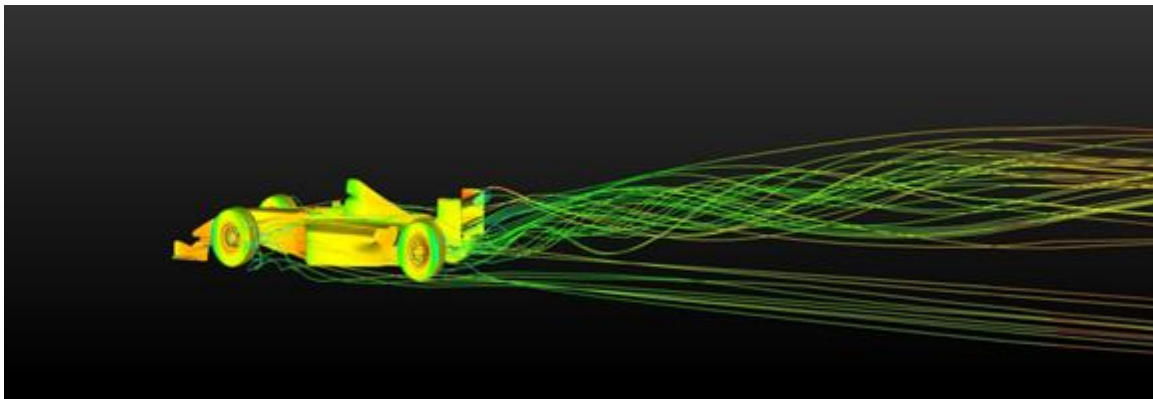


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ FORMULA STUDENTS



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ 6518

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ)

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και είναι η προσαρμογή υπάρχουσας μεθόδου (και λογισμικού) για το σχεδιασμό-βελτιστοποίηση αεροδυναμικών μορφών 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 αγωνίσματα, 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 πτυχιακή αυτή εργασία περιλαμβάνει παρουσίαση των δράσεων της ομάδας FSAE, FP-ONE TEAM, με έδρα το Α.Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. Έμφαση θα δοθεί στη συμμετοχή του γράφοντος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αεροδυναμική μελέτη του μονοθέσιου. Παρουσιάζεται η τρέχουσα μορφή του πλαισίου του μονοθέσιου, τα βήματα αεροδυναμικού σχεδιασμού για να προκύψει αυτή καθώς και οι διαδικασίες βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας. Συνολικός στόχος είναι η αύξησης της παραγόμενης κάθετης δύναμης, με παράλληλη μείωση της οπισθέλκουσας.

Βασικά εργαλεία ανάπτυξης ήταν το σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS και το λογισμικό ANSYS Fluent. Με το πρώτο έγινε ο σχεδιασμός του πλαισίου και αεροδυναμικών βοηθημάτων λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς λόγω κανονισμών. Στο δεύτερο έγινε η αεροδυναμική προσομοίωσή και η βελτιστοποίησή του βάση των αποτελεσμάτων. Δεν υλοποιήθηκε αυτόματος βρόχος βελτιστοποίησης, καθώς θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη πολλοί περιορισμοί.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολόκληρου του κειμένου εξ ίσου, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής
ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

.....
(Υπογραφή)

“Δεν ξέρουμε τίποτα,
Απλά θυμόμαστε”

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία έχει θέμα την αεροδυναμική μελέτη του πλαισίου με αεραγωγούς της Formula Students που κατασκευάζεται από ομάδα φοιτητών του τμήματος Μηχανολογίας Α.Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδος FP-ONE TEAM. Η αεροδυναμική είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος, έτσι ώστε αυτό να αποδίδει όσο το δυνατόν καλύτερα και είναι ένα από τα κριτήρια που έχει ο Διεθνής Φοιτητικός Διαγωνισμός Σχεδιασμού FSAE. Η μελέτη, στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία, έγινε με τη χρήση του υπολογιστικού λογισμικού προσομοιώσεων Ansys Fluent και η σχεδίαση με το σχεδιαστικό λογισμικό Solidworks. Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε επτά Κεφάλαια.

Στο πρώτο Κεφάλαιο περιγράφεται ο Διεθνής Φοιτητικός Διαγωνισμός Σχεδιασμού FSAE. Δίνεται σημασία στις δοκιμασίες στις οποίες επιβάλλεται το μονοθέσιο κάθε ομάδας καθώς και τους κανόνες σχεδιασμού που πρέπει να πληρεί για να μπορεί να διαγωνιστεί, βάση αυτών έγιναν και ο σχεδιασμός του δικού μας μονοθέσιου.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται η σχέση αεροδυναμικής και ρευστοδυναμικής. Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της ροής των Ρευστών, τα καθεστώτα ροής, τα οριακά στρώματα και γίνεται αναφορά στις διάφορες εξισώσεις ροής που θα χρησιμοποιηθούν.

Στο τρίτο Κεφάλαιο εξηγούνται οι αρχές της αεροδυναμικής και η δράση της πάνω στα οχήματα. Εκτεταμένη αναφορά γίνεται στα διάφορα αεροδυναμικά βοηθήματα τα οποία σκοπό έχουν να δημιουργήσουν ένα όχημα-μονοθέσιο το οποίο θα αποδίδει τα βέλτιστα.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο αναφερόμαστε στην μοντεοποίηση της δομής που θα μελετηθεί η οποία έγινε με την χρήση του σχεδιαστικού λογισμικού Solidworks και παρουσιάζεται αναλυτικά βήμα προς βήμα η κατασκευή του πλαισίου και των αεραγωγών. Περιγράφεται η δημιουργία του πλέγματος καταγράφονται οι οριακές συνθήκες και τέλος αναπτύσσονται οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διακριτοποίηση.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο περιγράφονται 3 από τα πακέτα που περιλαμβάνει το υπολογιστικό λογισμικό Ansys. Αυτά είναι το Ansys CFD, το Ansys ICEM και το Ansys Fluent. Επίσης στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται και τα μοντέλα ροής του Fluent, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία, καθώς και οι αλλαγές στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, οι οποίες έγιναν στο Fluent, και ισχύουν για όλες τις προσομοιώσεις ανεξαρτήτως μοντέλου.

Στο έκτο Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή του αρχείου το οποίο

κατασκευάστηκε στο Solidworks, στο Ansys Fluent. Εκεί ξεκινούν οι προσομοιώσεις, με του πλαισίου και των αεραγωγών καθώς και όλου μαζί του συστήματος και παρατίθενται τα διαγράμματα του συντελεστή άνωσης και του συντελεστή οπισθέλκουσας, καθώς και η κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας. Ακόμη, στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένας μικρός οδηγός του Fluent, για τέτοιου είδους προβλήματα.

Τέλος, στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που βγήκαν από αυτή τη μελέτη. Επιπροσθέτως, ο συγγραφέας αυτής της εργασίας παρατήθει προτάσεις εξέλιξης και επέκτασης για νέες μελέτες μέχρι να κατασκευαστεί ένα άκρως ανταγωνιστικό μονοθέσιο.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α	vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΥΡΙΩΣ ΚΕΙΜΕΝΟ	4
1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	4
1.1 Ο ΔΙΕΘΝΗΣ ΦΟΙΤΗΤΙΚΟΣ ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ FORMULA SAE	4
1.2 ΑΡΧΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	7
2 ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	11
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΩΝ	11
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΗΣ	13
2.3 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ	14
2.4 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ.....	15
2.4.1 Το οριακό στρώμα και τα χαρακτηριστικά του.....	15
2.4.2 Η μορφή του οριακού στρώματος	17
2.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ	17
2.6 ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	19
3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΒΟΗΘΗΜΑΤΑ	20
3.1 ΑΡΧΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....	20
3.1.1 Το αεροδυναμικό κέντρο του αυτοκινήτου.	25
3.1.2 Αεροδυναμική οπισθελκούς και στρόβιλοι (περιδίνηση, τυρβώδης ροή). 26	
3.1.3 Άνωση.....	29
3.1.4 Σχέση μεταξύ κατάστασης αμαξώματος και οπισθελκούς.	29
3.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΒΟΗΘΗΜΑΤΑ.....	34
3.2.1 Βελτίωση πρόσθιας επιφάνειας	35
3.2.2 Βελτίωση πλαγίας επιφάνειας οχήματος.....	37

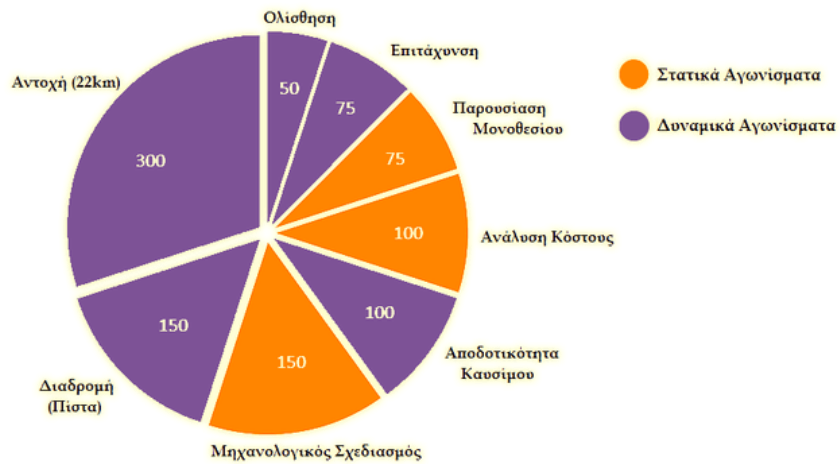
3.2.3	Πραγματική γωνία κλίσης οπίσθιου μπαρμπριζ οχηματος τριων ογκων (notchback/νοτσμπακ)	39
3.2.4	Επίδραση προεξέχοντος αεροδυναμικού βοηθηματος στο οπίσθιο μέρος της οροφης.....	39
3.2.5	Επίδραση πίσω ποδιας.....	43
4	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	45
4.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	45
4.1.1	Λογισμικό προγραμμα σχεδίασης SOLIDWORKS.....	46
4.1.2	Βήματα σχεδίασης πλαισίου και αεραγωγών	47
4.2	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	52
4.3	ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	53
4.4	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ	55
5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS	57
5.1	Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	57
5.2	ICEM CFD.....	58
5.3	ANSYS CFX.....	59
5.4	ANSYS FLUENT.....	60
5.4.1	Επιλογή παραμέτρων στο Fluent:	61
5.4.2	Τα μοντέλα του Fluent:	63
6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	65
6.1	ΟΔΗΓΟΣ FLUENT	65
6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	68
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΕΙΑ	79

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Formula SAE είναι ένας παγκόσμιος διαγωνισμός φοιτητών που διοργανώνεται από την SAE (Society of Automotive Engineers), το IMECHE (Institution of Mechanical Engineers), τη Formula Student και άλλους οργανισμούς παγκοσμίως. Η Formula SAE η οποία ξεκίνησε το 1978 στην Αμερική, δίνει την ευκαιρία στους φοιτητές να εξασκήσουν και να εξελίξουν τις μηχανολογικές, επιχειρηματικές και οργανωτικές τους ικανότητες. Η ιδέα του διαγωνισμού είναι το σενάριο ύπαρξης μίας φανταστικής εταιρίας όπου αναθέτει σε μία ομάδα φοιτητών να ιδρύσουν, να οργανώσουν και να διαχειρίζονται μία αγωνιστική ομάδα η οποία με τη σειρά της θα σχεδιάσει, κατασκευάσει και θα αγωνιστεί με ένα μικρό αγωνιστικό μονοθέσιο τύπου Formula αγώνων ταχύτητας. Το αυτοκίνητο περνάει από μία σειρά στατικών και δυναμικών αγωνισμάτων, που έχουν να κάνουν όχι μόνο με την ταχύτητα που αναπτύσσει ή τις ικανότητες οδήγησης του οδηγού, αλλά και με τις καινοτομίες πάνω στο σχεδιασμό και την κατασκευή, το κόστος, την ανθεκτικότητα και την αντοχή του καθώς και την δυνατότητα παραγωγής του. Η συμμετοχή και οι εξετάσεις απαιτούν την τήρηση συγκεκριμένων κανόνων και περιορισμών, ενώ πολλές είναι οι εταιρίες που ενισχύουν τα γεγονότα με χορηγίες χρηματικές ή μη (αναλώσιμα, ανθρώπινο δυναμικό κλπ.). Οι αγώνες του διαγωνισμού χωρίζονται σε 3 κατηγορίες από τις οποίες οι φοιτητικές ομάδες μπορούν να επιλέξουν κάθε χρόνο που θα συμμετάσχουν:

- **Class 3:** Σε αυτό το στάδιο παρουσιάζει η ομάδα το σχεδιασμό του μονοθεσίου χωρίς να έχει προχωρήσει στο κατασκευαστικό μέρος.
- **Class 2:** Σε αυτό το στάδιο παρουσιάζει η ομάδα κάποια έτοιμα κομμάτια από την κατασκευή του μονοθεσίου.
- **Class 1:** Σε αυτό το στάδιο παρουσιάζει η ομάδα ένα πλήρες λειτουργικό μονοθέσιο έτοιμο για αγώνες.

Αναλυτικά οι δυναμικές και στατικές αξιολογήσεις αναφέρονται στο παρακάτω γράφημα 1.



Γράφημα 1: Πόντοι για κάθε αγώνισμα [22]

Ο διαγωνισμός αυτός, χάρη στο διεθνές κύρος που του προσδίδει η υποστήριξη τεχνολογικών κολοσσών όπως IBM, Jaguar, Ford, Daimler, Chrysler, Shell, Bosch, Audi, BMW, Dekra, Mahle, Brunel, Continental κ.α. προσελκύει κάθε χρόνο περισσότερες από 150 συμμετοχές από όλο τον κόσμο.



Εικόνα 1: Φωτογραφία από διαγωνισμό με όλες τις ομάδες που συμμετείχαν [23]

Έτσι και στο δικό μας εκπαιδευτικό ίδρυμα το ακαδημαϊκό έτος 2015 μια ομάδα προπτυχιακών φοιτητών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών, πλαισιωμένη και με καθηγητές του τμήματος, ξεκίνησε τον σχεδιασμό του πρώτου αγωνιστικού μονοθέσιου τύπου Formula Student.

Το εγχείρημα αυτό είναι ένα ρίσκο και συνάμα μια επένδυσή για το μέλλον κάθε ιδρύματος. Η όλη διαδικασία από την λήψη της ιδέας, την έγκριση του τμήματος, την συγκρότηση αξιόπιστης και εργατικής ομάδας, την εύρεση χορηγών και επενδυτών μέχρι και την κατασκευή και μελετή, την συμμετοχή σε διαγωνισμούς αποτελεί ένας συνέχη αγώνα της Ομάδας με τον χρόνο και τον ανταγωνισμό των άλλων ιδρυμάτων.

Κάθε μια ομάδα αποτελούμενη από φοιτητές πρέπει να δημιουργήσει στο εσωτερικό της μικρές υποομάδες με την κάθε μια από αυτές να αναλαμβάνει και να προσπαθεί να φέρει σε πέρας την αποστολή που της έχει ανατεθεί. Ομάδα φοιτητών αναλαμβάνει την σχεδίαση, άλλη την δυναμική μελέτη, άλλη την κατασκευή. Υπάρχει άλλη ομάδα για τον κινητήρα, άλλη για το σύστημα πέδησης, άλλη για την αεροδυναμική σχεδίαση, το σύστημα πλοήγησης και άλλους πολλούς τομείς. Όπως είναι προφανές υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των υποομάδων καθώς οι αποφάσεις και τα αποτελέσματα της κάθε ομάδας μπορεί να φέρει αλλαγές στην άλλη. Γι αυτό το λόγο κανονίζονται συναντήσεις ανά τακτα χρονικά διαστήματα μεταξύ των ομάδων ώστε να ανταλλάσσουν απόψεις και δεδομένα που στόχο έχουν την χρήση των πιο σύγχρονων υλικών και κατεργασιών ώστε να είναι ένα εξωραϊστικά αποδοτικό μονοθέσιο, με υψηλές επιδόσεις, μικρό βάρος και χαμηλή κατανάλωση.

Εξίσου σημαντικό ρόλο παίζει και η επικοινωνιακή ομάδα η οποία προσπαθεί να προβάλλει το προϊόν προσελκύοντας έτσι νέους χορηγούς και επενδυτές οι οποίοι είναι η τροφή για την ομάδα που έχει πολλά έξοδα και εθελοντική εργασία των φοιτητών. Καταλήγοντας γίνεται αντιληπτό ότι τον διαγωνισμό θα μπορούσε να τον χαρακτηρίσουμε ως πολυτμηματικό. Δεν είναι δηλαδή μόνο μηχανολογικός αλλά συντελούν σε αυτόν και άλλοι τομείς όπως ηλεκτρολογία, αυτοματισμοί, marketing. Αν το μονοθέσιο λοιπόν είναι ανταγωνιστικό και πρωταγωνιστής θα φέρει διακρίσεις σε όλο τα τμήματα που θα συμμετάσχουν για την δημιουργία του και κατεπέκταση για όλο το τεχνολογικό ίδρυμα.

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.

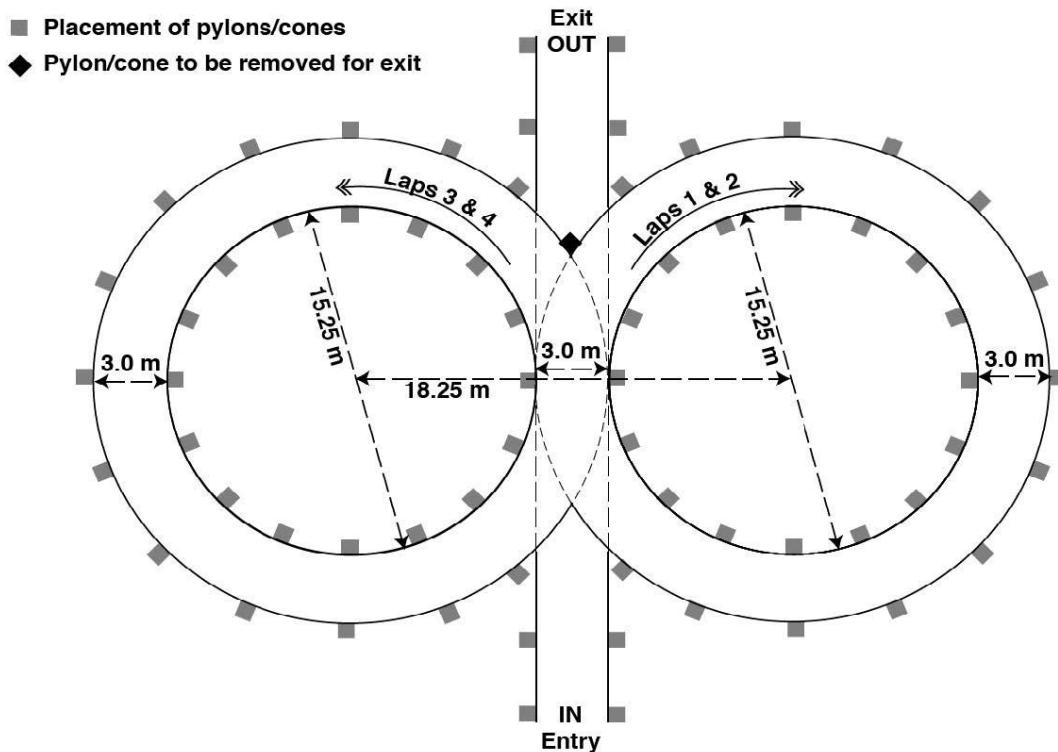
Τα δυναμικά αγωνίσματα δοκιμάζουν πλήρως τις δυνατότητες του μονοθέσιου. Στο acceleration δοκιμάζεται η επιτάχυνση. Το μονοθέσιο επιταχύνει από στάση. Το μήκος που πρέπει να καλύψει είναι 75 m και βαθμολογείται ανάλογα με το χρόνο που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωσή τους. Μέγιστη βαθμολογία είναι 75 βαθμοί Σχήμα 1.2



Σχήμα 1.2: Μονοθέσιο Grimsel της ομάδας AMZ Racing με έδρα το ETH Zurich. [26]

Στο διαγωνισμό του skid-pad 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.

FSAE SKIDPAD LAYOUT



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα της χάραξης πίστας skid-pad. Φαίνεται και η σειρά με την οποία πρέπει να καλυφθούν οι τέσσερις συνολικά περιστροφές [24].

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 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 CO₂ που παράγεται. Θεωρείται πως κάθε λίτρο αμόλυβδης βενζίνης παράγει 2.31 kg CO₂. 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 κόστους 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.

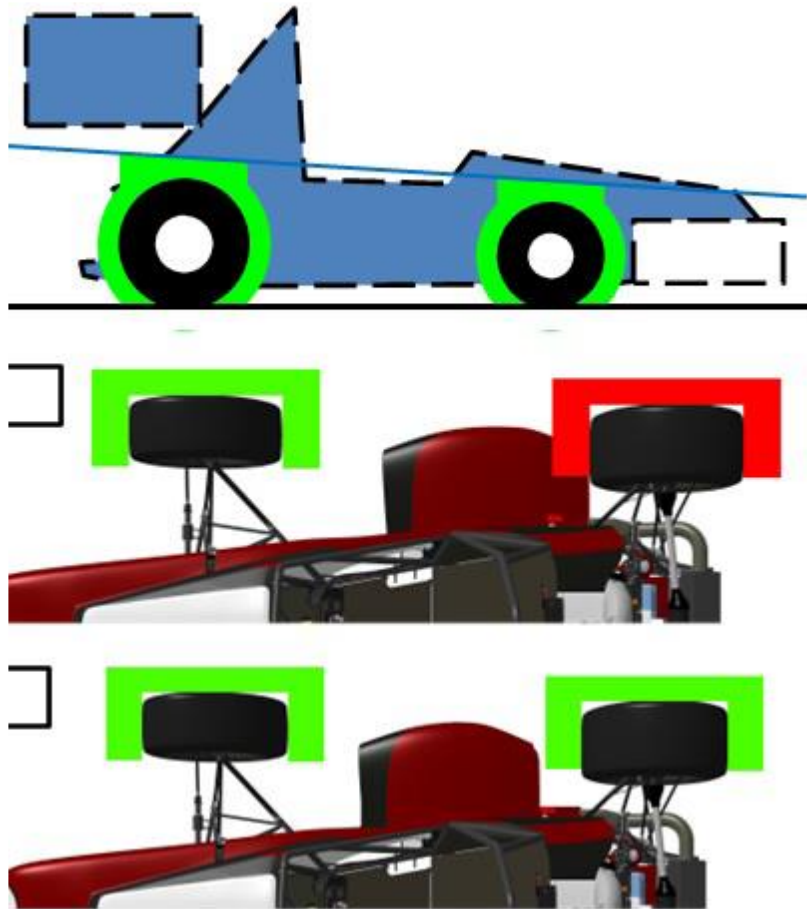
Για τους αναγνώστες οι οποίοι δεν γνωρίζουν το διαγωνισμό και επιθυμούν περισσότερες πληροφορίες πάνω στους κανονισμούς μπορούν να επισκεφθούν τον ιστότοπο: <http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=e179e647-cb8c-4ab0-860c-ec69aae080a3>.

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.

1.2 ΑΡΧΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

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 1.4.



Σχήμα 1.4: 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 [24].

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.



Σχήμα 1.5: Μονοθέσιο Monash Motorsport 2013 με έδρα το Monash University [27].

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 1.5), 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 1.6).



Σχήμα 1.6: Μονοθέσιο Ka. Raceing Kit 2012 με έδρα το Karlsruhe Institute of Technology [28].

Η τρίτη επιλογή ήταν ένας συνδυασμός των δύο. Η τρίτη επιλογή θεωρείται η καταλληλότερη. Επομένως, σε επόμενο στάδιο θα πρέπει να επιλεγθεί 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 πρέπει 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 να 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.

2 ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΩΝ

Η αεροδυναμική υπάγεται στο πεδίο της ρευστοδυναμικής και είναι ο κλάδος της δυναμικής που ασχολείται με τη ροή του αέρα γύρω από διάφορα σώματα. Η μελέτη της μας βοηθά στο να καθοριστούν οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά τα σώματα, καθώς και να προταθούν διάφορες βελτιώσεις για καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά και συνεπώς καλύτερη απόδοση. Η βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη μείωση της αντίστασης του αέρα, είτε με την επίτευξη μέγιστης άνωσης με ελάχιστη οπισθέλκουσα δύναμη.

A. Κατ' αντικείμενο έρευνας και μελέτης η Αεροδυναμική διακρίνεται σε δύο μεγάλους κλάδους:

- i. την πειραματική αεροδυναμική και
- ii. την υπολογιστική αεροδυναμική.

B. Κατ' αντικείμενο επί των ταχυτήτων που εξετάζει η Αεροδυναμική διακρίνεται σε τρεις επιμέρους κλάδους:

- i. την υπηχητική αεροδυναμική,
- ii. την διηχητική αεροδυναμική και
- iii. την υπερηχητική αεροδυναμική.

Γ. Κατ' αντικείμενο δραστηριοτήτων και εφαρμογών η Αεροδυναμική διακρίνεται στους επιμέρους επιστημονικούς κλάδους (αλφαβητικά):

- i. Αεροναυτική αεροδυναμική (αντικείμενο: αεροπλάνα, διαστημόπλοια, κατευθυνόμενα βλήματα κ.λπ)

- ii. Βιομηχανική αεροδυναμική, (αντικείμενο: ρύπανση ατμόσφαιρας, επίδραση ανέμου στις κατασκευές)
- iii. Εσωτερική αεροδυναμική αντικείμενο: αεριοστρόβιλοι, πυραυλοκινητήρες κ.λπ)
- iv. Μαγνητοϋδροδυναμική, που πρόκειται για μικτό τομέα έρευνας, π.χ. ηλιακός άνεμος, μαγνητόσφαιρα, παραγωγή ρεύματος κ.λπ.
- v. Μηχανολογική αεροδυναμική (αντικείμενο: οχήματα, πλοία και διάφορες μηχανές) και
- vi. Φυσική αεροδυναμική (αντικείμενο: μετεωρολογικά, γεωλογικά, αλλά και βιολογικά φαινόμενα ροής).

Η αεροδυναμική έχει πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παραγωγή ενός οχήματος όπου η αεροδυναμική του συμπεριφορά είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού. Όσο καλύτερα αεροδυναμικά σχεδιασμένο είναι ένα όχημα, τόσο πιο ασφαλές (ευσταθές) και οικονομικό (λιγότερη κατανάλωση καυσίμου) είναι.

Επίσης η αεροδυναμική μας βοηθά να κατανοήσουμε και τον τρόπο με τον οποίο πετούν τα αεροσκάφη και τις δυνάμεις οι οποίες επιδρούν πάνω σε αυτό ή από αυτό. Επίσης είναι σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού και στις πτέρυγες των ανεμογεννητριών, για τη μέγιστη απόδοση. Ακόμη βρίσκει εφαρμογή και σε κτίρια (κυρίως ουρανοξύστες) και σε γέφυρες, καθώς λόγω του αέρα, οι συγκεκριμένες κατασκευές ταλαντώνονται.

Μια από τις σημαντικότερες εξισώσεις για την επίλυση του αεροδυναμικού προβλήματος, είναι η εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση διατήρησης της μάζας (2.1). Σύμφωνα με την συγκεκριμένη εξίσωση, η ποσότητα του ρευστού που εισέρχεται εντός ενός ρευματικού αγωγού σε μόνιμη ροή, είναι ίση με την ποσότητα του ρευστού που εξέρχεται από τον αγωγό. Δηλαδή η παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος του αγωγού. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που υπάρχει μεταβολή της διατομής του αγωγού σε κάποιο σημείο, τότε θα υπάρχει και μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού στο ίδιο σημείο. Δηλαδή αν η διατομή διευρυνθεί, η ταχύτητα σε εκείνο το σημείο θα μειωθεί. Αν η διατομή σμικρυνθεί, η ταχύτητα σε εκείνο το σημείο θα αυξηθεί.

Ο τύπος της εξίσωσης αυτής είναι:

$$Q = \frac{dV}{dt} = u \cdot A = u \cdot \pi \cdot r^2 \quad (2.1)$$

όπου: Q = Παροχή (m^3/s)

V = Όγκος ρευστού (m^3)

t = Χρόνος (sec)

A = Επιφάνεια αγωγού (m^2)

u = Ταχύτητα ρευστού (m/s)

Η επίλυση των αεροδυναμικών προβλημάτων γίνεται ακόμα με διάφορες εξισώσεις μεταξύ άλλων είναι οι εξισώσεις μεταφοράς ορμής Navier-Stokes οι

οποίες είναι ένα σύνολο εξισώσεων, όπου περιγράφουν την κίνηση των ρευστών. Ουσιαστικά, αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν το ρυθμό μεταβολής διαφόρων μεγεθών του ρευστού, ή ακόμη και το ρυθμό μεταβολής της ροής του ρευστού. Η χρήση τους ενδείκνυται και για μόνιμες καταστάσεις, και για στρωτή ροή. Στις πιο περίπλοκες και σύνθετες καταστάσεις όπως όταν έχουμε τυρβώδη ροή, είναι απαραίτητη η χρήση υπολογιστικού λογισμικού, καθώς εκεί επικρατούν σύνθετες καταστάσεις.

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΗΣ

Συμπίεστη και ασυμπίεστη ροή: Συμπίεστη ονομάζεται η ροή στην οποία η πυκνότητα του ρευστού μεταβάλλεται στο ροϊκό πεδίο. Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν ο αριθμός Mach, ο οποίος εξηγείται παρακάτω, είναι μεγαλύτερος από 0.3. Μια συμπίεστη ροή απαιτεί λύση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας, και της εξίσωσης διατήρησης της εντροπίας.

Ασυμπίεστη είναι η ροή κατά την οποία η πυκνότητα του ρευστού παραμένει σταθερή, στο ροϊκό πεδίο, στις όποιες μεταβολές. Περιγράφεται με την εξίσωση διατήρησης της μάζας, ή εξίσωση συνέχειας, και με την εξίσωση διατήρησης της ορμής.

Μόνιμη και μη μόνιμη ροή: Με τον όρο μόνιμη ροή περιγράφεται η ροή κατά την οποία οι ιδιότητες του ρευστού, στο πεδίο ροής, παραμένουν σταθερές στις όποιες μεταβολές του χρόνου.

Η μη μόνιμη ροή, είναι εκείνη κατά την οποία οι ιδιότητες του ρευστού, στο ροϊκό πεδίο, μεταβάλλονται όταν μεταβάλλεται και ο χρόνος.

Ο Αριθμός Reynolds: Ο χαρακτήρας της ροής, καθώς και το πεδίο ταχυτήτων και πίεσεως, καθορίζεται από το σχετικό μέγεθος των δυνάμεων συνεκτικότητας και αδράνειας. Μέτρο συγκρίσεως αυτών των δυνάμεων αποτελεί ο αριθμός Reynolds (2.2). Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος απέδειξε πειραματικά, για πρώτη φορά, ότι η ροή ενός ρευστού δεν γίνεται πάντοτε με ομοιόμορφο τρόπο. Αυτός ο αδιάστατος αριθμός σχετίζεται με τις δυνάμεις αδρανείας του ρευστού, δηλαδή την αντίσταση του ρευστού στην κίνηση και την επιτάχυνση, και με τις δυνάμεις συνεκτικότητας, ή αλλιώς δυνάμεις ιξώδους, δηλαδή με την αντίσταση στην παραμόρφωση του ρευστού. Την έννοια του αριθμού Reynolds εισήγαγε ο George Gabriel Stokes το 1851, όμως πήρε το όνομά του από τον Osborne Reynolds, ο οποίος διέδωσε τη χρήση του το 1883.

Ο τύπος υπολογισμού του αριθμού Reynolds είναι:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (2.2)$$

Όπου: ρ = η πυκνότητα του ρευστού ($\frac{kg}{m^3}$)

u = η μέση ταχύτητα ροής ($\frac{m}{s}$)

d = χαρακτηριστική γραμμική διάσταση (m)

μ = το ιξώδες του ρευστού (Pa·s)

ν =το κινηματικό ιξώδες του ρευστού ($\frac{m^2}{s}$)

Ο αριθμός *Mach*: Όπως ο αριθμός *Re*, έτσι και ο αριθμός *Mach* είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος μπορεί να καθορίσει ένα αεροδυναμικό πρόβλημα. Ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του αντικειμένου, το οποίο κινείται διάμεσο ενός ρευστού, προς την ταχύτητα του ήχου.(2.3)

$$M = \frac{u}{a} \quad (2.3)$$

Όπου: u = ταχύτητα αντικειμένου ($\frac{m}{s}$)

a = ταχύτητα του ήχου ($\frac{m}{s}$)

Επίσης ισχύει ότι:

Όταν $M < 1$, η ροή είναι υποηχητική.

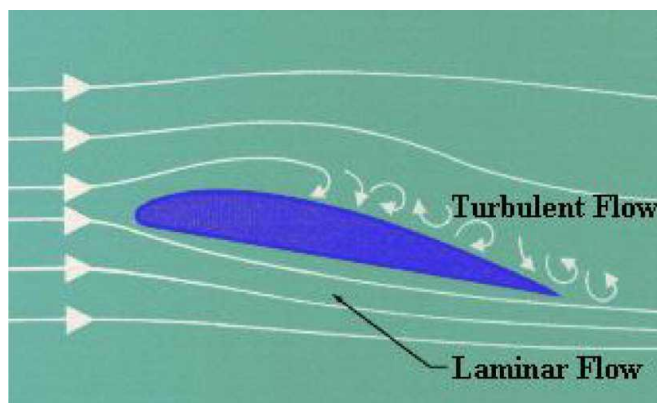
Όταν $M = 1$, η ροή είναι ηχητική.

Όταν $M > 1$, η ροή είναι υπερηχητική.

Γενικότερα είναι δυνατό και ορθό να πούμε ότι «υποηχητικό» είναι κάθε αντικείμενο που κινείται με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου, «ηχητικό» κάθε αντικείμενο που κινείται με ταχύτητα ίση με αυτήν του ήχου και τέλος, «υπερηχητικό» κάθε αντικείμενο που κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου.

2.3 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ

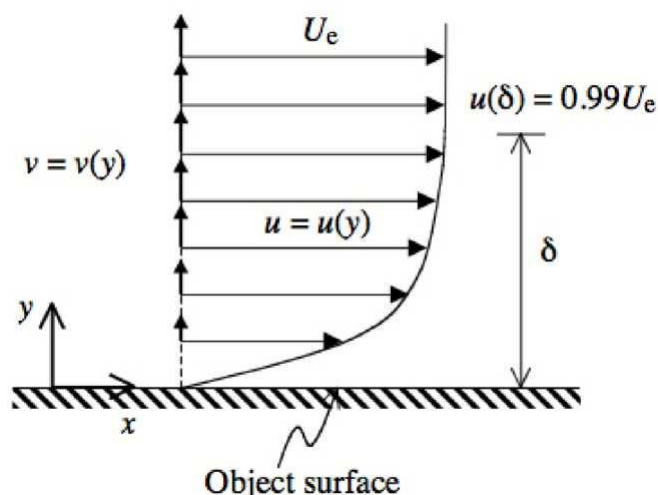
Ο αριθμός Reynolds χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των διαφορετικών καθεστώτων ροής. Υπάρχουν τρία βασικά καθεστώτα ροής. Αυτά είναι η στρωτή ροή, η μεταβατική ή ενδιάμεση ροή και η τυρβώδης ροή. Όταν οι δυνάμεις αδράνειας είναι μικρές σε σχέση με τις δυνάμεις συνεκτικότητας, άρα ο αριθμός Reynolds είναι μικρός, η ροή επηρεάζεται σημαντικά από τις δυνάμεις συνεκτικότητας και είναι σταθερή, ή αλλιώς στρωτή. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή οι δυνάμεις αδράνειας είναι σημαντικές σε σχέση με τις δυνάμεις συνεκτικότητας, άρα και ο αριθμός Reynolds είναι μεγάλος, τότε η ροή επηρεάζεται από τις δυνάμεις αδράνειας και χαρακτηρίζεται ασταθής, ή αλλιώς τυρβώδης. Στην τυρβώδη ροή τα ρευστά έχουν ακανόνιστη κίνηση και η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού μεταβάλλεται με το χρόνο κατά μέγεθος και διεύθυνση.



Εικόνα 2.1: Τυρβώδης και στρωτή ροή γύρω από τομή πτερυγίου [32]

2.4 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

2.4.1 Το οριακό στρώμα και τα χαρακτηριστικά του



Σχήμα 2.1: Το οριακό στρώμα και τα χαρακτηριστικά του [14]

Το πραγματικό ρευστό αποτελείται από μόρια, και θεωρείται ως συνεχές μέσο όταν ο αριθμός των μορίων είναι μεγάλος. Καθώς το ρευστό κινείται, κινούνται και τα μόρια, και έτσι υπάρχουν επαφές και συγκρούσεις μεταξύ τους, οι οποίες προκαλούν μεταφορά ορμής, ενέργειας και μάζας, δίνοντας στο ρευστό τις ιδιότητες μεταφοράς. Μια από αυτές τις ιδιότητες είναι και η εσωτερική τριβή ή συνεκτικότητα, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την αντίστασή του σε κάθε αλλαγή του σχήματός του.

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ροή ρευστού γύρω από ένα στερεό σώμα, επακόλουθο των εσωτερικών τριβών είναι και η προσκόλληση του ρευστού στην επιφάνεια, ώστε η ροϊκή ταχύτητα να μηδενίζεται. Γενικά το ροϊκό πεδίο γύρω από ένα σώμα χωρίζεται σε δύο περιοχές. Στην περιοχή η οποία βρίσκεται πολύ κοντά

στην επιφάνεια του στερεού σώματος και στην περιοχή του εξωτερικού ροϊκού πεδίου όπου βρίσκεται μακριά από αυτήν.

Στην πρώτη περιοχή, η επίδραση του ιξώδους (των εσωτερικών δυνάμεων δηλαδή), παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ροής και η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική. Στη δεύτερη περιοχή, οι δυνάμεις αυτές δεν είναι τόσο καθοριστικές και η ροή ελέγχεται από τις δυνάμεις αδράνειας και πίεσεως. Η μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού από $u=0$ σε $u=u_{\infty}$ στο εξωτερικό πεδίο πραγματοποιείται εντός μιας μεταβατικής περιοχής που ονομάζεται *οριακό στρώμα*. Στο οριακό στρώμα ισχύει ο νόμος της τριβής του Newton, σύμφωνα με τον οποίο η διατμητική τάση που αναπτύσσεται εξαιτίας της τριβής είναι:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

όπου: μ = το ιξώδες του ρευστού (Pa·s)

$\frac{du}{dy}$: η μεταβολή της ροϊκής ταχύτητας στο οριακό στρώμα

Η μεταβολή $\frac{du}{dy}$ πραγματοποιείται μέσα σε μια απόσταση από τη στερεή επιφάνεια στην οποία η ταχύτητα γίνεται ίση με την ταχύτητα της ελεύθερης ροής, $u=u_{\infty}$. Αυτό το εύρος της περιοχής μεταβολής της ταχύτητας ονομάζεται πάχος οριακού στρώματος δ και κατά τη διεύθυνση της ροής αυξάνεται. Πάντως το οριακό στρώμα δεν έχει συγκεκριμένο πάχος διότι η εξίσωση των ταχυτήτων $u = u_{\infty}$ συντελείται στο άπειρο. Έτσι πάχος οριακού στρώματος ορίζεται η απόσταση δ , όπου η ταχύτητα u διαφέρει κατά 1% από την ταχύτητα του ελεύθερου ροϊκού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα στην απόσταση y είναι $u=0.99 \cdot u_{\infty}$.

Ακόμη ένας σημαντικός όρος είναι το πάχος μετατοπίσεως δ^* , το οποίο ορίζεται ως το πάχος του στρώματος κατά το οποίο μετατίθεται (ανυψώνεται) η εξωτερική ροή πάνω από την πλάκα, για τη διατήρηση της συνέχειας μέσα στο οριακό στρώμα πάχους δ , σε ισοδύναμη ιδανική ροή. Αυτό γίνεται διότι η ταχύτητα μετακινήσεως της μάζας εντός του οριακού στρώματος ελαττώνεται, κάτι το οποίο προκαλεί και απώλεια της ποσότητας κινήσεως. Έτσι ορίζεται και το πάχος απώλειας της ορμής θ , που είναι το πάχος θ ενός ρευστού ταχύτητας u_{∞} και ορμής ίσης με το ποσόν κατά το οποίο ελαττώνεται η ορμή της ροής στο πραγματικό οριακό στρώμα πάχους δ .

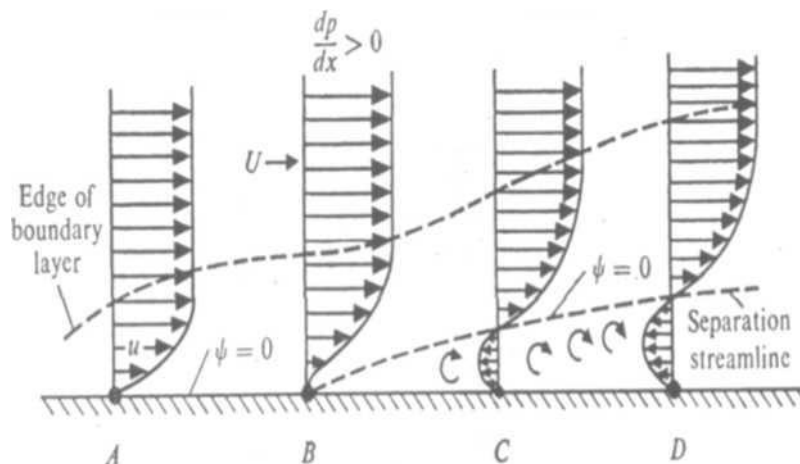
Τέλος υπάρχει και ο σχηματικός συντελεστής H , ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο του πάχους μετατοπίσεως δ^* προς το πάχος απώλειας της ορμής θ , και σχετίζεται με τη μεταβολή του σχήματος του οριακού στρώματος.

Η αποκόλληση του οριακού στρώματος είναι ένα φαινόμενο το οποίο λαμβάνει τόπο όταν η πίεση αυξάνεται αρκετά, και για το λόγο αυτό η ταχύτητα στο οριακό στρώμα αντιστρέφεται κοντά στην επιφάνεια της πλάκας και έτσι αυτό αποκολλάται.

2.4.2 Η μορφή του οριακού στρώματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λόγω των τριβών αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις στο ρευστό. Όμως όταν αυτό είναι εντός του οριακού στρώματος τότε υπόκειται και σε μια μεταβολή πίεσης η οποία καθορίζεται από τη δυναμική ροή, και έχει μια αναλογική σχέση με το πάχος του οριακού στρώματος. Σε περίπτωση ελάττωσης της πίεσης κατά τη διεύθυνση της ροής, το πάχος του οριακού στρώματος ελαττώνεται και αυτό. Όταν η πίεση αυξάνεται κατά τη διεύθυνση της ροής, αυξάνεται και το πάχος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 στη θέση Β, οι διατμητικές τάσεις και η αύξηση της πίεσης, προκαλούν ελάττωση της ορμής στο οριακό στρώμα και σε κάποιο σημείο ανακόπτεται. Μέχρι να γίνει αυτό η ροή μπορεί να θεωρηθεί στρωτή και έτσι η περιοχή ονομάζεται στρωτό οριακό στρώμα.

Έπειτα από τη θέση Β, του ίδιου σχήματος, η μορφή του οριακού στρώματος αλλάζει. Σε εκείνο το σημείο αρχίζουν να δημιουργούνται στρόβιλοι, και πλέον παύει να υπάρχει στρωτή ροή. Το παραπάνω ονομάζεται αναστροφή της ροής και η θέση όπου αρχίζει να γίνεται αυτό ονομάζεται σημείο αποκόλλησης. Δηλαδή όταν η πίεση αυξηθεί αρκετά, η ταχύτητα στο οριακό στρώμα αντιστρέφεται κοντά στην επιφάνεια της πλάκας και το οριακό στρώμα αποκολλάται. Έτσι πέρα από τη θέση Β, το οριακό στρώμα αποκολλάται. Για λείες πτέρυγες ή αεροτομές το στρωτό οριακό στρώμα εμφανίζεται στο χείλος πρόσπτωσης, ενώ το τυρβώδες στο χείλος εκφυγής, έννοιες οι οποίες θα αναλυθούν σε παρακάτω κεφάλαιο.



Σχήμα 2.2: Η αναστροφή της ροής στο οριακό στρώμα

2.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από τον ορισμό της μάζας $m = \iiint_V \rho dV$ και την αρχή διατήρησης της μάζας $dm/dt = - (\oint_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n})dS$, 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. Μία μορφή της εξίσωσης της συνέχειας είναι για παράδειγμα η εξίσωση Bernoulli ή αλλιώς εξίσωση ενέργειας.

Η Εξίσωση 2.5 γράφεται αλλιώς:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

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 δρυσών 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 2.7.

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - (\nu + \nu_T) \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (2.7)$$

Η εξίσωση 2.6 μαζί με την εξίσωση συνέχειας εξίσωση 2.7 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 τέσσερα μοντέλα τύρβης. Το μοντέλο "Laminar", μοντέλο "k-ε", το μοντέλο "SST k-ω" και το μοντέλο "Spalart-Allmaras". Και τα τέσσερα 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.

Το μοντέλο Spalart-Allmaras από την άλλη αποτελείται από μία μερική διαφορική εξίσωση. Το μοντέλο αυτό φέρει καλύτερη δυνατότητα σύγκλισης και χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα εξωτερικής ροής όπως αυτό που

παρουσιάζεται στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία. Το μοντέλο παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε υπολογισμούς σε οριακό στρώμα με μεγάλη κλίση πίεσης.

2.6 ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Σε ένα αντικείμενο υπάρχουν τέσσερις δυνάμεις καθώς κινείται. Η δύναμη ανύψωσης, η οποία ωθεί το αντικείμενο προς τα επάνω εξαιτίας της συμπεριφοράς του. Η δεύτερη δύναμη είναι αυτή που δέχεται το αντικείμενο λόγω της κίνησης του μέσα στον αέρα και είναι η δύναμη αντίστασης του αέρα. Το σύνολο των τριβών και των στροβιλισμών είναι η αιτία αυτής της δεύτερης δύναμης. Έπειτα έχουμε τη δύναμη ώθησης, η οποία προέρχεται από τη δύναμη που δίνει ο κινητήρας που τυχόν έχει το αντικείμενο για να κινείται και να επιταχύνει. Και τέλος έχουμε τη δύναμη της βαρύτητας, που δημιουργείται από το βάρος του αντικειμένου.

- Η δύναμη ανύψωσης (Lift): Αυτή η δύναμη εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το σχήμα, το μέγεθος και την ταχύτητα του αντικειμένου.
- Η οπισθέλκουσα (Drag): Η οπισθέλκουσα δύναμη, είναι η αντίσταση του αέρα στο αντικείμενο και κατευθύνεται κατά μήκος και αντίθετα της φοράς της κίνησης. Όπως και η δύναμη της ανύψωσης, έτσι και η οπισθέλκουσα εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου και την ταχύτητά του.
- Το βάρος (Weight): Το βάρος κατανέμεται σε όλο το αντικείμενο, αλλά για να το προσδιορίσουμε χρησιμοποιείται το κέντρο βάρους.
- Η δύναμη ώθησης (Thrust): Η δύναμη ώθησης υπερνικά την οπισθέλκουσα δύναμη και έτσι έχουμε την κίνηση του αντικειμένου.

3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΒΟΗΘΗΜΑΤΑ

Η σχέση μεταξύ αυτοκινήτου και αεροδυναμικής έχει αρχίσει τελευταία να απολαμβάνει της αρμόζουσας προσοχής από όλους εκείνους που ασχολούνται με την αυτοκίνηση. Η αντίληψη της αεροδυναμικής διαφέρει σημαντικά ακόμα και μεταξύ των σχεδιαστών και μηχανικών που εμπλέκονται στη διαδικασία της εξέλιξης.

3.1 ΑΡΧΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Όταν το αυτοκίνητο βρίσκεται σε κίνηση δέχεται και εξασκεί δυνάμεις σε δύο κυρίως «τομείς»: το οδόστρωμα και το στρώμα αέρος που το περιβάλλει. Αεροδυναμική επομένως είναι το πεδίο δυνάμεων που απορρέουν από την κίνηση ενός στερεού σώματος μέσα στον αέρα σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Ο αέρας δημιουργεί προβλήματα στα αυτοκίνητα [8]

Η γνώση των παραμέτρων της αεροδυναμικής που σχετίζονται με το αυτοκίνητο θεωρείται αναγκαία προκειμένου να βελτιώσουμε τους ακόλουθους σημαντικούς τομείς επιδόσεων:

1. Οικονομία καυσίμου.
2. Υψηλές Ταχύτητες.
3. Σταθερότητα Χειρισμών και Υψηλές Ταχύτητες.
4. Σταθερότητα στους Πλευρικούς Ανέμους.
5. Ψύξη Μηχανής και Φρένων.
6. Μειωμένοι Θόρυβοι Αέρος.
7. Εξαερισμός.
8. Απόψυξη.
9. Κλιματισμός.
10. Μείωση του ποσοστού σκόνης και λάσπης που εναποτίθεται στο αυτοκίνητο.
11. Κράτημα των υαλοκαθαριστήρων στη θέση τους.

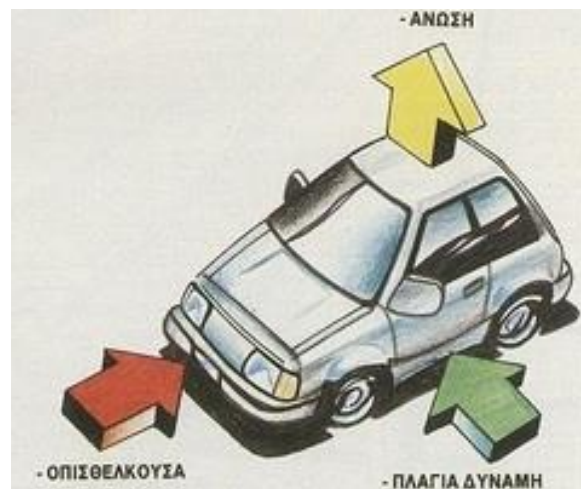
Η αεροδυναμική σήραγγα είναι το «εργαλείο» που χρησιμοποιείται ευρέως για την αεροδυναμική βελτίωση των επιδόσεων των αυτοκινήτων που είναι, όπως φαίνεται, εξαιρετικά εκτενής. Τα τελευταία χρόνια οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων και τα ερευνητικά κέντρα σε όλο τον κόσμο διαθέτουν τις δικές τους αεροδυναμικές σήραγγες ευρείας κλίμακας και υψηλών επιδόσεων. Απόδειξη της πρακτικής αυτής είναι ότι η «αεροδυναμικότητα» ενός αυτοκινήτου θεωρείται προϋπόθεση για την επιτυχία του στην αγορά. Ας εξετάσουμε πρώτα τη σχέση που υφίσταται μεταξύ αυτοκινήτου και αεροδυναμικής. Είναι σημαντικό σ' αυτό το σημείο να εξετάσουμε αυτήν τη σχέση γιατί, όπως προαναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο αέρας εξασκεί επάνω στο αυτοκίνητο ορισμένες δυνάμεις και ροπές που στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να αντιμετωπίσουμε χρησιμοποιώντας διάφορα αεροδυναμικά βοηθήματα.



Σχήμα 3.2: Οι τρεις βασικές δυνάμεις που εξασκεί ο αέρας στα αυτοκίνητα [8]

Οι τρεις δυνάμεις που επιδρούν στο αυτοκίνητο που βρίσκεται εν κινήσει είναι η οπισθέλκουσα, η άνωση και η πλευρική δύναμη σχήμα 3.2. Οπισθέλκουσα είναι η δύναμη που εμποδίζει το αυτοκίνητο από το να κινείται προς τα εμπρός, άνωση είναι η δύναμη που σηκώνει το αυτοκίνητο από το οδόστρωμα (απώλεια πρόσφυσης) και η πλευρική δύναμη είναι εκείνη που σπρώχνει το αυτοκίνητο από το πλάι (οι

πλευρικοί άνεμοι έχουν συνήθως σαν αποτέλεσμα την απώλεια ευθύγραμμης κίνησης ή την ανατροπή του αυτοκινήτου σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Ο αέρας τείνει να ανασηκώσει το αυτοκίνητο [8]

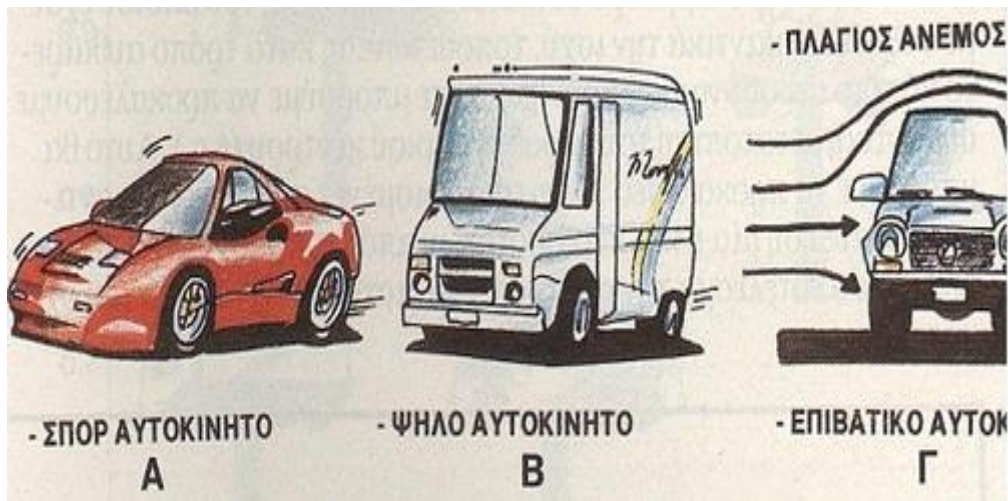
Υπάρχουν τρεις αεροδυναμικές συνιστώσες που συμβάλλουν σημαντικά στην ευστάθεια ή μη του αυτοκινήτου. Η πρώτη είναι η "γωνία προσβολής" του πρόσθιου τμήματος του αυτοκινήτου από τα αερονημάτια, που συμβάλλει στην ανύψωσή του γύρω από το κέντρο βάρους του. Αυτή η συνιστώσα γύρω από το κέντρο βάρους προκαλεί τη "ροπή ανατροπής" όπως λέγεται στην αεροδυναμική ορολογία. Η ροπή ανατροπής επομένως συνδέεται άμεσα με τη γωνία προσβολής του αέρα και με την πρόσθια και οπίσθια τάση ανύψωσης του αυτοκινήτου σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Γωνίες πρόσπτωσης ανέμου [8]

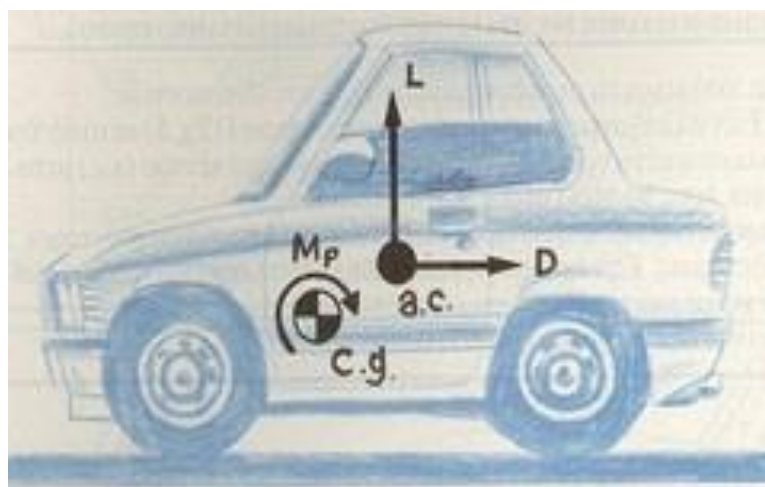
Η δεύτερη συνιστώσα είναι η "ροπή περιστροφής ή περικύλισης" (roll) που προκαλείται από τον πλευρικό άνεμο και τείνει να ανατρέψει το όχημα προς το πλάι. Η τρίτη είναι η "ροπή εκτροπής" που προκαλείται όταν ο αέρας προσβάλλει το αυτοκίνητο υπό γωνία. Αυτή η συνιστώσα έχει και αποτέλεσμα να εκτρέψει το

αυτοκίνητο από την πορεία του. Με λίγα λόγια, βρίσκουμε εξαιρετική δυσκολία στο να οδηγήσουμε το όχημα σε ευθεία γραμμή.



Σχήμα 3.5: Αυτοκίνητα διαφορετικής προσωπικότητας αντιμετωπίζουν διαφορετικά αεροδυναμικά προβλήματα[8]

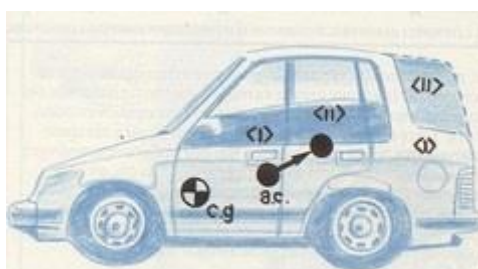
Για τις τρεις κατηγορίες αυτοκινήτων που αντιπροσωπεύουν το σχήμα 3.5 (αν έχουν μπει με τη σειρά!) βλέπουμε ότι εξαιρετική σημασία δίνεται στα μεν αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων στη "ροπή ανατροπής", στα φορηγάκια με μεγάλη πλευρική επιφάνεια στη "ροπή περιστροφής" και στα επιβατικά αυτοκίνητα στη "ροπή εκτροπής". Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι, αν επέμβουμε σε ένα συμβατικό όχημα αυξάνοντας σημαντικά τις επιδόσεις του, τότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε και τα κατάλληλα αεροδυναμικά βοηθήματα προκειμένου να ανατρέψουμε τις νέες αεροδυναμικές ροπές που θα εξασκούνται σ' αυτό.



Σχήμα 3.6: Το κέντρο βάρους και το αεροδυναμικό κέντρο δεν συμπίπτουν[8]

L	: άνωση
M_p	: ροπή ανατροπής
e.g.	: κέντρο βάρους
C_L	: συντελεστής άνωσης
C_{LF}	: συντελεστής άνωσης προσθίου άξονα
C_{LR}	: συντελεστής άνωσης οπισθίου άξονα
a.c.	: αεροδυναμικό κέντρο
C_D	: συντελεστής οπισθέλκουσας
D	: οπισθέλκουσα

Έχουμε εξάσκηση αεροδυναμικής ροπής όταν το σημείο όπου συγκεντρώνονται όλες οι "αεροδυνάμεις", δηλαδή το αεροδυναμικό κέντρο (a.c.) και το κέντρο βάρους (e.g.), δεν συμπίπτουν σχήμα 3.6. ΠΡΟΣΟΧΗ: Αν επέμβουμε σε κάποιο αυτοκίνητο, του οποίου έχουμε αυξήσει σημαντικά την ισχύ, τοποθετώντας κατά τρόπο αυθαίρετο κάποιο αεροδυναμικό βοήθημα, τότε μπορούμε να προκαλέσουμε σημαντική μετατόπιση του αεροδυναμικού κέντρου (a.c.). Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει, κάτω από ορισμένες συνθήκες, σημαντικότερη αύξηση μία ή και περισσοτέρων από τις προαναφερθείσες ροπές με αποτέλεσμα την ανατροπή, περιστροφή ή εκτροπή του οχήματος.

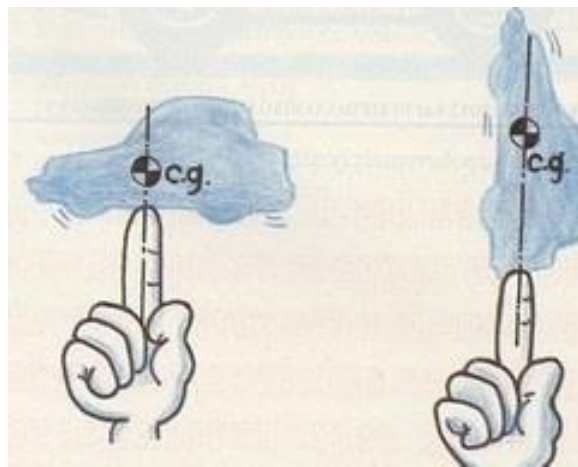


Σχήμα 3.7: Όλες οι δυνάμεις του αέρα εξασκούνται στο αεροδυναμικό κέντρο (a.c.) [8]

3.1.1 Το αεροδυναμικό κέντρο του αυτοκινήτου.

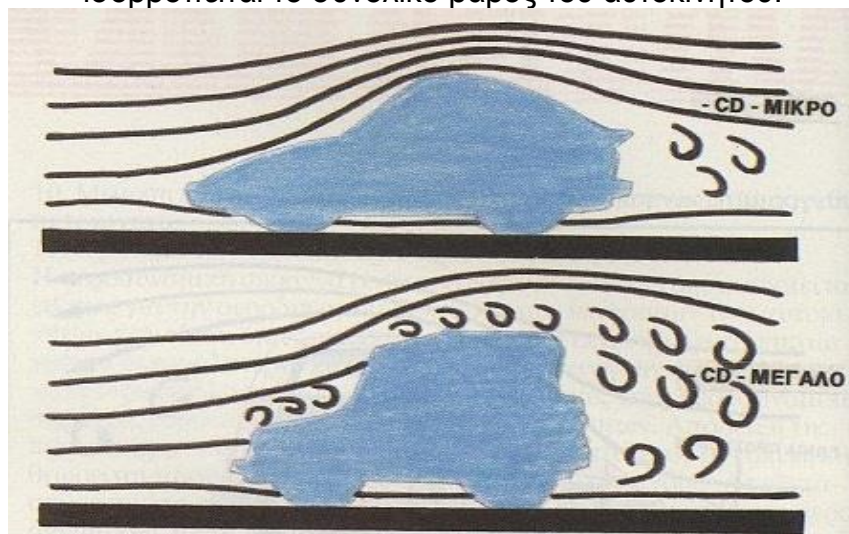
Σημ: Εάν αλλάξουμε το σχήμα του αυτοκινήτου I σχήμα 3.7 σε αυτό του II (διακεκομμένη γραμμή), τότε το αεροδυναμικό κέντρο (a.c.) μετακινείται προς το πίσω μέρος του αυτοκινήτου. Το αεροδυναμικό κέντρο (a.c.) είναι το σημείο που εξασκούνται οι αεροδυνάμεις. Εάν έχουμε την οποιαδήποτε αλλαγή αεροδυνάμεων τότε έχουμε και την ανάλογη μετατόπιση του a.c.

Το κέντρο βάρους του αυτοκινήτου φαίνεται στο ακόλουθω σχήμα 3.8



Σχήμα 3.8: Το κέντρο βάρους είναι το σημείο που ισορροπεί το βάρος του αυτοκινήτου [8]

Το κέντρο βάρους του αυτοκινήτου (e.g.) είναι το σημείο όπου εξασκείται ή ισορροπείται το συνολικό βάρος του αυτοκινήτου.

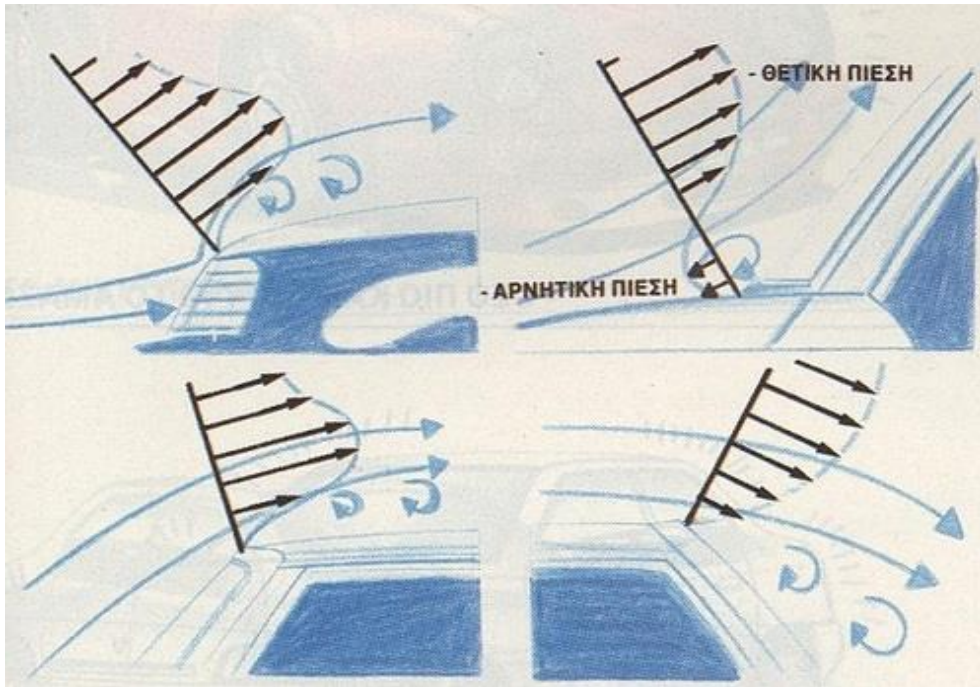


Σχήμα 3.9: Οι στρόβιλοι δημιουργούν οπισθέλκουσα[8]

3.1.2 Αεροδυναμική οπισθέλκουσα και στροβίλοι (περιδίνηση, τυρβώδης ροή).

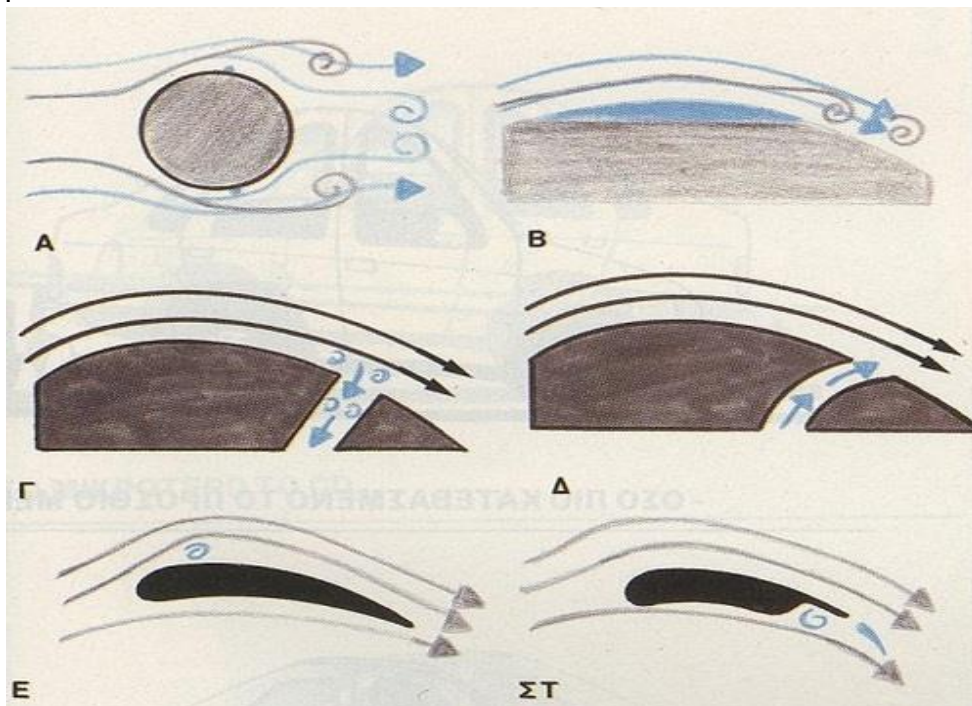
Η αεροδυναμική οπισθέλκουσα χωρίζεται σε τρεις γενικές κατηγορίες, την οπισθέλκουσα πίεσης, την οπισθέλκουσα τριβής και την επαγωγική οπισθέλκουσα (Σχήμα 3.9). Από αυτές τις τρεις, αυτή που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στα αυτοκίνητα είναι η οπισθέλκουσα πίεσης. Η οπισθέλκουσα πίεσης αυξάνεται με τη δημιουργία στροβίλων κατά τη ροή του αέρα γύρω από το αμάξωμα.

1. Σ' εκείνα τα σημεία όπου η μία επιφάνεια με την άλλη σχηματίζουν οξεία γωνία, το στρώμα αέρος θα πάρει οξεία κλίση και θα αποκτήσει μεγαλύτερη ταχύτητα σε μία προσπάθεια να ακολουθήσει τη συγκεκριμένη επιφάνεια. Σε περιπτώσεις που αυτό δεν είναι δυνατό, ο αέρας θα αποκολληθεί από την επιφάνεια σχηματίζοντας στροβίλους. Αυτό συνήθως σημαίνει δημιουργία οπισθέλκουσας,
2. Όταν το στρώμα αέρος κοντά στην επιφάνεια του αμαξώματος δεν μπορεί να κυλήσει πλέον κατά μήκος της επιφάνειας έχουμε αποχωρισμό του στρώματος αέρος και τη δημιουργία στροβίλων πίσω από το αυτοκίνητο Σχήμα 3.10.
3. Η ταχύτητα του αέρα επιβραδύνεται σε σημεία εσοχής, όπως το σημείο συνάντησης του καπό και του παρμπρίζ. Σε γενικές γραμμές δημιουργούνται στροβίλοι σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου έχουμε αποκόλληση του οριακού στρώματος αέρος (είναι το στρώμα που σχεδόν εφάπτεται στην επιφάνεια του αμαξώματος). Όταν το οποιοδήποτε αντικείμενο κινείται μέσα στον αέρα, το οριακό στρώμα κινείται μαζί του. Όμως, καθώς η ταχύτητα του αντικειμένου αυξάνει, το οριακό στρώμα διαταράσσεται. Αυτό το φαινόμενο αποκαλείται αποκόλληση και το σημείο όπου αυτό συμβαίνει αποκαλείται σημείο αποχωρισμού. Οι στροβίλοι δημιουργούνται σε τέτοια σημεία. Όπως θα δούμε αργότερα, είναι αυτά τα σημεία όπου συνήθως επεμβαίνουμε με αεροδυναμικά βοηθήματα προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις των στροβίλων Σχήμα 3.11.



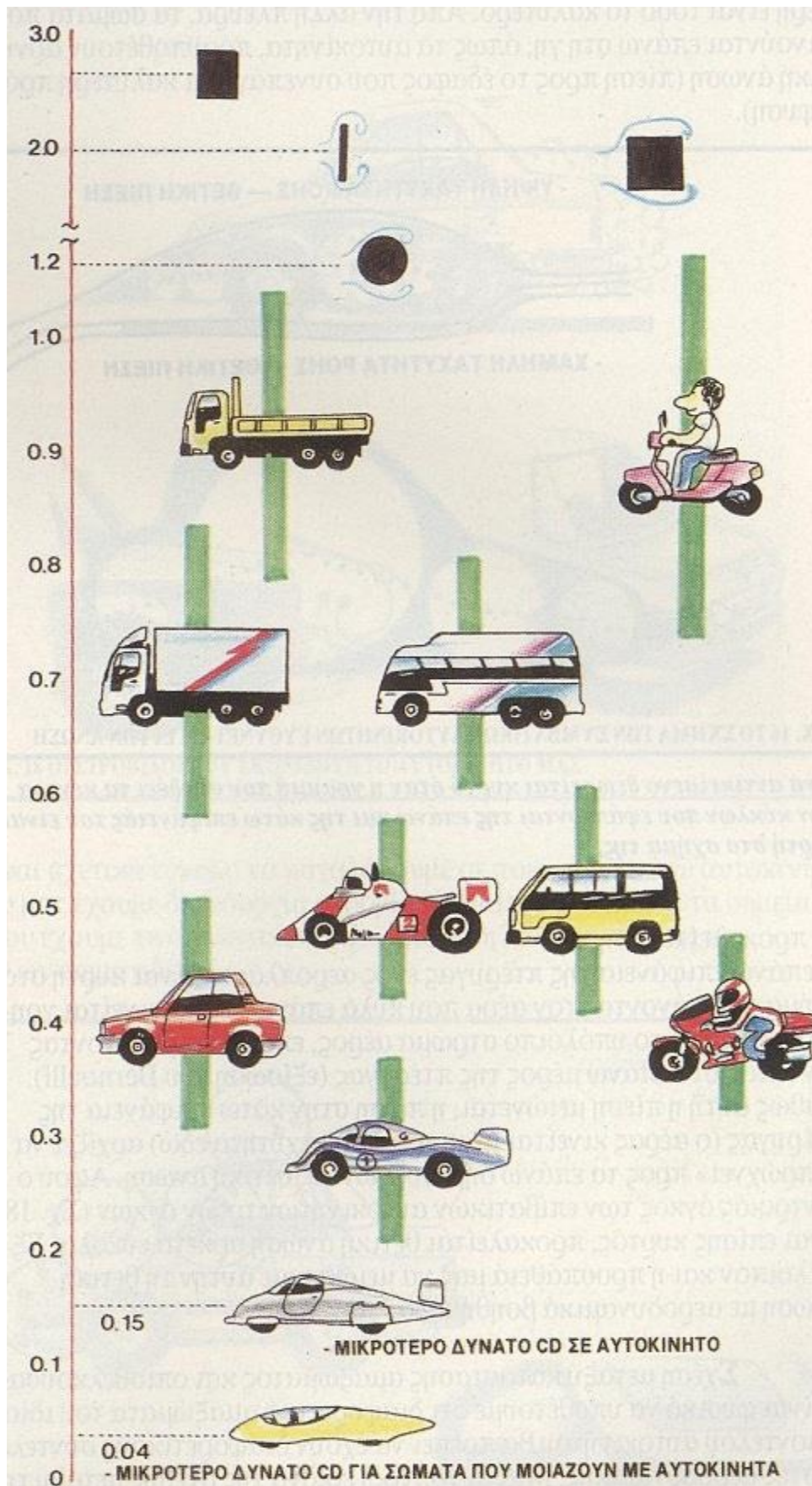
Σχήμα 3.10: Τα σημεία που δημιουργούν προβλήματα στον αέρα [8]

Στρόβιλοι δημιουργούνται στα σημεία εκείνα όπου η ταχύτητα του αέρα μεταβάλλεται δραστικά, δηλαδή στα σημεία όπου έχουμε σαφή απόκλιση της μιας επιφάνειας από την άλλη.



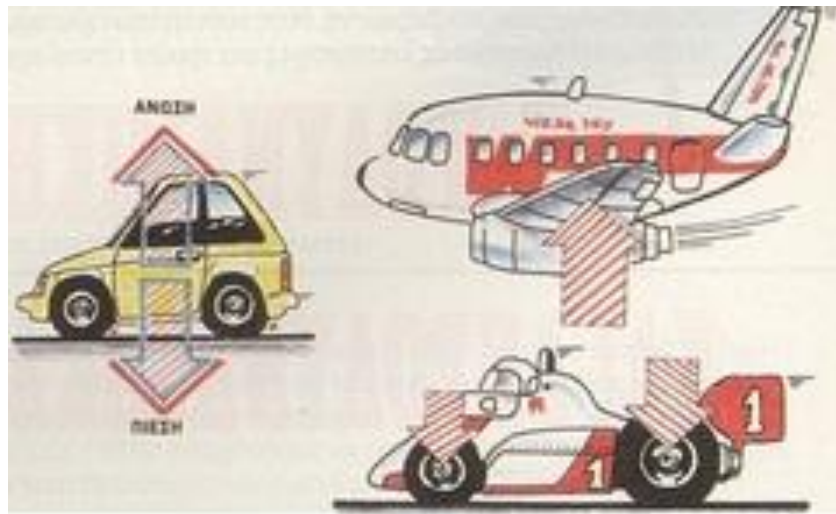
Σχήμα 3.11: Μερικοί τρόποι αντιμετώπισης των στροβίλων [8]

Όσο πιο αργά γίνεται η αποκόλληση του οριακού στρώματος, τόσο μειώνεται η οπισθέλκουσα. Η οπισθέλκουσα μειώνεται όσο πιο πίσω από το αμάξωμα μετακινούνται τα σημεία δημιουργίας στροβίλων.



Σχήμα 3.12: Ο αεροδυναμικός πίνακας που τα λέει όλα[8]

3.1.3 Άνωση



Σχήμα 3.13: Η άνωση απογειώνει το αυτοκίνητό σας [8]

Στις περιπτώσεις σωμάτων που κινούνται στον αέρα, όπως τα αεροπλάνα, η θετική άνωση είναι σημαντική προϋπόθεση και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο το καλύτερο. Από την άλλη πλευρά, τα σώματα που κινούνται επάνω στη γη, όπως τα αυτοκίνητα, προϋποθέτουν αρνητική άνωση (πίεση προς το έδαφος που συνεπάγεται καλύτερη πρόσφυση - Σχήμα 3.13).

Η επάνω επιφάνεια της πτέρυγας ενός αεροπλάνου είναι κυρτή στο σχήμα της, κάνοντας τον αέρα που κυλά επάνω της να κινείται γρηγορότερα από το υπόλοιπο στρώμα αέρος, επομένως μειώνοντας την πίεση στο επάνω μέρος της πτέρυγας (εξίσωση του Bernoulli). Καθώς αυτή η πίεση μειώνεται, η πίεση στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας (ο αέρας κινείται με μικρότερη ταχύτητα εδώ) αρχίζει να «σπρώχνει» προς τα επάνω δημιουργώντας θετική άνωση. Αφού ο κεντρικός όγκος των επιβατικών αυτοκινήτων τριών όγκων είναι επίσης κυρτός, προκαλείται θετική άνωση αρκετά εύκολα. Εξ ου λοιπόν και η προσπάθειά μας να μειώσουμε αυτήν τη θετική άνωση με αεροδυναμικά βοηθήματα.

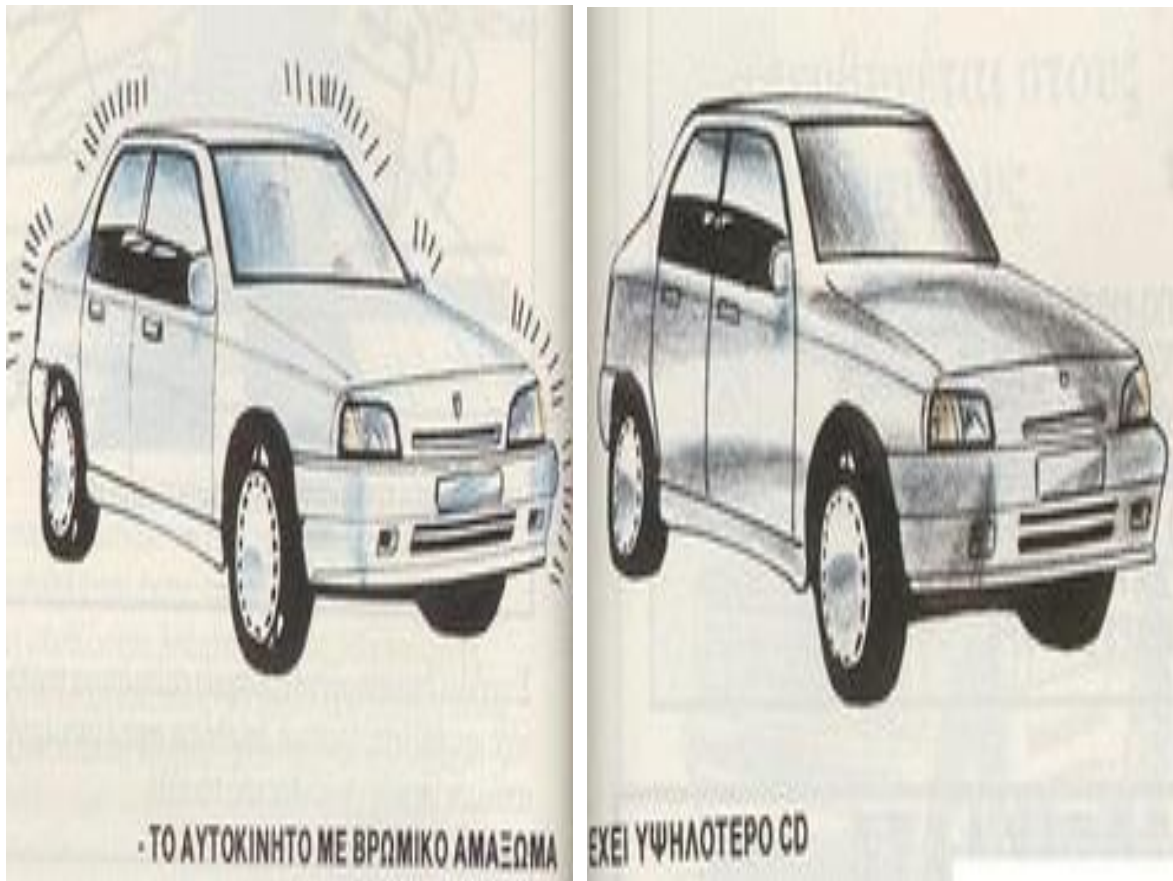
3.1.4 Σχέση μεταξύ καταστασης αμαξώματος και οπισθελκουσας.

Είναι φυσικό να υποθέτουμε ότι διαφορετικά αμαξώματα του ίδιου μοντέλου αυτοκινήτου θα πρέπει να έχουν διαφορετικούς συντελεστές αεροδυναμικής. Μια συνοπτική εικόνα της σχέσης μεταξύ της κατάστασης του αμαξώματος και του συντελεστή οπισθελκουσας προκαλούν και οι ακόλουθοι παράμετροι: πλάτος και πίεση ελαστικών, ποσότητα καυσίμων στη δεξαμενή, θέση καθισμάτων και ορισμένα εξαρτήματα όπως λασπωτήρες και spoiler (σπόιλερ).

Παρακάτω ακολουθούν σε εικόνες 3.1-3.4 μικρές λεπτομέρειες που συμβάλουν στην δράση της οπιθέλκουσας:



Εικόνα 3.1: Οπισθέλκουσα και παλαιότητα οχήματος [8]



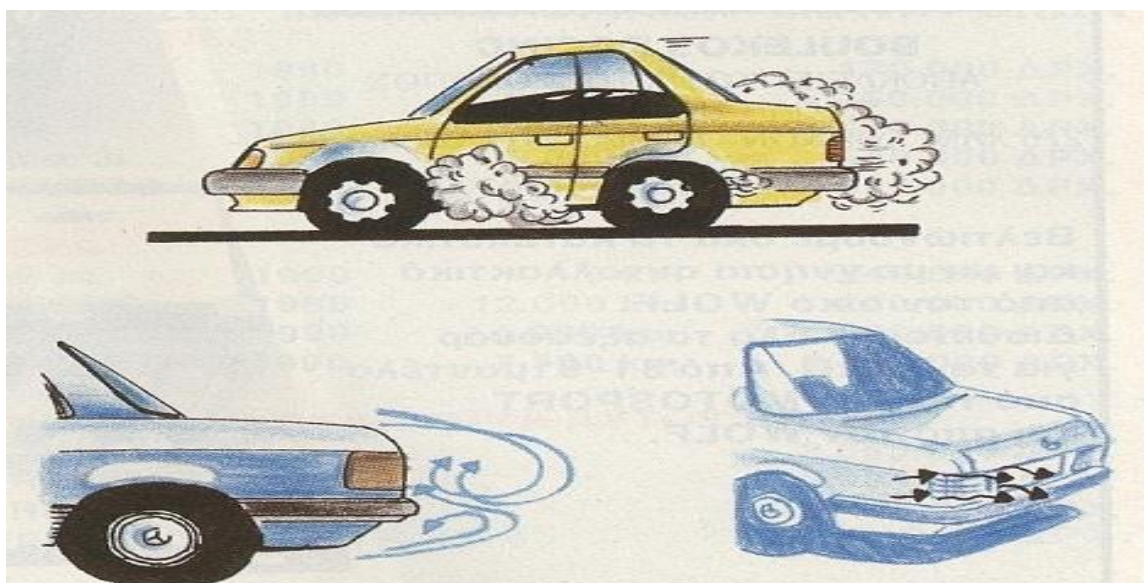
Εικόνα 3.2: Οπισθέλκουσα και καθαριότητα οχήματος [8]



Εικόνα 3.3: Οπισθέλκουσα και πρόσθιο μέρος οχήματος [8]



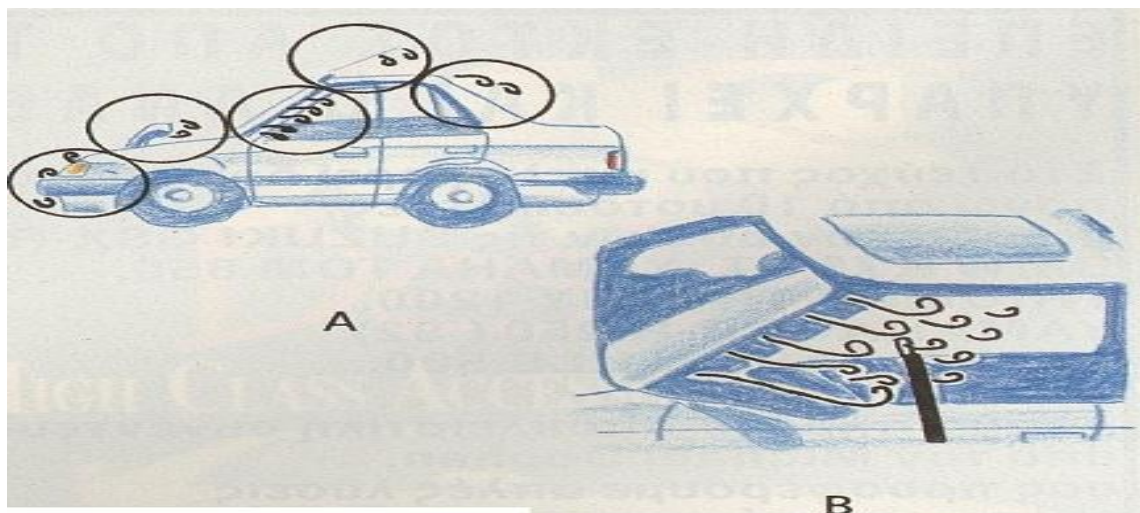
Εικόνα 3.4: Οπισθέλκουσα και χωρητικότητα οχήματος [8]



Σχήμα 3.14: Οι στρόβιλοι που σκονίζουν το αυτοκίνητό σας [8]

Είναι σχετικά εύκολο να καταλάβουμε σε ποιό σημείο του αυτοκινήτου μας

έχουμε δημιουργία στροβίλων, γιατί είναι εκείνα τα σημεία όπου έχουμε τη σημαντικότερη εναπόθεση λάσπης, σκόνης και άλλων σωματιδίων.



Σχήμα 3.15: Οι στρόβιλοι που σφυρίζουν [8]

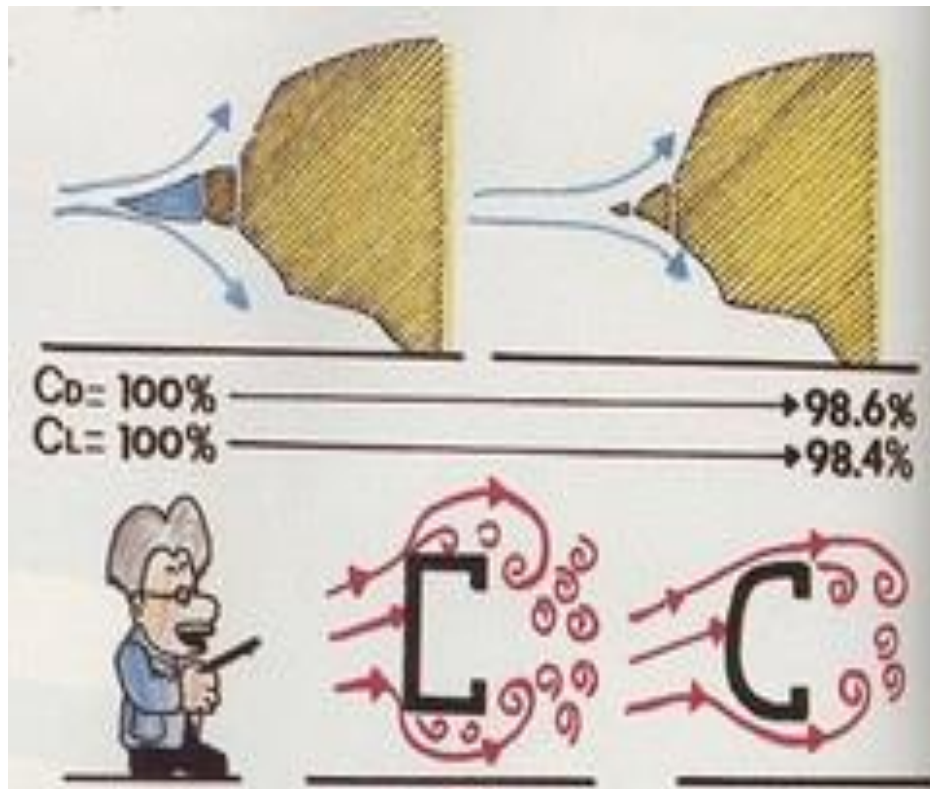
Στο Σχήμα 3.15A βλέπουμε τις περιοχές όπου έχουμε συνήθως τη δημιουργία στροβίλων. Στα σημεία αυτά έχουμε συνήθως και τη δημιουργία θορύβων (π.χ. σφύριγμα).

Στο Σχήμα 3.16B θα μπορούσαμε να έχουμε πιθανότατα ομαλότερη ροή αν τοποθετούσαμε ένα σωστά μελετημένο ανεμοθραύστη.

3.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΒΟΗΘΗΜΑΤΑ

Ένα πολύ σημαντικό ρόλο στον αεροδυναμικό ανταγωνισμό παίζουν τα αεροδυναμικά βοηθήματα. Μέχρι πρόσφατα δινόταν μεγαλύτερο βάρος στο πρόσθιο τμήμα του αυτοκινήτου, για την αεροδυναμική βελτίωσή του. Τον τελευταίο όμως καιρό δίνεται ανάλογη προσοχή και στα πλαϊνά όπως και στο πίσω μέρος του αμαξώματος.

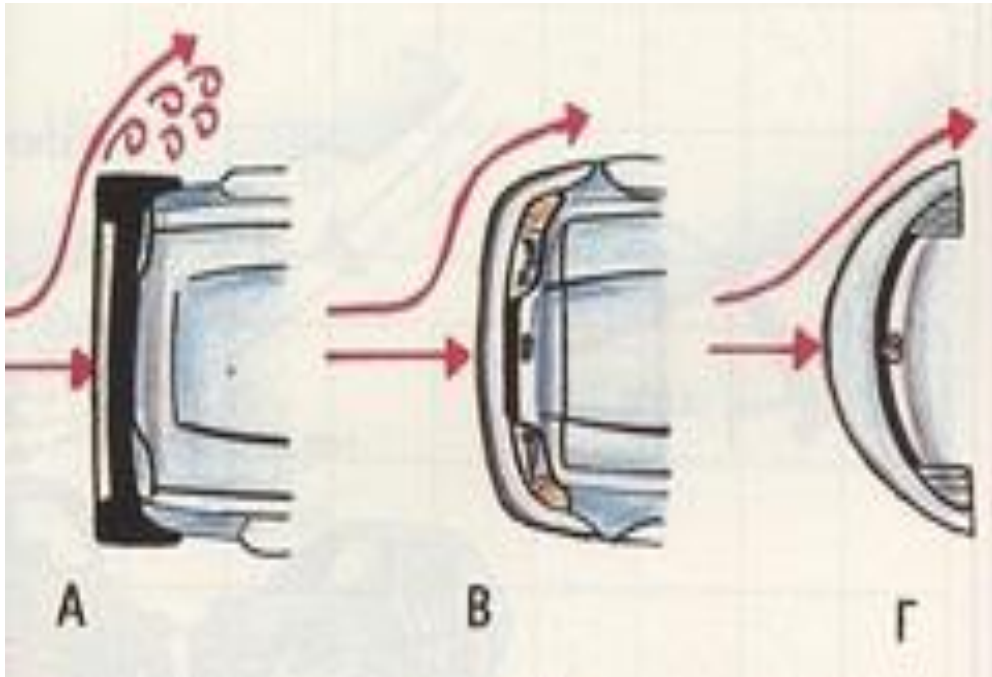
Προσοχή έχει επίσης αρχίσει να δίνεται στην ομαλοποίηση της ροπής του αέρα μέσα στο διαμέρισμα του κινητήρα όπως επίσης και σε όλα τα άλλα σημεία του οχήματος (π.χ. ομαλοποίηση ροής μέσα στην καμπίνα επιβατών κ.λπ.).



Σχήμα 3.16: Οι αεροδυναμικοί προφυλακτήρες [8]

Ιδιαίτερες μελέτες έχουν γίνει για την επιλογή του καλύτερου σχήματος για τον προφυλακτήρα. Συγκρίνοντας τους προφυλακτήρες τριγωνικού σχήματος με τους επίπεδους, έχει διαπιστωθεί ότι οι επίπεδοι προκαλούν στασιμότητα του ρεύματος αέρος και έχουν χειρότερο συντελεστή οπισθέλκουσας και προκαλούν μεγαλύτερη άνωση. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.16 ο τριγωνικός προφυλακτήρας έχει μικρότερη οπισθέλκουσα κατά 1.4% και δημιουργεί άνωση κατά 1.6%.

3.2.1 Βελτίωση προσθιας επιφανειας



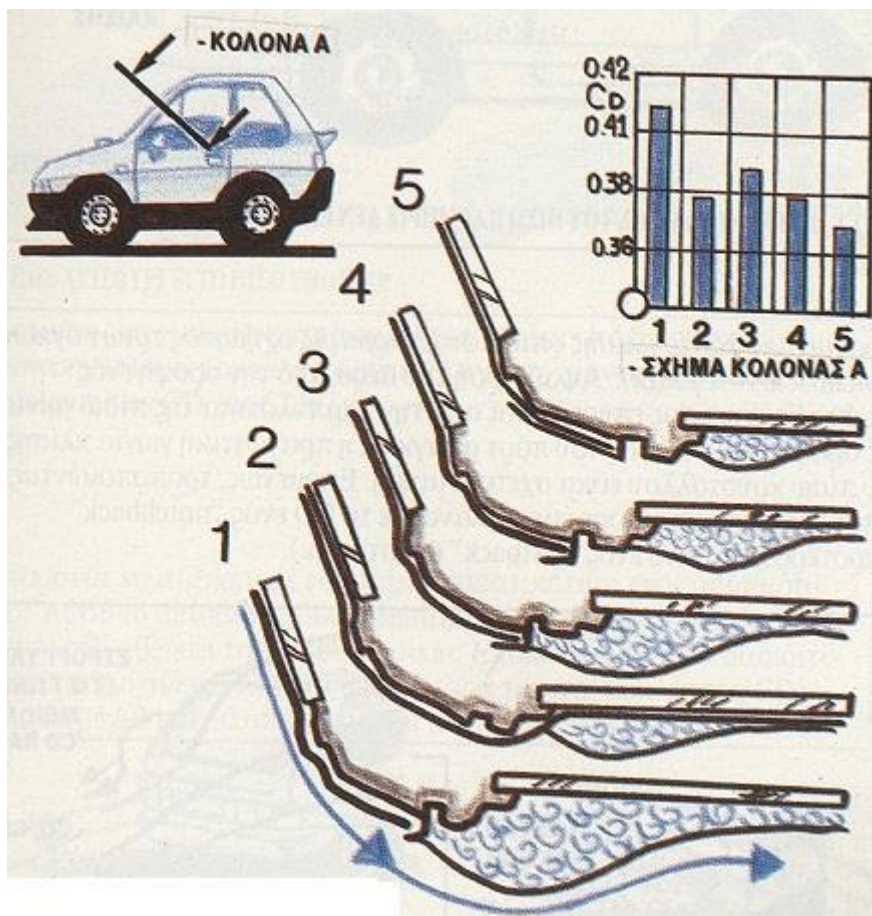
Σχήμα 3.17: Οι προφυλακτῆρες που αγκαλιάζουν [8]

Είναι εξαιρετικής σημασίας όχι μόνο η πλάγια τομή του προφυλακτῆρα αλλά και το σχῆμα του σε κάτοψη. Όσο πιο ομαλά αγκαλιάζει το αμάξωμα και όσο πιο στρογγυλεμένες είναι οι γωνίες του, τόσο καλύτερη είναι και η αεροδυναμική του Σχήμα 3.17. Αντικαθιστώντας τον παλαιό προφυλακτῆρα του αυτοκινήτου μας με κάποιο ενιαίο πρόσθιο αεροδυναμικό βοήθημα θα πρέπει να επιλέξουμε εκείνο που «αγκαλιάζει» πιστά το πρόσθιο τμήμα του αμαξώματος χωρίς να έχει απότομες γωνίες και ανώμαλες προεξοχές ή ακανόνιστες εσοχές.

Σε πολλά αυτοκίνητα υπάρχει ένα σημαντικό κενό μεταξύ αμαξωμάτων και προφυλακτῆρων. Το καλύτερο που έχουμε να κάνουμε είναι να καλύψουμε το κενό αυτό βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ψύξη του κινητήρα αλλά και μειώνοντας την οπισθέλκουσα (C_D) αλλά και την άνωση (C_L). Την κάλυψη του κενού αυτού θα μπορούσαμε να την κάνουμε με κάποια διακοσμητική λωρίδα ή τοποθετώντας ένα ενιαίο πρόσθιο kit. Τα περισσότερα αυτοκίνητα νέας τεχνολογίας έχουν προφυλακτῆρα και πρόσθιο σπóιλερ σε ένα ενιαίο κομμάτι βελτιώνοντας έτσι την αεροδυναμική του οχήματος. Αυτή η λύση θεωρείται η καλύτερη δυνατή. Στις περιπτώσεις εκείνες που έχουμε ενσωματωμένο προφυλακτῆρα και σπóιλερ και που ο προφυλακτῆρας έχει ειδικά σημεία παγίδευσης του αέρα, δημιουργούνται ενσωματωμένες εισαγωγές αέρα (προφυλακτῆρας Alfa Romeo 33) όπου υπάρχουν τέτοια σημεία τα οποία βελτιώνουν σημαντικά την ψύξη του κινητήρα

3.2.2 Βελτίωση πλαγίας επιφανείας οχήματος

Για να βελτιώσουμε αεροδυναμικά την πλάγια επιφάνεια του αμαξώματος, ισχύουν οι ίδιες μέθοδοι που περιγράψαμε για τη βελτίωση της πρόσθιας επιφάνειας του οχήματος. Δηλαδή στρογγύλεμα ή εξομάλυνση των γωνιών, εξομάλυνση εσοχών (χτυπημένες επιφάνειες κ.λπ.), αποφυγή προεξοχών (ορισμένες διακοσμητικές εφαρμογές προεξέχουν αρκετά διαταράσσοντας έτσι την ομαλή ροή του αέρα).



Σχήμα 3.18: Τα αεροδυναμικά πλαϊνά [8]

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.18 θα μπορούσαμε να επεμβούμε με κάποιο αεροδυναμικό βοήθημα (π.χ. χρήση ανεμοθραύστη) στο σημείο ένωσης της επιφάνειας του μπαρμπρίζ με τα πλαϊνά παράθυρα (κολόνα Α). Με αυτόν τον τρόπο κάνουμε ομαλότερη τη ροή του αέρα μειώνοντας την πιθανότητα αποκόλλησης του οριακού στρώματος. Ένα άλλο σημείο του αμαξώματος στο πλάι που επιδέχεται αεροδυναμικού βοηθήματος είναι το κάτω μέρος. Εδώ συνήθως τοποθετούμε βοηθήματα που αποκαλούνται «Skirts» (σκέρτς). Ο λόγος ύπαρξης αυτών των βοηθημάτων είναι η ομαλοποίηση της ροής στα πλαϊνά του αμαξώματος και στην

κάτω επιφάνεια. Λόγω του ότι αυτά τα βοηθήματα κατεβαίνουν σε επίπεδο ανάλογο με αυτό του προσθίου σπóιλερ, ελαχιστοποιούν τη δημιουργία στροβίλων στο πλάι λόγω της αποκόλλησης της ροής στο συγκεκριμένο σημείο. Βέβαια, η ροή του αέρα στο κάτω μέρος του οχήματος είναι κάθε άλλο παρά ομαλή λόγω της τραχύτητας της κάτω επιφάνειας του αμαξώματος. Όμως αυτή η περιοχή έχει γίνει πρόσφατο αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών αεροδυναμικής ομαλοποίησης από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές αυτοκινήτων.

Αν ξανά δούμε το σχήμα 3.18 η λύση Νο 5 μας δίνει το μικρότερο συντελεστή οπισθέλκουσας. Γι' αυτόν το λόγο αν τοποθετήσουμε κάποιο αεροδυναμικό βοήθημα σ' αυτό το σημείο θα πρέπει η παρουσία του να είναι διακριτική χωρίς να προεξέχει σημαντικά.

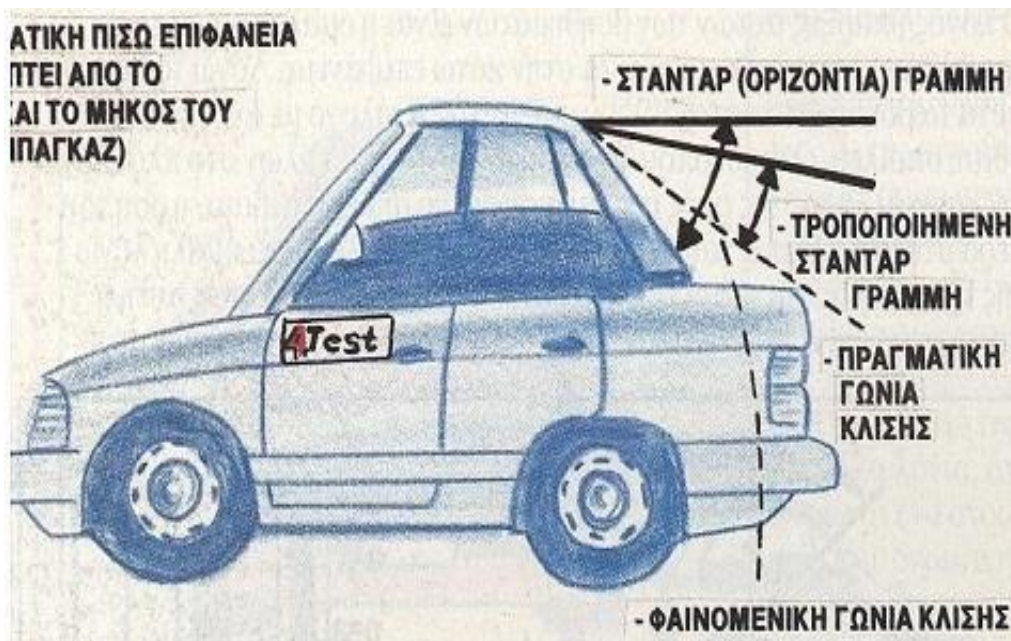
Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι υπάρχουν στο εμπόριο ορισμένοι ανεμοθραύστες που στο πίσω μέρος τους φέρουν σχισμές εξαέρωσης. Αυτές οι σχισμές συμβάλλουν στη μείωση της οπισθέλκουσας, αποτρέπουν την αποκόλληση του ανεμοθραύστη και ελαχιστοποιούν το θόρυβο (σφύριγμα).



Σχήμα 3.19: Τα αεροδυναμικά μάτια μπαίνουν σε βιτρίνες [8]

Στο Σχήμα 3.19 βλέπουμε ότι η κάλυψη της εσοχής που φέρουν ορισμένα οχήματα στην περιοχή του προβολέα μπορεί να συμβάλλει σε μείωση του C_D έως και 0.5%. Προσοχή όμως τα υλικά κάλυψης αυτής της περιοχής πρέπει να είναι ανθεκτικά στα χτυπήματα, στο χάραγμα και στη θερμοκρασία.

3.2.3 Πραγματική γωνία κλίσης οπίσθιου μπαρμπρίζ οχήματος τριων όγκων (notchback/νότσμπακ)



Σχήμα 3.20: Η γωνία κλίσης του πίσω παρμπρίζ [8]

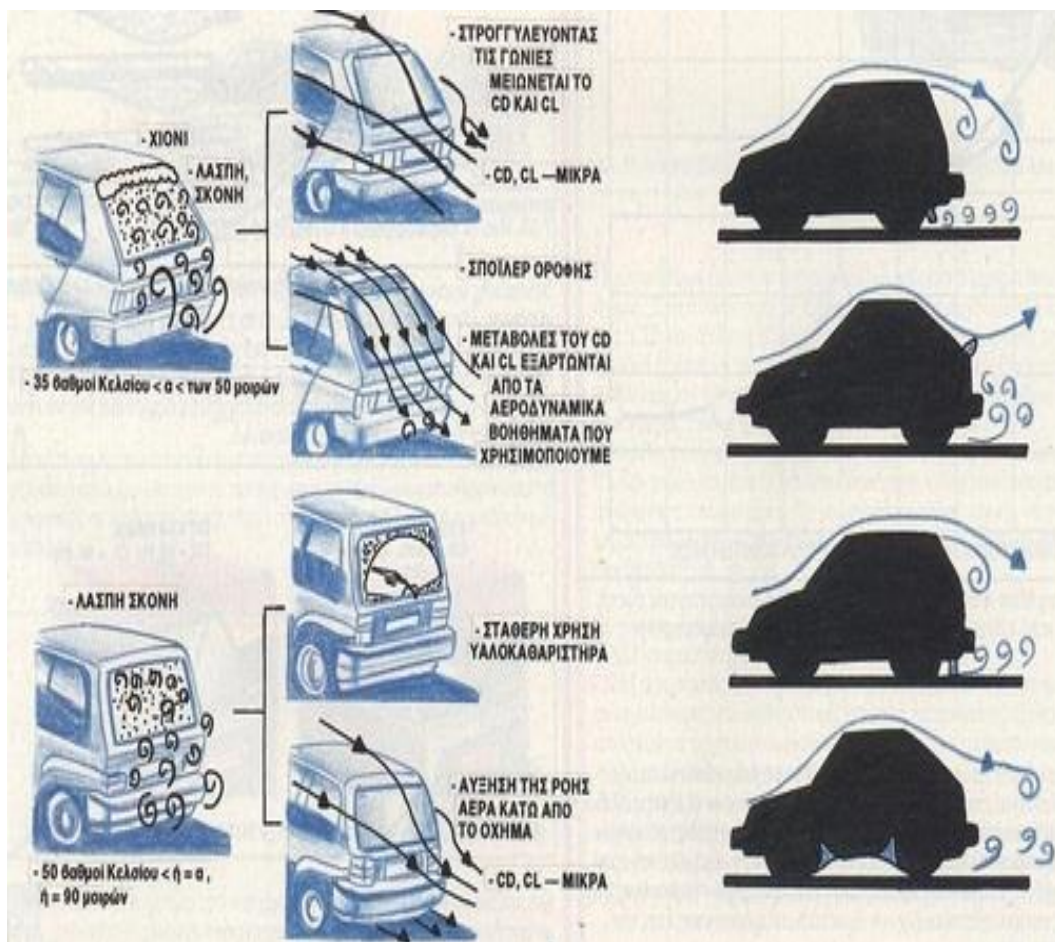
Αφού η ροή του αέρα από την οροφή ενός notchback οχήματος επηρεάζεται από την καμπυλότητα της πίσω γωνίας της οροφής και το ύψος του πόρτ μπαγκάζ, η πραγματική γωνία κλίσης του πίσω κρυστάλλου είναι σχετικά μικρή Σχήμα 3.20. Επομένως, τροποποιώντας αυτήν την περιοχή, μπορούμε να κάνουμε το C_D ενός "notchback" μικρότερο από αυτό ενός "fastback" (φάστμπακ).

3.2.4 Επίδραση προεξέχοντος αεροδυναμικού βοηθήματος στο οπίσθιο μέρος της οροφής



Σχήμα 3.21: Η θαυματουργή προεξοχή της οροφής [8]

Μια, μετρίως αποτελεσματικότητα στο σχήμα της πίσω γωνίας, οροφή που είναι εφοδιασμένη με ένα ελαφρώς προεξέχον σπόιλερ μπορεί να συμβάλει στη μείωση του C_D και C_L του οπίσθιου τμήματος Σχήμα 3.21. Αυτή η εφαρμογή είναι πολύ πρακτική για τη μείωση του C_D σε σχετικά μεγάλα αυτοκίνητα με γωνία κλίσης οπίσθιου μπαρμπρίζ μεγαλύτερη των 30 μοιρών. Από την άλλη πλευρά, αυτοκίνητα με σχεδόν κάθετο οπίσθιο κρύσταλλο έχουν την τάση να ανασηκώνουν μεγάλες ποσότητες σκόνης και βρωμιάς στο πίσω μέρος, κάνοντας τη χρήση του οπίσθιου υαλοκαθαριστήρα απαραίτητη για την εξασφάλιση καλής ορατότητας.



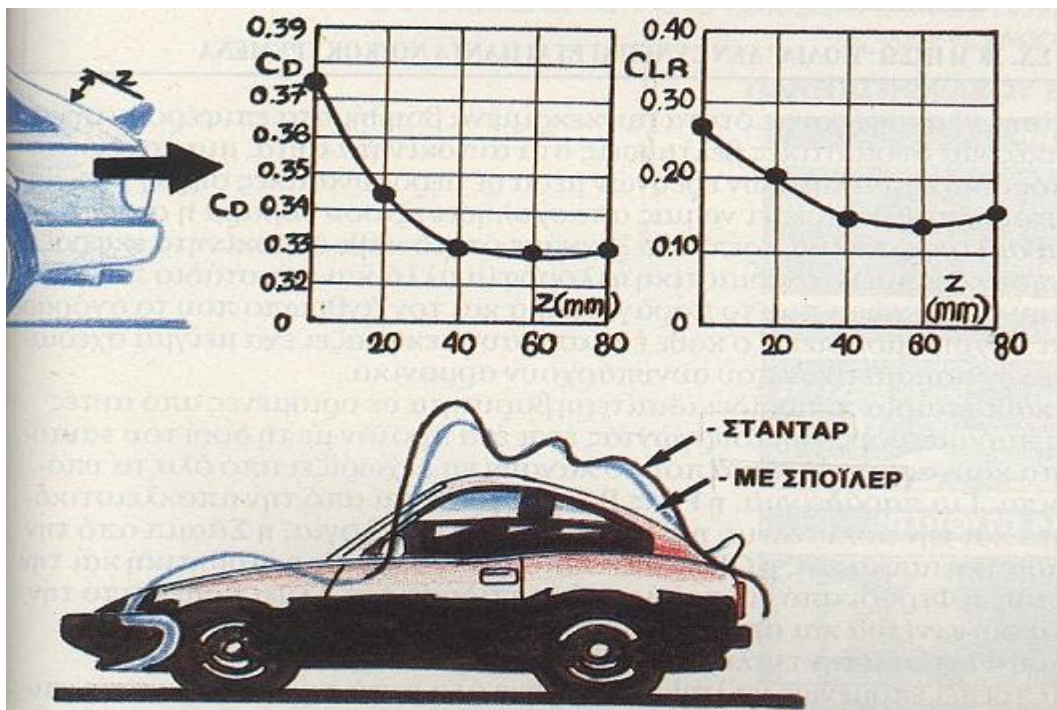
Σχήμα 3.22: Τα αεροδυναμικά μυστικά της οπίσθιας υγιεινής του αυτοκινήτου σας [8]

Οι στρόβιλοι που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου εναποθέτουν σημαντική ποσότητα σκόνης και βρωμιάς Σχήμα 3.22. Αν η γωνία $\alpha < 35^\circ$, πολύ μικρή ποσότητα σκόνης προσκολλάται στο πίσω μπαρμπρίζ, αλλά αν $\alpha > 35^\circ$, μεγάλη ποσότητα σκόνης εναποτίθεται αρκετά εύκολα, προϋποθέτοντας την ύπαρξη πίσω υαλοκαθαριστήρα.



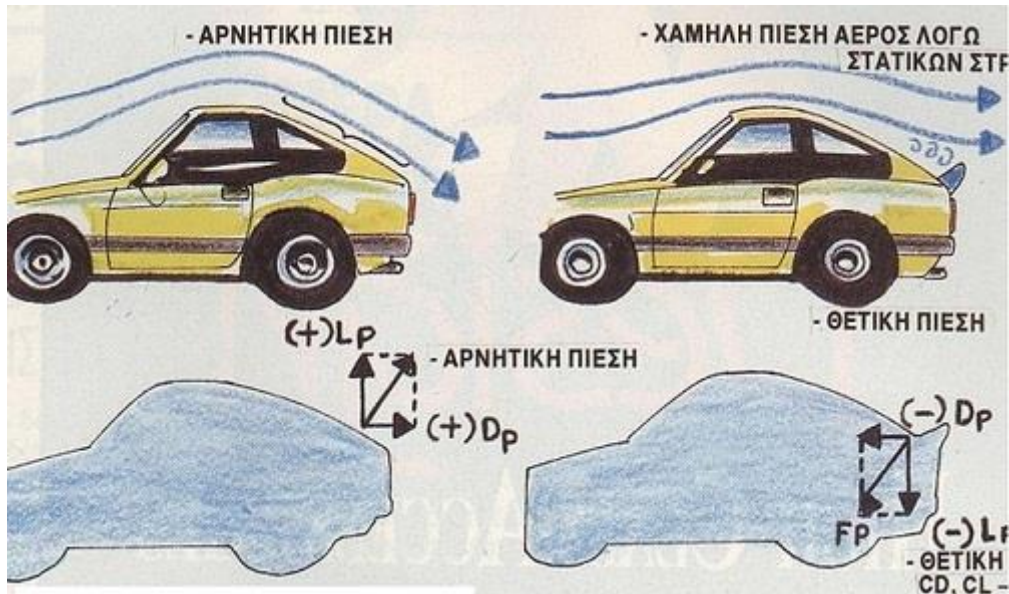
Σχήμα 3.23: Μια μικρή προέκταση με εκπληκτικά αποτελέσματα [8]

Τοποθετώντας ένα σπόιλερ στη θέση που δείχνει το Σχήμα 3.23 βοηθάμε στη δημιουργία ενός στατικού στροβίλου, βοηθώντας τη ροή του αέρα να περάσει από την οροφή προς τα κάτω, κατά μήκος του οπίσθιου μπαρπρίζ. Αυτή η εξέλιξη είναι εκπληκτική σε αυτοκίνητα με πραγματική κλίση οπίσθιου κρυστάλλου μικρότερη των 30° και σχετικά χαμηλό ολικό C_D .



Σχήμα 3.24: Το σπόιλερ προσγειώνει τις πίσω ρόδες σας[8]

Ένα μετρίου ύψους οπίσθιο σπόιλερ είναι αποτελεσματικό για τη μείωση του C_D και C_{LR} (άνωση οπίσθιου τμήματος). Σύμφωνα με στοιχεία από την Nissan Motor, η προσθήκη οπίσθιου σπόιλερ αυξάνει την πίεση στο επάνω μέρος της οπίσθιας επιφάνειας του αμαξώματος Σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.25: Πως λειτουργεί το πίσω σπóιλερ [8]

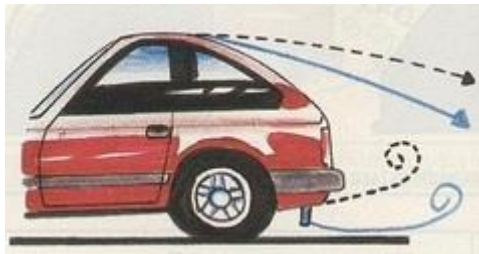
Η ροή του αέρα κοντά στην περιοχή ύπαρξης ενός οπίσθιου σπóιλερ είναι σχεδόν στατική αναγκάζοντας την ανοδική ροή του αέρα να είναι επίσης στατική. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της πίεσης (το ιδεώδες θα ήταν η αρνητική πίεση - άνωση - να γίνει θετική πίεση). Αυτή η θετική πίεση τότε ενεργεί σαν αρνητική οπισθέλκουσα και αρνητική άνωση, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση των C_D και C_{LR} Σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.26: Η διακριτικότητα του πίσω σπóιλερ αυξάνει την αποτελεσματικότητά του [8]

Αφού το οπίσθιο σπóιλερ δημιουργεί θετική πίεση, αν είναι πολύ μεγάλο θ' αυξήσει την οπισθέλκουσα. Επομένως, όσο πιο διακριτικό είναι τόσο πιο αυξημένη είναι η προσφορά του στη μείωση του C_D και C_{LR} . Το μέγεθος, η κλίση και θέση του πρέπει να είναι απολύτως σωστή για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.26 . Τα πίσω σπóιλερ πρέπει να τοποθετούνται στα σημεία όπου η ταχύτητα της ροής του αέρα είναι υψηλή και η ύπαρξη στροβίλων είναι ανύπαρκτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο ένα σπóιλερ μειώνει την ταχύτητα του αέρα που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης.

3.2.5 Επίδραση πίσω ποδιάς



Σχήμα 3.27: Η πίσω ποδιά δεν συνεπάγεται πάντα νοικοκυρεμένα [8]

Τοποθετώντας «ποδιά» στο πίσω κάτω μέρος του στρώματος εμποδίζουμε την τάση του στρώματος του αέρος κάτω από το αμάξωμα να αντιστραφεί προς τα επάνω. Με τον τρόπο αυτό δίνουμε τη δυνατότητα στο στρώμα αέρος της επάνω επιφάνειας του αμαξώματος να κυλήσει ομαλά προς τα κάτω ακολουθώντας το σχήμα του αμαξώματος. Εμποδίζοντας την αναστροφή του κάτω στρώματος αέρος μειώνουμε επίσης την εναπόθεση σκόνης, λάσπης και διαφόρων σωματιδίων στο πίσω μέρος του οχήματος. Αυτή η βελτίωση συνιστάται μόνο σε αυτοκίνητα με καλή αεροδυναμική και με C_D και C_L που δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με άλλον τρόπο. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι η πίσω ποδιά δεν προσφέρει σχεδόν καμία βελτίωση στα αυτοκίνητα τριών όγκων (τύπου "νότσμπακ"). Για τα συγκεκριμένα οχήματα, μια ελαφριά κλίση προς τα επάνω του πίσω κάτω μέρους του αυτοκινήτου, ίσως και με τη χρήση ενός πολύ διακριτικού σπóιλερ, θεωρείται η καλύτερη δυνατή λύση.

Έχοντας προσπαθήσει να αναπτύξουμε σε γενικές γραμμές αλλά το δυνατόν πιο κατανοητά το τεράστιο θέμα της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων και των αεροδυναμικών βοηθημάτων, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι: τα αυτοκίνητα πρόσφατης τεχνολογίας επιδέχονται όλο και λιγότερες εκ των υστέρων επεμβάσεις για τη βελτίωση της αεροδυναμικής τους. Θα πρέπει επίσης να επισημάνουμε ότι, οι περισσότεροι κατασκευαστές, μέσα στα πλαίσια μιας άκρως καταναλωτικής κοινωνίας, προσφέρουν ευρεία γκάμα παρελκομένων (αξεσουάρ) και αεροδυναμικών βοηθημάτων για την αισθητική αλλά και δυναμική βελτίωση των μοντέλων τους μετά την πώληση. Με αυτά τα βοηθήματα εξοπλίζουν συνήθως τα μοντέλα υψηλών επιδόσεων της γκάμας τους. Θα πρέπει επίσης ν' αναφέρουμε ότι τα συγκεκριμένα βοηθήματα επιφέρουν σημαντικές και ουσιαστικές βελτιώσεις στα αυτοκίνητα αυτά, μια και είναι απόρροια εξαντλητικών ερευνών μέσα σε αεροδυναμικές σήραγγες. Εκτός αυτού θα πρέπει να μας απασχολήσει εξίσου σοβαρά η αισθητική παράμετρος. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι το κάθε αυτοκίνητο εκφράζει μια

συγκεκριμένη σχεδιαστική φιλοσοφία αλλά και ένα στάδιο πολιτισμού για τη χώρα που το παράγει αλλά και τον άνθρωπο που το αγοράζει και το χρησιμοποιεί. Το κάθε ένα από αυτά εκφράζει ένα μείγμα σχεδιαστικών παραμέτρων που συνυπάρχουν αρμονικά. Η κάθε εταιρία προσδίδει ιδιαίτερη βαρύτητα σε ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους, δημιουργώντας έτσι ένα προϊόν με τη δική του ταυτότητα και χαρακτηριστικά που το κάνουν να ξεχωρίζει από όλα τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα, η Ρόλς Ρόις εκφράζεται από την αποκλειστικότητα και την πολυτέλεια, η BMW από την τεχνολογία, η Σάαμπ από την παθητική ασφάλεια, η CITROEN από την ιδιόρρυθμη αισθητική και την άνεση, η Φεράρι από τις πολύ υψηλές επιδόσεις, η Αλφα Ρομέο από την ιταλική φινέτσα και από τις επιδόσεις, η Τογιότα από την αξιοπιστία και η Φιάτ από την ευελιξία και τη λειτουργικότητα. Θα πρέπει επομένως να λάβουμε υπόψη όλα αυτά πριν κάνουμε τις επιλογές μας επενδύοντας σημαντικά ποσά σ' αυτές. Και φυσικά, ας μην ξεχνάμε ποτέ ότι υπάρχουν πάντα οι ειδικοί και τα εξειδικευμένα μέσα ενημέρωσης που θα μπορούσαν να σας βοηθήσουν στις επιλογές σας.

4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

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 τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδιασμού. 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.

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 την μύτη και τα πλευρικά στοιχεία-καλύμματα (endplates) τα οποία έχουν το μέγεθος που ορίζουν οι κανόνες. 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. 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 κατασκευασιμότητά του και το 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). Το μοντέλο ως έχει δεν περιέχει πληροφορία χρήσιμη για την αεροδυναμική μελέτη, αλλά μας βοηθά για μία πρώτη εικόνα. 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.

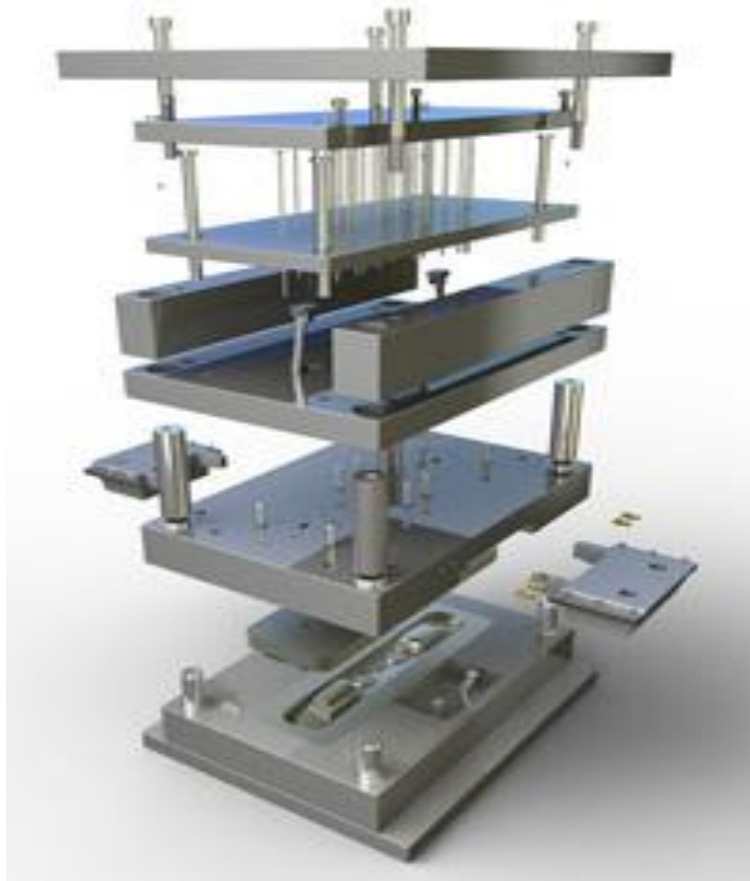
4.1.1 Λογισμικό προγράμματος σχεδίασης SOLIDWORKS



Εικόνα 4.1: Λογότυπο solidworks [29]

Η μοντελοποίηση έγινε με την Χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος SOLIDWORKS. Το SOLIDWORKS είναι το πλέον καταξιωμένο λογισμικό παγκοσμίως, στο χώρο του τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδιασμού, εφόσον στις αρχές του 2016 περισσότεροι των 3.000.000 σχεδιαστών προϊόντων και μηχανικών, οι οποίοι εκπροσωπούν 230.000 οργανισμούς, χρησιμοποιούν το SOLIDWORKS.

Δραστηριοποιείται στον βιομηχανικό χώρο, τις βιομηχανικές μελέτες και βιομηχανικές κατασκευές, στο μεταποιητικό χώρο και στα εργαλεία, στα ιατρικά μηχανήματα, σε κάθε είδους συσκευές οικιακής χρήσης και συσκευές βιομηχανικής χρήσης, στις συσκευές τεχνολογίας και στις μελέτες και κατασκευές του χώρου των μεταφορικών μέσων Εικόνα 4.2.

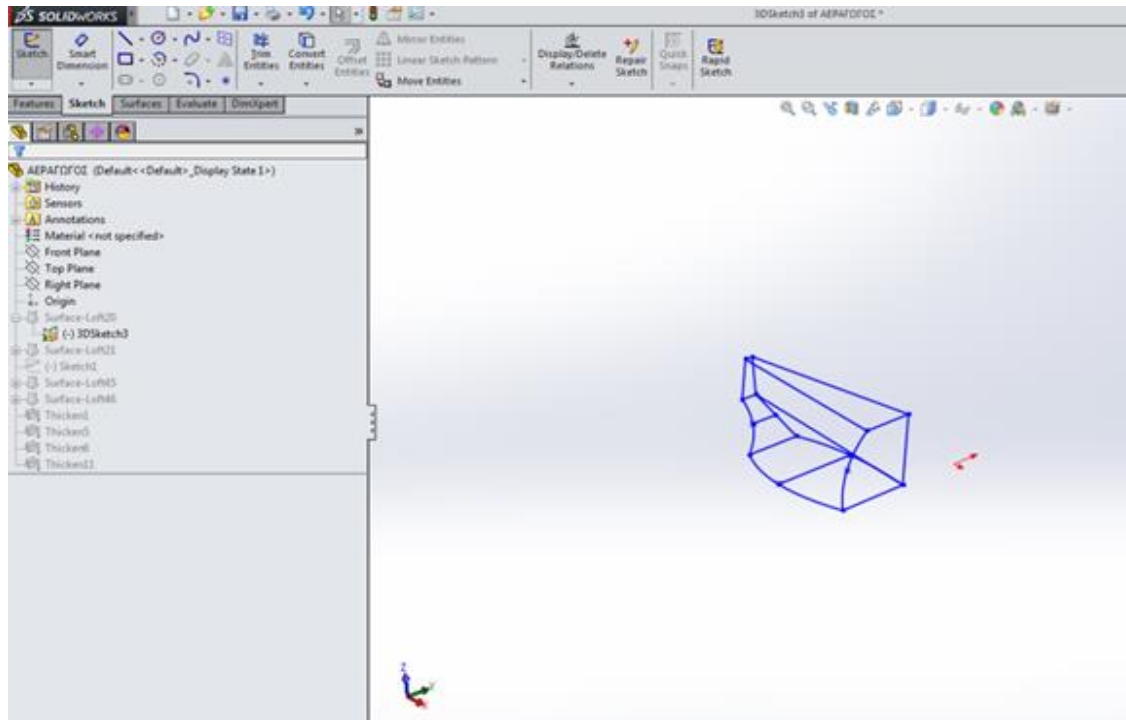


Εικόνα 4.2: Δημιουργία καλουπιού με την χρήση solidworks [30]

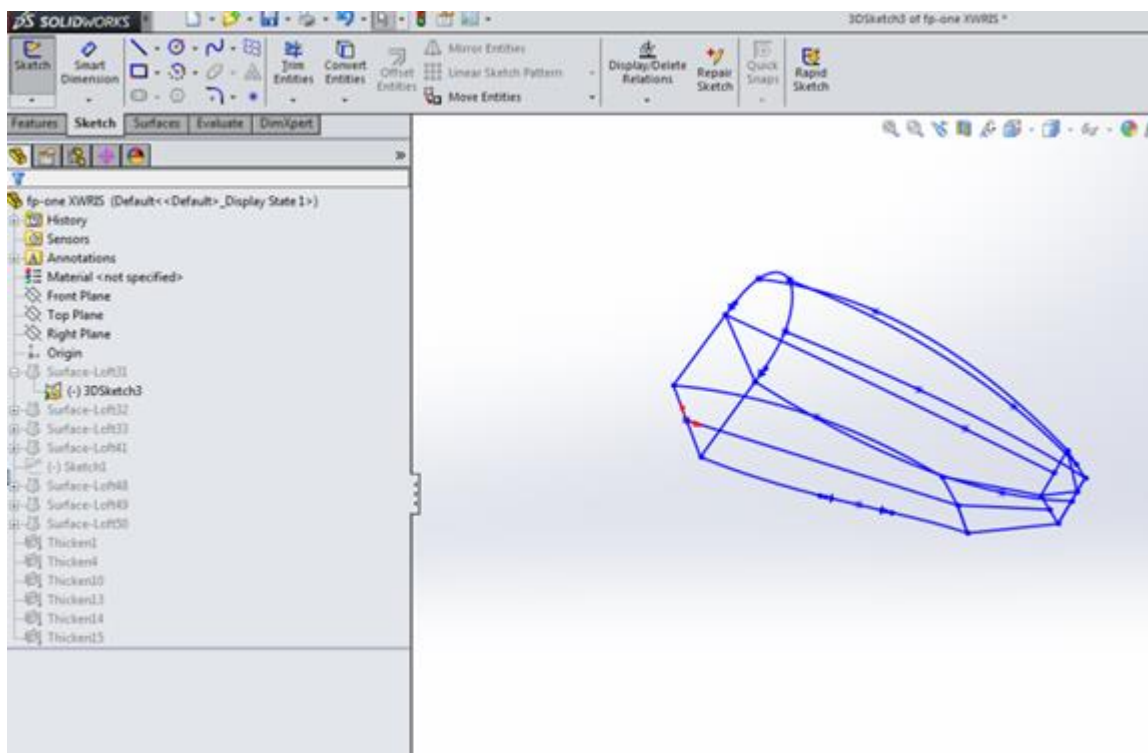
Με βάση το SOLIDWORKS, η AlfaSolid είναι αφοσιωμένη στην παροχή λύσεων στην ελληνική και κυπριακή βιομηχανία με τη βοήθεια λογισμικών σχεδιασμού, προγραμματισμού, αυτοματοποίησης, διαχείρισης και οργάνωσης.

4.1.2 Βήματα σχεδίασης πλαισίου και αεραγωγών

Σε πρώτο βήμα έγινε ένα σκαρίφημα του πλαισίου και των αεραγωγών. Έπειτα βάση των διαστάσεων που επελέγησαν, δημιουργήθηκε το 3D Sketch για τον αεραγωγο και το πλαίσιο. Η δομή φαίνεται στην Εικόνα 4.3, 4.4.

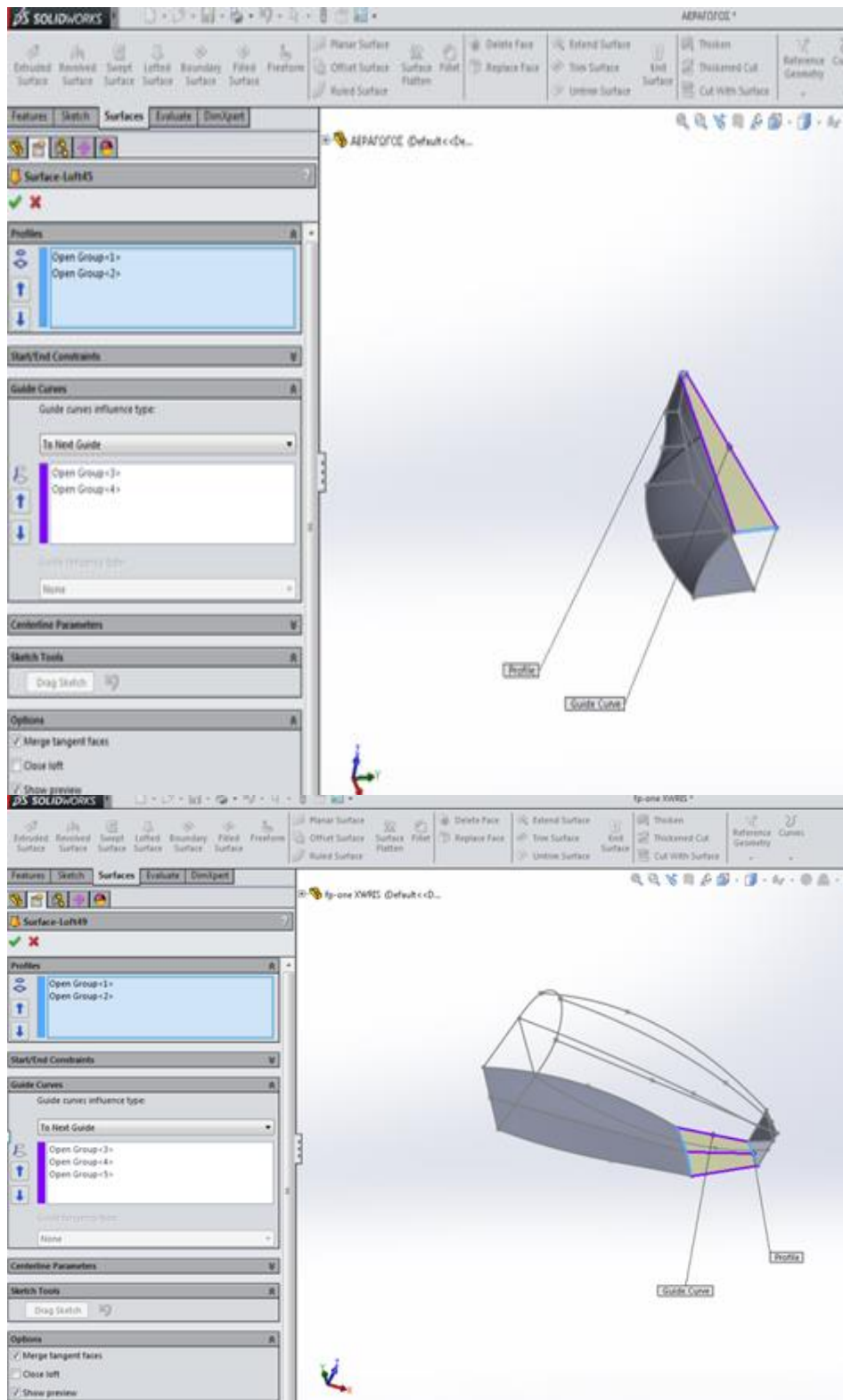


Εικόνα 4.3: Σχέδιο αεραγωγού



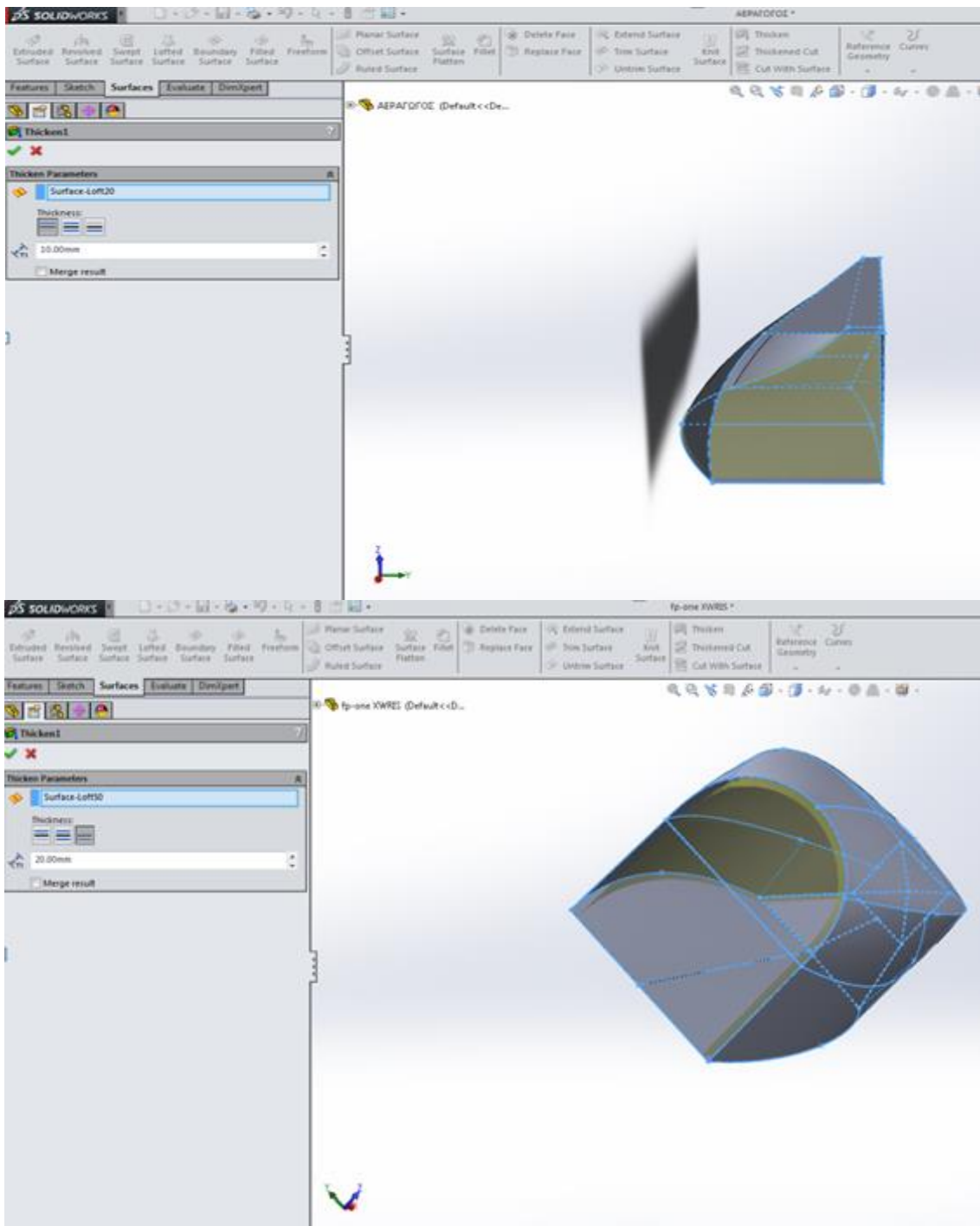
Εικόνα 4.4: Σχέδιο πλαισίου

Σε επόμενο στάδιο με την εντολή Loft δημιουργήσα επιφάνειες σε αυτές τις δομές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5



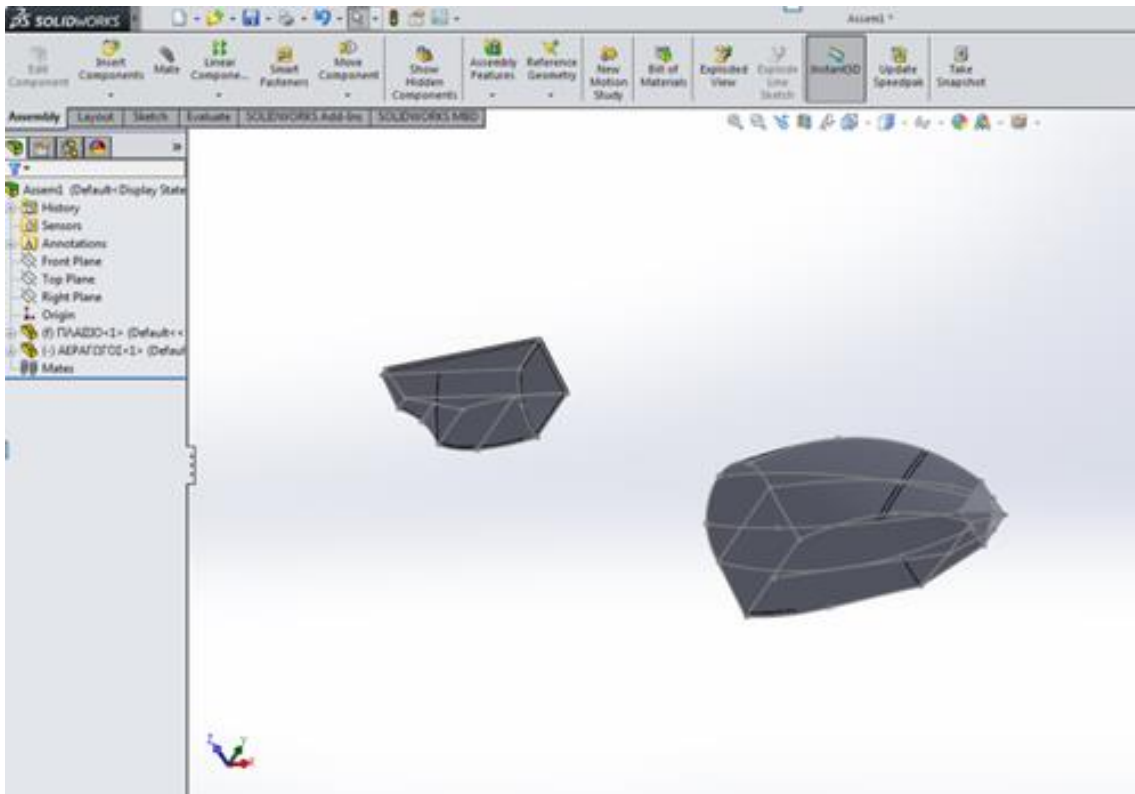
Εικόνα 4.5: Επεξεργασία Loft στον αεραγωγό και στο πλαίσιο

Προτελευταίο βήμα ήταν να δωθεί πάχος σε αυτές τις επιφάνειες ώστε να αποκτήσουν μια στερεά δομή οι γεωμετρίες του αεραγωγού και του πλαισίου. Αυτό έγινε με την εντολή thicken Εικόνα 4.6. Το πάχος αυτό δόθηκε γιατί σε μετέπειτα στάδιο αυτό της προσομοίωσης αν δεν έχουν πάχος το πρόγραμμα αντιμετωπίζει πρόβλημα στο mech.

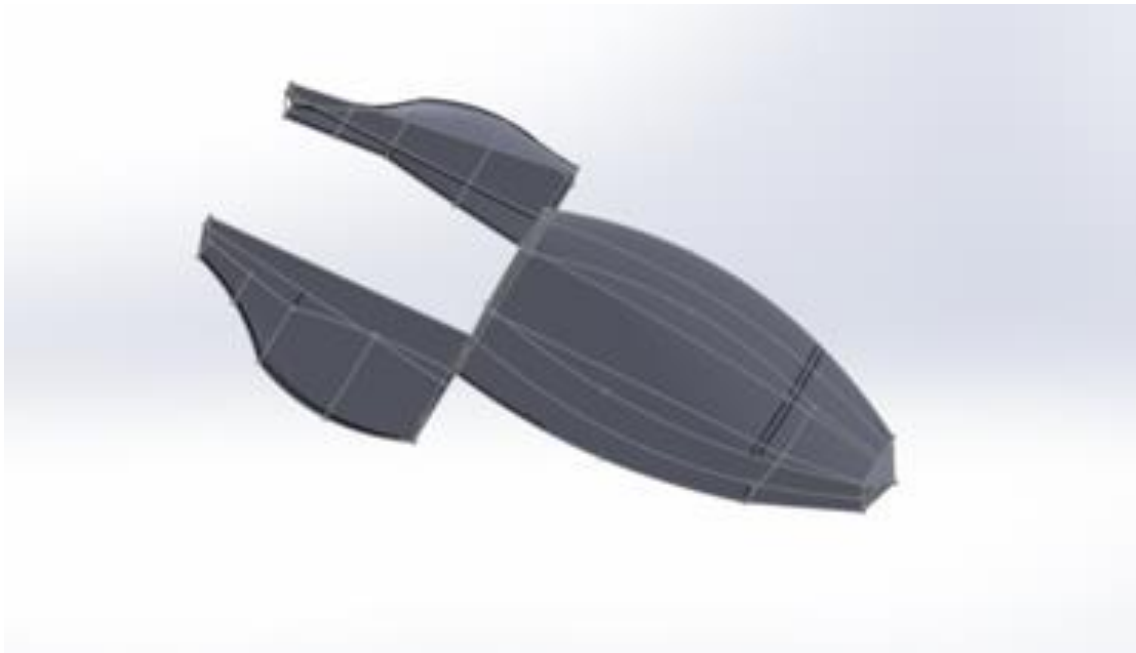


Εικόνα 4.6: Εντολή thicken στον αεραγωγό και στο πλαίσιο

Τελικό βήμα της σχεδίασης είναι να ενώσουμε τους αεραγωγούς με το πλαίσιο αυτό γίνεται με το assembly Εικόνα 4.7. Ο δεύτερος αεραγωγός προκύπτει με την εντολή mirror από τον αρχικό και έτσι προκύπτει η τελική δομή Εικόνα 4.8.



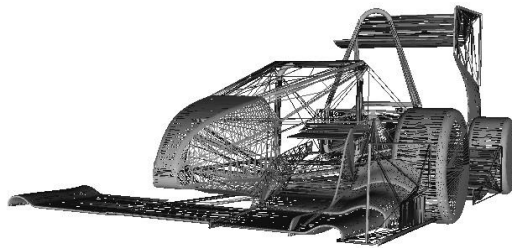
Εικόνα 4.7: Assembly



Εικόνα 4.8: Τελική δομή

4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

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 Εικόνα 5.9. Το μοντέλο του μονοθέσιου θα αποτελέσει εσωτερικά στερεά όρια του χωρίου στα οποία ορίζονται οριακές συνθήκες.



Εικόνα 4.9: Μορφή πλέγματος

Ο μοναδικός τρόπος να δημιουργηθεί ένα τόσο πολύπλοκο πλέγμα από ένα άτομο είναι με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Στην παρούσα περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο του ANSYS Fluent, Meshing. Αρχικά, το μοντέλο από αρχείο το οποίο αντιπροσωπεύει όγκο πρέπει να μετατραπεί σε πλέγμα της εξωτερικής επιφάνειάς του.. 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 επιλογή έγινε διότι με αυτόν τον τρόπο δίνεται η επιλογή ελέγχου της ονομασίας του συνόλου των επιφανειών που περιλαμβάνονται στο κάθε αρχείο.

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 μέγεθός του επηρεάζει την ικανότητα του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής να συγκλίνει. Δηλαδή, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας που μελετάται καθώς και της δεδομένης στροβιλότητας

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 στο πίσω μέρος 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 έγινε μελέτη και για διπλάσιο μέγεθος (10 μήκη μονοθέσιου) και παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα ταυτίζονται με το μικρότερο χωρίο, οπότε επιλέχθηκε η βέλτιστη απόσταση, λόγω υπολογιστικού κόστους τα 5 μήκη μονοθέσιου. Αντίστοιχα, στο πλάι και πάνω. Να τονισθεί πως στην αεροδυναμική μελέτη μπορεί να μελετηθεί το μισό μοντέλο, αν υπάρχει συμμετρία, χωρίς προβλήματα. Εν συνεχεία, το εργαλείο, Mesh, 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.

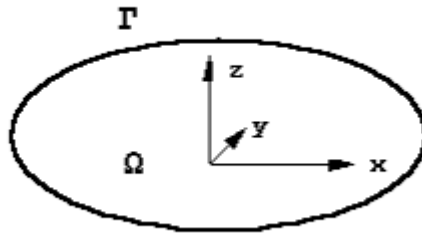
Η εξωτερική επιφάνεια του χωρίου ροής που παράγεται από το Mesh διασπάται σε έξι επιφάνειες οι οποίες αντιπροσωπεύουν την είσοδο, την έξοδο, το οδόστρωμα, την επιφάνεια συμμετρίας και δύο επιφάνειες οι οποίες βρίσκονται αρκετά μακριά από το μοντέλο και δεν αντιπροσωπεύουν κάποια στερεή επιφάνεια, αλλά 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.

4.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

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.

Τα περισσότερα προβλήματα τα οποία έχουν ενδιαφέρον για το μηχανικό καταλήγουν σε ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων. Το σύστημα αυτών των

διαφορικών εξισώσεων πρέπει να λυθεί σε ένα χώρο Ω με την απαίτηση να ικανοποιούνται ειδικές συνθήκες στο όριό του Γ Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Χώρος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων [31]

Οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες είναι απαραίτητες προκειμένου να εξασφαλιστεί η μοναδικότητα της πεδιακής λύσης. Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω μορφές συνοριακών συνθηκών:

- **Dirichlet.** Σε αυτόν τον τύπο των συνοριακών συνθηκών το διανυσματικό δυναμικό είναι επακριβώς γνωστό στο σύνορο. Οι συνοριακές συνθήκες τύπου Dirichlet ονομάζονται και συνοριακές συνθήκες πρώτου είδους.
- **Neumann** (ή συνοριακή συνθήκη δευτέρου είδους). Αυτού του τύπου η συνοριακή συνθήκη καθορίζει την χωρική παράγωγο του διανυσματικού δυναμικού κατά την κάθετη διεύθυνση στο σύνορο. Συνήθως ισχύει

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (4.1)$$

i. **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.

ii. **Οριακές συνθήκες στην έξοδο**

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

iii. 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.

iv. 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.

v. Οριακές συνθήκες χαρακτηριστικών τύρβης

Για τα χαρακτηριστικά τύρβης (v_T, v) 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.

4.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

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. 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

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - (\nu + \nu_T) \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (4.2)$$

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:

$$\int_V (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} dV - \int_V \nabla (\nu + \nu_T) \nabla \mathbf{u} dV + \int_V \nabla p = 0 \quad (4.3)$$

Θεωρώντας γραμμική τη μεταβολή σε γειτονικούς όγκους και με χρήση του αναπτύγματος Taylor για κάθε συνάρτηση, εκφράζονται τα διαφορικά των όρων της εξίσωσης 4.3 συναρτήσει των τιμών στα βαρύκεντρα γειτονικών κελιών. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss στα χωρικά ολοκληρώματα της εξίσωσης 4.3, 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.

i. **Όρος μεταφοράς**

Οπότε η διακριτοποίηση του όρου μεταφοράς δίνει:

$$\begin{aligned} \int_V (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} dV &= \oint_S \mathbf{u} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \\ &= \sum_{\text{faces}} (\mathbf{S} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_{sc} \mathbf{u}_{sc} = a_P \mathbf{u}_P + \sum_N a_N \mathbf{u}_N \end{aligned} \quad (4.4)$$

όπου faces είναι το σύνολο των επιφανειών του όγκου ελέγχου, $\mathbf{S} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ είναι η παροχή μάζας και με δείκτη sc (surface centre) 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.

ii. **Όρος διάχυσης**

Αντίστοιχα με τον όρο μεταφοράς διακριτοποιείται και ο όρος διάχυσης. $\int_V (\nu + \nu_T) \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u}) dV = \sum_i S_i (\nu \mathbf{u})_i$. Ο όρος $\nabla \mathbf{u}$ διακριτοποιείται με ανάπτυγμα Taylor και σφάλμα αποκοπής δεύτερης τάξης.

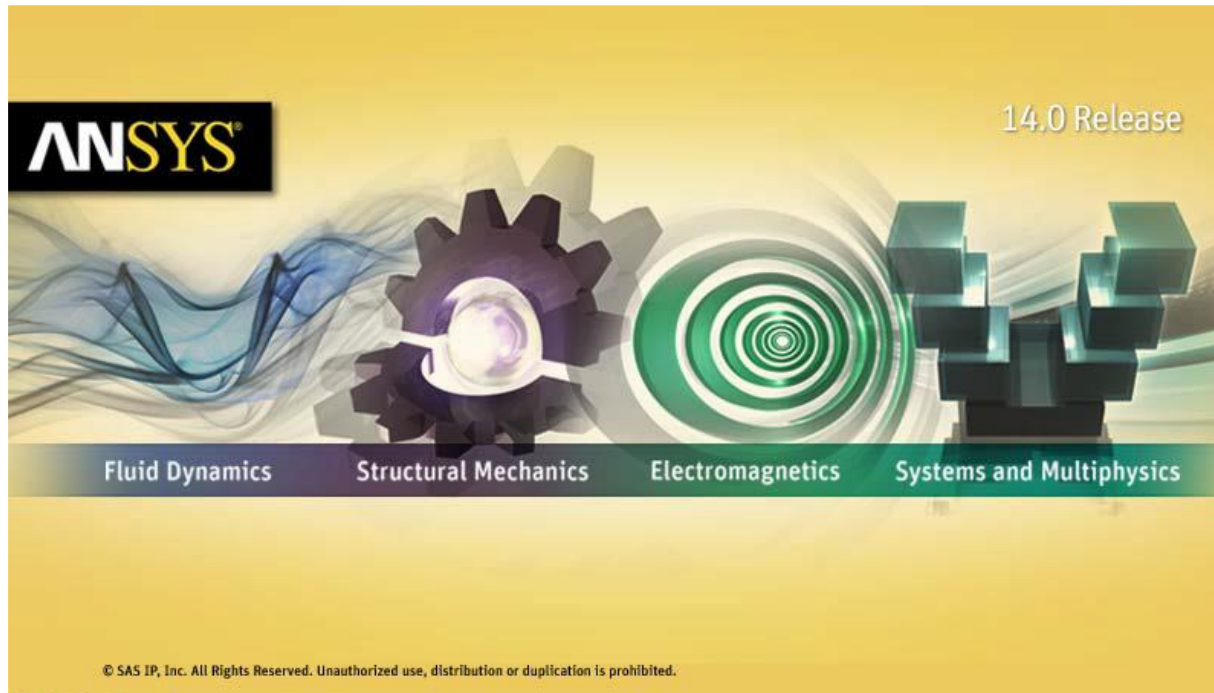
iii. **Όρος πίεσης και τελικό διακριτοποιημένο σύστημα**

Θεωρείται η ημι-διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης ορμής

$$a_P u_P = A(u) - \nabla p \quad (4.5)$$

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.

5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS



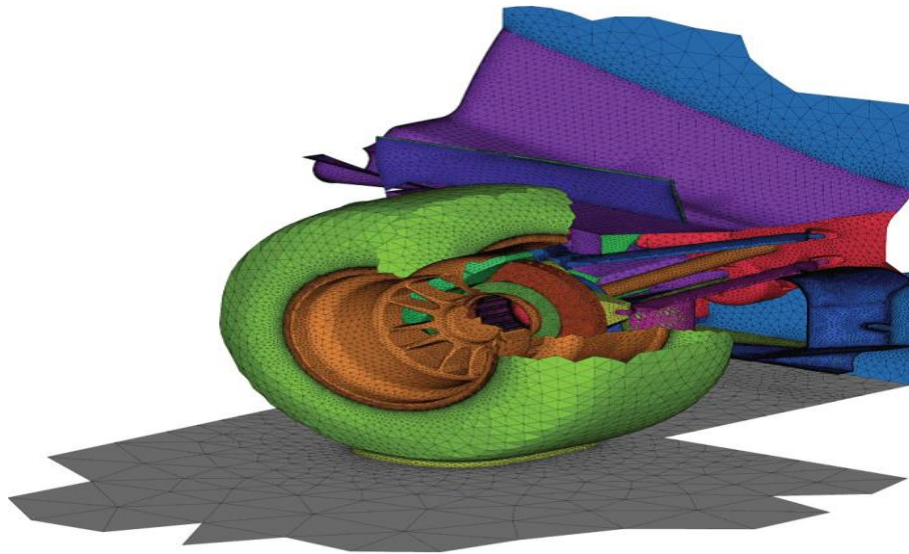
Εικόνα 5.1: Το υπολογιστικό λογισμικό ANSYS 14.0

5.1 Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το 1970 ο Δρ. John Sawanson ιδρύει την εταιρία Systems Analysis Swanson Inc SASI η οποία το 1994 πωλείται στην TA Associates, με τους νέους ιδιοκτήτες να την μετονομάζουν σε Ansys Inc Εικόνα 5.1. Ο στόχος της, ήταν η ανάπτυξη και η λειτουργία ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών, με το οποίο θα ήταν δυνατή η προσομοίωση και η έρευνα σε διάφορες εφαρμογές.

Τα πολλά πακέτα τα οποία εμπεριέχονται στο ANSYS δίνουν τη δυνατότητα για μελέτες, μέσω προσομοιώσεων, σε τομείς όπως η ρευστομηχανική, η στατική, η ηλεκτρομαγνητική, η μηχανική των υλικών και η μετάδοση θερμότητας. Με το πέρασμα των χρόνων η εταιρία επένδυσε πολλά κεφάλαια έτσι ώστε να αναπτύξει το προϊόν της με αποτέλεσμα την ευρεία χρήση του. Το 2003 αναπτύχθηκε το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής CFX και το 2007 ακολούθησε το παρόμοιο Fluent.

5.2 ICEM CFD



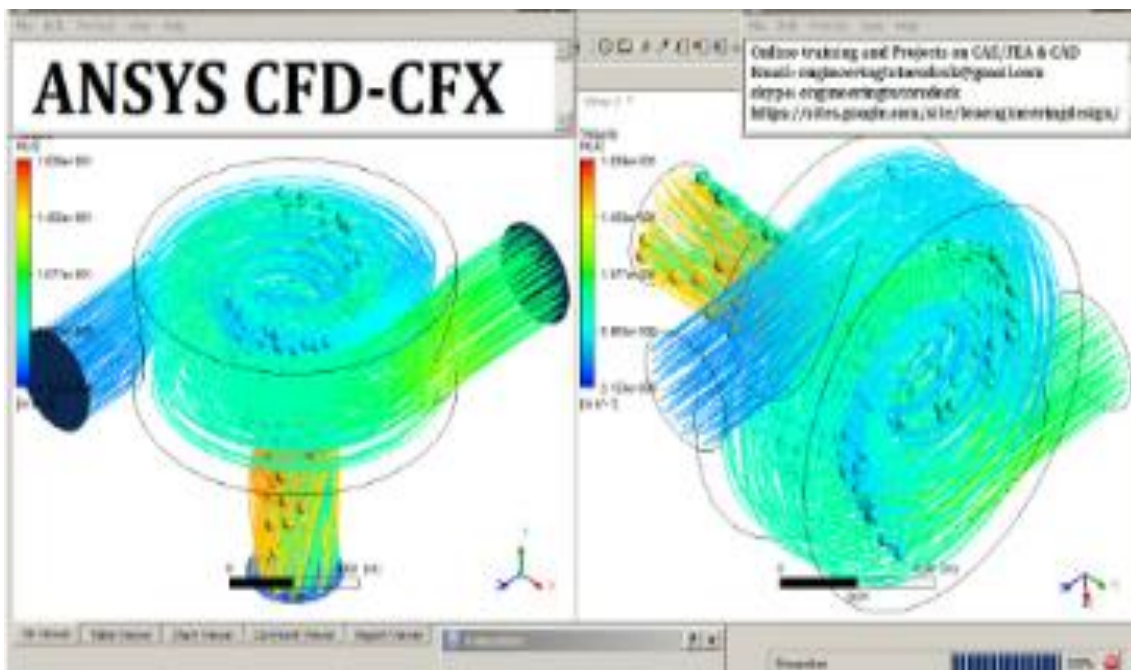
Εικόνα 5.2: Πλέγμα δημιουργημένο στο ICEM CFD

Το ICEM CFD είναι ένα λογισμικό δημιουργίας πλεγμάτων, ή αλλιώς ένα λογισμικό meshing. Υπάρχει η δυνατότητα της εισαγωγής μιας γεωμετρίας, η οποία έχει σχεδιαστεί σε κάποιο πρόγραμμα σχεδίασης, όπως το SolidWorks και το Catia. Το ICEM, μας δίνει τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε το πλέγμα, με τη μορφή που εμείς θέλουμε. Μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε τριγωνικό meshing (AllTri), τετραγωνικό meshing (Quad), τριγωνικό-τετραγωνικό (Tri/Quad). Επίσης το ICEM δεν περιορίζεται σε 2D προβλήματα. Υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής ενός 3D meshing, όπως απαιτείται και για τη μελέτη μας Εικόνα 5.2. Ακόμη εφόσον δημιουργήσουμε το πλέγμα, έπειτα με τη χρήση πολλών εργαλείων μπορούμε να το βελτιστοποιήσουμε και να το διορθώσουμε, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιόπιστα αποτελέσματα στα μετέπειτα προγράμματα προσομοιώσεων που θα χρησιμοποιήσουμε. Ακόμη η δημιουργία ενός πλέγματος (mesh), μπορεί να γίνει και μέσα από το Ansys Workbench και τα εργαλεία που αυτό εμπεριέχει, τα οποία είναι το Ansys Design Modeler και το Ansys Meshing. Βέβαια το Ansys Workbench δεν περιορίζεται μόνο στην κατασκευή ενός πλέγματος, αλλά υπάρχει η δυνατότητα ολόκληρου του καθορισμού του προβλήματος. Από τον καθορισμό της γεωμετρίας, έως και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

5.3 ANSYS CFX

Το ANSYS CFX είναι ένα υψηλής απόδοσης και γενικής χρήσεως, λογισμικό πεπερασμένων διαφορών και επεξεργασίας δυναμικής ρευστών, το οποίο χρησιμεύει στη λύση προβλημάτων ροής ρευστών σε μεγάλο εύρος για πάνω από είκοσι χρόνια.

Στην «καρδιά» του ANSYS CFX υπάρχει ένας προηγμένης τεχνολογίας solver («λύτης»), με τον οποίο επιτυγχάνεται, μεταξύ άλλων, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ο σύγχρονος αυτός solver είναι το θεμέλιο για μια άφθονη επιλογή των φυσικών μοντέλων που αναπαριστούν εικονικά κάθε είδους φαινόμενο, το οποίο σχετίζεται με τη ροή των ρευστών Εικόνα 5.3. Ο solver και πολλά φυσικά μοντέλα είναι ενσωματωμένα σε ένα σύγχρονο και ευέλικτο γραφικά περιβάλλον με εκτεταμένες δυνατότητες και αυτοματοποίηση, χρησιμοποιώντας διάφορα αρχεία και δεδομένα, ενώ διαθέτει και μια ισχυρή γλώσσα γραφής.



Εικόνα 5.3:Ροή ρευστού αναλυμένο με ANSYS CFD

Βέβαια το ANSYS CFX είναι κάτι παραπάνω από ένας ισχυρός κώδικας CFD. Η ενσωμάτωση στην πλατφόρμα ANSYS WorkBench, που όπως περιγράψαμε μας δίνει τη δυνατότητα καθορισμού-λύσης-επεξεργασίας αποτελεσμάτων ενός προβλήματος, παρέχει ανώτερες αμφίδρομες συνθέσεις σε όλα τα μεγάλα CAD συστήματα, καθώς και ισχυρή τροποποίηση γεωμετρίας και δημιουργίας πλέγματος, με τα εργαλεία που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης η ενσωμάτωση αυτή παρέχει ευκολία στη μεταφορά δεδομένων και αποτελεσμάτων, τα οποία μπορούν να μοιραστούν μεταξύ των διάφορων εφαρμογών. Για παράδειγμα μια λύση ενός προβλήματος που ασχολείται με τη ροή ενός ρευστού, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί στον ορισμό ενός οριακού φορτίου μεταγενέστερης δομικής μηχανικής προσομοίωσης. Μια αμφίδρομη σύνδεση με το ANSYS Structural Mechanics Products επιτρέπει τη σύλληψη

ακόμα και των πιο σύνθετων δομών ενός ρευστού, δηλαδή FSI (Fluid - Structure Interaction) προβλημάτων, με την ίδια ευκολία στο περιβάλλον χρήσης εξοικονομώντας την ανάγκη για την αγορά, τη διαχείριση ή την εκτέλεση από άλλα περαιτέρω λογισμικά.

5.4 ANSYS FLUENT

Το λογισμικό ANSYS Fluent περιέχει τις ευρείες δυνατότητες φυσικής μοντελοποίησης που απαιτούνται για τα μοντέλα διαφόρων ροών, αναταράξεων, μεταφορά θερμότητας κ.α., για βιομηχανικές εφαρμογές που κυμαίνονται από τη ροή του αέρα πάνω σε ένα πτερύγιο ενός αεροσκάφους, μέχρι την καύση σε κλίβανο, από τις στήλες φυσαλίδων μέχρι τις εξέδρες άντλησης πετρελαίου, από τη ροή του αίματος μέχρι την παραγωγή ημιαγωγών, και από έναν καθαρά απλό σχεδιασμό δωματίου, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Εικόνα 5.4. Σήμερα, χιλιάδες επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο επωφελούνται από τη χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent, και είναι αναπόσπαστο εργαλείο για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης του προϊόντος τους.

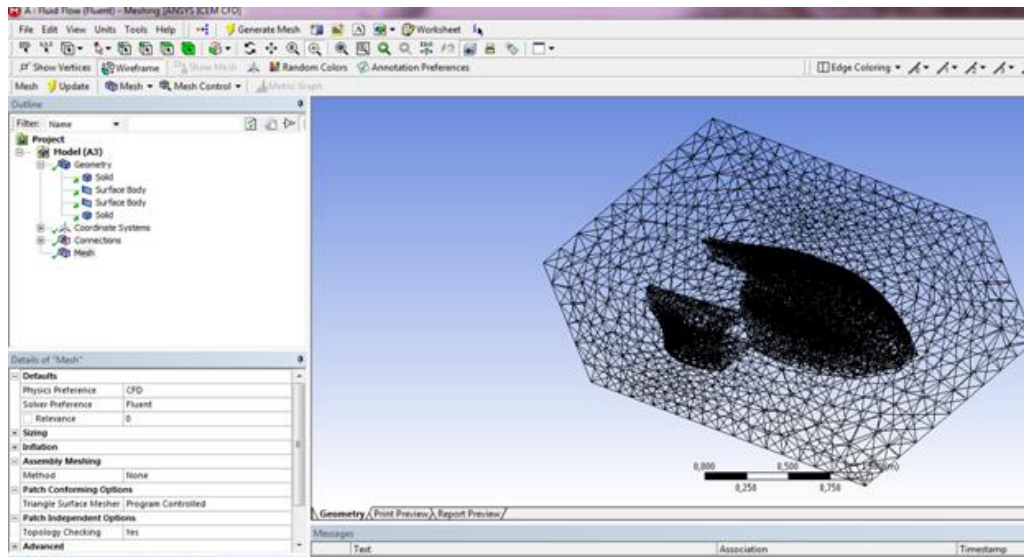


Εικόνα 5.4: Μελέτες με το ANSYS FLUENT

Ο προηγμένης τεχνολογίας solver παρέχει γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα και ευέλικτη μετακίνηση και μετασχηματισμό πεδίων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρέμβει στα διάφορα μοντέλα και τις διάφορες παραμέτρους που ορίζει το Fluent, έτσι ώστε να προσαρμόσει το ίδιο το Fluent πάνω στο πρόβλημά του, και όχι να προσαρμοστεί ο ίδιος πάνω στο Fluent. Ακόμη κατά τη διάρκεια της λύσης ενός προβλήματος, το ANSYS Fluent δίνει τη δυνατότητα της διακοπής ενός υπολογισμού, και έτσι ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τα αποτελέσματα, να αλλάξει οποιαδήποτε ρύθμιση, και στη συνέχεια να συνεχίσει τον υπολογισμό από εκεί που τον είχε σταματήσει.

Τέλος όλες οι ρυθμίσεις και όλα τα δεδομένα που έχει εισάγει που έχει κάνει ο χρήστης, αποθηκεύονται ως case & data, και υπάρχει η δυνατότητα της εισαγωγής αυτών σε αντίστοιχα προβλήματα. Δηλαδή το μόνο που έχει να κάνει ο χρήστης, είναι να εισάγει τη νέα γεωμετρία.

5.4.1 Επιλογή παραμέτρων στο Fluent:

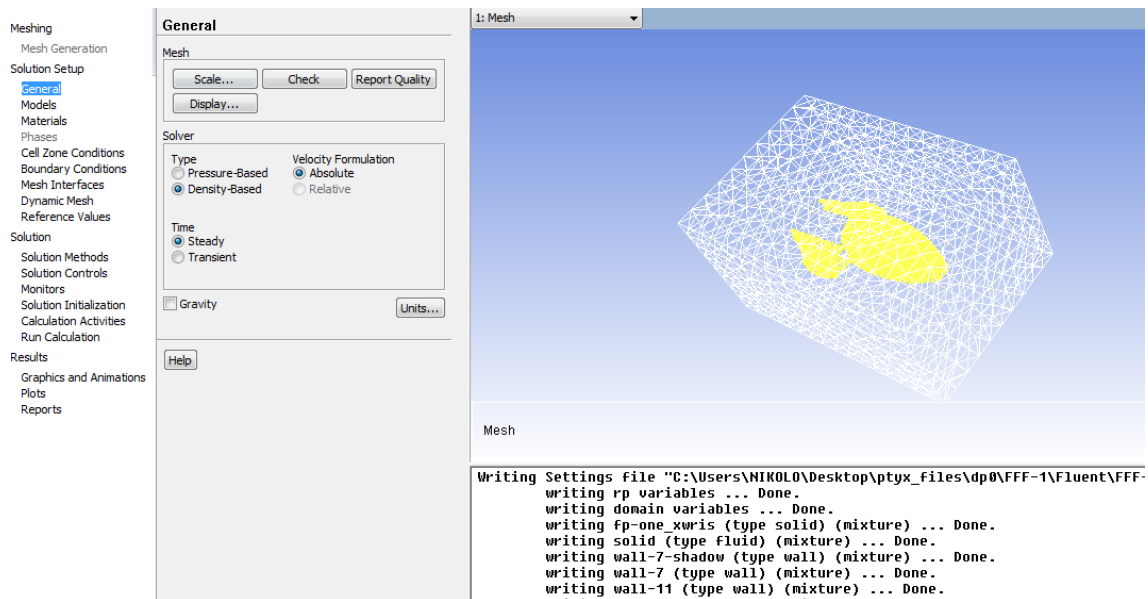


Εικόνα 5.5: Ποιότητα πλέγματος

Το Fluent έχει ένα μεγάλο αριθμό μοντέλων προσομοίωσης, και καθένα από αυτά πολλές παραμέτρους, οι οποίες ρυθμίζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας. Επίσης πολλές παράμετροι μπορούν να ρυθμιστούν, πριν γίνει η επιλογή του μοντέλου, για τον καλύτερο καθορισμό και κυρίως για την καλύτερη επίλυση του προβλήματος. Αφού πρώτα από την καρτέλα General, στην επιλογή mesh, ελέγξουμε την ποιότητα, και όχι μόνο, του πλέγματος Εικόνα 5.5, προχωράμε σε κάποιες αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν.

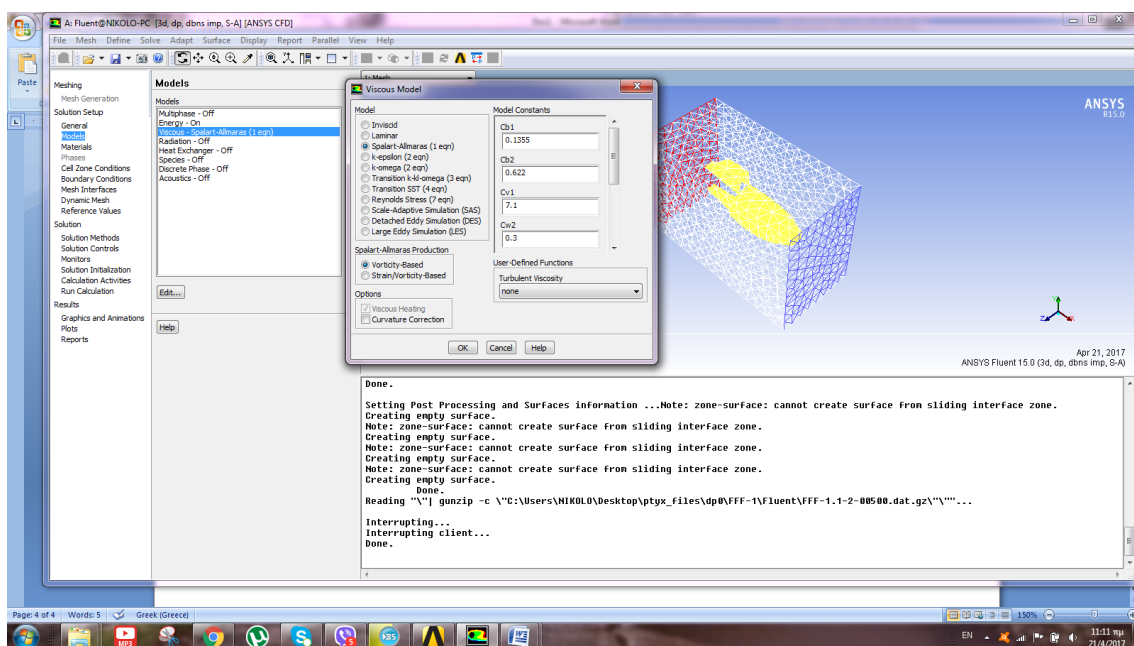
Αυτές οι αλλαγές που έγιναν στις προεπιλεγμένες επιλογές του fluent, είναι κοινές για όλα τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, έτσι ώστε να υπάρχει συνοχή στα αποτελέσματα. Με αυτές τις αλλαγές πάρθηκαν τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Στην κατηγορία General™ το Fluent δίνει δύο επιλογές Type, οι οποίες είναι η Pressure Based και η Density Based. Η επιλογή Pressure Based χρησιμοποιείται για προβλήματα ασυμπίεστης ροής και για «ήπιες» συμπιεστές ροές. Η άλλη επιλογή, Density Based, χρησιμοποιείται για προβλήματα συμπιεστής ροής υψηλής ταχύτητας, καθώς δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε τέτοιες περιπτώσεις. Όλες οι προσομοιώσεις που έγιναν στην παρούσα πτυχιακή, είχαν ως επιλογή Type, το Density Based. Επίσης στο General, βρίσκουμε και την επιλογή Time, στην οποία επιλέγουμε Steady, καθώς έχει επιλεγθεί το πρόβλημα στην οποία επιλέγουμε σταθερή, καθώς έχει επιλεγθεί το πρόβλημα να είναι σταθερό στον χρόνο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6: Επιλογή τύπου

Στην κατηγορία Model, επιλέχθηκε το Energy On, καθώς η ροή, στο πρόβλημα, είναι συμπιεστή, και έτσι η θερμοκρασία μεταβάλλεται Εικόνα 5.7 .



Εικόνα 5.7: Energy on

Στην κατηγορία Solution Monitor, μέσω της επιλογής Pressure-Far-Field, επιλέγουμε να γίνεται έλεγχος της σύγκλισης των εξισώσεων, Αυτό γίνεται επιλέγοντας την εντολή κανένα, στο Convergence Criterion (κριτήριο σύγκλισης). Πρέπει να αναφερθεί ότι το πλήθος των επαναλήψεων που έχει επιλεγεί είναι ικανό για την σύγκλιση όλων των εξισώσεων.

Όπως προαναφέραμε αυτές οι αλλαγές στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του fluent, έγιναν σε όλες τις προσομοιώσεις.

5.4.2 Τα μοντέλα του Fluent:

Στην παρούσα Πτυχιακή επιλέχθηκαν τα μοντέλα Laminar, Spalart Allmaras, k-ε και k-ω για τη μελέτη του πλαισίου και των αεραγωγών. Παρακάτω περιγράφονται αυτά τα μοντέλα και τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που εμφανίζουν.

- Laminar
Είναι ένα μοντέλο το οποίο δε μοντελοποιεί τις τυρβώδεις καταστάσεις. Όπως λέει και το όνομά της (Laminar = Στρωτή), αναφέρεται σε στρωτές ροές. Οι δυνατότητες εισαγωγής δεδομένων είναι οι βασικές, χωρίς να ασχολούμαστε με παραμέτρους τύρβης. Οι τυρβώδεις ροές μπορούν να μοντελοποιηθούν με τα μοντέλα που περιγράφονται παραπάνω (S-A, k-ε και k-ω), καθώς όπως αναφέρθηκε το Laminar model δεν έχει τη δυνατότητα να το κάνει.
- Spalart Allmaras
Το Spalart-Allmaras είναι ένα μοντέλο μιας εξίσωσης. Σε σχέση με άλλα μοντέλα τύρβης (όπως το k-epsilon και το k-omega), είναι πιο απλό. Έχει σχεδιαστεί ειδικά για προβλήματα αεροδιαστημικής και αεροναυτικής. Επίσης είναι κατάλληλο για μελέτες ροών κοντά σε τοιχώματα, κάτι το οποίο είναι αναγκαίο στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία. Η προσθήκη που γίνεται σε αυτό το μοντέλο είναι μια εξίσωση μεταφοράς για το τυρβώδες ιξώδες. Η μεταβλητή ν χαρακτηρίζει αυτήν την επιπλέον εξίσωση του μοντέλου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι, από τη στιγμή που δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, είναι πιο ελαστικό - και έτσι καταλληλότερο- για περιπτώσεις όπου το πλέγμα δεν είναι υψηλής ποιότητας. Το μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα, σε απότομες μεταβάσεις από τα τοιχώματα στην ελεύθερη ροή.
- k-epsilon standard
Το k-epsilon είναι ένα μοντέλο τύρβης, δύο εξισώσεων. Οι δύο επιπλέον εξισώσεις που περιλαμβάνει, είναι εξισώσεις μεταφοράς οι οποίες περιγράφουν τις τυρβώδεις ιδιότητες της ροής. Στην παρούσα Εργασία, χρησιμοποιείται το standard μοντέλο, το οποίο είναι πιο εύκολο στο «χειρισμό» του. Επίσης οδηγεί σε σταθερούς υπολογισμούς, οι οποίοι συγκλίνουν σχετικά εύκολα. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι δεν αποδίδει καλά σε περιπτώσεις μεγάλων κλίσεων πίεσης.
- k- omega SST
Το μοντέλο k-omega, είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, στο οποίο προστίθενται δύο ακόμη μεταβλητές από τις οποίες υπολογίζεται το πεδίο τυρβώδους συνεκτικότητας. Το μοντέλο SST, είναι ένα εξελιγμένο μοντέλο

του k - ω standard. Το k - ω Standard είναι πιο ακριβή στα στρώματα κοντά στο τοίχωμα, από το μοντέλο k - \epsilonpsilon . Όμως είναι πιο «ευαίσθητο» στο πεδίο μακριά από το τοίχωμα. Έτσι με την επιλογή SST, αυτή η αδυναμία επιλύεται, καθώς το k - ω SST λύνει την k - ω standard κοντά στο τοίχος και την k - \epsilonpsilon standard στο υπόλοιπο πεδίο ροής, δηλαδή στο farfield. Έτσι όπως είναι λογικό το SST, χρειάζεται ένα πιο απαιτητικό πλέγμα γύρω από το τοίχος, από ότι στο υπόλοιπο farfield.

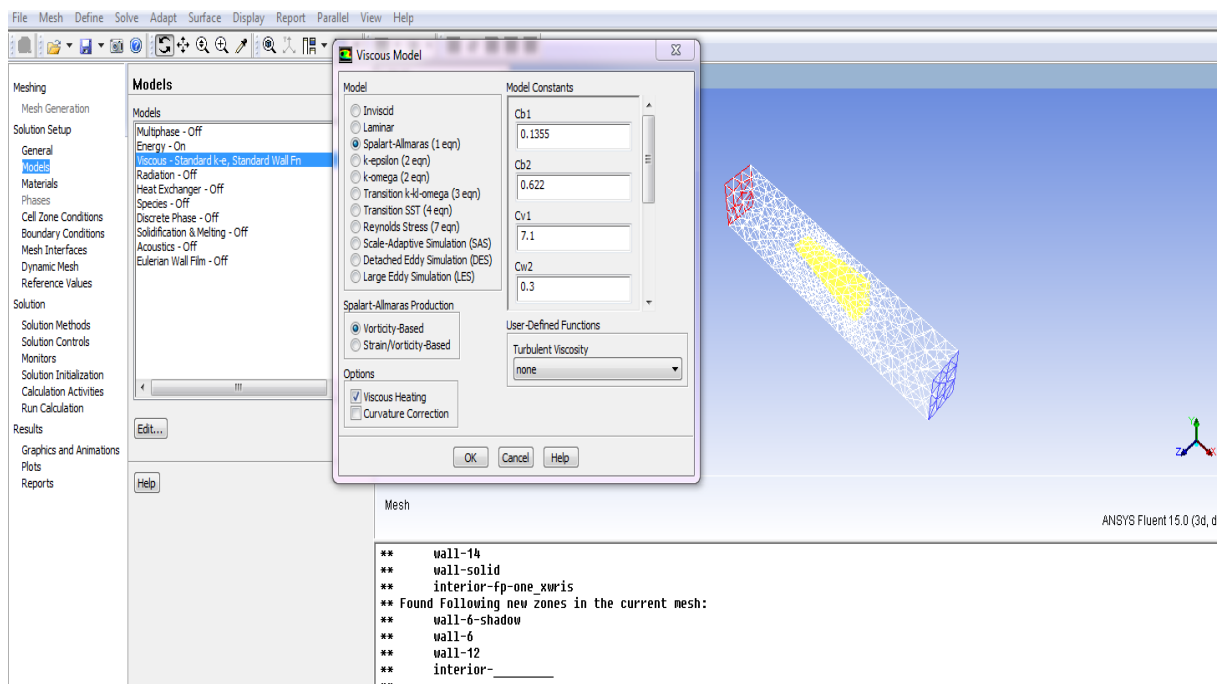
6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Προσομοιώθηκε το πλαίσιο με τους αεραγωγούς που έχει σχεδιάσει η ομάδα στα μοντέλα k-epsilon Standard, k-omega SST, Spalart Allmaras και Laminar. Βέβαια παρουσιάζονται και τα διαγράμματα C_L και C_D συναρτήσεως των επαναλήψεων, καθώς και η κατανομή πίεσης και ταχύτητας γύρω από το πλαίσιο και τους αεραγωγούς. Επίσης, παρουσιάζονται και πίνακες οι οποίοι έχουν τα αποτελέσματα των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας και των δύο έτσι ώστε να υπάρξει και μια σύγκριση μεταξύ των μοντέλων.

6.1 ΟΔΗΓΟΣ FLUENT

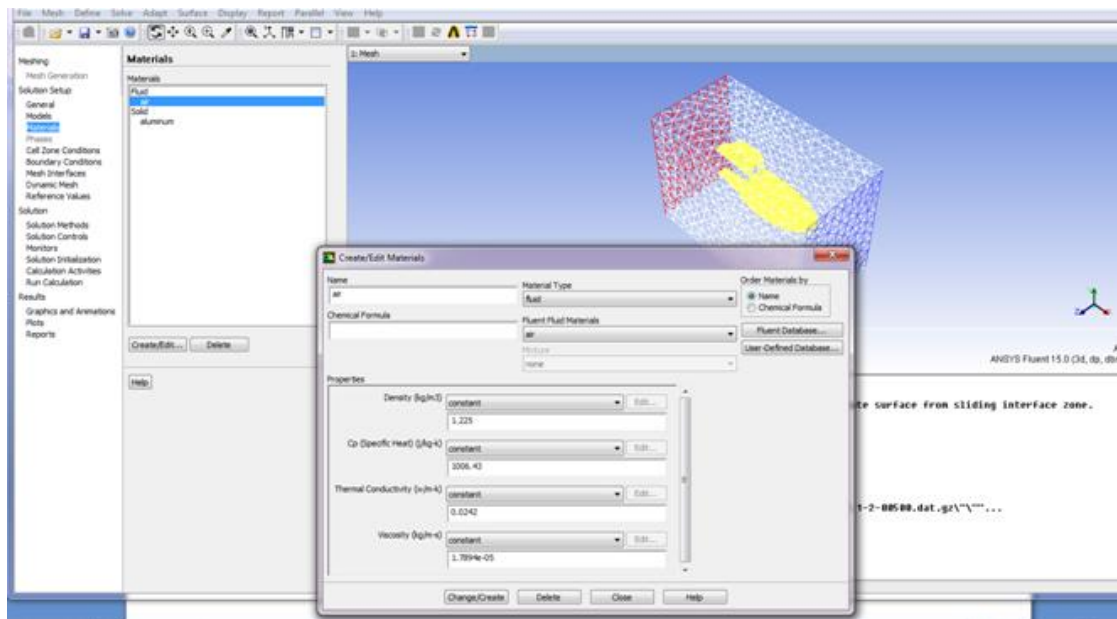
Η επιλογή του μοντέλου και η ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων που έγιναν στο Fluent παρουσιάζονται παρακάτω σε βήματα .

Η επιλογή μοντέλου γίνεται από την καρτέλα Model. Δίπλα στο όνομα των μοντέλων, αναφέρονται και οι εξισώσεις που περιέχει Εικόνα 6.1. Όπως αναφέραμε το Spalart-Allmaras είναι μοντέλο μιας εξίσωσης (1 eqn).



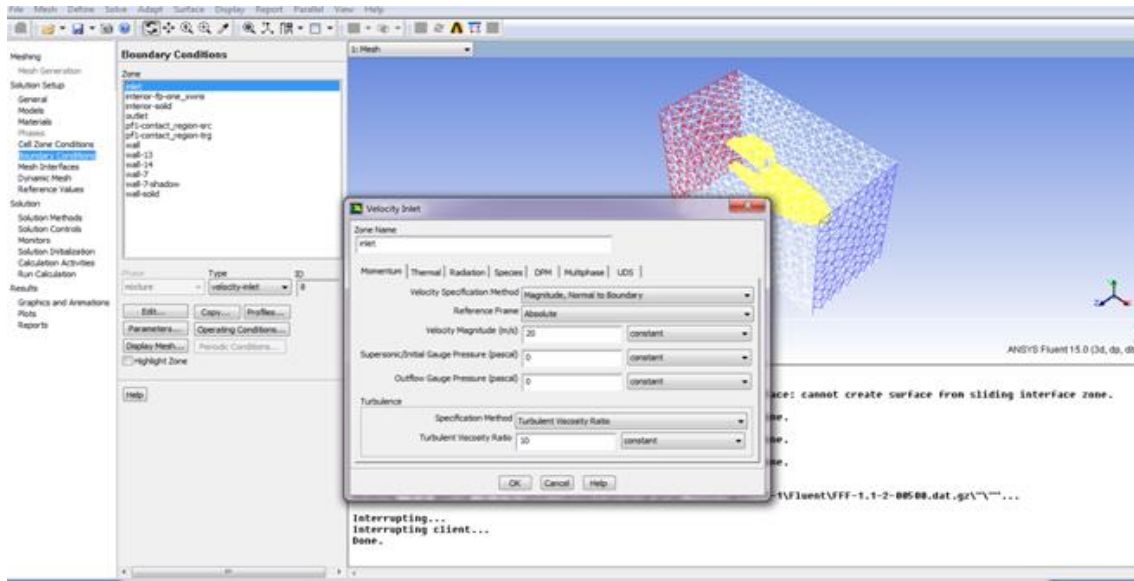
Εικόνα 6.1: Επιλογή μοντέλου

Έπειτα επιλέγουμε το είδος του ρευστού, που στην περίπτωση μας είναι αέρας. Το υλικό της δομής μας, δηλαδή της του πλαισίου και του αεραγωγού, δε μας απασχολεί στη συγκεκριμένη μελέτη. Αυτή η επιλογή είναι χρήσιμη για άλλου είδους μελέτες, όπως είναι τα μηχανικά προβλήματα. Όπως φαίνεται στη συγκεκριμένη Εικόνα 6.2, στην επιλογή Density (πυκνότητα), παραμένει η προεπιλεγμένη παράμετρος constant και γιατί εμείς λύνουμε το πρόβλημα για κανονικές συνθήκες. Το Fluent βέβαια έχει την δυνατότητα να υπολογίζει αυτόματα την πυκνότητα βάσει των παραμέτρων που δίνουμε εμείς (θερμοκρασία, πίεση κ.λ.π.).



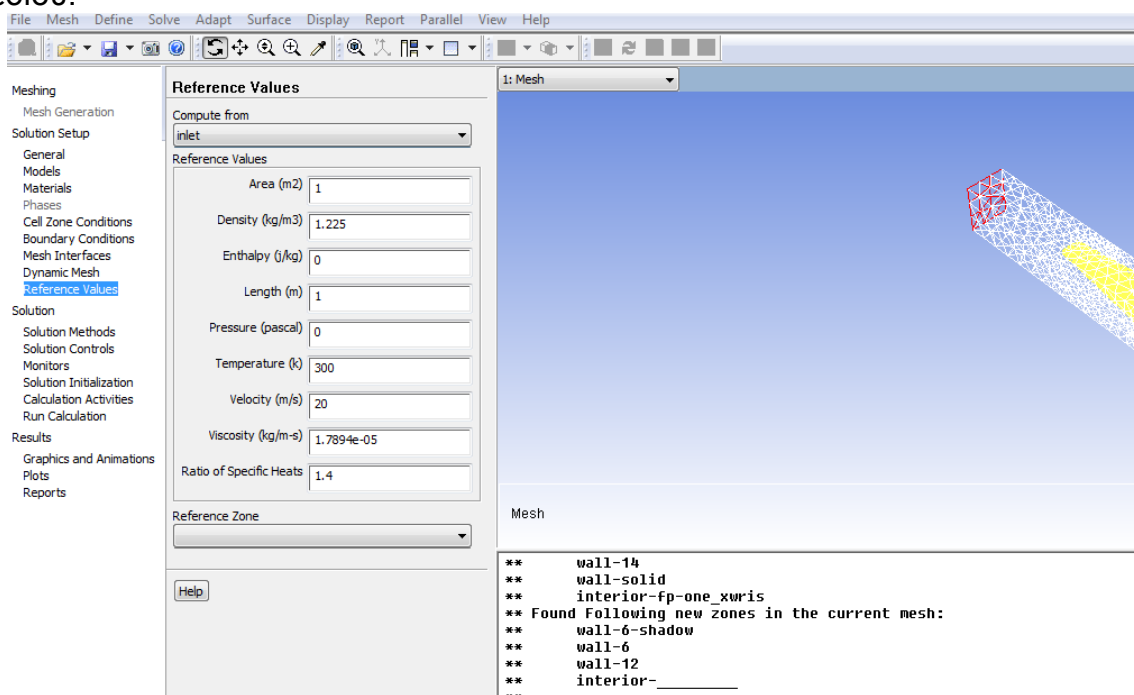
Εικόνα 6.2: Επιλογή ρευστού και του υλικού του αεραγωγού και του πλαισίου.

Στην κατηγορία Boundary Conditions (Συνοριακές Συνθήκες), ορίσαμε τον τύπο του αεραγωγού και του πλαισίου αντίστοιχα, ως τοίχωμα (wall). Το Fluent, δίνει διάφορους τύπους συνοριακών συνθηκών που μπορούν να επιλεγθούν για το πεδίο ροής. Ένας τύπος συνοριακής συνθήκης είναι το Velocity Inlet, με την οποία, ορίζεται το μέτρο της ταχύτητας και η ένταση της τύρβης Εικόνα 6.3. Άλλος τύπος είναι το Pressure Outlet, στο οποίο όλες οι ποσότητες της ροής, στην έξοδο, υπολογίζονται από την κατάσταση μέσα στο ροϊκό πεδίο.



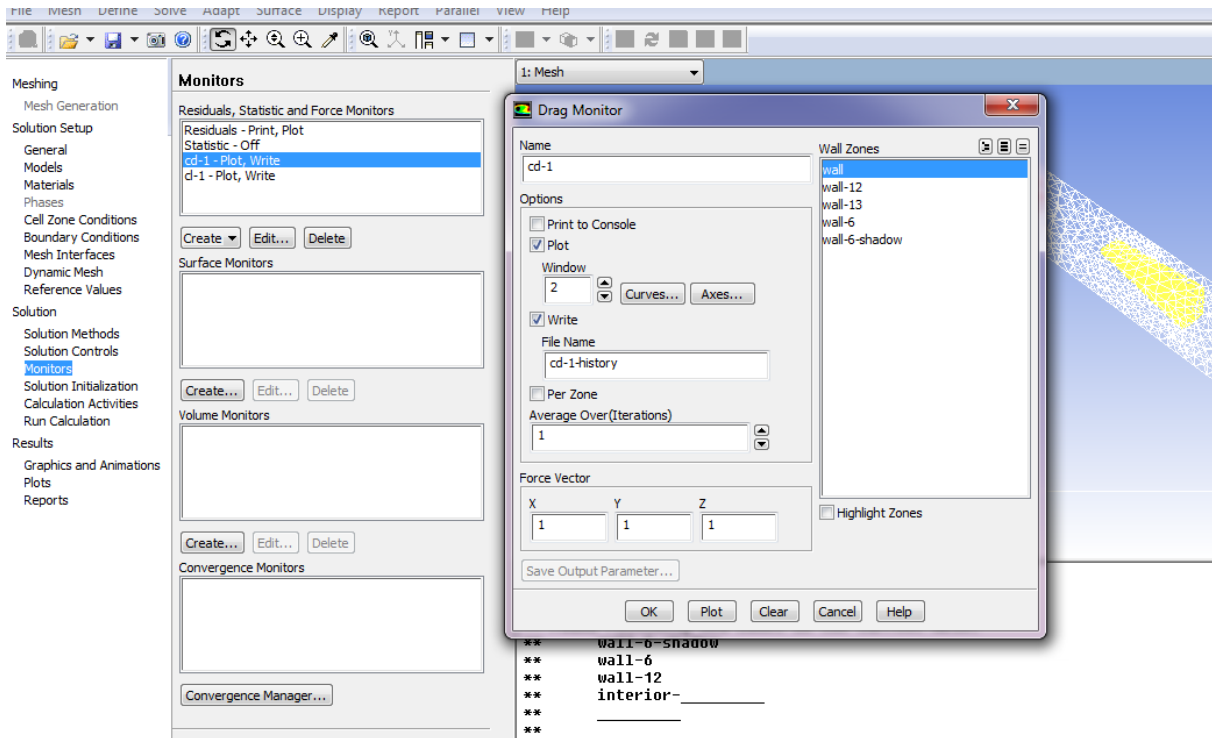
Εικόνα 6.3: Συνοριακές Συνθήκες

Στην συνέχεια καθορίζουμε ποιο θα είναι το σημείο αναφοράς για τους υπολογισμούς Εικόνα 6.4. Επιλέγουμε το Inlet, και έτσι οι υπολογισμοί θα γίνουν βάσει των δεδομένων που έχουμε εισάγει στις συνοριακές συνθήκες του ροϊκού πεδίου.



Εικόνα 6.4: Σημείο αναφοράς για τους υπολογισμούς

Από την καρτέλα Monitors δημιουργούμε, με την επιλογή Create, τα διαγράμματα C_L και C_D . Επίσης μπορούμε να καθορίσουμε και τα υπόλοιπα των εξισώσεων από την υποκαρτέλα Residuals.



Εικόνα 6.5: Εισαγωγή διαγράμματος οπισθέλκουσας

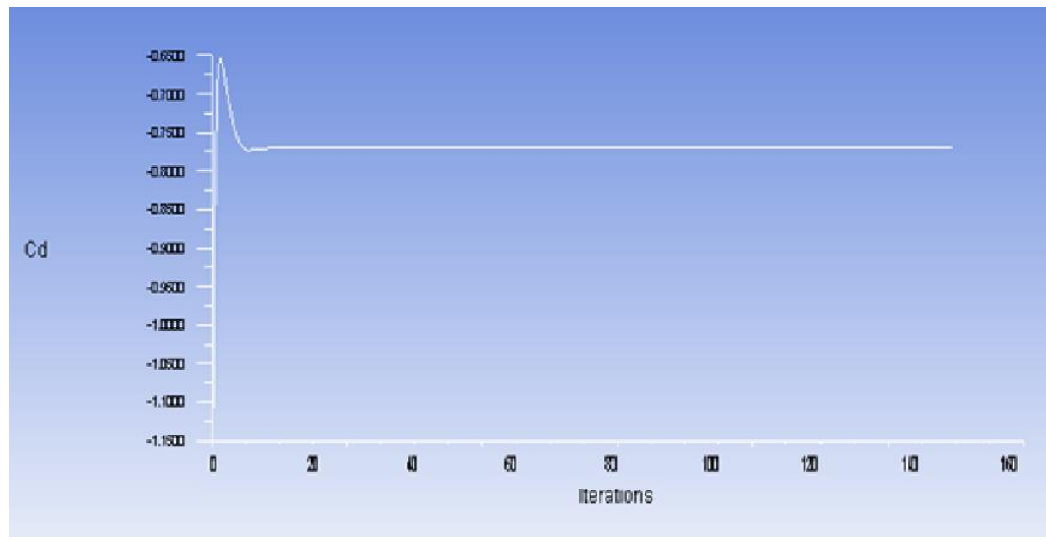
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπου εισάγαμε τα διαγράμματα C_L και C_D , μπορούμε να εισάγουμε τις κατανομές πίεσης και ταχύτητας Εικόνα 6.5(και όχι μόνο, καθώς το Fluent έχει πολλές άλλες επιλογές όπως η κατανομή του αριθμού Mach, της θερμοκρασίας και της τύρβης). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καρτέλας Graphics and Animations. Τέλος από την καρτέλα Run Calculation, επιλέγουμε τον αριθμό επαναλήψεων.

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

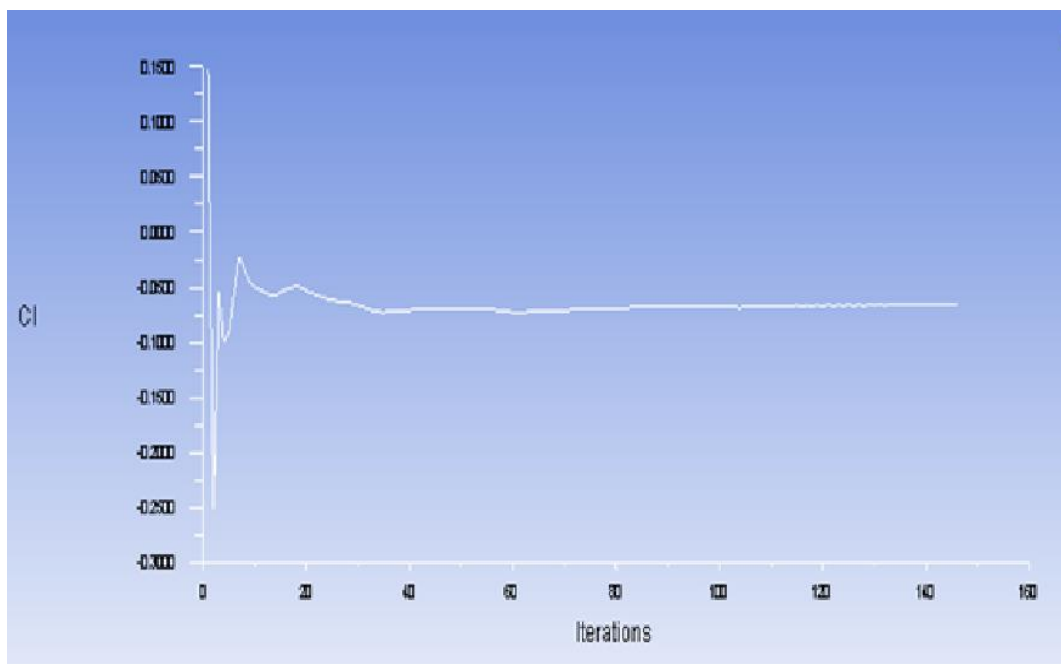
Με τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν και με τις οριακές συνθήκες που θέτουμε, εξάγουμε τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα για το αεραγωγό, το πλαίσιο και όλο το σύστημα μαζί.

Η διαδικασία που πραγματοποιείται είναι αυτή που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Γίνεται η προσομοίωση αρχικά με επιλογή μοντέλου Spalart Allmaras και ακολουθούν με τα μοντέλα k-epsilon Stanard, k-omega SST και Laminar. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα του συντελεστή οπισθέλκουσας και άνωσης καθώς και η κατανομή της ταχύτητας και πίεσης κατά μήκος των δομών που μελετώνται.

- **Πλαίσιο**



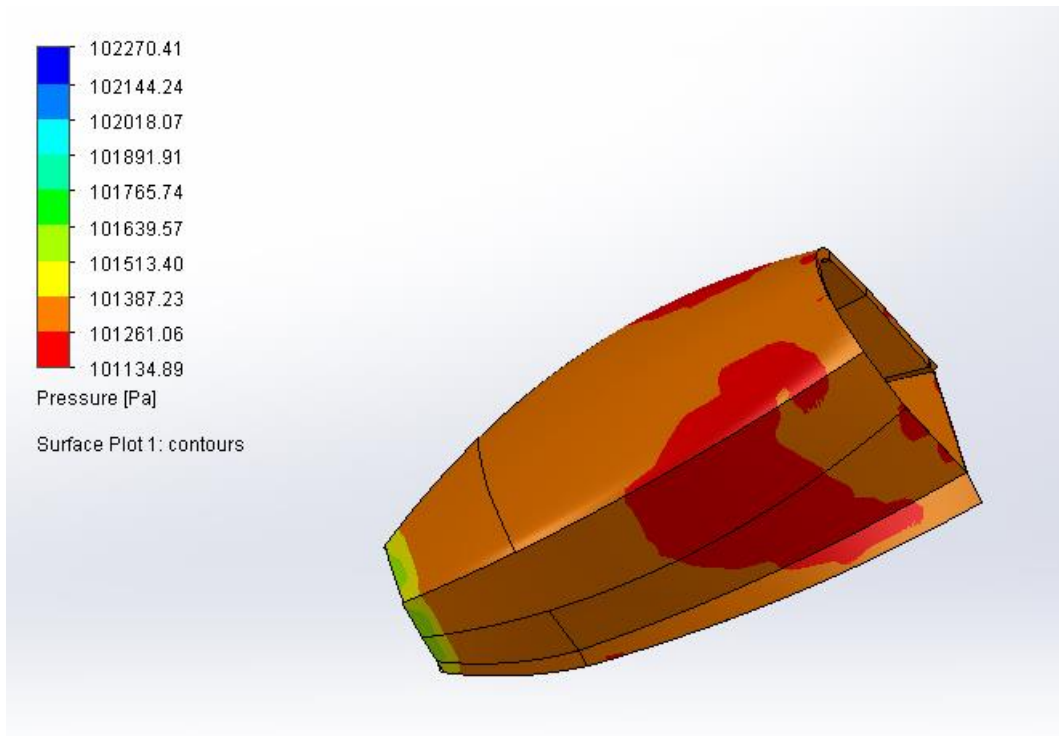
Διάγραμμα 6.1: Συντελεστής οπισθέλκουσας πλαισίου



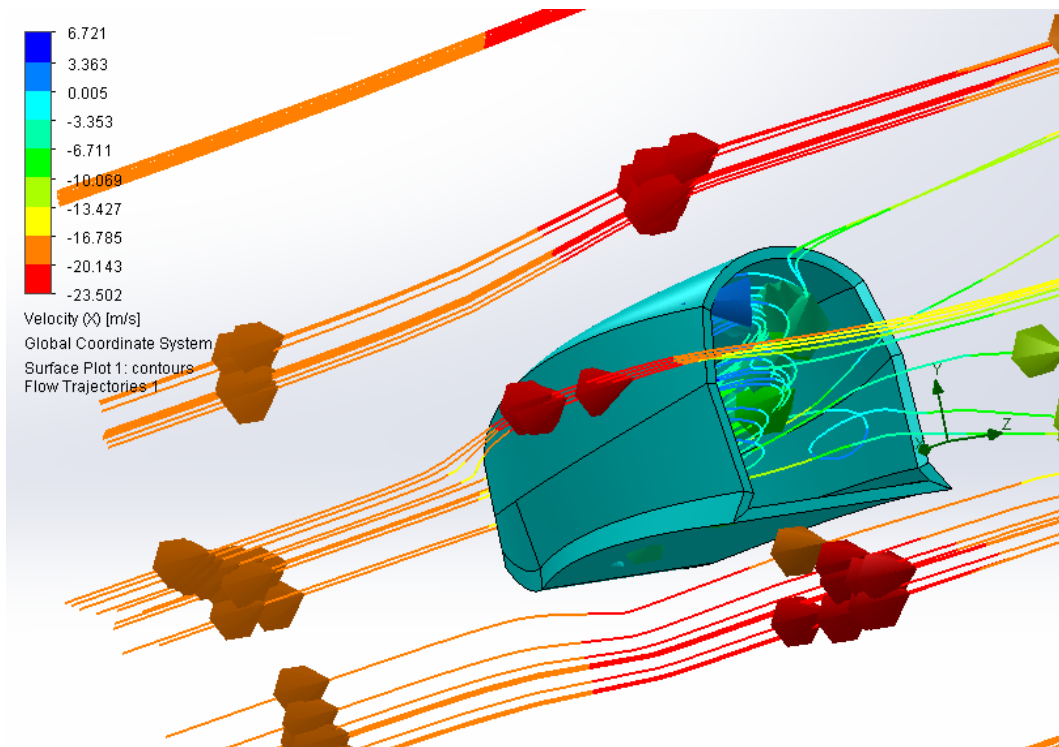
Διάγραμμα 6.2: Συντελεστής άνωσης πλαισίου

α/α	Μέγεθος	Spalart Allmaras	Laminar	k-epsilon Stanard	k-omega SST
1	C_L	0.0832	0.0824	0.0835	0.0841
2	C_D	0.7783	0.7923	0.7795	0.797
3	L/D	0.1069	0.1040	0.1071	0.1055

Πίνακας 6.1: Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης πλαισίου

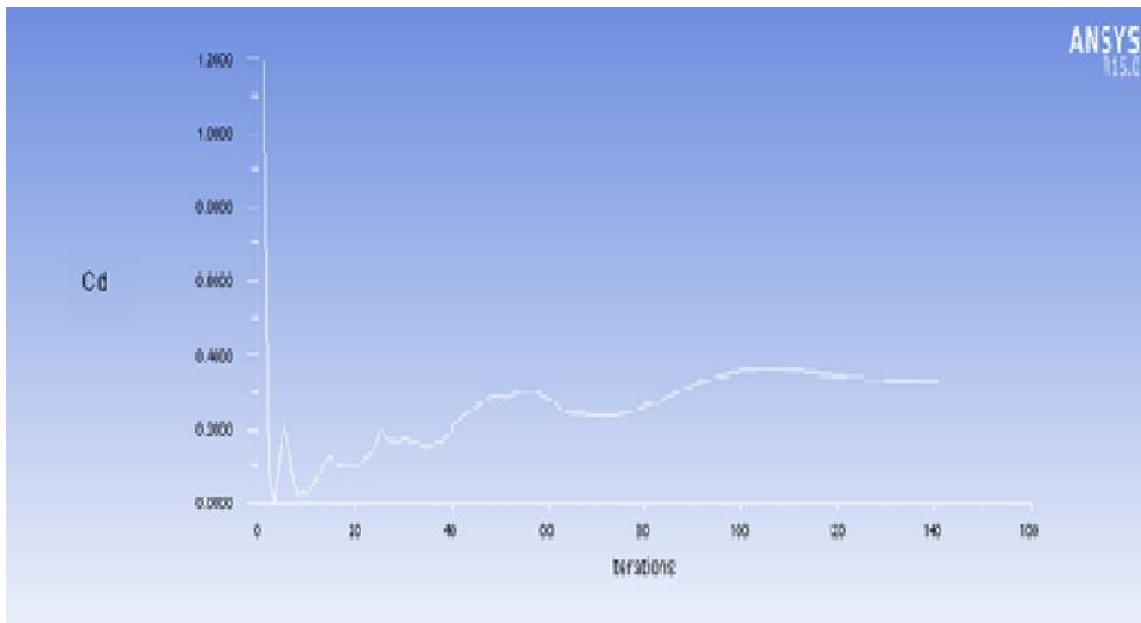


Εικόνα 6.6: Κατανομή πίεσης στο πλαίσιο

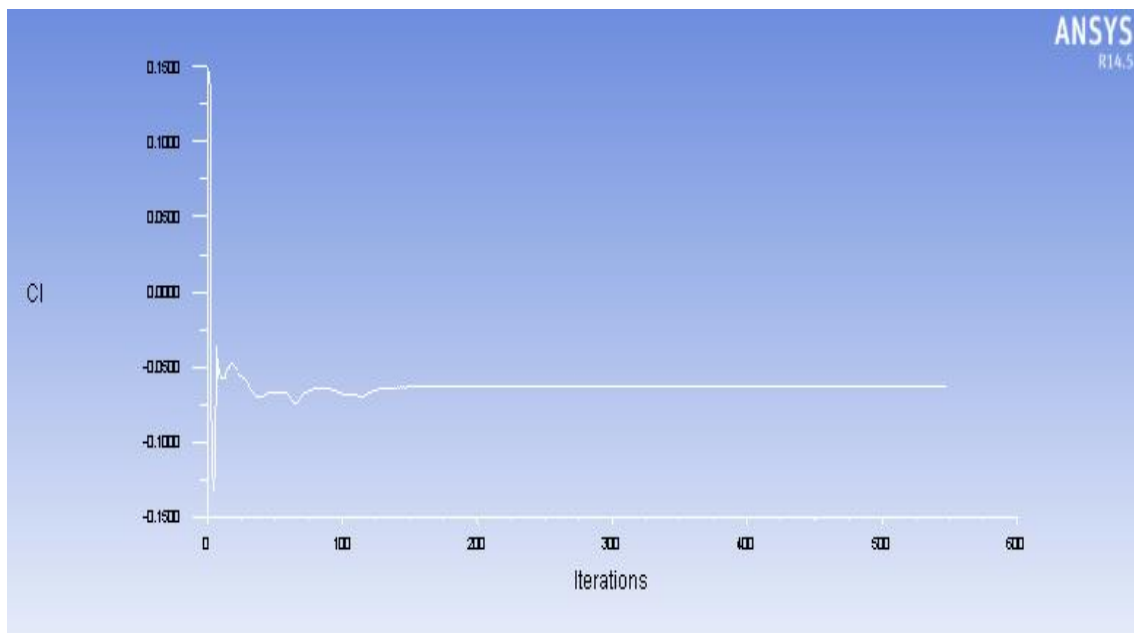


Εικόνα 6.7: Κατανομή ταχύτητας στο πλαίσιο. Παρατηρούνται και οι στροβιλισμοί στο πίσω μέρος του

- Αεραγωγοί



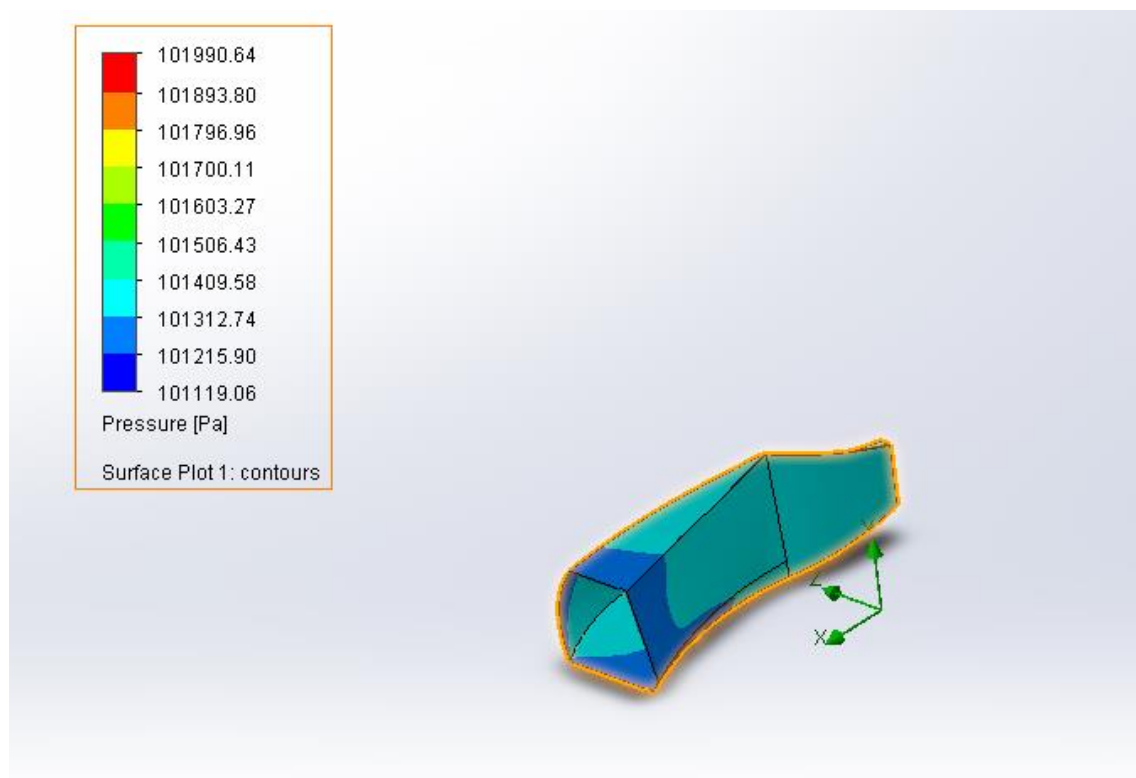
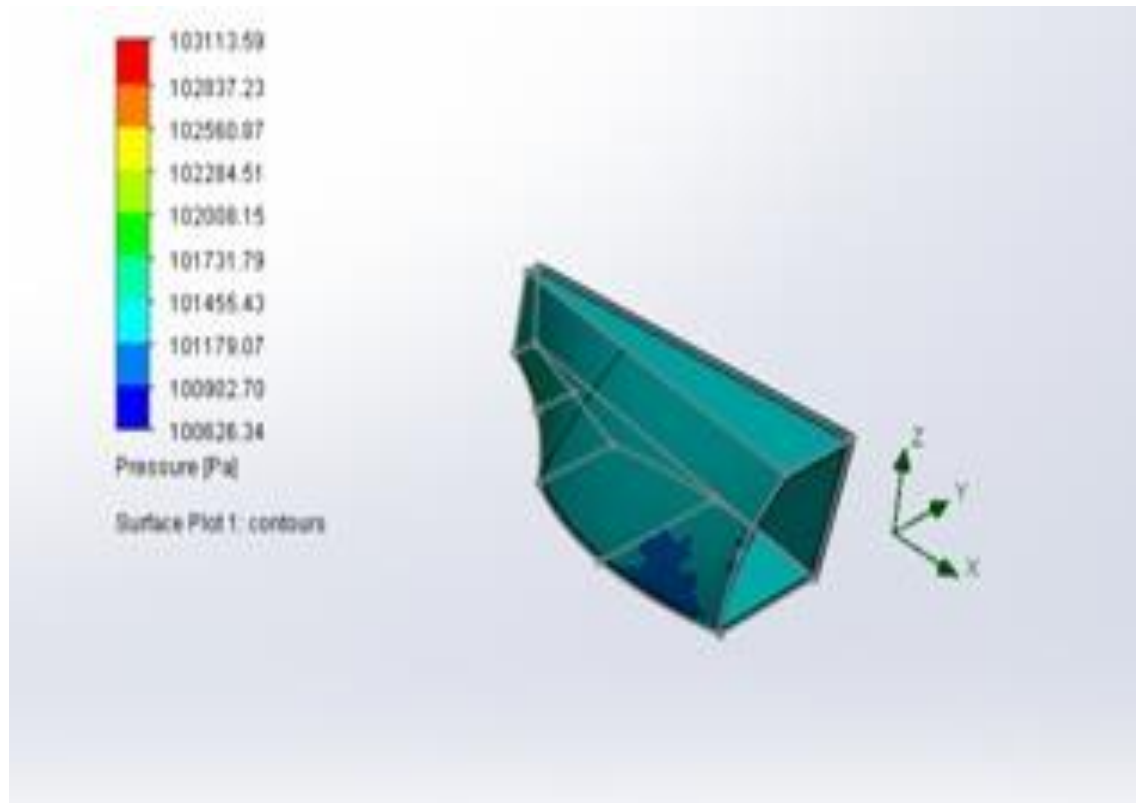
Διάγραμμα 6.3: Συντελεστής οπισθέλκουσας αεραγωγών



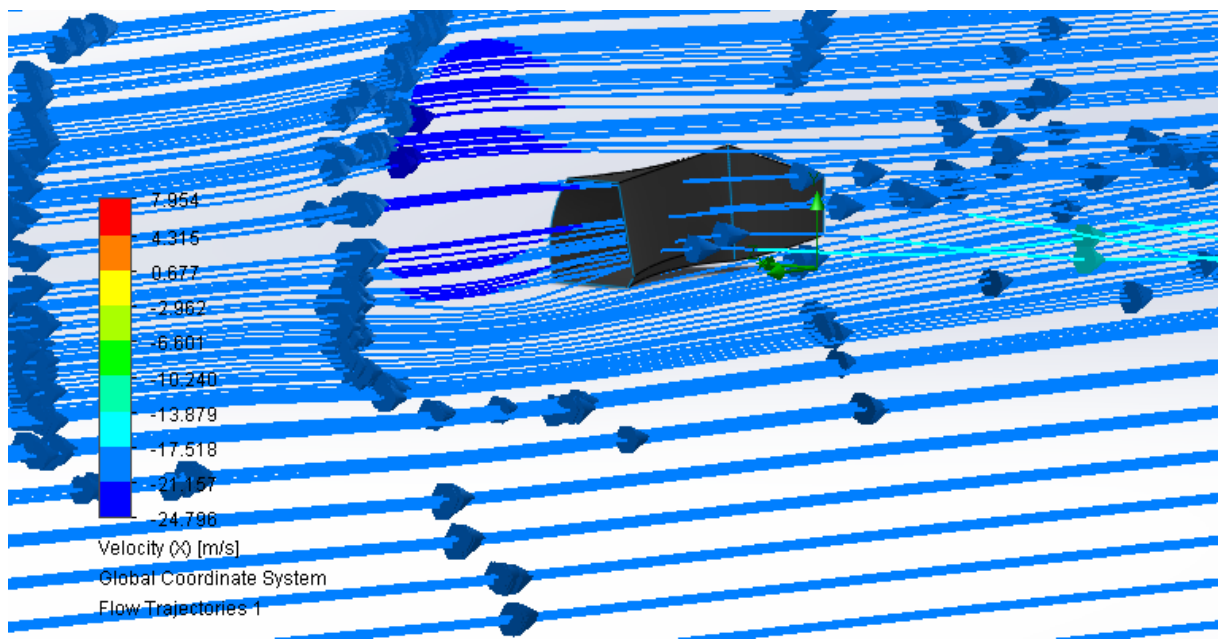
Διάγραμμα 6.4: Συντελεστής άνωσης αεραγωγών

α/α	Μέγεθος	Spalart Allmaras	Laminar	k-epsilon Stanard	k-omega SST
1	C_L	0.0631	0.06454	0.06287	0.0637
2	C_D	0.3212	0.3456	0.3253	0.3322
3	L/D	0.1965	0.1867	0.1933	0.1918

Πίνακας 6.2: Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης αεραγωγών

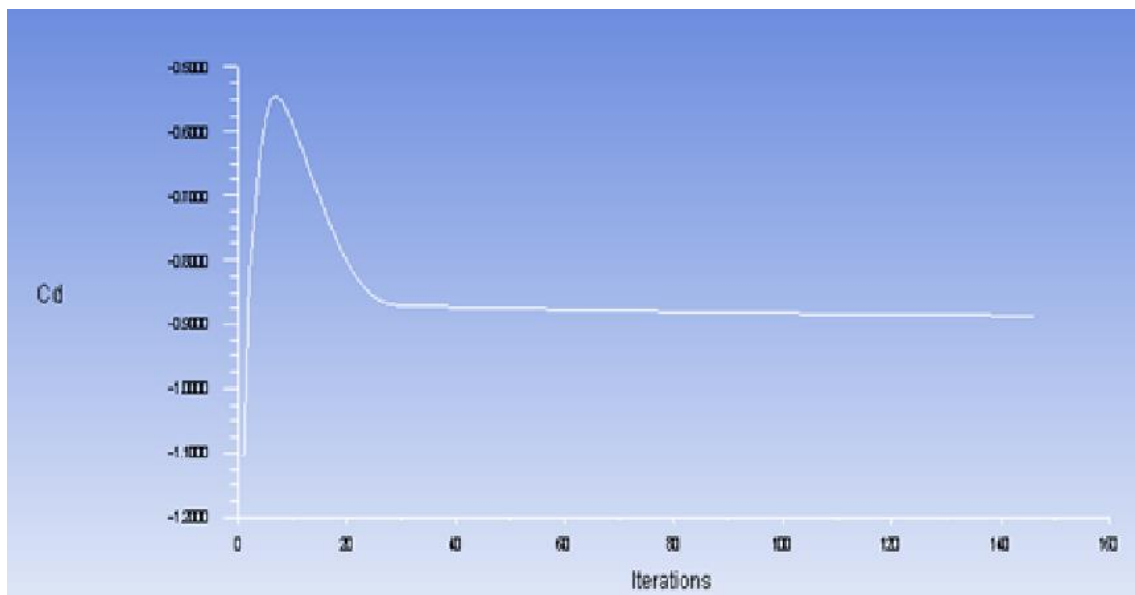


Εικόνα 6.8: Κατανομή πίεσης στον αεραγωγό

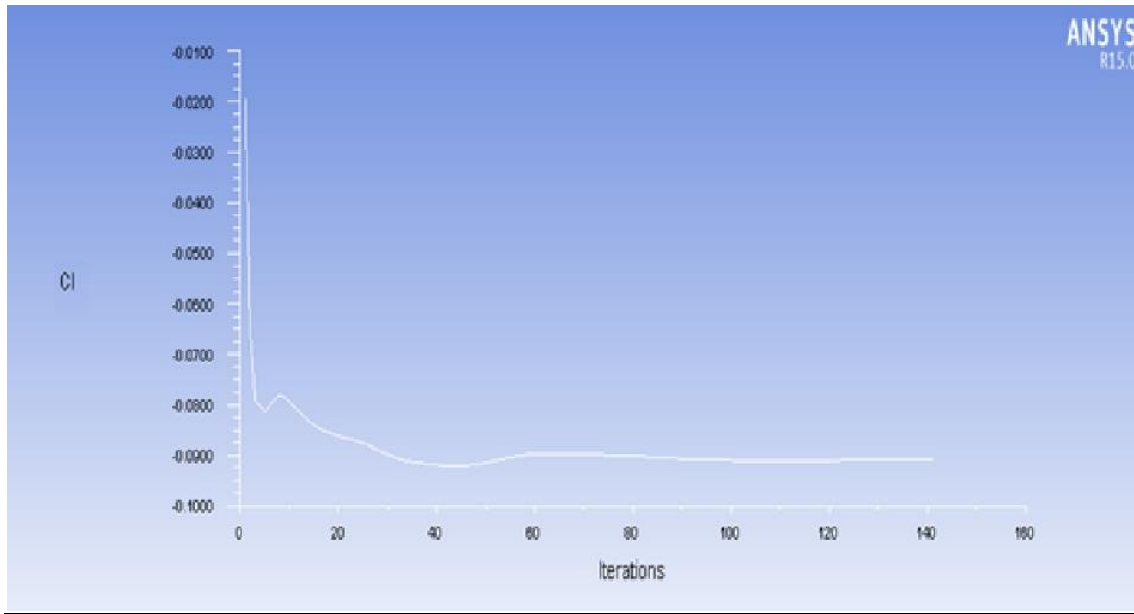


Εικόνα 6.9: Κατανομή ταχύτητας στον αεραγωγό

- **Πλαισιο μαζί με τα αεροδυναμικά βοηθήματα**



Διάγραμμα 6.7: Συντελεστής οπισθέλκουσας όλου του συστήματος



Διάγραμμα 6.8: Συντελεστής άνωσης όλου του συστήματος

α/α	Μέγεθος	Spalart Allmaras	Laminar	k-epsilon Stanard	k-omega SST
1	C_L	0.0921	0.0935	0.0929	0.0928
2	C_D	0.8652	0.8712	0.8673	0.8714
3	L/D	0.1064	0.1073	0.1071	0.1065

Πίνακας 6.3: Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης πλαισίου με αεροδυναμικά βοηθήματα

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης τα νούμερα της οπισθέλκουσας και της άνωσης είναι σχετικά καλά συγκριτικά με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων Πανεπιστημιακών ιδρυμάτων (για παράδειγμα η Prom Racing ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου έχει τιμή συντελεστή οπισθέλκουσας 0.62, που έχουν ασχοληθεί με το ίδιο πρόγραμμα, συνεπώς υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων. Τα νούμερα είναι ικανοποιητικά αν σκεφτεί κανείς ότι υπάρχει έλλειψη ακόμα πολλών εξαρτημάτων και τμημάτων τα οποία με τα υπάρχοντα δεδομένα δεν ήτο εφικτό να υπολογιστούν ακόμα.

Τα νούμερα C_D και C_L δεν είναι τα τελικά όσον αφορά την τελική μορφή του μονοθεσίου, γιατί όπως προαναφέραμε ασχολούμαστε με το πρώτο στάδιο της μελέτης. Πρέπει, για να προκύψουν τα τελικά αποτελέσματα, να υπολογιστούν και να ληφθούν υπόψιν τα διάφορα εξαρτήματα τροχοί, αεροτομή και κάθε άλλο αεροδυναμικό βοήθημα που θα συντελέσουν στο να κατεβάσουν και να φέρουν τις τιμές των παραπάνω μεγεθών σε ανταγωνιστικά νούμερα, γιατί μην ξεχνάμε ότι εφόσον το μονοθεσιό μας θα συμμετάσχει σε διαγωνισμό θα πρέπει να ξεπεράσει τον ανταγωνισμό αν θέλουμε να διακριθεί. Τα αεροδυναμικά βοηθήματα δεν θα βελτιώσουν το μονοθέσιο μόνο όσο αφορά το αεροδυναμικό κομμάτι, δηλαδή τις επιδόσεις ταχύτητας και ισχύος αλλά θα συντελεσουν στην ενίσχυση της ασφάλειας και του σχεδιασμού (design) δύο τομείς που μας δίνουν πολλούς πόντους στους διαγωνισμούς.

Αν δούμε τώρα ένα ένα τα αποτελέσματα της μελέτης θα παρατηρήσουμε ότι το πλαίσιο έχει, για όλα τα ροικά μοντέλα, τις ακόλουθες μέσες τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας και άνωσης:

- $C_D=0.78$
- $C_L=0.083$

Η τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας είναι μεγάλη όχι όμως ακραία αν αναλογιστεί κανείς τον όγκο του πλαισίου και την μεγάλη επιφάνεια στο μπροστινό μέρος του, η οποία έχει αυτό το σχήμα καθώς με τα υλικά και τα εργαλεία που διαθέτει η ομάδα ακόμα και να ήθελε δεν μπορούσε να κατασκευάσει μία πιό

καμπύλη μύτη υπακούοντας πάντα όμως και στους κανονισμούς του διαγωνισμού. Ο συντελεστής άνωσης από την άλλη έχει πολύ μικρή τιμή, όπως προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο η άνωση είναι αυτή που κρατάει το όχημά μας στο έδαφος εξού και η αρνητική τιμή που φαίνεται στο διάγραμμα. Καμία τιμή όμως δεν είναι λάθος καθώς όπως έχουμε πει πολλάκις και τονίζεται συνέχεια για να αναδειχτεί η αξία τους δεν έχουμε τοποθέτηση αεροδυναμικά βοηθήματα τα οποία το έργο τους είναι να βελτιώσουν αυτές τις τιμές.

Οι αντίστοιχες μέσες τιμές για τους αεραγωγούς είναι:

- $C_D=0.32$
- $C_L=0.063$

Βλέπουμε μια πολύ καλή τιμή οπισθέλκουσας και αυτή οφείλεται στο μακροστότενο σχήμα του αεραγωγού και την μικρή επιφάνεια αντίστασης. Θα μπορούσαμε να το παρωμοιάσουμε με το σχήμα της σταγόνας καθώς κατά μήκος λεπτύνει.

Τέλος, το πλαίσιο μαζί με τους αεραγωγούς έχει τιμές:

- $C_D=0.87$
- $C_L=0.093$

Ένα αγωνιστικό μονοθέσιο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.12 του Κεφαλαίου 3 έχει τιμή 0.5 πράγμα που σημαίνει ότι δεν βρισκόμαστε σε «απαγορευμένη ζώνη» τιμών. Ακόμα έχει αυξηθεί και η τιμή του συντελεστή άνωσης πράγμα που επιδιώκουμε.

Ένα ακόμα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει, και δεν έχει να κάνει με την μελέτη των αεροδυναμικών συντελεστών, είναι ο χρόνος της προσομοίωσης σαν αποτέλεσμα της διακριτοποίησης του πλέγματος. Δηλαδή όσο αναφορά τη χωρική σύγκλιση, στην αρχή πηγαίναμε σε αρκετά πυκνά πλέγματα, και ταυτόχρονα απαιτητικά για τον υπολογιστή, με αποτέλεσμα οι προσομοιώσεις να χρειάζονται αρκετό χρόνο για να ολοκληρωθούν. Μερικές φορές δε, μπορεί να μας εμφάνιζαν προβλήματα, όπως αδυναμία ανάγνωσης από το Fluent. Τα απαιτητικά πλέγματα τα οποία δεν εμφάνιζαν προβλήματα, έδιναν αντίστοιχα αποτελέσματα, με αυτά που δίνει το πλέγμα που επιλέξαμε, έχοντας μια μικρή απόκλιση. Για να απλοποιήσουμε το πλέγμα φυσικά χρειάστηκαν πολλές τροποποιήσεις στην γεωμετρία από το πρόγραμμα Solidworks. Συνεπώς οι προσομοιώσεις έγιναν με το βέλτιστο συνδυασμό μεγέθους πλέγματος και ταχύτητας προσομοίωσης για την δεδομένη υπολογιστική ισχύ.

Τέλος ένα συμπέρασμα που βγαίνει μέσα από αυτήν την Πτυχιακή Εργασία είναι ότι το Laminar model έχει μια απόκλιση αποτελεσμάτων, μόλις στο 1% - 6%, από το μοντέλο k-omega SST, το οποίο θεωρείται και το πιο απαιτητικό μοντέλο τύρβης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς το Laminar model απαιτεί πολύ μικρότερο χρόνο προσομοίωσης από ότι το k-ω. Επίσης παρατηρείται ότι το Spalart Allmaras δίνει

αντίστοιχα αποτελέσματα με το k-epsilon Standard, το οποίο και αυτό απαιτεί παραπάνω χρόνο προσομοίωσης από ότι το SA.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε μια αρχική δομή-πρόταση του μονοθέσιου της FP-ONE team σε ακολουθία βημάτων σχεδιασμού και αεροδυναμικής μελέτης. 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.

Γενικεύοντας τη συνολική διαδικασία που παρουσιάστηκε 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 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. 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.

Τα αποτελέσματα συμβαδίζουν με αυτά που παρουσιάζουν, όπως προαναφέραμε, άλλες ομάδες του διαγωνισμού. Αυτό δεν σημαίνει πως η αξία των αποτελεσμάτων είναι απόλυτη, καθώς δεν μπορούν να προσομοιωθούν ακριβώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες και λείπουν μέλη. 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.

Με τη γνώση και την εμπειρία που αποκτήθηκε και τα πακέτα μελέτης που ετοιμάστηκαν είναι δυνατό να γίνουν καινούρια σενάρια μελέτης πάνω στο μονοθέσιο. Ολοκληρώνοντας, ας εκφραστεί η ευχή να υπάρξουν επόμενοι σπουδαστές που θα εμπλακούν με την ομάδα FP-ONE και θα εκμεταλλευτούν, προς όφελός της, ακόμα και αυτήν την πτυχιακή εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσαγγάρης, Σ., "Μηχανική των Ρευστών", Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2005.
2. Μπεργελές, Γ., "Υπολογιστική Ρευστομηχανική", Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2012.
3. Γιαννάκογλου, Κ., Χ., "Μέθοδοι Αιτιοκρατικής 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. Menter, F., Esch, T., "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction", 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2001.
7. 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.
8. <http://iceal.wikidot.com/aerodynamika-voithimata>
9. Hellsten, A., "Some Improvements in Menter's k-omega-SST turbulence model", 29th AIAA Fluid Dynamics Conference, 1998. P.R. Spalart, S.R. Allmaras, "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", La Recherche Aerospatiale, No. 1, 1994, pp. 5-21.
10. G.A. Ashford, "An Unstructured Grid Generation and Adaptive Solution Technique for High Reynolds Number Compressible Flows", Ph.D. thesis, University of Michigan, 1996.
11. Q., Wang, P., Moin, "Minimal repetition dynamic checkpointing algorithm for unsteady adjoint calculation", Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, 2008.
12. 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.
13. 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
14. Νανούσης Δ. Νανούσης, *Ρευστομηχανική Α' Τόμος*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 2005.
15. Νανούσης Δ. Νανούσης, *Ρευστομηχανική Β' Τόμος*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 2009.
16. Lloyd R. Jenkinson and James F. Marchman III, *Aircraft Design Projects*, British Library Cataloguing in Publication Data, 2003.
17. 12/airplane/forces.html.
18. Computational Fluid Dynamics, <http://www.ansys.com/>.
19. Σημειώσεις του μαθήματος Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών II, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας (Πάτρα).

20. Νικολάου Α. Αθανασιάδη, *Μηχανική Ρευστών*, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα, 1989
21. Δημήτρης Γ. Παπανίκας, *Εφαρμοσμένη Ρευστοδυναμική*, 2η έκδοση, Εκδόσεις Αχαιός, Πάτρα, 1981/22. <http://history.nasa.gov/>
22. democritusracingteam.com/el/index.php/fsae
23. www.autoblog.gr/2013/10/08/uop-racing-h-formula-student
24. www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=e179e647-cb8c-4ab0-860c-ec69aae080a3.
25. www.rennteam-stuttgart.de/
26. <https://www.ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2016/06/grimsel-electric-racing-car-broke-world-record.html>
27. www.monashmotorsport.com
28. <https://www.kit.edu/english/>
29. <https://www.monkeywings.nl>
30. www.alfasolid.gr
31. <http://www.image.ece.ntua.gr/old/vlabs/kladas/introduction.htm>
32. www.fugahumana.wordpress.com