



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΕΜΠΡΟΣΘΙΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΜΟΤΟΣΙΚΛΕΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φοιτητής Διονύσης Νουχάι

AM 51204283

Επιβλέπων Καθηγητής

Αντώνης Τσολάκης

Αθήνα

Σεπτέμβριος 2024



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

MOTORCYCLE FRONT WHEEL SPOILER DESIGN

DIPLOMA THESIS

Student Dionisis Nuhai

Registration number :51204283

Supervisor Professor

Antonis Tsolakis

Athens

September 2024

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Όνοματεπώνυμο	Υπογραφή
Τσολάκης Αντώνης	
Βαΐρης Αχιλλέας	
Ράπτης Κωνσταντίνος	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Διονύσης Νουχάι του Ένγκελ Νουχάι, με αριθμό μητρώου 51204283 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Διονύσης Νουχάι

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Αντώνη Τσολάκη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα διπλωματικής καθώς και για την καθοδήγηση του.

Περίληψη

Η εργασία εξετάζει την επίδραση της χρήσης των αεροτομών στο μπροστινό spoiler μηχανής ώστε να βελτιωθεί η πρόσφυση .

Αρχικά ,γίνεται μια εισαγωγή στον ορισμό της αεροτομής και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της.Οι κύριες δυνάμεις που μας ενδιαφέρουν στις αεροτομές είναι οι ανοδικές-καθοδικές και η οπισθέλκουσα.Οι συντελεστές αυτών των δυνάμεων επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως παρουσιάζονται με διαγράμματα στην εργασία. Οι αεροτομές χρησιμοποιούνται πχ(σε αεροπλάνα για άνωση ,σε ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρισμού) κλπ όμως στις μηχανές αγώνων είναι σε πρώιμο στάδιο πραγμα που εξετάζεται στην εργασία.

Οπότε επιλέχθηκαν 3 είδη αεροτομών προς εξέταση.Οι NACA 6412 ,NACA 23015, NASA SC(2)-0714. Παρατίθενται τα χαρακτηριστικά τους.Στη συνέχεια δημιουργείται στο CAD solidworks το spoiler με την ρόδα με βάσει σχέδια των διαστασέων μηχανής και του ελαστικού της ρόδας που βρέθηκαν στο ίντερνετ.Έπειτα ,έγινε ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται στις αεροτομές μέσω πρόγραμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής του solidworks. Εκεί παρουσιάζονται οι πιέσεις και οι ταχύτητες του αέρα πάνω στην επιφάνεια των αεροτομών και υπολογίζονται η τελική κάθετη και οπισθέλκουσα δύναμη για κάθε αεροτομή μεμονωμένα.

Συγκρίνονται τα αποτελέσματα και την χαμηλότερη καθοδική δύναμη έχει η NACA 23015 άρα απορρίπτεται. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση δυνάμεων του συστήματος spoiler –ρόδα με τις άλλες δύο αεροτομές (NACA 6412 και NASA SC(2)-0714) και βρίσκεται ότι έχουμε δυνάμεις άνωσης. Το σύστημα spoiler-ρόδα NACA 6412 έχει την μικρότερη άνωση άρα επιλέγεται αυτή ως βέλτιστη. Παρόλα αυτά ,το ζητούμενο είναι η καθοδική δύναμη άρα με βάσει διάφορες αλλαγες στην πχ (γωνία προσβολής,χρήση δεύτερης αεροτομής κλπ) έχουμε σαν αποτέλεσμα μια βελτιωμένη εκδοχή της NACA 6412.

Τέλος ,παρουσιάζονται οι δυνατότητες της χρήσης αεροτομών και για μελλοντικές μελέτες ώστε να αναπτυχθεί παραπάνω η αεροδυναμική των αγωνιστικών μηχανών.

Λέξεις-Κλειδιά : μηχανές αγώνων,spoiler,αεροτομή,καθοδικές δυνάμεις,οπισθέλκουσα

ABSTRACT

This thesis investigates the effect of airfoil use on a front spoiler of motorbike in order to improve downforce .

Firstly, it is introduced the definition of airfoil and its general geometrical characteristics. The main forces that interest us in airfoils are the lift-downforce and drag forces. Airfoils are used, for example, in airplanes for lift, in wind turbines for electricity generation, etc. However, in racing engines, they are at an early stage, which it is examined.

Therefore, three types of airfoils were selected for examination: NACA 6412, NACA 23015, and NASA SC(2)-0714. Their characteristics are listed. Subsequently, the spoiler with the wheel is created in CAD SolidWorks based on the engine dimensions and the wheel's tire specifications found on the internet. Then, an analysis of the forces acting on the airfoils was performed using SolidWorks' computational fluid dynamics (CFD) program. This analysis shows the pressures and air velocities on the surface of the airfoils and calculates the resulting lift and drag forces for each airfoil individually.

The results are compared, and the NACA 23015 has the lowest downforce, so it is discarded. Then, an analysis of the forces of the spoiler-wheel system with the other two airfoils (NACA 6412 and NASA SC(2)-0714) is performed, and it is found that there are lift forces. The spoiler-wheel system with the NACA 6412 has the lowest lift, so it is selected as the optimal one. However, since the goal is to have downforce, various modifications, such as changing the angle of attack or using a second airfoil, are made to result in an improved version of the NACA 6412.

Finally, the potential uses of airfoils are presented for future studies, with the aim of further developing the aerodynamics of racing vehicles

Keywords: racing vehicles, spoiler, airfoil, downforce, drag

Πίνακας Περιεχομένων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	4
Περίληψη	6
ABSTRACT	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Αεροτομές και Χαρακτηριστικά τους	11
1.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Αεροτομών	12
1.1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας Άνωσης και Οπισθέλκουσας	15
1.1.3 Συντελεστής Άνωσης και Οπισθέλκουσας	16
1.2 Εφαρμογές Αεροτομών	21
1.3 Εφαρμογές Αεροτομών στον Μηχανοκίνητο Αθλητισμό	24
1.3.1 Αεροτομές στην Formula 1	24
1.3.1 Αεροτομές στο Moto GP	26
1.3 Σκοπός	29
1.3.1 NACA 6412	30
1.3.1 NACA 23015	31
1.3.2 NASA SC(2)-0714	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	34
2.1 Έρευνα Σχεδίασης– Πρότυπες Διαστάσεις	34
2.2 Σχεδίαση του Ελαστικού	37
2.3 Σχεδίαση της Ζάντας	42
2.4 Συναρμολόγηση του Τροχού	47

2.5	Σχεδίαση Φτερού (Spoiler).....	48
2.6	Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού - Φτερού.....	51
2.7	Σχεδίαση Φτερού (Spoiler) με Αεροτομή NACA 6412	53
2.8	Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NACA 6412	59
2.9	Σχεδίαση του Φτερού με Αεροτομή NACA 23015	61
2.10	Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NACA 23015.....	67
2.10	Σχεδίαση του Φτερού με Αεροτομή NASA SC(2)-0714	70
2.11	Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NASA SC(2)-0714	
	74	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		77
3.1	Δισδιάστατη ανάλυση αεροτομών	77
3.1.1	NACA 6412	77
3.1.2	NACA 23015	82
3.1.3	NASA SC(2)-0714.....	85
3.1.4	Σύγκριση Αεροτομών	88
3.2	Τρισδιάστατη ανάλυση φτερού.....	89
3.2.1	Φτερό χωρίς αεροτομή.....	89
3.2.2	Φτερό με αεροτομή NACA 6412.....	91
3.2.3	Φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714	94
3.1.4	Σύγκριση φτερών με και χωρίς αεροτομές.....	96
3.3	Περπτώσεις και Βελτιστοποίηση NACA 6412	98
3.3.1	Περίπτωση 1	98
3.3.2	Περίπτωση 2	98
3.3.3	Περίπτωση 3	98

3.3.4 Περίπτωση 4	100
3.3.5 Περίπτωση 5	102
3.3.6 Περίπτωση 6	104
3.3.7 Περίπτωση 7	106
3.3.8 Διάγραμμα.....	109
3.4 Συμπεράσματα.....	111
Βιβλιογραφία	112

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

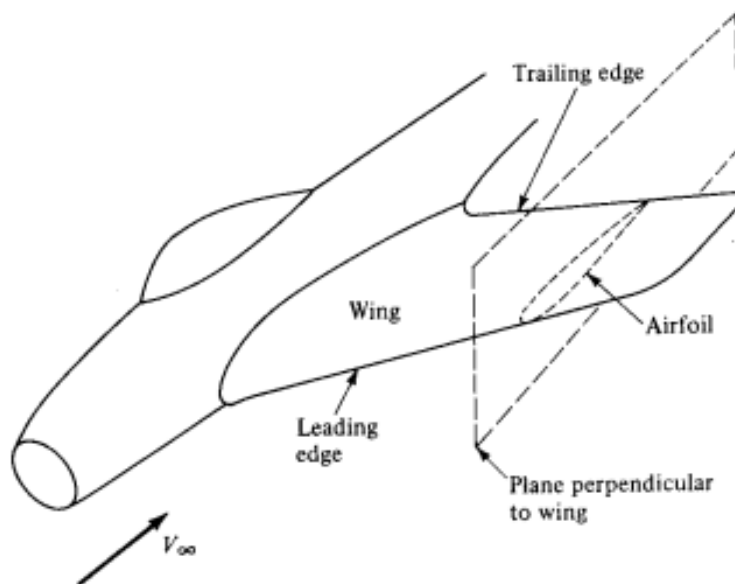
1.1 Αεροτομές και Χαρακτηριστικά τους

Όλα τα στερεά σώματα το οποία βρίσκονται εντός μίας ροής ρευστού αλληλεπιδρούν με αυτό και επιφέρουν ένα διττό αποτέλεσμα. Η ροή του ρευστού καθώς και ιδιότητές του όπως το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων μεταβάλλονται προσαρμοζόμενα στο «εμπόδιο» το οποίο βρίσκουν ανάντη της. Η θεωρία των γραμμών ροής περιγράφει και οπτικοποιεί χαρακτηριστικά την μεταβολή αυτή, όπως παρουσιάζεται στο παράδειγμα της Εικόνας 1. Η μεταβολή της ροής και των ιδιοτήτων του ρευστού μεταβάλλει την ενέργειά του, μέρος της οποίας μεταφέρεται από ή προς το στερεό σώμα. Στην περίπτωση στερεών σωμάτων που δεν μεταφέρουν ενέργεια στο ρευστό (παράδειγμα μεταφοράς ενέργεια στο ρευστό είναι τα τα πτερύγια ενός στροβίλου), μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται σε αυτά από το ρευστό δημιουργεί γύρο του ένα πεδίο πίεσης και επιφανειακών τάσεων. Τα πεδία αυτά οδηγούν στην δημιουργία δυνάμεων οι οποίες μπορεί να γενικευτούν σε δυνάμεις άνωσης και αντίστασης.



Εικόνα 1: Οπτικοποίηση ροής γύρω από μοντέλο αεροσκάφους (1).

Ως αεροτομές ορίζονται τα αεροδυναμικά σώματα τα οποία έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η άνοση που παράγουν να είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίσταση που δημιουργείται από το ρευστό (2). Ο Anderson (3) συμπληρώνει τον παραπάνω ορισμό αναφέροντας ότι οι αεροτομές είναι οι γεωμετρικές τομές οι οποίες δημιουργούν μία πτέρυγα, όπως αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Στην πράξη μία πτέρυγα αποτελείται από ένα σύνολο ενός ή περισσότερων τύπων αεροτομών, οι οποίες συνολικά την σχηματίζουν.

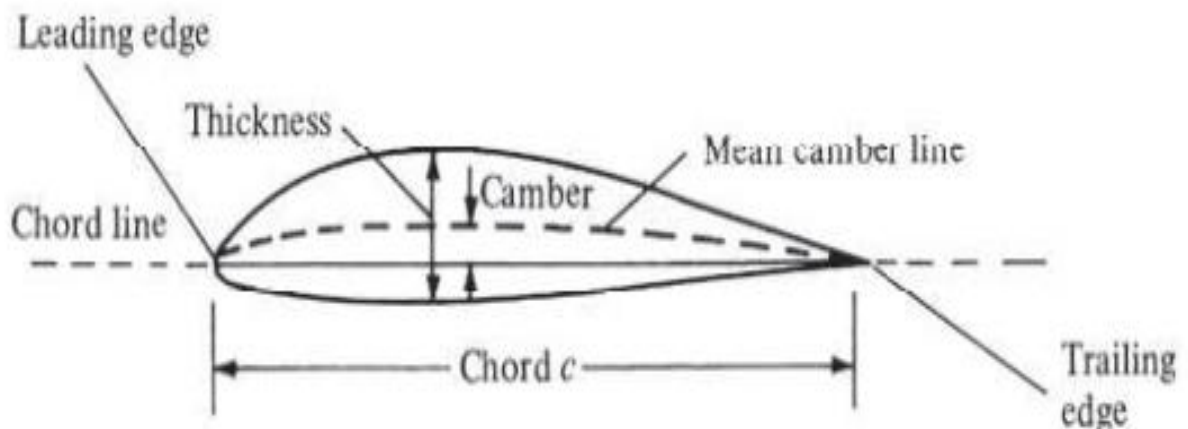


Εικόνα 2: Σχέδιο μίας πτέρυγας και της αεροτομής (3)

1.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Αεροτομών

Παρά το γεγονός ότι υφίσταται μία εκτενής ποικιλία αεροτομών για μεγάλο εύρος χρήσεων, όλες οι αεροτομές χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στο σχήμα της αεροτομής αλλά και των επιδόσεων αυτής. Αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 3 και είναι τα παρακάτω:

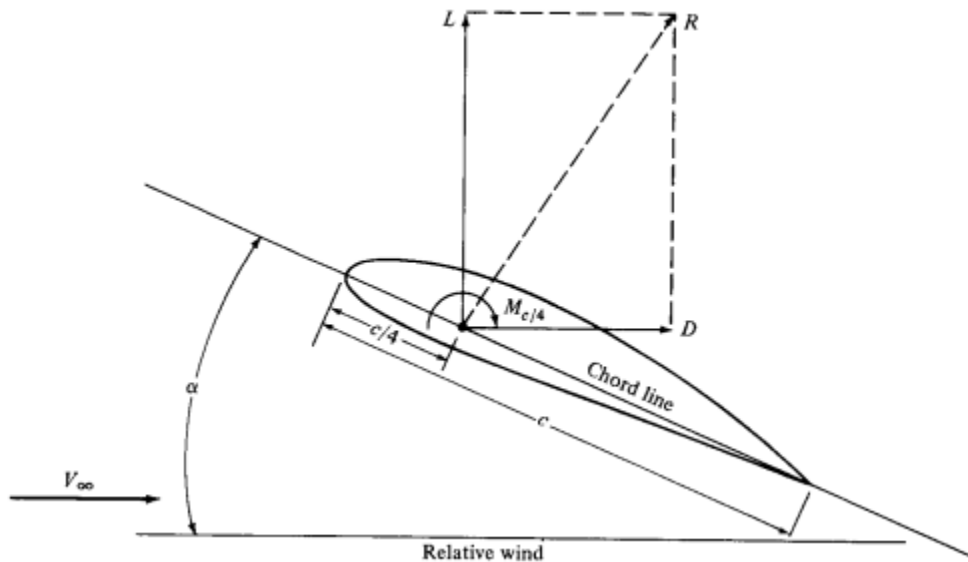
- Ακμή προσβολής (leading edge): Αποτελεί το σημείο στο εμπρός τμήμα της αεροτομής το οποίο συναντά πρώτο η ροή και χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη καμπυλότητα.
- Ακμή εκφυγής (trailing edge): Αποτελεί το αντίστοιχο σημείο με την ακμή προσβολής στο πίσω τμήμα της αεροτομής.
- Χορδή (chord): Είναι η ευθεία γραμμή που συνδέει την ακμή προσβολής με την ακμή εκφυγής. Το μήκος της χορδής c είναι το μήκος της ευθείας αυτής και αποτελεί την χαρακτηριστική διάσταση της αεροτομής.
- Μέση καμπυλότητα (mean camber): Είναι το σύνολο των σημείων μεταξύ του άνω και κάτω τμήματος της αεροτομής τα οποία ισαπέχουν από αυτά. Η κατανομή των σημείων αυτών εξαρτάται από το πάχος της αεροτομής κατά μήκος της.
- Καμπυλότητα (camber): Είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ της μέσης καμπυλότητας και της χορδής, υπολογιζόμενη κάθετα από την χορδή.
- Πάχος (Thickness): Το πάχος της αεροτομής αποτελεί την κάθετη στην χορδή απόσταση μεταξύ του άνω και κάτω τμήματος της αεροτομής.



Εικόνα 3: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής (4)

Πέρα των παραπάνω γεωμετρικών χαρακτηριστικών, στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται ιδιότητες της ροής και των δυνάμεων που ασκούνται σε μία αεροτομή. Αυτές είναι τα παρακάτω:

- Ταχύτητα ροής – σχετική ταχύτητα (V_∞): Η σχετική ταχύτητα της ροής του ρευστού σε απόσταση που δεν επηρεάζεται από την αεροτομή.
- Γωνία προσβολής (α): Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής και της κατεύθυνσης του διανύσματος της ταχύτητας της ροής.
- Κέντρο άνωσης: Σημείο επί της χορδής στο οποίο οι ροπές που ασκούνται είναι ανεξάρτητες από τον συντελεστή άνωσης και της γωνία προσβολής.
- Κέντρο πίεσης: Σημείο επί της χορδής στο οποίο οι ροπές είναι ίσες με μηδέν.
- Αεροδυναμική δύναμη (R): Είναι η συνολική δύναμη που ασκείται από το ρευστό στην αεροτομή. Αυτή αναλύεται στην άνωση (L), η οποία είναι κάθετη στη ροή, και την αντίσταση (οπισθέλκουσα) (D), η οποία είναι παράλληλη με την ροή.

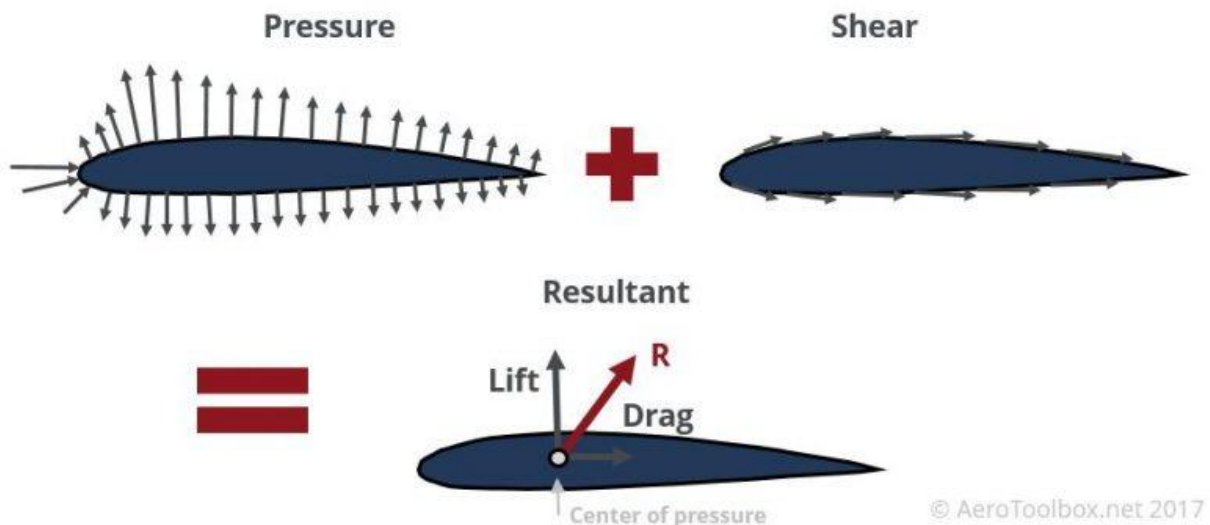


Εικόνα 4: Ιδιότητες αεροτομής και ροής γύρω από αυτή (3)

1.1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας Άνωσης και Οπισθέλκουσας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο αυτό, κάθε σώμα το οποίο εισέρχεται εντός μία ροής ρευστού οδηγεί στην μεταβολή ιδιοτήτων του ρευστού όπως το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων. Η μεταβολή αυτή δημιουργεί γύρω από το σώμα ένα ανομοιόμορφο πεδίο πίεσης καθώς και επιφανειακές τάσεις. Στις αεροτομές το πεδίο πίεσης παρουσιάζει πιέσεις μεγαλύτερου μέτρου στο κάτω τμήμα της αεροτομής, ενώ στο άνω τμήμα της αεροτομής παρουσιάζονται υποπίεσεις (χαμηλότερες της ατμοσφαιρικής).

Η κατανομή αυτή δημιουργεί ένα πεδίο δυνάμεων λόγω πίεσης, όπως αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. Επιπρόσθετα οι επιφανειακές τάσεις είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις δυνάμεις λόγω πίεσης. Αν όλες αυτές οι δυνάμεις ολοκληρωθούν ως προς το κέντρο πίεσης, υπολογίζεται η συνολική αεροδυναμική δύναμη R , και κατά συνέπεια η άνωση και οπισθέλκουσα.



Εικόνα 5: Πεδίο πιέσεων και επιφανειακών τάσεων αεροτομής (5)

1.1.3 Συντελεστής Άνωσης και Οπισθέλκουσας

Κάθε αεροτομή χαρακτηρίζεται από δύο αεροδυναμικούς συντελεστές, τον συντελεστή άνωσης και τον συντελεστή οπισθέλκουσας. Οι συντελεστές αυτοί αποτελούν αδιάστατα μεγέθη τα οποία ποσοτικοποιούν την άνωση και την αντίσταση που δέχεται η αεροτομή ως συνάρτηση ενός αριθμού χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής. Η άνωση και αντίστοιχα η οπισθέλκουσα που δέχεται μία αεροτομή αποδεικνύεται πειραματικά ότι μπορούν να περιγραφούν από την Εξίσωση (1) (6):

$$Lift = L = \rho_{\infty} \times V_{\infty}^2 \times S \times Factor \quad (1)$$

Όπου S είναι η χαρακτηριστική επιφάνεια (συνήθως η επιφάνεια της πτέρυγας) και Factor ένας συντελεστής. Αυτός ο συντελεστής ονομάζεται συντελεστής άνωσης ή αντίστοιχα οπισθέλκουσας στην περίπτωση αυτή. Με κατάλληλους μετασχηματισμούς της Εξίσωσης (1) και αντίστοιχα της εξίσωσης της οπισθέλκουσας λαμβάνουμε τις Εξισώσεις (2) και (3), όπου περιγράφουν τον συντελεστή άνωσης (C_L) και οπισθέλκουσας (C_D).

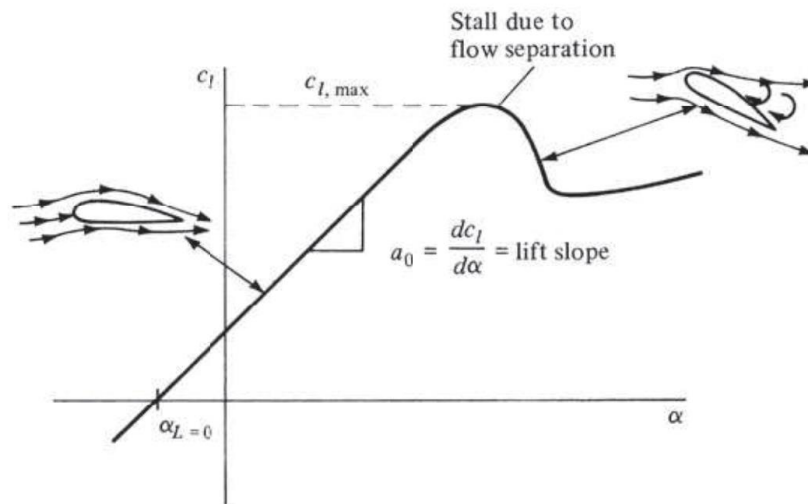
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S} = \frac{Lift}{Q S} = \frac{l}{Q c} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S} = \frac{D}{Q S} = \frac{d}{Q c} \quad (3)$$

Όπου Q η δυναμική πίεση και l,d οι άνωση ανά μονάδα επιφάνειας (χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να εκφράσουμε τους συντελεστές για τομή μίας πτέρυγας). Οι δύο συντελεστές αυτοί

(C_L και C_D) δεν παραμένουν σταθεροί αλλά αποτελούν συνάρτηση της γωνίας προσβολής (α) και του αριθμού Reynolds (Re).

Γενικά μία αεροτομή, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6, ξεκινά να παράγει άνωση από μία αρνητική γωνία προσβολής (σημείο $\alpha_L=0$) και ο συντελεστή άνωσης αυξάνεται γραμμικά με κλίση a_c μέχρι μία γωνία προσβολής κατά την οποία η ροή ξεκινά να αποκολλάτε από την αεροτομή, οδηγώντας σταδιακά σε απώλεια της παραγόμενης άνωσης (απώλεια στήριξης). Η οπτικοποίηση της αποκόλλησης της ροής σε μία αεροτομή με μεγάλη γωνία προσβολής παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.

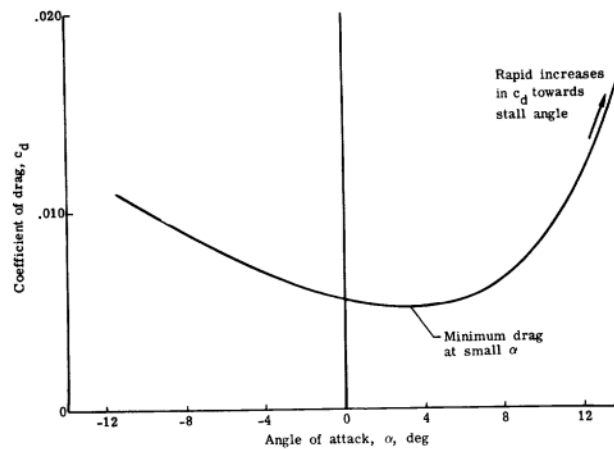


Εικόνα 6: Συσχέτιση συντελεστή άνωσης με γωνία προσβολής (4)

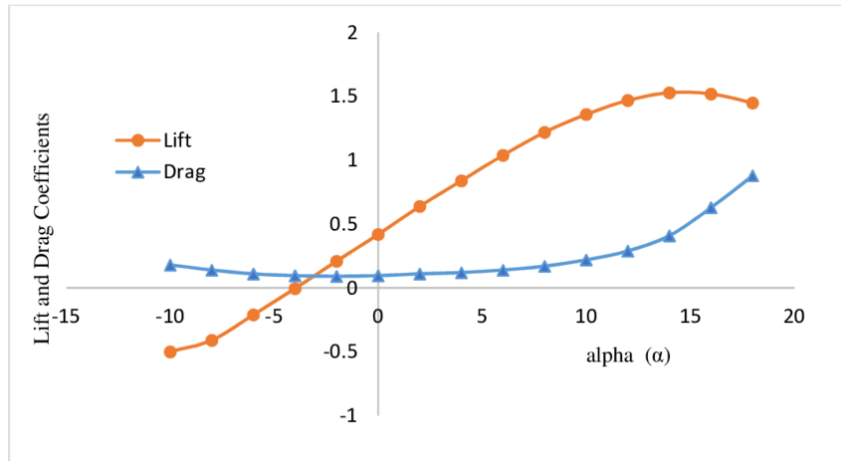


Εικόνα 7: Αποκόλληση ροής σε μεγάλη γωνία προσβολής

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας παρουσιάζει και αυτός συσχέτιση με τη γωνία προσβολής (Εικόνα 8). Σε αντίθεση με τον συντελεστή άνωσης, παρουσιάζει ελάχιστο σε μία ενδιάμεση γωνία προσβολής ενώ για γωνίες μικρότερες ή μεγαλύτερες αυξάνεται. Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι όταν η ροή πλησιάζει στην αποκόλληση (μεγάλες γωνίες προσβολής), η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται συνολικά η συσχέτιση των δύο συντελεστών σε σχέση με την γωνία προβολής.



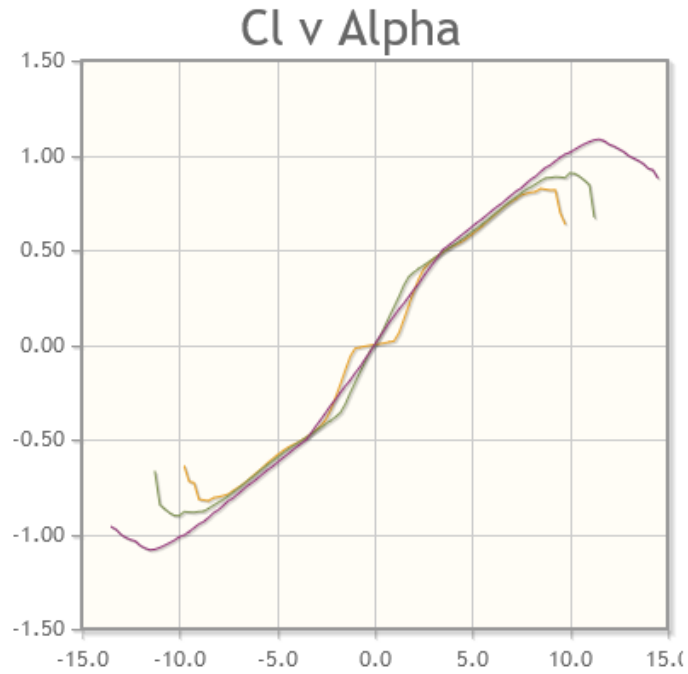
Εικόνα 8: Συσχέτιση συντελεστή οπισθέλκουσας με γωνία προσβολής (6)



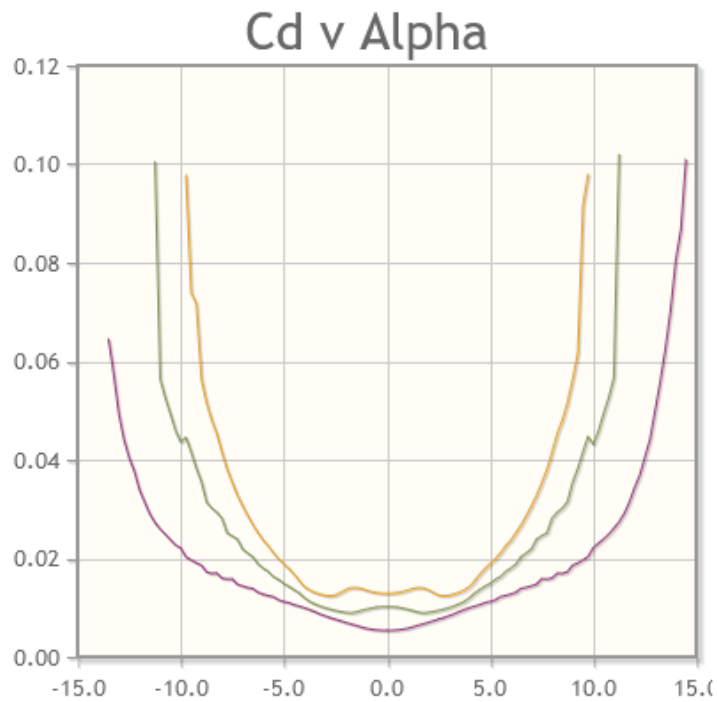
Εικόνα 9: Συσχέτιση συντελεστή άνωσης και οπισθέλκουσας με γωνία προσβολής (7)

Τόσο ο συντελεστής οπισθέλκουσας όσο και ο συντελεστής άνωσης επιπρόσθετα της γωνίας προσβολής επηρεάζεται και από τον αριθμό Reynolds της ροής, και κατά συνέπεια από την ταχύτητα του ρευστού, τις ιδιότητές του, και το χαρακτηριστικό μήκος της αεροτομής (χορδή). Ο αριθμός Reynolds (Σχέση 4) αποτελεί έναν αδιάστατο αριθμό, και επιτρέπει την εκτίμηση αν μία ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης. Σε ροή πάνω από επίπεδη πλάκα η μετάβαση από στρωτή ροή σε τυρβώδη παρατηρείται περίπου όταν έχουμε $Re = 5 \times 10^5$ (8). Παρά το γεγονός ότι η ροή γύρο από αεροτομές μπορεί να προσεγγιστεί με το μοντέλο της επίπεδης πλάκας, η μετάβαση (ειδικά σε μεγάλες γωνίες προσβολής) ξεκινά αρκετά νωρίτερα, μεταξύ $Re = 2-3 \times 10^5$ (9). Στην Εικόνα 10 και 11 παρουσιάζεται η μεταβολή της σχέσης των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας σε σχέση με την γωνία προσβολής για αεροτομή NACA-0009 και αριθμούς Reynolds 10^5 (πορτοκαλί), 2×10^5 (πράσινο), και 5×10^5 (μοβ)

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{\rho uL}{\mu} \quad (4)$$



Εικόνα 10: Συσχέτιση συντελεστή άνωσης με γωνία προσβολής για αεροτομή NACA-0009 και τρεις αριθμούς Reynolds (10)

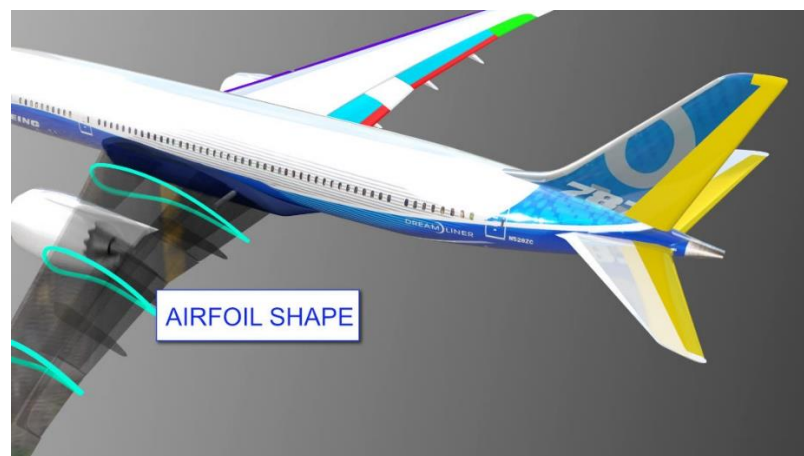


Εικόνα 11: Συσχέτιση συντελεστή οπισθέλκουσας με γωνία προσβολής για αεροτομή NACA-0009 και τρεις αριθμούς Reynolds (10)

1.2 Εφαρμογές Αεροτομών

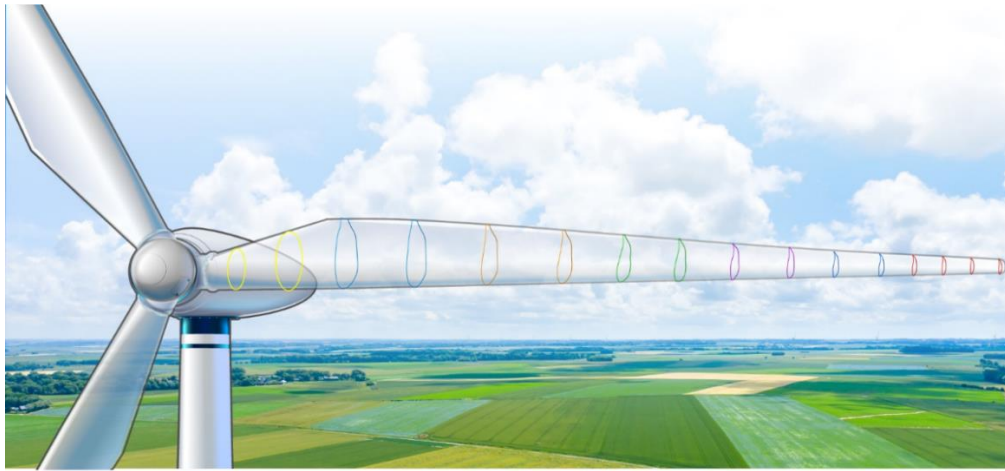
Οι αεροτομές παρουσιάζουν πλήθος εφαρμογών, με τις σημαντικότερες από τις οποίες να συγκεντρώνονται στον τομέα της αεροδιαστημικής. Παρόλα αυτά όπου απαιτείται να παραχθεί άνωση ή να μεταφερθεί ενέργεια από και προς ένα ρευστό, οι αεροτομές (και η παραλλαγή του για υγρά – υδροτομές) αποτελούν την πρώτη επιλογή των σχεδιαστών σε ένα μεγάλο εύρος τομέων της επιστήμης και της βιομηχανίας. Χαρακτηριστικά αναφέρονται κάποιες από τις σημαντικότερες χρήσεις τους.

- Πτέρυγες αεροσκαφών: Οι αεροτομές αποτελούν το κύριο μέσο σχεδίασης πτερύγων αεροσκαφών, τα οποία αποτελούν το βασικό μέσο παραγωγής άνωσης σε ένα αεροσκάφος. Οι αεροτομές στις εφαρμογές αυτές σχεδιάζονται και επιλέγονται με προσοχή με στόχο την μεγιστοποίηση της άνωσης και την ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας για όσο μεγαλύτερο εύρος του πεδίου λειτουργίας. Τα χαρακτηριστικά της αεροτομής επιλέγονται με γνώμονα τόσο την πρακτικότητα όσο και το είδος του αεροσκάφους.



Εικόνα 12: Αεροτομές σε πτέρυγα αεροσκάφους

- Πτερύγια ανεμογεννητριών: Στις ανεμογεννήτριες ο σκοπός των αεροτομών είναι να παράγουν δυνάμεις άνωσης οι οποίες μέσω της περιστροφής που δημιουργείται μεταφέρουν μέρος της ενέργειας τους ρευστού στην γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



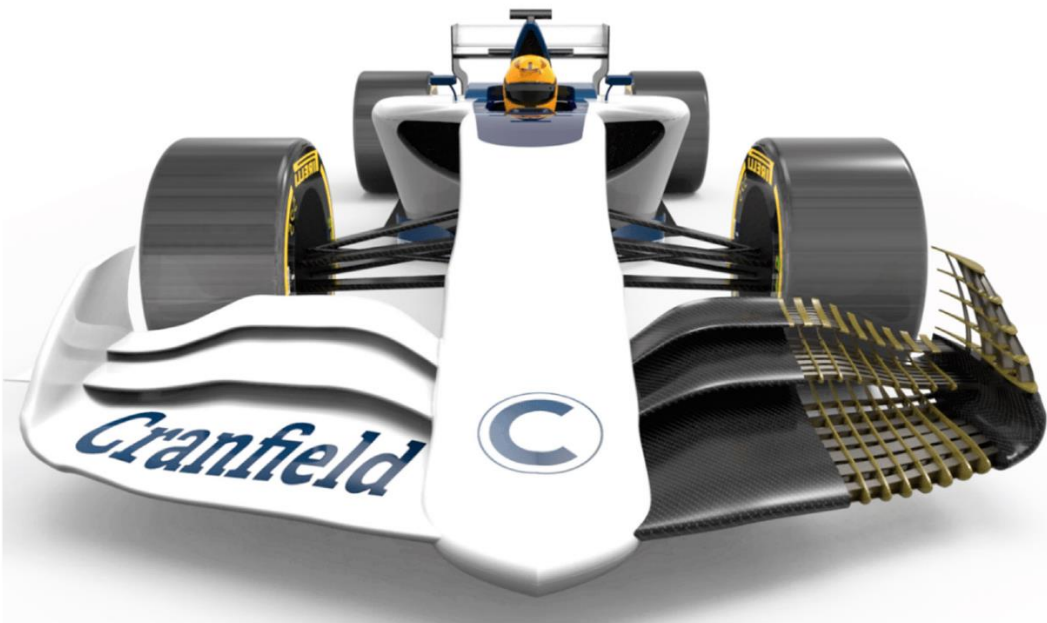
Εικόνα 13: Αεροτομές σε ανεμογεννήτρια.

- Πτερύγια Στροβιλομηχανών: Στις στροβιλομηχανές οι αεροτομές κατέχουν διπλό ρόλο. Στους συμπιεστές μεταφέρουν ενέργεια από την μηχανή στο ρευστό με στόχο την αύξηση της πίεσης του. Στους στροβίλους λαμβάνουν ενέργεια στο ρευστό με στόχο την περιστροφή της μηχανής. Συνολικά επιτρέπουν την λειτουργία σύνθετων μηχανημάτων και ΜΕΚ όπως υδροστρόβιλοι και αεροκινητήρες.



Εικόνα 14: Αεροτομές σε πτερύγια στροβιλοκινητήρα

- Αεροτομές σε οχήματα εδάφους: Σε αντίθεση με τα αεροσκάφη και τα ελικόπτερα, τα οχήματα εδάφους δεν απαιτούν δυνάμεις άνωσης. Αντίθετα μάλιστα, οι δυνάμεις άνωσης αποτελούν κάτι που σχεδιαστικά αποφεύγεται καθώς μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε απώλεια πρόσφυσης. Για τον λόγο αυτό η χρήση των αεροτομών στα οχήματα εδάφους έχει ως στόχο την παραγωγή καθοδικών δυνάμεων (downforce) η οποία πιέζει το όχημα προς το έδαφος, αυξάνοντας τον συντελεστή πρόσφυσης και την ικανότητα του οχήματος να διατηρεί υψηλές ταχύτητες χωρίς απώλεια ελέγχου σε ευθείες αλλά και στροφές. Για την επίτευξη καθοδικών δυνάμεων οι αεροτομές σχεδιάζονται «ανάποδα» σε σχέση με τις αεροτομές αεροπορικών εφαρμογών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο συνολική δύναμη κάθετη προς την χορδή να έχει κατεύθυνση προς το έδαφος.

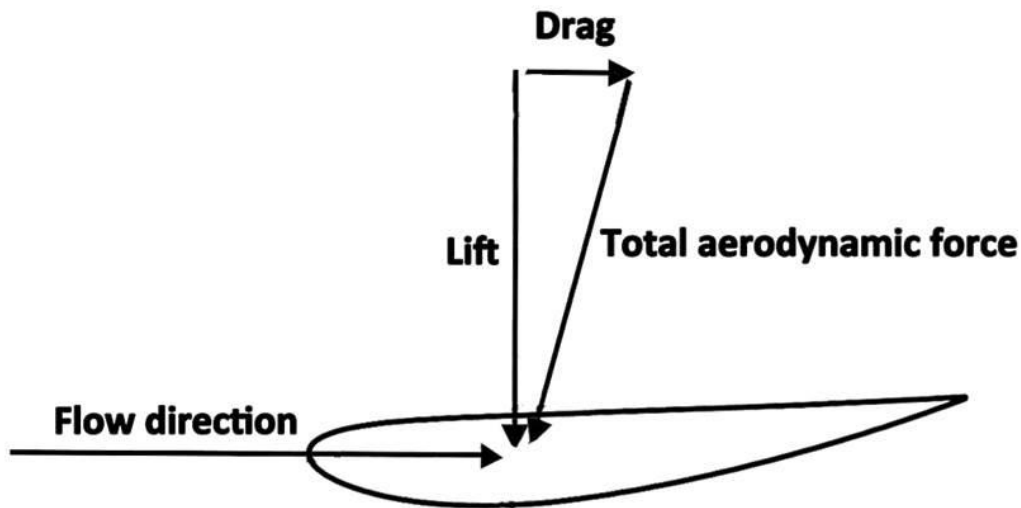


Εικόνα 15: Αεροτομή αγωνιστικού οχήματος

1.3 Εφαρμογές Αεροτομών στον Μηχανοκίνητο Αθλητισμό

1.3.1 Αεροτομές στην Formula 1

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι αεροτομές χρησιμοποιούνται στον μηχανοκίνητο αθλητισμό κυρίως για την παραγωγή καθοδικών δυνάμεων (downforce), με στόχο την αύξηση του «κρατήματος» του οχήματος, μέσω αύξησης της πρόσφυσης των ελαστικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντιστροφή των αεροτομών, όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Παρόλα αυτά η χρήση των αεροτομών δεν αποτελεί πανάκια καθώς αυξάνουν σημαντικά την συνολική οπισθέλκουσα του οχήματος. Επιπρόσθετα συνδράμουν στην δημιουργία στροβιλισμών, ειδικά στις περιπτώσεις οχημάτων με ανοικτά ελαστικά (π.χ. formula 1), όπου οι στροβιλισμοί αλληλοεπιδρούν με αυτά. Παρά τα μειονεκτήματα, η χρήση τους έχει καθιερωθεί στην Formula 1, όπου οι πολύ υψηλές ταχύτητες και το μικρό βάρος των οχημάτων τις καθιστούν απαραίτητες για την διατήρηση επαρκούς πρόσφυσης.



Εικόνα 16: Αεροτομή για δημιουργία downforce (11)

Η χρήση των αεροτομών σε οχήματα μπορεί να γίνει σε αρκετά σημεία αυτών, παρόλα αυτά έχει καθιερωθεί η χρήσης του στο εμπρός και στο πίσω τμήμα αυτού. Στα οχήματα της Formula 1

συνδράμουν στην δημιουργία περίπου στο 70% της παραγόμενης καθοδικής δύναμης (12), ενώ το 25% παράγεται από τη γάστρα και το άλλο 5% από άλλα τμήματα του οχήματος. Η παραγόμενη καθοδική δύναμη είναι υπεύθυνη για την δημιουργία του 80% της συνολικής πρόσφυσης (13). Για τον λόγο αυτό η σχεδίαση και βελτιστοποίησή τους αποτελεί μία από τις κρισιμότερες λειτουργίες της σχεδιαστικής ομάδας των ομάδων F1. Στις Εικόνες 17 και 18 παρουσιάζεται η πολυπλοκότητα στη σχεδίαση των αεροτομών, οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλά επίπεδα και διαχωριστικά για βέλτιστη παραγωγή καθοδικών δυνάμεων και καθοδήγησης της ροής. Για την απαιτούμενη βελτιστοποίηση, οι αναλυτικές μεθοδολογίες δεν επαρκούν και η χρήση υπολογιστικών μεθόδων και ανάλογων λογισμικών έχει καθιερωθεί (14).



Εικόνα 17: Εμπρόσθια αεροτομή οχήματος F1 (15)



Εικόνα 18: Οπίσθια αεροτομή οχήματος F1

1.3.1 Αεροτομές στο Moto GP

Σε αντίθεση με την Formula 1, όπου η χρήση των αεροτομών αποτελεί τον κανόνα εδώ και δεκαετίες, το ίδιο δεν ισχύει στον χώρο των αγώνων με δίκυκλα και ειδικά στο Moto GP. Το 2015 άρχισαν να εμφανίζονται σε διάφορες ομάδες μικρές αεροδυναμικές επιφάνειες, φτιαγμένες κυρίως από ανθρακονήματα. Ο στόχος των επιφανειών αυτών δεν ήταν ξεκάθαρος σε κάθε ομάδα, παρόλα αυτά εκτιμήσεις αναφέρουν την βελτιστοποίηση της κατανομής της καθοδικής δύναμης κατά τις διάφορες φάσεις ενός αγώνα (στροφές, ευθείες κ.α.) και την καθοδήγηση της ροής (16). Παρόλα αυτά οι επιφάνειες αυτές δημιούργησαν σημαντικό αντίλογο, με σημαντικότερο την ασφάλεια του αναβάτη.



Εικόνα 19: Διαφορετικές αεροδυναμικές επιφάνειες κατά την περίοδο 2017 στο Moto GP (16)

Λαμβάνοντας υπόψη τους όχι ξεκάθαρους και μη ενταγμένους στους κανονισμούς του αθλήματος στόχους αλλά και την ασφάλεια των αναβατών, το 2017 νέοι κανονισμού απαγόρευσαν την χρήση αεροδυναμικών επιφανειών, πτερύγων και αεροτομών, εκτός αν βρίσκονται εντός κλειστού πλαισίου ενσωματωμένο στον κορμό της μηχανής. Παρόλα αυτά η χρήση τους δείχνει ότι θα επικρατήσει με νέες σχεδιάσεις από όλες τις ομάδες.



Εικόνα 20: Αεροτομές με τη μορφή πτερυγίων κατά την περίοδο 2016 στο Moto GP

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν διεξαχθεί επί του αντικειμένου της αποτελεσματικότητας της χρήσης αεροτομών υπό την μορφή πτερυγίων στο Moto GP, τα παρακάτω συμπεράσματα έχουν προκύψει (17) (18) (19):

- Προσφέρουν αύξηση στις καθοδικές δυνάμεις και στην πρόσφυση του οχήματος, με αποτέλεσμα την δυνατότητα αύξησης της τελικής ταχύτητας χωρίς απώλεια ελέγχου.
- Αύξηση της οπισθέλκουσας η οποία κρίνεται ως μη σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη ισχύ των οχημάτων (20)
- Αύξηση της ευστάθειας και της δυνατότητας ελέγχου τόσο στην ευθεία, όσο και υπό γωνία.

1.3 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η εξέταση της επίδρασης στην συνολική καθοδική δύναμη και την οπισθέλκουσα πτερυγίων τα οποία έχουν τοποθετηθεί στο «φτερό» ενός οχήματος Moto GP. Η μελέτη αυτή θα επιτευχθεί μέσω της ακόλουθης μεθοδολογίας:

- Επιλογή κατάλληλων αεροτομών προς εξέταση.
- Σχεδίαση του φτερού και της ρόδας σε πρόγραμμα CAD
- Αξιολόγηση των αεροτομών μέσω των παρακάτω μελετών σε πρόγραμμα υπολογιστής ρευστομηχανικής (CFD):
 - Εξέταση των αεροτομών ανεξάρτητα για εκτίμηση της παραγόμενης καθοδικής δύναμης.
 - Εξέταση του φτερού χωρίς την παρουσία αεροτομών για την δημιουργία μίας βάσης σύγκρισης.
 - Εξέταση του φτερού με χρήση αεροτομών
 - Σύγκριση των παραπάνω
 - Εύρεση βέλτιστης αεροτομής
 - Βελτιστοποίηση της τελικής αεροτομής
- Εξαγωγή συμπερασμάτων από τα παραπάνω.

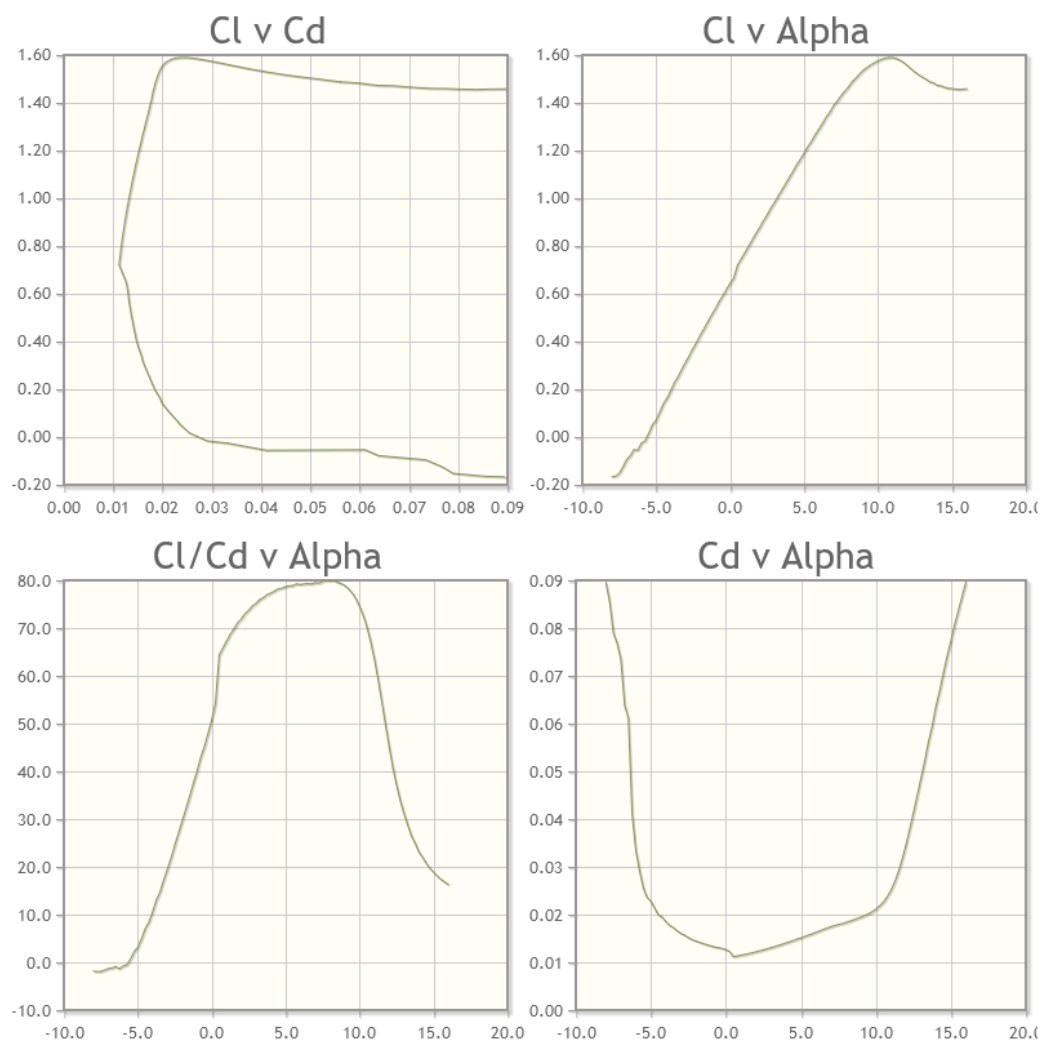
Για την μελέτη επιλέχθηκαν οι παρακάτω αεροτομές, ενώ χρησιμοποιήθηκε μία μέση ταχύτητα των 162 km/h (45 m/s) η οποία για κανονική ατμόσφαιρα και επίπεδο θάλασσας οδηγεί σε αριθμό Reynolds ροής ίσο με περίπου 3×10^5 , κοντά στη μετάβαση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής.

1.3.1 NACA 6412

Η αεροτομή αυτή αποτελεί μία τυποποιημένη κατά NACA αεροτομή η οποία παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη καμπυλότητα: 6% στο 30% χορδής
- Μέγιστο Πάχος: 12% στο 40 % χορδής

Τα χαρακτηριστικά της διαγράμματα για $Re = 2 \times 10^5$ παρουσιάζονται στην Εικόνα 21:



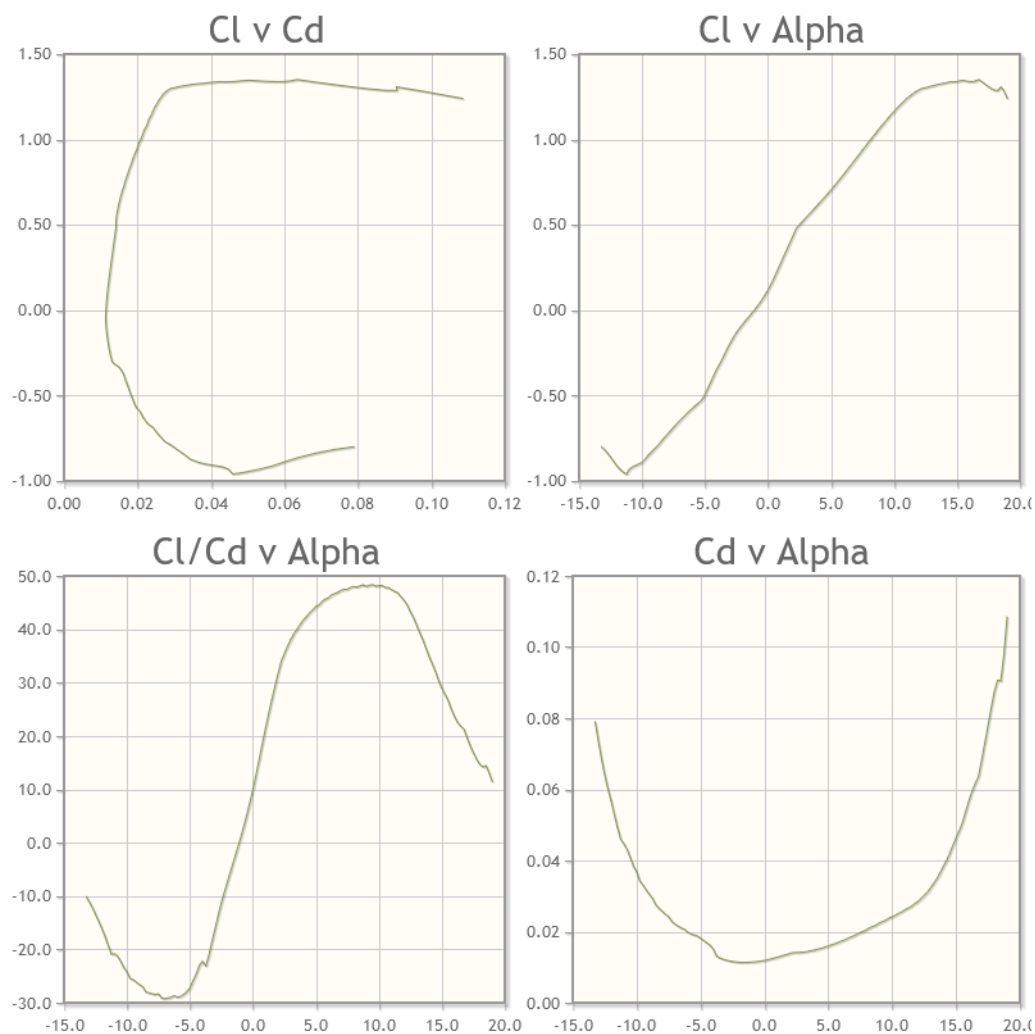
Εικόνα 21: Διαγράμματα αεροτομής NACA 6412 (10)

1.3.1 NACA 23015

Η αεροτομή αυτή αποτελεί μία τυποποιημένη κατά NACA αεροτομή η οποία παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη καμπυλότητα: 1.8% στο 15% χορδής
- Μέγιστο Πάχος: 15% στο 30 % χορδής

Τα χαρακτηριστικά της διαγράμματα για $Re = 2 \times 10^5$ παρουσιάζονται στην Εικόνα 22. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής άνωσης είναι χαμηλός για μηδενικές και μικρές γωνίες προσβολής, λόγω της συμμετρικότητάς της.



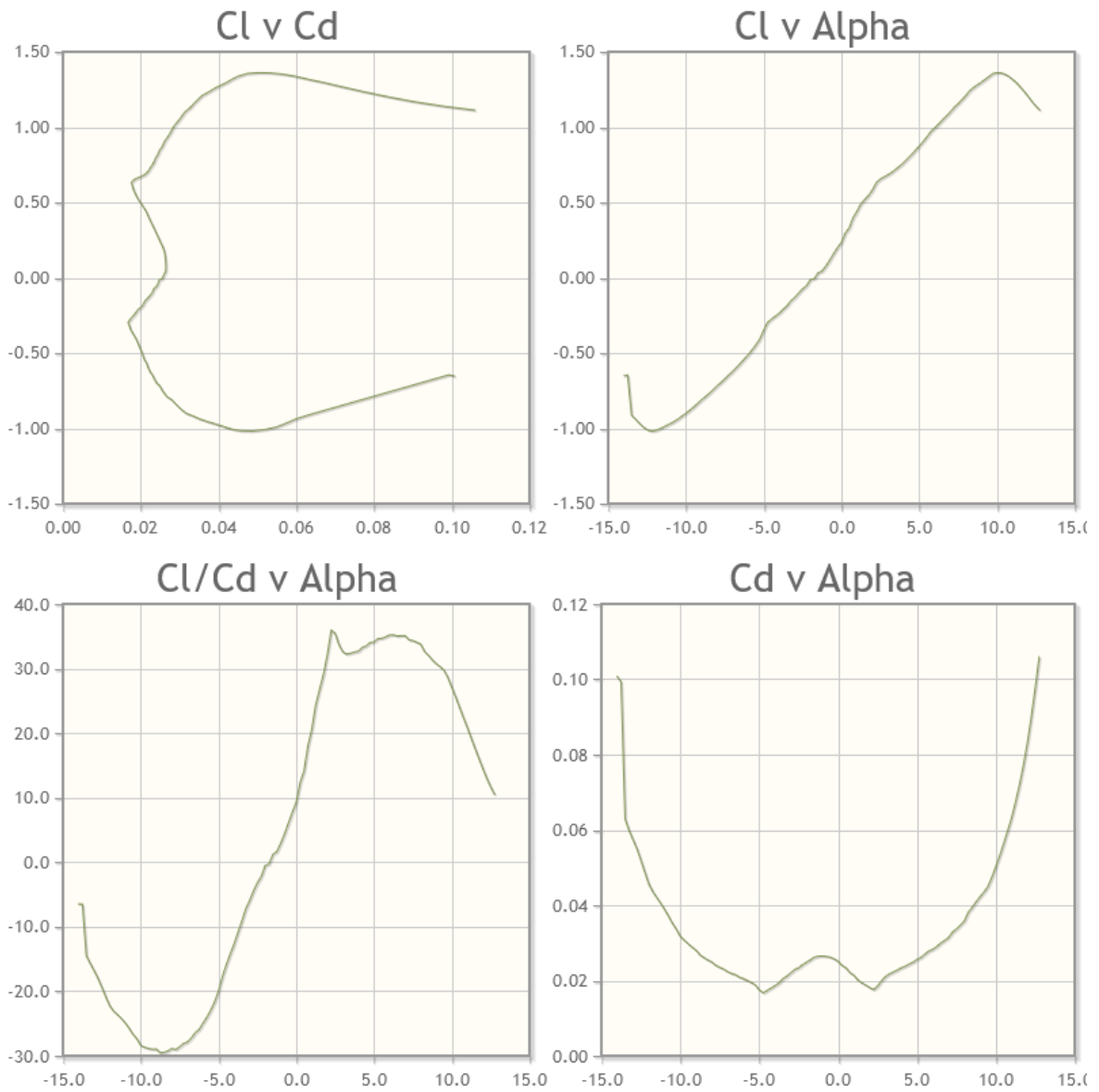
Εικόνα 22: Διαγράμματα αεροτομής NACA 23015 (10)

1.3.2 NASA SC(2)-0714

Η αεροτομή αυτή αποτελεί μία τυποποιημένη κατά NASA υπερκρίσιμη αεροτομή η οποία παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη καμπυλότητα: 2.5% στο 37% χορδής
- Μέγιστο Πάχος: 14% στο 81 % χορδής

Τα χαρακτηριστικά της διαγράμματα για $Re = 2 \times 10^5$ παρουσιάζονται στην Εικόνα 23. Η συγκεκριμένη αεροτομή, σε σχέση με τις δύο πρώτες, είναι βελτιστοποιημένη για υψηλούς υποηχητικούς αριθμούς Mach.

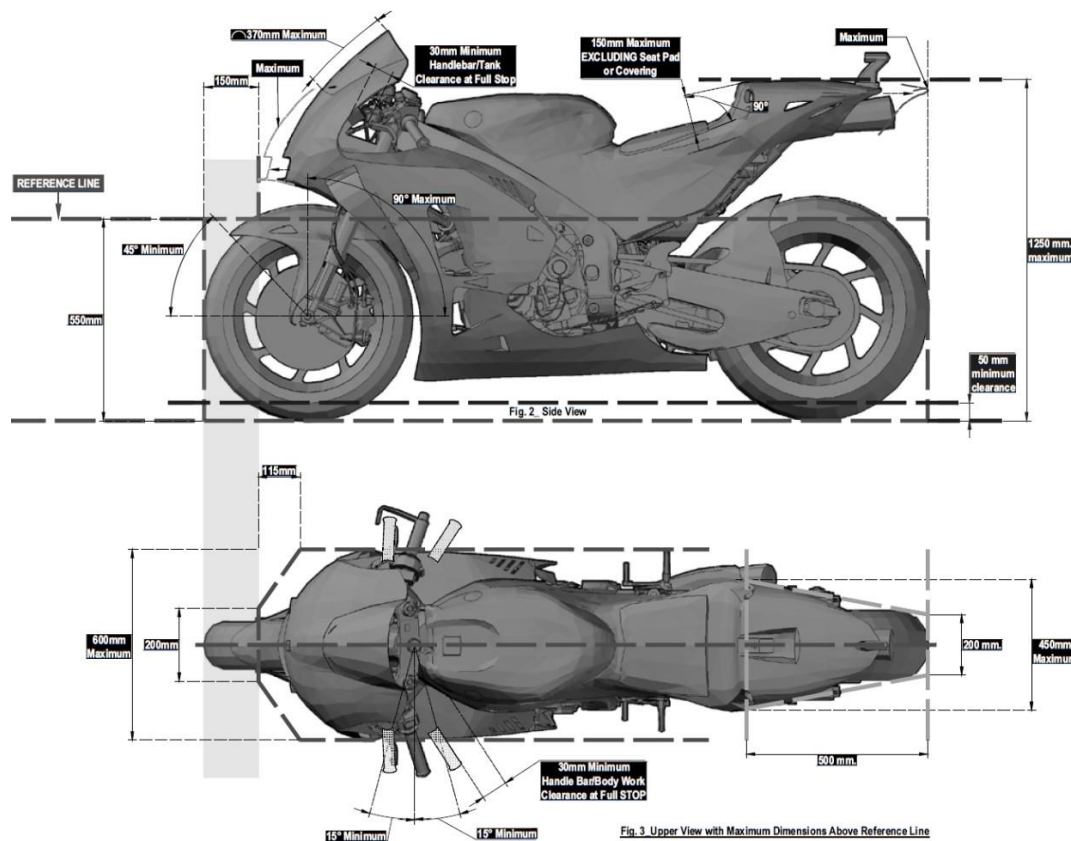


Εικόνα 23: Διαγράμματα αεροτομής NASA SC(2)-0714 (10)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

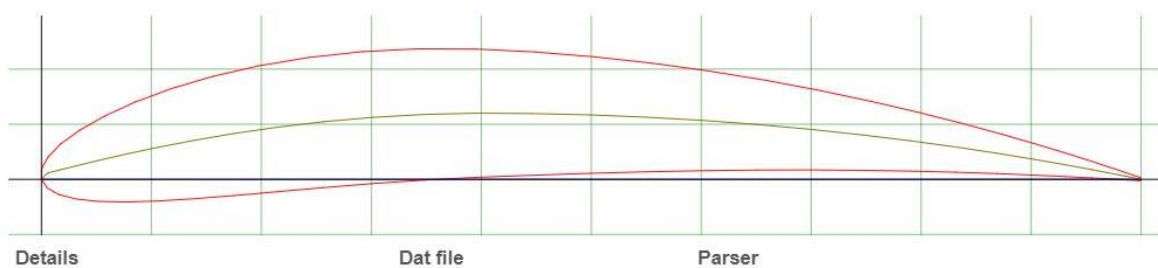
2.1 Έρευνα Σχεδίασης– Πρότυπες Διαστάσεις

Βασικός πυλώνας της προκαταρκτικής σχεδίασης του μοντέλου φτερό (spoiler) –αεροτομή - τροχός, είναι η εύρεση των βασικών-πρότυπων διαστάσεών τους. Έτσι, στο πλαίσιο της υπόψη έρευνας, αναζητήθηκαν οι πρότυπες διαστάσεις, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς των αγώνων MOTO GP. Τα επίσημα σχέδια των κατασκευαστών δεν ήταν διαθέσιμα στο διαδίκτυο, κάτι που είναι λογικό καθόσον τα κατασκευαστικά σχέδια των μοτοσυκλετών αποτελούν πνευματική ιδιοκτησία των κατασκευαστών. Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν η εύρεση από τον ιστότοπο crash.net, των αλλαγών στον χώρο του MOTO GP για το έτος του 2020.

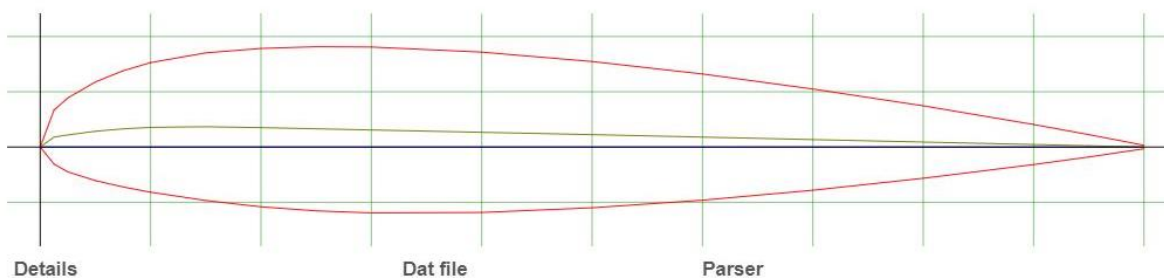


Εικόνα 24: Πρότυπο Σχεδίασης MOTO GP για το έτος του 2020 (21)

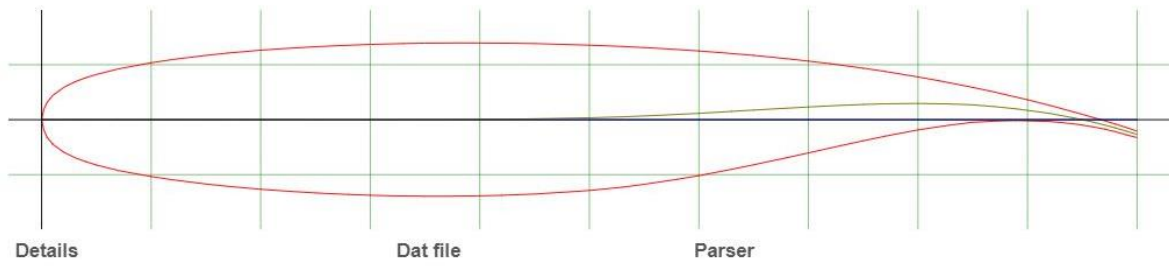
Σαφώς, από το 2020 έως την αγωνιστική σεζόν 2023-2024, έχουν επέλθει αλλαγές, παρόλα αυτά όμως η εν λόγω προσέγγιση κρίνεται ως μια πολύ καλή βάση σχεδίασης. Επιπρόσθετα, αναζητήθηκαν οι πρότυπες διαστάσεις και τα σχήματα των αεροτομών που επιλέχθηκαν για την μελέτη, ήτοι [NACA 6412, NACA 23015, NASA SC(2)-0714], από τον ιστότοπο Airfoil Tools (10). Βάσει αυτών των βασικών – πρότυπων αεροτομών και του πρότυπου σχήματος και μεγέθους του φτερού της μηχανής, έγιναν οι αντίστοιχες αναλογικές προσαρμογές στα τρισδιάστατα μοντέλα που θα αναπτυχθούν στις παρακάτω παραγράφους.



Εικόνα 25: Αεροτομή NACA 6412 (10)



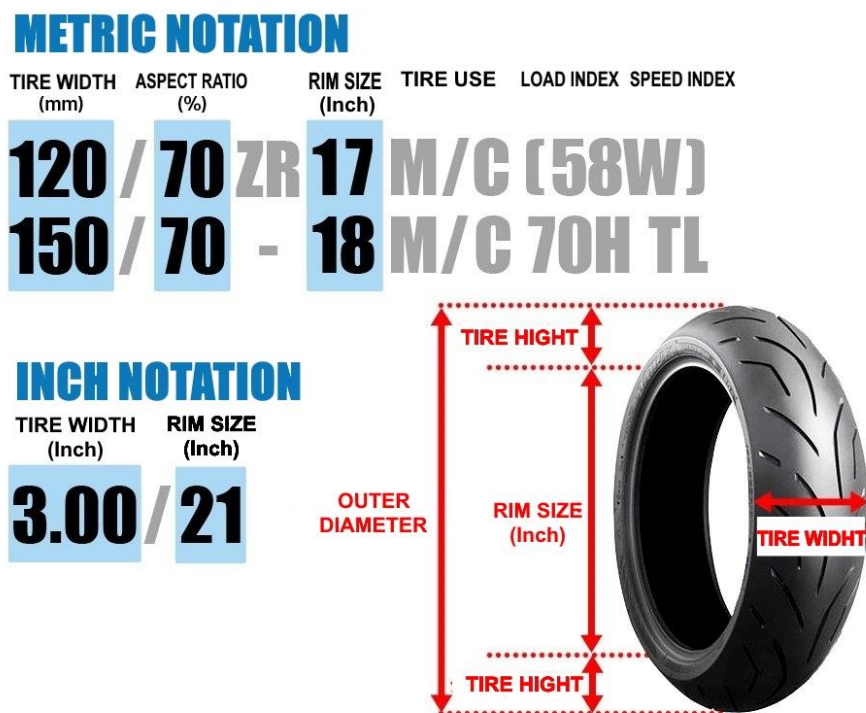
Εικόνα 26: Αεροτομή NACA 23015 (10)



Εικόνα 27: Αεροτομή NASA SC(2)-0714 (10)

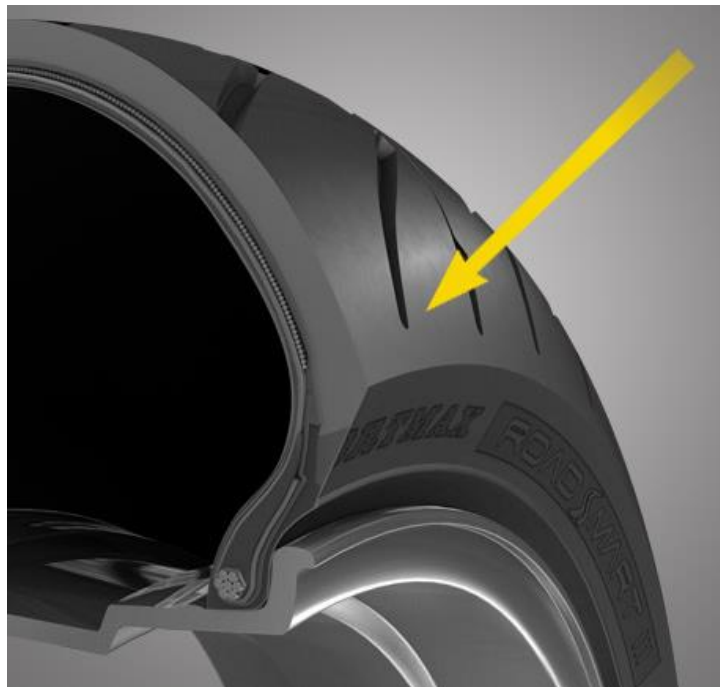
2.2 Σχεδίαση του Ελαστικού

Πρώτο βήμα για τη σχεδίαση του μοντέλου φτερό (spoiler) –αεροτομή - τροχός, ήταν η απόδοση σε τρισδιάστατο μηχανολογικό στο σχεδιαστικό περιβάλλον του προγράμματος CAD Solidworks®, του ελαστικού του τροχού της μηχανής. Αυτή η επιλογή έγινε με σκοπό αφενός για τη χρήση του ελαστικού σε απλοποιημένες αεροδυναμικές μελέτες, αφετέρου για την απλοποίηση του συστήματος «assembly» του τροχού σε δύο ξεχωριστά εξαρτήματα «parts». Αυτό του ελαστικού και της ζάντας. Αν και υπάρχουν πρότυπα μεγέθη ελαστικών σύμφωνα με τη διεθνή τυποποίηση, όπως φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα, παρόλα αυτά επιλέχθηκε σχεδίαση επί του σκαριφήματος των αλλαγών του 2020 στο MOTO GP.

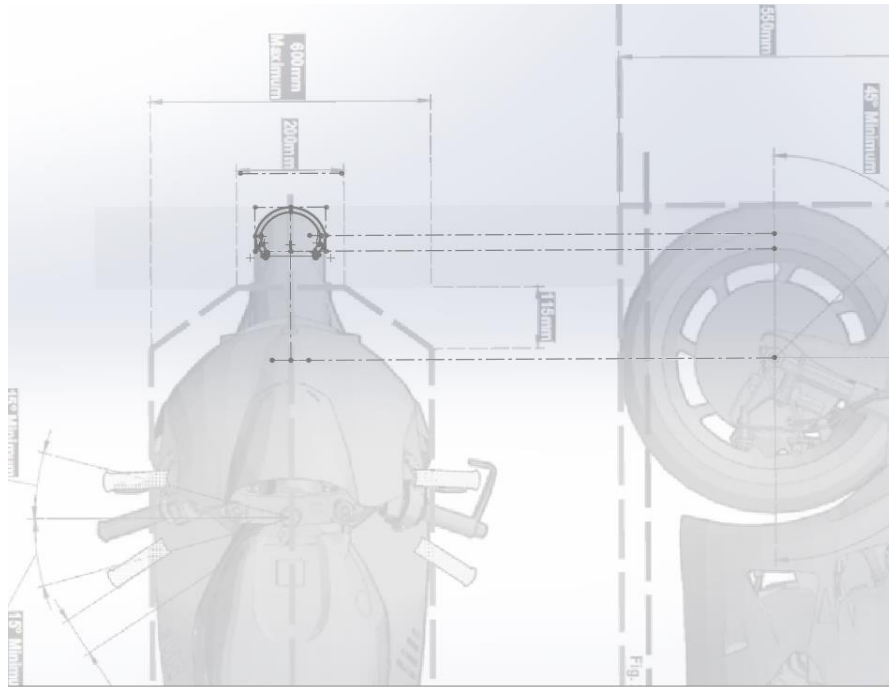


Εικόνα 28: Πρότυπα μεγέθη και τυποποίηση ελαστικών (22)

Αρχικά εισήχθη στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Solidworks ως εικόνα, το σκαριφήμα της πρότυπης μηχανής ΜΟΤΟ GΡ, ως βάση σχεδίασης. Έπειτα σχεδιάστηκε ένα βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα μήκους 200mm με σκοπό την προσαρμογή του μεγέθους του σκαριφήματος στην αναγραφόμενη σε αυτό διάσταση των 200mm που αφορά το πλάτος του μπροστά άξονα. Έπειτα έγινε η αποτύπωση της διατομής του ελαστικού πάνω στη φιγούρα του ελαστικού του σκαριφήματος. Στην σχεδίαση της διατομής ήταν πολύ χρήσιμη η παρακάτω εικόνα, όπου εμφανίζεται η τομή ενός ελαστικού και η ζάντας την οποία περιβάλλει.

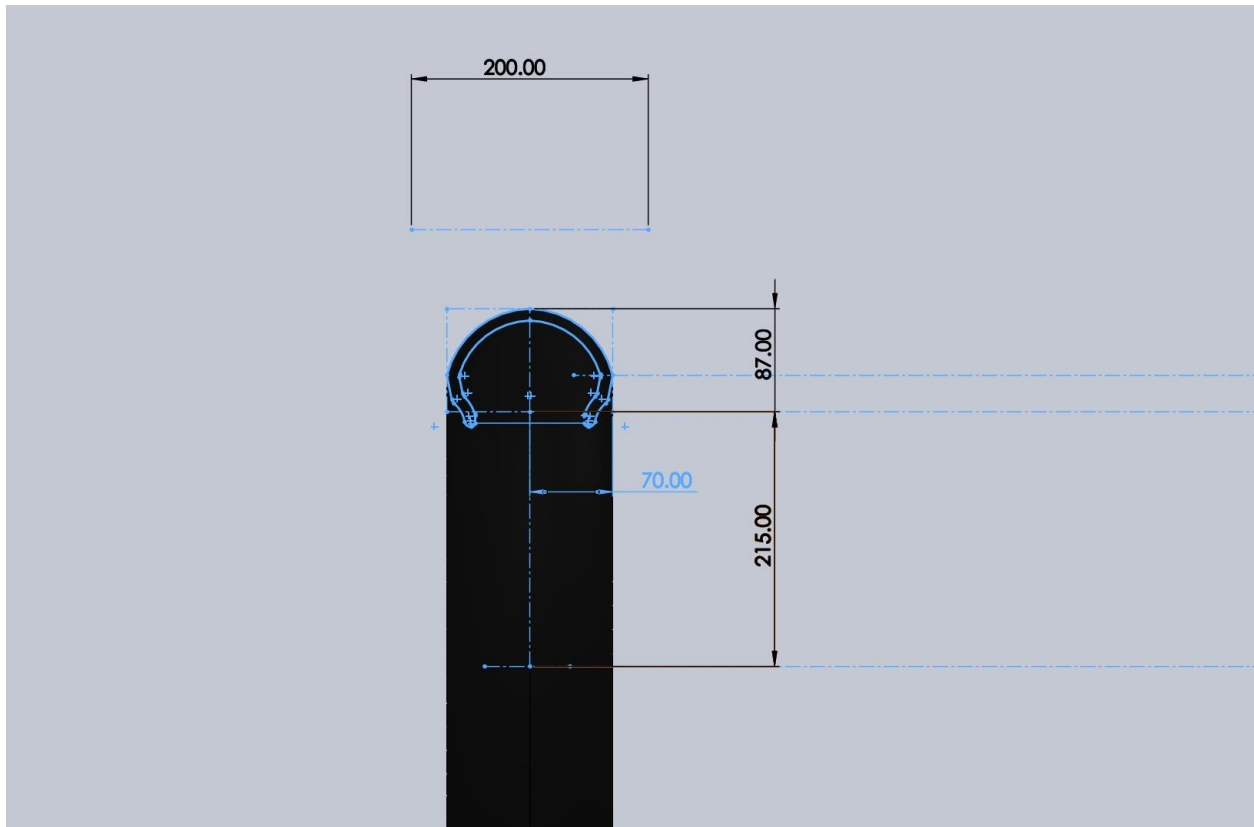


Εικόνα 29: Τομή Ελαστικού (23)

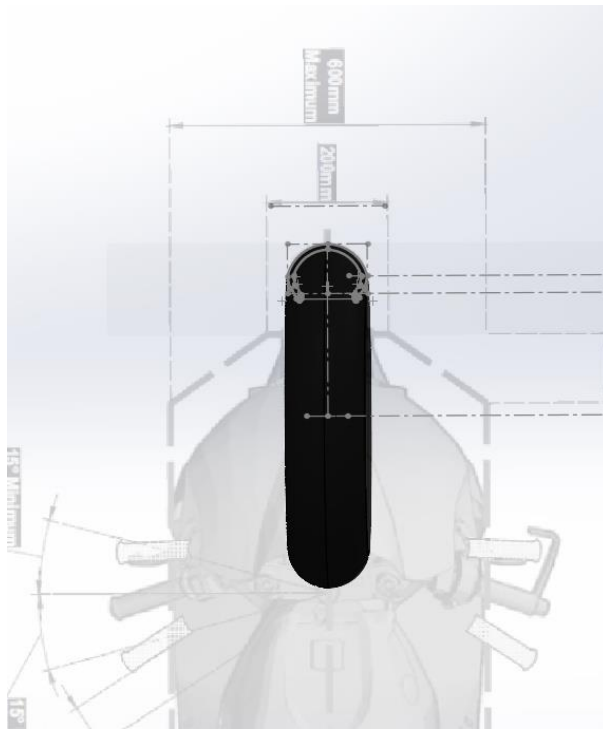


Εικόνα 30: Αποτύπωση διατομής ελαστικού στη φιγούρα του σκαριφήματος

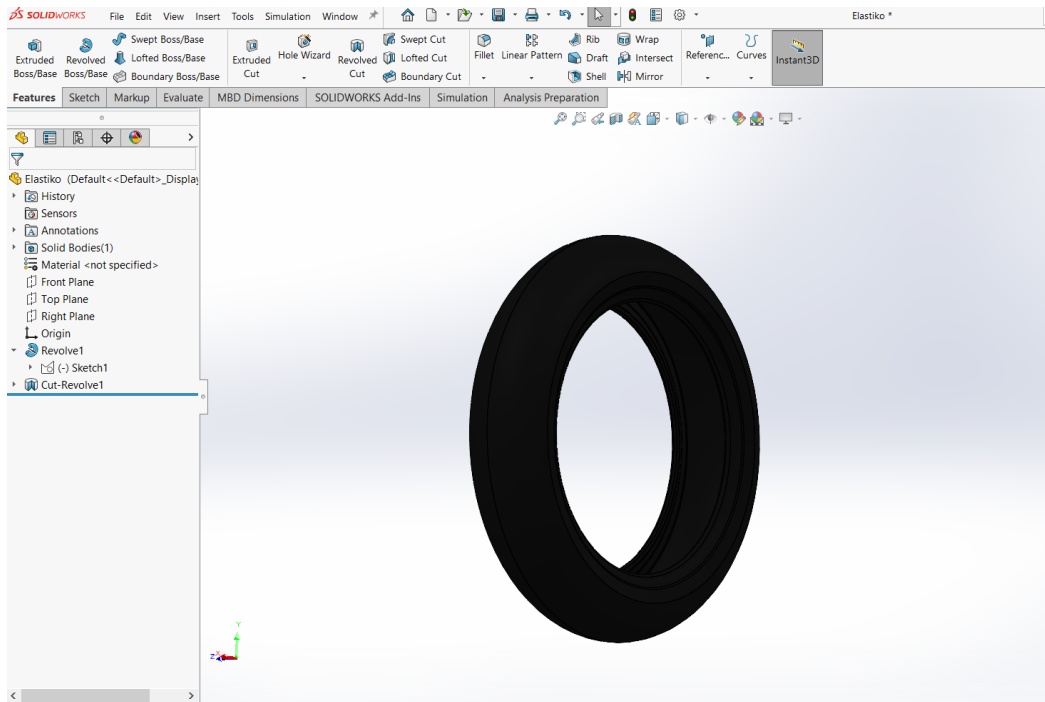
Στη συνέχεια με το εργαλείο-εντολή «Revolve Boss-Base» στο Solidworks, έγινε η περιστροφή της σχεδιασθείσας διατομής κατά 360°, με αποτέλεσμα την δημιουργία του ελαστικού.



Εικόνα 31: Ενεργοποίηση εργαλείου-εντολής «Revolve Boss-Base»



Εικόνα 32: Αποτέλεσμα εντολής «Revolve Boss-Base»



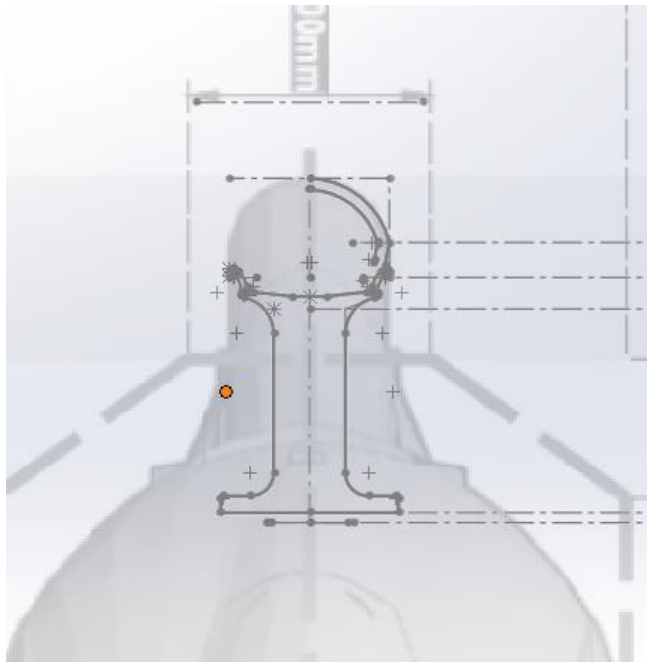
Εικόνα 33: Εικόνα Ελαστικού ως «Part» στο Solidworks



Εικόνα 34: Φωτορεαλιστική Εικόνα Ελαστικού στο Render του Solidworks

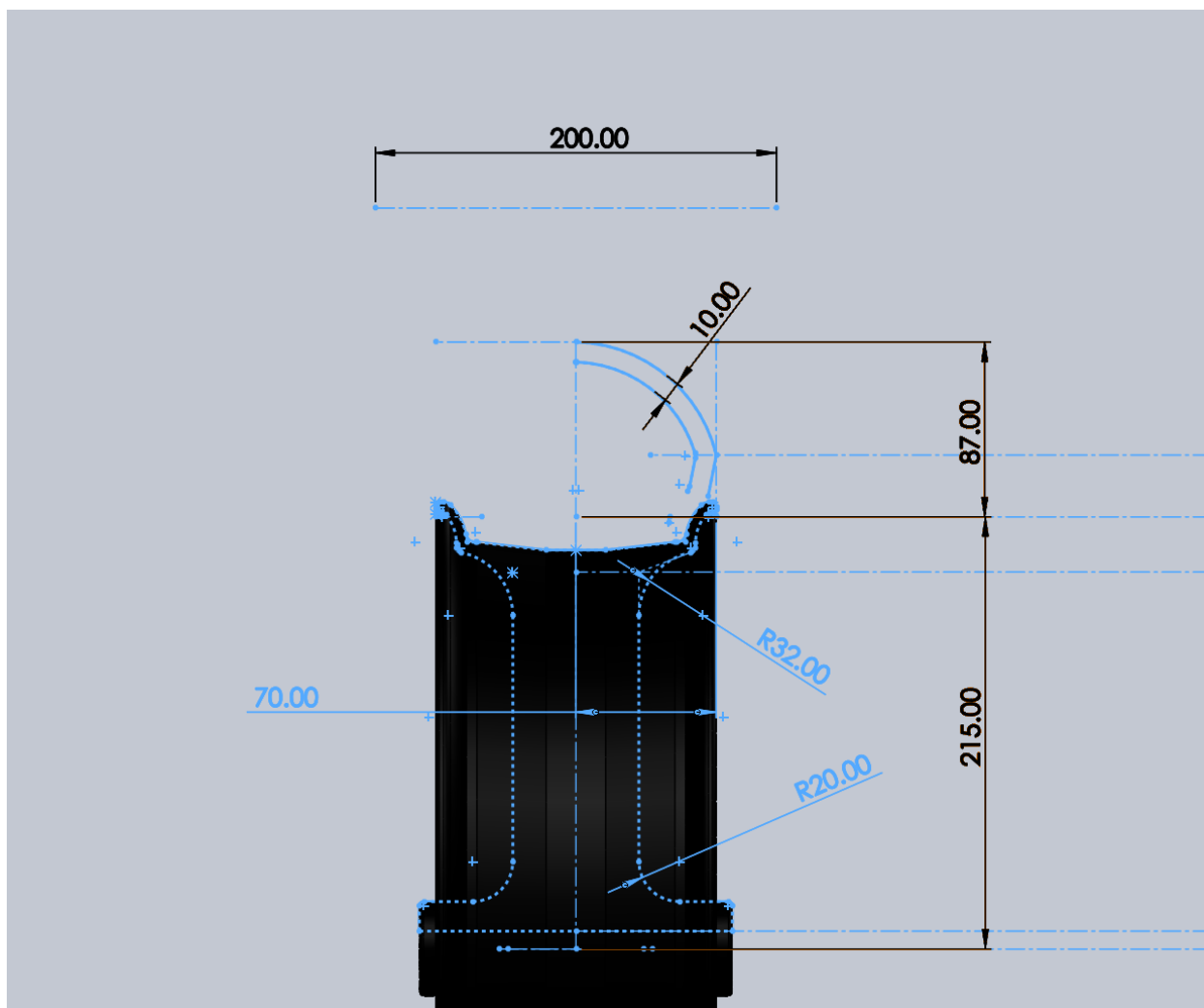
2.3 Σχεδίαση της Ζάντας

Επόμενο βήμα ήταν η σχεδίαση της ζάντας την οποία περιβάλλει το ελαστικό ως ξεχωριστό part. Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, έγινε η αποτύπωση της διατομής της ζάντας με την βοήθεια της ήδη υπάρχουσας διατομής του ελαστικού πάνω στη φιγούρα του σκαριφήματος. Και σε αυτή την περίπτωση, στην σχεδίαση της διατομής ήταν πολύ χρήσιμη η παραπάνω εικόνα, όπου εμφανίζεται η τομή του ελαστικού και της ζάντας.



Εικόνα 35: Αποτύπωση διατομής ζάντας στη φειγούρα του σκαριφήματος

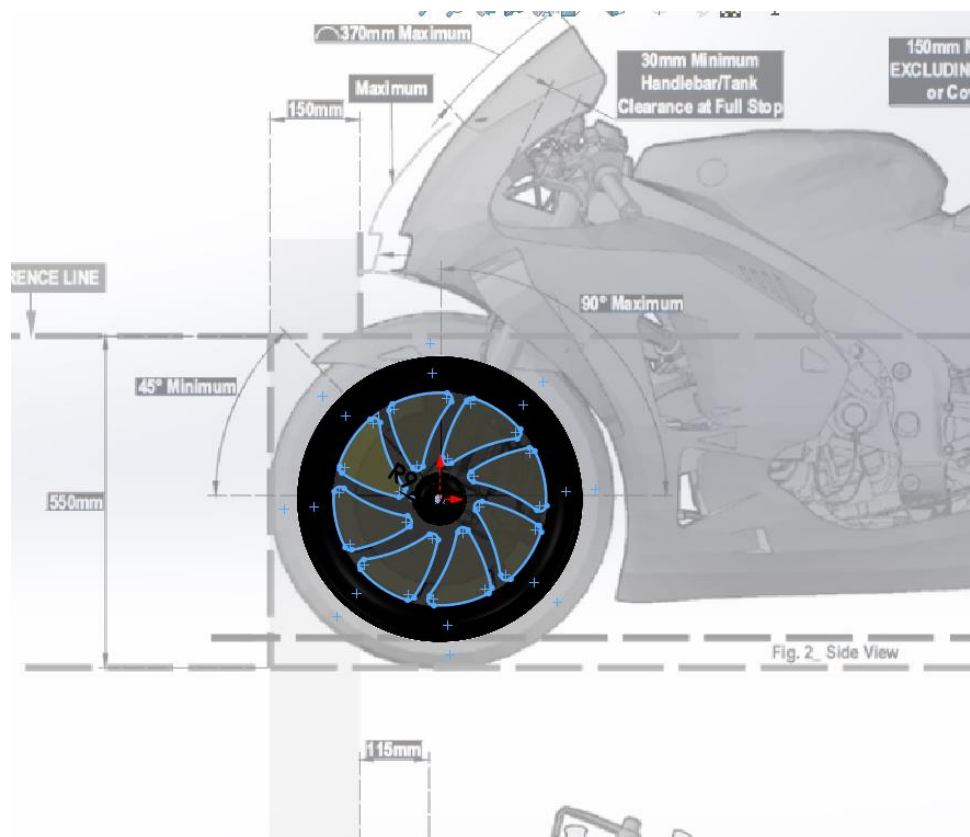
Στη συνέχεια και εδώ με το εργαλείο-εντολή «Revolve Boss-Base» στο Solidworks, έγινε η περιστροφή της σχεδιασθείσας διατομής κατά 360°, με αποτέλεσμα την δημιουργία της ζάντας.



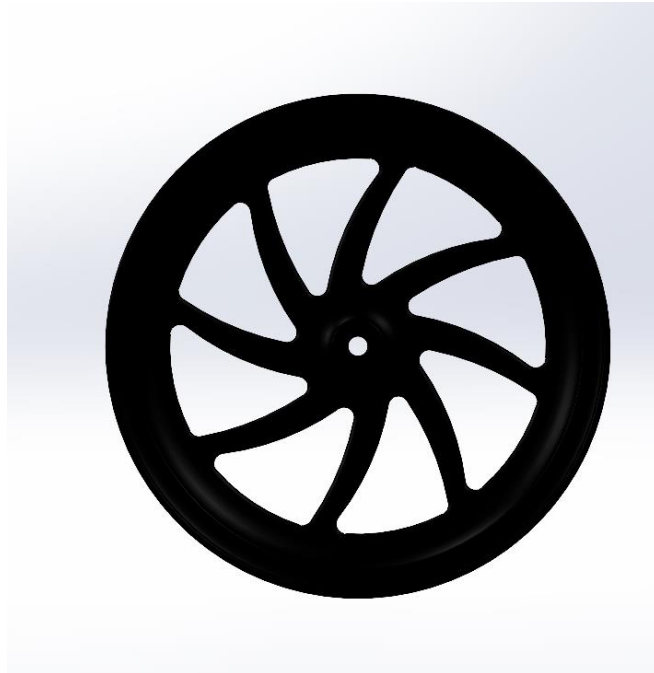
Εικόνα 36: Ενεργοποίηση εργαλείου-εντολής «Revolve Boss-Base»

Για την πληρέστερη αποτύπωση της ζάντας, αλλά και για ένα άρτιο οπτικό αποτέλεσμα, κρίθηκε σκόπιμη η σχεδίαση των ακτινών της ζάντας. Αν και η πολυπλοκότητα του σχήματος αύξανε και ενδεχομένως να απαιτούνταν επιπρόσθετη υπολογιστική ισχύς για την αεροδυναμική μελέτη της, παρόλα αυτά η εικόνα μιας ζάντας όπως αυτή είναι στην πραγματικότητα, δίνει την αίσθηση της πληρότητας αλλά και αποτελέσματα που προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Σχεδιάστηκαν ελλειπτικά σχήματα περιμετρικά του άξονα περιστροφής του τροχού, τα οποία έπαιζαν τον ρόλο των οπών. Αφού λοιπόν σχεδιάστηκαν αυτές οι 8 ελλειπτικές διατομές επί της πλάγιας όψης της ζάντας και χρησιμοποιώντας ως «μπούσουλα» την πρόοψη του σκαριφήματος, «κόπηκαν» με το εργαλείο-εντολή «Extruded Cut Base» του Solidworks. Έγινε η τομή των σχεδιασθέντων

διατομών κατά τον κάθετο άξονα επί της γενέτειρας της ζάντας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 37: Ενεργοποίηση εργαλείου-εντολής «Extruded Cut Base»



Εικόνα 38: Αποτέλεσμα της δημιουργίας της ζάντας.



Εικόνα 39: Φωτορεαλιστική Εικόνα Ζάντας στο Render του Solidworks

2.4 Συναρμολόγηση του Τροχού

Στη συνέχεια έπρεπε τα ήδη σχεδιασθέντα εξαρτήματα (parts) να συναρμολογηθούν σε ένα σύστημα. Το σύστημα του τροχού. Για να επιτευχθεί αυτό θα έπρεπε και τα δυο αυτά parts να εισαχθούν στο περιβάλλον του “Assembly” του Solidworks. Αφού έγινε αυτό, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες σχέσεις σύνδεσης-επαφής των εξαρτημάτων (“mates”). Το αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



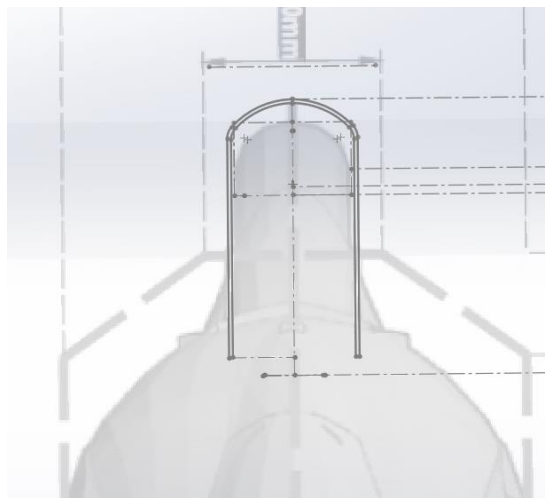
Εικόνα 40: Αποτέλεσμα της συναρμολόγησης του Τροχού



Εικόνα 41: Φωτορεαλιστική Εικόνα Τροχού στο Render του Solidworks

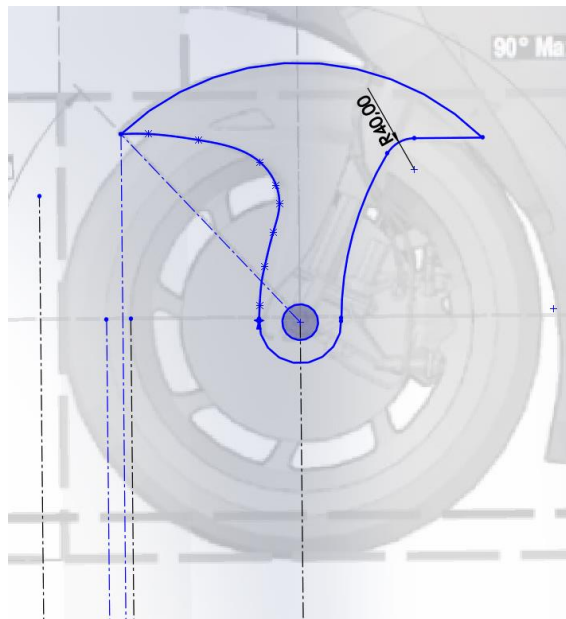
2.5 Σχεδίαση Φτερού (Spoiler)

Η σχεδίαση του φτερού το οποίο βρίσκεται άνωθεν του τροχού έγινε και αυτή ως ξεχωριστό part. Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, έγινε η αποτύπωση της διατομής του φτερού πάνω στη φιγούρα του σκαριφήματος.

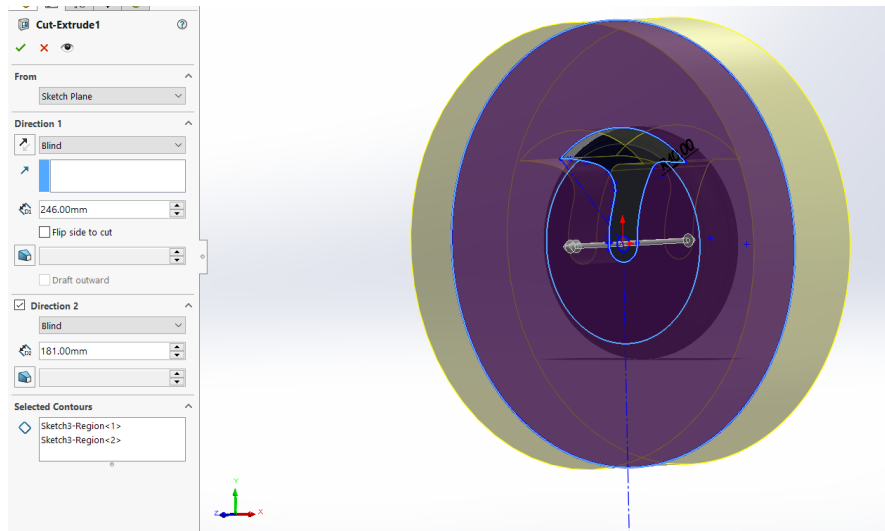


Εικόνα 42: Αποτύπωση διατομής φτερού στη φιγούρα του σκαριφήματος

Στη συνέχεια, όπως και στα περισσότερα από τα υπόλοιπα βήματα, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο-εντολή «Revolve Boss-Base» στο Solidworks, έγινε η περιστροφή της σχεδιασθείσας διατομής κατά 360°. Αυτό το βήμα έγινε με σκοπό την δημιουργία ενός κελύφους ουσιαστικά περιμετρικά του τροχού και στη συνέχεια έγινε η τομή του στο σχήμα με του φτερού. Αφού λοιπόν δημιουργήθηκε το παραπάνω κέλυφος περιμετρικά του τροχού σχεδιάστηκε η «φόρμα» - διατομή στο σχήμα με του φτερού, χρησιμοποιώντας ως «μπούσουλα» την πρόοψη του σκαριφήματος. Η εν λόγω διατομή «κόπηκε» με το εργαλείο-εντολή «Extruded Cut Base» του Solidworks, καθ' όλο το μήκος του κάθετου άξονα (“through all”), επί της γενέτειρας του τροχού όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



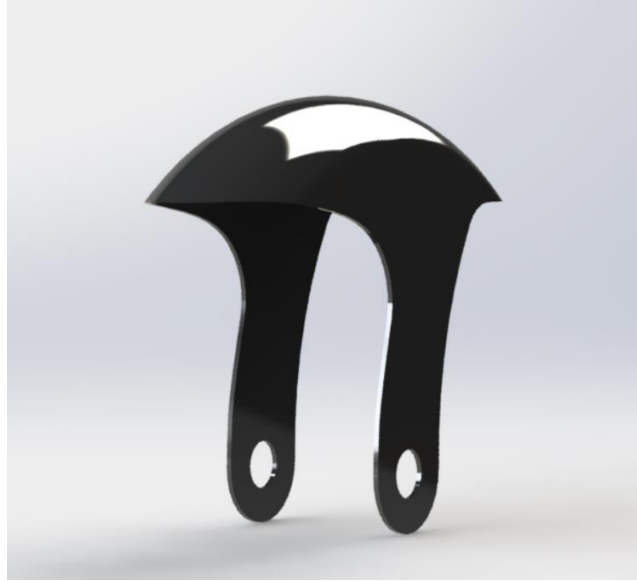
Εικόνα 43: Σχεδίαση διατομής φτερού



Εικόνα 44: Ενεργοποίηση εργαλείου-εντολής «Extruded Cut Base»



Εικόνα 45: Πρόοψη φτερού



Εικόνα 46: Φωτορεαλιστική Εικόνα Φτερού στο Render του Solidworks

2.6 Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού - Φτερού

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η απόδοση της αρχική μορφής του φτερού-spoiler η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βάση, ως αρχική-υφιστάμενη κατάσταση δηλαδή, στην οποία στη συνέχεια θα προστεθούν εκατέρωθεν οι αεροτομές. Για την ολοκλήρωση της δημιουργίας της εν λόγω βάσης μελέτης, έπρεπε το ήδη σχεδιασθέν εξάρτημα (part) του φτερού να συναρμολογηθεί με το σύστημα (assembly) του τροχού σε ένα νέο σύστημα. Το σύστημα «βάσης», τροχού - φτερού (spoiler). Για να επιτευχθεί αυτό θα έπρεπε και τα δυο αυτά αρχεία να εισαχθούν στο περιβάλλον του “Assembly” του Solidworks. Αφού έγινε αυτό, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες σχέσεις σύνδεσης-επαφής των εξαρτημάτων (“mates”). Το αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 47: Αποτέλεσμα της συναρμολόγησης του συστήματος βάσης (πρόοψη)



Εικόνα 48: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος βάσης (Πλάγια όψη)

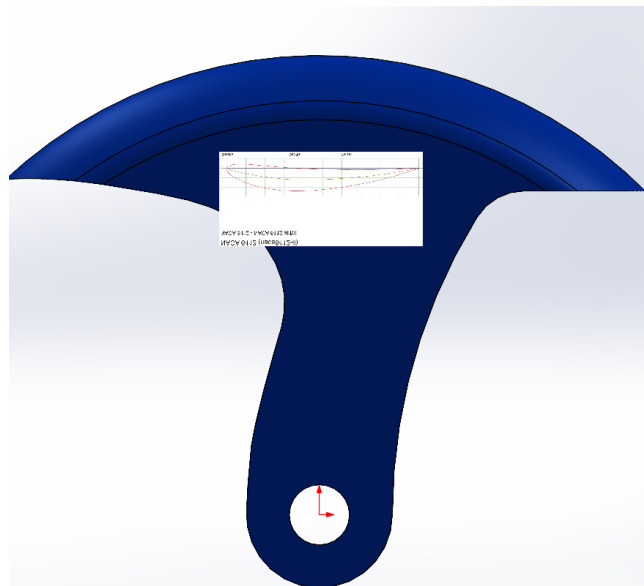


Εικόνα 49: Φωτορεαλιστική Εικόνα υπερσυστήματος βάσης (3D όψη)

2.7 Σχεδίαση Φτερού (Spoiler) με Αεροτομή NACA 6412

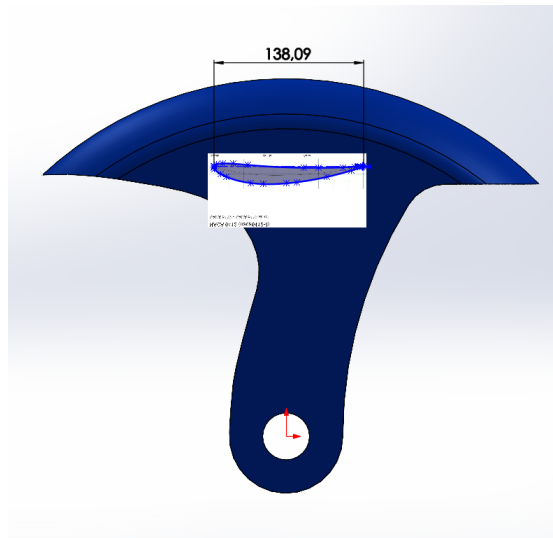
Αφού πλέον υφίσταται το φτερό (spoiler) «βάση», το φτερό δηλαδή που δεν έχει κάποια επιπλέον επιφάνεια ή πτερύγιο επί αυτού, δύναται η δυνατότητα αεροδυναμικής μελέτης του, η οποία θα αποτελέσει και την βάση της υφιστάμενης κατάστασης. Η εν λόγω αεροδυναμική μελέτη θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Για την συνέχεια όμως της μελέτης συνεισφοράς ανεστραμμένων αεροτομών στην σταθερότητα και την πρόσφυση κατά την οδήγηση μιας μηχανής επιπέδου MOTO GP, θα πρέπει να προστεθούν εκατέρωθεν του φτερού «βάσης» , πτερύγια έχοντα ως διατομή πρότυπες αεροτομές. Η πρώτη αεροτομή που επιλέχθηκε είναι η NACA 2146, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της οποίας καθώς και οι λόγοι επιλογής της να έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Με παρόμοιο τρόπο όπως περιγράφηκε και παραπάνω, επιλέχθηκε μια παρειά (πλευρά) του φτερού «βάσης» ως επίπεδο σχεδίασης και επί αυτού επικολλήθηκε ως φωτογραφία η αεροτομή ανεστραμμένη. Αυτή η αναστροφή της φωτογραφίας έγινε διότι το αρχικό σχήμα της αεροτομής, με τα κοίλα προς τα πάνω δηλαδή,

επιφέρει άντωση (lift) κάτι που στην υπόψη μελέτη, όχι απλά δεν είναι αποδεκτό αλλά είναι το ακριβώς αντίθετο του επιθυμητού. Στην μελέτη εισαγωγής-προσθήκης πτερυγίου για αύξηση της σταθερότητας και πρόσφυσης της μηχανής τύπου MOTO GP, η αεροτομή θα πρέπει να τοποθετηθεί ανεστραμμένη ώστε να προσφέρει άντωση προς το έδαφος. Η προαναφερθείσα ενέργεια φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



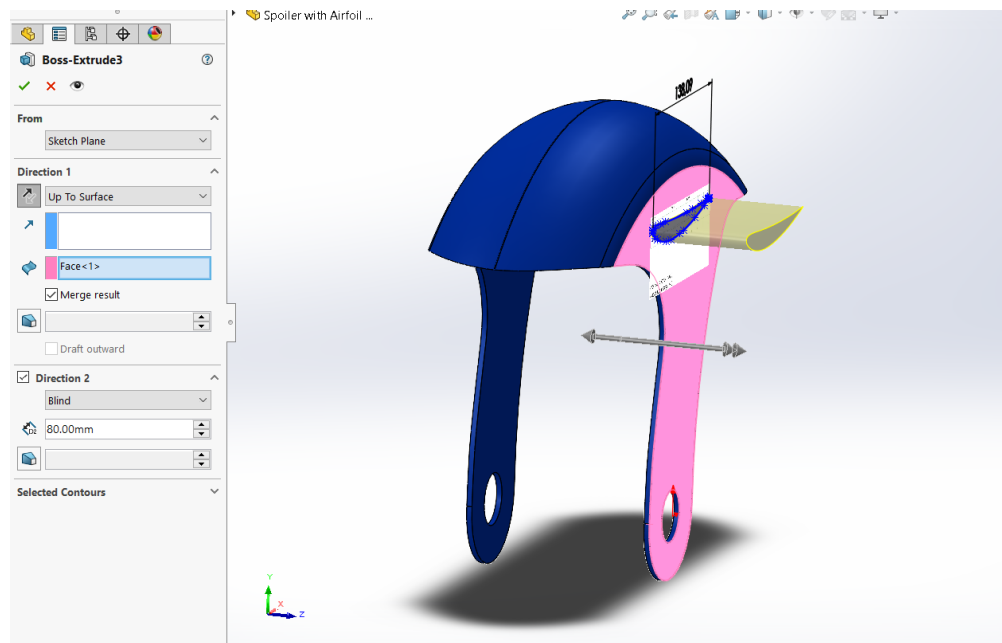
Εικόνα 50: Επικόλληση φιγούρας αεροτομής NACA 6412 στο φτερό «βάσης»

Πάνω στη φωτογραφία της αεροτομής η οποία μεγεθύνθηκε με τρόπο ώστε το μήκος χορδής της να είναι 138 mm, σχεδιάστηκε με το εργαλείο “spline”, η διατομής της πάνω στο σχεδιασθέν επίπεδο.



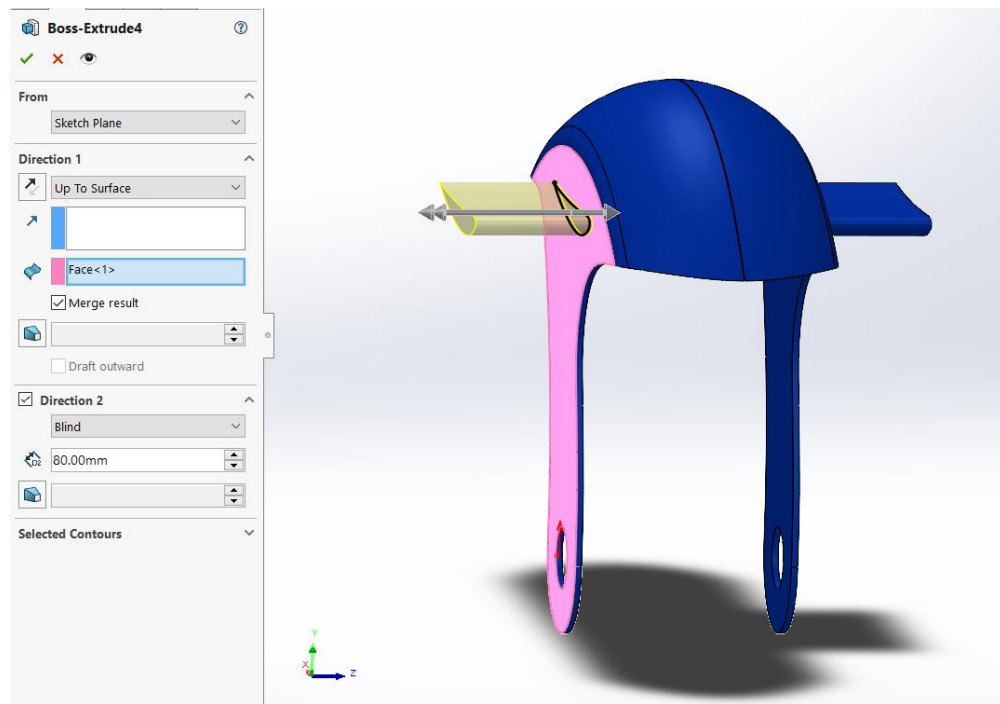
Εικόνα 51: Σχεδίαση αεροτομής NACA 6412 στο φτερό «βάσης»

Έπειτα με το εργαλείο “Boss Extruded Boss-Base” έγινε εξαγωγή όγκου κατά 80mm από το επίπεδο σχεδίασης. Το μήκος αυτό, επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο, σύμφωνα με την σχέση χορδής αεροτομής και πλάτους φτερού.



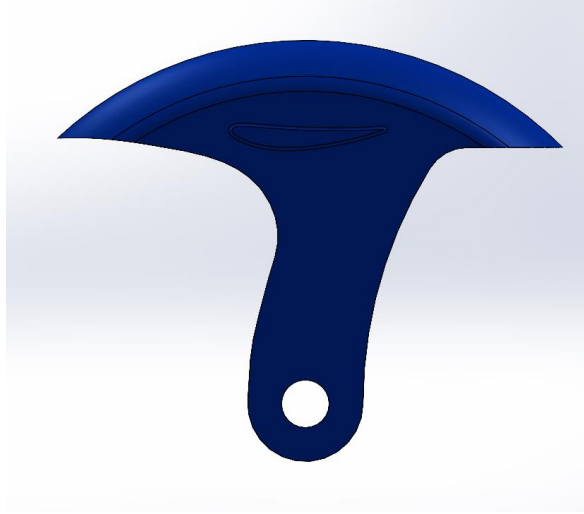
Εικόνα 52: Εξαγωγή όγκου αεροτομής NACA 6412 από τη μια πλευρά του φτερού «βάσης»

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο έγινε εξαγωγή όγκου κατά 80mm από την ακριβώς αντιδιαμετρική παρειά του φτερού βάσης. Σε αυτό βέβαια δεν έγινε εξαρχής σχεδίασης αεροτομής αλλά με αντιγραφή του σχεδίου “sketch”. Με την εντολή “convert entities”.

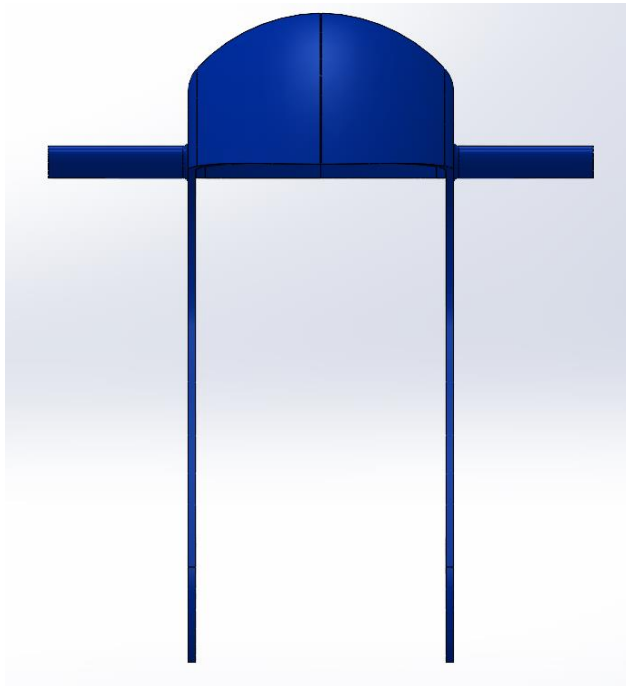


Εικόνα 53: Εξαγωγή όγκου αεροτομής NACA 6412 από τη μια πλευρά του φτερού «βάσης»

Το χρώμα που επιλέχθηκε για το φτερό που φέρει αεροτομή NACA 2146, ήταν το μπλε, και αυτό καθαρά για λόγους εποπτείας της έρευνας. Το τελικό αποτέλεσμα για το υπόψη φτερό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 54: Φτερό με αεροτομή NACA 6412 (Πρόοψη)



Εικόνα 55: Φτερό με αεροτομή NACA 6412 (Αριστερή Πλάγια Όψη)



Εικόνα 56: Φωτορεαλιστική Εικόνα αεροτομή NACA 6412 (3D όψη)



Εικόνα 57: Φωτορεαλιστική Εικόνα αεροτομή NACA 6412 (Κάτοψη)

2.8 Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NACA 6412

Για την ολοκλήρωση της δημιουργίας της του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NACA 6412, έπρεπε όπως και σε παραπάνω παράγραφο και τα δυο αυτά αρχεία (τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 6412) να εισαχθούν στο περιβάλλον του “Assembly” του Solidworks. Αφού έγινε αυτό, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες σχέσεις σύνδεσης-επαφής των εξαρτημάτων (“mates”). Το αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 58: Συστήμα “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 6412 (πρόοψη)



Εικόνα 59: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 6412 (πρόοψη)



Εικόνα 60: Φωτορεαλιστική Εικόνα υπερσυστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 6412 (3D όψη)



Εικόνα 61: Φωτορεαλιστική Εικόνα υπερσυστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 6412 (Αριστερή Πλάγια Όψη)

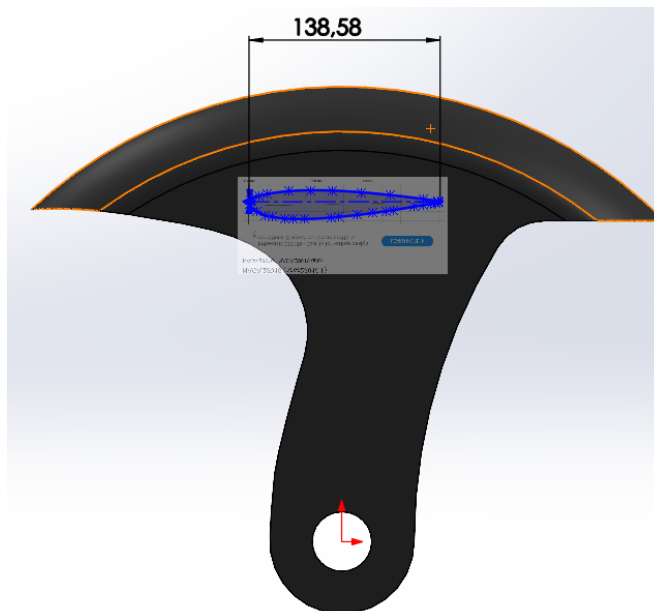
2.9 Σχεδίαση του Φτερού με Αεροτομή NACA 23015

Ως δεύτερη χαρακτηριστική αεροτομή για την μελέτη, επιλέχθηκε η NACA 23015, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της οποίας καθώς και οι λόγοι επιλογής της να έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Με παρόμοιο τρόπο όπως περιγράφηκε και παραπάνω, επιλέχθηκε μια παρειά (πλευρά) του φτερού «βάσης» ως επίπεδο σχεδίασης. Επί αυτής επικολλήθηκε ως φωτογραφία η αεροτομή ανεστραμμένη όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



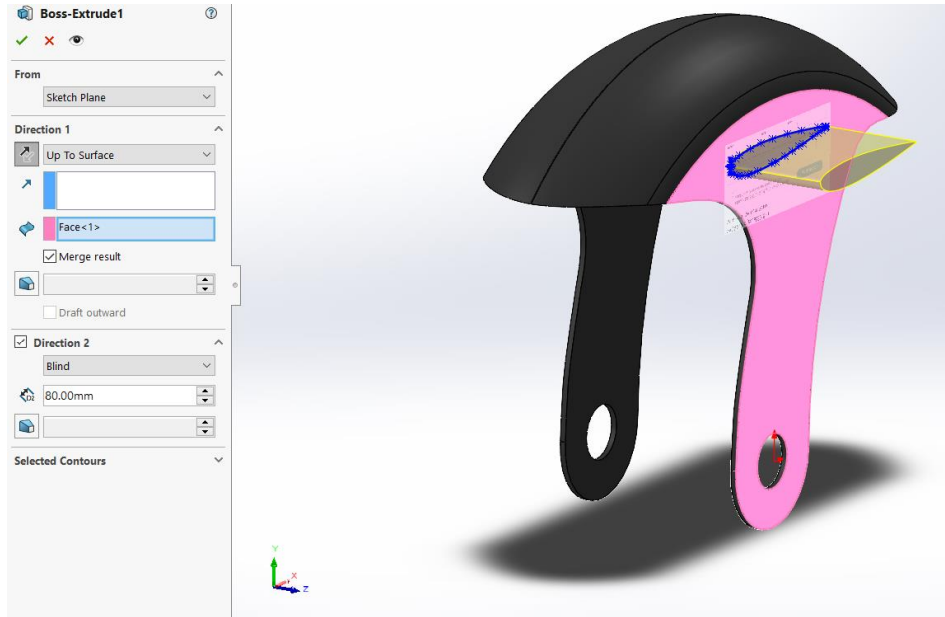
Εικόνα 62: Επικόλληση φιγούρας αεροτομής NACA 23015 στο φτερό «βάσης»

Πάνω στη φωτογραφία της αεροτομής η οποία μεγεθύνθηκε με τρόπο ώστε το μήκος χορδής της να είναι 138,58 mm, σχεδιάστηκε με το εργαλείο “spline”, η διατομή της πάνω στο σχεδιασθέν επίπεδο.

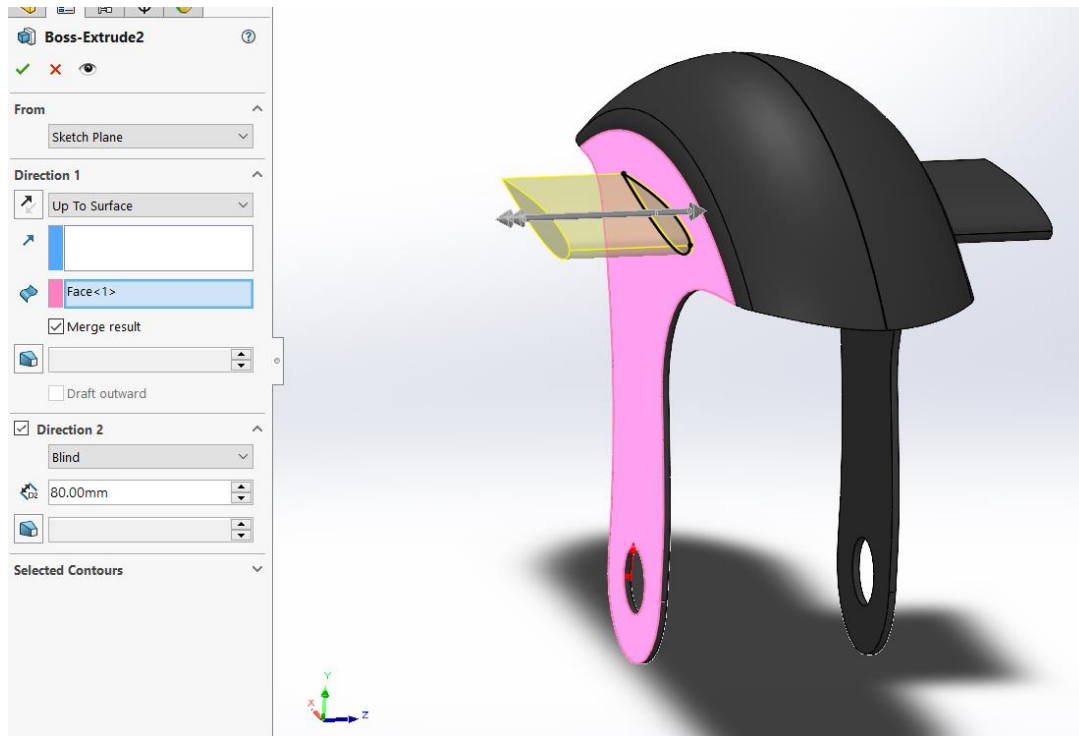


Εικόνα 63: Σχεδίαση αεροτομής NACA 23015 στο φτερό «βάσης»

Έπειτα με το εργαλείο “Boss Extruded Boss-Base” έγινε εξαγωγή όγκου κατά 80mm από το επίπεδο σχεδίασης. Το μήκος αυτό, επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο, σύμφωνα με την σχέση χορδής αεροτομής και πλάτους φτερού.



Εικόνα 64: Εξαγωγή όγκου αεροτομής NACA 23015 από τη μια πλευρά του φτερού «βάσης»

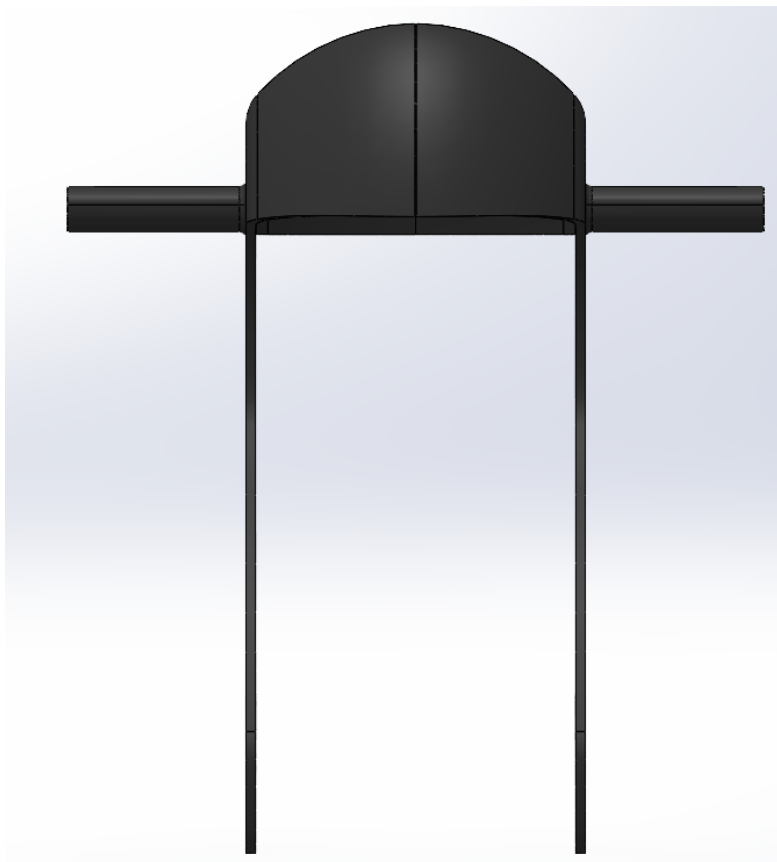


Εικόνα 65: Εξαγωγή όγκου αεροτομής NACA 23015 από τη μια πλευρά του φτερού «βάσης»

Το χρώμα που επιλέχθηκε για το φτερό που φέρει αεροτομή NACA 23015, ήταν το γκρι, και αυτό όπως και στην αεροτομή NACA 2146 καθαρά για λόγους εποπτείας της έρευνας. Το τελικό αποτέλεσμα για το υπόψη φτερό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες,



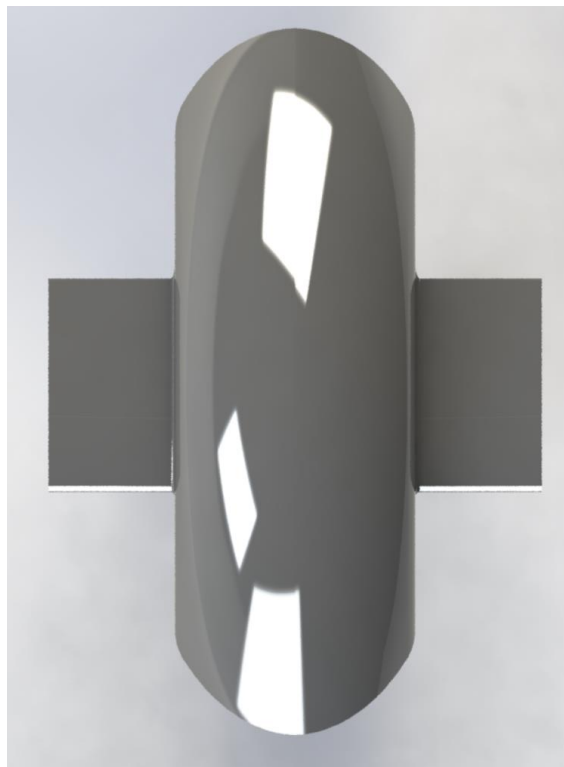
Εικόνα 66: Φτερό με αεροτομή NACA 23015 (Πρόοψη)



Εικόνα 67: Φτερό με αεροτομή NACA 23015 (Αριστερή Πλάγια Όψη)



Εικόνα 68: Φωτορεαλιστική Εικόνα αεροτομή NACA 23015 (3D όψη)



Εικόνα 69: Φωτορεαλιστική Εικόνα αεροτομή NACA 23015 (Κάτοψη)

2.10 Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NACA 23015

Για την ολοκλήρωση της δημιουργίας της του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NACA 23015, έπρεπε και όπως και σε παραπάνω παράγραφο και τα δυο αυτά αρχεία (τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 23015) να εισαχθούν στο περιβάλλον του “Assembly” του Solidworks. Αφού έγινε αυτό, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες σχέσεις σύνδεσης-επαφής των εξαρτημάτων (“mates”). Το αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 70: Σύστημα “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 23015 (πρόοψη)



Εικόνα 71: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 23015 (πρόοψη)



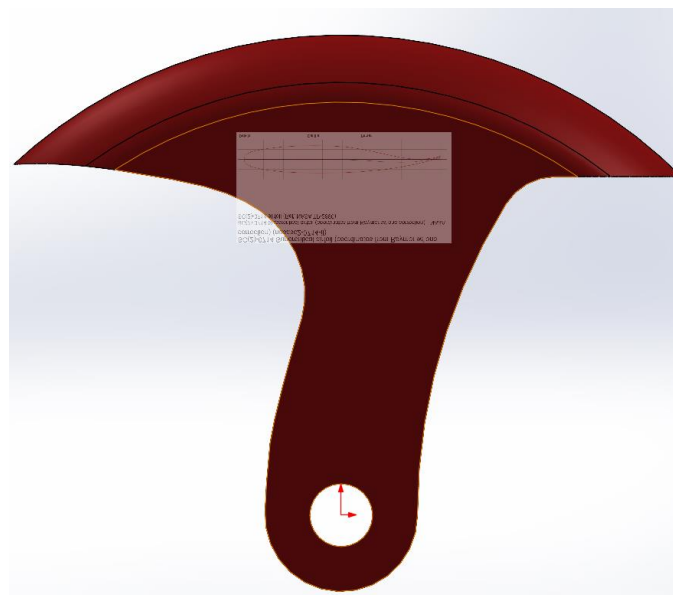
Εικόνα 72: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 23015 (3D όψη)



Εικόνα 73: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος "Τροχός και φτερό με αεροτομή NACA 23015 (Αριστερή Πλάγια Όψη)

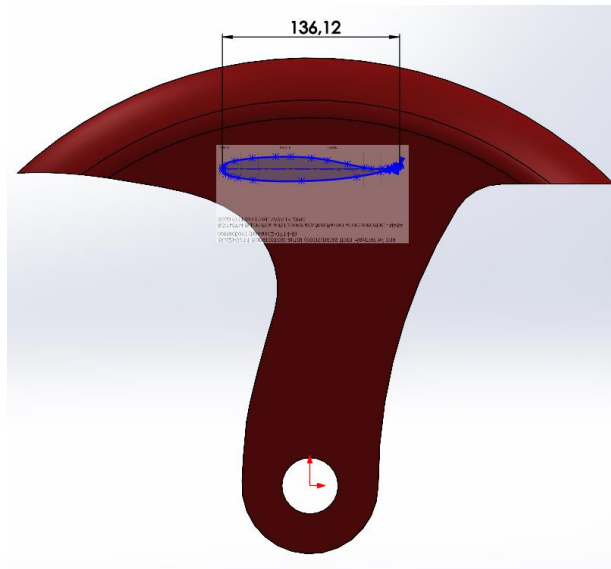
2.10 Σχεδίαση του Φτερού με Αεροτομή NASA SC(2)-0714

Ως τρίτη και τελευταία χαρακτηριστική αεροτομή για την μελέτη, επιλέχθηκε η NASA SC(2)-0714, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της οποίας καθώς και οι λόγοι επιλογής της να έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Με παρόμοιο τρόπο όπως περιγράφηκε και παραπάνω, επιλέχθηκε μια παρειά (πλευρά) του φτερού «βάσης» ως επίπεδο σχεδίασης. Επί αυτής επικολλήθηκε ως φωτογραφία η αεροτομή ανεστραμμένη όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



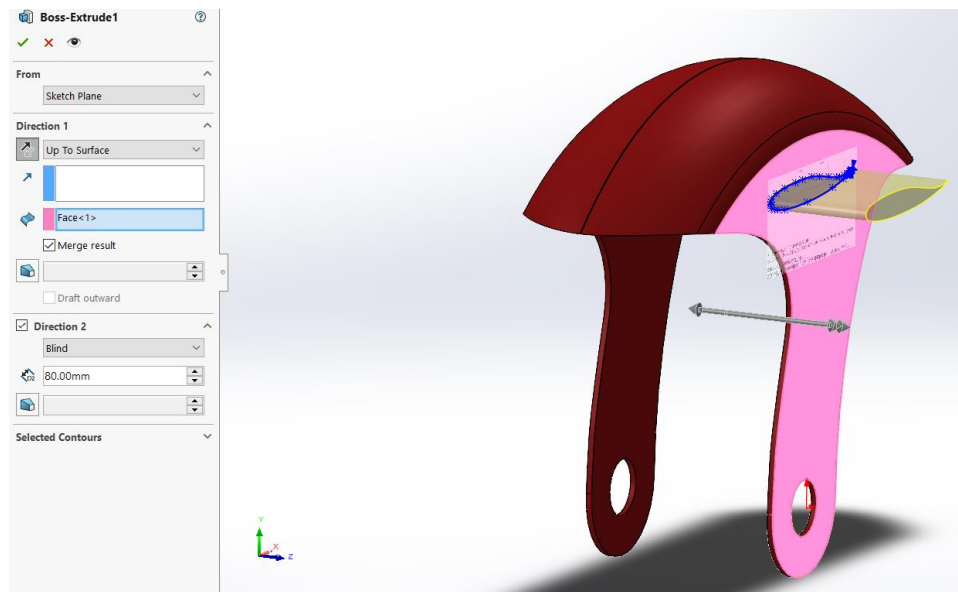
Εικόνα 74: Επικόλληση φιγούρας αεροτομής NASA SC(2)-0714 στο φτερό «βάσης»

Πάνω στη φωτογραφία της αεροτομής η οποία μεγεθύνθηκε με τρόπο ώστε το μήκος χορδής της να είναι 136,12 mm, σχεδιάστηκε με το εργαλείο “spline”, η διατομής της πάνω στο σχεδιασθέν επίπεδο.

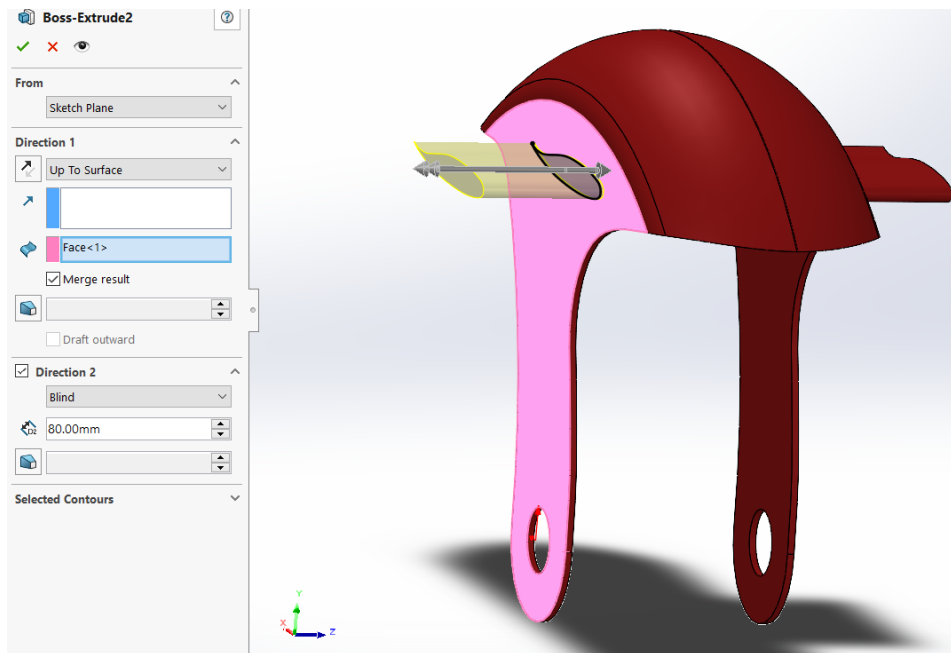


Εικόνα 75: Σχεδίαση αεροτομής NASA SC(2)-0714 στο φτερό «βάσης»

Έπειτα με το εργαλείο “Boss Extruded Boss-Base” έγινε εξαγωγή όγκου κατά 80mm από το επίπεδο σχεδίασης. Το μήκος αυτό, επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο, σύμφωνα με την σχέση χορδής αεροτομής και πλάτους φτερού.

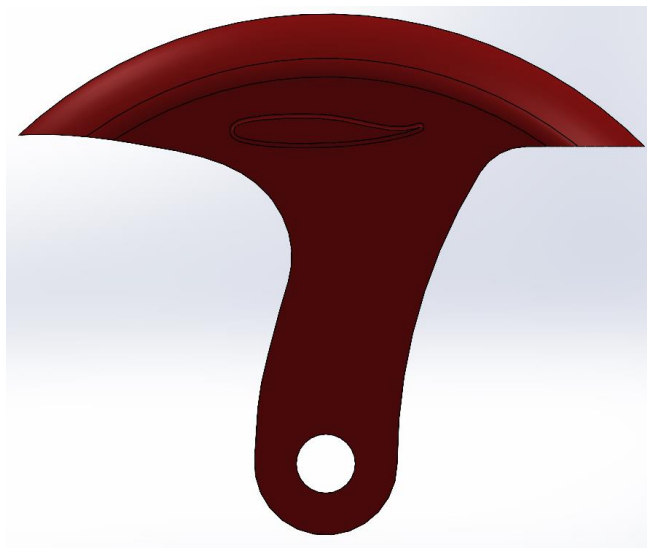


Εικόνα 76: Εξαγωγή όγκου αεροτομής NASA SC(2)-0714 από τη μια πλευρά του φτερού «βάσης»

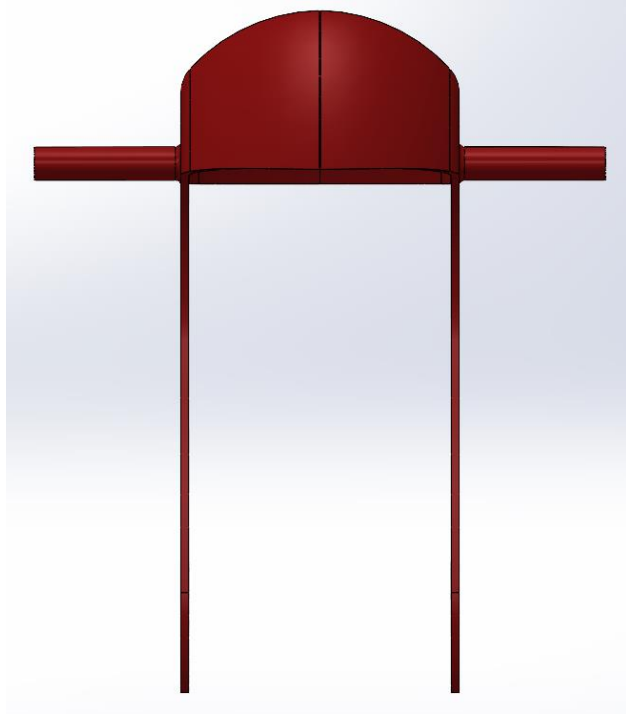


Εικόνα 77: Εξαγωγή όγκου αεροτομής NASA SC(2)-0714 από τη μια πλευρά του φτερού «βάσης»

Το χρώμα που επιλέχθηκε για το φτερό που φέρει αεροτομή NASA SC(2)-0714, ήταν το **κόκκινη**, και αυτό όπως και στις άλλες 2 αεροτομές καθαρά για λόγους εποπτείας της έρευνας. Το τελικό αποτέλεσμα για το υπόψη φτερό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες,



Εικόνα 78: Φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714 (Πρόοψη)



Εικόνα 79: Φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714 (Αριστερή Πλάγια Όψη)



Εικόνα 80: Φωτορεαλιστική Εικόνα αεροτομή NASA SC(2)-0714 (3D όψη)



Εικόνα 81: Φωτορεαλιστική Εικόνα αεροτομή NASA SC(2)-0714 (Κάτοψη)

2.11 Συναρμολόγηση του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NASA SC(2)-0714

Για την ολοκλήρωση της δημιουργίας της του Συστήματος Τροχού – Φτερού με Αεροτομή NASA SC(2)-0714 , έπρεπε και όπως και σε παραπάνω παράγραφο και τα δυο αυτά αρχεία (τροχός και φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714) να εισαχθούν στο περιβάλλον του “Assembly” του Solidworks. Αφού έγινε αυτό, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες σχέσεις σύνδεσης-επαφής των εξαρτημάτων (“mates”). Το αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 82: Συστήμα "Τροχός και φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714 (πρόοψη)



Εικόνα 83: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος "Τροχός και φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714 (πρόοψη)



Εικόνα 84: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714 (3D όψη)



Εικόνα 85: Φωτορεαλιστική Εικόνα συστήματος “Τροχός και φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714 (Αριστερή Πλάγια Όψη)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μέσω μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής η ανάλυση των τριών αεροτομών και των spoiler που τις φέρουν. Αυτή θα γίνει ακολουθώντας την παρακάτω μεθοδολογία:

- Εξέταση και των τριών αεροτομών σε δυοδιάστατο πεδίο ροής με στόχο την εκτίμηση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων οπισθέλκουσας. Απόρριψη της αεροτομής με την χαμηλότερη επίδοση.
- Εξέταση του φτερού χωρίς αεροτομή και με δύο από τις τρεις αεροτομές και σύγκριση των δεδομένων.

Η ανάλυση σε όλες τις περιπτώσεις έγινε για ροή ρευστού με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Σχετική ταχύτητα ρευστού: 45 m/s
- Ρευστό αέρα σε κανονικές συνθήκες (πίεση 101325 Pa και θερμοκρασία 293 K)
- Τύρβη με ένταση 0.1% και μήκος 0.2mm.
- Γωνία προσβολής μηδέν μοίρες.

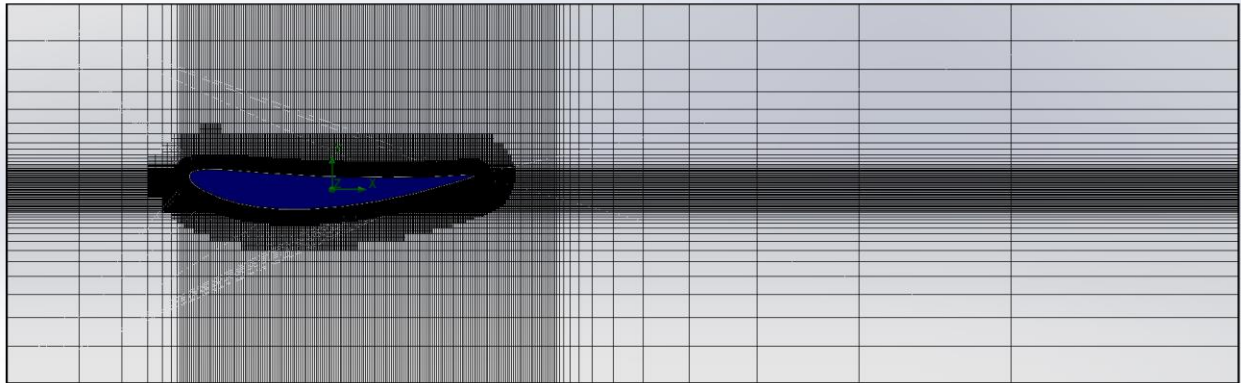
Η επίλυση του πεδίου ροής έγινε με χρήση του προγράμματος CAD/CAE Solidworks για συμπιεστό ρευστό. Ειδικότερα για την μοντελοποίηση της τύρβης αναφέρεται ότι το πρόγραμμα χρησιμοποιεί το μοντέλο τύρβης k-ε.

3.1 Δισδιάστατη ανάλυση αεροτομών

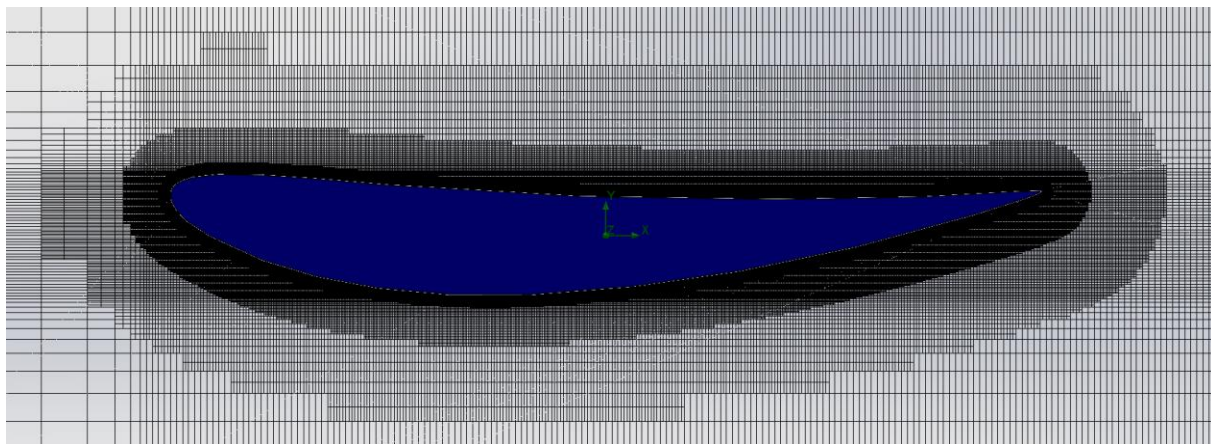
3.1.1 NACA 6412

Για την ανάλυση της αεροτομής δημιουργήθηκε γύρω της ένα πεδίο ροής διαστάσεων 0.5 x 0.18 μέτρα. Για την επίτευξη της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ανάλυσης το πεδίο χωρίστηκε σε πλέγμα τετραγωνικών κελιών. Για την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας στο πλέγμα υλοποιήθηκε πύκνωση στις περιοχές που η μεταβολή των ρευστοδυναμικών μεγεθών είναι πιο έντονη, ήτοι κοντά στην επιφάνεια της αεροτομής. Ειδικότερα το πλέγμα πυκνώνει σταδιακά καθώς πλησιάζει

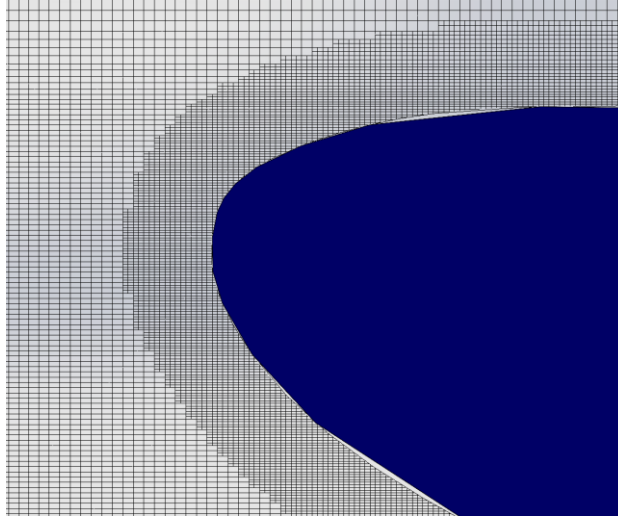
την αεροτομή και στις δύο διαστάσεις ενώ παράλληλα υπάρχει σταδιακή πύκνωση προς την επιφάνεια της αεροτομής με στόχο την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στο οριακό στρώμα το οποίο δημιουργείτε γύρο από αυτή. Το πλέγμα παρουσιάζεται στις Εικόνες 87 έως 89, ενώ η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και στις άλλες δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 86: Πλέγμα πεδίου ροής γύρο από την αεροτομή NACA 6412



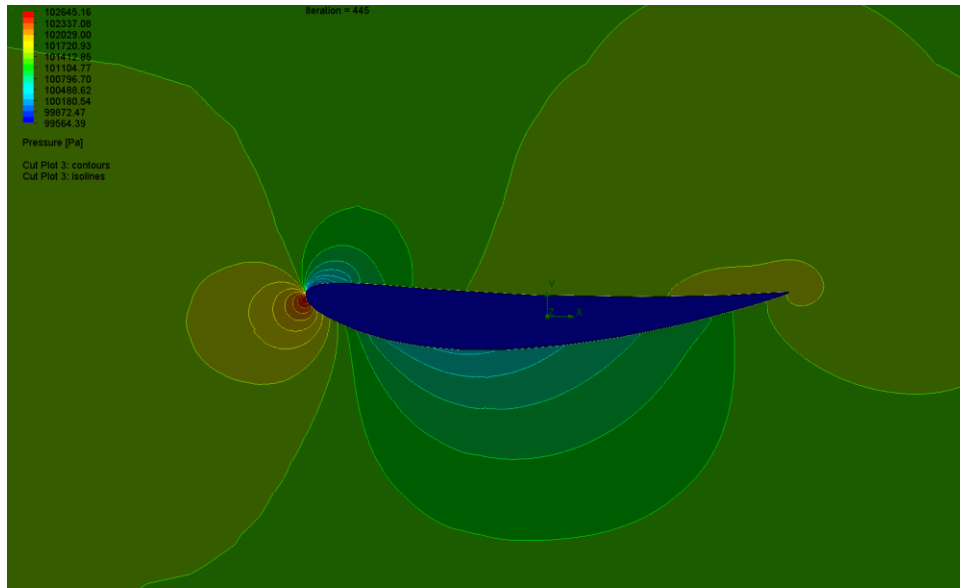
Εικόνα 87: Πλέγμα γύρο από την αεροτομή NACA 6412



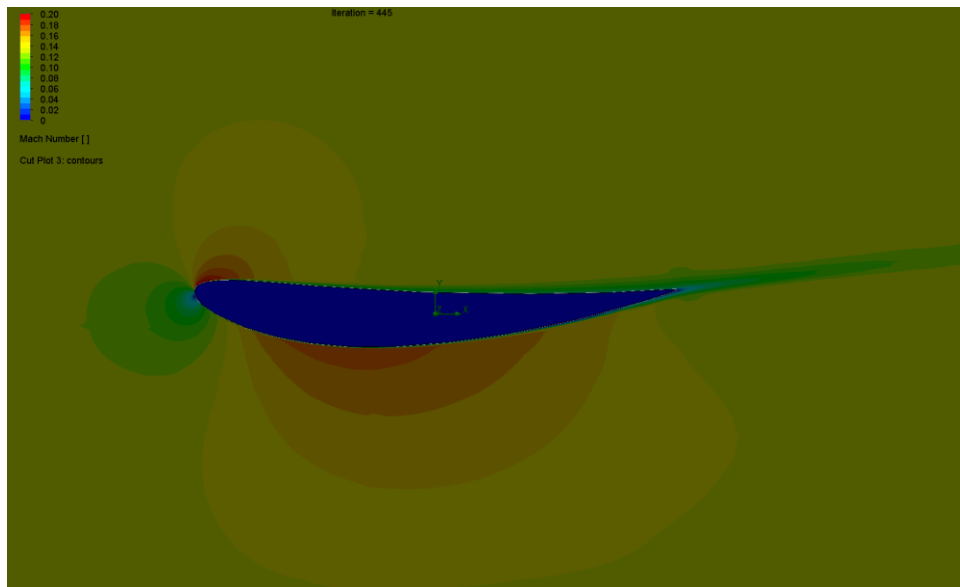
Εικόνα 88: Λεπτομέρεια πλέγματος στην ακμή προσβολής αεροτομής NACA 6412

Η επίλυση του πεδίου ροής υλοποιείται επαναληπτικά (περίπου 450 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων) και επέτρεψε την εκτίμηση του πεδίου πιέσεων και ταχυτήτων γύρο από την αεροτομή και τον υπολογισμό βάση αυτών της συνολικής καθοδικής δύναμης και δύναμης οπισθέλκουσας. Στην Εικόνα 90 παρουσιάζεται το πεδίο πιέσεων. Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω ότι η αεροτομή είναι ανεστραμμένη, η δημιουργία υπόπιασης στην κάτω πλευρά και υπερπίεσης στην άνω, κάτι που οδηγεί στην δημιουργία καθοδικών δυνάμεων. Στην Εικόνα 91 παρουσιάζεται το πεδίο ταχυτήτων γύρο από την αεροτομή, μέσω του αδιάστατου αριθμού Mach. Παρατηρούμε, όπως επίσης ήταν αναμενόμενο, μία αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στην κάτω πλευρά όπου υφίσταται υποπίεση.

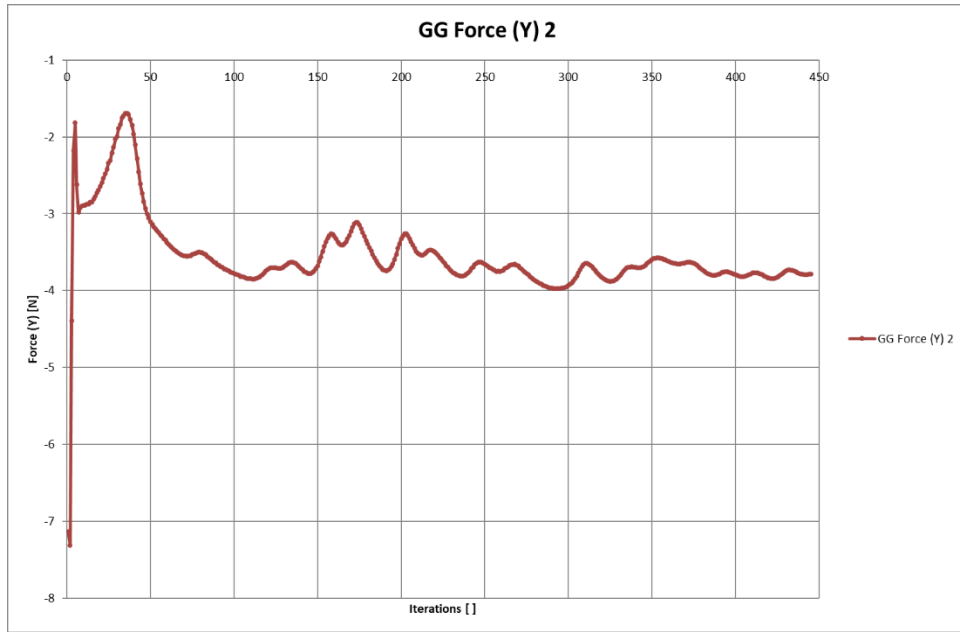
Στις Εικόνες 90 και 91 παρουσιάζεται η σύγκλιση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων οπισθέλκουσας. Παρατηρούμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας (απόλυτη τιμή) είναι σημαντικά μικρότερη της καθοδικής με τις τιμές τους να συγκλίνουν στις τιμές $F_x = 0.379$ και $F_y = -3.784$ (καθοδική) με λόγο $F_y/F_x = 9.984$



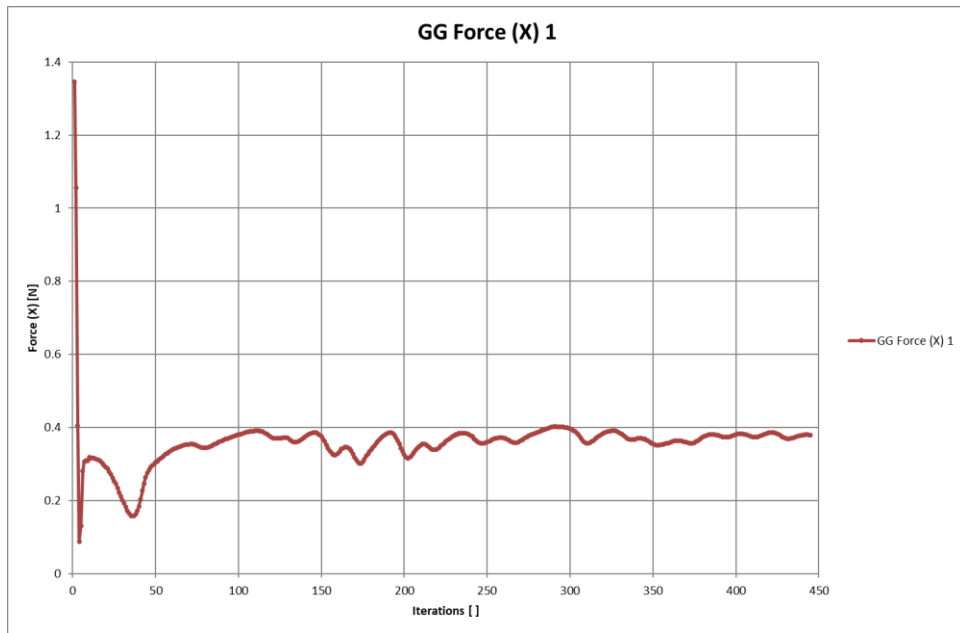
Εικόνα 89: Πεδίο πίεσης γύρω από αεροτομή NACA 6412



Εικόνα 90: Αριθμός Mach γύρω από αεροτομή NACA 6412



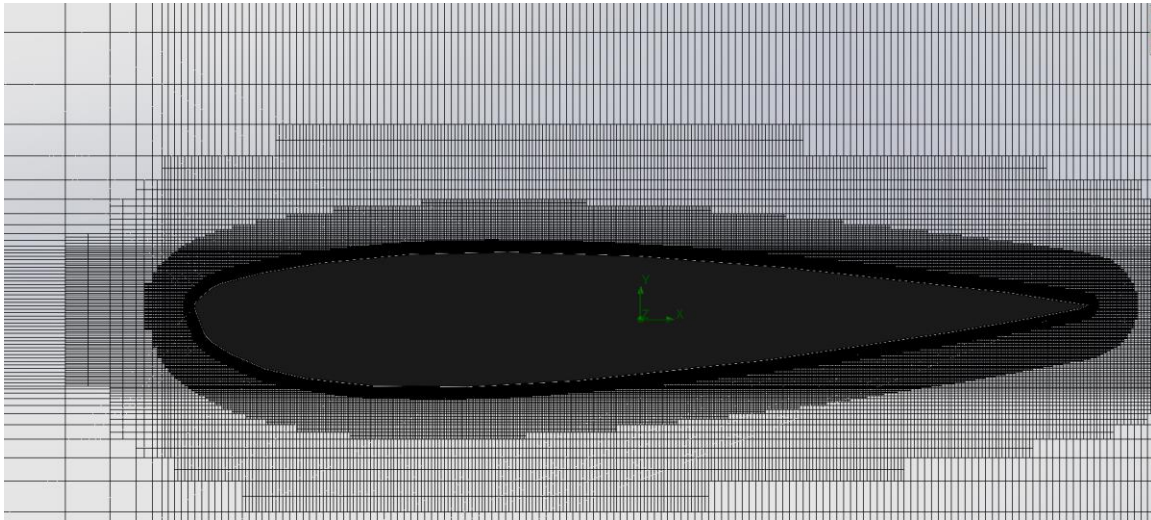
Εικόνα 91: Κάθετη δύναμη σε αεροτομή NACA 6412



Εικόνα 92: Οπισθέλκουσα σε αεροτομή NACA 6412

3.1.2 NACA 23015

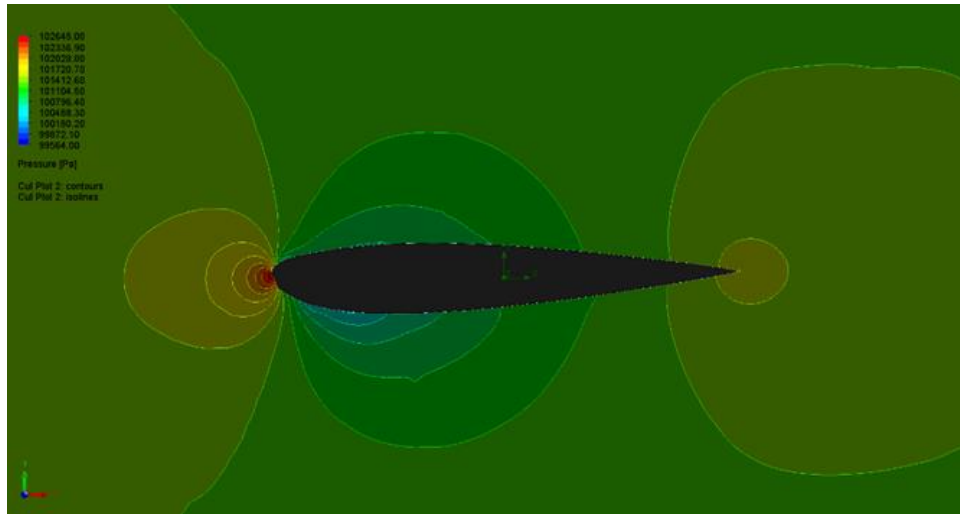
Για την ανάλυση της αεροτομής ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με την NACA 6412. Το πλέγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 94



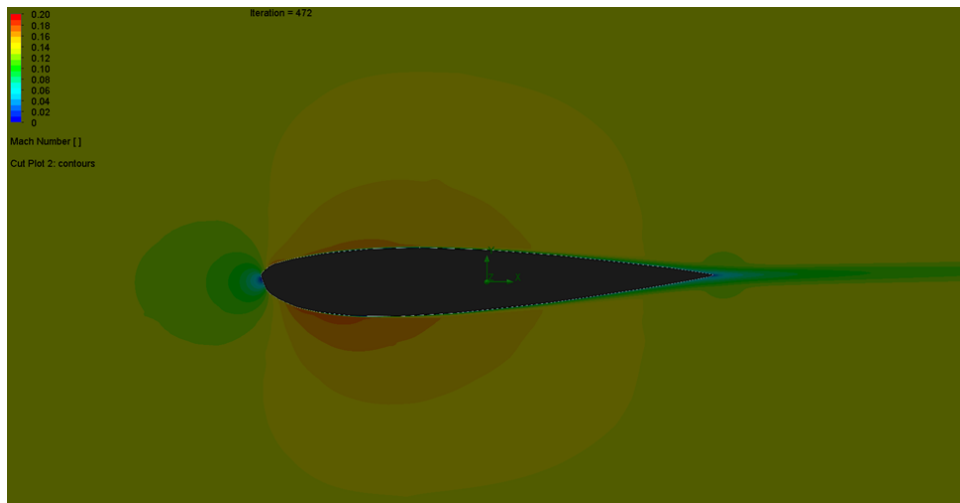
Εικόνα 93: Πλέγμα πεδίου ροής γύρω από την αεροτομή NACA 23015

Η επίλυση του πεδίου ροής υλοποιείται επαναληπτικά (περίπου 470 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων) και επέτρεψε την εκτίμηση του πεδίου πιέσεων και ταχυτήτων γύρω από την αεροτομή και τον υπολογισμό βάσει αυτών της συνολικής καθοδικής δύναμης και δύναμης οπισθέλκουσας. Στην Εικόνα 95 παρουσιάζεται το πεδίο πιέσεων. Παρατηρείται ότι λόγω της συμμετρίας η διαφορά πίεσης ανώ και κάτω πλευράς είναι μικρότερη σε σχέση με την NACA 2146. Στην Εικόνα 96 παρουσιάζεται το πεδίο ταχυτήτων γύρω από την αεροτομή, μέσω του αδιάστατου αριθμού Mach. Παρατηρούμε επίσης μικρότερες και συμμετρικές ταχύτητες σε σχέση με την NACA 2146

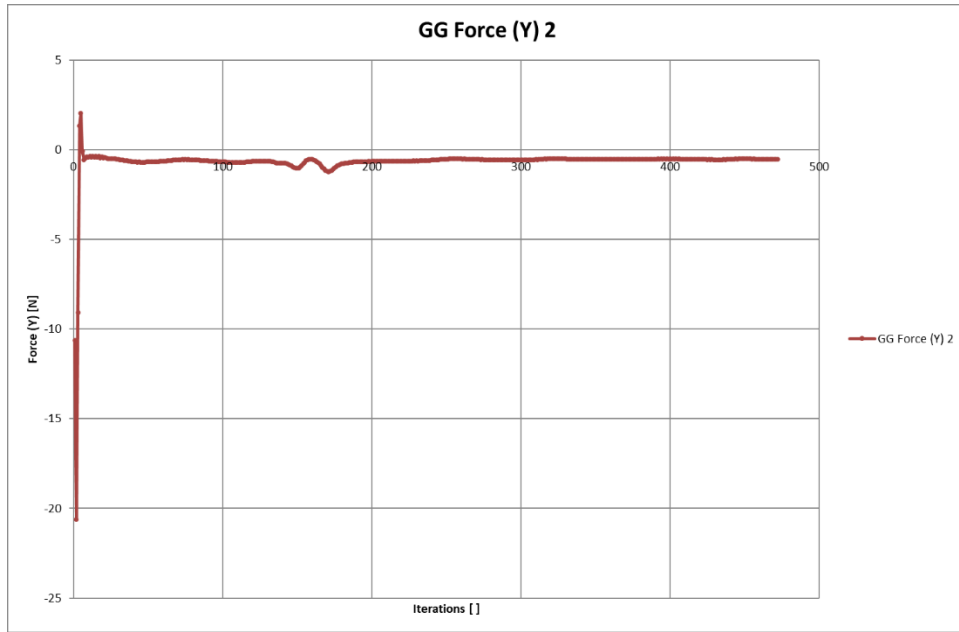
Στις Εικόνες 97 και 98 παρουσιάζεται η σύγκλιση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων οπισθέλκουσας. Παρατηρούμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας είναι οριακά μικρότερη (απόλυτη τιμή) της καθοδικής με τις τιμές τους να συγκλίνουν στις τιμές $F_x = 0.171$ και $F_y = -0.523$ (καθοδική) με λόγω $F_y/F_x = 0.327$.



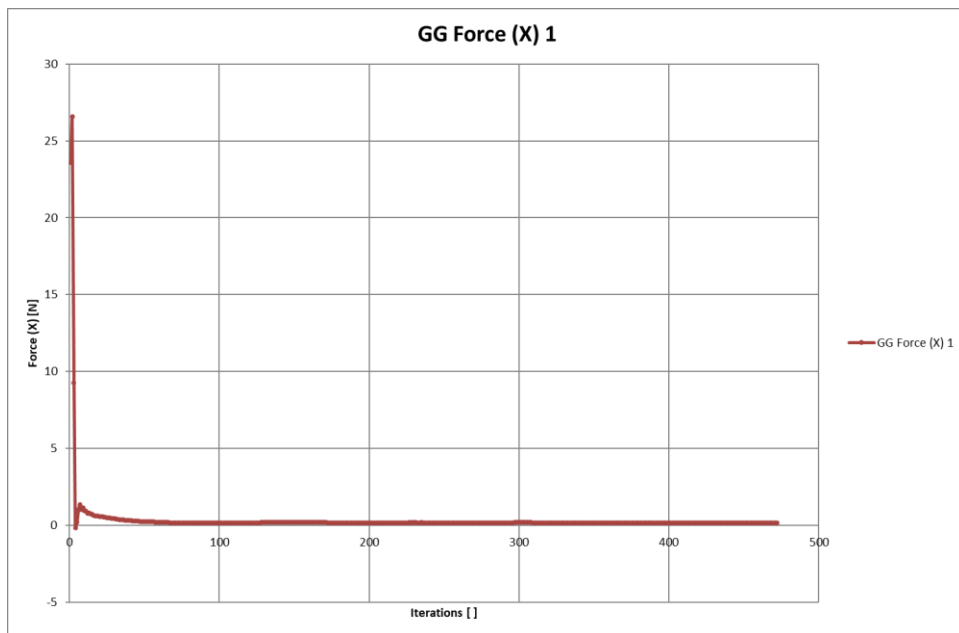
Εικόνα 94: Πεδίο πίεσης γύρω από αεροτομή NACA 23015



Εικόνα 95: Αριθμός Mach γύρω από αεροτομή NACA 23015



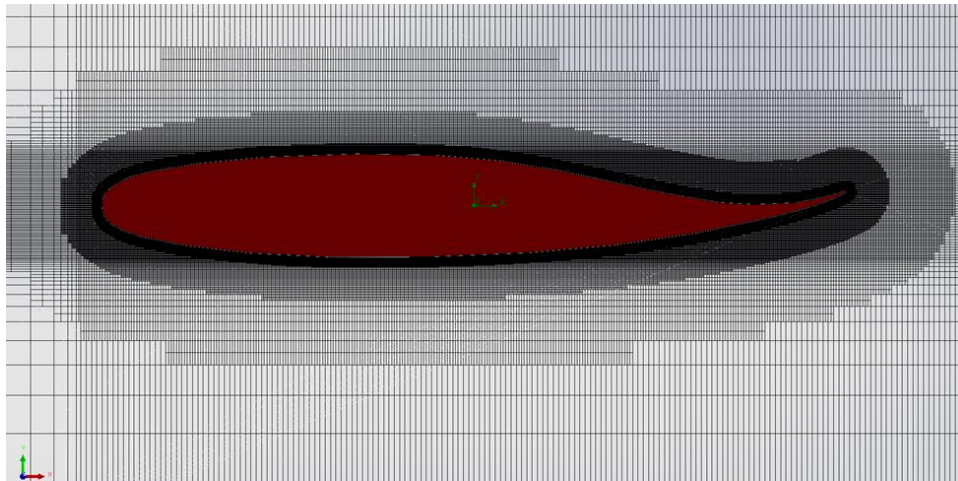
Εικόνα 96: Κάθετη δύναμη σε αεροτομή NACA 23015



Εικόνα 97: Οπισθέλκουσα σε αεροτομή NACA 23015

3.1.3 NASA SC(2)-0714

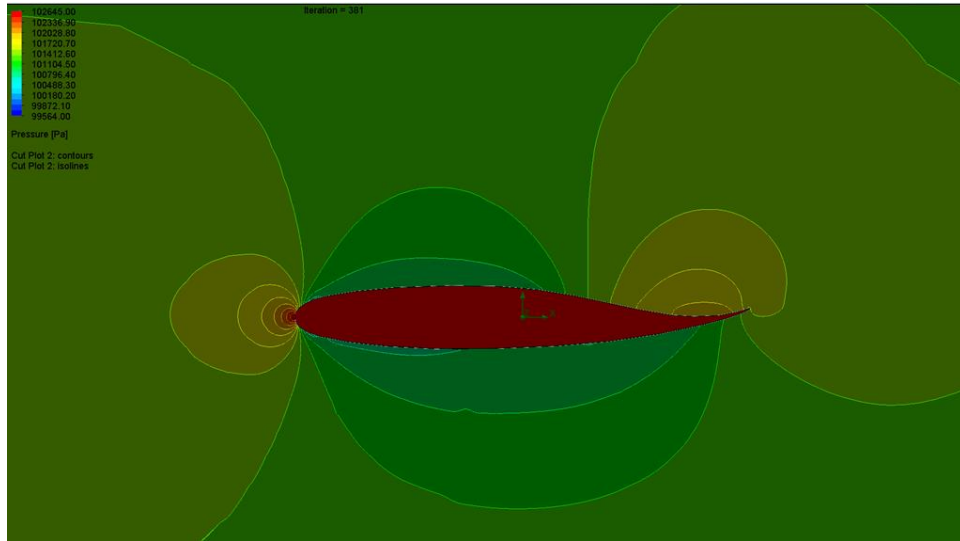
Για την ανάλυση της αεροτομής ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με την NACA 6412. Το πλέγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 99



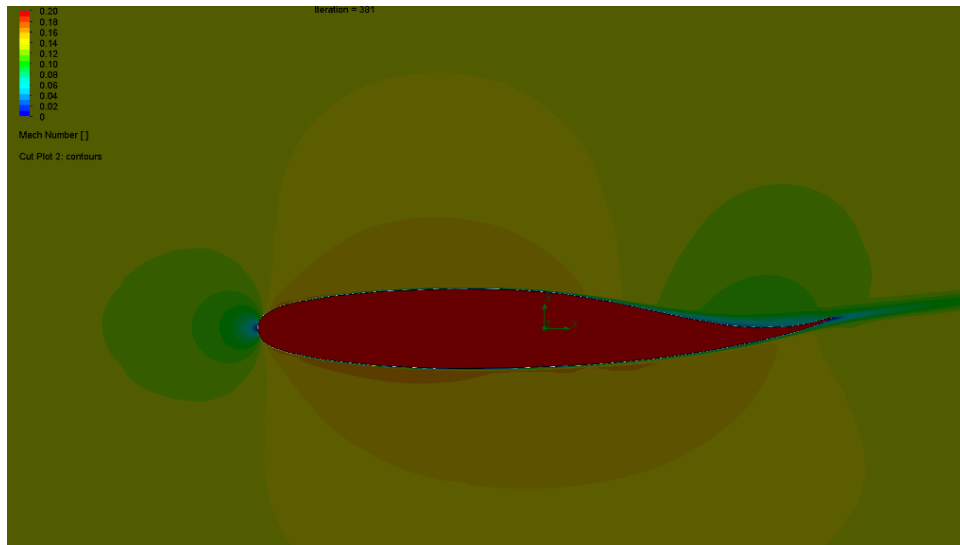
Εικόνα 98: Πλέγμα πεδίου ροής γύρω από την αεροτομή NASA SC(2)-0714

Η επίλυση του πεδίου ροής υλοποιείται επαναληπτικά (περίπου 380 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων) και επέτρεψε την εκτίμηση του πεδίου πιέσεων και ταχυτήτων γύρω από την αεροτομή και τον υπολογισμό βάσει αυτών της συνολικής καθοδικής δύναμης και δύναμης οπισθέλκουσας. Στην Εικόνα 100 παρουσιάζεται το πεδίο πιέσεων. Παρατηρείται ότι σε σχέση με την NACA 6412 οι πιέσεις είναι μικρότερες παρόλα αυτά υφίσταται υποπίεση στην κάτω πλευρά. Στην Εικόνα 101 παρουσιάζεται το πεδίο ταχυτήτων γύρω από την αεροτομή, μέσω του αδιάστατου αριθμού Mach.

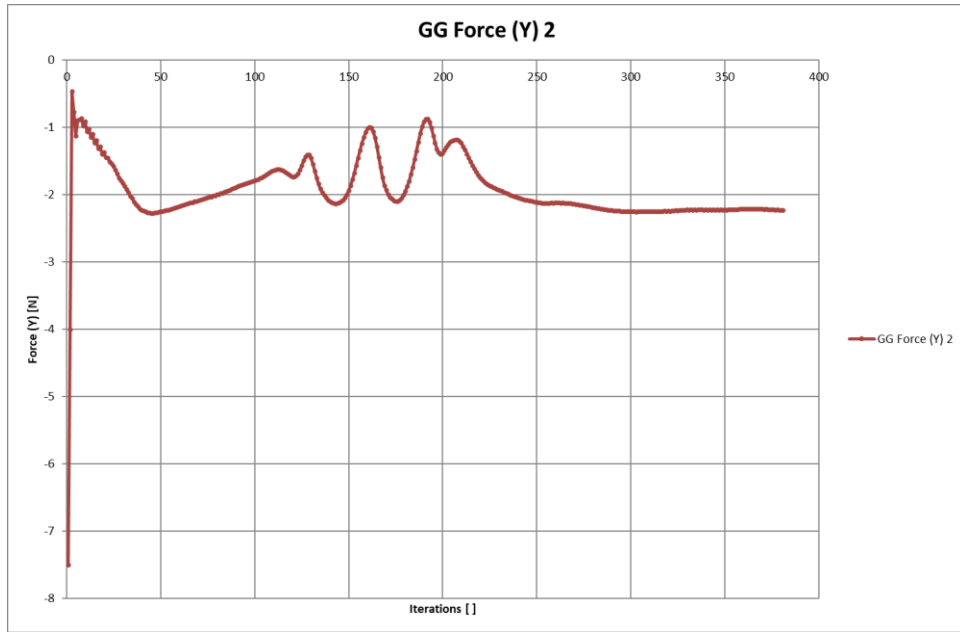
Στις Εικόνες 102 και 103 παρουσιάζεται η σύγκλιση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων οπισθέλκουσας. Παρατηρούμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας (απόλυτη τιμή) είναι σημαντικά μικρότερη της καθοδικής με τις τιμές τους να συγκλίνουν στις τιμές $F_x = 0.200$ και $F_y = -2.241$ (καθοδική) με λόγω $F_y/F_x = 11.205$



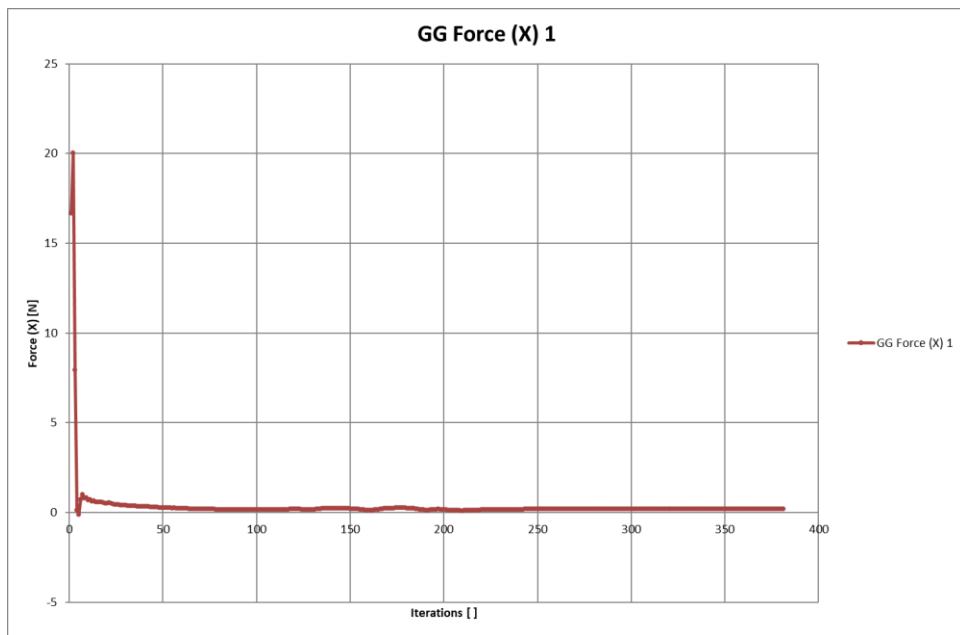
Εικόνα 99: Πεδίο πίεσης γύρω από αεροτομή NASA SC(2)-0714



Εικόνα 100: Αριθμός Mach γύρω από αεροτομή NASA SC(2)-0714



Εικόνα 101: Κάθετη δύναμη σε αεροτομή NASA SC(2)-0714



Εικόνα 102: Οπισθέλκουσα σε αεροτομή NASA SC(2)-0714

3.1.4 Σύγκριση Αεροτομών

Οι εκτιμώμενες καθοδικές δυνάμεις, δυνάμεις οπισθέλκουσας και ο λόγος τους παρουσιάζονται για τις τρεις αεροτομές στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σύγκριση εξεταζόμενων αεροτομών

Αεροτομή	Καθοδική Δύναμη (Fy)	Οπισθέλκουσα (Fx)	Fy / Fx
NACA 6412	-3.784	0.379	9.984
NACA 23015	-0.523	0.171	0.327
NASA SC(2)-0714	-2.241	0.200	11.205

Από τον Πίνακα 1 παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Την μεγαλύτερη καθοδική δύναμη παράγει η NACA 6412 και την μικρότερη η NACA 23015.
- Την μεγαλύτερη οπισθέλκουσα παράγει η NACA 6412 και την μικρότερη η NACA 23015.
- Τον μεγαλύτερο λόγο Fy/Fx παρουσιάζει η NASA SC(2)-0714
- Οι καταλληλότερες αεροτομές προς εξέταση για τις εξεταζόμενες συνθήκες ροής είναι οι NACA 6412 και NASA SC(2)-0714.

3.2 Τρισδιάστατη ανάλυση φτερού

3.2.1 Φτερό χωρίς αεροτομή

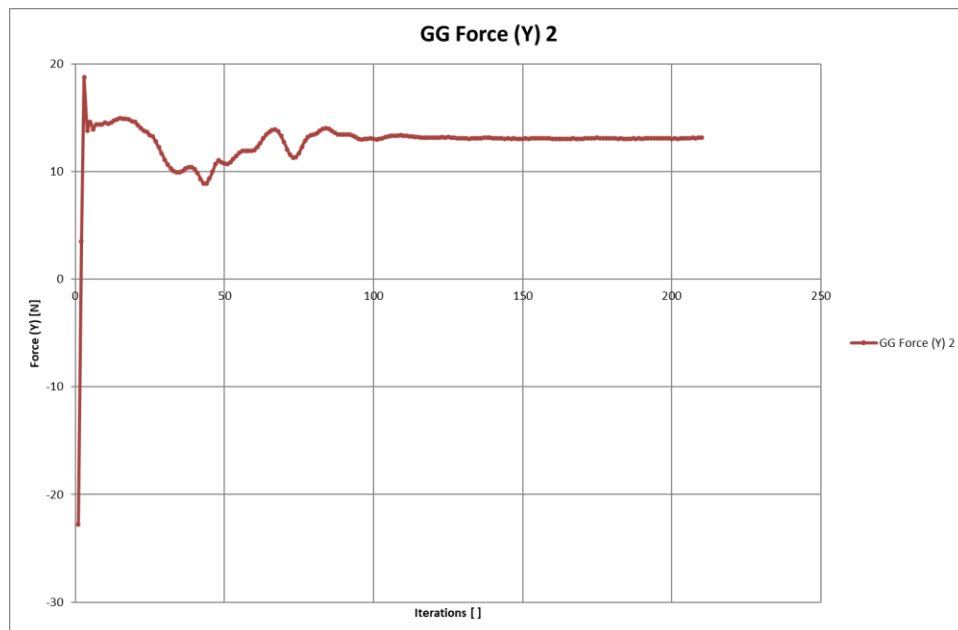
Αρχικά εξετάστηκε το φτερό χωρίς παρουσία αεροτομής για τον υπολογισμό των δυνάμεων βάση των οποίων θα γίνει η εξέταση και σύγκριση της απόδοσης των άλλων δύο περιπτώσεων (NACA 2146 και NASA SC(2)-0714). Χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους πύκνωσης όπως και στην δυσδιάστατη περίπτωση, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο πλέγμα για την υλοποίηση της επίλυσης του πεδίου ροής γύρω από το φτερό.

Η επίλυση του πεδίου ροής υλοποιείται επαναληπτικά (περίπου 210 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων) και επέτρεψε την εκτίμηση του πεδίου πιέσεων γύρω από την αεροτομή και τον υπολογισμό βάση αυτών της συνολικής καθοδικής δύναμης και δύναμης οπισθέλκουσας. Στην Εικόνα 104 παρουσιάζεται το πεδίο πιέσεων. Παρατηρείται ότι μία αύξηση της πίεσης στο εμπρός τμήμα του ελαστικού και του φτερού, λόγω ύπαρξης εκεί σημείων ανακοπής της ροής.

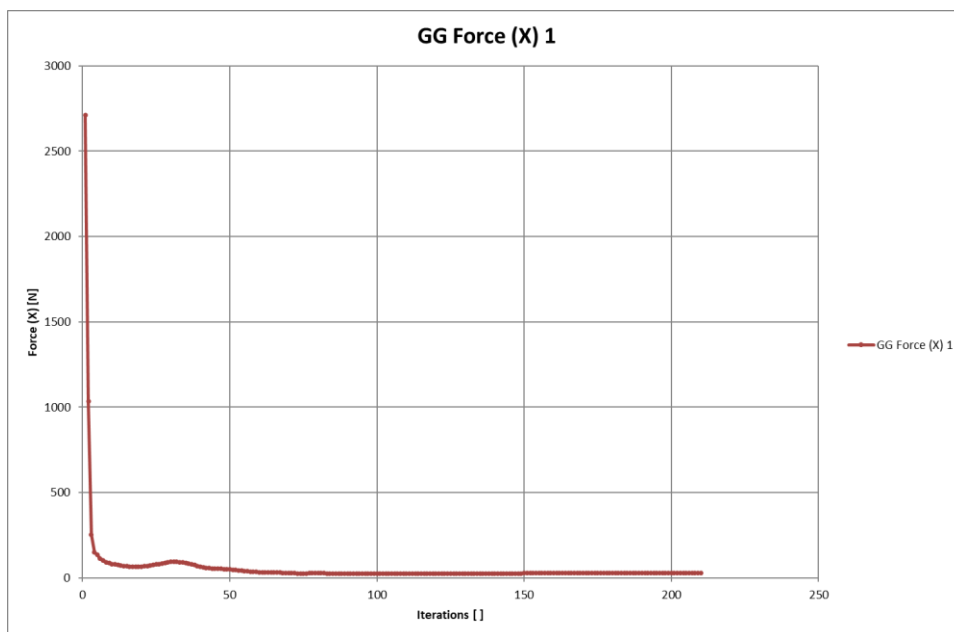
Στις Εικόνες 105 και 106 παρουσιάζεται η σύγκλιση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων άνωσης. Παρατηρούμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας είναι αρκετά μεγαλύτερη της άνωσης με τις τιμές τους να συγκλίνουν στις τιμές $F_x = 26.911$ και $F_y = 13.126$ με λόγω $F_y/F_x = 0.488$. Παρατηρούμε επίσης ότι λόγω του μη αεροδυναμικού σχήματος η οπισθέλκουσα είναι μεγαλύτερη της άνωσης. Επίσης η αεροδυναμική δύναμη παράγει «άνωση» και έρχεται αντίθετη με το βάρος της μηχανής, μειώνοντας την πρόσφυση.



Εικόνα 103: Πεδίο πίεσης γύρω από το φτερό χωρίς αεροτομή.



Εικόνα 104: Κάθετη δύναμη σε φτερό χωρίς αεροτομή

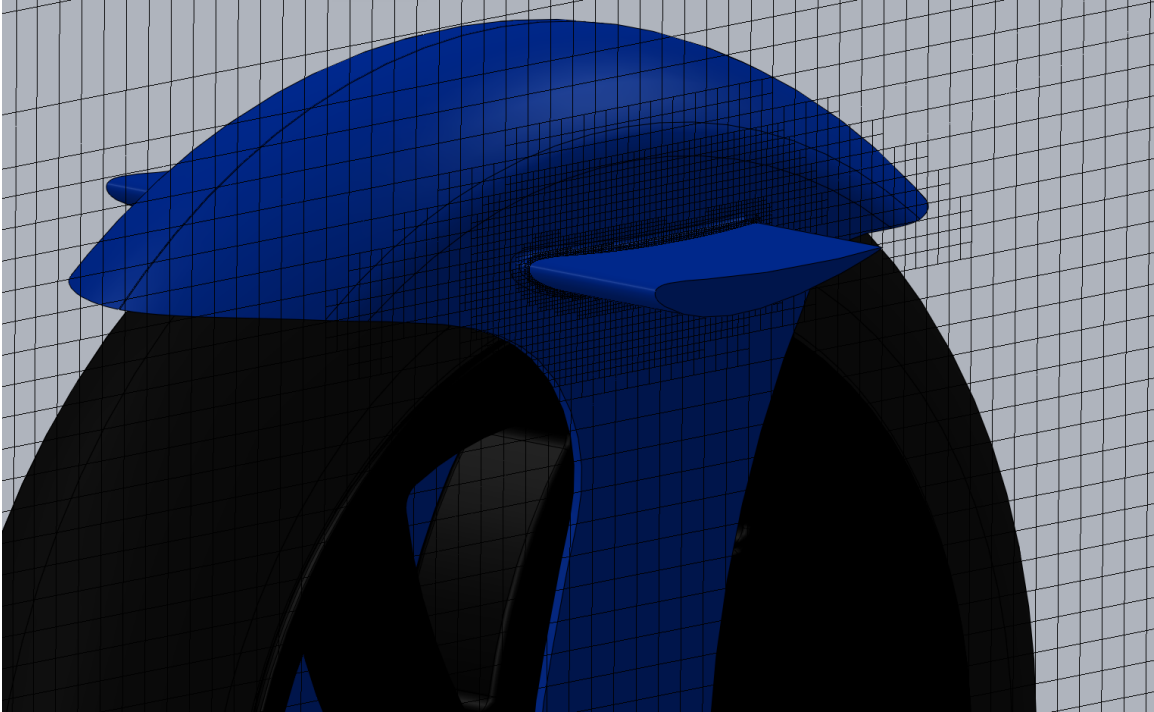


Εικόνα 105: Οπισθέλκουσα σε φτερό χωρίς αεροτομή

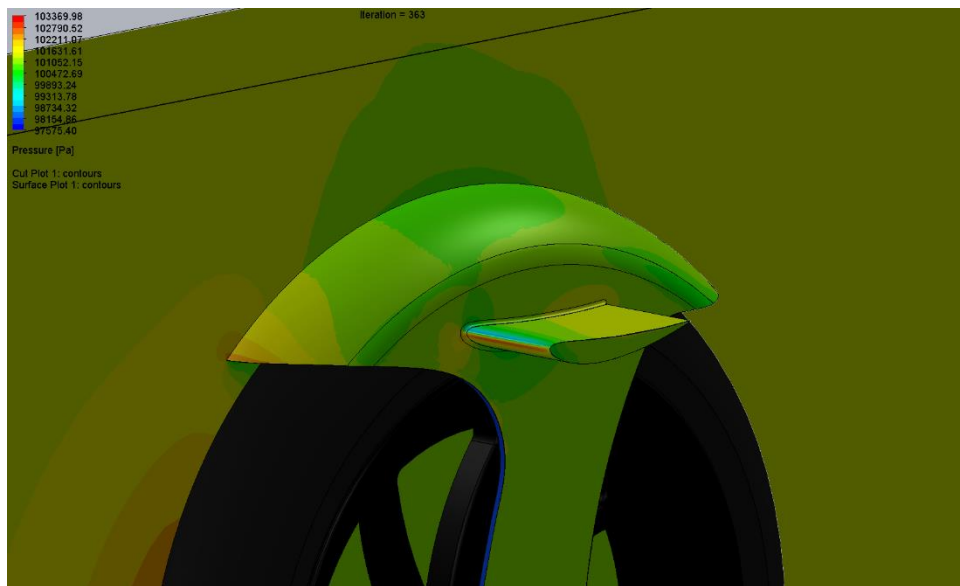
3.2.2 Φτερό με αεροτομή NACA 6412

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους πύκνωσης όπως και στην δυσδιάστατη περίπτωση, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο πλέγμα (Εικόνα 107) για την υλοποίηση της επίλυσης του πεδίου ροής γύρο από το φτερό. Η επίλυση του πεδίου ροής υλοποιείται επαναληπτικά (περίπου 360 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων) και επέτρεψε την εκτίμηση του πεδίου πιέσεων και ταχυτήτων γύρο από την αεροτομή και τον υπολογισμό βάση αυτών της συνολικής καθοδικής δύναμης και δύναμης οπισθέλκουσας. Στην Εικόνα 108 παρουσιάζεται το πεδίο πιέσεων.

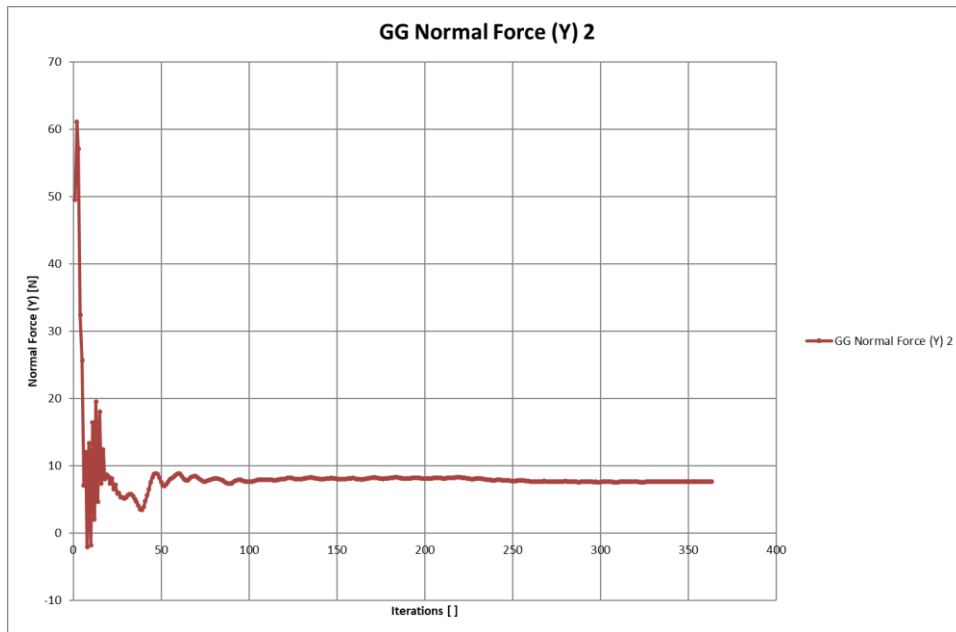
Στις Εικόνες 109 και 101 παρουσιάζεται η σύγκλιση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων άνωσης. Παρατηρούμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας είναι αρκετά μεγαλύτερη της άνωσης με τις τιμές τους να συγκλίνουν στις τιμές $F_x = 26.866$ και $F_y = 7.634$ με λόγω $F_y/F_x = 0.284$. Παρατηρούμε μία μείωση της άνωσης που τείνει να αυξήσει την πρόσφυση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αεροτομή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής δύναμης που παράγει η αεροτομή και ενισχύει την πρόσφυση.



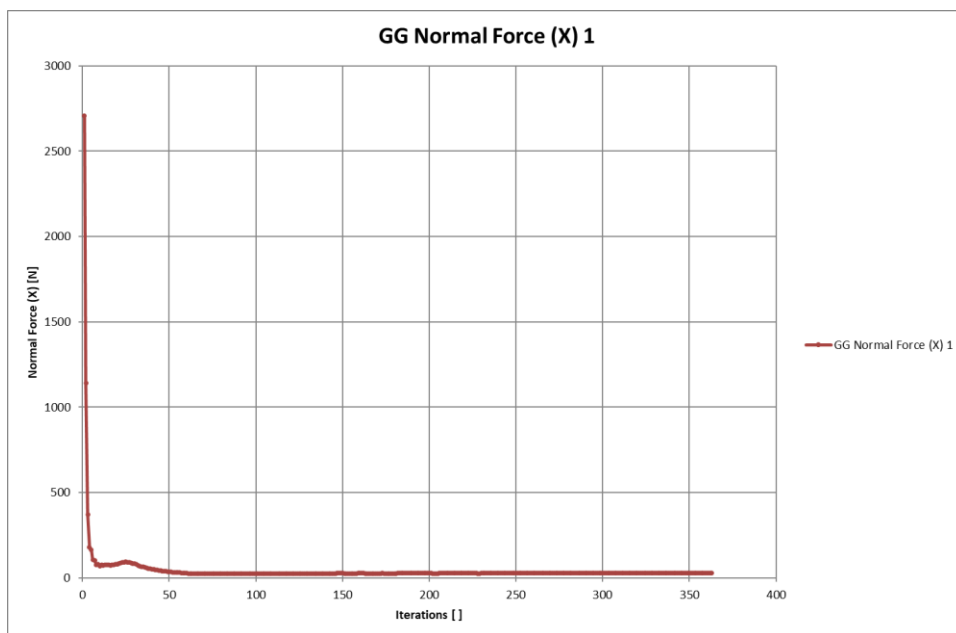
Εικόνα 106: Υπολογιστικό πλέγμα γύρω από το φτερό με αεροτομή NACA 6412



Εικόνα 107: Πεδίο πίεσης γύρω από το φτερό με αεροτομή NACA 6412



Εικόνα 108: Κάθετη δύναμη σε φτερό με αεροτομή NACA 6412

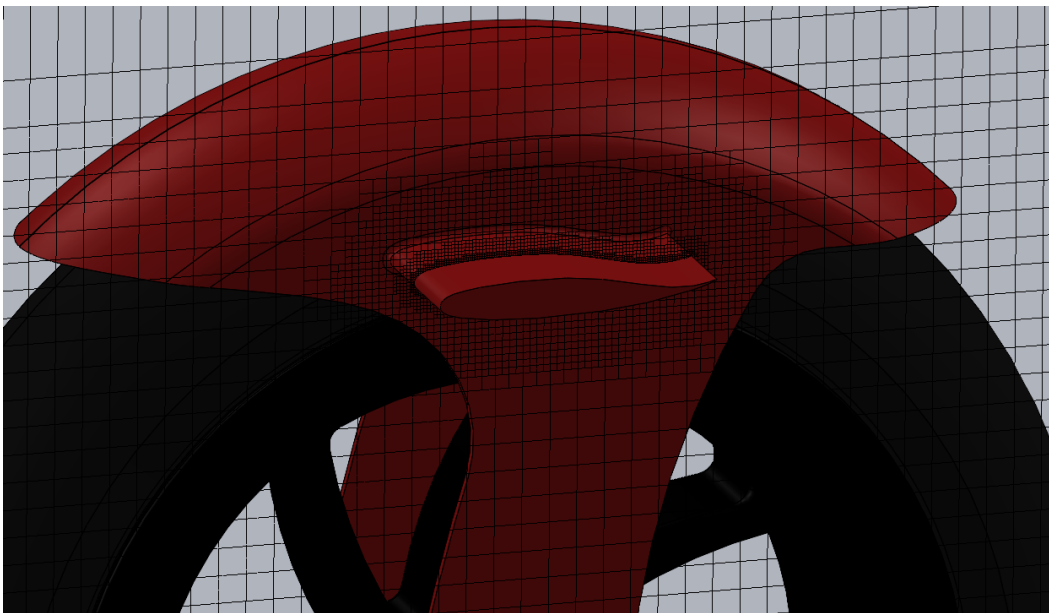


Εικόνα 109: Οπισθέλκουσα σε φτερό με αεροτομή NACA 6412

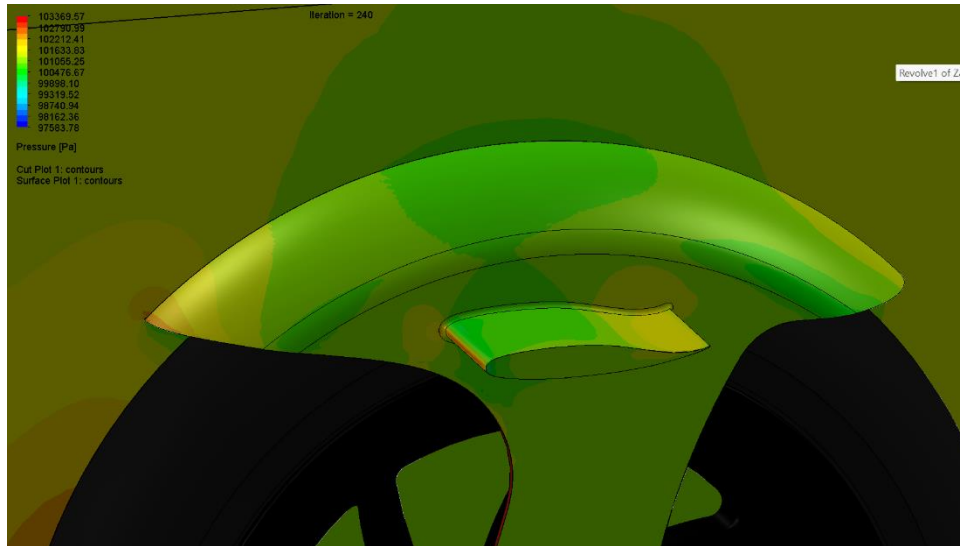
3.2.3 Φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους πύκνωσης όπως και στην δυσδιάστατη περίπτωση, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο πλέγμα (Εικόνα 111) για την υλοποίηση της επίλυσης του πεδίου ροής γύρω από το φτερό. Η επίλυση του πεδίου ροής υλοποιείται επαναληπτικά (περίπου 240 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων) και επέτρεψε την εκτίμηση του πεδίου πιέσεων και ταχυτήτων γύρω από την αεροτομή και τον υπολογισμό βάση αυτών της συνολικής καθοδικής δύναμης και δύναμης οπισθέλκουσας. Στην Εικόνα 112 παρουσιάζεται το πεδίο πιέσεων.

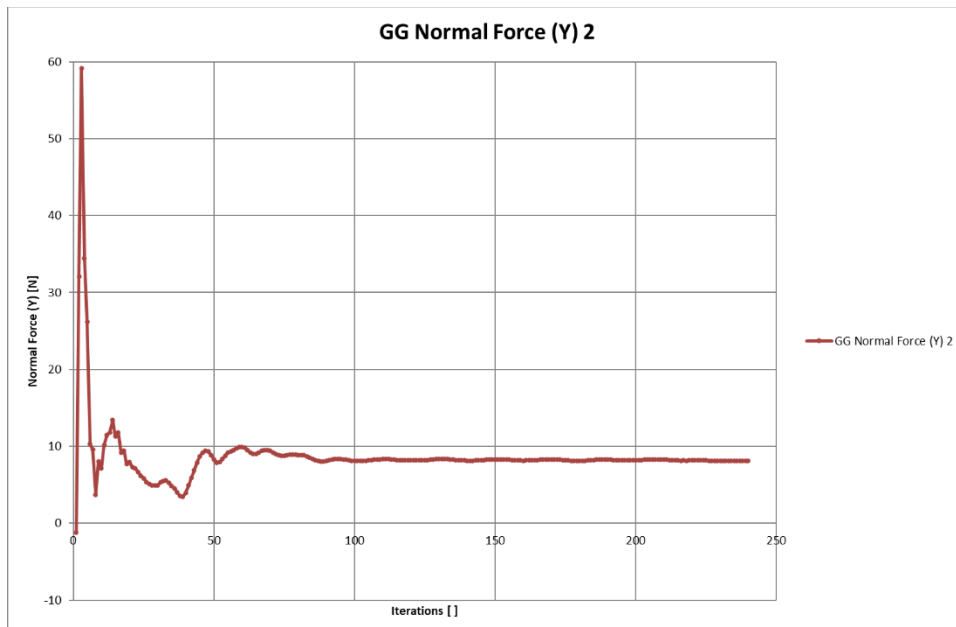
Στις Εικόνες 113 και 114 παρουσιάζεται η σύγκλιση των καθοδικών δυνάμεων και δυνάμεων άνωσης. Παρατηρούμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας είναι αρκετά μεγαλύτερη της άνωσης με τις τιμές τους να συγκλίνουν στις τιμές $F_x = 26.633$ και $F_y = 8.091$ με λόγω $F_y/F_x = 0.304$. Παρατηρούμε μία μείωση της δύναμης που τείνει να αύξησει την πρόσφυση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς αεροτομή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής δύναμης που παράγει η αεροτομή και ενισχύει την πρόσφυση.



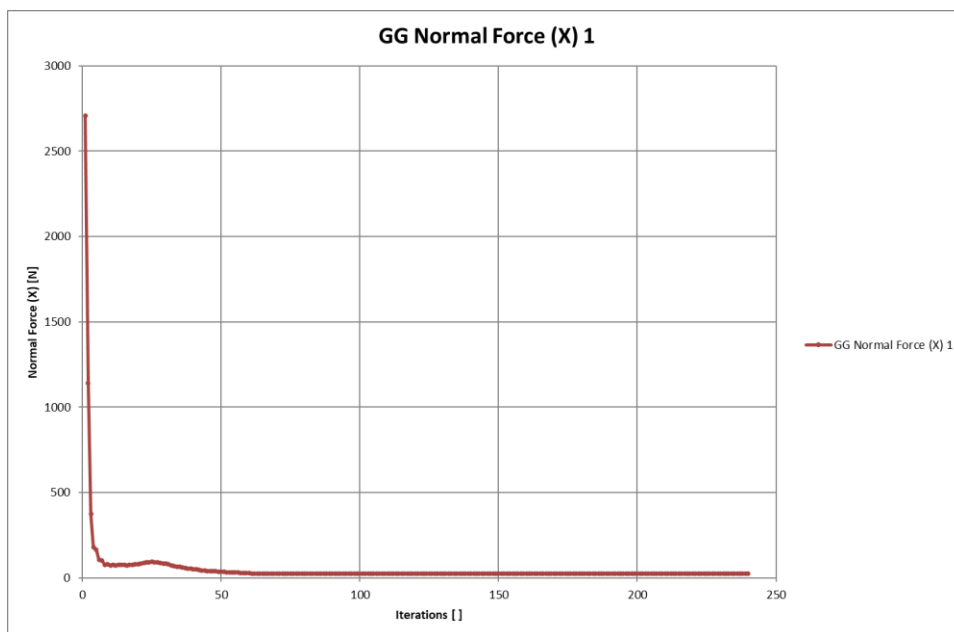
Εικόνα 110: Υπολογιστικό πλέγμα γύρω από το φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714



Εικόνα 111: Πεδίο πίεσης γύρω από το φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714



Εικόνα 112: Κάθετη δύναμη σε φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714



Εικόνα 113: Οπισθέλκουσα σε φτερό με αεροτομή NASA SC(2)-0714

3.1.4 Σύγκριση φτερών με και χωρίς αεροτομές

Οι εκτιμώμενες κάθετες δυνάμεις, δυνάμεις οπισθέλκουσας και ο λόγος τους παρουσιάζονται για τις τρεις αεροτομές στον Πίνακα 2. Επιπρόσθετα παρουσιάζεται το ποσοστό μείωσης της κάθετης δύναμης λόγω δημιουργίας καθοδικής δύναμης από τις αεροτομές.

Πίνακας 2: Σύγκριση εξεταζόμενων φτερών με αεροτομές

Αεροτομή	Άνωση (Fy)	Οπισθέλκουσα (Fx)	Fy / Fx	Μείωση Fy
-	13.126	26.912	0.488	-
NACA 2146	7.634	26.866	0.284	-41.18%
NASA SC(2)-0714	8.091	26.633	0.304	-38.36%

Από τον Πίνακα 2 παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Και οι δύο αεροτομές μειώνουν σχεδόν κατά 40% την κάθετη δύναμη, κάτι που βελτιώνει σημαντικά την πρόσφυση.
- Και οι δύο αεροτομές μειώνουν ανεπαίσθητα την οπισθέλκουσα.

3.3 Περιπτώσεις και Βελτιστοποίηση NACA 6412

Παρακάτω γίνεται μια ειδικότερη μελέτη στην βελτιστοποίηση της καθοδικής δύναμης από το φτερό χωρίς αεροτομή ως την τελευταία περίπτωση NACA 6412 που δημιουργήθηκε και έχουν αριθμηθεί όλα ώστε να γίνει καλύτερη παρουσίαση στα διαγράμματα.

3.3.1 Περίπτωση 1

Φτερό χωρίς αεροτομή

$F_y = 13,1 \text{ N}$ και $F_x = 26,9 \text{ N}$ όπως υπολογίστηκε πιο πάνω σελ. (76-77)

3.3.2 Περίπτωση 2

Φτερό με αεροτομή NACA 6412 με $F_y = 7,6 \text{ N}$ και $F_x = 26,9$ σελ. (79)

3.3.3 Περίπτωση 3

Υπάρχει μείωση lift με τις αεροτομές αλλά πρέπει να επιτευχθεί αρνητική δύναμη δηλαδή καθοδική δύναμη. Γιαυτό θα γίνει βελτίωση την NACA 6412 η οποία έχει και την καλύτερη F_y .

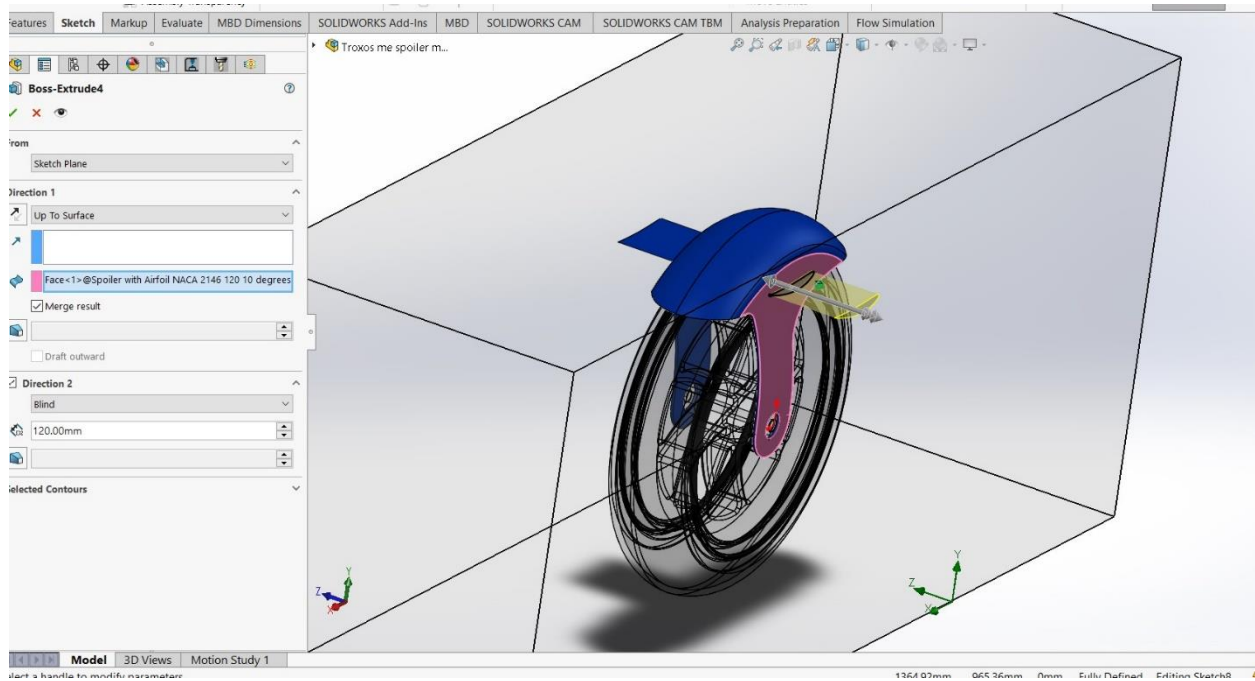
Με βάση τον τύπο του $downforce = \rho_{\infty} \times V_{\infty}^2 \times S \times Cl$ (1) αφού έχουμε αναποδογυρίστηκε η αεροτομή και έχουμε τα εξής :

S :επιφάνεια (m^2)

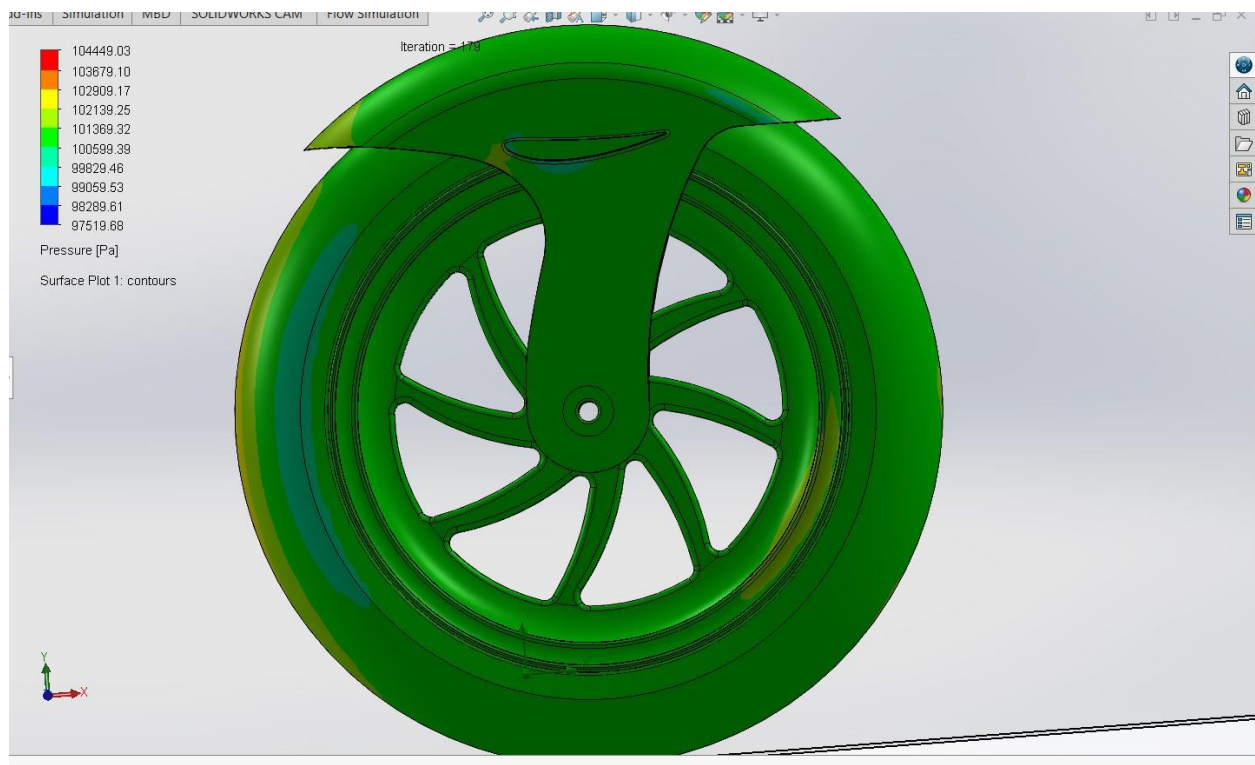
Cl (καθοδική δύναμη) :συντελεστής καθοδικής δύναμης στην προκειμένη περίπτωση

ρ, V είναι σταθερά

Οπότε αυξάνεται το μήκος της αεροτομής με το εργαλείο-εντολή «Extrude-Boss» από 80 mm σε 120 mm με αποτέλεσμα να αυξηθεί το S



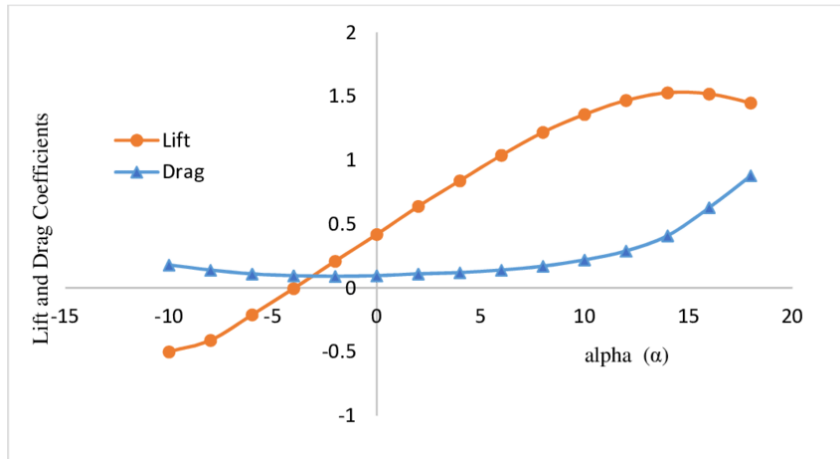
Εικόνα 114 :Αύξηση μήκους σε 120 mm



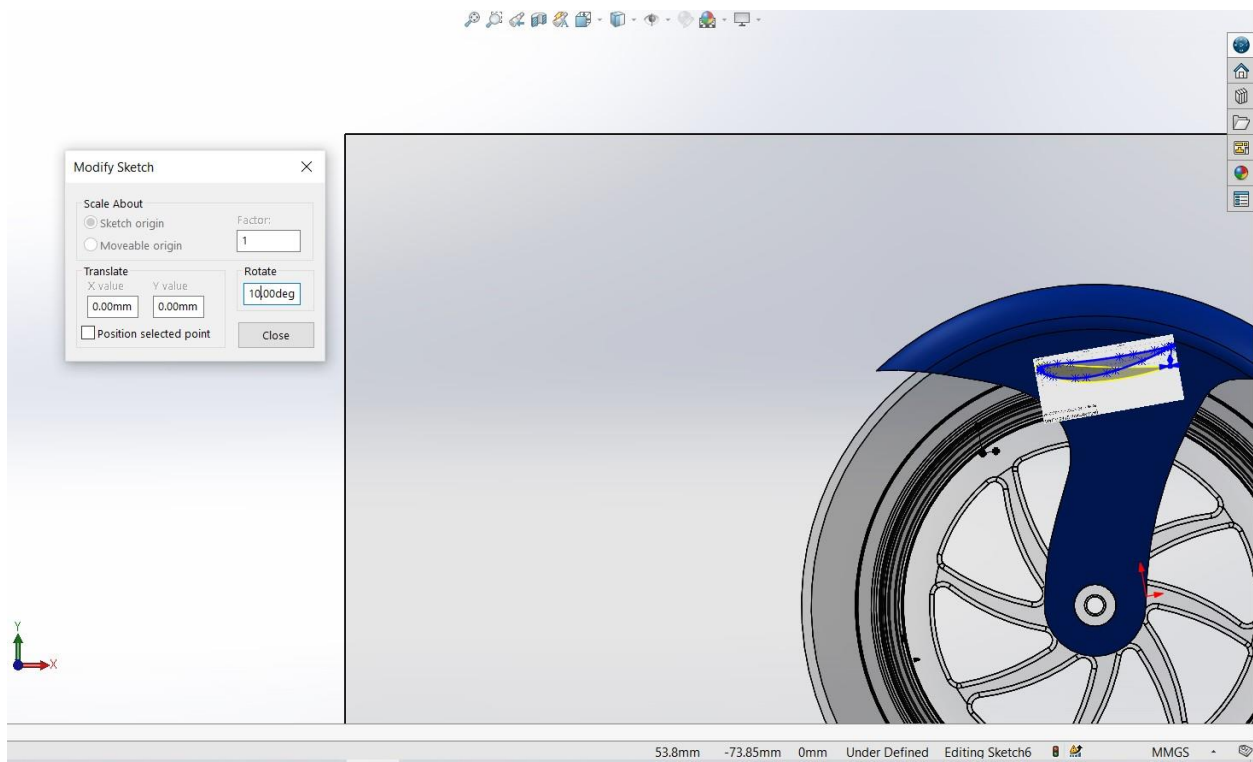
Εικόνα 115 :Πεδίο πίεσης γύρω από από το φτερό με το αυξημένο μήκος στην αεροτομή Αυτό δίνει σαν αποτέλεσμα $F_y = 4,4\text{N}$ και $F_x = 42,2\text{N}$

3.3.4 Περίπτωση 4

Στη συνέχεια με βάση το διάγραμμα C_l και α (γωνία)



Παρατηρείται ότι εάν αυξηθεί το α έχουμε και αύξηση του C_l όμως στην προκειμένη περίπτωση έχει αντιστραφεί η αεροτομή οπότε πρέπει να μειωθεί η γωνία προσβολής.

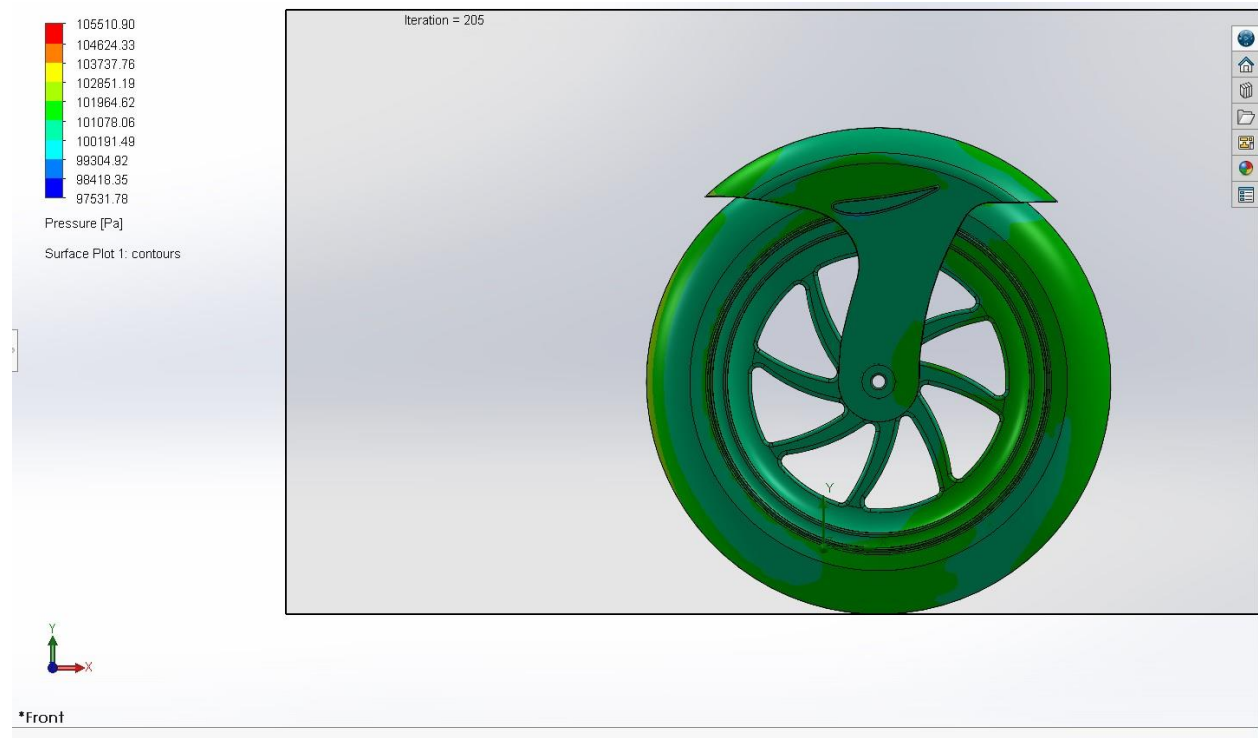


Εικόνα 116 : Μείωση α (γωνίας προσβολής) κατά 10 μοίρες

Μειώνεται η α κατά -10 μοίρες με το «Tools»>«Sketch Tools» >«modify sketch»

$F_y = -15,1 \text{ N}$ και $F_x=35,4\text{N}$

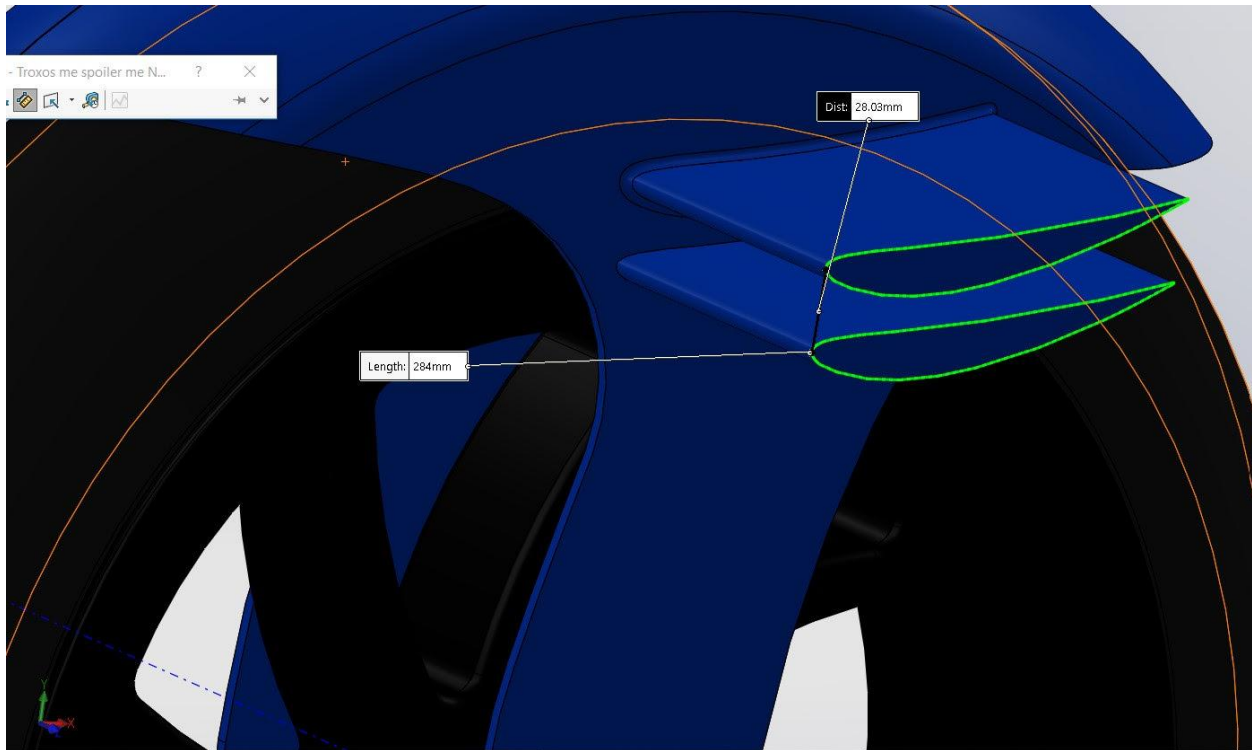
Άρα πλέον ασκείται καθοδική δύναμη.



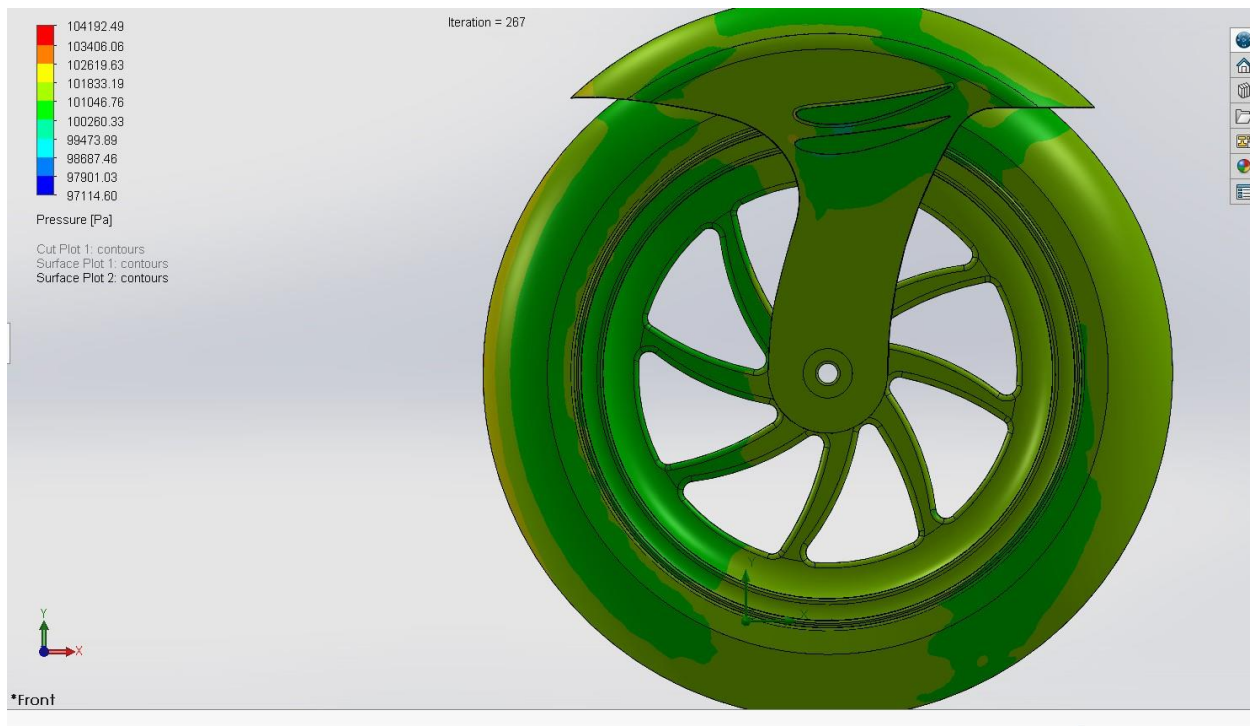
Εικόνα 117 :Πεδίο πίεσης μετά την μείωση της γωνίας

3.3.5 Περίπτωση 5

Προστίθεται μια δεύτερη ίδια αεροτομή κάτω από την πρώτη κάνοντας «copy-paste». Η απόσταση από τις ακμές προσβολής που έχει η κάτω με την πάνω είναι 28 mm



Εικόνα 118 :Αλλή οπτική γωνία όπου φαίνεται η απόσταση

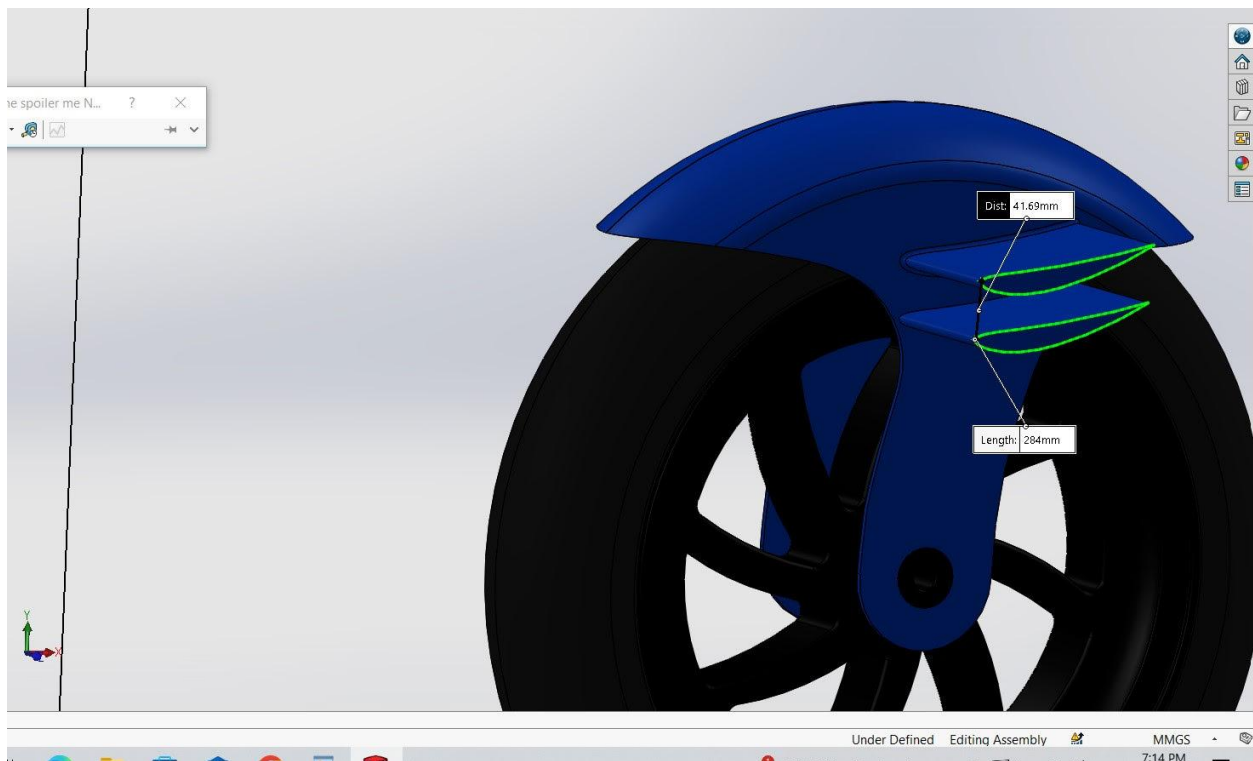


Εικόνα 119 :Πεδίο πίεσης με διπλές αεροτομές με μικρή απόσταση

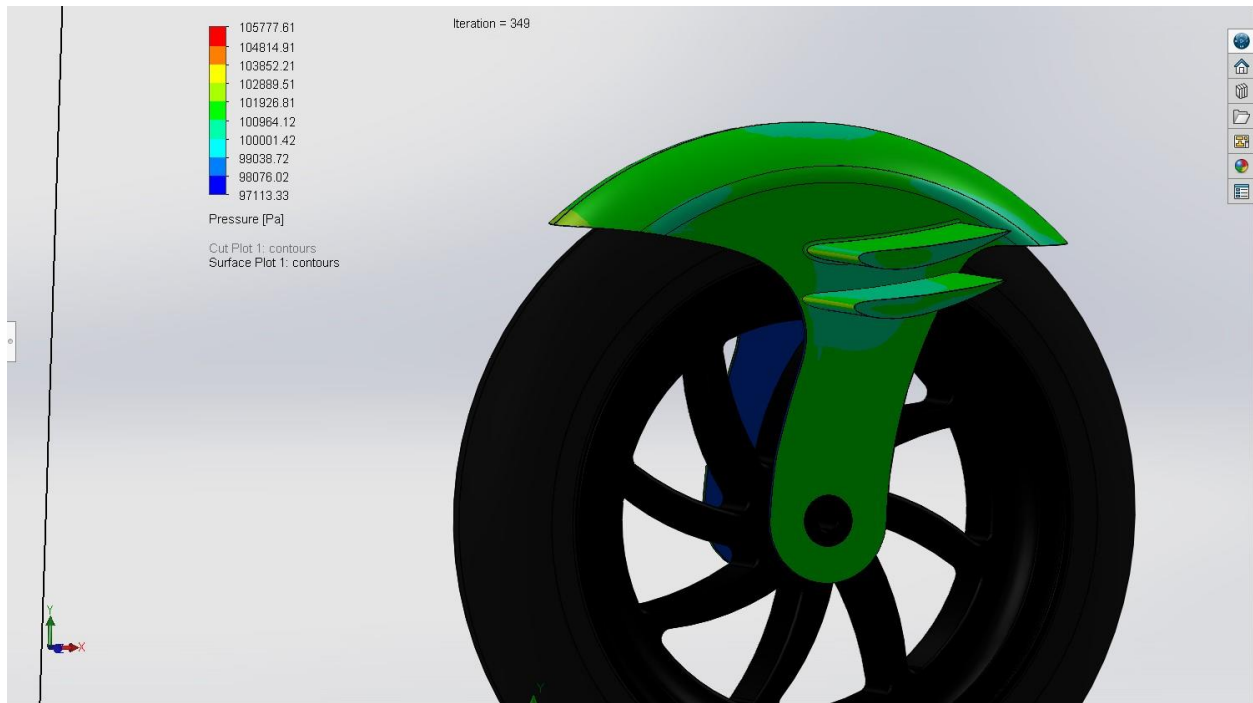
Παρατηρείται μια μικρή αύξηση στο $F_y = -16,7 \text{ N}$ και μια μεγάλη αύξηση στο $F_x = 46,7 \text{ N}$

3.3.6 Περίπτωση 6

Σε αυτή την περίπτωση αυξάνονται οι αποστάσεις των ακμών προσβολής των δύο αεροτομών κατά 41,7 mm κάνοντας «edit sketch» > «move» στο σχέδιο (η κάτω αεροτομή χαμηλώνει). Αυτή η μετατροπή δίνει μια καλύτερη αύξηση (σε σχέση με την περίπτωση 3) στο $F_y = -19,7 \text{ N}$ ενώ είναι ελάχιστα μεγαλύτερο το $F_x = 47$.



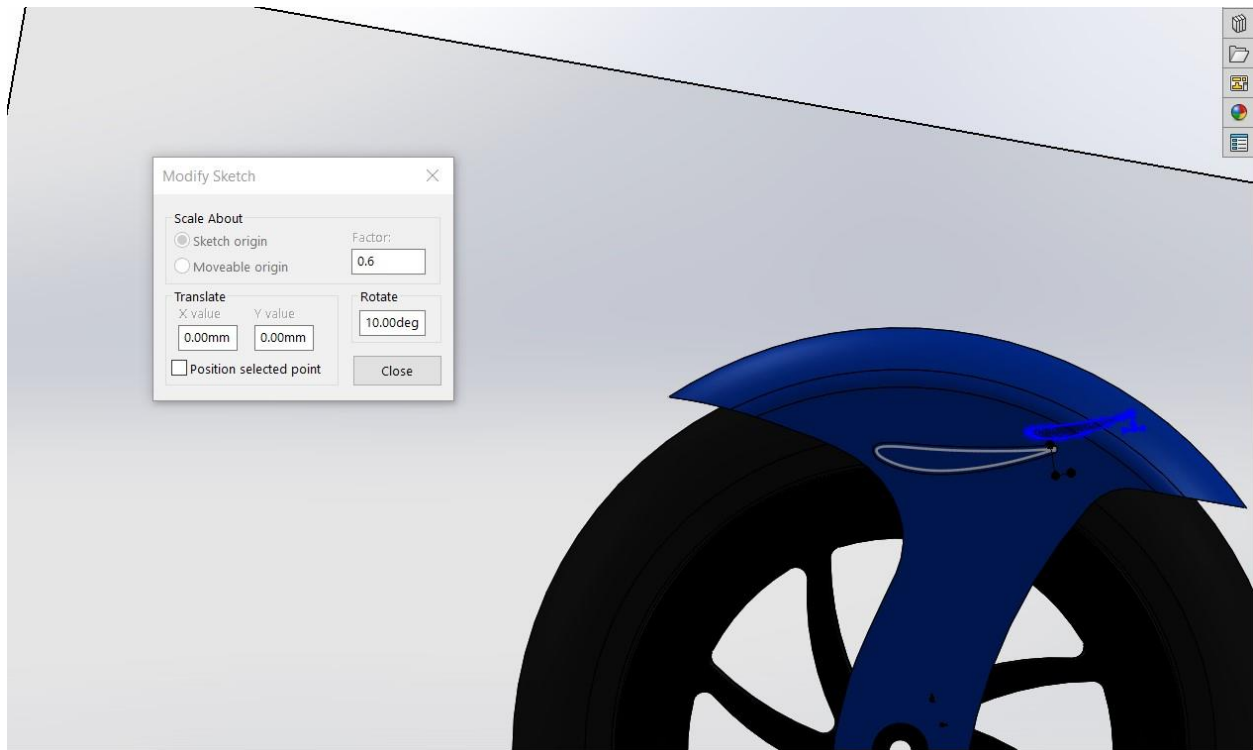
Εικόνα 120 :Αύξηση απόστασης της περίπτωσης 5



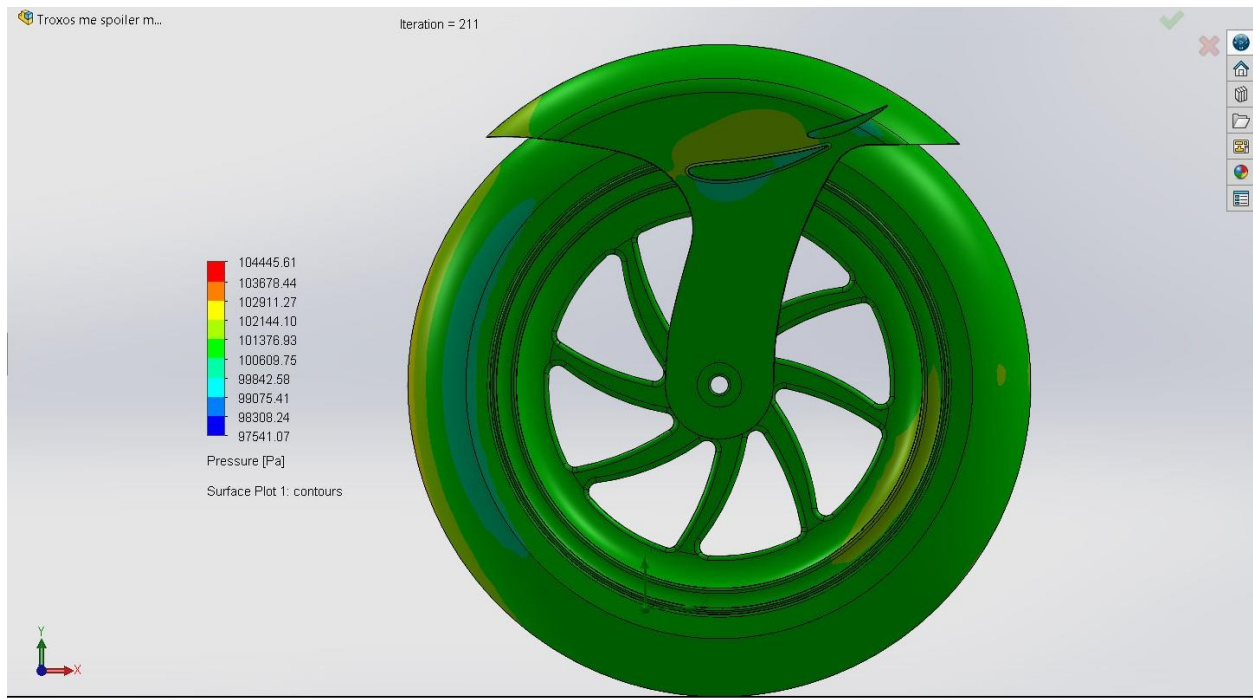
Εικόνα 121 : Πεδίο πίεσης μετά την αύξηση απόστασης της περίπτωσης 5

3.3.7 Περίπτωση 7

Μια επιπλέον ιδέα που εισάγεται στην εργασία είναι η χρήση δεύτερης αεροτομής στο πάνω δεξιό μέρος της αρχικής αεροτομής η οποία αυξάνει την καμπυλότητα άρα και το downforce (24). Ουσιαστικά εισάγεται ένα δεύτερο airfoil NACA 6412. Γίνεται descale κατά 0,6 μέσω του «Tools»>«Sketch Tools»>«Modify Sketch» για λόγους χωρητικότητας. Επίσης, δοκιμάζεται το δεύτερο airfoil στις -20 μοίρες μιας και είναι γνωστό ότι και σε αυτές τις μοίρες η καθοδική δύναμη θα μεγαλώσει. Οι συντεταγμένες της ακμής εκφυγής είναι $(x,y) = (153,245)$ και οι δυνάμεις που παράγονται είναι $F_y = -41\text{ N}$ και $F_x = 47\text{ N}$.



Εικόνα 122 : Χρήση δεύτερης αεροτομής πάνω δεξιά από το πρώτο



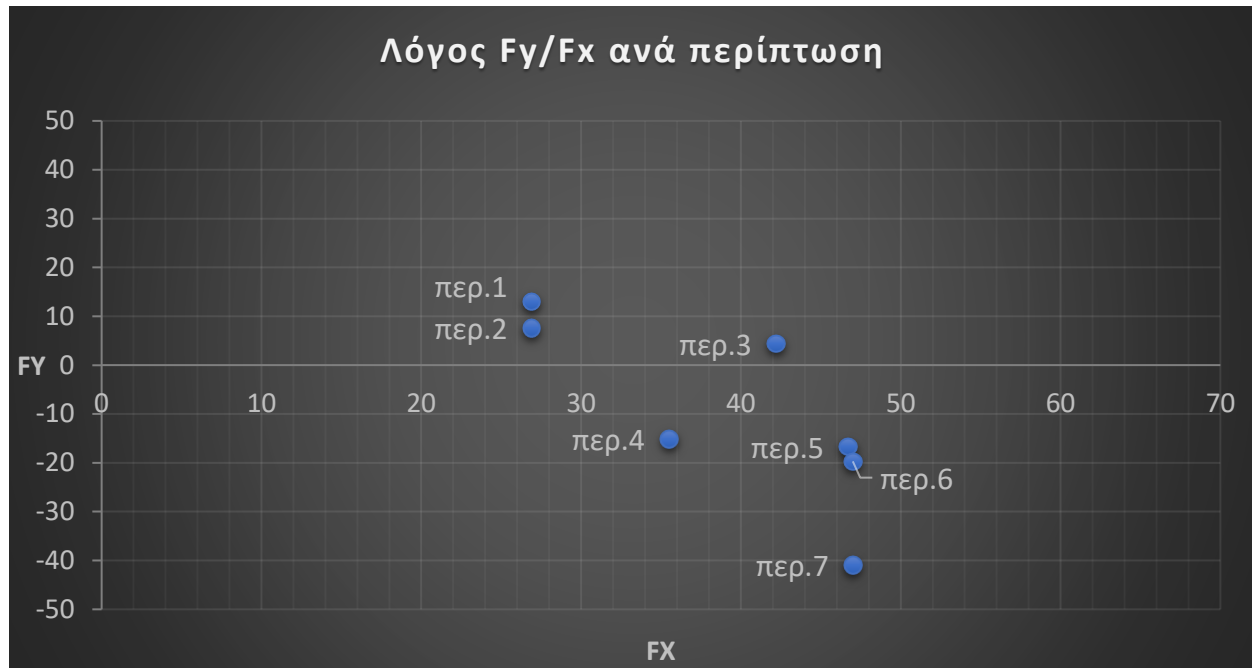
Εικόνα 123 :Πεδίο πίεσης μετά τη χρήση δεύτερης αεροτομής

	Κάθετη Δύναμη (Fy)	Οπισθέλκουσα (Fx)	Μεταβολή Fy	Fy/Fx
Περ.1	13,126	26,912	-	0,48
Περ.2	7,6	26,866	42%	0,28
Περ.3	4,4	42,247	66%	0.1
Περ.4	-15,136	35,485	215%	-0.42
Περ.5	-16,7	46,7	227%	-0.36
Περ.6	-19,7	47	250%	-0.42
Περ.7	-41	47	413%	-0.87

Πίνακας 3 : Σύγκριση των προσθηκών στη NACA 6412

Παρατηρείται ότι και σαν Fy μενομωμένα αλλά και σαν λόγος Fy/Fx την βέλτιστη λύση την έχει η περίπτωση 7.

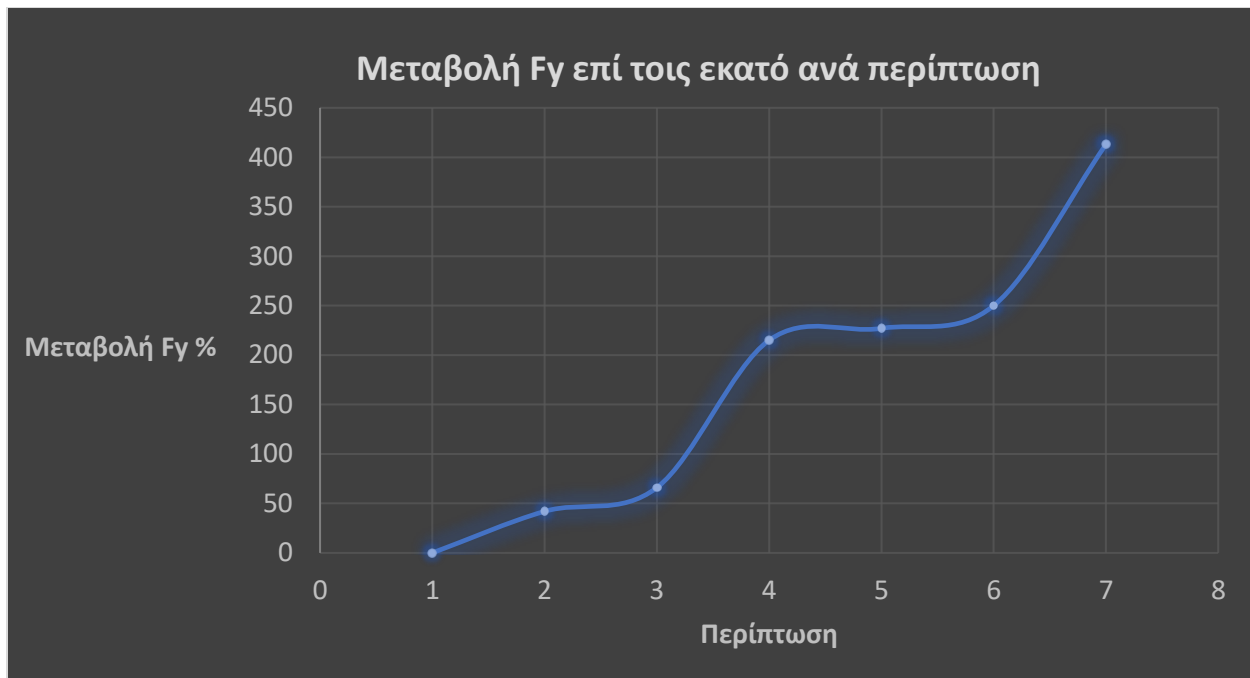
3.3.8 Διάγραμματα



Διάγραμμα 1.

Παρατήρηση

- Περ.3 :Αύξηση μήκους αεροτομής αυξάνει σημαντικά το F_x
- Περ.4 :Μείωση γωνίας αυξάνει σημαντικά το F_y και μειώνει σημαντικά F_x βάσει διαγραμμάτων εικ.21
- Είσοδος δεύτερης ίδιας αεροτομής παράλληλα με την πρώτη φαίνεται να έχει ελάχιστη βελτίωση στο F_y και η αύξηση απόστασης μεταξύ τους φαίνεται να αυξάνει το F_y



Διάγραμμα 2.

Παρατήρηση

- Περ.4 και Περ.7 έχουν απότομη αύξηση Fy

3.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση αεροτομών στις πλευρές των φτερών δύναται να βελτιώσει σημαντικά την καθοδική δύναμη που ασκείται στην μηχανή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πρόσφυσης της μηχανής και την βελτίωση της συμπεριφοράς της. Επιπρόσθετα η προσθήκη των αεροτομών αυξάνει την οπισθέλκουσα (F_x) όμως λόγω της μεγάλης ιπποδύναμης που έχει η μηχανή, ειδικά μια αγωνιστική, επηρεάζει ελάχιστα την απόδοση της (20). Οπότε καταλήγουμε στο ότι η NACA 6412 120 mm 10 deg, second small airfoil deg 20 (x,y)=(153,245) έχει τη βέλτιστη καθοδική δύναμη (F_y). Εν τέλει και με βάσει τα διαγράμματα βρέθηκε ότι η μεγάλη αύξηση F_y προέρχεται όταν μειώνουμε το α και όταν προσθέτουμε δεύτερη αεροτομή όπως η περίπτωση 7. Αυτή η αύξηση του downforce, αυξάνει την πρόσφυση και την ταχύτητα στις στροφές (25).

Αυτή η εργασία είναι μόνο ένα μικρό κομμάτι της αεροδυναμικής βελτίωσης της μηχανής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για περαιτέρω έρευνες όπως πχ έυρεση βέλτιστου μήκους αεροτομής, βέλτιστης γωνίας προσβολής κλπ. Επίσης μπορεί να γίνει μια μελέτη πάνω στην περίπτωση 7 και να χρησιμοποιηθούν πχ παραπάνω αεροτομές όπως και να εξεταστούν διάφορες αεροτομές σε διάφορα σημεία της μηχανής για να έχουμε μια ολική λύση.

Βιβλιογραφία

1. **NASA.** NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection. [Ηλεκτρονικό] 19 Dec 1985. <https://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/FVF/HTML/ECN-33298-47.html>.
2. **Abbott, Ira Herbert και Von Doenhoff, Albert Edward.** *Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data.* Dover : Dover Publications, 1959.
3. **Anderson, John D.** *Introduction to Flight.* Maryland : McGraw-Hill, 1989.
4. —. *Fundamentals of Aerodynamics.* New York : McGraw-Hill, 2011.
5. **Wood, Andrew.** Aerodynamic Lift, Drag and Moment Coefficients. *AeroToolbox.* [Ηλεκτρονικό] 28 Sept 2022. <https://aerotoolbox.com/lift-drag-moment-coefficient/>.
6. **Talay, Theodore A.** *Introduction to the Aerodynamics of Flight.* Washington DC : NASA, 1975.
7. *Computational Study of Aerodynamic Flow over NACA 4412 Airfoil.* **Petinrin, Moses και Onoja, Vincent.** 3, 2017, British Journal of Applied Science & Technology, Τόμ. 21, σσ. 1-11.
8. **Schlichting, H. και Gersten, K.** *Boundary Layer Theory.* [επιμ.] 8th. Berlin : Springer, 2000.
9. *Study on flow separation and transition of the airfoil in low Reynolds number.* **Dong, Hao, και συν.** 10, 2019, Physics of Fluids, Τόμ. 31.
10. **Airfoil Tools.** Airfoil database list. [Ηλεκτρονικό] <http://airfoiltools.com/search/airfoils?m=a>.
11. **RFeed.** Aerodynamics in F1 – Part 1. [Ηλεκτρονικό] 2020. <https://racingfeed.wordpress.com/2020/06/13/aerodynamics-in-f1-part-1/>.
12. **Smith, Richard.** Formula 1 Aerodynamics. *Symscape.* [Ηλεκτρονικό] 2007. https://www.symscape.com/blog/f1_aero.
13. **Harish, Ajay.** Front Wing of an F1 Car: How to Optimize Its Design. *Simscale Blog.* [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.simscale.com/blog/front-wing-f1-car-optimize/>.

14. *Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly*. **Castro, Xabier και Rana, Zeeshan**. 4, 2020, Fluids, Τόμ. 5.
15. **Somerfield, Matt και Piola, Giorgio**. The Mercedes and Ferrari F1 wing ideas many thought were banned. *Autosport*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.autosport.com/f1/news/the-mercedes-and-ferrari-f1-wing-ideas-many-thought-were-banned/10433854/>.
16. *Aerodynamic Study of MotoGP Motorcycle Flow Redirectors*. **Gonzalez-Arcos, Borja και Gamez-Monter, Pedro**. 12, 2023, Energies, Τόμ. 16.
17. **da Silva, Joao**. *On the Aerodynamics Performance of MotoGP Wings*. Lisbon : Instituto Superior T´ecnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 2019.
18. **Sedlak, Vojtech**. *Motorcycle Cornering Improvement: An Aerodynamical Approach based on Flow Interference*. s.l. : Royal Institute of Technology, 2012.
19. **Peri, Giulio και Capuana, Jonathan**. *Motorcycle aerodynamics: a CFD study from airfoil selection to winglet design for downforce increase and lap time reduction*. Milano : Politecnico Milano, 2023.
20. **Cameron, Kevin**. Cycle World. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.cycleworld.com/blogs/ask-kevin/aero-drag-on-motogp-motorcycles-explained/>.
21. **Crash.net**. Moto GP News. [Ηλεκτρονικό] <https://www.crash.net/motogp>.
22. **Webike**. Tyres Standards. [Ηλεκτρονικό] <https://japan.webike.net/>.
23. **Dunlop**. Dunlop Moto Tyres. [Ηλεκτρονικό] https://www.dunlop.eu/en_gb/motorcycle.html#/.
24. *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*. **Katz, Joseph**. 1995, σσ. 127-145.
25. *Motorcycle Cornering Improvement: An Aerodynamical*. **Vojtech, Sedlak**. 2012, A Master Thesis in Mechanics.

