



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ανάπτυξη μοντέλου αεροδυναμικής
πτέρυγας και μελέτη των αεροδυναμικών
χαρακτηριστικών μέσω Υπολογιστικής
Ρευστοδυναμικής.

Προεστάκης Κυριάκος

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Πετούσης Μάρκος

Ηράκλειο 2020

Περίληψη

Στην πτυχιακή αυτή γίνεται μια προσπάθεια αεροδυναμικής ανάλυσης μιας υπάρχουσας πτέρυγας αγνώστων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών μέσω αντίστροφης μηχανικής. Η μέθοδος που ακολουθείται είναι, η ψηφιοποίηση της πτέρυγας μέσω τρισδιάστατης σάρωσης χωρίς επαφή, η δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου και η αεροδυναμική μελέτη αυτού με προσομοίωση ροής στο Solidworks FlowSimulation, δηλαδή με Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) ώστε να υπολογισθούν οι συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και ροπής. Παράλληλα με το πειραματικό κομμάτι και τα βήματα που ακολουθήθηκαν, αναλύεται και η σχετική θεωρία της ψηφιοποίησης, της ρευστομηχανικής και της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Και τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την μέθοδο αλλά και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την διάρκεια.

Abstract

This thesis is an attempt of an aerodynamic analysis of a wing that of unknown aerodynamic characteristics, with the method of reverse engineering. The method consists of the process of three-dimensional scanning of the wing, the creation of a 3D model, and the aerodynamic analysis by Computational Flow Dynamics (CFD) in Solidworks FlowSimulation to calculate the coefficients of lift, drag and momentum. Along with the experimental part and the steps that were followed, there is cited all the relevant theory about 3D scanning, flow dynamics, and Computation Flow Dynamics. Finally, the results of the analysis are presented as well as the conclusions that emerge for the method and the problems that were encountered.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	1
Abstract	1
1. Εισαγωγή.....	5
1.1. Σκοπός της εργασίας	5
1.2. Δομή της εργασίας	5
2. Αντίστροφη Μηχανική	6
3. Τρισδιάστατη Σάρωση (Ψηφιοποίηση).....	7
3.1. Γενικά.....	7
3.2. Κατηγορίες σαρωτών	7
3.2.1. Σαρωτές Επαφής	7
3.2.2. Σαρωτές Χωρίς Επαφή.....	9
3.3. Στάδια σάρωσης.....	13
3.4. Λογισμικά	14
3.5. Σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε.....	15
3.5.1. Τρόπος λειτουργίας.....	15
3.5.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά	16
4. Πτέρυγες-Αεροτομές.....	19
4.2. Χαρακτηριστικά Πτερύγων.....	22
4.2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	23
4.2.2. Είδη αεροτομής	25
4.2.3. Είδη πτερύγων.....	25
5. Αεροδυναμική	27
5.1. Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών	27
5.1.1. Ροή.....	27
5.1.2. Αρχή συνέχειας της ροής.....	29
5.1.3. Bernoulli	30
5.1.4. Coanda Effect	31
5.2. Δυνάμεις στην πτέρυγα.....	31
5.2.1. Άντωση	31
5.2.2. Οπισθέλκουσα.....	33
5.2.3. Παράγοντες Άντωσης και Οπισθέλκουσας	36
5.2.4. Αεροδυναμικά κέντρα αναφοράς	38
5.2.5. Λόγος άντωσης-αντίστασης K	40

5.2.6.	Οριακό στρώμα	41
5.2.7.	Αποκόλληση Ροής στο Οριακό Στρώμα.....	44
5.2.8.	Γωνία προσβολής και κρίσιμη γωνία	45
5.3.	Υπολογιστική Ρευστομηχανική CFD	46
5.3.1.	Εξισώσεις Navier - Stokes.....	48
5.3.2.	Προγράμματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	51
5.3.3.	Τομείς εφαρμογής.....	51
6.	Μεθοδολογία	52
6.1.	Τρισδιάστατη Σάρωση.....	52
6.1.1.	Λογισμικό και σαρώσεις.....	54
6.2.	Δημιουργία Γεωμετρικού Μοντέλου	59
6.3.	Επαλήθευση Γεωμετρικού Μοντέλου.....	68
6.4.	Ανάλυση Χαρακτηριστικών Πτέρυγας	69
6.5.	Αεροδυναμική Μελέτη Σε CFD.....	70
6.5.1.	Στόχος της μελέτης - προσομοίωσης.	70
6.5.2.	Διαδικασία.....	70
6.5.3.	Παράμετροι Προσομοίωσης	71
6.5.3.1.	Σταθερές Παράμετροι	72
Σταθερές Παράμετροι		72
6.5.3.2.	Ειδος ροής	73
6.5.3.3.	Χαρακτηριστικά ρευστού	73
6.5.3.4.	Computational Domain	74
6.5.3.5.	Οριακές συνθήκες	75
6.5.3.6.	Πλέγμα (Mesh)	76
6.5.3.7.	Επιλογές Υπολογισμών.....	78
6.5.3.8.	Στόχοι ανάλυσης.....	79
7.	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	80
7.1.	Διάγραμμα Συντελεστή Άντωσης – Γωνίας Πρόσπτωσης.....	84
7.2.	Διάγραμμα Συντελεστή Οπισθέλκουσας – Γωνίας Πρόσπτωσης	85
7.3.	Διάγραμμα Συντελεστής Άντωσης – Συντελεστή Οπισθέλκουσας	86
7.4.	Διάγραμμα Συντελεστή Άντωσης προς Συντελεστή Οπισθέλκουσας – Γωνίας Πρόσπτωσης.....	87
7.5.	Διάγραμμα Συντελεστή Ροπής – Γωνίας Πρόσπτωσης	88
7.6.	Διαγράμματα ταχύτητας ροής και κατανομής πίεσης.....	89

8. Συμπεράσματα	116
8.1. Για την μέθοδο	116
8.2. Για τα αποτελέσματα	117
9. Βιβλιογραφία.....	118

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου αντίστροφης μηχανικής, μέσω της οποίας θα βρίσκονται και θα μελετώνται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας πτέρυγας (ή ενός οποιουδήποτε αεροδυναμικού αντικειμένου, κατ' επέκταση) για την οποία δεν είναι διαθέσιμα εκ των προτέρων. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που ζητούνται είναι ο συντελεστής δυναμικής άνωσης, ο συντελεστής οπισθέλκουσας και ο συντελεστής ροπής.

Αυτή η μέθοδος θα αποτελείται από τρία βασικά τμήματα. Αρχικά την σάρωση του αντικειμένου, δηλαδή της πτέρυγας. Έπειτα την δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου στον Η/Υ. Και τέλος, την μελέτη του μοντέλου αυτού μέσω της υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ώστε να βρεθούν και να αναλυθούν τα αεροδυναμικά του χαρακτηριστικά.

1.2. Δομή της εργασίας

Η εργασία αυτή αποτελείται από 9 κεφάλαια και χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα στο οποίο ανήκουν τα κεφάλαια 2 έως και 5, αναλύει την απαραίτητη για την κατανόηση της μεθόδου, θεωρία, τόσο της ρευστομηχανικής και των πτερυγώσεων, όσο και των μεθόδων και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν. Το δεύτερο τμήμα της εργασίας που αποτελείται από το κεφάλαιο 6 και το κεφάλαιο 8, εξηγεί την πορεία του πειραματικού μέρους της εργασίας βήμα προς βήμα. Και τέλος στο κεφάλαιο 8 αναλύονται τα συμπεράσματα της διαδικασίας και στο κεφάλαιο 9 παρατίθεται η βιβλιογραφία.

2. Αντίστροφη Μηχανική

Ο όρος αντίστροφη μηχανική περιγράφει την διαδικασία μελέτης ενός υπάρχοντος αντικειμένου ή κατασκευής για το οποίο δεν υπάρχουν διαθέσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά. Είναι το αντίστροφο από τη συνήθη πορεία που ακολουθείται, όπου μια κατασκευή σχεδιάζεται και μετά κατασκευάζεται. Έτσι μέσω της αντίστροφης μηχανικής βρίσκονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά, ενός αντικειμένου και μπορεί αυτό πλέον να μελετηθεί, να βελτιωθεί ή και να αντιγραφεί.

Η αντίστροφη μηχανική βρίσκει εφαρμογή σε πολλές επιστήμες μεταξύ των οποίων η μηχανολογία, η πληροφορική, η αρχαιολογία, η ιατρική κ.α.. Έχει επίσης και διάφορους σκοπούς για τους οποίους χρησιμοποιείται, μερικοί εκ των οποίων είναι η απόκτηση τεχνογνωσίας ανταγωνιστών ή και αντιγραφή προϊόντων, η κατανόηση της λειτουργίας παλαιότερων κατασκευών ή και κατασκευών που δεν υπάρχουν διαθέσιμα σχέδια κτλ. Σε κάθε μία από της παραπάνω εφαρμογές, οι μέθοδοι της αντίστροφης μηχανικής που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ανάλογα με το αντικείμενο που μελετάται και τον σκοπό της μελέτης.

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία, είναι αυτή της τρισδιάστατης σάρωσης. Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές επιστήμες, όταν το ζητούμενο είναι η γεωμετρία και ο σχεδιασμός ενός αντικειμένου. Με αυτή τη μέθοδο ένα υπάρχον αντικείμενο ψηφιοποιείται μέσω της τρισδιάστατης σάρωσης και κατασκευάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο του στον Η/Υ. Μετά την ψηφιοποίηση, μπορεί να γίνει περαιτέρω μελέτη, μετατροπές και κατασκευή εκ νέου του αντικειμένου ανάλογα με το τι απαιτείται.

3. Τρισδιάστατη Σάρωση (Ψηφιοποίηση)

3.1. Γενικά

Η τρισδιάστατη σάρωση είναι η διαδικασία ψηφιοποίησης ενός αντικειμένου. Είναι δηλαδή ένας τρόπος καταγραφής της γεωμετρίας ενός φυσικού μοντέλου και μεταφοράς της γεωμετρίας αυτής στον υπολογιστή. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της καταγραφής της θέσης, όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων του αντικειμένου, με την μορφή συντεταγμένων στο χώρο και αποθήκευση τους σε ένα αρχείο.

Οι μέθοδοι καταγραφής της γεωμετρίας ποικίλουν και χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στην σάρωση με επαφή και σε αυτήν χωρίς επαφή. Βέβαια υπάρχουν και υποκατηγορίες σε αυτές τις μεθόδους. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και επιλέγεται βάσει των αναγκών της εκάστοτε εργασίας. Οι μέθοδοι αυτοί αναλύονται λεπτομερώς στις παρακάτω παραγράφους.

3.2. Κατηγορίες σαρωτών

3.2.1. Σαρωτές Επαφής

Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου με επαφή πραγματοποιείται με την μέτρηση των συντεταγμένων, όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων του, στο χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM). Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) συνήθως είναι NC μηχανές, όπου στο άκρο τους βρίσκεται ένας αισθητήρας επαφής του οποίου η θέση είναι γνωστή από την μηχανή ανά πάσα στιγμή. Έτσι ερχόμενος σε επαφή με το αντικείμενο που πρόκειται να ψηφιοποιηθεί, καταγράφει τις συντεταγμένες της θέσης του άκρου σε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων X-Y-Z. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα νέφος σημείων.

Αντίστοιχα η ίδια εργασία μπορεί να επιτευχθεί και από ρομποτικούς βραχίονες στο άκρο των οποίων υπάρχει ακίδα επαφής αντίστοιχη αυτών που βρίσκεται στις NC μηχανές. Ο ρομποτικός βραχίονας μπορεί να κινείται είτε από τον χρήστη, είτε να είναι αυτοματοποιημένος.

Η ακρίβεια των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 0,01mm.

Βασικό πλεονέκτημα των σαρωτών επαφής είναι η ακρίβειά τους, ενώ το βασικότερο μειονέκτημα είναι ότι απαιτείται επαφή, που σε ορισμένες περιπτώσεις ευαίσθητων επιφανειών δεν ενδείκνυται αλλά και το γεγονός ότι είναι μια χρονοβόρα διαδικασία λόγω της κίνησης του βραχίονα.



Εικόνα 1: Τρισδιάστατος σαρωτής επαφής CMM, NC.



Εικόνα 2: Τρισδιάστατος σαρωτής επαφής σε ρομποτικό βραχίονα.

3.2.2. Σαρωτές Χωρίς Επαφή

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές χωρίς επαφή πραγματοποιούν ταχεία συλλογή χωρικών μετρητικών δεδομένων εξ αποστάσεως. Είναι σαρωτές οι οποίοι βασίζονται στην καταγραφή φωτός (ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας). Είτε της ανάκλασης κάποιας ακτινοβολίας που παράγει ο σαρωτής, όταν αναφερόμαστε στους ενεργητικούς σαρωτές, είτε της περιρρέουσας όταν αναφερόμαστε στους παθητικούς. Οι σαρωτές αυτοί συλλέγουν μεγάλο αριθμό σημείων της επιφάνειας του αντικείμενου για να ορίσουν την γεωμετρία του, όπως και οι σαρωτές με επαφή που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και χρωματικές – φωτογραφικές πληροφορίες δημιουργώντας και αυτοί ένα νέφος σημείων από τις συντεταγμένες κάθε σημείου που σαρώθηκε.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της κατηγορίας αυτής είναι, η έλλειψη επαφής του σαρωτή στο προς ψηφιοποίηση αντικείμενο και ο σύντομος χρόνος ψηφιοποίησης σε σχέση με τους ψηφιοποιητές που απαιτούν επαφή. Το πρώτο είναι σημαντικό καθώς υπάρχουν επιφάνειες που είτε δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με εξοπλισμό, όπως είναι αρχαία αντικείμενα, είτε επιφάνειες που με επαφή δεν μπορούν να ψηφιοποιηθούν, όπως είναι οι μαλακές επιφάνειες. Και το δεύτερο, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την σάρωση, είναι εξίσου σημαντικό, ιδίως όταν πρόκειται για επιφάνειες με σύνθετη γεωμετρία.

Τα μειονεκτήματα της κατηγορίας είναι τα εξής. Αρχικά το πρόβλημα των μη ορατών επιφανειών, όπου αν υπάρχουν επιφάνειες σε ένα αντικείμενο που δεν είναι πλήρως ορατές δεν μπορούν να σαρωθούν. Έπειτα η δυσκολία σάρωσης ορισμένων επιφανειών λόγω ανάκλασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, πχ γυαλιστερών κτλ, κάτι το οποίο επιλύεται με την χρήση ειδικών επικαλύψεων στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά χάνονται τα προτερήματα της ψηφιοποίησης χωρίς επαφή. Και τέλος η ακρίβεια της σάρωσης, όπου είναι μικρότερη σχετικά με την ψηφιοποίηση με επαφή.

3.2.2.1. Ενεργητικοί Σαρωτές

Στην κατηγορία των ενεργών σαρωτών ανήκουν οι σαρωτές οι οποίοι εκπέμπουν οι ίδιοι μια ακτινοβολία, όπου ανακλάται στο αντικείμενο και επιστρέφει στον σαρωτή και σε αυτή εμπεριέχεται η πληροφορία για την γεωμετρία του αντικείμενου. Ανάλογα με τον τύπο του σαρωτή μετράται είτε ο χρόνος της ανάκλασης, είτε η γωνία που σχηματίζει μια ακτίνα, είτε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας κατά την επιστροφή του, είτε η παραμόρφωση ενός πλέγματος φωτός.

A. Μέτρησης χρόνου ανάκλασης

Οι σαρωτές μέτρησης χρόνου ανάκλασης χρησιμοποιούν μια πηγή φωτός λέιζερ της οποίας οι ακτίνες σαρώνουν το αντικείμενο και ανακλώνται από αυτό πίσω στον ψηφιοποιητή. Δεδομένης της ταχύτητας του λέιζερ (ταχύτητα του φωτός C) υπολογίζεται η απόσταση του κάθε σημείου, βάσει του χρόνου επιστροφής του φωτός.

$$(3.1) \quad S = \frac{C * t}{2}$$

Όπου:

S: η απόσταση του σημείου

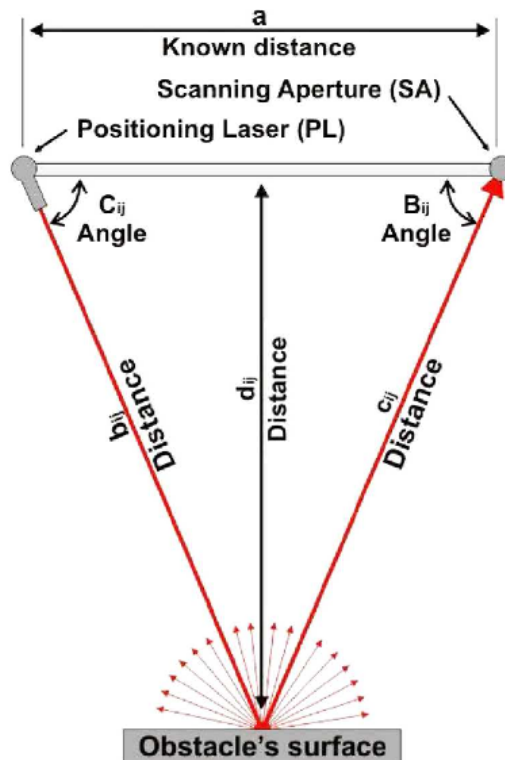
C: η ταχύτητα του φωτός

T: ο χρόνος ανάκλασης

Συνεπώς, η ακρίβεια των σαρωτών μέτρησης χρόνου ανάκλασης εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης του χρόνου από τον ψηφιοποιητή.

B. Τριγωνοποίησης

Οι σαρωτές τριγωνοποίησης χρησιμοποιούν και αυτοί ακτίνες λέιζερ, όπως και οι σαρωτές μέτρησης χρόνου ανάκλασης με την βασική διαφορά, ότι διαθέτουν μια κάμερα η οποία εντοπίζει την θέση του ίχνους της ακτίνας που εκπέμφθηκε, αντί να μετράει τον χρόνο. Έτσι βάσει της γωνίας επιστροφής της ακτίνας στην κάμερα, γνωρίζοντας την γωνία εκπομπής και την απόσταση της κάμερας και του λέιζερ, υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου του αντικείμενου μετά την επίλυση του τριγώνου που δημιουργήθηκε. Αυτή η μέθοδος υπολογισμού θέσης, ονομάζεται τριγωνοποίηση.

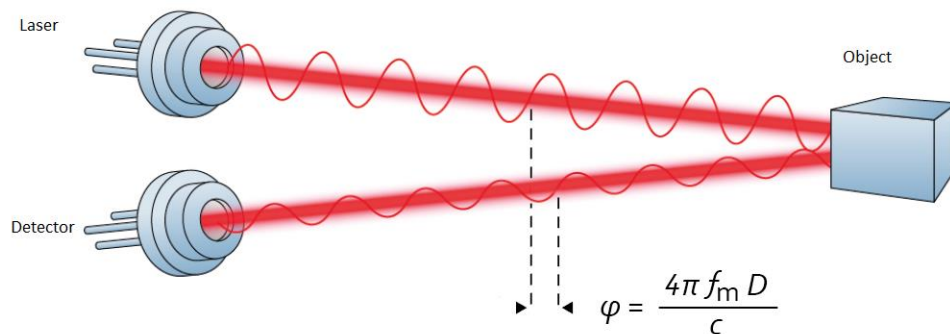


Εικόνα 3: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης λειτουργίας τριγωνοποίησης.

Σε αυτή την κατηγορία ψηφιοποιητών ανήκει και ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Γ. Συνεχούς διαμόρφωσης κύματος

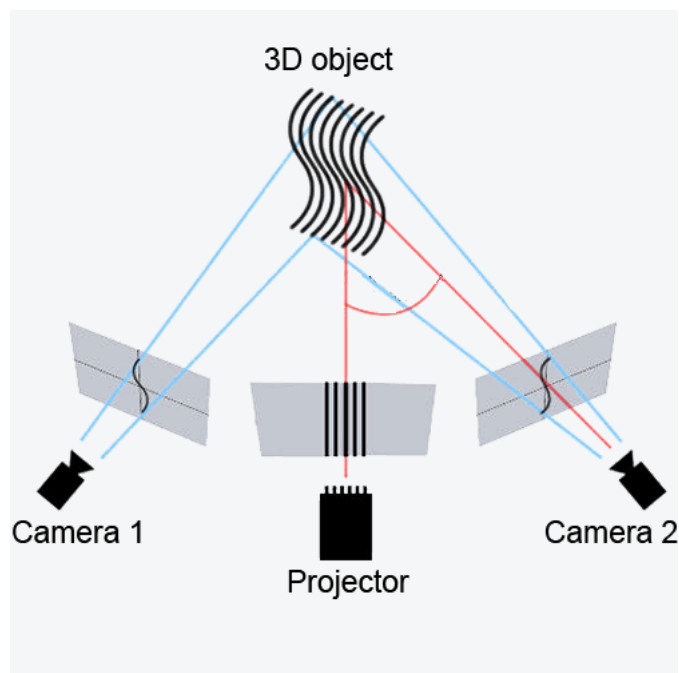
Και από αυτούς του σαρωτές εκπέμπονται ακτίνες λέιζερ, αλλά σε αυτή την περίπτωση για τον προσδιορισμό της απόστασης και συνεπώς της θέσης κάθε σημείου μετράται η διαφορά φάσης του λέιζερ μεταξύ του μεταδιδόμενου κύματος και του ανακλώμενου, καθώς αυτό κινείται από και προς το αντικείμενο.



Εικόνα 4: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης τρόπου λειτουργίας μεθόδου Συνεχούς Διαμόρφωσης Κύματος.

Δ. Δομημένου φωτός

Οι σαρωτές δομημένου φωτός χρησιμοποιούν και αυτοί τριγωνοποίηση για να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των σημείων του αντικειμένου, αλλά η ακτινοβολία που εκπέμπεται από αυτούς αντί για λέιζερ, είναι μοτίβο ορατού φωτός που προβάλλεται από έναν προτζέκτορα στο αντικείμενο και εξετάζεται η παραμόρφωσή του, από την κάμερα που διαθέτουν.



Εικόνα 5: Αρχή λειτουργίας σαρωτών δομημένου φωτός

3.2.2.2. Παθητικοί Σαρωτές

Στερεοσκοπικοί

Η μέθοδος της στερεοσκοπίας είναι αντίστοιχη του τρόπου λειτουργίας της ανθρώπινης όρασης. Οι στερεοσκοπικοί σαρωτές χρησιμοποιούν ταυτόχρονα δύο κάμερες, όπου φωτογραφίζουν το αντικείμενο, λαμβάνοντας ένα ζεύγος φωτογραφιών από διαφορετική γωνία. Η θέση των δύο αυτών καμερών είναι γνωστή όπως και η γωνία μεταξύ τους, συνεπώς μπορεί να βρεθεί η απόσταση των σημείων του αντικειμένου.

Περιγράμματος

Οι σαρωτές της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούν πολλαπλές λήψεις του αντικειμένου περιμετρικά αποτυπώνοντας κάθε φορά το περίγραμμα του. Έτσι συνθέτοντας τις φωτογραφίες μπορεί να αναπαρασταθεί τρισδιάστατα το αντικείμενο.

3.3. Στάδια σάρωσης

Η μεταφορά της γεωμετρίας ενός φυσικού μοντέλου σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο στον υπολογιστή μέσω της τρισδιάστατης σάρωσης είναι μια διαδικασία που απαιτεί ορισμένα βήματα για να επιτευχθεί. Τα στάδια, από την στιγμή της σάρωσης μέχρι και την δημιουργία του μοντέλου είναι τα εξής:

A. Σάρωση

Σαρώνεται το φυσικό μοντέλο ώστε να καταγραφεί η γεωμετρία του, δηλαδή η θέση όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων του στο χώρο, με ένα από τα προαναφερθέντα είδη σαρωτών ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε σάρωσης.

B. Δημιουργία Νέφους Σημείων

Αποτυπώνεται στο λογισμικό ένα νέφος σημείων που αποτελείται από όλα τα σημεία του αντικειμένου που καταγράφηκε η θέση τους στον χώρο από τον ψηφιοποιητή.

Γ. Δημιουργία Πλέγματος

Μετά την καταγραφή της θέσης των σημείων, κατασκευάζεται από το λογισμικό ένα πλέγμα μεταξύ των σημείων αυτό ώστε να δημιουργηθεί η επιφάνεια του αντικειμένου.

Δ. Εξαγωγή Τρισδιάστατου Μοντέλου

Από το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί στο προηγούμενο στάδιο, γίνεται επεξεργασία των επιφανειών εντός του λογισμικού, ώστε να διορθωθούν τυχόν λάθη, να

ενοποιηθούν οι σαρώσεις και να παραχθεί η επιφάνεια του τελικού μοντέλου σε μορφή κατάλληλη για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία από λογισμικά CAD.

3.4. Λογισμικά

Τα λογισμικά που αφορούν την τρισδιάστατη σάρωση χρησιμοποιούνται για δυο εργασίες. Η πρώτη είναι η διαδικασία της σάρωσης, δηλαδή η συλλογή του νέφους σημείων, διαδικασία στην οποία ανήκει και η οδήγηση του σαρωτή, της βάσης του αντικειμένου κτλ. Ενώ η δεύτερη, είναι η επεξεργασία των σαρώσεων, δηλαδή του νέφους σημείων, ώστε να προκύψει το τρισδιάστατο μοντέλο.

Συνήθως κάθε σαρωτής συνοδεύεται από λογισμικό συμβατό με αυτόν ικανό να κάνει αυτές τις εργασίες, αλλά πολλές φορές επιλέγονται και άλλα λογισμικά, όταν είναι απαραίτητο, κυρίως για την δεύτερη κατηγορία εργασιών, δηλαδή την επεξεργασία του τρισδιάστατου μοντέλου. Γενικά στην αγορά υπάρχει πληθώρα λογισμικών τόσο επί πληρωμή όσο και ελεύθερα.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της Konica Minolta που συνοδεύει τον σαρωτή και το Geomagic Studio για την επεξεργασία του νέφους σημείων, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω, στο αντίστοιχο κεφάλαιο της μεθόδου της σάρωσης και της επεξεργασίας.

3.5. Σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε

Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση του αντικειμένου, δηλαδή της πτέρυγας, είναι ο VIVID 910 της Konica Minolta, ο οποίος είναι ένας σαρωτής που ανήκει στην κατηγορία των σαρωτών που δεν απαιτούν επαφή με το αντικείμενο. Πιο συγκεκριμένα είναι ενεργητικός, καθώς εκπέμπει ο ίδιος ακτίνα λέιζερ και καταγράφει τις θέσεις των σημείων του αντικειμένου με την μέθοδο της τριγωνοποίησης.

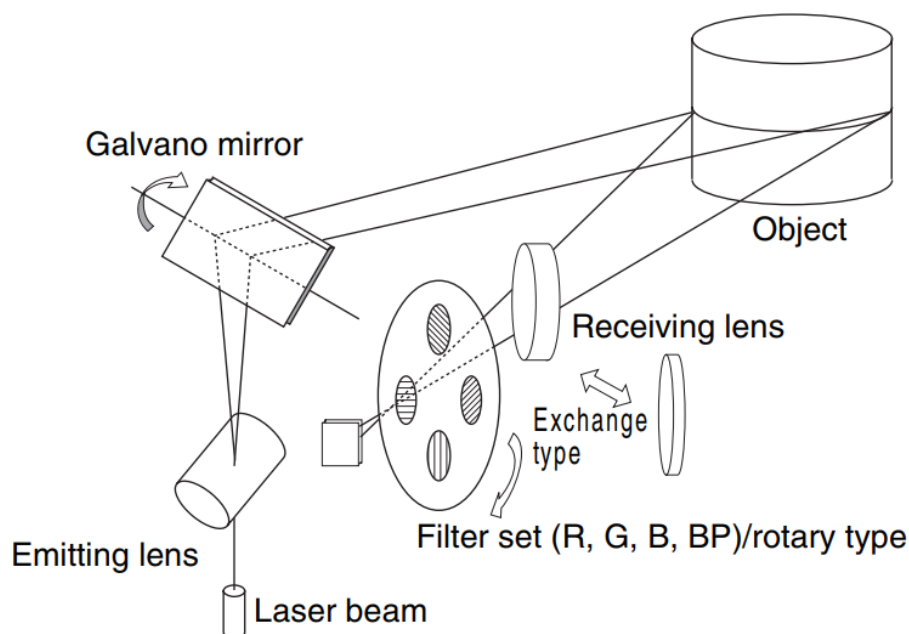


Εικόνα 6: Konica Minolta VIVID 910.

3.5.1. Τρόπος λειτουργίας

Ο VIVID 910 για να σαρώσει το αντικείμενο, εκπέμπει μια δέσμη λέιζερ από μια θυρίδα που διαθέτει στο κάτω μέρος της μπροστινής του πλευράς. Η δέσμη αυτή σαρώνει το αντικείμενο από το ψηλότερο μέρος του μέχρι την βάση και ανακλάται, από το αντικείμενο πίσω στον φακό της κάμερας του ψηφιοποιητή, ο οποίος βρίσκεται κι αυτός στην μπροστινή πλευρά της κάμερας, πάνω από την θυρίδα εκπομπής της δέσμης. Η κίνηση της δέσμης του λέιζερ επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφής ενός καθρέπτη (Galvano mirror) που βρίσκεται εντός της θυρίδας εκπομπής της δέσμης. Ενώ η λήψη της δέσμης κατά την επιστροφή της γίνεται μέσω ενός φακού και ενός αισθητήρα CCD (Charge - coupled device).

Έτσι γνωρίζοντας την γωνία του καθρέπτη κάθε στιγμή, την απόσταση της θυρίδας εκπομπής από αυτή της λήψης, και καταγράφοντας την γωνία πρόσπτωσης στον φακό, με την οποία επιστρέφει η δέσμη του λέιζερ, βρίσκεται μέσω της μεθόδου της τριγωνοποίησης η ακριβής θέση των σημείων του αντικειμένου.



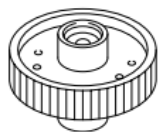
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας σαρωτή VIVID 910.

3.5.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Ο συγκεκριμένος σαρωτής έχει την δυνατότητα σάρωσης αντικειμένου σε απόσταση από 0,6m μέχρι 2,5m και οπτικό πεδίο από 0,6m μέχρι 1,2m.
- Η ένταση του laser είναι 30mW στα 690nm (IEC Class2)
- Διαθέτει δύο τρόπους σκαναρίσματος: **FINE**, ο οποίος δίνει μεγαλύτερη ανάλυση (640*480, 2,5sec) και **FAST**, όπου σαρώνει με μεγαλύτερη ταχύτητα (320*240, 0,3sec).
- Έχει την δυνατότητα εναλλαγής φακών. Διαθέτει 3 φακούς, ευρυγώνιο, μεσαίο και τηλεφακό με απόσταση εστίασης $F=8\text{mm}$, $F=14\text{mm}$ και $F=26\text{mm}$ αντίστοιχα, με σκοπό να μπορεί να γίνει σάρωση διαφόρων μεγεθών αντικειμένων σε διαφορετικές αποστάσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα μεγέθη των αντικειμένων που μπορούν να σαρωθούν ανάλογα με την απόσταση με τον καθένα από τους τρεις φακούς.

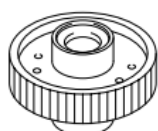
WIDE Lens



Measurement Distance		600	800	1000	1200	2000
Object Size	Horizontal	367.0	486.6	606.2	725.8	1204.2
	Vertical	275.2	364.9	454.6	544.4	903.2

Unit (mm)

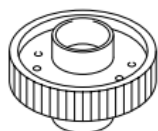
MIDDLE Lens



Measurement Distance		600	800	1000	1200	2500
Object Size	Horizontal	204.7	270.6	336.5	402.4	830.6
	Vertical	153.6	203.0	252.4	301.8	622.9

Unit (mm)

TELE Lens



Measurement Distance		600	800	1000	1200	2500
Object Size	Horizontal	113.9	151.0	188.0	225.1	465.9
	Vertical	85.4	113.2	141.0	168.8	349.4

Unit (mm)

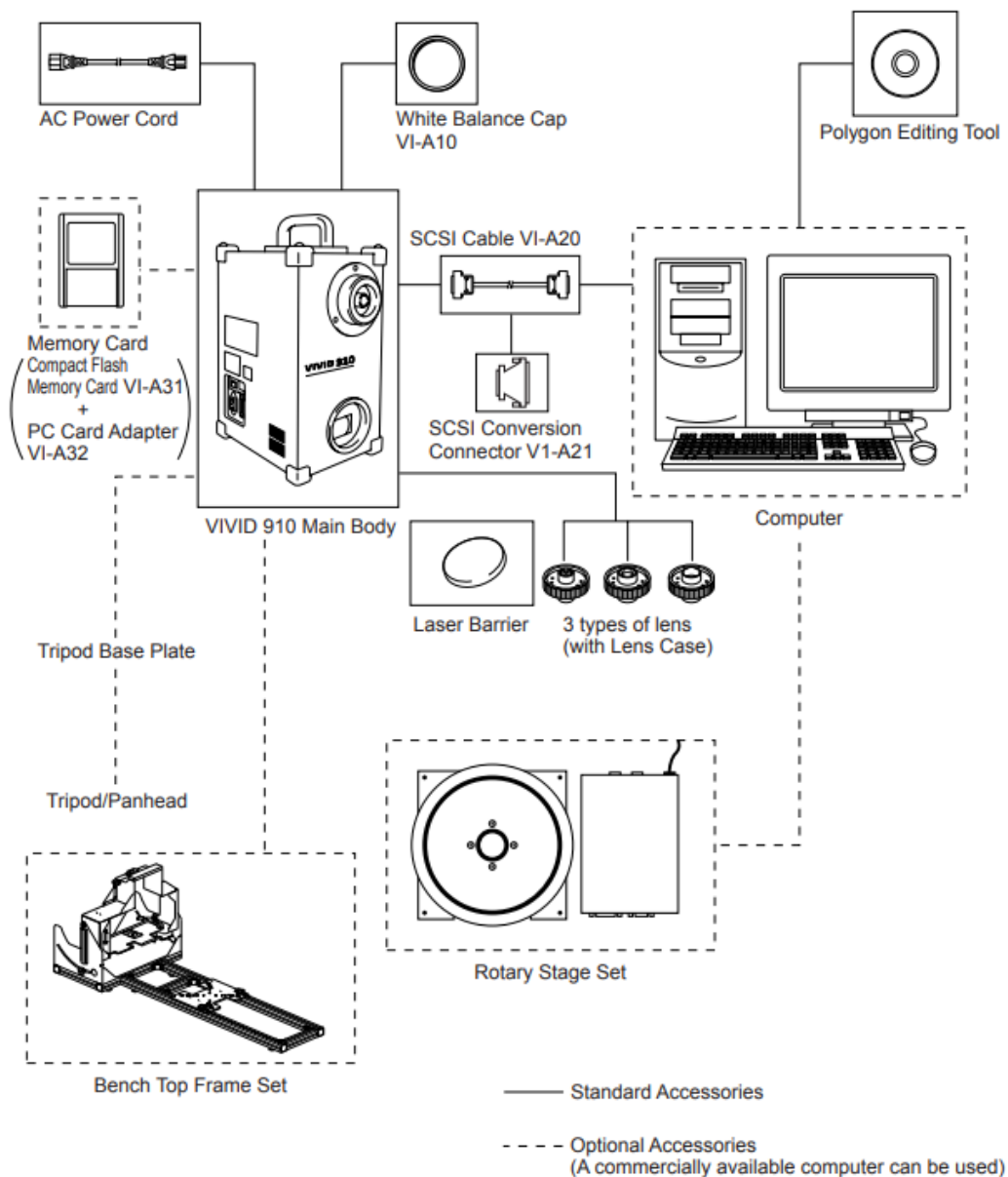
Εικόνα 8: Φακοί και τα χαρακτηριστικά τους.

- Η ακρίβεια που έχει ανά άξονα με κάθε φακό στη λειτουργία **FINE** είναι:
Με τον τηλεφακό X: $\pm 0,22\text{mm}$ Y: $\pm 0,16\text{mm}$ Z: $\pm 0,10\text{mm}$
Με τον μεσαίο X: $\pm 0,38\text{mm}$ Y: $\pm 0,31\text{mm}$ Z: $\pm 0,20\text{mm}$
Με τον ευρυγώνιο X: $\pm 1,4\text{mm}$ Y: $\pm 1,4\text{mm}$ Z: $\pm 0,40\text{mm}$
- Η επαναληψιμότητα λειτουργία **FINE** είναι:
Με τον τηλεφακό 8 μm
Με τον μεσαίο 16 μm
Με τον ευρυγώνιο 32 μm
- Ο φωτισμός του περιβάλλοντος στο οποίο γίνεται η σάρωση πρέπει να είναι μικρότερη των 500lx
- Ο χρόνος μεταφοράς της εικόνας στον Η/Υ είναι 1sec (FAST MODE) και 1,5sec (FINE MODE)
- Οι διαστάσεις του σαρωτή είναι 213*413*271mm και το βάρος του 11kg

Η κάμερα συνοδεύεται πέραν από τους τρεις φακούς και με το λογισμικό Polygon Editing Tool, με τα καλώδια σύνδεσης με τον Η/Υ και το καλώδιο τροφοδοσίας, και τα προστατευτικά καλύμματα των φακών και του laser, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας αυτόνομα, χωρίς Η/Υ, από το χειριστήριο που βρίσκεται ενσωματωμένο και την δυνατότητα αποθήκευσης σε κάρτα μνήμης, αλλά και μέσω του Η/Υ μέσω του λογισμικού Polygon Editing Tool.

Τέλος η κάμερα αυτή μπορεί να συνεργαστεί με περιστρεφόμενη βάση η οποία συνδέεται με το λογισμικό και αυτοματοποιεί την διαδικασία της σάρωσης.



Εικόνα 9: Εξαρτήματα σαρωτή.

4. Πτέρυγες-Αεροτομές

Πτέρυγα είναι ένα γεωμετρικό αντικείμενο του οποίου η μια από τις τρεις διαστάσεις είναι περιορισμένη σε σχέση με τις άλλες δύο και έχει σχήμα τέτοιο ώστε η ροή του ρευστού γύρω του να του ασκεί δύναμη παράλληλα στην ροή μέσω του νόμου του Bernoulli, δημιουργώντας δηλαδή διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές του, και μέσω του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα, δράση-αντίδραση, λόγω της αλλαγής της πορείας του ρευστού.

Οι πτέρυγες χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια, πέραν της αεροναυπηγικής, και σε πολλούς άλλους τομείς της μηχανολογίας καθώς κρίνεται όλο και περισσότερο σκόπιμο να μελετάται και να βελτιώνεται η αεροδυναμική αλλά και η υδροδυναμική συμπεριφορά των κατασκευών καθώς βελτιώνεται η συμπεριφορά και η απόδοση αυτών. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει και το γεγονός της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των συστημάτων CFD, διότι κάνουν την μελέτη των ροών αρκετά ευκολότερη σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια.

Ενδεικτικοί τομείς του οποίου χρησιμοποιούνται πτέρυγες είναι:

4.1.1. Αεροναυπηγική

Η αεροναυπηγική είναι ο κύριος τομέας χρήσης των πτερύγων καθώς είναι και ο τομέας που μελετά κατά κύριο λόγο της πτέρυγες αλλά και την αεροδυναμική γενικότερα. Οι πτέρυγες στην αεροναυτική, όπως είναι γνωστό, έχουν πληθώρα χρήσεων, τόσο εμφανώς, όπως είναι οι κύριες πτέρυγες και τα πτερύγια των αεροσκαφών, όσο και σε άλλα σημεία, όπως είναι τα πτερύγια των πτερωτών στους κινητήρες, δηλαδή οι πτερωτές των ελίκων και εντός των στροβιλοκινητήρων.

4.1.2. Ναυπηγική

Στον τομέα της ναυπηγικής χρησιμοποιούνται πτέρυγες, με την μόνη διαφορά, ότι το ρευστό στο οποίο βρίσκονται δεν είναι ο αέρας, αλλά το νερό. Αυτό αλλάζει κάποια χαρακτηριστικά των πτερύγων αυτών, λόγω κυρίως της μεγαλύτερης πυκνότητας του ρευστού, παρ' όλα αυτά οι βασικές αρχές παραμένουν οι ίδιες.

Η κύρια χρήση των πτερύγων στην ναυπηγική είναι ως πηδάλια για την αλλαγή κατεύθυνσης αλλά και ως πτερύγια ευσταθείας, τα οποία διατηρούν την ισορροπία και την ευστάθεια του πλοίου καθώς και περιορίζουν τους κλυδωνισμούς λόγω των κυμάτων.



Εικόνα 10: Stabilizer



Εικόνα 11: Πηδάλιο

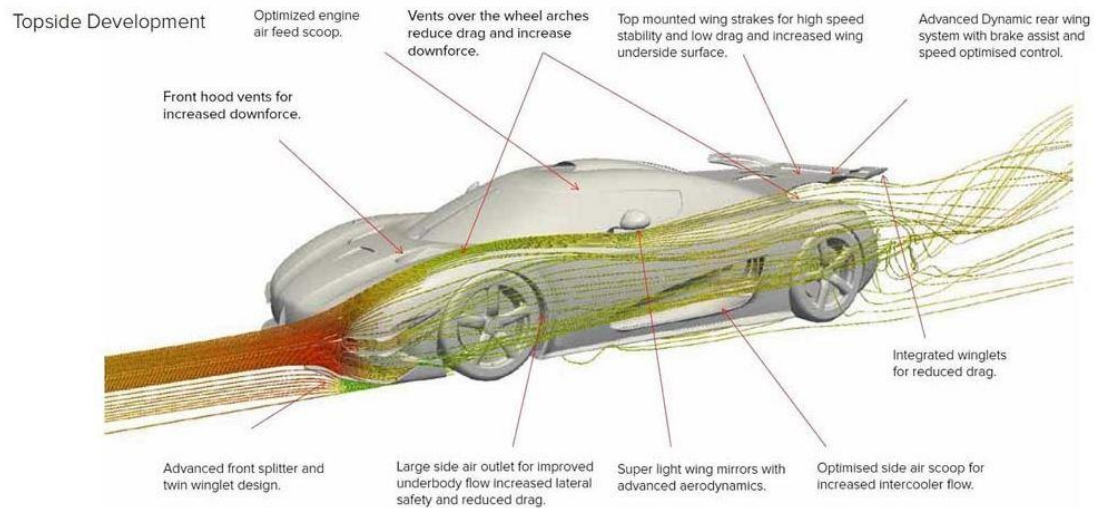
Επίσης χρήση πτερύγων γίνεται και στα υποβρύχια, μέσω των οποίων διατηρούν και αλλάζουν την κατεύθυνση τους στο χώρο.

Τέλος, ένα είδος πτέρυγας θα μπορούσε να θεωρηθεί το πανί στα ιστιοφόρα, διότι βασίζεται στις ίδιες αρχές.

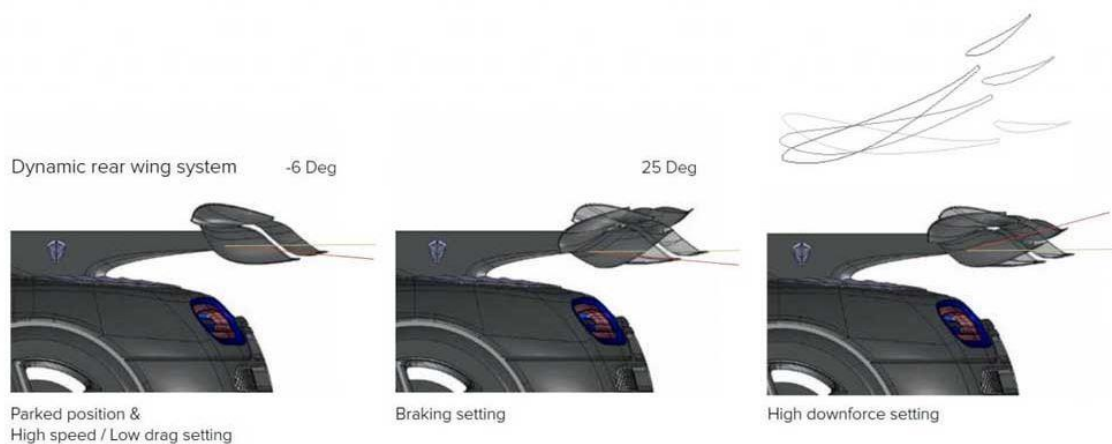
4.1.3. Αυτοκινητοβιομηχανία

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη σημασία στην αεροδυναμική των αυτοκινήτων. Τόσο με στόχο την μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης και συνεπώς την μείωση των ρύπων και την αύξηση των επιδόσεων, όσο και της αύξησης της πρόσφυσης μέσω της μείωσης της άντωσης που δημιουργείται ή σε πολλές περιπτώσεις με την δημιουργία αρνητικής άντωσης (downforce). Αυτό ξεκίνησε να εφαρμόζεται στα οχήματα αγωνιστικής χρήσης αλλά έχει, πλέον, επεκταθεί και στα εμπορικά οχήματα.

Για να επιτευχθούν αυτά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, εκτός του συνολικότερου αεροδυναμικού σχεδιασμού γίνεται και χρήση πτερυγών, σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και μεταβλητής γεωμετρίας.



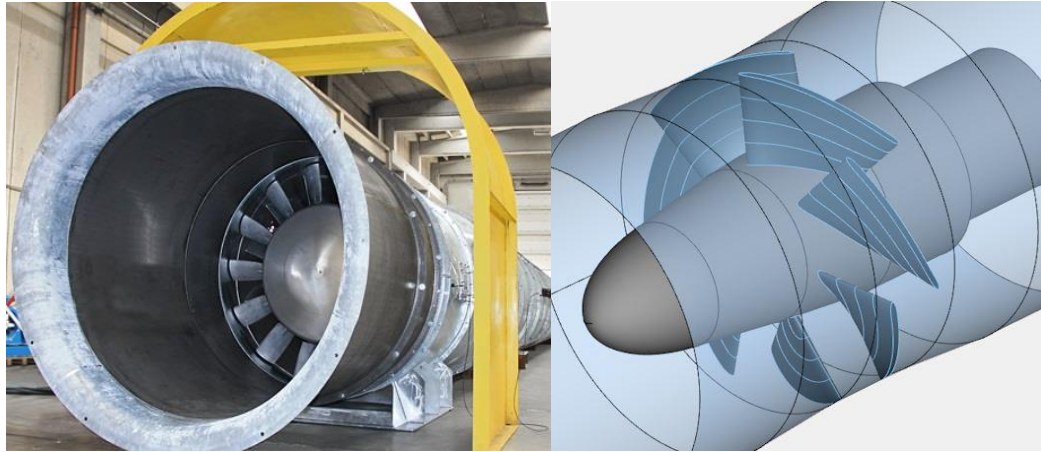
Εικόνα 12: Πτέρυγες και αεροδυναμικά βοηθήματα σε αυτοκίνητο (Koenigsegg one:1)



Εικόνα 13: Πτέρυγα μεταβλητής γωνίας προσβολής σε αυτοκίνητο.

4.1.4. Άλλες χρήσεις

Γενικά πτέρυγες και πτερύγια βρίσκονται σε ευρύ φάσμα μηχανολογικών κατασκευών. Ορισμένες από τις εφαρμογές αυτές είναι οι πτερωτές των αντλιών, οι πτερωτές σε συστήματα εξαερισμού κ.α.



Εικόνα 14: Πτερωτή σε σύστημα εξαερισμού σηράγγων

Εικόνα 15: Πτερωτή αξονικής αντλίας

4.2. Χαρακτηριστικά Πτερύγων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερύγων εξαρτώνται από την χρήση για την οποία προορίζονται. Το σχήμα δηλαδή των πτερύγων και της αεροτομής, εξαρτάται από την απαιτούμενη αεροδυναμική συμπεριφορά της εκάστοτε εφαρμογής. Διαφορετικές γεωμετρίες μπορούν να παρέχουν διαφορετικές δυνάμεις (άντωσης και οπισθέλκουσας) ανάλογα την ταχύτητα και το είδος του ρευστού στο οποίο θα βρίσκονται. Εκτός όμως των απόλυτα αεροδυναμικών χαρακτηριστικών η γεωμετρία τους προσαρμόζεται και με άλλους παράγοντες της εκάστοτε εφαρμογής. Οι άλλοι παράγοντες σχεδιασμού της πτέρυγας έχουν να κάνουν με τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτές και την αντοχή τους, οι κανονισμοί που πρέπει να πληρούν, (π.χ. στα αεροσκάφη υπάρχει μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στο μήκος των πτερύγων, για την κίνηση τους σε αεροδρόμια, στα οχήματα οι κανονισμοί ασφαλείας για πεζούς κτλ), τα φορτία και ο εξοπλισμός που πρέπει να φέρουν, κ.α.

Τα χαρακτηριστικά αυτά ποικίλουν τόσο όσο αφορά την κάτοψη της πτέρυγας, όσο την μπροστινή της όψη και την τομή της, η οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση ονομάζεται αεροτομή.

4.2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάτοψης, είναι τα εξής:

Πλάτος ή εκπέτασμα(s): Η απόσταση των άκρων της αεροτομής.

Εμβαδόν (A): χορδή x εκπέτασμα C*S Το εμβαδόν της επιφάνειας της πτέρυγας

Aspect ratio (AR) Διάταμα (επιμήκυνση): S^2/A ή S/C για ορθογώνια πτέρυγα

Λόγος εκλεπτύνσεως: ο λόγος μεταξύ του μήκους της χορδής στο κέντρο της πτέρυγας προς το μήκος της χορδής στην άκρη της.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αεροτομής

Χείλος προσβολής: είναι το τμήμα της πτέρυγας το οποίο έρχεται πρώτο σε επαφή με το ρευστό.

Χείλος εκφυγής: αντίστοιχα με το χείλος προσβολής, είναι το τμήμα της πτέρυγας το οποίο έρχεται τελευταίο σε επαφή με το ρευστό.

Χορδή (c): Είναι το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το χείλος προσβολής με το χείλος εκφυγής

Μέση γραμμή καμπυλότητας: αν θεωρήσουμε στην τομή της πτέρυγας (αεροτομή), άπειρα ευθύγραμμα τμήματα, κάθετα στην χορδή, τα οποία έχουν ως αρχή και τέλος την άνω και την κάτω πλευρά της πτέρυγας, τότε η μέση γραμμή καμπυλότητας είναι η καμπύλη που ενώνει τα μέσα των τμημάτων αυτών.(ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ισαπέχουν από την πάνω και κάτω επιφάνεια της πτέρυγας)

Μέγιστο πάχος αεροτομής(t): είναι η μέγιστη απόσταση των πλευρών της αεροτομής, κάθετα στην χορδή.

Καμπυλότητα(f): Είναι η μέγιστη κάθετη απόσταση από την χορδή στην μέση γραμμή καμπυλότητας.

Θέση μέγιστης καμπυλότητας X_f : Η απόσταση της θέσης της μέγιστης καμπυλότητας από το χείλος προσβολής παράλληλα στην χορδή.

Θέση μέγιστου πάχους X_t : Η απόσταση της θέσης του μέγιστου πάχους από το χείλος προσβολής παράλληλα στην χορδή.

Με βάση τα παραπάνω, ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

Σχετικό πάχος: μέγιστο πάχος προς το μήκος χορδής. t/c

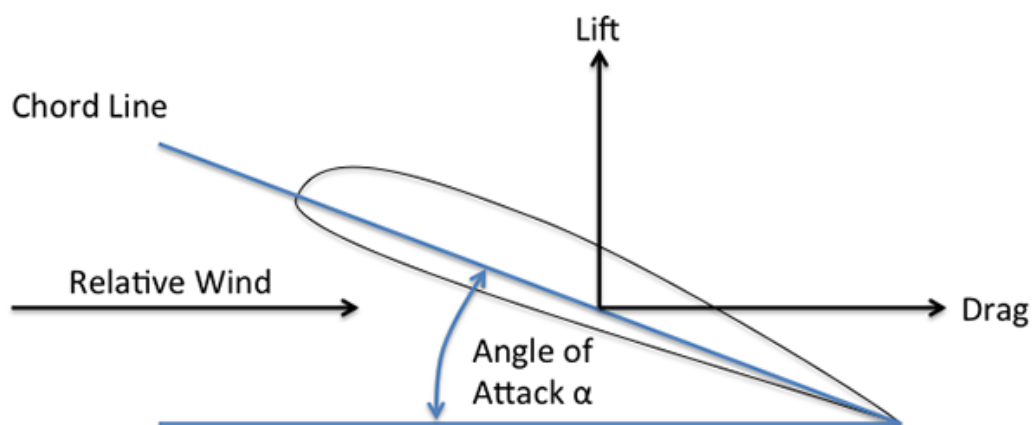
Σχετική καμπυλότητα: μέγιστη καμπυλότητα προς το μήκος της χορδής. f/c

Σχετική θέση μέγιστου πάχους: η θέση μέγιστου πάχους προς μήκος χορδής. Xt/c

Σχετική θέση μέγιστης καμπυλότητας: η θέση μέγιστης καμπυλότητας προς το μήκος της χορδής. Xf/c

Γωνία προσβολής (Angle of attack AoA)

Είναι η γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης της ροής του ρευστού και της χορδής της πτέρυγας.



Εικόνα 16: Γωνία προσβολής - Γωνία πρόσπτωσης

Γωνία πρόσπτωσης (Angle of incidence Aoi)

Είναι η γωνία που σχηματίζει η χορδή με το διαμήκη άξονα του οχήματος που είναι προσαρτημένη η πτέρυγα. Στην περίπτωση που ο διαμήκης άξονας του οχήματος παραμένει παράλληλος στην κίνηση του ρευστού, όπως για παράδειγμα σε ένα αυτοκίνητο τότε η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με την γωνία προσβολής. Στην περίπτωση όμως ενός αεροσκάφους που ο διαμήκης άξονας δεν είναι πάντα παράλληλος στην ροή του ρευστού τότε η γωνία πρόσπτωσης είναι διαφορετική από την γωνία προσβολής και το άθροισμα των γωνιών του διαμήκη άξονα του αεροσκάφους με την ροή και της γωνίας πρόσπτωσης ισούται με την γωνία προσβολής.

4.2.2. Είδη αεροτομής

Οι αεροτομές ανάλογα με το σχήμα κατατάσσονται στην τέσσερις παρακάτω κατηγορίες.

- **Συμμετρική**

Είναι η αεροτομή που και οι δύο επιφάνειες τις έχουν τον ίδιο βαθμό καμπυλότητας και είναι συμμετρικές ως προς την χορδή. Η άντωση σε αυτού του τύπου αεροτομές εξαρτάται μόνο από την γωνία προσβολής.

- **Ημισυμμετρική**

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν αεροτομές που και οι δύο του επιφάνειες είναι καμπύλες αλλά όχι στον ίδιο βαθμό.

- **Επίπεδη**

Είναι αεροτομές, όπου η μια τους πλευρά είναι επίπεδη και ταυτίζεται με την χορδή.

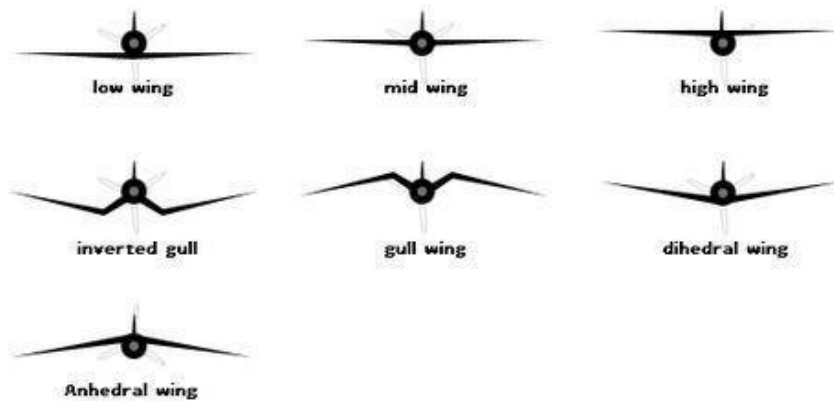
- **Κυρτή**

Αεροτομές που είναι και οι δύο τους πλευρές καμπύλες, σε διαφορετικό βαθμό, προς την ίδια κατεύθυνση.

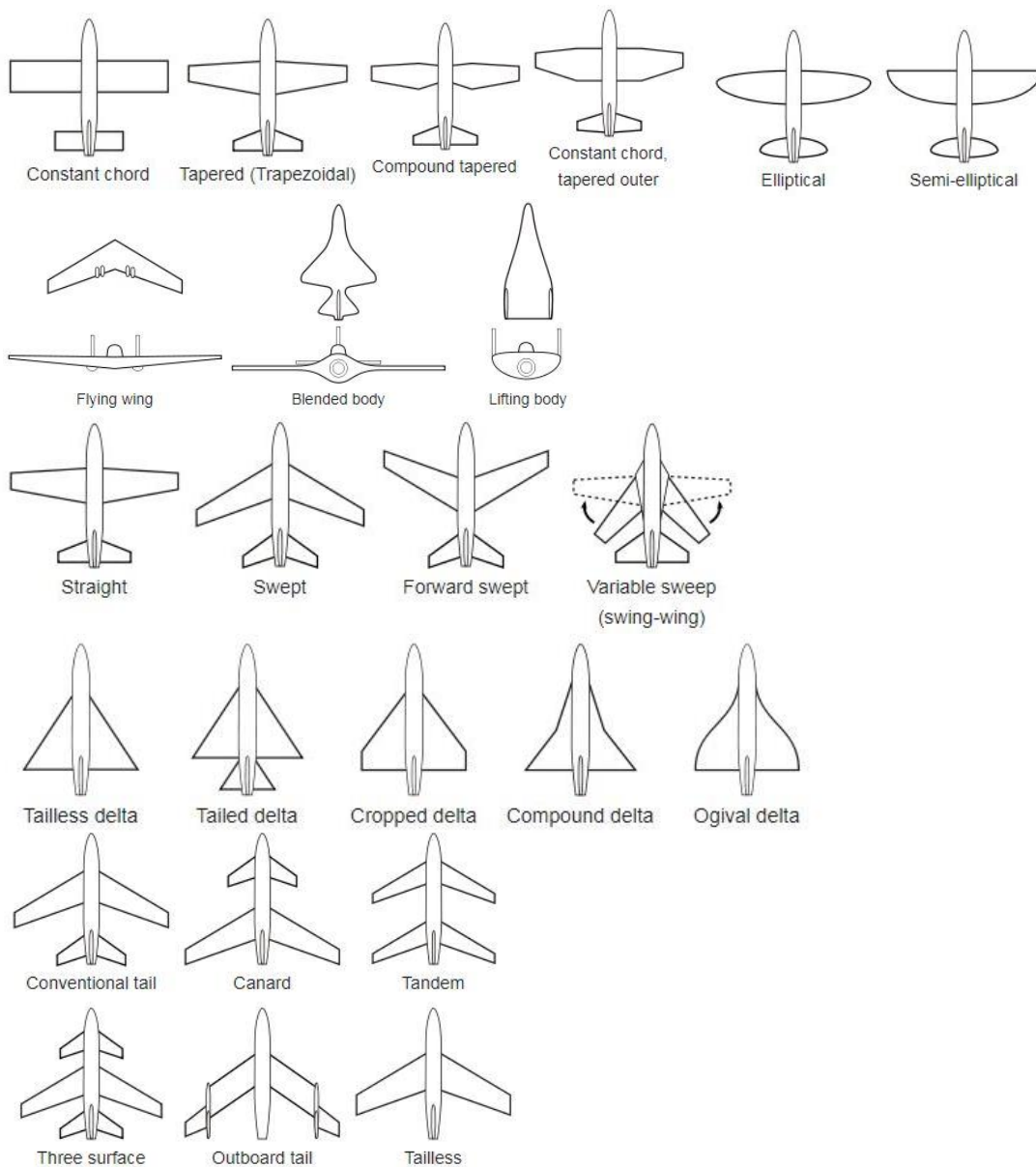
4.2.3. Είδη πτερύγων

Πέραν της γεωμετρίας της αεροτομής οι πτέρυγες διαφέρουν και κατηγοριοποιούνται και με βάση τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως το σχήμα τους σε κάτοψη και στην μπροστινή όψη. Αυτή η γεωμετρία έχει καθοριστικό ρόλο σε πτέρυγες που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική καθώς έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του αεροσκάφους αλλά και στις μεγάλες ταχύτητες, κοντά και μετά το 1Mach . Στην συγκεκριμένη εργασία αυτά τα είδη αναφέρονται επιγραμματικά καθώς η πτέρυγα παραλληλόγραμμη, μελετάται μόνη της και σε χαμηλές ταχύτητες.

Οι συνηθέστεροι τύποι γεωμετριών, πτερύγων, παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες (17,18).



Εικόνα 17: Τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά πτερύγων ως την μπροστινή όψη τους.



Εικόνα 18: Γεωμετρικές πτερύγων αεροσκαφών ως προς την κάτοψη

5. Αεροδυναμική

Η Αεροδυναμική είναι ο κλάδος της Μηχανικής Ρευστών που ασχολείται με την μελέτη της ροής του αέρα (και άλλων αερίων) γύρω από στερεά σώματα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται λόγω της ροής του αέρα σε στερεά σώματα των οποίων η μία εκ των δύο διαστάσεων που είναι κάθετες στην ροή, είναι περιορισμένη (π.χ. Πτέρυγα).

5.1. Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών

5.1.1. Ροή

Ροή ονομάζεται στην ρευστομηχανική η κίνηση των μορίων του ρευστού μεταξύ δύο σημείων.

Γραμμή ροής είναι ο γεωμετρικός τόπος των θέσεων ενός μορίου του ρευστού, στην οποία εφάπτεται σε κάθε της σημείο το διάνυσμα της ταχύτητας.

5.1.1.1. Είδη ροής

Υπάρχουν τρεις κατηγοριοποιήσεις της ροής ως προς το είδος της. Η πρώτη είναι, ως ιδανική ή πραγματική ανάλογα με την μελέτη που γίνεται. Η δεύτερη είναι ως προς την συμπίεστικότητα του ρευστού, δηλαδή, συμπίεστη ή ασυμπίεστη, κάτι που εξαρτάται και από το ρευστό και από τη σχετική ταχύτητα του ρευστού. Και τέλος η τρίτη, είναι ο διαχωρισμός της ροής σε τυρβώδη ή ομαλή.

Ιδανική-Πραγματική ροή

Ιδανική ονομάζεται η ροή υποθετικών, ιδανικών ρευστών, τα οποία δεν έχουν ιξώδες και που μεταξύ των μορίων τους αλλά και των στερεών που έρχονται σε επαφή δεν ασκούνται τριβές.

Ενώ πραγματική είναι η ροή πραγματικών ρευστών που μεταξύ των μορίων τους, αλλά και των στερεών που έρχονται σε επαφή, ασκούνται τριβές και διατμητικές τάσεις.

Συμπιεστή-ασυμπίεστη

Η ροή ενός ρευστού χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, συμπιεστή ή ασυμπίεστη ανάλογα με την σχετική ταχύτητα του ρευστού και την ταχύτητα του ήχου στο ρευστό, η αλλιώς τον αριθμό MACH (M).

$$M = \frac{V}{a}$$

Όπου:

- V είναι η σχετική ταχύτητα του ρευστού με το στερεό που έρχεται σε επαφή
- A είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο ρευστό στις συνθήκες που βρίσκεται.

Ασυμπίεστη χαρακτηρίζεται γενικά η ροή κατά την οποία η πυκνότητα ρ του ρευστού δεν μεταβάλλεται.

Στην αεροδυναμική, όπου το ρευστό είναι ο αέρας, ασυμπίεστη θεωρείται η ροή μέχρι την ταχύτητα των 0,4 Mach, η οποία χαρακτηρίζεται και ως Αεροδυναμική μικρών υποηχητικών ταχυτήτων.

Σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 0,4M κατά τις οποίες μεταβάλλεται η πυκνότητα ρ του αέρα η ροή είναι **συμπιεστή** και χωρίζεται επίσης σε υποκατηγορίες.

- 0,4 έως 0,9M Ροή μεγάλων υποηχητικών ταχυτήτων
- 1M Διαχυτική ροή
- M>1 Υπερηχητική

Στρωτή-τυρβώδης

Η ροή διακρίνεται επίσης σε ακόμη δύο κατηγορίες, την στρωτή ή παράλληλη και την τυρβώδη. Ανεξαρτήτως συμπιεστότητας της ροής, ο τύπος της ροής καθορίζεται από την ταχύτητα και το σχήμα του στερεού που έρχεται σε επαφή το ρευστό.

Στη στρωτή ροή οι γειτονικές στρώσεις του ρευστού σχηματίζουν λείες γραμμές ροής χωρίς να γίνεται ανάμιξη μακροσκοπικής κλίμακας μεταξύ δύο γειτονικών στρώσεων.

Στρωτή ροή προκύπτει όταν οι δυνάμεις συνεκτικότητας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδρανείας, λόγω των διατμητικών στάσεων

Κατά την τυρβώδη ροή τα σωματίδια του ρευστού έχουν ακανόνιστη κίνηση και η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του μεταβάλλεται με το χρόνο κατά μέγεθος και κατά διεύθυνση. Οι λείες γραμμές ροής που παρατηρούνται στην στρωτή ροή, διασπώνται πλήρως και υπάρχει έντονη ανάμιξη γειτονικών στρώσεων.

Η τυρβώδης ροή συμβαίνει όταν οι δυνάμεις αδρανείας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνεκτικότητας.

Στα διαγράμματα ροής η στρωτή ροή φαίνεται από τις γραμμές ροής όπου είναι παράλληλες μεταξύ τους, ενώ στην περίπτωση της τυρβώδους ροής οι γραμμές ροής έχουν την μορφή ακανόνιστων καμπυλών που τέμνονται μεταξύ τους.

5.1.1.2. Αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που δείχνει την αναλογία των αδρανειακών δυνάμεων ως προς τις δυνάμεις ιξώδους του ρευστού. Και ορίζεται:

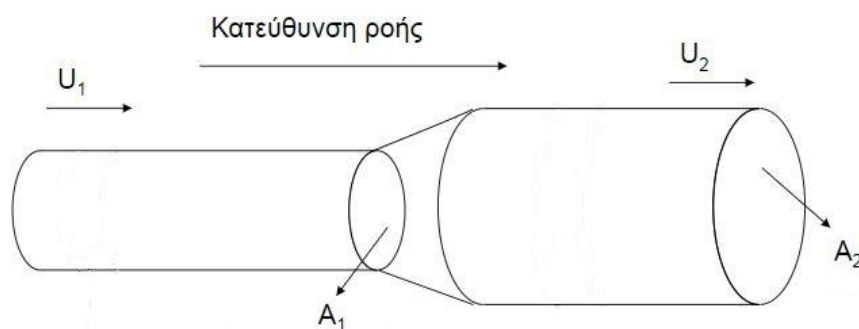
$$(5.1) \quad Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

Όπου:

- ρ : πυκνότητα του ρευστού
- V : σχετική ταχύτητα ρευστού-στερεού
- L : χαρακτηριστικό μήκος σώματος ή μήκος χορδής (C) στην περίπτωση πτέρυγας
- μ : δυναμικό ιξώδες ρευστού
- ν : κινηματικό ιξώδες

Οι μικροί αριθμοί Reynolds προκύπτουν στην περίπτωση που υπερέχουν οι δυνάμεις συνεκτικότητας έναντι των δυνάμεων αδρανείας και οι μεγάλοι αριθμοί το αντίστροφο. Καθώς επίσης ο αριθμός Re δείχνει και την μετάβαση από την στρωτή ροή στην τυρβώδη.

5.1.2. Αρχή συνέχειας της ροής



Η αρχή της συνέχειας της ροής είναι άμεση συνέπεια της αρχής διατήρησης της ύλης. Έτσι η παροχή μάζας ρευστού που διαρρέει έναν αγωγό παραμένει σταθερή ανεξάρτητα των μεταβολών της διατομής του.

$$(5.2) \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$(5.3) \quad \rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

Για ασυμπίεστη ροή $\rho_1 = \rho_2$

$$(5.4) \quad A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Όπου:

ρ : Πυκνότητα του ρευστού

\dot{m} = Παροχή μάζας

A= Διατομή του αγωγού

V= Ταχύτητα

5.1.3. Bernoulli

Το θεώρημα του Bernoulli εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας στα ρευστά και είναι θεμελιώδες θεώρημα για την μηχανική των ρευστών καθώς ορίζει την σχέση πίεσης και ταχύτητας ροής ενός κινούμενου ρευστού.

Έτσι για κάθε μόριο του ρευστού που βρίσκεται σε μια ρευματική γραμμή το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας, κινητικής ενέργειας και ενέργειας θέσεως παραμένει σταθερό. Για δύο σημεία της ρευματικής γραμμής προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$(5.6) \quad P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Ή αλλιώς

$$(5.7) \quad P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{σταθ.}$$

Όπου ο πρώτος όρος P είναι η πίεση, δηλαδή η δυναμική ενέργεια του ρευστού, ο δεύτερος όρος δηλώνει την κινητική ενέργεια του ρευστού και ο τελευταίος όρος δηλώνει την στατική πίεση, δηλαδή την ενέργεια λόγω της θέσης.

Όταν μεταξύ των δύο σημείων του ρευστού δεν υπάρχει υψομετρική διαφορά, άρα $h=0$, ο τελευταίος όρος μηδενίζεται. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση από την εξίσωση Bernoulli προκύπτει ότι όταν αυξάνεται η ταχύτητα ενός ρευστού η πίεση του μειώνεται και το αντίστροφο.

$$(5.8) \quad P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

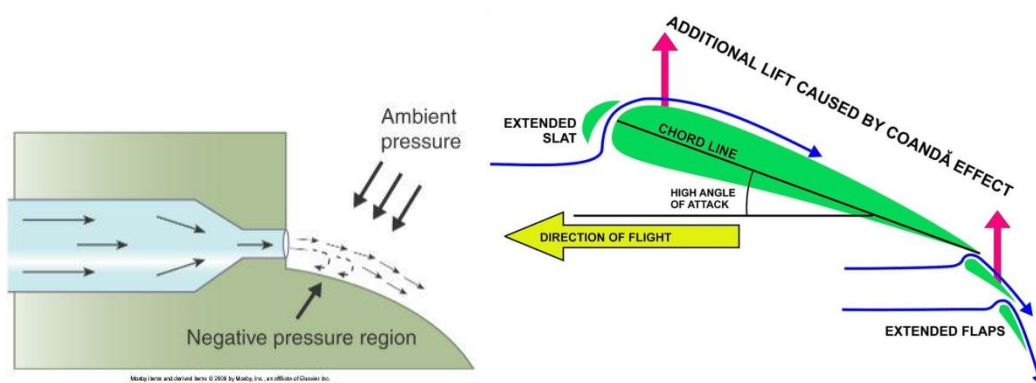
5.1.4. Coanda Effect

Το φαινόμενο «Coanda» συμβαίνει όταν ένα ρεύμα ρευστού έρχεται σε επαφή με μία κυρτή επιφάνεια. Όταν συμβαίνει αυτό το ρευστό έχει την τάση να μένει σε επαφή με την επιφάνεια αυτή και να αλλάζει η αρχική του πορεία ακολουθώντας πλέον εφαπτομενική πορεία με την επιφάνεια.

Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τον Φυσικό Henri - Marie Coanda το 1930, από τον οποίο πήρε και το όνομά του.

Στην καθημερινότητα, ένας εύκολος τρόπος παρατήρησης του είναι η τοποθέτηση μια κυρτής επιφάνειας, π.χ. ενός κουταλιού ή μια μπάλα μέσα στην ροή του νερού κάτω από μια βρύση.

Το φαινόμενο Coanda παρατηρείται και στις πτέρυγες, καθώς το ρευστό (αέρας) έρχεται σε επαφή με την πτέρυγα στην κυρτή της πλευρά, ακολουθεί την κυρτότητα της με αποτέλεσμα να ανακατευθύνεται και να συνεισφέρει στην συνολική άντωση της πτέρυγας.



Εικόνα 19: Coanda Effect

Εικόνα 20: Coanda Effect σε πτέρυγα

5.2. Δυνάμεις στην πτέρυγα

5.2.1. Άντωση

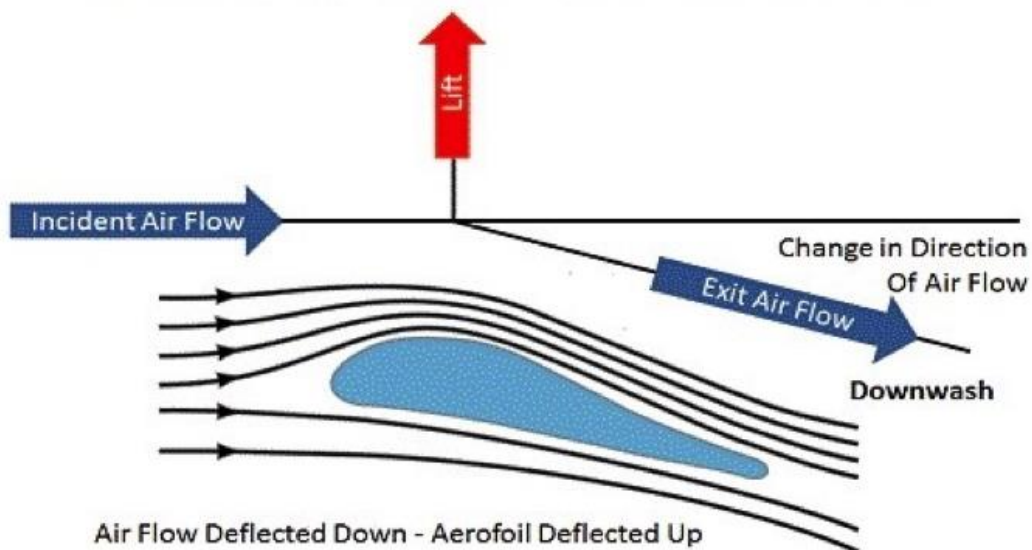
Η μια εκ των δυο δυνάμεων που ασκούνται σε μια πτέρυγα είναι η άντωση. Η άντωση ή αλλιώς δυναμική άνωση, είναι η δύναμη η οποία είναι κάθετη στην ροή του ρευστού και είναι συνήθως η επιθυμητή δύναμη που δημιουργείται από μια πτέρυγα, σε αντίθεση με την αντίσταση, που έχει αντίθετη φορά στην σχετική κίνηση πτέρυγας - ρευστού.

Η άντωση προκύπτει από δυο νόμους. Τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα που αφορά την δράση-αντίδραση. Καθώς, δηλαδή, η πτέρυγα αλλάζει κατεύθυνση στο ρευστό, ασκεί δύναμη σε αυτό, οπότε ασκείται και μια ίση και αντίθετη δύναμη στην πτέρυγα. Ο

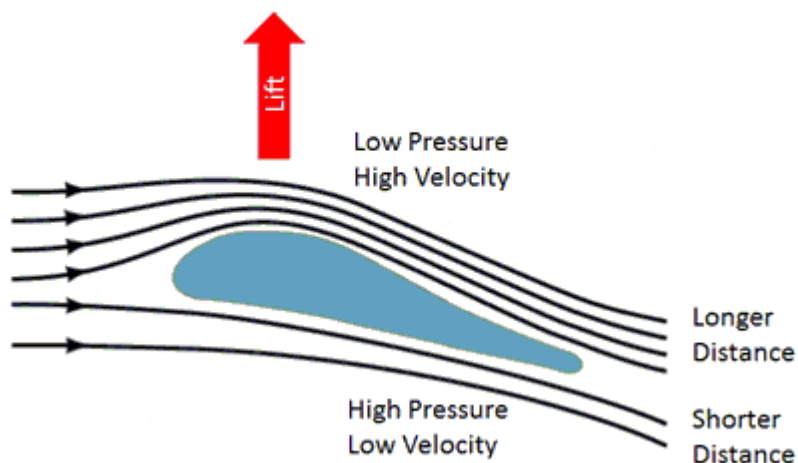
δεύτερος νόμος από τον οποίο προκύπτει η άντωση είναι ο νόμος του Bernoulli, όπου λόγω του σχήματος της πτέρυγας το ρευστό διανύει μεγαλύτερη απόσταση στην μία της πλευρά, άρα έχει και μεγαλύτερη ταχύτητα. Συνεπώς, βάσει της εξίσωσης της συνέχειας, έχοντας μεγαλύτερη ταχύτητα, έχει μικρότερη πίεση, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφορά πίεσης στις δυο πλευρές της πτέρυγας και να ασκείται δύναμη σε αυτήν.

$$(5.9) \quad L = \frac{1}{2} * Cl * \rho * V^2 * S$$

Aerodynamic Lift – Explained by Newton’s Laws of Motion



Aerodynamic Lift – Explained by Bernoulli’s Conservation of Energy Law



Εικόνα 21: Άντωση κατά τον Τρίτο Νόμο του Νεύτωνα και κατά Bernoulli.

5.2.2. Οπισθέλκουσα

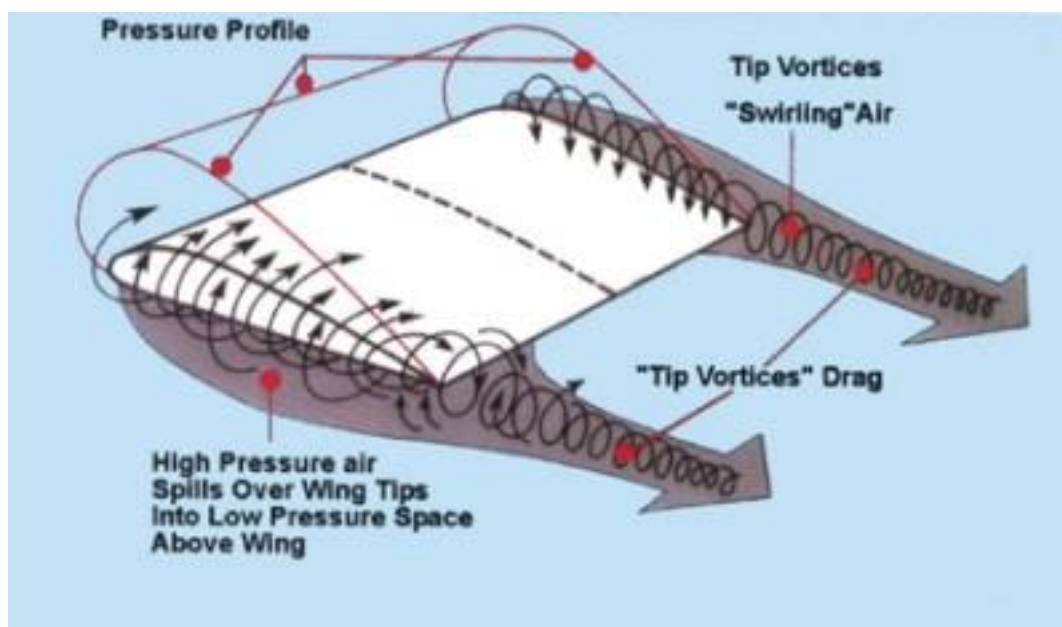
Οπισθέλκουσα είναι ο αεροδυναμικός όρος για την δύναμη της αντίστασης του ρευστού στην κίνηση ενός σώματος. Είναι συνήθως μη επιθυμητή δύναμη για ένα αεροδυναμικό σώμα και ιδίως για μια πτέρυγα, εκτός ορισμένων περιπτώσεων (όπου η πτέρυγα χρησιμοποιείται για επιβράδυνση). Η οπισθέλκουσα είναι ένα σύνολο δυνάμεων που δρουν σε ένα σώμα, από το ρευστό στο οποίο κινείται, με αντίθετη φορά στην κίνησή του.

Η συνολική οπισθέλκουσα σε μια πτέρυγα αποτελείται από το άθροισμα επιμέρους συνιστωσών, που αναλύονται παρακάτω, και διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες την επαγωγική οπισθέλκουσα και την παρασιτική. Η παρασιτική διακρίνεται περαιτέρω στην αντίσταση τριβής, την αντίσταση μορφής και την επαγόμενη αντίσταση.

5.2.2.1. Επαγωγική Οπισθέλκουσα (D_i)

Η επαγωγική οπισθέλκουσα είναι υποπροϊόν της παραγωγής άντωσης της πτέρυγας και μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας.

Η κύρια πηγή της είναι οι αεροδίνες, οι οποίες είναι περιστρεφόμενα ρεύματα αέρα στο χείλος εκφυγής της πτέρυγας που δημιουργούνται λόγω της διαφοράς πίεσης των αερορευμάτων μεταξύ των δύο πλευρών (άνω και κάτω) της πτέρυγας. Έτσι το υψηλής πίεσης αερόρευμα που παράγεται κατά την δημιουργία άντωσης συναντά το χαμηλής πίεσης της άλλη πλευράς της πτέρυγας και προκύπτει η σπειροειδής δίνη.



Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση των αεροδινών στα άκρα της πτέρυγας.

5.2.2.2. Παρασιτική οπισθέλκουσα

Η παρασιτική οπισθέλκουσα δεν σχετίζεται απ' ευθείας με την παραγωγή άντωσης. Είναι αντίσταση που προκύπτει από την κίνηση του σώματος στο ρευστό και αυξάνεται με την άνοδο της ταχύτητας. Διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες.

5.2.2.2.1. Αντίσταση Τριβής (D_f)

Η αντίσταση τριβής είναι η κύρια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης όταν το σώμα το οποίο κινείται μέσα στο ρευστό είναι πεπλατυσμένο παράλληλα με την ροή και έχει μικρή διατομή κάθετα στην ροή, όταν το σώμα έχει δηλαδή αεροδυναμικό σχήμα όπως μια πτέρυγα.

Η αντίσταση οφείλεται στην τριβή μεταξύ του ρευστού και των επιφανειών του σώματος λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού και την τραχύτητα των επιφανειών του σώματος.

Ο υπολογισμός της αντίστασης τριβής γίνεται θεωρώντας μια επίπεδη πλάκα παράλληλη στην ροή, της οποίας η επιφάνεια είναι ίση με του υπό μελέτη αντικειμένου.

Ο τύπος υπολογισμού της αντίστασης ροής είναι ο εξής:

$$(5.10) \quad D_f = \frac{1}{2} \times C_{d_f} \times \rho \times V^2 \times A$$

Όπου:

- C_{d_f} : ο συντελεστής τριβής
- ρ : η πυκνότητα του ρευστού
- V : η σχετική ταχύτητα του αντικειμένου με το ρευστό
- A : η επιφάνεια της πλάκας

Ο υπολογισμός του συντελεστή τριβής μπορεί να επιτευχθεί αναλυτικά μόνο στην περίπτωση στρωτού οριακού στρώματος από την σχέση:

$$(5.11) \quad C_{d_f} = \frac{1,328}{\sqrt{R}}$$

Όπου:

- $RL = V \times \frac{L}{\nu}$
- V : η ταχύτητα
- L : το μήκος της πλάκας
- ν : το κινηματικό ιξώδες

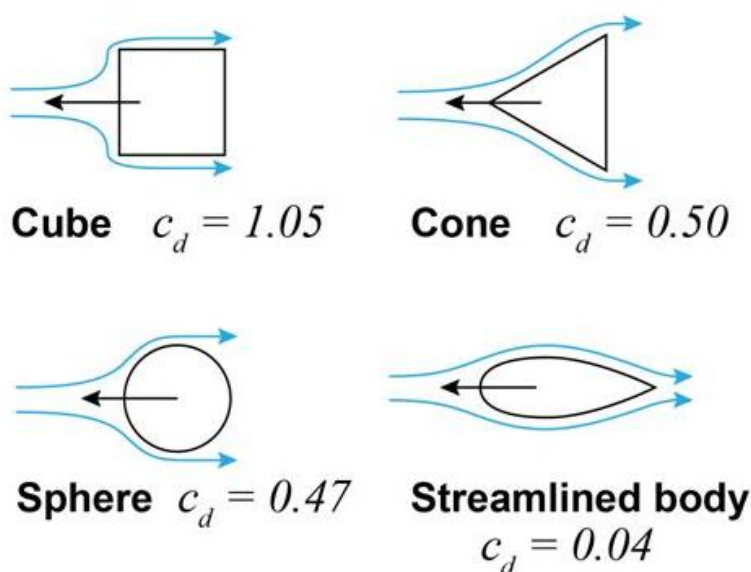
5.2.2.2. Οπισθέλκουσα Μορφής (D_p)

Η οπισθέλκουσα μορφής D_p εξαρτάται από το σχήμα του σώματος που έρχεται σε επαφή με το ρευστό και τον τρόπο που διαχωρίζεται η ροή του ρευστού δημιουργώντας διαφορά πίεσης στην πρόσθια και την πίσω επιφάνεια του σώματος. Όταν δηλαδή το ρευστό προσκρούει στην πρόσθια επιφάνεια του σώματος μειώνεται η ταχύτητά του και αυξάνεται η πίεση. Ενώ στην πίσω του πλευρά εμφανίζονται στροβιλισμοί και η πίεση του ρευστού μειώνεται. Με αυτή την διαφορά πιέσεων να παράγει μια δύναμη αντίθετη στην κίνηση του σώματος.

$$(5.12) \quad D_p = \frac{1}{2} C_{D_p} \times \rho \times A \times V^2$$

Η αντίσταση μορφής εξαρτάται από το σχήμα του αντικείμενου και από τον προσανατολισμό του σε σχέση με την ροή. Για αντικείμενα με γωνίες και μεγάλες κάθετες επιφάνειες στην ροή, ο συντελεστής αυξάνεται και είναι σχεδόν ανεξάρτητος από τον αριθμό Reynolds καθώς η ροή αποκολλάται από το αντικείμενο στις γωνίες. Όταν το υπό μελέτη αντικείμενο δεν έχει αυτά τα χαρακτηριστικά, δηλαδή κάθετες επιφάνειες και γωνίες, ο συντελεστής αντίστασης μορφής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds καθώς η αποκόλληση της ροής συμβαίνει σε σημεία που εξαρτώνται από αυτόν.

Τέλος όταν η συνολική οπισθέλκουσα εξαρτάται κυρίως στην αντίσταση μορφής τότε ως επιφάνεια (A), είναι η επιφάνεια προσβολής, δηλαδή προβολή του αντικείμενου στο επίπεδο κάθετο στην ροή. Όταν το σχήμα του αντικείμενου είναι αεροδυναμικό, τότε ως επιφάνεια, λαμβάνεται η συνολική επιφάνεια του αντικείμενου που έρχεται σε επαφή με το ρευστό, π.χ. για μια αεροτομή λαμβάνεται το εμβαδό της S , δηλαδή το εκπέτασμα επί την χορδή.



Εικόνα 23: Τυπικοί συντελεστές οπισθέλκουσας βασικών γεωμετριών.

5.2.2.2.3. Οπισθέλκουσα εξ αλληλεπιδράσεων (D_a)

Στην περίπτωση που το σχήμα του σώματος το οποίο κινείται στο ρευστό είναι σύνθετο, όπως ένα αεροσκάφος ή ένα αυτοκίνητο, τότε η συνολική οπισθέλκουσα που προκύπτει είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των επιμέρους οπισθέλκουσών που παράγουν οι επιφάνειες που το συγκροτούν. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης των ροών του ρευστού σε σημεία που υπάρχουν ενώσεις, όπως είναι η πτέρυγα με την άτρακτο ενός αεροσκάφους. Αυτή η διαφορά που προκύπτει μεταξύ των οπισθέλκουσών των επιφανιών και της συνολικής είναι η **οπισθέλκουσα εξ αλληλεπιδράσεων**.

5.2.2.3. Συνολική οπισθέλκουσα

Η συνολική οπισθέλκουσα D είναι το σύνολο των παραπάνω αντιστάσεων, δηλαδή της επαγόμενης, της αντίστασης μορφής, της αντίστασης τριβής και της αντίστασης εξ αλληλεπιδράσεων σε ένα σώμα και προκύπτει από το άθροισμα αυτών.

$$(5.13) \quad D = D_f + D_p + D_i + D_a$$

Για να μετρηθεί η συνολική αντίσταση πρέπει να γίνει μέσω προσομοίωσης της ροής σε λογισμικό (CFD) ή μέτρηση της μέσω πειραματικής διάταξης στην αεροσήραγγα.

Η συνολική οπισθέλκουσα εκφράζεται επίσης και από τον τύπο:

$$(5.14) \quad D = \frac{1}{2} * C_d * \rho * V^2 * S$$

Και εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται και η συνολική άντωση πέραν του συντελεστή, κάτι το οποίο είναι προφανές καθώς αποτελούν συνιστώσες της ίδια δύναμης.

5.2.3. Παράγοντες Άντωσης και Οπισθέλκουσας

Η άντωση και η οπισθέλκουσα που παράγονται από μία πτέρυγα εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες οι οποίοι όμως χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι παράγοντες που σχετίζονται με το ρευστό και εκείνοι που σχετίζονται με την γεωμετρία της πτέρυγας.

Παράγοντες που εξαρτώνται από το ρευστό

Ταχύτητα: Η σχετική ταχύτητα πτέρυγας/ρευστού είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τόσο την παραγόμενη άντωση όσο και την οπισθέλκουσα. Αυτό συμβαίνει διότι οι δύο αυτές δυνάμεις εξαρτώνται από το τετράγωνο της ταχύτητας.

Πυκνότητα: Η πυκνότητα του ρευστού επηρεάζει και αυτή και τις δύο δυνάμεις, άντωση και οπισθέλκουσα. Η αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση και των δύο δυνάμεων όπως και η ταχύτητα αλλά με την διαφορά ότι η αύξηση των μεγεθών είναι ανάλογη. Όσο αφορά τις πτέρυγες, λόγω του ότι οι διαφορές στην πυκνότητα του αέρα είναι μικρές η επίδραση είναι σχετικά μικρή.

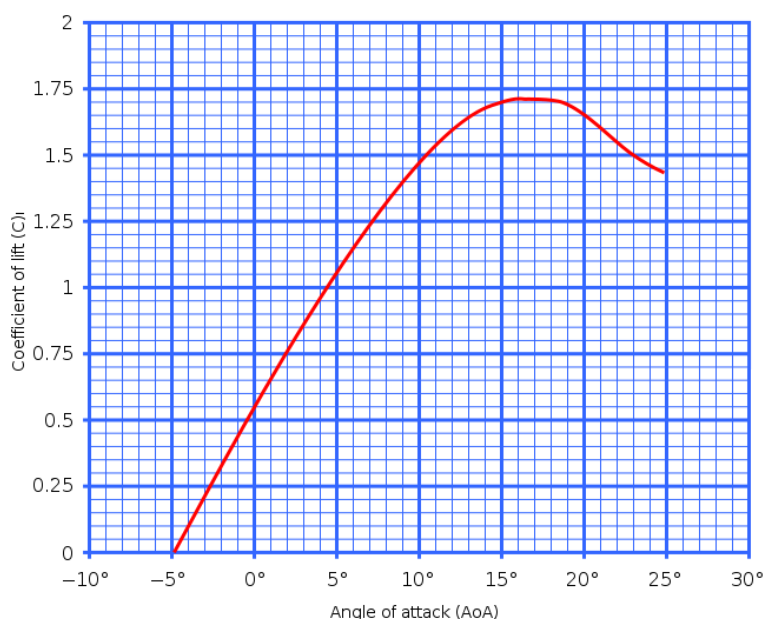
Παράγοντες που εξαρτώνται από την γεωμετρία

Οι παράγοντες που εξαρτώνται από την γεωμετρία είναι σημαντικότεροι των παραγόντων που εξαρτώνται από το ρευστό καθώς είναι αυτοί οι οποίοι μπορούν να μεταβληθούν αλλά και γιατί σε αντίθεση με τους με τους δεύτερους επηρεάζουν την άντωση και την οπισθέλκουσα με διαφορετικό τρόπο. Ενώ η αύξηση της ταχύτητας και της πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση τόσο της άντωσης όσο και της οπισθέλκουσας, στους παράγοντες που εξαρτώνται από την γεωμετρία δεν ισχύει αυτό.

Γεωμετρία αεροτομής: Η γεωμετρία της αεροτομής επηρεάζει την άντωση και την οπισθέλκουσα καθώς ουσιαστικά καθορίζει τους συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας. Έτσι μέσω της αεροδυναμικής μελέτης για την εκάστοτε αεροτομή σχεδιάζεται η γεωμετρία της ώστε να έχει τους κατάλληλους αεροδυναμικούς συντελεστές για την χρήση που προορίζεται.

Γωνία προσβολής: Η γωνία προσβολής επηρεάζει συνολικά τους συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας, καθώς μεταβάλλει συνολικά την γεωμετρία της πτέρυγας ως προς την ροή του ρευστού.

Εμβαδό πτέρυγας: Το εμβαδό της πτέρυγας επηρεάζει γραμμικά την άντωση και την οπισθέλκουσα. Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 5.2.2.4 «οπισθέλκουσα μορφής», όταν το σχήμα έχει αεροδυναμική μορφή, όπως μια πτέρυγα, λαμβάνεται υπ' όψιν η συνολική επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το ρευστό και όχι μόνο η προβαλλόμενη κάθετα στην ροή.



Εικόνα 24: Τυπικό διάγραμμα Συντελεστή Άντωσης – Γωνίας Πρόσπτωσης.

5.2.4. Αεροδυναμικά κέντρα αναφοράς

Ως αεροδυναμικά κέντρα αναφοράς ορίζονται σημεία της αεροτομής, για τα οποία ισχύουν συγκεκριμένες συνθήκες που αφορούν τις δυνάμεις που ασκούνται στην πτέρυγα και χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς.

Τα δύο κύρια σημεία είναι το **αεροδυναμικό κέντρο (ac)** και το **κέντρο πίεσης (cp)**.

Το **αεροδυναμικό κέντρο**, είναι το σημείο ως προς το οποίο η ροπή M , είναι ανεξάρτητη της γωνίας πρόσπτωσης και για χαμηλούς αριθμούς Mach βρίσκεται στο $C/4$ (25% της χορδής) ή πολύ κοντά σε αυτό.

Το **κέντρο πίεσης** είναι το σημείο όπου εφαρμόζεται η συνισταμένη δύναμη (F) στην αεροτομή και λόγω αυτού και το σημείο όπου μηδενίζεται η ροπή M . Το σημείο αυτό βρίσκεται μεταξύ του αεροδυναμικού κέντρου και του μέσου της χορδής και η ακριβής θέση του εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης, την ταχύτητα του αέρα και την γεωμετρία της πτέρυγας. Για χαμηλές ταχύτητες και μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης βρίσκεται πιο κοντά στο αεροδυναμικό κέντρο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, για μεγάλες ταχύτητες και μικρές γωνίες πρόσπτωσης βρίσκεται πιο κοντά στο μέσο της χορδής, λόγω της αναλογίας των δυνάμεων F_a και F_c .

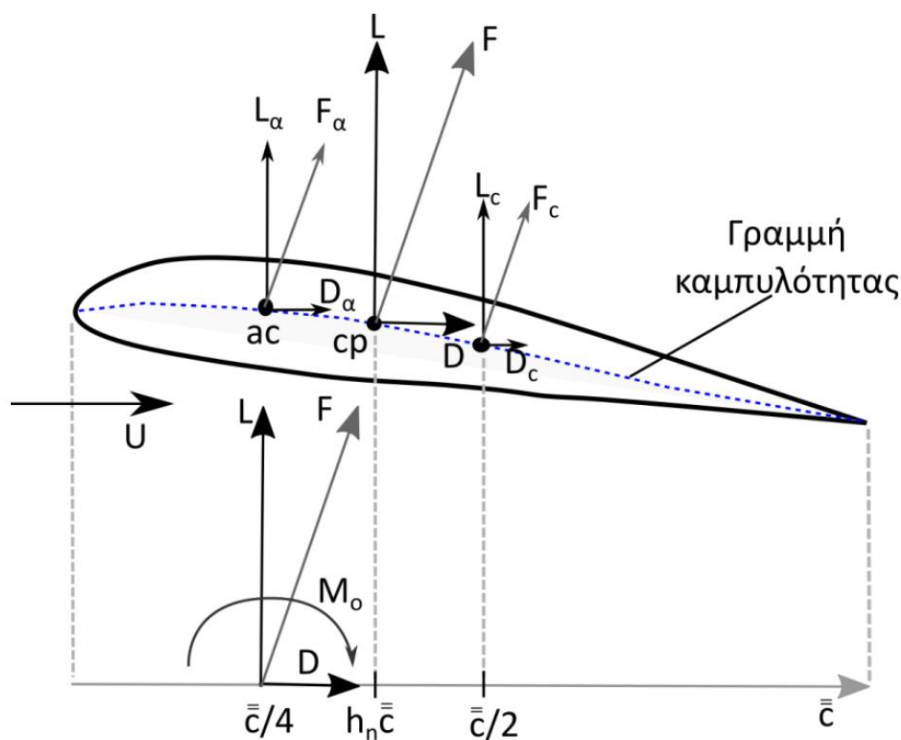
Οι δυνάμεις της άντωσης και της οπισθέλκουσας είναι συνιστώσες της συνολικής δύναμης F που ασκείται στην πτέρυγα. Η δύναμη F μπορεί να αναλυθεί και σε δύο άλλες συνιστώσες, την F_a την δύναμη λόγω γωνίας πρόσπτωσης και την F_c λόγω καμπυλότητας της πτέρυγας, κάθε μία εκ των οποίων αναλύεται σε L_a, D_a και L_c, D_c αντίστοιχα.

Η F_a εφαρμόζεται στο αεροδυναμικό κέντρο της αεροτομής, ενώ η F_c είναι σταθερή και εφαρμόζεται στο μέσο της χορδής και στην περίπτωση συμμετρικής αεροτομής μηδενίζεται, αφού δεν υπάρχει καμπυλότητα.

$$(5.15) \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_c$$

$$(5.16) \quad \mathbf{F}_a = \mathbf{L}_a + \mathbf{D}_a$$

$$(5.17) \quad \mathbf{F}_c = \mathbf{L}_c + \mathbf{D}_c$$



Εικόνα 25: Ανάλυση δυνάμεων στην αεροτομή.

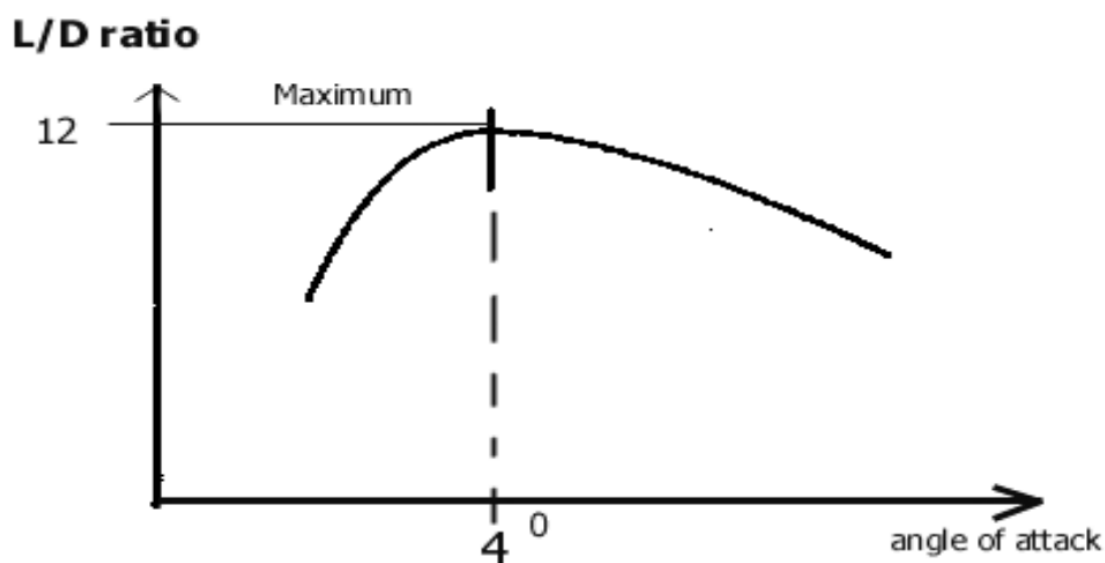
5.2.5. Λόγος άντωσης-αντίστασης K

Ο λόγος των δύο παραγόμενων δυνάμεων, της άντωσης προς την αντίσταση (L/D), για μια πτέρυγα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης, την ταχύτητα και την γεωμετρία της πτέρυγας. Αυτό ο λόγος επιδιώκεται να είναι το δυνατόν μεγαλύτερος, δηλαδή η άντωση να είναι μεγαλύτερη της οπισθέλκουσας.

Για κάθε αεροτομή υπάρχει μία βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης, όπου ο λόγος άντωσης-αντίστασης παίρνει την μεγαλύτερη δυνατή τιμή για μια δεδομένη ταχύτητα. Αυτή η γωνία είναι επιθυμητή, διότι σε μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερη άντωση αλλά αυξάνεται σημαντικά και η οπισθέλκουσα.

Γενικά, για μια δεδομένη πτέρυγα και μια δεδομένη ταχύτητα, ο λόγος K μεταβάλλεται ανάλογα με την γωνία προσβολής.

$$(5.18) \quad K = \frac{Lift}{Drag} = \frac{Cl}{Cd}$$

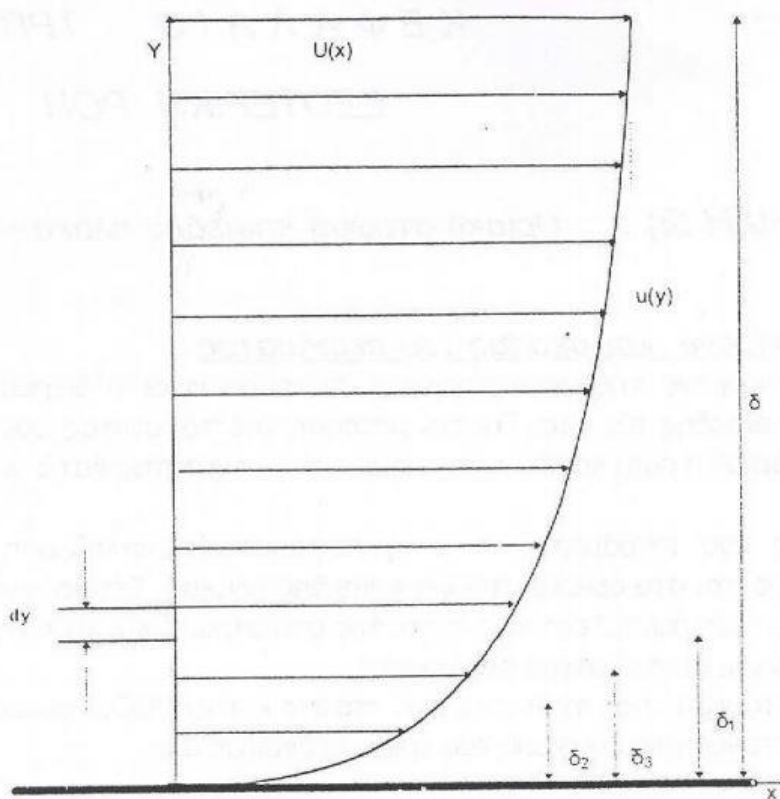


Εικόνα 26: Διάγραμμα λόγου Άντωσης προς Αντίσταση – Γωνίας Πρόσπτωσης.

5.2.6. Οριακό στρώμα

Όταν υπάρχει ροή ρευστού παράλληλα στην επιφάνεια ενός στερεού σώματος με ταχύτητα U στην κύρια μάζα του ρευστού, στο σημείο επαφής του ρευστού με το στερεό σώμα η ταχύτητα μηδενίζεται λόγω της τριβής. Μεταξύ της μηδενικής ταχύτητας του ρευστού στην επιφάνεια του σώματος και της ταχύτητας του στην κύρια μάζα του υπάρχει μία απόσταση με διεύθυνση y κάθετα στην ροή, στην οποία η ταχύτητα μεταβάλλεται και στην οποία αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις λόγω του ιξώδους του ρευστού, αυτή η περιοχή της ροής όπου συντελείται η μεταβολή du/dy ονομάζεται **Οριακό στρώμα**.

Το πάχος του Οριακού στρώματος δ , ορίζεται ως η απόσταση όπου η ταχύτητα u διαφέρει κατά 1% από την ταχύτητα του ρευστού στην κύρια μάζα U , δηλαδή $u=0.99U$ καθώς θεωρητικά δεν έχει συγκεκριμένο πάχος διότι η εξίσωση $u=U$ συντελείται στο άπειρο.



Εικόνα 27: Μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού στο οριακό στρώμα.

Πέραν του συνολικού πάχους του οριακού στρώματος υπάρχουν και άλλα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το οριακό στρώμα. Τα μεγέθη αυτά είναι το πάχος μετάθεσης δ_1 , το πάχος ορμής δ_2 , το πάχος απώλειας ενέργειας δ_3 , η τάση στο τοίχωμα τ_w και ο τοπικός συντελεστής τριβής C_f .

Το **πάχος μετάθεσης** είναι το πάχος κατά το οποίο μετατίθεται η εξωτερική ροή ώστε να διατηρηθεί η συνέχεια μάζας μέσα στο οριακό στρώμα. Αυτό προκύπτει μέσω της εξίσωσης συνέχειας.

$$(5.19) \quad \int_0^{\delta} (U - u(y)) dy = \int_0^{\delta_1} U dy = U\delta_1$$

$$(5.20) \quad \delta_1 = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

Το **πάχος ορμής** είναι το ιδεατό πάχος στο οποίο η ροή με ταχύτητα U έχει ίση ορμή με την απώλεια ορμής σε όλο το οριακό στρώμα πάχους δ .

$$(5.21) \quad U \int_0^{\delta_2} \rho U dy = (U - u) \int_0^{\delta} \rho U dy$$

$$(5.22) \quad \delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

Το **πάχος απώλειας ενέργειας** αντίστοιχα με το πάχος ορμής, είναι το πάχος που έχει ενέργεια ίση με την απώλεια σε όλο το οριακό στρώμα.

$$(5.23) \quad \delta_3 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u^2}{U^2}\right) dy$$

Ο τοπικός συντελεστής τριβής C_f και η τάση που δημιουργείται στο τοίχωμα δίνονται από τις δύο παρακάτω εξισώσεις.

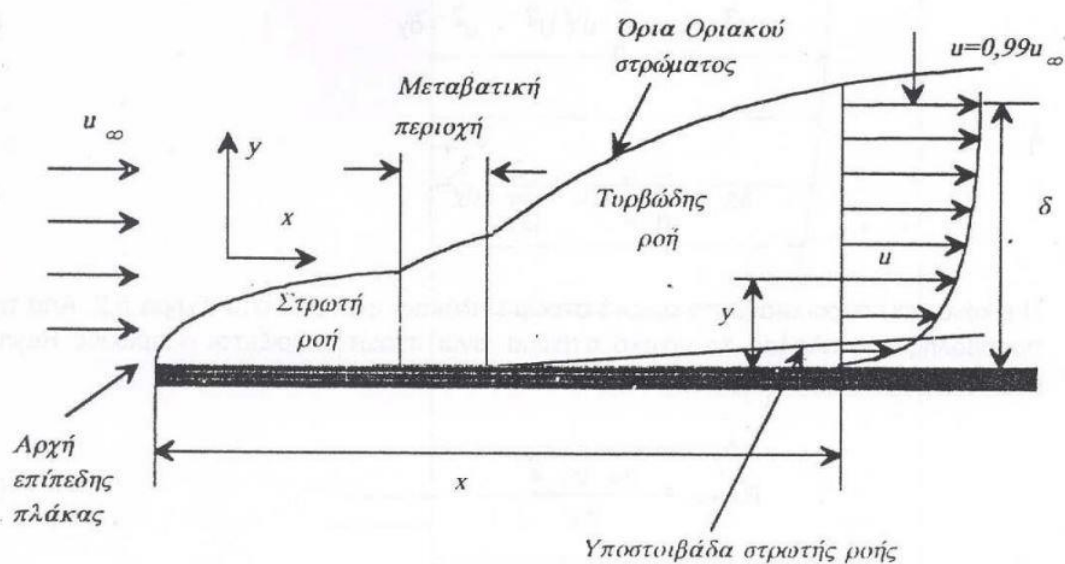
$$(5.24) \quad C_f = \frac{\tau_w}{\rho u^2 / 2}$$

$$(5.25) \quad \tau_w = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μεταβολή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη καθώς αυξάνει ο αριθμός Reynolds με την απόσταση από την ακμή προσβολής. Συγκεκριμένα υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του Re σε κάθε περίπτωση όπου το οριακό στρώμα από την στρωτή ροή περνάει μέσω μια μεταβατικής περιοχής σε τυρβώδη ροή.

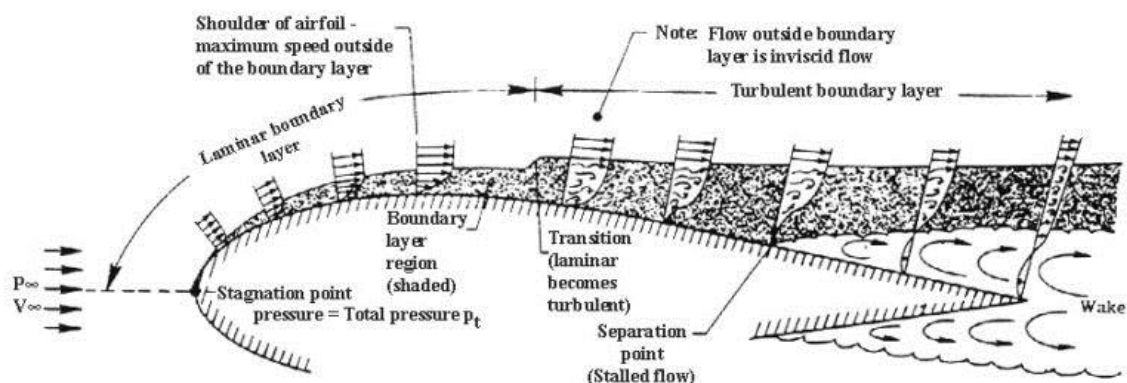
$$(5.26) \quad Re = \frac{\rho u x}{\mu}$$

Όπου x , η απόσταση από την ακμή προσβολής.



Εικόνα 28: Διάγραμμα ροής ρευστού σε επαφή με επίπεδη πλάκα.

5.2.7. Αποκόλληση Ροής στο Οριακό Στρώμα



Εικόνα 29: Σχηματική απεικόνιση της αποκόλλησης του ρευστού από την επιφάνεια της πτέρυγας.

Κατά την ροή ρευστού γύρω από καμπύλη επιφάνεια όπως σε μία πτέρυγα ή έναν κύλινδρο η ταχύτητα της ροής αυξάνεται από την ακμή προσβολής μέχρι το σημείο μέγιστου πάχους, ενώ από το μέγιστο πάχους και μετά η ροή επιβραδύνεται λόγω της μείωσης της διατομής της ροής. Έτσι σύμφωνα με τον νόμο του Bernoulli, η πίεση από την ακμή προσβολής μέχρι το μέγιστο πλάτος μειώνεται ενώ μετά από αυτό αυξάνεται.

Η αύξηση αυτή της πίεσης ασκεί δυνάμεις στα σωματίδια του ρευστού αντίθετα στην φορά της κίνησής τους. Αν ένα σωματίδιο του ρευστού που κινείται κοντά στην επιφάνεια εντός του οριακού στρώματος, η ταχύτητά του είναι μειωμένη και αδράνειά του δεν επαρκεί για να ξεπεράσει της δυνάμεις που του ασκούνται από την αυξημένη πίεση, τότε η ταχύτητά του παράλληλα στην επιφάνεια (και παράλληλα στην ροή εκτός του οριακού στρώματος) μηδενίζεται. Αφού η αρχική ταχύτητα του μηδενιστεί αποκτά ταχύτητα λόγω των δυνάμεων πίεσης με κατεύθυνση προς την ροή εκτός του οριακού στρώματος, δηλαδή αποκολλάται από την επιφάνεια.

Κατά την αποκόλληση του οριακού στρώματος η ροή μετατρέπεται σε τυρβώδη και αυτό συνεπάγεται με μεγάλη αύξηση της οπισθέλκουσας καθώς και μείωση της παραγόμενης άντωσης στην περίπτωση πτερυγών.

Τα αεροδυναμικά σώματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να αποφεύγεται όσο το δυνατόν περισσότερο η αποκόλληση του οριακού στρώματος έχοντας στρογγυλεμένη ακμή προσβολής και αιχμηρή ακμή εκφυγής. Με αυτό τον τρόπο η ροή ευνοείται από την μειωμένη πίεση στην ακμή προσβολής και το οριακό στρώμα αποκολλάται στην ακμή εκφυγής.

5.2.8. Γωνία προσβολής και κρίσιμη γωνία

Στις πτέρυγες καθοριστικό ρόλο για την αποκόλληση έχει η γωνία προσβολής καθώς στις μικρές γωνίες το σημείο αποκόλλησης βρίσκεται σχεδόν στην ακμή εκφυγής, όταν αυξάνεται όμως η γωνία το σημείο αυτό μεταφέρεται προς της ακμή προσβολής αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια της πτέρυγας στην οποία η ροή είναι τυρβώδης.

Για κάθε πτέρυγα υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία, η κρίσιμη γωνία προσβολής, όπου στις γωνίες ίσες ή μεγαλύτερες αυτής, το σημείο αποκόλλησης μεταφέρεται απότομα προς στην ακμή προσβολής με αποτέλεσμα την αντίστοιχα απότομη μείωση του συντελεστή άντωσης. Αυτό συμβαίνει διότι στο άνω και εμπρόσθιο τμήμα της πτέρυγας μειώνεται η ταχύτητα και συνεπώς αυξάνεται η πίεση. Παράλληλα υπάρχει στην πίσω πλευρά της πτέρυγας μια μικρή μείωση της πίεσης η οποία αντισταθμίζει την αύξηση της πίεσης στο μπροστινό μέρος, η οποία αυξάνει τον συντελεστή άντωσης. Σε μεγαλύτερες γωνίες η μείωση της υποπίεσης στην άνω πλευρά είναι τέτοια που οδηγεί σε μείωση του συντελεστή άντωσης.

Ταυτόχρονα με την απότομη μείωση του συντελεστή άντωσης μετά την κρίσιμη γωνία προσβολής, υπάρχει και απότομη αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας. Ο βασικότερος λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η μεγάλη αύξηση της πίεσης στο κάτω μέρος της ακμής προσβολής της πτέρυγας λόγω της μείωσης της ταχύτητας σε εκείνο το σημείο που οδηγεί σε μεγάλη διαφορά πίεσης της ακμής προσβολής με την ακμή εκφυγής.

Στα αεροσκάφη, όταν συμβεί εκτεταμένα το παραπάνω φαινόμενο στην επιφάνεια της πτέρυγας οδηγεί σε απώλεια στήριξης, δηλαδή οι πτέρυγες σταματούν απότομα να παράγουν την απαιτούμενη άντωση.



Εικόνα 30: Αποκόλληση ροής ανά γωνία προσβολής

5.3. Υπολογιστική Ρευστομηχανική CFD

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική αναπτύχθηκε ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια ως μέθοδος επίλυσης προβλημάτων της ρευστομηχανικής λόγω της ευκολίας που προσφέρει στην μελέτη των προβλημάτων αυτών καθώς και την μείωση του κόστους και του χρόνου που απαιτεί η αντίστοιχη πειραματική διαδικασία. Σε αυτό συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό η ανάπτυξη στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό έγινε διότι είναι μια μέθοδος η οποία καθιστά δυνατή την μελέτη ροών μέσω τις επίλυσης συστημάτων εξισώσεων που τις περιγράφουν και των οποίων ο αριθμός είναι τέτοιος που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Έτσι, σε ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) μπορεί να εισαχθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο CAD και να υπολογιστεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια στις περισσότερες περιπτώσεις η ροή ενός ρευστού εξωτερικά ή εσωτερικά αυτού. Ωστόσο σε μερικά προβλήματα η προσεγγιστική λύση που προκύπτει θα πρέπει να ελέγχεται και να επιβεβαιώνεται τελικά, με πειραματικά δεδομένα.

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική μελετάει ροές ρευστών σε πεδία ροής μέσω αριθμητικής ανάλυσης λόγω της πολυπλοκότητας ή και της αδυναμίας λύσης τους με αναλυτικές μεθόδους. Η δυσκολία στην μελέτη των ροών αυτών με αναλυτικές μεθόδους καθίσταται δύσκολη λόγω των μη γραμμικών, μερικά διαφορικών εξισώσεων που απαιτείται να λυθούν. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις ροές αυτές είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes για την συνεκτική κίνηση του ρευστού και οι εξισώσεις Euler για την μη συνεκτική κίνηση (μηδενικό ιξώδες).

Έτσι στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική οι εξισώσεις αυτές μετατρέπονται σε σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων και με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι τιμές των πεδιακών μεγεθών σε διακριτά σημεία του χώρου (ή του χρόνου). Τα διακριτά σημεία στα οποία χωρίζεται το πεδίο ροής αποτελούν ένα πλέγμα, του οποίου η πυκνότητα καθορίζει την ακρίβεια της αριθμητικής λύσης και κατά πόσο τείνει προς την αναλυτική. Η αύξηση βεβαία της πυκνότητας του πλέγματος εκτός της αύξησης της ακρίβειας αυξάνει και την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ.

Τα στοιχεία που αποτελούν την μέθοδο αριθμητικής επίλυσης είναι τα εξής:

A. Το **μαθηματικό μοντέλο**, το οποίο αποτελείται από το σύστημα εξισώσεων που περιγράφουν την ροή στο υπό μελέτη πρόβλημα και εξαρτάται από τον τύπο της ροής, το πλήθος των διαστάσεων (δύο ή τρεις), την συμπιεστικότητα του ρευστού κ.α. και περιλαμβάνουν τις εξισώσεις

- Navier-Stokes
- Euler
- Εξίσωση συνέχειας (Αρχή διατήρησης μάζας)

Β. Την **μέθοδο διακριτοποίησης**, όπου επιλέγεται μια από τρεις βασικές μεθόδους, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM) ή η μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM). Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να αποδώσουν την ίδια λύση και η επιλογή τους γίνεται με βάση την φύση του προβλήματος.

Γ. Το **σύστημα συντεταγμένων και η διανυσματική βάση**, όπου το σύστημα συντεταγμένων μπορεί να είναι το καρτεσιανό, το σφαιρικό, το κυλινδρικό κ.α. καθώς και η θέση της διανυσματικής βάσης, όπου η επιλογή τους γίνεται με βάση το κάθε πρόβλημα.

Δ. Το **πλέγμα**, το οποίο όπως προαναφέρθηκε χωρίζει το πεδίο ροής σε κυψέλες και ορίζει διακριτά σημεία όπου υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών. Ο τρόπος κατασκευής του πλέγματος, ο συνολικός αριθμός των κυψελών και οι περιοχές με αυξημένη πυκνότητα, έχει μεγάλη σημασία γιατί από αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ακρίβεια της λύσης, καθώς και ο χρόνος και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται.

Ε. Τις **προσεγγίσεις**, οι οποίες εξαρτώνται από την μέθοδο διακριτοποίησης που έχει επιλεγεί, για να επιτευχθεί η μετάβαση από τις διαφορικές, στις αλγεβρικές εξισώσεις. Για την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων γίνεται προσέγγιση μέσω παραγώγων, για την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μέσω ολοκληρωμάτων και για την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγεται η μέθοδος των συναρτήσεων βαρύτητας και των στοιχείων.

ΣΤ. Την **μέθοδο επίλυσης** όπου επιλύεται το σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που έχει προκύψει από την διαδικασία των προσεγγίσεων, του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από το μέγεθος του πλέγματος που έχει επιλεγεί. Για να λυθεί το σύστημα απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία η αρχική λύση βελτιώνεται μέσω μιας διαδικασίας εσωτερικών επαναλήψεων.

Ζ. Το κριτήριο σύγκλισης καθορίζει το πότε θα τερματιστεί η διαδικασία των επαναλήψεων όταν οι τιμές των λύσεων συγκλίνουν και ορίζεται απ τον χρήστη, καθώς εναλλακτικά μπορεί να οριστεί μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, όταν η περαιτέρω συνέχεια της διαδικασίας δεν θα επιφέρει βελτίωση των αποτελεσμάτων. Γενικά ο τερματισμός της διαδικασίας των επαναλήψεων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της λύσης καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο και πρέπει να οριστεί με προσοχή από τον χρήστη.

5.3.1. Εξισώσεις Navier - Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι ένα σύστημα μερικά διαφορικών εξισώσεων που μπορεί να περιγράψει την κίνηση οποιουδήποτε ρευστού στις τρεις διαστάσεις, συμπιεστού ή ασυμπιεστού, καθώς εξετάζει την σχέση της ταχύτητας, της πίεσης, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας (σε κάποιες περιπτώσεις) του ρευστού.

Το σύστημα εξισώσεων αποτελείται από τρεις εξισώσεις διατήρησης της ορμής στους τρεις καρτεσιανούς άξονες, την εξίσωση διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας) και την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Εμπεριέχουν τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές x , y , z και τον t , καθώς και έξι εξαρτημένες, την πίεση, την πυκνότητα, την θερμοκρασία και τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας.

Εξίσωση συνέχειας:

$$(5.27) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Εξισώσεις διατήρησης της ορμής:

$$(5.28) \quad \rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot u) + \rho \cdot g$$

Για ασυμπίεστη ροή όπου $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$:

$$(5.29) \quad \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \cdot \mathbf{g}$$

Για τις τρεις διαστάσεις x,y,z:

$$(5.30) \text{ x: } \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$(5.31) \text{ y: } \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$(5.32) \text{ z: } \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Όπου x, y, z είναι οι συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα

u, v, w: οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας **u**

ρ : πυκνότητα

g_i : επιτάχυνση της βαρύτητας

p: πίεση

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι ουσιαστικά μία διατύπωση του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα για τα ρευστά, όπου για απειροστό όγκο του ρευστού η μάζα του ρευστού επί την επιτάχυνση του ισούται με το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό. Οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στο ρευστό είναι η βαρύτητα, οι δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων και η δύναμη λόγω πίεσης.

Σε μερικά προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής προστίθεται στο σύστημα και μία ακόμα εξίσωση, αυτή της διατήρησης της ενέργειας, και ένας ακόμη άγνωστος, η θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρευστού και στερεού σώματος. Στην παρούσα μελέτη όμως που αφορά την συγκεκριμένη πτυχιακή δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας.

Οι εξισώσεις Euler χρησιμοποιούνται για μη συνεκτικό ρευστό και προκύπτουν από τις προαναφερθείσες εξισώσεις Navier-Stokes αφού αποτελούν ειδική περίπτωση αυτών. Στην περίπτωση μη συνεκτικού ρευστού το ιξώδες ισούται με μηδέν, συνεπώς και οι διατμητικές τάσεις μηδενίζονται. Επομένως προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις.

$$(5.33) \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$(5.34) \quad \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$(5.35) \quad \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial z}$$

5.3.2. Προγράμματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Υπάρχουν αρκετά προγράμματα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, όπου μπορεί να εισαχθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο CAD και να υπολογιστεί η ροή εξωτερικά ή εσωτερικά τους καθώς και η επίδραση της ροής του ρευστού σε αυτά. Αυτά τα προγράμματα παρ' ότι βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω, διαφέρουν κυρίως στον τρόπο με τον οποίο εισάγονται και ορίζονται τα δεδομένα και οι παράμετροι του υπολογισμού συνεπώς αυτό καθορίζει την ακρίβεια στα αποτελέσματα αλλά και την φιλικότητα στον χρήστη. Για παράδειγμα ορισμένα από αυτά έχουν την δυνατότητα να κάνουν αυτόματα κάποιες διαδικασίες όπως η επιλογή του πλέγματος και τα κριτήρια σύγκλισης. Μερικά από τα πιο γνωστά προγράμματα είναι το ANSYS FLUENT, το Dassault Solidworks FlowSimulation, το Autodesk simulation, το COMSOL Multiphysics κ.α. Στην παρούσα πτυχιακή, επιλέχθηκε το Solidworks FlowSimulation λόγω του ότι είναι ένα από τα πιο φιλικά προς τον χρήστη προγράμματα αλλά ταυτόχρονα ικανό για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης μελέτης.

5.3.3. Τομείς εφαρμογής

Οι τομείς εφαρμογής της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ποικίλουν. Η διαδικασία προσομοίωσης και υπολογισμού ροών χρησιμοποιείται πλέον στις περισσότερες επιστήμες που απαιτούν ρευστομηχανικές μελέτες, ιδιαίτερα στην αεροναυπηγική, την ναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και σε άλλους τομείς όπως η αρχιτεκτονική, η ιατρική έως και τον αθλητισμό.

Σε κάποιους τομείς από αυτούς όπως η αεροναυπηγική, η ναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία, έχει αντικαταστήσει μεγάλο μέρος των συμβατικών πειραμάτων, καθιστώντας ευκολότερο τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση των κατασκευών ειδικά στα πρώτα στάδια της μελέτης, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος των πειραμάτων σε αεροσήραγγες και πειραματικές δεξαμενές. Σε κάποιες περιπτώσεις έχει καταστήσει δυνατή την μελέτη σε κατασκευές που θα ήταν δύσκολο ή και αδύνατο μερικές φορές να μελετηθούν πειραματικά, όπως για παράδειγμα οι αεροδυναμικές μελέτες κτηρίων και κάποιες ναυπηγικές μελέτες που λόγω κλίμακας είναι δύσκολο να επιτευχθεί πειραματική μελέτη στον ίδιο αριθμό Reynolds.

6. Μεθοδολογία

Στα παρακάτω κεφάλαια αναλύεται το δυνατόν ακριβέστερα η πορεία του πειραματικού μέρους της εργασίας. Αναφέρονται δηλαδή όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν, ώστε η πτέρυγα που μελετάται να σαρωθεί τρισδιάστατα, να μετατραπεί σε γεωμετρικό μοντέλο και να γίνει η αεροδυναμική της μελέτη με στόχο να γίνουν γνωστά τα αεροδυναμικά της χαρακτηριστικά.

Η πτέρυγα που χρησιμοποιήθηκε

Η πτέρυγα η οποία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη αυτή είναι παραλληλόγραμμη, δηλαδή η αεροτομή της είναι ίδια σε όλο το μήκος της και μεγάλο λόγο μήκους-χορδής, προκειμένου να είναι απλούστερη η μελέτη των βασικών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της και να μπορεί να γίνει με δισδιάστατη ανάλυση. Ως προς την αεροτομή της (προφίλ), είναι ασύμμετρη με μεγάλη καμπυλότητα (Camber).

Τα γεωμετρικά, αλλά και τα αεροδυναμικά της χαρακτηριστικά, δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά.

6.1. Τρισδιάστατη Σάρωση

Η ψηφιοποίηση της πτέρυγας έγινε με τον σαρωτή VIVID 910 της Konica Minolta, ο οποίος περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.5. Η σάρωση έγινε πραγματοποιώντας σαρώσεις τμηματικά στην πτέρυγα μεταξύ των οποίων, η πτέρυγα μετακινούνταν χειροκίνητα, τόσο λόγω του μεγέθους της πτέρυγας όσο και λόγω έλλειψης κάποιου μηχανισμού αυτοματοποίησης της διαδικασίας της διαδικασίας της σάρωσης.

6.1.1. Προεργασία

Πριν την διαδικασία της σάρωσης της πτέρυγας, απαιτείται προεργασία ώστε να είναι δυνατό να αποτυπωθεί τρισδιάστατα, με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια το φυσικό μοντέλο. Η προεργασία αυτή έχει να κάνει τόσο με την επιφάνεια, του προς σάρωση αντικειμένου, όσο με την τμηματοποίηση του, και τέλος με την διάταξη του χώρου σάρωσης. Πριν την διαδικασία αυτή, έγιναν δοκιμές με το φυσικό μοντέλο χωρίς να γίνει η επεξεργασία της επιφάνειας και οι λοιπές εργασίες με τα αποτελέσματα των σαρώσεων να μην είναι επαρκή για την συνέχεια της διαδικασίας αυτής.

6.1.2. Επεξεργασία επιφανείας

Βάσει της αρχής λειτουργίας του σαρωτή, δηλαδή την ανάκλαση της ακτίνας λέιζερ, κρίσιμο ρόλο στην σωστή σάρωση του αντικειμένου προκειμένου να είναι πλήρης, να μην λείπουν τμήματα τα οποία δεν σαρώθηκαν επιτυχώς, αλλά και την μέγιστη ακρίβειά της, έχουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την σάρωση είναι το χρώμα, η τραχύτητα και η ανακλαστικότητά της.

Η προτιμότερη επιφάνεια σάρωσης είναι μια επιφάνεια, λεία, ανοιχτού χρώματος χωρίς γυαλάδα (ματ), έτσι ώστε η ακτίνα λέιζερ να ανακλάται στον μεγαλύτερο βαθμό.

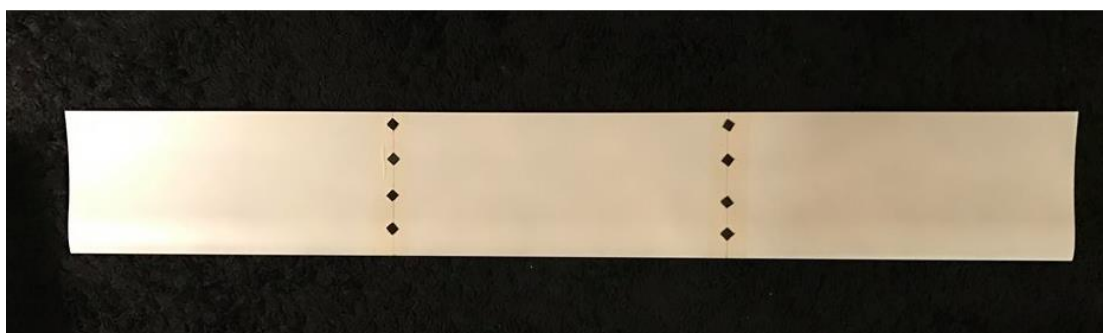
Για αυτό το σκοπό διατίθενται στην αγορά ειδικά σπρέι καθώς και άλλα υλικά κάλυψης, που καλύπτουν την επιφάνεια έτσι ώστε να αποκτά προσωρινά καλύτερη επιφάνεια για να επιτευχθεί η σάρωση χωρίς όμως να επηρεάζουν μόνιμα την επιφάνεια του αντικειμένου και να μπορούν να αφαιρούνται εύκολα μετά την διαδικασία της σάρωσης.

Στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα πτυχιακή εργασία λόγω μεγάλης καμπυλότητας αλλά και σκούρου, γυαλιστερού χρώματος της πτέρυγας, κρίθηκε απαραίτητο να μετά από αποτυχημένες δοκιμές σαρώσεων να υποστεί κάποιες αλλαγές η επιφάνεια της πτέρυγας. Καθώς όμως δεν υπήρχε διαθέσιμo κάποιο από τα προαναφερθέντα εξειδικευμένα υλικά επικάλυψης και επίσης η συγκεκριμένη πτέρυγα είχε ως μόνη χρήση το πείραμα αυτό, χρησιμοποιήθηκε απλό άσπρο ματ χρώμα με το οποίο βιάφτηκε για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες.

6.1.3. Τμηματοποίηση αντικειμένου

Λόγω του μεγέθους και της γεωμετρίας της πτέρυγας, θεωρήθηκε προτιμότερο να σαρωθεί σε επιμέρους τμήματα, τα οποία θα ενωθούν ξανά αργότερα κατά την επεξεργασία του τρισδιάστατου μοντέλου στο υπολογιστή. Αυτό έγινε διότι ο σαρωτής μπορεί να αποδώσει μεγαλύτερη ακρίβεια σαρώνοντας μικρότερη επιφάνεια καθώς και ότι η σάρωση έπρεπε να γίνει απ' όλες τις πλευρές του αντικειμένου, χωρίς την χρήση της περιστρεφόμενης βάσης, ή κάποιου άλλου αυτοματοποιημένου μηχανισμού κίνησης του αντικειμένου ή της κάμερας.

Έτσι η πτέρυγα χωρίστηκε σε 3 τμήματα ανά πλευρά της και τοποθετήθηκαν ειδικά ανάγλυφα σημάδια ώστε να καταστήσουν εύκολη την σύνδεση τους κατά την επεξεργασία των σαρώσεων, αργότερα, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.

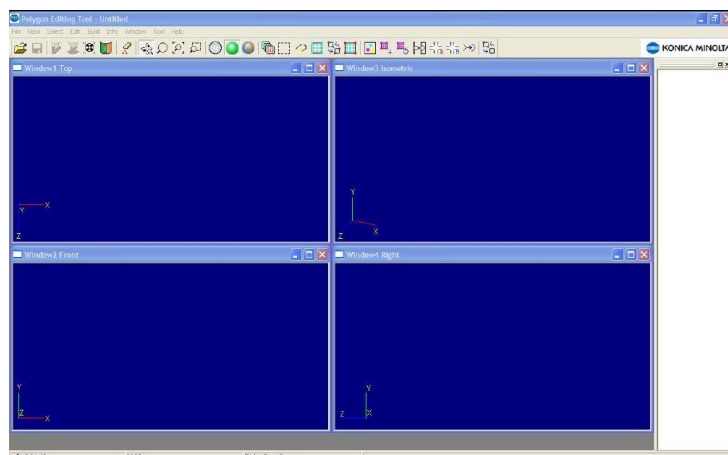


Εικόνα 31: Τμηματοποίηση του φυσικού μοντέλου για επιμέρους σάρωση.

Τα έξι αυτά τμήματα σαρώθηκαν ξεχωριστά και η κάθε μία από της σαρώσεις περιλάμβανε ένα τμήμα την φορά καθώς και ένα μικρό μέρος του διπλανού τμήματος ώστε να υπάρχει αλληλοκάλυψη και να μπορεί να γίνει ευκολότερα η διαδικασία της ένωσης των τμημάτων. Για τον ίδιο λόγο έγιναν και κάποιες συμπληρωματικές σαρώσεις στα τμήματα της πτέρυγας όπου η επιφάνεια που απέδιδε η σάρωση δεν ήταν αρκετά ικανοποιητική, όπως για παράδειγμα οι ακμές της.

6.1.1. Λογισμικό και σαρώσεις

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των σαρώσεων είναι το συνοδευτικό λογισμικό του σαρωτή, Polygon Editing Tool.

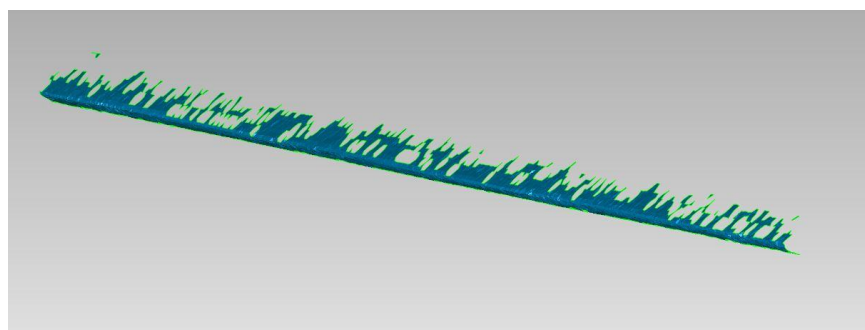


Εικόνα 32: Ενδεικτική εικόνα περιβάλλοντος λογισμικού Polygon Editing Tool.

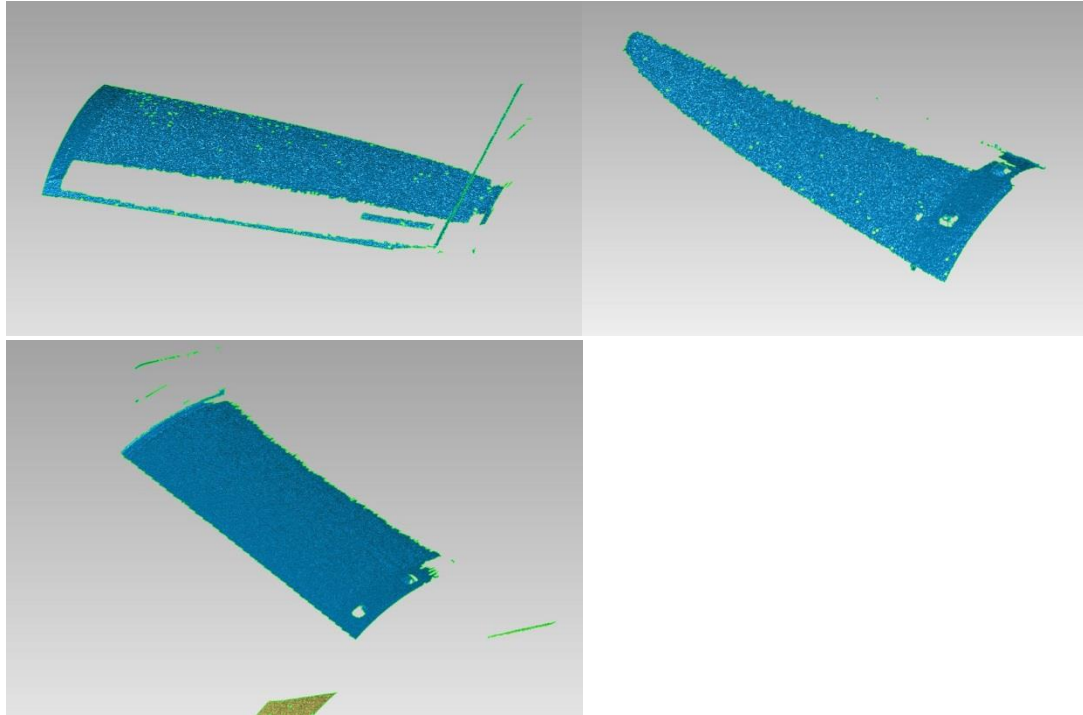
Οι παράμετροι που ορίστηκαν για την σάρωση του αντικειμένου, τόσο εντός του λογισμικού όσο και του περιβάλλοντα χώρου, βρέθηκαν κατόπιν επαναλαμβανόμενων σαρώσεων και δοκιμών ώστε να αποδοθεί η βέλτιστη επιφάνεια. Αυτό η διαδικασία ξεκίνησε κάνοντας λήψεις με τις αρχικές (default και αυτόματες) ρυθμίσεις του προγράμματος και έπειτα αλλαγή αυτών σύμφωνα με το εγχειρίδιο του σαρωτή και τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Τα τμήματα της πτέρυγας στα οποία υπήρχε η μεγαλύτερη δυσκολία αποτύπωσης της γεωμετρίας τους ήταν οι ακμές, λόγω κυρίως της μεγάλης τους καμπυλότητας. Μετά από μεγάλο αριθμό δοκιμών των σαρώσεων, αλλαγή παραμέτρων, επεξεργασία της επιφάνειας και λήψη των ακμών υπό διαφορετικές γωνίες, κατέστη δυνατή η επαρκής σάρωση της πτέρυγας ώστε να αποτυπωθεί σωστά η γεωμετρία της αεροτομής.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται ορισμένες από τις αρχικές δοκιμές, προτού βρεθεί λύση στις παραπάνω δυσκολίες.

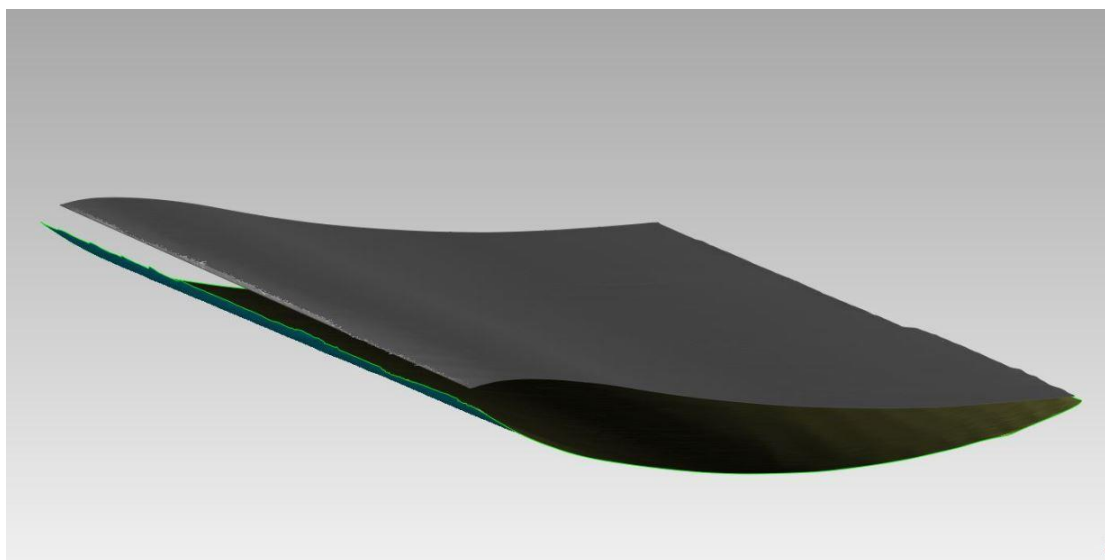


Εικόνα 33: Δοκιμαστική σάρωση της εμπρόσθιας ακμής της πτέρυγας.



Εικόνα 34: Φωτογραφίες σαρώσεων κατά τις δοκιμές σάρωσης πριν την επικάλυψη της επιφάνειας.

Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η αδυναμία αποτύπωσης των ακμών της πτέρυγας στις αρχικές σαρώσεις, κάτι το οποίο έγινε αντιληπτό κατά την προσπάθεια ένωσης των σαρώσεων.



Εικόνα 35: Αδυναμία σάρωσης των ακμών της πτέρυγας κατά τις δοκιμές.

Οι παράμετροι, οι οποίες μπορούν να οριστούν από τον χρήστη αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες που προέρχονται από το εγχειρίδιο του ψηφιοποιητή.

Parameters for [File-Import-Digitizer-One Scan-Option] Dialog Box	
Scan Parameter	
Mode	<ul style="list-style-type: none"> Select the scanning mode : FINE or FAST
Scan Parameter	<ul style="list-style-type: none"> Load : Loads the setting parameters and uses them as parameters for this command. Save : Saves the parameters set by this command as the setting parameters.
Brightness	Checking this checkbox enables you to set the brightness of the image.
Use Color	Checking this checkbox takes a color shot when a scan is made.
Log	Performs log correction for the color data if this checkbox is checked. This correction is used to make neutral colors brighter.
Dark	Performs dark correction for the color data if this checkbox is checked. This correction is used when lines are noticeable in the color image.
Convert Parameter	
Save Raw Data	Checking this checkbox displays the data save dialog at the end of the File-Import-Digitizer-One Scan command, allowing you to save the data.
Reduction Rate	Used to select the number of data points to be read from "1/1", "1/4", "1/9", "1/16" and "No Polygon".
Filter	<ul style="list-style-type: none"> None : Performs no correction for points when reading data. Noise Filter(N.F.) : Reduces noise in points when reading data. High Quality(H.Q.) : Deletes low-reliable data when reading data. H.Q. & N.F. : Reduces noise in points and deletes low-reliable data when reading data.
Fill Holes	If "ON" is selected, points are generated in the holes that were produced as a loss of data so that the holes are filled.
Remove	Select the data to be deleted when reading data. <ul style="list-style-type: none"> None : Outputs the data without performing specific processing. Boundary (B.) : Outputs the data after deleting boundary points. 5deg & B./10deg & B./15deg. & B./20deg & B. : Outputs the data after deleting the points present inside and at the boundary of the polygons that are angled within approximately 5, 10, 15 and 20 degrees to the vector of the line of view.
Hardware Parameter	<ul style="list-style-type: none"> Vertical : Check this checkbox if using the VIVID unit in vertical orientation. Horizontal : Check this checkbox if using the VIVID unit in horizontal orientation.

Parameters for [File-Import-Digitizer-One Scan] Dialog Box	
AF	Executes auto-focus. Note <i>This parameter is effective only when VIVID 910 is connected.</i>
Distance	Checking this checkbox enables distance setting. Note <i>This parameter is effective only when VIVID 910 is connected.</i>
Intensity	Checking this checkbox enables LD and Gain setting. • LD : Sets the laser power. • Gain : Sets the gain. Note <i>This parameter is effective only when VIVID 910 is connected.</i>
Scan	Performs a scan. Note <i>This parameter is effective only when VIVID 910 is connected.</i>
Import CDM	Import the saved CDM data.
Color Read	Takes a color shot. Clicking this button at the end of scan will take a color shot again and display the updated color image. Note <i>This button is effective if the [Use Color] checkbox is checked.</i>
Edit	Clicking this checkbox enables you to delete the area that is not necessary for three-dimensionalization by specifying it in the Work window area using the mouse.
Auto Store	If this checkbox is checked, data save will be performed automatically when corresponding points are designated in the Work and Store window areas.
Store	Registers the data present in the Work window area as store data, puts it into three-dimensional form and displays it in the element view window.
Mono/Color/Pitch	Switches display mode for the data currently displayed in the Work window area. • Mono : The current image is displayed in monochrome. This parameter is effective only when VIVID 9i is connected. • Color : The color data acquired from the scan is displayed. • Pitch : The color display is done in accordance with the distance data from Near to Far.
Angle	Rotates the rotary stage to the desired angle using the slide bar. This item is displayed when the rotary stage has been initialized successfully.
Prev/Next	Switches from one stored data to another. [Prev] button : Displays the previous data. [Next] button : Displays the next data.
Delete	Deletes the stored data currently displayed in the Work or Store window area. The corresponding elements in the element view window are also deleted at the same time.
View	Displays/hides the data currently displayed in the Store window area into the element view window.
OK	Keeps the element data created during command execution and exits the File-Import-Digitizer-One Scan command. Note <i>If the [Save Raw Data] checkbox is checked, the data save dialog box is displayed.</i>
Cancel	Exits the File-Import-Digitizer-One Scan command. The element data created during command execution will be deleted.
Option	Displays the [File-Import-Digitizer-One Scan-Option] dialogbox.

Πίνακας 1 : Παράμετροι Σάρωσης.

Η διαδικασία επιλογής των παραμέτρων αυτών στο Polygon Editing Tool γίνεται μέσω των παρακάτω παραθύρων.



Εικόνα 36: Παράθυρα επιλογής παραμέτρων σάρωσης

6.2. Δημιουργία Γεωμετρικού Μοντέλου

Στόχος της επεξεργασίας των λήψεων που προέκυψαν από τις σαρώσεις είναι να μετατραπούν τα δεδομένα αυτά σε ένα ενιαίο γεωμετρικό μοντέλο το οποίο θα μπορεί να εισαχθεί σε ένα πρόγραμμα CAD.

Για την δημιουργία τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου CAD από τις σαρώσεις, είναι απαραίτητη η επεξεργασία των σαρώσεων που λαμβάνονται από τον ψηφιοποιητή σε μορφή νέφους σημείων.

Για αυτό το σκοπό είναι απαραίτητη η χρήση ενός λογισμικού που παρέχει την δυνατότητα αυτής της επεξεργασίας. Το λογισμικό που επιλέχθηκε είναι το Geomagic Studio. Το Geomagic Studio, μπορεί να συλλέξει τα δεδομένα του σαρωτή, να τα ψηφιοποιήσει και να ανιχνεύσει την γεωμετρία τους. Καθώς επίσης είναι δυνατή μέσω αυτού του λογισμικού και η βελτίωση των δεδομένων της σάρωσης καθώς και η συγχώνευση πολλαπλών σαρώσεων.

Σε αυτό το λογισμικό έγιναν τα απαραίτητα βήματα που αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω ώστε τα νέφη σημείων να μετατραπούν σε γεωμετρικό μοντέλο, να βελτιωθεί η ποιότητά τους, αλλά και κυριότερα να συνδεθούν τα τμήματα της πτέρυγας που σαρώθηκαν ξεχωριστά λόγω του μεγέθους της πτέρυγας.

6.2.1. Μέθοδος Δημιουργίας Τρισδιάστατου Μοντέλου

6.2.2. Εισαγωγή Αρχείων

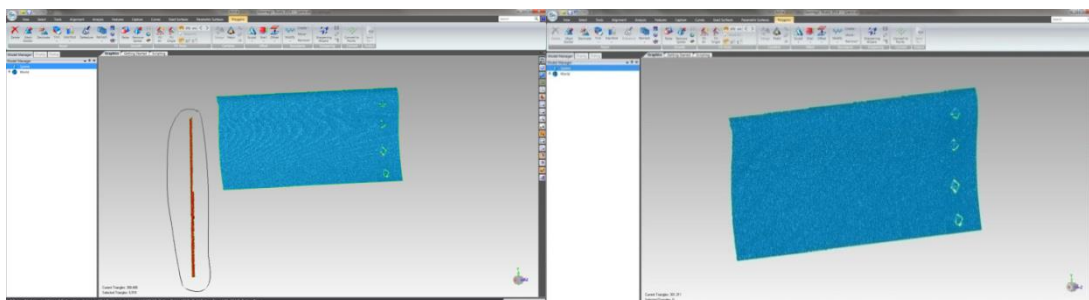
Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία των δεδομένων στο Geomagic Studio είναι η εισαγωγή των λήψεων στο λογισμικό. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή **import** μέσω της οποίας επιλέγονται τα αρχεία σε μορφή **STL**. Σε αυτό το σημείο μπορούν να επιλεχθούν όλα τα αρχεία των σαρώσεων και να επεξεργαστούν ταυτόχρονα ή και επιλεχθεί μέρος αυτών σε μικρότερες ομάδες, οι οποίες θα ενοποιηθούν αργότερα επαναλαμβάνοντας μέρος της εργασίας που θα αναφερθεί παρακάτω. Και στις δύο περιπτώσεις τα βήματα και το αποτέλεσμα της εργασίας δεν διαφέρει.

6.2.3. Επεξεργασία Σαρώσεων

Η επεξεργασία των χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα ή φάσεις, με βάση την μορφή που έχει το αντικείμενο που έχει σαρωθεί. Αρχικά γίνεται η επεξεργασία του ως νέφος σημείων, έπειτα μετατρέπεται και επεξεργάζεται σε μορφή πολυγώνων, μετά ως επιφάνεια και τέλος γίνεται η μετατροπή του στην τελική του μορφή CAD, με της οποία μπορεί να εισαχθεί σε άλλα CAD λογισμικά και να μελετηθεί.

Παρακάτω αναπτύσσονται όλες οι φάσεις επεξεργασίας και κάθε μία αναλύεται στα επιμέρους βήματα που την αποτελούν.

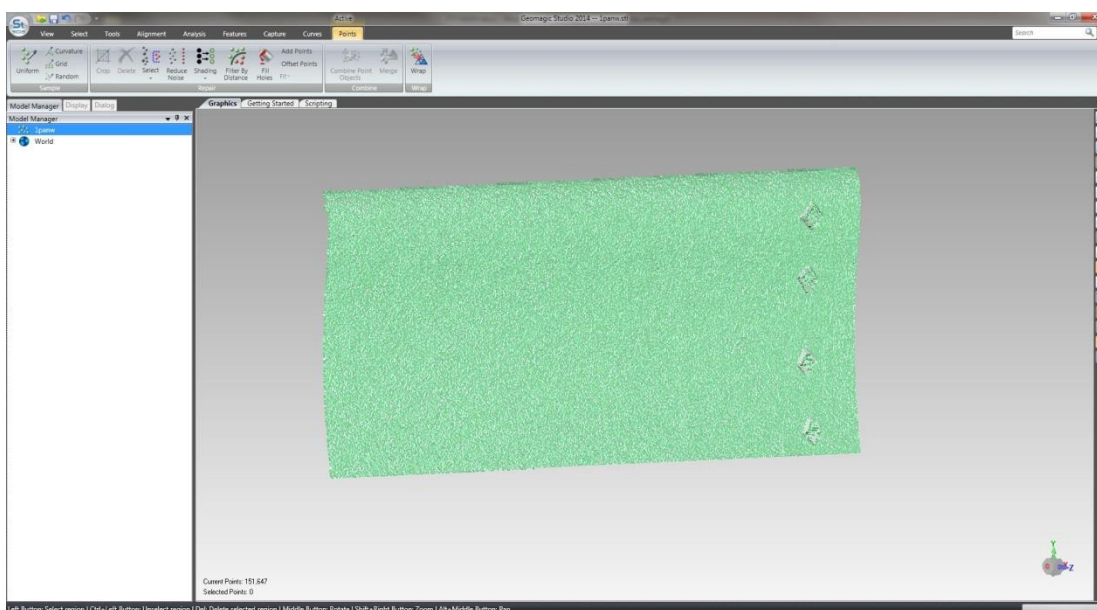
Το πρώτο βήμα μετά την εισαγωγή των αρχείων που προέκυψαν από τις σαρώσεις είναι η αφαίρεση τμημάτων της σάρωσης τα οποία δεν αποτελούν μέρος του αντικείμενου αλλά είναι αντικείμενα του περιβάλλοντος, όπως στην περίπτωση αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν για την στήριξη της πτέρυγας. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τα τμήματα αυτά είτε ως πολύγωνα, είτε ως σημεία και διαγράφοντάς τα.



Εικόνα 37: Διαγραφή τμημάτων σάρωσης.

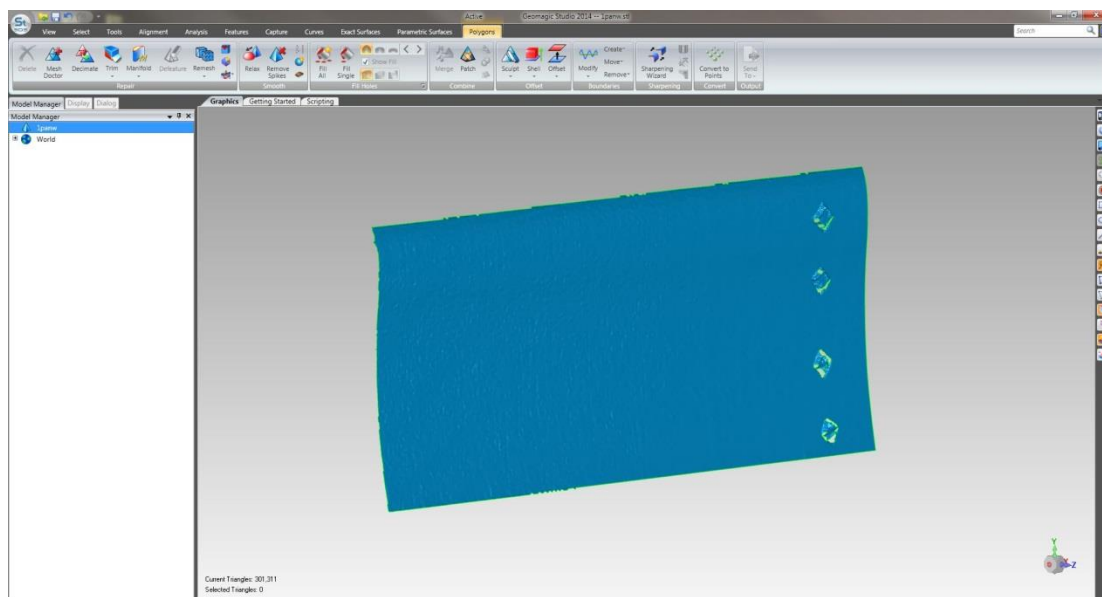
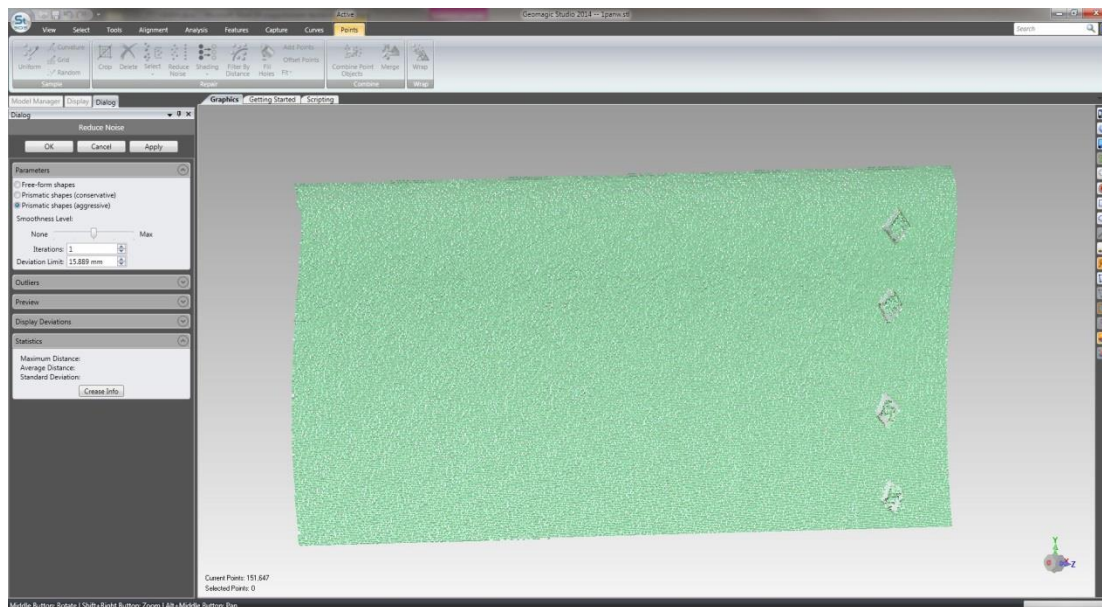
Point phase

Το δεύτερο βήμα είναι η μετατροπή του μοντέλου από πολύγωνα σε νέφος σημείων. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής Convert to points.



Εικόνα 38: Μετατροπή σε νέφος σημείων.

Μετά την μετατροπή του μοντέλου σε νέφος σημείων ακολουθεί το βήμα της μείωσης του θορύβου μέσω της εντολής Noise Reduction, η οποία διαγράφει τα σημεία τα οποία δεν συνάδουν με την υπόλοιπη γεωμετρία του αντικειμένου και τα οποία κάνουν την επιφάνεια του μοντέλου πιο τραχιά και πιθανώς αποτελούν «θόρυβο» από την σάρωση.



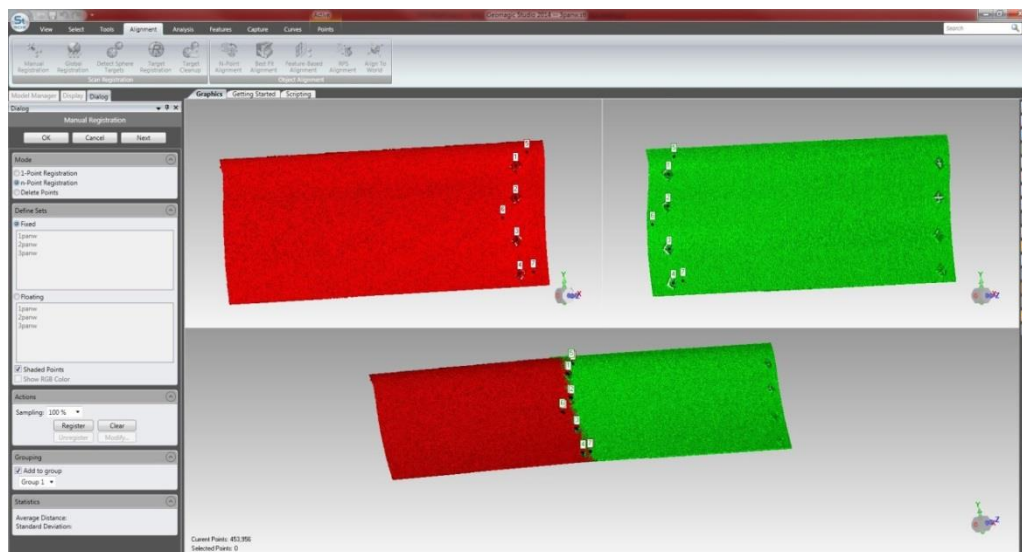
Εικόνα 39: Noise Reduction

Ενοποίηση σαρώσεων

Σε αυτό το σημείο γίνεται ενοποίηση (συναρμολόγηση) των επιμέρους σαρώσεων. Η ενοποίηση αυτή μπορεί να γίνει είτε για όλες τις σαρώσεις μαζί, είτε ενοποίηση των σαρώσεων κατά ομάδες. Στη περίπτωση έγινε με τον δεύτερο τρόπο, δηλαδή ενοποίηση των τριών σαρώσεων τις κάθε πλευράς τις πτέρυγας και μετά οι δύο πλευρές μεταξύ τους ώστε να απλοποιηθεί η διαδικασία της ένωσης των τμημάτων.

Η ενοποίηση αυτή επιτυγχάνεται αρχικά με το εργαλείο manual registration. Η διαδικασία που απαιτεί αυτή η εντολή είναι να επιλεγθούν 2 σαρώσεις στις οποίες τοποθετούνται από τον χρήστη σημεία τα οποία θα ταυτίζονται στον χώρο όταν το λογισμικό ενώσει αυτές τις δύο σαρώσεις.

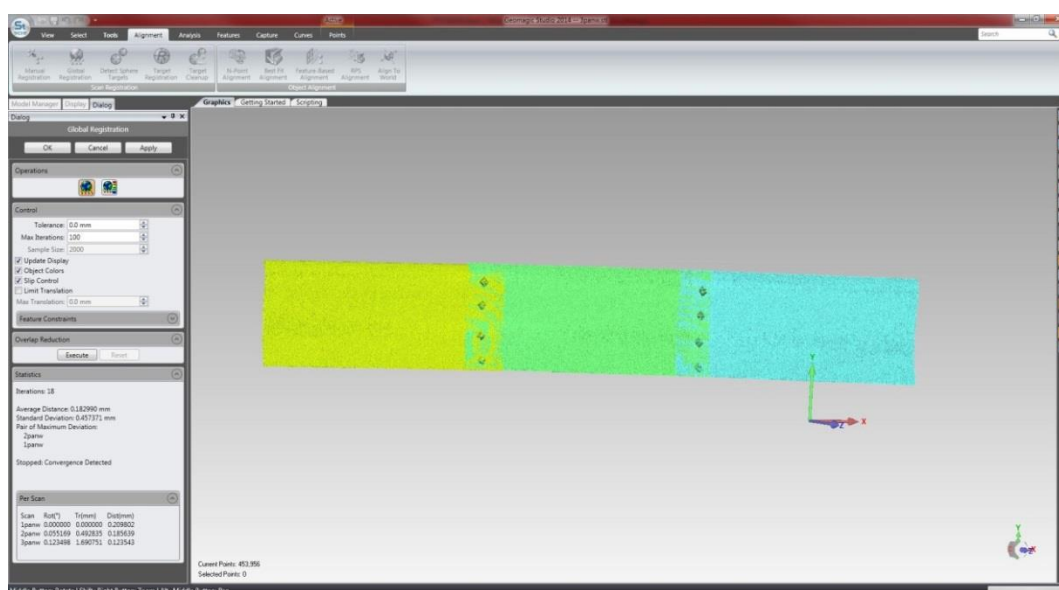
Για την διαδικασία αυτή παίζει μεγάλο ρόλο να η διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω σχετικά με την αλληλοκάλυψη των τμημάτων κατά την σάρωση και η τοποθέτηση ανάγλυφων σημαδιών σε αντικείμενα όπως η πτέρυγα που δεν έχουν άλλη διακριτά σημεία για την ένωση των τμημάτων.



Εικόνα 40: Ένωση τμηματικών σαρώσεων (Manual Registration).

Global registration

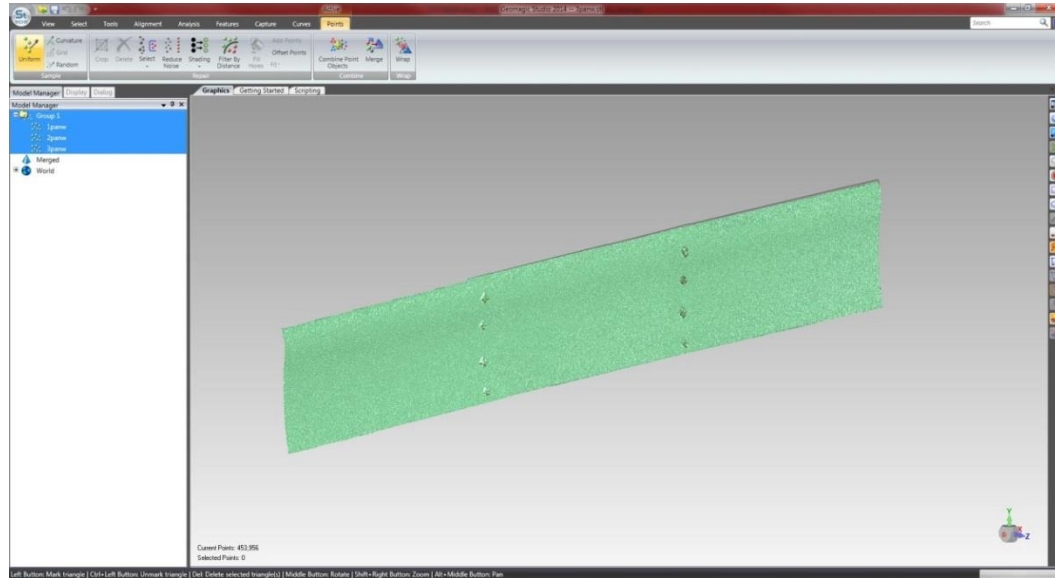
Μετά την χρήση του εργαλείου Manual Registration ακολουθεί η εντολή Global Registration η οποία βελτιώνει την ένωση των τμημάτων.



Εικόνα 41: Global Registration

Merge point object

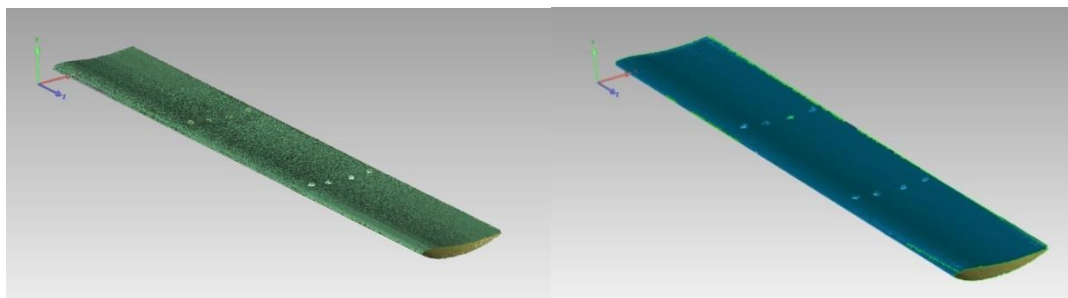
Με την εντολή αυτή ενοποιούνται όλα τα τμήματα της σάρωσης, σε ένα πλέον αρχείο και ταυτόχρονα διαγράφονται και τα αλληλοκαλυπτόμενα, κοινά δηλαδή τμήματα των σαρώσεων.



Εικόνα 42: Merge point object

Wrap

Η εντολή Wrap αποτελεί το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας του μοντέλου ως νέφος σημείων (Point Phase). Με αυτή την εντολή το μοντέλο μετατρέπεται σε πολύγωνα και η επεξεργασία του περνάει πλέον στην φάση των πολυγώνων (Polygon Phase).



Εικόνα 43: Wrap

Polygon Phase

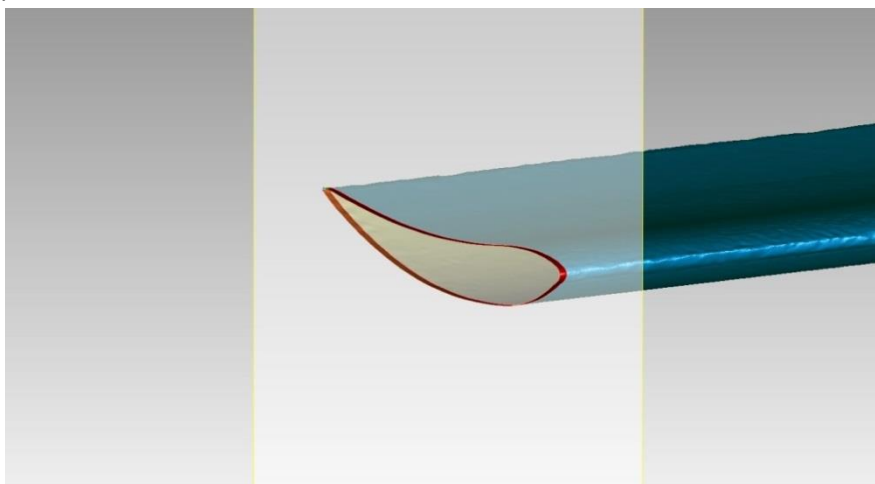
Μετά την διαδικασία της ένωσης των τμημάτων που ακολουθήθηκε παραπάνω και την μετατροπή του μοντέλου από νέφος σημείων σε πολύγωνα ακολουθείτε μία δεύτερη διαδικασία βελτίωσης της δομής των πολυγώνων.

Σε αυτή την φάση χρησιμοποιούνται κυρίως τα εξής εργαλεία:

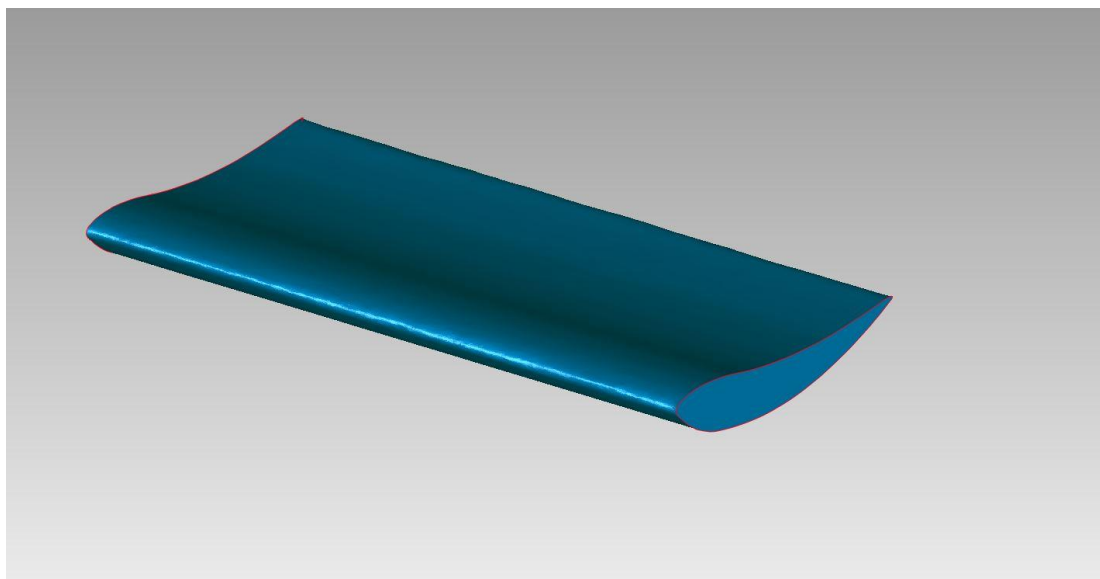
- **Fill holes** το οποίο γεμίζει κενά στην επιφάνεια που είτε προκύπτουν από την σάρωση, είτε όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση από την διαγραφή κάποιων πολυγώνων της επιφάνειας όπου βρίσκονταν τα σημάδια για τις ενώσεις.
- **Remove Spikes, Relax, Quick Smooth, Noise Reduction** και **sandpaper** όπου χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της επιφάνειας για όποιες ατέλειες έχουν παραμείνει από τις προηγούμενες διαδικασίες. Ξεκινώντας από τα δύο πρώτα που επεμβαίνουν συνολικά στην επιφάνεια του μοντέλου και τέλος όπου χρειάζεται περαιτέρω λείανση με το χειροκίνητο εργαλείο Sandpaper.
- **Make Manifold open**, το οποίο διορθώνει προβλήματα που δημιουργήθηκαν στο πλέγμα των πολυγώνων, κυρίως μέσω προηγούμενων εντολών. Αυτές οι διορθώσεις μπορεί να είναι, πολύγωνα εκτός πλέγματος ή πολύγωνα που τέμνονται. Η διόρθωση περιλαμβάνει είτε διαγραφή τους είτε ένταξή τους σωστά μέσα στο πλέγμα.

Λόγω προβλημάτων στην δημιουργία του μοντέλου στα σημεία που οι σαρώσεις δεν ήταν ικανοποιητικές, ειδικά στις ακμές της πτέρυγας, και αφού μετά από πολλές προσπάθειες δεν επιδεχόταν περαιτέρω βελτίωση το μοντέλο, αποφασίστηκε να κρατηθεί μόνο το τμήμα της πτέρυγας το οποίο είναι ικανοποιητικό. Αυτό είναι δυνατό στην συγκεκριμένη περίπτωση καθώς η πτέρυγα είναι παραλληλόγραμμη άρα αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο από την σάρωση είναι η σωστή αποτύπωση της αεροτομής.

Η παραπάνω διαδικασία έγινε με την εντολή **Trim with plane**, όπου με ένα επίπεδο παράλληλα στην αεροτομή απομονώθηκαν και διαγράφηκαν τα τμήματα στα οποία υπήρχε πρόβλημα.



Εικόνα 44: Trim with plane



Εικόνα 45: Τμήμα πτέρυγας χωρίς προβλήματα γεωμετρίας.

Shape phase

Σε αυτή την φάση που έχουν ολοκληρωθεί οι παραπάνω εργασίες, έχουν ενοποιηθεί οι λήψεις, δεν υπάρχουν ασυνέχειες στα πολύγωνα κτλ. Μπορεί να το τρισδιάστατο μοντέλο να μπει στην φάση επεξεργασίας των επιφανειών ως προς την γεωμετρία τους. Δηλαδή γίνεται διόρθωση της καμπυλότητας των επιφανειών όπου αυτό χρειάζεται.

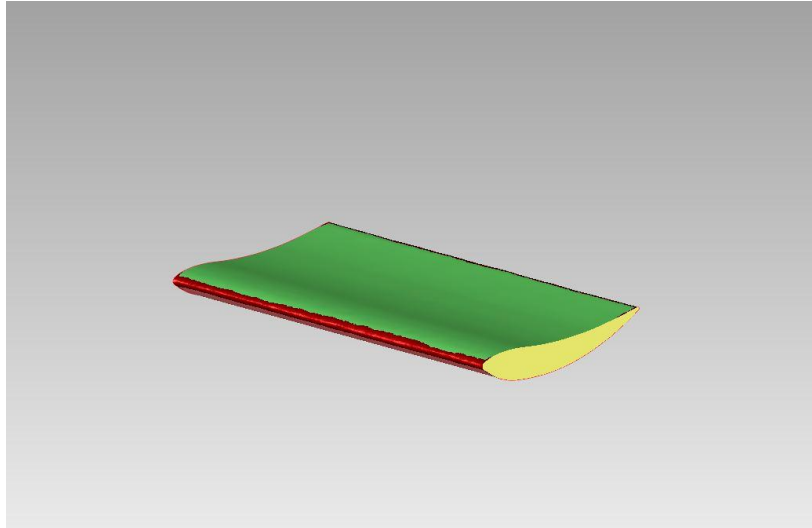
Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

Αρχικά μέσω της εντολή **Exact Surfacing** όπου προετοιμάζει το μοντέλο να μετατραπεί σε από πολύγωνα σε επιφάνειες NURBS.

Ακολουθεί το εργαλείο **Auto Surface**, όπου κάνει αυτόματα την μετατροπή σε NURBS.

Εναλλακτικά η μετατροπή μπορεί να γίνει χειροκίνητα μέσω των παρακάτω εργαλείων.

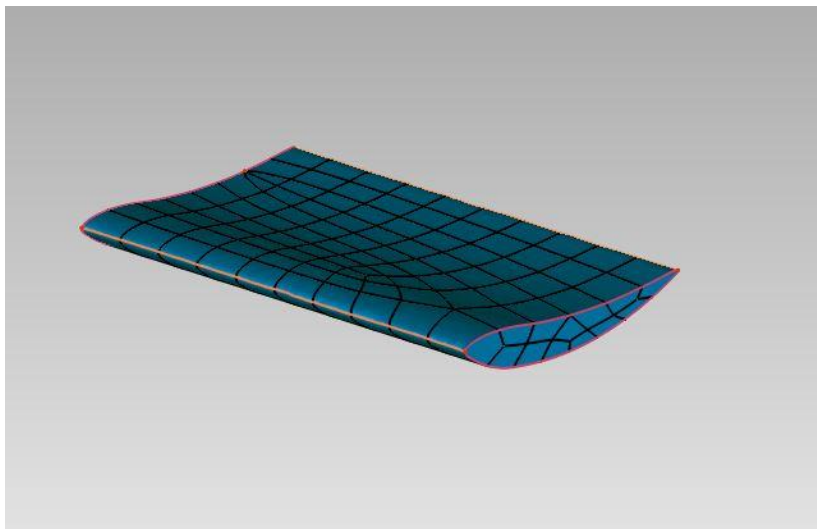
Αρχικά με το **Detect Contours** όπου ανιχνεύει αυτόματα τις επίπεδες περιοχές με και τις διαχωρίζει με κόκκινες γραμμές κατόπιν χωρίζει αυτές τις περιοχές με κίτρινες ή πορτοκαλί γραμμές (με δυνατότητα επιμήκυνσης ή όχι αντίστοιχα) και επιτρέπει την αλλαγή των περιοχών αυτών.



Εικόνα 46: Detect contours

Το επόμενο βήμα αυτής της φάσης επεξεργασίας είναι το **Subdivide/extend contours**, το οποίο δημιουργείται ένα πλέγμα εντός των περιοχών που σχηματίστηκαν από την προηγούμενη εντολή.

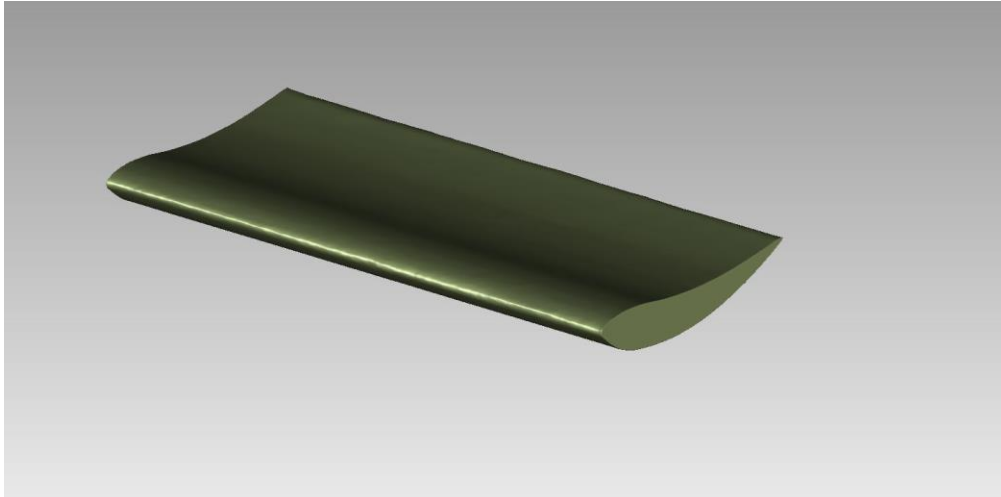
Έπειτα με το **Construct patches - Shuffle Panels** ανακατανέμονται οι χώροι γύρω από τα σημεία και τις γραμμές που έχουν δημιουργηθεί.



Εικόνα 47: Construct patches

Construct grids, με αυτό το εργαλείο δημιουργείται ένα πλέγμα ώστε να διορθωθεί η γεωμετρία του αντικειμένου.

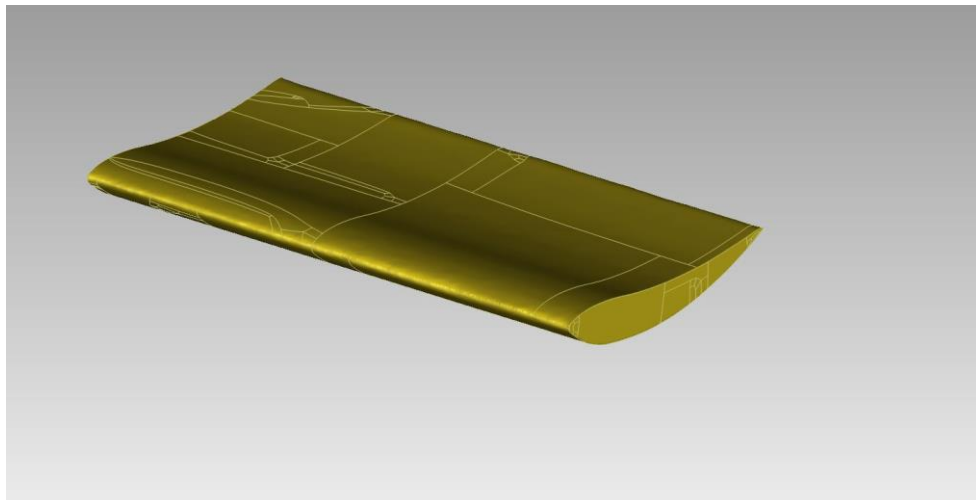
Και τέλος με το **Fit surfaces** μετατρέπεται το αντικείμενο σε επιφάνειες NURBS.



Εικόνα 48: Τελική μορφή επιφανειών NURBS.

CAD phase

Μετά και την μετατροπή της πτέρυγας σε επιφάνειες NURBS είναι πλέον δυνατή η μετατροπή σε αρχείο CAD μέσω της εντολής **Convert to CAD**, ώστε να μπορεί πλέον να εισαχθεί στο Solidworks και να γίνει η αεροδυναμική προσομοίωση.



Εικόνα 49: CAD Phase

6.3. Επαλήθευση Γεωμετρικού Μοντέλου

Στην συγκεκριμένη μελέτη είναι απαραίτητη η ακρίβεια στο γεωμετρικό μοντέλο, κυρίως ως προς την γεωμετρία της αεροτομής η οποία επηρεάζει σημαντικά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας. Καθώς και ότι η σάρωση έγινε τμηματικά σε πάνω από 6 διαφορετικές λήψεις και κατόπιν η ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων, διαδικασία στην οποία αντιμετωπίστηκαν αναμενόμενες δυσκολίες, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει επαλήθευση του τελικού μοντέλου και κυρίως των ακμών της πτέρυγας, πέραν των μετρήσεων του πλάτους, του μήκους και της χορδής.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την επαλήθευση της γεωμετρίας αυτής ανήκει κι αυτή στα πλαίσια της αντίστροφης μηχανικής. Έτσι, μέσω του σχεδιασμού της πτέρυγας στο Solidworks εισάγοντας την πλαϊνή όψη της ως φωτογραφία (Image) και ορισμό της κλίμακας της φωτογραφίας με βάση το μήκος της χορδής όπου μετρήθηκε στο φυσικό μοντέλο σχεδιάστηκε η πτέρυγα με την εντολή Spline για να δημιουργηθεί η τομή της και μετά την εντολή Extrude για το μήκος της.

Αυτό ήταν δυνατό λόγω του ότι η συγκεκριμένη πτέρυγα είναι παραλληλόγραμμη, έχει δηλαδή καθ' όλο το μήκος της ίδιες διαστάσεις (ίδια αεροτομή). Σε άλλη περίπτωση η επαλήθευση του μοντέλου με αυτόν τον τρόπο θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολη, αφού θα χρειαζόνταν ακριβείς μετρήσεις και πολύπλοκο τρισδιάστατο σχέδιο.

Τέλος συνδυάζοντας τα 2 μοντέλα από τις δύο διαφορετικές μεθόδους αντίστροφης μηχανικής έγινε σύγκριση και επαλήθευση των γεωμετριών τους. Καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρία της αεροτομής αποδόθηκε σωστά σε ορισμένα σημεία κατά μήκος της πτέρυγας καθώς ταυτίζεται με το τρισδιάστατο μοντέλο που σχεδιάστηκε με την προαναφερθείσα μέθοδο αλλά η συνολική γεωμετρία της πτέρυγας σε όλο το μήκος της δεν ταυτίζεται πλήρως με το μοντέλο αυτό καθώς υπάρχουν σημεία στην επιφάνεια του μοντέλου που προέκυψε από την σάρωση, κυρίως στις ακμές, όπου δεν σαρώθηκαν με επιτυχία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το μοντέλο από την σάρωση να έχει αποκλίσεις από την σωστή γεωμετρία σε αρκετά σημεία μετά την επεξεργασία του στο Geomagic studio.

Για τον παραπάνω λόγο επαναλήφθηκε αρκετές φορές η διαδικασία ενοποίησης στο Geomagic studio. Καταλήγοντας στο να απορριφθεί μήκος της αεροτομής και να κρατηθεί μόνο ένα τμήμα της το οποίο είχε την καλύτερη δυνατή ακρίβεια και ταίριαζε πλήρως με το άλλο μοντέλο. Το παραπάνω δεν αποτέλεσε πρόβλημα καθώς στην συγκεκριμένη περίπτωση κύρια σημασία έχει η αεροτομή, η οποία παραμένει ίδια σε όλο το μήκος της πτέρυγας.

Τέλος με τον συνδυασμό των δυο μεθόδων για την συγκεκριμένη πτέρυγα μπορεί να ληφθεί η ακριβής γεωμετρία της αεροτομής και να δημιουργηθεί ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο να μελετηθεί αεροδυναμικά στον υπολογιστή μέσω υπολογιστικής ρευστομηχανικής που θα αναλυθεί παρακάτω.

6.4. Ανάλυση Χαρακτηριστικών Πτέρυγας

Μετά την τρισδιάστατη σάρωση, την επεξεργασία των επιμέρους σαρώσεων, την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου και τέλος την επαλήθευσή του, μπορεί να γίνει ακριβής μέτρηση και ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της πτέρυγας βάσει του μοντέλου που έχει δημιουργηθεί στον υπολογιστή καθώς και των αεροδυναμικών της χαρακτηριστικών, κάτι το οποίο θα ακολουθήσει.

Τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά υπολογίζονται κυρίως βάσει της τομής του μοντέλου της πτέρυγας (αεροτομή)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας, είναι τα εξής:

Αεροτομή	
Είδος	Κυρτή
Μήκος	1308 mm
Χορδή (C)	188,2 mm
Αναλογία μήκους- χορδής	6,95
Καμπυλότητα	13,43 mm
Θέση μέγιστης καμπυλότητας	100,42 mm
Μέγιστο πάχος	24,15 mm
Θέση μέγιστου πάχους	46 mm
Σχετικό πάχος	0,1283
Σχετική καμπυλότητα	0,0714
Σχετική θέση μέγιστου πάχους	0,2444
Σχετική θέση μέγιστης καμπυλότητας	0,5336

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά αεροτομής.

Κάτοψη	
Γεωμετρία πτέρυγας	Παραλληλόγραμμη
Εμβαδόν (A)	246165,6 mm ²
Διάταμα (AR)	6,95
Εκπέτασμα (S)	1308 mm

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά κάτοψης πτέρυγας.

6.5. Αεροδυναμική Μελέτη Σε CFD

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την αεροδυναμική μελέτη της πτέρυγας. Η προσομοίωση-μελέτη έγινε στο τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε μέσω τρισδιάστατης σάρωσης όπως περιγράφεται παραπάνω.

Για να πραγματοποιηθεί η αεροδυναμική μελέτη στον Η/Υ, έγινε χρήση του προγράμματος Dassault Solidworks και πιο συγκεκριμένα, το FlowSimulation του προγράμματος, το οποίο προσομοιάζει την ροή μέσω Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Εντός του κεφαλαίου αυτού αναλύονται, οι στόχοι της μελέτης, οι παράμετροι που ορίστηκαν και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον ορισμό.

6.5.1. Στόχος της μελέτης - προσομοίωσης.

Στόχος της προσομοίωσης είναι να βρεθούν οι συντελεστές **δυναμικής άνωσης(Cl)**, **οπισθέλκουσας(Cd)** και **ροπή(Cm)** για εύρος γωνιών προσβολής από -10° έως 30° , ανά 2° . Και για ροές με αριθμούς Reynolds **5×10^4 Re**, **2×10^5 Re**, **5×10^5 Re** και **10^6 Re**, δηλαδή για 4 διαφορετικές ταχύτητες ροής ($U = 4,014$ m/s, $U = 16,056$ m/s, $U = 40,14$ m/s, $U = 80,25$ m/s). Από τις προσομοιώσεις θα προκύψουν οι πίνακες των αποτελεσμάτων, όπως υπολογισθούν από το λογισμικό, θα κατασκευασθούν τα διαγράμματα **Συντελεστή Άντωσης – Γωνίας Πρόσπτωσης**, **Συντελεστή Οπισθέλκουσας – Γωνίας Πρόσπτωσης**, **Συντελεστή Άντωσης – Συντελεστή Οπισθέλκουσας**, **Συντελεστή Άντωσης προς Συντελεστή Οπισθέλκουσας – Γωνίας Πρόσπτωσης**, και **Συντελεστή Ροπή – Γωνίας Πρόσπτωσης**, καθώς και τα διαγράμματα ταχύτητας ροής και πίεσης γύρω από την πτέρυγα, ώστε τα αποτελέσματα να παρέχουν πλήρη εικόνα για την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτέρυγας και να είναι συγκρίσιμα με των αεροτομών που υπάρχουν καταχωρημένα τα αποτελέσματα των μετρήσεων τους.

6.5.2. Διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθείται για το υπολογισμό των παραπάνω στόχων της μελέτης είναι η εξής. Αρχικά εισάγεται το τρισδιάστατο μοντέλο της πτέρυγας στο Solidworks.

Έπειτα, για κάθε επιθυμητή γωνία προσβολής, ορίζεται η γωνία μεταξύ της χορδής της πτέρυγας και του άξονα X του συστήματος συντεταγμένων του προγράμματος, παράλληλα με τον οποίο θα είναι η ροή.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής **Move/Copy Bodies** η οποία δίνει την δυνατότητα περιστροφής του μοντέλου.

Αφού οριστεί η γωνία, ακολουθείται η διαδικασία ορισμού των παραμέτρων της ροής, του ρευστού, των στόχων κ.τ.λ. όπως περιγράφεται παρακάτω.

Τέλος η διαδικασία επαναλαμβάνεται **για κάθε γωνία προσβολής και κάθε επιθυμητή ταχύτητα ροής (αριθμό Reynolds)** για την γωνία αυτή.

6.5.3. Παράμετροι Προσομοίωσης

Η μελέτη προϋποθέτει τον ορισμό κάποιων παραμέτρων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού, το είδος της ροής (π.χ. εξωτερική/εσωτερική), την ανάλυση του πλέγματος, το μέγεθος του πεδίου ροής, τις επαναλήψεις, ποιές δυνάμεις θα «μετρηθούν» κ.α. βάσει των οποίων καθορίζονται οι συνθήκες της ροής, τα ζητούμενα αποτελέσματα, η ακρίβεια με την οποία θα υπολογιστούν, αλλά και ο χρόνος επίλυσης στον εκάστοτε Η/Υ, όπως αναφέρθηκαν αναλυτικότερα στο κεφάλαιο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής παραπάνω.

Στην μελέτη αυτή μετά από δοκιμές στην προς μελέτη πτέρυγα αλλά και σε άλλες για τις οποίες υπάρχουν καταχωρημένα τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά επιλέχτηκαν οι παράμετροι που αναφέρονται παρακάτω με στόχο την μέγιστη ακρίβεια σε λογικό χρόνο επίλυσης με βάση τις δυνατότητες του συστήματος (Η/Υ) που εκτελέστηκε.

Μεταξύ των μεταβαλλόμενων παραμέτρων στο Flow simulation είναι κυρίως η ταχύτητα της ροής, ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά Reynolds και η γωνία προσβολής. Πέρα από αυτό όμως, σε κάποιες μεγάλες γωνίες προσβολής, κρίθηκε απαραίτητη η μεταβολή των παραμέτρων που αφορούν το πότε ολοκληρώνεται η διαδικασία της μελέτης, καθώς το λογισμικό από μόνο του επαναλάμβανε πολλές φορές την ανάλυση μέχρι να έχει την απαιτούμενη για τις αυτόματες ρυθμίσεις σύγκλιση αποτελεσμάτων που οδηγούσε σε μία ατέρμονη διαδικασία επαναλήψεων.

Σε κάθε λογισμικό CFD ο ορισμός αυτών των παραμέτρων γίνεται με διαφορετικό τρόπο καθώς επίσης και κάποιες παράμετροι είναι προκαθορισμένες ή ορίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα.

Παρακάτω αναλύονται οι παράμετροι της μελέτης καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον ορισμό τους εντός του περιβάλλοντος του Solidworks.

6.5.3.1. Σταθερές Παράμετροι

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι σταθερές παράμετροι που επιλέχθηκαν για την πραγματοποίηση της ανάλυσης. Τόσο για το ρευστό όσο και για το πλέγμα. Αυτές που αφορούν το πλέγμα επιλέχθηκαν με στόχο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της αεροδυναμικής μελέτης λαμβάνοντας υπ' όψιν και τον παράγοντα του χρόνου εκτέλεσης της εκάστοτε ανάλυσης.

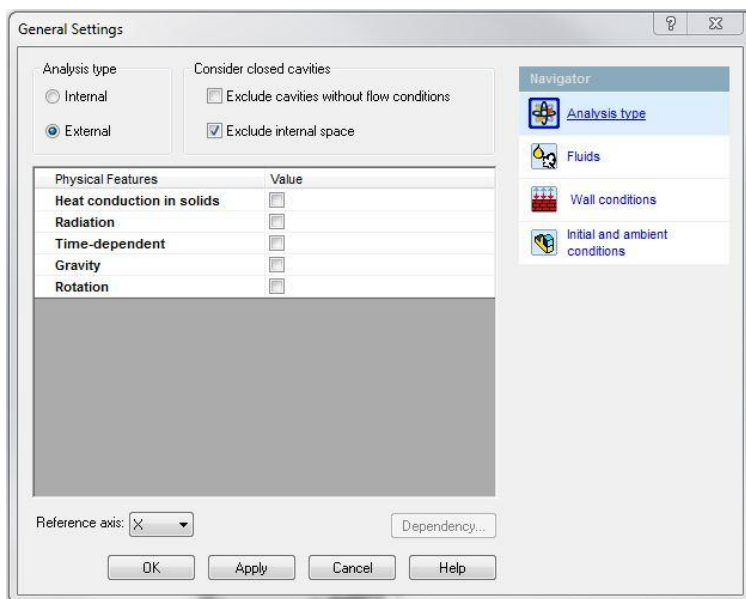
Σταθερές Παράμετροι

Παράμετρος			Τιμή
Initial Mesh	Automatic initial mesh	✓	
	Result resolution level		επίπεδο: 6
	Advanced narrow channel refinement	✗	
	Advanced narrow channel refinement	✗	
Local Initial Mesh	Region		επιφάνεια πτέρυγας
	Small solid features refinement	✓	επίπεδο: 5
	Curvature	✓	επίπεδο: 5
	tolerance	✓	επίπεδο: 5
	Refine fluid cells	✓	επίπεδο: 5
	Enable narrow channels	✗	
Solver Refinement	Refinement		1
Μέσο	Αέρας		
	Static Pressure:		101325,00 Pa
	Density:		1.20 kg/m ³
Turbulence intensity and length	Intensity:		0.10 %
	Length:		3.705e-004 m

Πίνακας 4: Παράμετροι ανάλυσης

Οι παράμετροι ορίζονται εντός του προγράμματος μέσω της παρακάτω διαδικασίας.

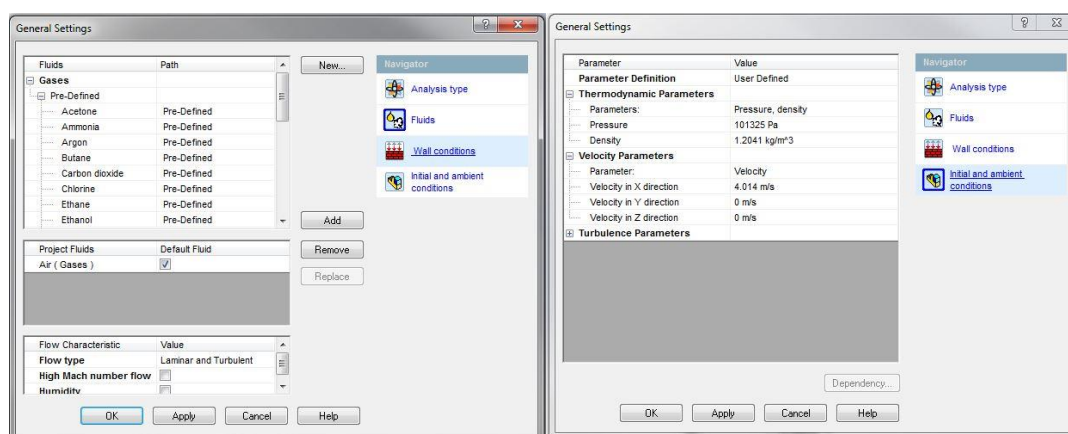
6.5.3.2. Ειδος ροής



Εικόνα 50: Ορισμός παραμέτρων ροής.

Στο παραπάνω παράθυρο ορίζεται το είδος ροής, συγκεκριμένα ότι θα είναι εξωτερικά του αντικειμένου, θα εξαιρούνται οι εσωτερικοί χώροι και ότι η ροή θα είναι κατά τον άξονα Χ.

6.5.3.3. Χαρακτηριστικά ρευστού



Εικόνα 51: Ορισμός παραμέτρων ρευστού.

Μέσω των καρτελών που φαίνονται από πάνω ορίζονται, το ρευστό και οι αρχικές συνθήκες. Οι επιλογές που γίνονται εδώ φαίνονται στον πίνακα των παραμέτρων.

6.5.3.4. Computational Domain

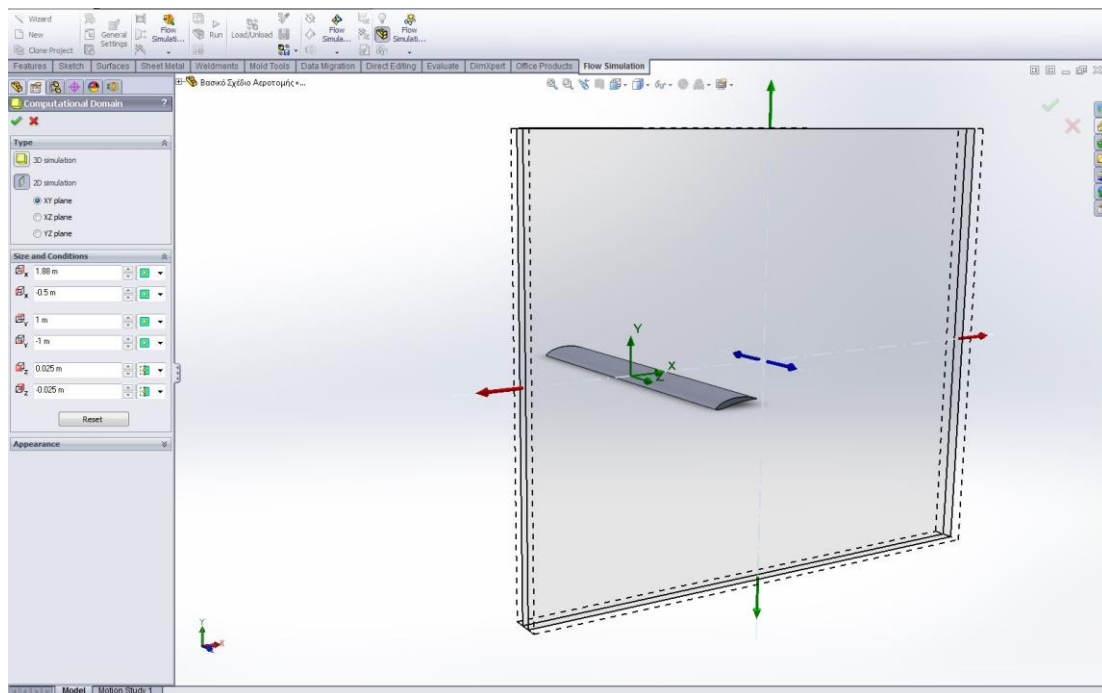
Στον παραπάνω πίνακα και την φωτογραφία φαίνεται ο ορισμός του χώρου στον οποίο γίνεται η ανάλυση της ροής γύρω από την πτέρυγα. Καθώς η πτέρυγα έχει ίδια αεροτομή σε όλο το μήκος της, επιλέγεται πολύ μικρό πλάτος στον χώρο ανάλυσης, δηλαδή σχεδόν 2 διαστάσεων. Αυτό επιλέγεται για οικονομία χρόνου της εκάστοτε ανάλυσης, λόγω του ότι η αύξηση των διαστάσεων του χώρου αυτού αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις του συστήματος και του χρόνου ολοκλήρωσης της ανάλυσης.

Το μόνο μειονέκτημα αυτού είναι η αδυναμία να συμπεριληφθούν στις μετρήσεις τα άκρα της πτέρυγας και οι δυνάμεις που παράγονται λόγω φαινομένων όπως οι αεροδίνες, κάτι που έχει μικρή επίπτωση στα αποτελέσματα.

Τέλος στον X και στον Ψ άξονα ο χώρος διατηρείται σε ένα λογικά μεγάλο μέγεθος ώστε να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερα η προσέγγιση.

Computational domain		
2D		
Xmax:	1,88	m
Xmin:	-0,5	m
Ymax:	1	m
Ymin:	-1	m
Zmax:	0,025	m
Zmin:	-0,025	m

Πίνακας 5: Παράμετροι Computational Domain.

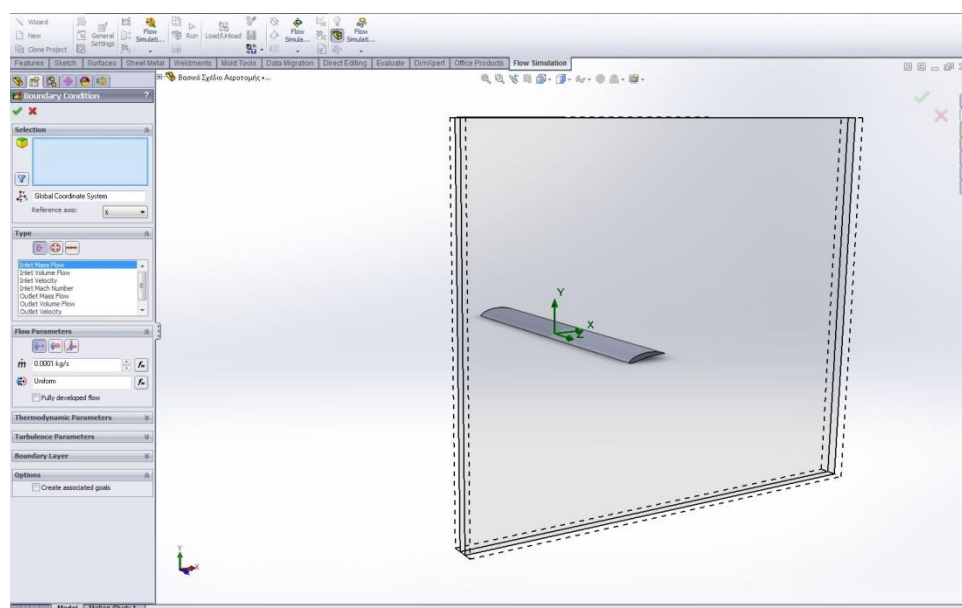


Εικόνα 52: Computational Domain

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το παράθυρο μέσω του οποίου γίνονται οι επιλογές στις παραμέτρους του Computational Domain.

6.5.3.5. Οριακές συνθήκες

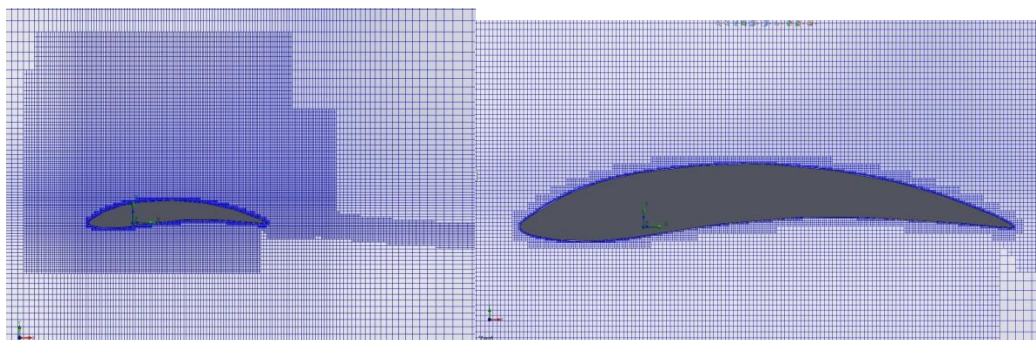
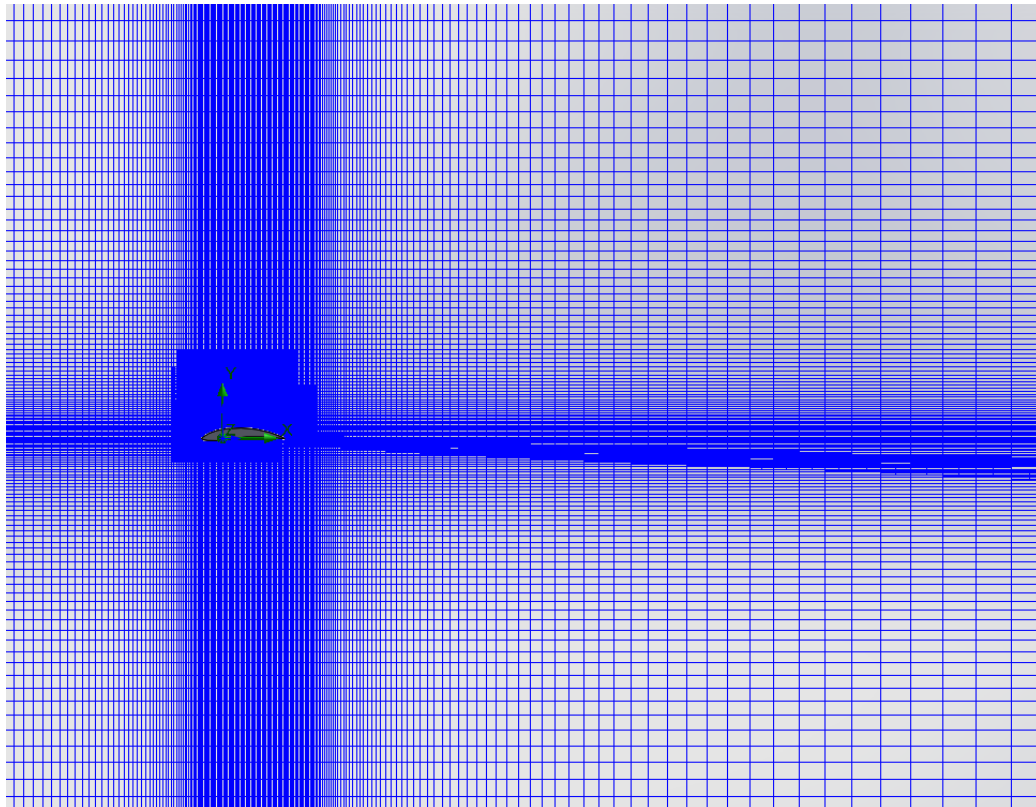
Μέσω της καρτέλας Boundary Condition ορίζονται οι παράμετροι των τοπικών οριακών συνθηκών. Στην συγκεκριμένη μελέτη επιλέγεται η επιφάνεια της πτέρυγας και ορίζεται η τραχύτητά της.

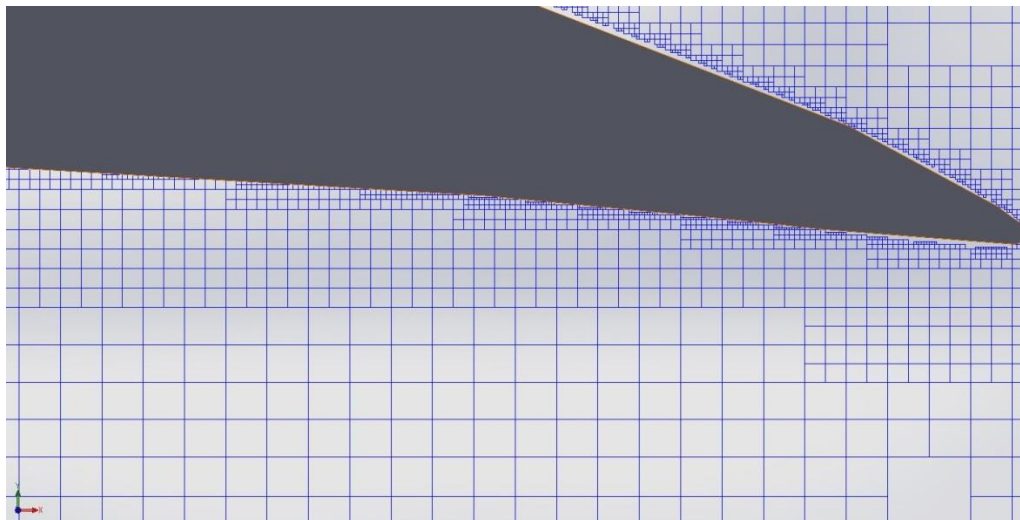


Εικόνα 53: Ορισμός Boundary Condition

6.5.3.6. Πλέγμα (Mesh)

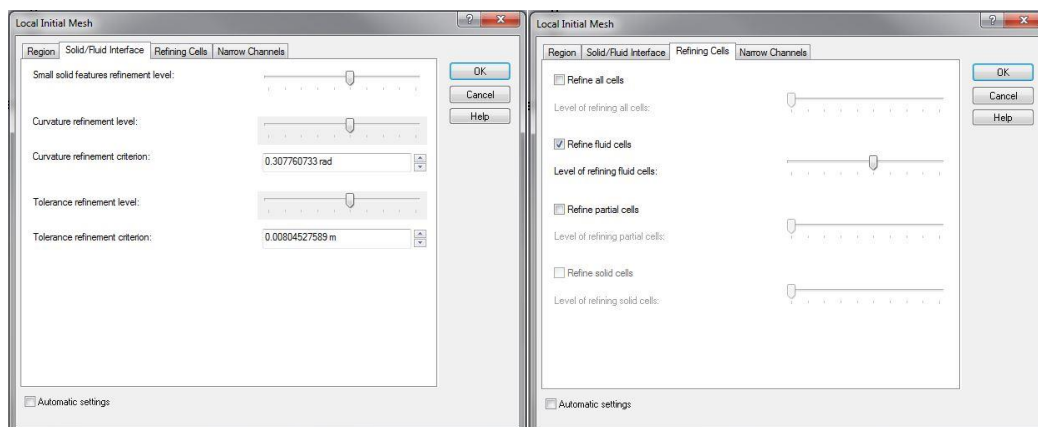
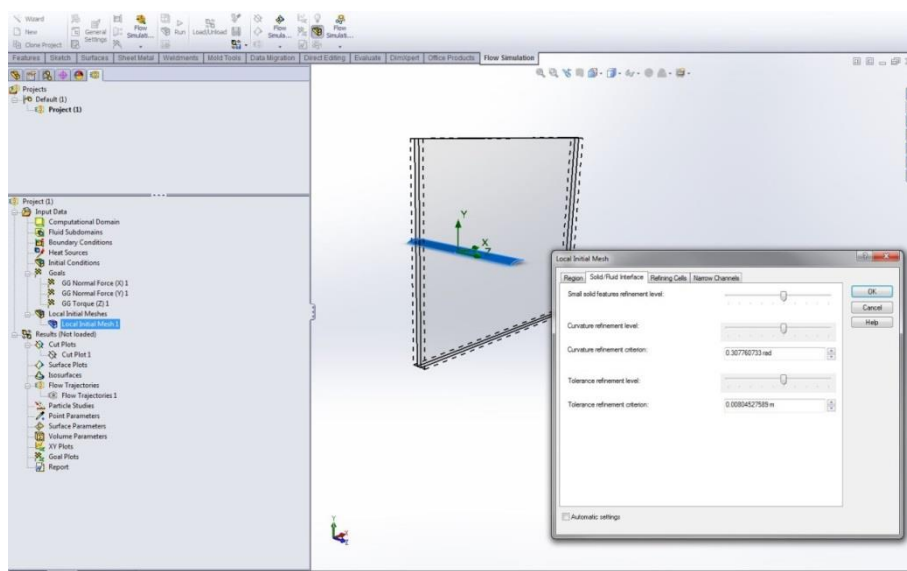
Το πλέγμα ορίστηκε σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα των παραμέτρων της ανάλυσης και απεικονίζεται στις παρακάτω φωτογραφίες. Η πυκνότητα του μεταβάλλεται στον χώρο γύρω από την πτέρυγα ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα σημεία που υπάρχουν μεγαλύτερες μεταβολές στην ροή και μικρότερη όπου δεν χρειάζεται εντός του computational domain για εξοικονόμηση πόρων και χρόνου.





Εικόνα 54: Πλέγμα (Mesh) με μεταβλητή πυκνότητα γύρω από την πτέρυγα.

Η επιλογής των παραμέτρων του πλέγματος γίνεται μέσα από την εντολή Local Initial Mesh.

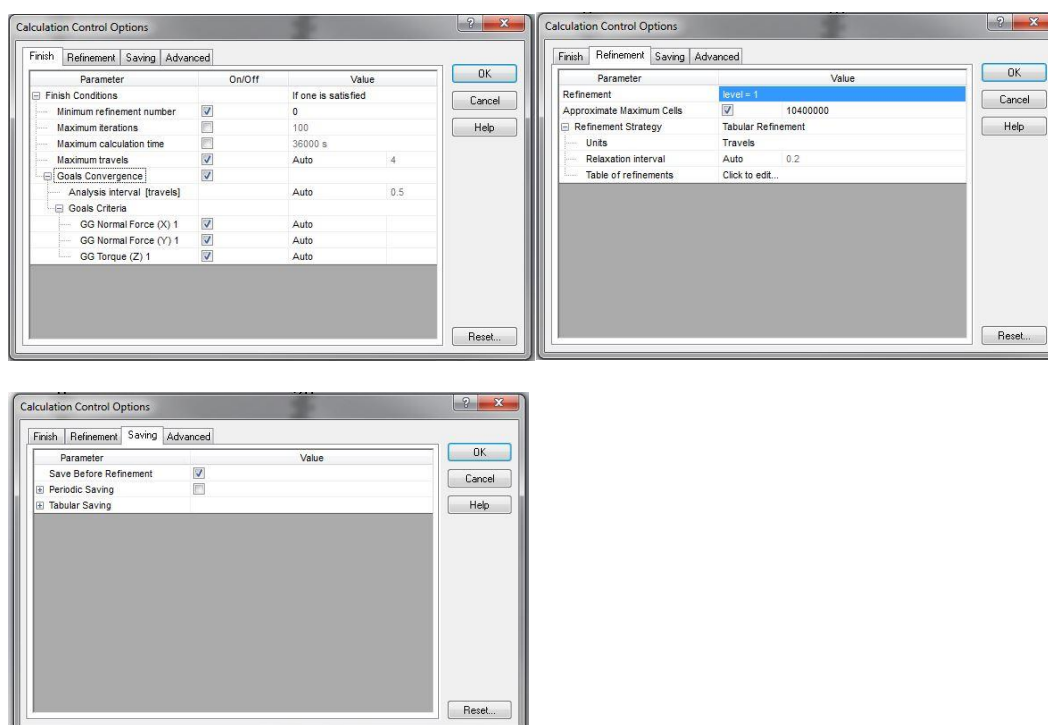


Εικόνα 55: Καρτέλες επιλογής παραμέτρων Local Initial mesh

6.5.3.7. Επιλογές Υπολογισμών

Σε αυτό το σημείο ορίζονται μέσα από το παράθυρο Calculation Control Options οι παράμετροι Finish Conditions, Refinement, Iterations κτλ οι οποίοι καθορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες θα θεωρείται ότι έχει τελειώσει η ανάλυση και έχει επιτευχθεί επαρκής σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι αυτόματες ρυθμίσεις είναι αποδεκτές. Σε ειδικές περιπτώσεις όμως όπου δεν μπορεί να επιτευχθεί η ζητούμενη σύγκλιση τότε χρειάζεται αλλαγή των παραμέτρων μέσω δοκιμών, καθώς σε άλλη περίπτωση η ανάλυση δεν θα λήγει.

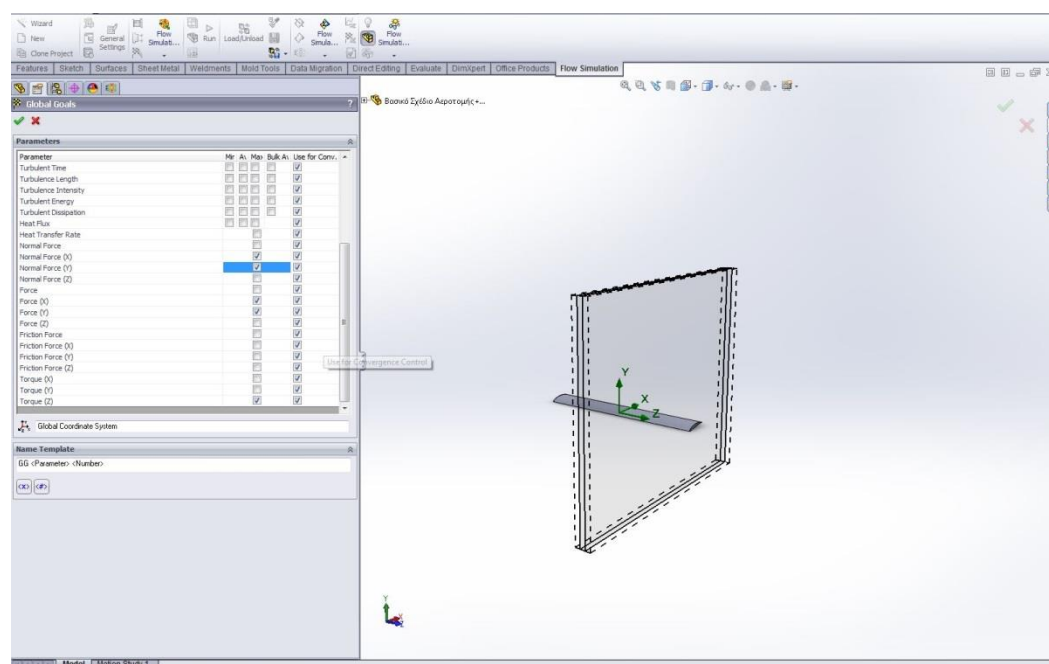


Εικόνα 56: Καρτέλες επιλογής παραμέτρων υπολογισμού.

6.5.3.8. Στόχοι ανάλυσης

Τέλος επιλέγονται τα αποτελέσματα που ζητούνται από την ανάλυση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα ζητούμενα είναι δύναμη στον άξονα Y δηλαδή η άντωση, η δύναμη στον άξονα X που είναι η οπισθέλκουσα και η ροπή στην πτέρυγα. Αυτά ορίζονται στην καρτέλα που φαίνεται παρακάτω (Global Goals).

Παράλληλα μπορούν να ορισθούν σαν στόχος ανάλυσης και εξισώσεις (Equation Goal) μέσω των οποίων να λαμβάνονται υπ όψιν οι δυνάμεις και έχοντας εισάγει τις κατάλληλες εξισώσεις να επιστρέφουν σαν αποτελέσματα στο τέλος της ανάλυσης και τους συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και ροπής (CL,CD και CM).



Εικόνα 57: Ορισμός στόχων

Πέραν των αποτελεσμάτων αυτών στην περίπτωση δημιουργήθηκαν και οι γραφικές αναπαραστάσεις της πίεσης και της ταχύτητας (Cut Plots) στο επίπεδο κάθετα την ροή.

7. Αποτελέσματα μετρήσεων

Ακολουθούν οι τέσσερις πίνακες των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για $5 \cdot 10^4 \text{Re}$, $2 \cdot 10^5 \text{Re}$, $5 \cdot 10^5 \text{Re}$ και $1 \cdot 10^6 \text{Re}$. Στους πίνακες αυτούς περιέχονται τα αποτελέσματα για κάθε γωνία προσβολής, όπως αυτά προέκυψαν από το Solidworks FlowSimulation καθώς και οι συντελεστές Άντωσης, Οπισθέλκουσας, Ροπής και Κ όπως υπολογίσθηκαν.

Έπειτα ακολουθούν τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν από τους πίνακες αυτούς, τα οποία είναι τα εξής: το διάγραμμα **Συντελεστή Άντωσης – Γωνίας Πρόσπτωσης**, το διάγραμμα **Συντελεστή Οπισθέλκουσας – Γωνίας Πρόσπτωσης**, το διάγραμμα **Συντελεστής Άντωσης – Συντελεστή Οπισθέλκουσας**, το διάγραμμα **Συντελεστή Άντωσης προς Συντελεστή Οπισθέλκουσας – Γωνίας Πρόσπτωσης**, και το **διάγραμμα Συντελεστή Ροπής – Γωνίας**.

5×10^4 Reynolds

$U = 4,014 \text{ m/s}$

Angle of attack	Lift(N)	Drag(N)	Moment(Nm)	Cl	Cd	Cm	Cl/Cd
-6	-0,0372	0,014104	-0,00257	-0,4075	0,1545	-0,1493	-2,6375
-4	-0,016	0,004476	-0,00023	-0,1753	0,0490	-0,0133	-3,5746
-2	0,02544	0,001495	0,00263	0,2787	0,0164	0,1530	17,0167
0	0,04136	0,00156	0,00260	0,4530	0,0171	0,1513	26,5128
2	0,0496	0,00191	0,00229	0,5433	0,0209	0,1333	25,9686
4	0,0637	0,00255	0,00222	0,6977	0,0279	0,1292	24,9804
6	0,0607	0,00652	0,00245	0,6649	0,0714	0,1426	9,3098
8	0,0655	0,00681	0,00172	0,7175	0,0746	0,0999	9,6182
10	0,0749	0,00725	0,00146	0,8204	0,0794	0,0850	10,3310
12	0,08686	0,00906	0,00147	0,9514	0,0992	0,0857	9,5872
14	0,09030	0,01960	0,00259	0,9891	0,2147	0,1507	4,6071
16	0,09863	0,02317	0,00300	1,0803	0,2538	0,1743	4,2568
18	0,09198	0,02696	0,00249	1,0075	0,2953	0,1450	3,4117
20	0,07897	0,02421	0,00166	0,8650	0,2652	0,0968	3,2619
22	0,13830	0,06980	0,00693	1,5149	0,7646	0,4035	1,9814
24	0,12730	0,07137	0,00687	1,3943	0,7818	0,3998	1,7836
26	0,18711	0,07917	0,00564	2,0495	0,8672	0,3283	2,3634
28	0,10388	0,07111	0,00567	1,1379	0,7789	0,3298	1,4608
30	0,06867	0,061693	0,00412	0,7522	0,6758	0,2395	1,1131

Πίνακας 6: Αποτελέσματα μετρήσεων για 50.000 Reynolds ανά 2ο γωνίας προσβολής.

2×10^5 Reynolds

U = 16,056 m/s

Angle of attack	Lift(N)	Drag(N)	Moment(Nm)	Cl	Cd	Cm	Cl/Cd
-10	-0,05444	0,11453	0,03723	-0,0373	0,0784	0,1354	-0,4753
-8	-0,34776	0,14521	0,00488	-0,2381	0,0994	0,0177	-2,3949
-6	0,10841	0,10265	0,02204	0,0742	0,0703	0,0801	1,0561
-4	0,27410	0,01869	0,04730	0,1876	0,0128	0,1720	14,6656
-2	0,57301	0,01908	0,04915	0,3923	0,0131	0,1788	30,0320
0	0,84520	0,02407	0,04922	0,5786	0,0165	0,1790	35,1143
2	1,04380	0,03210	0,04622	0,7146	0,0220	0,1681	32,5171
4	1,25830	0,04380	0,04449	0,8614	0,0300	0,1618	28,7283
6	1,48730	0,06134	0,04256	1,0182	0,0420	0,1548	24,2468
8	1,63660	0,07867	0,03856	1,1204	0,0539	0,1402	20,8034
10	1,74810	0,10050	0,03464	1,1967	0,0688	0,1260	17,3940
12	1,95110	0,13440	0,03396	1,3357	0,0920	0,1235	14,5171
14	2,03150	0,16355	0,02980	1,3908	0,1120	0,1084	12,4213
16	1,71730	0,37130	0,04146	1,1757	0,2542	0,1508	4,6251
18	1,70410	0,29840	0,02588	1,1666	0,2043	0,0941	5,7108
20	1,58830	0,37420	0,02767	1,0873	0,2562	0,1006	4,2445
22	1,45630	0,44470	0,02810	0,9970	0,3044	0,1022	3,2748

Πίνακας 7: Αποτελέσματα μετρήσεων για 200.000 Reynolds ανά 2ο γωνίας προσβολής.

5×10^5 Reynolds

$U = 40,14$ m/s

Angle of attack	Lift(N)	Drag(N)	Moment(Nm)	Cl	Cd	Cm	Cl/Cd
-10	1,1559	0,5944	0,2945	0,12661	0,0651	0,1714	1,9447
-8	-0,4567	0,2470	0,3165	-0,05002	0,0271	0,1842	-1,8490
-6	0,8343	0,1203	0,3277	0,09139	0,0132	0,1907	6,9352
-4	2,6186	0,0939	0,3377	0,28683	0,0103	0,1965	27,8871
-2	4,3212	0,1058	0,3401	0,47332	0,0116	0,1979	40,8431
0	5,8053	0,1244	0,3253	0,63588	0,0136	0,1893	46,6664
2	7,7451	0,2189	0,3391	0,84836	0,0240	0,1973	35,3819
4	8,9468	0,2583	0,3093	0,97999	0,0283	0,1800	34,6372
6	10,4112	0,3506	0,2980	1,14039	0,0384	0,1734	29,6954
8	12,0770	0,5346	0,3011	1,32286	0,0586	0,1752	22,5907
10	12,8585	0,6489	0,2645	1,40846	0,0711	0,1539	19,8158
12	13,7135	0,8109	0,2359	1,50211	0,0888	0,1373	16,9115
14	13,8241	0,9754	0,1966	1,51423	0,1068	0,1144	14,1727
16	13,5185	1,2004	0,1656	1,48075	0,1315	0,0964	11,2617
18	12,6306	1,5307	0,1476	1,38350	0,1677	0,0859	8,2515
20	8,9849	1,5462	0,1984	0,98416	0,1694	0,1154	5,8110
22	8,7744	3,0769	0,2037	0,96111	0,3370	0,1185	2,8517
24	8,8625	3,5627	0,2008	0,97076	0,3902	0,1169	2,4876
26	11,0978	5,1812	0,3206	1,21560	0,5675	0,1865	2,1419
28	10,2422	5,2119	0,2699	1,12188	0,5709	0,1571	1,9652
30	12,4738	8,7286	0,6145	1,36632	0,9561	0,3576	1,4291

Πίνακας 8: Αποτελέσματα μετρήσεων για 500.000 Reynolds ανά 2θ γωνίας προσβολής.

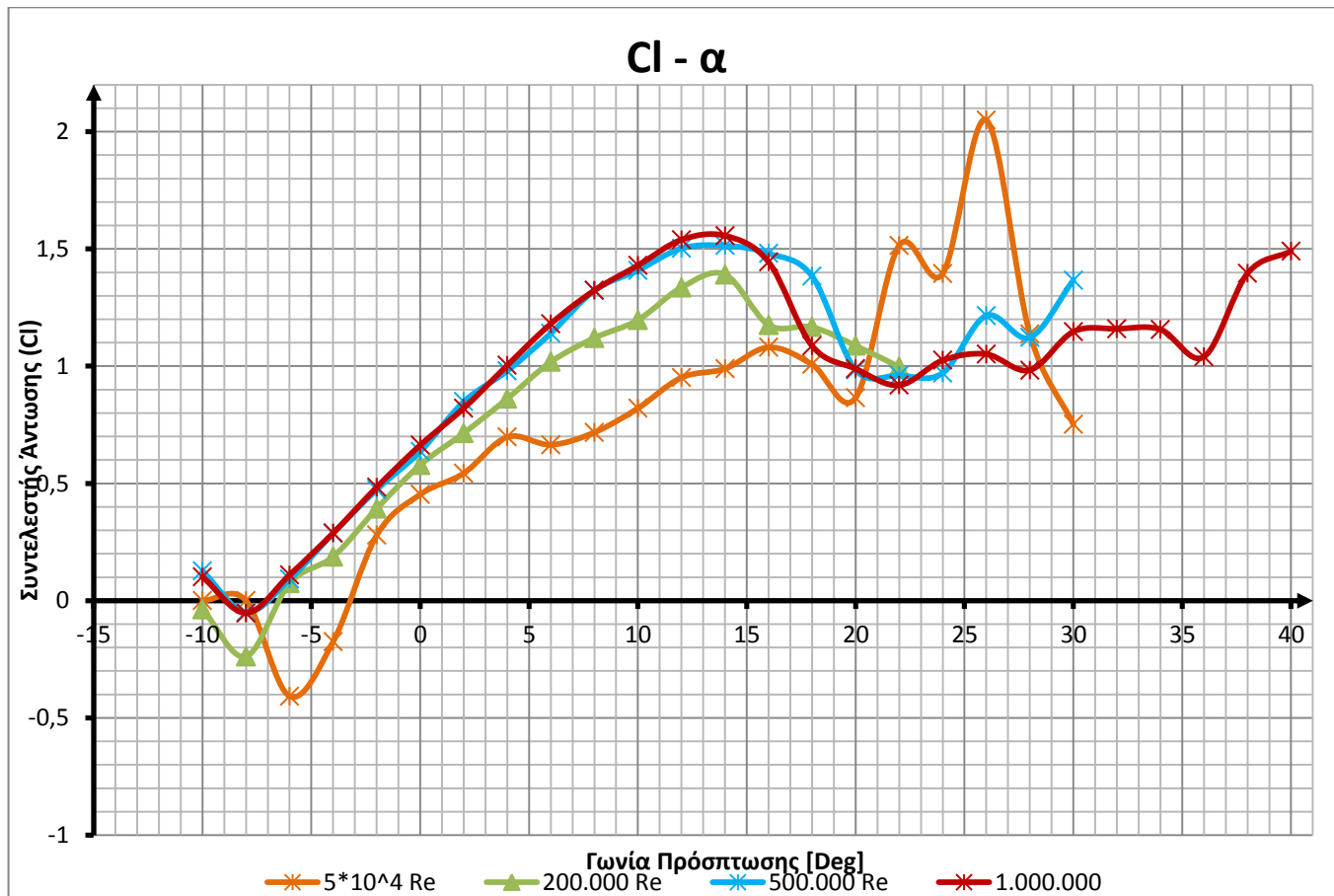
10⁶ Reynolds

U = 80,25 m/s

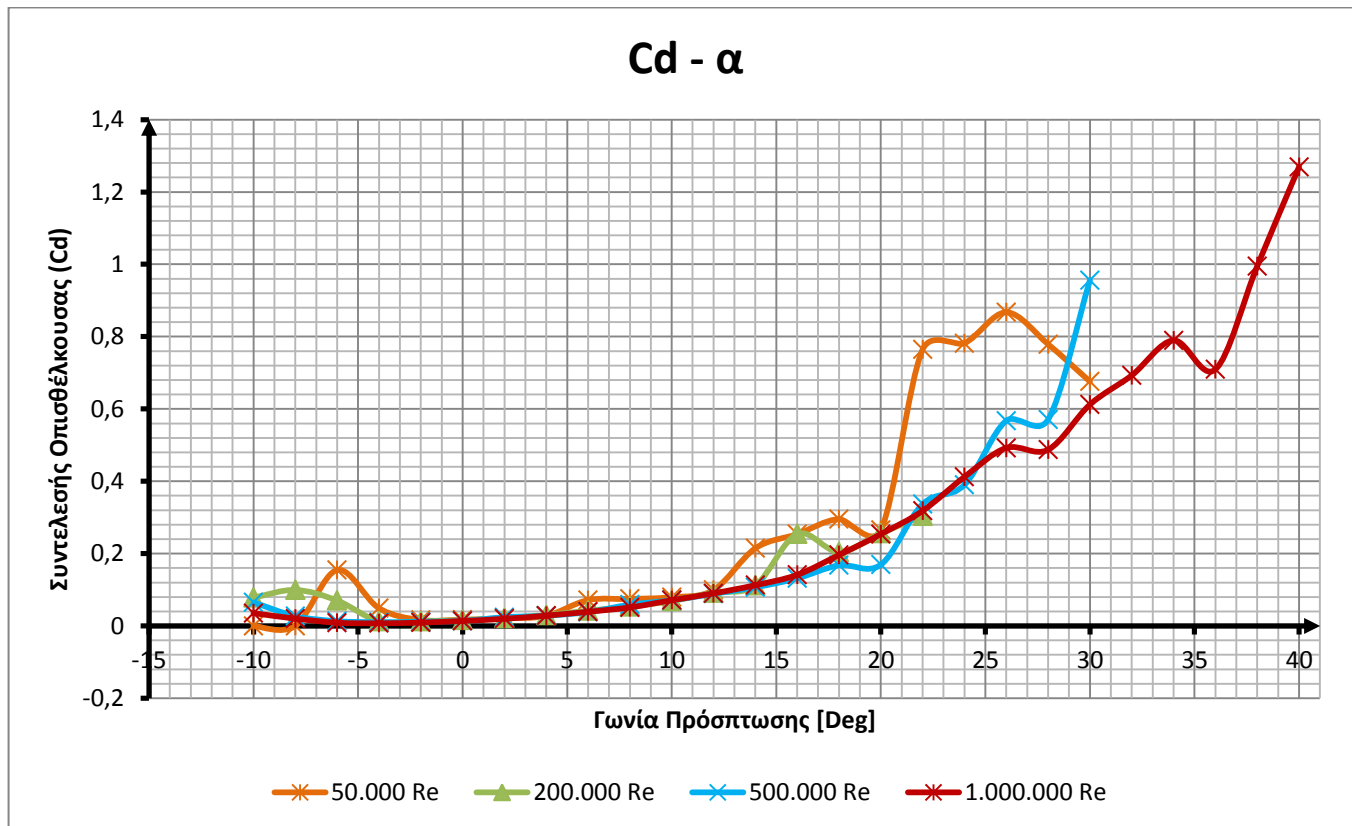
Angle of attack	Lift(N)	Drag(N)	Moment(Nm)	Cl	Cd	Cm	Cl/Cd
-10	3,7008	1,2918	1,5879	0,10134	0,03537	0,23101	2,86484
-8	-1,9331	0,7346	1,3472	-0,05294	0,02012	0,19599	-2,63164
-6	4,0051	0,3216	1,3784	0,10967	0,00881	0,20053	12,45367
-4	10,5188	0,2635	1,3727	0,28804	0,00722	0,19970	39,91954
-2	17,6564	0,3352	1,3875	0,48350	0,00918	0,20185	52,67422
0	24,2077	0,5003	1,3539	0,66290	0,01370	0,19697	48,38637
2	29,9698	0,7188	1,2894	0,82069	0,01968	0,18758	41,69421
4	36,6427	1,0375	1,2644	1,00342	0,02841	0,18395	35,31827
6	43,1256	1,4276	1,2299	1,18094	0,03909	0,17893	30,20846
8	48,3146	1,8674	1,1501	1,32304	0,05114	0,16732	25,87266
10	52,2076	2,5926	1,0485	1,42964	0,07100	0,15254	20,13716
12	56,206	3,2896	0,9585	1,53913	0,09008	0,13944	17,08597
14	56,8314	4,1141	0,8103	1,55626	0,11266	0,11788	13,81381
16	52,7430	5,1562	0,6641	1,44430	0,14120	0,09661	10,22904
18	39,6769	7,1647	0,5999	1,08650	0,19620	0,08727	5,53783
20	36,1188	9,2678	0,6953	0,98907	0,25379	0,10115	3,89724
22	33,5457	11,6221	0,7506	0,91861	0,31826	0,10920	2,88637
24	37,4282	15,0529	0,9018	1,02493	0,41221	0,13119	2,48644
26	38,3875	17,9773	0,9809	1,05120	0,49229	0,14270	2,13533
28	35,8957	17,7923	0,8387	0,98296	0,48722	0,12201	2,01749
30	41,8914	22,3560	1,0115	1,14715	0,61219	0,14715	1,87383
32	42,3331	25,3032	1,0778	1,15924	0,69290	0,15679	1,67303
34	42,2367	28,8376	1,2380	1,15660	0,78968	0,18010	1,46464
36	37,9863	25,9034	0,8242	1,04021	0,70933	0,11991	1,46646
38	50,9742	36,3374	1,1595	1,39587	0,99506	0,16868	1,40280
40	54,4208	46,3517	1,7592	1,49025	1,26929	0,25593	1,17408

Πίνακας 9: Αποτελέσματα μετρήσεων για 1.000.000 Reynolds ανά 2ο γωνία προσβολής.

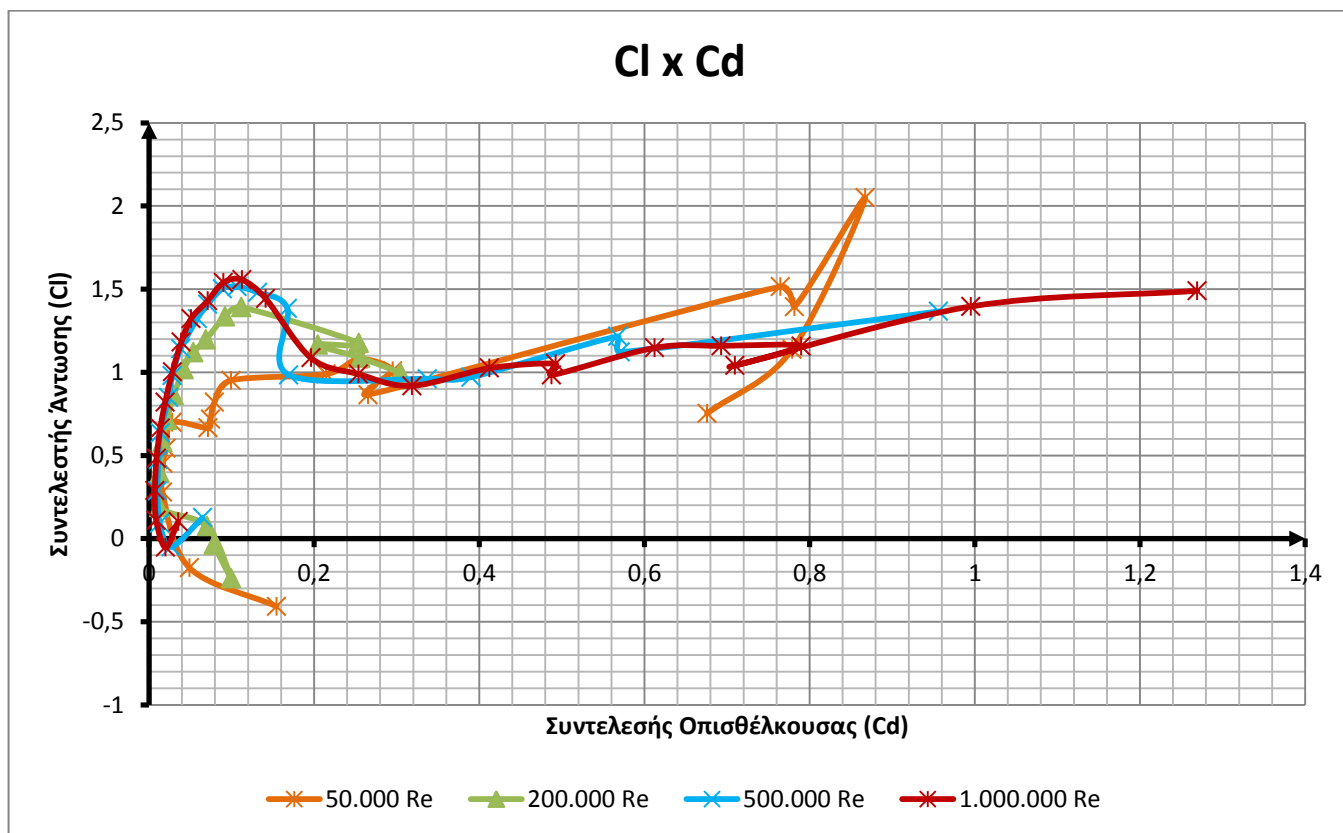
7.1. Διάγραμμα Συντελεστή Άντωσης - Γωνίας Πρόσπτωσης



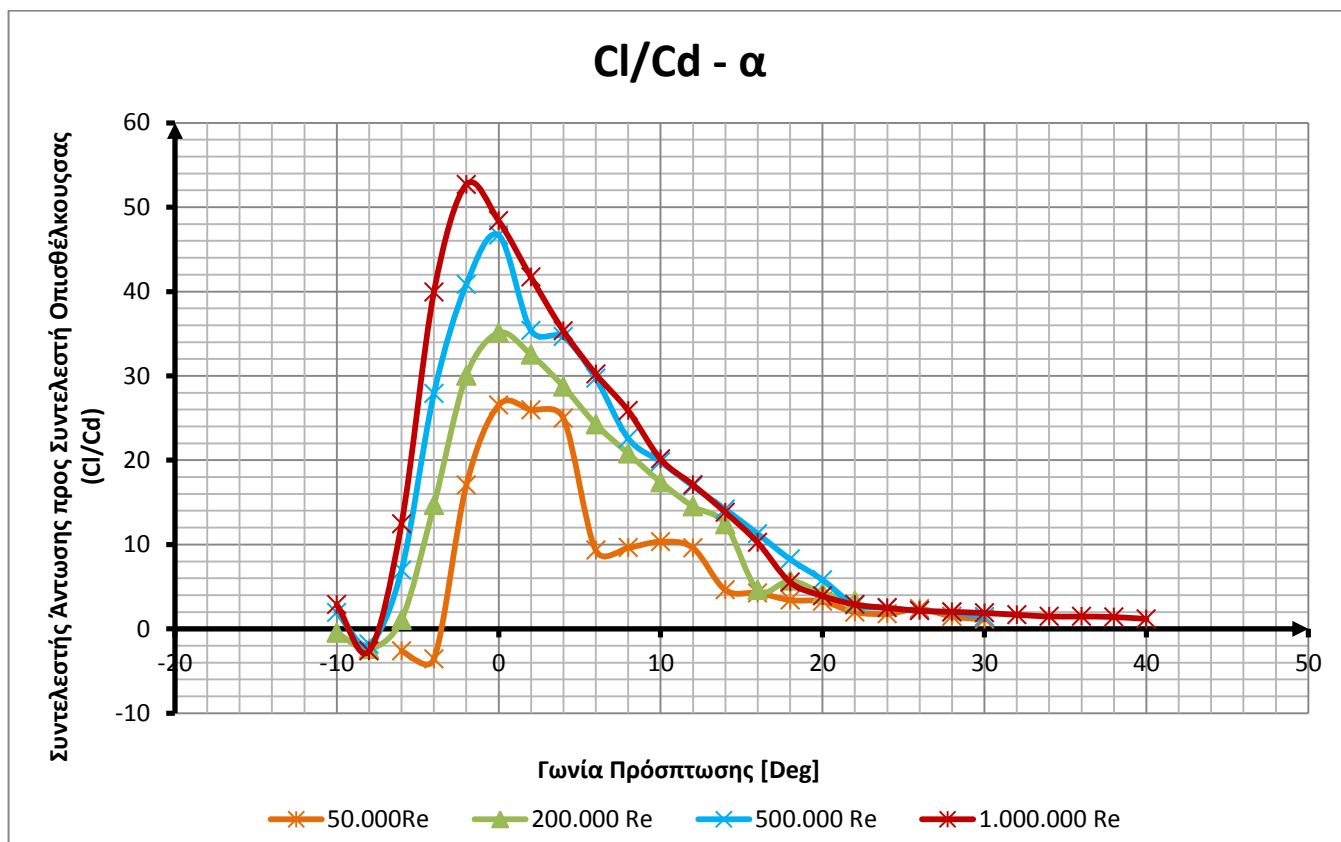
7.2. Διάγραμμα Συντελεστή Οπισθέλκουσας - Γωνίας Πρόσπτωσης



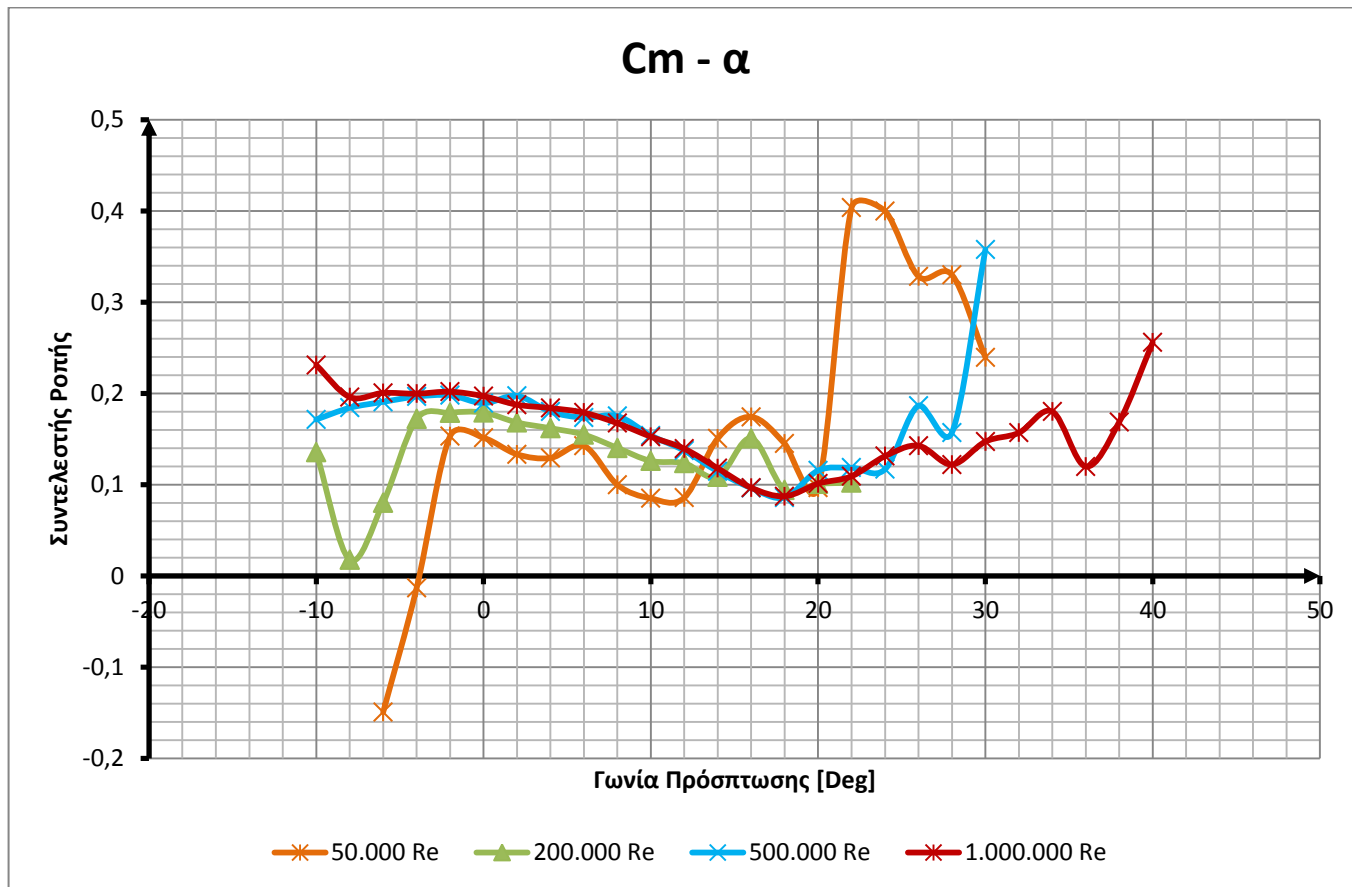
7.3. Διάγραμμα Συντελεστής Άντωσης - Συντελεστή Οπισθέλκουσας



7.4. Διάγραμμα Συντελεστή Άντωσης προς Συντελεστή Οπισθέλκουσας - Γωνίας Πρόσπτωσης



7.5. Διάγραμμα Συντελεστή Ροπής - Γωνίας Πρόσπτωσης



7.6. Διαγράμματα ταχύτητας ροής και κατανομής πίεσης

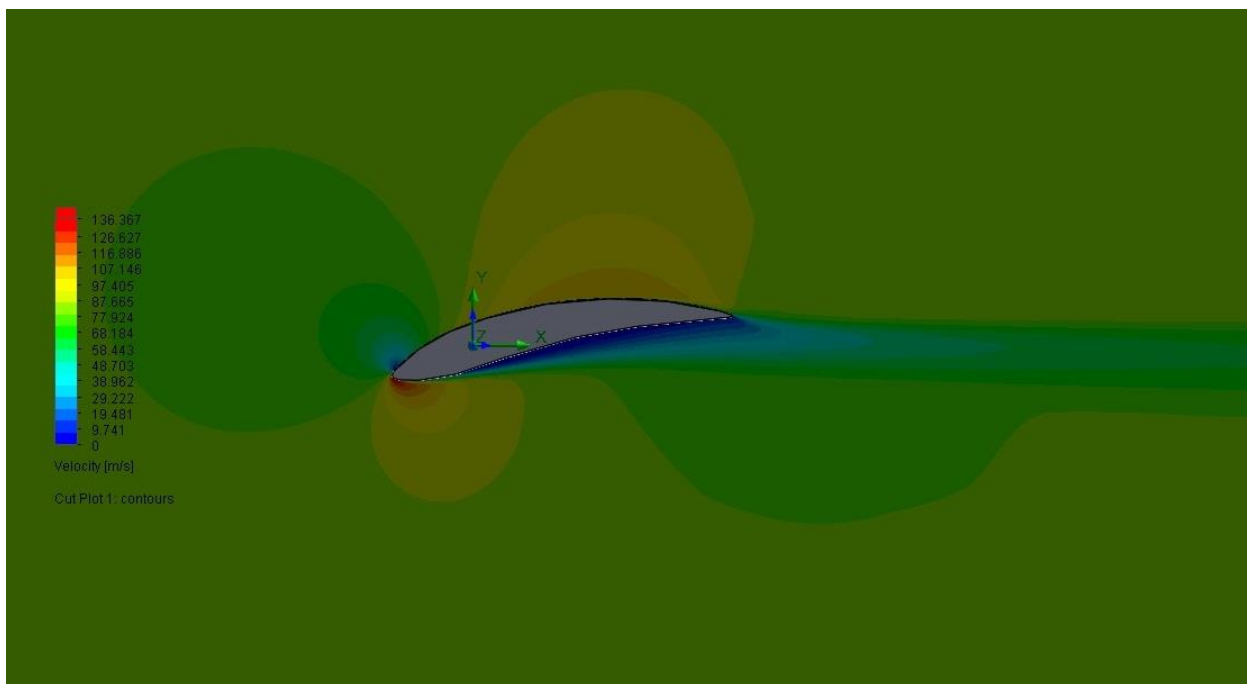
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα ταχύτητας ροής και κατανομής πίεσης (Cutplots), στο επίπεδο παράλληλα στην ροή και στην αεροτομή, όπως αυτά προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ροής στο Flow Simulation.

Τα διαγράμματα αυτά αφορούν την ροή των 10^6 Re και ταχύτητας 80,28m/s για γωνίες πρόσπτωσης από -10 μοίρες έως 40 μοίρες. Επιλέχθηκαν αυτά τα διαγράμματα, δηλαδή των 10^6 Re καθώς είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά για την συμπεριφορά της πτέρυγας.

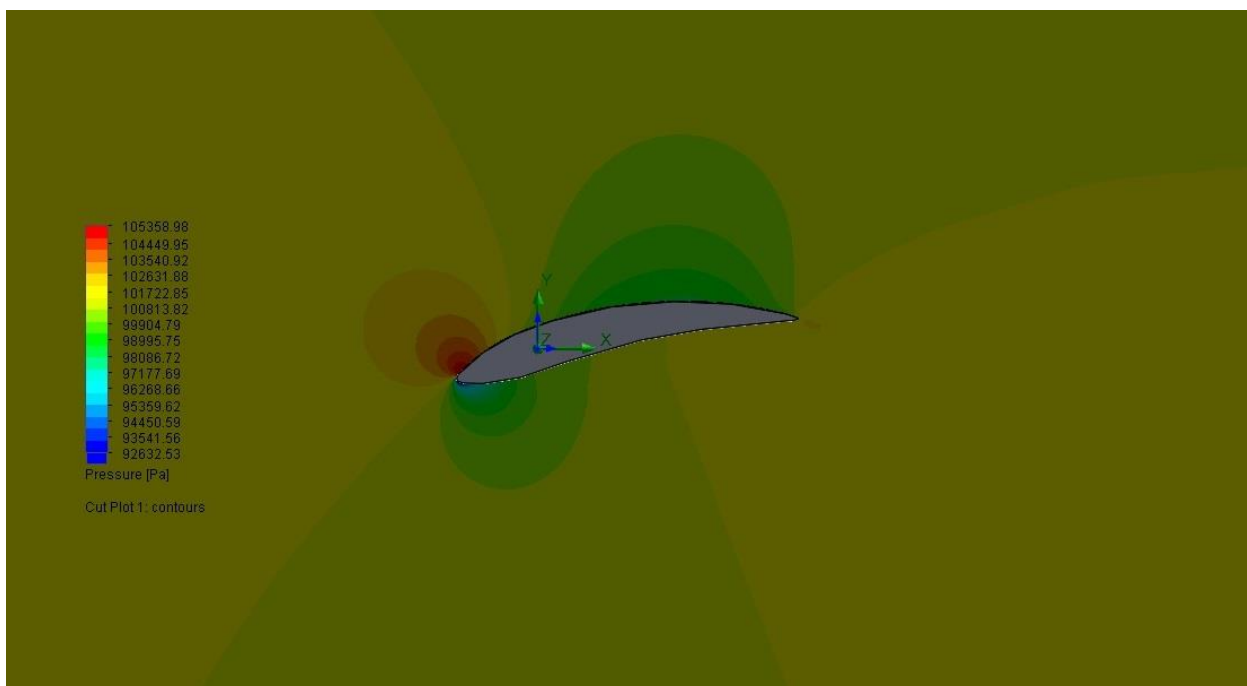
Στα διαγράμματα φαίνονται χρωματικά οι πιέσεις και οι ταχύτητες του ρευστού σε κάθε σημείο γύρω από την πτέρυγα. Αυτό είναι σημαντικό καθώς φαίνεται οπτικά η αεροδυναμική συμπεριφορά της πτέρυγας αλλά και τα σημεία πίεσης καθώς και τα σημεία που υπάρχει αποκόλληση του ρευστού για την εκάστοτε γωνία πρόσπτωσης.

Η σειρά με την οποία παρατίθενται είναι από τις -10 μοίρες μέχρι τις 40 μοίρες ανά 2 μοίρες, πρώτα το διάγραμμα πίεσης του ρευστού γύρω από την πτέρυγα και έπειτα το διάγραμμα ταχύτητας.

Γωνία προσβολής: -10 μοίρες

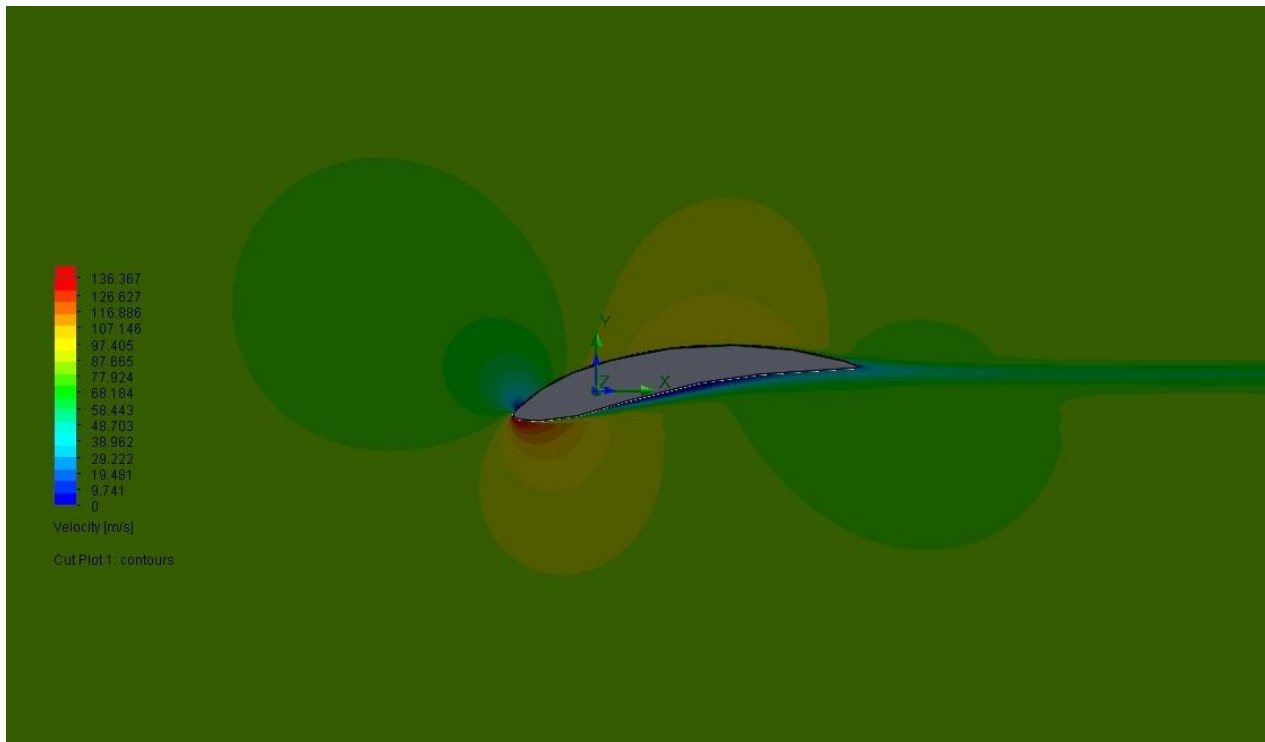


Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, -10 μοίρες

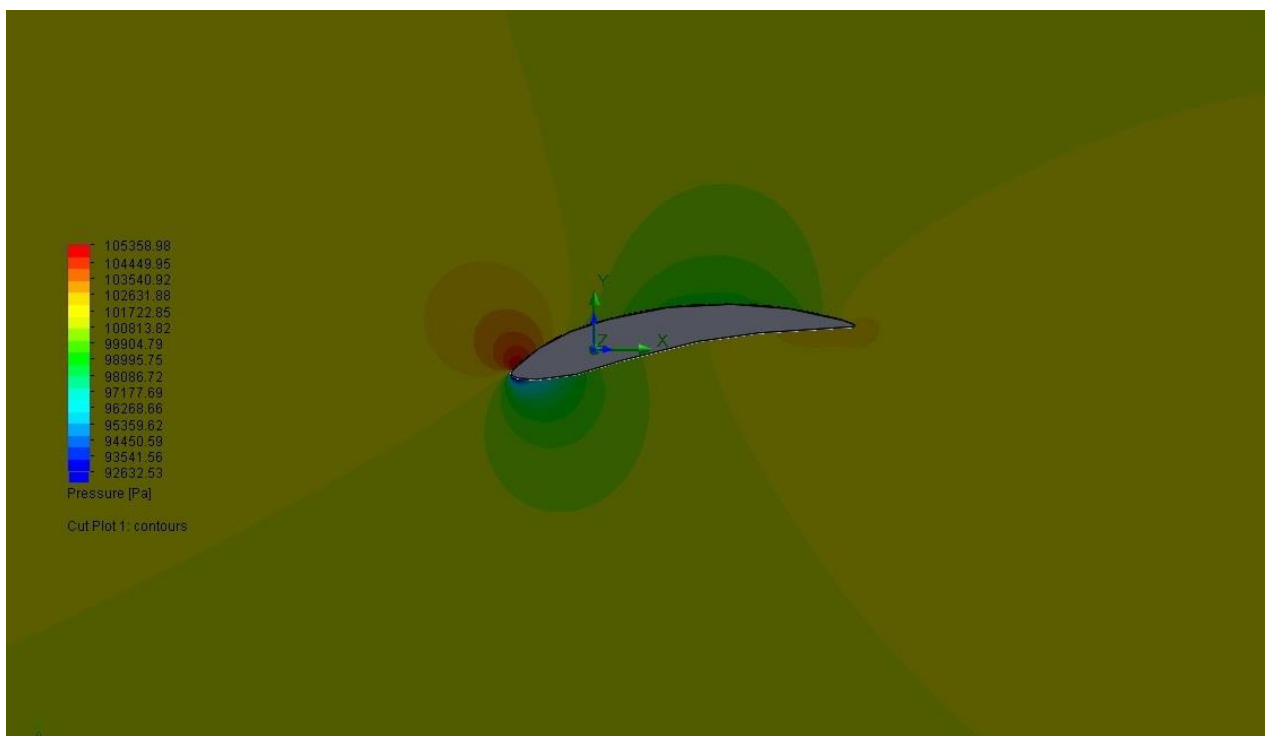


Διάγραμμα 2: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, -10 μοίρες

Γωνία προσβολής: -8 μοίρες

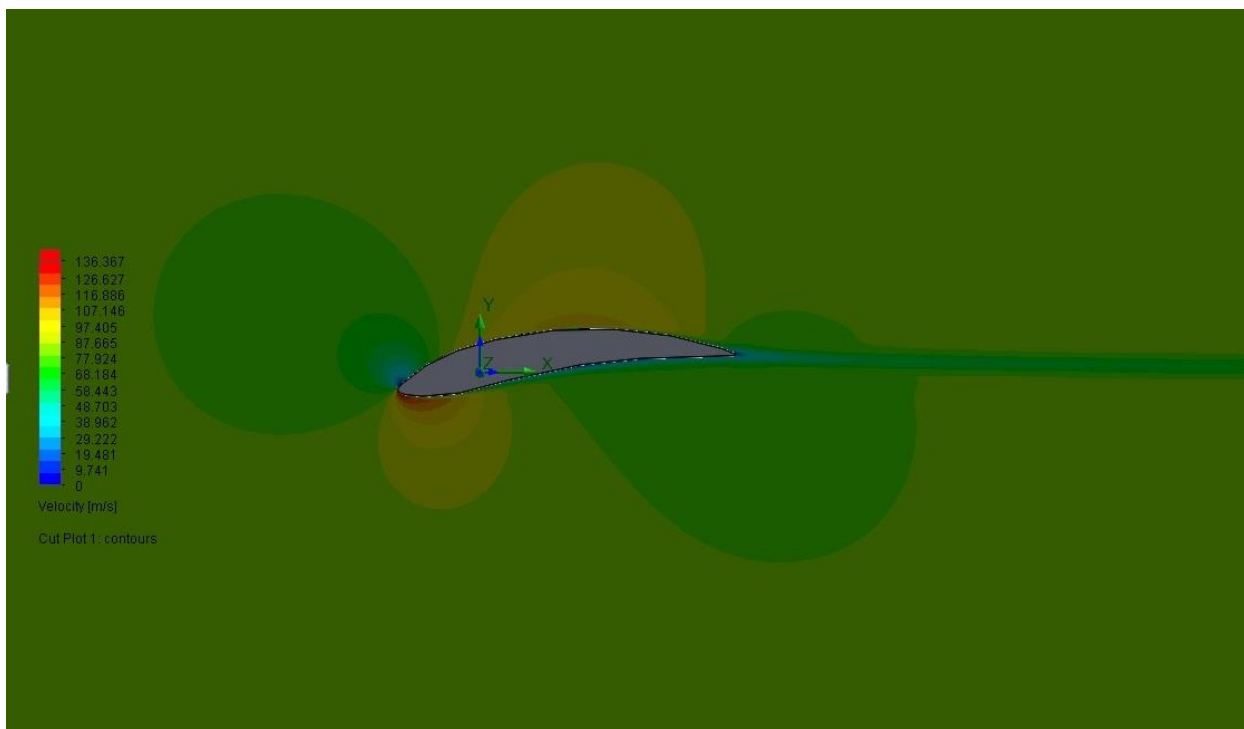


Διάγραμμα 3: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, -8 μοίρες

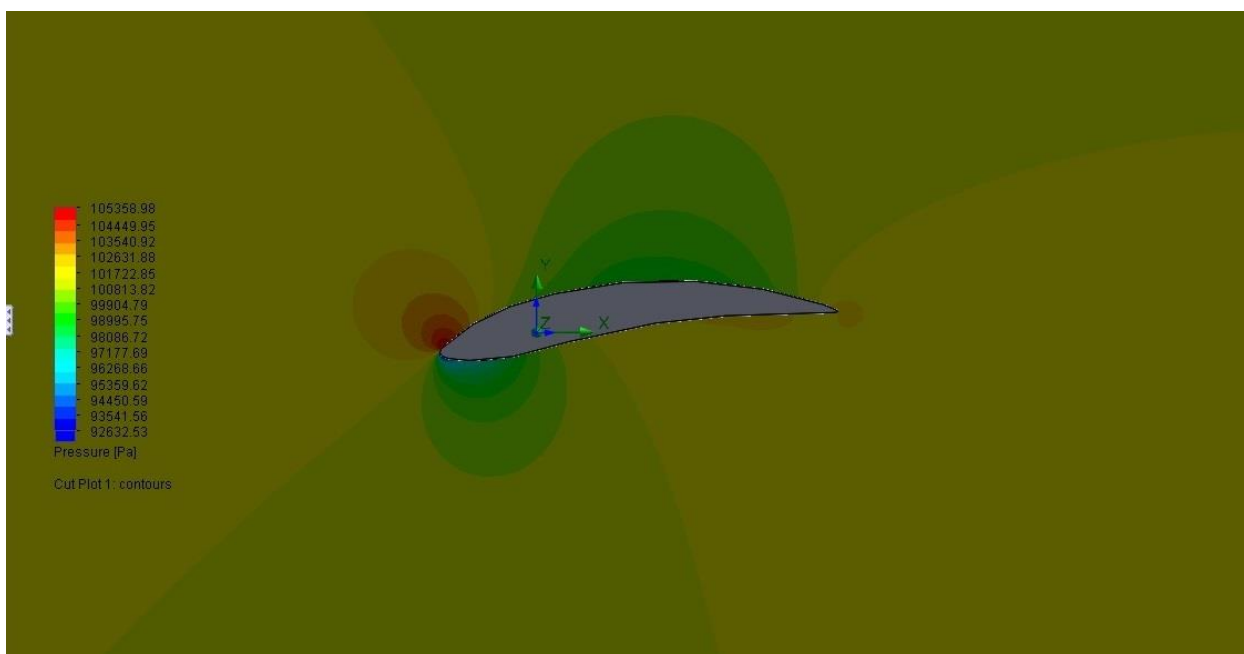


Διάγραμμα 4: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, -8 μοίρες

Γωνία προσβολής: -6 μοίρες

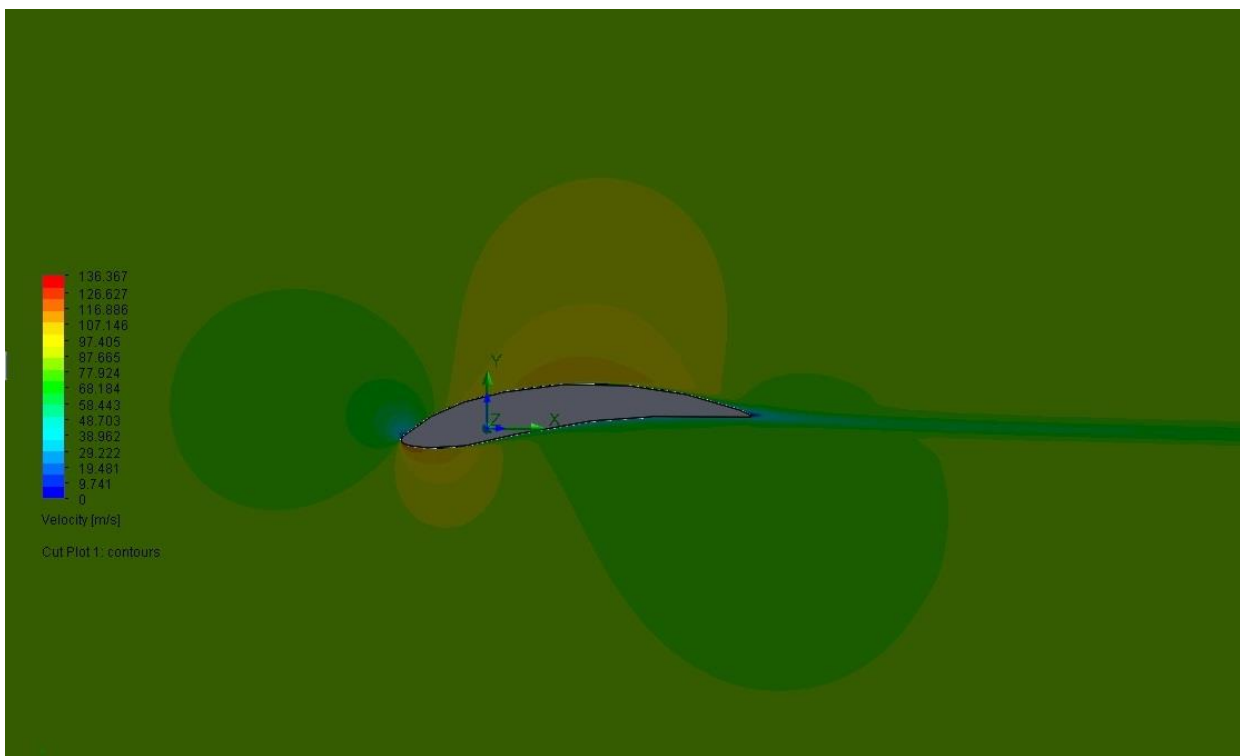


Διάγραμμα 5 : Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, -6 μοίρες

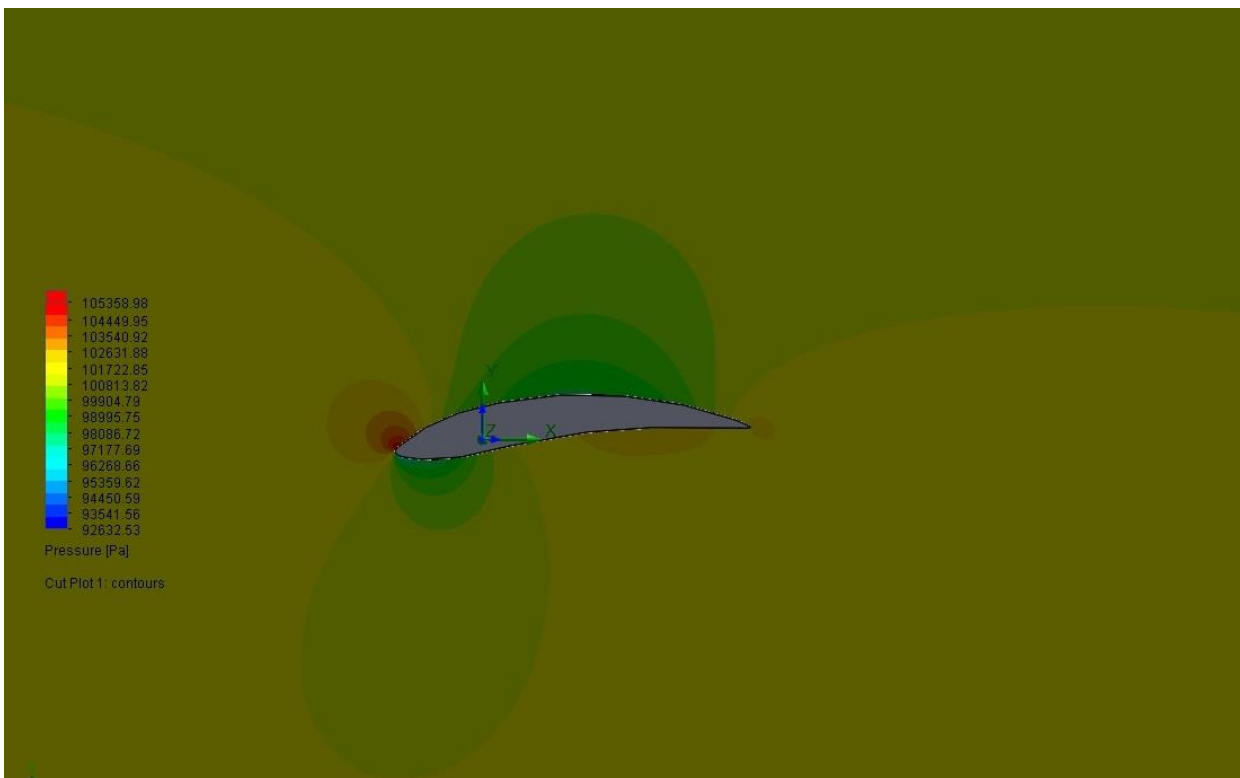


Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, -6 μοίρες

Γωνία προσβολής: -4 μοίρες

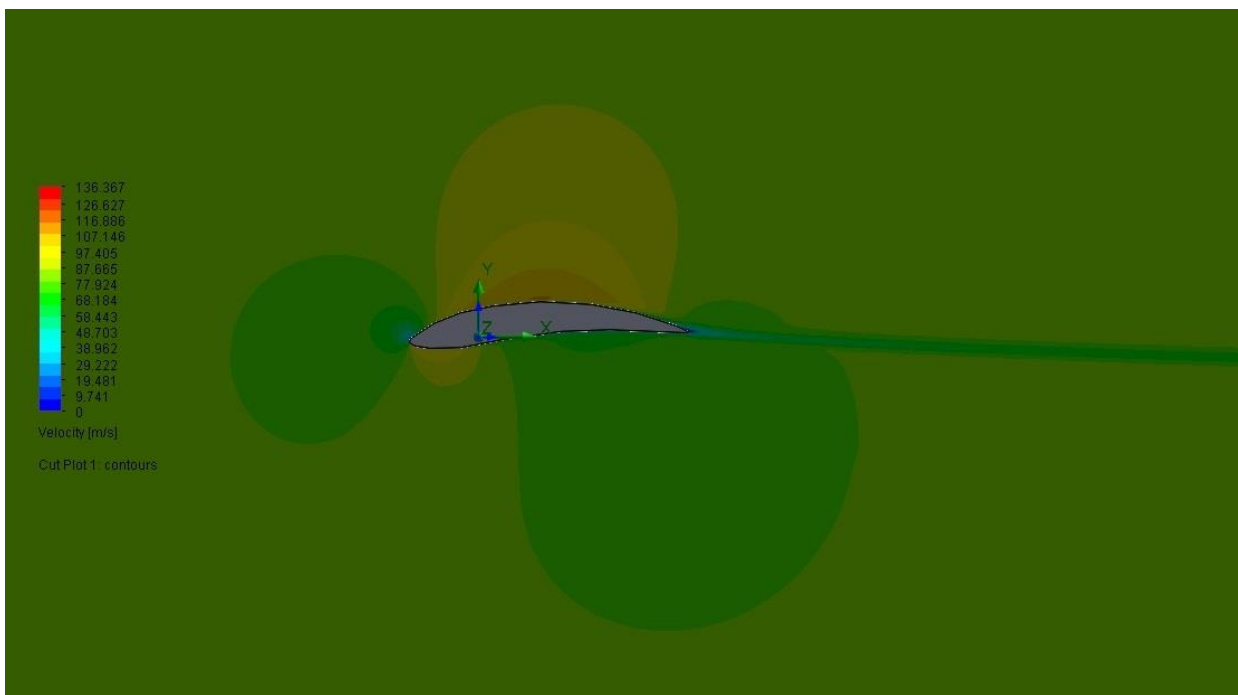


Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, -4 μοίρες

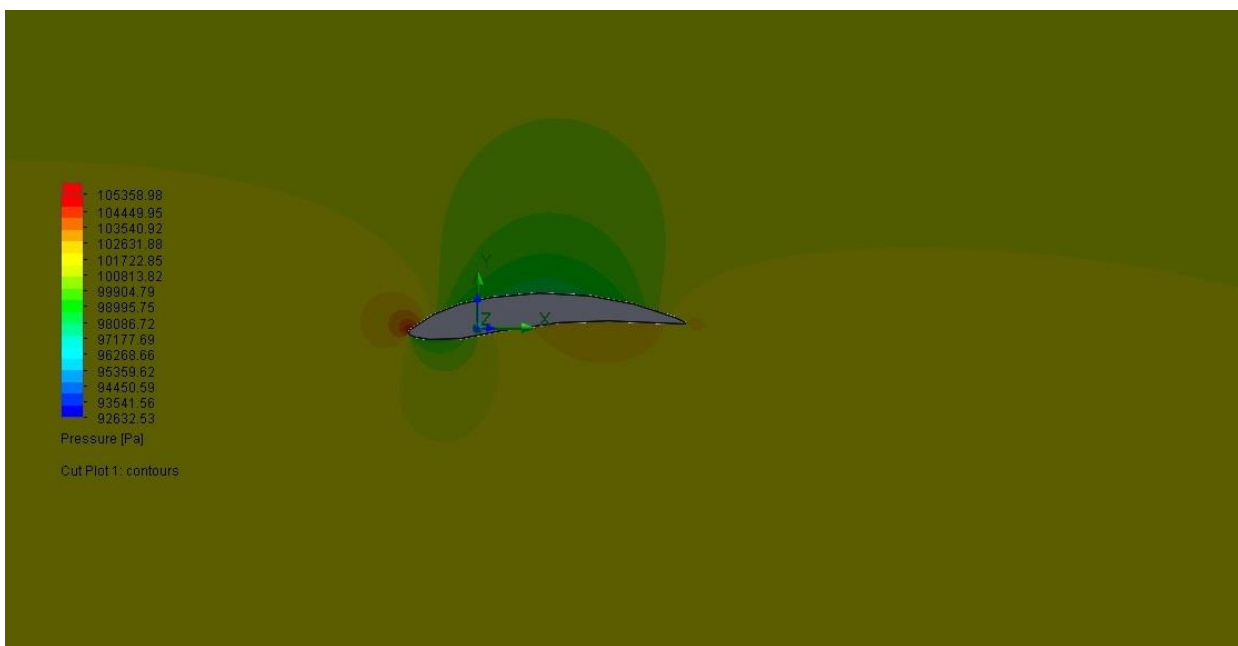


Διάγραμμα 8: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, -4 μοίρες

Γωνία προσβολής: -2 μοίρες

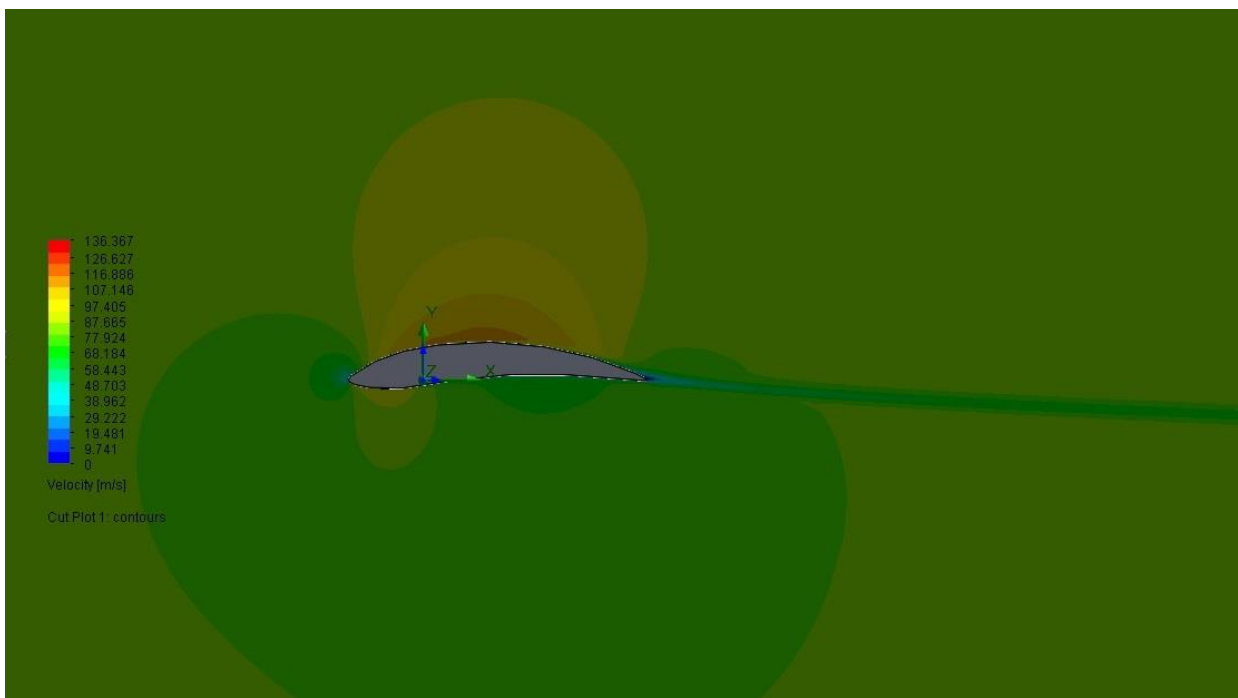


Διάγραμμα 9 : Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, -2 μοίρες



Διάγραμμα 10: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, -2 μοίρες

Γωνία προσβολής: 0 μοίρες

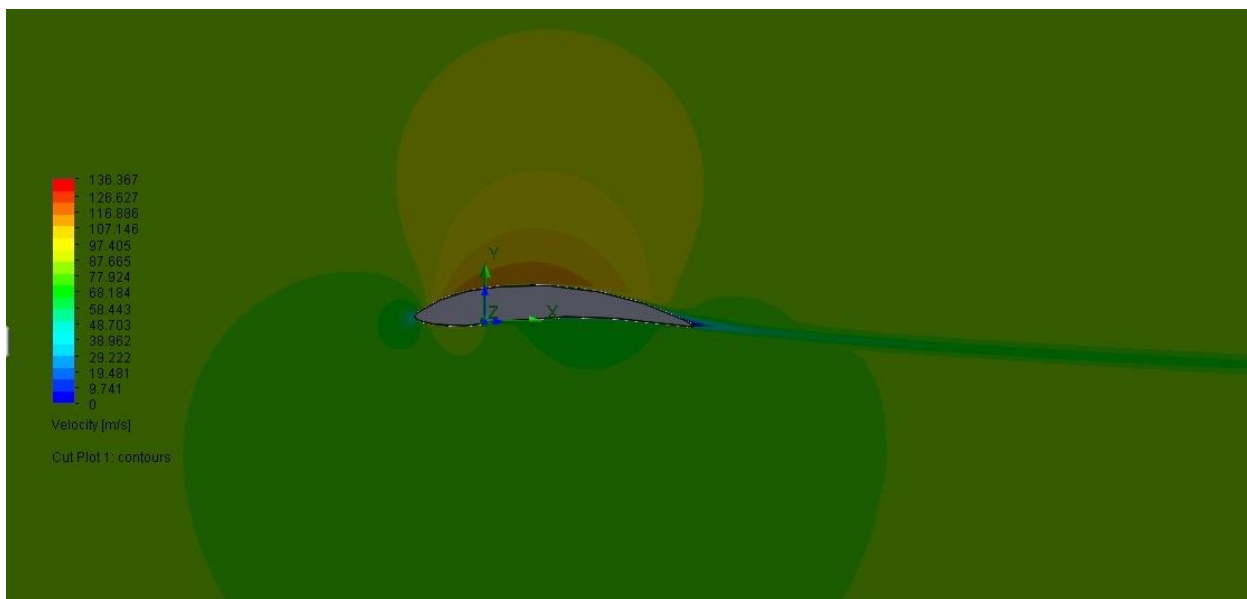


Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 0 μοίρες

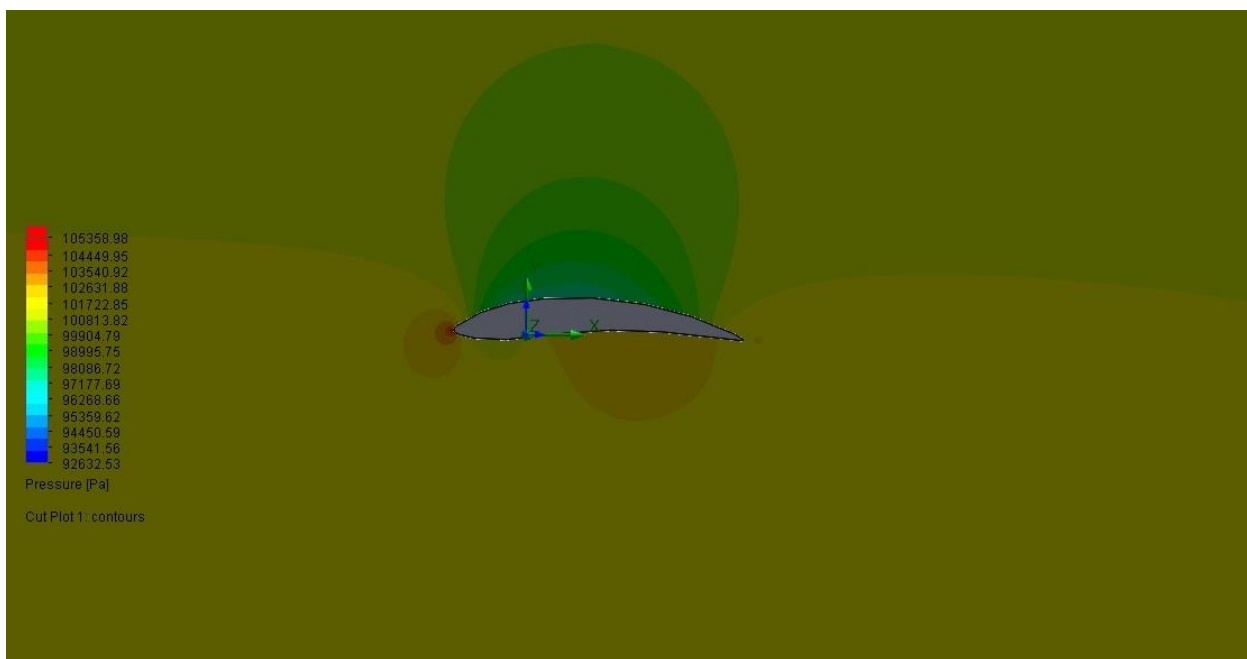


Διάγραμμα 12: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 0 μοίρες

Γωνία προσβολής: 2 μοίρες

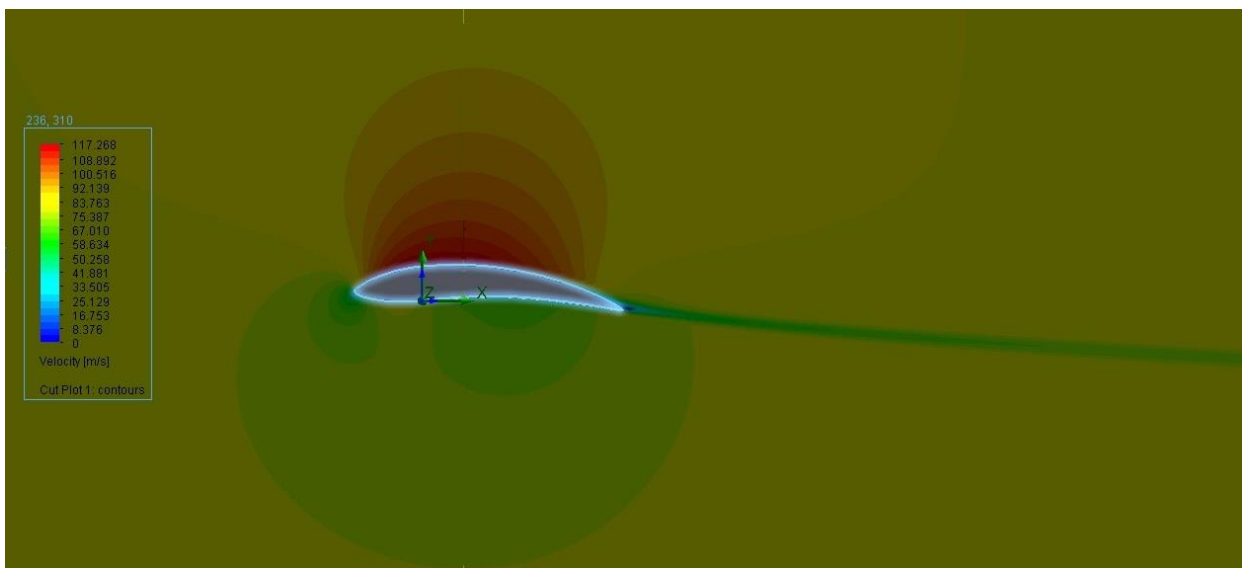


Διάγραμμα 13: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 2 μοίρες

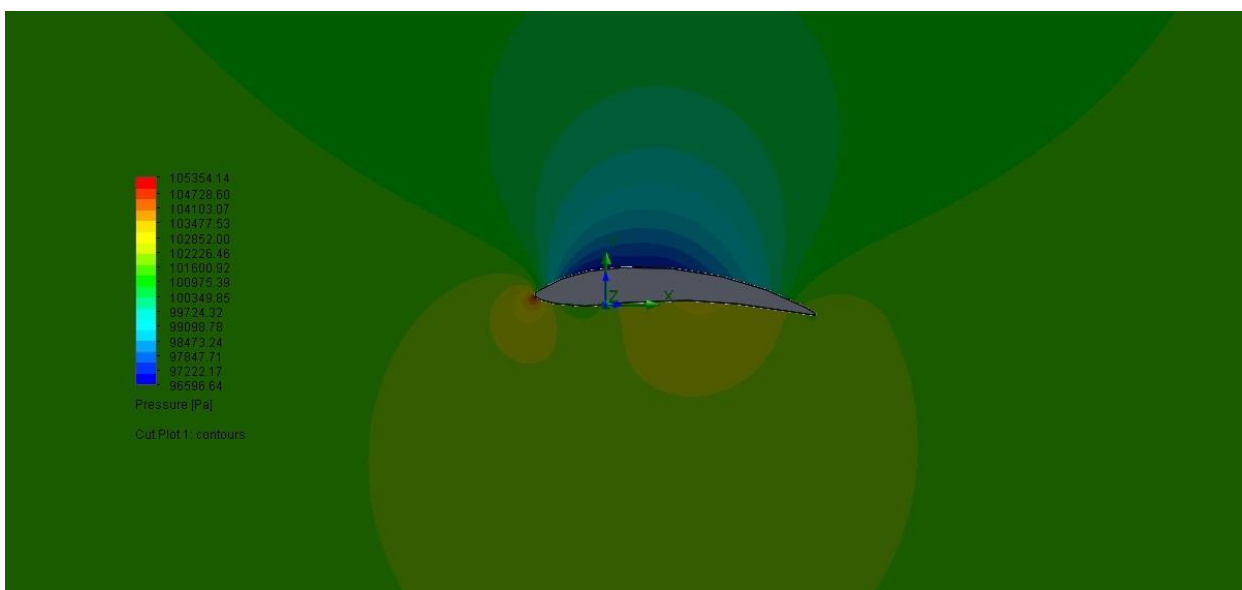


Διάγραμμα 14: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 2 μοίρες

Γωνία προσβολής: 4 μοίρες

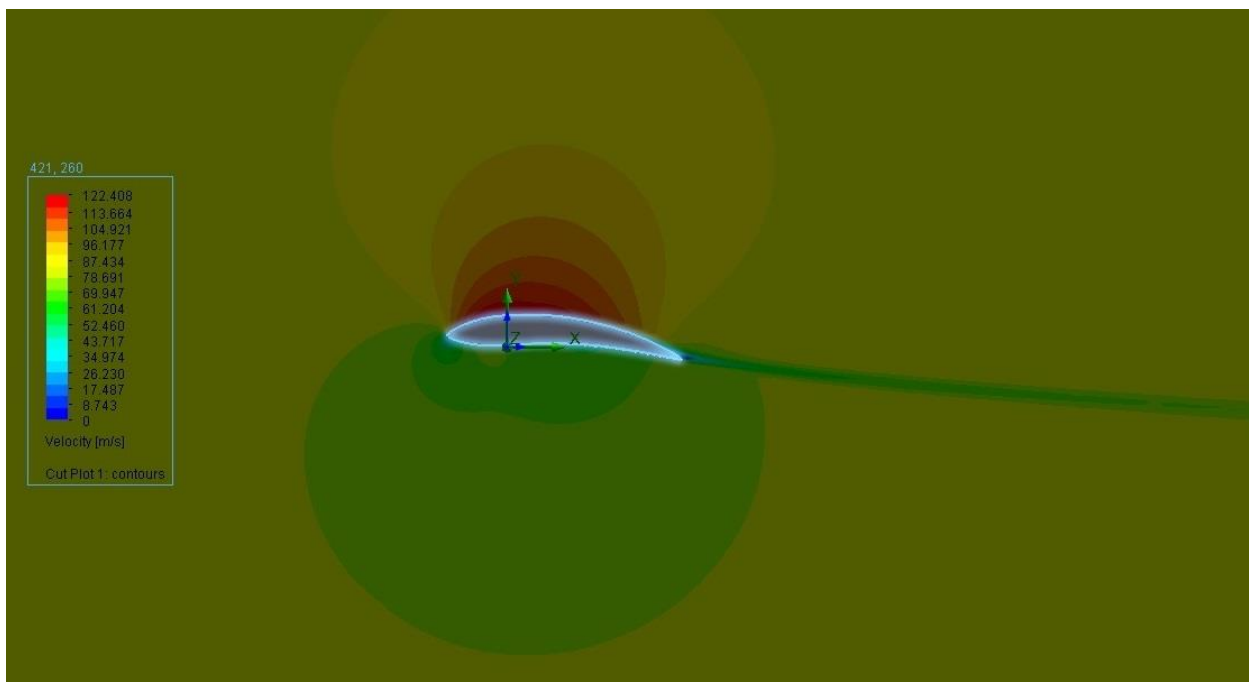


Διάγραμμα 15: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 4 μοίρες

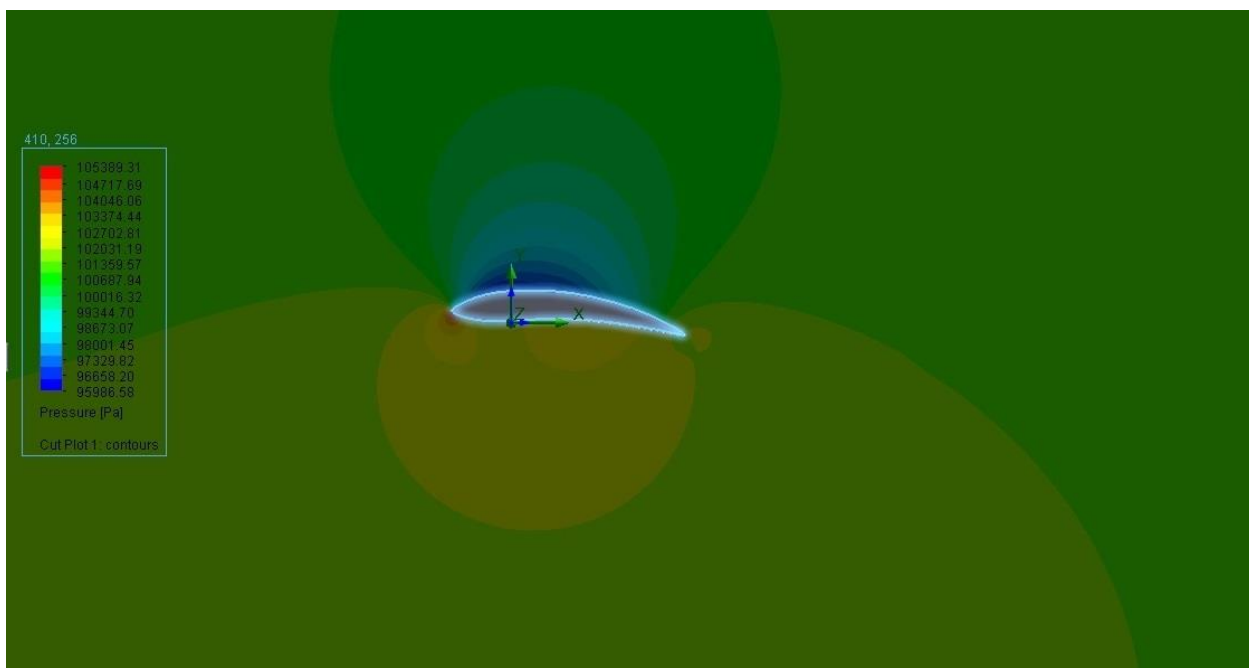


Διάγραμμα 16: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 4 μοίρες

Γωνία προσβολής: 6 μοίρες

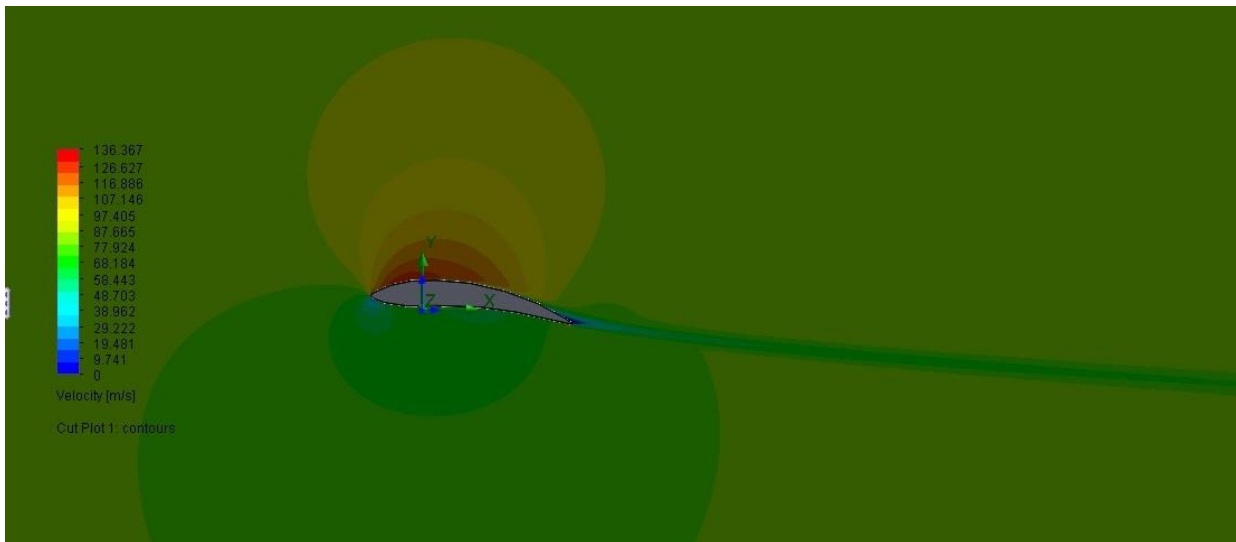


Διάγραμμα 17: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 6 μοίρες

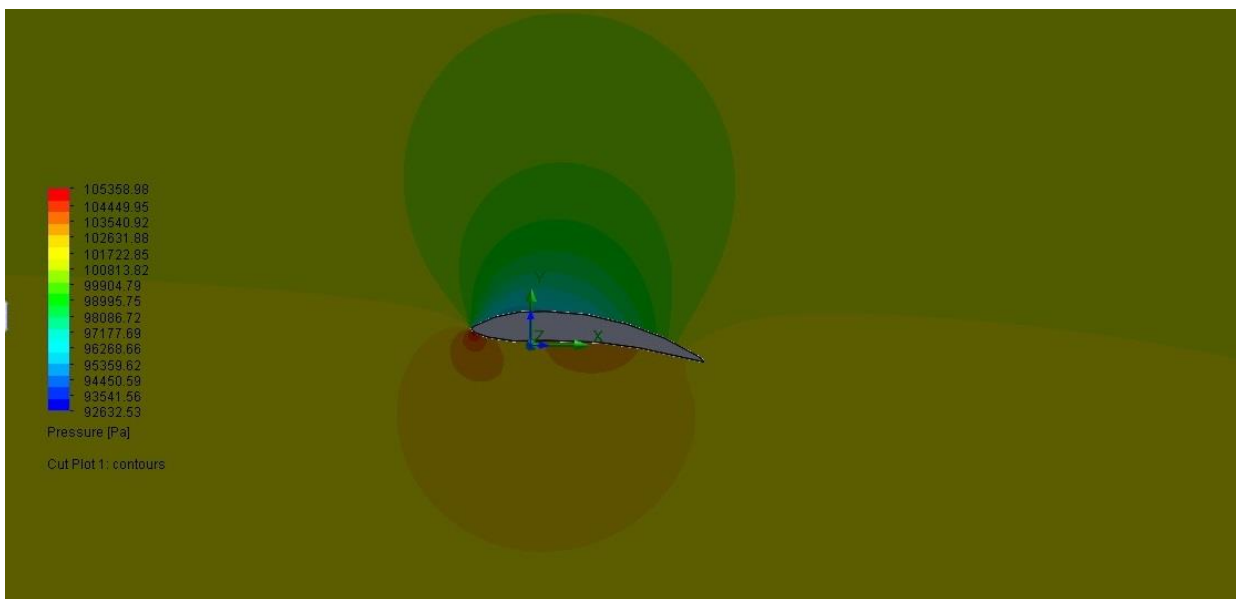


Διάγραμμα 18: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 6 μοίρες

Γωνία προσβολής: 8 μοίρες

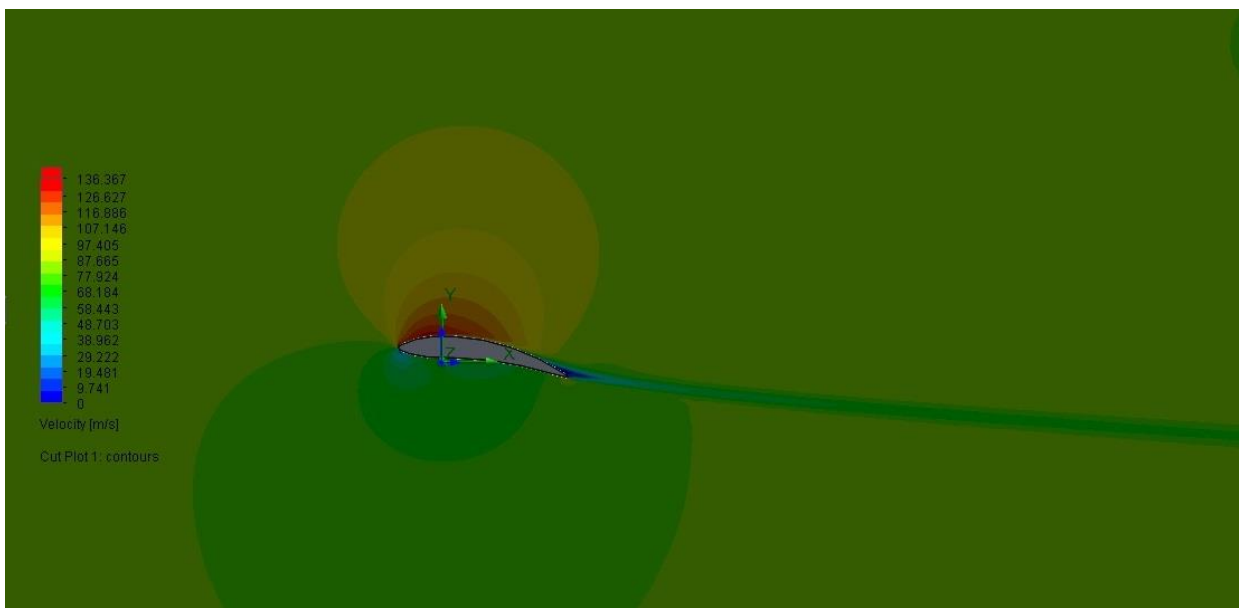


Διάγραμμα 19: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 8 μοίρες



Διάγραμμα 20: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 8 μοίρες

Γωνία προσβολής: 10 μοίρες

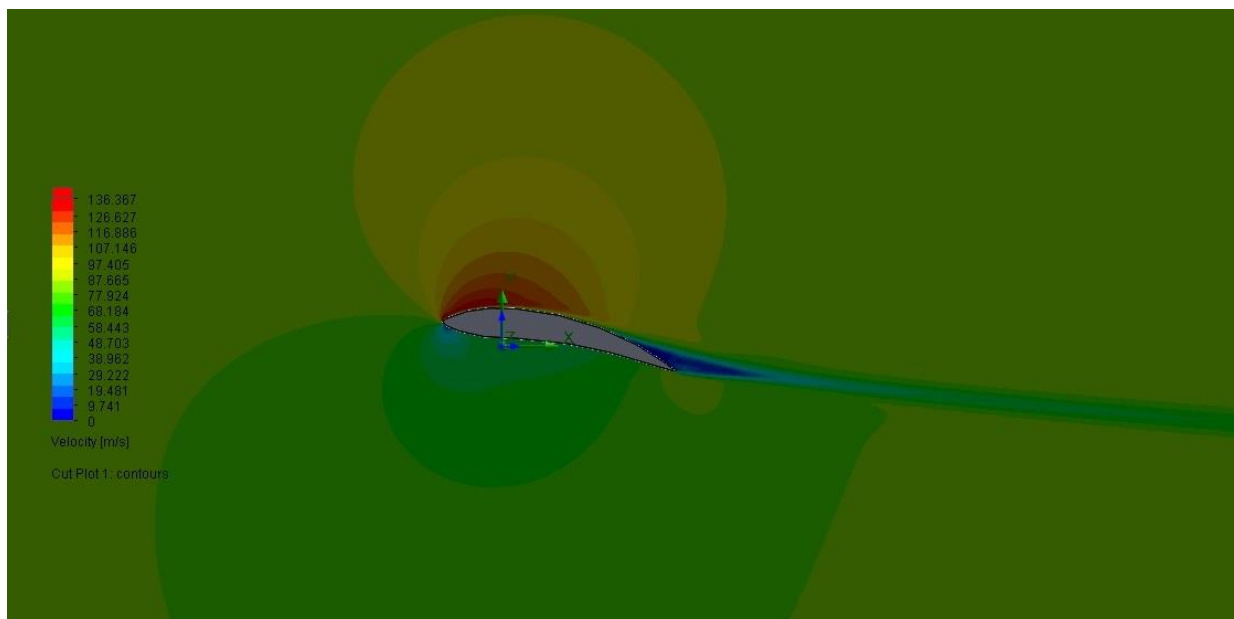


Διάγραμμα 21: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 10 μοίρες

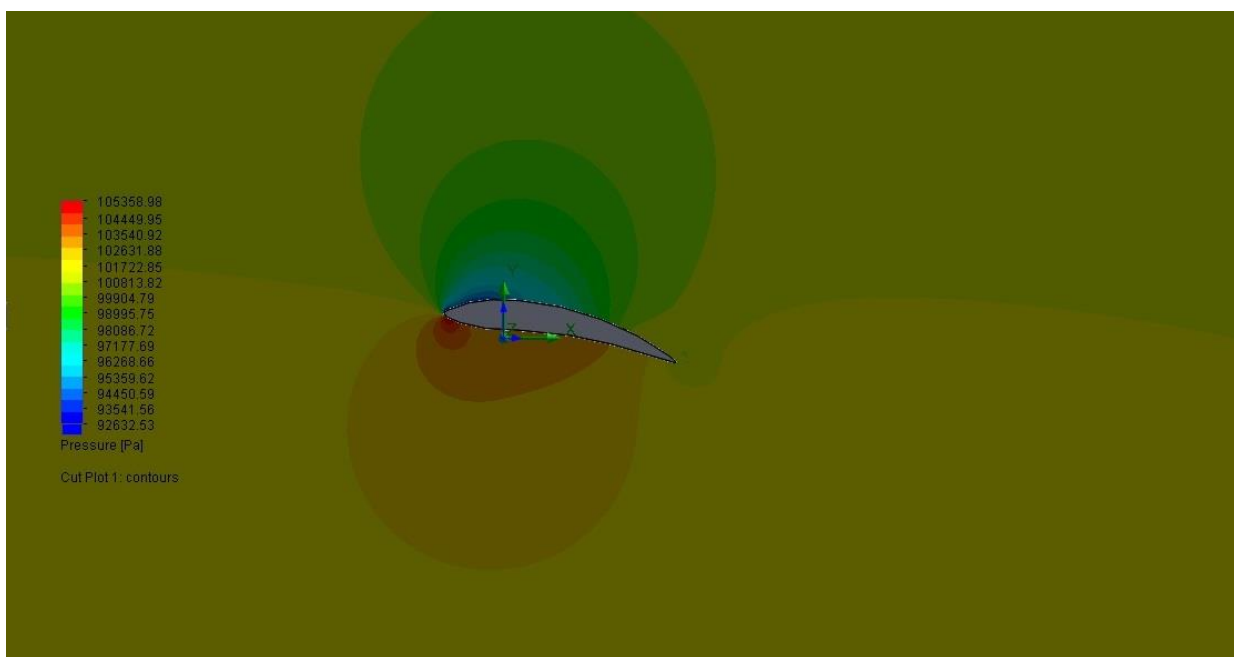


Διάγραμμα 22: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 10 μοίρες

Γωνία προσβολής: 12 μοίρες

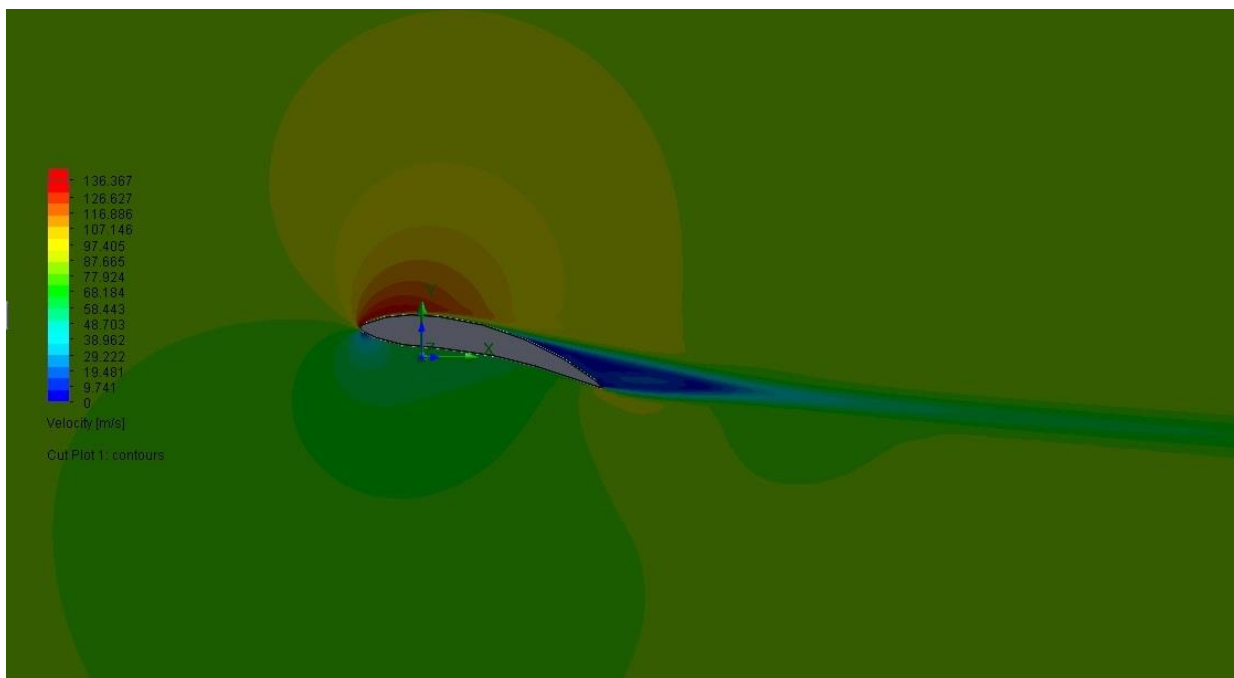


Διάγραμμα 23: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 12 μοίρες

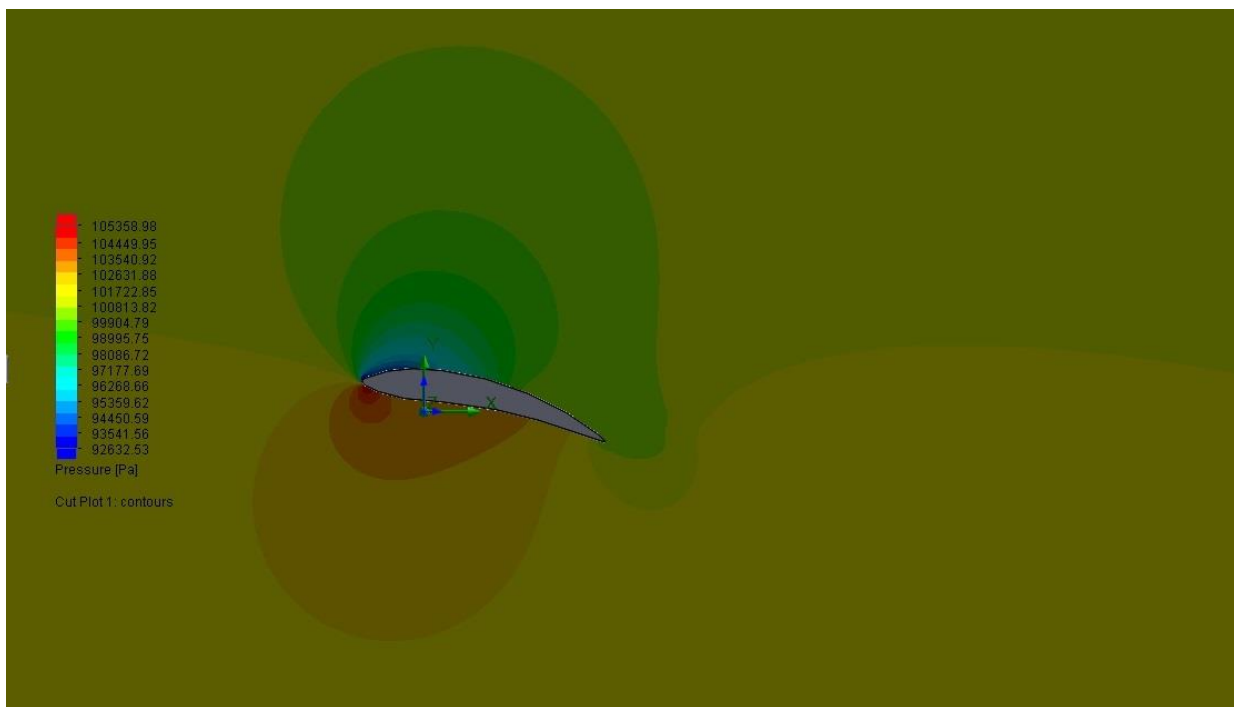


Διάγραμμα 24: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 12 μοίρες

Γωνία προσβολής: 14 μοίρες

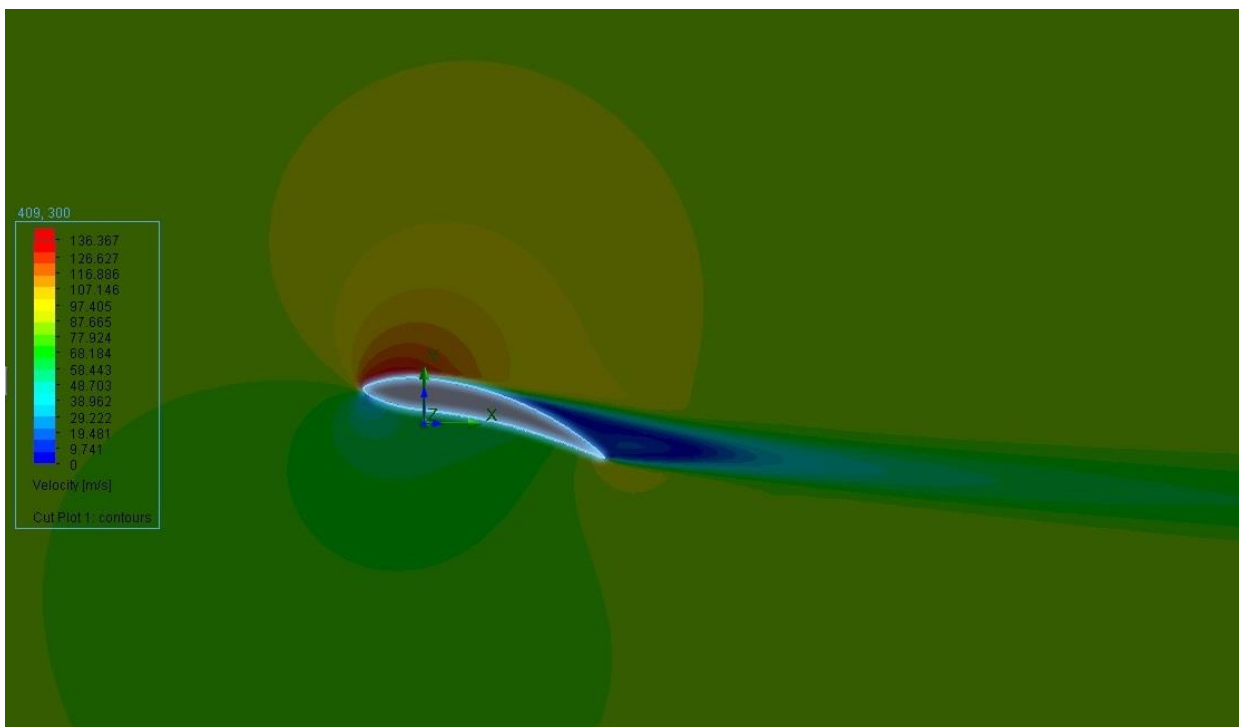


Διάγραμμα 25: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 14 μοίρες

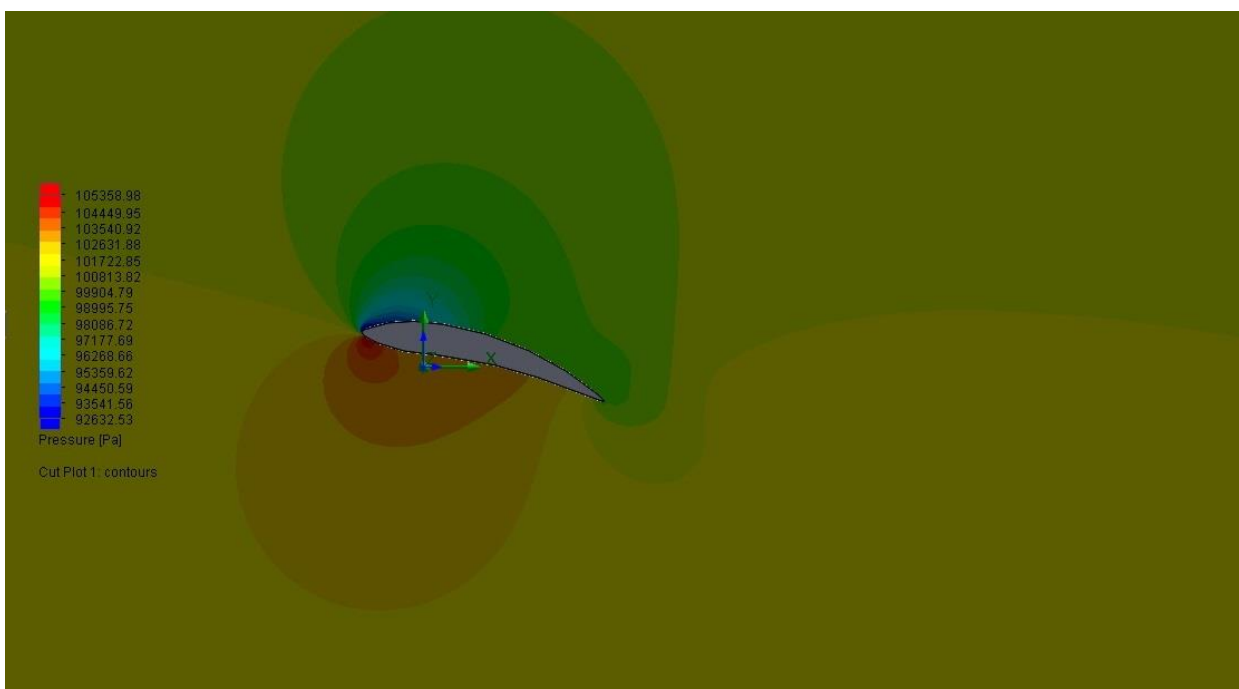


Διάγραμμα 26: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 14 μοίρες

Γωνία προσβολής: 16 μοίρες

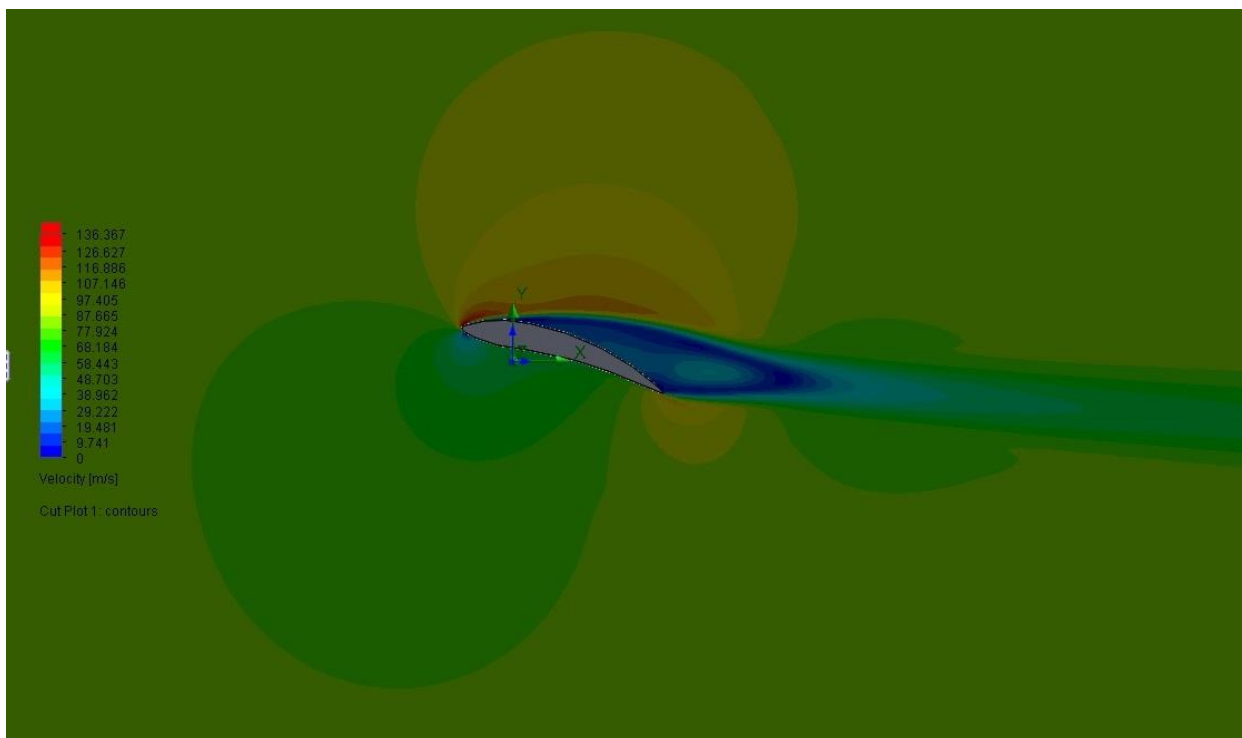


Διάγραμμα 27: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 16 μοίρες

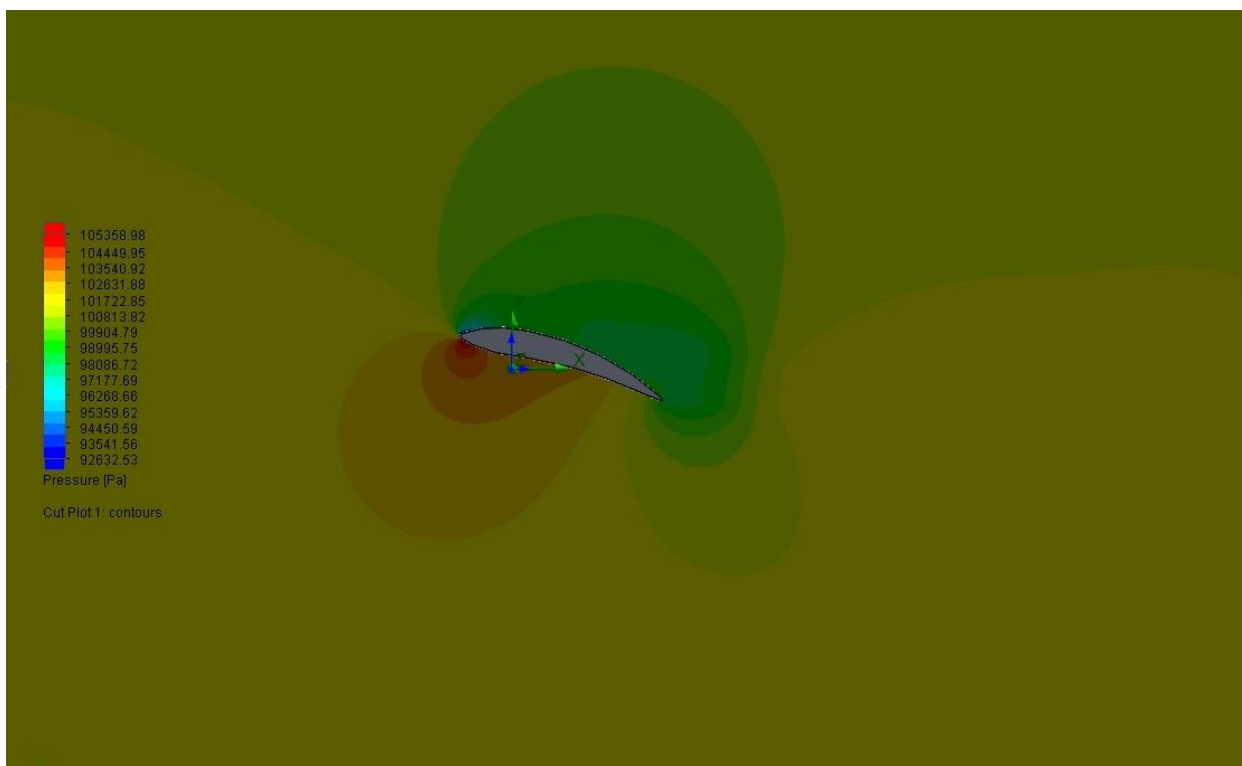


Διάγραμμα 28: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 16 μοίρες

Γωνία προσβολής: 18 μοίρες

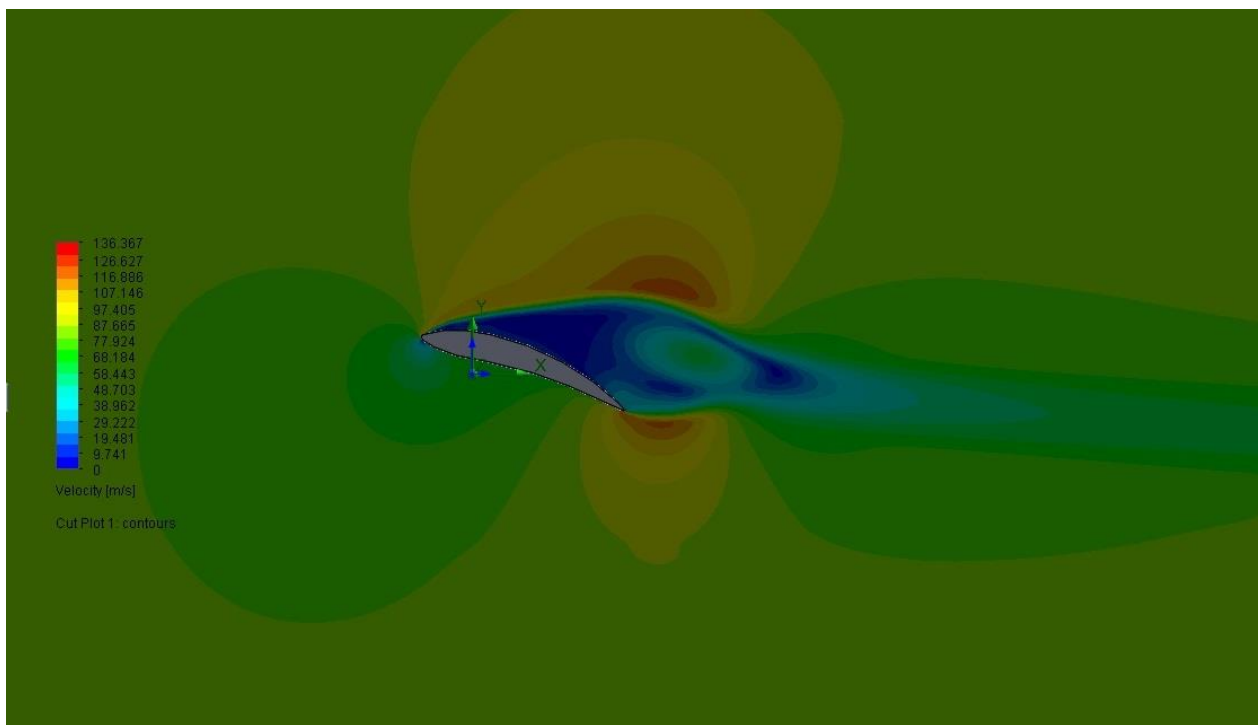


Διάγραμμα 29: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 18 μοίρες

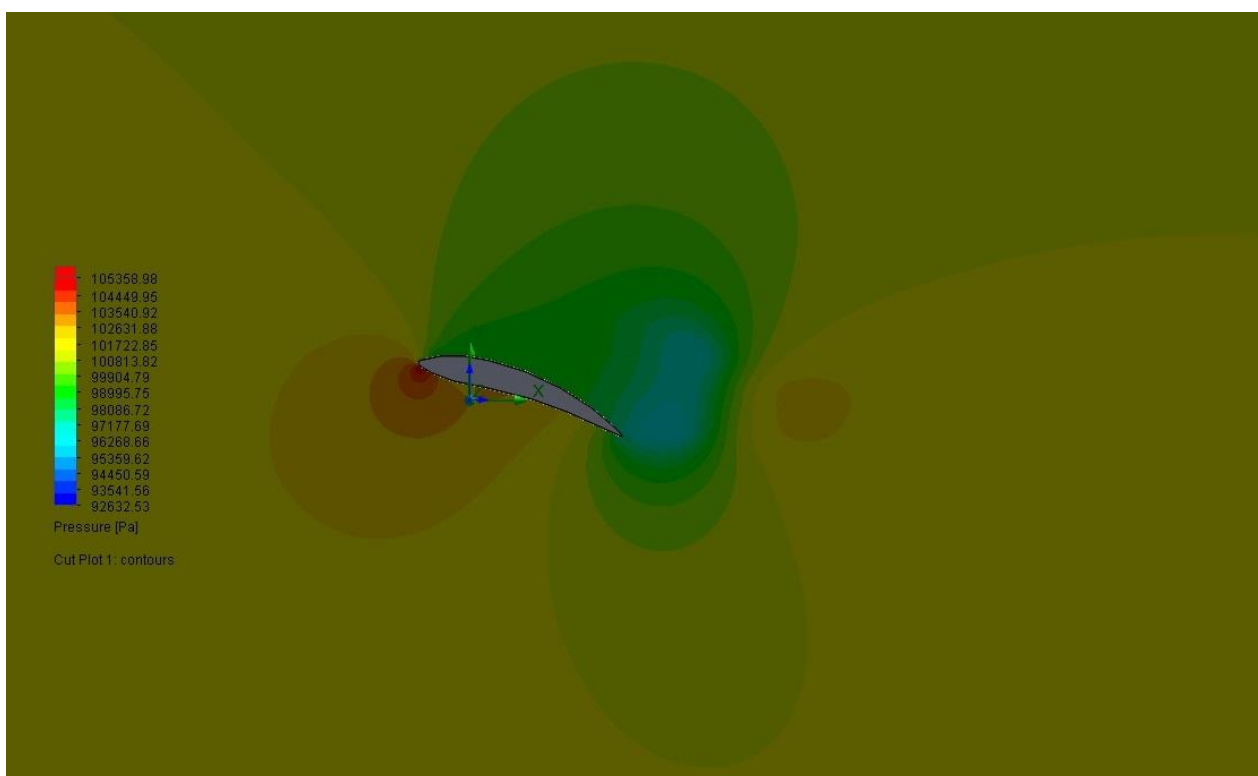


Διάγραμμα 30: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 18 μοίρες

Γωνία προσβολής: 20 μοίρες

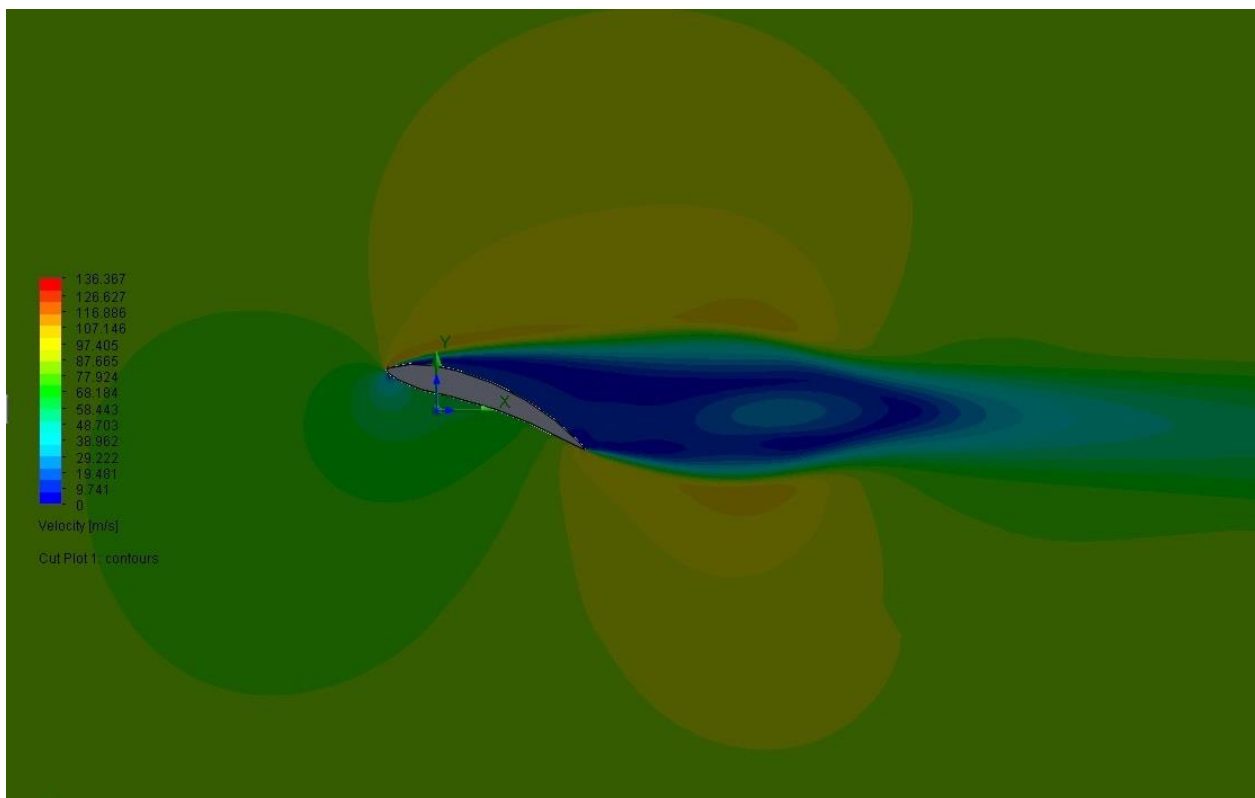


Διάγραμμα 31: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 20 μοίρες

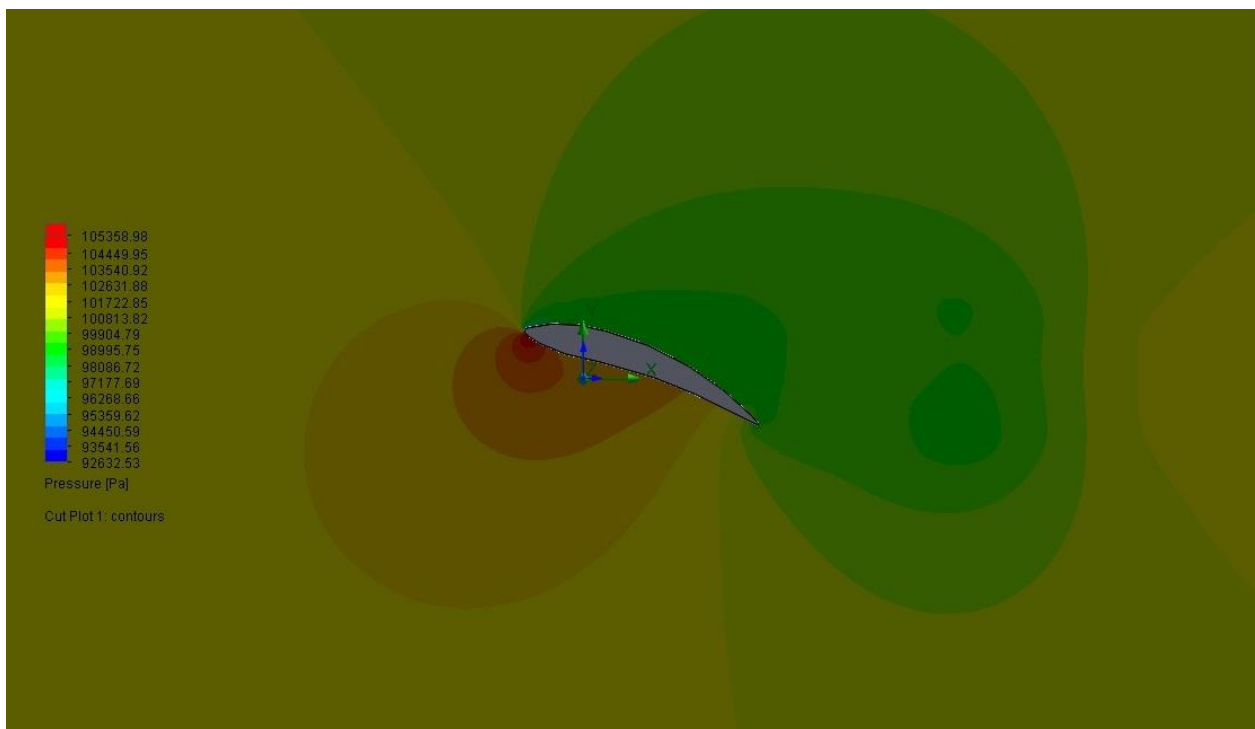


Διάγραμμα 32: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 20 μοίρες

Γωνία προσβολής: 22 μοίρες

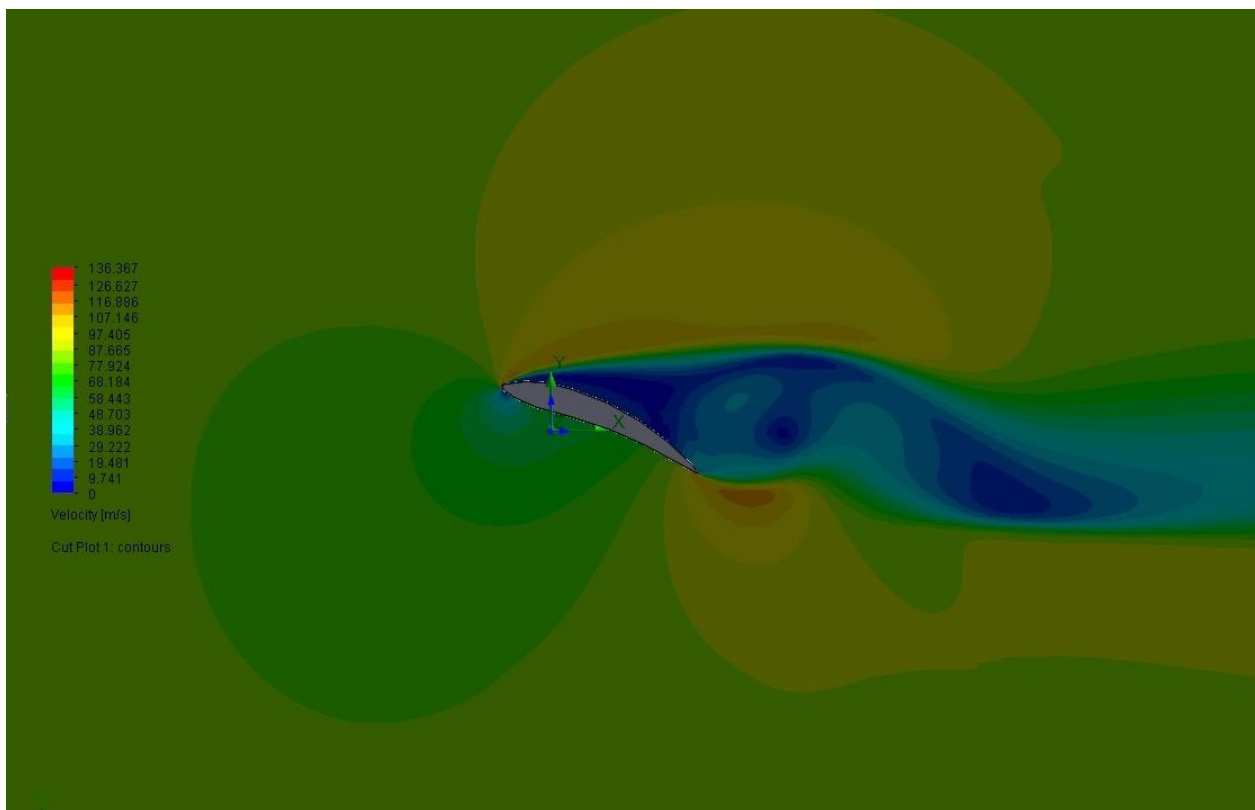


Διάγραμμα 33: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 22 μοίρες

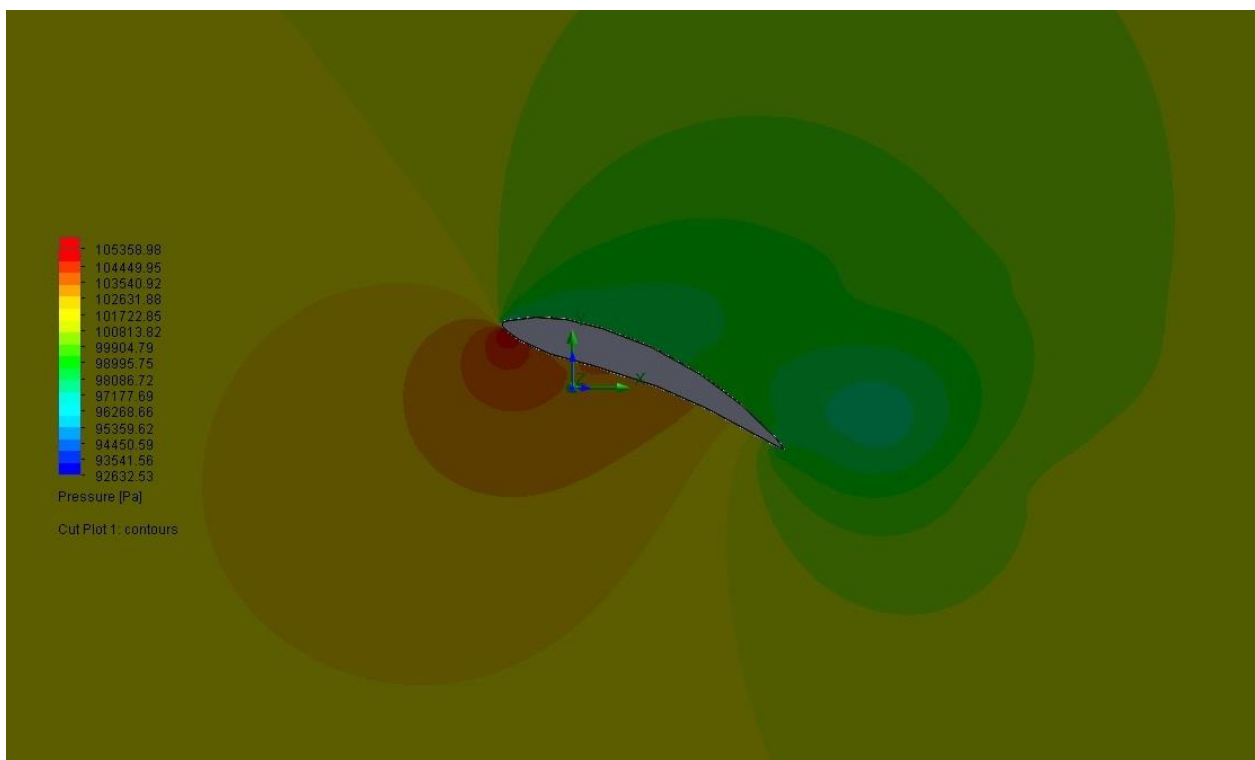


Διάγραμμα 34: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 22 μοίρες

Γωνία προσβολής: 24 μοίρες

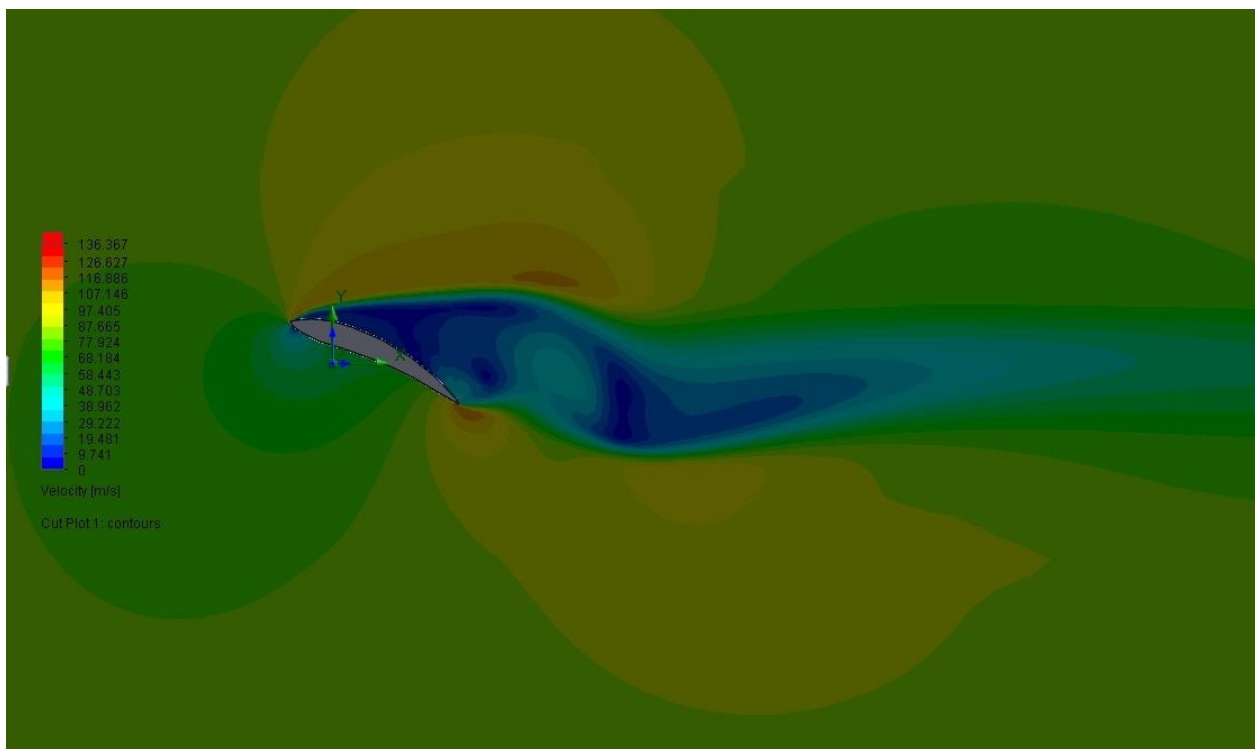


Διάγραμμα 35: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 24 μοίρες

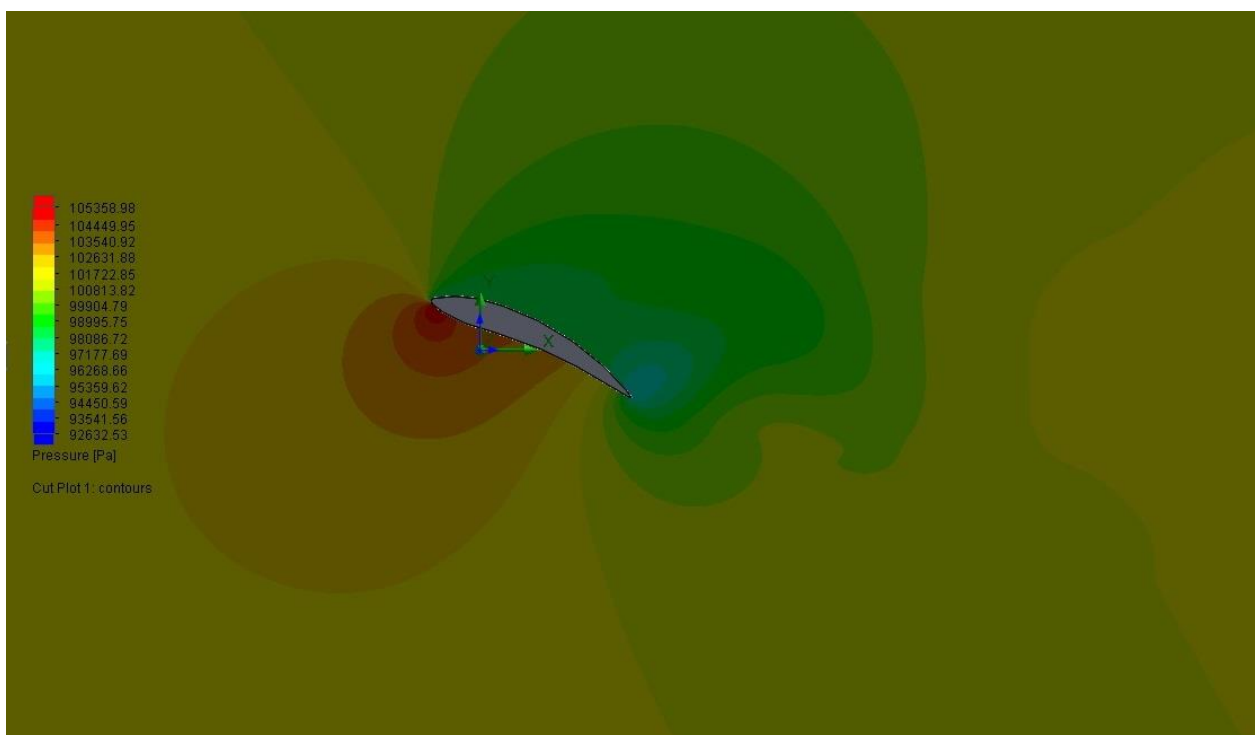


Διάγραμμα 36: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 24 μοίρες

Γωνία προσβολής: 26 μοίρες

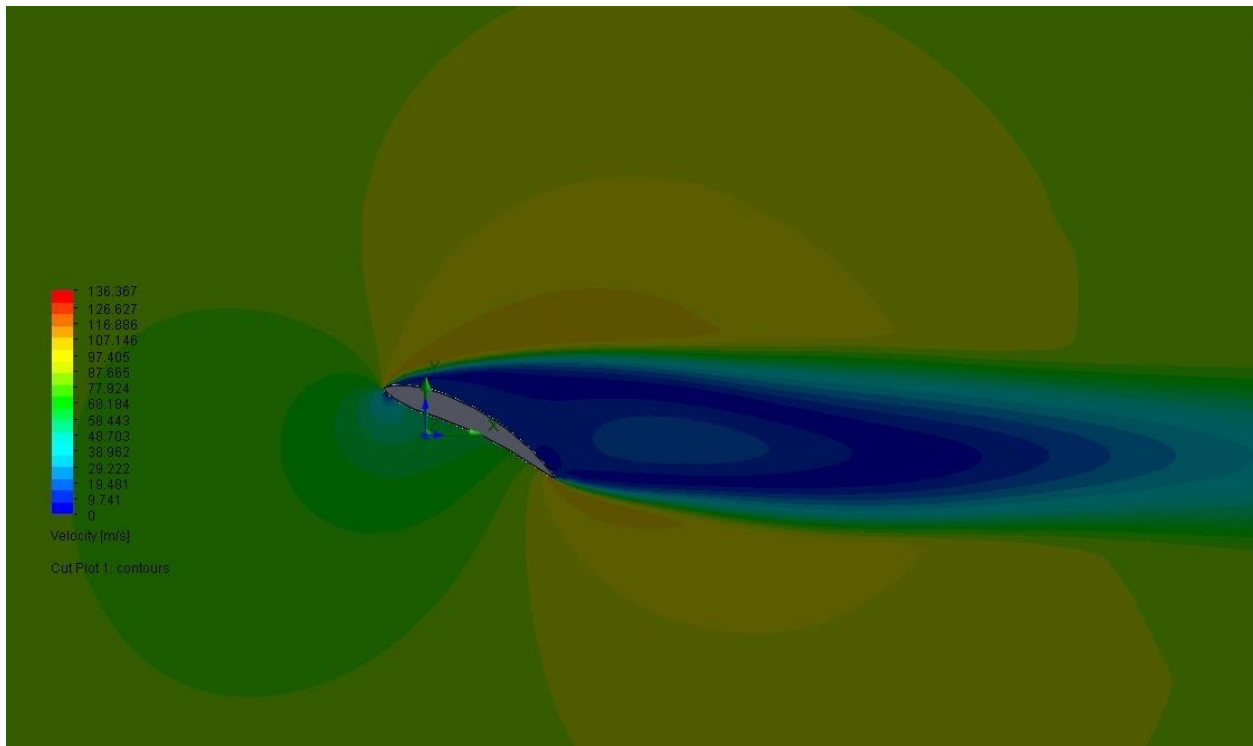


Διάγραμμα 37: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 26 μοίρες

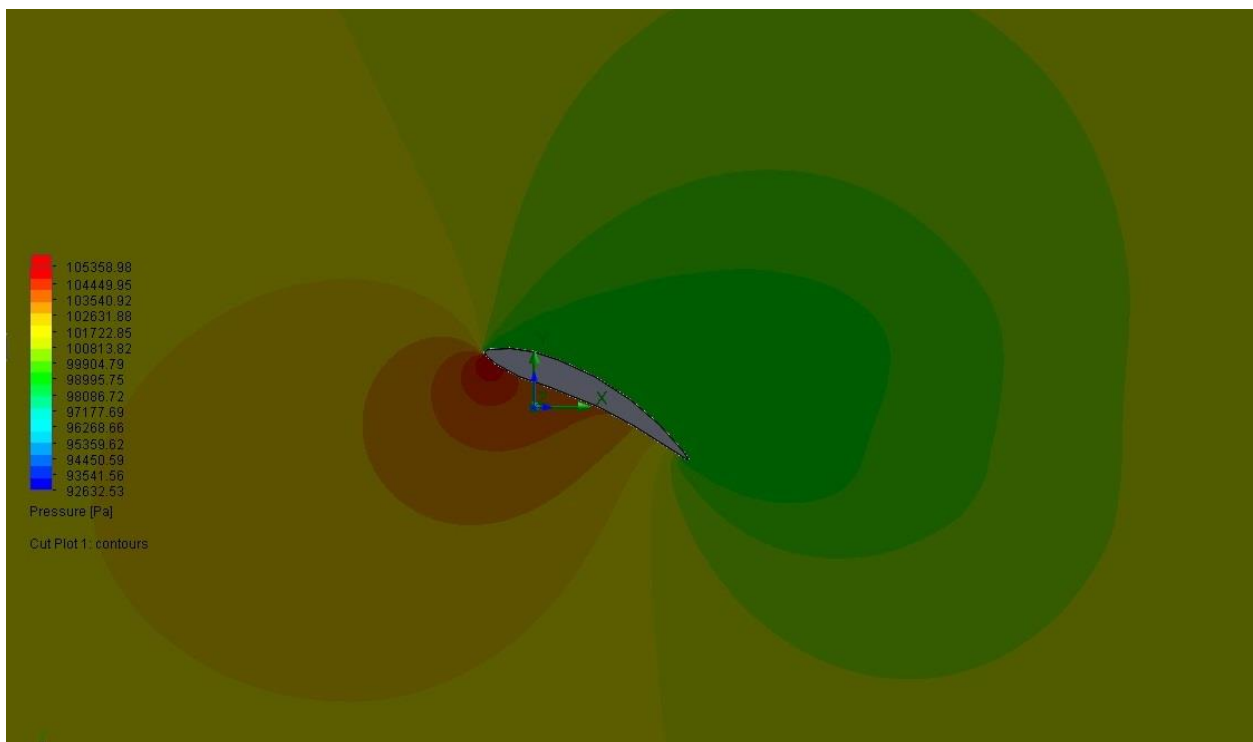


Διάγραμμα 38: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 26 μοίρες

Γωνία προσβολής: 28 μοίρες

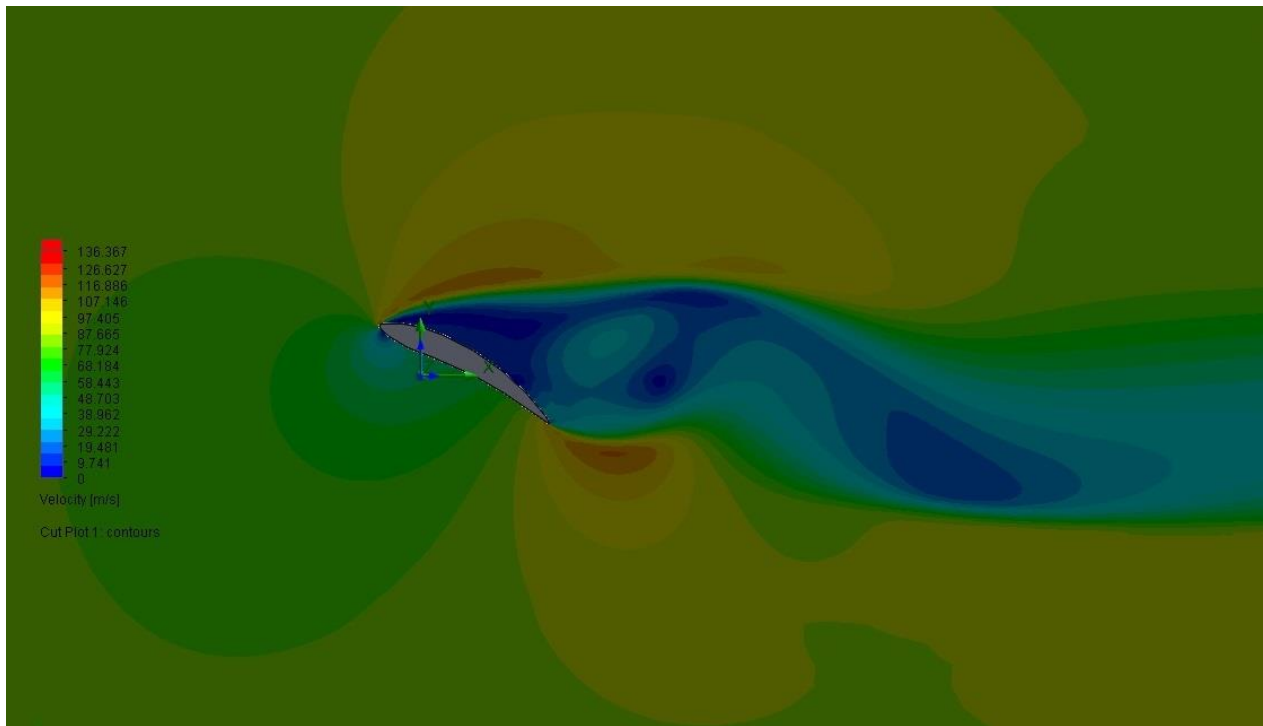


Διάγραμμα 39: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 28 μοίρες

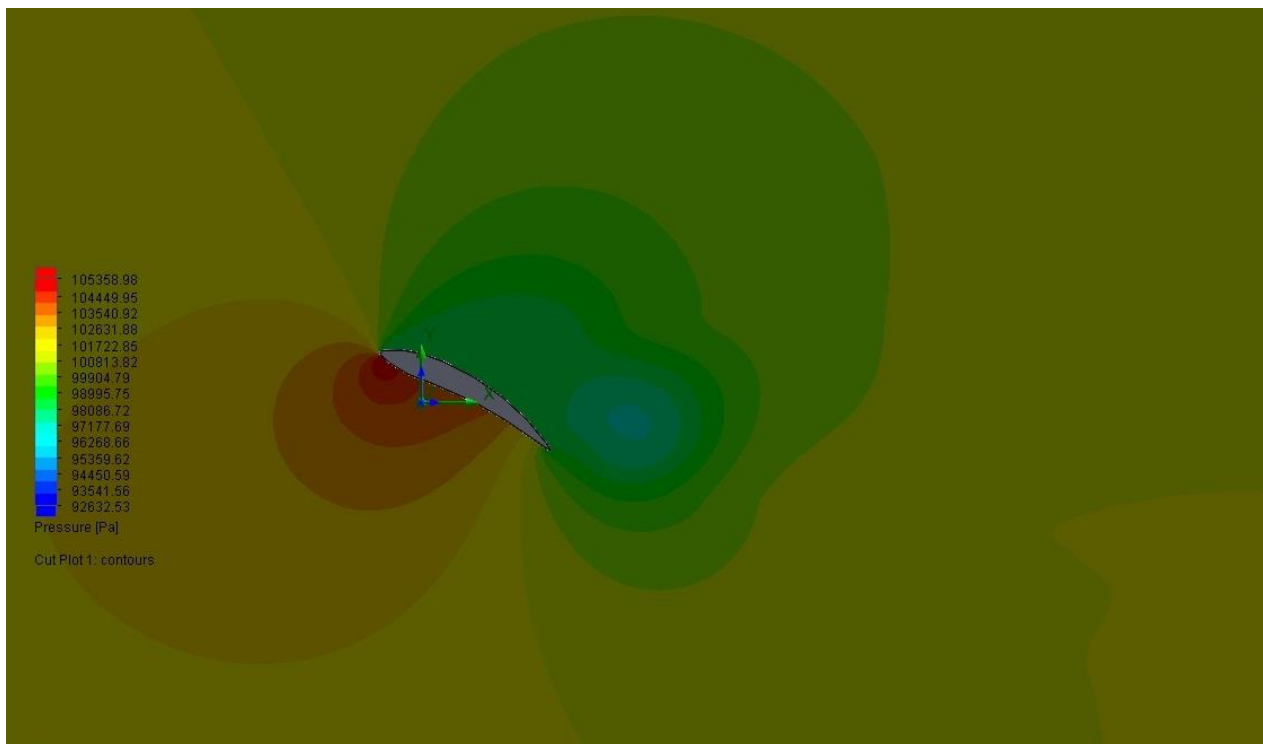


Διάγραμμα 40: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 28 μοίρες

Γωνία προσβολής: 30 μοίρες

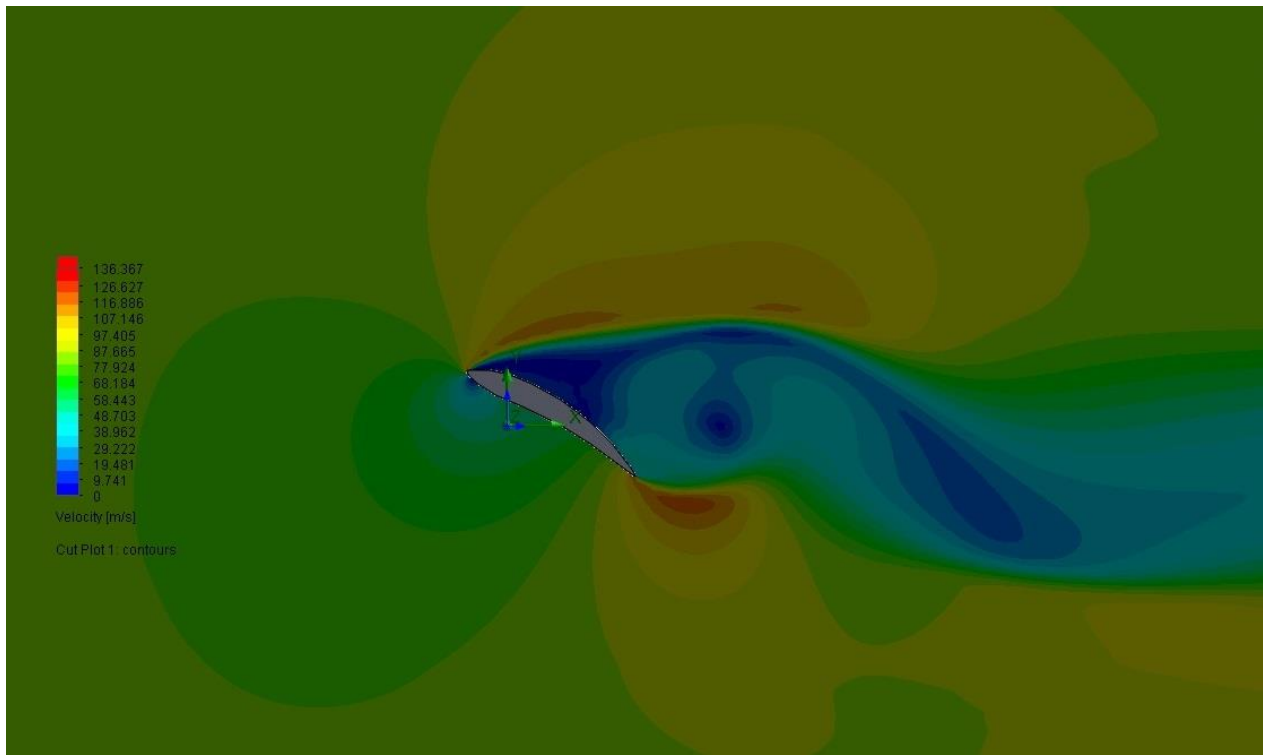


Διάγραμμα 41: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 30 μοίρες

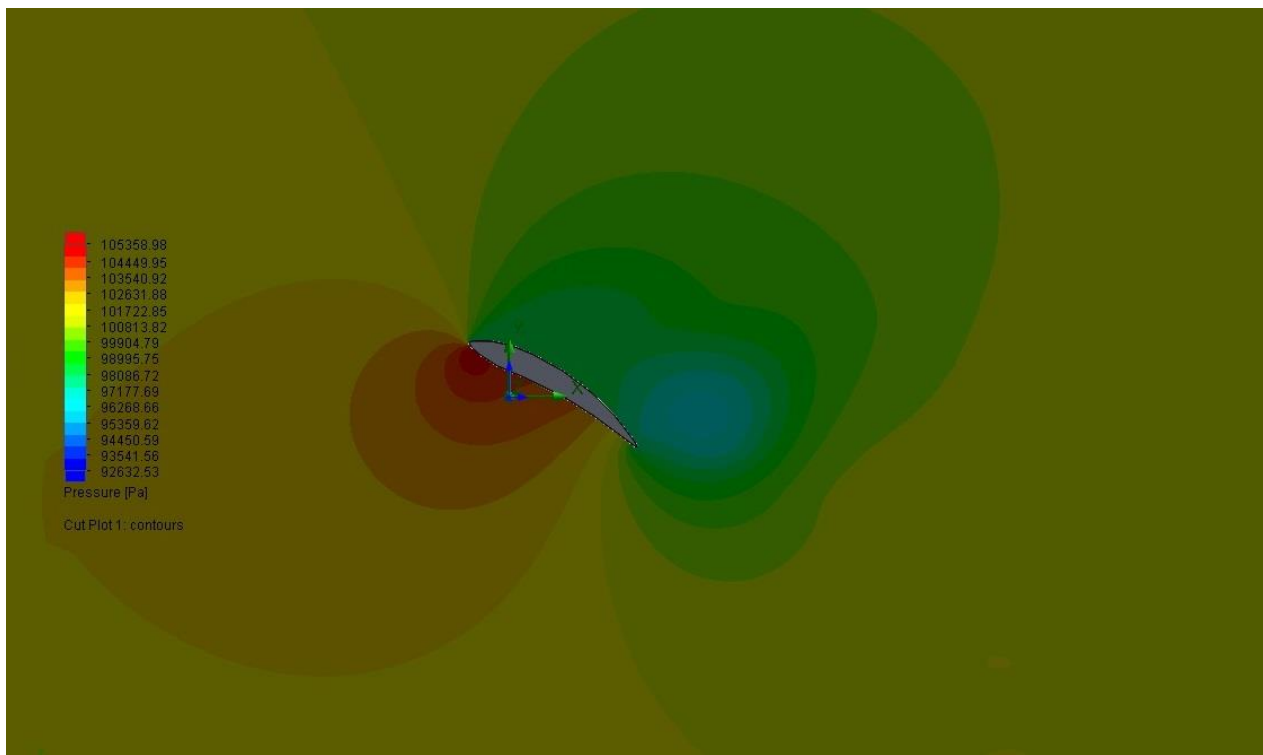


Διάγραμμα 42: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 30 μοίρες

Γωνία προσβολής: 32 μοίρες

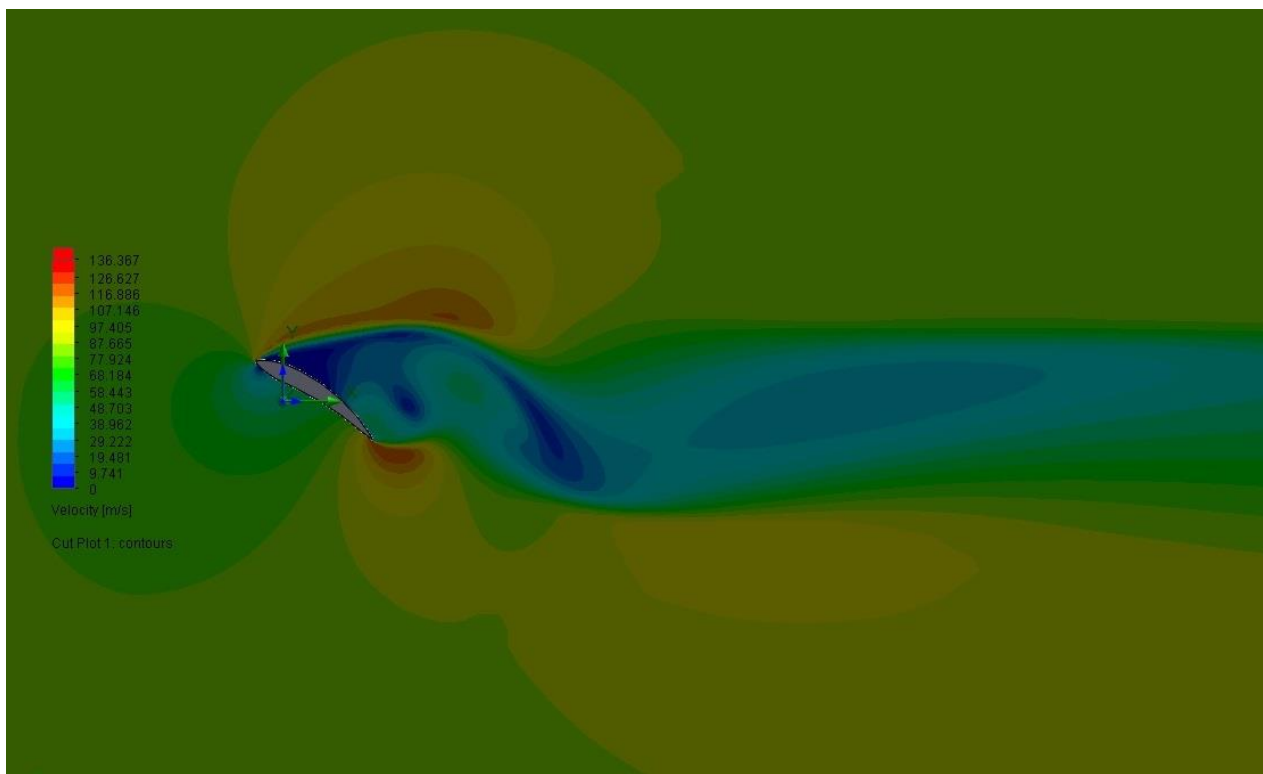


Διάγραμμα 43: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 32 μοίρες

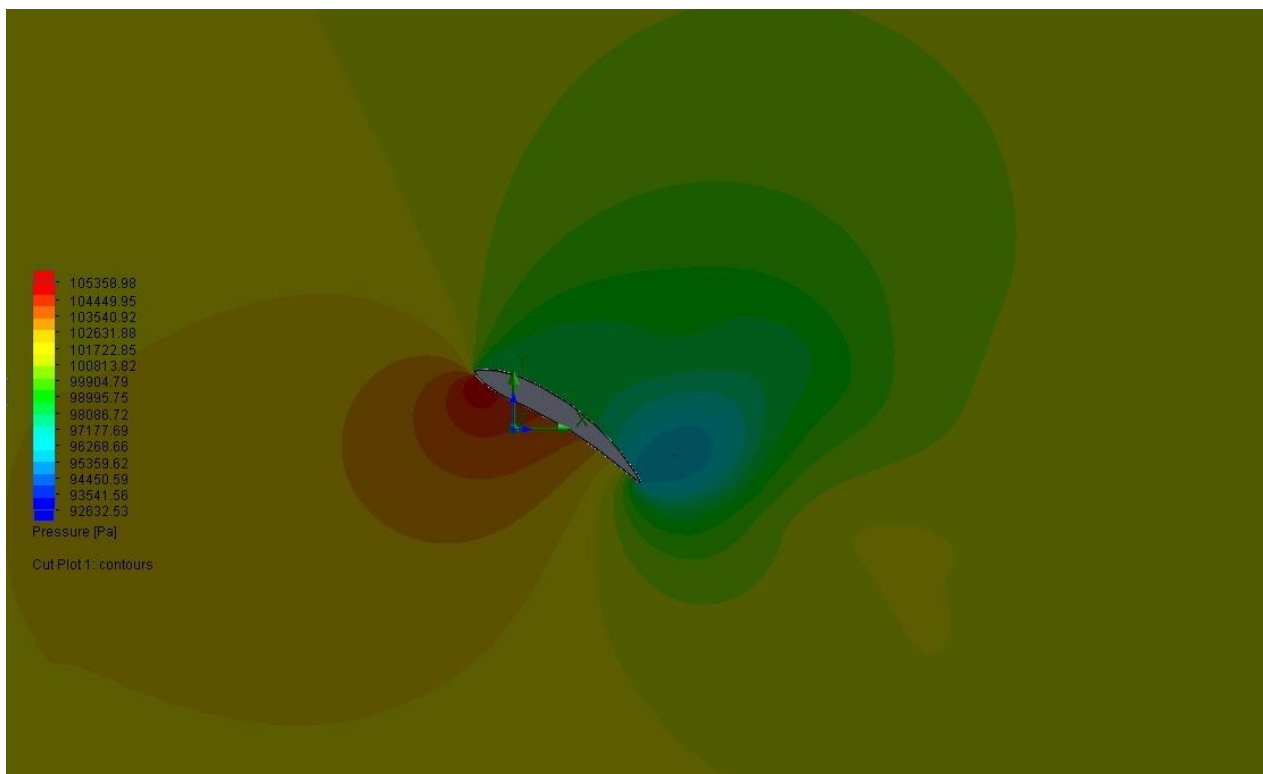


Διάγραμμα 44: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 32 μοίρες

Γωνία προσβολής: 34 μοίρες

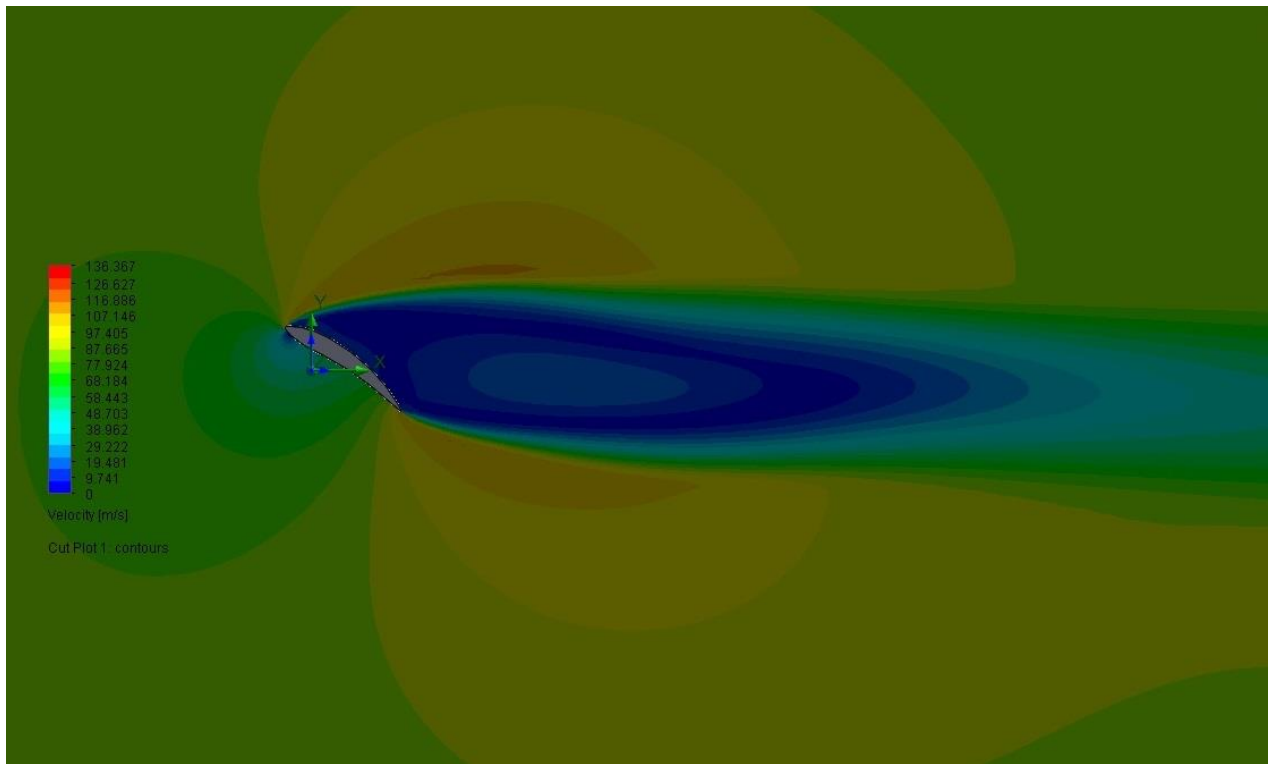


Διάγραμμα 45: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 34 μοίρες

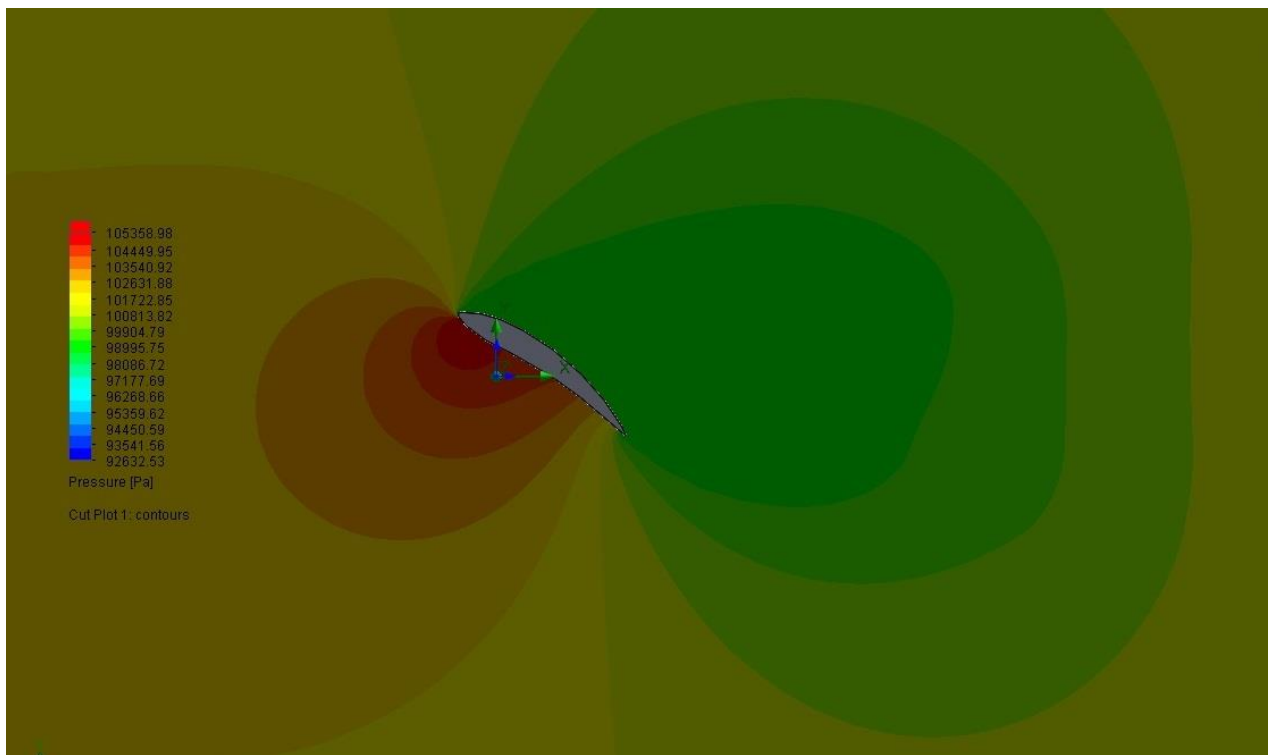


Διάγραμμα 46: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 34 μοίρες

Γωνία προσβολής: 36 μοίρες

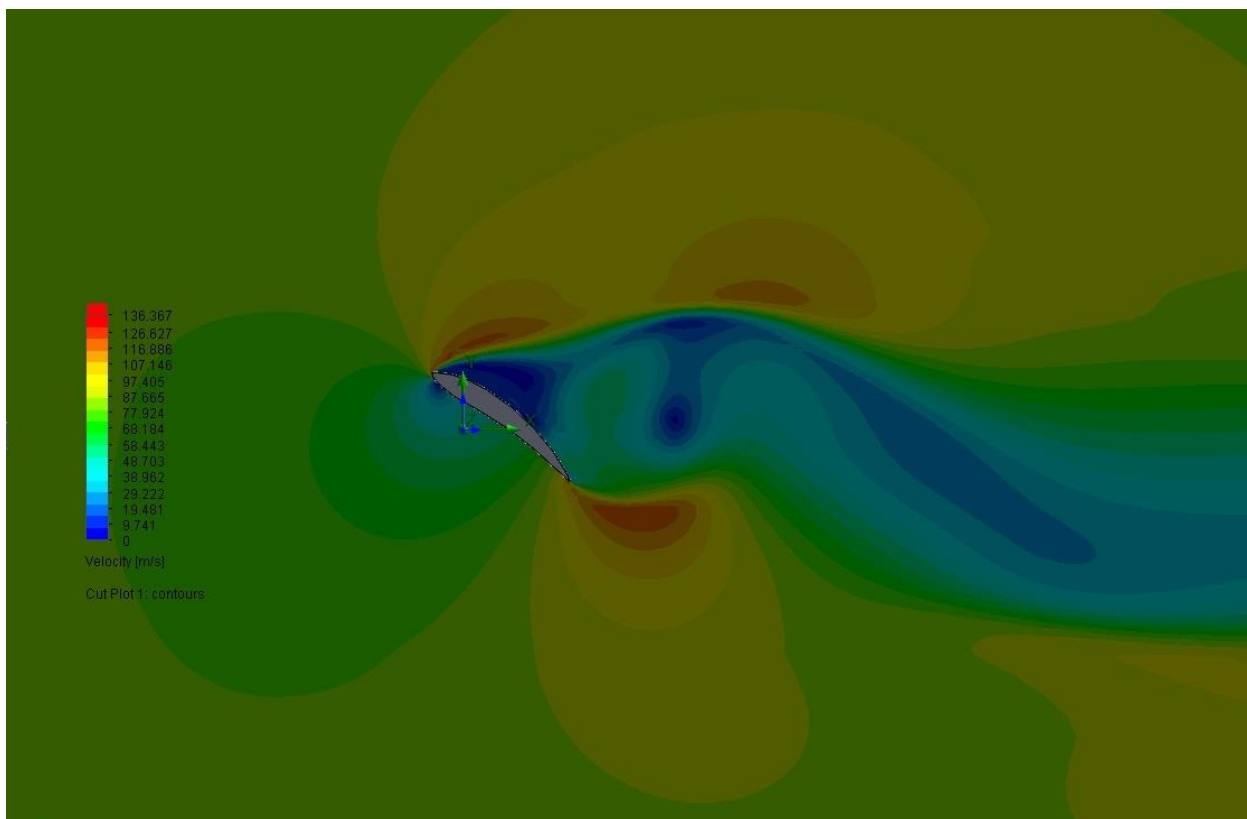


Διάγραμμα 47: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 36 μοίρες

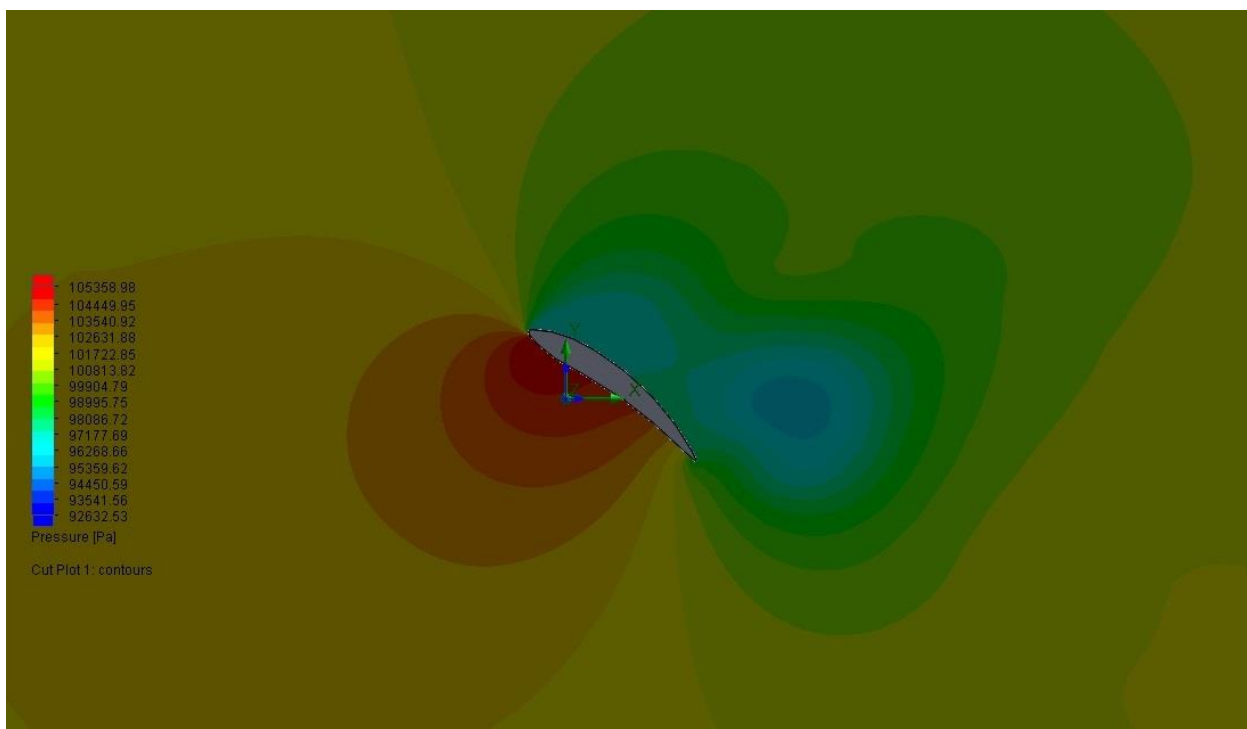


Διάγραμμα 48: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 36 μοίρες

Γωνία προσβολής: 38 μοίρες

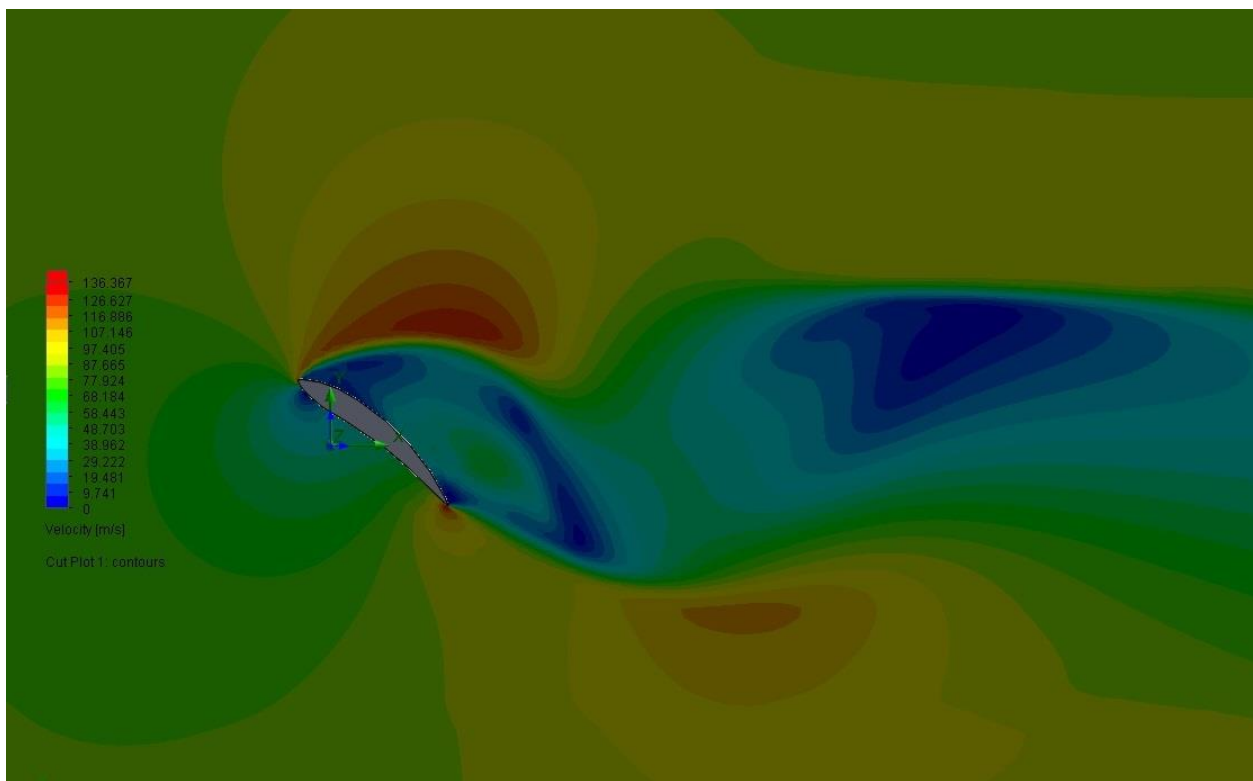


Διάγραμμα 49: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 38 μοίρες

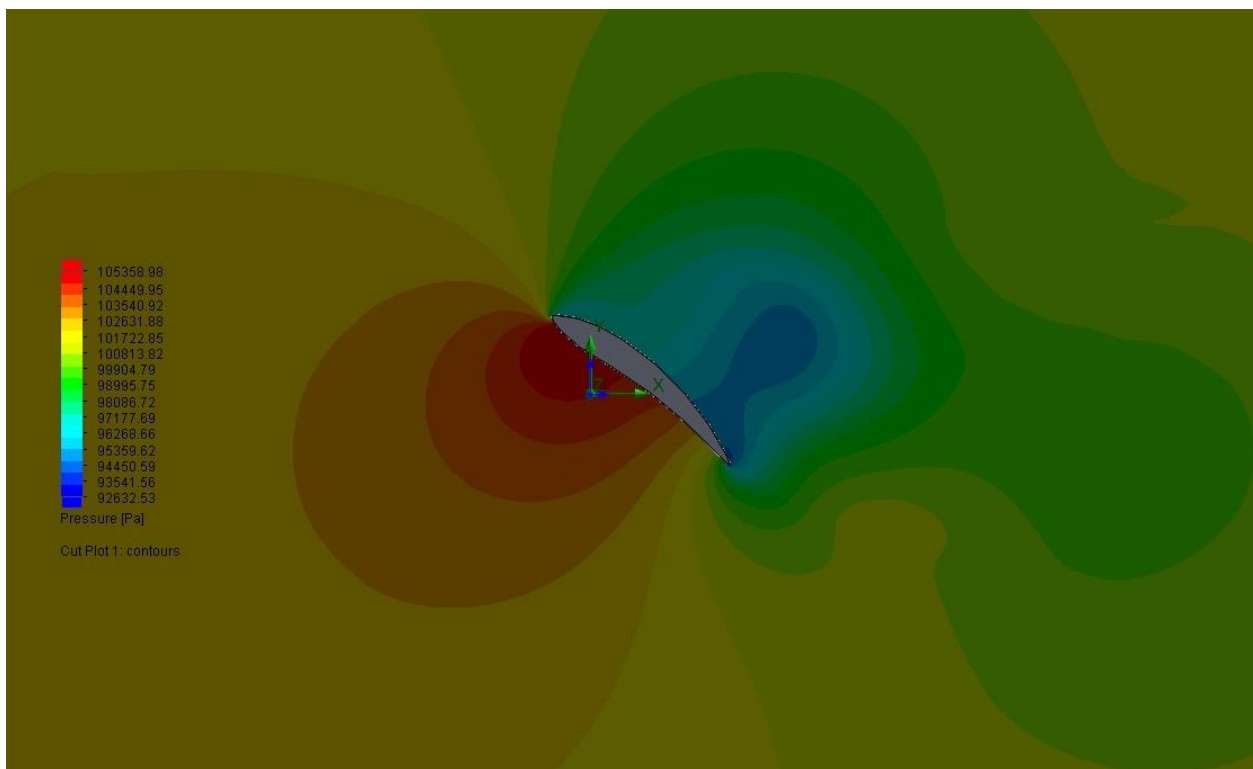


Διάγραμμα 50: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 38 μοίρες

Γωνία προσβολής: 40 μοίρες



Διάγραμμα 51: Διάγραμμα ταχυτήτων ρευστού, 40 μοίρες



Διάγραμμα 52: Διάγραμμα πιέσεων ρευστού, 40 μοίρες

8. Συμπεράσματα

8.1. Για την μέθοδο

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την μέθοδο, δηλαδή την ψηφιοποίηση του φυσικού μοντέλου υπάρχουσας πτέρυγας μέσω σάρωσης χωρίς επαφή, την δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου CAD και τέλος την μελέτη του μέσω υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι τα εξής.

Αρχικά η ψηφιοποίηση της πτέρυγας με τον ψηφιοποιητή Konica Minolta Vivid 910 ήταν επιτυχής και η τελική γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου είναι εντός των επιθυμητών προδιαγραφών για την παρούσα μελέτη, κάτι που επιβεβαιώθηκε κατόπιν μετρήσεων και σύγκρισης του μοντέλου, τόσο με το φυσικό μοντέλο όσο και με ένα δεύτερο μοντέλο που σχεδιάστηκε, όπως περιγράφεται παραπάνω, στην παράγραφο 6.3. Η διαδικασία της σάρωσης της πτέρυγας απεδείχθη απαιτητική λόγω της έντονης καμπυλότητας των ακμών της και στην πορεία της προέκυψαν και ξεπεράστηκαν αρκετές δυσκολίες, πολλές εκ των οποίων ήταν αναμενόμενες. Οι δυσκολίες αυτές προέκυψαν τόσο λόγω της γεωμετρίας της πτέρυγας όσο και λόγω της επιφάνειας η οποία ήταν λεία, και με μεγάλες αντανακλάσεις. Επιλύοντας το ζήτημα της ανακλαστικής επιφάνειας, καλύπτοντάς την με λευκό ματ χρώμα και έπειτα από μεγάλο αριθμό δοκιμών και σαρώσεων υπό διαφορετικές γωνίες, κατέστη δυνατή η αποτύπωση του μεγαλύτερου μέρους της γεωμετρίας της πτέρυγας. Τέλος μέσω της επεξεργασίας των σαρώσεων και την σύνθεση του μοντέλου στο λογισμικό, απομονώθηκαν τα τμήματα της πτέρυγας που εμφάνιζαν προβλήματα ως προς την γεωμετρία και κρατήθηκε το τμήμα εκείνο το οποίο ταυτιζόταν με την γεωμετρία του φυσικού μοντέλου. Αυτό ήταν δυνατό καθώς το απαιτούμενο για την μελέτη είναι η σωστή αποτύπωση της γεωμετρίας της αεροτομής και όχι ολόκληρης της πτέρυγας, αφού η πτέρυγα είναι παραλληλόγραμμη και η προσομοίωση γίνεται σε 2 διαστάσεις.

Όσον αφορά την Ρευστοδυναμική ανάλυση, έγινε πλήρης μελέτη σε όλες τις γωνίες, και με μεγάλο εύρος αριθμών Reynolds, στο Solidworks Flow simulation, το οποίο όπως έχει φανεί σε άλλες εργασίες και δοκιμές προσομοιάζει επαρκώς τις πραγματικές μετρήσεις. Παρ όλα αυτά, όπως σε κάθε μελέτη - προσομοίωση, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις μετρήσεις στην αεροσήραγγα θα ήταν αρκετά χρήσιμη για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Το σημείο στο οποίο υπάρχουν αμφιβολίες για την ακρίβεια των μετρήσεων στην μελέτη είναι στις πολύ μεγάλες γωνίες προσβολής, όπου υπάρχει αποκόλληση του ρευστού από την άνω πλευρά της πτέρυγας και μεγάλος στροβιλισμός, όπως φαίνεται στα σχετικά διαγράμματα (Κεφάλαιο 7). Σε ορισμένες από τις γωνίες αυτές, το λογισμικό αδυνατούσε να κάνει σύγκλιση των τιμών, τουλάχιστον σε εύλογο χρονικό διάστημα. Αυτό αφήνει ένα μεγαλύτερο περιθώριο λάθους στις μετρήσεις σε αυτό το εύρος γωνιών προσβολής.

8.2. Για τα αποτελέσματα

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Η πτέρυγα παρουσιάζει γραμμική αύξηση του συντελεστή δυναμικής άνωσης σε σχέση με την γωνία προσβολής (α) σε αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους των 200.000Re, δηλαδή ταχύτητες για την συγκεκριμένη πτέρυγα μεγαλύτερες των 16 m/s.
- Ο μέγιστος συντελεστής δυναμικής άντωσης είναι $Cl=1,54$ για γωνία προσβολής $\alpha= 12^\circ$.
- Μετά την γωνία των 14° υπάρχει αποκόλληση του ρευστού σε μεγάλο εμβαδό της άνω πλευράς της πτέρυγας και συνεπώς, απώλεια άντωσης. Αυτό παρατηρείται και στο ανάλογα γράφημα (Cutplot) με τις ταχύτητες του ρευστού.
- Ο συντελεστής οπισθέλκουσας για την γωνία μέγιστης άντωσης είναι $\alpha= 12^\circ$ είναι $Cd=0,09$.
- Παρατηρείται ότι η πτέρυγα παράγει άντωση από τις -6° γωνίας προσβολής, αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης καμπυλότητας (camber).
- Παρατηρείται επίσης, ότι οι γωνίες προσβολής με τον μεγαλύτερο λόγο $K= (Cl/Cd)$ είναι μεταξύ -2° και 0° .
- Γενικά οι πτέρυγες δεν συνηθίζεται να μελετώνται σε αυτό το εύρος γωνιών προσβολής, δηλαδή μεγαλύτερες των 20° , αλλά λόγω του ότι μια τέτοια πτέρυγα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε όχημα με στόχο την παραγωγή οπισθέλκουσας στην επιβράδυνση πέραν της αρνητικής άντωσης, κρίθηκε σημαντικό να γίνει προσομοίωση των γωνιών αυτών ώστε να υπάρξει μία καλύτερη εικόνα της συμπεριφοράς της πτέρυγας σε αυτές τις γωνίες.
- Ο μέγιστος συντελεστής οπισθέλκουσας σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο εύρος γωνιών που μελετήθηκαν, είναι $Cd=1,2$ για γωνία προσβολής $\alpha= 40^\circ$ ($Cl=1,5$).

9. Βιβλιογραφία

1. <http://airfoiltools.com>
2. https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/3d/pdf/vivid-910_vi-910_instruction_eng.pdf
3. Polygon Editing Tool Manual
4. <https://www.grc.nasa.gov/>
5. http://courseware.mech.ntua.gr/ml23229/lecture_pdfs
6. <https://www.koenigsegg.com/>
7. <https://m-selig.ae.illinois.edu/>
8. https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow_Sim_StudentWB_2011_ENG.pdf
9. <https://www.engineersrule.com/tutorial-performing-flow-simulation-aerofoil/>
10. <https://www.cfd-online.com/>
11. Dassault Systems “Solidworks Essentials”
12. Διδακτορική Διατριβή: Δούβη Ελένη « Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερύγων σε διφασική ροή αέρα- νερού και εφαρμογή σε πτερύγια ανεμοκινητήρων ».
13. Πτυχιακή εργασία: Κυριάκου Ευριπίδης «Ψηφιοποίηση Μηχανολογικών Εξαρτημάτων με Χρήση Τεχνολογιών Τρισδιάστατης Σάρωσης»
14. Πτυχιακή εργασία: Διρβαλά Μαρία «Τρισδιάστατη Σάρωση Σε Ιατρικές Εφαρμογές»
15. Πτυχιακή Εργασία: Τοτοζάνι Εμίλντα Αιμιλία «Θεωρητική Και Πειραματική Μελέτη Πτέρυγας Μηδενικού Συντελεστή Ροπής»
16. Απόστολος Λ. Πολυζάκης «Αεριοστρόβιλοι – Εισαγωγή στη Λειτουργία»
17. Δημήτρης Γ. Παπανίκας «Ρευστοδυναμικές Μηχανές»
18. Wikipedia. Wing configuration.
19. Youtube. Geomagic studio tutorial.
20. Youtube. FlowSimulation tutorial.
21. Youtube. 3D scanning tutorial