

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΒΕΡΓΑΔΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2023-2024

Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Μάρτιος 2024

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2023-2024

ΒΕΡΓΑΔΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Μάρτιος 2024

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA

2024. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without the written permission of the copyright owner.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι εξεταστική επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Μεταδιδάκτορας	
3	Δρ. Σοφιάδης Γεώργιος	Μεταδιδάκτορας	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βέργαδος Αθανάσιος του Αποστόλου, με αριθμό μητρώου 46146421, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



ABSTRACT

As a vehicle moves, it interacts with the flow field of the air surrounding it. This interaction becomes more pronounced with the complexity and non-uniformity of the vehicle geometry and leads to the creation of turbulent phenomena, thus affecting the smooth motion of the vehicle and causing the constant fluctuation of the values of the pressures and velocities of the flow. In this thesis, an analytical aerodynamic study of the flow field of the Orca vehicle of the Poseidon Team, a vehicle design team of the University of West Attica, is carried out, following the appropriate experimental procedure and simulation based on a RANS model and in particular the SST $k - \omega$ turbulence model. Furthermore, the aerodynamic behaviour of Orca is also studied after the addition of 2 buildings alongside it. All the procedure and flow field properties were set up and simulated in Ansys ICEM and Fluent environment and the post processing results were presented in Tecplot 360.

Keywords: CFD, RANS method, SST ($k - \omega$), streamlines, wake, boundary layers, yaw angles , turbulence

Ευχαριστίες

Με το πέρας της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας και γενικότερα της φοιτητικής μου πορείας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους εκείνους που με στήριξαν, με εμπιστεύθηκαν και με βοήθησαν σε αυτή μου την προσπάθεια, όντας από την αρχή μέχρι το τέλος δίπλα μου.

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Λεκάκη ο οποίος μου έδωσε το έναυσμα για να ασχοληθώ με τον τομέα της ρευστομηχανικής και πάντα ήταν πρόθυμος και επεξηγηματικός αναφορικά με την επίλυση αποριών και ζητημάτων καθ' όλη την διάρκεια της προετοιμασίας της παρούσας διπλωματικής. Τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και την εξασφάλιση όλων των υπολογιστικών πόρων για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και για την παροχή τεχνικών πληροφοριών για θέματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο ο οποίος με τις τεχνικές του γνώσεις και εμπειρία αποτέλεσε τον βασικό αρωγό στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, με την αμέριστη βοήθεια του και την συνεχή παρακολούθηση της πορείας της. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Θεόδωρο Παπαδόπουλο, με τη συμβολή και τη καθοδήγηση του οποίου πραγματοποιήθηκε όλη η πειραματική διαδικασία.

Εκτός από το εκπαιδευτικό προσωπικό που ανέφερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κανέλλο Ψυχογιό, μέλος της Poseidon Team, ο οποίος μου έδωσε αναλυτικές πληροφορίες και στοιχεία για το όχημα Orca, καθώς και τον συνάδελφο Παναγιώτη Τζέκο που με την παρουσία του στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής και Τεχνικών Μετρήσεων με βοήθησε σε δυσκολίες και εμπόδια που προέκυψαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου οικογένεια, τους γονείς μου Απόστολο και Μεταξία, αλλά και την πολυαγαπημένη μου αδερφή και μηχανικό Αγγελική, που ήταν εκεί σε όλες τις χαρές και τις λύπες, υποστηρίζοντας κάθε μου απόφαση και συμβάλλοντας έμπρακτα στην προσπάθεια μου να γίνω μηχανικός, ένα όνειρο που έγινε πραγματικότητα.

"We cannot solve our problems with the same thinking we used when we created them."

Albert Einstein

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
Ευχαριστίες	ii
Κατάλογος Σχημάτων	vi
Κατάλογος Πινάκων	xv
Κατάλογος Εξισώσεων	xvi
LIST OF ABBREVIATIONS	xvii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	2
2.1 Αεροδυναμικά φορτία	3
2.1.1 Οπισθέλκουσα δύναμη (Drag)	3
2.1.2 Άντωση (Lift) - Κάθετη δύναμη (Downforce)	6
2.1.3 Πίεση (Pressure)	7
2.1.4 Πλευρικές δυνάμεις (Lateral forces)	8
2.2 Οριακά στρώματα – Απόρρους (Boundary layers-Wake)	9
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	12
3.1 Έρευνες Αεροδυναμικής Οχημάτων Εδάφους	12
3.2 Πειραματικές Μελέτες σε Αεροδυναμικές Σήραγγες	17
3.2.1 Μελέτες υπό κλίμακα	19
3.2.2 Μελέτες σε πλήρη κλίμακα	34
3.3 Μελέτες με τη μέθοδο Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)	41
3.3.1 Μοντέλα τύρβης για εξισώσεις (RANS)	42
3.3.2 Προσομοίωση μεγάλων δινών (LES)	57
3.3.3 Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS)	61
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	62
4.1 Μέθοδος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)	62
4.2 Εξισώσεις Navier-Stokes	65
4.3 Μοντελοποίηση της τύρβης	66
4.3.1 Εξισώσεις μοντέλου RANS	68
5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	70
5.1 Orca	70
5.1.1 Ιστορικό	70
5.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά	71
5.2 Γεωμετρία πειραματικής διαδικασίας	73
5.2.1 Υπό κλίμακα μοντέλο αεροσήραγγας	74
6 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ	83
6.1 Πειραματική προσέγγιση	83
6.1.1 Εξοπλισμός πειράματος	84
6.2 Υπολογιστική προσέγγιση CFD (case 1)	87
6.2.1 Ορισμός πεδίου ροής και υπολογιστικού χωρίου	87
6.2.2 Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος	90

6.2.3 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες (Προ-επεξεργασία προσομοίωσης).....	93
6.2.4 Συντελεστής Πίεσης (Cp).....	102
6.2.5 Αποτελέσματα	109
7 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ (ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΤΙΡΙΩΝ).....	120
7.1 Υπολογιστική προσέγγιση CFD (case 2)	120
7.1.1 Υπολογιστικό χωρίο	120
7.1.2 Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος	122
7.1.3 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες.....	125
7.1.4 Σύγκριση συντελεστή πίεσης Cp (Case 1 – Case 2)	126
7.1.5 Αποτελέσματα	130
8 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	138
8.1 Συντελεστές οπισθέλκουσας και άντωσης (Cd, Cl)	138
8.2 Προφίλ ταχυτήτων.....	139
8.3 Ροϊκές γραμμές πεδίου ροής.....	146
9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	154
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	157

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Πίεση και διατμητική τάση σε μία αεροδυναμική επιφάνεια (John D. Anderson, 2017)	2
Σχήμα 2-2 Δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε εν κινήσει όχημα (Nebenführ, 2010)	3
Σχήμα 2-3 Εξέλιξη συντελεστή οπισθέλκουσας Cd με την πάροδο των χρόνων (Kloek, 2013)	5
Σχήμα 2-4 Συντελεστής οπισθέλκουσας για θεμελιώδεις γεωμετρίες (Αρζόγλου, 2017)	5
Σχήμα 2-5 Τιμές συντελεστών Cd και Cl για διαφορετικές γεωμετρίες (Αρζόγλου, 2017).....	7
Σχήμα 2-6 Κατανομή πίεσης κατά μήκος οχήματος (Αρζόγλου, 2017).....	8
Σχήμα 2-7 Ανάπτυξη οριακού στρώματος (Banihani & El Haj Assad, 2018)	10
Σχήμα 2-8 Αναπαράσταση οριακού στρώματος, απόρρου και αποκόλλησης της ροής σε όχημα (Li, 2017).....	11
Σχήμα 2-9 Απεικόνιση των φαινομένων αποκόλλησης και επανασύνδεσης της ροής (Heisler, 2002)	11
Σχήμα 3-1 Διαφορετικές τοποθεσίες και γεωμετρίες αεροτομής με σκοπό την ενίσχυση της πέδησης (Kurec, Remer, & Piechna, 2019)	12
Σχήμα 3-2 Τυπικό σχήμα αεροτομής (Μπεκάκος, 2011)	13
Σχήμα 3-3 Τυπικό σχήμα μπροστινού φτερού (Buscariolo et al., 2022)	14
Σχήμα 3-4 Διαφοροποίηση τιμών του συντελεστή πίεσης Cp λόγω διαχύτη (Huminić & Huminić, 2020)	14
Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση αλληλεξάρτησης παραμέτρων υπό την επίδραση παράπλευρων ανέμων (Winkler et al., 2016)	15
Σχήμα 3-6 Γεωμετρική αναπαράσταση γωνίας εκτροπής και οπισθέλκουσας δύναμης (Nakashima et al., 2020).....	15
Σχήμα 3-7 Εγκατάσταση αεροδυναμικής σήραγγας (Cogotti, 2008)	18
Σχήμα 3-8 Βασικά μέρη αεροδυναμικής σήραγγας (Cogotti, 2008).....	18
Σχήμα 3-9 Τυπική δομή αεροσήραγγας NPL για στερεά μικρής κλίμακας (Balczó & Lajos, 2015).....	19
Σχήμα 3-10 Σύστημα πτέρυγας-αεροτομής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)	20

Σχήμα 3-11 Στιγμιότυπο του πειραματικού οχήματος κλίμακας 1:2.5 μέσα στην αεροσήραγγα (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019).....	20
Σχήμα 3-12 Μετρήσεις συντελεστή κάθετης δύναμης για διαφορετικές γωνίες συστήματος πτερωτής-αεροτομής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)....	21
Σχήμα 3-13 Μετρήσεις συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης για διαφορετικές γωνίες συστήματος πτερωτής-αεροτομής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)	21
Σχήμα 3-14 Στιγμιότυπο της πλευράς αναρρόφησης της πτερωτής κατά την διάρκεια απεικόνισης της ροής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)	22
Σχήμα 3-15 Πειραματική διάταξη μπροστινής πτερωτής (Buscariolo et al., 2022)	23
Σχήμα 3-16 Απεικόνιση ροής στα τοιχώματα της πτερωτής σε ταχύτητα 15 m/s από διαφορετικές όψεις (Buscariolo et al., 2022)	23
Σχήμα 3-17 Πειραματική διάταξη με τα υπό μελέτη Ahmed models (Watkins & Vino, 2008)	24
Σχήμα 3-18 Χρονοεξαρτώμενες τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας σε συνάρτηση με την ενδιάμεση απόσταση των οχημάτων (Watkins & Vino, 2008).....	25
Σχήμα 3-19 Χρονοεξαρτώμενες τιμές συντελεστή άντωσης σε συνάρτηση με την ενδιάμεση απόσταση των οχημάτων (Watkins & Vino, 2008).....	26
Σχήμα 3-20 Απεικόνιση της μορφολογίας της ροής από το άκρο εκφυγής του προπορευόμενου Ahmed model για διαφορετικές αποστάσεις. α) 0,15 του μήκους του, β) 0,30 του μήκους του, γ) 0,50 του μήκους του, δ) 1,0 του μήκους του (Watkins & Vino, 2008)	26
Σχήμα 3-21 Davis Model (Fuller et al., 2013)	27
Σχήμα 3-22 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής δοκιμής στην αεροσήραγγα (Liu et al., 2016).....	28
Σχήμα 3-23 Δοκιμή υπό κλίμακα οχήματος σε τυρβώδη ροή (Liu et al., 2016)	28
Σχήμα 3-24 Δοκιμή υπό κλίμακα οχήματος σε ροή οριακού στρώματος (Liu et al., 2016).....	29
Σχήμα 3-25 Πεδίο ροής ανέμου και συσκευή καταγραφής μετρήσεων στην αεροσήραγγα (Hu et al., 2022)	31
Σχήμα 3-26 Αναλυτική περιγραφή πειραματικής διάταξης (Hu et al., 2022).....	31
Σχήμα 3-27 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης (Sivaraj et al., 2021)	33
Σχήμα 3-28 Μετρήσεις του συντελεστή πίεσης C_p για τις διάφορες γεωμετρίες οχημάτων (Sivaraj et al., 2021).....	33

Σχήμα 3-29 Ταχύτητα ανέμου και οπισθέλκουσα σε συνάρτηση με το χρόνο (Mariani et al., 2015).....	34
Σχήμα 3-30 Διαφορετικές συνδεσμολογίες του μοντέλου (Mariani et al., 2015)	35
Σχήμα 3-31 Ποσοστά βελτίωσης αεροδυναμικών μεγεθών της 2 ^{ης} συνδεσμολογίας μοντέλου σε σχέση με την 1 ^η (Mariani et al., 2015)	35
Σχήμα 3-32 Πειραματική διάταξη στην αεροσήραγγα της Volvo (Ljungskog et al., 2020).....	36
Σχήμα 3-33 Κατανομή συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος του οχήματος (Ljungskog et al., 2020)	37
Σχήμα 3-34 Συντελεστές C_d και C_l για τις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού (Αεροσήραγγα και προσομοιώσεις) (Ljungskog et al., 2020).....	38
Σχήμα 3-35 Διακύμανση τιμών ταχύτητας και τύρβης κατά την διάρκεια ριπής ανέμου (Wojciak, 2012)	39
Σχήμα 3-36 Διακύμανση συντελεστή C_p κατά μήκος της επιφάνειας του οχήματος (Wojciak, 2012).....	40
Σχήμα 3-37 Διακύμανση συντελεστή C_p ανάλογα με τον τύπο του αεροδυναμικού φορτίου (Wojciak, 2012)	40
Σχήμα 3-38 Πλέγματα για τις μεθόδους RANS και URANS για το DrivAer model: α) Χειρότερης ποιότητας πλέγμα, β) Λεπτομερές πλέγμα (Aultman et al., 2022)	43
Σχήμα 3-39 Διακύμανση του συντελεστή οπισθέλκουσας για τις διάφορες μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Aultman et al., 2022)	44
Σχήμα 3-40 Διακύμανση του συντελεστή οπισθέλκουσας κατά μήκος του μοντέλου DrivAer (Aultman et al., 2022).....	45
Σχήμα 3-41 Διακύμανση συντελεστή πίεσης με τη μέθοδο RANS κατά μήκος του μοντέλου SAE (Aultman et al., 2022)	46
Σχήμα 3-42 Διακύμανση συντελεστή πίεσης κατά μήκος του μοντέλου DrivAer (Aultman et al., 2022)	46
Σχήμα 3-43 Κατανομές μέσης ταχύτητας για τις μεθόδους RANS και URANS για το μοντέλο SAE (Aultman et al., 2022)	47
Σχήμα 3-44 Κατανομές μέσης ταχύτητας για τις μεθόδους RANS και URANS για το μοντέλο DrivAer (Aultman et al., 2022)	48
Σχήμα 3-45 Συγκριτική απεικόνιση του προφίλ μέσης ταχύτητας κατά μήκος και ύψος του οχήματος για την προσομοίωση και την πειραματική διάταξη (Wang et al., 2019).....	50

Σχήμα 3-46 Σύγκριση του συντελεστή πίεσης με την χρήση της μεθόδου RANS για α) σταθερό έδαφος, β) κινούμενο έδαφος, γ) απόκλιση σταθερού και κινούμενου (Wang et al., 2019)	51
Σχήμα 3-47 Σύγκριση του συντελεστή πίεσης στο κάτω μέρος του οχήματος με την χρήση της μεθόδου RANS για α) σταθερό έδαφος, β) κινούμενο έδαφος, γ) απόκλιση σταθερού και κινούμενου (Wang et al., 2019).....	52
Σχήμα 3-48 Συγκριτική απεικόνιση του συντελεστή πίεσης κατά μήκος του οχήματος για την προσομοίωση και την πειραματική διάταξη (Wang et al., 2019)	53
Σχήμα 3-49 Συντελεστής οπισθέλκουσας υπολογισμένος με την μέθοδο RANS για τα μοντέλα k – ε και SST k – ω (Fu et al., 2018)	54
Σχήμα 3-50 Συντελεστής κάθετης δύναμης υπολογισμένος με την μέθοδο RANS για τα μοντέλα k – ε και SST k – ω (Fu et al., 2018)	54
Σχήμα 3-51 Συντελεστής πίεσης υπολογισμένος με την μέθοδο RANS για τα μοντέλα k – ε και SST k – ω στο μπροστινό και πίσω μέρος του οχήματος (Fu et al., 2018)	55
Σχήμα 3-52 Περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής στο πίσω μέρος του οχήματος για τα 2 μοντέλα RANS (Fu et al., 2018).....	55
Σχήμα 3-53 Καρτεσιανά μπλοκ της μεθόδου LES για το μοντέλο Volkswagen Golf (Löhner et al., 2021).....	57
Σχήμα 3-54 Πλέγμα και περιγράμματα στιγμιαίων και μέσων ταχυτήτων της μεθόδου LES (Löhner et al., 2021)	58
Σχήμα 3-55 Κατανομή πίεσης με τη μέθοδο LES του μοντέλου Volkswagen Golf (Löhner et al., 2021)	58
Σχήμα 3-56 Διακύμανση των τιμών της πίεσης στα επίπεδα x και z με την μέθοδο LES για το Volkswagen Golf (Löhner et al., 2021)	59
Σχήμα 4-1 Περιοχή ροής ρευστού σε σωλήνα διακριτοποιημένη σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου (ANSYS, 2010).....	63
Σχήμα 4-2 Μεθοδολογία προσέγγισης προβλημάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) (ANSYS, 2010).....	64
Σχήμα 5-1 Απεικόνιση του μοντέλου Orca σε πλάγια αριστερή όψη	71
Σχήμα 5-2 Στιγμιότυπο της Orca σε κίνηση ("Ιστοσελίδα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής," 2018).....	72
Σχήμα 5-3 Στιγμιότυπο της Orca κατά την διάρκεια της διοργάνωσης Shell Eco Marathon ("Ιστοσελίδα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής," 2018)	72
Σχήμα 5-4 Απεικόνιση του 3D printing μοντέλου Orca σε κλίμακα 1/10	73
Σχήμα 5-5 3D printed μοντέλο εντός ξύλινου καλουπιού.....	74

Σχήμα 5-6 Χύτευση σιλικόνης.....	75
Σχήμα 5-7 Ολοκλήρωση χύτευσης.....	75
Σχήμα 5-8 Άνοιγμα καλουπιού σιλικόνης	76
Σχήμα 5-9 Τοποθέτηση σωλήνων στις οπές του καλουπιού.....	77
Σχήμα 5-10 Κατάλληλη διάνοιξη των 3 οπών για απλοποίηση της διαδικασίας χύτευσης.....	78
Σχήμα 5-11 Διαφορετική όψη της κατασκευής.....	78
Σχήμα 5-12 Χρησιμοποιούμενη ρητίνη.....	79
Σχήμα 5-13 Χύτευση πολυουρεθανικής ρητίνης.....	79
Σχήμα 5-14 Απεικόνιση του τελικού μοντέλου ρητίνης (δεξιά) και του αρχικού 3D printed μοντέλου (αριστερά), εδρασμένα στην κατεργασμένη πλάκα	80
Σχήμα 5-15 Διαφορετική όψη έδρασης του μοντέλου ρητίνης στην κατεργασμένη πλάκα.....	81
Σχήμα 5-16 Διαφορετική όψη έδρασης του μοντέλου ρητίνης στην κατεργασμένη πλάκα.....	81
Σχήμα 5-17 Διαφορετική όψη έδρασης του μοντέλου ρητίνης στην κατεργασμένη πλάκα.....	82
Σχήμα 6-1 Απεικόνιση του μοντέλου στην αεροσήραγγα τύπου Göttingen με ανοιχτό θάλαμο δοκιμών	84
Σχήμα 6-2 Απεικόνιση του μοντέλου στην αεροσήραγγα τύπου Göttingen με ανοιχτό θάλαμο δοκιμών (Σύνδεση σωληνίσκων μέσω οπών).....	85
Σχήμα 6-3 Μικρομανόμετρο FCO 560.....	86
Σχήμα 6-4 Μικρομανόμετρο Dwyer	86
Σχήμα 6-5 Κάτοψη του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD	89
Σχήμα 6-6 Απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD .	89
Σχήμα 6-7 Διαφορετική απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD	90
Σχήμα 6-8 Απεικόνιση υπολογιστικού πλέγματος σε 2D	91
Σχήμα 6-9 Απεικόνιση υπολογιστικού πλέγματος στα τμήματα έδρασης της Orca.....	92
Σχήμα 6-10 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος	93
Σχήμα 6-11 Υπολογιστικό χωρίο σε περιβάλλον FLUENT	94
Σχήμα 6-12 Λειτουργικές συνθήκες προσομοίωσης.....	95

Σχήμα 6-13 Τιμές αναφοράς μεγεθών προσομοίωσης.....	96
Σχήμα 6-14 Επιλογή μοντέλου τύρβης	97
Σχήμα 6-15 Επιλογή ρευστού προσομοίωσης	98
Σχήμα 6-16 Ορισμός οριακής συνθήκης εισόδου (Velocity Inlet)	99
Σχήμα 6-17 Ορισμός οριακής συνθήκης εξόδου (Pressure Outlet)	100
Σχήμα 6-18 Ορισμός οριακής συνθήκης εδάφους.....	100
Σχήμα 6-19 Ορισμός οριακής συνθήκης οχήματος	101
Σχήμα 6-20 Διάγραμμα συντελεστή πίεσης C_p για την περίπτωση προσομοίωσης χωρίς κτίρια (case 1) κατά μήκος του οχήματος.....	103
Σχήμα 6-21 Απεικόνιση του «μπροστινού ποδιού» της Orca που πάρθηκαν οι μετρήσεις C_p (μαύρη γραμμή).....	105
Σχήμα 6-22 Απεικόνιση του «πίσω ποδιού» της Orca που πάρθηκαν οι μετρήσεις C_p (μαύρη γραμμή).....	106
Σχήμα 6-23 Διάγραμμα συντελεστή πίεσης C_p για την περίπτωση προσομοίωσης χωρίς κτίρια (case 1) στο «μπροστινό πόδι» της Orca...	107
Σχήμα 6-24 Διάγραμμα συντελεστή πίεσης C_p για την περίπτωση προσομοίωσης χωρίς κτίρια (case 1) στο «πίσω πόδι» της Orca	108
Σχήμα 6-25 Γράφημα κατανομής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας (Pressure Contour).....	109
Σχήμα 6-26 Γράφημα κατανομής πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος (Pressure Side-Surface Contour)	110
Σχήμα 6-27 Γράφημα κατανομής πίεσης σε πρόοψη (Pressure Front-Surface Contour)	110
Σχήμα 6-28 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος (Pressure Coefficient Side-Surface Contour)	112
Σχήμα 6-29 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην άνω επιφάνεια του οχήματος (Pressure Coefficient Top View - Contour).....	113
Σχήμα 6-30 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης σε πρόοψη (Pressure Coefficient Front View - Contour)	114
Σχήμα 6-31 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας (Dimensionless Velocity Contour).....	115
Σχήμα 6-32 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας σε κάτοψη ($Z=0,3$) (Dimensionless Velocity Contour-Top View).....	116
Σχήμα 6-33 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στην επιφάνεια του οχήματος (Dimensionless Velocity Side-Surface Contour).....	116

Σχήμα 6-34	Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας σε πρόοψη (Dimensionless Velocity Front-Surface Contour)	117
Σχήμα 6-35	Γράφημα τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) στο επίπεδο συμμετρίας (Turbulent Kinetic Energy Contour)	117
Σχήμα 6-36	Γράφημα ειδικού ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω) στο επίπεδο συμμετρίας (Specific Dissipation Rate Contour)	118
Σχήμα 7-1	Απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD	121
Σχήμα 7-2	Απεικόνιση του συστήματος Orca - Κτίρια σε περιβάλλον ICEM CFD	122
Σχήμα 7-3	Απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος	123
Σχήμα 7-4	Απεικόνιση του μοντέλου Orca και των πλευρικών κτιρίων σε μορφή υπολογιστικού πλέγματος (κάτοψη)	123
Σχήμα 7-5	Απεικόνιση του μοντέλου Orca και των πλευρικών κτιρίων σε μορφή υπολογιστικού πλέγματος (πρόοψη)	124
Σχήμα 7-6	Υπολογιστικό χωρίο σε περιβάλλον FLUENT	125
Σχήμα 7-7	Συγκριτική απεικόνιση γραφημάτων πρώτης (case 1) και δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (case 2) σε ταχύτητες 30 m/s και Reynolds $5,55 \times 10^6$ κατά μήκος του οχήματος	127
Σχήμα 7-8	Συγκριτική απεικόνιση γραφημάτων πρώτης (case 1) και δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (case 2) σε ταχύτητες 30 m/s και Reynolds $5,55 \times 10^6$ στο «μπροστινό πόδι» οχήματος	128
Σχήμα 7-9	Συγκριτική απεικόνιση γραφημάτων πρώτης (case 1) και δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (case 2) σε ταχύτητες 30 m/s και Reynolds $5,55 \times 10^6$ στο «πίσω πόδι» του οχήματος	129
Σχήμα 7-10	Γράφημα κατανομής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας (Pressure Contour)	130
Σχήμα 7-11	Γράφημα κατανομής πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος (Pressure Side-Surface Contour)	131
Σχήμα 7-12	Γράφημα κατανομής πίεσης σε πρόοψη (Pressure Front-Surface Contour)	131
Σχήμα 7-13	Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια οχήματος - εδάφους (Pressure Coefficient Top - View Contour)	132
Σχήμα 7-14	Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια οχήματος (Pressure Coefficient Side-Surface Contour)	133
Σχήμα 7-15	Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια οχήματος σε πρόοψη (Pressure Coefficient Front - View Contour)	133

Σχήμα 7-16	Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας (Dimensionless Velocity Contour).....	135
Σχήμα 7-17	Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας σε κάτοψη ($Z=0,3$) (Dimensionless Velocity Contour-Top View).....	135
Σχήμα 7-18	Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στην επιφάνεια οχήματος - κτιρίου (Dimensionless Velocity Side - Surface Contour).....	136
Σχήμα 7-19	Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στην πρόοψη οχήματος (Dimensionless Velocity Front - Surface Contour).....	136
Σχήμα 7-20	Γράφημα τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) στο επίπεδο συμμετρίας (Turbulent Kinetic Energy Contour)	137
Σχήμα 7-21	Γράφημα ειδικού ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω) στο επίπεδο συμμετρίας (Specific Dissipation Rate Contour)	138
Σχήμα 8-1	Σημεία προφίλ ταχυτήτων ως προς το σημείο αναφοράς (0,0,0) ..	140
Σχήμα 8-2	Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 1	141
Σχήμα 8-3	Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 2	142
Σχήμα 8-4	Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 3	143
Σχήμα 8-5	Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 4	144
Σχήμα 8-6	Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 5	145
Σχήμα 8-7	Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 6	146
Σχήμα 8-8	Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Top View).....	147
Σχήμα 8-9	Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Side View).....	148
Σχήμα 8-10	Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Back View).....	149
Σχήμα 8-11	Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Front View).....	150
Σχήμα 8-12	Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 2 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 2 – Top View).....	151

Σχήμα 8-13 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 2 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 2 – Back View).....	152
Σχήμα 8-14 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 2 ^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 2 – Front View).....	153

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Πίνακας τιμών συντελεστή άντωσης και οπισθέλκουσας για τις μεθόδους RANS και URANS για το SAE notchback (Aultman et al., 2022)	44
Πίνακας 3-2 Πίνακας αεροδυναμικών συντελεστών (Aultman et al., 2022)	45

Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	4
(2-2).....	6
(2-3).....	7
(2-4).....	8
(4-1).....	65
(4-2).....	65
(4-3).....	65
(4-4).....	65
(4-5).....	66
(4-6).....	66
(4-7).....	68
(4-8).....	68
(4-9).....	68
(4-10).....	68
(4-11).....	68
(4-12).....	69
(6-1).....	83
(6-2).....	96
(6-3).....	102

LIST OF ABBREVIATIONS

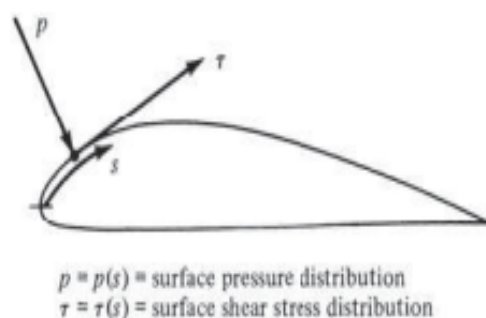
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
CFD	Computational Fluid Dynamics
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
SAE	Society of Automotive Engineers
PIV	Particle Image Velocimetry
URANS	Unstable Reynolds Average Navier Stokes
DES	Detached Eddy Simulation

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οχήματα αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μέσα μεταφοράς της σύγχρονης εποχής. Πιο συγκεκριμένα, ένα τυπικό αστικό περιβάλλον απαρτίζεται από πολλά οχήματα των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες διαφέρουν ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται. Παρόλα αυτά, σαν γενική γραμμή για τον σχεδιασμό ενός οχήματος πάντα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κατά το δυνατό μεγαλύτερη μείωση του βάρους του καθώς και η βελτιστοποίηση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του. Αυτό συμβαίνει αφού ένα ελαφρύτερο όχημα με βελτιστοποιημένη αεροδυναμική θα έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα αλλά και οικονομικότερη λειτουργία, πολύ σημαντικό ειδικότερα στην σημερινή εποχή της ενεργειακής κρίσης. Με τον όρο βελτιστοποιημένη αεροδυναμική νοείται η οποιαδήποτε παρέμβαση και βελτίωση στο αμάξωμα-πλαίσιο του οχήματος ώστε το πεδίο ροής γύρω από αυτό να επιδρά ωφέλιμα και να ευνοεί την εύρυθμη κίνηση του οχήματος ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ενέργειας λόγω τριβών με τα μόρια του αέρα και αυξάνοντας την αποδοτικότητα του οχήματος. Για το λόγο αυτό δίνεται μεγάλη έμφαση από τις βιομηχανίες παραγωγής αυτοκινήτων στο τομέα της αεροδυναμικής, με εξειδικευμένες εγκαταστάσεις για πειραματικές μετρήσεις και ρεαλιστικές προσομοιώσεις. Ειδικότερα, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μίας αεροδυναμικής μελέτης-έρευνας θα πρέπει να γίνει επεξεργασία και σύγκριση πειράματος και προσομοιώσεων ώστε ο μελετητής να είναι σίγουρος για την εγκυρότητα του αποτελέσματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει αναλυτική προσέγγιση και επεξήγηση των διαφόρων εννοιών που απαρτίζουν τον τομέα της αεροδυναμικής καθώς και όλων των διαδικασιών και φάσεων από τις οποίες αποτελείται μία αεροδυναμική μελέτη οχήματος.

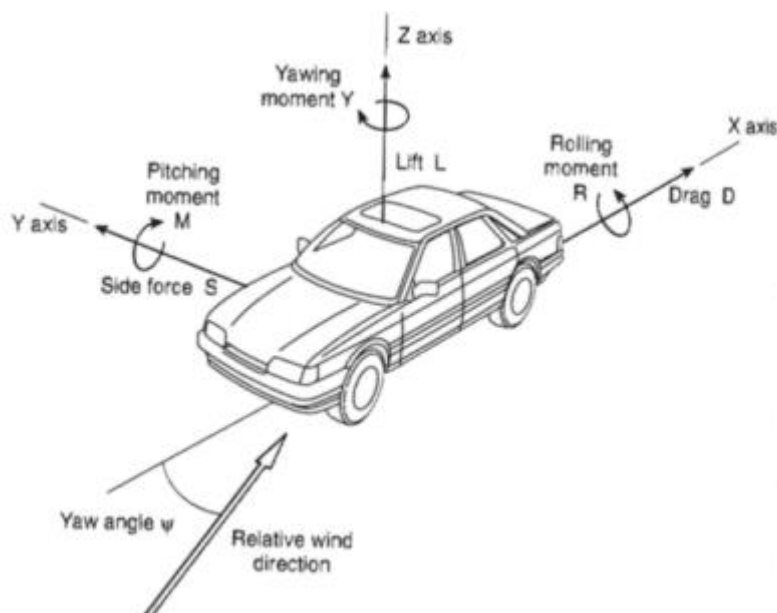
2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Η αεροδυναμική αποτελεί έναν τομέα της μηχανικής ρευστών που μελετά την δυναμική των αερίων, κυρίως του αέρα, καθώς και την αλληλεπίδραση τους με στερεά σώματα (John D. Anderson, 2017). Είχε εφαρμογή κυρίως στα εναέρια μέσα, αλλά τα τελευταία χρόνια με την ενεργειακή κρίση και την είσοδο της ηλεκτροκίνησης στον κλάδο της μετακίνησης και των μεταφορών έχει εδραιωθεί σαν κρίσιμος τομέας στον σχεδιασμό και την αποδοτικότητα των επίγειων μέσων. Πιο συγκεκριμένα, η αεροδυναμική οχημάτων έχει καταλήξει από μόνη της να αποτελεί ένα προς μελέτη επιστημονικό πεδίο. Ένα αυτοκίνητο κατά την διάρκεια της κίνησης του επηρεάζεται από δυνάμεις και ροπές οι οποίες επιδρούν στην ποιότητα και την σταθερότητα κύλισης του καθώς επίσης περιορίζουν τις επιδόσεις του και αυξάνουν την κατανάλωση του και τον παραγόμενο θόρυβο που εκλύεται από τον αέρα σε υψηλές ταχύτητες. Ειδικότερα, γύρω από ένα αυτοκίνητο που τρέχει με υψηλή ταχύτητα αναπτύσσεται μία αεροδυναμική αντίσταση καθώς πραγματοποιείται μία πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ οχήματος, αέρα και δρόμου (John D. Anderson, 2017). Οι αεροδυναμικές δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε ένα όχημα οφείλονται στην κατανομή της πίεσης και των διατμητικών τάσεων που δημιουργούνται στην επιφάνεια του οχήματος (John D. Anderson, 2017).



Σχήμα 2-1 Πίεση και διατμητική τάση σε μία αεροδυναμική επιφάνεια (John D. Anderson, 2017)

Επίσης, σημαντική είναι η αλληλεξάρτηση μεταξύ της ταχύτητας του αέρα και της πίεσης και η επίδραση τους στα αεροδυναμικά φορτία όπως είναι η οπισθέλκουσα δύναμη και η άντωση. Στα επόμενα υποκεφάλαια θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή αυτών των φορτίων.



Σχήμα 2-2 Δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε εν κινήσει όχημα (Nebenführ, 2010)

2.1 Αεροδυναμικά φορτία

Στο υποκεφάλαιο αυτό ουσιαστικά θα γίνει μία αναλυτικότερη περιγραφή των αεροδυναμικών μεγεθών που μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της κίνησης ενός οχήματος. Τα βασικότερα μεγέθη είναι η άντωση (lift), η οπισθέλκουσα δύναμη (drag), η κάθετη δύναμη (downforce), οι πλευρικές δυνάμεις (lateral forces) και η πίεση (pressure) κατά μήκος της επιφάνειας ενός οχήματος.

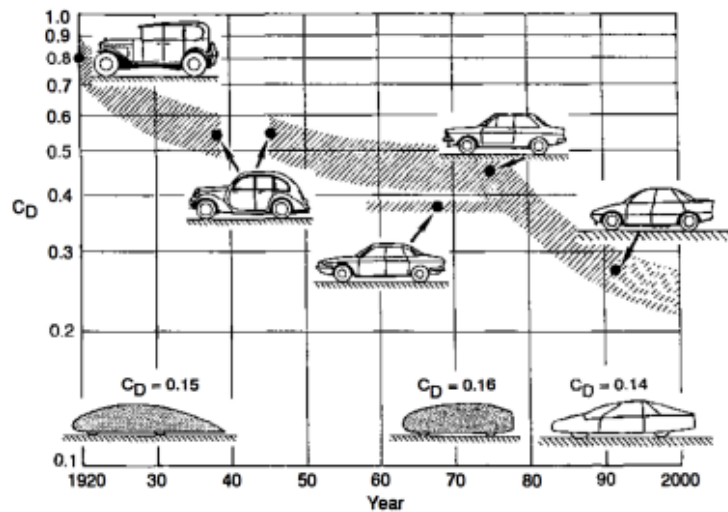
2.1.1 Οπισθέλκουσα δύναμη (Drag)

Η οπισθέλκουσα δύναμη είναι μία μηχανική δύναμη που δρα αντίθετα στην κίνηση του οχήματος. Δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του οχήματος με τον αέρα και αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας. Ο λόγος που μελετάται η οπισθέλκουσα είναι διότι σε ένα όχημα που κινείται συνδέεται άρρηκτα με τις

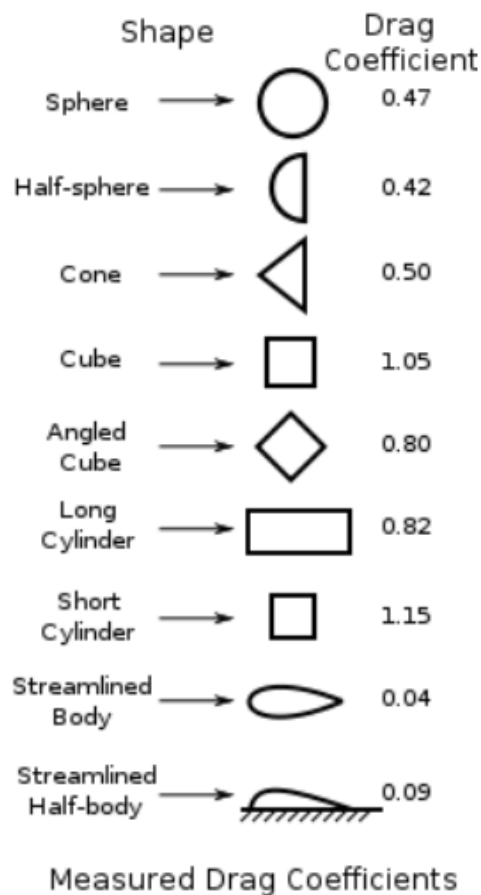
επιδόσεις και την κατανάλωση του, αφού αντιτίθεται στην κίνηση του και το όχημα πρέπει να καταναλώσει ενέργεια για να την υπερνικήσει και να κινηθεί. Συγκεκριμένα, οι μηχανικοί χρησιμοποιούν κυρίως τον αδιάστατο συντελεστή οπισθέλκουσας (C_d) για τον ορθό αεροδυναμικό σχεδιασμό ενός οχήματος, αφού ο αριθμός του συντελεστή αυτού σχετίζεται με αυξημένη ή μειωμένη κατανάλωση. Όσο μικραίνει ο αριθμός τόσο μικρότερη είναι η κατανάλωση που παρουσιάζει ένα όχημα. Το συνηθέστερο εύρος που κυμαίνεται στα οχήματα είναι το 0.20 έως 0.35. Ουσιαστικά, η οπισθέλκουσα δύναμη προκύπτει από τον συνδυασμό μίας δύναμης πίεσης σχετιζόμενη με το σχήμα του οχήματος και μίας ιξώδους δύναμης που προκαλείται από τις τριβές στην επιφάνεια του οχήματος (Nebenführ, 2010). Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι θα πρέπει λοιπόν να δίνεται μεγάλη προσοχή στην γεωμετρία του οχήματος για την ελαχιστοποίηση του συντελεστή οπισθέλκουσας.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (2-1)$$

Όπου D η οπισθέλκουσα δύναμη, $\frac{1}{2}\rho U_\infty^2$ η δυναμική πίεση, A η προσπίπτουσα επιφάνεια.



Σχήμα 2-3 Εξέλιξη συντελεστή οπισθέλκουσας C_D με την πάροδο των χρόνων (Κλοεκ, 2013)



Σχήμα 2-4 Συντελεστής οπισθέλκουσας για θεμελιώδεις γεωμετρίες (Αρζόγλου, 2017)

2.1.2 Άντωση (Lift) - Κάθετη δύναμη (Downforce)

Άντωση είναι μία μηχανική δύναμη που ασκείται σε ένα κινούμενο σώμα από το κινούμενο ρευστό που το περιβάλλει. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2 παραπάνω, δρα στο κέντρο πίεσης του οχήματος στον άξονα z δηλαδή είναι κάθετη στην διεύθυνση της ροής του αέρα και με φορά που αντιτίθεται στην δύναμη της βαρύτητας. Όπως και με την οπισθέλκουσα δύναμη, η άντωση σχετίζεται και αυτή με έναν συντελεστή άντωσης (C_l) ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (2-2)$$


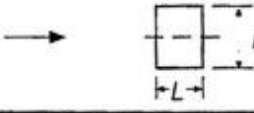
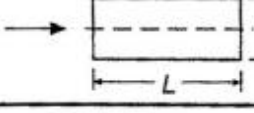
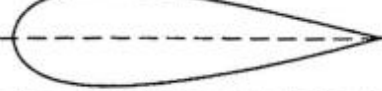
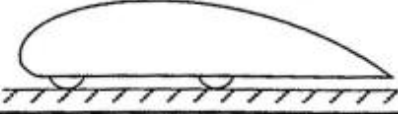

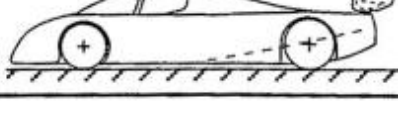
Όπου L η άντωση, $\frac{1}{2}\rho U_\infty^2$ η δυναμική πίεση, A η προσπίπτουσα επιφάνεια.

Οι τυπικές τιμές του συντελεστή άντωσης θα πρέπει να βρίσκονται κοντά στο 0. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εισαχθεί και η έννοια της κάθετης δύναμης (downforce) που συνδέεται άμεσα με την άντωση. Ειδικότερα, ένα όχημα είναι ευρέως γνωστό ότι θα πρέπει να έχει την καλύτερη δυνατή πρόσφυση με το έδαφος για την σταθερότητα και την βέλτιστη οδηγική συμπεριφορά του. Στην φυσική αυτό μεταφράζεται σαν αύξηση μίας δύναμης κάθετης στην ροή του αέρα έχοντας την ίδια φορά με την βαρύτητα και αντίθετη με την άντωση. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως αρνητική άντωση και εξαρτάται και αυτή από τον συντελεστή άντωσης. Για το λόγο αυτό τα αγωνιστικά οχήματα έχουν αρνητικούς συντελεστές άντωσης για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής κάθετης δύναμης που ωφελεί σε καλύτερη διαχείριση του αυτοκινήτου σε υψηλές ταχύτητες και ειδικότερα στις στροφές (Nebenführ, 2010). Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικές μεταβολές και προσθήκες στην γεωμετρία του οχήματος όπως αεροτομές, διαχύτες και ειδικά πτερύγια που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η εξίσωση υπολογισμού της κάθετης δύναμης.

(2-3)

$$F = Cl \frac{1}{2} \rho U \infty^2 A$$

Όπου Cl ο συντελεστής άντωσης, $\frac{1}{2} \rho U \infty^2$ η δυναμική πίεση, A η προσπίπτουσα επιφάνεια.

			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Σχήμα 2-5 Τιμές συντελεστών C_d και C_l για διαφορετικές γεωμετρίες (Αρζόγλου, 2017)

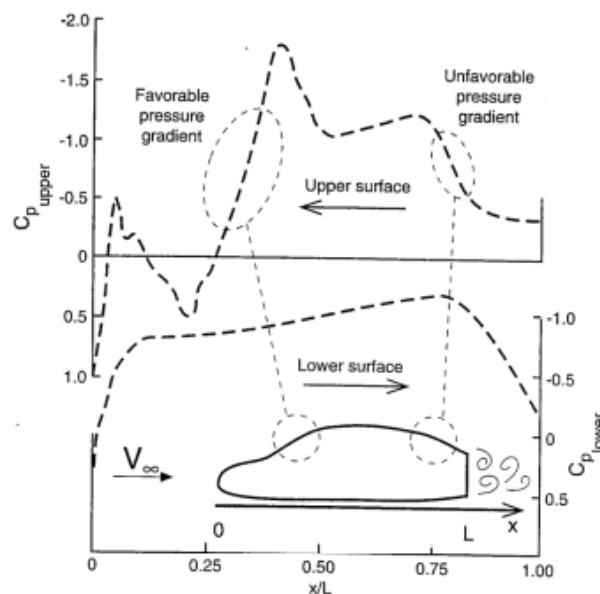
2.1.3 Πίεση (Pressure)

Αναφορικά με την πίεση, στις αεροδυναμικές μελέτες οι μηχανικοί δίνουν μεγάλη σημασία στην κατανομή της πίεσης γύρω από ένα όχημα. Η πίεση σε

ένα όχημα αυξάνεται τοπικά όταν ο αέρας βρει αντίσταση σε κάποιο σημείο του οχήματος και η ταχύτητα της ροής μειώνεται. Για να υπολογιστούν εύκολα αυτές οι διακυμάνσεις πίεσης και ταχύτητας χρησιμοποιείται ο συντελεστής πίεσης C_p . Ο συντελεστής αυτός είναι αδιάστατος και περιγράφει την σχετική πίεση σε ένα πεδίο ροής ανεξάρτητα από την ταχύτητα του οχήματος. Η ανεξαρτησία αυτή από την ταχύτητα τον καθιστά αρκετά πιο εύχρηστο και συγκρίσιμο στην επεξεργασία αποτελεσμάτων από την τοπική στατική πίεση (Nebenführ, 2010). Περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (2-4)$$

Όπου p η τοπική στατική πίεση οχήματος, p_∞ η στατική πίεση ροής, $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ η δυναμική πίεση ροής.



Σχήμα 2-6 Κατανομή πίεσης κατά μήκος οχήματος (Αρζόγλου, 2017)

2.1.4 Πλευρικές δυνάμεις (Lateral forces)

Οι πλευρικές δυνάμεις στην αεροδυναμική οχημάτων συχνά είναι ασήμαντες σε σύγκριση με τις δυνάμεις που περιγράφηκαν. Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις που προκαλούνται από έντονες ριπές ανέμου γίνονται σημαντικές

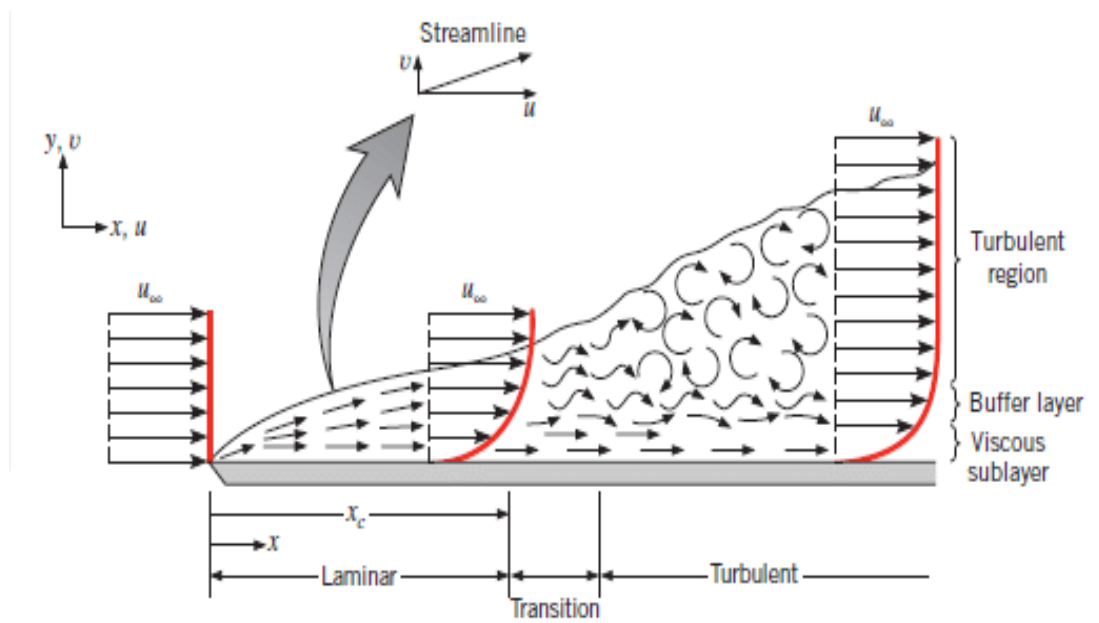
επιηρεάζοντας την σταθερότητα του οχήματος και σε έσχατες περιπτώσεις μπορεί να συμβάλλουν στην εκτροπή πορείας του. Οι δυνάμεις αυτές συγκεκριμένα μπορούν να προκληθούν είτε με πλευρικούς ανέμους συνήθως με μικρά φορτία, ή ακόμα και σε περιπτώσεις που το όχημα διανύει κάποια στροφή, καθώς οι μπροστινοί και πίσω τροχοί κινούνται με διαφορετικό τρόπο αλλά υπάρχει και επίδραση φυγοκεντρικών δυνάμεων.

2.2 Οριακά στρώματα – Απόρρους (Boundary layers-Wake)

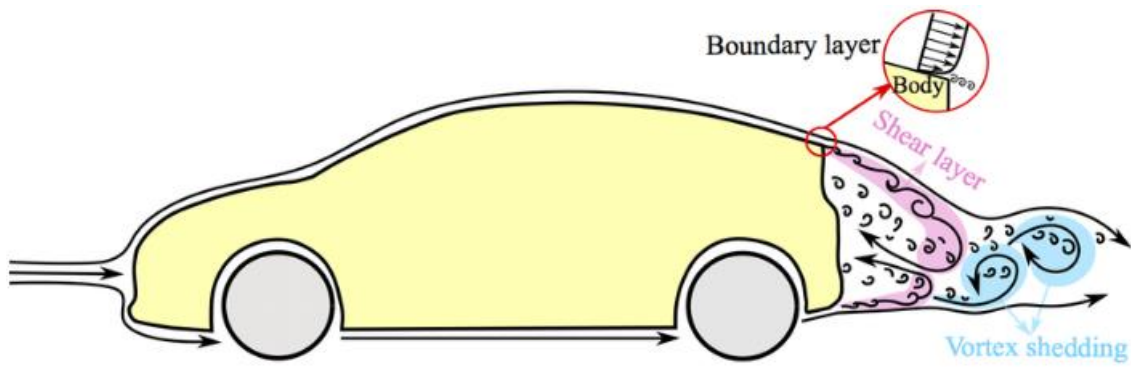
Στην αεροδυναμική μελέτη οχημάτων όπως και διαφόρων κατασκευών είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η έννοια του οριακού στρώματος. Ουσιαστικά, όταν η ελεύθερη ροή αέρα έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του οχήματος ξεκινά η δημιουργία του οριακού στρώματος. Η περιοχή ανάμεσα στην επιφάνεια του οχήματος και την ελεύθερη ροή αποτελεί το οριακό στρώμα. Κατά την διάρκεια της κίνησης του οχήματος τα μόρια του αέρα που βρίσκονται στην επιφάνεια του οχήματος προσκολλώνται πάνω σε αυτό και μηδενίζεται η ταχύτητα τους. Τα γειτονικά μόρια του αέρα δεν μένουν ανεπηρέαστα και παρουσιάζουν και αυτά μείωση στην ταχύτητα τους σε σχέση με την ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Με λίγα λόγια δημιουργήθηκε ένα στρώμα με διαφορετική κατανομή ταχυτήτων σε όλο το μήκος του σε σχέση με την ταχύτητα της ελεύθερης ροής αέρος λόγω της δράσης ιξωδών και δυνάμεων τριβής ανάμεσα στα επίπεδα των διαφορετικών ταχυτήτων (Kloek, 2013). Το πάχος του οριακού στρώματος επηρεάζεται από την τραχύτητα και το μήκος της επιφάνειας του οχήματος. Οι τύποι του οριακού στρώματος διακρίνονται σε στρωτό οριακό στρώμα και τυρβώδες οριακό στρώμα. Στον πρώτο τύπο τα μόρια του αέρα κινούνται ομαλά σε συστοιχίες ενώ στον δεύτερο κινούνται άναρχα και αλλάζουν την κατεύθυνση τους σε πολλές διευθύνσεις δημιουργώντας δίνες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση του οχήματος και κατ' επέκταση η οπισθέλκουσα δύναμη. Λόγω της περιπλοκότητας της γεωμετρίας των οχημάτων παρουσιάζεται το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής όπου το οριακό στρώμα «διαλύεται» αφού η κατεύθυνση της μέσης ροής αλλάζει σε σχέση με την όρια της γεωμετρίας του οχήματος. Αυτό το φαινόμενο

παρατηρείται κυρίως στο πίσω μέρος του οχήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις οχημάτων το οριακό στρώμα είναι τυρβώδες.

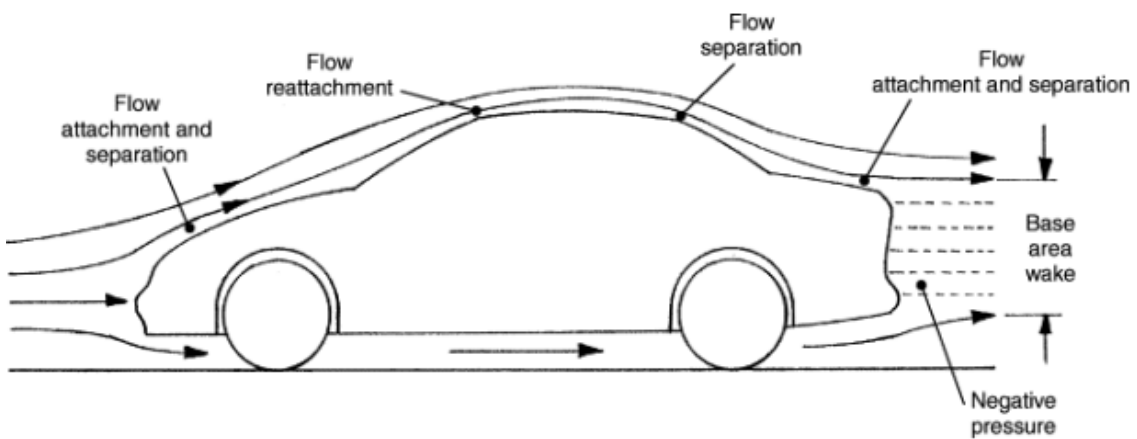
Όσον αφορά τον απόρρου (wake) ουσιαστικά είναι η περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής που δημιουργείται πίσω από το κινούμενο όχημα και συχνά συνοδεύεται από τυρβώδη τύπο ροής και το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής.



Σχήμα 2-7 Ανάπτυξη οριακού στρώματος (Banihani & El Haj Assad, 2018)



Σχήμα 2-8 Αναπαράσταση οριακού στρώματος, απόρρου και αποκόλλησης της ροής σε όχημα (Li, 2017)

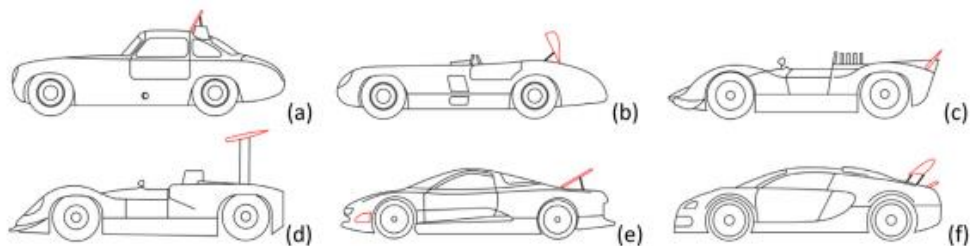


Σχήμα 2-9 Απεικόνιση των φαινομένων αποκόλλησης και επανασύνδεσης της ροής (Heisler, 2002)

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Έρευνες Αεροδυναμικής Οχημάτων Εδάφους

Η μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων αποτελεί αντικείμενο ενασχόλησης πολλών ερευνητικών δημοσιεύσεων, οι οποίες τονίζουν την σημασία της για την εύρυθμη και αποδοτική λειτουργία των οχημάτων. Ειδικότερα, η γεωμετρία είναι από τους κυριότερους παράγοντες επιρροής στην αεροδυναμική μελέτη ενός οχήματος, επηρεάζοντας βασικά διανυσματικά μεγέθη όπως η δυναμική άνωση (άντωση) και η οπισθέλκουσα δύναμη (Fukuda, Yanagimoto, China, & Nakagawa, 1995). Πιο συγκεκριμένα, στην έρευνα τους οι Fukuda et al. (1995) μελετούν τον συσχετισμό μεταξύ του σχήματος αεροτομής ενός οχήματος και των αεροδυναμικών μεγεθών σε συνδυασμό με τον απόρρο (ολκό) και συμπεραίνουν ότι ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός μοντέλου αεροτομής μπορεί να αυξήσει την πρόσφυση του οχήματος με το έδαφος. Σύμφωνα με τους Kurec, Remer, and Piechna (2019) ο κατάλληλος αεροδυναμικός σχεδιασμός και συγκεκριμένα οι διαφορετικές γεωμετρίες αεροτομής μπορούν να λειτουργήσουν ως υποβοήθηση στα ήδη υπάρχοντα συστήματα πέδησης των οχημάτων και έτσι να επιτευχθεί περαιτέρω μείωση της απόστασης ακινητοποίησης τους. Στην συνέχεια απεικονίζονται οι διατάξεις αεροτομών που χρησιμοποιήθηκαν.



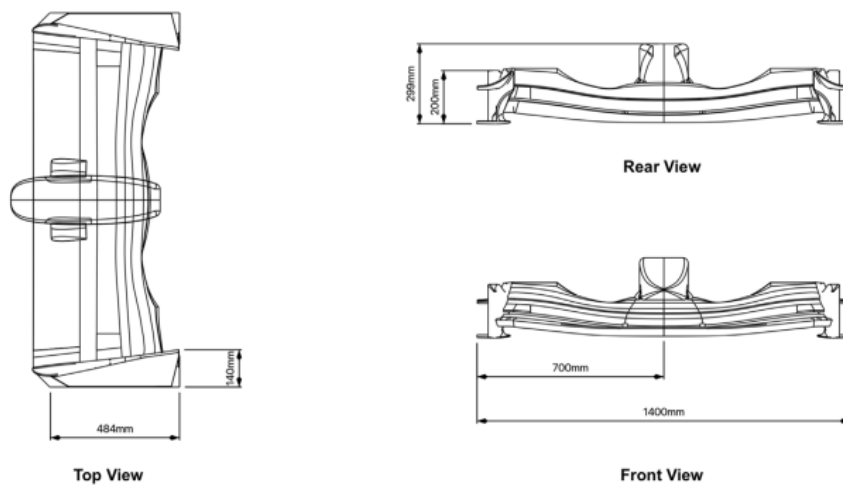
Σχήμα 3-1 Διαφορετικές τοποθεσίες και γεωμετρίες αεροτομής με σκοπό την ενίσχυση της πέδησης (Kurec, Remer, & Piechna, 2019)

Όπως φαίνεται παραπάνω, η αεροτομή πρέπει να τοποθετείται στις περιοχές που είναι πιθανότερο να εμφανιστεί το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής, δηλαδή στο πίσω μέρος του οχήματος.

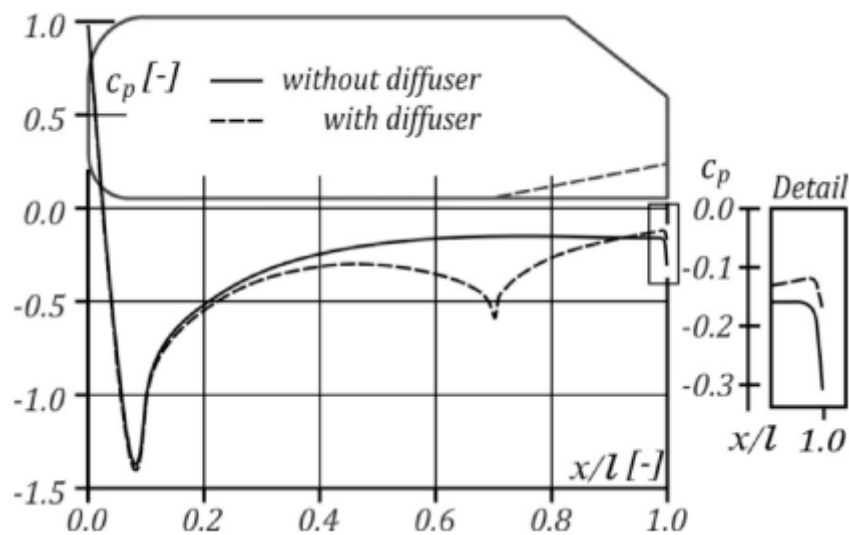


Σχήμα 3-2 Τυπικό σχήμα αεροτομής (Μπεκάκος, 2011)

Ειδικότερα, σε αγωνιστικά οχήματα εκτός από την αεροτομή σημαντικό αεροδυναμικό εξάρτημα αποτελεί και το μπροστινό φτερό, καθώς από την μία ενισχύει την κάθετη δύναμη (downforce) και κατ' επέκταση την επιθυμητή πρόσφυση με το έδαφος και ταυτόχρονα κατευθύνει την ροή γύρω από συγκεκριμένα μέρη του οχήματος (πχ γύρω από τα ελαστικά) με σκοπό την μείωση της τύρβης και της οπισθέλκουσας δύναμης (Buscariolo et al., 2022). Επίσης, πολυάριθμες μελέτες δείχνουν την σημασία του διαχύτη, ενός άλλου εξαρτήματος που χρησιμοποιείται κυρίως στα αγωνιστικά οχήματα, αλλά καθιερώθηκε και σε πολλά συμβατικά, το οποίο βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του σωλήνα Venturi δημιουργώντας πτώση πίεσης στο κάτω μέρος του οχήματος και επιτάχυνση της ροής. Οι Huminic and Huminic (2020) προσθέτουν ότι οι διαχύτες χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος της ροής κάτω από το όχημα για να αποφευχθούν φαινόμενα ανεπιθύμητης τύρβης.



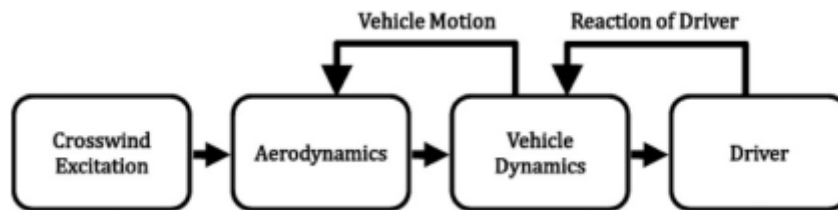
Σχήμα 3-3 Τυπικό σχήμα μπροστινού φτερού (Buscariolo et al., 2022)



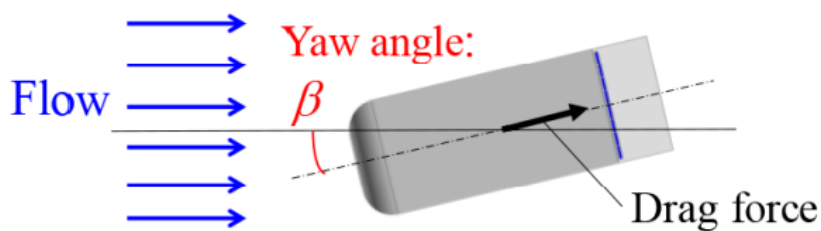
Σχήμα 3-4 Διαφοροποίηση τιμών του συντελεστή πίεσης C_p λόγω διαχύτη (Huminić & Huminić, 2020)

Σύμφωνα με τους Winkler, Drugge, Trigell, and Efrimsson (2016) μία άλλη σημαντική συνιστώσα μελέτης στην αεροδυναμική οχημάτων είναι οι παράπλευροι άνεμοι. Ουσιαστικά, αναφέρουν ότι η σταθερότητα ενός οχήματος είναι ένα πολύπλευρο ζήτημα που απαιτεί την ορθή αλληλεπίδραση μεταξύ της αεροδυναμικής, της δυναμικής οχημάτων και του κατάλληλου χειρισμού του οχήματος από τον οδηγό. Επιπρόσθετα, τονίζουν τη σημασία της γωνίας

εκτροπής (yaw angle), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει ο διαμήκης άξονας του οχήματος με έναν άξονα παράλληλο στην επιφάνεια της γης, καθώς η επίδραση της συχνά δεν αποτυπώνεται ορθά και ειδικότερα σε περιπτώσεις πλευρικών ανέμων που δεν επηρεάζουν ομοιόμορφα το όχημα.



Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση αλληλεξάρτησης παραμέτρων υπό την επίδραση παράπλευρων ανέμων (Winkler et al., 2016)



Σχήμα 3-6 Γεωμετρική αναπαράσταση γωνίας εκτροπής και οπισθέλκουσας δύναμης (Nakashima et al., 2020)

Η αεροδυναμική συμπεριφορά ενός οχήματος εκτός από την εξωτερική μορφολογία του εξαρτάται επίσης από την δομή και γενικότερα την διαμόρφωση της καμπίνας του. Οι Huang, Wang, Ji, and Liu (2021) συμπεραίνουν ότι όταν η ροή διέρχεται και στον χώρο της καμπίνας του οχήματος (πχ από ανοικτό παράθυρο) υπάρχει αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας έως και 85%. Προσθέτουν ότι όταν η είσοδος της ροής στο εσωτερικό του οχήματος είναι μειωμένη είναι λογικό να μειώνεται και ο συντελεστής οπισθέλκουσας αφού οι δίνες που δημιουργούνται είναι απλούστερες αλλά και πιο αδύναμες. Κλείνοντας, αναφέρουν ότι και μόνο που υπάρχει εσωτερική καμπίνα στα οχήματα αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η συχνότητα ταλάντωσης του πεδίου

ροής και ειδικότερα κοντά στις 15 φορές παραπάνω από το να μην υπήρχε η καμπίνα, καθώς και ότι οι μεγαλύτερες τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας στην μελέτη τους εμφανίστηκαν στις περιπτώσεις περιπλοκότερων και εντονότερων σχηματισμών δίνης.

Οι περισσότερες έρευνες αεροδυναμικής ουσιαστικά γίνονται για την εύρεση και τον υπολογισμό της κατανομής πιέσεων και ταχυτήτων κατά μήκος της επιφάνειας του οχήματος. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια που ο σωστός εργονομικός σχεδιασμός και η άνεση των επιβατών είναι βασικός στόχος των αυτοκινητοβιομηχανιών, γίνονται και αρκετές μελέτες για την εκτίμηση του αεροδυναμικού θορύβου που θα εκλύεται κατά την διάρκεια κίνησης του οχήματος. Για παράδειγμα, οι Tsai, Fu, Tai, Huang, and Leong (2009) αναφέρουν ότι ο θόρυβος που εκλύεται από το κάτω μέρος του αμαξώματος λόγω της σύνθετης δομής της ροής, αποτελεί σημαντικό ποσοστό του θορύβου που παράγεται συνολικά. Έτσι, στην αεροδυναμική μελέτη τους προσπαθούν να μειώσουν και τον παραγόμενο θόρυβο με την μέθοδο της ακουστικής ολογραφίας. Οι εξωτερικές ροές που προκαλούν θόρυβο διακρίνονται σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες και μπορούν να παραχθούν από διαμήκεις δίνες σε πολλαπλά σημεία του αμαξώματος όπως η οροφή, η κεραία, οι καθρέπτες και άλλα (Ogawa & Kamioka, 1999).

Στα τελικά στάδια παραγωγής για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη αεροδυναμική διεξάγονται πειραματικές διαδικασίες σε ειδικά διαμορφωμένες αεροσήραγγες (Aultman, Wang, Auza-Gutierrez, & Duan, 2022). Οι διαδικασίες αυτές όμως θεωρούνται αρκετά χρονοβόρες και ακριβές για να διεξαχθούν στα πρώιμα και ενδιάμεσα στάδια της εξέλιξης ενός οχήματος. Για το λόγο αυτό ξεκίνησε και χρησιμοποιείται και η μέθοδος της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) για να μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα και συμπεράσματα για τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός οχήματος σε όλα τα στάδια σχεδιασμού του, υπερτερώντας στο κομμάτι χρόνου και κόστους, καθώς ουσιαστικά πρόκειται για προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Aultman et al., 2022). Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν περαιτέρω οι παραπάνω διαδικασίες που αναφέρθηκαν.

3.2 Πειραματικές Μελέτες σε Αεροδυναμικές Σήραγγες

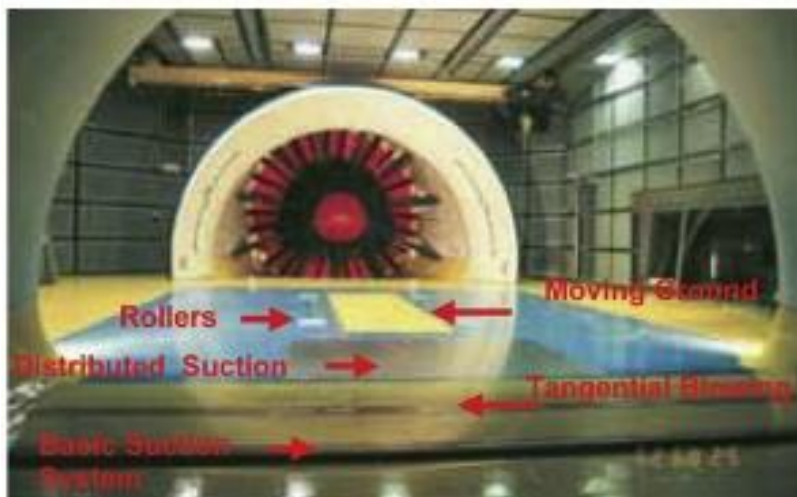
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο οι κυριότερες πειραματικές διαδικασίες στις αεροδυναμικές μελέτες οχημάτων είναι τα πειράματα σε ειδικά διαμορφωμένες εργαστηριακές αεροσήραγγες. Ουσιαστικά, πρόκειται για σήραγγες που χρησιμοποιούνται στον τομέα της αεροδυναμικής για την μελέτη της επίδρασης της ροής σε στερεά σώματα. Συγκεκριμένα, απαρτίζονται από μία σωληνοειδή δίοδο που στο κέντρο της βρίσκεται το υπό μελέτη όχημα και από έναν ανεμιστήρα με πτερύγια ευθυγράμμισης (για εξομάλυνση ροής) που προκαλεί ροή αέρος προς το όχημα. Καθώς η ροή περνά από το όχημα αυτό οι πειραματιστές παρατηρούν την συμπεριφορά της και παίρνουν μετρήσεις μέσω αισθητήρων για διάφορα μεγέθη (κατανομή πιέσεων, ταχύτητας κλπ). Τα πειράματα αυτά μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε στο ίδιο το όχημα είτε σε μικρότερες κλίμακες αυτού.

Όσο εξελίσσεται η τεχνολογία φυσικό είναι να υπάρχει και εξέλιξη των εγκαταστάσεων αεροδυναμικής, αφού οι απαιτήσεις για αποδοτικότερα οχήματα αυξάνονται. Για το λόγο αυτό οι αεροσήραγγες πρέπει ολοένα και περισσότερο να θυμίζουν αστικούς δρόμους ώστε τα αποτελέσματα που εξάγονται από τα πειράματα να είναι ρεαλιστικά. Ο Cogotti (2008) αναφέρει ότι οι βελτιώσεις που γίνονται με το πέρασμα του χρόνου σε αυτές τις πειραματικές σήραγγες αφορούν την βελτίωση δύο παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας αφορά την εξέλιξη των μεθόδων και συστημάτων μέτρησης και ο δεύτερος την γενικότερη αναβάθμιση της απόδοσης της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, η εύρεση νέων μεθόδων μέτρησης γίνεται με σκοπό την λεπτομερή αεροδυναμική και αεροακουστική μελέτη της ροής σε συντομότερο χρονικό διάστημα εξοικονομώντας έτσι χρόνο στην παραγωγή του οχήματος (Cogotti, 2008). Σε ότι αφορά την γενικότερη εξέλιξη της εγκατάστασης οι μεταβολές στις οποίες υπόκειται ουσιαστικά έχουν να κάνουν με την μείωση του περιβάλλοντα θορύβου για καλύτερες αεροακουστικές μετρήσεις, την σωστή προσομοίωση της σχετικής κίνησης μεταξύ οχήματος και εδάφους καθώς και της περιστροφής των τροχών για την καλύτερη αναπαράσταση τη ροής στο κάτω μέρος του αμαξώματος, στη περιοχή των τροχών και γενικότερα στο όχημα (Cogotti, 2008). Επίσης, θα πρέπει στην αεροσήραγγα να υπάρχει παραγωγή και

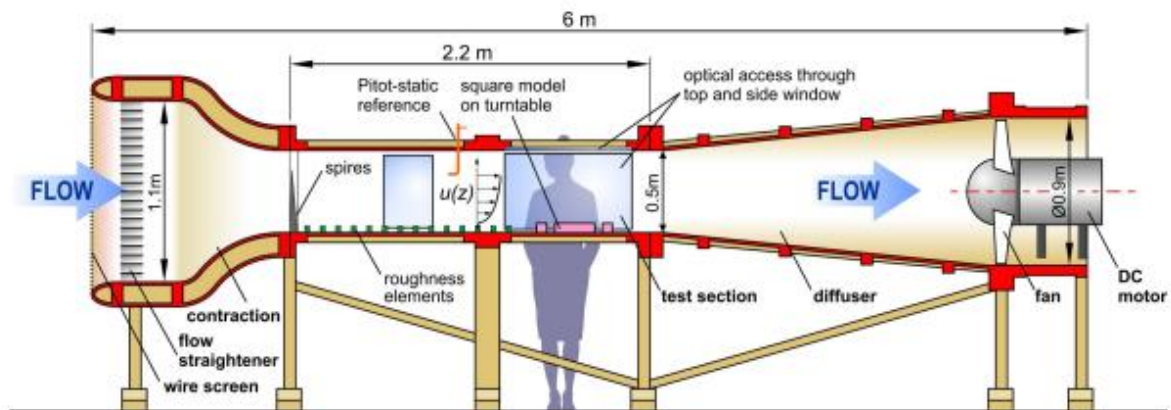
τυρβώδους ροής για την δημιουργία συνθηκών ρεαλιστικής λειτουργίας οχήματος που βρίσκεται σε εξωτερικό περιβάλλον (Cogotti, 2008).



Σχήμα 3-7 Εγκατάσταση αεροδυναμικής σήραγγας (Cogotti, 2008)



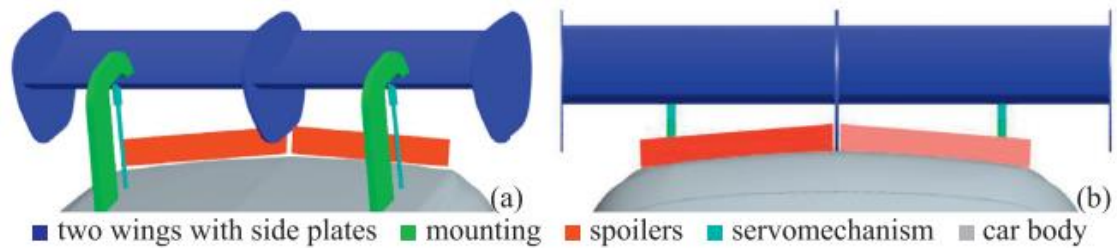
Σχήμα 3-8 Βασικά μέρη αεροδυναμικής σήραγγας (Cogotti, 2008)



Σχήμα 3-9 Τυπική δομή αεροσήραγγας NPL για στερεά μικρής κλίμακας (Balczó & Lajos, 2015)

3.2.1 Μελέτες υπό κλίμακα

Οι Kurec, Remer, Mayer, Tudruj, and Piechna (2019) πραγματοποίησαν μία πειραματική μελέτη που αποσκοπεί στην ανάδειξη μιας πληθώρας αεροδυναμικών πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την χρήση ρυθμιζόμενης αεροτομής και πτερωτής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν σε κλίμακα 1:2.5 ένα όχημα βασισμένο στο Honda CR-X del Sol, το οποίο είναι αρκετά ελαφρύ σπορ αυτοκίνητο με χαρακτηριστικό πίσω παράθυρο που προκαλεί ανακυκλοφορία της ροής στο πίσω μέρος του οχήματος. Το πείραμα έλαβε χώρα στην αεροσήραγγα του Ινστιτούτου Αεροναυπηγικής και Εφαρμοσμένης Μηχανικής στο Πανεπιστήμιο τεχνολογίας της Βαρσοβίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται αναλυτικά στην μελέτη των Kurec, Remer, Mayer, et al. (2019). Πρόκειται για μία αεροδυναμική σήραγγα με πλάτος 2,5m και ύψος 2m και η ταχύτητα ανέμου που χρησιμοποιήθηκε ήταν τα 23 m/s και 5mm το μήκος κλίμακας της τύρβης. Όσον αφορά το κύριο μέρος του πειράματος, στο αυτοκίνητο είναι εγκαταστημένο ένα σύστημα πτερωτής-αεροτομής που λειτουργεί με την βοήθεια σερβομηχανισμών.



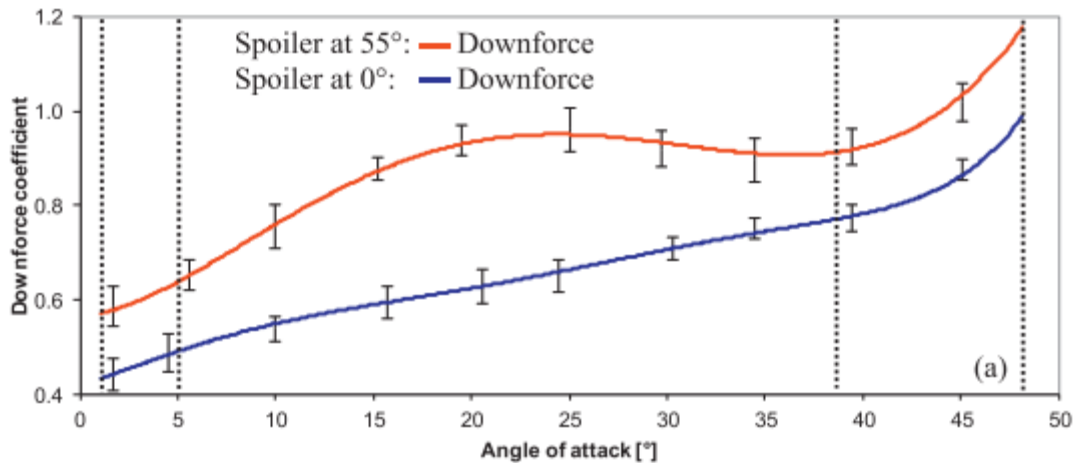
Σχήμα 3-10 Σύστημα πτέρυγας-αεροτομής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)



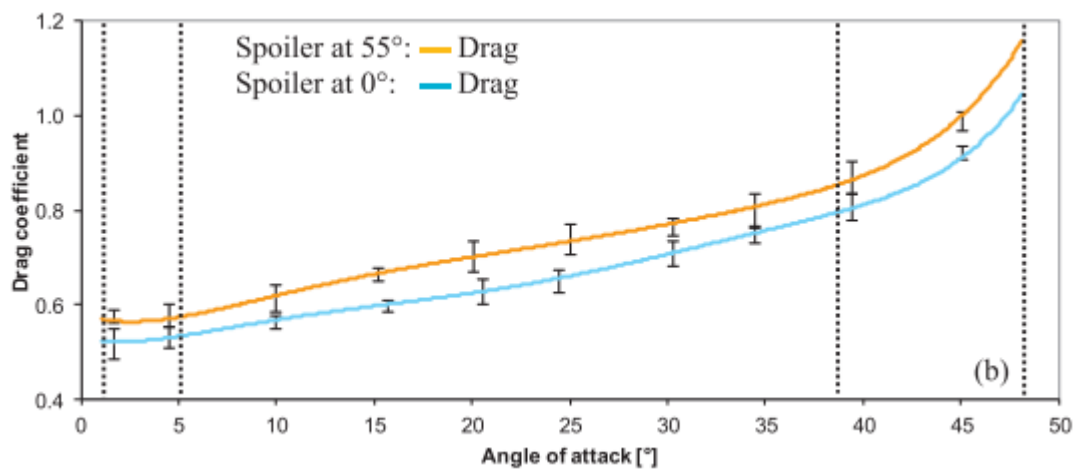
Σχήμα 3-11 Στιγμιότυπο του πειραματικού οχήματος κλίμακας 1:2.5 μέσα στην αεροσήραγγα (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)

Κατά την διάρκεια του πειράματος δίνεται έμφαση σε δύο συγκεκριμένες συνδεσμολογίες του συστήματος πτερωτής-αεροτομής. Η αλλαγή της κλίσης της αεροτομής είναι το κύριο χαρακτηριστικό και των δύο συνδεσμολογιών. Οι Kurec, Remer, Mayer, et al. (2019) περιγράφουν ότι στην πρώτη περίπτωση η αεροτομή είναι προσαρμοσμένη στις 0° και για το λόγο αυτό δεν προσφέρει καμία διαφορά όσο αφορά την κάθετη δύναμη (downforce) αλλά παρόλα αυτά δημιουργεί μία ευδιάκριτη περιοχή αποκόλλησης της ροής. Στην δεύτερη περίπτωση όπου η κλίση είναι στις 55° σε σχέση με την διεύθυνση της ροής παρατηρούν ότι η αεροτομή από την μία είναι λογικό να αυξάνει έστω και ελάχιστα την κάθετη δύναμη λόγω της δημιουργίας περιοχής υψηλότερης

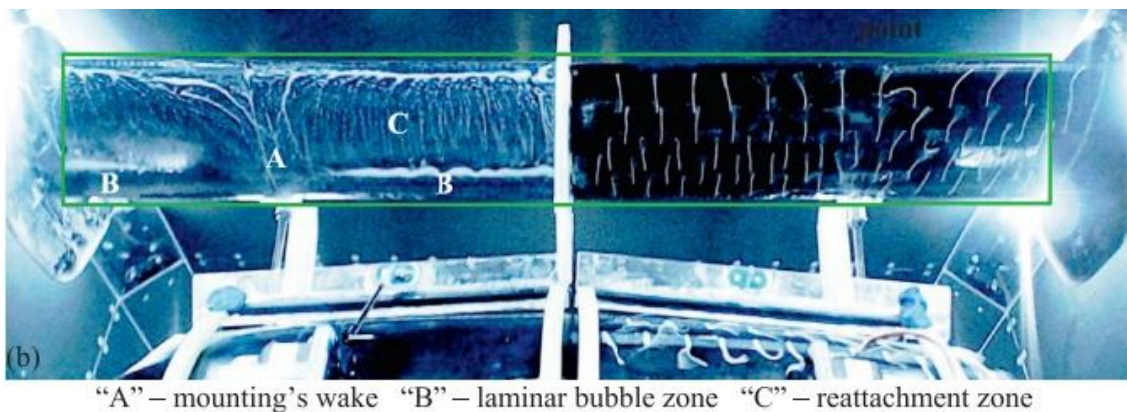
πίεσης , αλλά κυρίως επηρεάζει την ροή γύρω από την πτέρυγα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν καθώς και μία λεπτομερής απεικόνιση της ροής στο σύστημα πτέρυγας-αεροτομής.



Σχήμα 3-12 Μετρήσεις συντελεστή κάθετης δύναμης για διαφορετικές γωνίες συστήματος πτερωτής-αεροτομής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)



Σχήμα 3-13 Μετρήσεις συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης για διαφορετικές γωνίες συστήματος πτερωτής-αεροτομής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)



Σχήμα 3-14 Στιγμιότυπο της πλευράς αναρρόφησης της πτερωτής κατά την διάρκεια απεικόνισης της ροής (Kurec, Remer, Mayer, et al., 2019)

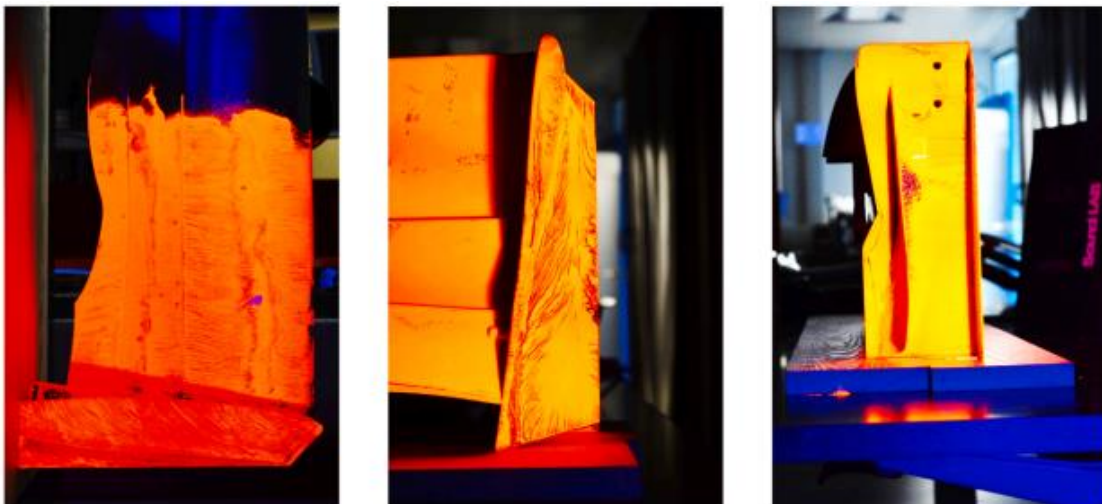
Οι Kurec, Remer, Mayer, et al. (2019) κλείνοντας συμπεραίνουν ότι η προσθήκη μικρότερων αεροδυναμικών στοιχείων μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά στην σωστή διαχείριση των αεροδυναμικών φορτίων. Αυτό γίνεται αντιληπτό καθώς η μικρή αλλαγή της κλίσης της αεροτομής συνέβαλε στην καλύτερη διαχείριση της ροής από την πτερωτή αλλά επηρέασε και τους συντελεστές οπισθέλκουσας και κάθετης δύναμης. Επιπρόσθετα, προσθέτουν ότι η χρήση της αεροτομής παρότι λειτούργησε υποστηρικτικά ήταν αρκετά σημαντική αφού με μικρότερα αεροδυναμικά εξαρτήματα εμφανίζεται το πλεονέκτημα της γρηγορότερης αλλαγής κίνησης λόγω μικρότερης αδράνειας και κατ' επέκταση γρηγορότερη αποδοχή και εκμετάλλευση των αεροδυναμικών φορτίων. Επίσης, λιγότερη ενέργεια πρέπει να δαπανηθεί για την μετακίνηση του μικρότερου στοιχείου (μικρής αεροτομής) από τους ενεργοποιητές.

Μία άλλη πειραματική υπό κλίμακα μελέτη που αναδεικνύει την σημασία ενός άλλου αεροδυναμικού εξαρτήματος πραγματοποιείται από τους Buscariolo et al. (2022). Συγκεκριμένα, πρόκειται για μία μπροστινή πτέρυγα σε κλίμακα 1:2 που βασίζεται στην δομή της McLaren 17D, ενός αγωνιστικού F1 οχήματος. Η αεροδυναμική σήραγγα που διεξάγεται το πείραμα βρίσκεται στο Imperial College του Λονδίνου με διαστάσεις μήκος-πλάτος-ύψος 10x5x20m. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται το πείραμα είναι θερμοκρασιακά ελεγχόμενες με ομοιομορφία ροής στο 1% και η ένταση των φαινομένων τύρβης στο 0,25%.



Σχήμα 3-15 Πειραματική διάταξη μπροστινής πτερωτής (Buscariolo et al., 2022)

Τα πειράματα που διεξήχθησαν είναι δύο. Το πρώτο πείραμα ουσιαστικά αφορά την απεικόνιση των ινώδων φλεβών στα τοιχώματα της πτερωτής με σκοπό την ανάλυση των μεταβατικών περιοχών καθώς και των περιοχών αποκόλλησης της ροής και το δεύτερο μετρήσεις ταχύτητας και σχετικών μεγεθών της ροής πάνω στην πτερωτή με την οπτική μέθοδο PIV.



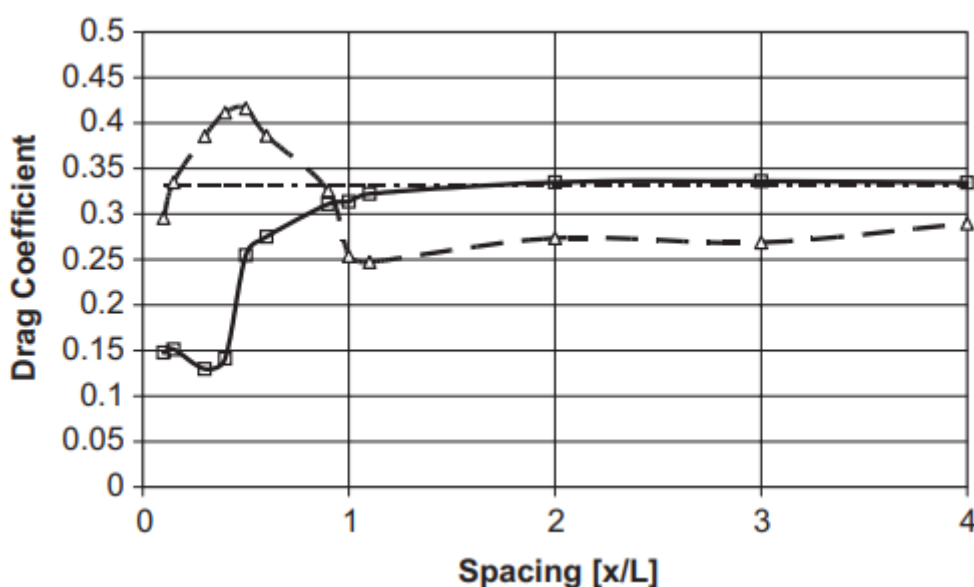
Σχήμα 3-16 Απεικόνιση ροής στα τοιχώματα της πτερωτής σε ταχύτητα 15 m/s από διαφορετικές όψεις (Buscariolo et al., 2022)

Στις πειραματικές μελέτες αεροδυναμικής οχημάτων υπήρχε ελλιπής έρευνα όσον αφορά το πώς επηρεάζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας ενός οχήματος σε πραγματικές συνθήκες κίνησης και οδήγησης. Γενικότερα, η ύπαρξη αυτοκινήτων σε συστοιχίες στους αυτοκινητόδρομους καθώς και η απόσταση που απέχουν μεταξύ τους είναι γνωστό ότι επηρεάζει σημαντικά την επιρροή της οπισθέλκουσας δύναμη. Για το λόγο αυτό οι Watkins and Vano (2008) πραγματοποιούν μία έρευνα στην οποία προσπαθούν να συλλέξουν και να παρουσιάσουν ευρήματα και αποτελέσματα σε τυπικές συστοιχίες οχημάτων κατά την διάρκεια της κίνησης τους και να ερευνήσουν τις μεταβολές των αεροδυναμικών φορτίων και δυνάμεων ενός οχήματος υπό την επήρεια του απόρρου της ροής των μπροστινών οχημάτων. Χρησιμοποιούν 2 μικρά οχήματα σε κλίμακα βασιζόμενα στο Ahmed model, που αποτελεί ένα αρκετά αντιπροσωπευτικό πρότυπο για αεροδυναμική μελέτη καθώς έχει απλή γεωμετρία και είναι αρκετά προσαρμόσιμο σε διαφορετικές περιπτώσεις και δεδομένα αεροδυναμικών πειραμάτων. Σχετικά με την εγκατάσταση του πειράματος, η χρησιμοποιούμενη αεροσήραγγα βρίσκεται στο πανεπιστήμιο RMIT και είναι κλειστού τύπου με σταθερό δάπεδο (όχι κινούμενο διάδρομο) έχοντας διαστάσεις 9x3x2 m. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ταχύτητα 35 m/s με ένταση φαινομένων τύρβης 1,8%.

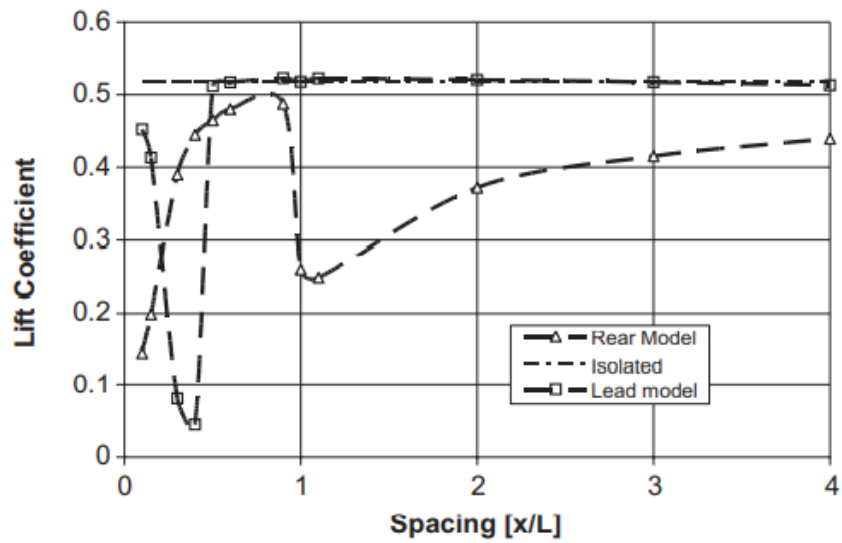


Σχήμα 3-17 Πειραματική διάταξη με τα υπό μελέτη Ahmed models (Watkins & Vano, 2008)

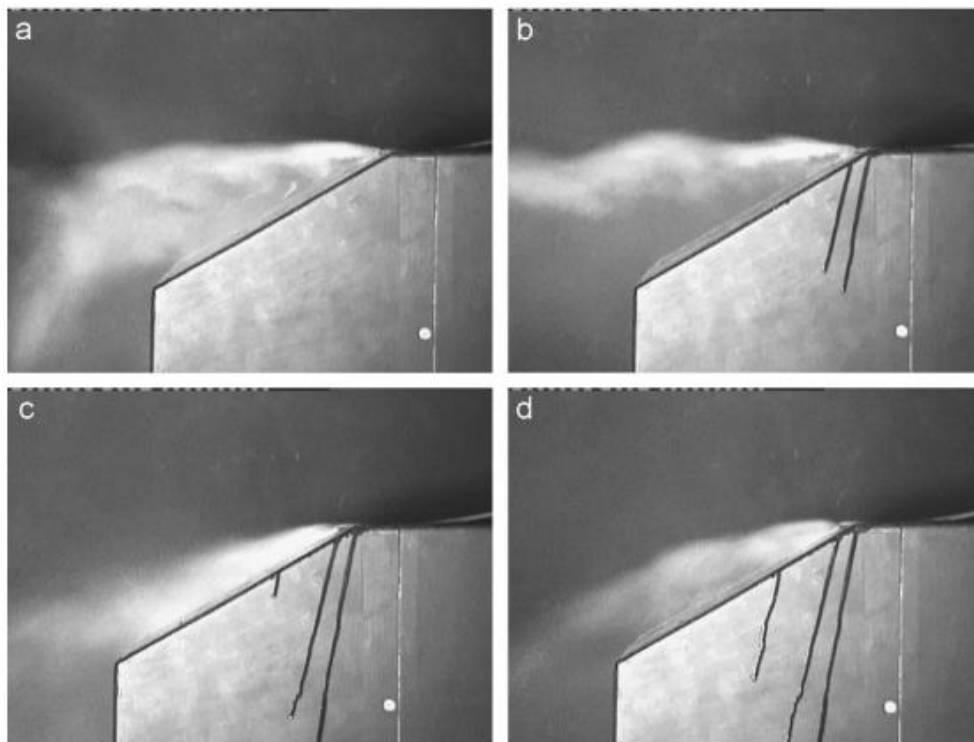
Οι Watkins and Vino (2008) καταλήγουν ότι παρότι η ευθυγράμμιση των αυτοκινήτων σε σειρές κατά την διάρκεια της κίνησης τους αποτελεί μία μέθοδο μείωσης της οπισθέλκουσας δύναμης και κατ' επέκταση μείωσης της κατανάλωσης και των εκπεμπόμενων ρύπων, σε πολύ κοντινές αποστάσεις δεν επαληθεύεται ο παραπάνω ισχυρισμός. Προσθέτουν μάλιστα ότι είναι πολύ πιθανό η οπισθέλκουσα δύναμη, όταν η απόσταση των οχημάτων είναι πολύ μικρή, να είναι και αυξημένη εν συγκρίσει με ένα μεμονωμένο όχημα που κινείται σε αυτοκινητόδρομο. Αναφορικά με την δύναμη άντωσης συμπεράναν ότι και αυτή παρουσίαζε αύξηση σε μικρή απόσταση μεταξύ των οχημάτων υπό την επήρεια των οπίσθιων δυνάμεων του προπορευόμενου οχήματος. Κλείνοντας, τονίζουν πως αυτά τα αποτελέσματα ήταν συγκεκριμένα και αποκλειστικά για το Ahmed model με κάποια απήχηση σε πραγματικό όχημα και οδηγικό περιβάλλον, αλλά η πολύ συγκεκριμένη και απλή γεωμετρία του είναι κάπως περιοριστική και ευελπιστούν η έρευνα τους να αποτελέσει αντικείμενο εξέλιξης με πιο σύνθετες γεωμετρίες και πραγματικά οχήματα ρεαλιστικού μεγέθους υποστηριζόμενη και από την χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD).



Σχήμα 3-18 Χρονοεξαρτώμενες τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας σε συνάρτηση με την ενδιάμεση απόσταση των οχημάτων (Watkins & Vino, 2008)

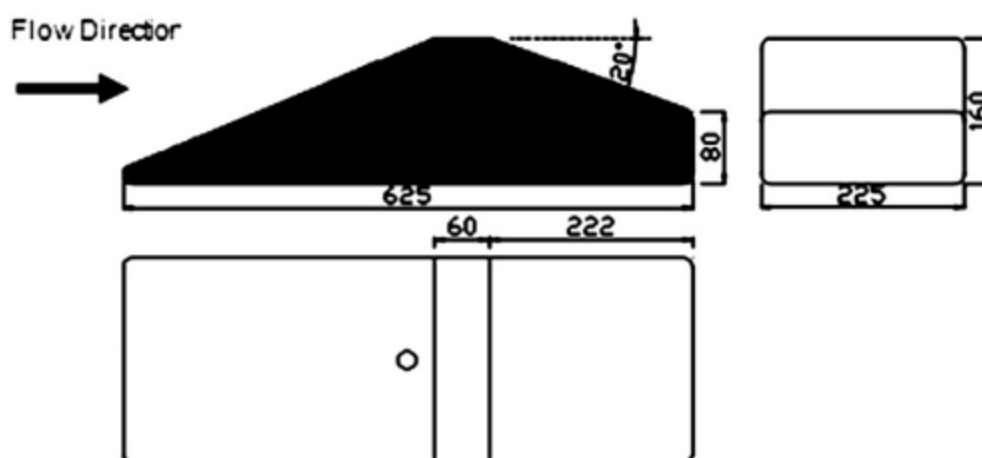


Σχήμα 3-19 Χρονοεξαρτώμενες τιμές συντελεστή άντωσης σε συνάρτηση με την ενδιάμεση απόσταση των οχημάτων (Watkins & Vano, 2008)



Σχήμα 3-20 Απεικόνιση της μορφολογίας της ροής από το άκρο εκφυγής του προπορευόμενου Ahmed model για διαφορετικές αποστάσεις. α) 0,15 του μήκους του, β) 0,30 του μήκους του, γ) 0,50 του μήκους του, δ) 1,0 του μήκους του (Watkins & Vano, 2008)

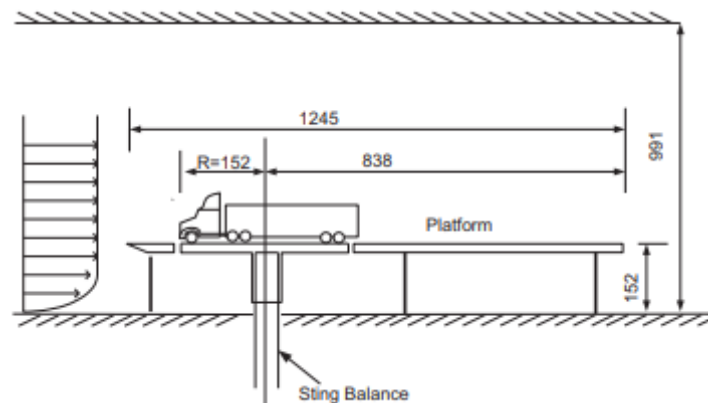
Σημαντική έρευνα πραγματοποιήθηκε και από τους Fuller, Best, Garret, and Passmore (2013) μελετώντας την επίδραση που έχουν τα διάφορα ασταθή αεροδυναμικά στοιχεία στην δυναμική των οχημάτων. Τα αεροδυναμικά φορτία που χρησιμοποίησαν είναι βασισμένα σε πειραματικές μετρήσεις στην αεροσήραγγα του Loughborough University στο υπό κλίμακα Davis model που απεικονίζεται στην συνέχεια.



Σχήμα 3-21 Davis Model (Fuller et al., 2013)

Η αεροσήραγγα είναι ανοιχτής κυκλοφορίας με σταθερό δάπεδο και η ένταση των φαινομένων τύρβης ήταν 0.2% και το πάχος του οριακού στρώματος 60mm. Τα αποτελέσματα που εξήγαγαν οι Fuller et al. (2013) οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση των ασταθών παράπλευρων ανέμων στον χειρισμό του οχήματος είναι μεγάλη όταν παρουσιάζονται μεταβολές μεγάλης κλίμακας στον άνεμο έναρξης. Οι υπόλοιπες πηγές αστάθειας μεταβάλλουν τις πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα αλλά δεν είναι αρκετά σημαντικές για να επηρεάσουν τον χειρισμό του. Παρόλα αυτά αυτές οι επιπλέον πηγές αστάθειας αποτελούν σημαντικό κομμάτι της ασταθούς εναρκτηρίας ροής και για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται και αυτές σοβαρά υπόψη για το σωστό σχεδιασμό ενός οχήματος από τους σχεδιαστές με σκοπό την αποτροπή ή και μείωση της επίδρασης τους (Fuller et al., 2013).

Άλλη σημαντική έρευνα διεξήχθη από τους Liu, Han, Cai, Levitan, and Nikitoroulos (2016) στην οποία αναλύθηκαν οι επιδράσεις διαφορετικών τύπων ροής σε ποικίλες υπό κλίμακα γεωμετρίες οχημάτων. Οι ροές που εφαρμόστηκαν ήταν στρωτή, τυρβώδης και οριακού στρώματος. Το πείραμα έγινε στην αεροσήραγγα του Louisiana State University με διαστάσεις 0.99m ύψος και 1.32m πλάτος και με μέγιστη ταχύτητα τα 15m/s.



Σχήμα 3-22 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής δοκιμής στην αεροσήραγγα (Liu et al., 2016)



Σχήμα 3-23 Δοκιμή υπό κλίμακα οχήματος σε τυρβώδη ροή (Liu et al., 2016)



Σχήμα 3-24 Δοκιμή υπό κλίμακα οχήματος σε ροή οριακού στρώματος (Liu et al., 2016)

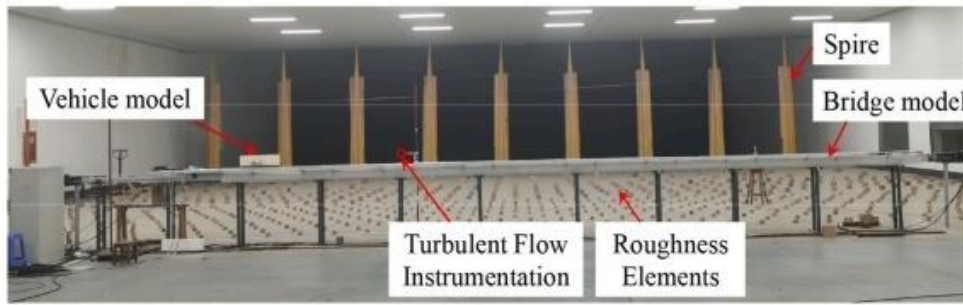
Οι Liu et al. (2016) έπειτα από ενδελεχή πειραματική μελέτη κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Ανεξάρτητα από τον τύπο του οχήματος οι πλευρικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στα οχήματα σε σχέση με την γωνία εκτροπής ήταν συνημιτονοειδούς τύπου με την μεγαλύτερη τιμή να εμφανίζεται σε γωνία εκτροπής 90° . Επίσης, παρατήρησαν ότι συντελεστής της πλευρικής δύναμης ήταν μεγαλύτερος στις περιπτώσεις στρωτής ροής και ροής οριακού στρώματος.
- Ο συντελεστής ροπής κύλισης σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τον συντελεστή πλευρικών δυνάμεων. Παρουσιάστηκαν μάλιστα μεγάλες αυξομειώσεις ανάλογα με τον τύπο οχήματος που χρησιμοποιούταν σε κάθε δοκιμή. Γενικότερα, παρατηρήθηκε ότι όσο μεγάλωνε ο λόγος της πλευρικής ως προς την μπροστινή επιφάνεια του οχήματος υπήρχε και αύξηση του συντελεστή ροπής κύλισης καθώς και επίσης ότι ο συντελεστής αυτός ήταν μειωμένος στις περιπτώσεις τυρβώδους ροής σε σχέση με την περίπτωση στρωτής ροής.
- Ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης ακολουθεί την ημιτονοειδή εξίσωση $A \sin(2\psi)$ όπου ψ είναι η γωνία εκτροπής. Σε αυτήν την

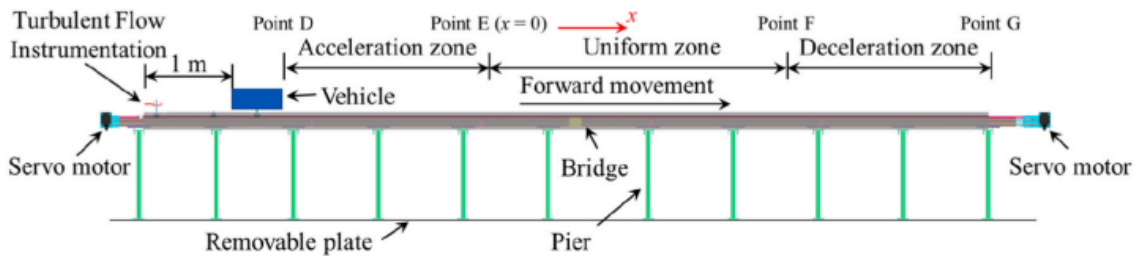
περίπτωση η γεωμετρία του εκάστοτε οχήματος ήταν ο κυριότερος παράγοντας μεταβολής του συντελεστή.

- Ο συντελεστής άντωσης κατά κύριο λόγο παρουσιάζει θετικές τιμές για γωνία εκτροπής $\psi=0$ ή π και αρνητικές στις κοντινές τιμές του $\pi/2$.
- Ο συντελεστής ροπής κλίσης παρουσιάζει μείωση όταν η γωνία εκτροπής μεταβάλλεται από 0 έως π και η επίδραση των διαφορετικών ειδών ροής στον συντελεστή αυτόν εξαρτάται από την γεωμετρία των οχημάτων.
- Το βασικότερο συμπέρασμα για τους συντελεστές ροπής που κατέληξαν ήταν ότι το ύψος στο οποίο βρίσκεται κάθε φορά το κέντρο βάρους του εξεταζόμενου οχήματος επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.

Κάτι που εκλείπει από τις περισσότερες πειραματικές μελέτες αεροσήραγγας είναι η αεροδυναμική ανάλυση σε κινούμενα οχήματα. Για το λόγο αυτό οι Hu, Xiang, Liu, Chen, and Li (2022) πραγματοποιούν μία έρευνα η οποία αποσκοπεί στην ανάλυση των φασμάτων ισχύος της ταχύτητας του ανέμου ενός υπό κλίμακα οχήματος, κινούμενο σε μία τεχνητή γέφυρα καθώς και στην επίδραση που έχουν το είδος των φασμάτων ισχύος ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, το είδος κίνησης του οχήματος και οι γωνίες εκτροπής του. Επίσης, εισάγονται οι συναρτήσεις αεροδυναμικής ανάλυσης του κινούμενου οχήματος χρησιμοποιώντας μία εξίσωση για τις διάφορες τιμές της γωνίας εκτροπής. Το πείραμα διεξήχθη στην Κίνα και συγκεκριμένα στο Southwest Jiaotong University, σε μία αεροσήραγγα διαστάσεων 36X22.5X4.5m κατάλληλα προσαρμοσμένη ώστε να θυμίζει μία υπό κλίμακα γέφυρα. Το πειραματικό μοντέλο αποτελεί ένα αστικό λεωφορείο που χρησιμοποιείται στην Κίνα σε κλίμακα 1/20. Κάποιες λεπτομέρειες αποφεύχθηκαν για ευκολία στην κατασκευή του οχήματος αλλά και για να μειωθεί η επίδραση του αριθμού Reynolds στην πειραματική διαδικασία. Για την μεγαλύτερη σαφήνεια του πειράματος αυτό χωρίστηκε σε διάφορα τμήματα όπως το στατικό τμήμα, το τμήμα επιτάχυνσης, το σταθερής ταχύτητας τμήμα, το τμήμα επιβράδυνσης και το τμήμα απουσίας κραδασμών. Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύχθηκε από το όχημα ήταν τα 12m/s.



Σχήμα 3-25 Πεδίο ροής ανέμου και συσκευή καταγραφής μετρήσεων στην αεροσήραγγα (Hu et al., 2022)

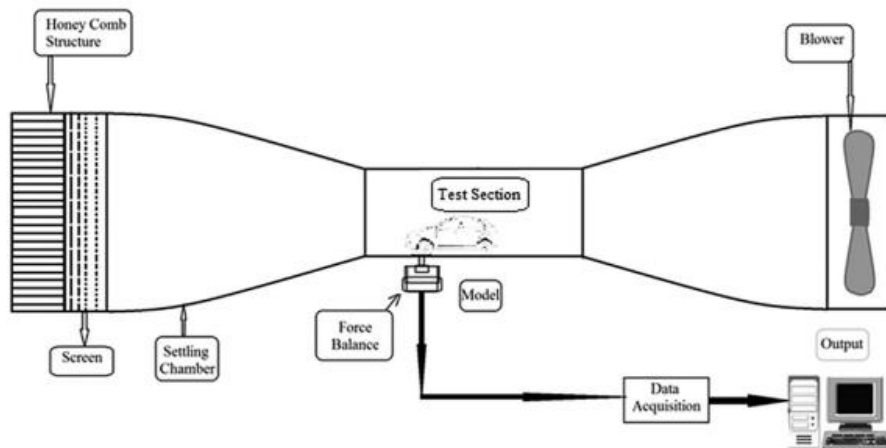


Σχήμα 3-26 Αναλυτική περιγραφή πειραματικής διάταξης (Hu et al., 2022)

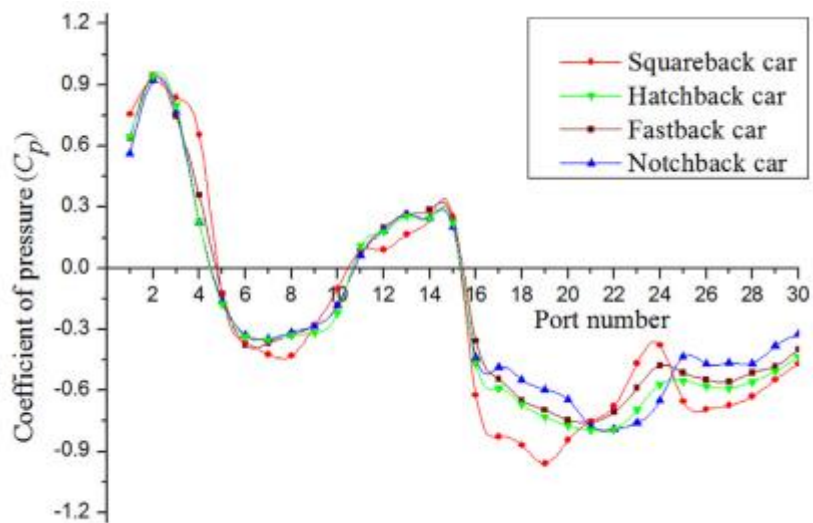
Ως συμπεράσματα της έρευνας οι Hu et al. (2022) αναφέρουν ότι κατά κύριο λόγο παρατήρησαν πως το φάσμα ισχύος της ταχύτητας του ανέμου και στην περίπτωση του κινούμενου αλλά και του στάσιμου οχήματος είναι μεγαλύτερο από το μοντέλο του Karman στις υψηλότερες συχνότητες. Επίσης, η αεροδυναμική επιρροή που δέχεται το κινούμενο όχημα σε συγκεκριμένο σημείο της γέφυρας χρησιμοποιώντας το φάσμα ισχύος της ταχύτητας του ανέμου είναι ασήμαντη σε μικρές συχνότητες ενώ διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων εμφανίζουν μεγάλη συνοχή σε υψηλές συχνότητες. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση συσχέτισης της ροής του ανέμου προσεγγίζεται καλύτερα στην περίπτωση σταθερού οχήματος εν αντιθέσει με την περίπτωση του κινούμενου με αποτέλεσμα οι μετρήσεις από την στατική δοκιμή να είναι καλύτερες στις χαμηλές συχνότητες από ότι στην δοκιμή με

κινούμενο όχημα αντίστοιχα. Κλείνοντας οι Hu et al. (2022) προσθέτουν ότι η ροπή κύλισης στο στάσιμο όχημα παρουσιάζεται μικρότερη από ότι στο κινούμενο καθώς και ότι οι μέγιστες τιμές άντωσης και πλευρικής δύναμης στο κινούμενο όχημα παρουσιάστηκαν στις υψηλότερες συχνότητες. Ακόμα, οι πλευρικές δυνάμεις στις χαμηλότερες συχνότητες δεν επηρεάστηκαν από την γωνία εκτροπής.

Άλλη σημαντική υπό κλίμακα έρευνα πραγματοποιείται από τους Sivaraj, Parammasivam, Prasath, Vadivelu, and Lakshmanan (2021) με κυριότερο σκοπό την παρουσίαση των διαφορετικών τιμών των συντελεστών οπισθέλκουσας, άντωσης και πίεσης που προκύπτουν από πειράματα αεροσήραγγας για τα διάφορα είδη γεωμετρίας οχημάτων (Sedan, Hatchback, κλπ). Το βασικότερο συμπέρασμα που κατέληξαν είναι ότι η διαφορά πίεσης μεταξύ του μπροστινού και του πίσω τμήματος του οχήματος αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα προέλευσης οπισθέλκουσας δύναμης σε όλα τις γεωμετρίες οχημάτων που δοκιμάστηκαν στο πείραμα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε διακύμανση του συντελεστή οπισθέλκουσας (0.31 - 0.35) καθώς η περιοχή του απόρρου στο πίσω μέρος του κάθε οχήματος επηρεαζόταν από την μορφολογία του. Επίσης, καταλήγουν ότι η ροϊκή γραμμή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την δύναμη άντωσης και γενικότερα το πεδίο ροής στην περιοχή χαμηλής πίεσεως στο πίσω μέρος του οχήματος, καθώς και ότι οι τύποι fastback και sedan παρουσίασαν καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά από τα υπόλοιπα είδη οχημάτων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται σε διάγραμμα οι διακυμάνσεις που συμβαίνουν στο συντελεστή πίεσης κατά την διάρκεια του πειράματος για τις διάφορες γεωμετρίες οχημάτων.



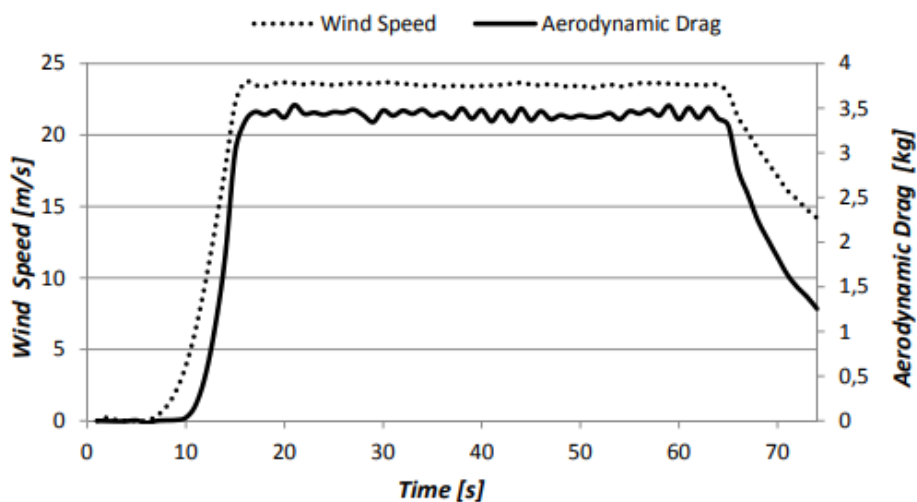
Σχήμα 3-27 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης (Sivaraj et al., 2021)



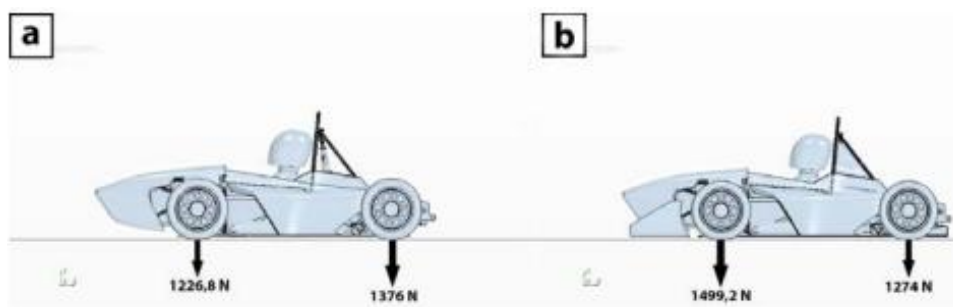
Σχήμα 3-28 Μετρήσεις του συντελεστή πίεσης C_p για τις διάφορες γεωμετρίες οχημάτων (Sivaraj et al., 2021)

3.2.2 Μελέτες σε πλήρη κλίμακα

Οι πειραματικές μελέτες αεροδυναμικής στον χώρο της αυτοκίνησης είναι πιθανό, ειδικότερα σε μεγάλες βιομηχανίες και ερευνητικά κέντρα που υπάρχει μεγαλύτερη οικονομική άνεση, να διεξάγονται με την βοήθεια μεγάλων αεροσηράγγων ικανών να «φιλοξενήσουν» οχήματα πλήρους κλίμακας. Συχνά, τέτοιες μελέτες γίνονται στα τελικά στάδια παραγωγής του οχήματος και σε συνδυασμό με την χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων CFD εξάγονται αποτελέσματα για τους κρίσιμους αεροδυναμικούς συντελεστές καθώς και συμπεράσματα για την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός οχήματος. Οι Mariani, Roggiani, Risi, and Scarpaticci (2015) πραγματοποιούν μία πειραματική μελέτη στην αεροσήραγγα κλειστού βρόγχου του University of Perugia. Χρησιμοποιούν ως πειραματικό όχημα ένα μοντέλο που προορίζεται για τον διαγωνισμό Formula SAE. Συγκεκριμένα, για δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες μπροστινής πτέρυγας λαμβάνονται μετρήσεις για την εκτίμηση της επίδρασης που έχει η ταχύτητα στον συντελεστή οπισθέλκουσας. Αυτή η εναλλαγή στο σχήμα του οχήματος έχει σκοπό την μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας και ταυτόχρονα την αύξηση της κάθετης δύναμης για να ελαχιστοποιηθούν τα σημεία ανακυκλοφορίας και στασιμότητας.

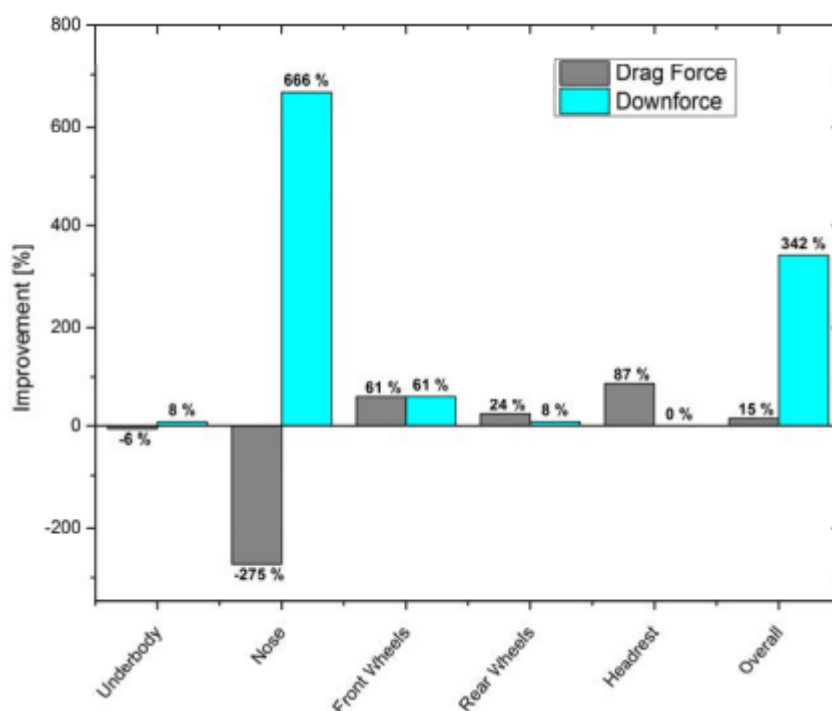


Σχήμα 3-29 Ταχύτητα ανέμου και οπισθέλκουσα σε συνάρτηση με το χρόνο (Mariani et al., 2015)



Σχήμα 3-30 Διαφορετικές συνδεσμολογίες του μοντέλου (Mariani et al., 2015)

Παρατηρείται όπως γίνεται αντιληπτό μία μεταβολή στις τιμές της κάθετης δύναμης στις 2 παραπάνω περιπτώσεις. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το ποσοστό βελτίωσης της δεύτερης συνδεσμολογίας έναντι της πρώτης όσον αφορά τα μεγέθη της οπισθέλκουσας και της κάθετης δύναμης.



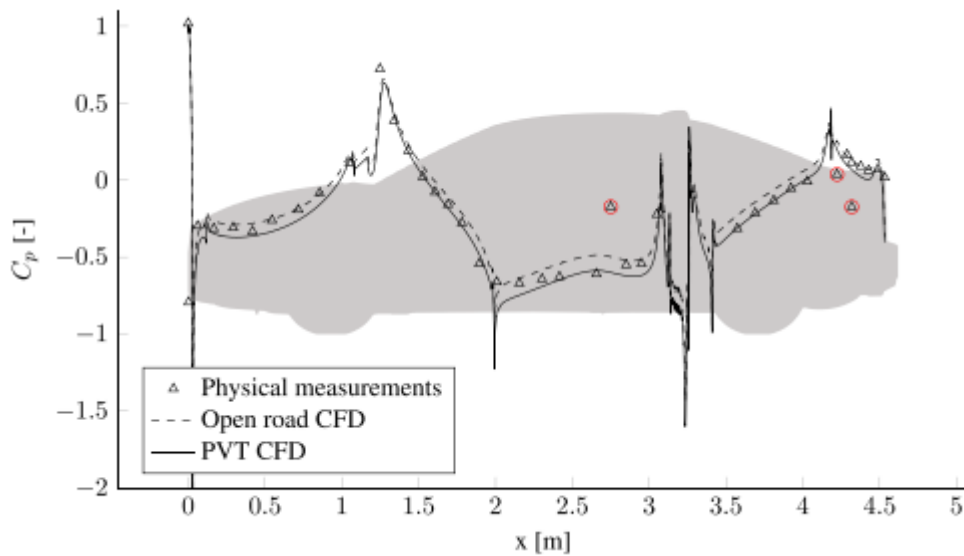
Σχήμα 3-31 Ποσοστά βελτίωσης αεροδυναμικών μεγεθών της 2ης συνδεσμολογίας μοντέλου σε σχέση με την 1η (Mariani et al., 2015)

Άλλη σημαντική έρευνα διεξάχθηκε από τους Ljungskog, Sebben, and Broniewicz (2020) στην οποία πραγματοποιούνται μετρήσεις οπισθέλκουσας και άντωσης σε ένα μοντέλο Volvo S60 στην αεροσήραγγα της Volvo (PVT) στο Gothenburg. Τα πειράματα έγιναν σε ταχύτητες 140km/h και γωνία εκτροπής 0

μοίρες. Το μπροστινό τμήμα του αμαξίου υπόκειται σε σταθερή μετωπική ροή και έτσι η άντωση στο εμπρός τμήμα παραμένει σταθερή, ενώ στο οπίσθιο τμήμα η άντωση επηρεάζεται από την ασταθή ροή που αναπτύσσεται λόγω ανακυκλοφορίας και δινών που δημιουργούνται. Το πείραμα αυτό έγινε συμπληρωματικά και σε συνδυασμό με την μέθοδο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής κατέληξαν ότι μπορεί να υπάρξει μία πολύ καλή προσέγγιση του απόλυτου συντελεστή οπισθέλκουσας και από τις 2 αυτές μεθόδους. Παρά την καλή προσέγγιση της οπισθέλκουσας, η άντωση εμφάνισε μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις 2 μεθόδους συγκριτικά. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος τοποθέτησης του οχήματος στην αεροσήραγγα καθώς και ο συντελεστής πίεσης C_p κατά μήκος του οχήματος για τις διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

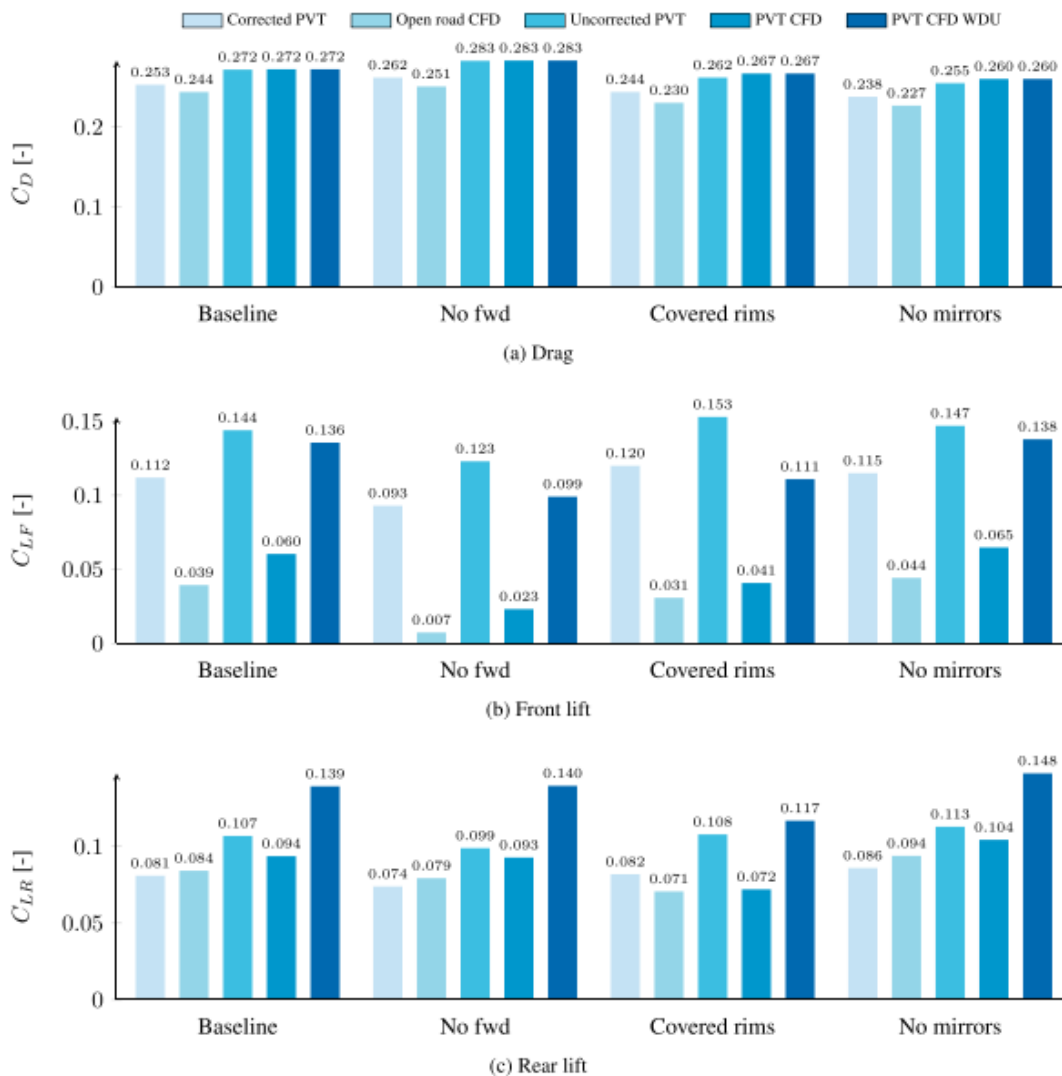


Σχήμα 3-32 Πειραματική διάταξη στην αεροσήραγγα της Volvo (Ljungskog et al., 2020)



Σχήμα 3-33 Κατανομή συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος του οχήματος (Ljungskog et al., 2020)

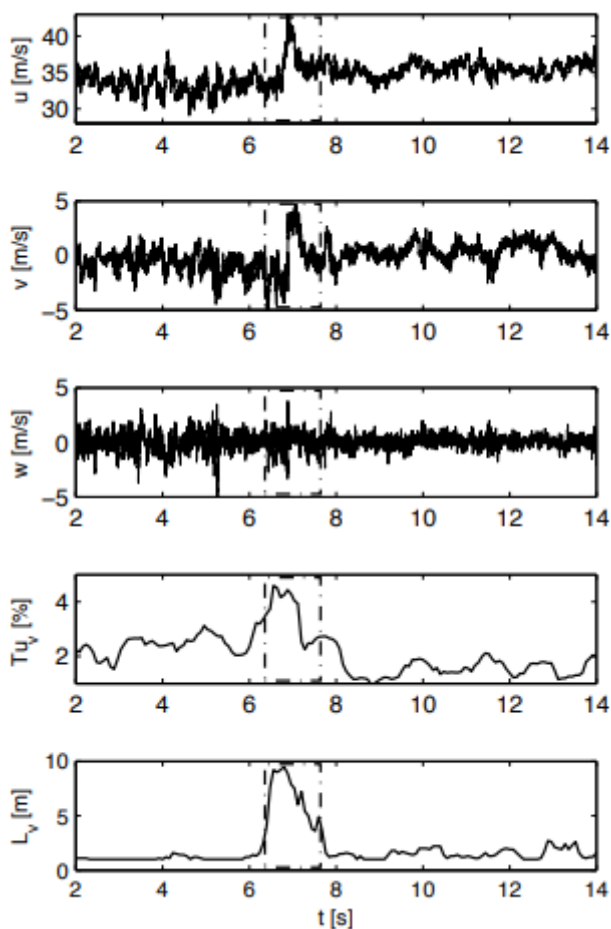
Ουσιαστικά, οι Ljungskog et al. (2020) κατάφεραν μέσα από τα πειράματα της μελέτης τους να κάνουν μία σύγκριση όσον αφορά την συμπεριφορά του οχήματος εντός αεροσήραγγας αλλά και σε συνθήκες ανοικτού δρόμου. Όπως ήταν αναμενόμενο συμπέραναν ότι η συνολική πίεση κατά μήκος της επιφάνειας του οχήματος είναι μικρότερη στην περίπτωση αεροσήραγγας. Οι βασικότερες διαφορές παρατηρούνται σε περιοχές έντονης επιτάχυνσης, όπως στην μπροστινή επιφάνεια του οχήματος, στους μπροστινούς τροχούς και στους πλαϊνούς καθρέπτες. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι αεροδυναμικοί συντελεστές και συγκεκριμένα κατά πόσο μεταβλήθηκαν ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο.



Σχήμα 3-34 Συντελεστές C_d και C_l για τις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού (Αεροσήραγα και προσομοιώσεις) (Ljungskog et al., 2020)

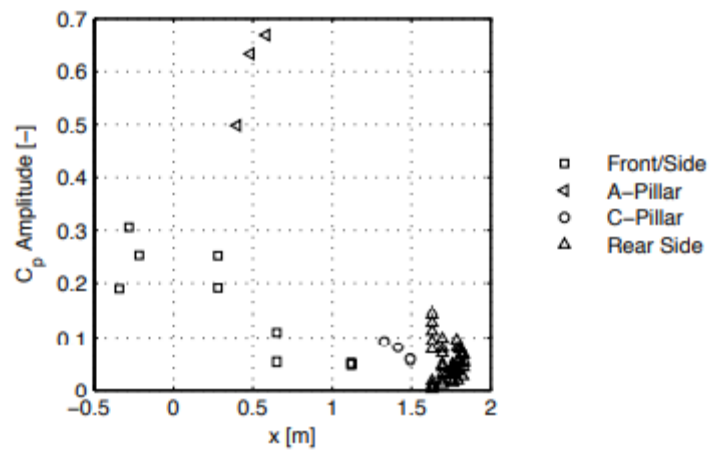
Τα αεροδυναμικά μεγέθη επηρεάζονται δραματικά από απότομες ριπές ανέμου με αποτέλεσμα την οδηγική αστάθεια (Wojciak, 2012). Για να εκτιμηθεί και να υπολογιστεί σωστά η αντίδραση του οχήματος κατά την διάρκεια ριπής ανέμου είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί η αεροδυναμική διέγερση του οχήματος. Ειδικότερα, ο Wojciak (2012) στην διπλωματική του εργασία προσπαθεί να κάνει μία αναλυτική περιγραφή για το είδος και τον τύπο της ροής που δέχεται ένα όχημα κατά την διάρκεια ριπής ανέμου. Συγκεκριμένα, οι

κλίμακες τύρβης ήταν μεταξύ 10m και 80m και παραμορφώσεις ταχύτητας έως τα 8m/s. Το πείραμα έλαβε χώρα στις ειδικές εγκαταστάσεις της BMW στην Γερμανία. Η πειραματική διάταξη απαρτίζεται από το όχημα πλήρους κλίμακας και από τον μετρητικό εξοπλισμό. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις ταχυτήτων καθώς και τα μεγέθη έντασης και κλίμακας μήκους τύρβης κατά την διάρκεια ριπής ανέμου.

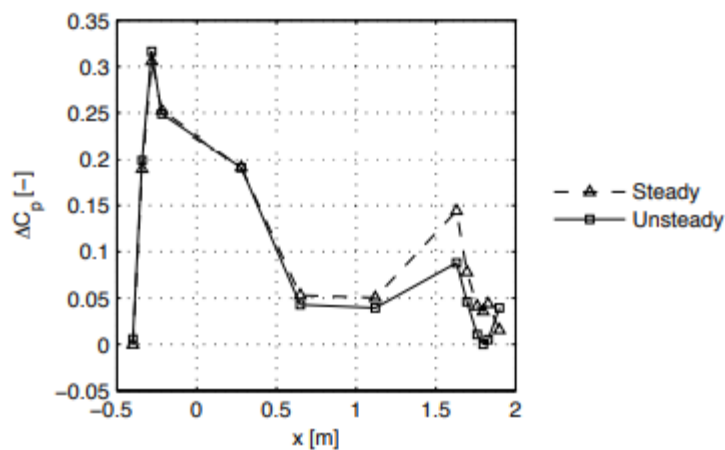


Σχήμα 3-35 Διακύμανση τιμών ταχύτητας και τύρβης κατά την διάρκεια ριπής ανέμου (Wojciak, 2012)

Οι μετρήσεις πίεσης πάρθηκαν σε σημεία σε όλο το μήκος της επιφάνειας και μεταβάλλονταν ανάλογα με το αν τα αεροδυναμικά φορτία ήταν ασταθή ή σταθερά.



Σχήμα 3-36 Διακύμανση συντελεστή C_p κατά μήκος της επιφάνειας του οχήματος (Wojciak, 2012)



Σχήμα 3-37 Διακύμανση συντελεστή C_p ανάλογα με τον τύπο του αεροδυναμικού φορτίου (Wojciak, 2012)

Τέλος, ο Wojciak (2012) τονίζει ότι θα πρέπει να δοθεί γενικότερα μεγαλύτερη σημασία στις ριπές του ανέμου και τις επιπτώσεις τους κατά την διάρκεια σχεδιασμού ενός οχήματος, ακόμα και στα πρώιμα στάδια, καθώς επηρεάζεται η σταθερότητα του οχήματος σε μεγάλο βαθμό και μπορεί να προκληθούν επικίνδυνα φαινόμενα. Για να γίνει μία τέτοια σωστή πρόβλεψη για το φαινόμενο ριπής ανέμου και το πώς επιδρά στο όχημα πρέπει να συμπεριληφθεί και η αλληλεξάρτηση της δυναμικής και της αεροδυναμικής του οχήματος σε

συνδυασμό με την αντίδραση του οδηγού. Επιβάλλεται η πειραματική διαδικασία να συνδυαστεί με μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για εγκυρότερα αποτελέσματα.

3.3 Μελέτες με τη μέθοδο Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)

Υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) είναι η ανάλυση των συστημάτων που περιλαμβάνουν ροή ρευστού, μεταφορά θερμότητας και συσχετιζόμενων φαινομένων όπως χημικές αντιδράσεις, μέσω προσομοίωσης βασισμένης σε υπολογιστή (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Όπως προαναφέρθηκε η χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στον τομέα αεροδυναμικής των οχημάτων αποτελεί έναν γρήγορο, σχετικά οικονομικό και αξιόπιστο τρόπο για την πρόβλεψη και την περιγραφή της ροής γύρω από οχήματα εδάφους. Σε αντίθεση με τις πειραματικές μελέτες αεροσήραγγας μπορεί να χρησιμοποιείται σε πρώιμα και ενδιάμεσα στάδια παραγωγής ενός οχήματος με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής στον σχεδιασμό του οχήματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται είτε συμπληρωματικά στις πειραματικές διαδικασίες αεροσηράγγων για τον έλεγχο της ορθότητας του πειράματος, είτε εξ' ολοκλήρου αποκλειστικά για την ανάλυση της ροής. Το βασικότερο σημείο που χρήζει προσοχής είναι να εισαχθούν σωστά στο εκάστοτε πρόγραμμα τα δεδομένα και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πρέπει να γίνει η μελέτη, καθώς και να υπάρχει επάρκεια υπολογιστικών πόρων και εργαλείων (Aultman et al., 2022). Πιο συγκεκριμένα, οι υπολογισμοί της τυρβώδους ροής προαπαιτούν την ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για την μελέτη των επιπτώσεων της τύρβης. Σύμφωνα με τους H.K. Versteeg and Malalasekera (2006) οι μέθοδοι αυτοί διαχωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες:

- **Μοντέλα τύρβης για εξισώσεις (RANS)**
- **Προσομοίωση μεγάλων δινών (LES)**
- **Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS)**

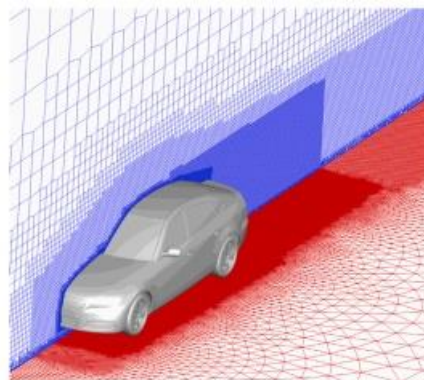
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν έρευνες με την χρήση των παραπάνω μεθόδων καθώς και θα αναδειχτεί η χρησιμότητα και η ικανότητα τους για επίλυση προβλημάτων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD).

3.3.1 Μοντέλα τύρβης για εξισώσεις (RANS)

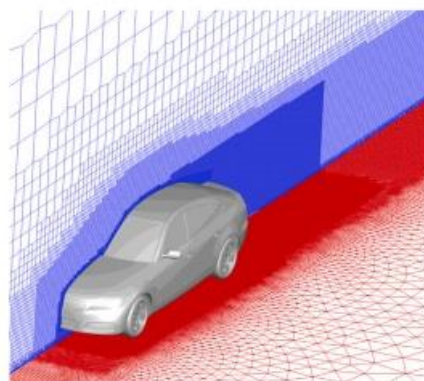
Η μέθοδος RANS ουσιαστικά έχει ως βάση την μελέτη της μέσης ροής καθώς και την επίδραση της τύρβης στις ιδιότητες της μέσης ροής (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Πριν από την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων, οι εξισώσεις Navier-Stokes γράφονται στην μορφή μέσων τιμών ως προς το χρόνο (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Στις χρονικά μέσες μορφές (Reynolds-averaged) εξισώσεις ροής, εμφανίζονται επιπλέον όροι λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφόρων τυρβώδων διακυμάνσεων (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Τα συνηθέστερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι το μοντέλο k-ε και το μοντέλο τάσεων Reynolds (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Η μέθοδος RANS έχει σχετικά απλή υπολογιστική διαδικασία και για αυτό το λόγο αποτελεί την βασικότερη μέθοδο επίλυσης προβλημάτων ροής (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Υπάρχουν και οι ασταθείς μέθοδοι URANS και DES οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι συχνά θεωρούνται η καλύτερη και ακριβέστερη επιλογή για την μελέτη πεδίων ροής γύρω από οχήματα εδάφους (Aultman et al., 2022). Ο υπολογισμός των τυρβωδών ροών με τις εξισώσεις RANS προϋποθέτει την ανάπτυξη μοντέλων τύρβης για τον προσδιορισμό των τάσεων Reynolds και των βαθμωτών όρων μεταφοράς και το κλείσιμο του συστήματος εξισώσεων μέσης ροής (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Τα πιο συνήθη μοντέλα είναι το $k - \epsilon$, $k - \omega$ και το μοντέλων τάσεων Reynolds καθώς και παραλλαγές τους.

Οι Aultman et al. (2022) πραγματοποιούν μία συγκριτική αξιολόγηση με σκοπό την ανάδειξη της μεθόδου RANS έναντι των υπολοίπων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν τις γεωμετρίες των μοντέλων SAE notchback και DrivAer fastback. Όλες οι μέθοδοι προέβλεψαν την οπισθέλκουσα δύναμη σε ποσοστό 10% των πειραματικών τιμών που προηγήθηκαν. Η μέθοδος RANS ήταν αρκετά κατατοπιστική όσον αφορά τον διαχωρισμό της ροής γύρω από τους

τροχούς στο σημείο που αλλάζει η δομή του απόρρου του οχήματος. Τα αποτελέσματα που παρουσίασαν ήταν σχετικά με τους συντελεστές C_l , C_d . Επιπρόσθετα, η μέθοδος RANS παρουσίασε την μεγαλύτερη ευαισθησία πλέγματος στον υπολογισμό της άντωσης σε αντίθεση με την μέθοδο URANS και DDES. Σε όλες τις μεθόδους παρατηρήθηκε σφάλμα της τάξεως 0.14 σε σχέση με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Αντιθέτως, η οπισθέλκουσα δύναμη για το SAE notchback προσεγγίστηκε σε μεγαλύτερο βαθμό από την δύναμη άντωσης, με σφάλμα κοντά στο 0.01 σε σχέση με την πειραματική διαδικασία. Από όλες τις πυκνότητες πλέγματος η μέθοδος RANS εμφανίζει αποκλίσεις 8,7% στην οπισθέλκουσα ενώ στην URANS 2.4%. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι περιπτώσεις πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για το SAE notchback και DrivAer model αντίστοιχα.



(a)



(b)

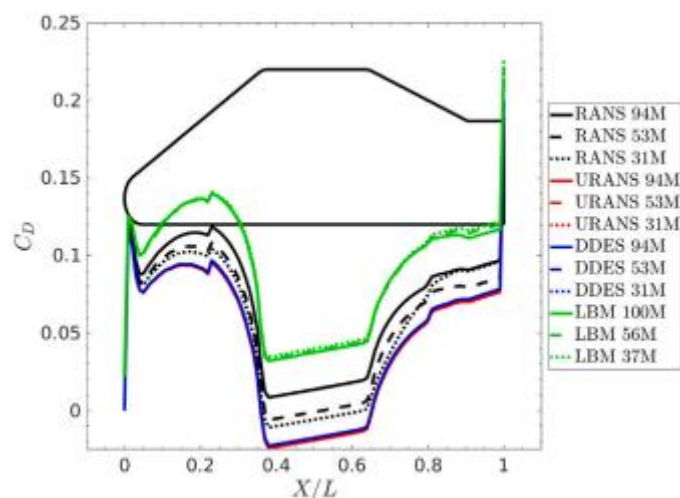
Σχήμα 3-38 Πλέγματα για τις μεθόδους RANS και URANS για το DrivAer model: α) Χειρότερης ποιότητας πλέγμα, β) Λεπτομερές πλέγμα (Aultman et al., 2022)

Γενικότερα οι Aultman et al. (2022) παρατήρησαν πως παρότι υπάρχει ομοιογένεια και συνοχή στον υπολογισμό του συντελεστή οπισθέλκουσας από τις μεθόδους RANS και URANS, ο συντελεστής αυτός μπορεί να εμφανίσει υπολογιστικά λάθη σε διαφορετικές περιοχές του πεδίου ροής με αποτέλεσμα να αγνοηθούν ανακρίβειες. Συνεπώς, για να χαρακτηριστεί καλύτερα και αναλυτικότερα ο συντελεστής οπισθέλκουσας για τις διάφορες μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, θα πρέπει να παρουσιάζεται σε συνάρτηση με το ροϊκό μήκος του οχήματος.

Lift and drag coefficients (C_L , C_D) predicted by various CFD methods for the SAE notchback model. ΔC_D is computed using the experimental results as a baseline.

Method	Mesh	C_L	C_D	ΔC_D
Exp. Wood et al. [16]	-	0.055	0.207	-
RANS	31M	-0.072	0.201	-2.9%
	53M	-0.081	0.183	-11.6%
	94M	-0.073	0.191	-7.7%
URANS	31M	-0.080	0.191	-7.7%
	53M	-0.079	0.188	-9.2%
	94M	-0.076	0.186	-10.1%

Πίνακας 3-1 Πίνακας τιμών συντελεστή άντωσης και οπισθέλκουσας για τις μεθόδους RANS και URANS για το SAE notchback (Aultman et al., 2022)



Σχήμα 3-39 Διακύμανση του συντελεστή οπισθέλκουσας για τις διάφορες μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Aultman et al., 2022)

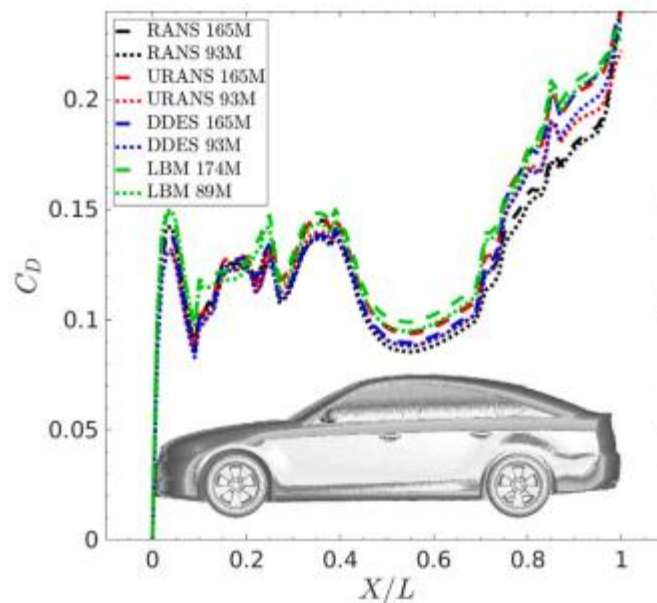
Αναφορικά με το DrivAer fastback και η μέθοδος RANS αλλά και η URANS δεν προσδιορίζουν πλήρως τον συνολικό συντελεστή άντωσης, με αποτέλεσμα οι τιμές δύναμης άντωσης της προσομοίωσης να είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις πειραματικές τιμές. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα αεροδυναμικών συντελεστών για το DrivAer fastback.

Table 4

Lift and drag coefficients (C_L , C_D) predicted by various CFD methods for the DrivAer fastback model. ΔC_D is computed using the experimental results of Heft et al. [13] as a baseline. C_{L_t} and C_{D_t} denote the total lift and drag coefficients, while C_{L_b} and C_{D_b} denote the lift and drag coefficients for the vehicle body (i.e. excluding wheels and tires), respectively.

Method	Mesh	C_{L_t}	C_{L_b}	C_{D_t}	C_{D_b}	ΔC_{D_t}
Experiments [31]	-	-0.008	-	0.252	-	-
Experiments [13]	-	-	-	0.243	-	-
RANS	93M	0.117	0.114	0.240	0.201	-1.2%
	165M	0.114	0.112	0.243	0.210	0.0%
URANS	93M	0.044	0.045	0.222	0.192	-8.6%
	165M	0.009	0.007	0.239	0.201	-1.6%

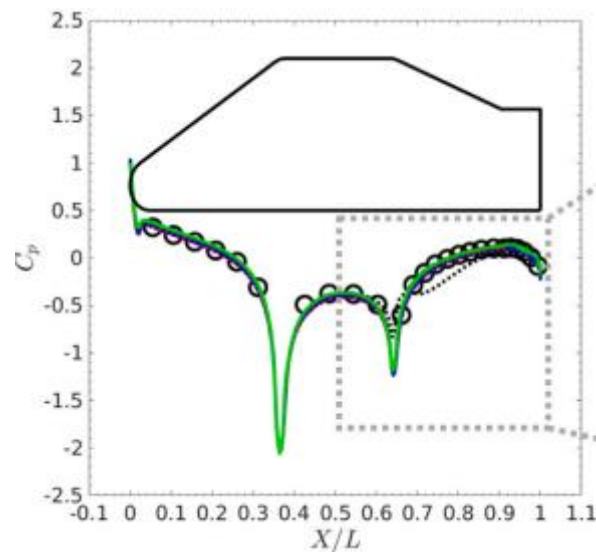
Πίνακας 3-2 Πίνακας αεροδυναμικών συντελεστών (Aultman et al., 2022)



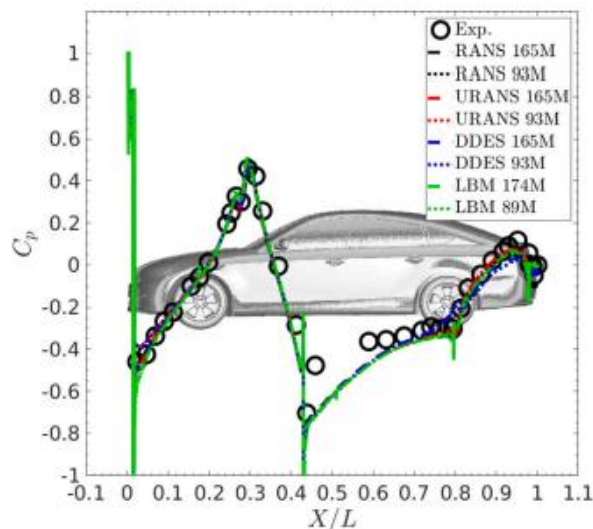
Σχήμα 3-40 Διακύμανση του συντελεστή οπισθέλκουσας κατά μήκος του μοντέλου DrivAer (Aultman et al., 2022)

Από την άλλη, όσον αφορά το συντελεστή πίεσης στο μοντέλο SAE, για όλες τις προσομοιώσεις παρατηρήθηκε παρόμοιο προφίλ πίεσης και τιμές κοντινές

με τις πειραματικές. Ο συντελεστής πίεσης C_p δεν παρουσίασε διαφορές ανάμεσα στην μέθοδο RANS και τις ασταθείς μεθόδους όπως η URANS όταν η ροή προσκολλάται στην επιφάνεια (πχ μπροστινό τμήμα οχήματος), αλλά οι μεγάλες διαφορές παρατηρήθηκαν στα σημεία αποκόλλησης της ροής. Σε γενικές γραμμές οι ίδιες παρατηρήσεις έγιναν και στο μοντέλο DrivAer.

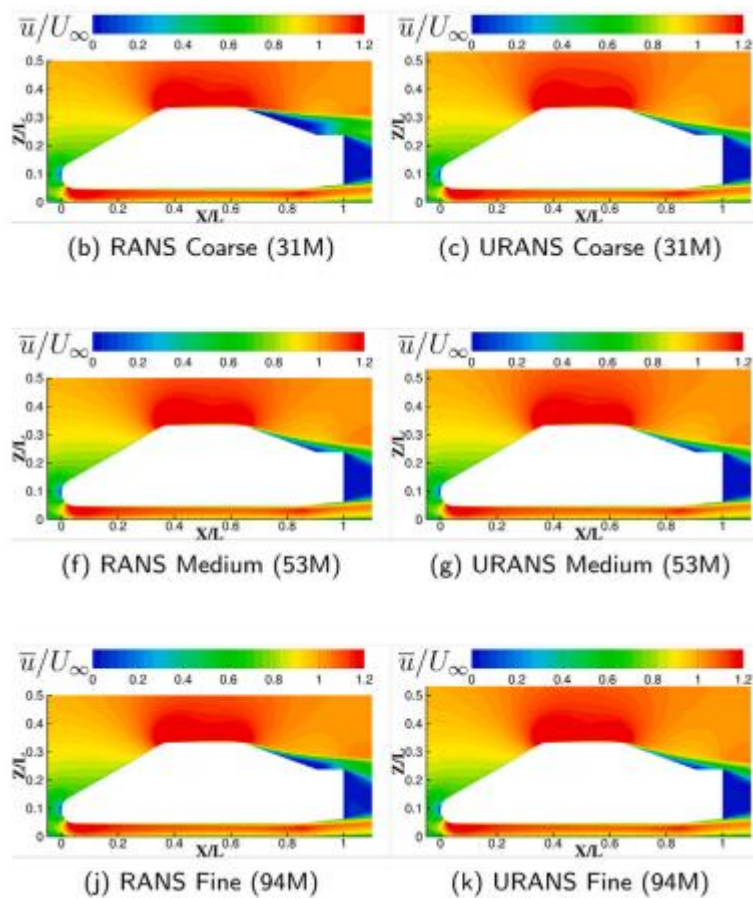


Σχήμα 3-41 Διακύμανση συντελεστή πίεσης με τη μέθοδο RANS κατά μήκος του μοντέλου SAE (Aultman et al., 2022)

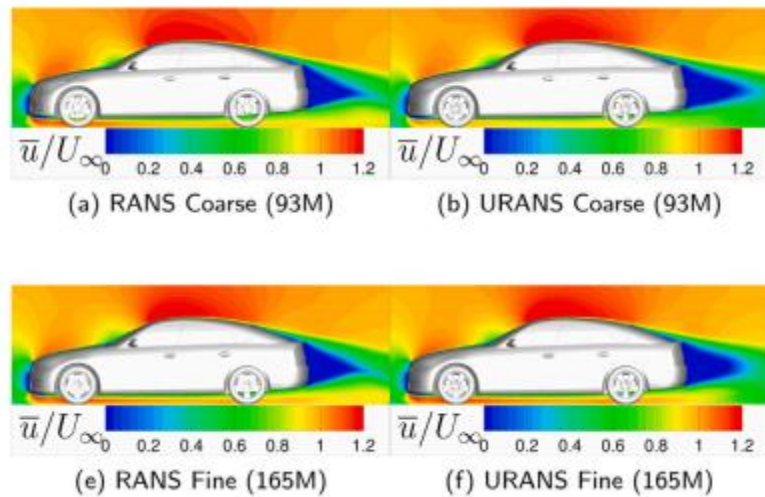


Σχήμα 3-42 Διακύμανση συντελεστή πίεσης κατά μήκος του μοντέλου DrivAer (Aultman et al., 2022)

Για τις μετρήσεις ταχύτητας και συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό του μέσου πεδίου ροής ταχύτητας η μέθοδος RANS παρουσίασε ανακρίβειες ξανά στα σημεία αποκόλλησης της ροής καθώς επίσης είναι αρκετά εξαρτώμενη από τον τύπο και το είδος του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε. Η μέθοδος URANS παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια και συνοχή καθώς και την μικρότερη ευαισθησία στην αλλαγή πλέγματος.



Σχήμα 3-43 Κατανομές μέσης ταχύτητας για τις μεθόδους RANS και URANS για το μοντέλο SAE (Aultman et al., 2022)

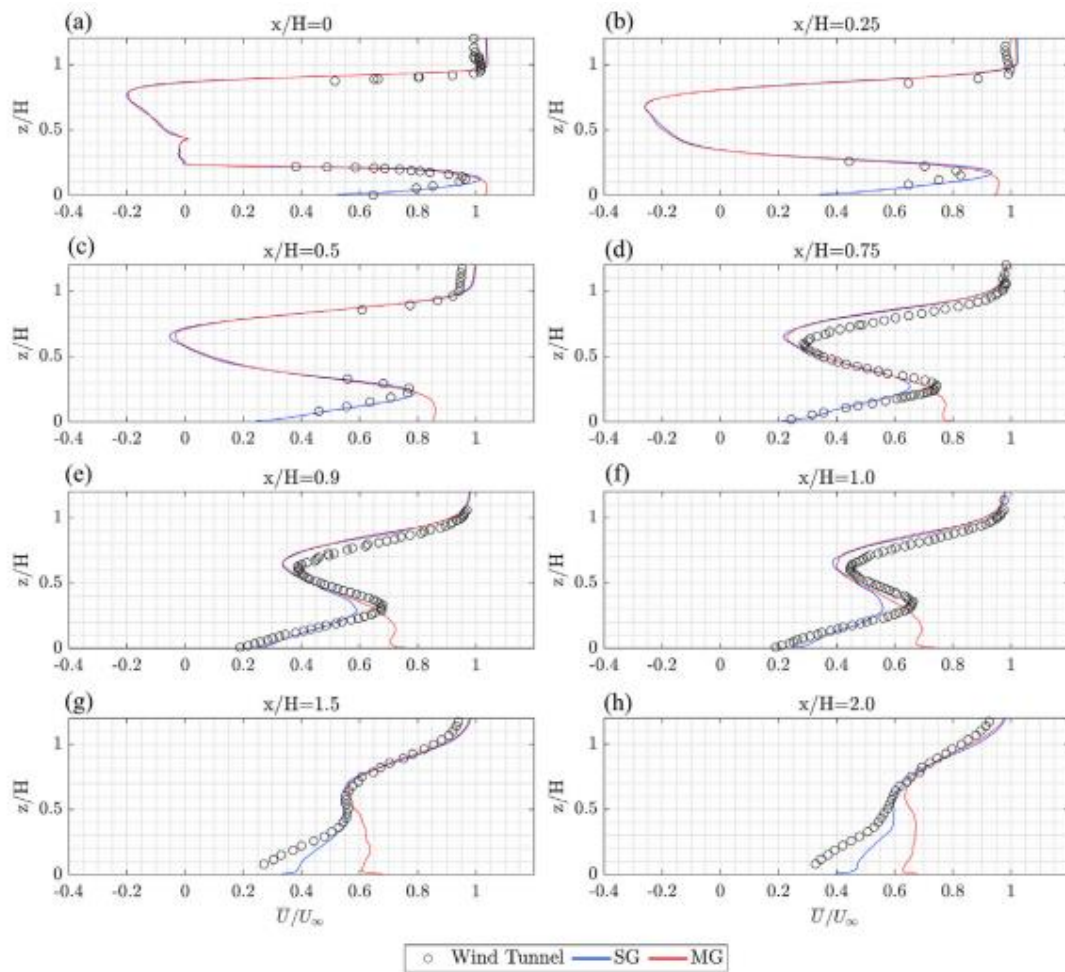


Σχήμα 3-44 Κατανομές μέσης ταχύτητας για τις μεθόδους RANS και URANS για το μοντέλο DrivAer (Aultman et al., 2022)

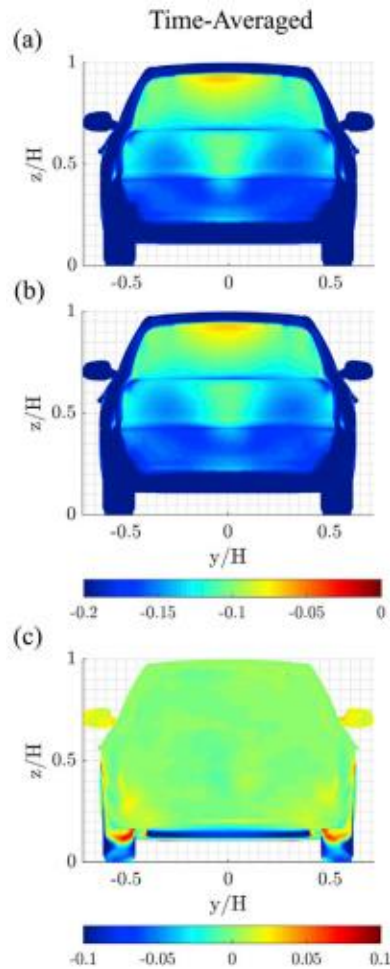
Όσον αφορά το κόστος η μέθοδος RANS ήταν η πιο οικονομική και παρότι παρουσίασε περισσότερες ανακρίβειες από την URANS μπορεί με σχετική ακρίβεια να παρουσιάσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι Ashton, West, Lardeau, and Revell (2016) έρχονται και αυτοί να προσθέσουν ότι μετά από έρευνα τους που έγινε στο Ahmed model και σε πραγματικά μοντέλα ότι η μέθοδος RANS παρουσίασε και στην δική τους έρευνα σχετική αδυναμία προσδιορισμού της ροής με το μεγαλύτερο σφάλμα να εμφανίζεται στα αρχικά στρώματα διάτμησης της ροής. Αντιθέτως, παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο DES που αποτελεί υβριδικό μοντέλο RANS παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα σχετικά με τον υπολογισμό των συντελεστών C_d , C_p , C_l και γενικότερα στον προσδιορισμό της ροής. Παρόλα αυτά αμφότερες οι μέθοδοι δεν προσδιορίζουν πλήρως το πεδίο ροής ακόμα και στον ποιοτικότερο τύπο πλέγματος και για αυτό το λόγο οι Ashton et al. (2016) ότι η μέθοδος LES που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο ίσως ήταν καλύτερη επιλογή στην συγκεκριμένη μελέτη. Κλείνοντας, τονίζουν και αυτοί την οικονομική υπεροχή που παρουσιάζει η μέθοδος RANS και για το λόγο αυτό θεωρούν πως θα πρέπει να γίνονται συνεχείς προσπάθειες τελειοποίησης της. Γενικότερα, η μέθοδος RANS είναι καλύτερη στο να προσεγγίζει τις περιοχές που δεν παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής σε τμήματα κοντά σε σταθερές

επιφάνειες, ενώ τα υβριδικά μοντέλα RANS όπως το DES είναι καλύτερα στις ροές με μεγάλες περιοχές αποκόλλησης και αποτυπώνουν καλύτερα τα τμήματα επανασύνδεσης της ροής (Winkler et al., 2016).

Οι έρευνες με την βοήθεια της μεθόδου RANS συχνά χρησιμοποιούνται υποστηρικτικά στις μελέτες αεροσήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργούνται περιβάλλοντα προσομοίωσης αεροσήραγγας με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον προσδιορισμό συνήθως των αεροδυναμικών συντελεστών C_d, C_l, C_p και ταχυτήτων και κατ' επέκταση για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του πειράματος. Σύμφωνα με τους Josefsson, Hobeika, and Sebben (2022) στις περισσότερες περιπτώσεις προσομοίωσης με την μέθοδο RANS, η προσθήκη αεροσήραγγας στην προσομοίωση συμβάλλει στην βελτίωση του υπολογισμού των συντελεστών οπισθέλκουσας και γενικότερα του προσδιορισμού των πεδίων ροής. Οι Wang, Avadiar, Thompson, and Burton (2019) διεξάγουν μία τέτοια συνδυαστική έρευνα πειραματικής αεροσήραγγας και προσομοίωσης CFD με την μέθοδο RANS. Ειδικότερα, κάνουν μία σύγκριση των δύο μεθόδων για την ορθή εξακρίβωση των αποτελεσμάτων αναφορικά με τα προφίλ ταχυτήτων, την τοπολογία του απόρρου που σχηματίζεται, την πίεση κατά μήκος της επιφάνειας του οχήματος καθώς και τα αεροδυναμικά φορτία. Η προσομοίωση με την μέθοδο RANS παρουσίασε μεγάλη ακρίβεια στην επίλυση του πεδίου ροής και συγκεκριμένα στην αναπαράσταση των προφίλ ταχυτήτων στην περιοχή του απόρρου καθώς και στον προσδιορισμό των δυνάμεων. Διαδικαστικά σφάλματα που συνέβησαν και στις δύο διαδικασίες καθώς και η απλοποίηση του μοντέλου για τις υπολογιστικές διαδικασίες συνέβαλαν σε μία απόκλιση των τιμών του πειράματος από αυτές της προσομοίωσης, αλλά η απόκλιση αυτή ήταν σε λογικά πλαίσια (Wang et al., 2019). Οι διαδικασίες έγιναν για 2 περιπτώσεις, κινούμενο έδαφος (MG) και σταθερό έδαφος (SG). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στην συνέχεια.

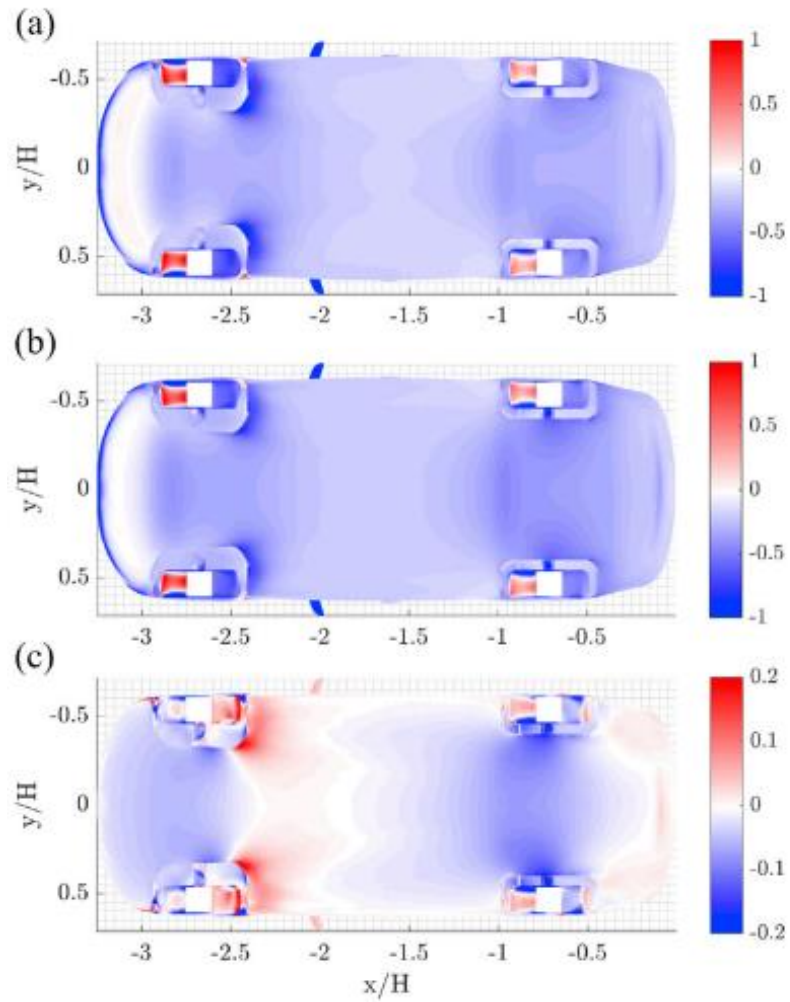


Σχήμα 3-45 Συγκριτική απεικόνιση του προφίλ μέσης ταχύτητας κατά μήκος και ύψος του οχήματος για την προσομοίωση και την πειραματική διάταξη (Wang et al., 2019)

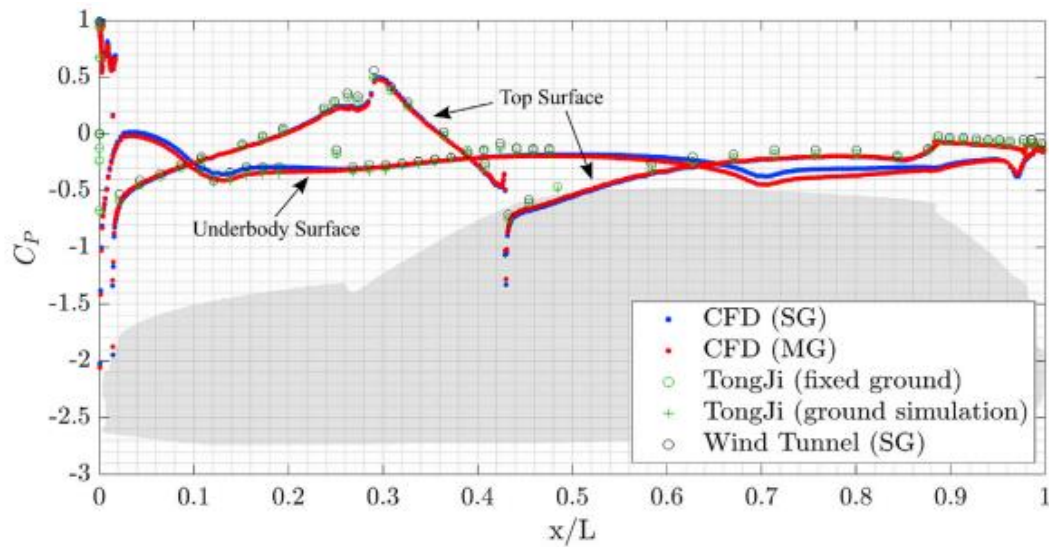


Σχήμα 3-46 Σύγκριση του συντελεστή πίεσης με την χρήση της μεθόδου RANS για α) σταθερό έδαφος, β) κινούμενο έδαφος, γ) απόκλιση σταθερού και κινούμενου (Wang et al., 2019)

Η μεγάλη διαφορά μεταξύ κινούμενου και σταθερού εδάφους παρατηρείται στην περιοχή των τροχών καθώς και στο κάτω μέρος του οχήματος λόγω του φαινομένου της αποκόλλησης της ροής. Πιο συγκεκριμένα, για το κάτω μέρος του οχήματος όπως παρουσιάζεται παρακάτω οι τιμές της πίεσης εμφανίζουν κάποια απόκλιση καθώς το κινούμενο έδαφος και η περιοχή «στέγασης» των τροχών προκαλεί αύξηση της πίεσης.



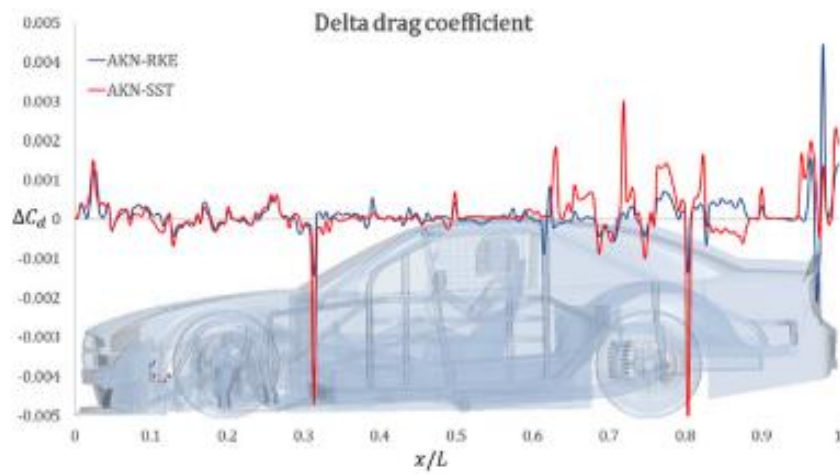
Σχήμα 3-47 Σύγκριση του συντελεστή πίεσης στο κάτω μέρος του οχήματος με την χρήση της μεθόδου RANS για α) σταθερό έδαφος, β) κινούμενο έδαφος, γ) απόκλιση σταθερού και κινούμενου (Wang et al., 2019)



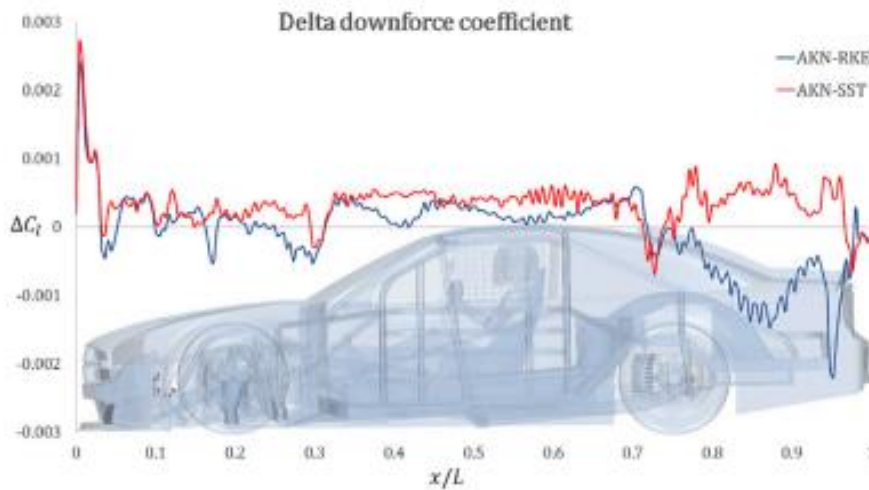
Σχήμα 3-48 Συγκριτική απεικόνιση του συντελεστή πίεσης κατά μήκος του οχήματος για την προσομοίωση και την πειραματική διάταξη (Wang et al., 2019)

Στην σύγκριση των πειραματικών τιμών πίεσης με τις τιμές της προσομοίωσης παρατηρείται συσχετισμός μεταξύ τους. Επίσης, στην επιφάνεια του οχήματος οι τιμές του συντελεστή πίεσης είναι αρκετά κοντινές ανεξάρτητα από την κίνηση του εδάφους.

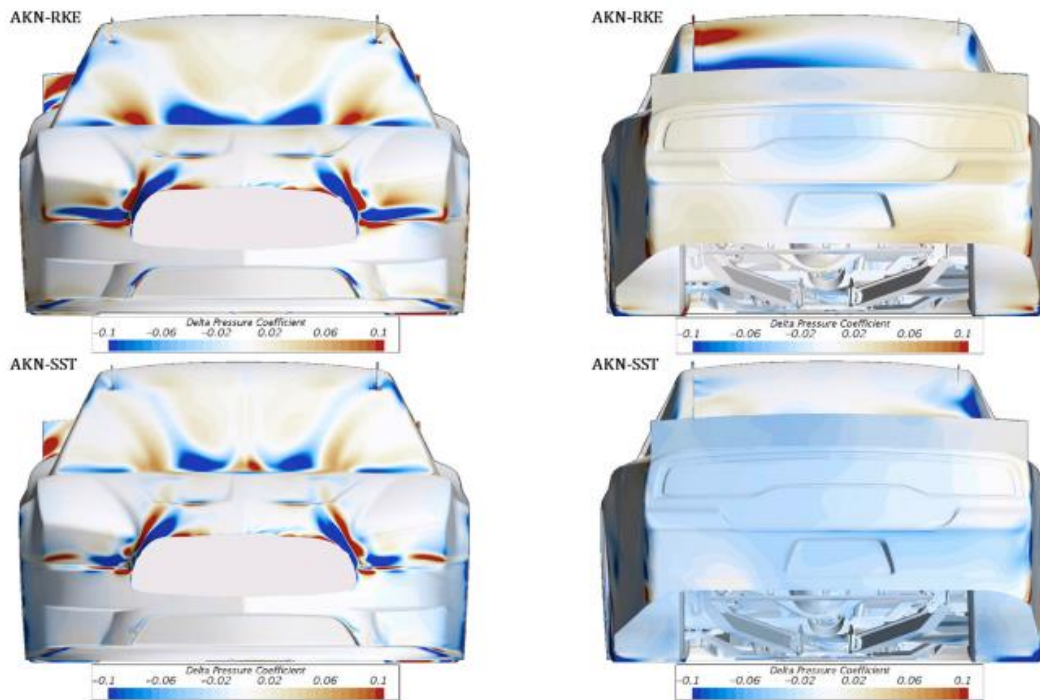
Η μέθοδος RANS χωρίζεται σε υποκατηγορίες οι οποίες παρουσιάζουν διαφορές στον τρόπο προσέγγισης και επίλυσης της εκάστοτε ροής που πρέπει να μελετηθεί. Οι Fu, Uddin, and Robinson (2018) πραγματοποιούν σύγκριση των μοντέλων $k - \epsilon$ και SST $k - \omega$. Οι κύριες διαφορές παρατηρούνται στις περιοχές αποκόλλησης και ανακυκλοφορίας της ροής στο πίσω τμήμα του οχήματος όπου δημιουργούνται έντονες δίνες (Fu et al., 2018). Όσον αφορά τον συντελεστή άντωσης και τα δύο μοντέλα παρουσίασαν κοντινές τιμές αλλά με διαφορετικά πεδία ροής της δίνης, ενώ οι κατανομές κάθετης δύναμης παρουσίασαν μεγάλες διαφορές στο μπροστινό και το πίσω τμήμα του οχήματος (Fu et al., 2018).



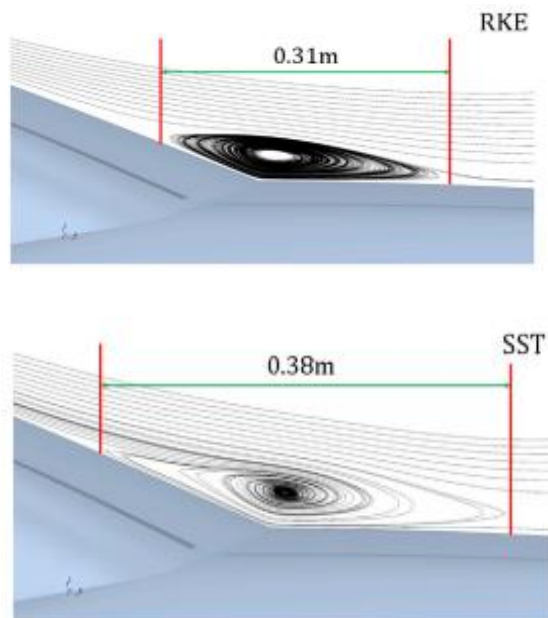
Σχήμα 3-49 Συντελεστής οπισθέλκουσας υπολογισμένος με την μέθοδο RANS για τα μοντέλα $k - \epsilon$ και SST $k - \omega$ (Fu et al., 2018)



Σχήμα 3-50 Συντελεστής κάθετης δύναμης υπολογισμένος με την μέθοδο RANS για τα μοντέλα $k - \epsilon$ και SST $k - \omega$ (Fu et al., 2018)



Σχήμα 3-51 Συντελεστής πίεσης υπολογισμένος με την μέθοδο RANS για τα μοντέλα $k - \epsilon$ και SST $k - \omega$ στο μπροστινό και πίσω μέρος του οχήματος (Fu et al., 2018)



Σχήμα 3-52 Περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής στο πίσω μέρος του οχήματος για τα 2 μοντέλα RANS (Fu et al., 2018)

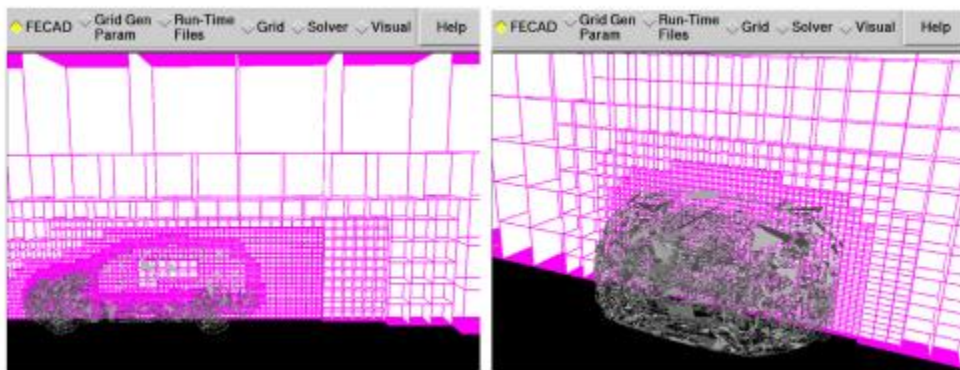
Γενικότερα, το μοντέλο $k - \epsilon$ είναι το συχνότερο που χρησιμοποιείται σε συνθήκες τυρβώδους ροής για τον υπολογισμό των μέσων χαρακτηριστικών της ροής, με το RKE που περιγράφηκε προηγουμένως να αποτελεί βελτίωση αυτού (Fu, Uddin, & Zhang, 2020). Το μοντέλο SST από την άλλη προσδιορίζει όλες τις ελεύθερες ροές και τα οριακά στρώματα μέχρι και το ιξώδες υπόστρωμα με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, αλλά είναι προτιμότερο για τον προσδιορισμό για μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης σε σχέση με το μοντέλο $k-\epsilon$ (Fu et al., 2020). Σύμφωνα με τον Wojciak (2012) στην έρευνα τους το μοντέλο $k - \epsilon$ και συγκεκριμένα το realizable $k - \epsilon$ μοντέλο προσδιορίζει τις συνολικές απώλειες πίεσης καθώς και την πλευρική εισροή στο πεδίου απόρρου με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα της μεθόδου RANS για τα δεδομένα της πειραματικής διάταξης. Επίσης, ο Kloek (2013) με την προσομοίωση που πραγματοποίησε με χρησιμοποιούμενη γεωμετρία το Ahmed model κατέληξε ότι τα πιο ακριβή αποτελέσματα παρουσιάστηκαν με την μέθοδο RANS σε συνδυασμό με το μοντέλο τύρβης $k - \omega$ SST εν αντιθέσει με το $k - \epsilon$ που παρουσίασε ανακρίβειες σε αρκετά σημεία.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η μέθοδος RANS παρότι παρουσιάζει σφάλματα είναι η συχνότερη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα ροής και παρουσιάζει συνοχή και σχετική ακρίβεια όσον αφορά τον προσδιορισμό των μέσων χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης ροής. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα τύρβης που την διέπουν όπως το $k-\omega$, SST και το $k-\epsilon$ στις περισσότερες έρευνες της βιβλιογραφίας φάνηκε να χαρακτηρίζουν ικανοποιητικά τα προβλήματα ροής στα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

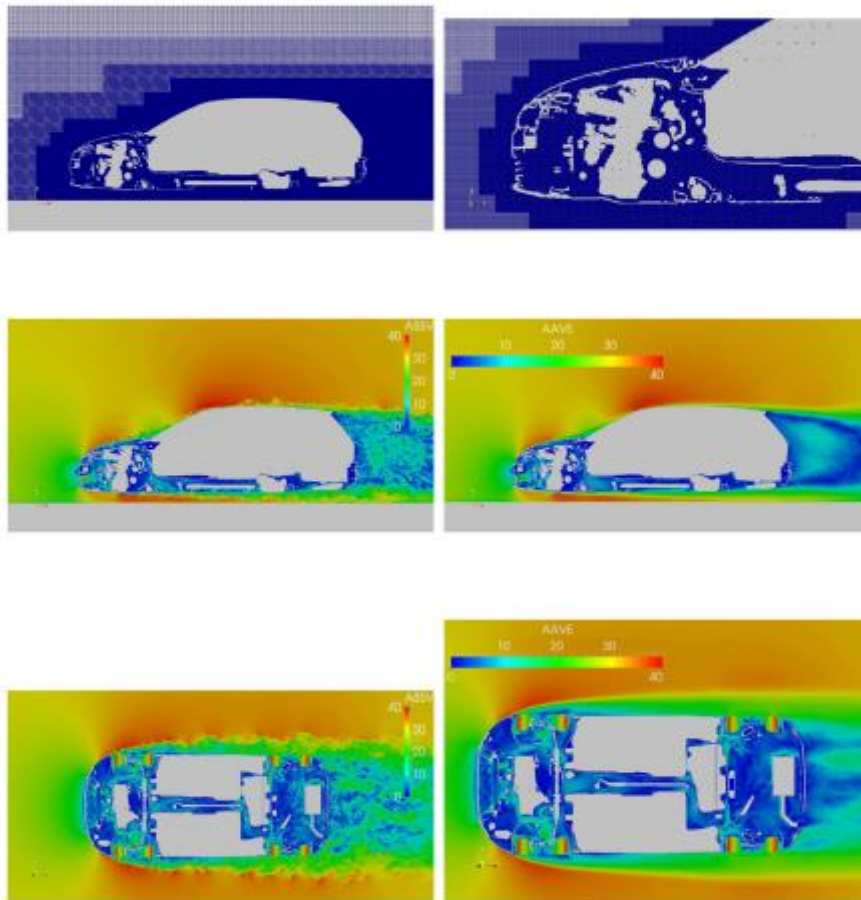
3.3.2 Προσομοίωση μεγάλων δινών (LES)

Η μέθοδος LES ουσιαστικά αφορά υπολογισμούς τύρβης βασιζόμενη στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς και ανάπτυξης των μεγαλύτερων δινών (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Περιλαμβάνει χωρικό φιλτράρισμα των μη μόνιμων εξισώσεων Navier – Stokes πριν τους υπολογισμούς, το οποίο διατηρεί τις μεγαλύτερες δίνες και απορρίπτει τις μικρότερες (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Οι εξισώσεις μη μόνιμης ροής πρέπει να επιλύονται, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη ανάγκη σε υπολογιστικούς πόρους και αποθηκευτικό χώρο, παρόλα αυτά όμως αποτελεί την πρώιμη τεχνική για την αντιμετώπιση προβλημάτων CFD πολύπλοκης γεωμετρίας με ευρεία εφαρμογή και στην σημερινή εποχή (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006).

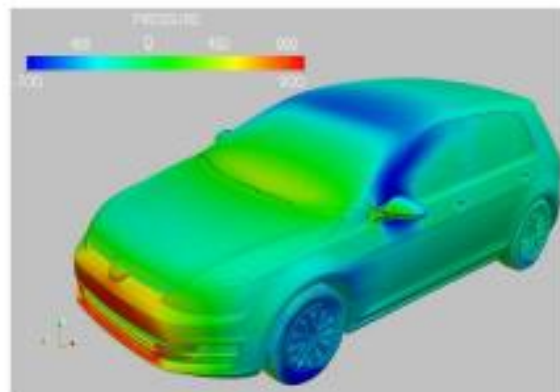
Οι Löhner, Othmer, Mrosek, Figueroa, and Degro (2021) διεξάγουν μία συνδυαστική πειραματική έρευνα με ολονύχτια προσομοίωση για την ανάδειξη της σημασίας της μεθόδου LES στην πρόβλεψη των εξωτερικών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός οχήματος Volkswagen Golf. Η επίλυση της προσομοίωσης πραγματοποιείται με την βοήθεια καρτεσιανών μπλοκ χρησιμοποιώντας χρονικά βήματα για την περιγραφή συμπιεστών ροών.



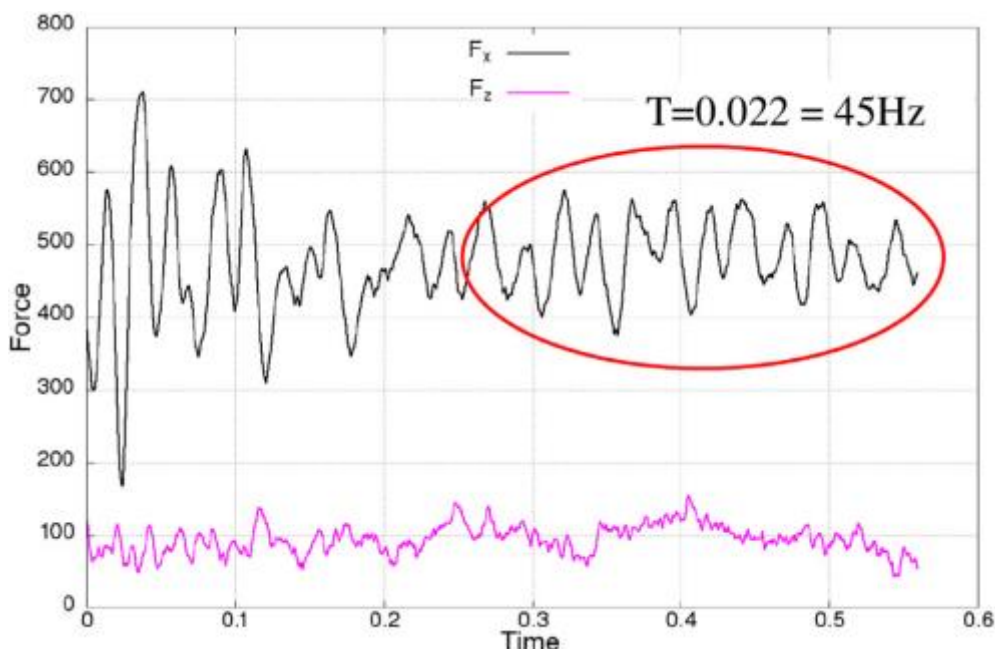
Σχήμα 3-53 Καρτεσιανά μπλοκ της μεθόδου LES για το μοντέλο Volkswagen Golf (Löhner et al., 2021)



Σχήμα 3-54 Πλέγμα και περιγράμματα στιγμιαίων και μέσων ταχυτήτων της μεθόδου LES (Löhner et al., 2021)



Σχήμα 3-55 Κατανομή πίεσης με τη μέθοδο LES του μοντέλου Volkswagen Golf (Löhner et al., 2021)



Σχήμα 3-56 Διακύμανση των τιμών της πίεσης στα επίπεδα x και z με την μέθοδο LES για το Volkswagen Golf (Löhner et al., 2021)

Συμπερασματικά, η μέθοδος LES είναι ικανή να προβλέψει ορθά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός οχήματος σε βιομηχανικές συνθήκες. Η μέθοδος LES αποτελείται και αυτή από μοντέλα τύρβης, όπως το μοντέλο SGS καθώς και παραλλαγές αυτού. Οι Aljure, Lehmkuhl, Rodríguez, and Oliva (2014) πραγματοποιούν μία σύγκριση σε 4 διαφορετικά μοντέλα που βασίζονται στο μοντέλο SGS. Εφαρμόζοντας τα μοντέλα αυτά σε εδραιωμένες πρότυπες γεωμετρίες όπως το Ahmed model και το Asmo παρατήρησαν καλή συσχέτιση με τις πειραματικές μετρήσεις παρά το όχι τόσο λεπτομερές πλέγμα που χρησιμοποίησαν. Παρότι η δομή των πλεγμάτων ήταν πιο τραχιά κατάφεραν να προσεγγίστουν ικανοποιητικά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Η ροή γύρω από τα οχήματα παρουσίασε 3 ασταθή τυρβώδη φαινόμενα, την εκροή δινών (vortex shedding), την επανασύνδεση και την επανακυκλοφορία της ροής, τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τους συντελεστές άντωσης

και οπισθέλκουσας επιδρώντας στην σταθερότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα του οχήματος (Aljume et al., 2014). Όλα τα μοντέλα LES προέβλεψαν ικανοποιητικά όλες τις δομές μεγάλων δινών γύρω και από τα 2 οχήματα με οποιοδήποτε τύπο πλέγματος.

Οι Tsai et al. (2009) αναφέρουν ότι το LES υπερέχει αρκετά ανάλογα και με την φύση του προβλήματος και είναι πιο φιλικό στον χρήστη από το $k - \epsilon$ μοντέλο επειδή το LES έχει λιγότερες απαιτήσεις όσον αφορά τον ορισμό των μεταβλητών στα δεδομένα της προσομοίωσης, αλλά αποτελεί μία πιο χρονοβόρα και δαπανηρή επιλογή. Θεωρείται μία μέθοδος που βρίσκεται ανάμεσα στις μεθόδους RANS και DNS όσον αφορά τις υπολογιστικές απαιτήσεις που προϋποθέτει. Στις αεροδυναμικές μελέτες συχνά συνδυάζεται το μοντέλο $k - \epsilon$ για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών και το μοντέλο τύρβης LES για τον υπολογισμό των αεροακουστικών χαρακτηριστικών ενός οχήματος (Tsai et al., 2009). Οι Franck, Nigro, Storti, and D'Elia (2009) χρησιμοποίησαν και αυτοί στην έρευνα τους την μέθοδο LES με αδόμητα πλέγματα και πεπερασμένα στοιχεία για να προσδιορίσουν την ασταθή ροή γύρω από γεωμετρίες οχημάτων. Οι απεικονίσεις της χρονοεξαρτώμενης ροής στο πεδίο του απόρρου ταιριάζουν ποιοτικά με τα αποτελέσματα της πειραματικής διάταξης και υπήρξε ακριβής πρόβλεψη των δινών, της αποκόλλησης και της ανακυκλοφορίας της ροής. Σε συνέχεια των παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η μέθοδος LES μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν τυρβώδες μοντέλο για πραγματικά οχήματα σε βιομηχανικό περιβάλλον (Franck et al., 2009). Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνουν εντατικές προσπάθειες ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα και οι ανακρίβειες της μεθόδου και καθώς αυξάνονται οι υπολογιστικοί πόροι και οι εφαρμογές της LES να κατανοηθούν περισσότερο τα πλεονεκτήματα της στη μοντελοποίηση της τύρβης (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006).

3.3.3 Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS)

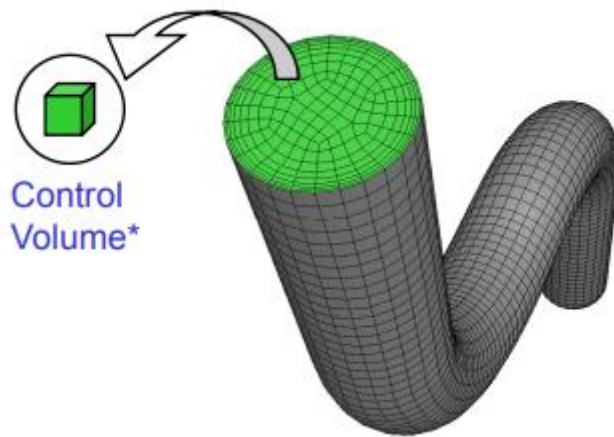
Η άμεση αριθμητική προσομοίωση αποτελεί προσομοίωση υπολογισμού της μέσης ροής και των διακυμάνσεων της τυρβώδους ταχύτητας (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Οι μη μόνιμες εξισώσεις Navier-Stokes λύνονται σε πυκνά χωρικά πλέγματα για να επιλύονται επίσης οι κλίμακες μήκους Kolmogorov στις οποίες πραγματοποιείται σκέδαση ενέργειας με χρονικά βήματα μικρά ώστε να επιλύεται η περίοδος των ταχύτερων διακυμάνσεων (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Παρόλα αυτά θεωρείται αρκετά δαπανηρή μέθοδος όσο αφορά τις υπολογιστικές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιείται για βιομηχανικούς υπολογισμούς ροής (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Στην μέθοδο DNS οι εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται άμεσα χωρίς την βοήθεια κανενός μοντέλου τύρβης και περιορίζεται σε εφαρμογές με μικρό αριθμό Reynolds (Nebenführ, 2010). Τα περισσότερα προβλήματα τυρβωδών ροών που απασχολούν τον κλάδο των μηχανικών, όπως και η αεροδυναμική μελέτη οχημάτων με την χρήση CFD, επιλύονται με τις μεθόδους RANS και LES και η μέθοδος DNS είναι αρκετά περιορισμένη σε ερευνητικές και ακαδημαϊκές εξατομικευμένες μελέτες ασυμπίεστων ροών (Nebenführ, 2010). Για το λόγο αυτό στις περισσότερες έρευνες αεροδυναμικής οχημάτων όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία επειδή οι τιμές αριθμού Reynolds είναι μεγάλες και λαμβάνουν χώρα περίπλοκα ροϊκά φαινόμενα, η μέθοδος DNS δεν συνίσταται να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη και την επίλυση του πεδίου ροής (Kloek, 2013). Σε τέτοιες μελέτες θα πρέπει να προτιμάται η μέθοδος RANS κατά κύριο λόγο και η LES έπειτα λόγω του αυξημένου υπολογιστικού κόστους της.

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε, για την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων μίας πλήρους μελέτης ενός πεδίου ροής θα πρέπει να πραγματοποιηθούν πειραματικές μετρήσεις σε αεροσήραγγα και στην συνέχεια υπολογιστικές προσομοιώσεις για τον έλεγχο ορθότητας του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μελέτη πεδίου ροής γύρω από ένα υπό κλίμακα μοντέλο το οποίο θα μελετηθεί και με τις δύο παραπάνω μεθόδους που αναφέρθηκαν. Αναφορικά με το πειραματικό σκέλος θα γίνουν μετρήσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του υπό κλίμακα οχήματος και για την προσομοίωση θα χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα τύρβης RANS και συγκεκριμένα το μοντέλο k- ω (SST) με την χρήση του προγράμματος ANSYS Fluent.

4.1 Μέθοδος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)

Ο κλάδος της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), όπως προαναφέρθηκε, αποσκοπεί στην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται κυρίως με φαινόμενα ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και μάζας καθώς και με συστήματα που πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις. Αυτό γίνεται μέσα από μία σειρά αριθμητικής επίλυσης διακριτοποιημένων μαθηματικών εξισώσεων, προερχόμενες από τις διέπουσες μερικές διαφορικές εξισώσεις της αρχής διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις επιδρώντες δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα (Gerhart, 2020). Το CFD και συγκεκριμένα το ANSYS CFD (Fluent) το οποίο χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Πιο συγκεκριμένα, το πεδίο μελέτης της εκάστοτε εξεταζόμενης γεωμετρίας είναι διακριτοποιημένο σε ένα πεπερασμένο σύνολο όγκων ελέγχου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



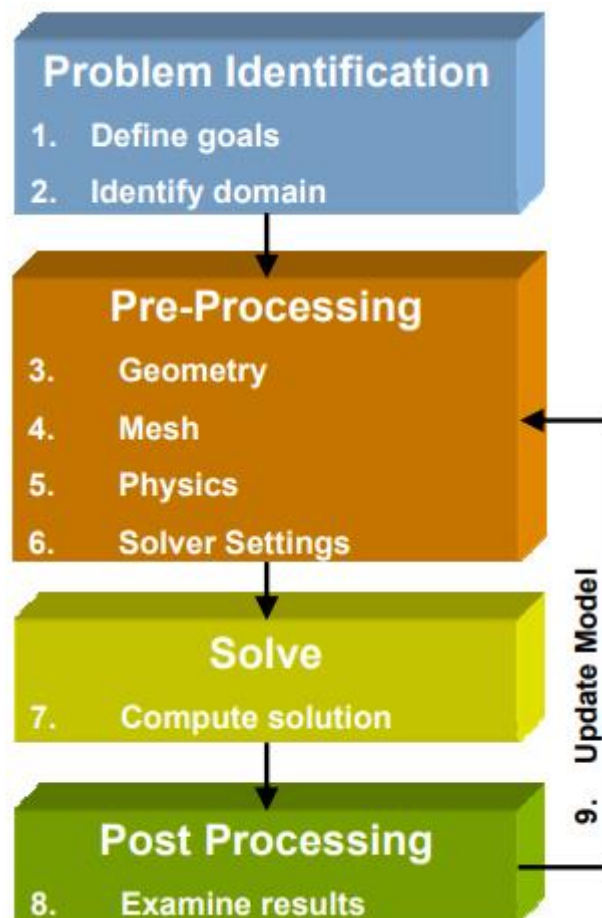
Σχήμα 4-1 Περιοχή ροής ρευστού σε σωλήνα διακριτοποιημένη σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου (ANSYS, 2010)

Οι κώδικες CFD βασίζονται σε αριθμητικούς αλγορίθμους που μπορούν να επιλύσουν προβλήματα ροής ρευστών (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Τα στάδια στα οποία διακρίνεται η μοντελοποίηση του CFD για την επίλυση του προς εξεταζόμενου προβλήματος είναι τέσσερα:

- Το 1^ο στάδιο αφορά την αποσαφήνιση του προβλήματος, όπως ποιο μέγεθος θα μελετηθεί (πίεση, ταχύτητα), η ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και ο χρόνος που θα χρειαστεί να παραχθούν αυτά τα αποτελέσματα. Επίσης, στο 1^ο στάδιο θα πρέπει να οριστεί το υπολογιστικό πεδίο μελέτης και οι περιορισμοί που μπορεί να υπάρχουν όπως οι οριακές συνθήκες του εξεταζόμενου πεδίου.
- Το 2^ο στάδιο είναι η προ-επεξεργασία και ουσιαστικά έχει να κάνει με τον ορισμό της εξεταζόμενης γεωμετρίας στο υπολογιστικό πεδίο, τη γένεση του πλέγματος (υποδιαίρεση του χώρου σε μικρά στοιχεία), τον ορισμό των φυσικών και χημικών φαινομένων που χρειάζεται να μοντελοποιηθούν καθώς και τις ιδιότητες του περιβάλλοντος ρευστού μαζί με τις οριακές συνθήκες (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006).
- Το 3^ο στάδιο είναι ο επιλυτής όπου πραγματοποιείται η αριθμητική επίλυση του προβλήματος ροής και συγκεκριμένα στην παρούσα διπλωματική εργασία όπως προαναφέρθηκε θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Στην μέθοδο πεπερασμένων όγκων πραγματοποιείται ολοκλήρωση των εξισώσεων της ροής ρευστού για το

σύνολο των όγκων ελέγχου και διακριτοποίηση των εξισώσεων αυτών ώστε στην συνέχεια να επιλυθούν με κάποια επαναληπτική μέθοδο (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006).

- Το 4^ο και τελευταίο στάδιο είναι η μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τον επιλυτή και τα προηγούμενα στάδια τα οποία παρουσιάζονται σε διάφορα γραφήματα και απεικονίσεις ώστε να αξιοποιηθούν από τους μελετητές.



Σχήμα 4-2 Μεθοδολογία προσέγγισης προβλημάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) (ANSYS, 2010)

4.2 Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes ουσιαστικά αποτελούν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν αναλυτικά κάθε αναπτυσσόμενη ροή ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά της (συμπίεστη - ασυμπίεστη, μόνιμη - μη μόνιμη κλπ). Όπως προαναφέρθηκε, οι εξισώσεις αυτές δεν είναι άλλες από την εξίσωση της συνέχειας (αρχή διατήρησης της μάζας), την εξίσωση αρχής διατήρησης της ορμής και την εξίσωση αρχής διατήρησης της ενέργειας. Παρακάτω περιγράφεται η γενική περίπτωση των εξισώσεων αυτών για συμπίεστη ροή με τριβή:

- **ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * \rho U = 0 \quad (4-1)$$

Η παραπάνω εξίσωση θεωρείται η μη μόνιμη τρισδιάστατη εξίσωση της συνέχειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενός συμπίεστου ρευστού, με τον πρώτο όρο να υποδηλώνει το ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας στον χρόνο και τον δεύτερο να περιγράφει την καθαρή ροή μάζας ανά μονάδα όγκου και ονομάζεται **όρος συναγωγής** (convective term).

- **ΕΞΙΣΩΣΗ ΑΡΧΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ**

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla * \rho U i U j = -\nabla p + \nabla * t_{ij} + \rho g \quad (4-2)$$

Όπου

$$t_{ij} = \nabla * [\mu(\nabla U + (\nabla U)T) - \lambda(\nabla * U)I] \quad (4-3)$$

και

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (4-4)$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση προκύπτει από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα και υποδηλώνει ότι η ορμή παραμένει σταθερή στο εκάστοτε εξεταζόμενο πεδίο ροής, καθώς και ότι η ορμή δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται εκ νέου, αλλά επηρεάζεται από τα αποτελέσματα των επιδρώντων δυνάμεων.

- **ΕΞΙΣΩΣΗ ΑΡΧΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η εξίσωση αρχής διατήρησης της ενέργειας ουσιαστικά αναφέρει ότι το άθροισμα όλων των ενεργειών (μηχανική, χημική κλπ) σε ένα σύστημα παραμένει σταθερό με την πάροδο του χρόνου.

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i u) = -p \text{div } u + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (4-5)$$

Όπου Φ είναι η συνάρτηση αντιστρεπτών απωλειών τριβής και ορίζεται ως:

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (4-6)$$

4.3 Μοντελοποίηση της τύρβης

Τα περισσότερα προβλήματα ροής στις σύγχρονες εφαρμογές σχετίζονται με φαινόμενα τυρβώδους ροής. Τα φαινόμενα τύρβης οδηγούν σε ασταθείς ροές, τυχαία μεταβαλλόμενες οι οποίες είναι δύσκολο να προβλεφθούν αφού με την πάροδο του χρόνου πραγματοποιούνται συνεχείς αλλαγές στην πίεση και στην ταχύτητα του ρευστού. Για το λόγο αυτό ο ακριβής υπολογισμός των παραμέτρων της δεν είναι εφικτός. Αυτός είναι και ο λόγος ύπαρξης των λεγόμενων μοντέλων τύρβης, τα οποία προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την τυρβώδη ροή. Η ύπαρξη πολλών μοντέλων τύρβης έχει να κάνει με το

γεγονός ότι δεν υπάρχει καταλληλότερο μοντέλο για την προσέγγιση όλων των τυρβωδών ροών, άλλα το πιο θα επιλεγθεί εξαρτάται από την εκάστοτε προσομοίωση. Τα μοντέλα αυτά όπως προαναφέρθηκαν και στην ενότητα 3.3 της διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- **REYNOLDS-AVERAGED NAVIER STOKES (RANS):** Το μοντέλο RANS είναι το πιο σύνηθες μοντέλο όσον αφορά την προσέγγιση προβλημάτων εφαρμοσμένης ρευστομηχανικής. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο αυτό μεταβάλλει τις αρχικές εξισώσεις Navier Stokes, ώστε να τις επιλύσει εκ νέου με μορφή μέσης τιμής ως προς το χρόνο με σκοπό το διαχωρισμό των χρονικά εξαρτώμενων διακυμάνσεων της ταχύτητας από τη μέση ταχύτητα ροής. Η μέθοδος RANS είναι σχετικά απλή και οικονομική, από άποψη πόρων, υπολογιστική διαδικασία και για αυτό το λόγο αποτελεί την βασικότερη μέθοδο επίλυσης προβλημάτων ροής. Τα συνηθέστερα μοντέλα της κατηγορίας RANS είναι το k-ε, k-ω καθώς και το μοντέλο τάσεων του Reynolds.
- **DIRECT NUMERICAL SIMULATION (DNS):** Με τη χρήση του μοντέλου DNS υπολογίζεται η μέση ροή και όλες οι διακυμάνσεις της τυρβώδους ταχύτητας. Παρότι όμως έχει τη δυνατότητα να επιλύσει όλες τις διακυμάνσεις της ροής, το πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά λεπτομερές (πυκνό) και τα χρονικά βήματα πολύ μικρά, επιλύοντας όλες τις κλίμακες μήκους Kolmogorov. Χρησιμοποιείται μόνο σε ερευνητικό επίπεδο για ροές χαμηλού αριθμού Reynolds, καθώς θεωρείται ιδιαίτερα ακριβό και απαιτητικό από πλευρά υπολογιστικών πόρων.
- **LARGE EDDY SIMULATION (LES):** Το μοντέλο LES, όσον αφορά τις απαιτήσεις του σε υπολογιστική ισχύ, αποτελεί ενδιάμεση λύση μεταξύ του DNS και του RANS (ANSYS, 2010). Η μέθοδος περιλαμβάνει χωρικό φιλτράρισμα των μη μόνιμων εξισώσεων Navier Stokes πριν τους υπολογισμούς και διατηρεί τις μεγαλύτερες δίνες απορρίπτοντας τις μικρότερες (H.K. Versteeg & Malalasekera, 2006). Το πλέγμα μπορεί να είναι πιο τραχύ και λιγότερο λεπτομερές καθώς και τα χρονικά βήματα μεγαλύτερα από το μοντέλο DNS. Είναι κατάλληλη για προβλήματα CFD σύνθετης γεωμετρίας (ANSYS, 2010).

- **DETACHED EDDY SIMULATION (DES):** Το μοντέλο DES θεωρείται παραλλαγή των μεθόδων RANS και LES με σκοπό την δημιουργία ενός μοντέλου που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο μοντέλων (Επίλυση μεγάλων δινών (LES) και επίλυση σε περιοχές κοντά σε σταθερές οριακές συνθήκες καθώς και μικρές κλίμακες (RANS)).

4.3.1 Εξισώσεις μοντέλου RANS

Όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για όλες τις προσομοιώσεις θα εφαρμοστεί το μοντέλο RANS με τη χρήση του λογισμικού **ANSYS Fluent**. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε ένα τυπικό μοντέλο RANS παρουσιάζονται παρακάτω:[από (Rumsey, 2023)]

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \hat{u}_j) = 0 \quad (4-7)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \hat{u}_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\hat{u}_j \bar{\rho} i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \hat{E}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\hat{u}_j \bar{\rho} \hat{H}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij} \hat{u}_j + \overline{\sigma_{ij} u_i''}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{q}_j + c_p \overline{\rho u_j'' T''}) - \hat{u}_i T_{ij} + \frac{1}{2} \overline{\rho u_i'' u_i'' u_j''} \quad (4-9)$$

Όπου

$$\hat{H} = \bar{E} + \bar{p}/\bar{\rho} \quad (4-10)$$

$$\bar{q}_j = -\overline{kT \partial T / \partial x_j} \approx -\frac{c_p \hat{\mu}}{Pr} \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_j} \quad (4-11)$$

Και ο τανυστής ιξώδους τάσης:

$$\bar{\sigma}_{ij} \approx 2\hat{\mu}(\hat{S}_{ij} - \frac{1}{3}\frac{\partial \hat{u}_k}{\partial x_k}\delta_{ij}) \quad (4-12)$$

Ουσιαστικά παρατηρώντας τις εξισώσεις RANS παρατηρούμε ότι είναι οι εξισώσεις Navier Stokes παραλλαγμένες.

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένα θα είναι το SST k- ω . Πρόκειται για ένα υβριδικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ομαλή μετάβαση από το πρότυπο μοντέλο k- ω , που εφαρμόζεται κοντά στα τοιχώματα της προσομοίωσης, σε μία εκδοχή του μοντέλου k- ϵ με μεγάλο αριθμό Reynolds στο εξωτερικό τμήμα του οριακού στρώματος. Το μοντέλο SST δίνει γενικά ακριβή πρόβλεψη της μετατόπισης και του μεγέθους του διαχωρισμού υπό δυσμενή κλίση πίεσης (ANSYS, 2010).

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

5.1 Orca

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί αεροδυναμική μελέτη στο πρότυπο μοντέλο Orca της Poseidon Team, η οποία αποτελεί ερευνητική ομάδα κατασκευής οχημάτων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η Orca αποτελεί ηλεκτροκίνητο όχημα που σχεδιάστηκε με σκοπό την εκπροσώπηση του ιδρύματος σε διαγωνισμούς και αγώνες, όπως η διοργάνωση Shell Eco Marathon. Ο σκοπός της διοργάνωσης αυτής είναι η μεγαλύτερη δυνατή διάνυση χιλιομέτρων ενός οχήματος με κατανάλωση 1kWh.

5.1.1 Ιστορικό

Η Orca είναι το 4^ο σε σειρά όχημα της ομάδας, το οποίο σχεδιάστηκε με το λογισμικό Catia της Dassault. Οι μελέτες και οι διαδικασίες για την κατασκευή του οχήματος διεξήχθησαν το διάστημα 2014-2015 και προς το 2016 πραγματοποιήθηκε η τελική συναρμολόγηση για την ολοκλήρωση του. Η 1^η συμμετοχή με το όχημα έγινε το 2016 σε διοργάνωση του Shell Eco Marathon στο Λονδίνο. Όσον αφορά τις διακρίσεις του, το 2017 στο Λονδίνο κατέκτησε την 9^η θέση κατάταξης επιτυγχάνοντας 412,2 km / kWh και κέρδισε το 1^ο βραβείο καινοτόμου σχεδιασμού. Αργότερα ξανά το 2017 έλαβε μέρος στον διαγωνισμό Shell Eco Marathon στην Τουρκία και κατέκτησε την 1^η θέση με αυτονομία 504,11 km / kWh που αποτελεί και την βέλτιστη επίδοση του οχήματος μέχρι σήμερα. Αναφορικά με το έτος 2018 η Orca κατάφερε να ξαναβγεί στην 1^η θέση στη διοργάνωση της Τουρκίας και στην 10^η θέση στη διοργάνωση της Αγγλίας αλλά με σημαντική αυτονομία 458,4 km / kWh. Τις επόμενες χρονιές λόγω της πανδημίας αλλά και αλλαγών και αναδιαμορφώσεων στην ομάδα δεν υπήρξε συμμετοχή σε διαγωνισμούς και αγώνες αλλά παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκαν έρευνες και αλλαγές για την βελτιστοποίηση του οχήματος.

5.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Όπως προαναφέρθηκε η Orca αποτελεί ένα μονοθέσιο ηλεκτροκίνητο όχημα το οποίο είναι σχεδιασμένο από ανθρακόνημα Monocoque και τροφοδοτείται από μπαταρίες. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται μπαταρίες ιόντων – λιθίου με ονομαστική τάση και χωρητικότητα στοιχείου (cell) στα 3,6V και 2900 mAh αντίστοιχα. Συνολικά αποτελείται από μπαταρίες μονόσελες με 13 στοιχεία (cells) σε σειρά ονομαστικής τάσης 46,8 V και χωρητικότητας 135,7 Wh και μία δίσελη μπαταρία με 26 στοιχεία (cells) ονομαστικής τάσης 46,8 V και χωρητικότητας 271,4 Wh (μονές μπαταρίες παράλληλα). Επίσης, οι μπαταρίες συνδέονται με σύστημα ελέγχου-διαχείρισης (BMS) συνεισφέροντας στην προστασία της μπαταρίας καθώς και στον σωστό διαμοιρασμό, έλεγχο και διαχείριση της αποθηκευμένης ενέργειας. Επιπρόσθετα, η Orca κινείται με την βοήθεια ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με τάση 48V και ισχύ 200W καθώς και έναν επεξεργαστή atmega 328p (Arduino). Αναφορικά με τις διαστάσεις, η Orca έχει μήκος 2.7m, πλάτος 0.65m και ύψος 0.6m καθώς και το βάρος της έχει βελτιστοποιηθεί πλέον στα 26kg. Τέλος, οι αεροδυναμικές θεωρητικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο όχημα από την ομάδα παρουσίασαν θεωρητικό συντελεστή οπισθέλκουσας Cd περίπου 0.11 και η οπισθέλκουσα δύναμη του οχήματος στα 30 km/h ανέρχεται κοντά στο 1 Newton. Με όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά το όχημα μπορεί να επιτύχει μέγιστη ταχύτητα κοντά στα 50km/h.



Σχήμα 5-1 Απεικόνιση του μοντέλου Orca σε πλάγια αριστερή όψη



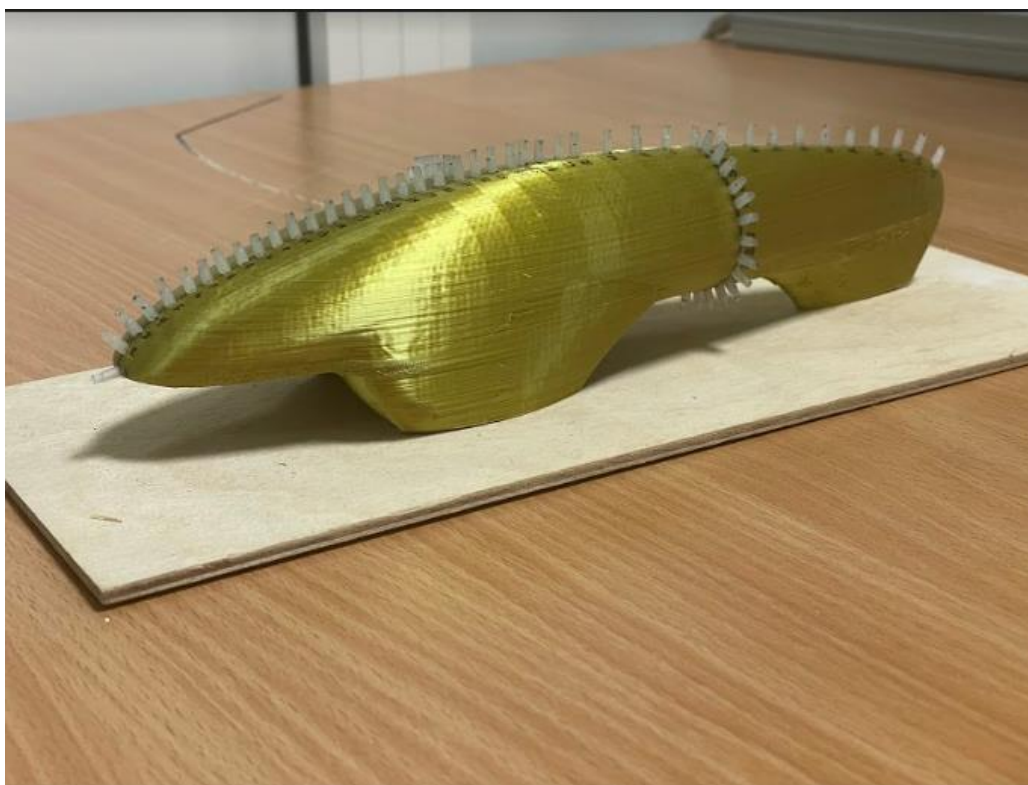
Σχήμα 5-2 Στιγμιότυπο της Orca σε κίνηση ("Ιστοσελίδα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής," 2018)



Σχήμα 5-3 Στιγμιότυπο της Orca κατά την διάρκεια της διοργάνωσης Shell Eco Marathon ("Ιστοσελίδα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής," 2018)

5.2 Γεωμετρία πειραματικής διαδικασίας

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για την αεροδυναμική μελέτη της Orca δεν χρησιμοποιήθηκε το ίδιο το όχημα της Poseidon Team, αλλά ένα υπό κλίμακα μοντέλο βασισμένο στην γεωμετρία του. Πιο συγκεκριμένα, το πειραματικό μοντέλο βρίσκεται σε κλίμακα **(1:10)** σε σχέση με την Orca και στο 1^ο στάδιο του πειράματος κατασκευάστηκε με την μέθοδο 3D printing. Κατά μήκος της επιφάνειας του μοντέλου υπάρχουν 70 διάτρητες οπές πίεσης (Pressure taps) ανά 0,5 cm κατά μήκος της ράχης καθώς και περιμετρικά, που στην συνέχεια θα εξηγηθεί ο σκοπός τους για το πείραμα.



Σχήμα 5-4 Απεικόνιση του 3D printing μοντέλου Orca σε κλίμακα 1/10

5.2.1 Υπό κλίμακα μοντέλο αεροσήραγγας

Ουσιαστικά το παραπάνω 3D printed μοντέλο κατασκευάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την δημιουργία ενός μοντέλου από πολυουρεθανική ρητίνη, υλικό που είναι ιδανικό για την δημιουργία γεωμετρίας έπειτα από χύτευση σε καλούπι. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν όλα τα βήματα και οι διαδικασίες που εφαρμόστηκαν για την δημιουργία του καλουπιού και του τελικού υπό κλίμακα μοντέλου από ρητίνη.

1^ο Βήμα: Σε πρώτο στάδιο το 3D printed μοντέλο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό ενός ξύλινου ορθογωνίου καλουπιού το οποίο είναι κατάλληλο για να προσδώσει σχηματισμό σε κάποιο ρευστό υλικό. Έπειτα από ορθή στεγανοποίηση της ξύλινης κατασκευής, πραγματοποιήθηκε έγχυση σιλικόνης. Το νέο καλούπι σιλικόνης ήταν έτοιμο μετά την πάροδο 6 ωρών.



Σχήμα 5-5 3D printed μοντέλο εντός ξύλινου καλουπιού



Σχήμα 5-6 Χύτευση σιλικόνης



Σχήμα 5-7 Ολοκλήρωση χύτευσης



Σχήμα 5-8 Άνοιγμα καλούπιού σιλικόνης

2^ο Βήμα: Στην συνέχεια όπως φαίνεται και στο καλούπι σιλικόνης παραπάνω, σχηματίστηκε η γεωμετρία του 3D printed μοντέλου μαζί με κάποιες οπές. Στις οπές αυτές θα συνδεθούν σωληνάκια τα οποία χρησιμεύουν στην μέτρηση της πίεσης στην επιφάνεια του μοντέλου που θα παρουσιαστεί στο τέλος της περιγραφής του πειράματος.



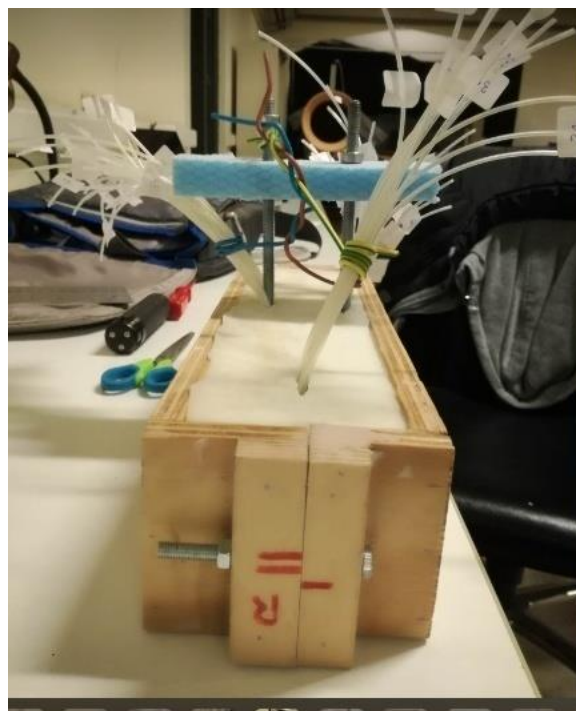
Σχήμα 5-9 Τοποθέτηση σωλήνων στις οπές του καλούπιού

Μετά την τοποθέτηση των σωλήνων στις οπές το καλούπι ξανακλείνει για να ξεκινήσει η έγχυση της ρητίνης.

3^ο Βήμα: Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε η χύτευση της πολυουρεθανικής ρητίνης, έπειτα από την κατάλληλη στεγανοποίηση και προετοιμασία του καλούπιού. Η διαδικασία της χύτευσης θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή και σε διάστημα 7-10 λεπτών, καθώς με την εξώθερμη αντίδραση που πραγματοποιείται από την ρητίνη όταν έρθει σε επαφή με συνθήκες αέρα περιβάλλοντος, το ίδιο το ρευστό ξεκινά να θερμαίνεται αρκετά και έπειτα από το παραπάνω χρονικό διάστημα πήζει και είναι αδύνατον να χυτευτεί.



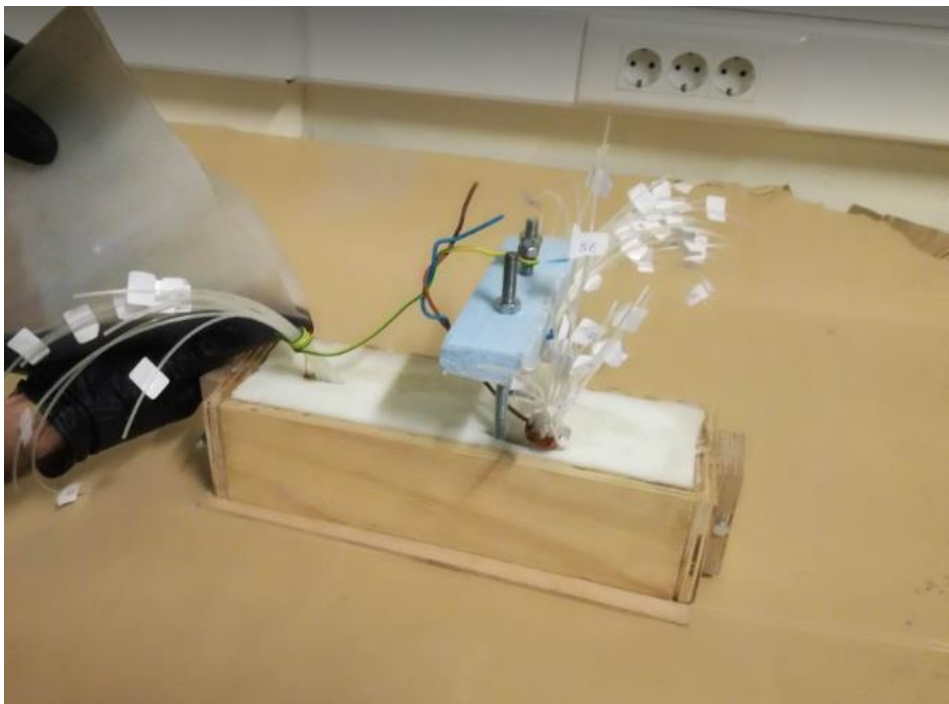
Σχήμα 5-10 Κατάλληλη διάνοιξη των 3 οπών για απλοποίηση της διαδικασίας χύτευσης



Σχήμα 5-11 Διαφορετική όψη της κατασκευής



Σχήμα 5-12 Χρησιμοποιούμενη ρητίνη



Σχήμα 5-13 Χύτευση πολυουρεθανικής ρητίνης

4^ο Βήμα: Στο 4^ο και τελευταίο στάδιο κατασκευής του μοντέλου, το σχηματισμένο υπό κλίμακα μοντέλο από ρητίνη, προερχόμενο από το καλούπι σιλικόνης, είναι έτοιμο κατασκευαστικά για να μελετηθεί στην αεροσήραγγα. Παρόλα αυτά για την καλύτερη προσέγγιση της μελέτης και κατ' επέκταση τα ορθότερα αποτελέσματα που θα ληφθούν από αυτήν, το υπό κλίμακα μοντέλο τοποθετήθηκε σε μία ξύλινη κατεργασμένη πλάκα η οποία θα βρίσκεται στο ύψος της αεροσήραγγας, ώστε η επιφάνεια να είναι κατάλληλη για το πέρασμα της ροής. Περισσότερες πληροφορίες για την τοποθέτηση του μοντέλου στην αεροσήραγγα θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5-14 Απεικόνιση του τελικού μοντέλου ρητίνης (δεξιά) και του αρχικού 3D printed μοντέλου (αριστερά), εδρασμένα στην κατεργασμένη πλάκα



Σχήμα 5-15 Διαφορετική όψη έδρασης του μοντέλου ρητίνης στην κατεργασμένη πλάκα



Σχήμα 5-16 Διαφορετική όψη έδρασης του μοντέλου ρητίνης στην κατεργασμένη πλάκα



Σχήμα 5-17 Διαφορετική όψη έδρασης του μοντέλου ρητίνης στην κατεργασμένη πλάκα

Στο σημείο αυτό, με αφορμή την παραπάνω εικόνα, πρέπει να διευκρινιστεί ότι στην πλάκα που εδράζεται το υπό κλίμακα μοντέλο ρητίνης έγινε διάτρηση τριών οπών για να μπορούν να εισχωρήσουν οι σωληνίσκοι μέτρησης πίεσης.

6 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

6.1 Πειραματική προσέγγιση

Το υπό κλίμακα μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατασκευάστηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σε πειραματική διάταξη αεροσήραγγας για τον προσδιορισμό του συντελεστή πίεσης C_p . Όπως προαναφέρθηκε στο υπό κλίμακα μοντέλο δημιουργήθηκαν 70 διάτρητες οπές (Pressure Taps) οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της πίεσης σε κομβικά σημεία που βρίσκονται στην επιφάνεια της γεωμετρίας του μοντέλου. Ειδικότερα, οι οπές αυτές συνδέθηκαν με σωληνίσκους οι οποίοι με την σειρά τους συνδέονται σε μανόμετρα (που θα περιγραφούν παρακάτω) για την καταγραφή πιέσεων. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή C_p , που είναι και ο κύριος στόχος του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ο γνωστός τύπος:

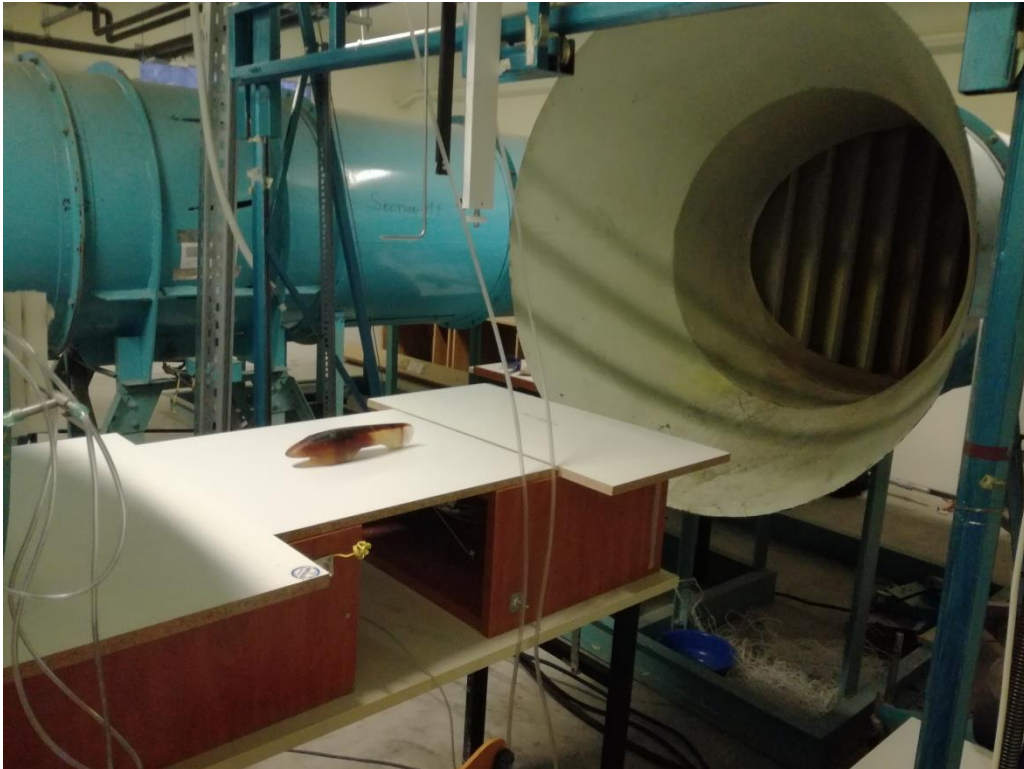
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (6-1)$$

Όπου p η τοπική στατική πίεση οχήματος σε κάθε οπή, p_∞ η στατική πίεση της ροής στο σωλήνα Pitot, $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ η δυναμική πίεση ροής.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα συστήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση του πειράματος.

6.1.1 Εξοπλισμός πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής και Ρευστοθερμικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις λήφθηκαν σε αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος Prandtl, η οποία είναι μία αεροσήραγγα τύπου Göttingen, ανοιχτού θαλάμου δοκιμών.



Σχήμα 6-1 Απεικόνιση του μοντέλου στην αεροσήραγγα τύπου Göttingen με ανοιχτό θάλαμο δοκιμών



Σχήμα 6-2 Απεικόνιση του μοντέλου στην αεροσήραγγα τύπου Göttingen με ανοιχτό θάλαμο δοκιμών (Σύνδεση σωληνίσκων μέσω οπών)

Οι σωληνίσκοι που προαναφέρθηκαν συνδέονται με το μικρομανόμετρο FCO 560 το οποίο ουσιαστικά υπολογίζει την διαφορά μεταξύ της πίεσης σε κάθε οπή που έχει διανοιχτεί στο υπό κλίμακα μοντέλο και της στατικής πίεσης στον σωλήνα Pitot. Χρησιμοποιήθηκε ουσιαστικά για την λήψη των πειραματικών μετρήσεων κατανομής πίεσης και ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας του είναι 10Hz με δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού αισθητήρα. Η δυναμική πίεση παραμένει σταθερή και εξαρτάται από την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής που είναι σταθερή στα 6.9 m/s και μετρήθηκε από το μανόμετρο Dwyer. Η θερμοκρασία του αέρα κατά την διάρκεια του πειράματος ήταν στους 21,7 ° C.



Σχήμα 6-3 Μικρομανόμετρο FCO 560



Σχήμα 6-4 Μικρομανόμετρο Dwyer

6.2 Υπολογιστική προσέγγιση CFD (case 1)

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί όλη η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων έπειτα από μελέτη του πεδίου ροής γύρω από το μοντέλο Orca σε περιβάλλον CFD. Πιο συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε η όλη διαδικασία έγινε με κατάλληλη μοντελοποίηση της τύρβης με τη μέθοδο RANS και ειδικότερα με το SST k- ω μοντέλο, το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του k- ω εσωτερικά του οριακού στρώματος και σταδιακά εναλλάσσεται σε k- ϵ διατύπωση για το εξωτερικό μέρος του οριακού στρώματος ώστε να είναι ανεξάρτητο από την επίδραση της ελεύθερης ροής που παρουσιάζεται στο μοντέλο k- ω . Τα στάδια ανάλυσης ενός προβλήματος CFD που ακολουθήθηκαν και στην προκειμένη περίπτωση αυτής της διπλωματικής είναι αρχικά ο ορισμός του υπολογιστικού χωρίου, που περιλαμβάνει την ενσωμάτωση της γεωμετρίας σε περιβάλλον CFD, τη δημιουργία πλέγματος και τον ορισμό οριακών και αρχικών συνθηκών, καθώς και η παρουσίαση αποτελεσμάτων. Στο παρών CFD ο βασικότερος σκοπός είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή C_p για τον έλεγχο ορθότητας της πειραματικής διαδικασίας.

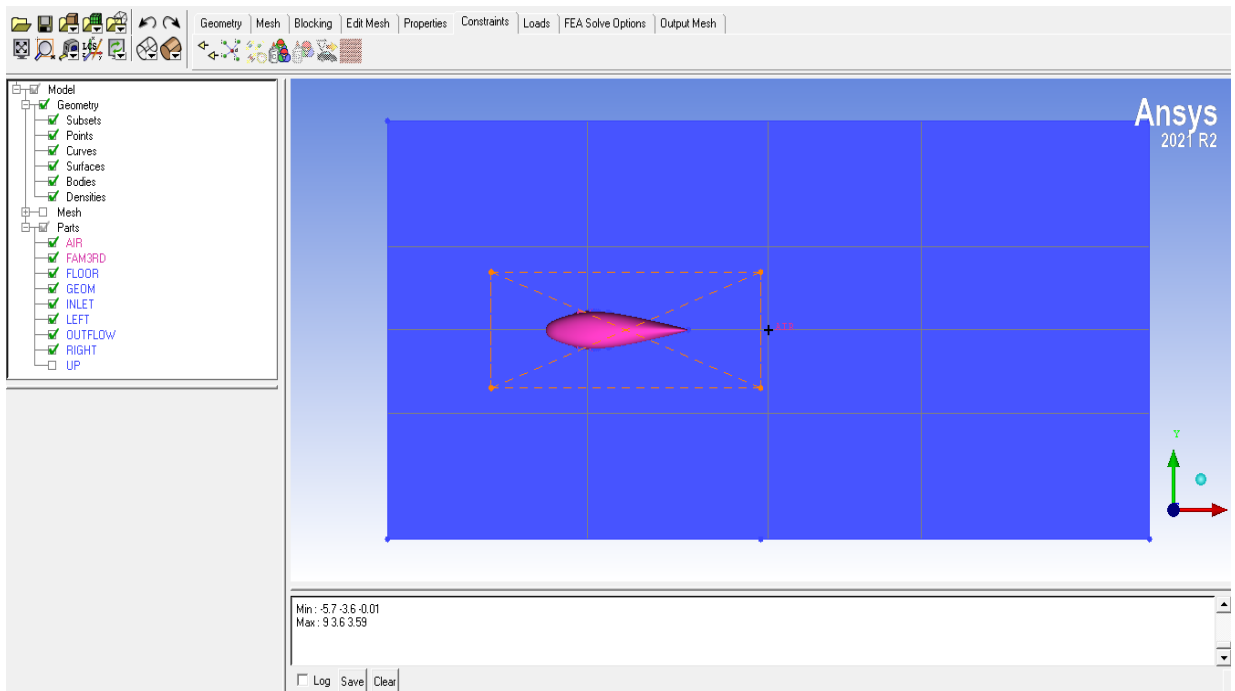
6.2.1 Ορισμός πεδίου ροής και υπολογιστικού χωρίου

Το πεδίο ροής (flow domain) μοιάζει με τον όγκο ελέγχου (control volume) στο γεγονός ότι και στις 2 περιπτώσεις ορίζεται ένας συγκεκριμένος χώρος μελέτης σε ένα πρόβλημα ρευστομηχανικής. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι στην περίπτωση του όγκου ελέγχου η λύση είναι ολοκληρωματική και δεν χρειάζεται να γίνει λεπτομερής ανάλυση για το τι ακριβώς συμβαίνει στο εσωτερικό του. Η προσέγγιση δηλαδή, είναι μακροσκοπική και υπολογίζονται μεγέθη όπως η καθαρή δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα εντός του όγκου ελέγχου (Yunus A. Cengel & Cimbala, 2014). Από την άλλη το πεδίο ροής, που χρησιμοποιείται και στην παρούσα διπλωματική, είναι πάλι ορισμένος όγκος με την διαφορά ότι χρησιμοποιούνται διαφορικές εξισώσεις για την λεπτομερή επίλυση όλων των χαρακτηριστικών της ροής που περιλαμβάνονται στο όγκο. Το υπολογιστικό χωρίο (computational domain) είναι ένα μέρος του χώρου στο οποίο υπολογίζεται η λύση της προσομοίωσης CFD, περιέχει και εξαρτάται σε

μέγεθος από την εξεταζόμενη γεωμετρία και θα πρέπει να διακριτοποιηθεί σε ένα υπολογιστικό πλέγμα για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων των ρών ρευστών. Για την δημιουργία του υπολογιστικού χωρίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα **ANSYS ICEM CFD**.

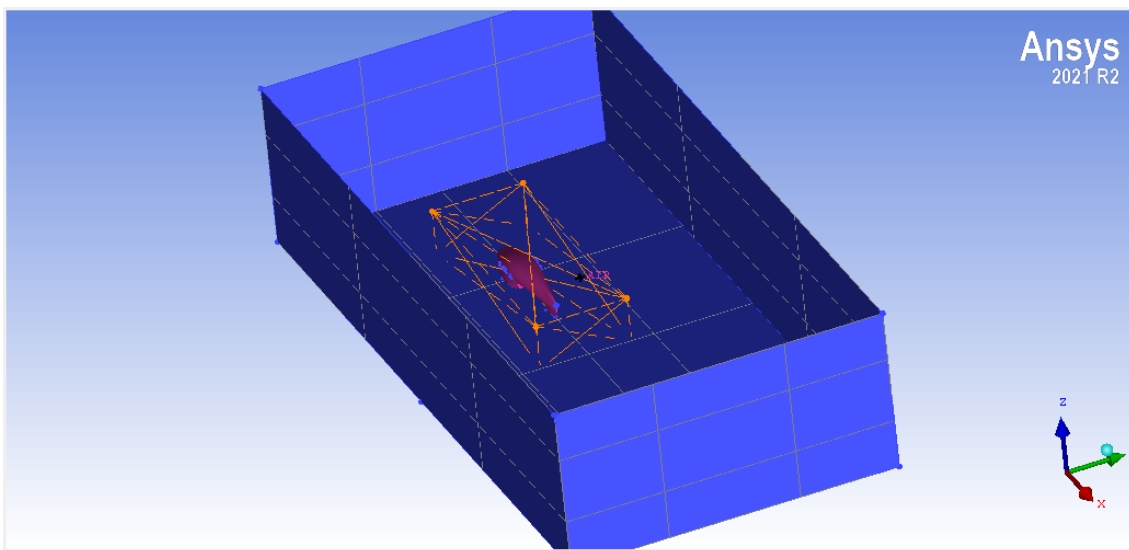
Σε πρώτο στάδιο εισήχθη η γεωμετρία στο πρόγραμμα σε μορφή STL. Έπειτα από την ορθή εισαγωγή της εξεταζόμενης γεωμετρίας θα πρέπει να δημιουργηθεί ο χώρος (Enclosure) μέσα στον οποίο θα περιέχεται η γεωμετρία και θα υπολογιστούν όλες οι ζητούμενες παράμετροι. Η γεωμετρία θα πρέπει να τοποθετηθεί σε τέτοιο σημείο στο υπολογιστικό χωρίο ώστε να ισχύουν τα εξής: (Οι αποστάσεις που ακολουθούν είναι σχετικές ως προς το σημείο αναφοράς (0,0,0) που στην προκειμένη περίπτωση είναι το πίσω “πόδι” της Orca.)

- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την μπροστινή πλευρά του χωρίου ισούται με 5 φορές το ύψος της γεωμετρίας (5H)**
- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την δεξιά και αριστερή πλευρά του χωρίου ισούται με 5 φορές το ύψος της γεωμετρίας (5H)**
- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την άνω πλευρά του χωρίου ισούται με 5 φορές το ύψος της γεωμετρίας (5H)**
- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την πίσω πλευρά του χωρίου ισούται με 15 φορές το ύψος της γεωμετρίας (15H)**

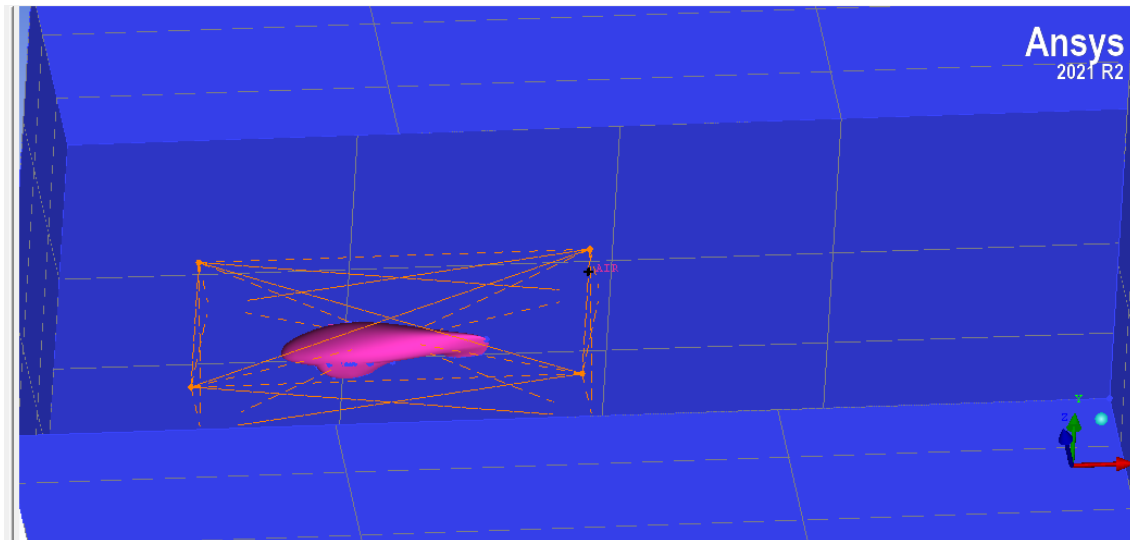


Σχήμα 6-5 Κάτοψη του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD

Στα αριστερά υπάρχει το “δέντρο” εντολών στο οποίο ορίζονται όλα τα παρελκόμενα και μέρη από τα οποία αποτελείται το προς μελέτη υπολογιστικό χωρίο, όπως όλες οι πλευρές, τα σημεία, οι επιφάνειες, οι καμπύλες και οι όγκοι που περιλαμβάνονται στο χωρίο συμπεριλαμβανομένου του εξεταζόμενου μοντέλου, καθώς και το ρευστό που παρεμβάλλεται στο χώρο μελέτης, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο αέρας.



Σχήμα 6-6 Απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD

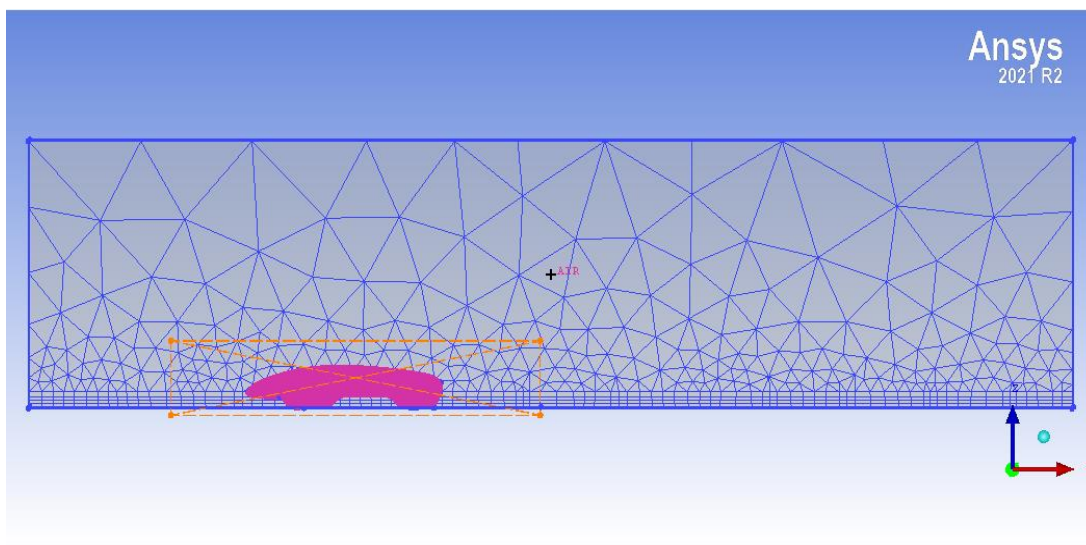


Σχήμα 6-7 Διαφορετική απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD

6.2.2 Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος

Όπως προαναφέρθηκε για την λύση της προσομοίωσης CFD το υπολογιστικό χωρίο που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα θα πρέπει να διακριτοποιηθεί σε ένα υπολογιστικό πλέγμα για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων των ροών ρευστών. Με την διακριτοποίηση αυτή, ουσιαστικά το χωρίο διασπάται σε μικρότερα τμήματα - στοιχεία ώστε να λυθεί με αριθμητική προσέγγιση. Η δημιουργία και η ποιότητα του πλέγματος είναι ένα πολύ σημαντικό στάδιο για την προετοιμασία της προσομοίωσης CFD και ανάλογα με την φυσική και τη γεωμετρία που μελετάται το πλέγμα που θα παραχθεί μπορεί να ναι αδόμητο (unstructured) ή δομημένο (structured)

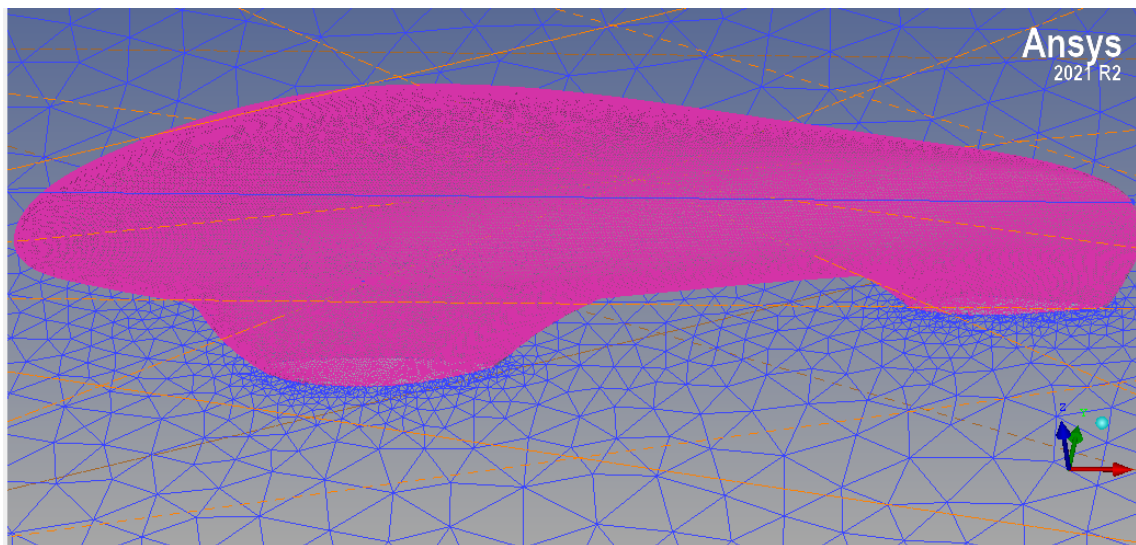
επηρεάζοντας την ευελιξία, την ακρίβεια και την αποδοτικότητα της λύσης (Thompson, Soni, & Weatherill, 1998). Στην παρούσα προσομοίωση CFD χρησιμοποιήθηκε αδόμητο πλέγμα καθώς είναι καλύτερο για πολύπλοκες γεωμετρίες όπως η Oca που απαρτίζεται από οπές και απότομες καμπύλες επιφάνειες, καθώς επίσης εφαρμόζει προσαρμοστικές τεχνικές βελτίωσης πλέγματος, οι οποίες επιτρέπουν τοπικές προσαρμογές του μεγέθους και του σχήματος των στοιχείων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της λύσης ή τις εκτιμήσεις σφάλματος. Η δημιουργία του πλέγματος πραγματοποιήθηκε στο **ANSYS ICEM CFD**. Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από τετράεδρα, εξάεδρα, πρισματικά και τριγωνικά στοιχεία.



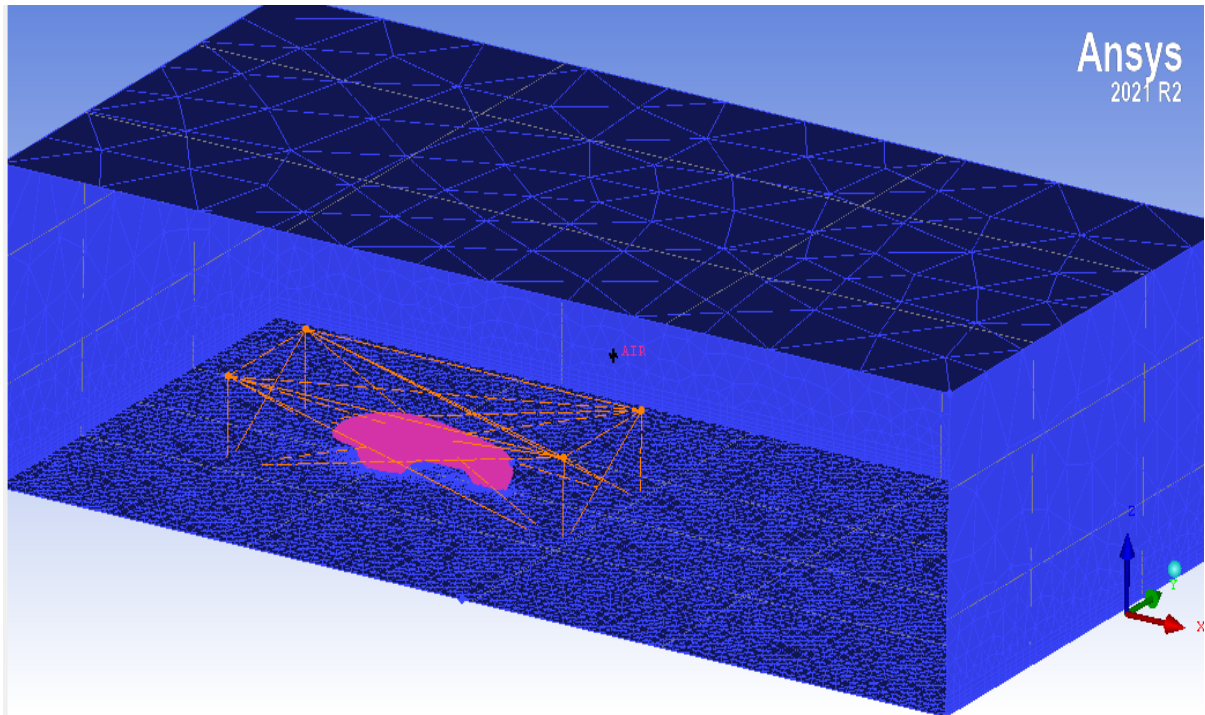
Σχήμα 6-8 Απεικόνιση υπολογιστικού πλέγματος σε 2D

Όπως παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα το πλέγμα όσο πλησιάζει προς το τμήμα σύνδεσης της Oca με την κάτω επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου πυκνώνει και γίνεται περισσότερο λεπτομερές για την καλύτερη αποσαφήνιση και περιγραφή των σημαντικών τυρβωδών φαινομένων και διαταραχών που συμβαίνουν λόγω της αλληλεπίδρασης της ροής με την πολύπλοκη, σε αυτά τα σημεία, γεωμετρία. Ουσιαστικά, πρόκειται για πρισματικά επίπεδα (layers) τα οποία συμβάλλουν στην αποφυγή αριθμητικής διάχυσης καθώς και για την δημιουργία ποιοτικότερου πλέγματος το οποίο εκφράζει με περισσότερη ακρίβεια τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε κρίσιμα σημεία της γεωμετρίας. Το πλέγμα γίνεται επίσης αρκετά πυκνό στα 3 τμήματα που εδράζονται οι τροχοί

της Orca καθώς εκεί πάλι δημιουργούνται έντονα φαινόμενα τύρβης. Αντιθέτως, μακριά από την Orca στην αδιατάρακτη ροή παρατηρείται λιγότερο πυκνό πλέγμα, αφού είναι περιοχή μικρότερου ενδιαφέροντος χωρίς σημαντικές μεταβολές και φαινόμενα. Τα συνολικά κελιά του πλέγματος ανέρχονται στα 1.715.251 και οι κόμβοι στους 524.607.



Σχήμα 6-9 Απεικόνιση υπολογιστικού πλέγματος στα τμήματα έδρασης της Orca

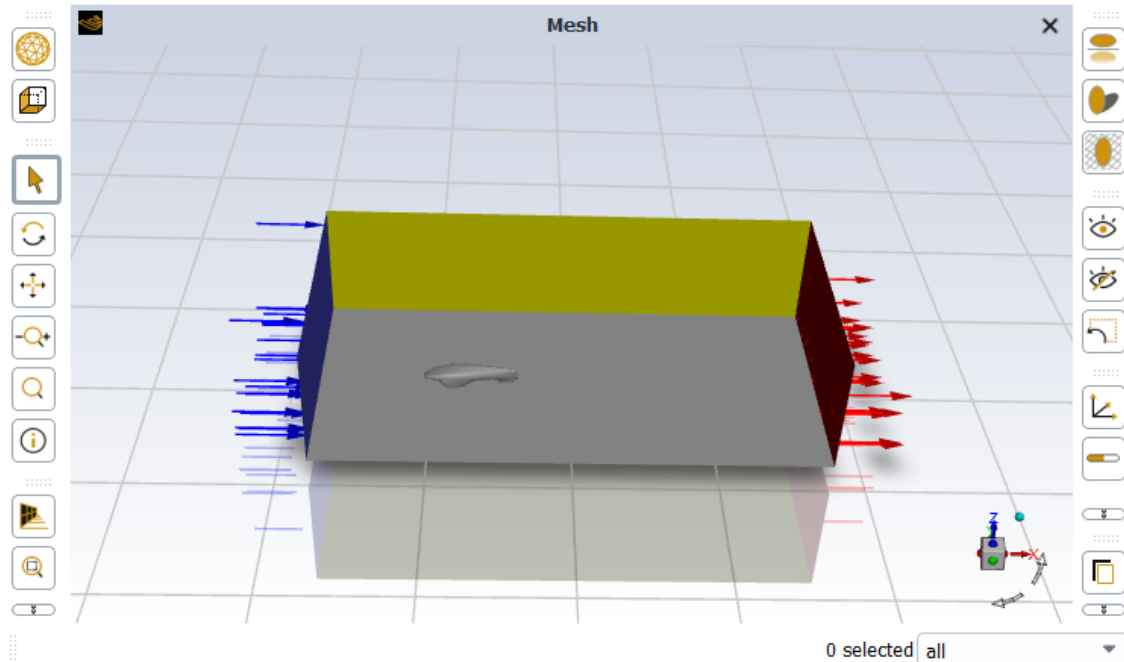


Σχήμα 6-10 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος

6.2.3 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες (Προ-επεξεργασία προσομοίωσης)

Ένας σημαντικός παράγοντας που πάντα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την ορθή επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι ο σωστός προσδιορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, είναι το στάδιο στο οποίο ο μελετητής θα πρέπει να αποδώσει τιμές και να ορίσει όλες τις μεταβλητές που σχετίζονται με την είσοδο την έξοδο και τα όρια του υπολογιστικού χωρίου, καθώς και τις ροϊκές συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια της εξεταζόμενης γεωμετρίας. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό **ANSYS FLUENT** και όλες οι αρχικές και οριακές συνθήκες ορίστηκαν σε αυτό. Με λίγα λόγια ουσιαστικά στην συγκεκριμένη ενότητα θα περιγραφούν τα στάδια προετοιμασίας του προγράμματος ώστε ο επιλυτής να παράξει σωστά αποτελέσματα. Παρακάτω

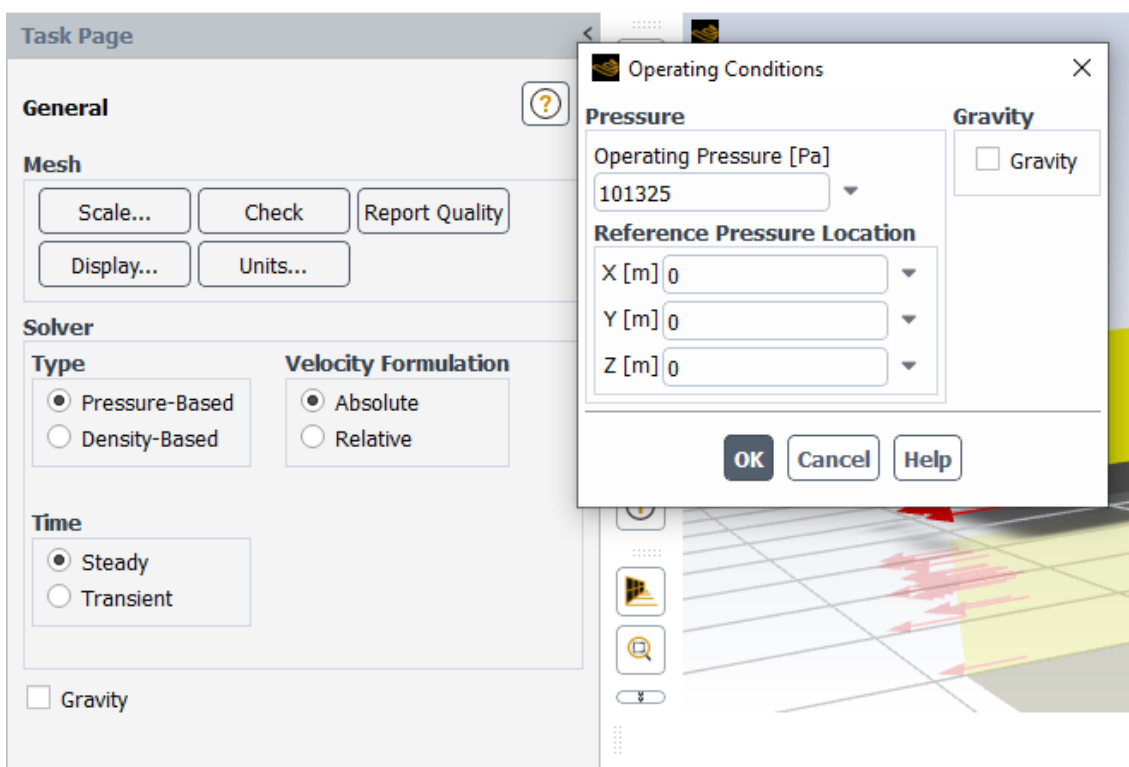
παρουσιάζεται το περιβάλλον του προγράμματος Fluent με ενσωματωμένο το υπό μελέτη υπολογιστικό χωρίο.



Σχήμα 6-11 Υπολογιστικό χωρίο σε περιβάλλον FLUENT

Ουσιαστικά, η Οτσα μετακινείται και έρχεται σε επαφή με το ενδιάμεσο ρευστό του υπολογιστικού χωρίου που είναι ο αέρας. Το αυτοκίνητο στην παρούσα περίπτωση θεωρούμε ότι κινείται με ταχύτητα **30 m/s**, αλλά πρακτικά στην προσομοίωση το όχημα θα είναι ακίνητο και όλα τα υπόλοιπα μέρη του υπολογιστικού χωρίου θα μετακινούνται σε σχέση με αυτό. Η ροή έχει κατεύθυνση από τα μπλε βέλη και καταλήγει στα κόκκινα βέλη (Σχήμα 6-11). Περιμετρικά του μοντέλου υπάρχουν οι επιφάνειες του υπολογιστικού χωρίου οι οποίες παριστάνουν τα τοιχώματα μίας αεροσήραγγας και θα οριστούν ως **τοιχώματα με ολίσθηση (slip walls)** καθώς η επίδραση των **διατμητικών τάσεων (shear stress)** θεωρείται αμελητέα. Ειδικότερα, η άνω, η δεξιά και η αριστερή επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου θα θεωρηθούν ότι έχουν συνθήκη **συμμετρίας (Symmetry)**, δηλαδή η μεταβολή των συνιστωσών της **ταχύτητας (U)**, της **πίεσης (P)**, της **τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k)** και

του ειδικού ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω) θα είναι 0. Το έδαφος (κάτω επιφάνεια υπολογιστικού χωρίου) όπως προαναφέρθηκε θα κινείται με **σχετική ταχύτητα 30m/s** σε σχέση με το όχημα και για το λόγο αυτό θα οριστεί σαν **κινούμενο τοίχωμα (moving wall)**. Στην προσομοίωση αυτή θα χρησιμοποιηθεί η ψευδο-μεταβατική διατύπωση του συζευγμένου επιλυτή με βάση την πίεση (**Pseudo-transient formulation of pressure based coupled solver**). Ως πίεση λειτουργίας θα χρησιμοποιηθεί η ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 6-12 Λειτουργικές συνθήκες προσομοίωσης

Στην συνέχεια θα πρέπει να οριστούν οι αρχικές τιμές αναφοράς οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν και εξαρτώνται κάθε φορά από την φύση του προβλήματος της προσομοίωσης. Είναι το στάδιο στο οποίο θα πρέπει να δηλωθεί και η επιφάνεια στην οποία θα προσκρούει η ροή στην Orca και θα πρέπει να οριστεί

ότι όλοι οι υπολογισμοί θα βασιστούν στις συνθήκες που επικρατούν στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου (**Inlet**).

Task Page

Reference Values

Compute from
inlet

Reference Values

Area [m ²]	0.3744591
Density [kg/m ³]	1.225
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	2.7
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	30
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

Reference Zone
air

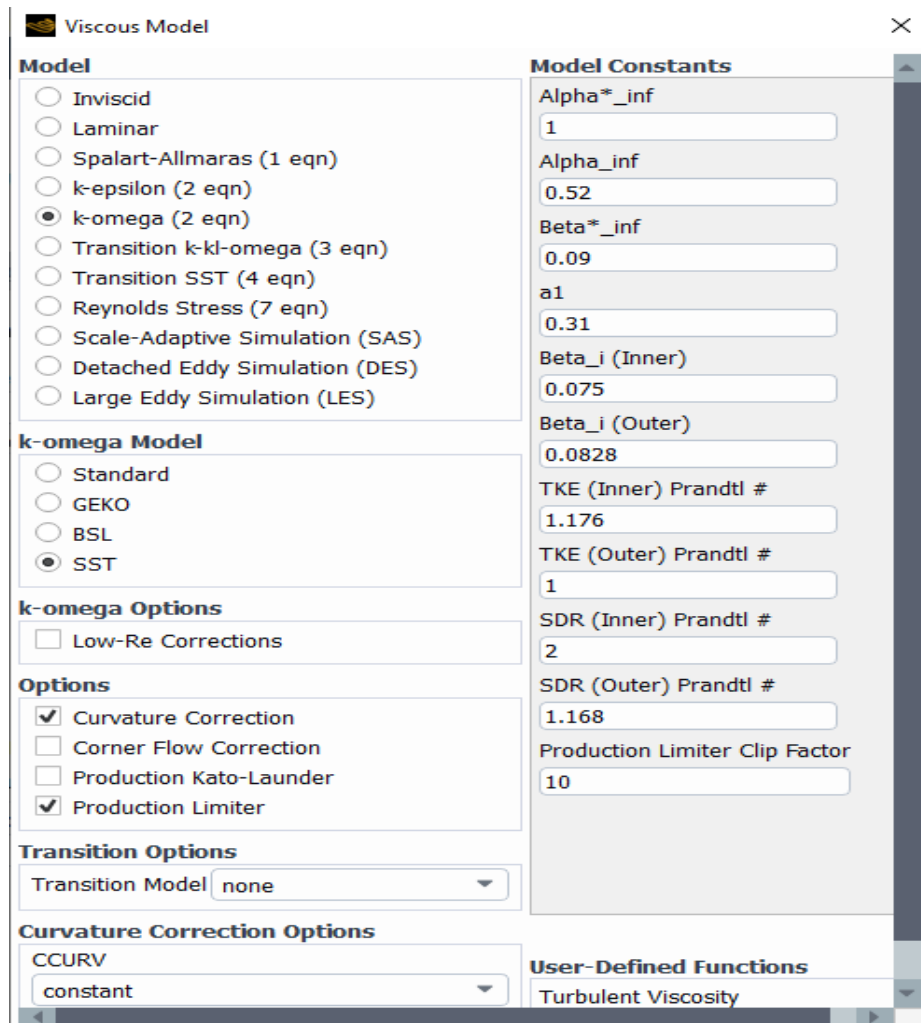
Σχήμα 6-13 Τιμές αναφοράς μεγεθών προσομοίωσης

Για να επιλεγθεί το σωστό μοντέλο τύρβης πρώτα υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds που επικρατεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα ροής ως εξής:

$$Re = \frac{\rho * U * L}{\mu} \quad (6-2)$$

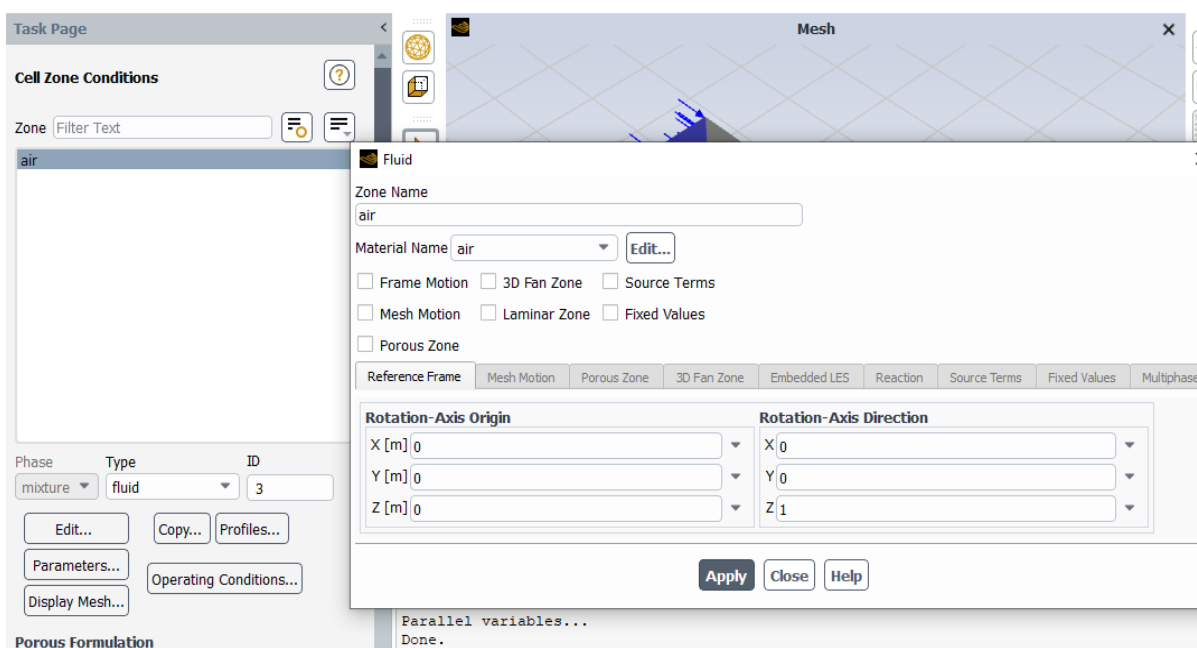
- όπου U η ταχύτητα της ελεύθερης ροής με τιμή 30 m/s
- όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα με τιμή 1.225 kg/m³
- όπου L είναι το μήκος της Orca με τιμή 2.7 m
- όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες με τιμή 1.7894e-05 kg / (m*s)

Ο αριθμός Reynolds σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίστηκε στα 5.55×10^6 , συνεπώς είναι πλήρως τυρβώδης και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και το μοντέλο **SST k- ω** για χρονικά σταθερή ροή ασυμπίεστου ρευστού (**σταθερή πυκνότητα**). Επίσης στην επιλογή μοντέλου τύρβης επιλέχθηκε και η διόρθωση καμπυλότητας (**curvature correction**) καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η καμπυλότητα που μπορεί να παρουσιάσει το πεδίο ροής.



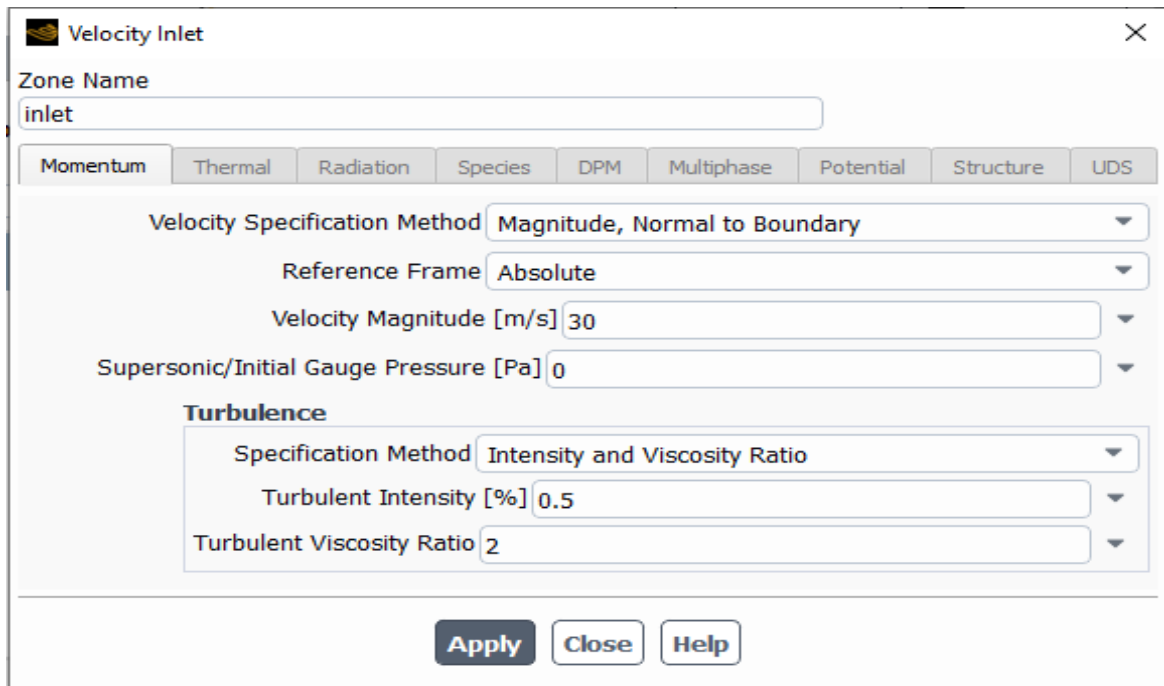
Σχήμα 6-14 Επιλογή μοντέλου τύρβης

Έπειτα από την επιλογή μοντέλου τύρβης θα πρέπει να οριστεί και το ρευστό το οποίο παρεμβάλλεται εσωτερικά του υπολογιστικού χωρίου.



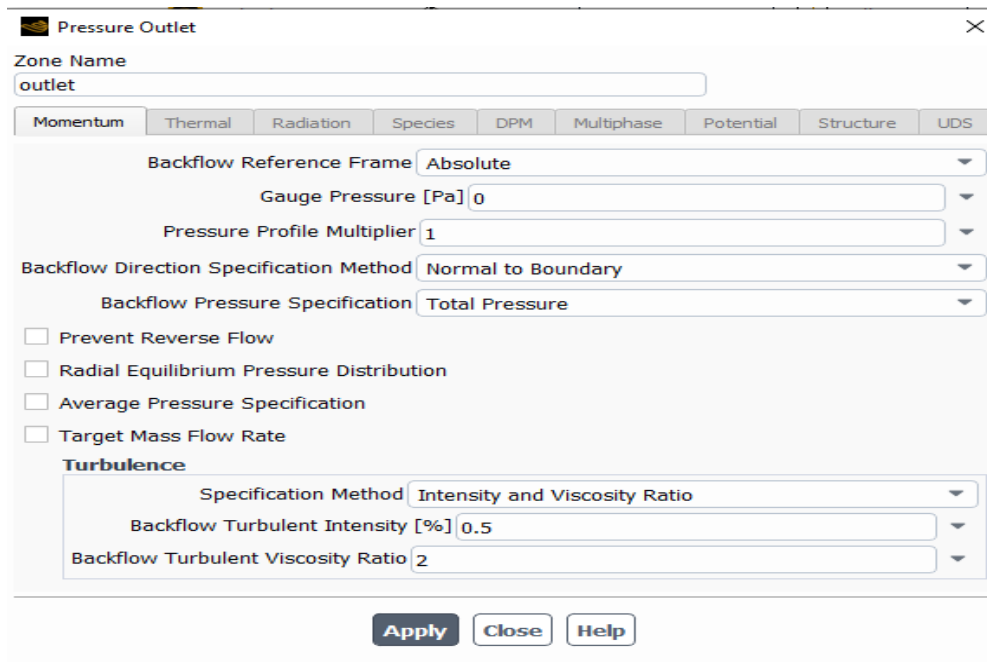
Σχήμα 6-15 Επιλογή ρευστού προσομοίωσης

Στην συνέχεια ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Όπως προαναφέρθηκε είναι ένα σημαντικό στάδιο της προ-επεξεργασίας του CFD ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες σφαλμάτων στην όλη διαδικασία. Στην οριακή συνθήκη **εισόδου (Inlet)** εισάγονται όλες οι σχετιζόμενες παράμετροι με την είσοδο του υπολογιστικού χωρίου καθώς και η απόδοση τιμών σε αυτές. Ο τύπος εισόδου στην προκειμένη περίπτωση είναι **οριακή συνθήκη εισόδου ταχύτητας (Velocity Inlet)** και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ταχύτητας και των κλιμακωτών ιδιοτήτων της ροής στα όρια εισόδου. Η ταχύτητα εισόδου όπως έχει αναφερθεί είναι **30 m/s** με την οποία θα προσομοιωθεί η κίνηση της Orca. Αναφορικά με τα μεγέθη της έντασης τύρβης (I) και του λόγου τυρβώδους ιξώδους, επειδή στην είσοδο των πειραματικών αεροσηράγγων είναι μικρές οι τιμές τους, θέτονται 0.5 και 2 αντίστοιχα.



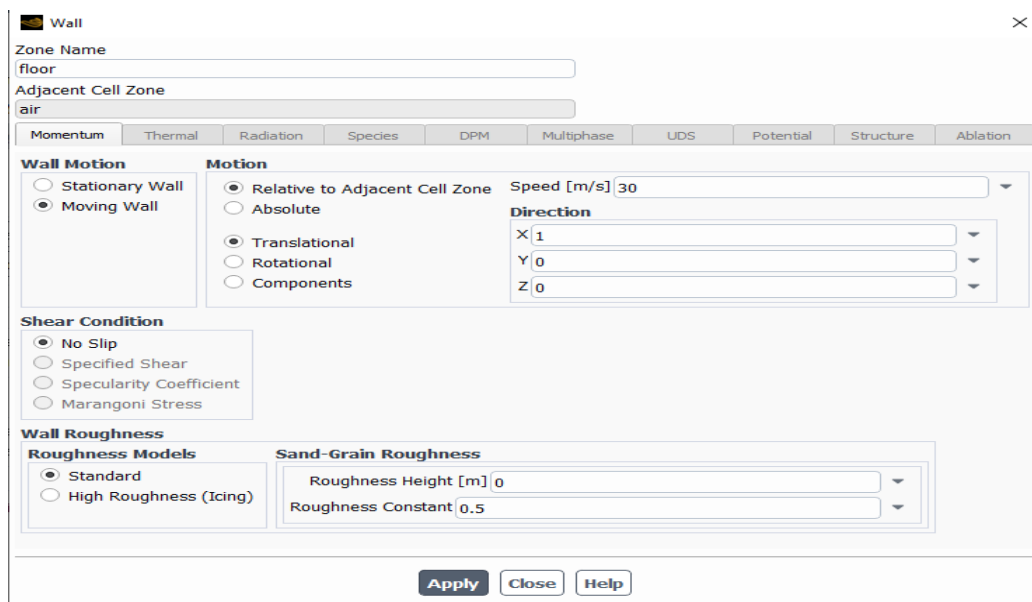
Σχήμα 6-16 Ορισμός οριακής συνθήκης εισόδου (Velocity Inlet)

Όσον αφορά τον τύπο της οριακής συνθήκης εξόδου θα είναι μία **έξοδος πίεσης (Pressure outlet)** η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό της στατικής πίεσης στην έξοδο της ροής, καθώς και άλλων κλιμακωτών μεταβλητών, όπως στην περίπτωση οπισθοροής. Με τον ορισμό μίας οριακής συνθήκης εξόδου πίεσης αντί μίας **οριακής συνθήκης εκροής (Outflow)** επιτυγχάνεται καλύτερη σύγκλιση της προσομοίωσης, ακόμα και όταν εμφανίζονται φαινόμενα οπισθοροής με το πέρας των επαναλήψεων. Η μετρούμενη πίεση στην έξοδο πρέπει να ναι μηδενική (**Zero-Gauge Pressure**) επειδή η έξοδος είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα και ορίζονται οι ίδιες τιμές για την ένταση της τύρβης και για τον λόγο τυρβώδους ιξώδους, σε περίπτωση που προκύψουν φαινόμενα οπισθοροής (0.5 και 2 αντίστοιχα).

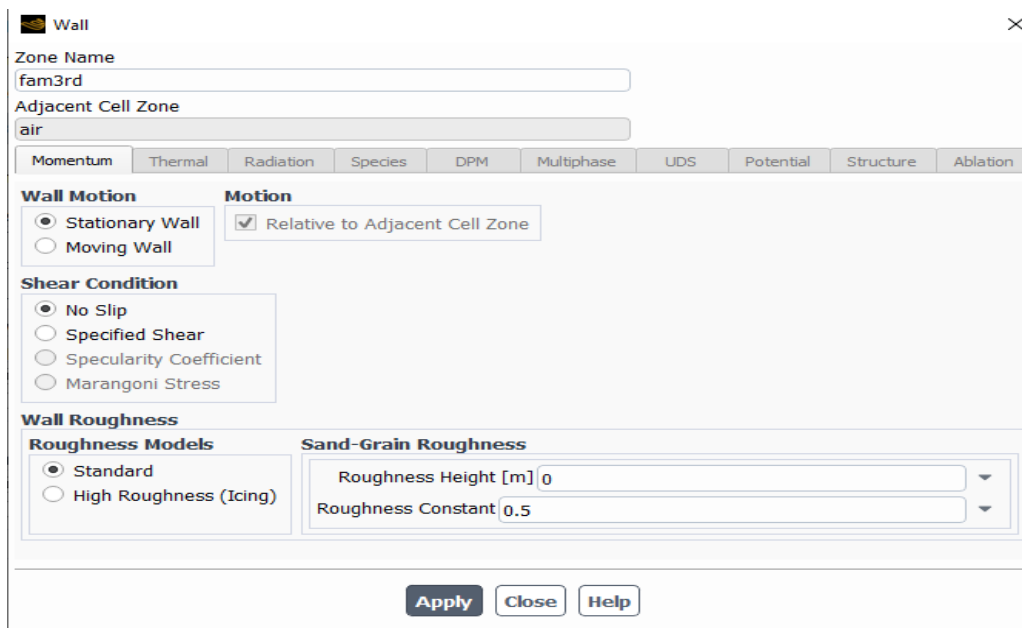


Σχήμα 6-17 Ορισμός οριακής συνθήκης εξόδου (Pressure Outlet)

Το έδαφος (κάτω επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου) λαμβάνει οριακή συνθήκη ως κινούμενο τοίχωμα (**Moving Wall**) και όπως προαναφέρθηκε κινείται με **30 m/s** σε σχέση με το όχημα. Το όχημα θα λάβει συνθήκη σταθερού τοιχώματος χωρίς ολίσθηση (**Stationary Wall - No Slip Condition**).



Σχήμα 6-18 Ορισμός οριακής συνθήκης εδάφους



Σχήμα 6-19 Ορισμός οριακής συνθήκης οχήματος

Το τελευταίο στάδιο της προ-επεξεργασίας πριν επιλυθεί η προσομοίωση έχει να κάνει με την κατάλληλη προετοιμασία του επιλυτή αποδίδοντας του σωστά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με τα μεγέθη **τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k)**, **ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω)**, **πίεσης (P)** και **ορμής (p)**, επιλύθηκαν χρησιμοποιώντας **χωρική διακριτοποίηση 2^{ης} τάξης (Spatial Discretization-Second Order Upwind)** για να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα. Η χωρική διακριτοποίηση 2^{ης} τάξης είναι δυσκολότερο να καταλήξει σε σύγκλιση (**Convergence**) από την 1^{ης} τάξης διακριτοποίηση, αλλά προσφέρει πιο ακριβή αποτελέσματα και για αυτό προτιμήθηκε για την παρούσα προσομοίωση. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο **Explicit** σε πρώτη φάση, καθώς η μέθοδος αυτή καταλαμβάνει λιγότερη μνήμη και είναι χρονικά συντομότερη στην επίλυση των εξισώσεων της ροής και έπειτα χρησιμοποιήθηκε και η **Implicit** όταν παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αστάθεια και η λύση άρχισε να είναι εξαρτώμενη από πολύ μικρά χρονικά βήματα για να καταλήξει σε σύγκλιση (**Convergence**).

6.2.4 Συντελεστής Πίεσης (Cp)

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθεί και θα γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς του συντελεστή πίεσης καθώς και η μεταβολή του ανάλογα με την περίπτωση προσομοίωσης και τον αριθμό Reynolds. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός Reynolds του πειράματος και των προσομοιώσεων είναι διαφορετικός, καθώς το πείραμα, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα **5.2**, πραγματοποιήθηκε σε υπό κλίμακα μοντέλο της Orca (**1:10**) και με ταχύτητα ροής της αεροσήραγγας στα **6,9 m/s**. Η ταχύτητα ορίστηκε σε σχετικά χαμηλά επίπεδα καθώς την περίοδο πραγματοποίησης του πειράματος υπήρχε περιορισμένη λειτουργία της αεροσήραγγας λόγω κάποιων βλαβών στην εγκατάσταση. Από την άλλη οι προσομοιώσεις αφορούν το ίδιο το μοντέλο σε πραγματική κλίμακα (**1:1**) και ταχύτητα **30 m/s**, η οποία είναι αρκετά ρεαλιστική τιμή για ένα όχημα που κινείται σε πόλη τις ώρες αιχμής, αλλά είναι και κοντά στην ταχύτητα που αναπτύσσουν τα οχήματα στον διαγωνισμό Shell Eco Marathon. Έτσι, για τον έλεγχο ορθότητας του πειράματος (**validation**) χρησιμοποιήθηκε και μία άλλη περίπτωση προσομοίωσης με αριθμό Reynolds **1,15 x 10⁵** (ίδιος με τον αριθμό Reynolds του πειράματος) και σαν ταχύτητα ορίστηκε το **1 m/s** έπειτα από υπολογισμό με τον τύπο :

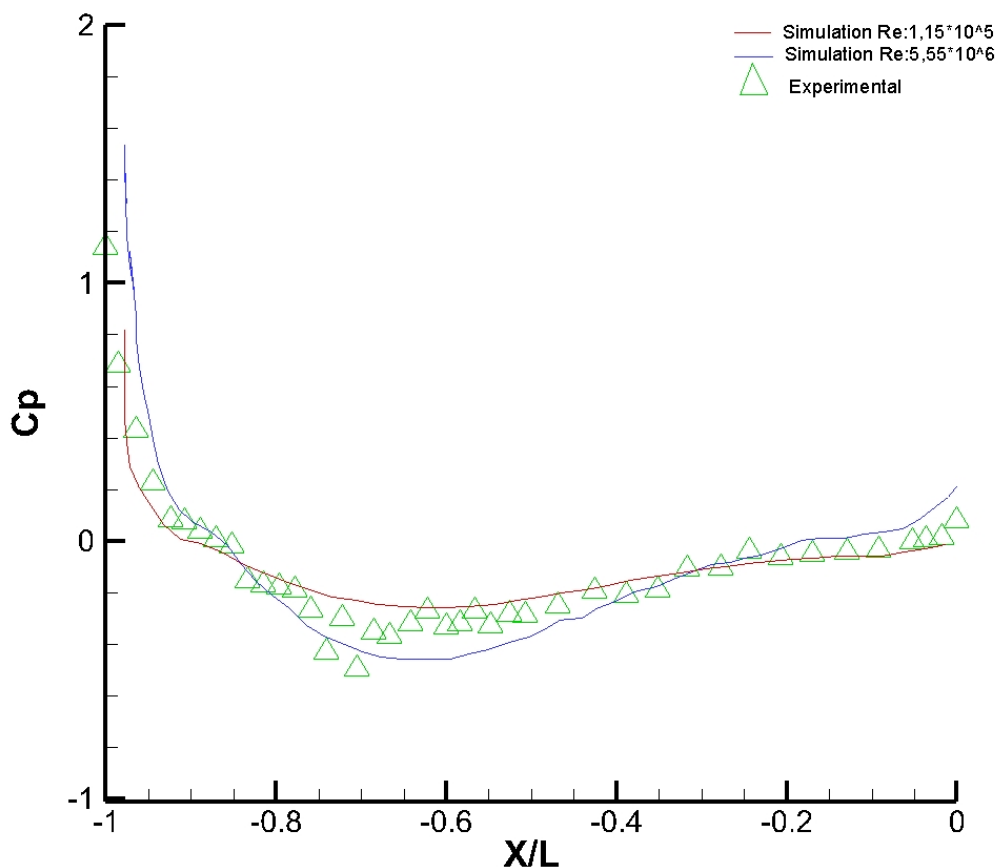
$$U = \frac{Re * \mu}{\rho * L} \quad (6-3)$$

- όπου Re είναι ο αριθμός Reynolds της ροής με τιμή **1,15 x 10⁵**
- όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα με τιμή **1.225 kg/m³**
- όπου L είναι το μήκος της Orca με τιμή **2.7 m**
- όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες με τιμή **1.7894e-05 kg / (m*s)**

Ο ίδιος τύπος χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds στο υπό κλίμακα μοντέλο του πειράματος με τα εξής στοιχεία:

- όπου U είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής με τιμή $6,9 \text{ m/s}$
- όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα με τιμή 1.225 kg/m^3
- όπου L είναι το μήκος της Orca με τιμή $0,27 \text{ m}$ (υπό κλίμακα μοντέλο)
- όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες με τιμή $1.7894\text{e-}05 \text{ kg / (m*s)}$

Οι μετρήσεις του συντελεστή πίεσης έγιναν κατά μήκος του οχήματος (οπές ράχης) και πλευρικά αυτού. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα C_p για τις διαφορετικές περιπτώσεις προσομοίωσης που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 6-20 Διάγραμμα συντελεστή πίεσης C_p για την περίπτωση προσομοίωσης χωρίς κτίρια (case 1) κατά μήκος του οχήματος

Αρχικά, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζονται 2 διαφορετικές καμπύλες και μία σειρά από τριγωνικά σημεία. Η μπλε καμπύλη απεικονίζει την προσομοίωση με **αριθμό Reynolds $5,55 \times 10^6$** και **ταχύτητα ροής 30 m/s** , ενώ η κόκκινη καμπύλη αναπαριστά την προσομοίωση ελέγχου ορθότητας της πειραματικής διαδικασίας με **αριθμό Reynolds $1,15 \times 10^5$** και **ταχύτητα ροής 1 m/s** . Τα τριγωνικά πράσινα σημεία απεικονίζουν τις πειραματικές τιμές C_p . Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω εκλογής του σημείου (0,0,0) στο τέλος του μήκους της Orca (πίσω πόδι) οι καμπύλες αναπτύσσονται στο αρνητικό τμήμα του άξονα XX' του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.

Στην αρχή (σημείο -1 στον αδιάστατο άξονα X/L) παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή πίεσης C_p και για τις 2 καμπύλες προσομοίωσης αλλά και για το πείραμα, καθώς η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από την πρωταρχική πρόσκρουση της ροής με το όχημα. Συνεπώς, είναι λογικό εκεί να αναπτύσσεται και η μεγαλύτερη τιμή κατά μήκος του οχήματος. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία αρκετά μεγάλη πτώση του συντελεστή πίεσης, αφού η ροή αποδεσμεύεται από το σημείο πρόσκρουσης και ανακτά ξανά ταχύτητα. Προς το τέλος παρατηρείται μία μικρότερη αύξηση του συντελεστή πίεσης και εκ νέου μείωση της ταχύτητας λόγω φαινομένων ανακυκλοφορίας και αποκόλλησης της ροής καθώς και δινών που συμβαίνουν στο πίσω τμήμα της Orca.

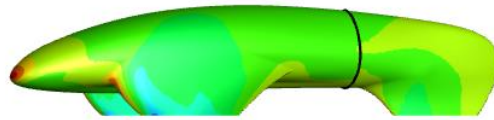
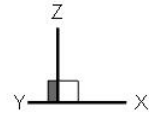
Συγκριτικά, παρατηρείται ομοιογένεια και στις 2 καμπύλες προσομοίωσης αναφορικά με την μεταβολή του συντελεστή πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας το διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι η προσομοίωση με ταχύτητα ροής **30 m/s** παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή συντελεστή πίεσης από τις 2 καμπύλες, αφού η ροή συγκρούεται με το όχημα σε μεγαλύτερη ταχύτητα και συνεπώς στο συγκεκριμένο σημείο θα αναπτυχθεί μεγαλύτερη σημειακή πίεση από την περίπτωση προσομοίωσης **1 m/s** . Με την ίδια λογική παρατηρείται και μεγαλύτερη πτώση συντελεστή πίεσης κατά μήκος της ράχης του οχήματος στην περίπτωση προσομοίωσης **30 m/s** , καθώς η ταχύτητα ροής είναι

μεγαλύτερη από την περίπτωση προσομοίωσης 1m/s και συνεπώς θα παρουσιαστεί μεγαλύτερη υποπίεση στη πρώτη περίπτωση. Αναφορικά με την πειραματική διαδικασία (πράσινα τριγωνικά σημεία), φαίνεται να επαληθεύεται σε ικανοποιητικό βαθμό από την καμπύλη προσομοίωσης ελέγχου ορθότητας του πειράματος (κόκκινη καμπύλη). Υπάρχουν σημεία που έχουν κάποια απόκλιση από την καμπύλη αλλά στα λογικά πλαίσια του τυχαίου σφάλματος του πειραματιστή.

Εκτός από την επιφάνεια κατά μήκος της ράχης του οχήματος, έγιναν προσομοιώσεις και πειραματική διαδικασία για τη μελέτη του συντελεστή πίεσης C_p στα 2 «πόδια της Orca». Παρακάτω για καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη θα απεικονιστούν τα τμήματα της Orca που αναφέρονται ως «πόδια» από τα οποία πάρθηκαν οι μετρήσεις του συντελεστή πίεσης.

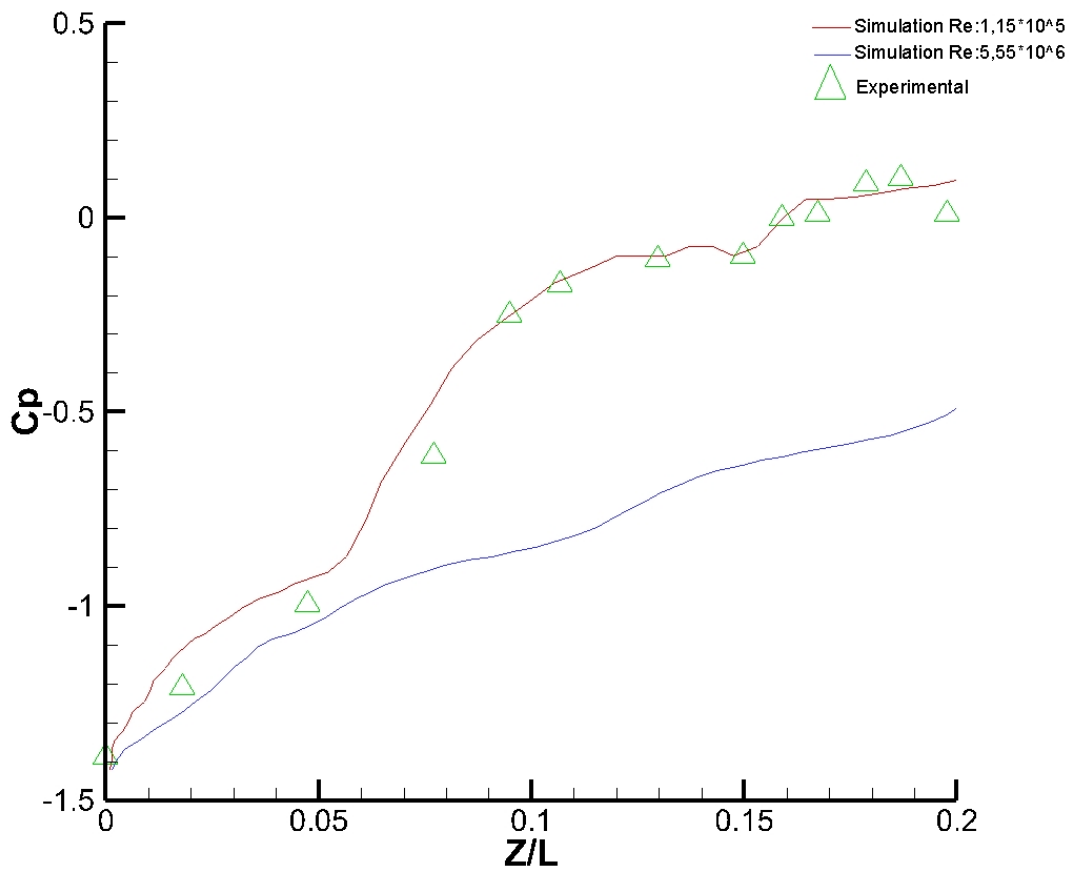


Σχήμα 6-21 Απεικόνιση του «μπροστινού ποδιού» της Orca που πάρθηκαν οι μετρήσεις C_p (μαύρη γραμμή)



Σχήμα 6-22 Απεικόνιση του «πίσω ποδιού» της Orca που πάρθηκαν οι μετρήσεις C_p (μαύρη γραμμή)

Να σημειωθεί ότι οι απεικονιζόμενες μαύρες γραμμές προήλθαν από την ένωση των σημείων (οπών) του πειραματικού μοντέλου. Αφού έγινε εξήγηση των όρων μπροστινού και πίσω «ποδιού» παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα.

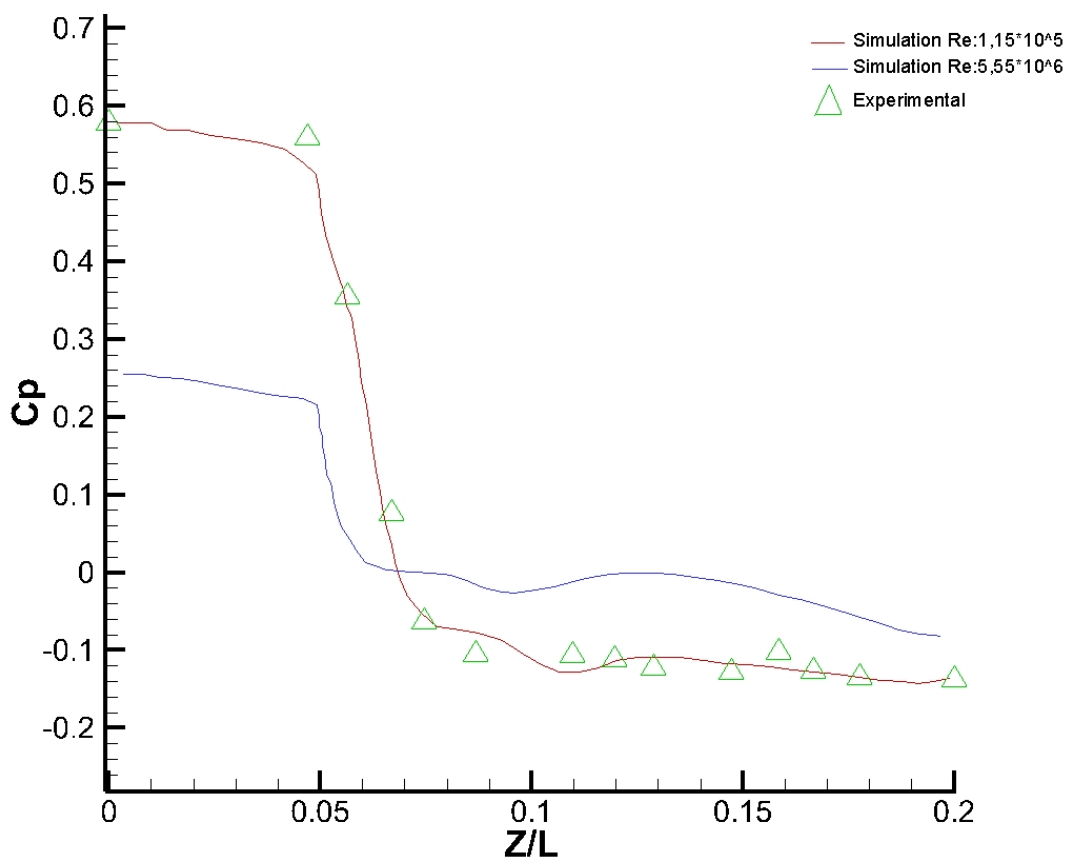


Σχήμα 6-23 Διάγραμμα συντελεστή πίεσης C_p για την περίπτωση προσομοίωσης χωρίς κτίρια (case 1) στο «μπροστινό πόδι» της Orca

Αρχικά, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα η καμπύλη ελέγχου ορθότητας του πειράματος (κόκκινη καμπύλη) έχει ικανοποιητική συσχέτιση με τα πειραματικά σημεία (πράσινα σύμβολα) άρα γίνεται επαλήθευση του πειράματος από την προσομοίωση. Όσον αφορά τις δύο καμπύλες είναι προφανές ότι οι αριθμητικές τιμές του συντελεστή πίεσης βρίσκονται κατά κύριο λόγο στα αρνητικά αφού το «μπροστινό πόδι» το οποίο αφορούν οι μετρήσεις C_p βρίσκεται μεταγενέστερα από το σημείο πρόσκρουσης, σε περιοχή στην οποία έχει ξεκινήσει ξανά η επιτάχυνση της ροής και η μείωση της πίεσης σε αρνητικές τιμές. Συγκριτικά, η καμπύλη προσομοίωσης με ταχύτητα ροής **30 m/s** σε όλο το εύρος της παίρνει μικρότερες τιμές συντελεστή πίεσης από την

καμπύλη προσομοίωσης 1m/s , κάτι απολύτως λογικό λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας ροής. Όπως έχει προαναφερθεί, ο συντελεστής πίεσης δηλώνει την μετατροπή της ταχύτητας σε πίεση (με έναν πιο επιστημονικό όρο, από κινητική σε δυναμική ενέργεια) και συγκεκριμένα όταν η ταχύτητα μειώνεται παράγεται περισσότερη δυναμική ενέργεια και το αντίστροφο.

Αναφορικά με το πίσω πόδι της Orca η αυξομείωση καθώς και οι τιμές του συντελεστή πίεσης επεξηγούνται ξανά σύμφωνα με όλες τις παραδοχές και φυσικές ερμηνείες που εξηγήθηκαν αναλυτικότερα πιο πάνω.

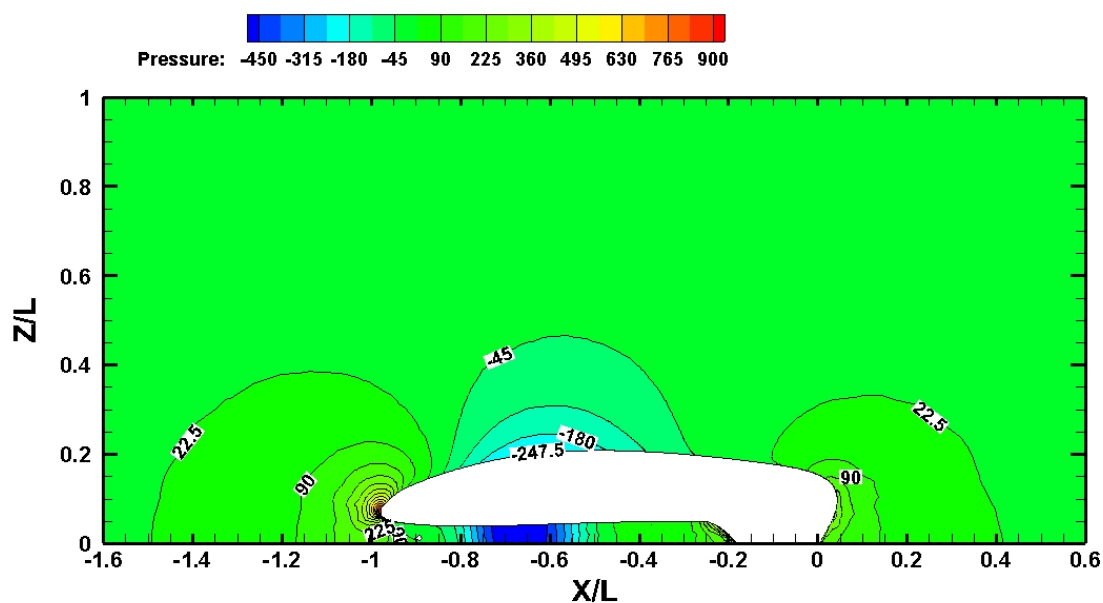


Σχήμα 6-24 Διάγραμμα συντελεστή πίεσης C_p για την περίπτωση προσομοίωσης χωρίς κτίρια (case 1) στο «πίσω πόδι» της Orca

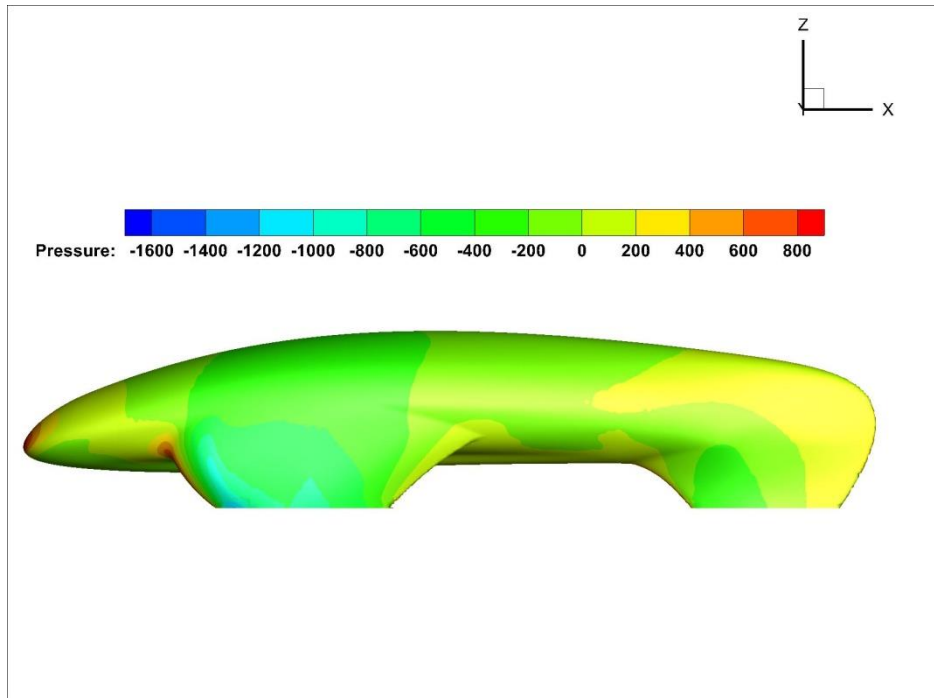
6.2.5 Αποτελέσματα

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση της προσομοίωσης. Ειδικότερα, θα δειχθούν όλα τα γραφήματα (Contours) των σχετιζόμενων με το πεδίο ροής μεγεθών. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Tecplot 360 EX.

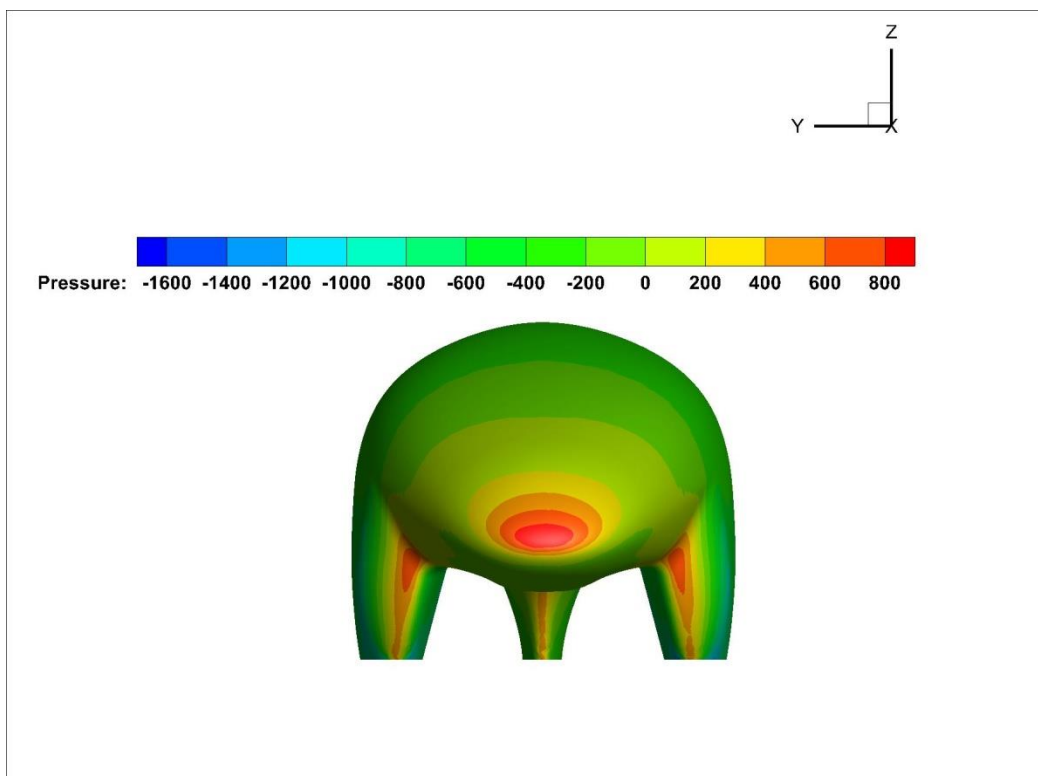
Για αρχή θα παρουσιαστεί η κατανομή της πίεσης που επικρατεί στο πεδίο ροής γύρω από την Orca καθώς και πως αυτό επηρεάζει τις τιμές της πίεσης που εμφανίζονται στην επιφάνεια της.



Σχήμα 6-25 Γράφημα κατανομής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας
(Pressure Contour)

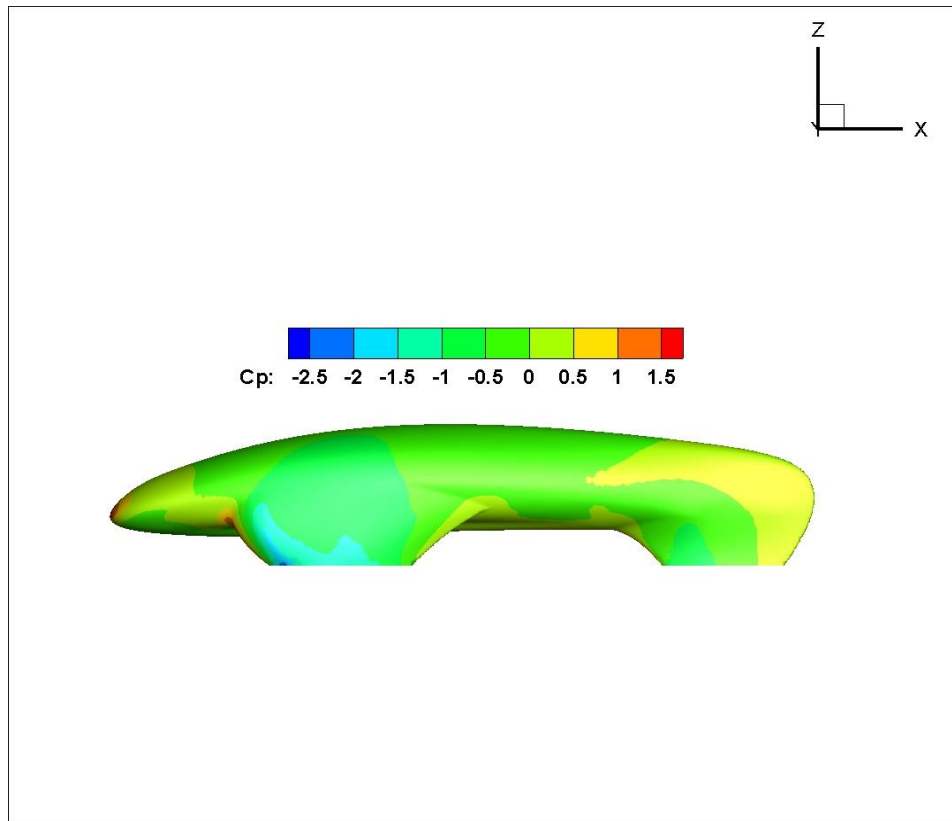


**Σχήμα 6-26 Γράφημα κατανομής πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος
(Pressure Side-Surface Contour)**

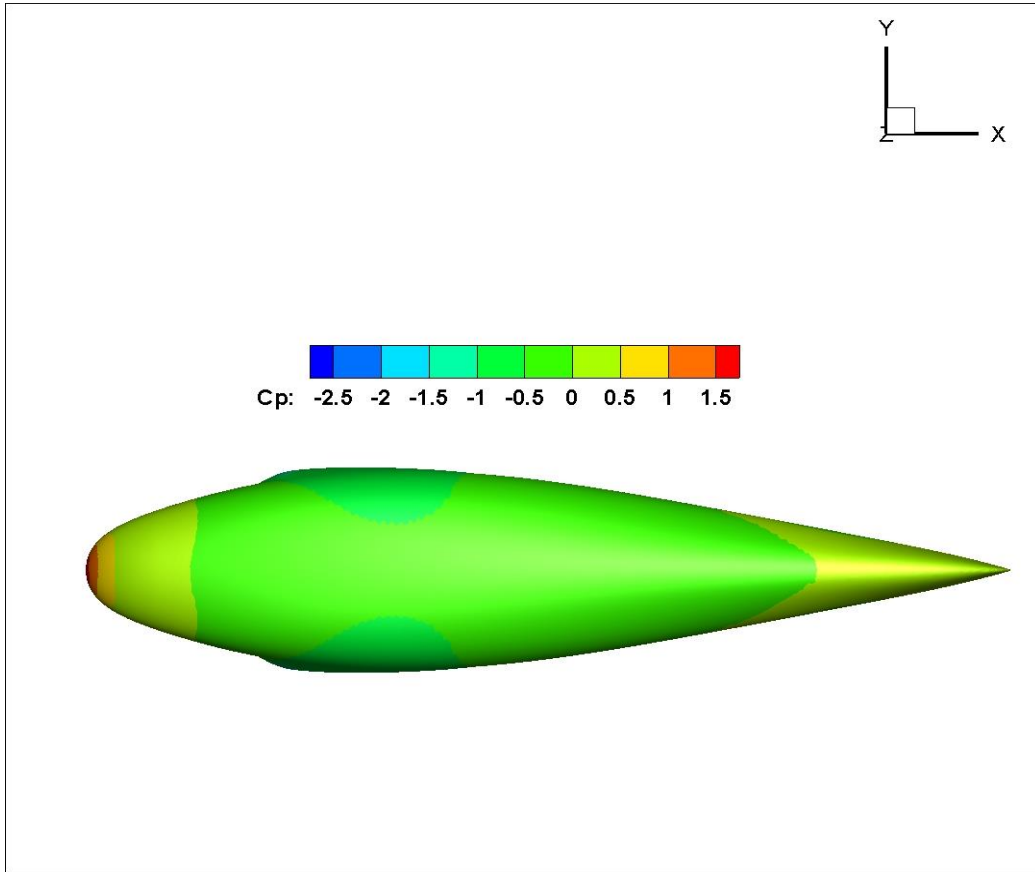


**Σχήμα 6-27 Γράφημα κατανομής πίεσης σε πρόοψη
(Pressure Front-Surface Contour)**

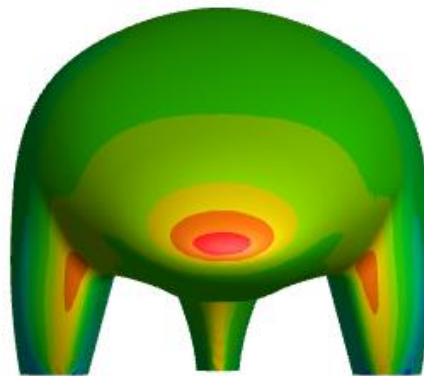
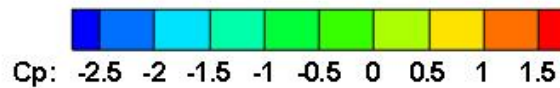
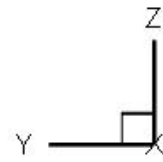
Στο μπροστινό τμήμα του οχήματος όπου πραγματοποιείται πρόσκρουση της ροής είναι λογικό να παρατηρείται τοπική αύξηση της πίεσης. Έπειτα, η ροή αποδεσμεύεται και συνεχίζει την πορεία της κατά της μήκος της επιφάνειας του οχήματος με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα ροής και να μειώνεται η πίεση. Πιο συγκεκριμένα, κάτω από το όχημα λίγο μετά από το σημείο πρόσκρουσης της ροής όπως φαίνεται παρουσιάζεται περιοχή μέγιστης υποπίεσης με αποτέλεσμα εκεί να υπάρχει μεγιστοποίηση της ταχύτητας. Έτσι, η υποπίεση αυτή βοηθά στην αύξηση της κάθετης δύναμης (**downforce**) με αποτέλεσμα να βελτιστοποιείται η επαφή του οχήματος με το έδαφος, πράγμα επιθυμητό για τα ιδανικότερα επίπεδα πρόσφυσης οχήματος - δρόμου. Άλλα σημεία στα οποία παρατηρείται μικρότερη αύξηση της πίεσης είναι στις γωνίες που παρουσιάζει η γεωμετρία, όπως τα «πόδια» της Orca (σημεία έδρασης τροχών) και στο πίσω μέρος της γεωμετρίας που παρατηρούνται φαινόμενα ανακυκλοφορίας και εμφανίζονται μικρές αλλά υπαρκτές δίνες. Η ίδια φυσική επεξήγηση δίνεται και για τα παρακάτω γραφήματα που απεικονίζουν την μεταβολή του συντελεστή πίεσης **C_p** κατά μήκος του οχήματος.



Σχήμα 6-28 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος (Pressure Coefficient Side-Surface Contour)

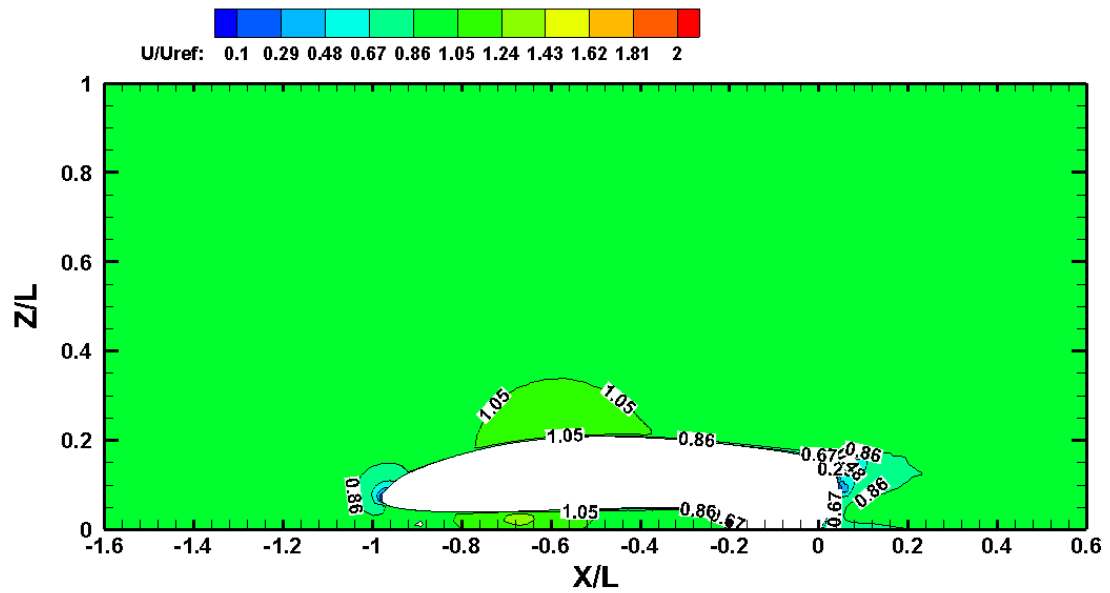


Σχήμα 6-29 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην άνω επιφάνεια του οχήματος (Pressure Coefficient Top View - Contour)

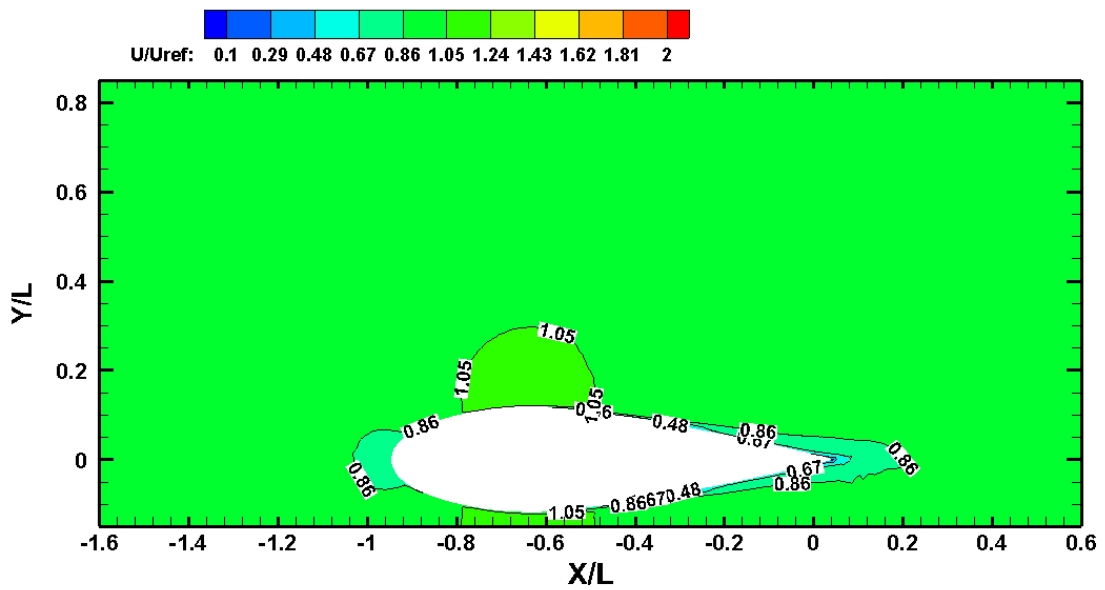


Σχήμα 6-30 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης σε πρόοψη (Pressure Coefficient Front View - Contour)

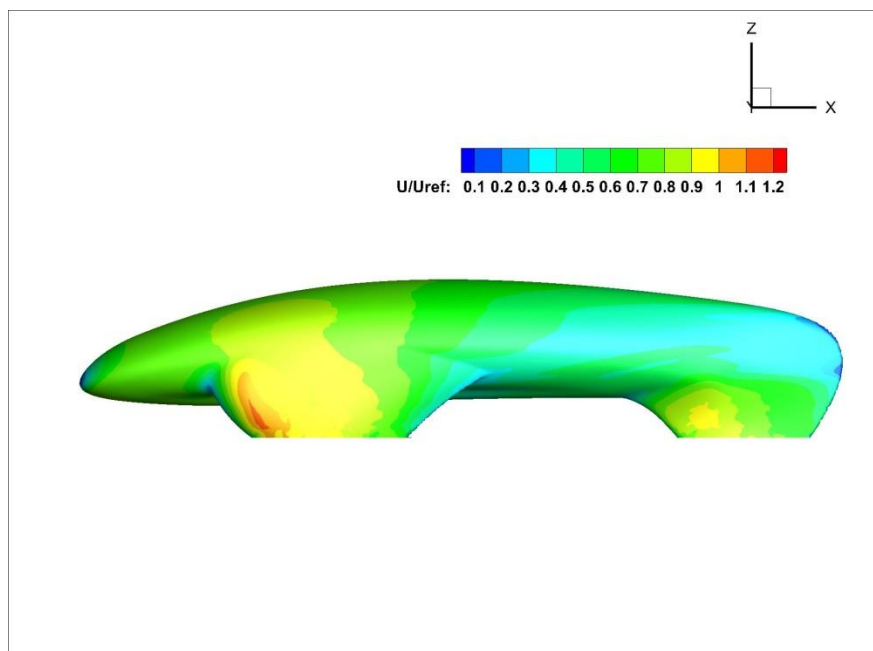
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα γραφήματα των μέσων αδιάστατων ταχυτήτων σε διάφορα επίπεδα. Οι ταχύτητες είναι λογικό να εμφανίζονται μεγαλύτερες στα αντίστοιχα σημεία που υπάρχει πτώση της πίεσης σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli. Μετά από την αρχική πρόσκρουση της ροής και την αισθητή μείωση της ταχύτητας παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας κατά μήκος της επιφάνειας του οχήματος. Στο κάτω μέρος του οχήματος υπάρχει αύξηση της ταχύτητας καθώς εμφανίζεται υποπίεση σε σχέση με το άνω μέρος του οχήματος και η ταχύτητα θα εμφανίσει τις μεγαλύτερες τιμές της, φαινόμενο που θυμίζει τους διαχύτες στα αγωνιστικά οχήματα (**diffuser**). Όπως προείπαμε στο πίσω μέρος της Orca εμφανίζονται φαινόμενα ανακυκλοφορίας και δημιουργίας δινών και συνεπώς εκεί η ταχύτητα θα εμφανίσει τις χαμηλότερες τιμές.



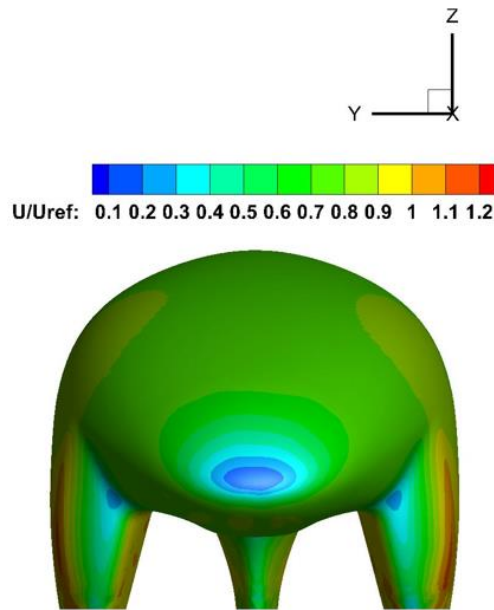
Σχήμα 6-31 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας
(Dimensionless Velocity Contour)



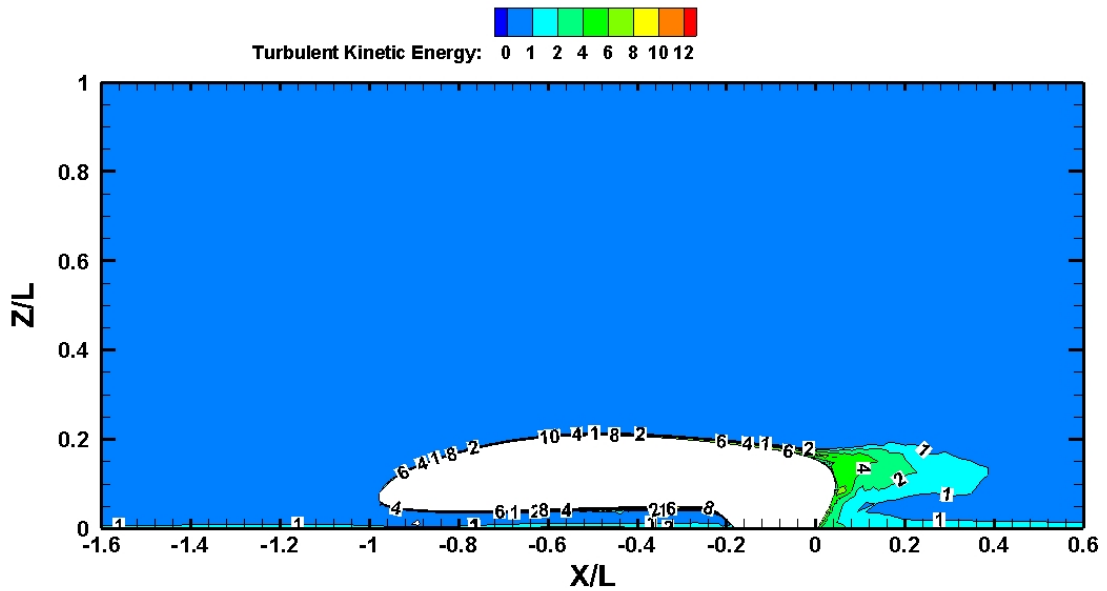
Σχήμα 6-32 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας σε κάτοψη (Z=0,3)
 (Dimensionless Velocity Contour-Top View)



Σχήμα 6-33 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στην επιφάνεια του οχήματος
 (Dimensionless Velocity Side-Surface Contour)

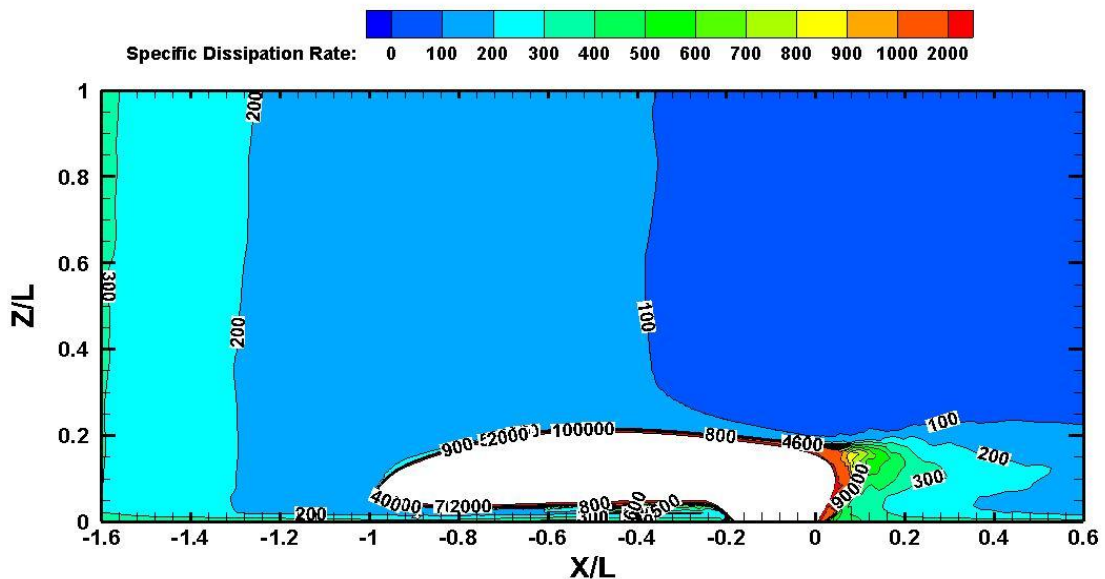


Σχήμα 6-34 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας σε πρόοψη
(Dimensionless Velocity Front-Surface Contour)



Σχήμα 6-35 Γράφημα τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) στο επίπεδο
συμμετρίας (Turbulent Kinetic Energy Contour)

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια k είναι ουσιαστικά μία ποσοτική μέτρηση της έντασης της τύρβης για ένα δεδομένο πεδίο ροής ρευστού. Στη ρευστοδυναμική, μπορεί απλά να οριστεί ως η μέση κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας για μια τυρβώδη ροή. Για το λόγο αυτό όπως γίνεται αντιληπτό στο παραπάνω γράφημα οι μεγαλύτερες τιμές της παρατηρούνται στην απόληξη του οχήματος όπου λαμβάνουν χώρα τα εντονότερα φαινόμενα τύρβης του εξεταζόμενου πεδίου ροής.



Σχήμα 6-36 Γράφημα ειδικού ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω) στο επίπεδο συμμετρίας (Specific Dissipation Rate Contour)

Ο ειδικός ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ω είναι ένα κοινό αποτέλεσμα της τύρβης. Σε μια τυρβώδη ροή, οι δίνες αλληλεπιδρούν

μεταξύ τους και η κινητική ενέργεια διαχέεται σε θερμότητα με τη βοήθεια της ιξώδους δύναμης. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχική φάση της διάχυσης, παράγονται μεγάλες δίνες, όμως με την πάροδο του χρόνου, καθώς η ροή αφήνεται να ηρεμήσει, αυτές οι δίνες διασπώνται σε μικρότερες δίνες, οι οποίες διαλύονται σε ακόμη μικρότερες μονάδες, μέχρις ότου δεν είναι ορατό κανένα μοτίβο ροής. Αυτό συμβαίνει στη μικροκλίμακα Kolmogorov, η οποία είναι η μικρότερη κλίμακα στην τυρβώδη ροή, όταν η ιξώδης δύναμη είναι πολύ πιο διαδεδομένη. Έτσι, οι δίνες διαλύονται σε θερμική ενέργεια. Για το λόγο αυτό στην απόληξη του οχήματος παρατηρούνται μεγάλες τιμές ρυθμού διάχυσης αφού εμφανίζονται έντονες αλληλεπιδράσεις δινών άρα και μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας.

7 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ (ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΤΙΡΙΩΝ)

7.1 Υπολογιστική προσέγγιση CFD (case 2)

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί ξανά μία προσομοίωση CFD που αφορά το μονοθέσιο Orca με την διαφορά ότι θα γίνει προσθήκη δύο κτιρίων πλευρικά του οχήματος με σκοπό να μελετηθεί η επιρροή τους στο πεδίο ροής και κατ' επέκταση το πώς θα διαφοροποιήσουν τα αποτελέσματα της πρώτης περίπτωσης προσομοίωσης. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί είναι παρόμοια με την πρώτη περίπτωση (case 1), δηλαδή θα οριστούν ξανά η εξεταζόμενη γεωμετρία, το υπολογιστικό χωρίο, το πλέγμα, οι οριακές συνθήκες καθώς και θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιήθηκε ξανά η μέθοδος RANS και το συγκεκριμένα το μοντέλο SST k- ω .

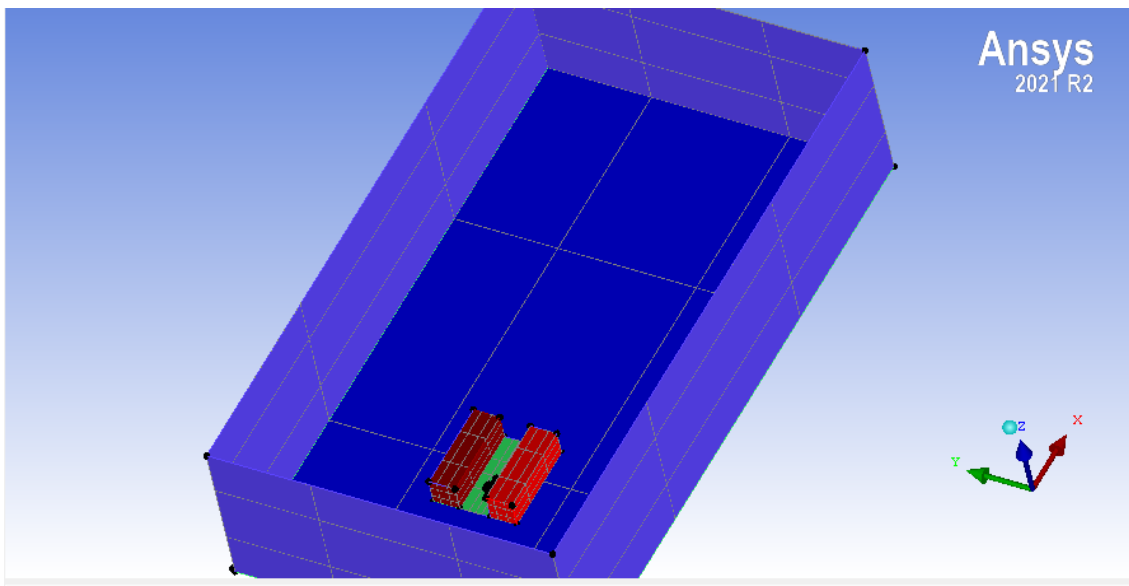
7.1.1 Υπολογιστικό χωρίο

Για την δημιουργία του υπολογιστικού χωρίου χρησιμοποιήθηκε όπως προείπαμε το πρόγραμμα **ANSYS ICEM CFD**. Η γεωμετρία τοποθετήθηκε ξανά σε τέτοιο σημείο στο υπολογιστικό χωρίο ώστε να ισχύουν τα εξής: (Οι αποστάσεις που ακολουθούν είναι σχετικές ως προς το σημείο αναφοράς (0,0,0) που στην προκειμένη περίπτωση είναι το πίσω "πόδι" της Orca.)

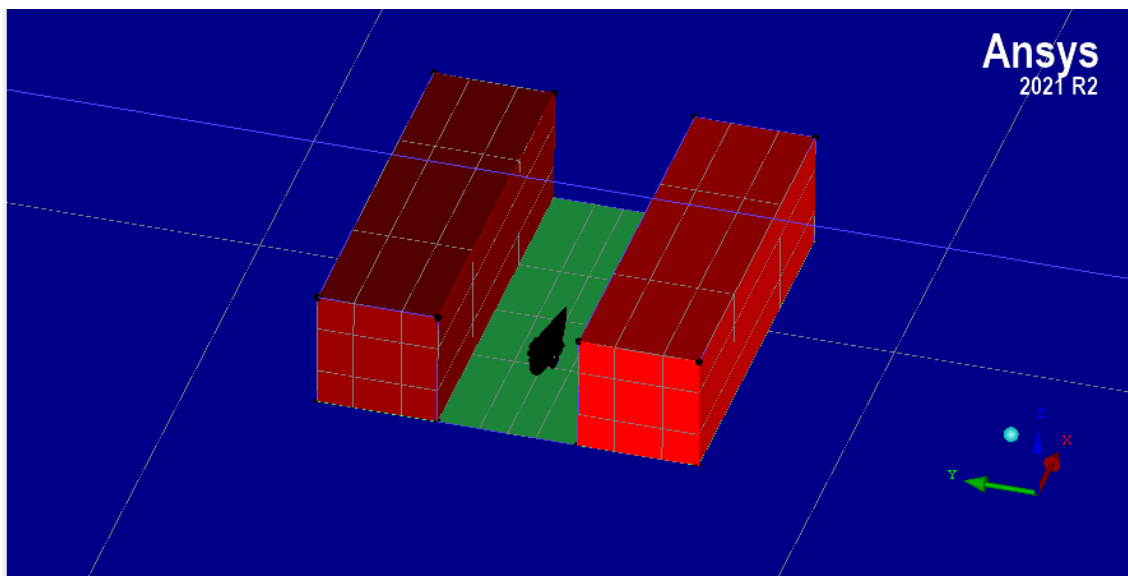
- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την μπροστινή πλευρά του χωρίου ισούται με 5 φορές το ύψος της γεωμετρίας (5H)**
- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την δεξιά και αριστερή πλευρά του χωρίου ισούται με 5 φορές το ύψος της γεωμετρίας (5H)**
- **Απόσταση του σημείου αναφοράς από την άνω πλευρά του χωρίου ισούται με 5 φορές το ύψος της γεωμετρίας (5H)**

- Απόσταση του σημείου αναφοράς από την πίσω πλευρά του χωρίου ισούται με 15 φορές το ύψος της γεωμετρίας (15H)

Επιπρόσθετα, στην συγκεκριμένη περίπτωση θα υπάρχουν και 2 κτίρια πλευρικά από το όχημα προσομοίωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από το πρόγραμμα ICEM CFD που απεικονίζουν το υπολογιστικό πεδίο της 2^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης.



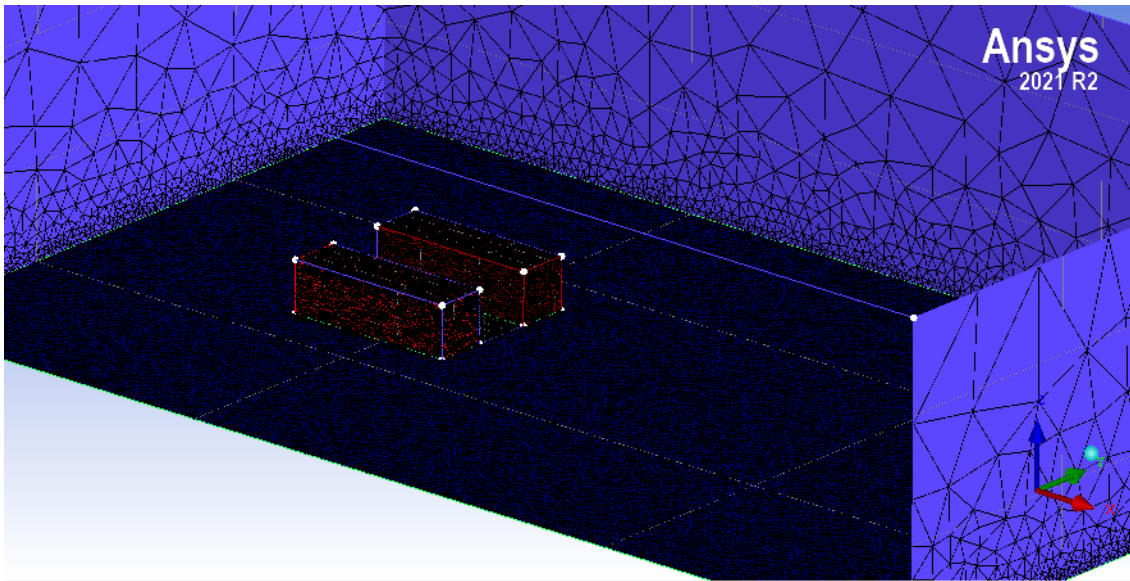
Σχήμα 7-1 Απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου σε περιβάλλον ICEM CFD



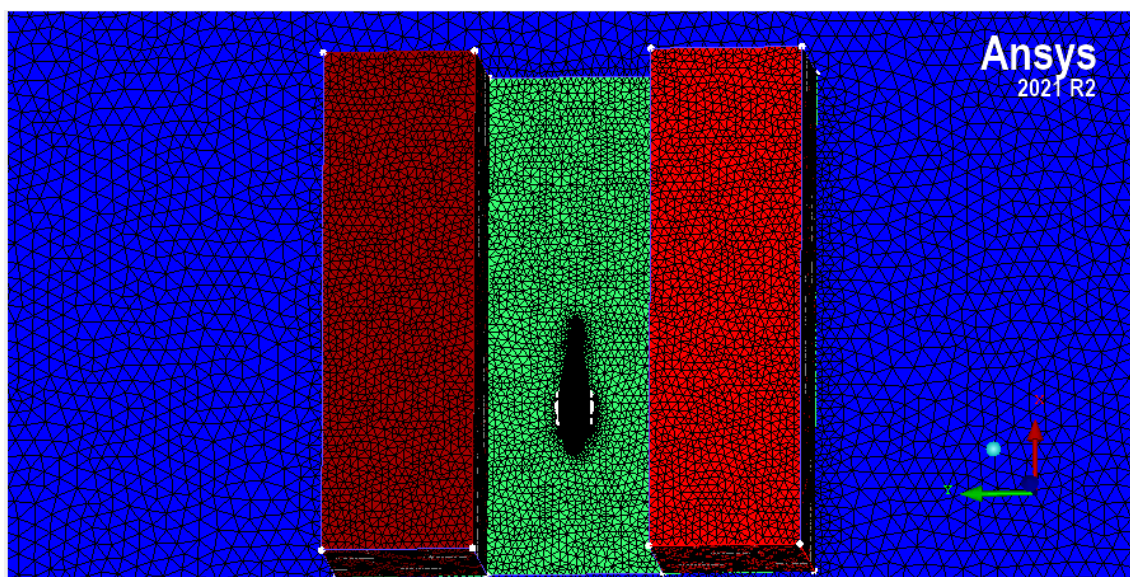
Σχήμα 7-2 Απεικόνιση του συστήματος Orca - Κτίρια σε περιβάλλον ICEM CFD

7.1.2 Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος

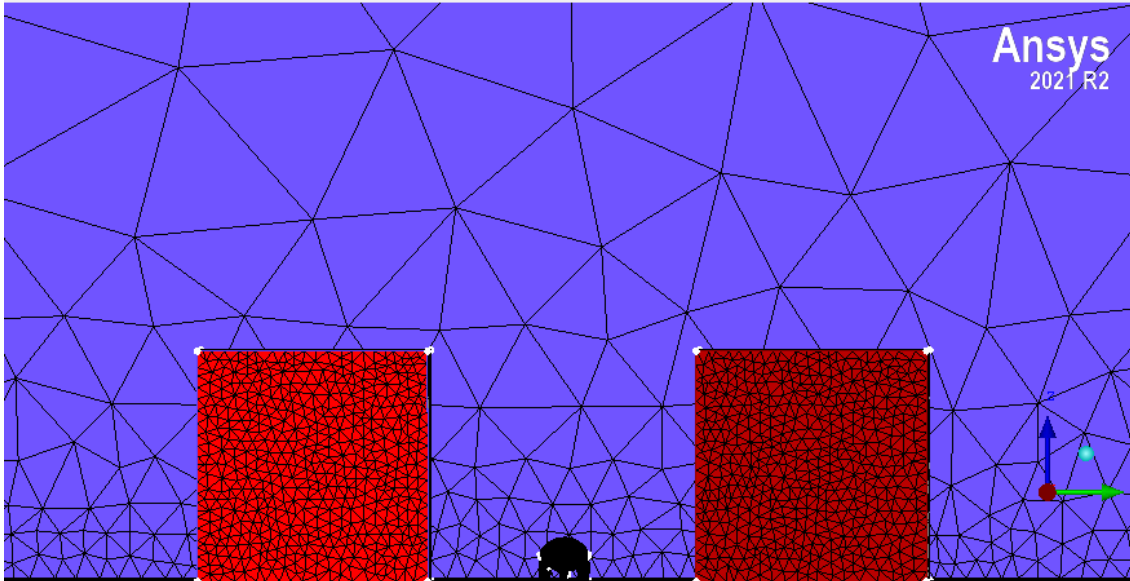
Για το υπολογιστικό πλέγμα, ομοίως με την 1^η περίπτωση προσομοίωσης θα ακολουθηθεί η ίδια λογική κατασκευής του με την διαφορά ότι θα προστεθούν 2 κτίρια παράπλευρα της εξεταζόμενου μοντέλου. Συνεπώς, θα ξαναγίνει διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου σε μικρότερα τμήματα για να επιλυθεί αριθμητικά. Το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι πάλι αδόμητο και τα στοιχεία από τα οποία θα απαρτίζεται (elements) θα είναι ξανά τετράεδρα, εξάεδρα, πρισματικά και τριγωνικά.



Σχήμα 7-3 Απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος



Σχήμα 7-4 Απεικόνιση του μοντέλου Orca και των πλευρικών κτιρίων σε μορφή υπολογιστικού πλέγματος (κάτοψη)

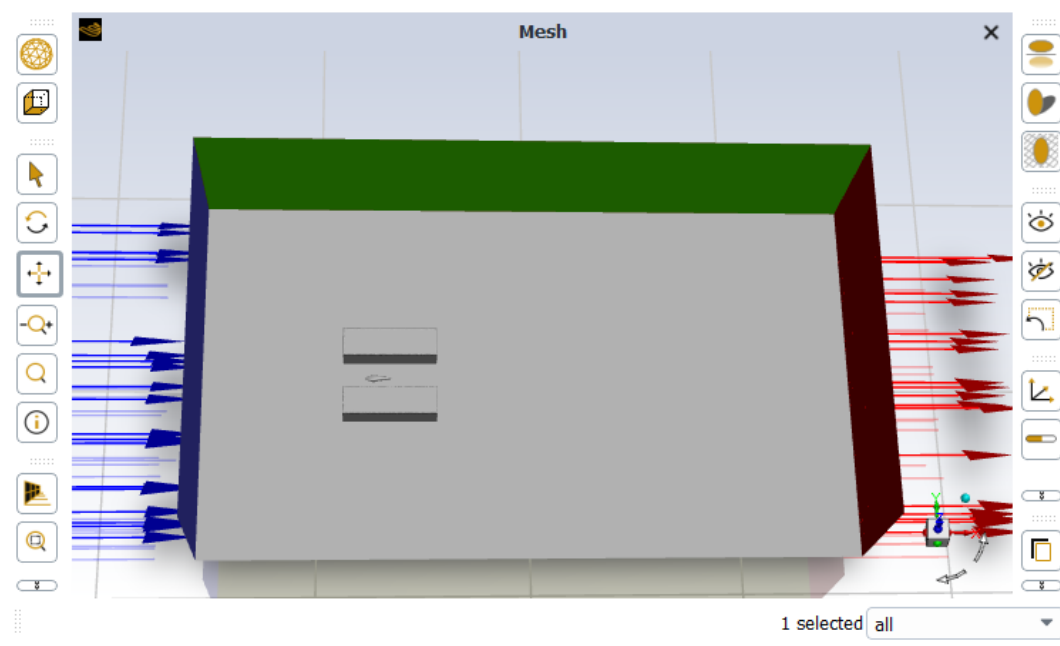


Σχήμα 7-5 Απεικόνιση του μοντέλου Orca και των πλευρικών κτιρίων σε μορφή υπολογιστικού πλέγματος (πρόοψη)

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, το πλέγμα κατασκευάστηκε πιο πυκνό στις περιοχές ενδιαφέροντος μελέτης, δηλαδή στα σημεία σύνδεσης της Orca με το κάτω τμήμα του υπολογιστικού πλέγματος (floor), στα 2 προστιθέμενα κτίρια και γενικότερα σε όλες τις περιοχές που χρειάζεται πιο λεπτομερής περιγραφή και ανάλυση όλων των φαινομένων και διαταραχών που συμβαίνουν λόγω της αλληλεπίδρασης της ροής με τα εμπόδια και πιο συγκεκριμένα τις γεωμετρίες του υπολογιστικού πεδίου. Όπως προαναφέρθηκε και στην πρώτη περίπτωση προσομοίωσης (**case 1**) αυτή η πύκνωση του πλέγματος ορίζεται ως πρισματικά επίπεδα (**layers**) τα οποία συμβάλλουν στην αποφυγή αριθμητικής διάχυσης καθώς και στην δημιουργία ποιοτικότερου πλέγματος το οποίο εκφράζει με περισσότερη ακρίβεια τα φαινόμενα που συμβαίνουν και κατ' επέκταση θα προσεγγίσει ορθότερα τα αριθμητικά αποτελέσματα σε αυτές τις κρίσιμες περιοχές του πεδίου. Τα συνολικά κελιά του πλέγματος ανέρχονται στα 2.067.269 και οι κόμβοι στους 408.185.

7.1.3 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες

Οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες, όπως προαναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο θεωρούνται ένα αρκετά σημαντικό σκέλος της προεπεξεργασίας της προσομοίωσης και συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην ορθότητα των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν. Ομοίως με την 1^η περίπτωση προσομοίωσης οι συνιστώσες που θα μελετηθούν και στην συνέχεια θα σχολιαστούν είναι η **πίεση (P)**, η **ταχύτητα (U)**, η **τυρβώδης κινητική ενέργεια (k)** και ο **ειδικός ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω)**. Ουσιαστικά, θα ξαναοριστούν όλες οι παράμετροι, οι μεταβλητές, οι σταθερές και οι συνθήκες ροής που επικρατούν εντός του υπολογιστικού χωρίου και έπειτα θα ξεκινήσει η επίλυση του προβλήματος προσομοίωσης. Παρακάτω παρουσιάζεται το υπολογιστικό χωρίο στο οποίο περιέχονται τα δύο κτίρια και το μοντέλο Orca καθώς επίσης απεικονίζονται η είσοδος (inlet) και η έξοδος (outlet) της ροής σε περιβάλλον **ANSYS FLUENT**.



Σχήμα 7-6 Υπολογιστικό χωρίο σε περιβάλλον FLUENT

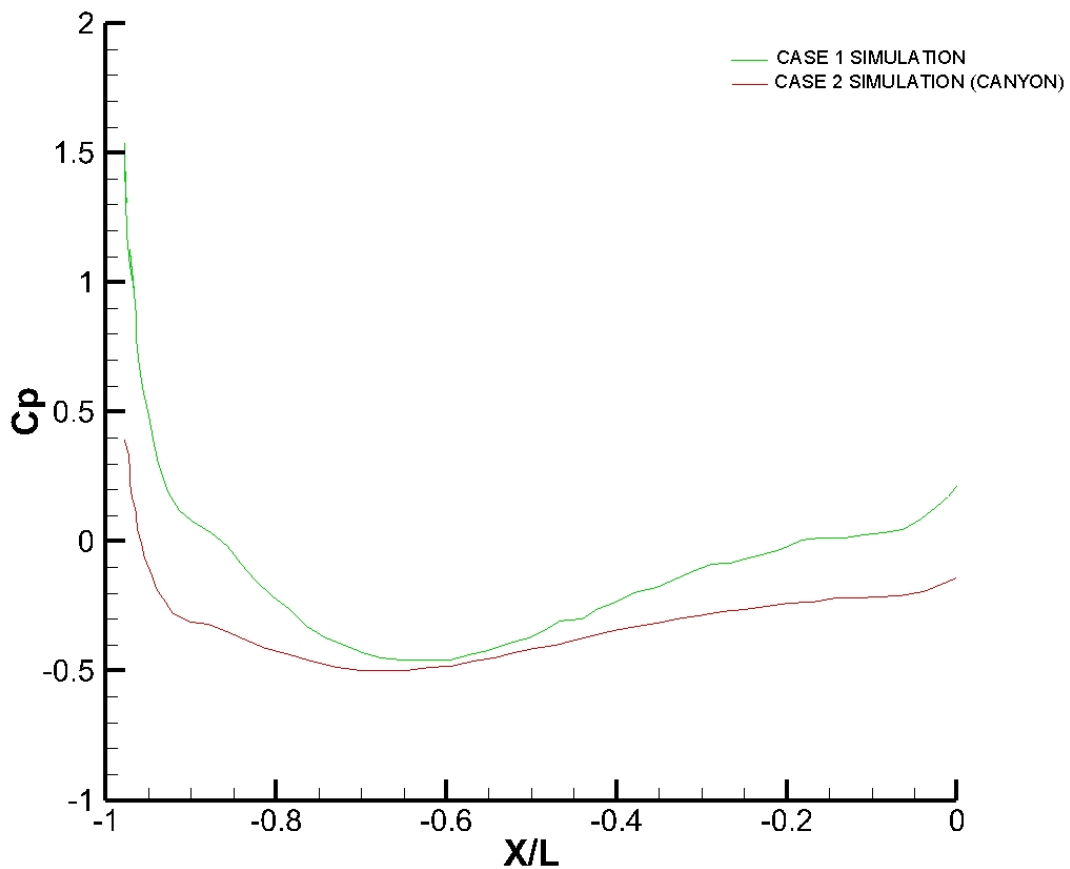
Κατά κύριο λόγο οι παράμετροι και οι συνθήκες ροής που ορίστηκαν είναι οι ίδιες με την 1^η προσομοίωση. Η ταχύτητα του οχήματος θα οριστεί ξανά στα **30 m/s** το οποίο θα προσομοιωθεί στο πρόγραμμα με την είσοδο μιας σταθερής τιμής ταχύτητας ροής στην αρχή του υπολογιστικού πεδίου. Ο αριθμός

Reynolds θα είναι ξανά 5.55×10^6 και πάλι θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο **SST (k- ω)** για χρονικά σταθερή ροή ασυμπίεστου ρευστού (**σταθερή πυκνότητα**). Επίσης στην επιλογή μοντέλου τύρβης επιλέχθηκε ξανά και η διόρθωση καμπυλότητας (**curvature correction**) καθώς θα πρέπει να ληφθεί πάλι υπόψη και η καμπυλότητα που μπορεί να παρουσιάσει το πεδίο ροής. Η **τυρβώδης κινητική ενέργεια (k)** και ο **ειδικός ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω)** έχουν τις ίδιες τιμές με την πρώτη περίπτωση προσομοίωσης της ροής.

Όσον αφορά τον τύπο της οριακής συνθήκης εξόδου θα είναι ξανά μία **έξοδος πίεσης (Pressure outlet)** η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό της στατικής πίεσης στη έξοδο της ροής. Η άνω, η δεξιά και η αριστερή επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου λαμβάνουν **συνθήκη συμμετρίας (symmetry)**. Το έδαφος (κάτω επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου) λαμβάνει οριακή συνθήκη ως κινούμενο τοίχωμα (**Moving Wall**) και όπως προαναφέρθηκε κινείται με **30 m/s** σε σχέση με το όχημα. Το όχημα και τα κτίρια που βρίσκονται παράπλευρα αυτού θα λάβουν συνθήκη σταθερού τοιχώματος χωρίς ολίσθηση (**Stationary Wall - No Slip Condition**). Αναφορικά με τον επιλυτή και την μέθοδο επίλυσης, ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία με την 1^η προσομοίωση της ροής.

7.1.4 Σύγκριση συντελεστή πίεσης C_p (Case 1 – Case 2)

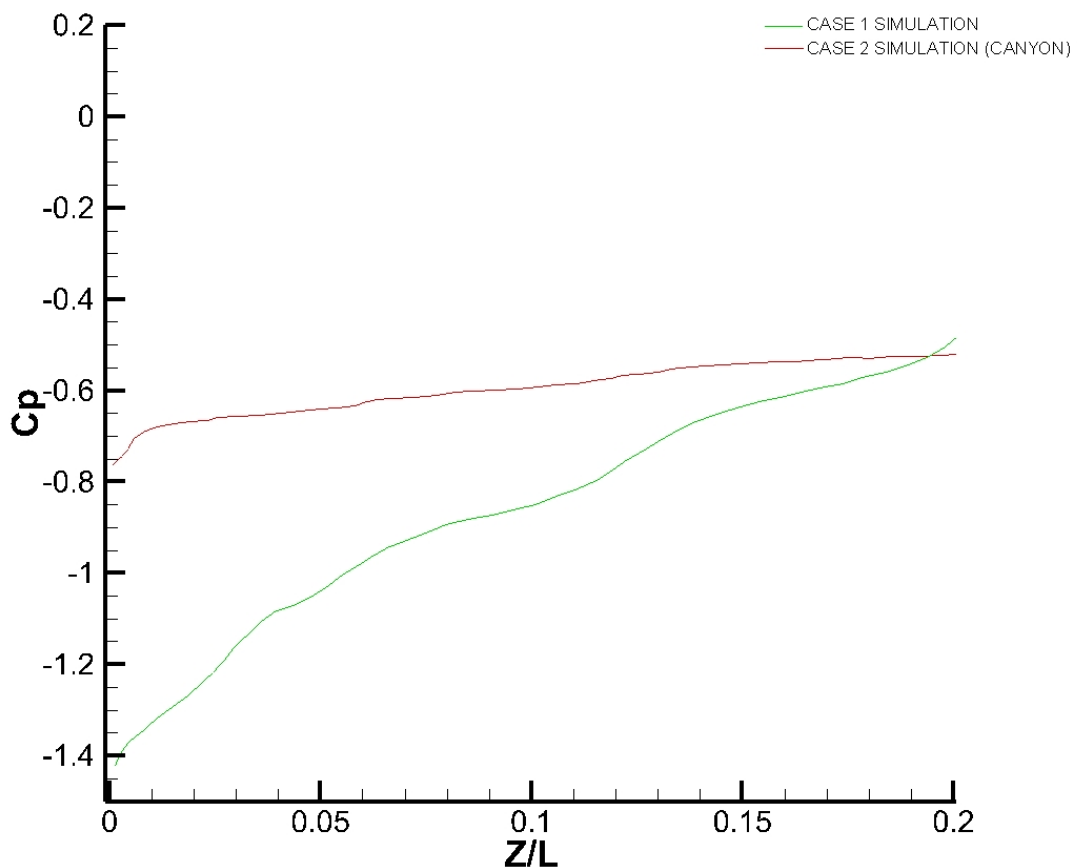
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα συγκριθούν τα γραφήματα της πρώτης (**case 1**) και της δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (**case 2**) έτσι ώστε να σχολιασθεί η επίδραση της προσθήκης κτιρίων στο πεδίο ροής.



Σχήμα 7-7 Συγκριτική απεικόνιση γραφημάτων πρώτης (case 1) και δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (case 2) σε ταχύτητες 30 m/s και Reynolds $5,55 \times 10^6$ κατά μήκος του οχήματος

Παρατηρώντας τα παραπάνω γραφήματα γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι διαφέρουν αισθητά όσον αφορά τις τιμές συντελεστή πίεσης C_p . Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η προσθήκη των κτιρίων δημιουργεί συνθήκες υποπίεσης και ταυτόχρονης αύξησης ταχύτητας στο πεδίο ροής ανάμεσα στα κτίρια και το όχημα σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli, άρα για το λόγο αυτό η πράσινη καμπύλη (**case 1**) προσεγγίζει μεγαλύτερες τιμές C_p από την κόκκινη καμπύλη (**case 2**). Εκτός αυτού η μορφή και οι αυξομειώσεις των καμπυλών

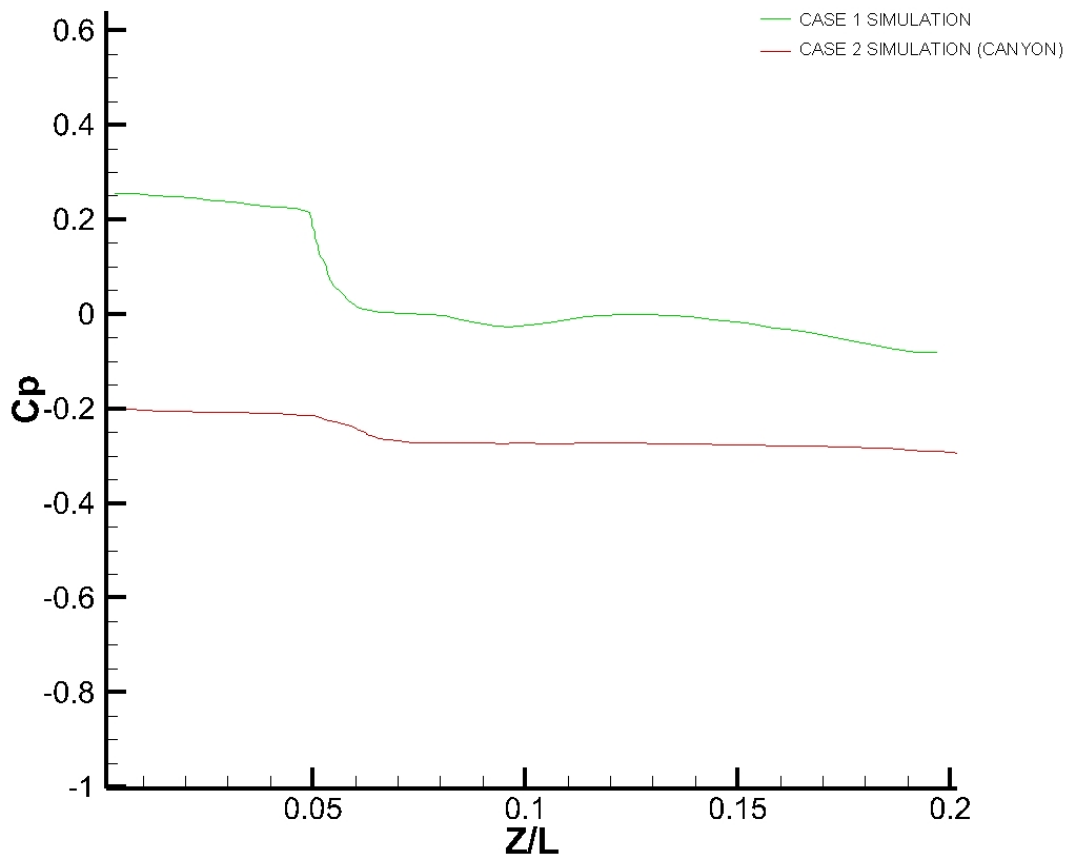
σχετικά με τον συντελεστή πίεσης ακολουθούν το ίδιο φυσικό μοτίβο απλά με διαφορετικές αριθμητικές τιμές όπως προειπώθηκε.



Σχήμα 7-8 Συγκριτική απεικόνιση γραφημάτων πρώτης (case 1) και δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (case 2) σε ταχύτητες 30 m/s και Reynolds $5,55 \times 10^6$ στο «μπροστινό πόδι» οχήματος

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η παρουσία κτιρίων αυξάνει τον συντελεστή πίεσης στο «μπροστινό πόδι» της Oca (κόκκινη γραμμή). Με λίγα λόγια, η προσθήκη κτιρίων στην προσομοίωση δημιούργησε μεγαλύτερη πίεση πλευρικά του οχήματος, σε αντίθεση με τη ράχη του οχήματος όπου τα κτίρια δημιούργησαν χαμηλότερες πιέσεις.

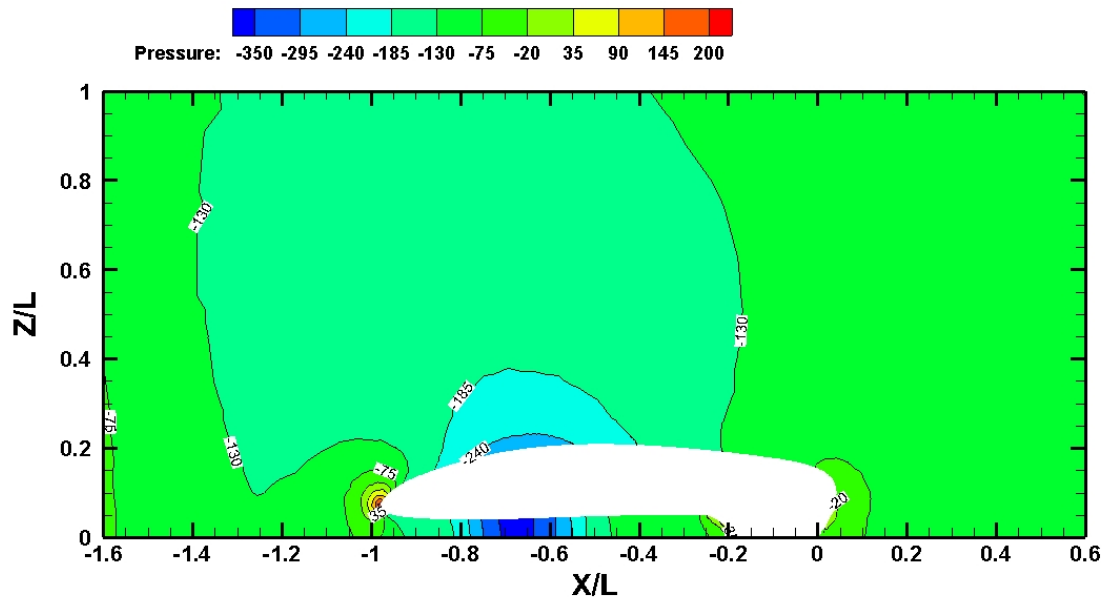
Αναφορικά με το πίσω πόδι της Orca η αυξομείωση καθώς και οι τιμές του συντελεστή πίεσης των 2 προσομοιώσεων επεξηγούνται ξανά σύμφωνα με όλες τις παραδοχές και φυσικές ερμηνείες που εξηγήθηκαν αναλυτικότερα πιο πάνω.



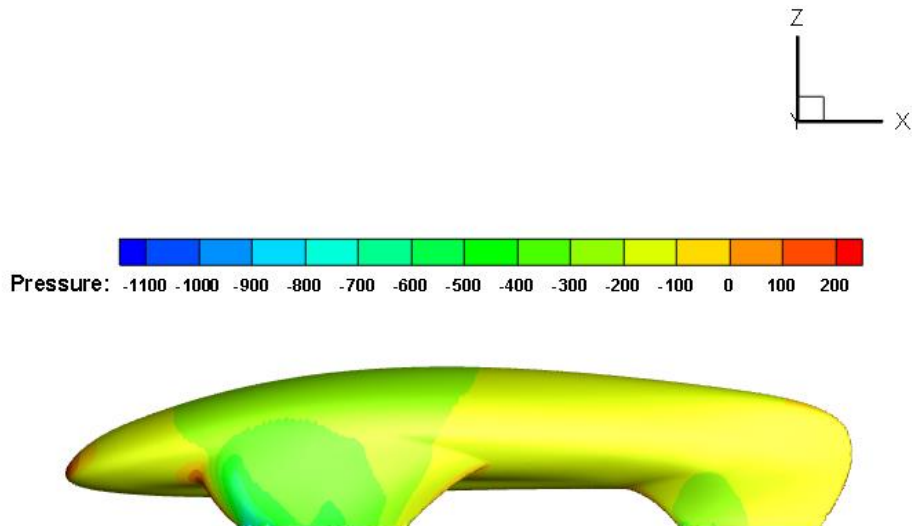
Σχήμα 7-9 Συγκριτική απεικόνιση γραφημάτων πρώτης (case 1) και δεύτερης περίπτωσης προσομοίωσης (case 2) σε ταχύτητες 30 m/s και Reynolds $5,55 \times 10^6$ στο «πίσω πόδι» του οχήματος

7.1.5 Αποτελέσματα

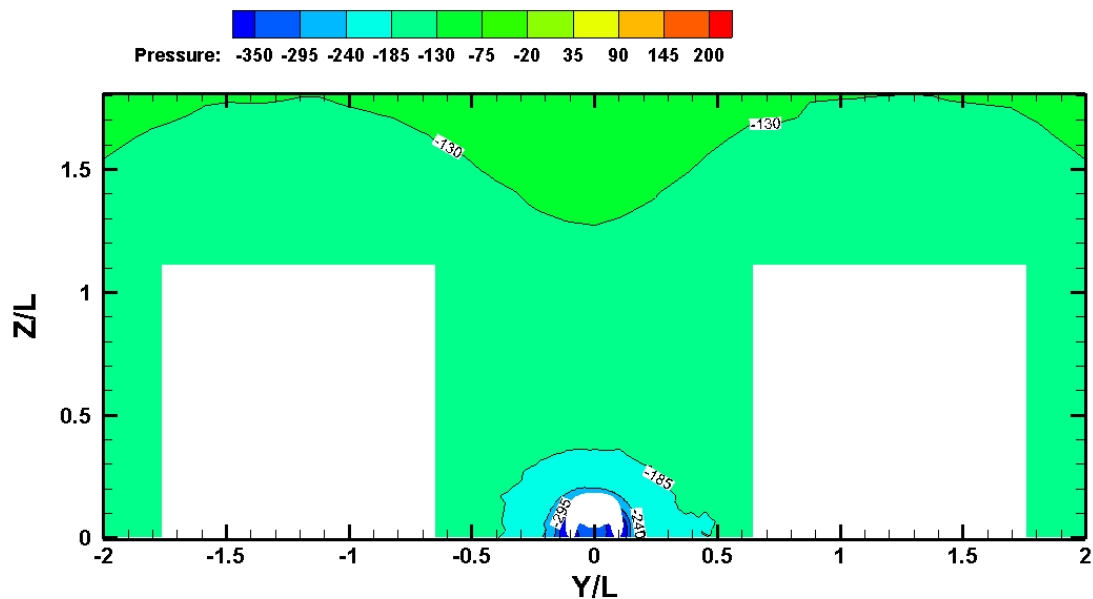
Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τα διάφορα γραφήματα όλων των σχετικών κατανομών στο επίπεδο συμμετρίας γύρω από την Οσca υπό την ύπαρξη κτιρίων πλευρικά του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, θα δειχθεί κατά πόσο θα υπάρξει μεταβολή στα διάφορα φυσικά μεγέθη του πεδίου ροής με την προσθήκη των κτιρίων.



Σχήμα 7-10 Γράφημα κατανομής πίεσης στο επίπεδο συμμετρία
(Pressure Contour)



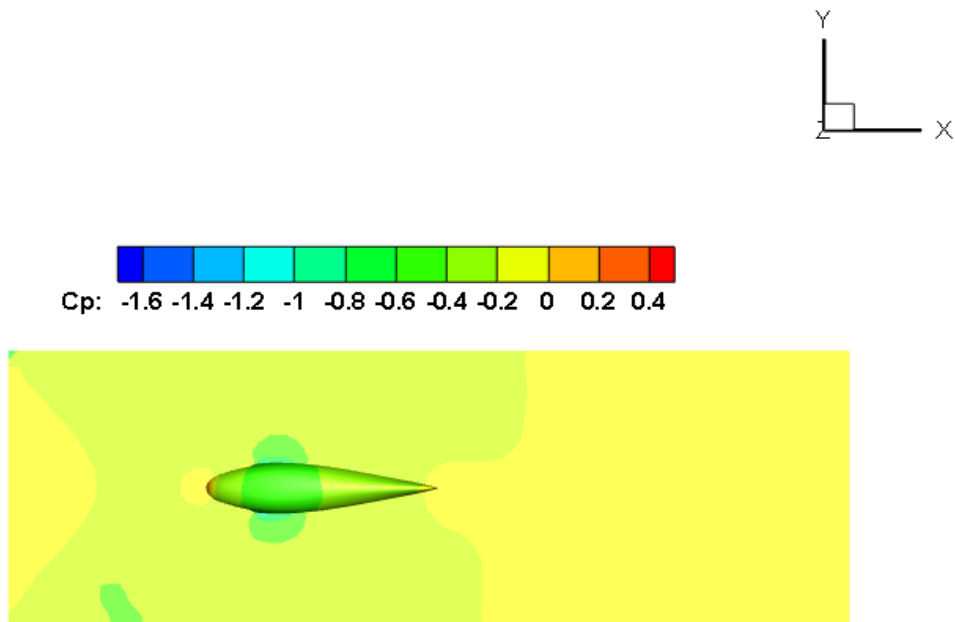
Σχήμα 7-11 Γράφημα κατανομής πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος
(Pressure Side-Surface Contour)



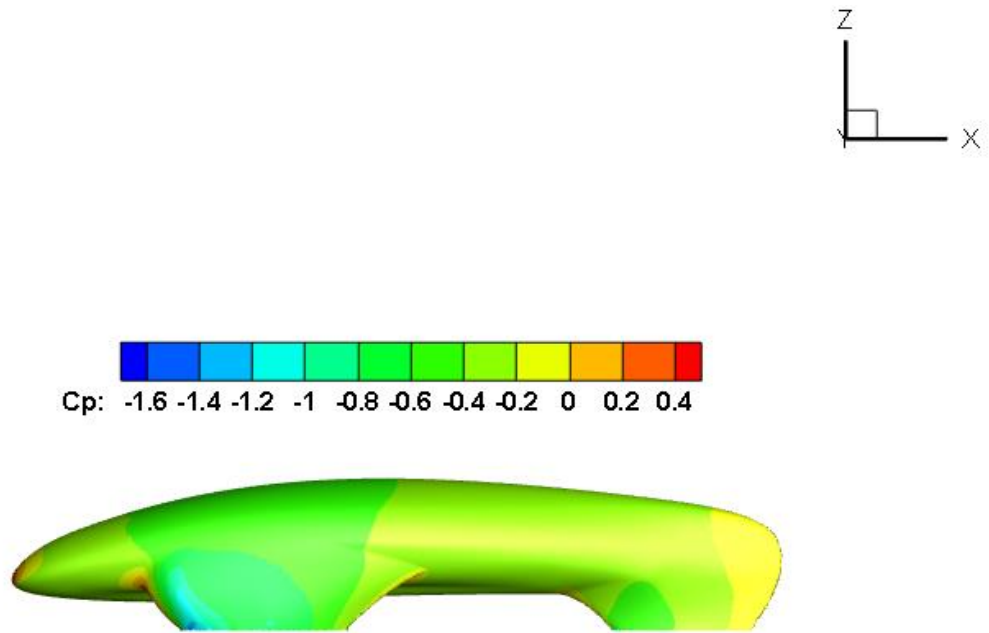
Σχήμα 7-12 Γράφημα κατανομής πίεσης σε πρόοψη
(Pressure Front-Surface Contour)

Όπως φαίνεται στα παραπάνω γραφήματα η κατανομή της πίεσης ακολουθεί το ίδιο μοτίβο αυξομείωσης με την πρώτη περίπτωση της προσομοίωσης. Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες τιμές πίεσης παρατηρούνται ξανά στα σημεία

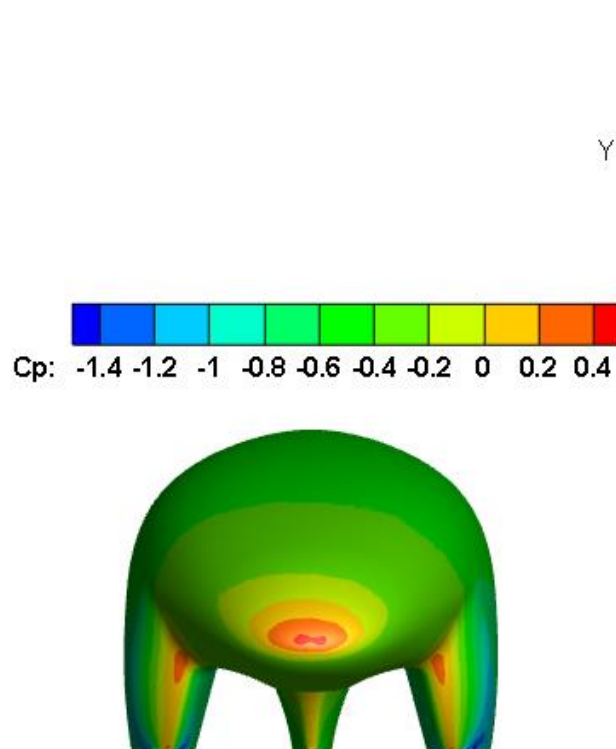
ανακοπής (μπροστίνο τμήμα οχήματος) και ανακυκλοφορίας της ροής (απόληξη οχήματος) και οι χαμηλότερες τιμές ανάντη και κατόντη της επιφάνειας της Orca. Τα κτίρια συνεπώς, δεν επηρεάζουν ποιοτικά τις αυξομειώσεις της πίεσης αλλά ποσοτικά, καθώς παρατηρούνται μόνο αριθμητικές αλλαγές της πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται χαμηλότερη μέγιστη πίεση από την πρώτη περίπτωση προσομοίωσης (200 έναντι 225). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι τα κτίρια καθώς βρίσκονται αμφίπλευρα του οχήματος, δημιουργούν ένα περιβάλλον **υποπίεσης** εσωτερικά του πεδίου ροής με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ελαφρώς μεγαλύτερες ταχύτητες και συνεπώς μικρότερες τιμές πιέσεων. Το ίδιο ισχύει και για τα γραφήματα του C_p .



Σχήμα 7-13 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια οχήματος - εδάφους (Pressure Coefficient Top - View Contour)

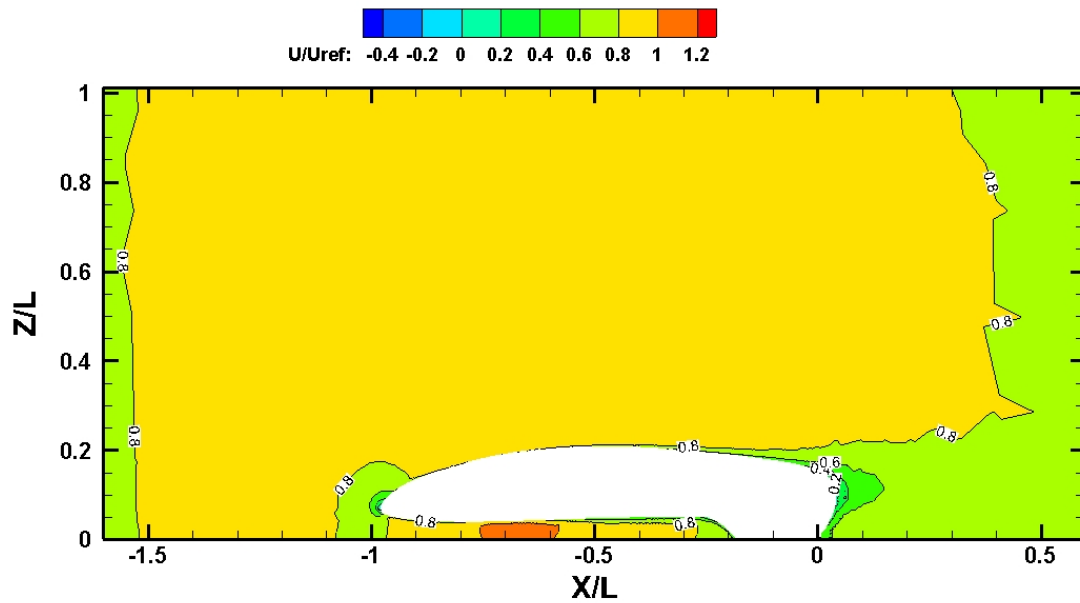


Σχήμα 7-14 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια οχήματος
(Pressure Coefficient Side-Surface Contour)

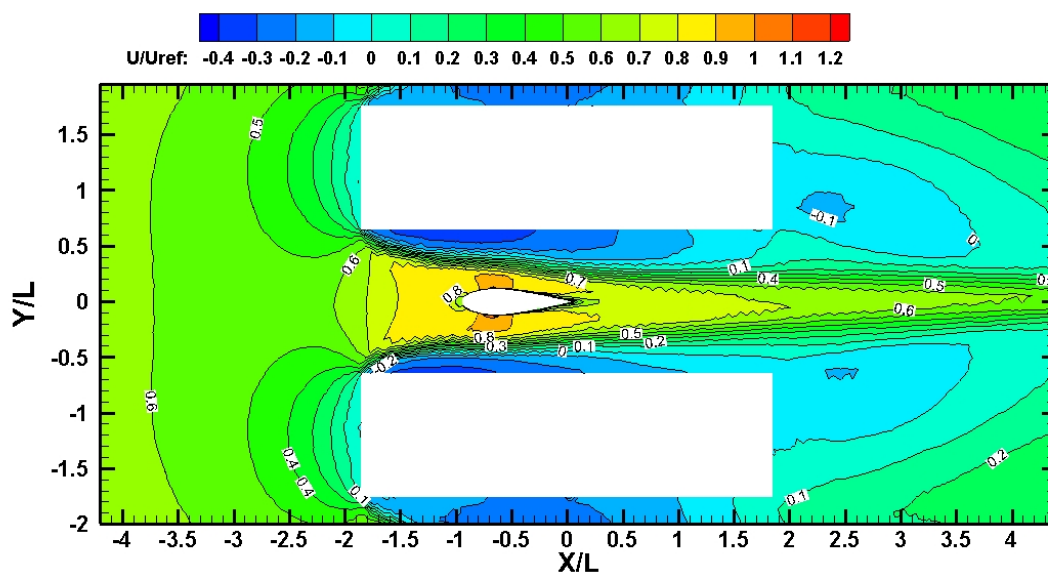


Σχήμα 7-15 Γράφημα κατανομής συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια οχήματος
σε πρόοψη (Pressure Coefficient Front - View Contour)

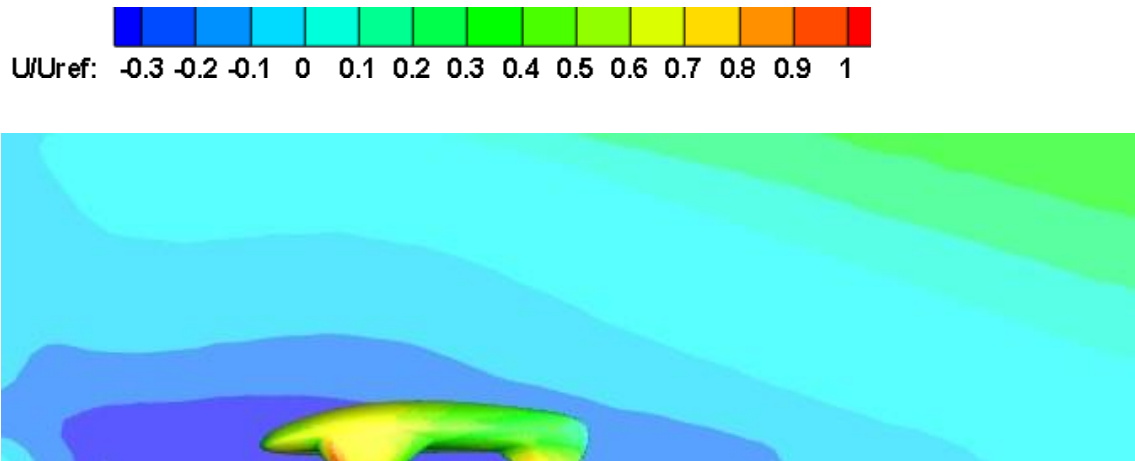
Όσον αφορά τα γραφήματα των μέσων αδιάστατων ταχυτήτων παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές θα βρίσκονται στον ενδιάμεσο χώρο των κτιρίων του πεδίου ροής και ειδικότερα ανάντη και κατόντη του οχήματος. Μετά το πέρας της περιοχής των κτιρίων (**Canyon**) είναι λογικό να παρατηρούνται φαινόμενα ανακυκλοφορίας και αποκοπής της ροής με αποτέλεσμα οι τιμές της ταχύτητας να πέφτουν σημαντικά και να σχηματίζεται **απόρρους (wake)**. Με λίγα λόγια, ποιοτικά οι αυξομειώσεις ταχύτητας είναι πανομοιότυπες με την πρώτη προσομοίωση, αλλά όπως και στις πιέσεις παρατηρούνται αριθμητικές αλλαγές στην περιοχή ενδιαφέροντος λόγω προσθήκης των κτιρίων.



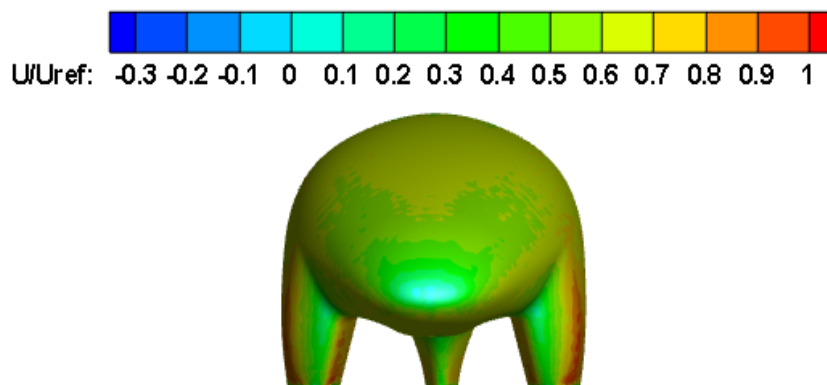
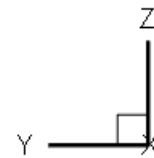
Σχήμα 7-16 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας
(Dimensionless Velocity Contour)



Σχήμα 7-17 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας σε κάτοψη ($Z=0,3$)
(Dimensionless Velocity Contour-Top View)

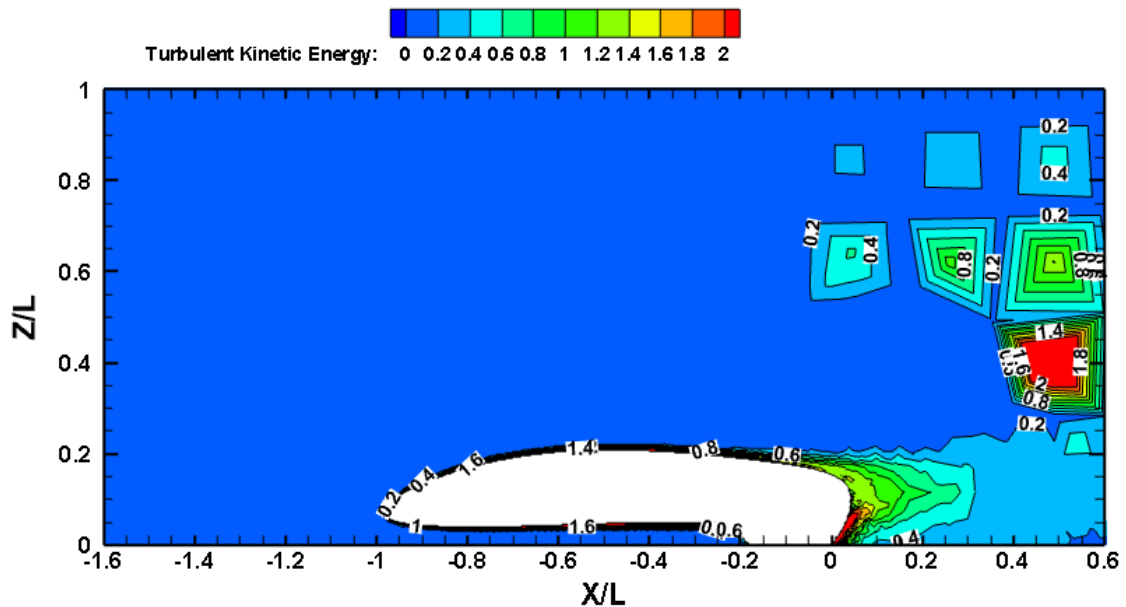


Σχήμα 7-18 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στην επιφάνεια οχήματος - κτιρίου
(Dimensionless Velocity Side - Surface Contour)

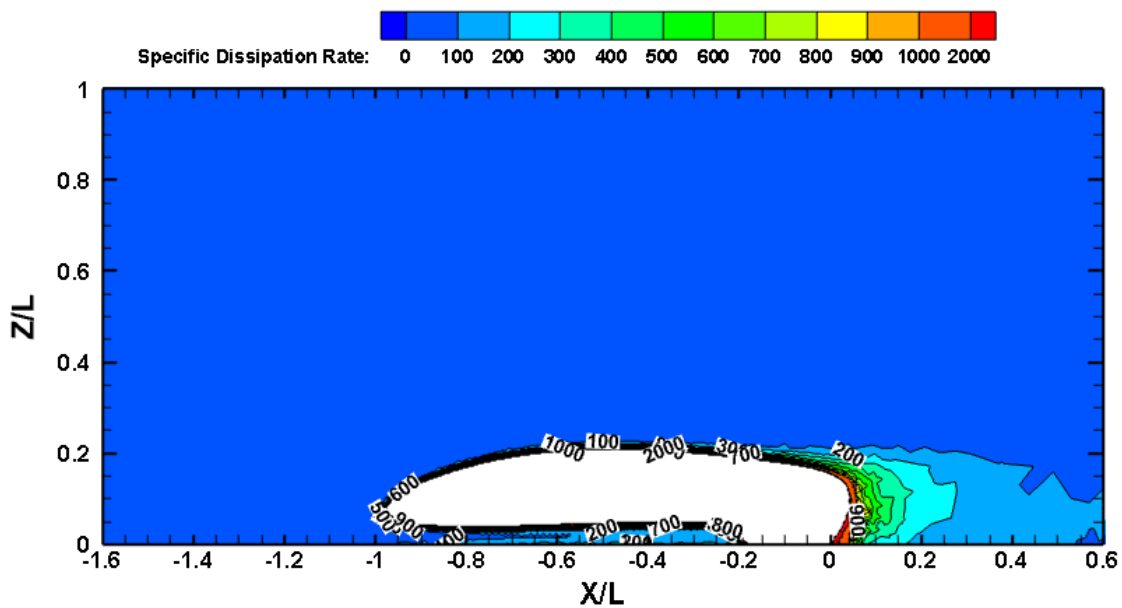


Σχήμα 7-19 Γράφημα αδιάστατης ταχύτητας στην πρόοψη οχήματος
(Dimensionless Velocity Front - Surface Contour)

Τέλος, αναφορικά με τα **μεγέθη τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k)** και **ειδικού ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω)** οι περισσότερες μεταβολές παρατηρούνται στην απόληξη του οχήματος, όπως και στην πρώτη περίπτωση προσομοίωσης, αφού στην απόληξη του οχήματος παρατηρούνται μεγάλες τιμές ρυθμού διάχυσης και εμφανίζονται έντονες αλληλεπιδράσεις δινών άρα και μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας, καθώς λαμβάνουν χώρα τα εντονότερα φαινόμενα τύρβης του εξεταζόμενου πεδίου ροής.



Σχήμα 7-20 Γράφημα τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) στο επίπεδο συμμετρίας (Turbulent Kinetic Energy Contour)



Σχήμα 7-21 Γράφημα ειδικού ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ω) στο επίπεδο συμμετρίας (Specific Dissipation Rate Contour)

8 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

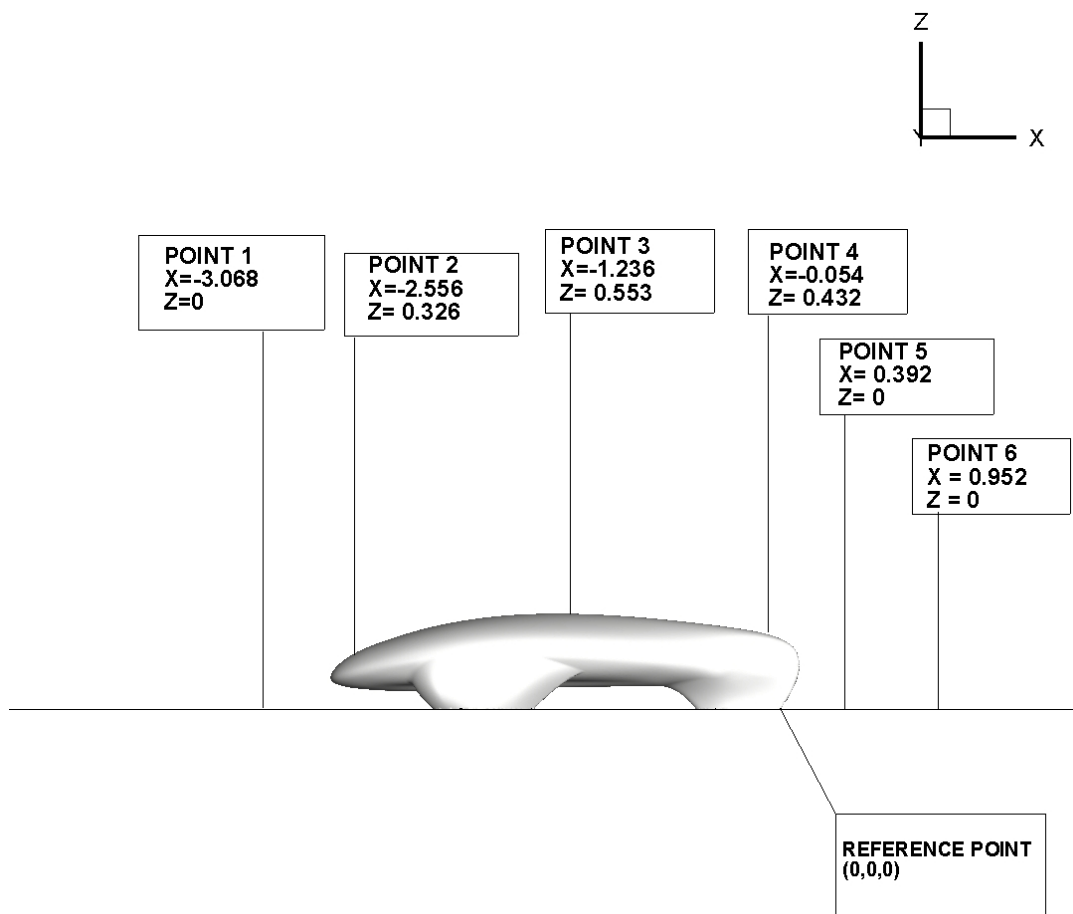
8.1 Συντελεστές οπισθέλκουσας και άντωσης (C_d , C_l)

Οι συντελεστές οπισθέλκουσας και άντωσης όπως αναφέρθηκαν και στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής είναι δύο αδιάστατοι συντελεστές που υποδηλώνουν την αποδοτικότητα και επίδοση ενός οχήματος. Αλλάζοντας τις συνθήκες και τα δεδομένα ενός πεδίου ροής, καθώς και τις γεωμετρίες που περιλαμβάνονται σε αυτό, είναι φυσικό να μεταβάλλονται και οι τιμές των συντελεστών αυτών. Συνεπώς, στις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης παρατηρούνται διαφορές στις τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας και άντωσης. Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με το συντελεστή οπισθέλκουσας στην 1^η περίπτωση προσομοίωσης (χωρίς κτίρια) και ταχύτητα 30 m/s η τιμή του είναι $C_d = 0.11879$ και στην 2^η περίπτωση έπειτα από την προσθήκη κτιρίων $C_d = 0.09077406$. Άρα, γίνεται αντιληπτό ότι η προσθήκη κτιρίων συμβάλλει στην δημιουργία ενός περιβάλλοντος πεδίου ροής γύρω από την Orca που ευνοεί ακόμα περισσότερο την κίνηση του οχήματος, με πάρα πολύ χαμηλή αντίσταση

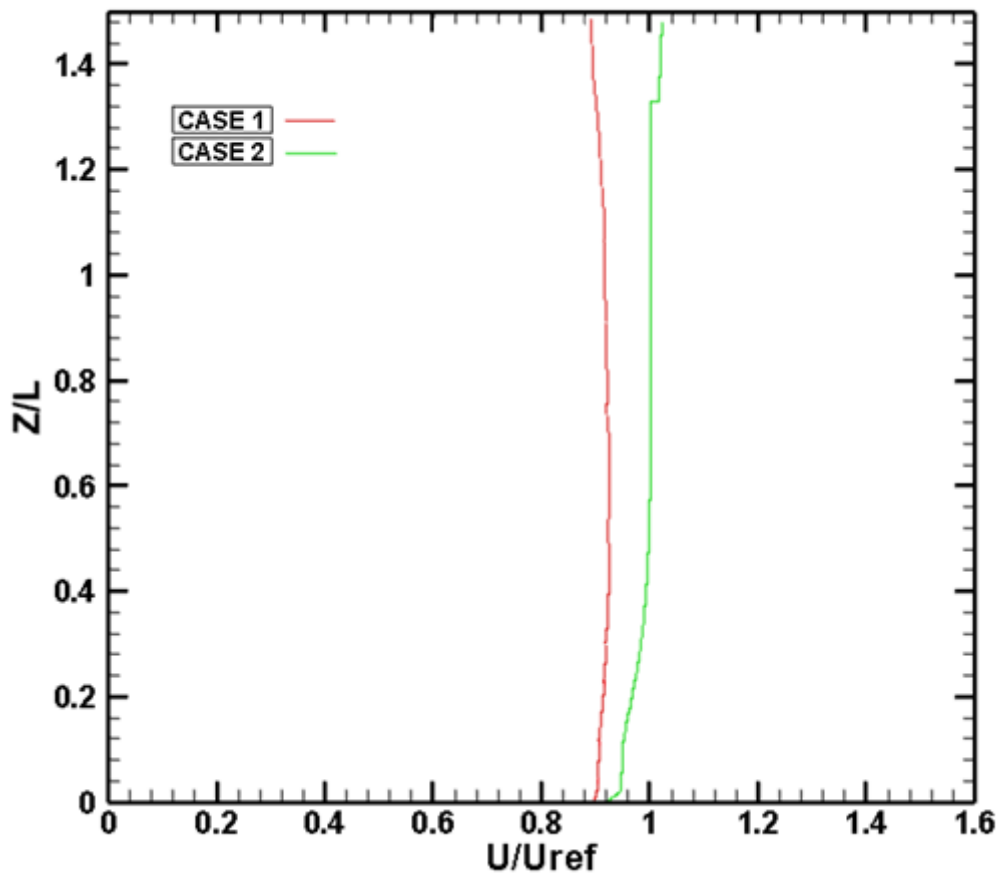
και λιγότερες τριβές της επιφάνειας του με τα μόρια του αέρα. Έτσι, στο υποτιθέμενο αυτό αστικό περιβάλλον, από αεροδυναμικής σκοπιάς, το όχημα δεν θα επηρεαστεί αρνητικά ως προς την επίδοση και την κατανάλωση που θα παρουσιάσει. Αναφορικά με τον συντελεστή άντωσης, στην 1η περίπτωση είναι $C_l = 0.028948$ και στην 2η περίπτωση $C_l = 0.3576049$. Στην πρώτη περίπτωση συνεπώς, η απουσία των κτιρίων υποδεικνύει καλύτερη πρόσφυση του οχήματος με το έδαφος. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δυσμενέστερες τιμές C_d και C_l που προαναφέρθηκαν δεν παύουν να θεωρούνται πολύ καλές τιμές συντελεστών οπισθέλκουσας και άντωσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι το όχημα έχει σχεδιαστεί εξ αρχής με σκοπό να έχει τη βέλτιστη δυνατή αεροδυναμική συμπεριφορά.

8.2 Προφίλ ταχυτήτων

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα προφίλ ταχύτητας του πεδίου ροής που λήφθηκαν από 6 σημεία στο επίπεδο συμμετρίας του οχήματος για καθεμία από τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημεία αυτά χωροθετημένα ως προς το σημείο αναφοράς (0,0,0) που βρίσκεται στο τέλος του «πίσω ποδιού» της Orca.



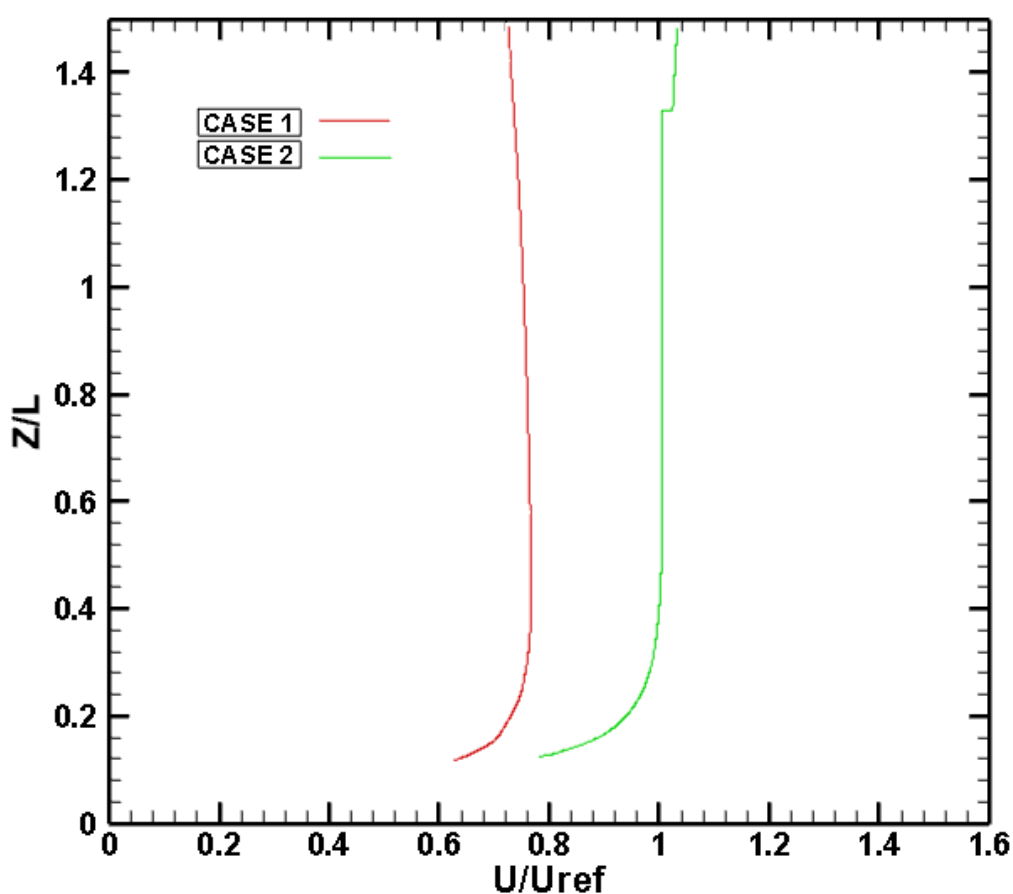
Σχήμα 8-1 Σημεία προφίλ ταχυτήτων ως προς το σημείο αναφοράς (0,0,0)



Σχήμα 8-2 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 1

Παραπάνω απεικονίζονται τα προφίλ ταχυτήτας στο σημείο 1 για τις δύο διαφορετικές προσομοιώσεις. Ως (**case 1**) θεωρείται η προσομοίωση χωρίς κτίρια και (**case 2**) η προσομοίωση με κτίρια. Οι προσομοιώσεις αμφότερες όπως έχει προαναφερθεί, έχουν ταχύτητα αναφοράς **Uref = 30 m/s** και ανάλογα την ταχύτητα ροής **U** σε συγκεκριμένα σημεία του πεδίου θα αλλάζει και το αδιάστατο μέγεθος **U/Uref**. Το σημείο 1 βρίσκεται λίγο πριν από το σημείο πρόσκρουσης της ροής με το όχημα και κατά κύριο λόγο η ταχύτητα της ροής δεν επηρεάζεται σημαντικά από κάποιο στοιχείο του πεδίου ροής. Πιο συγκεκριμένα, σε ύψος **Z/L=0**, δηλαδή στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, η αδιάστατη ταχύτητα **U/Uref** και για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης είναι λίγο κάτω από το 1. Αυτό συμβαίνει, καθώς το σημείο 1 βρίσκεται σε περιοχή που απέχει λίγο από την πρόσκρουση της ελεύθερης ροής με το όχημα και έχει

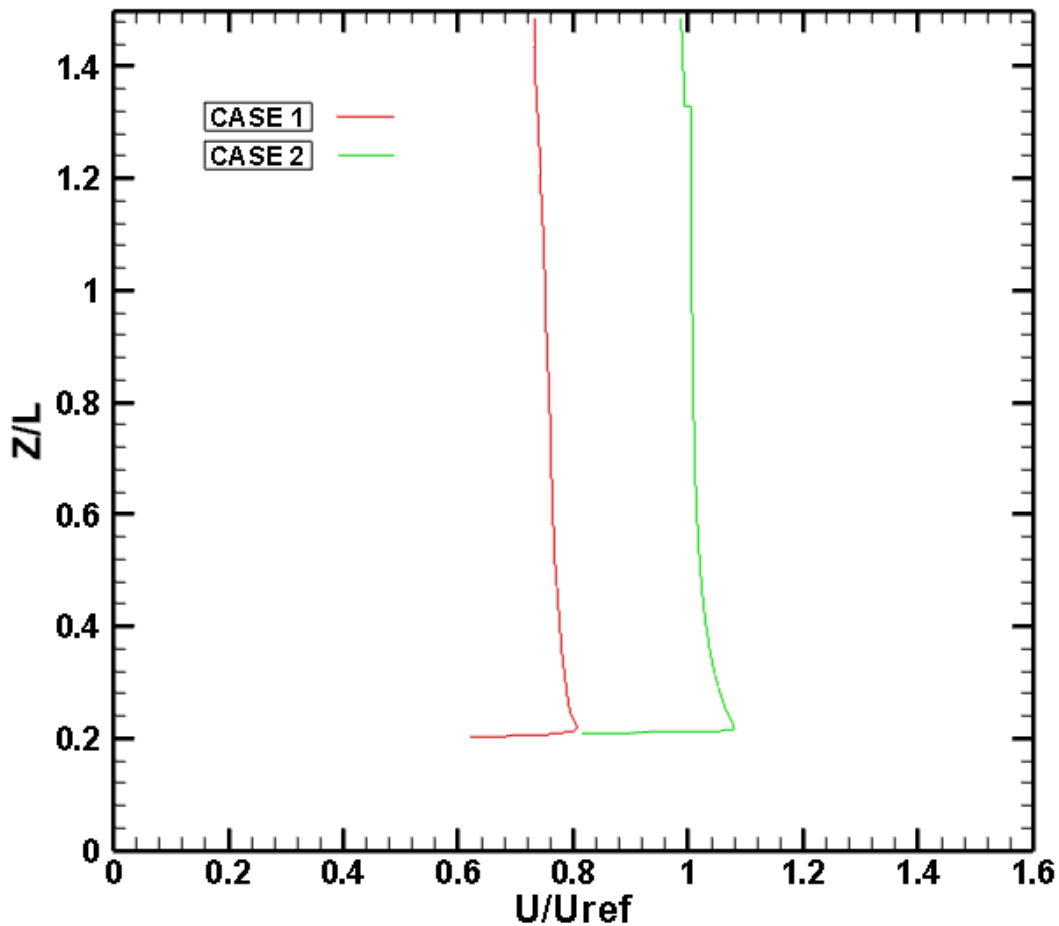
ξεκινήσει αδρά να σχηματίζεται ένα οριακό στρώμα που επηρεάζει την ταχύτητα ροής ακόμα και σε μικρό βαθμό. Όσο ανεβαίνει το **ύψος Z/H** και συγκεκριμένα από ύψος **$Z/L > 0,6$** όπου συναντάται η αδιατάρακτη ροή, παρατηρείται περισσότερο γραμμική ανάπτυξη των καμπυλών και ειδικότερα στην περίπτωση της προσομοίωσης με κτίρια (**case 2**) η ταχύτητα **U/U_{ref}** εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένη του 1, καθώς τα κτίρια εσωτερικά τους δημιουργούν ένα πιο «στενό διάδρομο» που ευνοεί την αύξηση της ταχύτητας της ροής.



Σχήμα 8-3 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 2

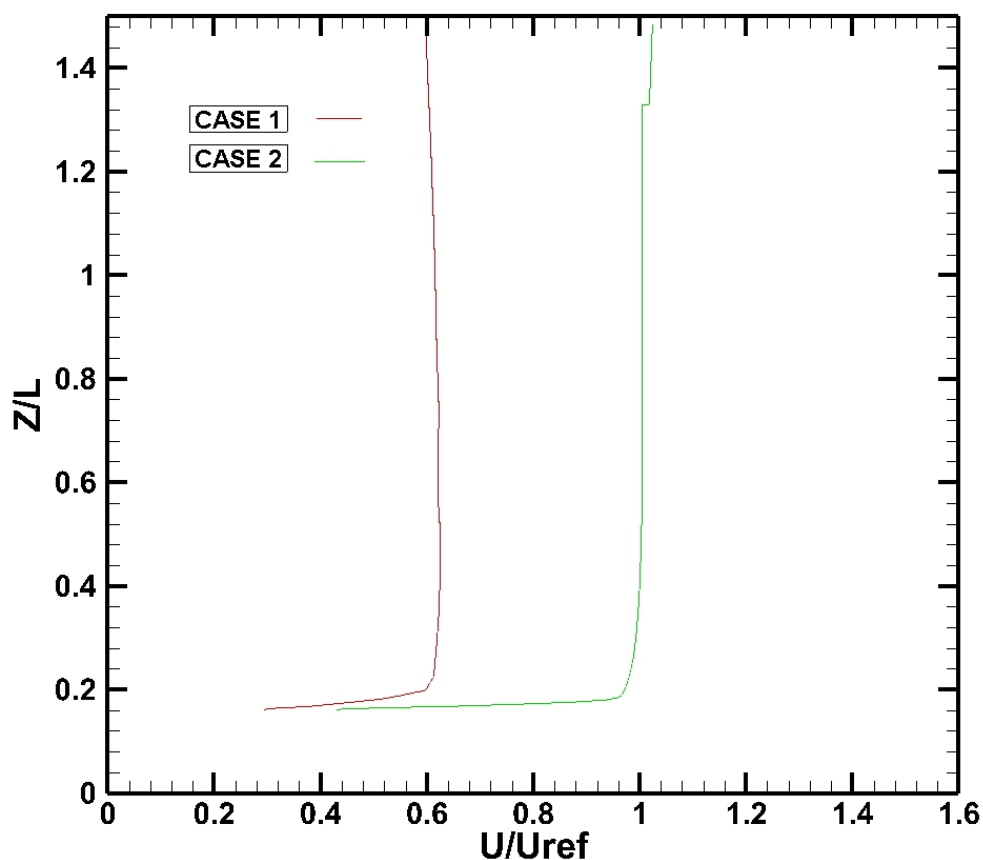
Στο σημείο 2, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η ταχύτητα ροής και για τις δύο προσομοιώσεις έχει μειωθεί σημαντικά. Κοιτώντας το **Σχήμα 7-9** γίνεται αντιληπτό ότι το σημείο 2 βρίσκεται λίγο μετά από την περιοχή πρόσκρουσης της ροής και είναι λογικό να υπάρχει μείωση της ταχύτητας,

πράγμα που δικαιολογεί και την τοπική αυτή πτώση. Έπειτα, όσο αυξάνεται το ύψος και όσο απομακρύνεται η ροή από το όχημα η ταχύτητα τείνει να επανέλθει στις τιμές κοντά στο 1, με την προσομοίωση με κτίρια να λαμβάνει ξανά μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας για τον λόγο που αναφέρθηκε στο προηγούμενο διάγραμμα.



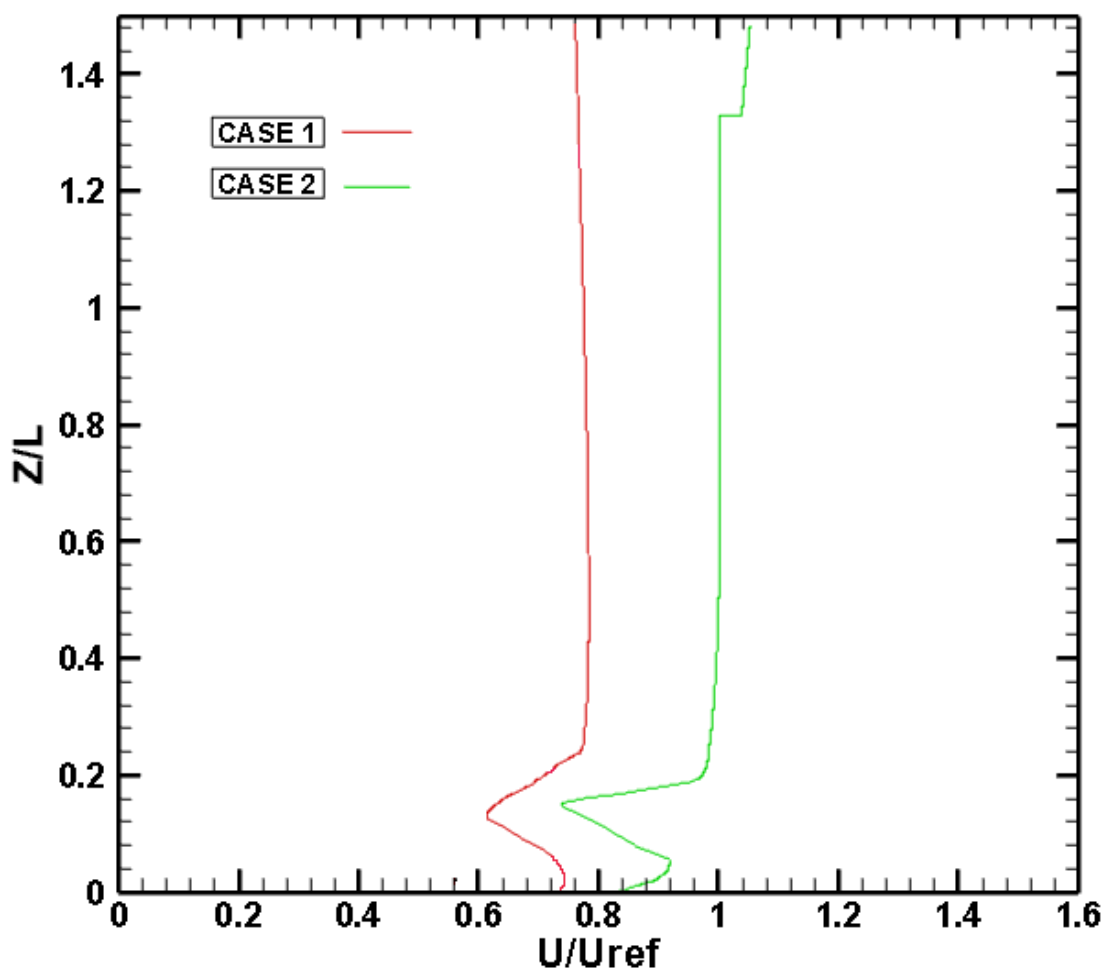
Σχήμα 8-4 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 3

Το σημείο 3 βρίσκεται σχεδόν στα μέσα του μήκους του οχήματος και είναι λογικό να έχει καταφέρει η ροή να ανακτήσει την ταχύτητα της και μάλιστα στην περίπτωση των κτιρίων να ξεπεράσει και την τιμή του 1. Με την αύξηση του ύψους και προσεγγίζοντας την περιοχή αδιατάρακτης ροής παρατηρείται ξανά ομαλοποίηση των καμπυλών και επαναφορά των τιμών σε συνθήκες αδιατάρακτης ροής.



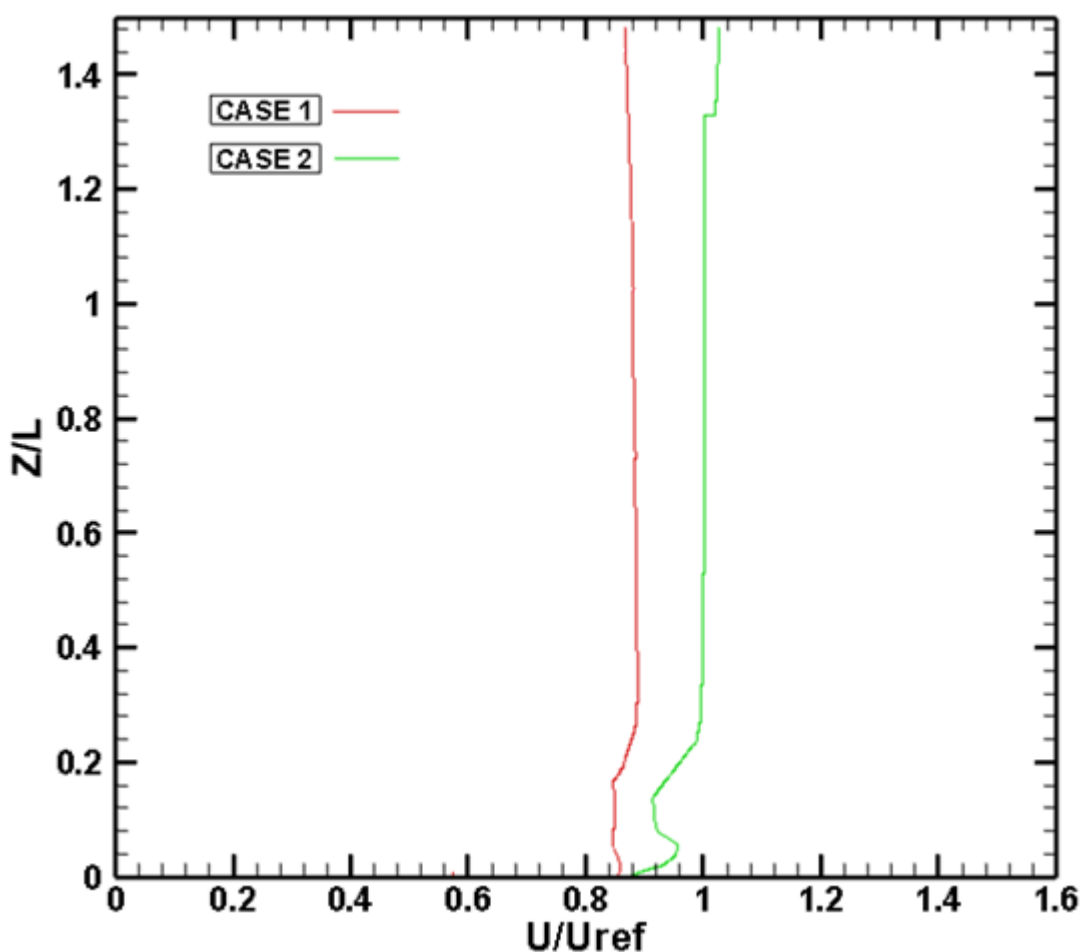
Σχήμα 8-5 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 4

Η ταχύτητα ροής στο σημείο 4 κατά κύριο λόγο έχει την ίδια εικόνα με το σημείο 3 ποιοτικά, αλλά ποσοτικά οι τιμές της ταχύτητας ροής είναι πολύ χαμηλότερες καθώς το σημείο 4 βρίσκεται κοντά στην περιοχή ανακυκλοφορίας και αποκόλλησης της ροής όπου υπάρχουν συνεχείς εναλλαγές στην ταχύτητα των σωματιδίων της ροής. Με την αύξηση του ύψους η ταχύτητα επανέρχεται στα φυσιολογικά για την κάθε προσομοίωση επίπεδα.



Σχήμα 8-6 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 5

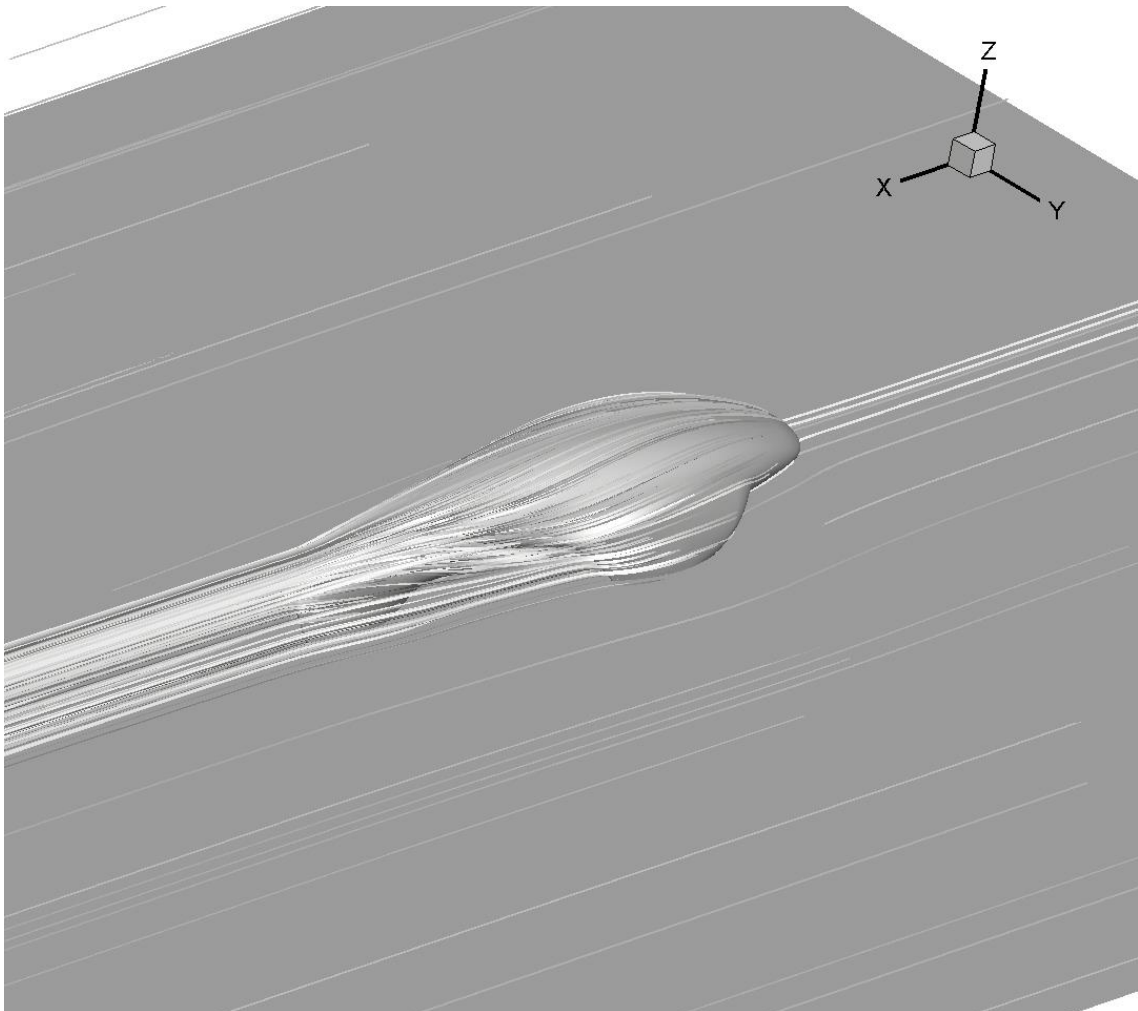
Το σημείο 5 και για ύψος $Z/L=0$ (ύψος εδάφους),καθώς βρίσκεται μετά από το πίσω μέρος του οχήματος, επηρεάζεται από την περιοχή του απόρρου της ροής (**wake region**) και είναι λογικό μέχρι το ύψος του οχήματος να υπάρχει μείωση της ταχύτητας ροής και στην συνέχεια με την αύξηση του ύψους η ταχύτητα να φτάνει κοντά στα επίπεδα της αδιατάρακτης ροής. Το σημείο 6 από την άλλη παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο από τα προαναφερόμενα ροϊκά φαινόμενα και για το λόγο αυτό παρουσιάζει προβλεπόμενη και γραμμική αύξηση των προφίλ ταχυτήτων και για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης.



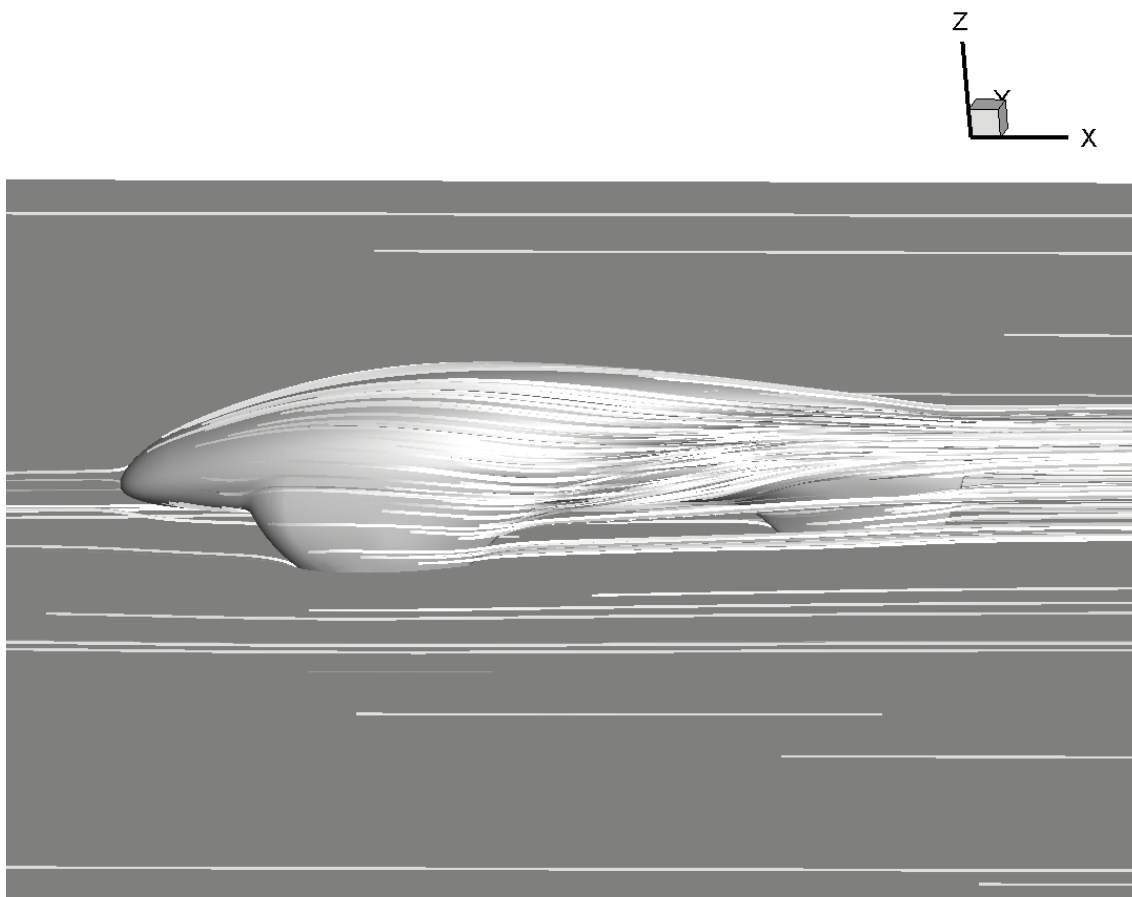
Σχήμα 8-7 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας για τις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης στο σημείο 6

8.3 Ροϊκές γραμμές πεδίου ροής

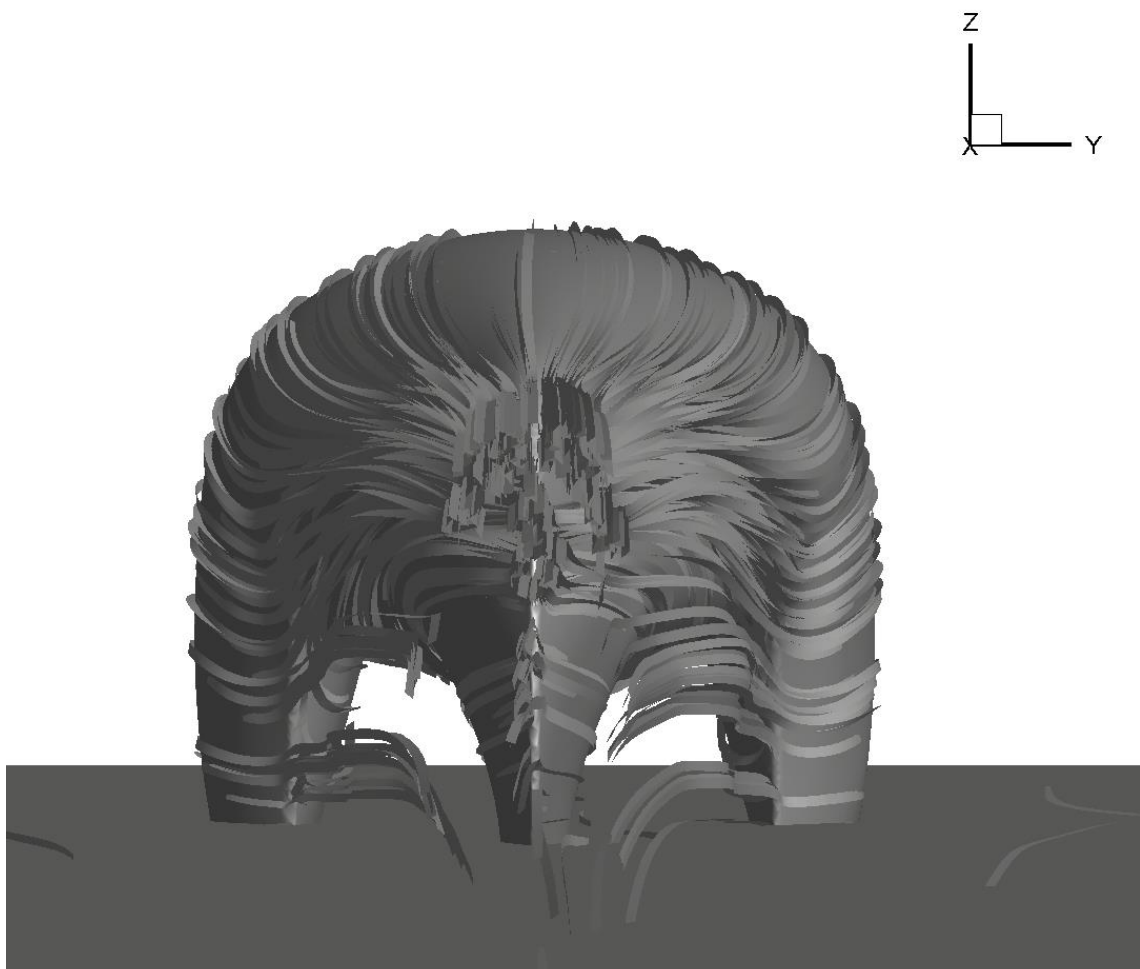
Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι ροϊκές γραμμές για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Ως ροϊκή γραμμή ενός πεδίου ροής ονομάζεται κάθε γραμμή η οποία έχει την ιδιότητα η εφαπτομένη σε κάθε σημείο της να συμπίπτει με τη διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας του ρευστού σε εκείνο το σημείο, μια δεδομένη χρονική στιγμή t (Παπαϊωάννου, 2002). Παρακάτω απεικονίζεται το σύνολο των ροϊκών γραμμών για την πρώτη περίπτωση προσομοίωσης.



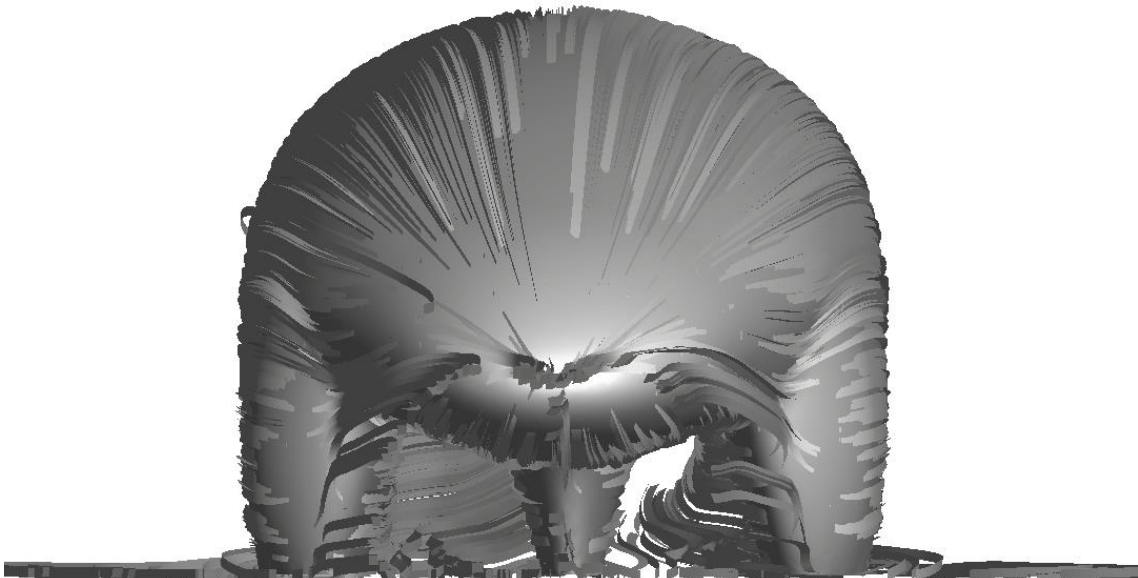
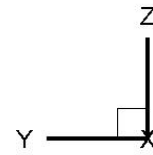
Σχήμα 8-8 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Top View)



Σχήμα 8-9 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Side View)



Σχήμα 8-10 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Back View)

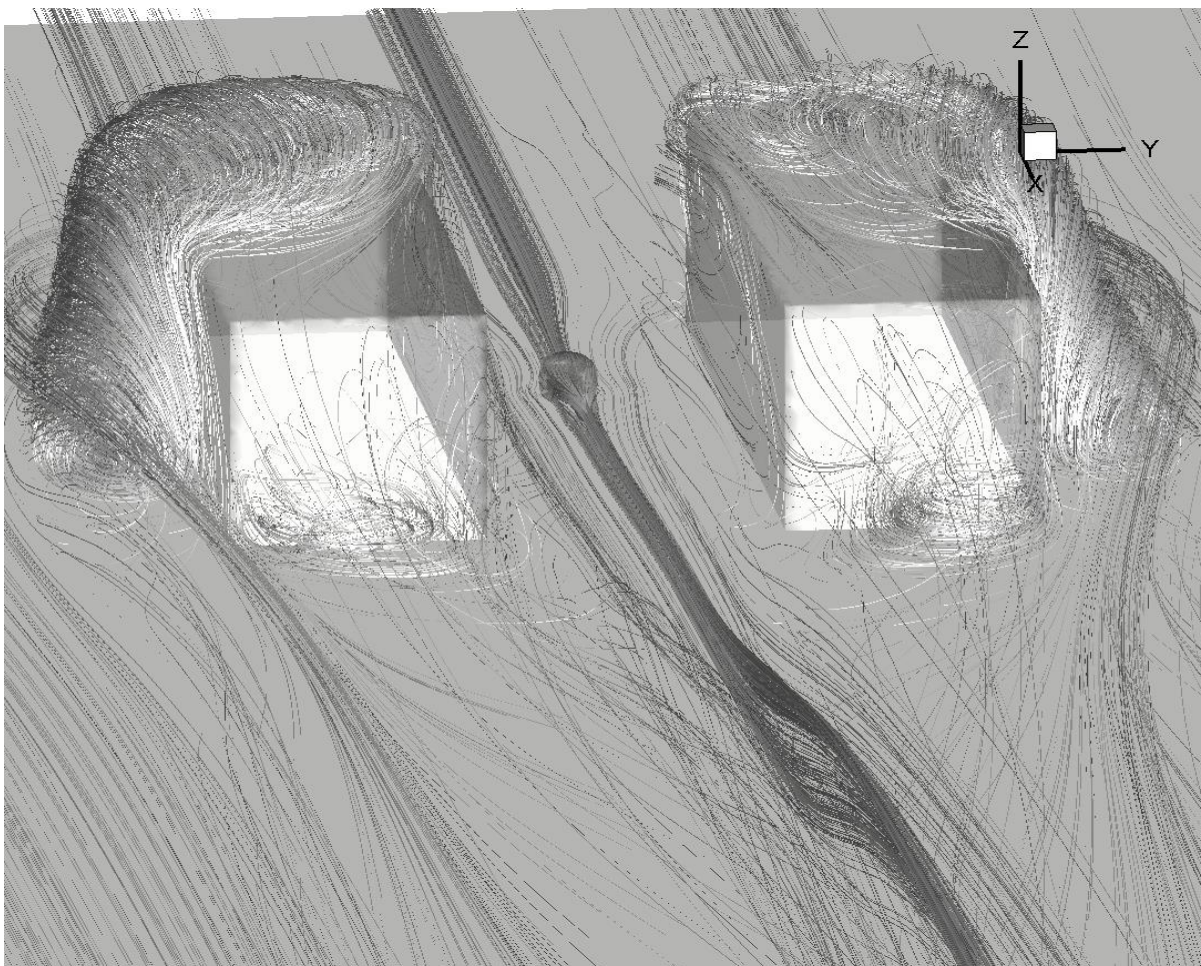


Σχήμα 8-11 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 1^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 1 – Front View)

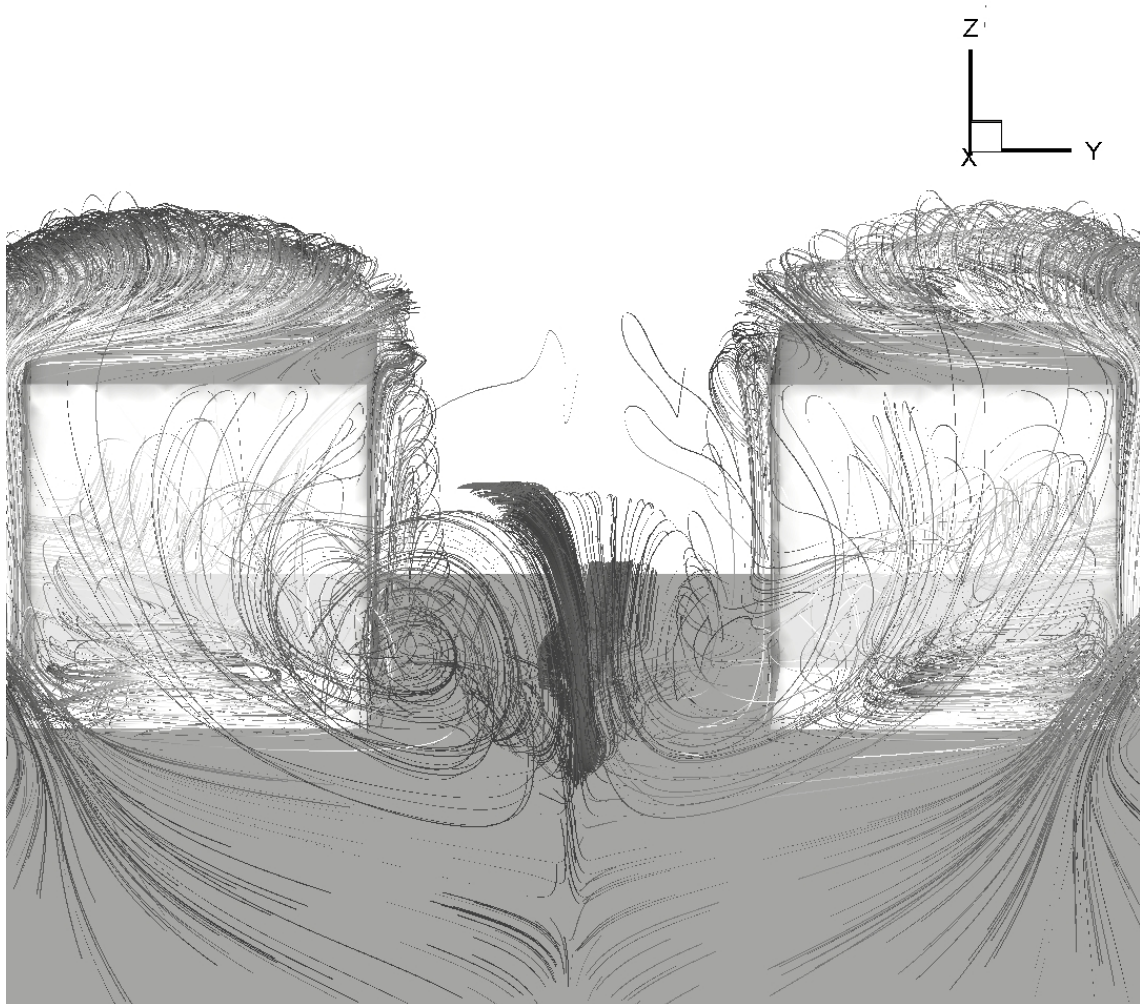
Η Orca είναι ένα μονοθέσιο όχημα το οποίο είναι κατασκευασμένο για να συμμετέχει σε αγώνες που σχετίζονται με επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης. Είναι λογικό το όχημα συνεπώς να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε από αεροδυναμικής άποψης η ροή να κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το όχημα, ευνοώντας τη ομαλή κίνηση του και προκαλώντας όσο το δυνατό μικρότερη αντίσταση και τριβή του οχήματος με τα μόρια του αέρα. Οι περιοχές στις οποίες έχουμε έντονα ροϊκά φαινόμενα είναι το μπροστινό και το πίσω τμήμα του οχήματος. Στο μπροστινό τμήμα, όπου έχει σχεδιαστεί για την κατά το δυνατό ομαλότερη πρόσκρουση της ροής με το όχημα, δεν παύει να δημιουργείται μία περιοχή που πραγματοποιείται απότομη ανακοπή της ροής, με αποτέλεσμα όλη κινητική

ενέργεια να μετατρέπεται σε πίεση. Στην συνέχεια οι ροϊκές γραμμές «ξεγλιστρούν» και κατανέμονται ομοιόμορφα περιμετρικά του οχήματος, έως ότου καταλήξουν στο πίσω μέρος της Οτσα, όπου όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες, δημιουργούνται δίνες που εκτείνονται στον απόρροου της ροής.

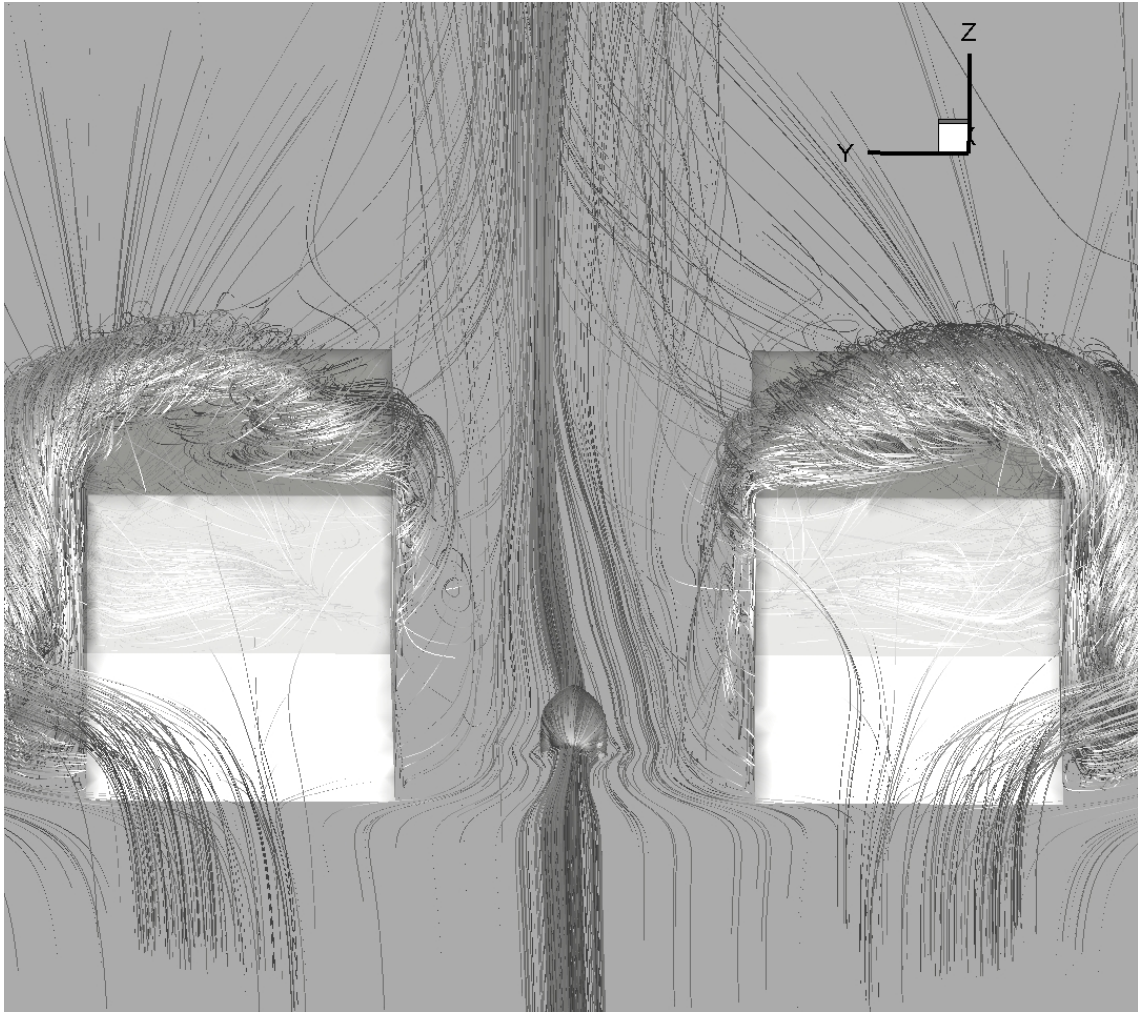
Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης η παρουσία των κτιρίων φαίνεται να προκαλεί εντονότερα φαινόμενα τύρβης με αποτέλεσμα την δημιουργία περισσότερων δινών και φαινομένων ανακυκλοφορίας και αποκόλλησης της ροής με άμεση επίδραση, όπως φάνηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, στις μεταβαλλόμενες τιμές πίεσης και ταχύτητας του πεδίου ροής.



Σχήμα 8-12 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 2^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 2 – Top View)



Σχήμα 8-13 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 2^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 2 – Back View)



Σχήμα 8-14 Ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για την 2^η περίπτωση προσομοίωσης (Case 2 – Front View)

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε το πεδίο ροής και η επίδραση του στην αεροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος Orca. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε πείραμα σε υπό κλίμακα μοντέλο και προσομοιώθηκαν τρεις περιπτώσεις ροής στις οποίες έγινε σύγκριση και ανάλυση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών και αποτελεσμάτων τους. Η μία περίπτωση προσομοίωσης εξ αυτών πραγματοποιήθηκε για τον έλεγχο ορθότητας του πειράματος (**validation**) και οι άλλες δύο για την παρουσίαση της επίδρασης και της μεταβολής που υφίσταται το πεδίο ροής με την προσθήκη κτιρίων παράλληλα του οχήματος, σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος.

Αρχικά, στο κεφάλαιο 2 γίνεται γενική αναφορά στην αεροδυναμική των οχημάτων καθώς και σε όλες τις αρχές και θεωρήματα που την απαρτίζουν. Στην συνέχεια στα κεφάλαια 3 και 4 έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση σε υπάρχουσες μελέτες αεροδυναμικής οχημάτων ως υπόβαθρο για την παρούσα εργασία και αναλύθηκε η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αντίστοιχα. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται ιστορική αναδρομή του οχήματος Orca καθώς και όλων των τεχνικών χαρακτηριστικών του. Επίσης, αναλύεται όλη η κατασκευή του υπό κλίμακα μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη μετρήσεων στην αεροσήραγγα.

Στο κεφάλαιο 6 ουσιαστικά αναλύεται όλη η πειραματική διαδικασία καθώς και η περιγραφή των περιπτώσεων προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, ο κύριος σκοπός του πειράματος ήταν ο προσδιορισμός του συντελεστή πίεσης ο οποίος υπολογίστηκε έπειτα από μετρήσεις πίεσης που έγιναν με τη χρήση σωληνίσκων συνδεδεμένων σε σημεία στην επιφάνεια του υπό κλίμακα μοντέλου, σε ειδική διάταξη στην αεροσήραγγα και καταγράφηκαν σε μανόμετρο. Στην συνέχεια περιγράφηκαν οι δύο περιπτώσεις προσομοίωσης (με κτίρια – χωρίς κτίρια). Αρχικά, και στις δύο περιπτώσεις ορίστηκε το υπολογιστικό χωρίο του πεδίου ροής με τις κατάλληλες αποστάσεις από την εξεταζόμενη γεωμετρία και στην συνέχεια διακριτοποιήθηκε σε αδόμητο υπολογιστικό πλέγμα για να επιλυθεί με αριθμητική προσέγγιση σε περιβάλλον ANSYS ICEM CFD και FLUENT. Έπειτα, ορίστηκαν οι αρχικές και οι οριακές

συνθήκες της ταχύτητας και της τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου. Έπειτα αφού ορίστηκαν οι προδιαγραφές και οι συνθήκες που θα εκτελεστούν οι προσομοιώσεις, παρουσιάστηκαν τα γραφήματα (**contours**) κατανομής πίεσης (**P**), ταχύτητας (**U**), τυρβώδους κινητικής ενέργειας (**k**) και ειδικού ρυθμού διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας (**ω**). Αν και ποιοτικά οι τιμές πίεσης και ταχύτητας και στις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης παρουσίασαν παρόμοια αυξομείωση σε συγκεκριμένα σημεία του πεδίου ροής, στην 2^η περίπτωση προσομοίωσης παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο «διάκενο» μεταξύ των κτιρίων όπου βρίσκεται το όχημα και προκλήθηκαν εντονότερα φαινόμενα τύρβης.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται μία αναλυτική σύγκριση όλων των προσομοιώσεων και του πειράματος με σκοπό να αναδειχθούν οι ομοιότητες και διαφορές που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων. Αρχικά, έγινε απεικόνιση και σύγκριση των συντελεστών πίεσης (**C_p**) για το πείραμα και τις διαφορετικές περιπτώσεις προσομοίωσης. Ειδικότερα για τον έλεγχο ορθότητας της πειραματικής διαδικασίας προσομοιώθηκε και μία περίπτωση προσομοίωσης με ίδιο αριθμό Reynolds με το πείραμα και κατ' επέκταση κατάλληλη ταχύτητα ροής. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν πως η πειραματική διάταξη αλλά και η λήψη των μετρήσεων ήταν σωστή με μικρές αποκλίσεις από την προσομοίωση ελέγχου ορθότητας (**validation simulation**). Κατά τα άλλα, η προσθήκη κτιρίων φαίνεται να επηρέασε το πεδίο ροής, αφού μειώθηκε ο συντελεστής πίεσης (**C_p**), τουλάχιστον στις δύο από τις τρεις περιοχές μελέτης πάνω στην Orca, λόγω αύξησης της ταχύτητας πεδίου ροής εσωτερικά των κτιρίων. Η διαφορά αυτή στην ταχύτητα ροής απεικονίζεται και από τα προφίλ ταχυτήτων που πάρθηκαν για 6 διαφορετικά σημεία στο επίπεδο ροής του άξονα $x-x'$. Επιπρόσθετα, η απεικόνιση των ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής έδειξε ότι τα κτίρια προκάλεσαν μία πιο ασταθή ροή με τη δημιουργία πολύ περισσότερων δινών και τυρβωδών φαινομένων, όπως αυτά της αποκόλλησης και ανακυκλοφορίας της ροής, ειδικά στο πίσω μέρος του οχήματος.

Συμπερασματικά, έπειτα από την ενδελεχή μελέτη της επίδρασης ενός υποτιθεμένου αστικού πεδίου ροής στην αεροδυναμική συμπεριφορά του

οχήματος Orca, γίνεται αντιληπτό ότι η παραμικρή μεταβολή των παρελκόμενων και γενικότερα των στοιχείων που ορίζουν ένα πεδίο ροής μπορεί να αλλάξουν και να επηρεάσουν αρκετά τα αποτελέσματα ενός πειράματος ή μίας προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό, οι περιπτώσεις προσομοίωσης και τα επίμαχα πειράματα που μπορούν να πραγματοποιηθούν για την πλήρη κατανόηση της επιρροής του πεδίου ροής γύρω από την Orca, είτε από οποιοδήποτε όχημα, είναι αμέτρητες και πάντα θα αποτελούν το έναυσμα για την έναρξη κάποιας νέας αεροδυναμικής μελέτης που θα συμπληρώνει τις ήδη υπάρχουσες ή θα εισάγει νέα δεδομένα και αποτελέσματα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aljure, D. E., Lehmkuhl, O., Rodríguez, I., & Oliva, A. (2014). Flow and turbulent structures around simplified car models. *Computers & Fluids*, 96, 122-135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.03.013>
- ANSYS. (2010). Introduction to CFD methodology. *Introduction to ANSYS FLUENT*.
- Ashton, N., West, A., Lardeau, S., & Revell, A. (2016). Assessment of RANS and DES methods for realistic automotive models. *Computers & Fluids*, 128, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.01.008>
- Aultman, M., Wang, Z., Auza-Gutierrez, R., & Duan, L. (2022). Evaluation of CFD methodologies for prediction of flows around simplified and complex automotive models. *Computers & Fluids*, 236, 105297. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2021.105297>
- Balczó, M., & Lajos, T. (2015). Flow and Dispersion Phenomena in a Simplified Urban Square. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(3), 347-360. doi:10.3311/PPci.7852
- Banihani, E., & El Haj Assad, M. (2018). Boundary-Layer Theory of Fluid Flow past a Flat-Plate: Numerical Solution using MATLAB. *International Journal of Computer Applications*, 180. doi:10.5120/ijca2018916374
- Buscariolo, F. F., Hoessler, J., Moxey, D., Jassim, A., Gouder, K., Basley, J., . . . Sherwin, S. J. (2022). Spectral/hp element simulation of flow past a Formula One front wing: Validation against experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 221, 104832. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104832>
- Cogotti, A. (2008). Evolution of performance of an automotive wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6), 667-700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.007>
- Franck, G., Nigro, N., Storti, M., & D'Elía, J. (2009). Numerical simulation of the flow around the ahmed vehicle model. *Latin American applied research Pesquisa aplicada latino americana = Investigación aplicada latinoamericana*, 39, 295-306.
- Fu, C., Uddin, M., & Robinson, A. C. (2018). Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a NASCAR Gen 6 racecar. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 176, 98-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.016>
- Fu, C., Uddin, M., & Zhang, C. (2020). Computational Analyses of the Effects of Wind Tunnel Ground Simulation and Blockage Ratio on the Aerodynamic

- Prediction of Flow over a Passenger Vehicle. *Vehicles*, 2, 318-341. doi:10.3390/vehicles2020018
- Fukuda, H., Yanagimoto, K., China, H., & Nakagawa, K. (1995). Improvement of vehicle aerodynamics by wake control. *JSAE Review*, 16(2), 151-155. doi:[https://doi.org/10.1016/0389-4304\(95\)00007-T](https://doi.org/10.1016/0389-4304(95)00007-T)
- Fuller, J., Best, M., Garret, N., & Passmore, M. (2013). The importance of unsteady aerodynamics to road vehicle dynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 117, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.03.006>
- Gerhart, A. L., J. I. Hochstein and P. M. Gerhart (2020). *Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics*: Wiley.
- H.K. Versteeg, & Malalasekera, W. (2006). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, 2nd Edition*: Pearson Publications.
- Heisler, H. (2002). 14 - Vehicle body aerodynamics. In H. Heisler (Ed.), *Advanced Vehicle Technology (Second Edition)* (pp. 584-634). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Hu, H., Xiang, H., Liu, K., Chen, H., & Li, Y. (2022). Experiments of aerodynamic admittances for moving vehicles on bridges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 226, 105041. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105041>
- Huang, Y., Wang, S., Ji, Y., & Liu, Z. (2021). Study of the automotive aerodynamic performance affected by entrance structure of forecabin. *Energy and Built Environment*, 2(3), 327-335. doi:10.1016/j.enbenv.2020.06.012
- Huminic, A., & Huminic, G. (2020). Aerodynamics of curved underbody diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 104300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104300>
- John D. Anderson, J. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics, Fifth Edition* The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Josefsson, E., Hobeika, T., & Sebben, S. (2022). Evaluation of wind tunnel interference on numerical prediction of wheel aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 224, 104945. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104945>
- Kloek, L. J. R. (2013). *A validation study on the rooftop flow behaviour of road vehicles*. (Master of Science), Delft University of Technology,
- Kurec, K., Remer, M., Mayer, T., Tudruj, S., & Piechna, J. (2019). Flow control for a car-mounted rear wing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 152, 384-399. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.034>

- Kurec, K., Remer, M., & Piechna, J. (2019). The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking. *International Journal of Mechanical Sciences*, 164, 105140. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105140>
- Li, R. (2017). *Aerodynamic Drag Reduction of a Square-Back Car Model Using Linear Genetic Programming and Physic-Based Control*.
- Liu, X., Han, Y., Cai, C. S., Levitan, M., & Nikitopoulos, D. (2016). Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 150, 15-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.12.004>
- Ljungskog, E., Sebben, S., & Broniewicz, A. (2020). Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197, 104055. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104055>
- Löhner, R., Othmer, C., Mrosek, M., Figueroa, A., & Degro, A. (2021). Overnight industrial LES for external aerodynamics. *Computers & Fluids*, 214, 104771. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104771>
- Mariani, F., Poggiani, C., Risi, F., & Scappaticci, L. (2015). Formula-SAE Racing Car: Experimental and Numerical Analysis of the External Aerodynamics. *Energy Procedia*, 81, 1013-1029. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.111>
- Nakashima, T., Yan, C., Moriuchi, T., Kohri, I., Mutsuda, H., & Doi, Y. (2020). Active aerodynamics control of simplified vehicle body in a crosswind condition. *The Journal of Engineering*, 2020(14), 1005-1011. doi:10.1049/joe.2020.0062
- Nebenführ, B. (2010). *OpenFOAM: A tool for predicting automotive relevant flow fields*. (Master Master's Thesis in Automotive Engineering), CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden.
- Ogawa, S., & Kamioka, T. (1999). Review of aerodynamic noise prediction using cfd.
- Rumsey, C. (2023). Implementing Turbulence Models into the Compressible RANS Equations. *Turbulence Modeling Resource*. Retrieved from <https://turbmodels.larc.nasa.gov/implementrans.html>
- Sivaraj, G., Parammasivam, K. M., Prasath, M. S., Vadivelu, P., & Lakshmanan, D. (2021). Flow analysis of rear end body shape of the vehicle for better aerodynamic performance. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2175-2181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.521>
- Thompson, J. F., Soni, B. K., & Weatherill, N. P. (1998). *Handbook of Grid Generation*: CRC Press.

- Tsai, C.-H., Fu, L.-M., Tai, C.-H., Huang, Y.-L., & Leong, J.-C. (2009). Computational aero-acoustic analysis of a passenger car with a rear spoiler. *Applied Mathematical Modelling*, 33(9), 3661-3673. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.12.004>
- Wang, S., Avadiar, T., Thompson, M. C., & Burton, D. (2019). Effect of moving ground on the aerodynamics of a generic automotive model: The DrivAer-Estate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 195, 104000. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104000>
- Watkins, S., & Vio, G. (2008). The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6), 1232-1239. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.042>
- Winkler, N., Drugge, L., Trigell, A. S., & Efraimsson, G. (2016). Coupling aerodynamics to vehicle dynamics in transient crosswinds including a driver model. *Computers & Fluids*, 138, 26-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.08.006>
- Wojciak, J. D. (2012). *Quantitative Analysis of Vehicle Aerodynamics during Crosswind Gusts*. (23/1/2012), Technical University of Munich,
- Yunus A. Cengel, & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics : Fundamentals and Applications*: The McGraw-Hill Companies.
- Αρζόγλου, Θ. (2017). *Σχεδίαση αυτοκινήτου και μελέτη αεροδυναμικών φορτίων*. (Master Διπλωματική Εργασία), Πανεπιστήμιο Αιγαίου,
- Ιστοσελίδα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. (2018). Retrieved from <https://www.uniwa.gr/announcements/epitychia-tis-fititikis-omadas-posidon-tou-panepistimiou-dytikis-attikis/>
- Μπεκάκος, Χ.-Α. (2011). *Υπολογιστική Μελέτη Αεροδυναμικής Συμπεριφοράς Απλοποιημένου Μοντέλου Αυτοκινήτου με Χρήση Γεννητριών Στροβιλισμού*. (Master Διπλωματική Εργασία), ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ,
- Παπαϊωάννου, Ά. (2002). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ* (2η Έκδοση ed. Vol. Τόμος 1): Εκδόσεις "Κοράλι".