



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής &
Βελτιστοποίησης

Διπλωματική Εργασία

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ
ΜΟΝΟΘΕΣΙΟΥ FSAE ΜΕΣΩ OpenFOAM
ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΩΝ ΣΥΖΥΓΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

Τσιολάκης Βασίλειος

Επιβλέπων:

Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2015

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ
ΜΟΝΟΘΕΣΙΟΥ FSAE ΜΕΣΩ OpenFOAM ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΩΝ ΣΥΖΥΓΩΝ
ΜΕΘΟΔΩΝ

Διπλωματική Εργασία
Βασίλειος Τσιολάκης

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσαρμογή υπάρχουσας μεθόδου (και λογισμικού) για το σχεδιασμό-βελτιστοποίηση αεροδυναμικών μορφών που αναπτύχθηκε στη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ) του ΕΜΠ και τη χρήση της για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό - βελτιστοποίηση ενός αγωνιστικού μονοθέσιου τύπου FSAE. Το FSAE είναι ένας διεθνής φοιτητικός διαγωνισμός σχεδιασμού αγωνιστικών μονοθέσιων. Τα μονοθέσια αυτά κατασκευάζονται και συμμετέχουν (οδηγούμενα από σπουδαστές) σε δυναμικά και στατικά αγώνισμα, βάσει των οποίων κρίνονται ως προς τις επιδόσεις τους και πολλά επιπλέον χαρακτηριστικά τους. Συνεπώς, υπάρχει μεγάλος αριθμός κανονισμών που στοχεύουν στην ασφάλεια των συμμετεχόντων. Αυτό ισοδυναμεί με πολλούς περιορισμούς που πρέπει να ικανοποιούνται καθ' όλη τη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

Η διπλωματική αυτή εργασία περιλαμβάνει μια εκτενή παρουσίαση των δράσεων της ομάδας FSAE, Prom Racing, με έδρα το ΕΜΠ. Έμφαση θα δοθεί στη συμμετοχή του γράφοντος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό του μονοθέσιου. Παρουσιάζεται η τρέχουσα μορφή του μονοθέσιου, τα βήματα αεροδυναμικού σχεδιασμού για να προκύψει αυτή καθώς και οι διαδικασίες βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, η προσπάθεια στοχεύει στη βελτιστοποίηση του σχήματος όλων των αεροδυναμικών συσκευών, δηλαδή της μπροστά και πίσω πτέρυγας, του πατώματος και του αποκλίνοντος ακροφύσιου, αλλά και του συνόλου των καλυμμάτων που σχεδιά-

στηκαν, τα οποία έχουν λειτουργικό ρόλο (καλύμματα ψυγείων, κινητήρα, εμπρόσθιας προστατευτικής διάταξης). Συνολικός στόχος είναι η αύξηση της παραγόμενης κάθετης δύναμης, με παράλληλη μείωση της οπισθέλκουσας.

Βασικό εργαλείο ανάπτυξης ήταν το ανοιχτό λογισμικό OpenFOAM και βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης, το λογισμικό συνεχών συζυγών μεθόδων (continuous adjoint methods) για ασυμπίεστη τυρβώδη ροή που έχει αναπτύξει η ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ σε περιβάλλον OpenFOAM. Η συνεχής συζυγής μέθοδος υπολογίζει τις παραγώγους ευαισθησίας και επιστρέφει τον χάρτη ευαισθησίας. Δηλαδή, το «χρωματισμό» των επιφανειών του μονοθέσιου που δείχνουν την ένταση της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης (στην προκειμένη της κάθετης δύναμης, της οπισθέλκουσας και του λόγου τους, ανάλογα με την εφαρμογή) ως προς την κάθετη μετατόπιση κάθε σημείου της επιφάνειας του μονοθέσιου. Με βάση αυτήν την πληροφορία, έγιναν τροποποιήσεις στη μορφή των τμημάτων που αναφέρονται παραπάνω. Διερευνήθηκαν εναλλακτικές μορφές του σχεδιασμού και κατά πόσο αποτελούν βελτίωση του αρχικού. Δεν υλοποιήθηκε αυτόματος βρόχος βελτιστοποίησης, καθώς θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη πολλοί περιορισμοί.

National Technical University of Athens

School of Mechanical Engineering

Fluid Section

Lab. of Thermal Turbomachines

Parallel CFD & Optimization Unit

CONTRIBUTION TO THE AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF AN FSAE RACE CAR USING OpenFOAM AND CONTINUOUS ADJOINT METHODS

Diploma Thesis

Bill Tsiolakis

Abstract

This diploma thesis aims at the adaptation of an existing method for the design-optimization of aerodynamic shapes, developed by the Parallel CFD & Optimization Unit of the Lab. of Thermal Turbomachinery (PCOpt/LTT) of NTUA and its use in a series of steps for the aerodynamic design-optimization of an FSAE race car. FSAE is an international student design competition. Student teams design and build a race car. Then, this race car competes in a series of both dynamic and static events being rated according to its performance. The drivers are also students, meaning that there is a large set of rules aiming at the safety of the participants. These rules translate to limitations that need to be met during the design process as well as the optimization.

This diploma thesis consists of a detailed presentation of the NTUA FSAE team's, Prom Racing, ventures. Attention is paid to the participation of the writer, who is responsible for the aerodynamic design of the race car. The present form of the race car will be presented along with the aerodynamic design steps that were taken in order to come to that result and the optimization procedures that took place in the context of this diploma thesis. More specifically, this effort aims at the optimization of the shape of each aerodynamic device, meaning the front and rear wings, the underbody and the diffuser, but also all the lids and covers that have some functional role (sidepods, engine cover, frontal crash structure cover). The general goal is to increase produced downforce while lowering the drag.

Basic development tool is the open source software OpenFOAM and basic optimization tool is the continuous adjoint

methods software for incompressible, turbulent flow developed by the PCOpt/LTT of NTUA in the OpenFOAM environment. The continuous adjoint method computes the sensitivity derivatives and returns the sensitivity map. This is a surface plot that "paints" all of the car's surfaces in accordance to the intensity of the derivative of the objective function (in this case the downforce, the drag and the ratio of the above, depending on the case) with respect to the perpendicular displacement of each point of the car's surface. Based on this information, modifications were made on the shape of each part mentioned above. Alternative design shapes were tested and valued based on whether they improved on the starting design. No automated loop was formed, due to the great number of restrictions.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κ. Χ. Γιαννάκογλου, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με μία διπλωματική εργασία που συνδυάζει το πάθος μου τόσο για το μηχανοκίνητο αθλητισμό, όσο και για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό. Να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση, τις καίριες συμβουλές και υποδείξεις του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να χρησιμοποιήσω λογισμικό και πόρους της ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ για τον τρόπο με τον οποίο με δέχτηκαν και την προθυμία τους να με βοηθήσουν, ιδιαίτερα, το διδάκτορα Βαγγέλη Παπουτσή, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, το διδάκτορα Γιάννη Καββαδία, ο οποίος μου προσέφερε χρήσιμες συμβουλές στο OpenFOAM και τους υποψήφιους διδάκτορες Χρήστο Βεζύρη και Χρήστο Καπέλλο, οι οποίοι με βοήθησαν στα πρώτα μου βήματα στο OpenFOAM.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με στηρίζει σε όλες τις επιλογές μου και τους στενούς μου φίλους, με τους οποίους μοιράστηκα δυσκολίες και χαρές.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ο διεθνής φοιτητικός διαγωνισμός σχεδιασμού FSAE . .	1
1.2	FSAE στο ΕΜΠ	5
1.3	Περιεχόμενα της Διπλωματικής Εργασίας	8
1.4	Αεροδυναμική βελτιστοποίηση με χρήση Συζυγών Μεθόδων	11
2	Κανονισμοί	13
2.1	Αρχικοί κανονισμοί	13
2.2	Νέοι κανονισμοί και η επιρροή τους στο σχεδιασμό . .	17
3	Μοντελοποίηση	23
3.1	Προκαταρκτικό μοντέλο	23
3.2	Προσθέτοντας λεπτομέρεια	25
3.3	Ολοκληρώνοντας το μοντέλο	28
4	Δημιουργία Πλέγματος	31
5	Πρωτεύουσα Αεροδυναμική Μελέτη	41
5.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	41
5.1.1	Εξισώσεις ροής	42
5.1.2	Οριακές συνθήκες	44
5.1.3	Διακριτοποίηση	45
5.2	Επίλυση του συστήματος σε περιβάλλον OpenFOAM .	48
5.3	Αποτελέσματα και αλλαγές στον αρχικό σχεδιασμό . .	55
6	Βελτιστοποίηση	65
6.1	Συζυγείς Μέθοδοι Βελτιστοποίησης σε Μόνιμη Ασυμπίεστη Ροή	65
6.1.1	Αντικειμενική Συνάρτηση και Συζυγείς Μεταβλητές	66
6.2	Συζυγείς Οριακές Συνθήκες	69

6.2.1	Συζυγείς Οριακές Συνθήκες στην Είσοδο	69
6.2.2	Συζυγείς Οριακές Συνθήκες στην Έξοδο	70
6.2.3	Συζυγείς Οριακές Συνθήκες στα Σταθερά και Παραμετροποιημένα Τοιχώματα	70
6.3	Τελική Έκφραση των Παραγώνων Ευαισθησίας	71
6.4	Χρήση των συζυγών μεθόδων στη διπλωματική εργασία	71
6.5	Βελτιστοποίηση του αγωνιστικού μονοθέσιου Prom16 .	73
6.5.1	Κύκλος βελτιστοποίησης	74
7	Μελέτη με περιστρεφόμενους τροχούς	95
7.1	Νέες οριακές συνθήκες	95
7.2	Αποτελέσματα επίλυσης ροής με περιστρεφόμενους τροχούς	96
8	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα	101

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε ο αεροδυναμικός σχεδιασμός και μελέτη του αγωνιστικού μονοθέσιου FSAE, Prom16, της ομάδας Prom Racing, με έδρα το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Παρακάτω θα παρουσιαστούν όλα τα βήματα από τη διαδικασία λήψης αποφάσεων στο σχεδιασμό έως και το στάδιο της βελτιστοποίησης. Τα ανωτέρω βήματα περιλαμβάνουν την αρχική ιδέα και την εξέλιξή της, τη δημιουργία μοντέλου με χρήση προγραμμάτων CAD, την αεροδυναμική μελέτη με χρήση του υπολογιστικού πακέτου OpenFoam καθώς και το πρώτο βήμα αεροδυναμικής βελτιστοποίησης.

Αρχικά, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό το πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η προσπάθεια.

1.1 Ο διεθνής φοιτητικός διαγωνισμός σχεδιασμού FSAE

Πρόκειται για ένα διεθνή φοιτητικό διαγωνισμό σχεδιασμού που οργανώνεται από τον SAE International (Society of Automotive Engineers). Ξεκίνησε στην Αμερική το 1979 και περνώντας από διάφορα στάδια κατέληξε να αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα φοιτητικά προγράμματα του χώρου με 9 επίσημα αναγνωρισμένους αγώνες σε όλο τον κόσμο και αρκετούς ακόμα ανεπίσημους. Εξαπλώθηκε σε επίπεδο που πλέον υποστηρίζεται από εταιρείες κολοσσούς του



Σχήμα 1.1: Μονοθέσιο Grimsel της ομάδας AMZ Racing με έδρα το ETH Zurich. Με το συγκεκριμένο μονοθέσιο στέφθηκαν νικητές στους διαγωνισμούς Αγγλίας, Γερμανίας και Ισπανίας το 2014.

τεχνολογικού και όχι μόνο τομέα (Mercedes AMG, Ferrari, Porsche, Yamaha, Red Bull, Dekra, SKF, Bosch, κ.α.).

Η λογική του διαγωνισμού είναι πως κάθε ομάδα που συμμετέχει αποτελεί μία φανταστική κατασκευαστική εταιρεία η οποία καλείται να σχεδιάσει και να αναπτύξει ένα αγωνιστικό μονοθέσιο σύμφωνα με ένα σύνολο κανόνων (Σχήμα 1.1). Στη συνέχεια, το πρωτότυπο παρουσιάζεται στους διαγωνισμούς και κρίνεται ως εμπορικό προϊόν. Οι δοκιμασίες αποτελούνται τόσο από δυναμικά αγωνίσματα (autocross, endurance, acceleration, skid-pad και fuel consumption), στις οποίες σημασία έχουν οι επιδόσεις του μονοθέσιου, όσο και από στατικά (cost and manufacturing analysis, presentation). Με βάση τα παραπάνω βαθμολογείται το κάθε πρωτότυπο από υπεύθυνες επιτροπές διεθνώς αναγνωρισμένων μηχανικών. Αποτέλεσμα είναι οι ομάδες να προσπαθούν να ξεπεράσουν τα προβλήματα και τους περιορισμούς που εμφανίζονται και με έξυπνο σχεδιασμό να θέτουν κάθε φορά νέα όρια σε όλους τους τομείς.

Τα δυναμικά αγωνίσματα δοκιμάζουν πλήρως τις δυνατότητες του μονοθέσιου. Στο acceleration δοκιμάζεται η επιτάχυνση. Το μονοθέσιο επιταχύνει από στάση. Το μήκος που πρέπει να καλύψει είναι 75

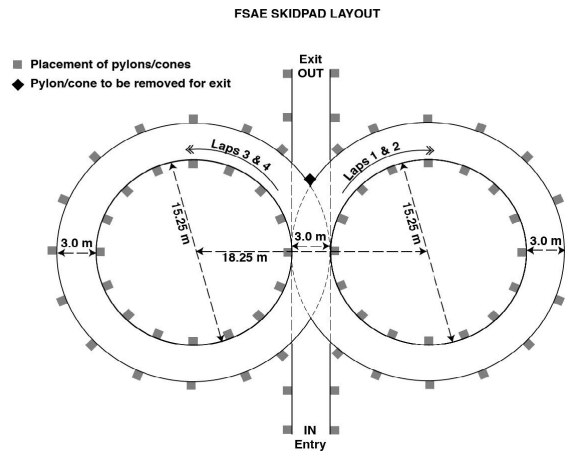
m και βαθμολογείται ανάλογα με το χρόνο που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωσή τους. Μέγιστη βαθμολογία είναι 75 βαθμοί. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται η ομάδα που είχε τον καλύτερο χρόνο επιτάχυνσης στο διαγωνισμό της Γερμανίας (FSG).



Σχήμα 1.2: Μονοθέσιο F0711-9 της ομάδας Rennteam Stuttgart. Νικητές στο αγώνισμα της επιτάχυνσης στη Γερμανία με χρόνο λίγο πάνω από τα 3,8 s.

Στο διαγωνισμό του skid-rod δοκιμάζεται η πλευρική επιτάχυνση. Η διαγράμμιση αποτελείται από δύο κυκλικές διαδρομές μέσης διαμέτρου 18,25 m και πλάτος πίστας 3 m. Τα κέντρα των κύκλων απέχουν μεταξύ τους 18,25 m. Το μονοθέσιο πρέπει να καλύψει δύο περιστροφές στον πρώτο κύκλο και στη συνέχεια άλλες δύο στο δεύτερο. Η χάραξη φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Η βαθμολογία βασίζεται στην πλευρική επιτάχυνση που αναπτύσσει το κάθε μονοθέσιο σε πολλαπλάσια του g. Η διάμετρος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση είναι ίση με 17,10 m και ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι $a_{Lat} = 2,012D/t^2$. Η μέγιστη βαθμολογία στο αγώνισμα είναι 50 βαθμοί.

Στο autocross δοκιμάζεται η οδηγική συμπεριφορά του πρωτότυπου. Μονοθέσιο και οδηγός καλούνται να ολοκληρώσουν μια χρονομετρημένη διαδρομή. Χαρακτηρίζεται από στενές και απότομες στροφές, ενώ περιέχει και τμήματα που θα κρίνουν την ικανότητα του μονοθέσιου σε επιτάχυνση και φρενάρισμα. Κάθε οδηγός έχει δύο προσπάθειες και κάθε ομάδα συμμετέχει με δύο οδηγούς. Ο καλύτερος



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα της χάραξης πίστας skid-pad. Φαίνεται και η σειρά με την οποία πρέπει να καλυφθούν οι τέσσερις συνολικά περιστροφές.

χρόνος είναι αυτός που καταχωρίζεται. Η μέγιστη βαθμολογία είναι 150 βαθμοί.

Τέλος, στο endurance, δοκιμάζεται η αντοχή και η αξιοπιστία του μονοθέσιου παράλληλα με τη δυναμική συμπεριφορά του. Σε αυτή τη δοκιμασία το μονοθέσιο καλύπτει περίπου 22 km (δύο οδηγοί από 11 km). Η μέγιστη βαθμολογία είναι 300 βαθμοί. Οι 50 δίνονται σε κάθε ομάδα που καταφέρνει να τερματίσει και οι υπόλοιποι ανάλογα με το χρόνο που χρειάστηκε για να καλύψει η ομάδα τα 22 km. Παράλληλα με το αγώνισμα του endurance διεξάγεται και το αγώνισμα του fuel consumption, δηλαδή της αποδοτικότητας του μονοθέσιου. Πριν ξεκινήσει την προσπάθειά του ο κάθε οδηγός, το μονοθέσιο ανεφοδιάζεται με καύσιμο μέχρι μία συγκεκριμένη ένδειξη. Στο τέλος των 11 km του κάθε οδηγού μετράται η ποσότητα καυσίμου που καταναλώθηκε και η ομάδα βαθμολογείται βάσει του CO_2 που παράγεται. Θεωρείται πως κάθε λίτρο αμόλυβδης βενζίνης παράγει 2,31 kg CO_2 . Αυτό γίνεται διότι επιτρέπεται η χρήση και άλλων ειδών καυσίμου. Η μέγιστη βαθμολογία είναι 100 βαθμοί.

Από τα παραπάνω γίνεται ξεκάθαρο πως η μέγιστη βαθμολογία στα δυναμικά αγωνίσματα είναι 675 βαθμοί. Πρέπει να τονισθεί πως η βαθμολογία δεν κρίνεται από τη θέση στην κατάταξη αλλά από τη σχέση της επίδοσης της κάθε ομάδας με την καλύτερη του αγωνίσματος. Τα δυναμικά αγωνίσματα μπορεί να συνεισφέρουν στο κύριο τμήμα της βαθμολογίας αλλά δεν κρίνουν μόνο αυτά την κατάταξη. Τα στατικά αγωνίσματα είναι εξίσου σημαντικά.

Στο cost and manufacturing κρίνεται το μονοθέσιο βάσει του κό-

στους του και της αξίας των χρημάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Η ομάδα παρέχει ένα σύνολο αναλυτικών εγγράφων υλικών και κατασκευών στους κριτές και αυτοί ελέγχουν το μονοθέσιο. Δίνουν ιδιαίτερη σημασία στις επιλογές που περιορίζουν το κόστος χωρίς επιπτώσεις στις επιδόσεις ή που για μικρή αύξηση στο κόστος προσφέρουν πολλά στη συμπεριφορά του μονοθέσιου. Η μέγιστη βαθμολογία είναι 100 βαθμοί.

Στο presentation η ομάδα παρουσιάζει ένα επιχειρηματικό μοντέλο σε αρμόδια επιτροπή. Τα μέλη της επιτροπής αποτελούν τα στελέχη της εταιρείας που ανέθεσε την κατασκευή του μονοθέσιου. Στόχος είναι να πεισθούν πως το προϊόν της ομάδας είναι αυτό που καλύπτει καλύτερα τις ανάγκες τους και να υπάρχουν αναλυτικές πληροφορίες για όλα τα στάδια της επιχειρηματικής διαδικασίας. Η μέγιστη βαθμολογία είναι 75 βαθμοί.

Το τελευταίο στατικό αγώνισμα είναι αυτό του design. Σε αυτό το αγώνισμα στόχος είναι να παρουσιαστεί σε κριτές ο μηχανολογικός σχεδιασμός και η προσπάθεια που έχει γίνει, καθώς και πως τα παραπάνω συμβαδίζουν με τις εμπορικές ανάγκες τόσο σε συνολικές επιδόσεις όσο και σε συνολική αξία. Πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως έγιναν καίριες, λογικές και συνειδητές σχεδιαστικές επιλογές ώστε να υπάρξει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Η μέγιστη βαθμολογία είναι 150 βαθμοί.

Για τους αναγνώστες οι οποίοι δεν γνωρίζουν το διαγωνισμό και επιθυμούν περισσότερες πληροφορίες πάνω στους κανονισμούς μπορούν να επισκεφθούν τον ιστότοπο <http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=e179e647-cb8c-4ab0-860c-ec69aae080a3>.

1.2 FSAE στο ΕΜΠ

Στο πλαίσιο του διαγωνισμού FSAE, η ομάδα Prom Racing με έδρα το ΕΜΠ σχεδιάζει και κατασκευάζει αγωνιστικά μονοθέσια τα τελευταία πέντε έτη. Η προσπάθεια ξεκίνησε το 2008 από τους διπλωματούχους πλέον φοιτητές της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Βασίλη Τσινιά, Αλέξη Βαμβακά, Γιάννη Μιχαλόπουλο, Γιώργο Ντέμο και Γιώργο Γεωργιάδη. Κινητήριος δύναμη ήταν η δίψα για τους αγώνες ταχύτητας και στόχος ήταν να αποκτήσουν τη γνώση που απαιτείται ώστε να σχεδιαστεί ένα ανταγωνιστικό μονοθέσιο και να συμμετέχει στο διαγωνισμό. Λίγους μήνες μετά την ίδρυση της ομάδας ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του πρώτου μονοθέσιου. Ο σχεδιασμός χρησιμοποιήθηκε για τη συμμετοχή στην 3η κατηγορία του διαγωνισμού FSAE Italy

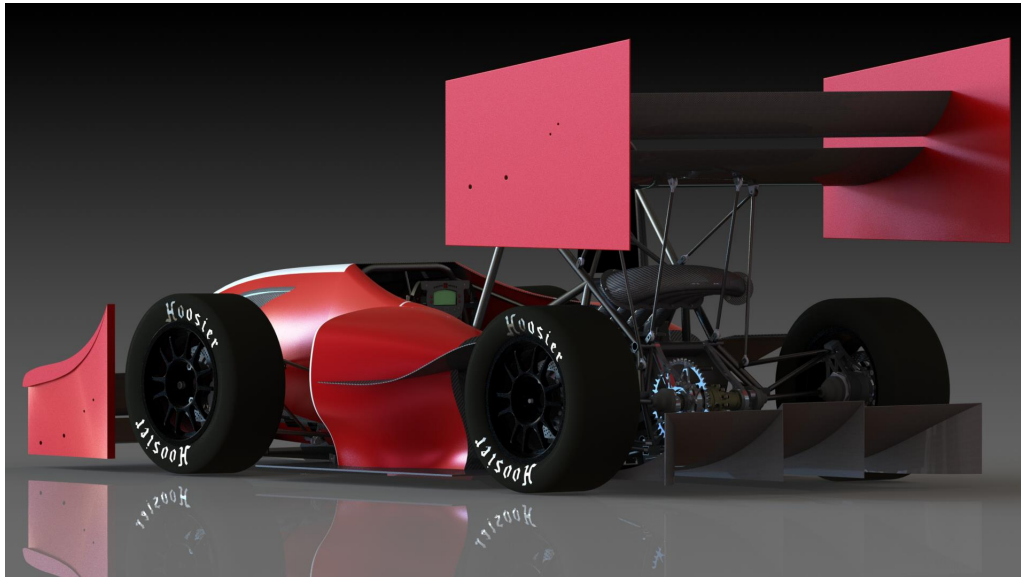
2008 η οποία αποτελεί μόνο διαγωνισμό σχεδιασμού και δεν κρίνεται κάποιο πρωτότυπο. Στην πρώτη εμφάνισή της, η ομάδα κέρδισε την πρώτη θέση στην κατηγορία. Πλέον, στόχος ήταν να κατασκευαστεί το πρώτο αγωνιστικό μονοθέσιο.

Το 2010-11, βρέθηκε χρηματοδότηση και κατασκευάστηκε το πρώτο μονοθέσιο της ομάδας, Prom11 (Σχήμα 1.4). Με αυτό η ομάδα συμμετείχε στους διαγωνισμούς της Ουγγαρίας και της Ιταλίας. Μάλιστα, στο διαγωνισμό της Ουγγαρίας κατάφερε να κερδίσει την πρώτη θέση στο αγώνισμα του Cost and Manufacturing Analysis λόγω του χαμηλού συνολικού κόστους ενός πολύ ανταγωνιστικού μονοθέσιου. Στην Ιταλία πήραμε την 32η θέση στους 51 συμμετέχοντες. Δυστυχώς, λόγω προβλήματος στον κινητήρα, δεν ολοκληρώθηκαν όλα τα αγωνίσματα με απώλειες πολλών βαθμών, συνεπώς και θέσεων. Αν ολοκληρώνονταν οι διαδρομές του endurance, η βαθμολογία θα προσέφερε στην ομάδα θέση μέσα στην 20άδα. Παρόλα αυτά τα σχόλια από τους κριτές και τις υπόλοιπες ομάδες ήταν πολύ θετικά. Ορισμένοι από τους κριτές σχολίασαν πως ήταν πιθανότατα η καλύτερη προσπάθεια πρωτοεμφανιζόμενης ομάδας που είχαν δει.



Σχήμα 1.4: Το μονοθέσιο Prom11b της ομάδας Prom Racing με έδρα το ΕΜΠ. Αποτελεί βελτίωση του μονοθέσιου Prom11. Πρόκειται για το ίδιο μονοθέσιο που χρησιμοποιήθηκε στους διαγωνισμούς του 2011. Εδώ βρίσκεται στην πίστα Kartodromos όπου έγιναν οι περισσότερες δοκιμές του μονοθέσιου.

Εισπράττοντας τα θετικά σχόλια, η ομάδα συνέχισε επιθυμώντας να συμμετέχει και σε διαγωνισμούς του 2012 πετυχαίνοντας καλύτερα αποτελέσματα. Δυστυχώς, η έλλειψη χορηγών και η έλλειψη υποστήριξης από το ίδρυμα δεν έδωσε τη δυνατότητα για κάτι τέτοιο. Το 2012 πολλά από τα παλιά μέλη αποχώρησαν από την ομάδα αφού πλέον είχαν αποφοιτήσει. Οπότε το 2012-13 ήταν μια χρονιά ανασυγκρότησης με την προσχώρηση νέων μελών, την εκπαίδευσή τους και την έναρξη του σχεδιασμού του νέου μονοθέσιου P13 (Σχήμα 1.5). Να τονισθεί πως ήταν το πρώτο μονοθέσιο της ομάδας με αεροδυναμικό σχεδιασμό. Ενώ υπήρχαν συζητήσεις με πιθανούς χορηγούς, καμία προσπάθεια δεν απέφερε καρπούς. Επομένως, δεν προχώρησε η διαδικασία κατασκευής.



Σχήμα 1.5: Φωτορεαλιστική αναπαράσταση του μονοθέσιου Prom13 της ομάδας Prom Racing με έδρα το ΕΜΠ. Δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Το ψηφιακό υλικό παρουσιάστηκε στον ιστότοπο FSTotal στο Facebook. Από πλευράς σχεδιασμού ήταν καλύτερο σε κάθε τομέα του προκατόχου του και αποτελεί την πρώτη προσπάθεια της ομάδας για ολοκληρωμένο αεροδυναμικό σχεδιασμό.

Το 2014-15 έγινε ολική αναδιάρθρωση της ομάδας και επιλογή νέων μελών καθώς ήταν φανερό πως τα προηγούμενα έτη οι προσπάθειες δεν απέδιδαν. Μετά από τέσσερα έτη βρέθηκε νέος χορηγός, διατεθειμένος να χορηγήσει αποκλειστικά την ομάδα. Έτσι η ομάδα ονομάζεται πλέον Prom Racing Powered By Bosch και προχωρά στο

σχεδιασμό μονοθέσιου για τους διαγωνισμούς του 2015-16.

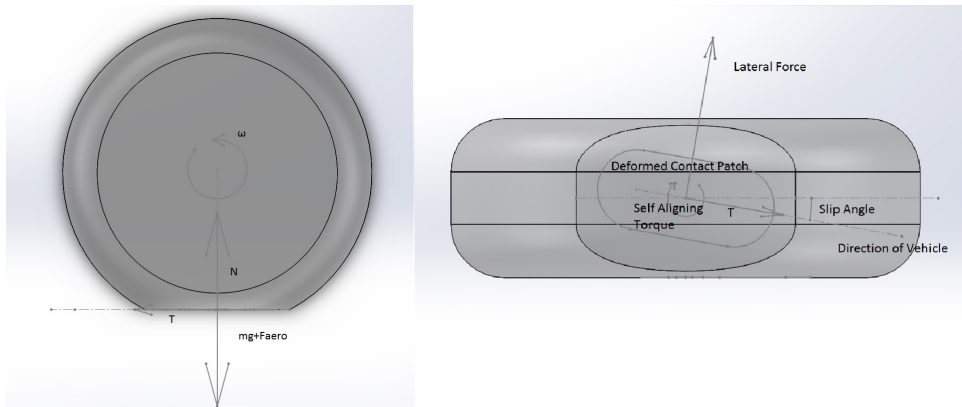
Πλέον έχει ολοκληρωθεί το στάδιο του σχεδιασμού. Εδώ πρέπει να γίνουν γνωστά τα άτομα που συμμετείχαν στη διαδικασία. Ο Σταύρος Πατηνιώτης είναι υπεύθυνος σχεδιασμού του νέου πλαισίου. Ο Νεοκλής Ταϊφόρος υπεύθυνος σχεδιασμού του παλιότερου πλαισίου το οποίο χρησιμοποιείται επίσης στη μελέτη. Οι Στέφανος Ουσταμπασίδης και Χάρης Κωστούρος είναι υπεύθυνοι της ανάρτησης, οι Φίλιππος Μπεζμέρης και Άγγελος Κρεμμύδας είναι υπεύθυνοι του κινητήρα και ο Ματθαίος Ιερωνυμάκης μαζί με τον Σταύρο Πατηνιώτη υπεύθυνοι του μηχανολογικού σχεδιασμού. Ο εκπονήσας την παρούσα διπλωματική εργασία συμμετείχε στην ομάδα από το 2011 με την ευθύνη του αεροδυναμικού σχεδιασμού του μονοθέσιου τα τελευταία τρία χρόνια. Μόλις ολοκληρωθούν οι βελτιστοποιήσεις σε όλους του τομείς θα ξεκινήσει η κατασκευή. Αυτό θα δώσει χρόνο για τεστ στους οδηγούς και εμφάνιση προβλημάτων ώστε να διορθωθούν και να αποφευχθούν κατά τους διαγωνισμούς.

1.3 Περιεχόμενα της Διπλωματικής Εργασίας

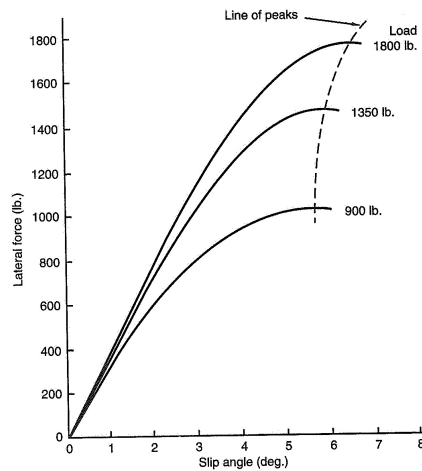
Όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του μονοθέσιου. Αυτό σημαίνει πως έγινε η σύλληψη της ιδέας των συσκευών που συμβάλλουν στην αεροδυναμική του μονοθέσιου, ακολούθησε η μοντελοποίηση της ιδέας και έγινε μελέτη της με χρήση λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Έπειτα ακολούθησε διαδικασία αεροδυναμικής βελτιστοποίησης με χρήση συνεχών συζυγών μεθόδων. Τα αποτελέσματα του κώδικα βελτιστοποίησης μεταφράστηκαν σε μετατροπές του μονοθέσιου οι οποίες μελετώνται ως προς την απόδοσή τους.

Γιατί να γίνει αεροδυναμικός σχεδιασμός του μονοθέσιου; Όλα τα οχήματα εδάφους έχουν την ικανότητα να αλλάζουν πορεία κίνησης, όταν δοθεί η εντολή από το τιμόνι, λόγω των εγκάρσιων φορτίων που αναπτύσσονται από τα ελαστικά. Θεωρώντας πολύ απλοποιημένο μοντέλο ελαστικού, το εγκάρσιο φορτίο αναπτύσσεται λόγω της τριβής μεταξύ επιφάνειας επαφής ελαστικού και δρόμου και της ελαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια επαφής και το υπόλοιπο ελαστικό κατά την περιστροφή του τροχού (γωνία ολίσθησης) (Σχήμα

1.6). Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το κατακόρυφο φορτίο στους τροχούς και η γωνία ολίσθησης, τόσο αυξάνεται και το εγκάρσιο φορτίο που αναπτύσσεται (Σχήμα 1.7). Αντίστοιχα, για επιτάχυνση και πέδη, σημασία έχει η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Για απλοποιημένο μοντέλο τροχού, η τριβή τροχού-οδοστρώματος είναι ίση με $T = \mu N$, όπου N είναι η δύναμη αντίδρασης από το οδόστρωμα στον τροχό και μ ο συντελεστής τριβής. Για το μέτρο της δύναμης N ισχύει $N = mg + F_{aero}$, όπου m είναι η μάζα που αντιστοιχεί στο κάθε άκρο του οχήματος και F_{aero} το αεροδυναμικό φορτίο που κατανέμεται στο ίδιο άκρο. Δηλαδή, η αύξηση του αεροδυναμικού φορτίου βελτιώνει τη λειτουργία των ελαστικών και τη συμπεριφορά του οχήματος χωρίς την προσθήκη επιπλέον αδρανειακών φορτίων (μάζα).



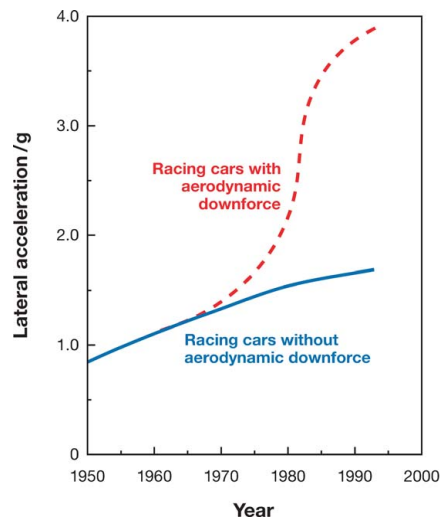
Σχήμα 1.6: Απλοποιημένο μοντέλο ελαστικού κινούμενο με γωνιακή ταχύτητα ω και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτό. Το ελαστικό περιστρέφεται κατά τον κατακόρυφο άξονα σύμφωνα με την εντολή που δίνεται από το τιμόνι. Το τμήμα του που έρχεται σε επαφή με το οδόστρωμα δεν περιστρέφεται το ίδιο δημιουργώντας μία ζώνη παραμόρφωσης στο ελαστικό. Εξαιτίας αυτής εμφανίζεται η ροπή επαναφοράς. Η τριβή T και η αντίδρασή της εξαρτώνται από τη δύναμη αντίδρασης του οδοστρώματος στο ελαστικό, N . Για τη N ισχύει $N = mg + F_{aero}$.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα που δείχνει το εγκάρσιο φορτίο που αναπτύσσεται από το ελαστικό συναρτήσει της γωνίας ολίσθησης και του κατακόρυφου φορτίου στον τροχό. Η εικόνα βρέθηκε στο διαδίκτυο. Πηγή: RaceCar Vehicle Dynamics - William & Douglas Milliken

Τα αγωνιστικά οχήματα τα τελευταία χρόνια έχουν δει πολλές βελτιώσεις στον τομέα της αεροδυναμικής. Αποτέλεσμα είναι η ικανότητά τους σε πλευρική επιτάχυνση να έχει βελτιωθεί δραματικά (Σχήμα 1.8). Στο διαγωνισμό FSAE η μέση ταχύτητα των αγωνισμάτων είναι χαμηλή, ικανή όμως για την παραγωγή κατακόρυφων αεροδυναμικών φορτίων. Έχει αποδειχθεί πως χωρίς αεροδυναμικά βοηθήματα τα μονοθέσια που κατασκευάζονται δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν πλήρως τις δυνατότητες των ελαστικών. Ο κατασκευαστής (Hoosier) δηλώνει πως τα ελαστικά είναι σε θέση να προσφέρουν πλευρική επιτάχυνση έως 2g. Το μονοθέσιο της ομάδας σε ιδανικές συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιήσει λίγο κάτω από 1.5g. Επομένως, με τη χρήση αεροδυναμικών βοηθημάτων στόχος είναι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ελαστικά με το βέλτιστο τρόπο.

1.4. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΖΥΓΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ 11



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα που δείχνει την ικανότητα αγωνιστικών μονοθέσιων σε πλευρική επιτάχυνση με την πάροδο των χρόνων. Τα οχήματα που δεν χρησιμοποιούν αεροδυναμικά βοηθήματα βελτιώνονται με πολύ αργό ρυθμό. Το σχήμα βρέθηκε στο διαδίκτυο. Πηγή: Aerodynamics of Race Cars - Joseph Katz.

1.4 Αεροδυναμική βελτιστοποίηση με χρήση Συζυγών Μεθόδων

Ο τομέας της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής έχει προοδεύσει πολύ τα τελευταία χρόνια. Πλέον οι υπολογιστικοί πόροι δεν κοστίζουν όσο παλαιότερα και οι δυνατότητες που προσφέρονται από διάφορα πακέτα λογισμικού διευκολύνουν πιθανές αεροδυναμικές μελέτες. Στην περίπτωση όμως του διαγωνισμού FSAE μία τυπική αεροδυναμική μελέτη κατά την οποία ο σχεδιαστής βλέπει αποτελέσματα και βάσει αυτών κάνει αλλαγές δεν είναι αρκετή. Σα μέθοδος είναι χρονοβόρα και αβέβαιη. Αλλαγές σε σχέδια με έντονη πολυπλοκότητα δεν μπορούν να γίνουν παρά μόνο σε προφανή σημεία. Πέραν αυτού μία αλλαγή μπορεί να έχει μη αναμενόμενες αρνητικές επιπτώσεις. Οπότε κρίνεται απαραίτητη κάποια είδους πληροφορία η οποία να μπορεί να ορίσει τις επιπτώσεις της όποιας αλλαγής γίνει στο σχήμα. Αυτή την πληροφορία μπορεί να προσφέρει κάποια μέθοδος βελτιστοποίησης.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η συνεχής συζυγής μέθοδος (continuous adjoint method). Οι συζυγείς διατυπώσεις αποτελούν μαθηματικό εργαλείο για τον υπολογισμό της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτη-

σης, ικανοποιώντας παράλληλα και τις εξισώσεις κατάστασης ροής του προβλήματος. Ως μέθοδος βελτιστοποίησης ανήκει στην οικογένεια αιτιοκρατικών μεθόδων βασισμένων στην κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης. Ένα από τα χαρακτηριστικά που την ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες είναι η ανεξαρτησία του υπολογιστικού κόστους από το πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού. Σε μία μελέτη μεγάλης πολυπλοκότητας με πολλές μεταβλητές σχεδιασμού ή σε μία μελέτη όπου ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι σημαντικός, ο περιορισμός του υπολογιστικού κόστους αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία. Ας σημειωθεί ότι απαιτείται να γίνονται αλλαγές κάθε φορά που η αντικειμενική συνάρτηση μεταβάλλεται.

Τα τελευταία χρόνια η Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ασχολείται με την ανάπτυξη συζυγών μεθόδων για χρήση στην αεροδυναμική βελτιστοποίηση. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιηθεί κώδικας συνεχών συζυγών μεθόδων ο οποίος αναπτύχθηκε από την ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ.

Κεφάλαιο 2

Κανονισμοί

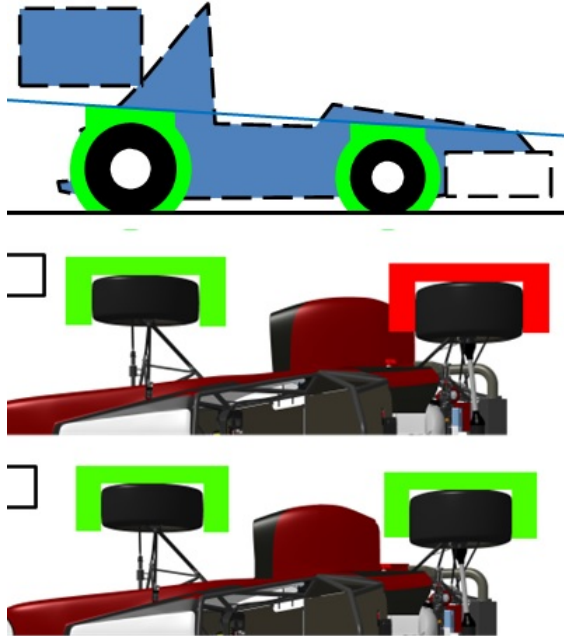
Όπως ειπώθηκε παραπάνω, ο διαγωνισμός είναι φοιτητικός. Οι οδηγοί είναι και αυτοί φοιτητές, οπότε είναι σημαντικός ο τομέας της ασφάλειας. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σύνολο κανονισμών που στόχο έχουν να αποτρέψουν ατυχήματα είτε επιβάλλοντας ασφαλή σχεδιασμό, είτε περιορίζοντας τις δυνατότητες των μονοθέσιων. Είναι λοιπόν ξεκάθαρο, πως οι κανόνες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και τον τομέα της αεροδυναμικής. Οπότε θα ακολουθήσει ανάλυση των κανονισμών που επηρεάζουν τις αποφάσεις.

Να τονισθεί πως, παρακάτω, θα χρησιμοποιηθούν οι εκφράσεις "αεροδυναμικό πακέτο" και "αεροδυναμικές συσκευές". Οι όροι αυτοί έχουν καθιερωθεί να χαρακτηρίζουν τις εμπρός και πίσω πτέρυγες, το πάτωμα με το αποκλίνον ακροφύσιο, τα καλύμματα των ψυγείων και οποιαδήποτε διαμόρφωση στο όχημα έχει στόχο τη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος μέσω της ροής του αέρα.

2.1 Αρχικοί κανονισμοί

Ο σχεδιασμός ξεκίνησε όταν βρίσκονταν ακόμα σε ισχύ οι παλαιοί κανονισμοί. Οι περιορισμοί δεν επέμβαιναν σημαντικά στο σχεδιασμό. Αρχικά, διευκρίνιζαν πως το μονοθέσιο πρέπει να είναι "open-wheel", δηλαδή οι τροχοί να μην καλύπτονται από κάποια διαμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, οι τροχοί δεν πρέπει να καλύπτονται σε πλάγια όψη. Επίσης, θεωρείται ζώνη, ακτινικά γύρω από τον τροχό έως απόσταση 68.6 mm από αυτόν, όπου δεν επιτρέπεται να εισέρχεται κανένα στοιχείο του μονοθέσιου. Τέλος, σε κάτοψη, 68.6 mm πάνω από τους τροχούς δεν πρέπει να καλύπτονται οι άνω 180° του τροχού

(Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Φαίνεται ο ορισμός του open-wheel μονοθέσιου. Σε κάτοψη από τη γραμμή οι άνω 180 μοίρες των τροχών δεν πρέπει να καλύπτονται. Σε πλάγια όψη οι τροχοί δεν πρέπει να καλύπτονται και δεν επιτρέπεται να εισέρχεται καμία διάταξη στη ζώνη που δημιουργείται από τον τροχό έως ακτινική απόσταση 68.6 mm από αυτόν.

Επιπλέον, οι κανονισμοί περιορίζουν τη θέση στην οποία μπορεί να βρίσκεται η κάθε αεροδυναμική συσκευή. Δηλαδή, καμία αεροδυναμική συσκευή δεν μπορεί να εξέχει μπροστά περισσότερο από 762 mm από την πλέον εμπρός επιφάνεια των εμπρός τροχών. Καμία αεροδυναμική συσκευή δεν μπορεί να εξέχει προς τα πίσω περισσότερο από 305 mm από την πλέον πίσω επιφάνεια των πίσω τροχών. Τέλος, καμία αεροδυναμική συσκευή δεν μπορεί να εξέχει στο πλάι περισσότερο από την εξωτερική επιφάνεια των τροχών μετρούμενη στο ύψος της πλήμνης. Αυτοί αποτελούν και τους σημαντικότερους περιορισμούς κατά το στάδιο της βελτιστοποίησης. Δεν πρέπει να παραβιαστούν καθώς θα οδηγούσαν σε αποκλεισμό της ομάδας. Πέραν των κανονισμών που περιορίζουν με άμεσο τρόπο τον αεροδυναμικό σχεδιασμό, υπάρχουν και κανονισμοί οι οποίοι το κάνουν έμμεσα. Δηλαδή, η ισχύς του κινητήρα περιορίζεται μέσω της εισαγωγής η οποία είναι μικρής διαμέτρου. Αποτέλεσμα είναι η επιβάρυνση της οπισθέλκουσας να μεγενθύνεται. Επίσης, σύμφωνα με

τους κανονισμούς, η μέση ταχύτητα των δυναμικών αγωνισμάτων περιορίζεται στα 40-50 km/h και η μέγιστη στα 100-110 km/h. Πρακτικά, η ταχύτητα είναι υψηλότερη γύρω στα 50-70 km/h ανάλογα με τη χάραξη της πίστας. Αυτό σημαίνει πως η μελέτη και ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Με αυτούς τους κανονισμούς ξεκίνησε ο αεροδυναμικός σχεδιασμός. Το πρώτο στάδιο αποτελεί τη σύλληψη της ιδέας. Οι επιλογές είναι είτε ένα επιθετικό αεροδυναμικό πακέτο, μεγάλο σε όγκο και βάρος το οποίο περιορίζει τις δυνατότητες του μονοθέσιου στον τομέα της μηχανικής πρόσφυσης, δηλαδή της πρόσφυσης που προσφέρει η διάταξη του συστήματος ανάρτησης, λόγω υψηλότερου κέντρου βάρους και αύξησης του συνολικού βάρους (Σχήμα 2.2), είτε ένα αεροδυναμικό πακέτο το οποίο έχει βέλτιστη απόδοση σε ταχύτητα υψηλότερη της ενδιαφερόμενης, το οποίο όμως δεν επιβαρύνει το μονοθέσιο με μεγάλη τιμή οπισθέλκουσας ή βάρους και το οποίο πιθανότατα να φέρει μεγάλη βαθμολογία στο κομμάτι του design (Σχήμα 2.3). Η τρίτη επιλογή ήταν ένας συνδυασμός των δύο. Έχοντας πειραματικά δεδομένα από το μονοθέσιο Prom11 και Prom11b καθώς και από τα σχόλια των βασικών οδηγών, η τρίτη επιλογή θεωρείται η καταλληλότερη. Αυτό σημαίνει πως όσο καλύτερη συμπεριφορά και αν αποκτήσει το μονοθέσιο θα συνεχίσει να υπάρχει άμεση ανάγκη για καλύτερη απόκριση του μπροστά τμήματος και βελτίωση της ικανότητας προς ελιγμό. Επομένως, επιλέχθηκε ο σχεδιασμός εμπρός πτέρυγας η οποία να καλύπτει πλήρως τον επιτρεπόμενο χώρο και να είναι αρκετά επιθετική ώστε να προσφέρει ικανή κατακόρυφη δύναμη. Η πίσω πτέρυγα θα εξέχει έως του επιτρεπτού σημείου και θα έχει δύο ή τρία στοιχεία-πτερύγια ανάλογα με τα αποτελέσματα της μελέτης μέσω λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, η οποία όμως να βρίσκεται όσο το δυνατό πιο χαμηλά και να μην έχει υψηλή οπισθέλκουσα ώστε να μην επηρεάσει αρνητικά το μονοθέσιο στους υπόλοιπους τομείς. Το πάτωμα με το αποκλίνον ακροφύσιο θα καλύπτουν ολόκληρο το πλαίσιο ώστε να εκμεταλλευτούν, στο έπακρο, την ιδιότητά τους για παραγωγή κάθετης δύναμης με ελάχιστη οπισθέλκουσα. Τέλος, τα καλύμματα των ψυγείων και του κινητήρα θα είναι σχεδιασμένα ώστε να επηρεάζουν στο ελάχιστο τη ροή γύρω τους.

Στο επόμενο βήμα ο συγγραφέας της διπλωματικής εργασίας σχεδίασε σκίτσα της ιδέας και σκαριφήματα που θα μεταφραστούν σε τριδιάστατα μοντέλα τα οποία αφού περάσουν κάποια στάδια αλλαγών θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη του αεροδυναμικού σχε-



Σχήμα 2.2: Μονοθέσιο Monash Motorsport 2013 με έδρα το Monash University. Νικητές του διαγωνισμού της Αυστραλίας. Έχουν παράδοση στον πολύ επιθετικό αεροδυναμικό σχεδιασμό και πολλές επιτυχίες κάθε χρόνο.

διασμού με χρήση λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η πρώτη αναπαράσταση της αρχικής ιδέας της εμπρός πτέρυγας. Τα προηγούμενα έτη η εμπρός πτέρυγα ήταν συμβατική στη λογική πως τα επιμέρους πτερύγια στην διεύθυνση του πλάτους επεκτεινόταν σε μία μόνο κατεύθυνση. Στο νέο σχεδιασμό τα πτερύγια διαμορφώνουν τούνελ μπροστά από τον τροχό. Αυτό σε συνδυασμό με διαμόρφωση των πλευρικών καλυμμάτων (endplates) έγιναν με τη λογική πως θα διευκολυνθεί η ροή γύρω από τους τροχούς και το χωρίο αποκοπής. Η διαμόρφωση οδηγεί σε μικρότερη επιφάνεια ικανή να παράγει κάθετη δύναμη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον πτερύγια πάνω από τα τρία κύρια για να αντισταθμιστούν οι απώλειες και να διαμορφώσουν τη ροή ώστε να αποφευχθεί η αποκόλληση. Η πίσω πτέρυγα, τα καλύμματα των ψυγείων και το πάτωμα φαίνονται στα Σχήματα 2.5, 2.6 και 2.7.

Εδώ θα παρουσιαστεί και μία φωτορεαλιστική αναπαράσταση πρόχειρου τριδιάστατου μοντέλου (Σχήμα 2.8).



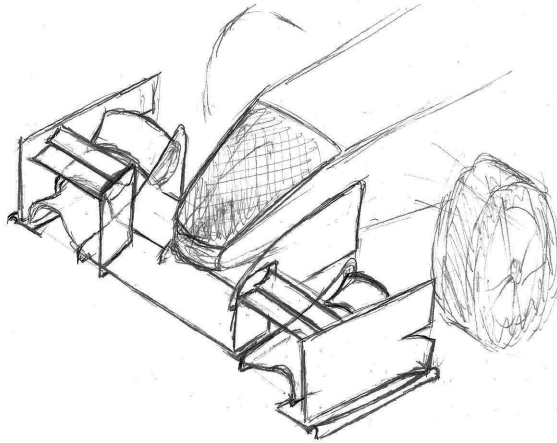
Σχήμα 2.3: Μονοθέσιο Κα. Racing Kit 2012 με έδρα το Karlsruhe Institute of Technology. Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός είναι ξεκάθαρα πιο διακριτικός με πτέρυγες των οποίων τα στοιχεία βρίσκονται σε μικρή γωνία πρόσπτωσης. Το μονοθέσιο τους προσέφερε πολλές επιτυχίες. Μάλιστα απέσπασαν βραβείο καλύτερου αεροδυναμικού σχεδιασμού λόγω της πολύ καλής απόδοσης σε κάθετη δύναμη και της πολύ μικρής οπισθέλκουσας.

2.2 Νέοι κανονισμοί και η επιρροή τους στο σχεδιασμό

Λίγο καιρό μετά την αρχή του σχεδιασμού δημοσιεύθηκαν οι νέοι κανονισμοί. Πλέον οι περιορισμοί στο τμήμα του αεροδυναμικού σχεδιασμού έγιναν πολύ πιο συγκεκριμένοι. Ακολουθούν όλες οι αλλαγές που έγιναν λίγο πιο αναλυτικά.

Πρώτη σημαντική αλλαγή έγινε στον ορισμό του open wheeled μονοθέσιου. Πλέον απαγορεύεται να υπάρχει κάποια διαμόρφωση πάνω από τους τροχούς. Δηλαδή οι τροχοί πρέπει να είναι ορατοί σε κάτοψη. Επίσης, ο ορισμός της ζώνης στην οποία δεν πρέπει να εισέρχεται καμία συσκευή είναι πλέον παραλληλεπίπεδο και όχι κύλινδρος. Το παραλληλεπίπεδο ορίζεται από τις πλευρικές επιφάνειες του τροχού και δύο κατακόρυφες επιφάνειες οι οποίες απέχουν 75 mm από την εξωτερική διάμετρο του τροχού (Σχήμα 2.9).

Επιπλέον, οι εμπρός αεροδυναμικές συσκευές πλέον δεν μπορούν να απέχουν περισσότερο από 700 mm από την πλέον εμπρός επιφάνεια των μπροστινών τροχών. Ακόμα, οι εμπρός τροχοί πρέπει να είναι ορατοί 250 mm από το έδαφος και πάνω. Εξαιρέση αποτελούν οι κατακόρυφες επιφάνειες με πάχος μικρότερο των 25 mm. Οι πίσω αεροδυναμικές συσκευές μπορούν πλέον να απέχουν έως και 250 mm

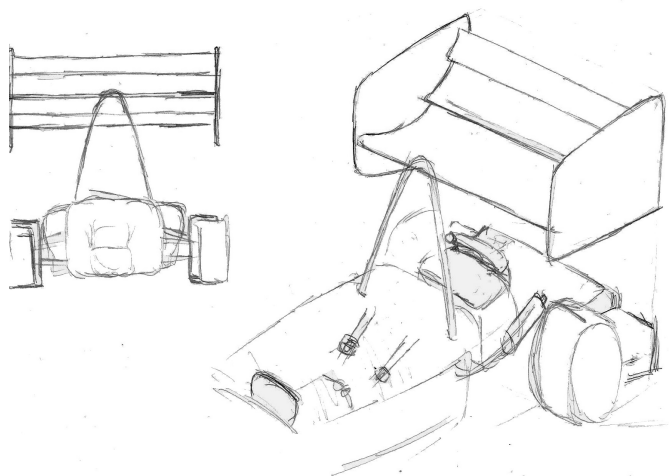


Σχήμα 2.4: Σκίτσο της εμπρός πτέρυγας.

προς τα πίσω από την πλέον πίσω επιφάνεια των τροχών. Η πίσω πτέρυγα δεν μπορεί να έχει πλάτος μεγαλύτερο αυτού της απόστασης των εσωτερικών επιφανειών των τροχών στο ύψος της πλήμνης. Έγιναν και κάποιες ακόμα αλλαγές οι οποίες δεν επηρεάζουν την αρχική ιδέα. Τέλος, καμία αεροδυναμική συσκευή δεν μπορεί να βρίσκεται υψηλότερα από 1200 mm από το έδαφος. Το Σχήμα 2.10 αποτελεί γραφική απεικόνιση των παραπάνω κανόνων.

Οι αλλαγές στους κανονισμούς, επέφεραν αλλαγές στην αρχική ιδέα. Αρχικά είναι ξεκάθαρο πως με τη μείωση των επιφανειών μειώνεται και η κάθετη δύναμη στο μονοθέσιο. Οπότε για να αντισταθμιστούν οι απώλειες πρέπει να δημιουργηθούν νέες διατάξεις ικανές να παράξουν κάθετη δύναμη. Οι προφανείς αλλαγές είναι οι ακόλουθες:

1. Η μπροστά πτέρυγα αποκτά επιμέρους στοιχεία μικρότερης χορδής ώστε να καλύπτεται ο περιορισμός των 250 mm. Επίσης, πρέπει να αφαιρεθούν τα πτερύγια άνω των τριών κύριων. Οι επιλογές είναι δύο. Είτε θα προστεθούν δύο επιπλέον πτερύγια εσωτερικά των τροχών δημιουργώντας πτέρυγα τεσσάρων στοιχείων είτε θα προστεθούν δύο πτερύγια σε μεγαλύτερο ύψος και μικρότερη γωνία πρόσπτωσης. Η δεύτερη επιλογή φαίνεται να είναι η καλύτερη για την διατήρηση της ποιότητας της ροής στα

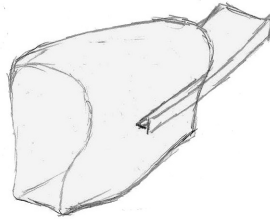


Σχήμα 2.5: Σκίτσο της πίσω πτέρυγας. Πρώτη εικόνα της αρχικής ιδέας. Η πτέρυγα εκμεταλλεύεται το πλήρες πλάτος αλλά σε ύψος δεν ξεπερνά παρά ελάχιστα το υψηλότερο σημείο του πλαισίου. Αν επικρατήσει η έκδοση με δύο επιμέρους πτερύγια το ύψος είναι ακόμη μικρότερο.

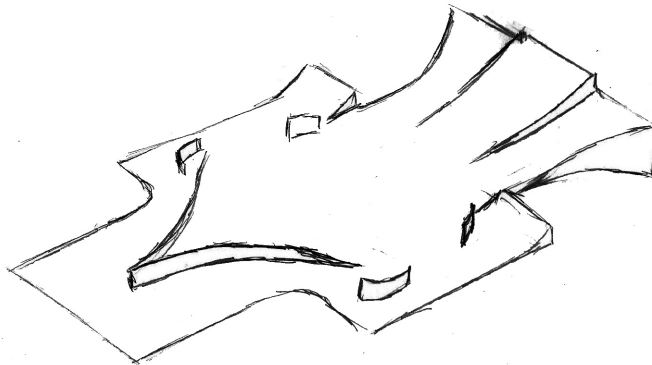
ψυγεία.

2. Η πίσω πτέρυγα θα χάσει πλάτος. Επίσης θα μειωθεί και η διάσταση της στο διαμήκη άξονα. Τέλος, θα επιλεγεί η έκδοση των δύο στοιχείων για να ικανοποιείται το μέγιστο ύψος των 1200 mm. Επίσης, με αυτή τη λογική τα στοιχεία της πτέρυγας δέχονται ροή λιγότερο επηρεασμένη από το πλαίσιο, την εισαγωγή και το προσκέφαλο του οδηγού.
3. Προς το παρόν το πάτωμα γίνεται μονάχα κοντύτερο στο διαμήκη άξονα και τα κανάλια του ακροφυσίου διαμορφώνονται κατάλληλα.
4. Τα πλαϊνά καλύμματα γίνονται ελαφρώς στενότερα.

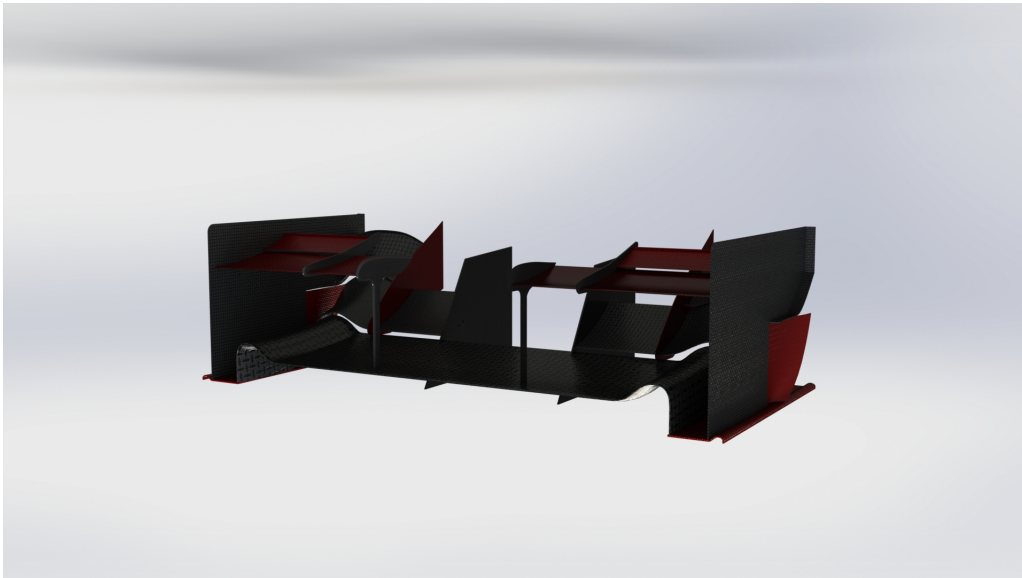
Επίσης, έγιναν νέες σχεδιαστικές επιλογές σε διάφορους τομείς από τα μέλη της ομάδας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μετάβαση σε τροχούς μικρότερης διαμέτρου. Το νέο αεροδυναμικό πακέτο είναι σχεδιασμένο για το νέο μονοθέσιο με ό,τι αλλαγές έχουν γίνει σε αυτό. Παρόλα αυτά, έχει προσαρμοστεί και σε παλιότερο πλαίσιο ώστε να γίνει μελέτη και με αυτό.



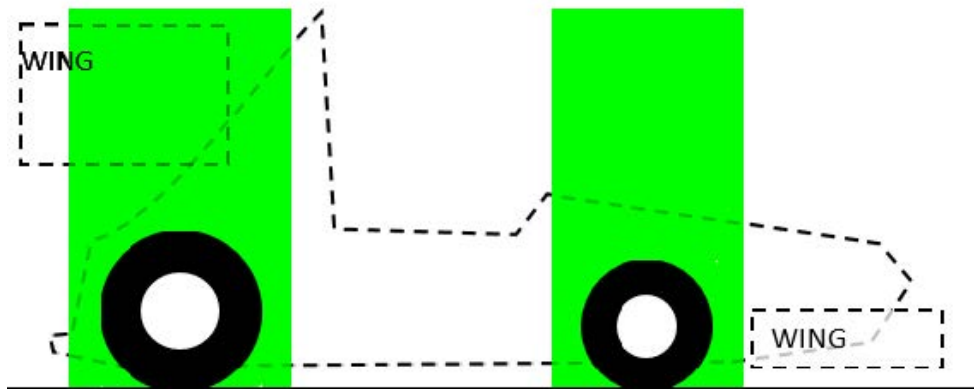
Σχήμα 2.6: Σκίτσο των πλευρικών καλυμμάτων των ψυγείων. Επιτρέπουν την τοποθέτηση των ψυγείων στο εσωτερικό τους. Έχουν σχήμα σταγόνας για ελαχιστοποίηση των αντιστάσεων. Το πτερύγιο βρίσκεται για διαμόρφωση της ροής πριν την πίσω πτέρυγα.



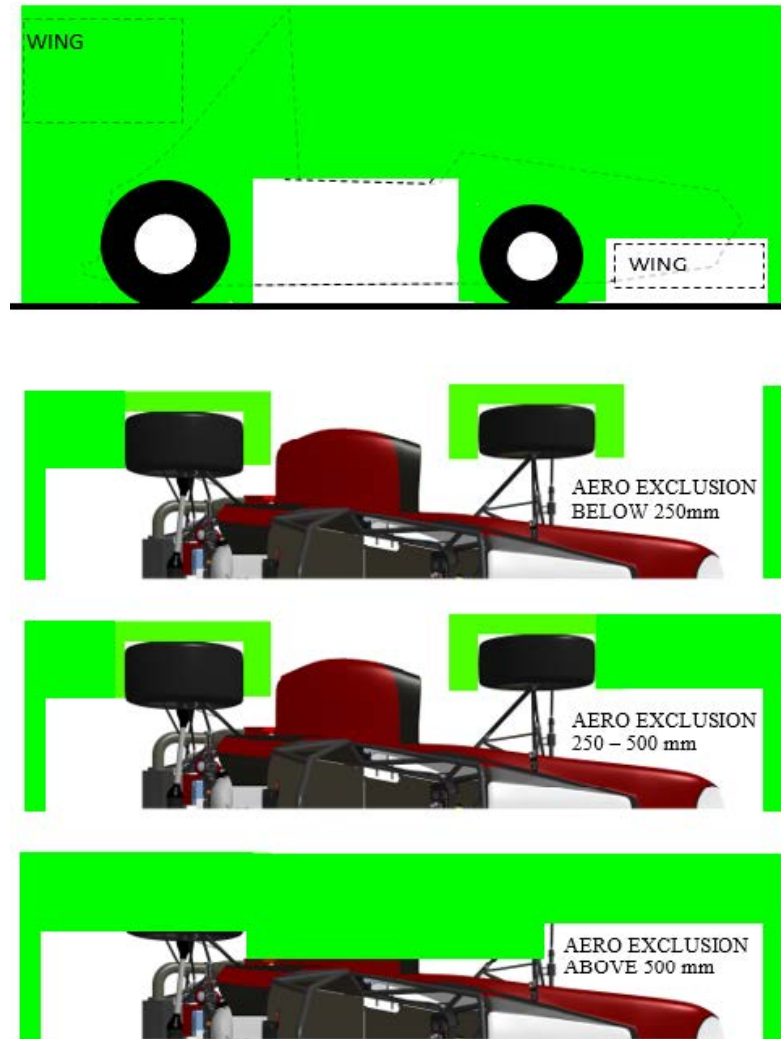
Σχήμα 2.7: Σκίτσο του πατώματος και του αποκλίνοντος ακροφύσιου. Η λογική είναι πως η ροή εισέρχεται κάτω από το πάτωμα και επιταχύνεται. Η υποπίεση παράγει κάθετη δύναμη. Επομένως, επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή επιφάνεια. Η ελάχιστη πίεση θα παρουσιαστεί στο σημείο όπου ξεκινάει το αποκλίνον ακροφύσιο. Η δράση του ενισχύεται από την καλύτερη ροή γύρω από το ακροφύσιο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται επιφάνειες οι οποίες στόχο έχουν τη μεταφορά ροής προς αυτό.



Σχήμα 2.8: Εικόνα του πρόχειρου μοντέλου της εμπρός πτέρυγας.



Σχήμα 2.9: Οι πράσινες επιφάνειες αντιπροσωπεύουν τους χώρους στους οποίους δεν μπορούν να εισέρχονται αεροδυναμικές συσκευές ή άλλες διαμορφώσεις.



Σχήμα 2.10: Οι πράσινες περιοχές αποτελούν ζώνες στις οποίες δεν μπορεί να τοποθετηθεί κάποια αεροδυναμική συσκευή. Το πρώτο σχήμα αναφέρεται σε πλάγια όψη και μπροστά από τους τροχούς. Τα επόμενα τρία σχήματα αναφέρονται σε επιτρεπόμενες και μη περιοχές για ύψος μικρότερο των 250 mm, μεταξύ των 250 mm και 500 mm και άνω των 500 mm από το έδαφος αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 3

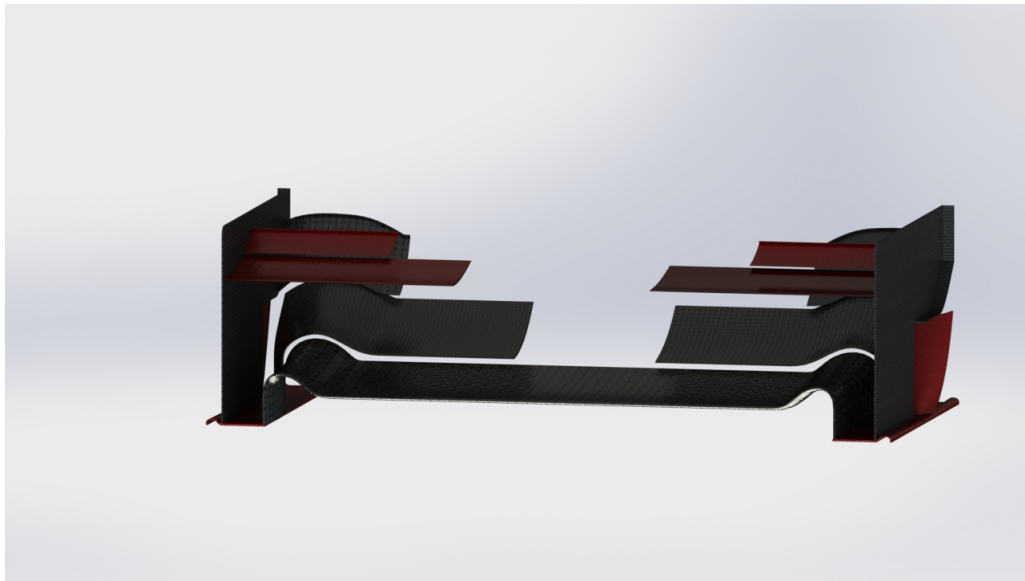
Μοντελοποίηση

Μετά την κατανόηση των κανονισμών, συνεπώς των περιορισμών που παρουσιάζονται στο σχεδιασμό, έχοντας την ιδέα η οποία θα μελετηθεί, ακολουθεί η δημιουργία του τριδιάστατου μοντέλου. Σε αυτό το βήμα χρησιμοποιείται λογισμικό τύπου CAD (**C**omputer **A**ided **D**esign). Η σημασία του μοντέλου έχει πολλά επίπεδα, καθώς πρωταρχικοί έλεγχοι, αεροδυναμική μελέτη και βελτιστοποίηση γίνονται με βάση αυτό. Η ποιότητά του μπορεί να επηρεάσει έντονα τα αποτελέσματα. Μάλιστα το τελικό μοντέλο που θα προκύψει μετά τη βελτιστοποίηση θα χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία της κατασκευής.

3.1 Προκαταρκτικό μοντέλο

Στο πρώτο στάδιο δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο περιέχει όλες τις βασικές πληροφορίες που χρειάζονται. Δηλαδή ένα μοντέλο το οποίο ικανοποιεί τους χωρικούς περιορισμούς και περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά του τελικού πλην των λεπτομερειών. Για παράδειγμα στην εμπρός πτέρυγα περιέχει τα πλευρικά στοιχεία-καλύμματα (endplates) τα οποία έχουν το μέγεθος που ορίζουν οι κανόνες. Περιέχει και τα επιμέρους πτερύγια με τις σωστές διαστάσεις πλάτους και χορδών. Δεν περιλαμβάνει όμως κάποια συγκεκριμένη μορφή αεροτομής για αυτά, ούτε αναγκαστικά τις σωστές γωνίες πρόσπτωσης. Επίσης μπορεί να λείπουν κάποια στοιχεία διότι θεωρείται πως η ακρίβεια σε αυτά επηρεάζει έντονα τις ιδιότητες της πτέρυγας (Σχήμα 3.1). Το μοντέλο αυτό είναι χρήσιμο για το πρώτο στάδιο μελέτης.

Πέρα από τους περιορισμούς που ορίζονται από τους κανονισμούς, υπάρχουν αρκετοί επιπλέον, οι οποίοι σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες του σχεδιασμού, την κατασκευασισμότητά του και το

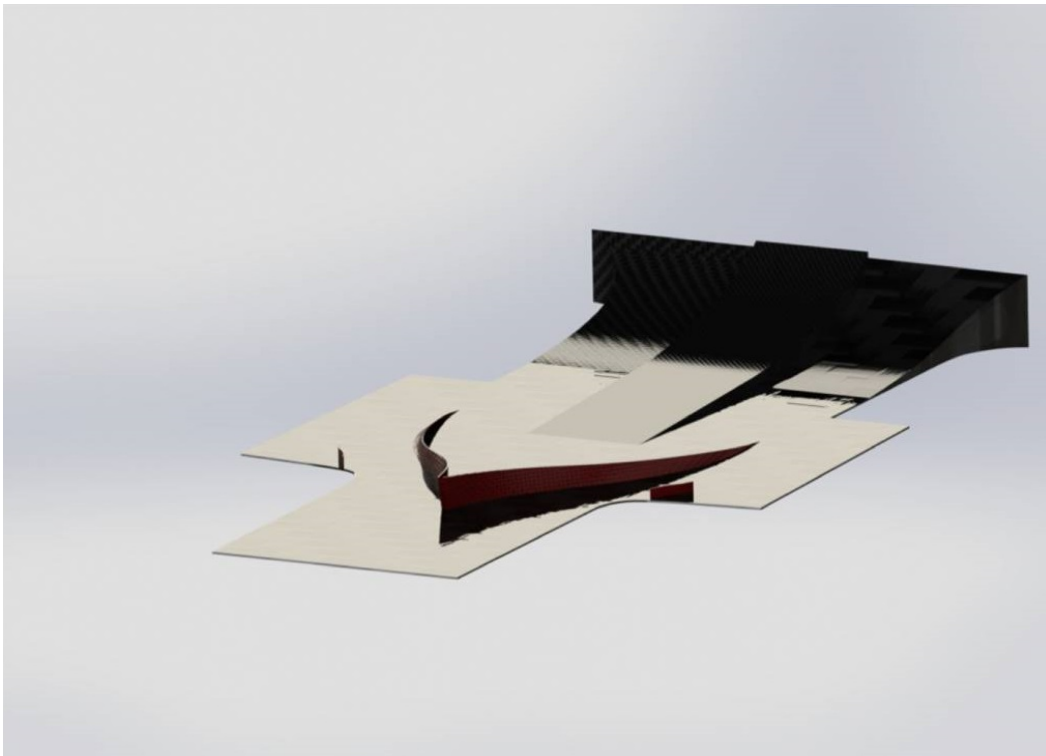


Σχήμα 3.1: Προκαταρκτικό μοντέλο εμπρός πτέρυγας σύμφωνα με τους κανονισμούς του 2014. Φαίνονται όλα τα επιμέρους πτερύγια καθώς και τα endplates. Λείπουν τα εσωτερικά endplates καθώς λειτουργούν τόσο ως σύνδεσμοι όσο και ως αεροδυναμικές συσκευές και το σχήμα τους και οι ιδιότητές τους μπορεί να διαφέρουν πολύ από το ένα βήμα μελέτης στο επόμενο. Επίσης, οι γωνίες των πτερυγίων καθώς τα προφίλ τους δεν έχουν γίνει ακόμα συγκεκριμένα.

κόστος αυτής. Αυτοί προκύπτουν κατά το πρώτο στάδιο μελέτης.

Στο πρώτο στάδιο της μελέτης εξετάζονται η δυνατότητα κατασκευής του μοντέλου, το κόστος κατασκευής και κάποιες μηχανικές ιδιότητες οι οποίες θεωρείται πως θα απέχουν ελάχιστα από τις τελικές. Αυτό σημαίνει, πως το μοντέλο μελετάται σε συνεργασία με μέλη της ομάδας μηχανολογικού σχεδιασμού. Θεωρείται μέγιστο αεροδυναμικό φορτίο σε κάθε πτερύγιο, το οποίο είναι λίγο πάνω από το επιθυμητό, και με χρήση προγραμμάτων Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) υπολογίζονται πιθανές μετατροπές που πρέπει να γίνουν για την αντοχή του κομματιού.

Στην πορεία θεωρείται πως έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι περιορισμοί και έχουν γίνει ήδη οι αναγκαίοι συμβιβασμοί κατά το σχεδιασμό. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το αποκλίνον ακροφύσιο, το οποίο από την έκδοση του 2013 σε αυτήν του 2014 και 2015 έχει απλοποιήσει καθαρά λόγω κατασκευαστικών δυνατοτήτων (Σχήμα 3.2 και 3.3).

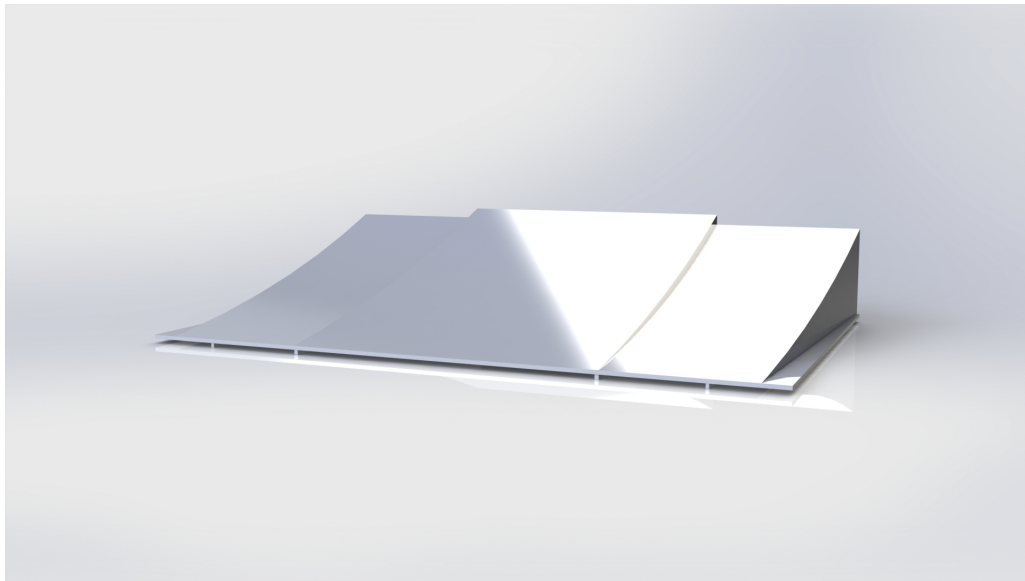


Σχήμα 3.2: Μοντέλο του πατώματος του μονοθέσιου Prom13 της ομάδας Prom Racing. Χαρακτηριστικό του ακροφύσιου είναι πως εκτείνεται με καμπύλη σε δύο επίπεδα. Πρακτικά, είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστεί καθώς ανεβάζει το κόστος. Δεν έγιναν αλλαγές αφού δεν επρόκειτο να κατασκευαστεί.

3.2 Προσθέτοντας λεπτομέρεια

Το μοντέλο ως έχει δεν περιέχει πληροφορία χρήσιμη για την αεροδυναμική μελέτη. Κατά τη χρήση λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής μικρές λεπτομέρειες είναι ικανές να μεταβάλουν τα αποτελέσματα έντονα. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να γίνουν κάποια βήματα ώστε το μοντέλο να έρθει πιο κοντά στην τελική του μορφή.

Αρχικά πρέπει να προστεθούν οι ακριβείς γεωμετρίες των αεροτομών στις δύο πτέρυγες. Διαδικασία η οποία δεν είναι τόσο απλή καθώς οι επιλογές είναι πολυάριθμες. Δεν είναι δυνατό να προχωρήσει ο σχεδιασμός εάν δεν μελετηθούν πρώτα αρκετοί πιθανοί συνδυασμοί αεροτομών ώστε να γίνει δεκτό πως η βελτιστοποίηση θα ξεκινήσει από μία αρκετά καλή αρχική δομή. Οπότε επιλέχθηκαν τέσσερις οικογένειες αεροτομών οι οποίες και μελετήθηκαν. Αυτές είναι οι NACA



Σχήμα 3.3: Μοντέλο του ακροφύσιου του πατώματος του μονοθέσιου Prom16 της ομάδας Prom Racing Powered By Bosch. Είναι ξεκάθαρη η διαφορά με το ακροφύσιο του Prom13. Σε αυτή την έκδοση οι πλευρικές επιφάνειες είναι πλέον επίπεδες το οποίο διευκολύνει κατά πολύ την κατασκευή, μειώνοντας το κόστος.

4 και 5 ψηφίων, οι Joukowski, οι FX και οι πλήρως παραμετροποιήσιμες Parsec. Γνωρίζοντας το μήκος της χορδής του κάθε στοιχείου, δημιουργήθηκαν μοντέλα πτερύγων από κάθε οικογένεια και τοποθετήθηκαν στη θέση των επιφανειών του προκαταρκτικού μοντέλου. Έπειτα, έγινε αεροδυναμική μελέτη της κάθε πτέρυγας σε ελεύθερη μετωπική ροή των 20 και 30 m/s. Πρωταρχικός στόχος είναι η μελέτη διαφόρων προφίλ σε διατάξεις πολλών πτερυγίων. Να τονισθεί πως χρησιμοποιήθηκε το προκαταρκτικό μοντέλο των κανόνων του 2014 καθώς θεωρητικά η "συνεργασία" των διαφόρων προφίλ επηρεάζεται ελάχιστα από τη διάταξη αν οι γωνίες πρόσπτωσης μένουν ίδιες. Λίγο πιο συγκεκριμένα ορισμένα από τα προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν οι τροποποιήθηκαν ώστε να μελετηθούν είναι τα παρακάτω:

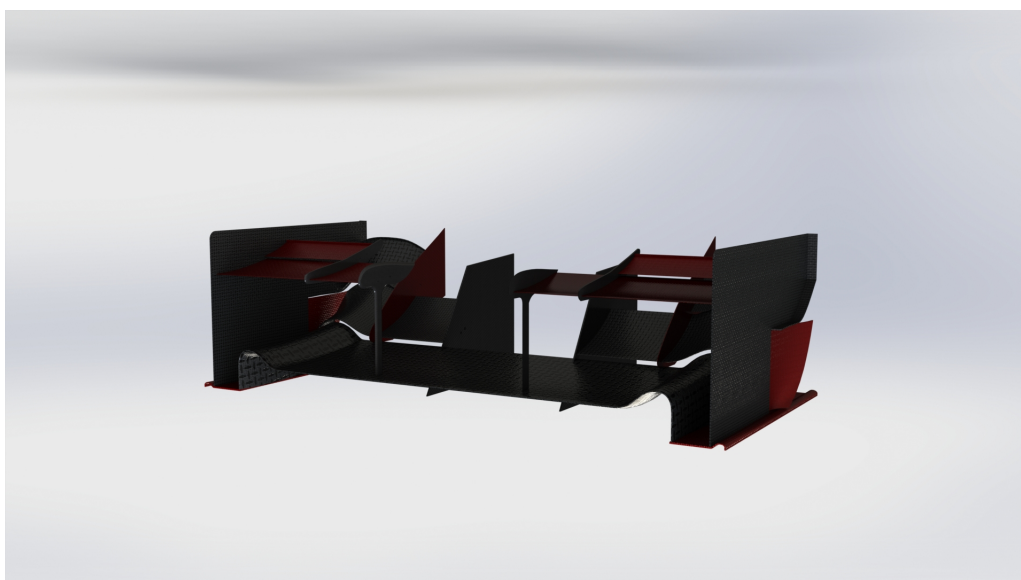
1. NACA: 6408, 8407, 8408, 8507, 63018
2. Joukowski: διάφορες εκδόσεις Joukowski 9% και Joukowski 12%
3. FX: 60-100, 63-100, 800-80

Για τη δημιουργία των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν αρχεία με σημεία των προφίλ από διάφορους ιστότοπους τα οποία στην πορεία τρο-

ποποιήθηκαν ώστε να ικανοποιούν τις χωρικές ανάγκες που υπήρχαν κάθε φορά.

Με τα αποτελέσματα εξισώσεων ροής για διάφορους συνδυασμούς επιλέχθηκαν οι ακριβείς μορφές αεροτομών που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε πτερύγιο του μονοθέσιου.

Για να ολοκληρωθεί η δημιουργία του μοντέλου των πτερύγων προστέθηκαν τα πλευρικά καλύμματα (endplates) και προστέθηκαν λεπτομέρειες σε αυτά που υπήρχαν ήδη. Όπως τα καλύμματα που λειτουργούν και ως σύνδεσμοι ή στηρίξεις, τα οποία τροποποιήθηκαν σύμφωνα με τους περιορισμούς λόγω μηχανικών καταπονήσεων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο είναι σε θέση να παρέχει σημαντική και αξιόπιστη πληροφορία (Σχήμα 3.4). Να τονισθεί πως δεν αποτελεί την τελική μορφή, παρά μόνο την αρχική μορφή η οποία θα μελετηθεί και θα βελτιστοποιηθεί.



Σχήμα 3.4: Μοντέλο της εμπρός πτέρυγας του μονοθέσιου Prom15 (σύμφωνα με τους κανόνες του 2014). Είναι πλέον έτοιμο να μελετηθεί με χρήση λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Εν συνεχεία, με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εμπρός πτέρυγα, ολοκληρώνεται η πίσω πτέρυγα. Τα πλευρικά καλύμματα (endplates) λειτουργούν και ως στηρίξεις. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται το μοντέλο της πίσω πτέρυγας έτοιμο για αεροδυναμική μελέτη.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες αεροδυναμικές συσκευές. Στο πάτωμα προστέθηκαν κανάλια και τροπο-



Σχήμα 3.5: Μοντέλο της πίσω πτέρυγας του μονοθέσιου Prom16 (σύμφωνη με τους κανόνες του 2015-16). Αποτελεί την εξέλιξη της αρχικής ιδέας της πίσω πτέρυγας ώστε να συμβαδίζει με τους νέους κανονισμούς. Τα πλευρικά καλύμματα λειτουργούν και ως στηρίξεις για τη βελτίωση της ροής σε σχέση με την ύπαρξη βάσεων πάνω στα πτερύγια. Είναι πλέον έτοιμο να μελετηθεί με χρήση λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

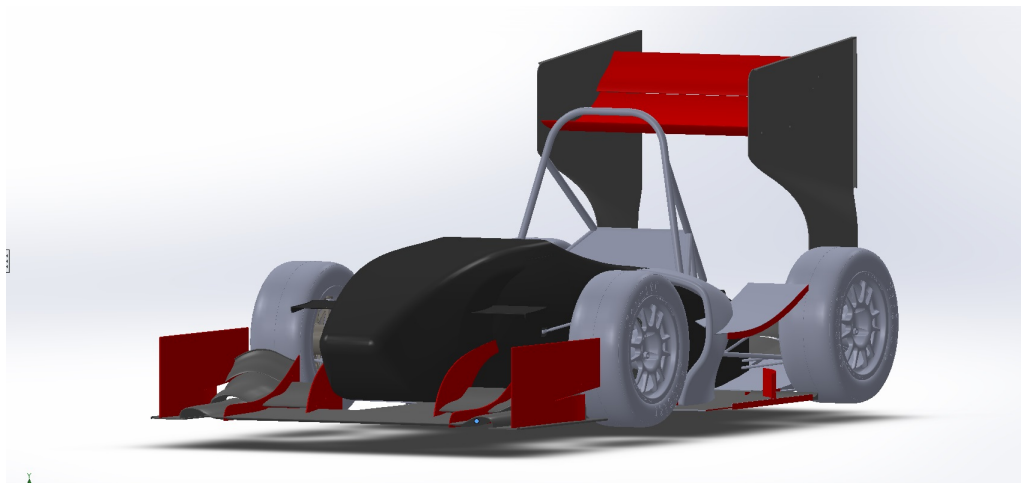
ποιήθηκαν οι διαστάσεις σε επιφάνειες οι οποίες μπορεί να μην ήταν κατασκευάσιμες ή να έρχονταν σε επαφή με άλλα τμήματα του μονοθέσιου. Τα καλύμματα των ψυγείων δέχθηκαν ελάχιστες αλλαγές και αυτές ήταν μονάχα για λεπτομέρειες. Όλα τα υπόλοιπα τμήματα θεωρούνται ικανοποιητικά ώστε να γίνει η αεροδυναμική μελέτη και ανάλογα με τα αποτελέσματα να γίνουν μερικές αλλαγές.

3.3 Ολοκληρώνοντας το μοντέλο

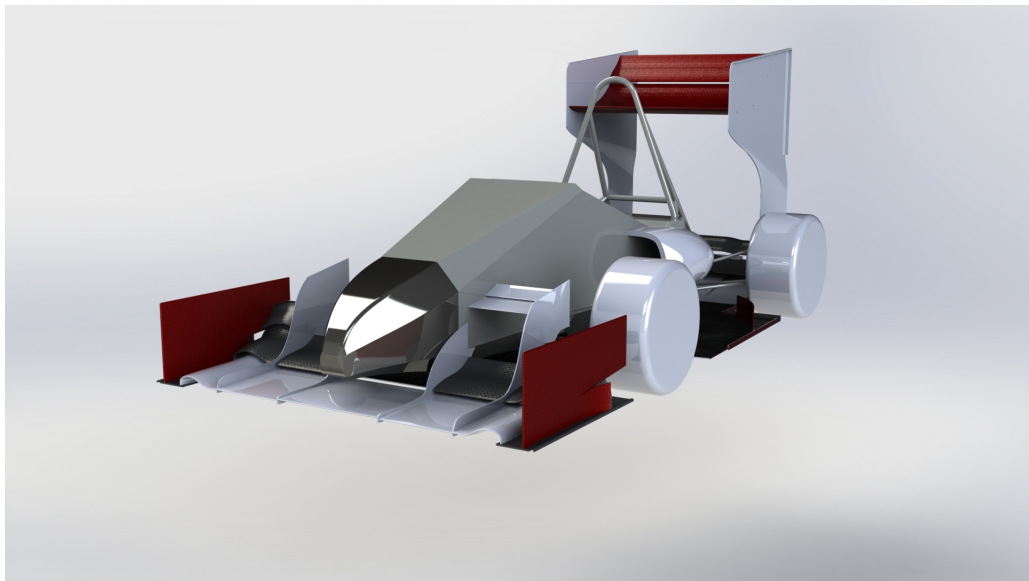
Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι να ενωθούν όλα τα επιμέρους μοντέλα σε ένα. Δηλαδή να αποκτήσει το κάθε μοντέλο καινούρια θέση στο χώρο. Θεωρείται ένα πρωτεύον σύστημα αξόνων σύμφωνα με το οποίο πρέπει να αποκτήσουν όλα τα επιμέρους μοντέλα μία σχετική θέση. Διατηρείται το σύστημα αξόνων του πλαισίου και του καλύμματός του. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο επίπεδο συμμετρίας του οχήματος και απέχει 1m από το πλέον μπροστά σημείο

που υπολογίζεται πως θα έχει το μονοθέσιο. Γνωρίζοντας λοιπόν την ακριβή θέση της αρχής των αξόνων, προστίθεται το σύστημα αυτό και στα υπόλοιπα μοντέλα. Είναι σημαντικό να γίνει σχεδιασμός με ακρίβεια ώστε να μην υπάρχει απώλεια επαφής μεταξύ δύο τμημάτων ή να μην εισέρχεται το ένα στο άλλο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μετά την έκδοση των νέων κανονισμών, έγινε εκ νέου σχεδιασμός σε όλο το μονοθέσιο, καθώς και καινούριου αεροδυναμικού πακέτου. Το νέο αεροδυναμικό πακέτο είναι προσαρμοσμένο τόσο στο παλιό πλαίσιο όσο και στο καινούριο. Για λόγους πληρότητας μελετώνται και τα δύο. Στο Σχήμα 3.6 και στο Σχήμα 3.7 φαίνονται τα πλήρη μοντέλα τόσο με το νέο όσο και με το παλιό.



Σχήμα 3.6: Μοντέλο του πλήρους μονοθέσιου. Περιέχει το αεροδυναμικό πακέτο του Prom16 με το πλαίσιο και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του Prom14. Δεν πρόκειται να κατασκευαστεί αλλά μελετάται για την περίπτωση που κάποιο χαρακτηριστικό του πρέπει να διατηρηθεί και στο επόμενο μονοθέσιο.



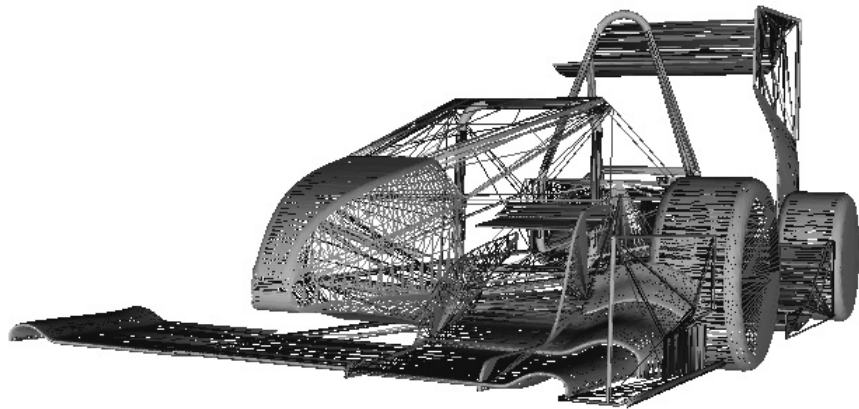
Σχήμα 3.7: Μοντέλο του πλήρους μονοθέσιου Prom16. Είναι απλοποιημένη έκδοση. Λείπουν λεπτομέρειες της γεωμετρίας οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα κατά τη χρήση του λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής OpenFOAM προκαλώντας απόκλιση του κώδικα ή να απαιτείται πολύ πιο χρονοβόρα επίλυση. Π.χ. δεν τοποθετούνται οι ζάντες και οι ακτίνες τους ή οι πλήμνες στο εσωτερικό των τροχών.

Κεφάλαιο 4

Δημιουργία Πλέγματος

Επόμενο στάδιο είναι να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του μονοθέσιου για την αεροδυναμική μελέτη με χρήση λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Η διακριτή φύση των Η/Υ απαιτεί αποθήκευση πληροφορίας σε πολλά σημεία γύρω και πάνω στο μοντέλο ώστε να προσδιορίσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη ροή. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να δημιουργηθεί πλέγμα βασισμένο στο μοντέλο. Θεωρείται ένα χωρίο ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει το μοντέλο του μονοθέσιου. Αυτό το χωρίο θα αποτελέσει το μη δομημένο πλέγμα, ένα σύνολο από εξάεδρα κελιά. Το μοντέλο του μονοθέσιου θα αποτελέσει εσωτερικά στερεά όρια του χωρίου στα οποία ορίζονται οριακές συνθήκες.

Ο μοναδικός τρόπος να δημιουργηθεί ένα τόσο πολύπλοκο πλέγμα από ένα άτομο είναι με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Στην παρούσα περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο του OpenFOAM, SnappyHexMesh. Αρχικά, το μοντέλο από αρχείο το οποίο αντιπροσωπεύει όγκο πρέπει να μετατραπεί σε πλέγμα της εξωτερικής επιφάνειάς του. Συγκεκριμένα ο τύπος αρχείου που χρησιμοποιήθηκε είναι **STL (STereoLithography)** (Σχήμα 4.1). Σε αυτήν τη μορφή το μοντέλο αποτελείται από τριγωνικές επιφάνειες οι οποίες ορίζονται από το κάθετο σε αυτές διάνυσμα και τις κορυφές τους δοσμένες με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η κωδικοποίηση με την οποία αποθηκεύονται τα αρχεία είναι ASCII. Η επιλογή έγινε διότι με αυτόν τον τρόπο δίνεται η επιλογή ελέγχου της ονομασίας του συνόλου των επιφανειών που περιλαμβάνονται στο κάθε αρχείο.



Σχήμα 4.1: Το πλήρες μοντέλο του μονοθέσιου Prom16 σε μορφή STL. Πλέον αποτελεί ένα σύνολο από τριγωνικές επιφάνειες οι οποίες διαμορφώνουν τη συνολική εξωτερική επιφάνεια.

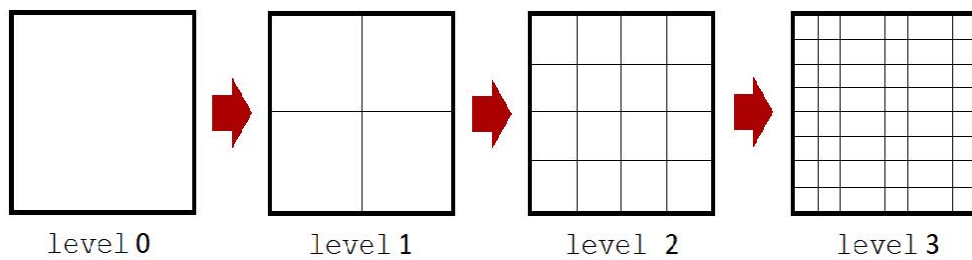
Έχοντας έτοιμο το πλέγμα της επιφάνειας του μονοθέσιου επιλέγεται το συνολικό χωρίο ελέγχου. Εκφράζει τον συνολικό όγκο στον οποίο τα μόρια του αέρα κινούνται και αλληλεπιδρούν με το μονοθέσιο. Το μέγεθος του επηρεάζει την ικανότητα του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής να συγκλίνει. Δηλαδή, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας που μελετάται καθώς και της δεδομένης στροβιλικότητας και αστάθειας που θα εισαχθεί στη ροή, αν τα όρια του όγκου ελέγχου βρίσκονται πολύ κοντά σε όλες αυτές τις πηγές αναταραχής τότε ο συνδυασμός τους με τις οριακές συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε μη συνεπή αποτελέσματα και στην πορεία σε απόκλιση του κώδικα. Ιδιαίτερα έντονο είναι το φαινόμενο στον ομόρρο του μονοθέσιου. Επομένως, θα επιλεγεί ένα αρχικό χωρίο ελέγχου με βάση εμπειρικούς κανόνες και ανάλογα με τα αποτελέσματα μπορεί να μεταβληθεί. Το αρχικό χωρίο ελέγχου περιέχει στο κέντρο του το μονοθέσιο και εκτείνεται πέντε μήκη του μονοθέσιου εμπρός και πέντε πίσω. Αντίστοιχα, στο πλάι και πάνω. Να τονισθεί πως στην αεροδυναμική μελέτη μπορεί να μελετηθεί το μισό μοντέλο, αν υπάρχει συμμετρία, χωρίς προβλήματα. Το συνολικό μήκος του μονοθέσιου είναι 3 m, το ύψος 1.2 m και το πλάτος του μισού είναι 0.74 m. Εν συνεχεία, το εργαλείο, BlockMesh, του λογισμικού δημιουργεί ένα ορθογωνικό δομημένο πλέγμα που καλύπτει ολόκληρο το χωρίο ροής. Τα εξάεδρα κελιά του πλέγματος πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά σε κύβο για τη σωστότερη λειτουργία του κύριου εργαλείου παραγωγής πλέγματος. Η πυκνότητα του πλέγματος επηρεάζει έντονα το τελικό αποτέλεσμα. Οπότε, πρέπει να βρεθεί μία ισορροπία μεταξύ ποιότητας πλέγματος και υπολογιστικού κόστους.

Η εξωτερική επιφάνεια του χωρίου ροής που παράγεται από το BlockMesh διασπάται σε έξι επιφάνειες οι οποίες αντιπροσωπεύουν την είσοδο, την έξοδο, το οδόστρωμα, την επιφάνεια συμμετρίας και δύο επιφάνειες οι οποίες βρίσκονται αρκετά μακριά από το μοντέλο και δεν αντιπροσωπεύουν κάποια στερεή επιφάνεια, αλλά ένα όριο. Αυτό σημαίνει πως κατά τη δημιουργία του εξωτερικού χωρίου ροής πρέπει να οριστούν κατάλληλα όλες οι επιφάνειες. Δηλαδή να ονομαστούν, ώστε στην πορεία να δοθούν οριακές συνθήκες σε αυτές. Η εμπρός μετωπική επιφάνεια ορίζεται ως η είσοδος του ρευστού. Αντίστοιχα η πίσω μετωπική επιφάνεια είναι η έξοδος. Η αριστερή πλευρική επιφάνεια καθώς και η άνω επιφάνεια δεν αποτελούν στερεό όριο και δεν είναι επιθυμητό να επηρεάζουν τη ροή. Η κάτω επιφάνεια είναι ο δρόμος ο οποίος είναι επιθυμητό να κινείται με την ταχύτητα του μονοθέσιου (rolling road). Τέλος, η άλλη πλευρική επιφάνεια είναι η επιφάνεια συμμετρίας. Με αυτό τον τρόπο, τα εξωτερικά όρια του χωρίου

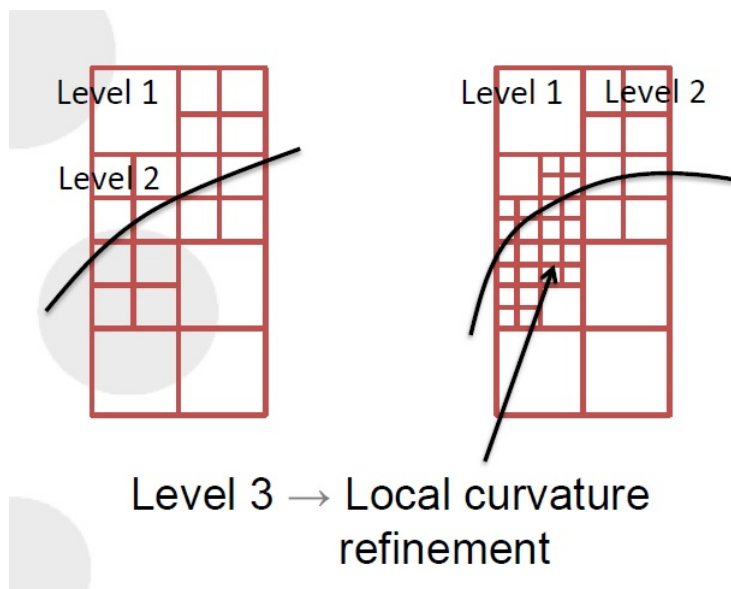
ελέγχου είναι πλέον πλήρως ορισμένα.

Σε επόμενο στάδιο πρέπει να εισαχθούν στον παραπάνω όγκο τα επιμέρους τμήματα του επιφανειακού πλέγματος του μονοθέσιου. Αυτό γίνεται μέσω του εργαλείου *SnappyHexMesh*. Έχει ορισθεί το επίπεδο στο οποίο θα γίνει η πύκνωση του πλέγματος για κάθε ένα από τα παραπάνω τμήματα. Για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα και προσέγγιση της ροής γύρω από τμήματα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως η μπροστά πτέρυγα ή γύρω από τον τροχό, δημιουργούνται και μικρότερα χωρία γύρω από το κάθε ενδιαφερόμενο τμήμα. Η διαδικασία πύκνωσης λειτουργεί ως εξής.

- Αρχικά, τα κελιά των μικρότερων χωρίων ελέγχου υποδιαιρούνται σύμφωνα με τις επιλογές που έχουν γίνει σε κάθε διεύθυνση (Σχήμα 4.2).
- Ακολουθεί η πύκνωση του πλέγματος κοντά σε κάθε επιφάνεια του μοντέλου και γίνεται ως εξής. Αρχικά, μελετάται εάν το πλέγμα του αρχείου του μοντέλου τέμνει κάποια ακμή κελιών. Σε αυτήν την περίπτωση, το κελί αυτό διαιρείται σε ό τι τάξη έχει ρυθμιστεί. Επίσης ελέγχει τη γωνία που δημιουργείται από τα σημεία επαφής της επιφάνειας με το κελί. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη μίας προεπιλεγμένης γωνίας ελέγχου, δίνεται η δυνατότητα για επιλογή διαίρεσης του κελιού σε διαφορετική τάξη. Βάση λογικής επιλέγεται μεγαλύτερη ώστε να προσεγγίζεται καλύτερα η επιφάνεια (Σχήμα 4.3). Μετά από ορισμένες επαναλήψεις της διαδικασίας και ελέγχους για νέες τμήσεις ολοκληρώνεται η αρχική διαδικασία πύκνωσης.

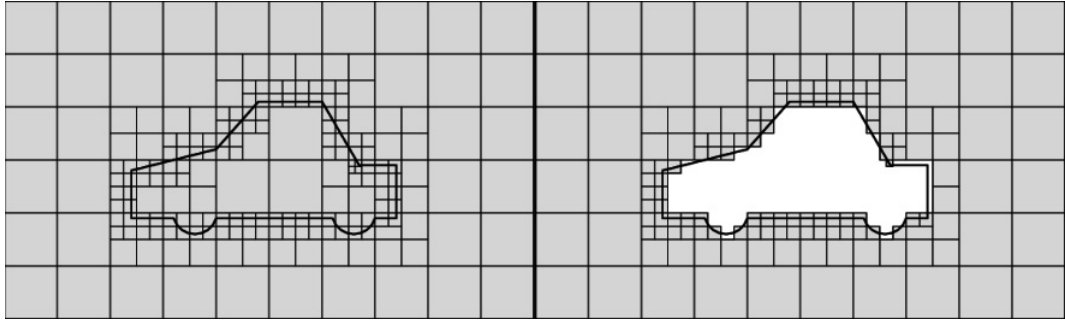


Σχήμα 4.2: Πύκνωση πρώτης, δεύτερης και τρίτης τάξης σε ένα κελί.



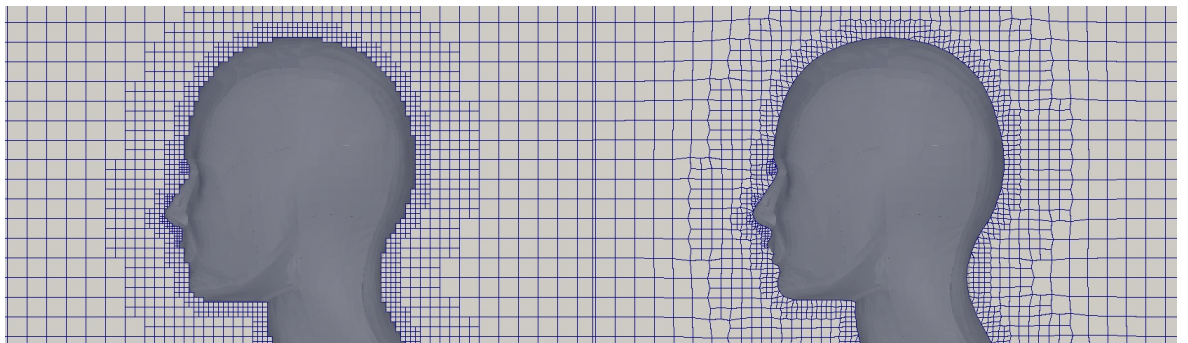
Σχήμα 4.3: Πύκνωση δεύτερης τάξης στα κελιά όπου το πλέγμα τέμνει τις ακμές του. Στα σημεία που το μοντέλο τέμνει το κελί και δημιουργείται γωνία μεγαλύτερη των 30 η πύκνωση είναι τρίτης τάξης.

- Τα κελιά τα οποία έχουν χρησιμότητα για τη μελέτη είναι τα εξωτερικά του μοντέλου του μονοθέσιου. Οπότε δηλώνεται ένα σημείο το οποίο ανήκει στο πλέγμα (δεν πρέπει να είναι κόμβος) και βρίσκεται εκτός του μοντέλου του μονοθέσιου. Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τη θέση του σημείου σε σχέση με το μοντέλο που εισήχθη και διατηρεί το αντίστοιχο τμήμα του πλέγματος ενώ διαγράφεται το υπόλοιπο (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Παράδειγμα διαγραφής πλέγματος στο εσωτερικό του μοντέλου. Πηγή: <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/tutorials/>

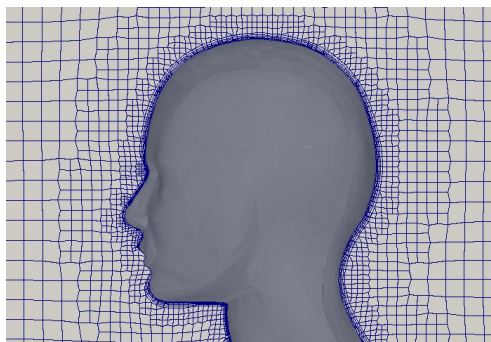
- Στην πορεία η διαδικασία του "snapping" διαμορφώνει το πλέγμα ώστε να διατηρηθούν οι ιδιότητες των επιφανειών του μοντέλου. Δηλαδή, τα κελιά του πλέγματος προβάλλονται στην επιφάνεια του μοντέλου. Έχει ορισθεί το μέγιστο μήκος ακμής του κελιού καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων εξομάλυνσης. Οπότε, αρχικά γίνονται ορισμένες επαναλήψεις εξομάλυνσης προτού προβληθούν τα κελιά στις επιφάνειες του μοντέλου, έπειτα γίνεται η προβολή και τέλος λαμβάνουν χώρα οι επαναλήψεις εξομάλυνσης του πλέγματος κοντά στην περιοχή που παραμορφώθηκε κατά την προβολή (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Παράδειγμα προβολής και εξομάλυνσης του πλέγματος στην επιφάνεια του μοντέλου. Πηγή: Engys Ltd.

- Τελευταίο βήμα στην παραγωγή πλέγματος είναι η προσθήκη στρωμάτων. Δηλαδή προστίθενται στρώματα κελιών γύρω από

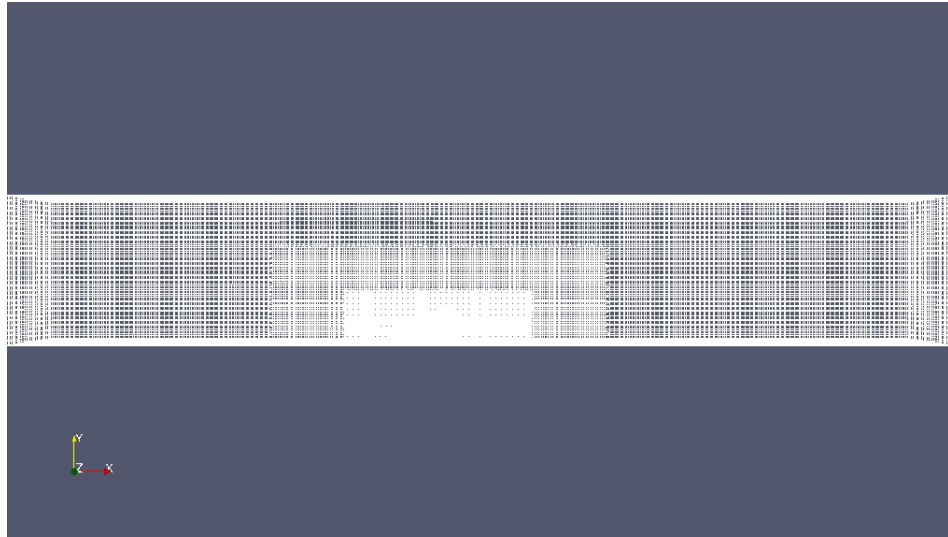
επιλεγμένες επιφάνειες. Σε κάθε επιλεγμένη επιφάνεια δημιουργούνται κελιά με διεύθυνση κάθετη σε αυτή και απομακρυνόμενα από αυτή (Σχήμα 4.6). Το σύνολο των στρωμάτων επιλέγεται καθώς και το πάχος του τελευταίου στρώματος. Ο λόγος εξάπλωσης ορίζεται ως ο λόγος παχών διαδοχικών στρωμάτων, δηλαδή $\Delta_2/\Delta_1 = \Delta_3/\Delta_2 = \Delta_4/\Delta_3 = \dots$ όπου Δ_i το πάχος του κάθε στρώματος. Ορισμένο είναι και το ελάχιστο πάχος στρώματος. Αυτό σημαίνει πως κάτω από αυτό το πάχος τα στρώματα θα συμπύσσονται. Παράλληλα λαμβάνει χώρα και διαδικασία εξομάλυνσης του πλέγματος στα προστιθέμενα στρώματα μεταβάλλοντας τα διανύσματα που ορίζουν οι επιφάνειες του μοντέλου.



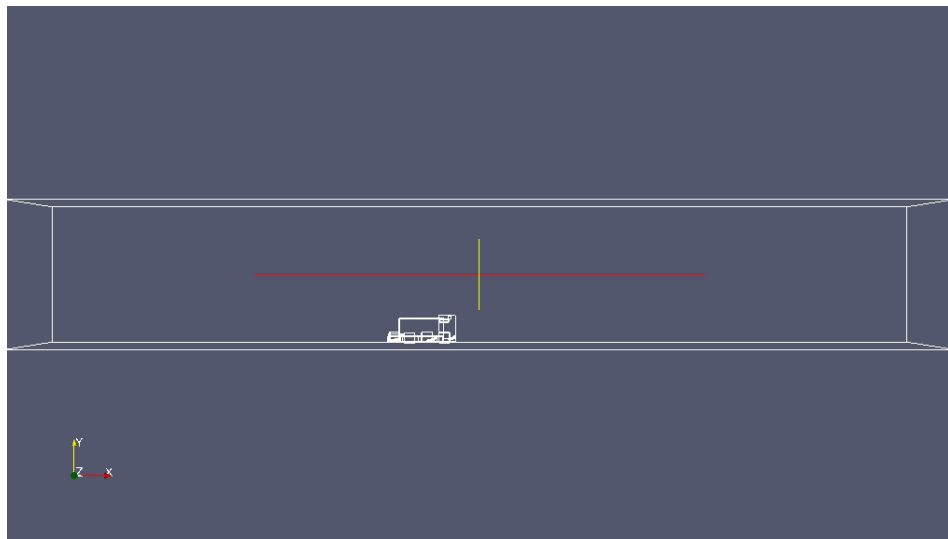
Σχήμα 4.6: Παράδειγμα προσθήκης στρωμάτων κελιών. Κοντά στην επιφάνεια του μοντέλου έχουν προστεθεί κελιά και έχουν εξομαλυνθεί. Πηγή: Engys Ltd.

Ακολουθούν και ένα σύνολο από ελέγχους ποιότητας του πλέγματος. Ελέγχονται η ορθογωνικότητα, η κυρτότητα, οι επιφάνειες, οι όγκοι και άλλα στοιχεία των κελιών και βρίσκεται μία κατάσταση στην οποία να ικανοποιούνται όλοι. Είναι κρίσιμο κάποιοι από τους παραπάνω ελέγχους να ικανοποιούνται καθώς αδυναμία οδηγεί σε πιθανή απόκλιση ή λάθη του κώδικα.

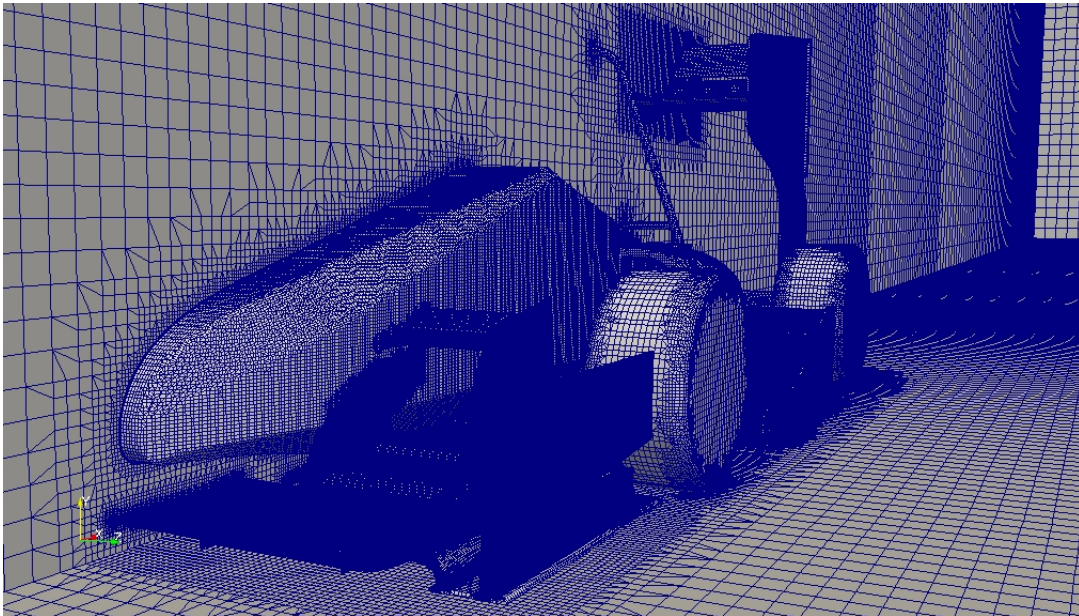
Παρακάτω ακολουθούν μερικά σχήματα του πλέγματος του μονοθέσιου Prom16 το οποίο είναι και το κύριο αντικείμενο μελέτης.



Σχήμα 4.7: Πλέγμα του μονοθέσιου Prom16. Φαίνονται ο κύριος όγκος ελέγχου και οι μικρότεροι εσωτερικοί όγκοι. Φαίνεται το πυκνότερο πλέγμα για τον καλύτερο έλεγχο της ροής.



Σχήμα 4.8: Εξωτερική διαγράμμιση του πλέγματος. Φαίνεται η διαφορά μεγέθους του όγκου ελέγχου με το όχημα.



Σχήμα 4.9: Πλέγμα του μονοθέσιου Prom16. Φαίνονται τόσο η πύκνωση πλέγματος στα καίρια σημεία καθώς και η προσθήκη στρωμάτων.

Κεφάλαιο 5

Πρωτεύουσα Αεροδυναμική Μελέτη

Έχοντας πλέον το πλέγμα το οποίο θα μελετηθεί, ακολουθεί η πρωτεύουσα αεροδυναμική μελέτη του μοντέλου με χρήση του λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής OpenFOAM. Στο παρόν κεφάλαιο με τον όρο αεροδυναμική μελέτη εννοείται η προσομοίωση κίνησης του μοντέλου με δεδομένη ταχύτητα ώστε να μελετηθούν τα αεροδυναμικά φαινόμενα, να υπολογιστούν τιμές πίεσης και ταχύτητας στο βαρύκεντρο κάθε κελιού του πλέγματος. Στην πορεία θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα ώστε να υπολογιστούν αεροδυναμικά φορτία και συντελεστές απόδοσης, τα οποία είναι πιο εύχρηστα. Για να γίνουν τα παραπάνω είναι απαραίτητο να υπάρξει μία ακολουθία βημάτων.

5.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά το θεωρητικό κομμάτι για την επίλυση της ροής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ενδιαφερόμενη ροή είναι εξωτερική γύρω από αυτοκίνητο κινούμενο με χαμηλή ταχύτητα. Οπότε μπορεί να γίνει η θεώρηση πως η ροή είναι ασυμπίεστη. Δηλαδή, στο χωρίο της ροής η τιμή της πυκνότητας ρ δεν μεταβάλλεται με το χρόνο.

5.1.1 Εξισώσεις ροής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ροή είναι ασυμπίεστη. Η εξίσωση της συνέχειας είναι η

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5.1)$$

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από τον ορισμό της μάζας $m = \iiint_V \rho dV$ και την αρχή διατήρησης της μάζας $\partial m / \partial t = - \iint_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS$, όπου \mathbf{J} είναι η ροή μάζας στα όρια του χωρίου ελέγχου $\mathbf{J} = \rho \mathbf{u}$ και \mathbf{n} το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στην επιφάνεια του χωρίου.

Η Εξίσωση 5.1 γράφεται αλλιώς:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.2)$$

Η επόμενη αρχή που χαρακτηρίζει τη ροή και χρησιμοποιείται για υπολογισμούς χαρακτηριστικών της είναι η διατήρηση της ορμής. Δηλαδή, ο δεύτερος νόμος κλασικής μηχανικής. Η χρονική μεταβολή της ορμής ισούται με το άθροισμα των δρωσών δυνάμεων. Αντικαθιστώντας τις υλικές εξισώσεις σε αυτές προκύπτουν οι εξισώσεις Navier-Stokes. Μάλιστα απλοποιώντας τις με την εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστα ρευστά καταλήγουν στην Εξίσωση 5.3.

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - (\nu + \nu_T) \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (5.3)$$

Η εξίσωση 5.3 μαζί με την εξίσωση συνέχειας (Εξίσωση 5.2) αποτελούν ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων και τεσσάρων αγνώστων (u, v, w, p). Για την περίπτωση στρωτής ροής, επιλύοντας προκύπτουν οι ζητούμενες τιμές ταχύτητας και πίεσης και καθορίζεται πλήρως η ροή. Αν η ροή δεν είναι στρωτή, τότε απαιτείται η παράλληλη επίλυση επιπλέον εξισώσεων οι οποίες προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά τύρβης.

Είναι δεδομένο πως η ροή γύρω από ένα μονοθέσιο με έντονες γωνίες και ένα πλήρες αεροδυναμικό πακέτο, που στόχο έχει πρωτίστως την παραγωγή κάθετης δύναμης, έχει τύρβη. Επίσης η ροή αποκολλάται. Αυτό κάνει τους υπολογισμούς σε κρίσιμα σημεία ανακριβείς. Απαιτείται λοιπόν η προσέγγιση της τύρβης με κάποιο υπολογιστικό μοντέλο. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα τύρβης. Το πρώτο είναι το μοντέλο "SST k- ω " [9] και το δεύτερο είναι το μοντέλο "Spalart-Allmaras" [12]. Και τα δύο είναι μοντέλα **Reynolds Averaged Simulation** ή **Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation** (RAS ή RANS).

Το SST k- ω αποτελεί μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στο χώρο της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Η

ιδιαιτερότητα που το κάνει εύχρηστο είναι πως στα εσωτερικά τμήματα του οριακού στρώματος έως και το οριακό υπόστρωμα χρησιμοποιεί το μοντέλο k- ω , ενώ στην ελεύθερη ροή χρησιμοποιεί το μοντέλο k- ϵ . Εμφανίζει αδυναμία στα σημεία αποκοπής και στα σημεία υψηλών τιμών επιτάχυνσης, στα οποία εμφανίζει μεγάλες τιμές τύρβης. Βέβαια όχι στο επίπεδο του μοντέλου k- ϵ .

Να τονισθεί πως στο OpenFOAM χρησιμοποιείται η βασική έκδοση [9] με ανανεωμένες σταθερές [10] και τη δυνατότητα επιλογής χρήσης όρου F_3 [11] για την περίπτωση τοιχωμάτων μεγάλης τραχύτητας.

Όπως προαναφέρθηκε είναι μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων. Το μοντέλο χαρακτηρίζουν η τυρβώδης συνεκτικότητα (Εξίσωση 5.4), η κινητική ενέργεια της τύρβης (Εξίσωση 5.5) και ο ειδικός λόγος διάχυσης (Εξίσωση 5.6).

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1, SF_2)} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = a S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5.6)$$

όπου $F_1, F_2, F_3, P_k, \phi, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \beta^*, \sigma_{k1}, \sigma_{k2}, \sigma_{\omega 1}$ και $\sigma_{\omega 2}$ είναι σχέσεις των k και ω και σταθερές. Εάν επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί ο όρος F_3 , οι εξισώσεις παραμένουν ίδιες με μοναδική αλλαγή τον πολλαπλασιασμό του $\beta k \omega$ με τον όρο F_3 .

Το μοντέλο Spalart-Allmaras από την άλλη αποτελείται από μία μερική διαφορική εξίσωση. Η έκδοση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση του OpenFOAM είναι η βασική (SA) [12]. Το μοντέλο αυτό φέρει καλύτερη δυνατότητα σύγκλισης και χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα εξωτερικής ροής όπως αυτό που παρουσιάζεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Για το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται μία επιπλέον μεταβλητή ($\tilde{\nu}$) η οποία σκοπό έχει τον υπολογισμό της τιμής του συντελεστή της κινητικής συνεκτικότητας τύρβης. Το μοντέλο παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε υπολογισμούς σε οριακό στρώμα με μεγάλη κλίση πίεσης.

$$\nu_T = \tilde{\nu} f_{\nu 1}$$

όπου $f_{\nu 1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{\nu 1}^3}$ με $\chi = \tilde{\nu} / \nu$. Η εξίσωση που χαρακτηρίζει το μοντέλο

είναι:

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{x_j} = C_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla [(\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + C_{b2} |\nabla \tilde{\nu}|^2 \} - \left[C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2$$

όπου $\tilde{S} = \Omega + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}$ και $f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$. Στο OpenFOAM δίνεται η δυνατότητα χρήσης της έκδοσης με τις επεκτάσεις-διορθώσεις του Ashford [13].

5.1.2 Οριακές συνθήκες

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων απαιτούνται οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση της ροής γύρω από το μονοθέσιο οι οριακές συνθήκες ορίζονται για την είσοδο της ροής (μετωπική επιφάνεια του χωρίου ελέγχου), την έξοδο (πίσω επιφάνεια του χωρίου, κάθετη στο διαμήκη άξονα του μονοθέσιου), το έδαφος-δρόμο (κάτω επιφάνεια του χωρίου ελέγχου), τις επιφάνειες του μονοθέσιου και τα ελαστικά.

Οριακές συνθήκες στην είσοδο

Στην είσοδο του χωρίου ροής ισχύει οριακή συνθήκη Dirichlet για την τιμή της ταχύτητας η οποία είναι ίση με $20m/s$. Για την πίεση ισχύει μηδενική συνθήκη Neumann.

Οριακές συνθήκες στην έξοδο

Στην έξοδο του χωρίου ροής ισχύει μηδενική συνθήκη Neumann και για την ταχύτητα και μηδενική συνθήκη Dirichlet για την πίεση.

Οριακές συνθήκες στο δρόμο

Στο δρόμο ισχύει οριακή συνθήκη Dirichlet που ορίζει την ταχύτητα ίση με την ταχύτητα στην είσοδο. Για την πίεση ισχύει μηδενική συνθήκη Neumann.

Οριακές συνθήκες στα τοιχώματα του μονοθέσιου

Στα τοιχώματα του μονοθέσιου ισχύει οριακή συνθήκη μηδενική συνθήκη Dirichlet για την ταχύτητα (μη εισχώρηση ρευστού στο στερεό σώμα) και μηδενική συνθήκη Neumann για την πίεση.

Οριακές συνθήκες χαρακτηριστικών τύρβης

Για τα χαρακτηριστικά τύρβης $(\nu_T, \tilde{\nu})$ οι οριακές συνθήκες είναι στη είσοδο και την έξοδο είναι ίδιες με αυτές της ταχύτητας. Για το k και το ω ορίζονται όπως και για την πίεση. Όσον αφορά τα τοιχώματα ορίζονται οριακές συνθήκες με τη μορφή συναρτήσεων. Να τονισθεί πως ενώ ορίζονται οριακές συνθήκες, δεν αποτελούν τέτοιες. Αυτές οι οριακές συνθήκες έχουν σκοπό την καλύτερη προσέγγιση του οριακού στρώματος. Για τον υπολογισμό του οριακού στρώματος σε τοίχωμα, απαιτείται πολύ πυκνό πλέγμα κοντά σε αυτό. Κάτι τέτοιο ανεβάζει το κόστος. Σε πλέγμα μεγάλου όγκου και πολλών, πολύπλοκων, επιφανειών είναι ακόμα πιο δύσκολο. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού ορίζονται οι Wall Functions των χαρακτηριστικών τύρβης. Πρόκειται για συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιούν εμπειρικές σχέσεις για την προσέγγιση της γραμμικής περιοχής του οριακού στρώματος.

5.1.3 Διακριτοποίηση

Για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε υπολογιστικό περιβάλλον γίνεται διακριτοποίηση πεπερασμένων όγκων. Οι αρχικές μερικές διαφορικές εξισώσεις απαιτείται να εκφραστούν ως ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος είναι και λύση των αρχικών διαφορικών εξισώσεων για το συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Οπότε απαιτείται ένα πεπερασμένο σύνολο από διακριτούς όγκους πάνω στους οποίους θα εκφραστούν οι αλγεβρικές εξισώσεις ροής. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύθηκε η διαδικασία ανάπτυξης πλέγματος. Το πλέγμα αποτελείται από πεπερασμένο σύνολο κελιών. Κάθε κελί αποτελεί και έναν όγκο ελέγχου όπου επιζητείται η λύση των διαφορικών εξισώσεων.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι της μορφής

$$(u \cdot \nabla) u - (\nu + \nu_T) \nabla^2 u + \nabla p = 0$$

όπου ο πρώτος όρος είναι αυτός της μεταφοράς, ο δεύτερος είναι ο όρος διάχυσης και ο τρίτος είναι όρος κλίσης πίεσης. Η παραπάνω

εξίσωση απαιτείται να ικανοποιείται σε κάθε όγκο ελέγχου V με κέντρο P . Οπότε για την ολοκληρωματική της μορφή ισχύει:

$$\int_V (u \cdot \nabla) u dV - \int_V \nabla (\nu + \nu_T) \nabla u dV + \int_V \nabla p = 0 \quad (5.7)$$

Θεωρώντας γραμμική τη μεταβολή σε γειτονικούς όγκους και με χρήση του αναπτύγματος Taylor για κάθε συνάρτηση, εκφράζονται τα διαφορικά των όρων της εξίσωσης 5.7 συναρτήσει των τιμών στα βαρύκεντρα γειτονικών κελιών. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss στα χωρικά ολοκληρώματα της εξίσωσης 5.7, η εξίσωση εκφράζεται στα κέντρα των επιφανειών του κάθε όγκου ελέγχου. Οι τιμές στα κέντρα των επιφανειών υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή, συναρτήσει του γνωστού πεδίου ταχύτητας και πίεσης.

Όρος μεταφοράς

Οπότε η διακριτοποίηση του όρου μεταφοράς δίνει:

$$\begin{aligned} \int_V (u \cdot \nabla) u dV &= \oint_S uu \cdot n dS = \\ &= \sum_{faces} (Su \cdot n)_{sc} u_{sc} = a_P u_P + \sum_N a_N u_N \end{aligned} \quad (5.8)$$

όπου faces είναι το σύνολο των επιφανειών του όγκου ελέγχου, $Su \cdot n$ είναι η παροχή μάζας και με δείκτη sc (**s**urface **c**entre) ορίζονται τα χαρακτηριστικά στο κέντρο της κάθε επιφάνειας. Με δείκτη P ορίζονται τα χαρακτηριστικά στο κέντρο του όγκου που πρέπει να υπολογιστούν και με N οι τιμές στους γειτονικούς. Η γραμμικοποίηση του όρου ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των συντελεστών a_P και a_N . Αφού οι τιμές στα κέντρα των επιφανειών υπολογίζονται μέσω γραμμικής παρεμβολής, εκφράζονται συναρτήσει των u_P , u_N και της απόστασης μεταξύ αυτών. Οπότε οι ενδιαφερόμενοι συντελεστές υπολογίζονται συναρτήσει του ήδη γνωστού πεδίου ταχύτητας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του όγκου ελέγχου.

Όρος διάχυσης

Αντίστοιχα με τον όρο μεταφοράς διακριτοποιείται και ο όρος διάχυσης. $\int_V (\nu + \nu_T) \nabla \cdot (\nabla u) dV = \sum_i S_i (\nabla u) \cdot n$. Ο όρος ∇u διακριτοποιείται με ανάπτυγμα Taylor και σφάλμα αποκοπής δεύτερης τάξης. Π.χ. σε περίπτωση ορθογωνικού πλέγματος ισχύει $S n \cdot (\nabla u)_{sc} = S \frac{u_N - u_P}{l}$ όπου l είναι η απόσταση του P από το N .

Όρος πίεσης και τελικό διακριτοποιημένο σύστημα

Θεωρείται η ημι-διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης ορμής

$$a_P u_P = A(u) - \nabla p \quad (5.9)$$

όπου ο όρος $A(u)$ αποτελείται από το μητρώο των γνωστών συντελεστών από τα γειτονικά κελιά πολλαπλασιασμένο με τις αντίστοιχες ταχύτητες. Οι συντελεστές έχουν προκύψει από τη διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς και διάχυσης.

Η επίλυση του συστήματος γίνεται σε περιβάλλον OpenFOAM. Η επίλυση των εξισώσεων ροής γίνεται με χρήση του επιλυτή SIMPLE [7]. Στον επιλυτή αυτό αν η τιμή της ταχύτητας που υπολογίστηκε μία χρονική στιγμή μέσω της εξίσωσης ορμής είναι v_i^* και η αντίστοιχη πίεση που ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας είναι p^* . Η διόρθωση της ταχύτητας και της πίεσης ώστε να ικανοποιούν και τις δύο εξισώσεις κατάστασης είναι v' και p' αντίστοιχα. Η εξίσωση της ορμής ισχύει και για τις διορθώσεις χωρίς μεγάλο σφάλμα. Δηλαδή

$$a_P u'_P = A(u') - \nabla p' \quad (5.10)$$

Αν θεωρηθεί πως ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος είναι αμελητέος σε σχέση με την κλίση της διόρθωσης της πίεσης τότε

$$u'_P = -\frac{1}{a_P} \nabla p' \quad (5.11)$$

Ισχύει $\nabla \cdot u_j = 0$ οπότε από τον ορισμό της διόρθωσης ταχύτητας ισχύει $\nabla \cdot u'_j = -\nabla \cdot u_j^*$. Μεταφέροντας την εξίσωση αυτή στην 5.10 και χρησιμοποιώντας την εξίσωση ορμής προκύπτει η έκφραση πίεσης. Ολοκληρώνοντας σε όγκο ελέγχου με έδρες "faces", διακριτοποιείται στη μορφή

$$\sum_{faces} A(u_{sc}) S_{face} = \sum_{faces} \frac{1}{a_{sc}} (\nabla p S)_{face} \quad (5.12)$$

Οπότε το τελικό διακριτοποιημένο σύστημα είναι

$$a_P u_P = A(u_{sc}) - \sum_{faces} p_{sc} S$$

$$\sum_{faces} A(u_{sc}) S_{face} = \sum_{faces} \frac{1}{a_{sc}} (\nabla p S)_{face} \quad (5.13)$$

όπου αρχικά υπολογίζεται το πεδίο της ταχύτητας από την εξίσωση της ορμής βάσει της αρχικής τιμής της πίεσης. Η εξίσωση αυτή δεν ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Στη συνέχεια, δημιουργείται το μητρώο $A(u)$ και με παρεμβολή εκφράζεται για τα κέντρα των επιφανειών του κελιού. Από τη δεύτερη εξίσωση υπολογίζεται το νέο πεδίο πίεσης το οποίο ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας αλλά όχι αναγκαστικά της ορμής. Τέλος, από την εξίσωση 5.12 υπολογίζεται το νέο πεδίο ταχύτητας u_p . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης.

Αξίζει να τονισθεί πως το OpenFOAM δεν επιλύει ως προς τη διόρθωση της πίεσης όπως κάνει κανονικά ο επιλυτής SIMPLE, αλλά ως προς την πίεση όπως φαίνεται και στις εξισώσεις 5.12 και 5.13.

5.2 Επίλυση του συστήματος σε περιβάλλον OpenFOAM

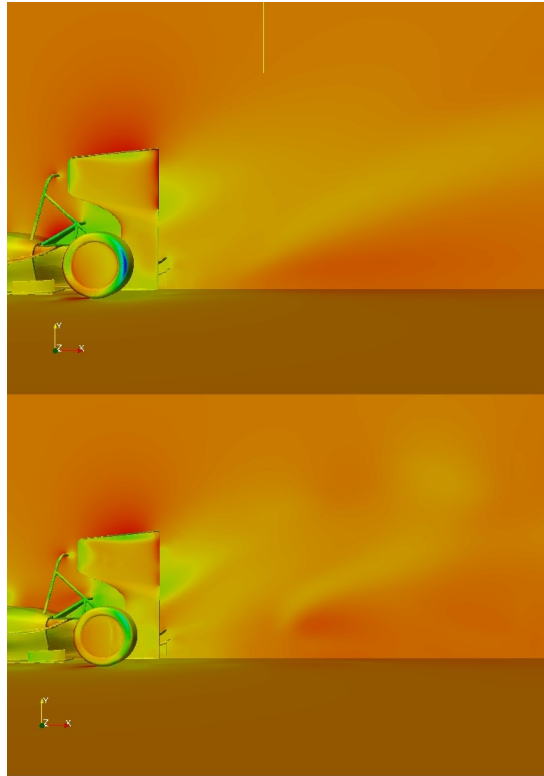
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αεροδυναμική μελέτη έγινε σε περιβάλλον OpenFOAM το οποίο δεν είναι το πιο φιλικό προς το χρήστη αλλά είναι ανοιχτού κώδικα, υπάρχει αρκετό βοηθητικό υλικό και παρέχει μεγάλη ελευθερία στο χρήστη. Παραπάνω αναφέρθηκε η διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων. Ο όρος μεταφοράς διακριτοποιήθηκε ανάντι με σχήμα πρώτης τάξης καθώς και με σχήμα δεύτερης τάξης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην πορεία.

Ο χώρος στον οποίο γίνεται η μελέτη αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο κελιών. Κάθε κελί περιέχει πληροφορίες για το ρευστό. Αυτές είναι τιμές ταχύτητας, πίεσης, γεωμετρικής θέσης και όποιων άλλων πεδίων οριστεί να υπολογίζει. Ξεκινώντας από τις τιμές στα χωρία των οριακών συνθηκών οι οποίες είναι γνωστές, υπολογίζονται αυτές των γειτονικών κελιών. Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε αρχικά είναι το μοντέλο $k-\omega$ SST. Οπότε επιλέχθηκε η τιμή του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας $\nu_T \approx \nu = 1.5e^{-5}$. Βάσει αυτών υπολογίζεται η τιμή του $k = 0.015$ και του $\omega = 1000$. Σε αρχικό στάδιο το σχήμα διακριτοποίησης της μεταφοράς είναι πρώτης τάξης για καλύτερη δυνατότητα σύγκλισης. Επίσης, γίνεται αρχικοποίηση τιμών σε όλο το πλέγμα με χρήση ενός πολύ απλοποιημένου επιλύτη εξισώσεων Navier-Stokes, `potentialFoam`, επίσης για βελτίωση των δυνατοτήτων σύγκλισης.

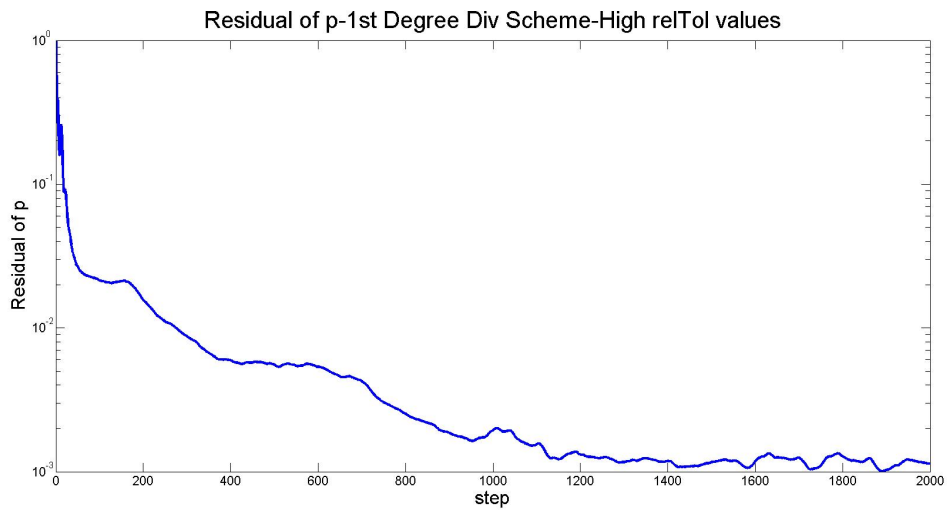
Τα γεωμετρικά μοντέλα που μελετώνται είναι αρχικά το αεροδυναμικό πακέτο του μονοθέσιου Prom 16 προσαρμοσμένο σε παλιότερο

πλαίσιο, έπειτα το μονοθέσιο Prom16 και, τέλος, η εξέλιξη του Prom16.

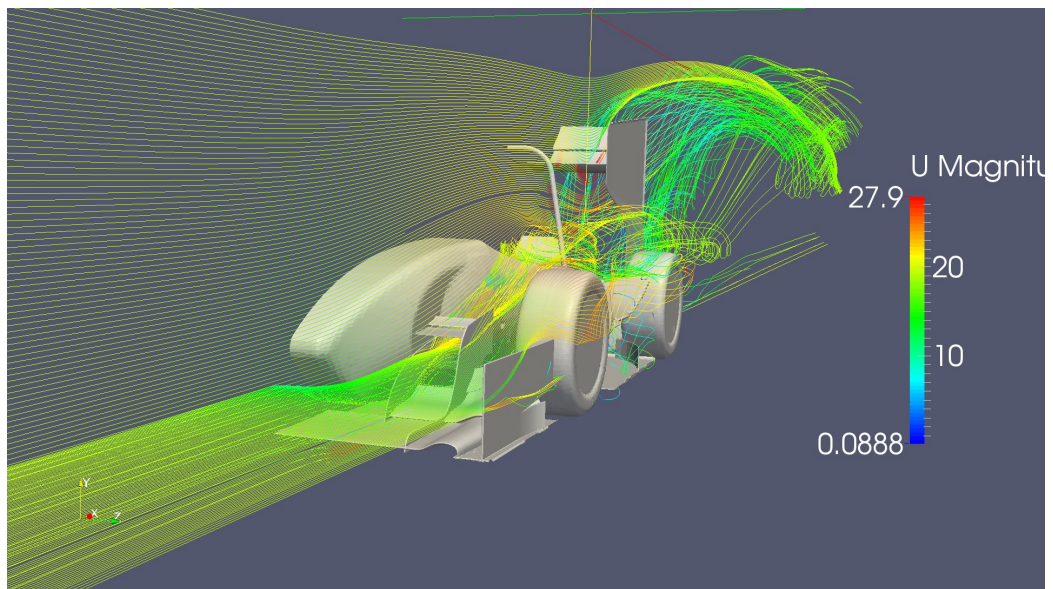
Αφού έχουν οριστεί όλες οι απαραίτητες παράμετροι ξεκινά η επίλυση του συστήματος. Αρχικά μελετάται το αεροδυναμικό πακέτο προσαρμοσμένο στο παλιότερο πλαίσιο. Πρώτη επίλυση γίνεται με διακριτοποίηση πρώτης τάξης για τον όρο μεταφοράς (Gauss Upwind). Τα αποτελέσματα μετά από 2000 επαναλήψεις δείχνουν πως ο κώδικας έχει συγκλίνει, με το σφάλμα πίεσης να βρίσκεται στο 10^{-3} . Τα αποτελέσματα απέχουν αρκετά από το αναμενόμενο βάσει εμπειρικών δεδομένων. Η επιλογή σχήματος διακριτοποίησης πρώτης τάξης και ο έλεγχος σχετικής χαλάρωσης για την ταχύτητα και την πίεση, που είναι υψηλός (0,5 και 0,2 αντίστοιχα), αποτελούν συμβιβασμούς που έγιναν με στόχο τη διευκόλυνση του κώδικα για σύγκλιση (Σχήμα 5.1). Βέβαια οι παραπάνω συμβιβασμοί επηρεάζουν και την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται και η πορεία του σφάλματος πίεσης. Είναι επιθυμητή μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, οπότε στο επόμενο βήμα επιλέχθηκε να γίνει η μετάβαση από διακριτοποίηση πρώτης τάξης για τον όρο μεταφοράς σε δεύτερης και η σχετική χαλάρωση για την πίεση και την ταχύτητα να γίνει 0,01 και 0,1 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως πιθανές αστάθειες στη ροή επηρεάζουν έντονα τη σύγκλιση του κώδικα καθώς το σφάλμα της πίεσης είναι στο $9 \cdot 10^{-2}$, τιμή η οποία είναι οριακά αποδεκτή, όμως δύσκολα θα οδηγήσει σε σύγκλιση όταν, στη συνέχεια, επιλυθούν οι συζυγείς εξισώσεις. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως υπάρχει αστάθεια στη ροή και δίνες έως το τέλος του χωρίου ροής (Σχήμα 5.3). Παρόλα αυτά υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στον ομόρρο σε σχέση με τα αποτελέσματα με διακριτοποίηση 1ης τάξης. Λύση του προβλήματος αποτελεί η επιμήκυνση του χωρίου ελέγχου στη φορά του ομόρρου ώστε να δοθεί η δυνατότητα εξομάλυνσης της ροής πριν την επιφάνεια εξόδου (μήκος χωρίου ελέγχου από 33 m έγινε 38 m). Αντίστοιχα αυξήθηκε ελαφρώς το ύψος του χωρίου ενώ μειώθηκε το πλάτος, το οποίο φαίνεται να επηρεάζει λιγότερο τη ροή. Στην επόμενη επίλυση τα αποτελέσματα είναι καλύτερα με το σφάλμα πίεσης να πέφτει κατά 10^{-1} και τα αποτελέσματα να φέρουν μικρότερες αποκλίσεις σε κάθε βήμα. Στο Σχήμα 5.4 φαίνονται οι διακυμάνσεις του σφάλματος πίεσης. Δεν εξομαλύνονται ποτέ, γεγονός το οποίο αποδεικνύει την μη μονιμότητα του πεδίου ροής.



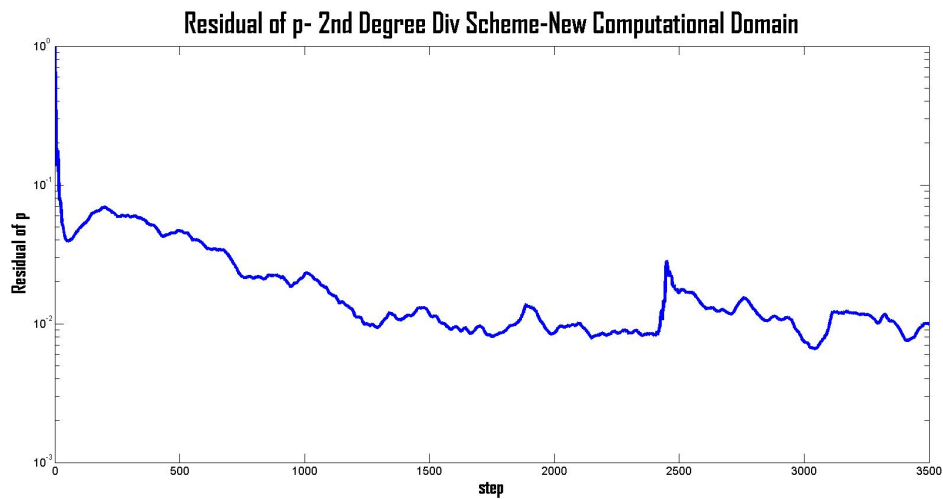
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα πίεσης στην επιφάνεια του πίσω τμήματος του μονοθέσιου και στον ομόρρου. Πρόκειται για το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Πάνω φαίνεται η διακριτοποίηση πρώτης τάξης. Κάτω φαίνεται η διακριτοποίηση δεύτερης τάξης. Οι διαφορές είναι έντονες. Στη διακριτοποίηση πρώτης τάξης, με χαμηλότερους συντελεστές σχετικής χαλάρωσης, είναι ξεκάθαρο πως δεν διατυπώνεται αναλυτικά η αναταραχή στον ομόρρου, όπως εισάγεται από το πάτωμα και το αποκλίνον ακροφύσιο. Επίσης, σε τμήματα του μονοθέσιου, όπως τα πλευρικά καλύμματα της πίσω πτέρυγας, οι διαφορές πίεσης στο σχήμα με τη διακριτοποίηση πρώτης τάξης είναι μεγαλύτερες αλλά εξομαλύνονται πολύ πιο γρήγορα. Ενώ, στο σχήμα δεύτερης τάξης, στον ομόρρου είναι φανερά περισσότερα ρεύματα διαφορετικής πίεσης καθώς και το διάστημα το οποίο απαιτείται για τη ροή του πατώματος να αποκτήσει πίεση ίση με αυτήν του περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.2: Λογαριθμικό διάγραμμα σφάλματος της εξίσωσης της πίεσης. Πρόκειται για το μοντέλο με το παλιό πλαίσιο. Η διακριτοποίηση του όρου μεταφοράς είναι πρώτης τάξης.



Σχήμα 5.3: Μοντέλο του μονοθέσιου με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Παρουσιάζονται οι τροχιές ρευστοστοιχείων και το μέτρο της ταχύτητας. Φαίνεται έντονα η πιθανότητα ύπαρξης αστάθειας στη ροή έως και το πέρας του χωρίου ροής, γεγονός το οποίο επηρεάζει έντονα τη δυνατότητα του κώδικα για σύγκλιση.



Σχήμα 5.4: Λογαριθμικό διάγραμμα σφάλματος της εξίσωσης της πίεσης. Πρόκειται για το αεροδυναμικό πακέτο Pfrom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Χρησιμοποιείται σχήμα διακριτοποίησης δεύτερης τάξης και το νέο-μεγαλύτερο χωρίο ροής.

Έπειτα επαναλήφθηκε η διαδικασία επίλυσης με χρήση του μοντέλου Spalart-Allmaras. Διατηρήθηκαν οι αλλαγές που έγιναν στα προηγούμενα βήματα. Έχει ήδη αναφερθεί πως το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε σημεία με μεγάλη κλίση πίεσης, όπως σε πολλές επιφάνειες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το μοντέλο k- ω SST επιστρέφει μεγαλύτερες τιμές τύρβης σε σημεία αποκοπής και μεγάλης κλίσης πίεσης. Οπότε τα αποτελέσματα με το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras είναι ελαφρώς καλύτερα και πιο κοντά στα αναμενόμενα. Το σφάλμα πίεσης είναι ελαφρώς μικρότερο από αυτό του μοντέλου k- ω SST. Παρουσιάζονται βέβαια μεγαλύτερες διακυμάνσεις από ό τι προηγουμένως.

Ακολουθούν οι Πίνακες 5.1 και 5.2 όπου γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων αεροδυναμικών φορτίων για σχήματα διακριτοποίησης 1ης και 2ης τάξης.

Forces (1st order)	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag
Front Wing	126.00	18.50	6.81
Rear Wing	93.40	32.50	2.87
Beam Wing	1.00	1.37	0.73
Underbody	23.90	1.19	20.08
Chassis Winglets	0.92	0.72	1.28
Chassis	-63.60	32.60	-1.95
Wheels	-23.40	10.50	-2.23
Prom16 (old chassis)	158.22	97.38	1.62

Πίνακας 5.1: Πίνακας με τα αεροδυναμικά φορτία στο μονοθέσιο όπως προκύπτουν από την επίλυση των πρωτεύουσών εξισώσεων. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με χρήση σχήματος διακριτοποίησης πρώτης τάξης. Πρόκειται για το μοντέλο με το παλιό πλαίσιο. Τα αποτελέσματα αφορούν το μισό μονοθέσιο καθώς υπάρχει συμμετρία.

Forces (2nd order)	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag
Front Wing	110.12	16.30	6.76
Rear Wing	100.53	31.40	3.20
Beam Wing	3.00	2.30	1.30
Underbody	45.50	2.37	19.20
Chassis Winglets	0.92	0.66	1.39
Chassis	-60.20	38.60	-1.56
Wheels	-24.50	11.10	-2.21
Prom16 (old chassis)	175.37	102.73	1.71

Πίνακας 5.2: Πίνακας με τα αεροδυναμικά φορτία στο μονοθέσιο όπως προκύπτουν από την επίλυση των πρωτευουσών εξισώσεων. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με χρήση σχήματος διακριτοποίησης δεύτερης τάξης. Πρόκειται για το μοντέλο με το παλιό πλαίσιο. Τα αποτελέσματα αφορούν το μισό μονοθέσιο καθώς υπάρχει συμμετρία.

5.3 Αποτελέσματα και αλλαγές στον αρχικό σχεδιασμό

Έχοντας αποτελέσματα για το μονοθέσιο, είναι πλέον δυνατό να εκτιμηθούν οι σχεδιαστικές επιλογές που έγιναν. Για να γίνει αυτό αρχικά κρίνονται τα αποτελέσματα αεροδυναμικών φορτίων που υπολογίστηκαν. Να τονισθεί πως αρχικά μελετάται το αεροδυναμικό πακέτο όπως έχει προσαρμοστεί στο παλιό πλαίσιο ώστε να γίνουν φανερές πιθανές αδυναμίες του σχεδιασμού του 2016. Επίσης ο νέος σχεδιασμός δεν επηρεάζει κατά πολύ τον αεροδυναμικό καθώς οι κύριες διαστάσεις παραμένουν όμοιες και απλά πρέπει να προσαρμοστούν λεπτομέρειες.

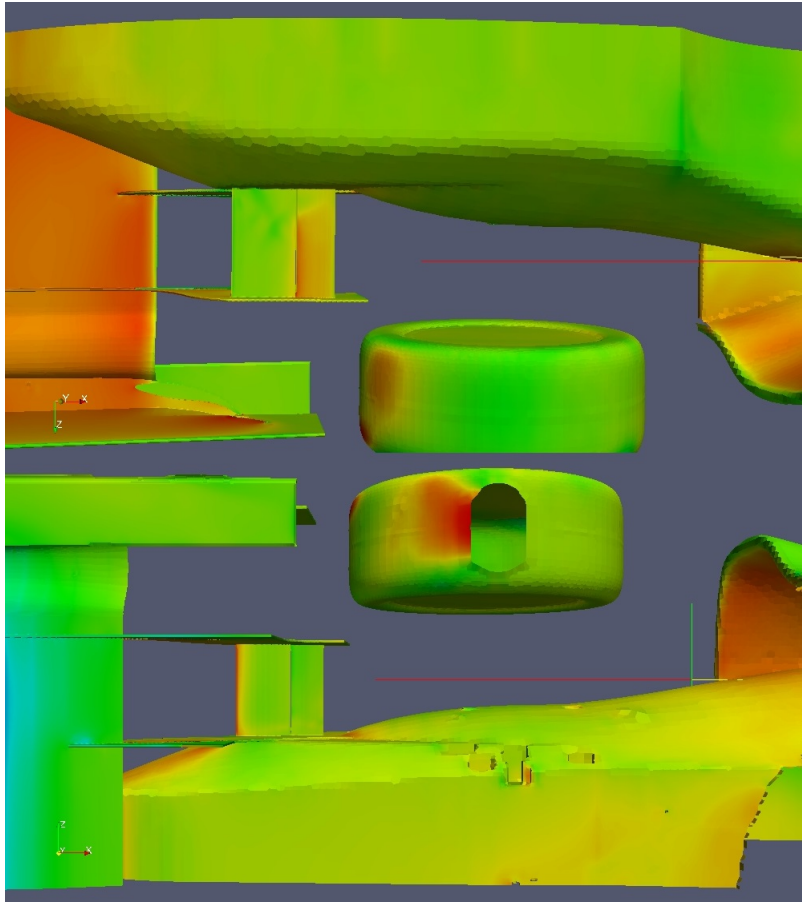
Από τα αποτελέσματα κρίνεται πως υπάρχουν έντονες αδυναμίες στον αεροδυναμικό σχεδιασμό. Τα χρονικά περιθώρια δεν είναι απεριόριστα, και οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν ώστε να διορθωθούν πολλές από τις αδυναμίες είναι ξεκάθαρες. Οπότε, σε αυτό το στάδιο γίνονται μετατροπές χωρίς την επίλυση συζυγών εξισώσεων.

Φαίνεται πως η εμπρός πτέρυγα παράγει μεγάλη κατακόρυφη δύναμη. Η πίσω πτέρυγα παράγει λιγότερη από όση ήταν αναμενόμενο. Το πάτωμα παράγει λιγότερο από το επιθυμητό και τα πτερύγια στο σώμα του μονοθέσιου δεν παράγουν σχεδόν καθόλου. Το κυριότερο σημείο βέβαια είναι πως λόγω τροχών και πλαισίου τελικά η συνολική κάθετη δύναμη μειώνεται στο 75% και η οπισθέλκουσα διπλασιάζεται.

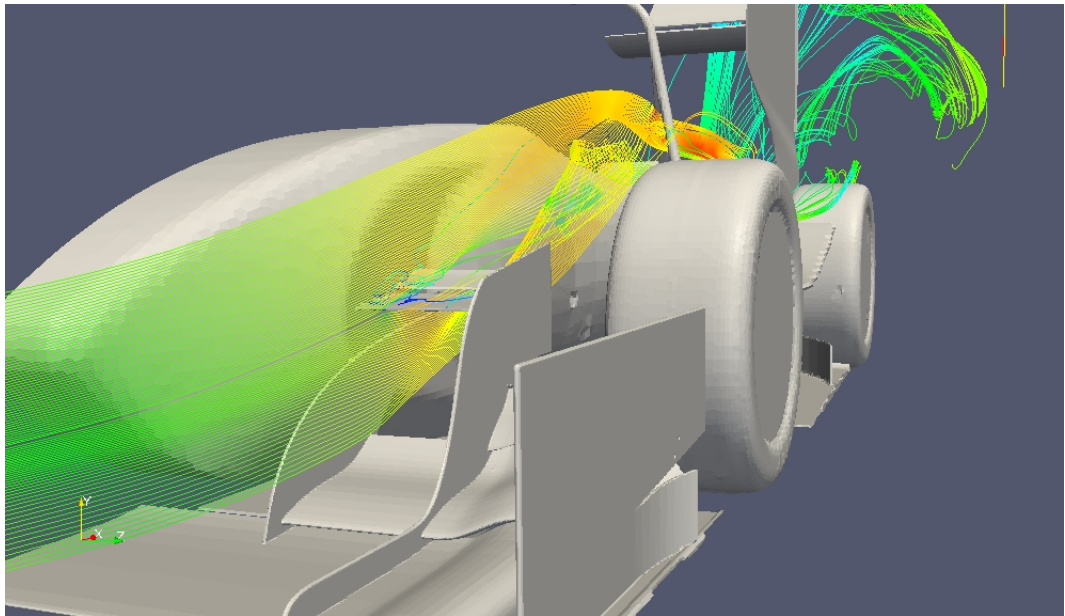
Στο επόμενο βήμα γίνεται η οπτικοποίηση της ροής με χρήση του

πακέτου ParaView. Αρχικά παρουσιάζεται η επιφανειακή κατανομή πίεσης στο μονοθέσιο. Αυτή είναι σε θέση να προσδιορίσει τις επιφάνειες στις οποίες τα αποτελέσματα είναι αντίθετα από τα αναμενόμενα (Σχήμα 5.5). Έπειτα παρουσιάζονται οι τροχιές ρευστοστοιχείων και η ταχύτητα ώστε να γίνει ξεκάθαρος ο λόγος που η ροή σε αυτές τις επιφάνειες συμπεριφέρεται με τέτοιο τρόπο (Σχήμα 5.6).

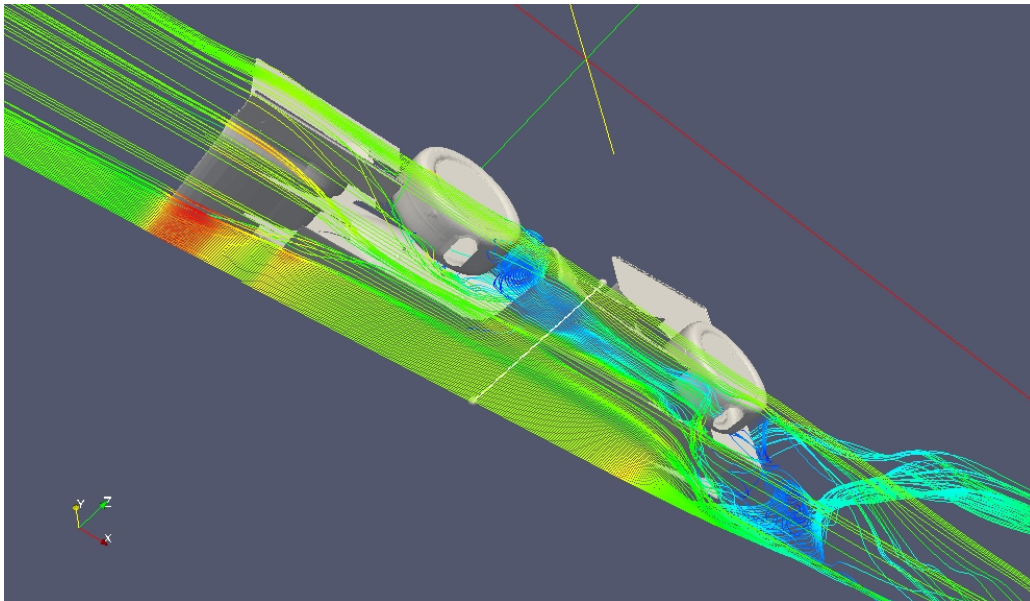
Έχοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες ξεκινά η διαδικασία αρχικών αλλαγών πριν τη εκκίνηση της βελτιστοποίησης. Ότι αλλαγές γίνουν μπορούν να μεταφερθούν και στο μοντέλο με το νέο πλαίσιο. Μάλιστα οι αλλαγές θα μελετηθούν απευθείας σε αυτό. Το πρώτο τμήμα το οποίο και πρέπει να μεταβληθεί είναι τα πτερύγια μεταξύ των τροχών και του πλαισίου. Είναι ξεκάθαρο πως δεν προσφέρουν τίποτα καθώς η ροή σε αυτά είναι έντονα ανοδική. Οπότε, σε πρώτο στάδιο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Η πίσω πτέρυγα παράγει μικρή τιμή κάθετης δύναμης, οπότε, αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης και σε αυτή, ακόμα και αν αυτό σημαίνει μικρή αύξηση στην οπισθέλκουσα. Πίσω από τον τροχό, όπως ήταν αναμενόμενο, η ροή δεν έχει μεγάλη ταχύτητα και παρουσιάζονται δίνες οι οποίες εκτρέπουν τη ροή από την πορεία της. Αυτό σημαίνει πως τα πτερύγια των καλυμμάτων του ψυγείου δεν χρησιμεύουν. Η καλύτερη δυνατή επιλογή είναι να δημιουργηθούν πιο μικρά καλύμματα για να επηρεάζουν λιγότερο τη ροή μεταξύ τροχών και πλαισίου. Τέλος, το πάτωμα δεν παράγει όση κάθετη δύναμη είναι επιθυμητή οπότε πρέπει κάποια μέθοδος ελέγχου ροής να ωθήσει περισσότερη παροχή σε αυτό. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται πως η ροή στο πάτωμα, ανάμεσα στους τροχούς, έχει πολύ χαμηλή ταχύτητα και επηρεάζει και τη ροή στο κέντρο αυτού. Επίσης, η εμπρός πτέρυγα ωθεί αέρα πάνω από το πάτωμα. Οπότε, το μεσαίο τμήμα της αποκτά μικρότερη γωνία πρόσπτωσης ώστε να μην δημιουργεί τόσο έντονο ανώρευμα. Επίσης, δημιουργούνται κανάλια ώστε να διαχωριστούν καλύτερα τα ρεύματα με διαφορετικές ιδιότητες. Ανάμεσα από τους τροχούς υιοθετείται επιθετικός σχεδιασμός αποκλίνοντος ακροφύσιου με χρήση πτερυγίων για την καλύτερη αξιοποίηση της ροής.



Σχήμα 5.5: Επιφανειακή κατανομή πίεσης στο μονοθέσιο με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Σημείο ενδιαφέροντος αποτελούν τα πτερυγία που βρίσκονται μεταξύ τροχών και πλαισίου. Στο πάνω σχήμα φαίνεται η κατανομή πίεσης στην πλευρά υπερπίεσης των πτερυγίων και στο κάτω σχήμα η πλευρά υποπίεσης αντίστοιχα. Παρατηρείται πως η διαφορά πίεσης είναι μηδαμινή με το σημείο αποκοπής να βρίσκεται πολύ κοντά στην ακμή προσβολής αλλά στην πλευρά υποπίεσης. Αυτό προϋδεάζει πως η ενεργή γωνία πρόσπτωσης του πρώτου εκ των δύο πτερυγίων είναι αρνητική.

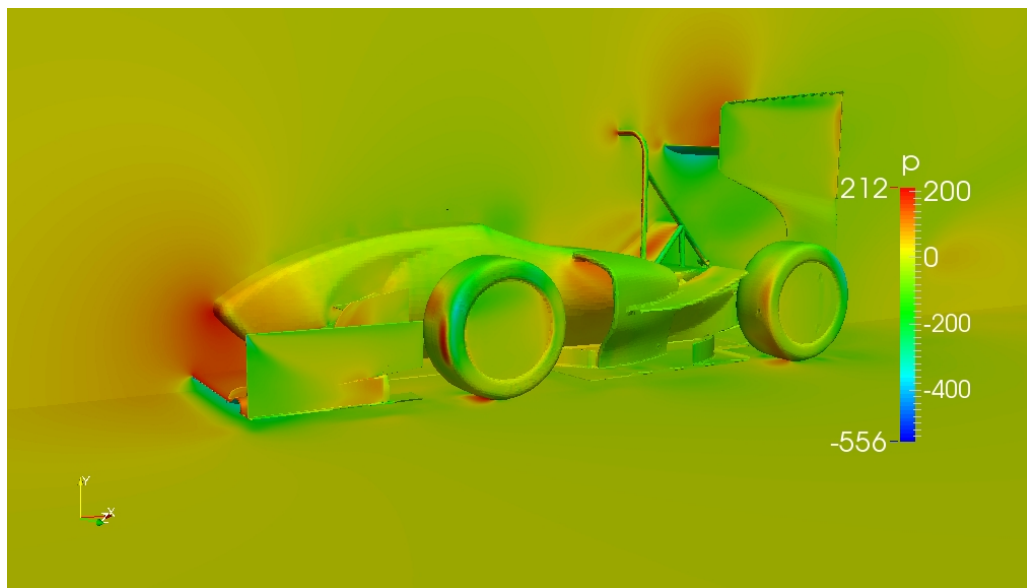


Σχήμα 5.6: Διάγραμμα με τις τροχιές ρευστοστοιχείων στο μονοθέσιο με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Το σημείο ενδιαφέροντος είναι τα πτερύγια που έρχονται σε επαφή με το πλαίσιο. Είναι γνωστό από τα αποτελέσματα και από τα διαγράμματα πίεσης πως δεν συνεισφέρουν στην παραγωγή κάθετης δύναμης. Εδώ φαίνεται και ο λόγος. Το ανώρευμα από τα πρώτα δύο στοιχεία της εμπρός πτέρυγας και το πεδίο πίεσης επηρεάζουν το χώρο στον οποίο βρίσκονται. Η ενεργή γωνία πρόσπτωσης είναι κοντά στο μηδέν αν όχι αρνητική, οπότε πρέπει να τους δοθεί μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης για να συμμετέχουν στην παραγωγή κάθετης δύναμης.

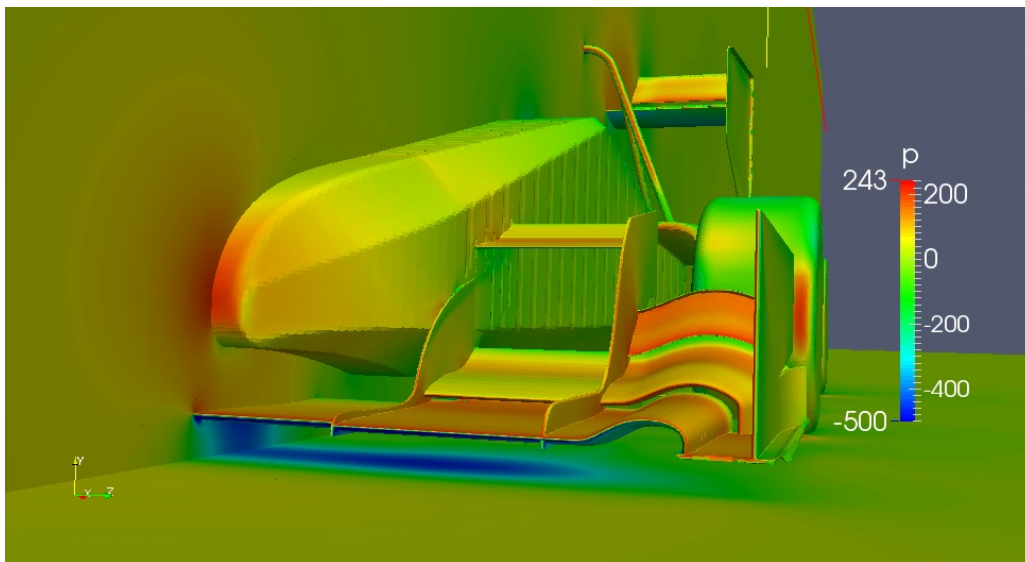


Σχήμα 5.7: Γραμμές τροχιάς ρευστοστοιχείων με τιμές του μέτρου της ταχύτητας στο μονοθέσιο με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το πάτωμα και το αποκλίνον ακροφύσιο. Συγκεκριμένα τα πλευρικά κανάλια μεταξύ του εμπρός και πίσω άξονα επηρεάζουν αρνητικά το υπόλοιπο πάτωμα μειώνοντας την ταχύτητα της ροής σε αυτό. Αυτό οφείλεται στη ροή που ακολουθεί τον τροχό ο οποίος εισάγει έντονες αναταραχές.

Μεγάλο πρόβλημα αποτελεί η άνωση που παρουσιάζει το πλαίσιο και τα καλύμματά του. Στο σχήμα 5.8 φαίνεται πως μεταξύ της "μύτης" (κάλυμμα προστατευτικής διαμόρφωσης σε περίπτωση σύγκρουσης) του πλαισίου και της εμπρός πτέρυγας δημιουργείται ένα πεδίο υψηλής πίεσης. Το σχήμα όμως οδηγεί σε πολύ χαμηλή πίεση άνω του πλαισίου. Για να διορθωθεί το πρόβλημα, πρέπει να διαμορφωθεί καταλληλότερο σχήμα "μύτης" στο πλαίσιο (Σχήμα 5.9).

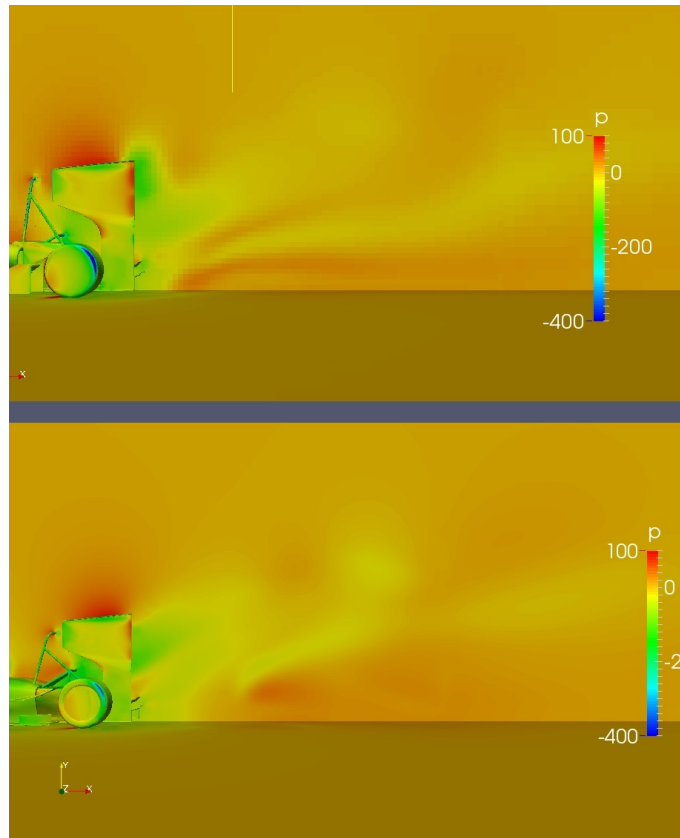


Σχήμα 5.8: Επιφανειακή κατανομή πίεσης στο μονοθέσιο με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 προσαρμοσμένο στο παλιό πλαίσιο. Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το εμπρός άκρο του πλαισίου (κάλυμμα της προστατευτικής διαμόρφωσης στην περίπτωση σύγκρουσης). Μεταξύ του πλαισίου και της εμπρός πτέρυγας εμφανίζεται πεδίο υψηλής πίεσης όπως και ήταν αναμενόμενο. Το σχήμα του καλύμματος οδηγεί σε πολύ χαμηλότερη πίεση στο άνω μέρος του πλαισίου με αποτέλεσμα μεγάλη τιμή άνωσης.



Σχήμα 5.9: Επιφανειακή κατανομή πίεσης στο μονοθέσιο με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 στο νέο πλαίσιο. Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το εμπρός άκρο του πλαισίου (κάλυμμα της προστατευτικής διαμόρφωσης στην περίπτωση σύγκρουσης). Μεταξύ του πλαισίου και της εμπρός πτέρυγας συνεχίζει να εμφανίζεται πεδίο ελαφρώς αυξημένης πίεσης. Πλέον η διαμόρφωση του καλύμματος οδηγεί σε μικρότερη διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς του πλαισίου με αποτέλεσμα μικρότερη άνωση.

Με όλες τις αλλαγές στο σχεδιασμό ολοκληρωμένες γίνεται νέα αεροδυναμική μελέτη, αυτή τη φορά χρησιμοποιώντας μόνο το μοντέλο Spalart-Allmaras. Τα αποτελέσματα είναι κατά πολύ καλύτερα (Σχήμα 5.10). Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται τα βελτιωμένα πλέον αποτελέσματα. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα στον πίνακα 5.2. Οπότε, το επόμενο βήμα είναι η χρήση συζυγών μεθόδων για τη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 5.10: Επιφανειακή κατανομή πίεσης στην επιφάνεια συμμετρίας του μονοθέσιου με το αεροδυναμικό πακέτο Prom16 και το νέο πλαίσιο μετά που έγιναν οι αλλαγές (πάνω) και του αεροδυναμικού πακέτου Prom16 πριν γίνουν οι αλλαγές (κάτω). Συγκρίνεται ο ομόρρους στις δύο περιπτώσεις καθώς στο πάτωμα έγιναν οι μεγαλύτερες αλλαγές. Στο νέο σχεδιασμό φαίνεται πως η ροή μετά το αποκλίνον ακροφύσιο στο νέο σχεδιασμό αποκτά την πίεση του περιβάλλοντος πολύ πιο γρήγορα από ότι πριν καθώς και πως στροβιλισμοί οι οποίοι φαίνονται ως πεδία χαμηλότερης πίεσης στην επιφάνεια συμμετρίας έχουν σχεδόν αφανιστεί.

Forces	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag
Front Wing	150	21	7.14
Rear Wing	97	38	2.55
Beam Wing	9	2.5	3.60
Underbody	86	11	7.82
Chassis Winglets	11	3	3.67
Chassis	-25	33	-0.76
Wheels	-22	14	-1.57
Prom16 (new chassis)	300	120	2.50

Πίνακας 5.3: Πίνακας με τα αεροδυναμικά φορτία όπως προκύπτουν από την πρωτεύουσα αεροδυναμική μελέτη. Πρόκειται για το μοντέλο με το νέο πλαίσιο αφού έγιναν κάποιες αλλαγές στο σχεδιασμό βασισμένες στα αποτελέσματα του μοντέλου με το παλιό πλαίσιο. Τα αποτελέσματα αφορούν το μισό μονοθέσιο καθώς υπάρχει συμμετρία. Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται είναι το Spalart-Allmaras. Τα αποτελέσματα αξίζει να συγκριθούν με αυτά του Πίνακα 5.2. Συνολικά, υπάρχει μεγάλη αύξηση της κάθετης δύναμης με παράλληλη βελτίωση του λόγου κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα.

Πλέον ο σχεδιασμός κρίνεται πως έχει φτάσει σε σημείο όπου οι επιθυμητές αλλαγές σε αυτόν δεν είναι προφανείς. Επίσης, τα παραγόμενα αεροδυναμικά φορτία βρίσκονται στα άνω όρια των αναμενόμενων. Θα ακολουθήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση συζυγών μεθόδων.

Κεφάλαιο 6

Βελτιστοποίηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης του μονοθέσιου Prom16. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται πλέον αποκλειστικά το μοντέλο με το νέο πλαίσιο καθώς έγιναν ό τι αλλαγές χρειάστηκαν και ο νέος σχεδιασμός είναι σαφώς καλύτερος του παλιού. Χρησιμοποιούνται Συνεχείς Συζυγείς Μέθοδοι βελτιστοποίησης, αφού οι δυνατότητές τους προσφέρουν πολύ καλά αποτελέσματα και πολύ γρήγορα.

6.1 Συζυγείς Μέθοδοι Βελτιστοποίησης σε Μόνη Ασυμπιεστή Ροή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συζυγής μέθοδος βελτιστοποίησης αποτελεί αιτιοκρατική μέθοδο, η οποία στόχο έχει τον υπολογισμό της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Επομένως, γίνεται γνωστή η τάση μεταβολής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με τις μεταβολές των μεταβλητών σχεδιασμού. Εδώ, η διαδικασία δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Δηλαδή, δεν χρησιμοποιείται η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης για την εύρεση των μεταβλητών σχεδιασμού που ελαχιστοποιούν την τιμή της, αλλά χρησιμοποιείται για τη δημιουργία χαρτών ευαισθησίας του γεωμετρικού μοντέλου που μελετάται, ώστε να γίνουν μετατροπές πάνω σε αυτό. Δηλαδή με λογισμικό CAD γίνονται αλλαγές στο σχεδιασμό σύμφωνα με τα αποτελέσματα. Έπειτα, γίνεται καινούρια επίλυση της ροής στο OpenFOAM, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αρχικά και αν είναι καλύτερα διατηρείται ο νέος σχεδιασμός και ξεκινά ο επόμενος κύκλος βελτιστοποίησης. Να διευκρινιστεί πως η

βελτιστοποίηση έγινε με το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras.

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 5 οι εξισώσεις που ορίζουν τη μέση ροή είναι οι Navier-Stokes μόνιμης κατάστασης ασυμπίεστου ρευστού (εξίσωσης συνέχειας και διατήρησης της ορμής). Δεν λαμβάνεται υπόψη το έργο λόγω μεταφοράς θερμότητας (Εξίσωση 6.1).

$$R^p = -\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

$$R_i^v = v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0$$

$$i = 1, 2, 3 \quad (6.1)$$

όπου με v_i ορίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας, p είναι η στατική πίεση διαιρεμένη με την πυκνότητα ρ του ρευστού και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα.

Οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται παράλληλα με το μοντέλο τύρβης από το οποίο υπολογίζεται το ν_t . Οι Navier-Stokes, οι εξισώσεις του μοντέλου τύρβης και οι οριακές συνθήκες αποτελούν τις πρωτεύουσες εξισώσεις. Οι οριακές συνθήκες δίνονται στο κεφάλαιο 5.

6.1.1 Αντικειμενική Συνάρτηση και Συζυγείς Μεταβλητές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια για αεροδυναμικό σχεδιασμό με την ελάχιστη οπισθέλκουσα και μέγιστη κάθετη δύναμη. Οπότε είναι ξεκάθαρο πως η συνάρτηση κόστους F είναι στη μία περίπτωση η δύναμη οπισθέλκουσας και στην δεύτερη περίπτωση η κάθετη δύναμη (Εξίσωση 6.2). Στην περίπτωση της κάθετης δύναμης η αντικειμενική εξίσωση εκφράζει την άνωση καθώς απαιτούνται λιγότερες μετατροπές στον κώδικα. Η Εξίσωση 6.2 ζητείται να ελαχιστοποιηθεί και στις δύο περιπτώσεις. Αντικείμενο προς βελτιστοποίηση είναι το σχήμα του μονοθέσιου, οπότε οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι θέσεις των κελιών των τοιχωμάτων που ορίζει το μοντέλο του μονοθέσιου.

$$F = \int_{S_{w_p}} (p\delta_i^j - \tau_{i,j}) n_j r_i dS \quad (6.2)$$

όπου r_i είναι το διάνυσμα κατεύθυνσης της δύναμης. Στην περίπτωση της οπισθέλκουσας είναι το μοναδιαίο διάνυσμα $(1, 0, 0)$ και στην περίπτωση της άνωσης είναι $(0, 1, 0)$.

Όπως φαίνεται, η F εξαρτάται από το πρωτεύον πεδίο (ταχύτητα και πίεση) και από τις πρωτεύουσες μεταβλητές σχεδιασμού ($F =$

6.1. ΣΥΖΥΓΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΜΟΝΙΜΗ ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ 67

$F(\mathbf{U}(\mathbf{b}), \mathbf{b})$. Δηλαδή η F εξαρτάται και άμεσα και έμμεσα από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Η μέθοδος ξεκινάει από τη δημιουργία της επαυξημένης εξίσωσης της F , F_{aug} . Αυτή ορίζεται ως η F συν τα χωρικά ολοκληρώματα των υπολοίπων των εξισώσεων ροής επί τα συζυγή πεδία της ροής (Εξίσωση 6.3) [8].

$$F_{aug} = F + \int_{\Omega} u_i R_i^v d\Omega + \int_{\Omega} q R^p d\Omega \quad (6.3)$$

όπου Ω είναι το χωρίο ελέγχου, u_i και q είναι οι τιμές συζυγούς ταχύτητας και πίεσης αντίστοιχα. Επίσης, αν ικανοποιούνται οι εξισώσεις της ροής είναι προφανές πως ισχύει $F = F_{aug}$.

Τα παραπάνω αναφέρονται σε στρωτή ροή με την υπόθεση του Taylor για την τύρβη. Δεν πρόκειται για αξιόπιστη λύση. Στην παρούσα περίπτωση έγινε παράλληλα και παραγωγή του μοντέλου τύρβης. Πρόκειται για "black box" κώδικα, ο οποίος αποτελεί ιδιοκτησία της ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ οπότε και δεν παρατίθεται στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας.

Σκοπός είναι ο υπολογισμός των παραγωγών ευαισθησίας της αντικειμενικής συνάρτησης $\delta F / \delta \mathbf{b}$. Αυτές εκφράζουν τις μεταβολές της συνάρτησης κόστους ως προς τις μεταβολές των μεταβλητών σχεδιασμού, δηλαδή του σχήματος του μονοθέσιου. Από το θεώρημα του Leibniz για διαφόριση σε χωρικό ολοκλήρωμα προκύπτει από την Εξίσωση 6.3:

$$\begin{aligned} \frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} &= \frac{\delta F}{\delta b_n} + \frac{\delta}{\delta b_n} \int_{\Omega} u_i R_i^v d\Omega + \frac{\delta}{\delta b_n} \int_{\Omega} q R^p d\Omega \\ &= \frac{\delta F}{\delta b_n} + \int_{\Omega} u_i \frac{\partial R_i^v}{\partial b_n} d\Omega + \int_{\Omega} q \frac{\partial R^p}{\partial b_n} d\Omega + \int_S (u_i R_i^v + q R^p) n_k \frac{\delta x_k}{\delta b_n} dS \end{aligned} \quad (6.4)$$

Το όριο S του Ω διασπάται σε $S = S_I \cup S_O \cup S_W \cup S_{W_p}$. Οι συνιστώσες του S_I, S_O, S_W και $S_{W_p} = S_{W_p}(\mathbf{b})$ αντιστοιχούν στις οριακές συνθήκες στην είσοδο, έξοδο, τη μόνιμη και την ελεγχόμενη επιφάνεια του Ω . Επίσης, το n_k αντιπροσωπεύει το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια.

Αφού το μόνο ελεγχόμενο τμήμα του S είναι το S_{W_p} , η εξίσωση 6.4 γράφεται:

$$\frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = \frac{\delta F}{\delta b_n} + \int_{\Omega} u_i \frac{\partial R_i^v}{\partial b_n} d\Omega + \int_{\Omega} q \frac{\partial R^p}{\partial b_n} d\Omega + \int_{S_{W_p}} (u_i R_i^v + q R^p) n_k \frac{\delta x_k}{\delta b_n} dS \quad (6.5)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση περιέχει επιφανειακά ολοκληρώματα

καθώς και χωρικά. Μία τέτοια συνάρτηση μπορεί να γραφεί ως

$$F = \int_S F_S dS + \int_\Omega F_\Omega d\Omega = \int_S F_{S_i} n_i dS + \int_\Omega F_\Omega d\Omega \quad (6.6)$$

Στην περίπτωση της οπισθέλκουσας ή της κάθετης δύναμης, πρόκειται για συναρτήσεις οι οποίες επηρεάζονται μονάχα από την παραμετροποιημένη επιφάνεια. Οπότε οι όροι των χωρικών ολοκληρωμάτων δεν συμμετέχουν. Η παραγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού δίνει

$$\frac{\delta F}{\delta b_n} = \frac{\delta}{\delta b_n} \int_S F_{S_i} n_i dS \quad (6.7)$$

Κάνοντας τις παραγωγίσεις στο επιφανειακό ολοκλήρωμα και χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας για την εμφάνιση των διαφορικών της ταχύτητας, της πίεσης και του τένσορα τάσεων ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού στην έκφραση του διαφορικού, προκύπτει η έκφρασή του:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta b_n} \int_S F_{S_i} n_i dS &= \int_S \frac{\partial F_{S_i}}{\partial v_k} n_i \frac{\partial U_k}{\partial b_n} dS + \int_S \frac{\partial F_{S_i}}{\partial p} n_i \frac{\partial p}{\partial b_n} dS \\ &+ \int_S \frac{\partial F_{S_i}}{\partial \tau_{kj}} n_i \frac{\partial \tau_{kj}}{\partial b_n} dS + \int_S n_i \frac{\partial F_{S_i}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS + \int_S F_{S_i} \frac{\delta n_i}{\delta b_n} dS + \int_S F_{S_i} n_i \frac{\delta(dS)}{\delta b_n} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Παραγωγίζοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού, προκύπτουν οι εξισώσεις 6.10 και 6.11. Να τονισθεί πως ισχύει:

$$\frac{\partial}{\partial b_n} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial b_n} \right) \quad (6.9)$$

αν περιέχονται μόνο μερικά διαφορικά.

$$\frac{\partial R^p}{\partial b_n} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_j}{\partial b_n} \right) \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_i^v}{\partial b_n} &= \frac{\partial v_j}{\partial b_n} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial b_n} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial}{\partial b_n} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p}{\partial b_n} \right) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Το $\frac{\partial v_T}{\partial b_n}$ παραλείπεται διότι μελετάται μόνιμη ροή με σταθερές ιδιότητες του πεδίου τύρβης.

Με αυτό τον τρόπο και ικανοποιώντας τις εξισώσεις των συζυγών πεδίων προκύπτει η έκφραση της παραγώγου της επαυξημένης εξίσωσης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού b_n [8], η οποία είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = & \int_S \mathcal{B}C_i^u \frac{\partial v_i}{\partial b_n} dS + \int_S (u_j n_j + \frac{\partial F_{S_i}}{\partial p} n_i) \frac{\partial p}{\partial b_n} dS + \\ & + \int_S (-u_i n_j + \frac{\partial F_{S_k}}{\partial \tau_{ij}} n_k) \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial b_n} dS + \int_{S_{WP}} n_i \frac{\partial F_{S_i}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS + \\ & + \int_{S_{WP}} F_{S_i} \frac{\delta n_i}{\delta b_n} dS + \int_{S_{WP}} F_{S_i} n_i \frac{\delta(dS)}{\delta b_n} + \int_{S_{WP}} (u_i R_i^v + q R^p) \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS \quad (6.12) \end{aligned}$$

και χρησιμοποιείται για την εύρεση της τελικής έκφρασης των παραγώγων ευαισθησίας.

6.2 Συζυγείς Οριακές Συνθήκες

Για την εύρεση των τελικών εκφράσεων των παραγώγων ευαισθησίας απαιτούνται οι οριακές συνθήκες. Η λογική είναι πως στην Εξίσωση 6.12 περιέχονται όροι οι οποίοι έχουν πολύ υψηλό κόστος υπολογισμού, όπως η κλίση της ταχύτητας ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού ($\partial u_i / \partial b_n$), της πίεσης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού ($\partial p / \partial b_n$) και του τένσορα τάσεων ($\partial \tau_{i,j} / \partial b_n$). Οπότε με τις οριακές συνθήκες απαλείφονται οι όροι αυτοί μέσω του μηδενισμού των συντελεστών τους. Εν συνεχεία παρουσιάζονται πιο αναλυτικά για την είσοδο, την έξοδο, τα μόνιμα τοιχώματα και τα παραμετροποιημένα τοιχώματα.

6.2.1 Συζυγείς Οριακές Συνθήκες στην Είσοδο

Στην επιφάνεια εισόδου (S_I) ισχύει $\frac{\delta v_i}{\delta b_n} = 0$ αφού $\frac{\delta x_k}{\delta b_n} = 0$. Οπότε το πρώτο ολοκλήρωμα του δεξιού μέλους της Εξίσωσης 6.12 μηδενίζεται. Επίσης, για να απαλειφθεί το δεύτερο και τρίτο ολοκλήρωμα του

δεξιού μέλους της 6.12 τίθεται

$$u_{\langle n \rangle} = u_j n_j = -\frac{\partial F_{S_{I,i}}}{\partial p} n_i \quad (6.13\alpha)$$

$$u_{\langle t \rangle}^i = \frac{\partial F_{S_{I,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_j^i n_j + \frac{\partial F_{S_{I,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_j^i n_i \quad (6.13\beta)$$

$$u_{\langle t \rangle}^{ii} = \frac{\partial F_{S_{I,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_i^{ii} n_j + \frac{\partial F_{S_{I,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_j^{ii} n_i \quad (6.13\gamma)$$

όπου t_i^I και t_i^{II} είναι οι συνιστώσες του εφαπτόμενου στην επιφάνεια διανύσματος και $u_{\langle t \rangle}^I$ και $u_{\langle t \rangle}^{II}$ είναι οι αντίστοιχες συνιστώσες της συζυγούς ταχύτητας.

6.2.2 Συζυγείς Οριακές Συνθήκες στην Έξοδο

Αντίστοιχα με την επιφάνεια εισόδου, στην επιφάνεια εξόδου ισχύει $\delta p / \delta b_n = \partial p / \partial b_n = 0$. Μηδενίζοντας την ολοκληρωτέα ποσότητα του πρώτου ολοκληρώματος της Εξίσωσης 6.12 προκύπτουν οι τρεις οριακές συνθήκες:

$$u_i v_j w_k n_j + \tau_{a,ijk} n_j - q n_i + \frac{\partial F_{S_k}}{\partial v_i} n_k = 0 \quad (6.14)$$

6.2.3 Συζυγείς Οριακές Συνθήκες στα Σταθερά και Παραμετροποιημένα Τοιχώματα

Στα σταθερά τοιχώματα, S_W , ισχύει $\frac{\delta x_k}{\delta b_n} = 0$ οπότε οι οριακές συνθήκες είναι ίδιες με αυτές της επιφάνειας εισόδου. Τέλος, στα παραμετροποιημένα τοιχώματα ισχύει $v_i = 0$, οπότε $\delta v_i / \delta b_n = 0$. Οι οριακές συνθήκες ώστε να απαλειφθούν το δεύτερο και τρίτο ολοκλήρωμα της Εξίσωσης 6.10 είναι

$$u_{\langle n \rangle} = -\frac{\partial F_{S_{W,p,i}}}{\partial p} n_i \quad (6.15\alpha)$$

$$u_{\langle t \rangle}^i = \frac{\partial F_{S_{W,p,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_j^I n_j + \frac{\partial F_{S_{W,p,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_j^I n_i \quad (6.15\beta)$$

$$u_{\langle t \rangle}^{ii} = \frac{\partial F_{S_{W,p,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_i^{II} n_j + \frac{\partial F_{S_{W,p,k}}}{\partial \tau_{ij}} n_k t_j^{ii} n_i \quad (6.15\gamma)$$

6.3 Τελική Έκφραση των Παραγώγων Ευαισθησίας

Οι τελικές εκφράσεις των παραγώγων ευαισθησίας προκύπτουν ικανοποιώντας τις συζυγείς εξισώσεις μέσης ροής και τις οριακές συνθήκες τους ώστε να απαλειφθούν όροι και να εμφανιστούν οι μερικές παράγωγοι ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Αυτές είναι

$$\begin{aligned}
\frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = & - \int_{S_{W_p}} \mathcal{BC}_i^u \frac{\partial U_{ik}}{\partial x_k} n_k \frac{\delta x_m}{\delta b_n} n_m dS + \int_{S_{W_p}} n_i \frac{\partial F_{S_{W_p},i}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS + \\
& + \int_{S_{W_p}} F_{S_{W_p},i} \frac{\delta n_i}{\delta b_n} dS + \int_{S_{W_p}} F_{S_{W_p},i} n_i \frac{\delta(dS)}{\delta b_n} + \\
& + \int_{S_{W_p}} (u_i R_i^v + q R^p) \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS - \int_{S_{W_p}} \left(-u_{(n)} + \frac{\partial F_{S_{W_p},k}}{\partial \tau_{lm}} n_k n_l n_m \right) \mathcal{TS}_1 dS - \\
& - \int_{S_{W_p}} \frac{\partial F_{S_{W_p},k}}{\partial \tau_{lm}} n_k t_l^I t_m^I \mathcal{TS}_2 dS - \int_{S_{W_p}} \left(\frac{\partial F_{S_{W_p},k}}{\partial \tau_{lm}} n_k (t_l^{II} t_m^I + t_l^I t_m^{II}) \right) \mathcal{TS}_3 dS - \\
& - \int_{S_{W_p}} \frac{\partial F_{S_{W_p},k}}{\partial \tau_{lm}} n_k t_l^{II} t_m^{II} \mathcal{TS}_4 dS
\end{aligned} \tag{6.16}$$

όπου

$$\begin{aligned}
\mathcal{TS}_1 &= \tau_{ij} \frac{\delta(n_i n_j)}{\delta b_n} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k n_i n_j \\
\mathcal{TS}_2 &= \tau_{ij} \frac{\delta(t_i^I t_j^I)}{\delta b_n} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta(t_i^I t_j^I)}{\delta b_n} n_k t_i^I t_j^I \\
\mathcal{TS}_3 &= \tau_{ij} \frac{\delta(t_i^{II} t_j^I)}{\delta b_n} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta(t_i^I t_j^I)}{\delta b_n} n_k t_i^{II} t_j^I \\
\mathcal{TS}_4 &= \tau_{ij} \frac{\delta(t_i^{II} t_j^{II})}{\delta b_n} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_m} n_m \frac{\delta(t_i^I t_j^I)}{\delta b_n} n_k t_i^{II} t_j^{II}
\end{aligned}$$

6.4 Χρήση των συζυγών μεθόδων στη διπλωματική εργασία

Γίνονται δύο επιλύσεις συζυγών εξισώσεων. Μία για τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας της οπισθέλκουσας και μία για την κάθετη δύναμη. Η αντικειμενική εξίσωση δίνεται στην Εξίσωση 6.2.

Στην Εξίσωση 6.16 εκφράζεται η γενική τελική μορφή των παραγώγων ευαισθησίας. Σε αυτήν την έκφραση εμφανίζονται όροι τοπικών παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς το x_m και το $\tau_{l,m}$, $\frac{\partial F}{\partial x_m}$ και $\frac{\partial F}{\partial \tau_{l,m}}$. Αν η αντικειμενική συνάρτηση εκφραστεί ως:

$$F = \int_S [p\delta_i^j - \tau_{i,j}] n_j r_i dS = \int_S F_{S_j} n_j dS$$

τότε $F_{S_j} = p\delta_i^j r_i - \tau_{i,j} r_i$. Παραγωγίζοντας ως προς το x_m προκύπτει:

$$\frac{\partial F_{S_j}}{\partial x_m} = \frac{\partial p}{\partial x_m} r_j - \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_m} r_i$$

Αντίστοιχα, παραγωγίζοντας ως προς τις τάσεις προκύπτει:

$$\frac{\partial F_{S_j}}{\partial \tau_{l,m}} = -\delta_l^i \delta_m^j r_i = -\delta_m^j r_l$$

Οι παραπάνω εκφράσεις ισχύουν και για τις δύο περιπτώσεις μελέτης. Οπότε αντικαθιστώντας τις στην Εξίσωση 6.16 προκύπτει η έκφραση των παραγώγων ευαισθησίας:

$$\begin{aligned} \frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = & - \int_{S_{W_p}} \mathcal{BC}_i^u \frac{\partial U_{ik}}{\partial x_k} n_k \frac{\delta x_m}{\delta b_n} n_m dS + \int_{S_{W_p}} n_i \left(\frac{\partial p}{\partial x_m} r_j - \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_m} r_i \right) n_m \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS + \\ & + \int_{S_{W_p}} [p\delta_i^j - \tau_{i,j}] n_j r_i \frac{\delta n_i}{\delta b_n} dS + \int_{S_{W_p}} [p\delta_i^j - \tau_{i,j}] n_j r_i n_i \frac{\delta(dS)}{\delta b_n} + \\ & + \int_{S_{W_p}} (u_i R_i^v + q R^p) \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS \end{aligned} \quad (6.18)$$

6.5 Βελτιστοποίηση του αγωνιστικού μονοθέσιου Prom16

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η βελτιστοποίηση του μονοθέσιου Prom16 στοχεύει στην επιλογή των χαρακτηριστικών του σχήματος τα οποία θα προσφέρουν τη μέγιστη δυνατή κατακόρυφη δύναμη και την ελάχιστη οπισθέλκουσα. Πρόκειται για μεγέθη αλληλένδετα, οπότε και ανούσιο να γίνει προσπάθεια βελτιστοποίησης του ίδιου τμήματος και για τα δύο χαρακτηριστικά. Σε λογικά πλαίσια, η αύξηση της κατακόρυφης δύναμης ισοδυναμεί με αύξηση της οπισθέλκουσας. Προϋπόθεση αποτελεί να μην υπάρχουν σχεδιαστικά λάθη, όπως επιφάνειες σε πολύ μεγάλη γωνία πρόσπτωσης ή επιφάνειες οι οποίες αυξάνουν την τύρβη στο υπόλοιπο μονοθέσιο. Μία επιπλέον αντικειμενική συνάρτηση που εισάγεται, η οποία εκφράζει την αεροδυναμική απόδοση ενός τμήματος, είναι ο λόγος της κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα. Η βελτιστοποίηση ως προς αυτόν δεν έχει στόχο τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση κάποιας εκ των δύο πρώτων αντικειμενικών συναρτήσεων, αλλά τη μεγιστοποίηση του λόγου αυτών.

Η επιλογή βελτιστοποίησης του κάθε τμήματος του μονοθέσιου ως προς κάποια αντικειμενική συνάρτηση γίνεται βάσει του ρόλου που επιτελεί. Ορισμένα τμήματα του μονοθέσιου έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή κάθετης δύναμης (πτέρυγες και πάτωμα). Άλλα υπάρχουν απλά για λειτουργικές ανάγκες. Είναι δεδομένο πως όλα τα τμήματα του μονοθέσιου θα μελετηθούν ως προς όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Παρόλα αυτά, θα δοθεί βαρύτητα στη βελτιστοποίηση ως προς την κάθετη δύναμη και το λόγο αυτής ως προς την οπισθέλκουσα για τις πτέρυγες και το πάτωμα, και αντίστοιχα ως προς την οπισθέλκουσα και το λόγο της κάθετης δύναμης ως προς αυτή για τα καλύμματα των ψυγείων, του πλαισίου και της εμπρόσθιας προστατευτικής διάταξης. Οπότε η βέλτιστη μορφή του μονοθέσιου ισοδυναμεί με τη βέλτιστη μορφή του κάθε τμήματός του για την χρήση που επιτελεί. Εξαιρεση αποτελεί η μπροστά πτέρυγα για την οποία είναι επιθυμητό να μειωθεί η οπισθέλκουσα χωρίς μεγάλες απώλειες κάθετης δύναμης. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να έχει πολύ καλό λόγο κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα. Να τονισθεί πως ορισμένες μεταβολές έχουν διπλό χαρακτήρα, δηλαδή συνεισφέρουν στη βελτιστοποίηση ως προς περισσότερες της μίας αντικειμενικής συνάρτησης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο κύκλος της βελτιστοποίη-

σης δεν είναι αυτοματοποιημένος. Δηλαδή, ο κώδικας βελτιστοποίησης δεν δέχεται ως είσοδο το μονοθέσιο και δίνει ως έξοδο την ιδανική μορφή του. Θα ήταν πολύ δύσκολο καθώς οι ανάγκες και οι απαιτήσεις από το σχεδιασμό δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένες, και οι περιορισμοί είναι πάρα πολλοί. Αντί αυτού, δημιουργεί ένα χάρτη του μονοθέσιου, ο οποίος ορίζει της μεταβολές που πρέπει να γίνουν σε κάθε επιφάνειά του. Αυτόν το χάρτη χρησιμοποιεί ο εκπονήσας την παρούσα διπλωματική εργασία ώστε να ολοκληρώσει ένα βήμα βελτιστοποίησης. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματά της.

Παρουσιάζεται ένα βήμα, και όχι περισσότερα, καθώς τα χρονικά περιθώρια είναι περιορισμένα, και θα έπρεπε να καταλαμβάνονται πολλοί υπολογιστικοί πόροι της ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ από ένα άτομο. Επίσης, βασικός στόχος ήταν η δημιουργία ενός πακέτου, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον από σπουδαστές, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, οι οποίοι εμπλέκονται με την ομάδα FSAE του ΕΜΠ, Prom Racing. Για λόγους κόστους έχουν γίνει και συμβιβασμοί στην πυκνότητα του πλέγματος που μελετάται. Τα σημεία ενδιαφέροντος, όπως οι πτέρυγες, το πάτωμα κλπ, επιλέχθηκε να προσδιοριστούν με αρκετά υψηλή ακρίβεια κατά τη διαδικασία γένεσης πλέγματος. Στα υπόλοιπα τμήματα μειώθηκε η πυκνότητα του πλέγματος τόσο ώστε να είναι δυνατή η επίλυση στο διαθέσιμο χρόνο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προκύπτουν από επίλυση σε πλέγμα 6.500.000 κελιών. Αυτό σημαίνει πως υπάρχουν επιφάνειες και ακμές οι οποίες δεν είναι προσδιορισμένες στον καλύτερο δυνατό βαθμό, αλλά κρίθηκε πως δεν πρόκειται να επηρεάσουν έντονα τα αποτελέσματα. Για τον ακριβή προσδιορισμό όλων των χαρακτηριστικών του μοντέλου απαιτούνται τουλάχιστον 50% περισσότερα κελιά, κόστος απαγορευτικό για μία διπλωματική εργασία.

Επίσης, στα πρώτα βήματα βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού, ο οποίος έχει κριθεί πως βρίσκεται ήδη σε πολύ καλό επίπεδο, επιτυγχάνεται το 80% του κέρδους. Κάθε επόμενο βήμα συνεισφέρει κατά πολύ λιγότερο στη βελτιστοποίηση. Οπότε, το πρώτο βήμα είναι αυτό με την υψηλότερη απόδοση για τη μελέτη που εκτελείται.

6.5.1 Κύκλος βελτιστοποίησης

Το πρώτο βήμα βελτιστοποίησης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συζυγούς μεθόδου, δηλαδή ο χάρτης της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των μεταβλητών σχεδια-

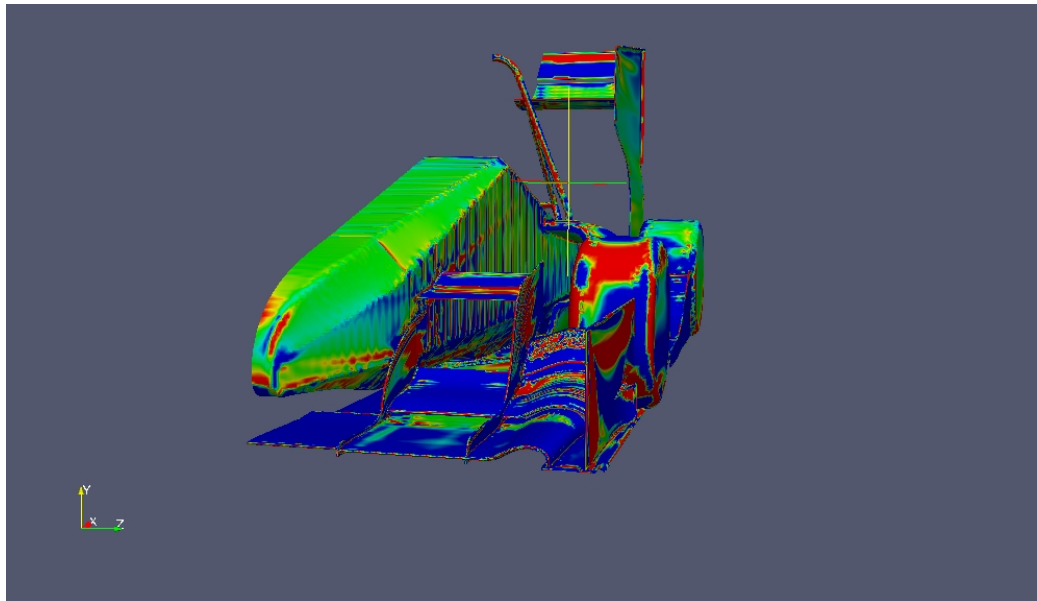
σμού. Αρχικά, μελετάται ο χάρτης ευαισθησίας της κατακόρυφης δύναμης και έπειτα αυτός της οπισθέλκουσας. Επιπλέον, δημιουργήθηκε και μελετήθηκε χάρτης κλίσης της κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Κρίνονται οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν και αφού ολοκληρωθούν ξεκινάει η μελέτη της ροής στο νέο τριδιάστατο μοντέλο. Αν τα αποτελέσματα είναι θετικά ακολουθεί το επόμενο βήμα βελτιστοποίησης. Σε διαφορετική περίπτωση επαναλαμβάνεται το τρέχον.

Βελτιστοποίηση ως προς την κατακόρυφη δύναμη

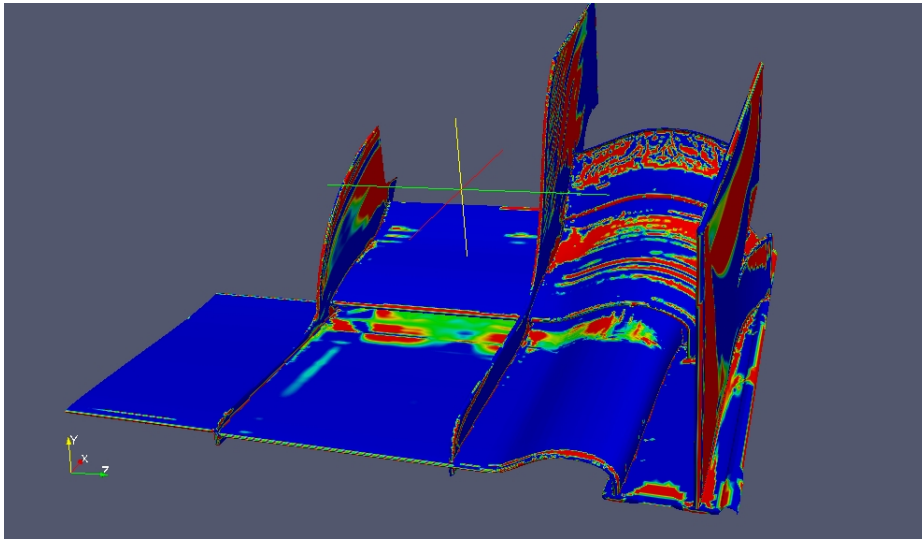
Σε πρώτο στάδιο, γίνεται η μελέτη ως προς την κατακόρυφη δύναμη. Έχοντας τα πρωτεύοντα αποτελέσματα για το μονοθέσιο, ξεκινάει ο υπολογισμός των παραγώγων ευαισθησίας στις επιφάνειες του μονοθέσιου. Τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται με χρωματισμό του μονοθέσιου ανάλογα με την τιμή της παραγώγου. Δηλαδή, αν η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη μεταβολή της θέσης του τοιχώματος του μονοθέσιου είναι θετική τότε το τοίχωμα βάφεται με κόκκινο ενώ αν η ισχύει το αντίθετο με μπλε (Σχήμα 6.1).

Έχοντας την πληροφορία αυτή, μελετάται το κάθε τμήμα του μονοθέσιου ώστε να βρεθούν οι αλλαγές που μπορούν να γίνουν. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα βαρύτερα θα δοθεί στα τμήματα που σκοπό έχουν την παραγωγή κάθετης δύναμης. Επίσης, δεν πρέπει να παραβιαστούν οι κανόνες που ακολουθήθηκαν κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Παρακάτω, στα Σχήματα 6.2 έως και 6.4 φαίνεται ο χάρτης ευαισθησίας της κάθετης δύναμης για μία σειρά από τα επιμέρους τμήματα του μονοθέσιου. Σύμφωνα με αυτόν ορίζονται οι μετατροπές που πρέπει να γίνουν.

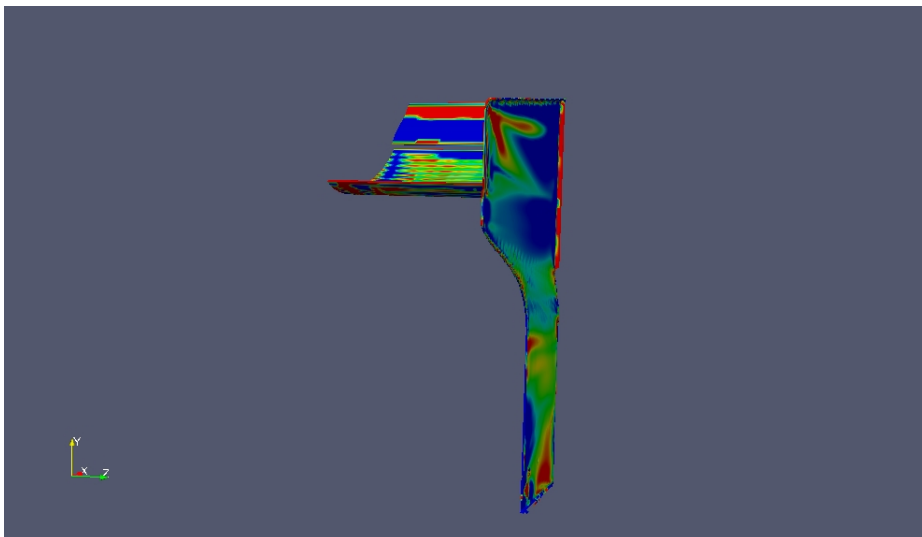
Αντίστοιχα με τους παραπάνω χάρτες ευαισθησίας, υπάρχουν χάρτες και για τα υπόλοιπα τμήματα του μονοθέσιου. Παρόλα αυτά δε δίνεται βαρύτερα σε αυτά, καθώς στόχος είναι η βελτιστοποίηση ως προς άλλη αντικειμενική συνάρτηση. Για να ολοκληρωθεί το πρώτο βήμα βελτιστοποίησης πρέπει να μελετηθούν και τα αντίστοιχα διαγράμματα για την κλίση του λόγου της κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού, να συγκριθούν με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω, και να γίνουν οι ανάλογες μετατροπές.



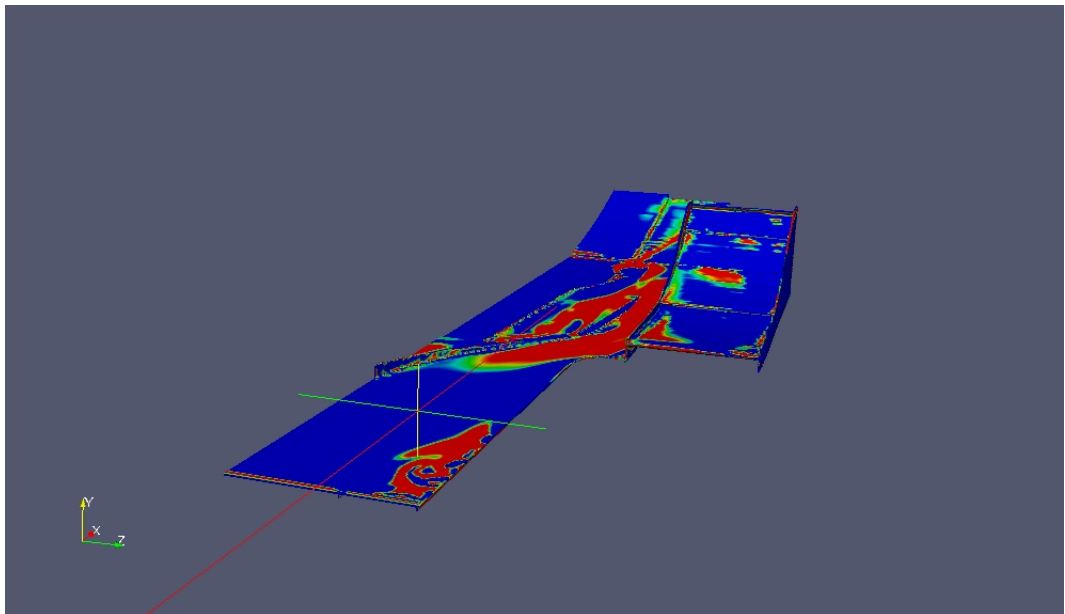
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα κλίσης κάθετης δύναμης ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom 16. Όποιο τμήμα είναι χρωματισμένο μπλε πρέπει να κινηθεί προς τα μέσα, ενώ όποιο είναι κόκκινο προς τα έξω. Τμήματα όπως οι τροχοί ή το ανώτερο πτερύγιο της εμπρός και πίσω πτέρυγας δεν μπορούν να κινηθούν. Επίσης, οι ρίγες αντίθετων χρωματισμών εμφανίζονται στο πλαίσιο, καθώς σε αυτό το σημείο το πλέγμα έχει επιλεγεί να είναι πιο αραιό.



Σχήμα 6.2: Χάρτης ευαισθησίας της κάθετης δύναμης ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν στην εμπρός πτέρυγα. Από τη στιγμή που η εμπρός πτέρυγα παράγει περίπου το 42% της κάθετης δύναμης, γεγονός που επηρεάζει την ισορροπία του μονοθέσιου, θα γίνουν αλλαγές με κύριο γνώμονα το λόγο κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα.



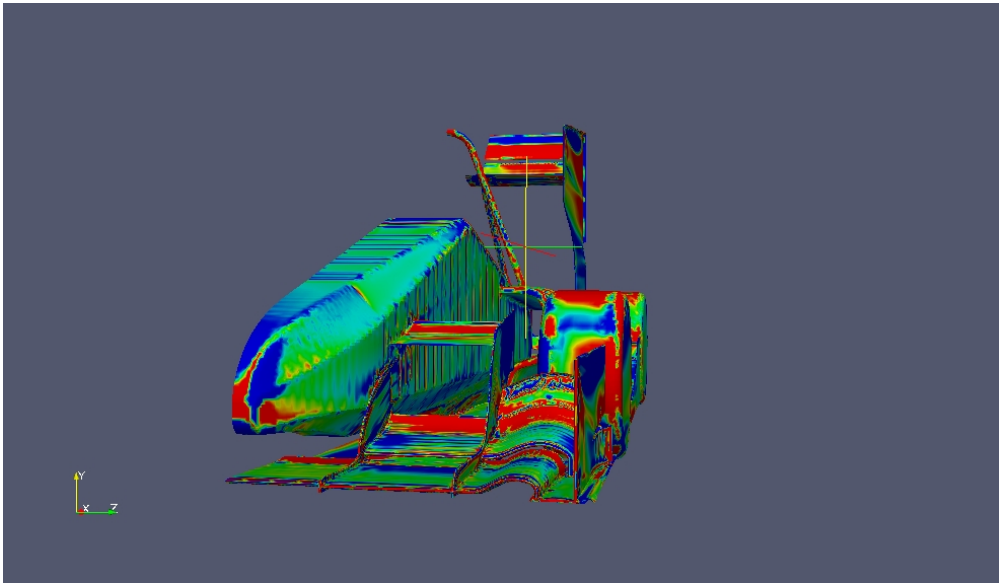
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα κλίσης κάθετης δύναμης ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν στην πίσω πτέρυγα.



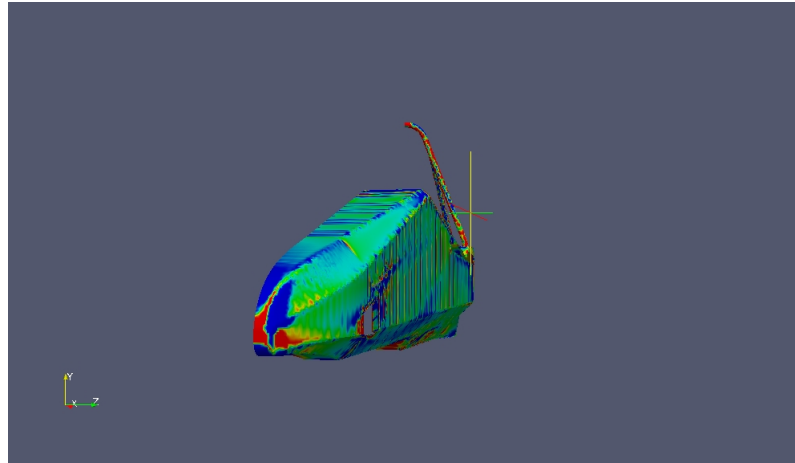
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα κλίσης κάθετης δύναμης ως προς τη μεταβολή των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται αλλαγές που πρέπει να γίνουν στο πάτωμα και τα πλευρικά πτερύγια.

Βελτιστοποίηση ως προς την οπισθέλκουσα

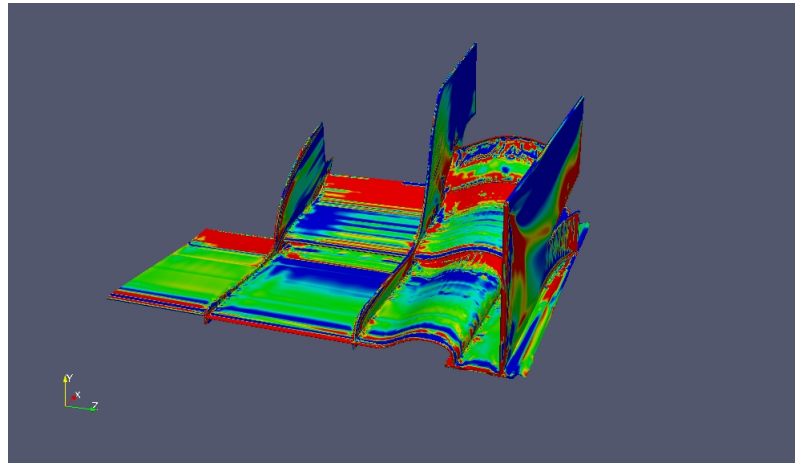
Όπως και προηγουμένως, η συζυγής μέθοδος βελτιστοποίησης προσφέρει πληροφορία για την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης (στην παρούσα περίπτωση της οπισθέλκουσας) ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Βαρύτητα ως προς την οπισθέλκουσα θα δοθεί κυρίως στα πλευρικά καλύμματα των ψυγείων, το κάλυμμα της εμπρόσθιας προστατευτικής διάταξης, στο πλαίσιο και σε δεύτερο στάδιο στην μπροστά πτέρυγα. Ακολουθούν τα Σχήματα 6.5 έως 6.8 στα οποία παρουσιάζονται οι αλλαγές που προτείνονται από τη συζυγή μέθοδο για ολόκληρο το μονοθέσιο καθώς και τα ανωτέρω τμήματά του.



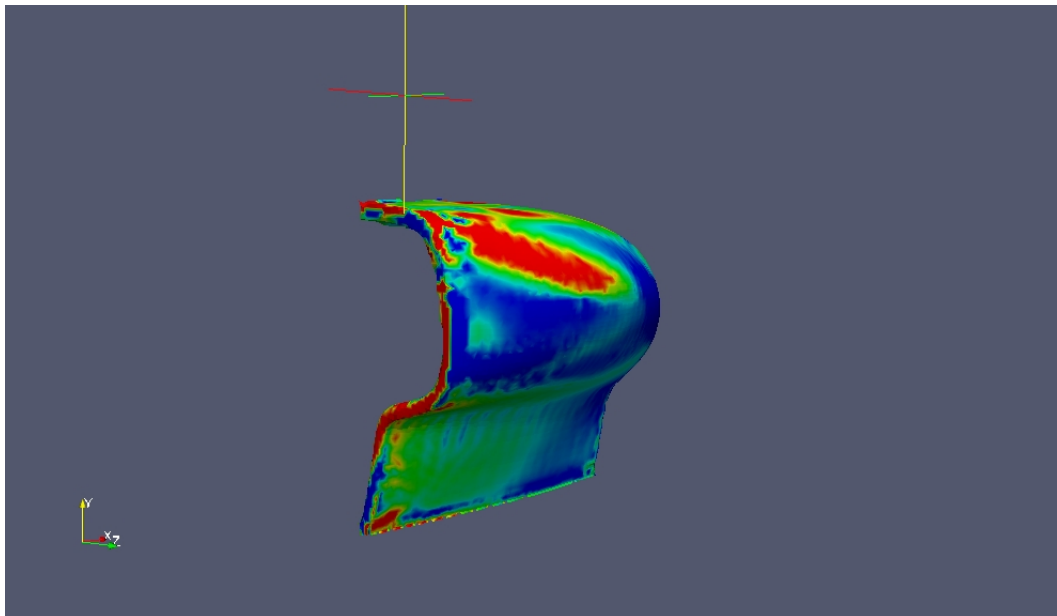
Σχήμα 6.5: Διάγραμμα κλίσης οπισθέλκουσας ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Αποτελεί το οπτικό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης συζυγών μεθόδων. Όποια επιφάνεια είναι βαμμένη μπλε πρέπει να μετατοπισθεί προς τα μέσα και όποια είναι κόκκινη προς τα έξω. Αυτός είναι ο γενικός χάρτης ο οποίος διασπάται και μελετάται για κάθε τμήμα χωριστά.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα κλίσης οπισθέλκουσας ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται αλλαγές που πρέπει να γίνουν στο πλαίσιο και το μπροστά κάλυμμα του προστατευτικού (μύτη) για τη μείωση της οπισθέλκουσας. Οι αλλαγές που είναι δυνατό και επιτρεπτό να γίνουν είναι λίγες αλλά δεν παύουν να είναι χρήσιμες. Οι ρίγες αντίθετων χρωματισμών οφείλονται στο αραιό πλέγματος. Παρόλα αυτά δεν επηρεάζουν την κατανόηση των μετατροπών που πρέπει να γίνουν.



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα κλίσης οπισθέλκουσας ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται αλλαγές που πρέπει να γίνουν στην μπροστά πτέρυγα για τη μείωση της οπισθέλκουσας. Τα αποτελέσματα δεν συμβαδίζουν με την απλή λογική καθώς σε ορισμένα πτερύγια ζητείται η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Η εμπρός πτέρυγα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα της ανάγκης και χρησιμότητας των εργαλείων βελτιστοποίησης.



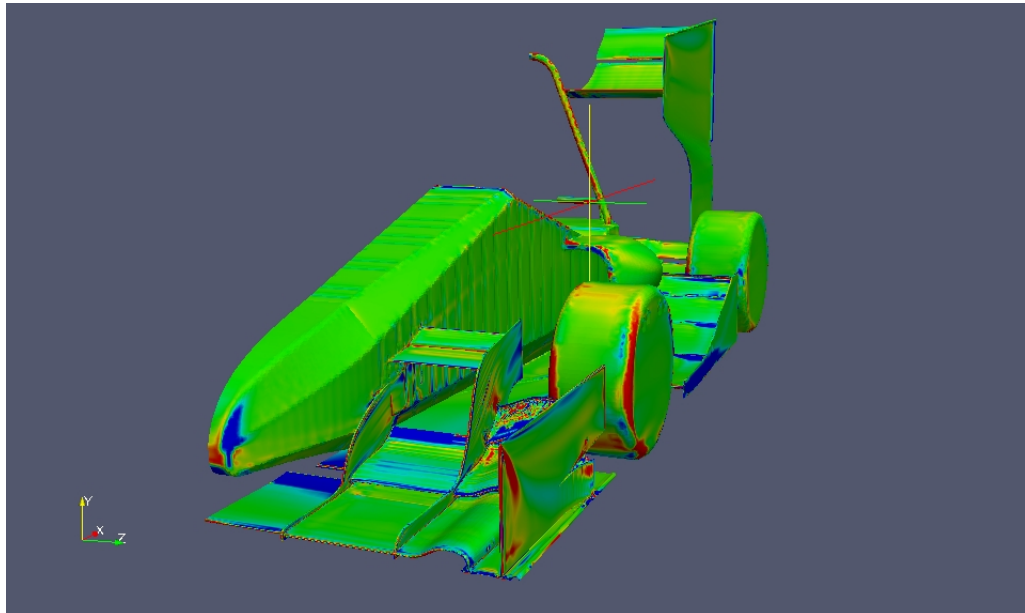
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα κλίσης οπισθέλκουσας ως προς την κάθετη μετατόπιση των τοιχωμάτων στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται αλλαγές που πρέπει να γίνουν στο πλευρικό κάλυμμα των ψυγείων. Είναι ξεκάθαρη, όπως και λογική, η τάση να μειωθεί η επιφάνεια σε πρόσοψη. Εμφανίζονται όμως και σημεία της πλευρικής επιφάνειας τα οποία σύμφωνα με τα αποτελέσματα πρέπει να διογκωθούν.

Βελτιστοποίηση ως προς το λόγο κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μπροστά πτέρυγα θα βελτιστοποιηθεί ως προς την οπισθέλκουσα. Είναι όμως επιθυμητό να μην υπάρξει μεγάλη πτώση κάθετης δύναμης. Για το λόγο αυτό δημιουργείται χάρτης ευαισθησίας του λόγου άνωσης προς οπισθέλκουσα. Έχοντας γνωστές τις κλίσεις της οπισθέλκουσας και της κάθετης δύναμης προκύπτει, παραγωγίζοντας το λόγο Lift/Drag.

$$\frac{\delta}{\delta b_n} \left(\frac{L}{D} \right) = \frac{\delta L / \delta b_n D - L \delta D / \delta b_n}{D^2}$$

όπου όλοι οι όροι είναι γνωστοί.

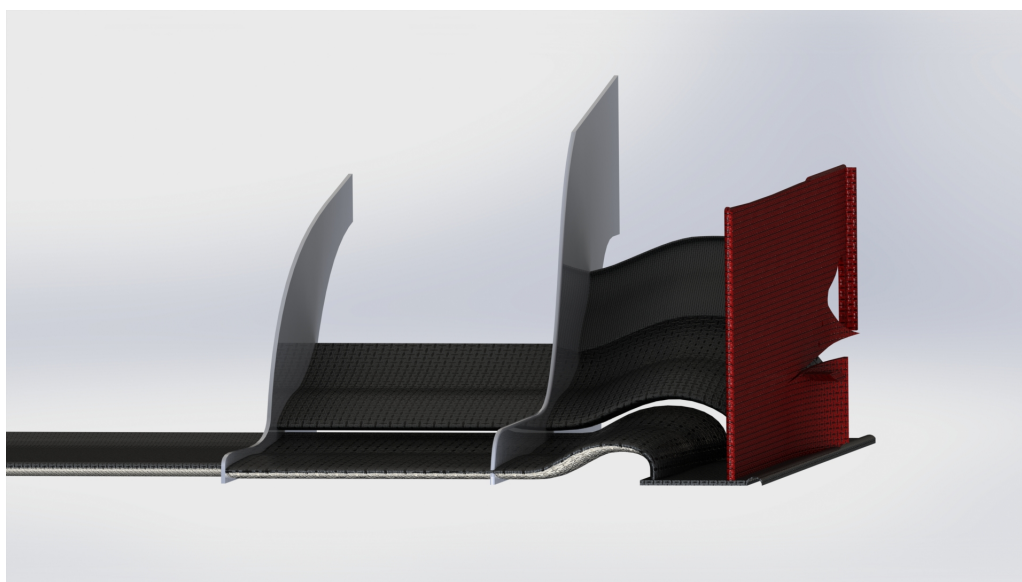


Σχήμα 6.9: Διάγραμμα κλίσης του λόγου άνωσης προς οπισθέλκουσα ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού στο μονοθέσιο Prom16. Φαίνονται κάποιες αλλαγές που πρέπει να γίνουν στην εμπρός πτέρυγα και το πλαίσιο.

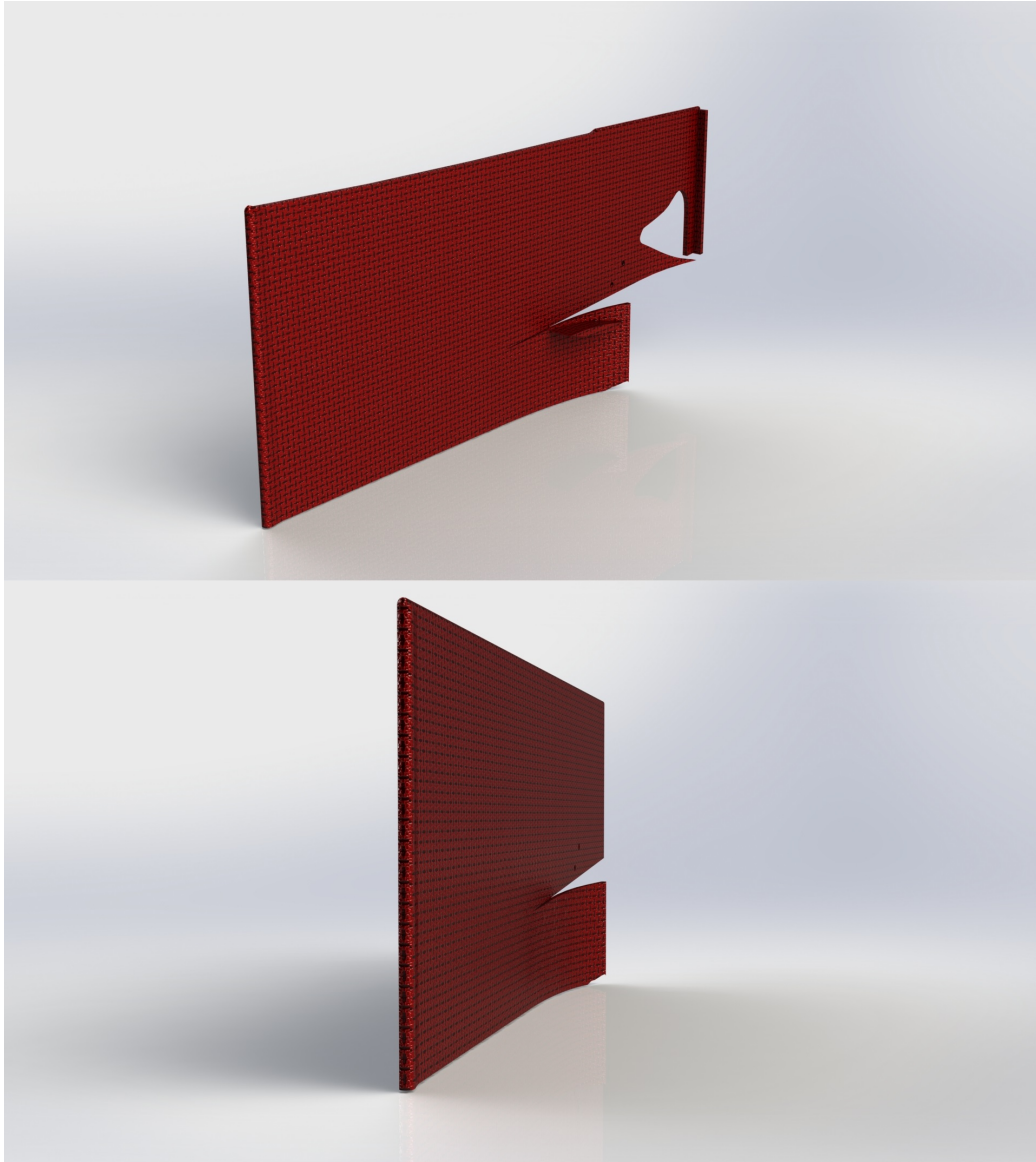
Μετατροπές στο μονοθέσιο Prom16

Θα παρουσιαστούν οι μετατροπές που έγιναν στο μονοθέσιο σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συζυγούς μεθόδου. Αλλαγές έγιναν στο κάλυμμα της εμπρόσθιας προστατευτικής διάταξης του μονοθέσιου, στις δύο πτέρυγες, στο πάτωμα και στα πλευρικά καλύμματα των ψυγείων. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη βελτιστοποίηση της μπροστά πτέρυγας, καθώς παράγει την περισσότερη κάθετη δύναμη. Οι μετατροπές αυτές είχαν στόχο τη μείωση της οπισθέλκουσας χωρίς να αλλάξει ριζικά το σχήμα οπότε και να μειωθεί η παραγόμενη κάθετη δύναμη.

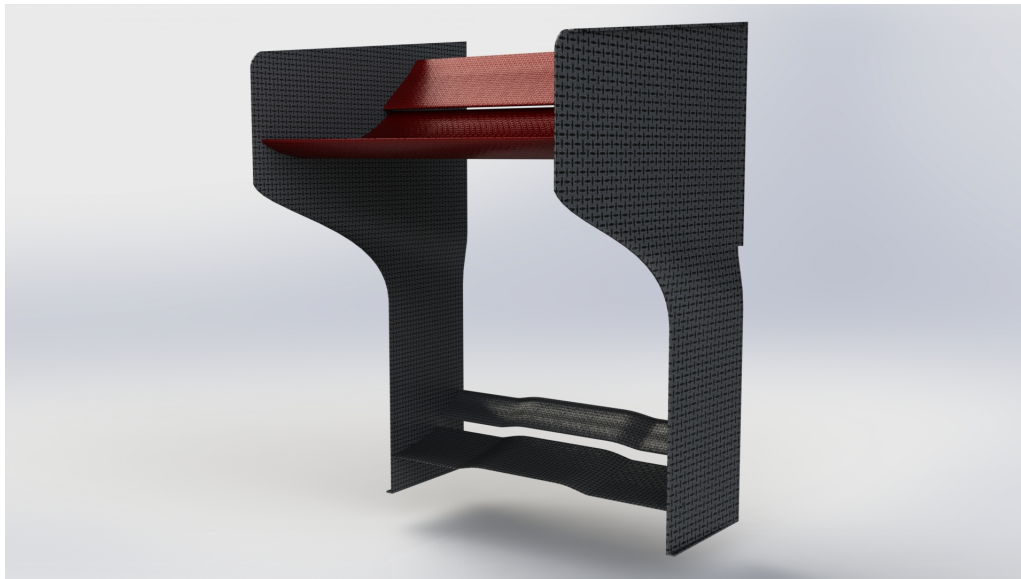
Ακολουθούν εικόνες του μοντέλου του κάθε τμήματος μετά τις μετατροπές. Προτείνεται στους αναγνώστες να κάνουν σύγκριση με τα μοντέλα του Κεφαλαίου 3 και 5.



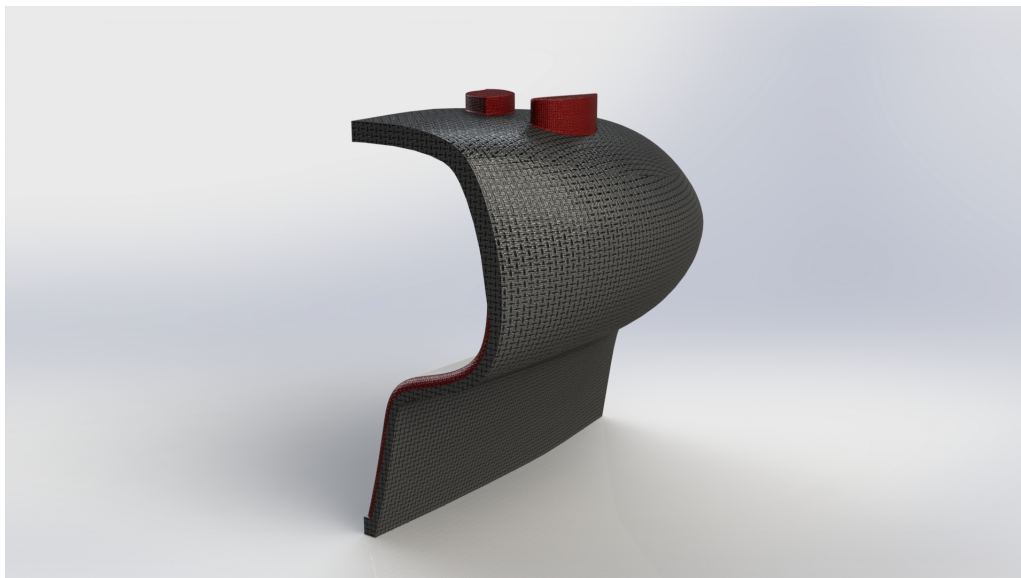
Σχήμα 6.10: Φωτορεαλιστική αναπαράσταση της μπροστά πτέρυγας του μονοθέσιου Prom16. Έγιναν αλλαγές σε όλα τα προφίλ των πτερύγων. Στα πρώτα δύο έγιναν μετατροπές σύμφωνα με την κλίση της οπισθέλκουσας ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού και στο τρίτο έγιναν μετατροπές οι οποίες να συμβαδίζουν και με τα δύο διαγράμματα. Μεγάλες μετατροπές έγιναν στο εξωτερικό πλευρικό κάλυμμα. Αφαιρέθηκε υλικό σύμφωνα με τα διαγράμματα τόσο της οπισθέλκουσας όσο και της κάθετης δύναμης. Δόθηκε μεγάλη προσοχή ώστε όλες οι μετατροπές να έχουν διπλή χρησιμότητα και να μην παραβαίνουν τους κανονισμούς.



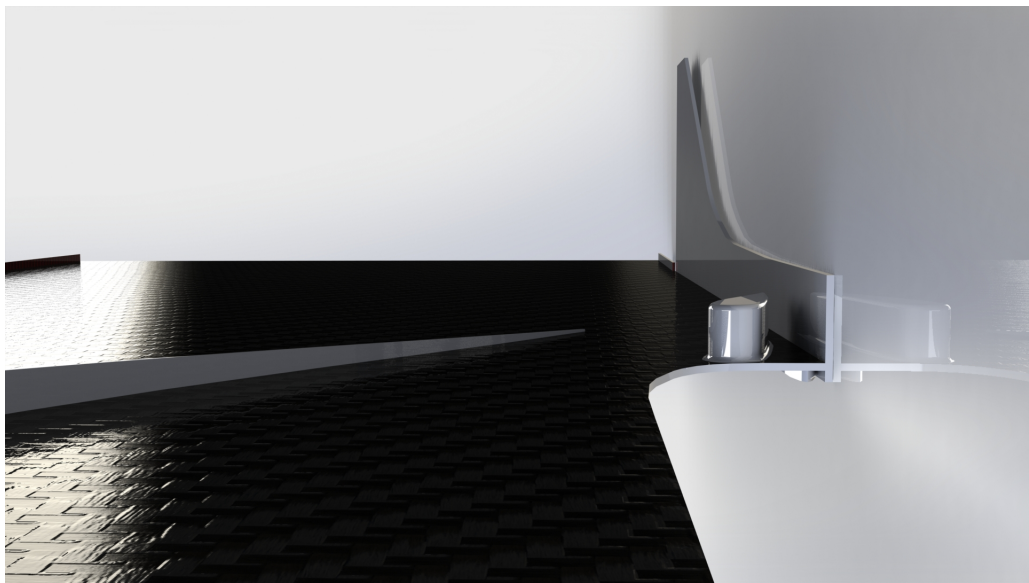
Σχήμα 6.11: Φωτορεαλιστική αναπαράσταση του εξωτερικού πλευρικού καλύμματος της μπροστά πτέρυγας του μονοθέσιου Prom16. Παρουσιάζεται μαζί με το μοντέλο πριν τις μετατροπές ώστε να γίνει ευκολότερα η σύγκριση.



Σχήμα 6.12: Φωτορεαλιστική αναπαράσταση της πίσω πτέρυγας του μονοθέσιου Prom16. Οι αλλαγές επικεντρώνονται στη διαμόρφωση των προφίλ των πτερύγων και ελαφρές μετατροπές στην κλίση των πλευρικών καλυμμάτων.



Σχήμα 6.13: Φωτορεαλιστική αναπαράσταση του καλύμματος του ψυγείου του μονοθέσιου Prom16 (siderod). Προστέθηκαν διαμορφώσεις στο άνω τμήμα του οι οποίες παράγουν δίνη. Το σχήμα τους καθορίστηκε από το χάρτη του μονοθέσιου για ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας.



Σχήμα 6.14: Φωτορεαλιστική αναπαράσταση του κυρίως τμήματος του πατώματος του μονοθέσιου Prom16. Δεν έγιναν μετατροπές στα κανάλια. Παρόλα αυτά προστέθηκαν διαμορφώσεις τόσο στο άνω τμήμα του όσο και μέσα στα κανάλια.

Δημιουργήθηκε νέο πλέγμα σύμφωνα με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 και ξεκίνησε η μελέτη της ροής στο νέο μοντέλο ώστε να κριθούν οι μετατροπές που έγιναν.

Αποτελέσματα πρωτεύουσας ροής

Έχοντας ολοκληρώσει την επίλυση της ροής στο νέο μοντέλο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.1 αναφέρονται οι τιμές της κάθετης δύναμης, της οπισθέλκουσας και του λόγου των δύο για την μπροστά πτέρυγα, την πίσω πτέρυγα, το πάτωμα, το πλαίσιο και τα καλύμμάτα του και το ολικό μοντέλο. Οι τιμές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πριν γίνουν αλλαγές στο σχεδιασμό, όπως ορίστηκαν από τα αποτελέσματα της συζυγούς μεθόδου (Πίνακας 6.2).

Forces	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag
Front Wing	142.1	19.4	7.32
Rear Wing	102.7	38.6	2.66
Underbody	88.5	12.1	7.31
Chassis	-25.2	35.2	-0.72
Prom16	312.5	123.5	2.53

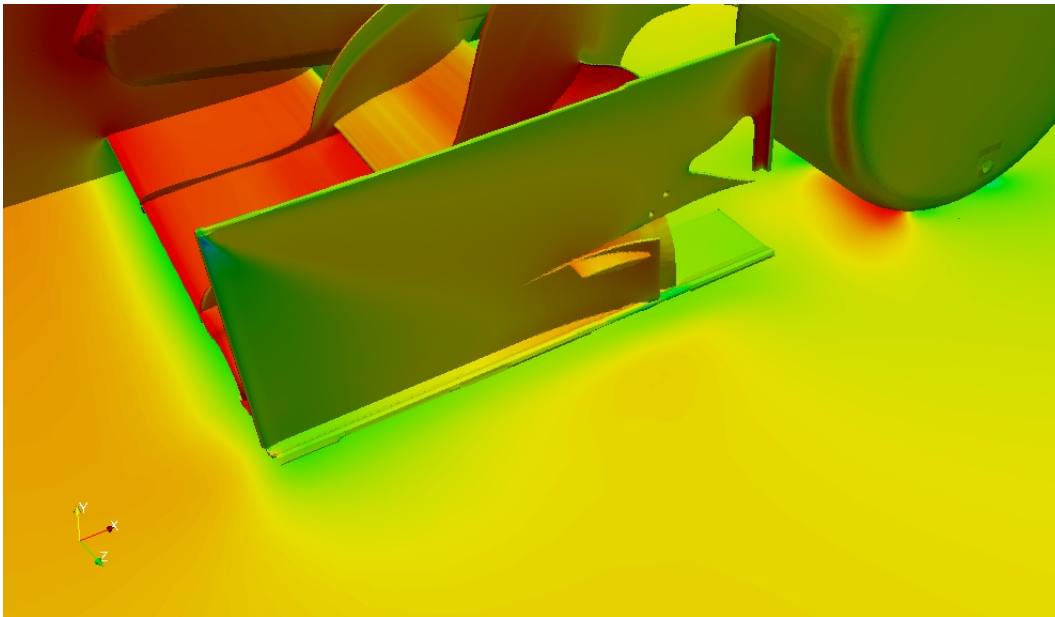
Πίνακας 6.1: Πίνακας με τα αποτελέσματα της ροής για το μονοθέσιο Prom16 μετά τις μετατροπές που έγιναν σύμφωνα με τους χάρτες ευαισθησίας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην μπροστά πτέρυγα, την πίσω πτέρυγα, το πάτωμα, το πλαίσιο και τα καλύμμάτα του και το ολικό μοντέλο. Μεγαλύτερη προσοχή δόθηκε στην μπροστά πτέρυγα, καθώς φάνηκε πως είχε τον πιο καθοριστικό ρόλο στο αεροδυναμικό πακέτο. Ακολουθώντας τις "οδηγίες" του χάρτη ευαισθησίας των αντικειμενικών συναρτήσεων φαίνεται πως υπήρξε βελτίωση σε ολόκληρο το μονοθέσιο.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.1 υπήρξε βελτίωση σε όλο το μονοθέσιο. Μάλιστα σε ορισμένα τμήματά του η βελτίωση υπήρξε σημαντική. Αρχικά, να αναφερθεί πως η σύμφωνα με την πρωτεύουσα μελέτη του προηγούμενου σχεδιασμού, η κατανομή των αεροδυναμικών φορτίων είναι 57% στον εμπρός άξονα και 43% στον πίσω. Είναι δεδομένο πως ένας από τους κυριότερους στόχους είναι η βελτίωση της πρόσφυσης στον εμπρός άξονα. Παρόλα αυτά η κατανομή είναι επιθυμητό να είναι κοντά στο 53% στον εμπρός άξονα. Οπότε η μπροστά πτέρυγα τροποποιήθηκε κυρίως ώστε να μειωθεί η οπισθέλκουσα ακόμα και αν αυτό σημαίνει μικρή μείωση της κάθετης

Forces	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag
Front Wing	149.7	21.2	7.06
Rear Wing	97.2	38.4	2.53
Underbody	86	10.7	8.04
Chassis	-25.1	32.8	-0.77
Prom16	300.6	120.4	2.50

Πίνακας 6.2: Πίνακας με τα αποτελέσματα της ροής για το μονοθέσιο Prom16 πριν τις μετατροπές που έγιναν σε αυτό κατά το πρώτο βήμα βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην μπροστά πτέρυγα, την πίσω πτέρυγα, το πάτωμα, το πλαίσιο και τα καλύμματά του και το ολικό μοντέλο.

δύναμης. Λίγο πιο συγκεκριμένα, στην μπροστά πτέρυγα εμφανίζεται μείωση της κάθετης δύναμης κατά 5% με μείωση της οπισθέλκουσας κατά 8.5%. Αυτό σημαίνει πως η απόδοση της πτέρυγας βελτιώθηκε κατά 2.8 %. Στο Σχήμα 6.15 φαίνεται η κατανομή πίεσης στη νέα μπροστά πτέρυγα.

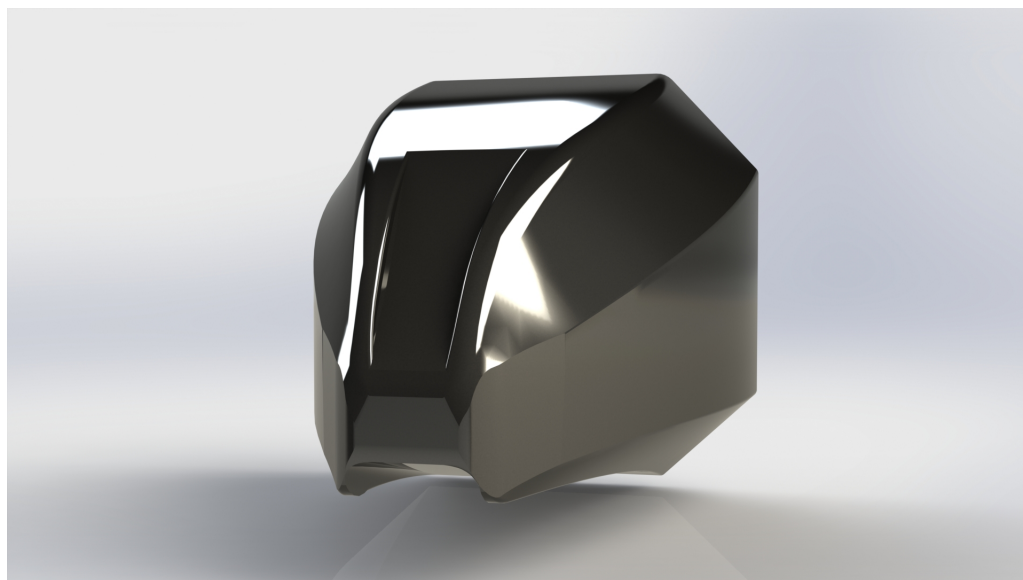


Σχήμα 6.15: Κατανομή πίεσης στην μπροστά πτέρυγα του μονοθέσιου Prom16 αφού έγιναν οι μετατροπές κατά το πρώτο βήμα βελτιστοποίησης. Με την αναδιαμόρφωση των αεροτομών που χρησιμοποιούνται καθώς και με τις μετατροπές στα πλευρικά καλύμματα, παρουσιάζεται καλύτερη εκτόνωση της πίεσης. Αυτός είναι και ο λόγος που ενώ η γωνία πρόσπτωσης δεν μεταβάλλεται η μείωση της οπισθέλκουσας βρίσκεται στο 8.5%.

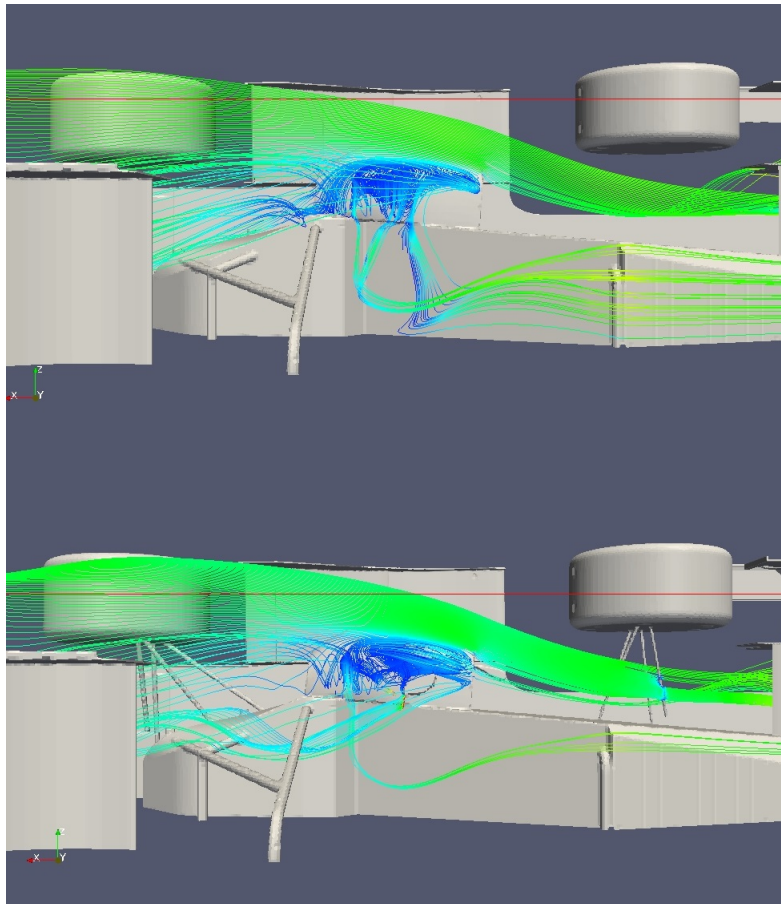
Αντίστοιχα με την μπροστά πτέρυγα, η πίσω δέχθηκε μετατροπές ώστε να αυξηθεί η παραγόμενη κάθετη δύναμη χωρίς να αυξηθεί ιδιαίτερα η οπισθέλκουσα. Επιτυγχάνεται με αναδιαμόρφωση των αεροτομών και μικρές αλλαγές στα πλευρικά καλύμματα. Η βελτίωση κυμαίνεται στο επίπεδο του 5% για την απόδοση. Συγκεκριμένα αυξήθηκε η κάθετη δύναμη κατά 1% ενώ η οπισθέλκουσα παρέμεινε σχεδόν ίδια (αύξηση περίπου 0.5%). Το πάτωμα αποτελεί την αεροδυναμική συσκευή με τον μεγαλύτερο λόγο κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα, οπότε οι μετατροπές είχαν ξεκάθαρο στόχο την αύξηση της παραγόμενης κάθετης δύναμης. Η αύξηση της κάθετης δύναμης κυμαίνεται λίγο πάνω από το 3.2% με το λόγω απόδοσης να μειώνεται κατά 8.7%. Παρόλα αυτά οι μετατροπές είναι αποδεκτές καθώς η οπισθέλκουσα ακόμα και μετά την αύξησή της είναι μικρή (12.1 N για το μισό μοντέλο) και η ισχύς του κινητήρα αρκετή ώστε να μην αποτελεί πρόβλημα. Παρόλα αυτά επιλέγεται να γίνουν επιπλέον μετατροπές οι οποίες φαίνεται πως θα αυξήσουν την κάθετη δύναμη και θα βελτιώσουν και το λόγο αυτής προς την οπισθέλκουσα. Τα πτερύγια που

βρίσκονται τοποθετημένα στο πλαίσιο δέχονται μετατροπές με αποκλειστικό στόχο την αύξηση της παραγόμενης κάθετης δύναμης.

Συνοψίζοντας, το μονοθέσιο ως σύνολο παρουσίασε αύξηση της κάθετης δύναμης της τάξης του 4% με αύξηση της οπισθέλκουσας κατά 2.6%. Η αύξηση της οπισθέλκουσας ήταν αναμενόμενη, αλλά όχι σε αυτό το βαθμό. Περισσότερο από το 77% της αύξησης της οπισθέλκουσας προκύπτει από τις μεταβολές στα καλύμματα. Το αποτέλεσμα στον τομέα της κάθετης δύναμης από μόνο του είναι αξιόλογο, αλλά υπάρχει ακόμα μεγάλο περιθώριο βελτίωσης. Αυτό σημαίνει πως το βήμα βελτιστοποίησης δεν μπορεί να θεωρηθεί επιτυχές ακόμα. Έγιναν εκ νέου αλλαγές στο κάλυμμα στη μύτη (Σχήμα 6.16), καθώς, όπως φάνηκε, οι πρώτες αλλαγές είχαν κάποιο σφάλμα και δε συμφωνούσαν με το χάρτη ευαισθησίας. Γίνονται μικρές αλλαγές στα καλύμματα των ψυγείων, παρόλο που φαίνεται να λειτουργούν καλύτερα από πριν (Σχήμα 6.17).

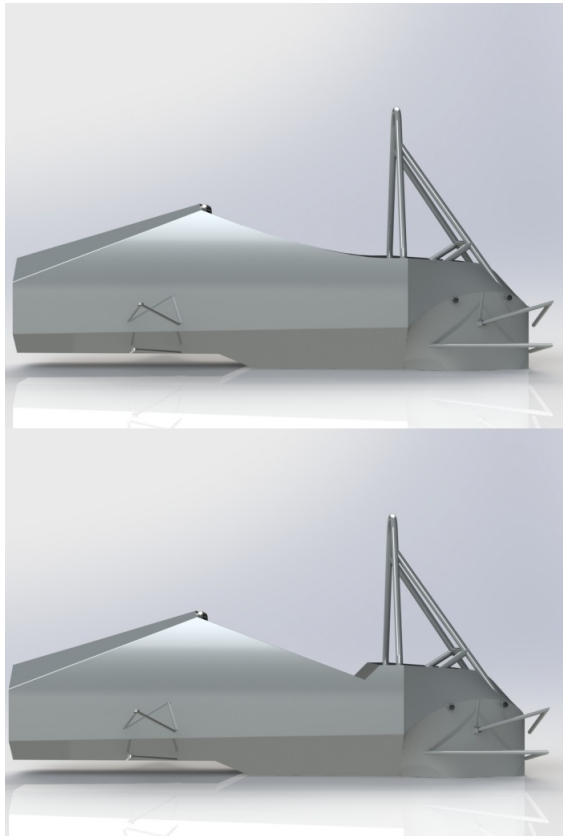


Σχήμα 6.16: Φωτορεαλιστικό μοντέλο του μονοθέσιου μπροστά καλύμματος της προστατευτικής διάταξης του μονοθέσιου Prom16. Οι μετατροπές μεταφράζονται διαφορετικά σε σχέση με πριν. Το κάλυμμα επιλέγεται να επιμηκυνθεί όσο επιτρέπουν οι χωρικοί περιορισμοί και παράλληλα αφαιρείται υλικό, όπως ορίζεται από το χάρτη ευαισθησίας της οπισθέλκουσας.

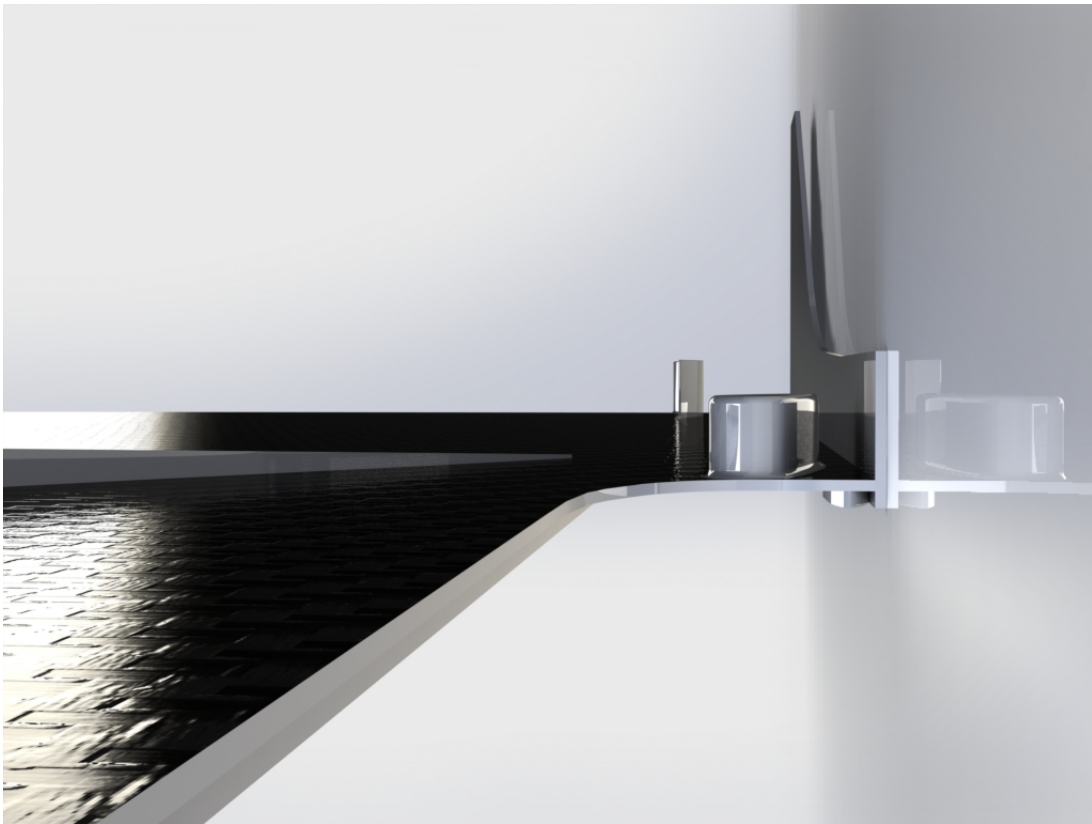


Σχήμα 6.17: Μοντέλο του μονοθέσιου Prom16 με γραμμές τροχιάς ρευστοστοιχείων πριν και μετά τις μετατροπές στα καλύμματα των ψυγείων. Φαίνεται ξεκάθαρα στη δεύτερη περίπτωση πως η ροή ανακατευθύνεται προς το διαμήκη άξονα του μονοθέσιου. Στην πρώτη περίπτωση η ροή αποκτά έντονη διαταραχή μετά τον τροχό και πάνω στα καλύμματα και καταλήγει να κινείται προς τα έξω στους τροχούς διαχέοντας της αναταραχή.

Επιλέγεται να γίνουν ορισμένες επιπλέον μετατροπές στο πλαίσιο και το πάτωμα. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο επιλέγεται να προστεθούν καλύμματα ώστε να καλύψουν το σκαλοπάτι που δημιουργείται (Σχήμα 6.18). Στο πάτωμα προστίθεται διαμόρφωση ελέγχου ροής, η οποία σύμφωνα με το χάρτη ευαισθησίας θα αυξήσει την κάθετη δύναμη και το λόγω της ως προς την οπισθέλκουσα (Σχήμα 6.19).



Σχήμα 6.18: Φωτορεαλιστικό μοντέλο του πλαισίου του μονοθέσιου Prom16. Στο νέο (πάνω), καλύπτεται το σκαλοπάτι στο χώρο του οδηγού.



Σχήμα 6.19: Φωτορεαλιστικό μοντέλο του πατώματος του μονοθέσιου Prom16. Οι μετατροπές μεταφράζονται διαφορετικά σε σχέση με πριν. Προστέθηκε πτερύγιο ελέγχου ροής.

Τα νέα αποτελέσματα δείχνουν πως οι επιπλέον μετατροπές λειτούργησαν καλύτερα από το αναμενόμενο. Στον πίνακα 6.3 φαίνονται τα αποτελέσματα για τα κυριότερα σημεία του μονοθέσιου. Οι μεταβολές στο πάτωμα δείχνουν πως λειτούργησαν καθώς αύξησαν το λόγο κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα αυξάνοντας την κάθετη δύναμη και μειώνοντας ελαφρώς την οπισθέλκουσα. Μεγάλη βελτίωση είδε το πλαίσιο και τα καλύμματά του. Με τη συνολική κάθετη δύναμη να βρίσκεται 309.3 N και την οπισθέλκουσα στα 117.3 N, υπήρξε αύξηση 2.9% στην κάθετη δύναμη και μείωση 2.6% στην οπισθέλκουσα. Ο λόγος κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα αυξήθηκε κατά 5.6%.

Συνολικά λοιπόν οι μετατροπές υπήρξαν θετικές. Επίσης η κατανομή αεροδυναμικών φορτίων μετατοπίστηκε ελαφρώς προς τα πίσω. Πλέον η κατανομή είναι 55% στον μπροστά άξονα, δηλαδή, πολύ πιο

Forces	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag
Front Wing	142.1	19.4	7.32
Rear Wing	99.2	37.5	2.65
Underbody	87.1	10.6	8.22
Chassis	-24.5	31.2	-0.79
Prom16	309.3	117.3	2.64

Πίνακας 6.3: Πίνακας με τα αποτελέσματα της ροής για το μονοθέσιο Prom16 μετά την επανάληψη του βήματος μετατροπών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην μπροστά πτέρυγα, την πίσω πτέρυγα, το πάτωμα, το πλαίσιο και τα καλύμμά του και το ολικό μοντέλο. Πλέον τα κέρδη είναι εμφανή σε ολόκληρο το μονοθέσιο.

κοντά στο επιθυμητό. Οπότε, κλείνει ο κύκλος βελτιστοποίησης.

Κεφάλαιο 7

Μελέτη με περιστρεφόμενους τροχούς

Ο κύκλος βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε δεν περιλάμβανε περιστρεφόμενους τροχούς. Αυτό έγινε καθώς:

- Η ταχύτητα με την οποία κινείται το όχημα είναι χαμηλή ($20m/s$), οπότε οι τροχοί περιστρέφονται με πολύ μικρή γωνιακή ταχύτητα, επομένως, δεν επηρεάζουν έντονα τη ροή.
- Η αστάθεια που εισάγει ο περιστρεφόμενος τροχός μπορεί να δυσκολέψει τη δυνατότητα σύγκλισης του κώδικα βελτιστοποίησης ή να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος.
- Εισάγεται μη-μονιμότητα στη ροή. Ο επιλύτης SIMPLE μπορεί να αποκλίνει εύκολα. Καταλληλότερο μοντέλο για την προσέγγιση είναι αυτό της μη-μόνιμης ροής. Σε τέτοια περίπτωση θα πρέπει να αυξηθεί είτε το υπολογιστικό κόστος, είτε το κόστος αποθήκευσης.

7.1 Νέες οριακές συνθήκες

Ανεξάρτητα από τα παραπάνω σημεία, για λόγους πληρότητας και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων, θα γίνει και η επίλυση των πρωτεύουσών εξισώσεων με περιστρεφόμενους τροχούς για το μονοθέσιο που προκύπτει από τον κύκλο βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε. Οπότε, στο πλέγμα που προκύπτει μετά το βήμα βελτιστοποίησης, ορίζονται νέες οριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, οι οριακές συνθήκες σε όλα τα τμήματα του μονοθέσιου παραμένουν

ίδιες εκτός από αυτήν της ταχύτητας στους τροχούς. Τα τοιχώματά τους ορίζονται να περιστρέφονται γύρω από άξονα που διέρχεται από το κέντρο τους και έχει κατεύθυνση ίδια με αυτήν του άξονα z . Η ταχύτητα με την οποία περιστρέφονται καθορίζεται από την ταχύτητα του μονοθέσιου. Δηλαδή, για διαμήκη ταχύτητα 20 m/s και για γνωστή εξωτερική ακτίνα τροχού, η ταχύτητα περιστροφής είναι ίση με:

$$\omega = \frac{2\pi 20 \text{ m/s}}{P}$$

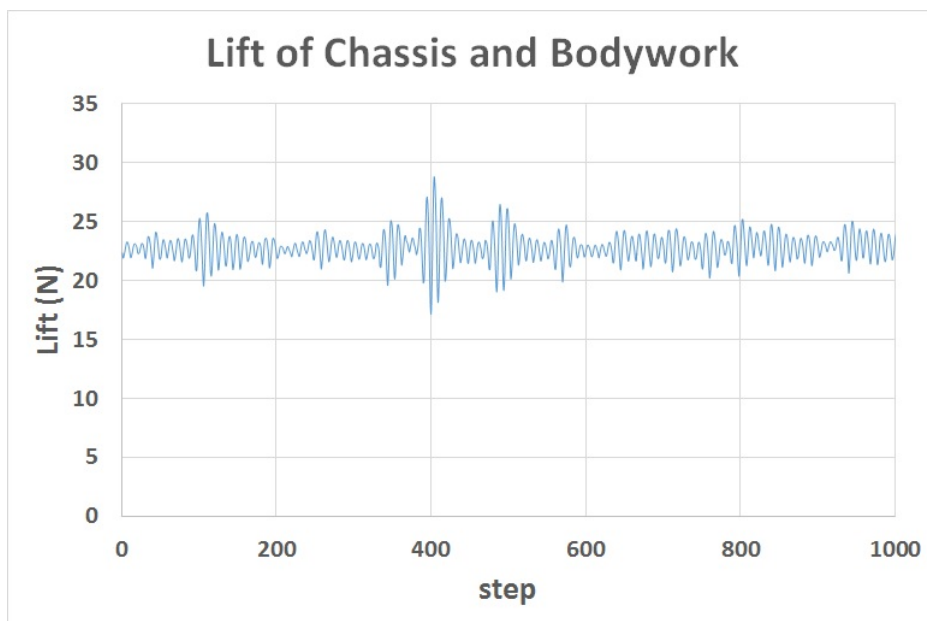
όπου $P = 2\pi R$ η περιφέρεια του τροχού και R η ακτίνα του. Οπότε οι γωνιακές ταχύτητες των τροχών είναι $\omega_{front} = 87.022 \text{ rad/s}$ και $\omega_{rear} = 86.073 \text{ rad/s}$.

Με τις παραπάνω οριακές συνθήκες και χρησιμοποιώντας τον επιλύτη SIMPLE (στην προκειμένη περίπτωση δεν αντιμετώπισε προβλήματα, απλά απαιτήθηκαν περισσότερες επαναλήψεις ώστε να συγκλι-νει) επιλύονται οι πρωτεύουσες εξισώσεις και προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

7.2 Αποτελέσματα επίλυσης ροής με περιστρεφόμενους τροχούς

Σύμφωνα με τη μελέτη μετά το πρώτο βήμα βελτιστοποίησης, η κάθετη δύναμη στο σύνολο του μονοθέσιου έχει αυξηθεί από τα 309.3 N στα 321.1 N. Πρόκειται για αύξηση 3.8%. Η οπισθέλκουσα αυξήθηκε επίσης, από τα 117.3 N στα 124.7 N, αύξηση 6.3%. Επομένως, ο λόγος κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα μειώθηκε από το 2.64 στο 2.57, πτώση λίγο πάνω από 2.5%. Αντίστοιχες είναι οι μεταβολές που παρατηρούνται σε κάθε τμήμα του μονοθέσιου μεμονωμένα, με ορισμένα τμήματα να επηρεάζονται περισσότερο και άλλα λιγότερο. Παράδειγμα αποτελεί το πάτωμα και το αποκλίνον ακροφύσιο τα οποία επηρεάζονται εντονότερα από όλα τα υπόλοιπα τμήματα, καθώς η είσοδος της ροής σε αυτό βρίσκεται κοντά στον μπροστά τροχό και η έξοδος στο αποκλίνον ακροφύσιο επηρεάζεται από τον πίσω τροχό. Λιγότερο, αλλά εξίσου σημαντικά επηρεάζονται η μπροστά πτέρυγα και το πλαίσιο. Στο πλαίσιο παρουσιάζεται ταλαντωτική συμπεριφορά στην παραγόμενη άνωση η οποία δεν εξομαλύνεται σε καμία στιγμή (Σχήμα 7.1).

7.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ97



Σχήμα 7.1: Διακύμανση της τιμής άνωσης στο πλαίσιο και τα καλύμμάτα του. Παρουσιάζονται τα 1000 τελευταία βήματα οπότε και ο κώδικας φαίνεται να έχει συγκλίνει. Παρατηρείται ταλαντωτική συμπεριφορά γύρω από μέση τιμή ίση με 22,3 N. Το διάστημα τιμών άνωσης κυμαίνεται από 17 N έως 28 N. Μετά το βήμα 2800 το διάστημα συρρικνώνεται στο 21 N έως 25 N.

Σημαντική εξαίρεση αποτελούν η πίσω πτέρυγα και οι ίδιοι οι τροχοί. Στην πίσω πτέρυγα αυξάνεται η παραγόμενη κάθετη δύναμη κατά 8.2% και η οπισθέλκουσα κατά 2.4%. Αυτό ισοδυναμεί με βελτίωση του λόγου κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα κατά περίπου 5.3%. Οι τροχοί παράγουν έντονα μικρότερη δύναμη άνωσης, 16.2 N από 21 N. Η παραγόμενη οπισθέλκουσα είναι επίσης μικρότερη, κατά περίπου 2 N. Εξαρχής ο σχεδιασμός στα άκρα της μπροστά πτέρυγας έγινε με σκοπό την καλύτερη αλληλεπίδραση με τον περιστρεφόμενο τροχό. Μεταφέροντας τη ροή γύρω από αυτόν και μειώνοντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ πτέρυγας και τροχού, απομακρύνοντας τα άκρα της πτέρυγας από το έδαφος. Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η κατανομή πίεσης στην τομή κατά τον εγκάρσιο άξονα στο κέντρο των τροχών και στο Σχήμα 7.3 οι γραμμές τροχιάς των ρευστοστοιχείων γύρω από τον τροχό.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων ροής με περιστρεφόμενους τροχούς και συγκρίνονται με αυτά της περίπτωσης των στατικών τρο-

χών (Πίνακας 7.2).

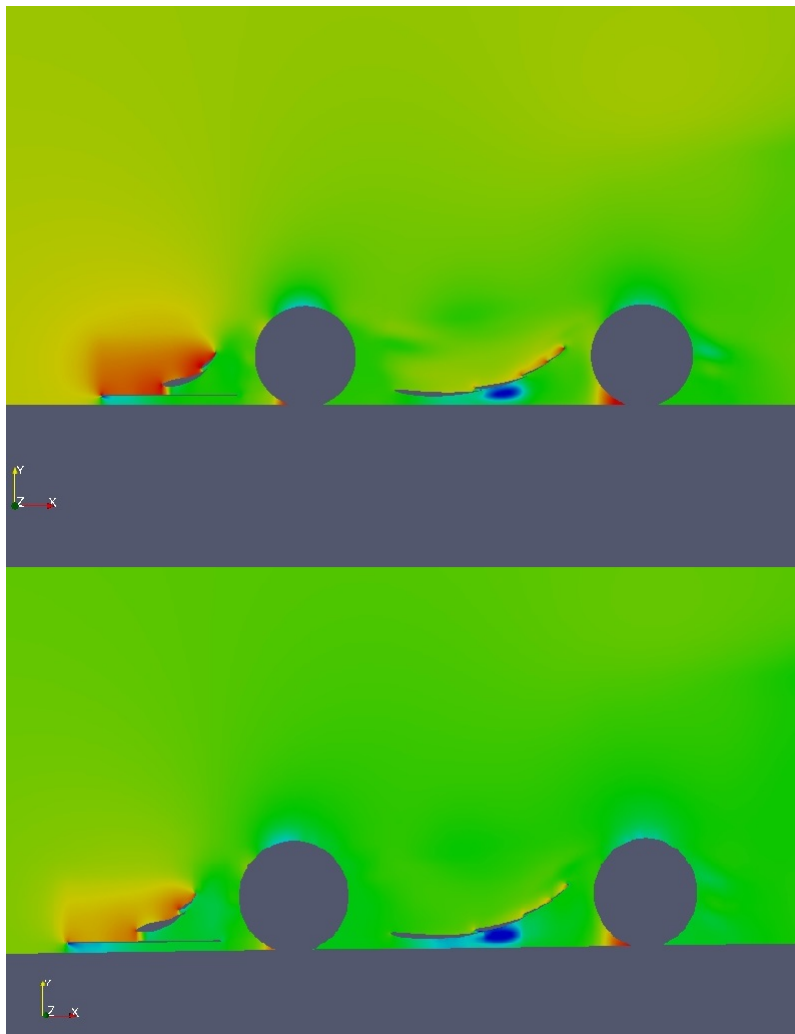
Forces (rotating wheels)	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag (N)
Front Wing	143	21.3	6.71
Rear Wing	107.3	38.4	2.79
Unerbody	88.4	13.4	6.60
Bodywork	-22.3	32.3	-0.69
Wheels	-16.2	11.4	-1.42
Car	321.1	124.7	2.57

Πίνακας 7.1: Πίνακας με τα αποτελέσματα της ροής με χρήση περιστρεφόμενων τροχών.

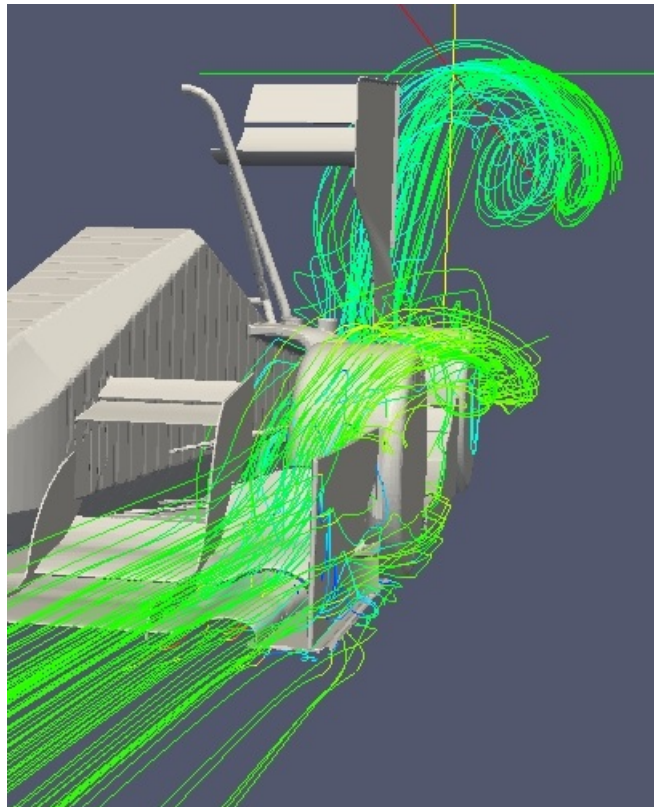
Forces (steady wheels)	Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/Drag (N)
Front Wing	142.1	19.4	7.32
Rear Wing	99.2	37.5	2.65
Unerbody	87.1	10.6	8.22
Bodywork	-24.5	31.2	-0.79
Wheels	-21.2	13.8	-1.54
Car	309.3	117.3	2.64

Πίνακας 7.2: Πίνακας με τα αποτελέσματα της ροής για στατικούς τροχούς. Παρατίθενται ώστε να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα του πίνακα 7.1.

7.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ99



Σχήμα 7.2: Κατανομή πίεσης σε τομή κατά τον εγκάρσιο άξονα. Στην άνω εικόνα φαίνεται η κατανομή πίεσης χωρίς περιστρεφόμενους τροχούς. Στην κάτω, η περίπτωση με περιστρεφόμενους. Οι μεγαλύτερες διαφορές στην περίπτωση περιστρεφόμενων τροχών εντοπίζονται στον μπροστά τροχό, μπροστά από τον οποίο και κοντά στην μπροστά πτέρυγα, υπάρχει πεδίο χαμηλότερης πίεσης. Κατόντι του τροχού απαιτείται μεγαλύτερο διάστημα για εμφάνιση πεδίου πίεσης μεγαλύτερου της περιβαλλοντικής. Στον πίσω τροχό εμφανίζεται ασθενέστερο πεδίο υποπίεσης μπροστά από αυτόν. Πίσω από αυτόν, εμφανίζεται ρεύμα χαμηλότερης πίεσης.



Σχήμα 7.3: Κίνηση του αέρα γύρω από τον μπροστά τροχό. Οι διαμόρφωση στην μπροστά πτέρυγα με την ανύψωση στα άκρα της, καθώς και η εκτόνωση της ροής προς τα πλάγια, μειώνει την επίδραση του πεδίου υπερπίεσης που δημιουργεί ο τροχός.

Κεφάλαιο 8

Ανακεφαλαίωση- Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία προσαρμόστηκε υπάρχουσα μέθοδος βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό αεροδυναμικών μορφών, που αναπτύχθηκε στη ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ, σε ακολουθία βημάτων για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του αγωνιστικού μονοθέσιου Prom16, της ομάδας Prom Racing, με έδρα το ΕΜΠ. Για ένα αγωνιστικό όχημα, ο αεροδυναμικός σχεδιασμός αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία. Η μεγαλύτερη αδυναμία ενός αγωνιστικού μονοθέσιου ήταν ανέκαθεν η περιορισμένη ικανότητά του σε πλευρική επιτάχυνση, λόγω της περιορισμένης δυνατότητάς του να εκμεταλλευτεί πλήρως τα ελαστικά του. Με ένα σύνολο από πτέρυγες και διατάξεις πάνω στο μονοθέσιο παράγεται κάθετη δύναμη η οποία στόχο έχει να απαλείψει τις παραπάνω αδυναμίες με την ελάχιστη δυνατή προστιθέμενη μάζα και οπισθέλκουσα. Η προσπάθεια εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο του διαγωνισμού FSAE. Οπότε, ο σχεδιασμός δεν είναι ελεύθερος, αλλά περιορίζεται από ένα σύνολο κανόνων. Η βελτιστοποίηση έγινε ώστε να δημιουργηθεί μια διαδικασία αεροδυναμικής βελτιστοποίησης, να επιδειχθεί ο τρόπος χρήσης της (με τους υπολογιστικούς πόρους που αποφασίστηκε να χρησιμοποιήσει η διπλωματική εργασία) και να δημιουργηθεί μία παρακαταθήκη υπολογιστικών εργαλείων για μελλοντική χρήση από τους εμπλεκόμενους σπουδαστές της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Στην προκειμένη περίπτωση ολοκληρώθηκε μία επανάληψη βελτιστοποίησης, η οποία στόχευσε στην αύξηση της παραγόμενης κάθετης δύναμης με παράλληλη μείωση της οπισθέλκουσας, την οποία, η περιορισμένη ισχύς του κινητήρα δεν επιτρέπει να αυξηθεί ανεξέλεγκτα. Περιληπτικά, η επιλογή του στόχου βελτιστοποίησης έγινε με κριτήριο τη

χρησιμότητα του κάθε τμήματος, καθώς και βάσει των αποτελεσμάτων ροής για τον αρχικό σχεδιασμό. Οι πτέρυγες και το πάτωμα βελτιστοποιούνται κατά κύριο λόγο ως προς την κάθετη δύναμη, ενώ τα καλύμματα ως προς την οπισθέλκουσα. Παράλληλα γίνεται προσπάθεια και για βελτιστοποίηση ως προς το λόγο κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα (Downforce/Drag), αφού εκφράζει καλύτερα την αεροδυναμική απόδοση.

Γενικεύοντας τη συνολική διαδικασία που παρουσιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε να ισχύει για οποιοδήποτε πρόβλημα αεροδυναμικού σχεδιασμού αγωνιστικού οχήματος, προκύπτει η παρακάτω ακολουθία βημάτων:

- Η μελέτη και κατανόηση των κανονισμών ή/και των πρακτικών περιορισμών που ισχύουν στο σχεδιασμό.
- Η σύλληψη της αρχικής ιδέας σχεδιασμού. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του βήματος είναι η λογική και η εμπειρία. Μελετώντας πειραματικά δεδομένα, ο σχεδιαστής μπορεί να κρίνει τις κυρίαρχες ανάγκες που εμφανίζει το όχημα και τον τρόπο που ο αεροδυναμικός σχεδιασμός θα καταφέρει να τις ικανοποιήσει. Η εμπειρία παίζει ιδιαίτερο ρόλο καθώς θα μπορέσει να μειώσει το συνολικό κόστος της μεθόδου, αποφεύγοντας σφάλματα τα οποία θα απαιτούσαν επιπλέον μετατροπές και επαναλήψεις του σχεδιαστικού κύκλου. Επίσης, θα καταλήξει κατά πάσα πιθανότητα σε καλύτερα τελικά αποτελέσματα αφού ισχύει η λογική "garbage in-garbage out".
- Η διαδικασία ανάπτυξης του γεωμετρικού μοντέλου. Είναι σχετικά απλή. Θα χρησιμοποιηθεί τόσο για την αεροδυναμική μελέτη αλλά και για τη συνολική δυναμική και μηχανική μελέτη του μονοθέσιου. Απαιτείται ακρίβεια ώστε τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία πληθώρα από λογισμικά CAD.
- Η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος. Είναι επίσης απλή. Απαιτείται να γίνουν σωστές επιλογές ώστε να προσεγγιστεί με αξιοπιστία η ροή γύρω από το μονοθέσιο. Όσο πιο πυκνό το πλέγμα, τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος κάθε κύκλου επιλύσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ένα σύνολο από λογισμικά γένεσης πλέγματος. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το SnappyHexMesh, εργαλείο ενσωματωμένο στο OpenFOAM, το

οποίο δημιουργεί μη δομημένα πλέγματα γύρω από σώματα, η επιφάνεια των οποίων περιγράφεται με αρχεία STL.

- Η επίλυση των εξισώσεων ροής. Σε αυτό το βήμα επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις ροής ώστε να αποκτηθεί πληροφορία για το σχεδιασμό. Ένας επιπλέον λόγος που έγινε είναι ώστε να απαλειφθούν τα σχεδιαστικά "σφάλματα" ή "αδυναμίες" πριν τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ένας έμπειρος σχεδιαστής μπορεί να μην χρειαστεί να κάνει μετατροπές στον αρχικό σχεδιασμό. Παρόλα αυτά, η χρησιμότητα του βήματος αυτού είναι ξεκάθαρη, καθώς όπως και προηγουμένως, η διαδικασία βελτιστοποίησης θα δώσει ως αποτέλεσμα αυτό που θεωρεί ιδανική μορφή του υπάρχοντος σχεδιασμού, αλλά δεν θα τον αλλάξει ριζικά. Χρησιμοποιείται το ανοιχτό λογισμικό OpenFOAM.
- Οι επαναλήψεις βελτιστοποίησης. Γίνεται η επίλυση των συζυγών εξισώσεων για τη δημιουργία του χάρτη ευαισθησίας του μονοθέσιου ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Πρόκειται για πολύ ισχυρό εργαλείο για οποιοδήποτε σχεδιαστή, καθώς προσφέρει απτή πληροφορία για το πως μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του μονοθέσιου ανάλογα με τις μετατροπές που θα γίνουν στο σχήμα αυτού. Προφανώς, όσο πιο έμπειρος είναι ο σχεδιαστής, τόσο μεγαλύτερο μπορεί να είναι το κέρδος από τη χρήση του εργαλείου αυτού. Αφού γίνουν οι μετατροπές, δημιουργείται νέο πλέγμα και ξεκινά καινούρια επίλυση των εξισώσεων ροής ώστε να κριθεί αν οι μετατροπές ικανοποιούν τα εκάστοτε κριτήρια. Αν ναι, ακολουθεί το επόμενο βήμα βελτιστοποίησης. Αν όχι, γίνονται νέες μετατροπές. Για το βήμα αυτό χρησιμοποιείται το λογισμικό επίλυσης των συζυγών εξισώσεων (και, προφανώς, η μαθηματική διατύπωσή) που έχει αναπτυχθεί από την ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ στο περιβάλλον OpenFOAM.

Πιο συγκεκριμένα, για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό του αγωνιστικού μονοθέσιου Prom16, όπως παρουσιάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε η σύλληψη της αρχικής ιδέας για το σχεδιασμό και μοντελοποιήθηκε. Στην πορεία χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο παραγωγής πλέγματος SnappyHexMesh και με χρήση του λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής OpenFOAM επιλύθηκαν οι εξισώσεις ροής. Στο πλαίσιο προσπάθειας μείωσης του χρονικού και υπολογιστικού κόστους της μελέτης έγινε μελέτη της απόκλισης των τιμών λόγω διαφορετικών σχημάτων διακριτοποίησης, καθώς και διαφορετικών μοντέλων τύρβης. Επίσης δοκιμάστηκαν διά-

φορες πυκνότητες πλέγματος. Αποφασίστηκε πως πλέγμα αραιότερο από αυτό που χρησιμοποιείται, αν και μειώνει το υπολογιστικό κόστος των υπολογισμών, δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού. Μετά από την πρώτη μελέτη των εξισώσεων ροής κρίθηκαν οι σχεδιαστικές επιλογές και γίνονται μετατροπές σε όλα τα προφανή σημεία του μοντέλου. Αυτή είναι μια διαδικασία πολύ πιο οικονομική αν πρόκειται για μετατροπές που βασίζονται σε ξεκάθαρες αδυναμίες του σχεδιασμού. Στο επόμενο στάδιο ξεκινά η διαδικασία βελτιστοποίησης. Για τη βελτιστοποίηση εφαρμόστηκε η συνεχής συζυγής μέθοδος. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι είτε η οπισθέλκουσα είτε η κάθετη δύναμη, ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται, και οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι η κάθετη μετατόπιση των σημείων των επιφανειών του μονοθέσιου. Έχοντας το πεδίο κλίσης αυτών των δύο συναρτήσεων μπορεί να δημιουργηθεί το πεδίο κλίσης του λόγου των δύο. Οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα δημιουργείται ο χάρτης ευαισθησίας. Σύμφωνα με αυτόν, έγιναν μετατροπές στο σχεδιασμό. Στόχος είναι η αύξηση της παραγόμενης κάθετης δύναμης με παράλληλη μείωση της οπισθέλκουσας. Οι αεροδυναμικές συσκευές οι οποίες σχεδιάστηκαν ώστε να παράγουν κάθετη δύναμη (πτέρυγες, πάτωμα και αποκλίνον ακροφύσιο) τροποποιήθηκαν με στόχο την αύξηση της κάθετης δύναμης, ενώ τα τμήματα τα οποία επιτελούν οποιαδήποτε άλλη λειτουργία (καλύμματα κινητήρα, ψυγείων, εμπρόσθιας προστατευτικής διάταξης και προσθήκες στο πλαίσιο) τροποποιούνται ώστε να μειωθεί η οπισθέλκουσα. Παράλληλα, οι τροποποιήσεις σε όλα τα τμήματα μελετούνται ώστε να αυξάνουν το λόγο κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα. Εξαιρέση αποτελεί η εμπρός πτέρυγα, η οποία τροποποιείται πρωτίστως ώστε να αυξάνει το λόγο κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, λόγω του περιορισμένου χρονικού περιθωρίου, παρουσιάζεται μόνο ένα βήμα βελτιστοποίησης και τα αποτελέσματά του. Από το βήμα βελτιστοποίησης που ολοκληρώθηκε, προέκυψε αύξηση της κάθετης δύναμης κατά 2.9% και μείωση της οπισθέλκουσας κατά 2.6%. Οπότε συνολικά ο λόγος κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα βελτιώθηκε κατά 5.6%.

Σε όλα τα στάδια της μελέτης η ροή μοντελοποιείται ως ασυμπίεστη και η ταχύτητά της ίση με 20 m/s . Το τελικό μοντέλο που προκύπτει μετά από το βήμα βελτιστοποίησης μελετάται ξανά αυτήν την φορά με περιστρεφόμενους τροχούς και συγκρίνονται τα αποτελέσματα. Διαδικασία η οποία δεν έγινε κατά την επίλυση των συζυγών εξισώσεων,

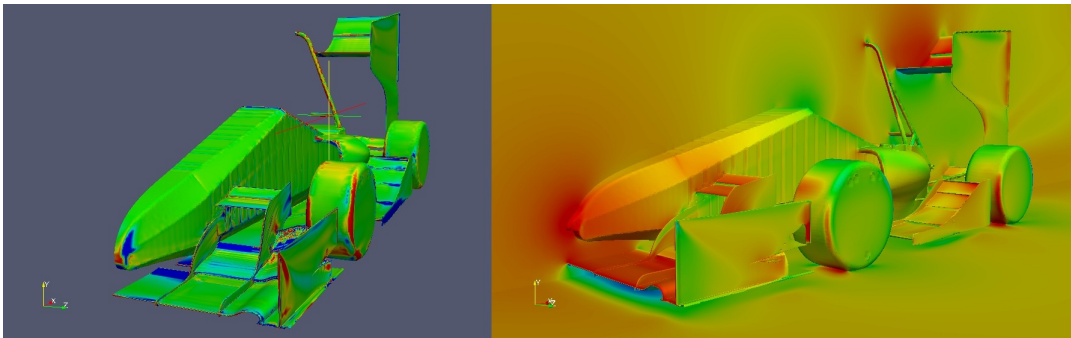
καθώς θα αύξανε τις πιθανότητες απόκλισης του κώδικα. Επίσης, οι περιστρεφόμενοι τροχοί σε μελέτη μονοθέσιων open-wheel έχουν και τη μεγαλύτερη δυσκολία υπολογισμού λόγω της αστάθειας και της μη-μονιμότητας που εισάγουν στη ροή, οπότε ένας επιλύτης όπως ο SIMPLE δύσκολα μπορεί να προσεγγίσει και να συγκλίνει σε μία τιμή. Το μοντέλο των περιστρεφόμενων τροχών παρουσιάζει αύξηση της παραγόμενης κάθετης δύναμης, με αύξηση της οπισθέλκουσας. Ο λόγος κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα μειώνεται κατά 2.65%.

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγιναν κάποιες παρατηρήσεις, οι οποίες έχουν γενικότερη ισχύ:

- Γίνεται ξεκάθαρο πως το σχήμα διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται επηρεάζει πολύ έντονα τα αποτελέσματα. Εμφανίζεται μεταβολή έως και 90% στα αποτελέσματα από το σχήμα 1ης τάξης σε αυτό 2ης για τον όρο μεταφοράς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πάτωμα.
- Η ροή μπορεί να προσεγγιστεί ως μόνιμη, αλλά τα αποτελέσματα παρουσιάζουν διακυμάνσεις οι οποίες δεν εξομαλύνονται ανεξάρτητα του αριθμού επαναλήψεων. Επομένως, ακριβέστερη μελέτη μπορεί να γίνει με μοντέλο μη-μόνιμης ροής. Σε αυτήν την περίπτωση ανεβαίνει πολύ το κόστος επίλυσης των εξισώσεων ροής. Επίσης, για την επίλυση των συζυγών εξισώσεων απαιτούνται τα αποτελέσματα των πρωτεύουσών εξισώσεων για κάθε χρονική στιγμή. Για να διευθετηθεί η παραπάνω ανάγκη απαιτείται είτε να αποθηκευτούν όλα τα αποτελέσματα της μη-μόνιμης ροής πριν την επίλυση των συζυγών εξισώσεων, οπότε ο όγκος δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτεί να είναι απαγορευτικά μεγάλος, είτε να επιλύεται κάθε φορά το πρόβλημα έως το σημείο στο οποίο έχει φτάσει η επίλυση της συζυγούς μεθόδου, οπότε ο χρόνος επίλυσης είναι μεγάλος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αποθήκευσης με σημεία checkpoints [14][15], ώστε να βρεθεί μία μέση κατάσταση μεταξύ των δύο πρώτων. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικό μοντέλο για την πορεία των αποτελεσμάτων της μη-μόνιμης ροής [16], με σχετικά μικρό κόστος αποθήκευσης και το ελάχιστο υπολογιστικό κόστος. Αλλά με αυτό τον τρόπο εισάγονται ανακρίβειες.
- Η αξία της διαδικασίας βελτιστοποίησης γίνεται ξεκάθαρη. Χωρίς ιδιαίτερη αύξηση του κόστους υπολογισμών δημιουργούνται χρησιμότερα αποτελέσματα για τις αλλαγές που απαιτούνται ώστε να υπάρξει βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργ-

γίας του μονοθέσιου. Το βήμα βελτιστοποίησης που ολοκληρώθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία απέφερε κέρδος περίπου 5.6% στο λόγο κάθετης δύναμης προς την οπισθέλκουσα στο συνολικό μοντέλο, με αύξηση κατά 2.9% στην κάθετη δύναμη και 2.6% μείωση της οπισθέλκουσας. Μάλιστα, πρόκειται για μεταβολές οι οποίες δεν θα μπορούσαν να είναι προφανείς παρά μόνο στα μάτια ενός πολύ έμπειρου σχεδιαστή (μικρές μετατροπές στο σχήμα των αεροτομών, δημιουργία διαμορφώσεων ελέγχου ροής κλπ).

- Έχοντας τον απαιτούμενο χρόνο και πόρους, η διαδικασία της βελτιστοποίησης μπορεί όντως να οδηγήσει στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα που ορίζουν οι συνθήκες λειτουργίας του μοντέλου και περιορίζουν οι κανόνες του διαγωνισμού.
- Κυριότερος περιορισμός της βελτιστοποίησης είναι το κόστος υπολογισμών. Στην παρούσα περίπτωση έγιναν πολλοί συμβιβασμοί κατά τη δημιουργία του πλέγματος. Αυτοί επηρεάζουν τα αποτελέσματα (Σχήμα 7.1), αλλά σε αποδεκτά όρια. Το κόστος του κάθε βήματος μελέτης είναι περίπου 15 ώρες ανάλογα με τις επιλογές που γίνονται και τους πόρους που χρησιμοποιούνται. Αν το πλέγμα και το μοντέλο είχαν την καλύτερη δυνατή ποιότητα, ο χρόνος ολοκλήρωσης ενός βήματος μπορεί να απαιτούσε αρκετές μέρες. Είναι ευνόητο ότι, παρά το ότι η ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ διαθέτει ένα ισχυρό πολυεπεξεργαστικό σύστημα, εξ αρχής τέθηκαν όρια χρήσης του για την υλοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.
- Τα αποτελέσματα συμβαδίζουν με αυτά που παρουσιάζουν άλλες ομάδες του διαγωνισμού. Επίσης ένα όχημα "open-wheeled" με επιθετικό αεροδυναμικό σχεδιασμό έχει λόγο κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα από 2 έως 3. Από τη στιγμή που τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κυμαίνονται σε αυτά τα όρια μπορούν να γίνουν αποδεκτά. Αυτό δεν σημαίνει πως η αξία των αποτελεσμάτων είναι απόλυτη, καθώς δεν μπορούν να προσομοιωθούν ακριβώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Επίσης, λαμβάνουν χώρα δυναμικά φαινόμενα κατά τη λειτουργία του μονοθέσιου (λειτουργία της ανάρτησης, μικρή παραμόρφωση του αεροδυναμικού πακέτου κ.α) τα οποία μεταβάλλουν τη γεωμετρία του μοντέλου, οπότε και τα αποτελέσματα. Πιο ακριβή αποτελέσματα θα προκύψουν από πειραματικές διατάξεις όταν κατασκευαστεί το μονοθέσιο.



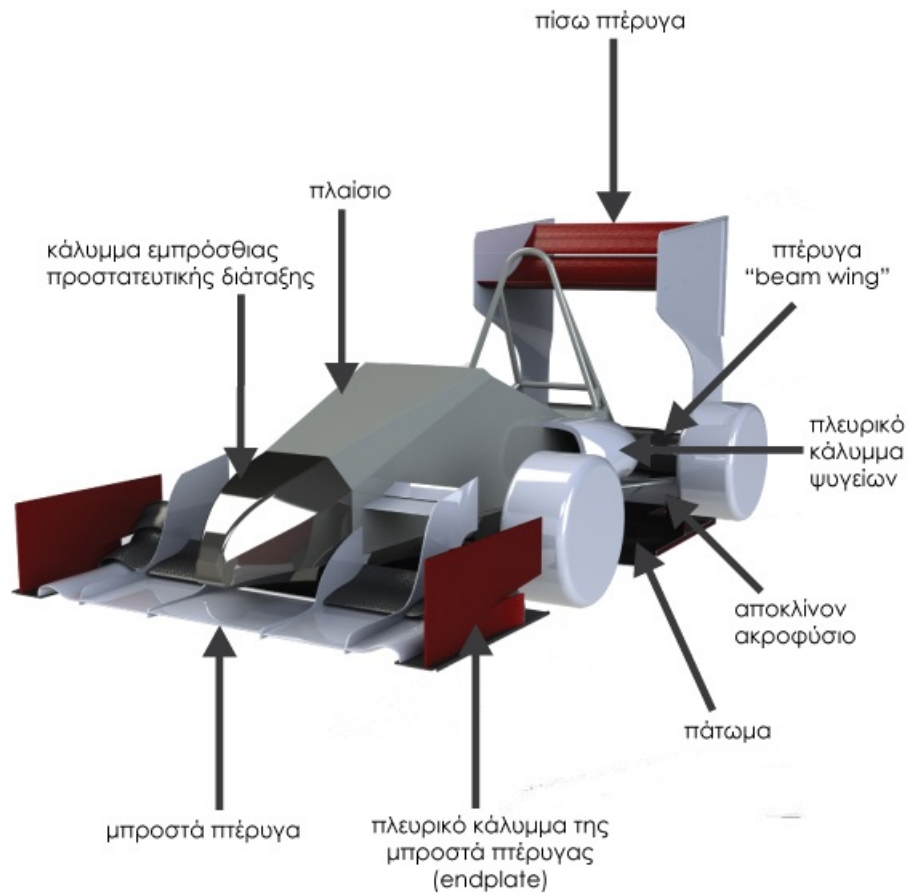
Σχήμα 8.1: Χάρτης κλίσης αντικειμενικής συνάρτησης (κάθετης δύναμης προς οπισθέλκουσα) ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού και κατανομή πίεσης στο μονοθέσιο Prom16. Οι συμβιβασμοί που έγιναν στο μοντέλο και το πλέγμα φαίνονται ξεκάθαρα. Στο πλαίσιο παρουσιάζονται κύματα τα οποία μεταβάλλουν την κατανομή πίεσης. Επίσης ο αλγόριθμος του adjoint τα παρουσιάζει ως σχεδιαστικό σφάλμα το οποίο πρέπει να διορθωθεί. Πολλές από τις ακμές έχουν γωνίες κατά μήκος τους και ορισμένες καμπύλες μετατρέπονται σε γωνίες. Για να αποδοθούν όλα αυτά με πολύ καλύτερη ποιότητα στο πλέγμα απαιτείται αύξηση του συνολικού αριθμού κελιών από 6.500.000 περίπου στα 10.000.000 ή και παραπάνω.

Με τη γνώση και την εμπειρία που αποκτήθηκε και τα πακέτα μελέτης που ετοιμάστηκαν, καθώς και με τη βοήθεια της ΜΠΥΡ& Β/ΕΘΣ είναι δυνατό να γίνουν καινούρια σενάρια μελέτης πάνω στο μονοθέσιο. Αυτά θα μπορούσαν να προσφέρουν περισσότερη γνώση για το μονοθέσιο το οποίο θα κατασκευαστεί και θα συμμετέχει σε διαγωνισμούς FSAE το έτος 2016.

Ολοκληρώνοντας, ας εκφραστεί η ευχή να υπάρξουν επόμενοι σπουδαστές που θα εμπλακούν με την ομάδα Prom Racing και θα εκμεταλλευτούν, προς όφελός της, το λογισμικό που δημιουργήθηκε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία.

Παράρτημα

Τριδιάστατο μοντέλο του μονοθέσιου Prom16 της ομάδας Prom Racing με έδρα το ΕΜΠ. Χρησιμοποιείται ώστε να γνωρίζει ο αναγνώστης σε ποιο αντικείμενο γίνεται αναφορά.



Βιβλιογραφία

- [1] Τσαγγάρης, Σ., "Μηχανική των Ρευστών", Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2005.
- [2] Μπεργελές, Γ., "Υπολογιστική Ρευστομηχανική", Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2012.
- [3] Γιαννάκογλου, Κ., Χ., "Μέθοδοι Απιοκρατικής και Στοχαστικής Βελτιστοποίησης και Εφαρμογές" Αθήνα, 2012.
- [4] Katz, J., "Race Car Aerodynamics-Designing for Speed", Bentrey Publishers, a division of Robert Bentley, Inc, 1995.
- [5] Milliken, w., F., Milliken, D., L., "Race Car Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Inc., 1995.
- [6] engys, "A Comprehensive Tour of snappyHexMesh", 7th OpenFOAM Workshop, 25 June 2012.
- [7] Ευάγγελος Μ. Παπουτσή-Κιαχαγιάς, "Συζυγείς Μέθοδοι για Τυρβώδεις Ροές, με Εφαρμογή στη Βελτιστοποίηση Μορφής ή Τοπολογίας και στο Στιβαρό Σχεδιασμό", Διδακτορική Διατριβή, Επιβλέπων : Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
- [8] E. Papoutsis-Kiachagias, K. Giannakoglou, Continuous adjoint methods for turbulent flows, applied to shape and topology optimization: Industrial applications, Archives of Computational Methods in Engineering DOI:10.1007/s11831-014-9141-9 (2014) 1–45.
- [9] Menter, F., Esch, T., "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction", 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2001.

- [10] Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 4, 2003, pp. 625 - 632, 2001.
- [11] Hellsten, A., "Some Improvements in Menter's k-omega-SST turbulence model", 29th AIAA Fluid Dynamics Conference, 1998.
- [12] P.R. Spalart, S.R. Allmaras, "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", *La Recherche Aerospaciale*, No. 1, 1994, pp. 5-21.
- [13] G.A. Ashford, "An Unstructured Grid Generation and Adaptive Solution Technique for High Reynolds Number Compressible Flows", Ph.D. thesis, University of Michigan, 1996.
- [14] Q., Wang, P., Moin, "Minimal repetition dynamic checkpointing algorithm for unsteady adjoint calculation", *Center for Turbulence Research Annual Research Briefs*, 2008.
- [15] A., Griewank, A., Walther, "Algorithm 799: Revolve: An Implementation of Checkpointing for the Reverse or Adjoint Mode of Computational Differentiation", *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 26, No. 1., March 2000.
- [16] C., Vezyris, I., Kavvadias, E.,M., Papoutsis-Kiachagias, K.,C., Giannakoglou, "Unsteady continuous adjoint method using POD for jet-based flow control", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, July 21-25, 2014.