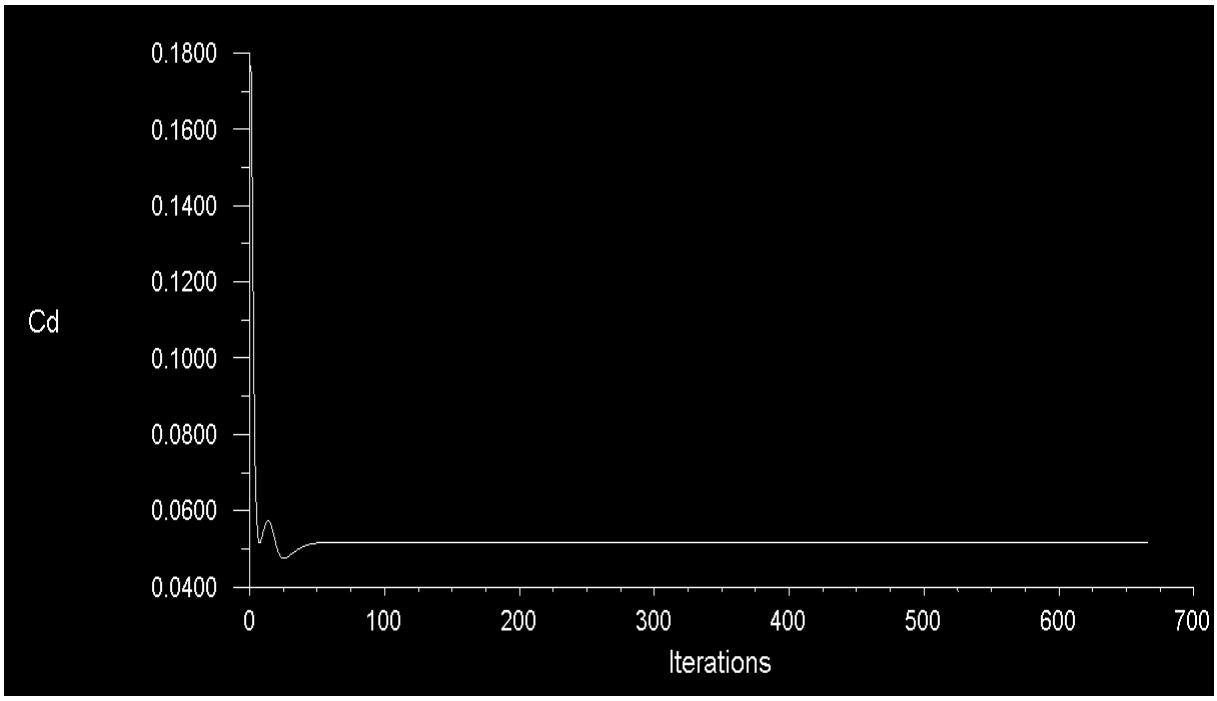
4.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως αναφέρθηκε ήδη στο κεφάλαιο 3, μπορούμε να επαληθεύσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων μίας προσομοίωσης μόνιμης ροής (steady state) με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

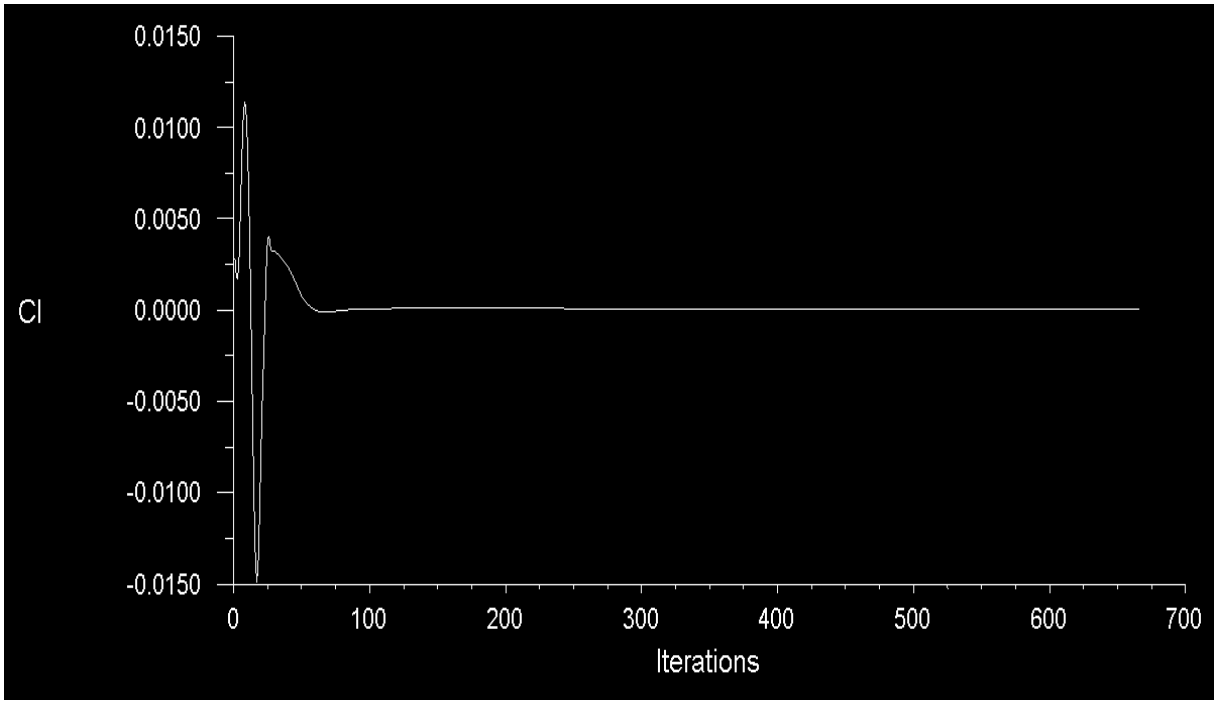
1. Παρατηρούμε ότι οι τιμές των residuals για κάθε μία εξίσωση που επιλύεται, έχουν φθάσει το κριτήριο που ορίσθηκε, το οποίο είναι και σε αυτήν την περίπτωση 10^{-6} (Σχήμα 4.7).
2. Η τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας έχει σταθεροποιηθεί μετά από περίπου 50 επαναλήψεις (Σχήμα 4.8).
3. Επίσης, και ο συντελεστής άντωσης έχει σταθεροποιηθεί μετά το πέρας των 50 επαναλήψεων. Εκτός αυτού, παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή άντωσης είναι περίπου μηδέν, γεγονός απόλυτα λογικό αφού οι πτέρυγες είναι τοποθετημένες σε ίσες και αντίθετες γωνίες προσβολής (Σχήμα 4.9).
4. Εφόσον η προσομοίωση αφορά μόνιμη ροή πρέπει να διασφαλίσουμε ότι η αρχή διατήρησης της μάζας ισχύει (Σχήμα 4.10).



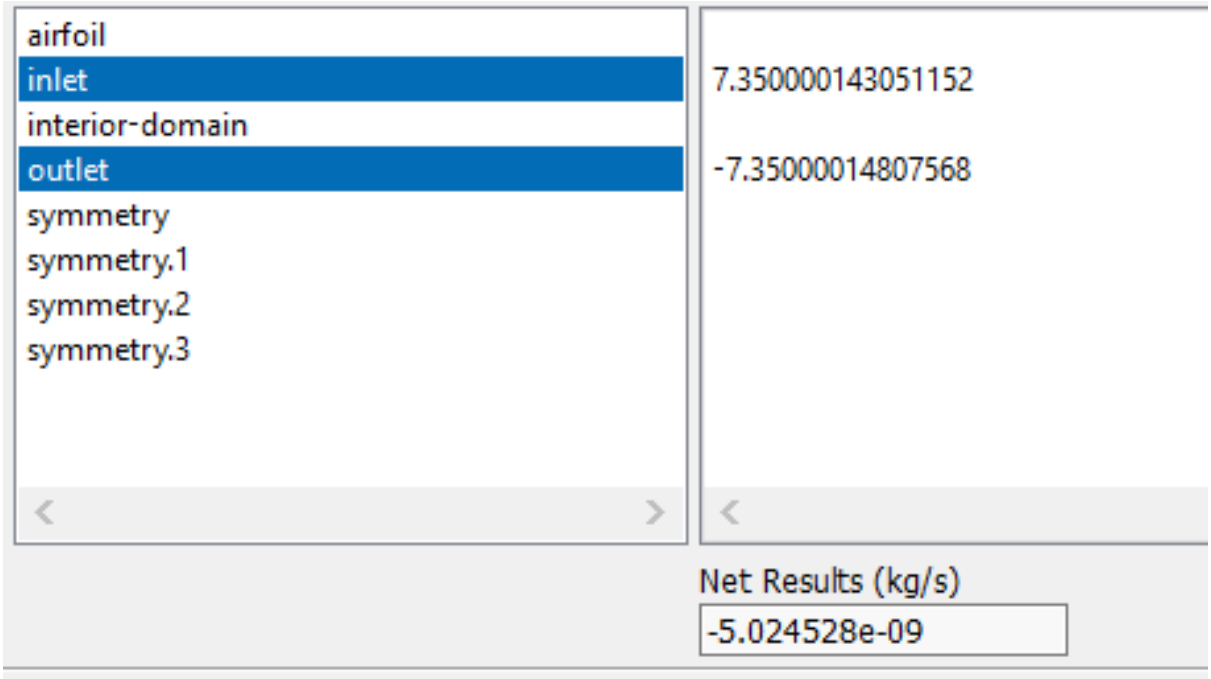
Σχήμα 26 : *Καταγραφή των residuals στη περίπτωση της διπλής πτέρυγας*



Σχήμα 4.7 : *Καταγραφή του συντελεστή οπισθέλκουσας για τη περίπτωση της διπλής πτέρυγας*



Σχήμα 4.8 : *Καταγραφή του συντελεστή άντωσης για την περίπτωση της διπλής πτέρυγας*

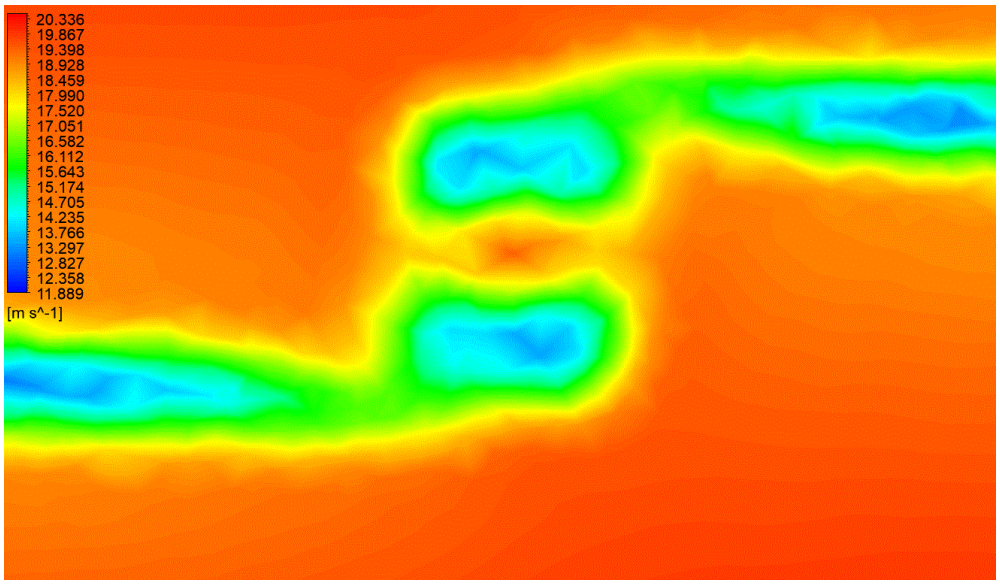


Σχήμα 4.9 : *Υπολογισμός της ροής μάζας για τη περίπτωση της διπλής πτέρυγας (εικόνα από το Fluent)*

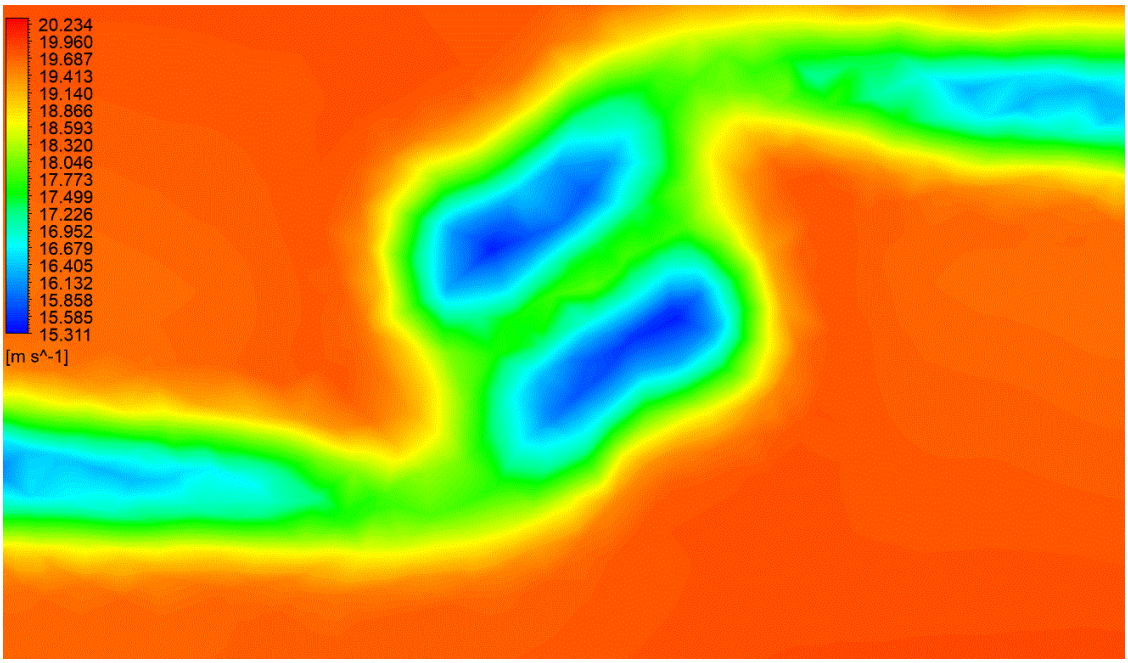
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζουν τις μέσες χρονικά συνιστώσες της ταχύτητας στους σταθμούς μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο πείραμα. Επίσης παρατίθενται και τα πειραματικά αποτελέσματα για την πιστοποίηση της ορθότητας των αποτελέσματα.

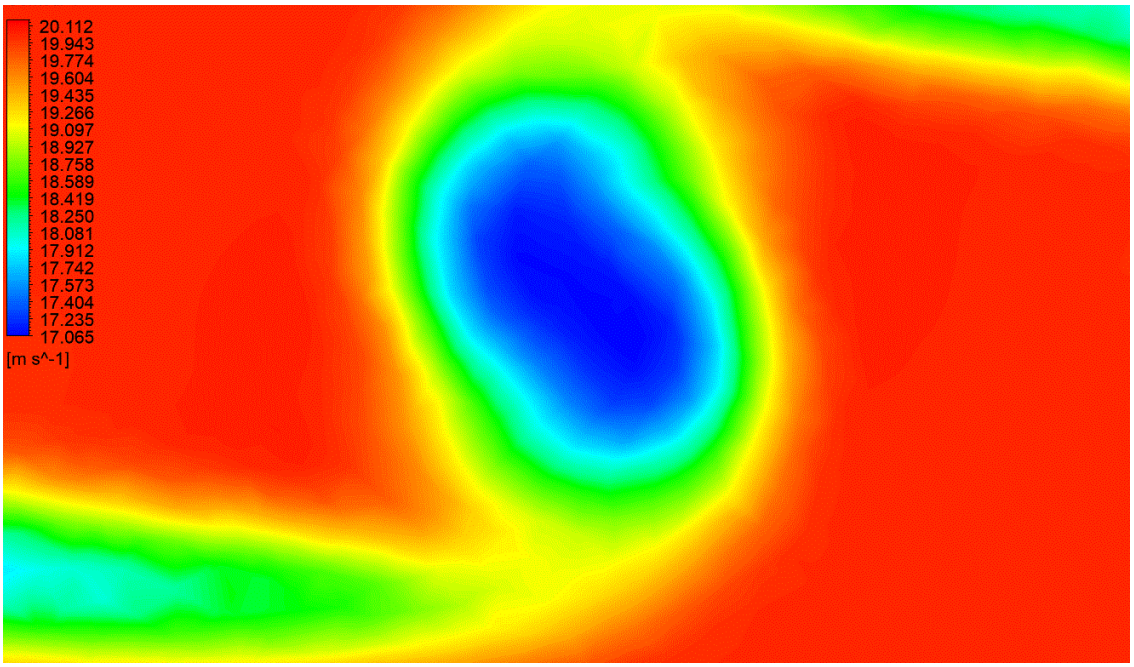
Ταχύτητα u



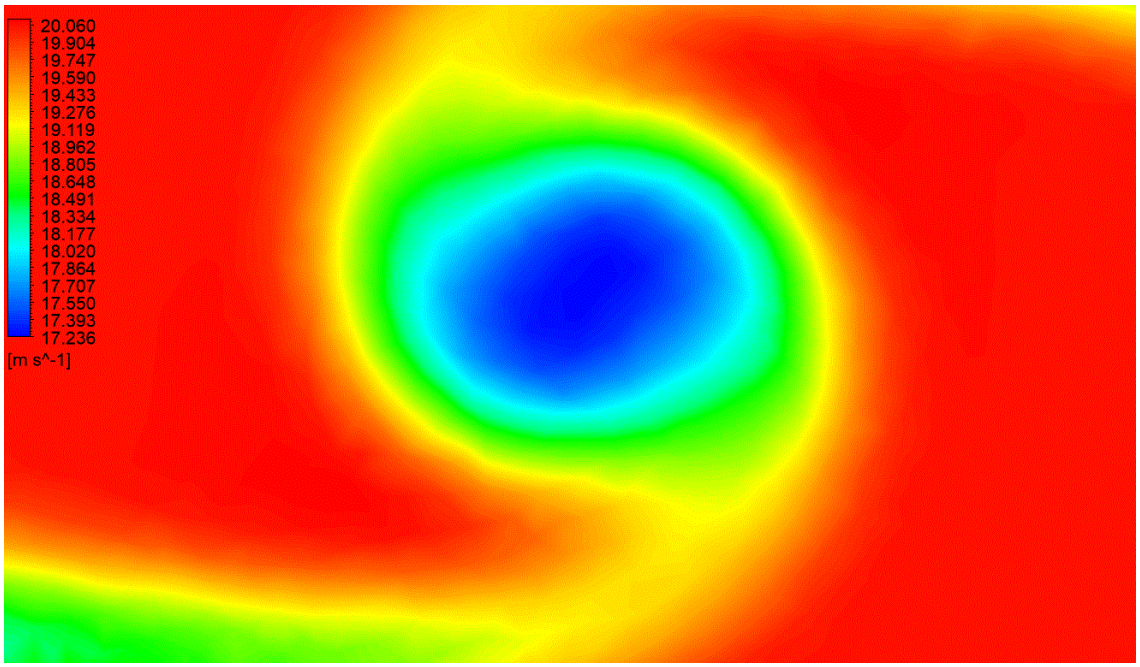
Σχήμα 4.10 *: Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=0.3 πίσω από τη πτέρυγα*



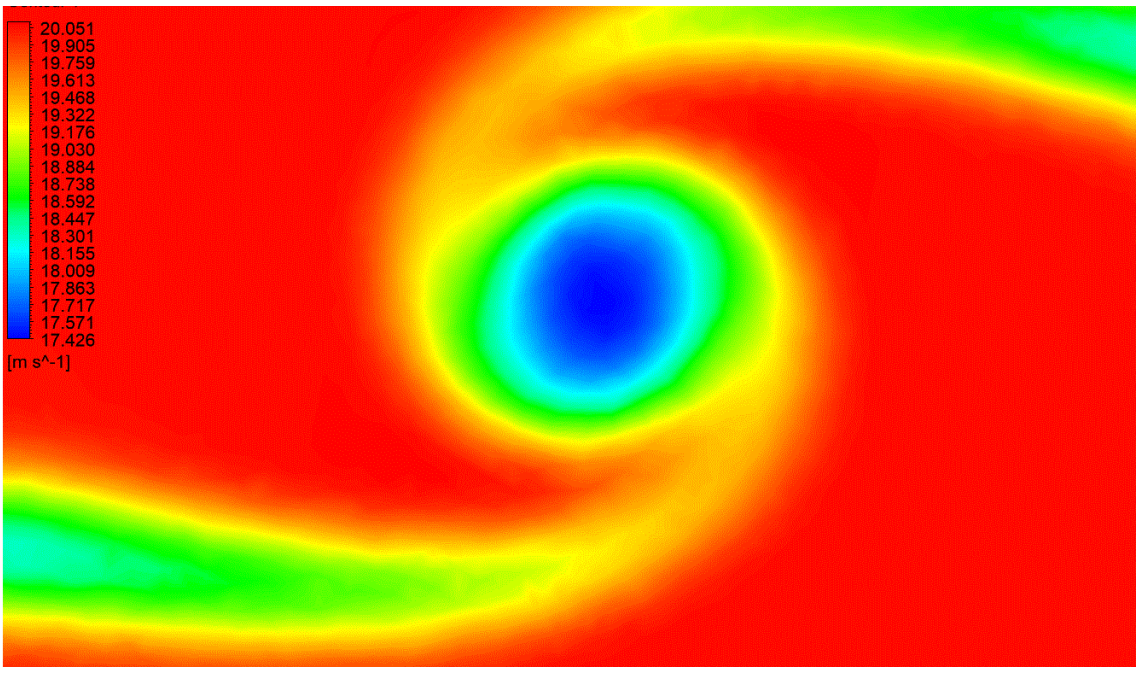
Σχήμα 4.11 : *Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=1 πίσω από τη πτέρυγα*



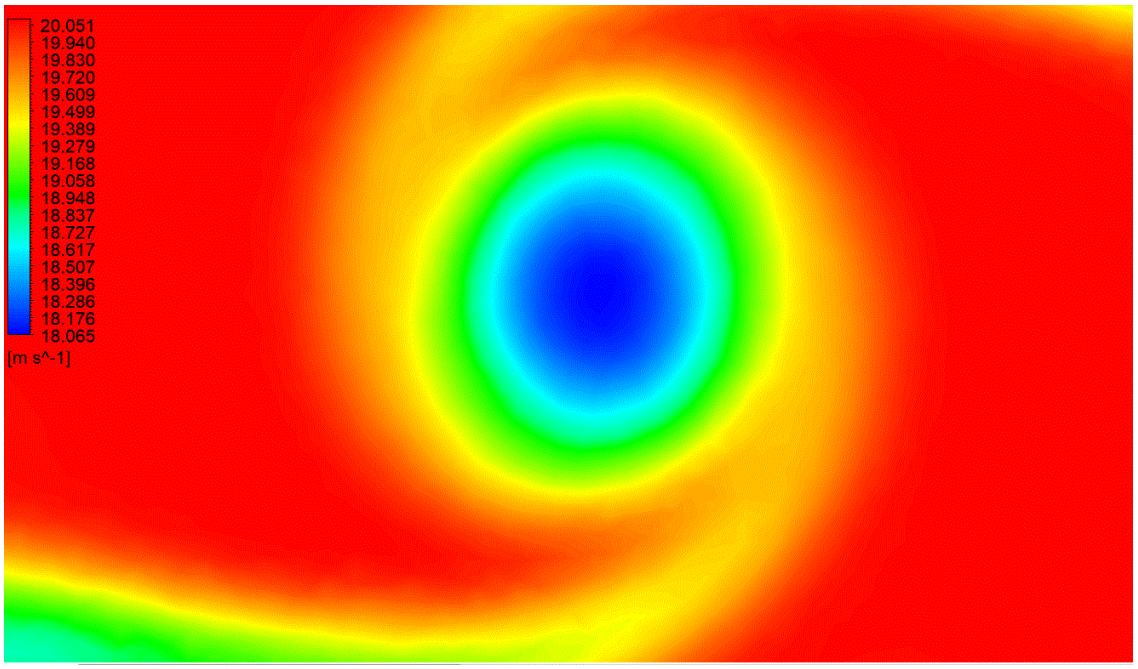
Σχήμα 4.12 : *Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=2 πίσω από τη πτέρυγα*



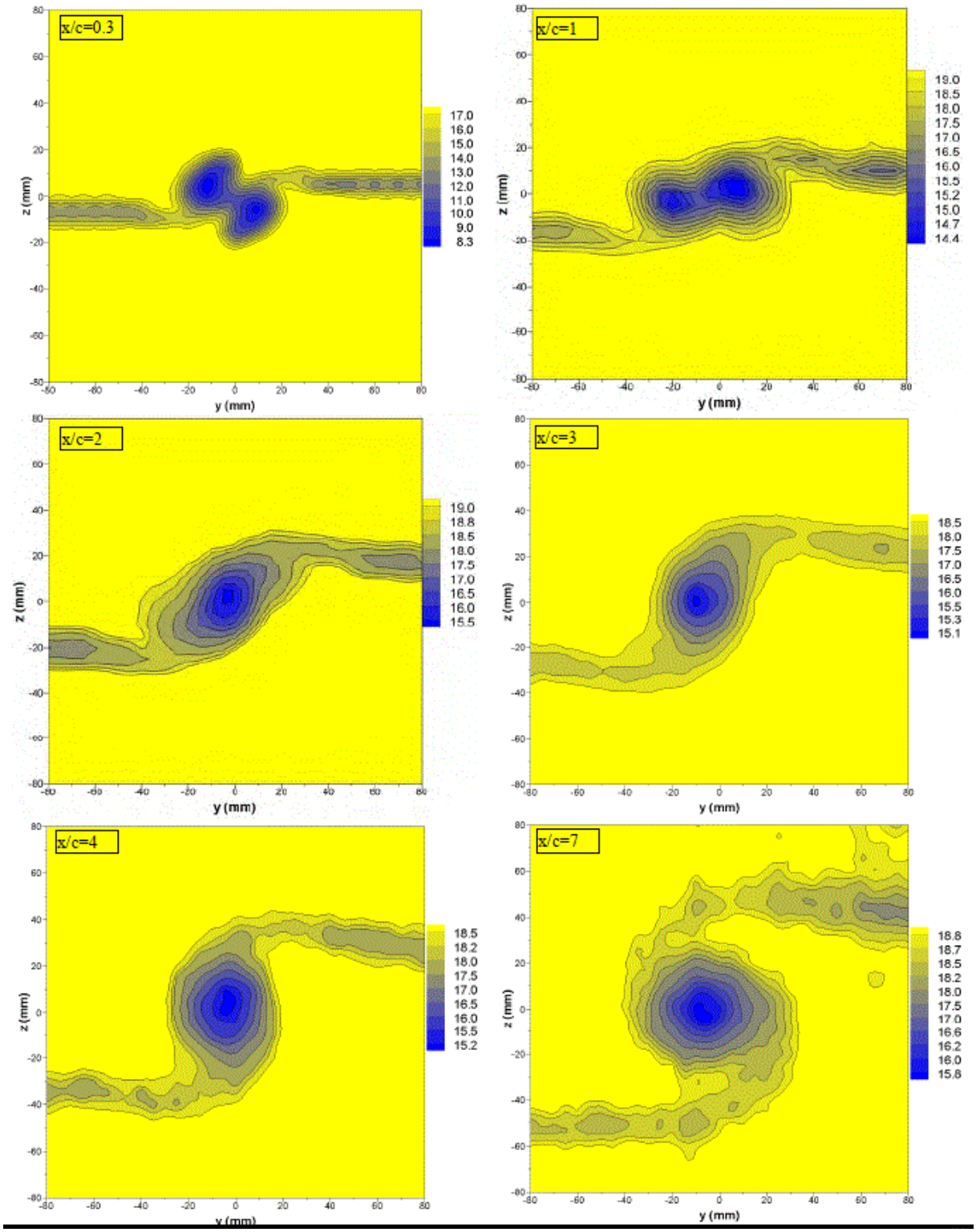
Σχήμα 4.13 : *Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=3 πίσω από τη πτέρυγα*



Σχήμα 4.14 : *Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=4 πίσω από τη πτέρυγα*

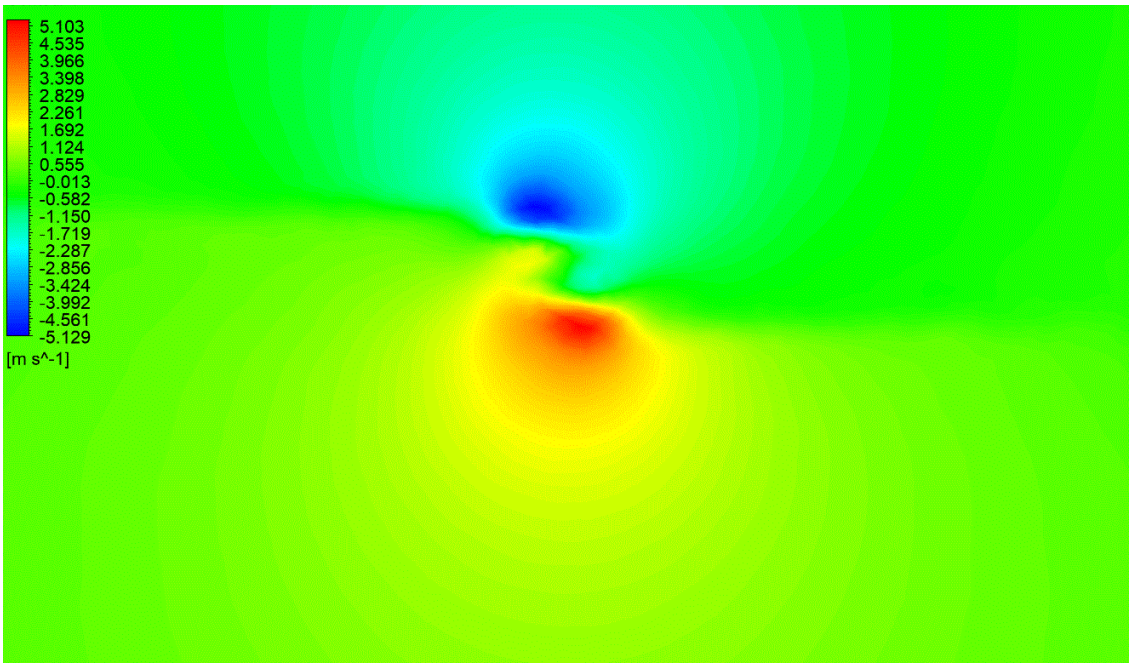


Σχήμα 4.15 : *Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=7 πίσω από τη πτέρυγα*

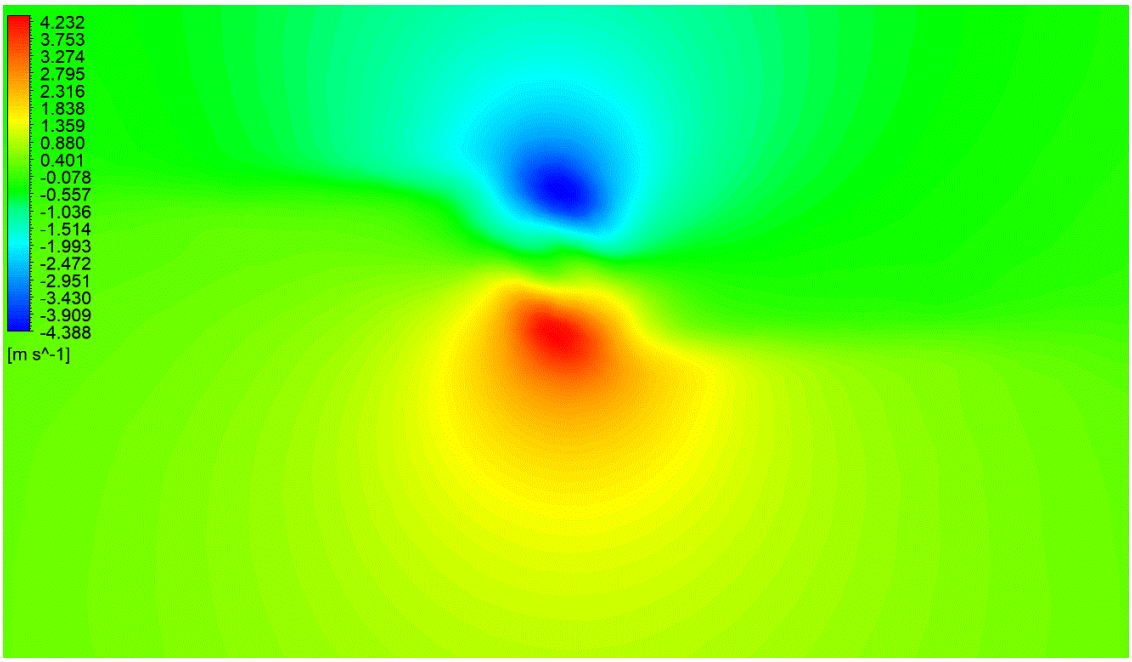


Σχήμα 4.16 : *Πειραματικά αποτελέσματα μέσου πεδίου ταχύτητας u[11]*

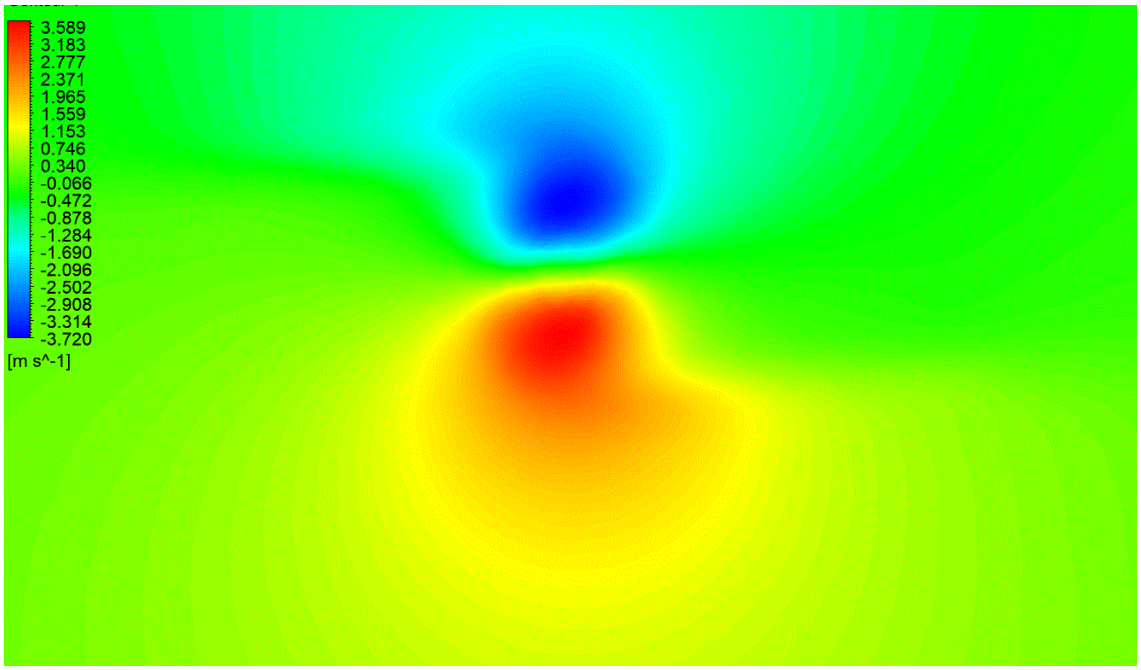
Ταχύτητα v



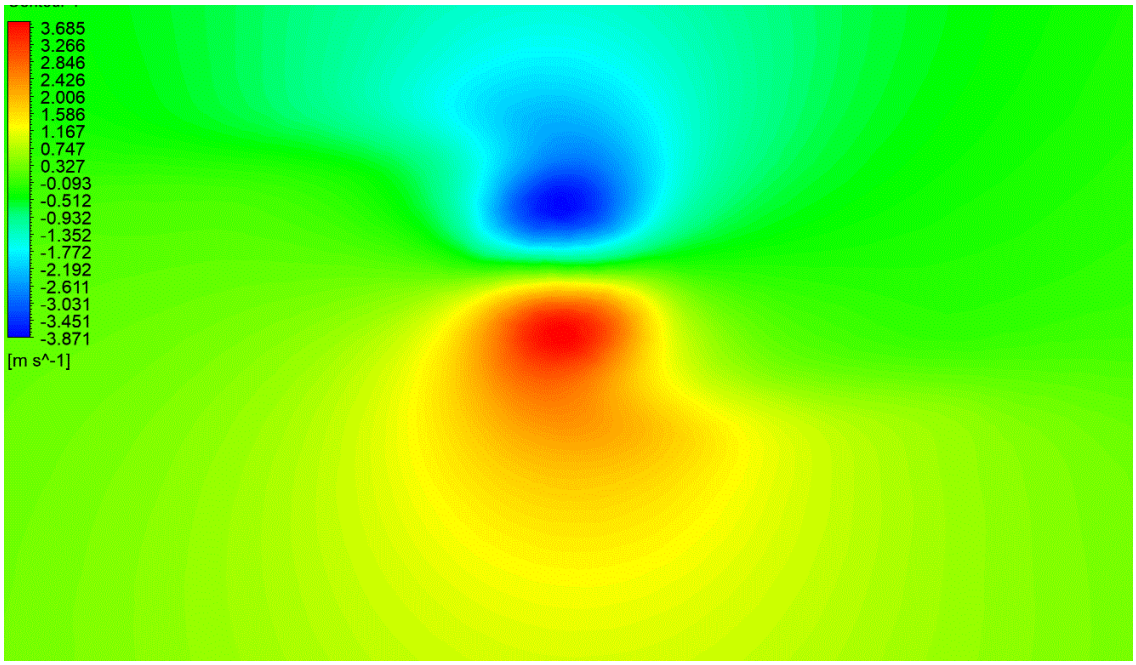
Σχήμα 4.17 : *Κατανομή της ταχύτητας v στη θέση x/c=0.3 πίσω από τη πτέρυγα*



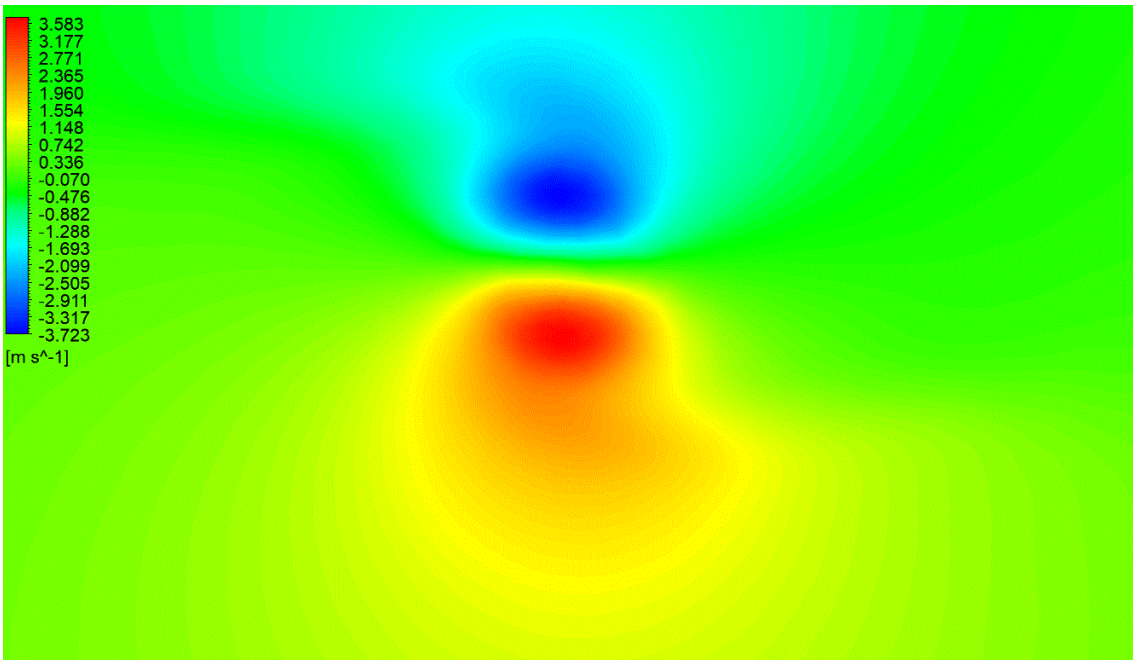
Σχήμα 4.18 : *Κατανομή της ταχύτητας v στη θέση x/c=1 πίσω από τη πτέρυγα*



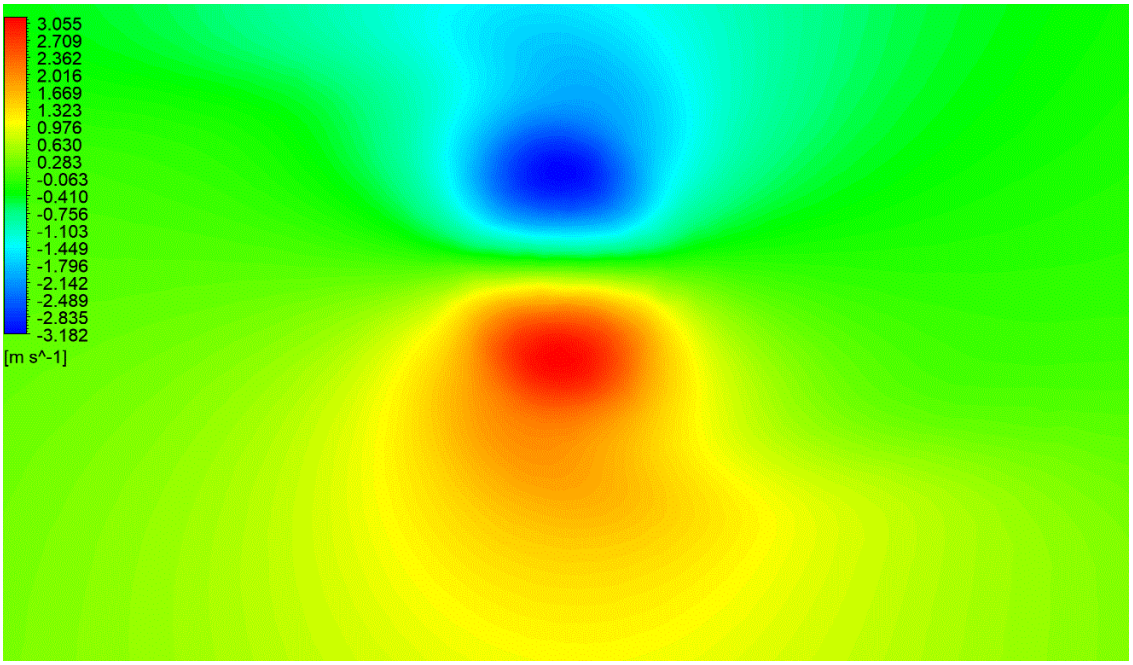
Σχήμα 4.19 : *Κατανομή της ταχύτητας v στη θέση x/c=2 πίσω από τη πτέρυγα*



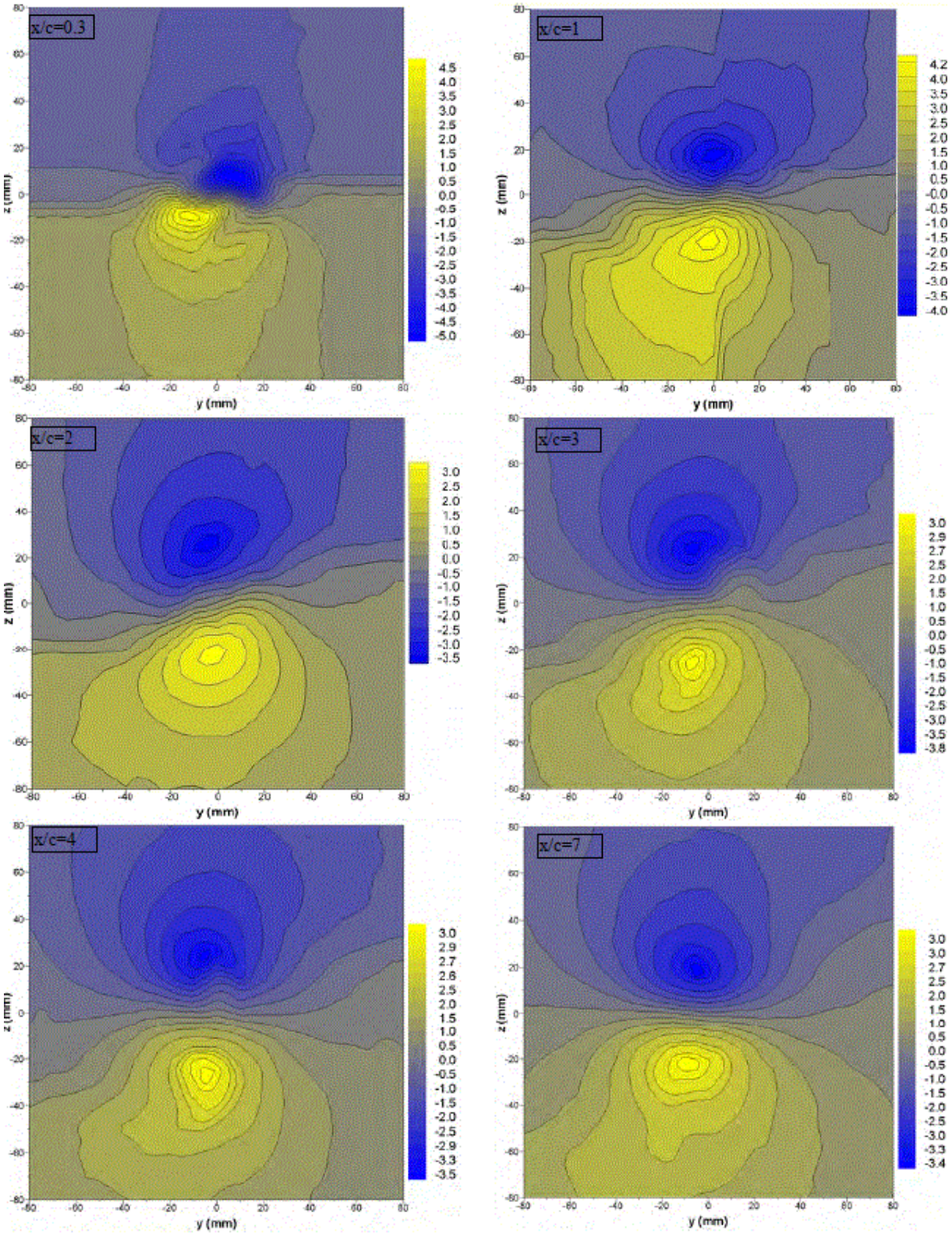
Σχήμα 4.20 : *Κατανομή της ταχύτητας u στη θέση x/c=3 πίσω από τη πτέρυγα*



Σχήμα 4.21 : *Κατανομή της ταχύτητας v στη θέση x/c=4 πίσω από τη πτέρυγα*

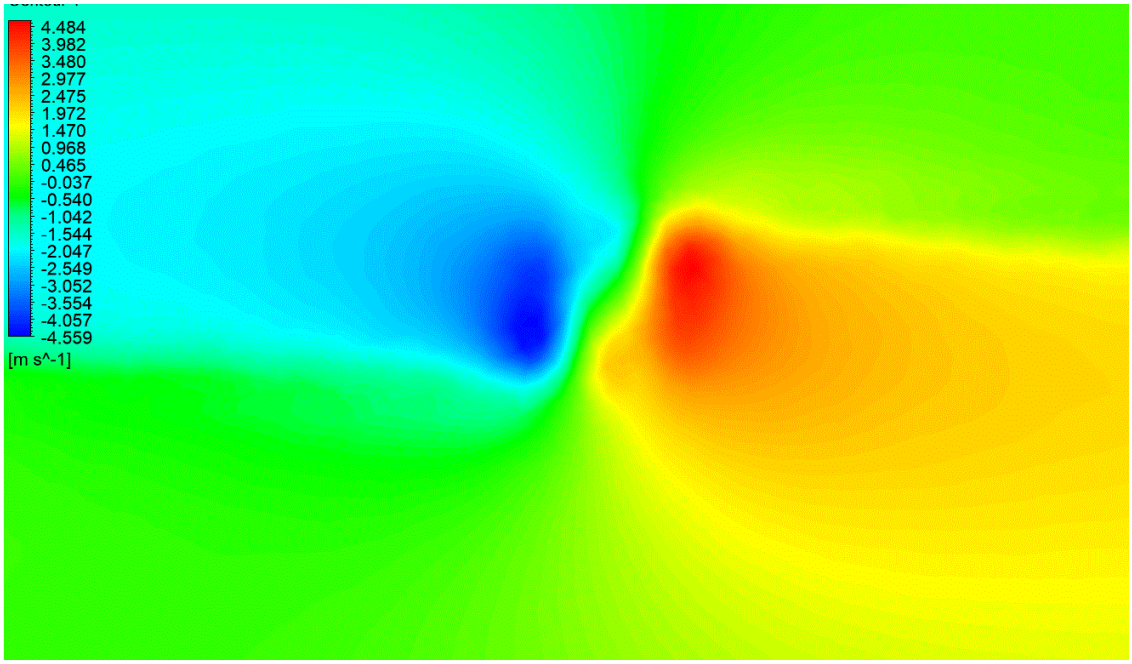


Σχήμα 4.22 : *Κατανομή της ταχύτητας v στη θέση x/c=7 πίσω από τη πτέρυγα*

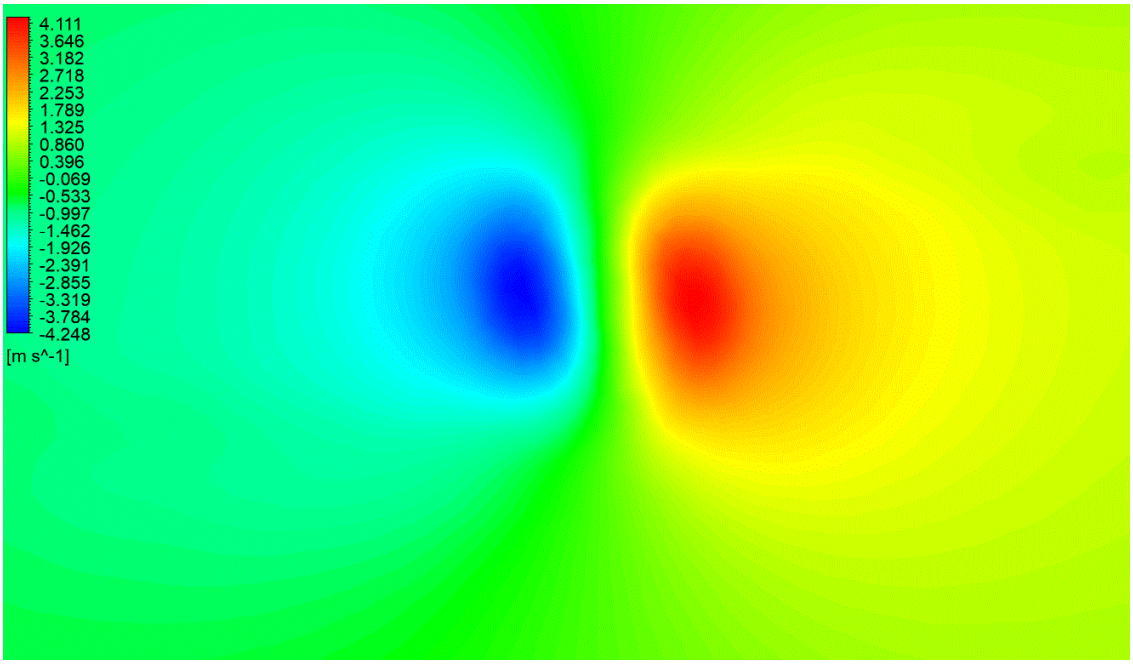


Σχήμα 4.23 : *Πειραματικά αποτελέσματα του μέσου πεδίου ταχύτητας v[11]*

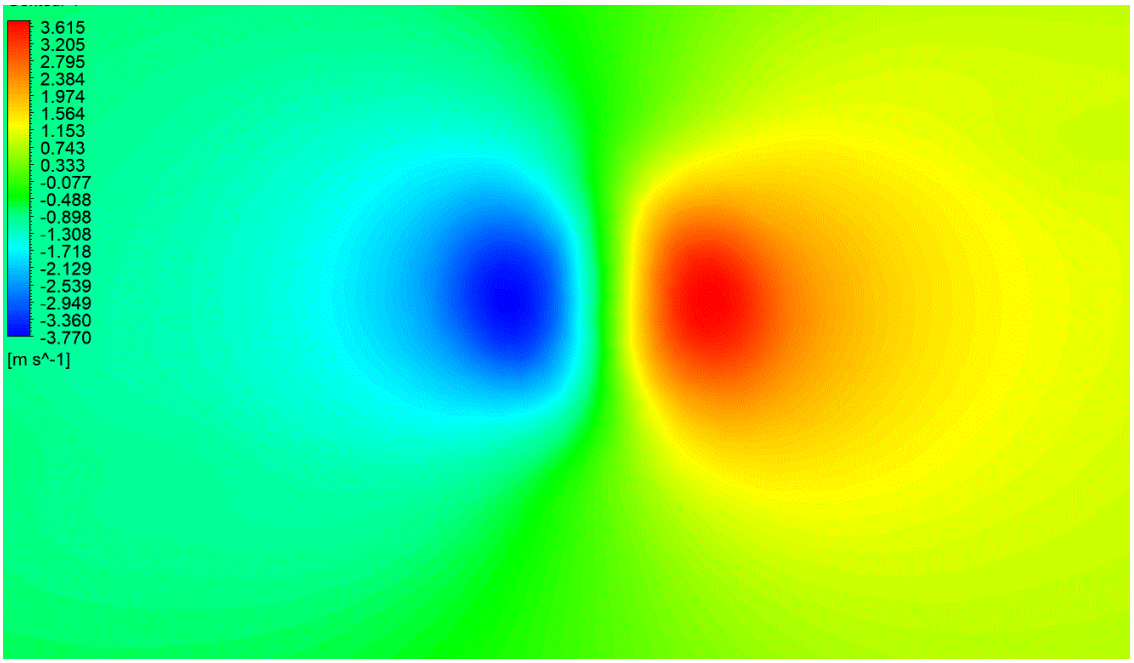
Ταχύτητα w



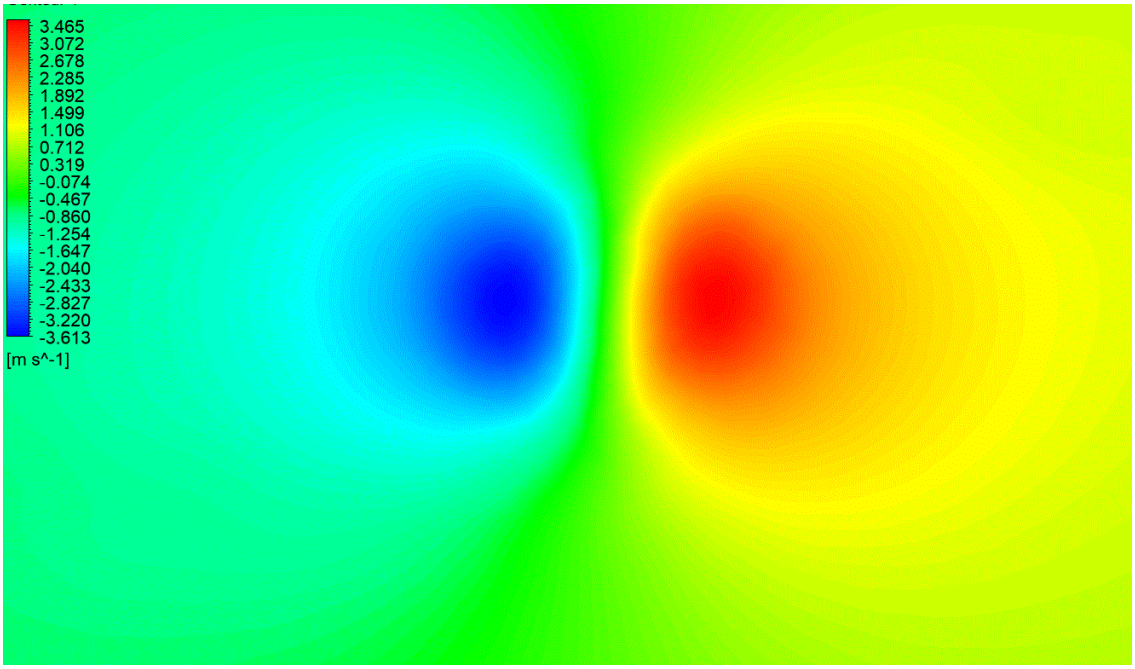
Σχήμα 4.24 : *Κατανομή της ταχύτητας w στη θέση x/c=0.3 πίσω από τη πτέρυγα*



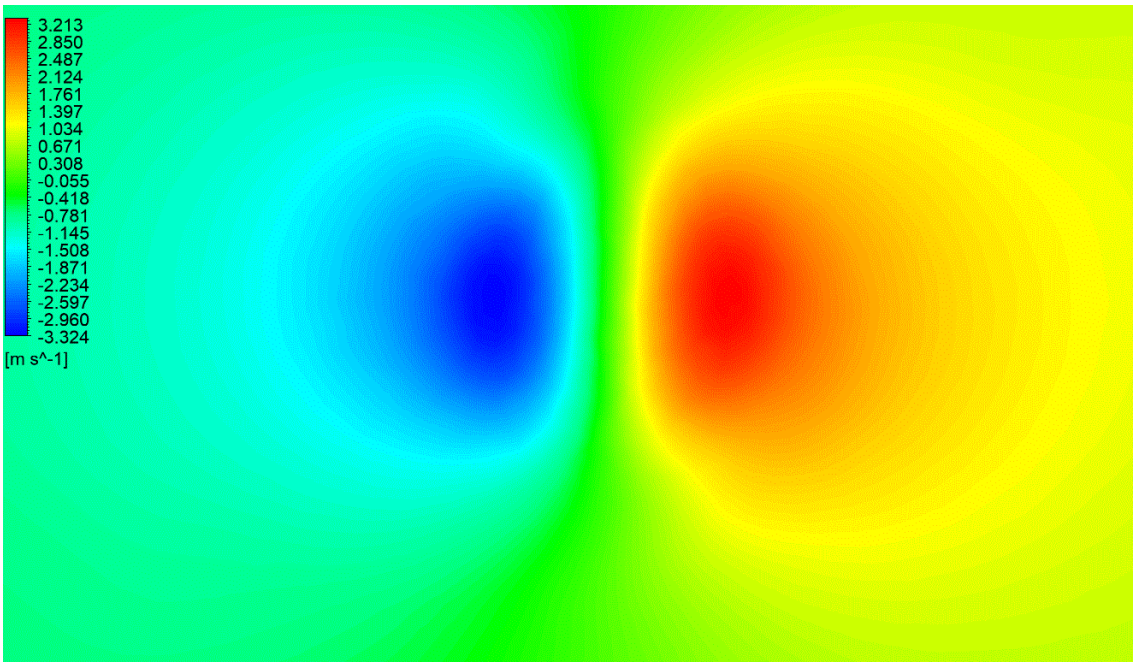
Σχήμα 4.25 : *Κατανομή της ταχύτητας w στη θέση x/c=2 πίσω από τη πτέρυγα*



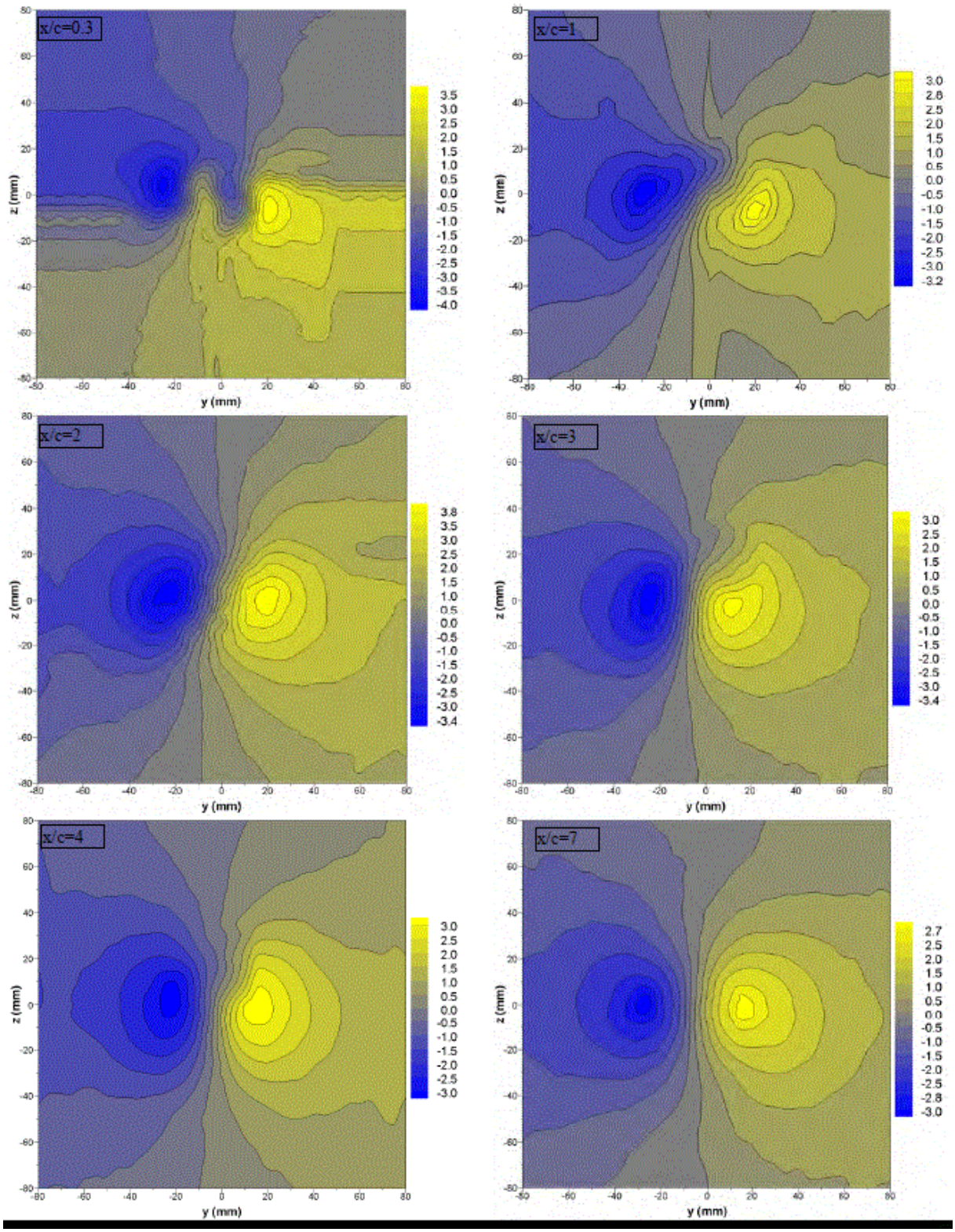
Σχήμα 4.26 : *Κατανομή της ταχύτητας w στη θέση x/c=3 πίσω από τη πτέρυγα*



Σχήμα 4.27 : *Κατανομή της ταχύτητας w στη θέση x/c=4 πίσω από τη πτέρυγα*



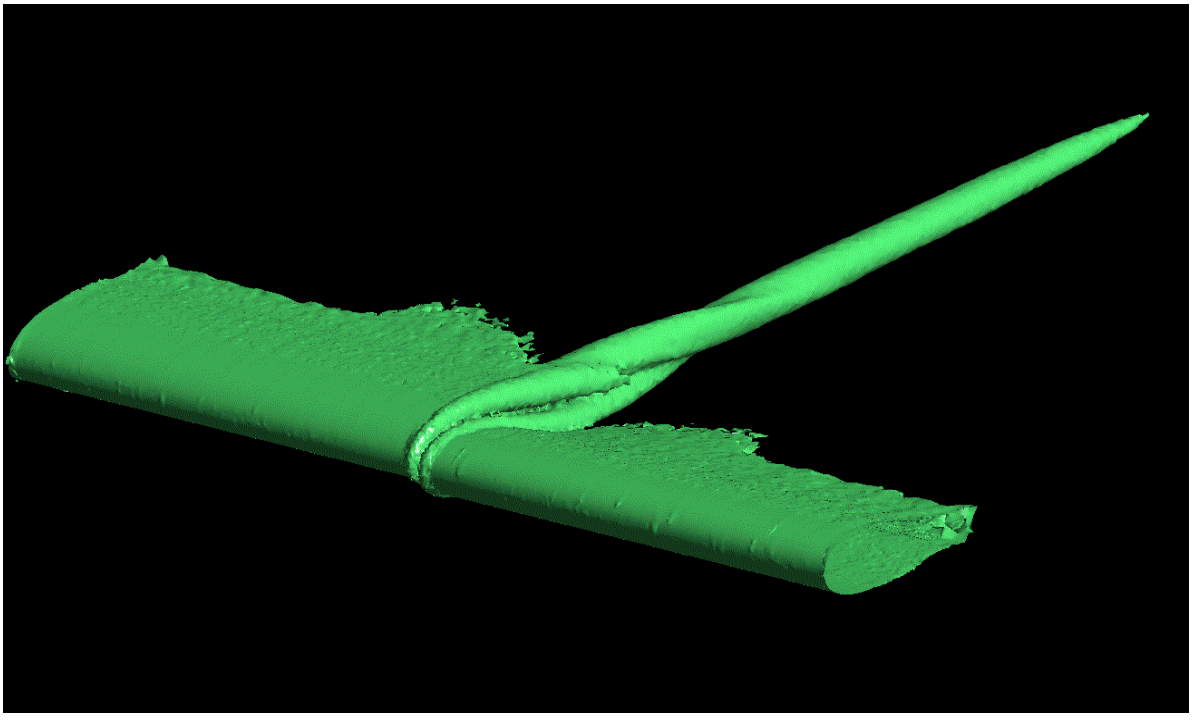
Σχήμα 4.28 : *Κατανομή της ταχύτητας w στη θέση x/c=7 πίσω από τη πτέρυγα*



Σχήμα 4.29 : *Κατανομή της ταχύτητας w στη θέση x/c=7 πίσω από τη πτέρυγα[11]*

Γενικά παρατηρείται μία καλή σχετικά συμφωνία, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών της προσομοίωσης. Όσον αφορά τη ταχύτητα u παρατηρούμε ότι ο στρόβιλος που δημιουργείται στο μοντέλο δεν έχει καθαρά στρογγυλή δομή όπως στην πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός των περίπου πέντε κελιών που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν έναν στρόβιλο διαμέτρου περίπου 2cm (element size = 4mm). Επίσης από τα στιγμιότυπα της ταχύτητας u φαίνεται η κίνηση των στροβίλων μεταξύ τους (x/c=0.3), και πως η συγχώνευση των στροβίλων πραγματοποιείται στη θέση x/c=2, όπως και στα πειραματικά αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι η τιμή της ταχύτητας u μειώνεται σταδιακά όσο ο στρόβιλος απομακρύνεται από τη πτέρυγα, γεγονός που υποδεικνύει την μείωση της έντασης του. Μέχρι τη θέση x/c=0.7 βλέπουμε ότι ο συγγενευμένος στρόβιλος δεν έχει εξασθενίσει (decay). Τέλος, στη προσομοίωση παρουσιάζεται πως ο στρόβιλος (από την αρχή της δημιουργίας των δύο στροβίλων μέχρι και τη τελική θέση x/c=7 του συγχωνευμένου στροβίλου) έχει κάπως μεγαλύτερη ένταση απότι στη πραγματικότητα. Αυτή η παρατήρηση φαίνεται, από την ταχύτητα u που επικρατεί στο κέντρο του στροβίλου. Σε όλους τους σταθμούς μέτρησης, η ταχύτητα u είναι μεγαλύτερη απότι στα πειραματικά δεδομένα. Αυτό πιστεύεται ότι οφείλεται στο «χαμηλό» αριθμό κελιών, με τα οποία διακριτοποιείται η περιοχή του στροβίλου.

Εκτός από το πεδίο της μέσης χρονικά ταχύτητας u, παρατηρούμε ότι και τα πεδία της μέσης χρονικά ταχύτητας v,w είναι συμβατά με αυτά του πειράματος.



Σχήμα 4.30 : *Τρισδιάστατη απεικόνιση του ζεύγους των ομόρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων και η συγχώνευσή τους στη θέση x/c=2*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρχικά, θα ήταν σκόπιμο να σημειωθεί, πως για την εκμάθηση καθώς και για την εξειδικευμένη ανάλογα με το εκάστοτε υπό μελέτη πρόβλημα σωστή χρήση ενός πολύπλοκου λογισμικού όπως είναι το Ansys Fluent, χρειάστηκε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται η γεωμετρία μίας αεροτομής (εγκάρσια τομή μίας πτέρυγας πεπερασμένου μήκους) καθώς και οι αεροδυναμικές δυνάμεις και συντελεστές που μελετώνται κατά τη ροή γύρω από αυτήν. Επίσης έγινε μία αναφορά στην υπολογιστική ρευστοδυναμική καθώς και στο τρόπο υλοποίησης της, με περισσότερες λεπτομέρειες να αναλύονται στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάσθηκαν συνοπτικά, για λόγους εποπτείας, οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των ρευστών. Στο παράρτημα Α γίνεται μία πιο εκτεταμένη ανάλυση σχετικά με τις εξισώσεις Navier – Stokes. Έγινε αναφορά στους τρεις βασικούς νόμους τους οποίους υπακούουν τα ρευστά (αρχή διατήρησης μάζας, αρχή διατήρησης ορμής, αρχή διατήρησης ενέργειας). Στη συνέχεια, περιγράφθηκε αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας ενός λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής όπως είναι το Ansys Fluent, καθώς επεξηγήθηκαν και οι διάφοροι αλγόριθμοι και ρυθμίσεις που πρέπει ο χρήστης να λαμβάνει υπόψιν για προσομοίωση κίνησης των ρευστών. Έγινε αναφορά και στους διαφορετικούς τρόπους μοντελοποίησης της τύρβης, καθώς και στα διαφορετικά μοντέλα τύρβης τα οποία εμπεριέχει το Fluent.

Το κεφάλαιο 3 αποτελεί την προσομοίωση του ροικού πεδίου γύρω από μία πτέρυγα πεπερασμένου μήκους NACA 0030. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση δόθηκε έμφαση στους αεροδυναμικούς συντελεστές καθώς και στο στρόβιλο απορρέματος που εμφανίζεται στην άκρη της πτέρυγας (wingtip). Προσομοιώθηκε η συμπεριφορά του ροικού πεδίου σε πέντε διαφορετικές γωνίες προσβολής και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή άντωσης και οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας προσβολής. Από αυτά φάνηκε η άμεση εξάρτηση των δύο παραπάνω συντελεστών από την γωνία προσβολής, και η συμφωνία των διαγραμμάτων με τα θεωρητικά που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 1. Επίσης κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή πίεσης σε σχέση με την επιφάνεια της πτέρυγας. Τέλος πραγματοποιήθηκε μελέτη για να εξετασθεί η επίδραση του πλέγματος στα αποτελέσματα (mesh independence study), και αποφάνθηκε, πως δεδομένης της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύς, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά..

Το κεφάλαιο 4 αποτελεί τη προσομοίωση του ζεύγους των ομόρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων που δημιουργούνται από δύο πτέρυγες πεπερασμένου μήκους τοποθετημένες σε ίσες και αντίθετες γωνίες προσβολής ($\pm 8^o$). Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 3 αποτέλεσαν σημαντική βοήθεια για την επιλογή των διάφορων ρυθμίσεων ώστε να

κατασκευαστεί ένα μοντέλου που συγκλίνει με κριτήριο σύγκλισης 10^{-6}. Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε (Spalart – Almaras) φαίνεται να αποτελεί καλή επιλογή, εφόσον τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειραματικά φαίνεται να συμβαδίζουν. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η συγχώνευση των στροβίλων γίνεται στην θέση x/c=2 όπως ακριβώς και στο πείραμα, γεγονός που σημαίνει ότι το συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο για τα δεδομένα που παράγει. Επίσης παρατηρείται, ότι η ένταση των στροβίλων απορρέματος από τις πτέρυγες (και του συγχωνευμένου) είναι μεγαλύτερη. Τέλος, μπορεί κανείς να διακρίνει ότι οι στρόβιλοι απορρέματος, ακριβώς όταν ξεκινάνε να σχηματίζονται δεν έχουν κυκλική δομή, όπως αναμένεται σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα (x/c=0.3 και x/c=1). Αυτό οφείλεται στην «αραιή» διακριτοποίηση σε αυτή τη περιοχή. Όπως έχει αναφερθεί οι στρόβιλοι που παράγονται έχουν διάμετρο περίπου δύο εκατοστά. Στο παρών υπολογιστικό μοντέλο το μέγεθος των κελιών που χρησιμοποιούνται για να διακριτοποιηθούν αυτοί οι στρόβιλοι είναι τέσσερα χιλιοστά. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε έναν στρόβιλο αντιστοιχούν περίπου πέντε κελιά. Όμως λόγω της ήδη αυξημένης υπολογιστικής ισχύς που απαιτείται για ένα μοντέλο με 8,261,604, δεν υπήρχε δυνατότητα για περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος. Όσον αφορά τις τρεις συνιστώσες των ταχυτήτων που συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, φαίνεται ότι πιο «κοντά» στα πειραματικά δεδομένα είναι η ταχύτητα v, δηλαδή η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα y.

5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΛΕΨΕΙΣ

- Υπάρχει περιθώριο για προσομοίωση της συγκεκριμένης πτέρυγας και σε επιπλέον γωνίες προσβολής μεγαλύτερες των 8 μοιρών, όπου είναι η μέγιστη γωνία στη παρούσα πτυχιακή εργασία. Στη πραγματικότητα, τα αεροσκάφη πετάνε σε μεγαλύτερες γωνίες προσβολής, οπότε θα ήταν σκόπιμο να μπορέσουμε να δούμε τη συμπεριφορά της ροής σε μεγαλύτερες γωνίες. Επίσης, όπως περιγράφθηκε στο κεφάλαιο 1, υπάρχει μία μέγιστη τιμή της γωνίας προσβολής για την οποία η πτέρυγα παράγει άντωση. Οπότε κρίνεται σκόπιμο η εύρεση αυτής της γωνίας προσβολής.
- Προσομοίωση και άλλων συμμετρικών πτερύγων NACA (00xx) με σκοπό να γίνει μελέτη της επίδρασης που έχεις το πάχος της πτέρυγας στους αεροδυναμικούς συντελεστές. Επίσης μπορεί να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της ίδιας πτέρυγας για διαφορετικές τιμές χορδής με σκοπό να κατανοηθεί πως η αλλαγή αυτή επηρεάζει το ροικό πεδίο γύρω από την πτέρυγα αλλά και τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν σε αυτή
- Μελέτη επίδρασης διαφορετικών τύπου πλεγμάτων στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Μπορεί να διακριτοποιηθεί το υπολογιστικό πεδίο και με άλλα κελιά όπου εμπεριέχονται στο Fluent, όπως είναι τα εξέδρα, και να μελετηθούν οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο αυτών τύπων πλέγματος. Επίσης μπορεί να μελετηθεί και ο συνδυασμός αυτών των δύο πλεγμάτων, δημιουργώντας ένα πλέγμα το οποίο θα αποτελείται και από τετράεδρα και από εξάεδρα κελιά (hybrid mesh).
- Εκτός από τα διαφορετικά πλέγματα, μπορεί να γίνει μία μελέτη για τις διαφορετικές ρυθμίσει που υπάρχουν στο λογισμικό Fluent, και πως αυτές επηρεάζουν τα

αποτελέσματα. Για παράδειγμα, να πραγματοποιηθούν πάλι οι προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το αλγόριθμό Density Based Solver και να μελετηθούν οι διαφορές μεταξύ των δύο.

- Η μελέτη των ροών πλέον σε μη μόνιμη κατάσταση (transient flow) είναι κάτι το οποίο προτείνεται με σκοπό την μελέτη της ροής κατά τη πάροδο του χρόνου. Στη παρούσα πτυχιακή εργασία όλες οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν μόνιμες ροές (steady state flow)
- Συ συνδυασμό με τη μελέτη των μη μόνιμων ροών μπορεί να μελετηθεί η δυνατότητα που έχει το Fluent για dynamic mesh. Δηλαδή στη διάρκεια της λύσης, να στρέφεται η πτέρυγα και να αλλάζει αυτόματα και το πλέγμα γύρω από αυτήν.
- Άλλο ένα σημαντικό βήμα για μελλοντική ανάλυση, είναι η βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης αεροτομής NACA 0030. Για παράδειγμα μπορεί να μελετηθεί η διαφοροποίηση στους αεροδυναμικούς συντελεστές και στο στρόβιλο απορρέματος, δοκιμάζοντας διάφορες παραλλαγές της γεωμετρίας όπως είναι η χρήση winglets.
- Σημαντική θα ήταν και η προσομοίωση των ίδιων μοντέλων με μεγαλύτερο υπολογιστικό πεδίο, για να αποφανθεί αν η αύξηση του υπολογιστικού πεδίου επηρεάζει τα αποτελέσματα.
- Τέλος, όσον αφορά τη περίπτωση της προσομοίωσης των δύο πτερύγων υπάρχει σκοπός να πραγματοποιηθεί εκ νέου η προσομοίωση με πιο πυκνό πλέγμα στη περιοχή ενδιαφέροντος με σκοπό, οι παραγόμενοι στρόβιλοι να έχουν την κυκλική δομή που αναμένεται. Το παρόν μοντέλο που πρόκειται να επιλυθεί σύντομα αποτελείται από 30,000,000 κελιά. Σκοπός από αυτήν την προσομοίωση είναι η συγγραφή μίας επιστημονικής δημοσίευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] "Airfoil," Wikipedia, the free encyclopedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil
[2] Παπανίκας Δ.Γ., Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Φ. Παπανίκα &ΣΙΑ Ο.Ε, Αθήνα, 2010
[3] Applied Aerodynamics: A Digital Textbook, http://docs.desktop.aero/appliedaero/airfoils1/AirfoilPressures.html
[4] https://rotorhead8900.wordpress.com/tag/lift-formula/
[5] https://rotorhead8900.wordpress.com/category/aerodynamics/
[6] Versteeg HK and Malalasekera W, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, John Wiley & Sons Inc, New York, 1995
[7] http://ocw.upm.es/ingenieria-aeroespacial/aerodinamica-numerica/F18.gif/view
[8] http://www.satprnews.com/2017/08/16/global-and-united-states-computational-fluid-dynamics-cfd-market-report-2017-2022/
[9] http://insightreplay.com/tech-sports-computational-fluid-dynamics/
[10] https://www.computationalfluiddynamics.com.au/how-ansys-cfd-keeps-the-top-formula-one-teams-on-the-podium/
[11] Ρωμαίος Α. Γ., Αλληλεπίδραση Ομόρροπα περιστρεφόμενων στροβίλων, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009
[12] Van Dyke M., An Album of Fluid Motion, Braun-Brumfield Inc, Michigan, 1982
[13] Τάχος Ν. Σ., Αεροδυναμική και Αεροακουστική ανάλυση ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013
[14] Ντζάνης Ε., Αριθμητική προσομοίωση τυρβώδους ροής σε δεξαμενή άντλησης θαλασσίου ύδατος ψύξης, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πάτρα 2012.
[15] Ταμπούρης Α., Καράμπελας Κ., Αεροδυναμική μελέτη και προσομοίωση συμπεριφοράς πτερύγιων αεροσκαφών, ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, Πάτρα, 2014
[16] Παπαϊωάννου Α.Θ, Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα, 2002
[17] https://www.physicsforums.com/threads/boundary-layer-thickness-confusion.860939/
[18] Zhang, Hong & Qi, Xiangying. (2016). Heat Transfer Analysis and Modification of Thermal Probe for Gas-Solid Measurement. Mathematical Problems in Engineering. 2016. 1-7. 10.1155/2016/9071531.
[19] https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall
[20] http://ta.twi.tudelft.nl/users/wesselin/projects/unstructured.html
[21] A. Fluent, "12.0 Theory Guide," Ansys Inc, vol. 5, 2009
[22] A. Fluent, "v. 12-User's Guide," ANSYS Inc NH1995–2007