

Περίληψη

Η αεροδυναμική ορίζεται ως ο επιστημονικός αυτός κλάδος ο οποίος ασχολείται με τους νόμους που διέπουν την ροή του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από ένα στερεό αντικείμενο. Η επίδραση της αεροδυναμικής στην απόδοση ενός οχήματος αποτελεί μεγάλο ερευνητικό πεδίο τόσο σε επιστημονικό όσο και βιομηχανικό επίπεδο. Ο πιο απλός, αξιόπιστος αλλά ταυτόχρονα και πιο δαπανηρός τρόπος για την απόδοση της ροής είναι μέσω της χρήσης πειραματικών διατάξεων, όπου είναι δυνατόν. Το αντικείμενο ενδιαφέροντος τοποθετείται σε μια αεροσήραγγα και μετρήσεις λαμβάνονται με ειδικό εξοπλισμό. Ο δεύτερος τρόπος, που είναι λιγότερο δαπανηρός, με ποικίλα επίπεδα αξιοπιστίας είναι μέσω της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Η διπλωματική αυτή εργασία πιστοποιεί τον κώδικα ρευστομηχανικής για το πρόβλημα ενός απλοποιημένου μοντέλου επιβατικού οχήματος με την ονομασία Ahmed Body, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης από δυο διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις έναντι πειραματικών μετρήσεων από τον H. Lienhart και τους συνεργάτες του. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση του συντελεστή οπισθέλκουσας και των προφίλ ταχύτητας. Ταυτόχρονα, η παρούσα εργασία εμβαθύνει στην διαφορετική επίδραση που έχει ένα αραιό και ένα πυκνό πλέγμα μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας. Τέλος, επιδιώκεται αυτή η μελέτη να αποτελέσει ένα αρχικό σημείο για μελλοντικές επεκτάσεις.

Abstract

Aerodynamics denote the scientific branch of studying the dynamics of air flow that interacts around a solid object. The effect of aerodynamics into vehicle's performance attracts both scientific and industrial interest. The simplest, most reliable but also most expensive way of measuring the flow is via carrying out experiments, whenever possible. The subject of interest is placed in a wind tunnel and certain quantities are measured by using special instrumentation. An alternative way, which is less costly, with varying levels of fidelity is via computational fluid mechanics.

This thesis validates a fluid mechanics code for a problem instance that involves a simplified car model, called Ahmed Body, by comparing two different geometrical arrangements against experimental data from H. Lienhart et al. The drag coefficient and vertical speed profiles are contrasted. At the same time, this study focuses on the impact of a coarse and fine grid by performing sensitivity analysis. Finally, this study is intended to be base of more complicated future cases.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1	Περιγραφή του προβλήματος	12
1.2	Στόχος της διπλωματικής	14
1.3	Δομή της διπλωματικής	15
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	16
2.1	Σύντομη ανασκόπηση του Ahmed Body	18
2.2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Πειραματικών Μετρήσεων	22
2.3	CFD Μέθοδοι για αεροδυναμικά οχήματα.	26
2.3.1	Γενικές παρατηρήσεις	26
2.3.2	Προσεγγίσεις των εξισώσεων Navier-Stokes	28
2.3.3	Βασικά βήματα για ένα υπολογισμό CFD	30
2.3.4	Σχεδιασμός πλέγματος 3Δ	30
2.3.5	Μη γραμμικές μέθοδοι CFD - Σχήματα επίλυσης για μη γραμμικές μεθόδους 36	
3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ AHMED BODY	39
3.1	Διάκριση Υπολογιστικών Μοντέλων	39
3.2	Απαιτήσεις σε μια προσομοίωση CFD	40
3.3	Επιλογή Υπολογιστικού Μοντέλου	41
4	Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RANS	42
4.1	Σύντομη περιγραφή επιλεγμένων μοντέλων 2 εξισώσεων	43
4.1.1	Μοντέλο k-ε	44
4.1.2	Πρότυπο μοντέλο k-ω	45
4.1.3	BSL k-ω	45

4.1.4	SST k- ω	46
4.2	Επιλογή του Realizable μοντέλου k- ϵ	46
4.3	Ανακεφαλαίωση των εξισώσεων των μαθηματικών μοντέλων	47
5	ΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	51
5.1	Περιγραφή του αριθμητικού κώδικα FLUENT	51
5.2	Απαιτούμενες ιδιότητες της αριθμητικής μεθόδου	51
5.3	Κατασκευή Γεωμετρίας	54
5.4	Κατασκευή Πλέγματος	56
5.5	Οριακές Συνθήκες	67
5.6	Επίλυση Προβλήματος	69
5.7	Αποτελέσματα	70
5.7.1	Σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις	70
5.7.2	25 Μοίρες 2 εκ. κελιά	82
5.7.3	25 Μοίρες 3.6 εκ. κελιά	87
5.7.4	35 Μοίρες 2 εκ. κελιά	92
5.7.5	35 Μοίρες 3.6 εκ. κελιά	96
5.8	Διαγράμματα Διασποράς και Δείκτες Αξιολόγησης	100
5.9	Συντελεστής Οπισθέλκουσας	104
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	105

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Δομή Αεροσήραγγας	13
1.2	Φωτογραφία στο εσωτερικό της αεροσήραγγας	13
2.1	3Δ μοντέλο του Ahmed body σε Solid Works	19
2.2	Ahmed Body	20
2.3	Γεωμετρική Περιγραφή Ahmed Body	21
2.4	Ahmed Body 25 μοιρών	21
2.5	Ahmed Body 35 μοιρών	21
2.6	Θέσεις αισθητήρων στις πειραματικές μετρήσεις του [1]	22
2.7	Οριακό Στρώμα Τύρβης	27
2.8	Μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής βασισμένα στις εξισώσεις NS	28
2.9	Τύποι κελιών πλέγματος	32
2.10	Διαδικασία δημιουργίας πλέγματος[8]	34
2.11	Πλέγμα για τον υπολογισμό με τη χρήση μεθόδων Euler ή NS [8]	35
2.12	Μοντέλο οχήματος δρόμου με συρμάτινο πλαίσιο [8]	35
4.1	Κλίμακες τύρβης	44
5.1	Γεωμετρικές Διαστάσεις	55
5.2	Κατασκευή της συμμετρίας στο Design Modeler του ANSYS	55
5.3	Ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο	56
5.4	Μετά την αφαίρεση του Ahmed body την αεροσήραγγα	56
5.5	Αρχικό αραιό πλέγμα	57
5.6	Πλέγμα στο σημείο του ποδιού στήριξης του Ahmed body	57
5.7	Πυκνότερο πλέγμα ανά περιοχές (κάτω μέρος του μοντέλου) συγκριτικά με τα διπλανά κελιά.	58
5.8	Πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος στο πίσω μέρος της ροής	58

5.9	Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών	59
5.10	Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών	60
5.11	Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών	61
5.12	Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών	62
5.13	Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών	63
5.14	Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών	64
5.15	Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών	65
5.16	Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών	66
5.17	Υπολογιστικό πεδίο για Ahmed Body	67
5.18	Γραφική αναπαράσταση της μέσης ταχύτητας σε ένα κεντρικό σημείο P για ένα κελί που είναι γειτονικό με τον τοίχο [5]	69
5.19	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 25 μοιρών	71
5.20	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 25 μοιρών	71
5.22	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών	72
5.21	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 25 μοιρών	72
5.23	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών	73
5.24	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών	73
5.25	Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών	74
5.26	Αισθητήρες στην περιοχή σύγκρισης Ahmed Body 25 και 35 μοιρών	75
5.27	Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 2 εκ. κελιά	75
5.28	Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	76
5.29	Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 2 εκ. κελιά	77
5.30	Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	78
5.31	Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	79
5.32	Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	79
5.33	Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	80

5.34	Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	80
5.35	Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	81
5.36	Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά	81
5.37	Υπόλοιπα	82
5.38	Κατανομή ταχύτητας	83
5.39	Κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος	83
5.40	Γραμμές ροής	84
5.41	Γραμμές ροής στο πίσω μέρος	84
5.42	Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος	85
5.43	Στροβιλότητα	85
5.44	Διάνυσμα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης	86
5.45	Συντελεστής Πίεσης	86
5.46	Υπόλοιπα	87
5.47	Κατανομή ταχύτητας	87
5.49	Γραμμές ροής	88
5.48	Κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος	88
5.50	Γραμμές ροής στο πίσω μέρος	89
5.51	Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος	89
5.53	Διανύσματα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης	90
5.52	Στροβιλότητα	90
5.54	Κατανομή πίεσης	91
5.55	Υπόλοιπα	92
5.56	Γραμμές ροής	92
5.57	Γραμμές ροής στο πίσω μέρος	93
5.58	Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος	93
5.60	Διανύσματα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης	94
5.59	Στροβιλότητα	94
5.61	Συντελεστής Πίεσης	95
5.62	Υπόλοιπα	96
5.63	Κατανομή ταχύτητας	96
5.64	Κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος	97
5.65	Γραμμές ροής	97

5.66	Γραμμές ροής	98
5.67	Γραμμές ροής στο πίσω μέρος	98
5.68	Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος	99
5.69	Στροβιλότητα	99
5.70	Διανύσματα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης	100
5.71	Συντελεστής Πίεσης	100
5.72	Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 25 μοιρών και 2 εκ κελιών	101
5.73	Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 25 μοιρών και 3.6 εκ κελιών	101
5.74	Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 35 μοιρών και 2 εκ κελιών	102
5.75	Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 35 μοιρών και 3.6 εκ κελιών	102

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Λίστα βιβλιογραφικών πηγών	23
4.1	Βιβλιογραφική έρευνα μοντέλων	48
4.2	Τιμές σταθερών του μοντέλου $k-\epsilon$	50
5.1	Δείκτες αξιολόγησης	103
5.2	Σύγκριση συντελεστών οπισθέλκουσας	104

Nomenclature

CAD	Computer-Aided Design
DNS	Direct Numerical Simulation
FB	Fractional Bias
LDA	Laser-Doppler Anemometer
LES	Large Eddy Simulation
NS	Navier Stokes
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes
SST	Shear Stress Transport

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην απόληξη αυτού του πολύ ενδιαφέροντος ερευνητικού μου ταξιδιού, θεωρώ υπέρτατη υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα οφείλω να εκφράσω το σεβασμό μου στον Καθηγητή κύριο Μπάρτζη Ιωάννη, χωρίς τις χρήσιμες υποδείξεις του οποίου σε καίριες ενότητες αυτής της μελέτης, θα αντιμετώπιζα πρόβλημα στην ολοκλήρωση της. Θα πρέπει όμως να ευχαριστήσω θερμά και τους κ. Ευθυμίου Γιώργο και Βαφειάδη Κυριάκο, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου από την αρχή και με καθοδήγησαν με ειλικρινές ενδιαφέρον και ζέση όσο καιρό χρειάστηκα για να ολοκληρώσω και να συγκροτήσω τις σκέψεις μου. Και βέβαια υπόχρεη αισθάνομαι και για την σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, η οποία μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία. Τέλος θα ήμουν ευτυχής αν οι παραπάνω σελίδες θα ετύγγαναν της ευμενούς υποδοχής της ευρύτερης επιστημονικής κοινότητας και θα επιπρόσθεταν έστω και ψιχία γνώσεων στον τομέα με το οποίον ασχολήθηκα.

Κεφάλαιο 1

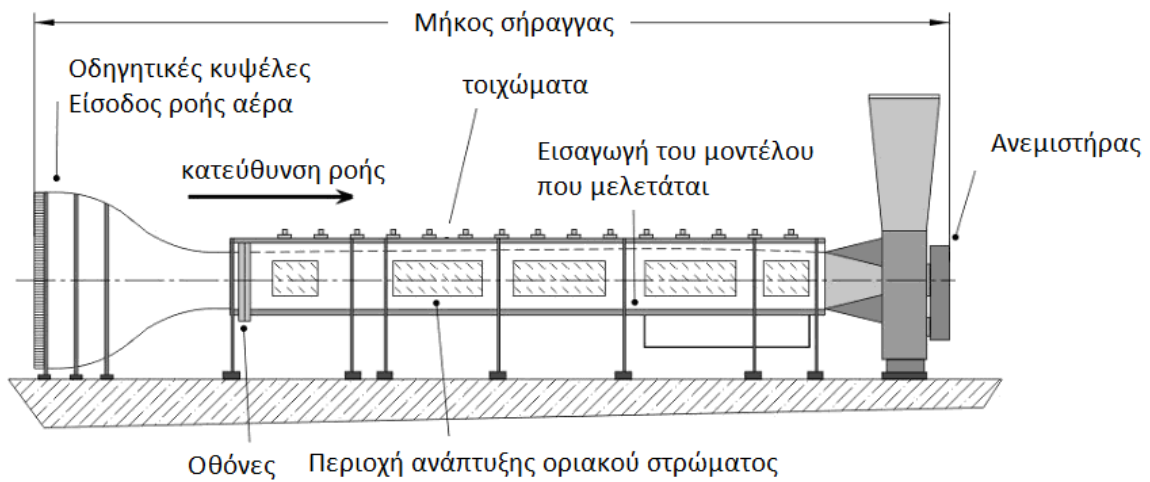
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

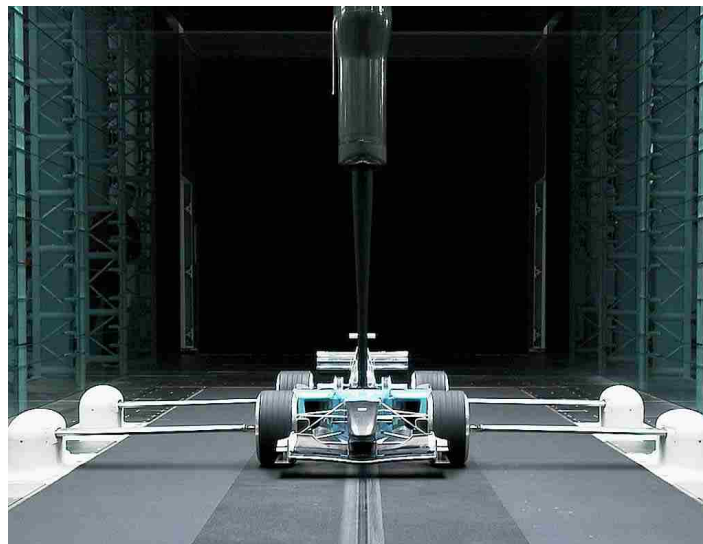
Στις μέρες μας, η αεροδυναμική εντοπίζεται παντού γύρω μας. Το πιο σύνηθες μέρος για να συναντήσει κανείς το προϊόν μιας μελέτης στον τομέα της αεροδυναμικής είναι τα οχήματα που μας μεταφέρουν, όπως για παράδειγμα, τα αεροπλάνα και τα αυτοκίνητα. Καθημερινά λοιπόν, ερχόμαστε σε επαφή με όλων των ειδών αντικείμενα που έχουν αναπτυχθεί με νέα, μοντέρνα, και εξελιγμένα εργαλεία είτε υπολογιστικά, είτε πειραματικά. Η αεροδυναμική είναι ο επιστημονικός αυτός κλάδος, ο οποίος ασχολείται με τους νόμους που διέπουν τη ροή του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από διάφορα σώματα. Πάνω σε αυτά ασχολούνται κάποιες δυνάμεις ανάλογα με τις συνθήκες του πειράματος, όπως περιγράφεται στην συνέχεια της εργασίας. Το αντικείμενο μιας αεροδυναμικής έρευνας και μελέτης αναλύεται σε δυο διαφορετικούς τομείς, οι οποίοι πλέον έχουν φτάσει να συμπληρώνουν ο ένας τον άλλον:

1. την πειραματική αεροδυναμική και
2. την υπολογιστική αεροδυναμική

Η Αεροδυναμική μέχρι και τις δύο προηγούμενες δεκαετίες ήταν καθαρά μόνο πειραματική επιστήμη και εκτελούσε πειράματα με μοντέλα μικρής ή και φυσικής κλίμακας σε αεροδυναμικές σήραγγες (ή αεροσήραγγες). Μετά την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών όμως αναπτύχθηκε έντονα και η υπολογιστική αεροδυναμική με συνέπεια πείραμα και θεωρία να συμβάλουν πλέον στη πλήρη μελέτη ενός φαινομένου, έτσι ώστε η υπολογιστική να συμπληρώνει και να εξακριβώνει τα αποτελέσματα της "πειραματικής αεροδυναμικής".



Σχήμα 1.1: Δομή Αεροσήραγγας



Σχήμα 1.2: Φωτογραφία στο εσωτερικό της αεροσήραγγας

Είναι συχνό φαινόμενο να συναντούμε και να παρατηρούμε τις καμπυλότητες, εσοχές και αεροτομές στα αυτοκίνητα γύρω μας. Ο μέσος άνθρωπος σίγουρα έχει αναρωτηθεί πολλές φορές για το ρόλο τους και για τα σημεία στα οποία έχουν τοποθετηθεί. Ανά τους καιρούς, από την πρώτη κιόλας κατασκευή του αυτοκινήτου με την μορφή που το καταλαβαίνουμε σήμερα, παρατηρήθηκαν πολλά προβλήματα στην αεροδυναμική του. Η αρχική μορφή του συνήθιζε να αποτελείται από μεγάλες και άστοχες σχεδιαστικά επιφάνειες κάθετες προς την διεύθυνση του αέρα. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι το όχημα που πήγαινε κόντρα στην ροή του ανέμου, αρχικά δυσκολευόταν να αναπτύξει ταχύτητα και στη συνέχεια αύξανε το κόστος της λειτουργίας του λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε καύσιμα.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες δουλεύουν συνεχώς στην εξέλιξη και στη βελτίωση της αεροδυναμικής των μοντέλων τους, χρησιμοποιώντας κάθε μέσο ώστε να παράγουν οχήματα με μικρότερη

κατανάλωση και πιο ανταγωνιστικές τιμές. Οι συνεχείς βελτιώσεις δείχνουν πόσα ακόμη εξακολουθούμε να μαθαίνουμε ψάχνοντας τη βέλτιστη λύση και ικανοποιώντας τις απαιτήσεις της αγοράς. Κάθε χρόνο νέες βελτιώσεις και καινούριες μελέτες πάνω σε νέα σχήματα και μια σειρά από πειράματα παίρνουν μέρος σε πανεπιστήμια αλλά και σε βιομηχανίες οι οποίες συνεχίζουν να ανοίγουν καινούριες οδούς στην περαιτέρω εξέλιξη της μορφής του οχήματος.

Το πρόβλημα που θα μελετηθεί παρακάτω είναι ένα πρόβλημα πάνω σε ένα απλής μορφής επιβατικό όχημα (Ahmed Body) το οποίο λειτουργεί σαν βοηθητικό μέσο για τους ερευνητές στην ξεκάθαρη αποτύπωση των φαινομένων που εμφανίζονται, όπως περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια αλλά και τη συνεχή βελτίωση της αεροδυναμικής του αφού αλλάζει η γεωμετρία του ώστε να έχουν εύκολες, με μικρό κόστος και γρήγορες βελτιώσεις οι οποίες θα είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους και θα δίνουν λύση ταυτόχρονα και σε μεγαλύτερα προβλήματα όταν εφαρμοστούν σε πραγματικού μεγέθους επιβατικά αυτοκίνητα.

Επιπλέον παρατηρείται η συνεχής χρήση του Ahmed Body από τις αυτοκινητοβιομηχανίες καθώς αποτελείται από μια πολύ απλή γεωμετρία, η οποία διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη δημιουργία ενός υπολογιστικού πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος και γύρω από αυτό. Επίσης αποτελεί ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα για τη μελέτη της αεροδυναμικής, την πιστοποίηση αποτελεσμάτων και εν συνεχεία την βελτίωση της κατασκευής ενός πραγματικού οχήματος.

Η παρούσα διπλωματική λοιπόν, επιλέχθηκε για αυτό το ενδιαφέρον που προκαλεί αυτό το απλοποιημένο μοντέλο στην βιομηχανία και η ασταμάτητη, συνεχής χρήση του στην επίλυση των προβλημάτων που έρχεται να καλύψει. Στην συνέχεια, ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι εύκολο στην επεξεργασία του καθώς όπως αναλύεται παρακάτω έχει απλή γεωμετρία και επάνω της μπορούν να μελετηθούν πολλά φαινόμενα που εμφανίζονται με την αλλαγή της γωνίας κλίσης στο πίσω μέρος του. Η διαφορά μερικών μοιρών έρχεται να μας δώσει την ανάλυση πολλών φαινομένων αλλά και λύσεις στην βελτίωση της κατασκευής ενός πραγματικού οχήματος.

1.2 Στόχος της διπλωματικής

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να πιστοποιήσει τον κώδικα CFD και στη συνέχεια να συγκρίνει το συντελεστή οπισθέλκουσας των παραλλαγών της γεωμετρίας με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα του Ahmed Body. Όλα τα παραπάνω αποτυπώνονται σε μια αναλυτική μεθοδολογία, που αφορά την προσομοίωση ροής γύρω από το απλοποιημένο μοντέλο Ahmed body με την χρήση ενός κατάλληλου υπολογιστικού μοντέλου και πόρων κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης των διαθέσιμων μοντέλων.

Η εργασία λοιπόν, στοχεύει στη μελέτη μιας σειράς από επιλεγμένες δοκιμές προσομοιώσεων (με δύο παραλλαγές στη γεωμετρία του μοντέλου), που εν τέλει θα οδηγήσει στην αξιολόγηση του μοντέλου επιλογής πραγματοποιώντας σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα του ίδιου προβλήματος. Ταυτόχρονα η επιδίωξη της παρούσας εργασίας είναι να εμβαθύνει στη διαφορετική επίδραση που έχει ένα αραιό και ένα πυκνό πλέγμα μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας πλέγματος.

Τέλος, επιδιώκεται, με το πέρας των προσομοιώσεων και των συγκρίσεων των αποτελεσμάτων, να επικυρωθεί, να επαληθεύει και να αναδειχθεί η μελέτη.

1.3 Δομή της διπλωματικής

Η δομή της διπλωματικής αυτής αποτελείται από έξι κεφάλαια που αποδίδουν αρχικά βιβλιογραφικά και στη συνέχεια υπολογιστικά τους νόμους της αεροδυναμικής, μελετώντας τη ροή αέρα γύρω από ένα απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στη διπλωματική εργασία, όπου περιγράφονται το πρόβλημα και οι στόχοι αυτής της μελέτης. Στη συνέχεια, το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έχει πραγματοποιηθεί γύρω από το Ahmed body αλλά και τις μεθόδους CFD γενικότερα. Ειδικότερα αναφέρεται μια σύντομη ιστορική περιγραφή για την πορεία και τη δημιουργία του μοντέλου Ahmed body ενώ περιγράφονται τα βήματα για τον υπολογισμό της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Έπειτα γίνεται μία αναλυτική περιγραφή όλων των διαθέσιμων στη βιβλιογραφία μοντέλων ενώ στο τέλος επιλέγεται το υπολογιστικό μοντέλο που κρίνεται κατάλληλο για τη μελέτη. Κατόπιν, στο κεφάλαιο τέσσερα, αποδίδεται η μεθοδολογία και περιγράφονται τα πιο γνωστά μοντέλα τύρβης ενώ ταυτόχρονα γίνεται η επιλογή αυτού του μοντέλου, με το οποίο θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις. Το πέμπτο και σημαντικότερο κεφάλαιο αφορά τις προσομοιώσεις του πειράματος και τη μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε. Ταυτόχρονα αναλύεται η κατασκευή της γεωμετρίας και του πλέγματος και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις που έχουν ληφθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Συμπερασματικά, αναλύονται οι στόχοι που επιτεύχθηκαν ενώ στην ίδια ενότητα γίνεται μια συζήτηση για τα μελλοντικά σχέδια και επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Αναμφισβήτητα υπάρχουν πολλές αναφορές και μελέτες σε απλοποιημένα μοντέλα αυτοκινήτων. Από αυτές επιλέχθηκαν οι εργασίες-ορόσημα και κάποιες νεότερες που είναι αντιπροσωπευτικές για τη μελέτη απλοποιημένων επιβατικών οχημάτων και παρουσιάζουν επιστημονικό ενδιαφέρον. Αυτό γίνεται για να αναφερθεί η σπουδαιότητα των πρώτων εφαρμογών και να αποτυπωθεί στη συνέχεια πως εξελίχθηκε ο αντίστοιχος επιστημονικός τομέας από το 1984.

Τα κλασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για να αξιολογούν την αεροδυναμική επίδοση των αυτοκινήτων είναι οι αεροσήραγγες (wind tunnels) [8] και οι δοκιμές δρόμου (road test) [8]. Υπάρχουν σήραγγες πλήρους κλίμακας για οχήματα, που όμως είναι πολύ δαπανηρές στην κατασκευή και στο χειρισμό τους. Η περίπτωση να γίνονται τεστ σε πραγματικού μεγέθους οχήματα όπου το μέγεθος του τμήματος που εξετάζεται, η περιπλοκότητα του χειρισμού στις μετακινήσεις του εδάφους-εξέδρας, η μη δυνατότητα ο έλεγχος να γίνεται κάτω από τις ακριβείς συνθήκες πλάγιου ανέμου κ.α. θέτουν όρια στο ρεαλισμό της προσομοίωσης. Τα μοντέλα μικρότερης κλίμακας, από την άλλη, παράγουν αποτελέσματα για τα οποία υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τον χαμηλό αριθμό Reynolds, την πιστότητα του μοντέλου, τα οριακά στρώματα στα τοιχώματα της σήραγγας, το αποτέλεσμα των παρεμβολών στήριξης του μοντέλου, το αποτέλεσμα φραγής του ορόρου κ.α.[8].

Οι δοκιμές δρόμου παρουσιάζουν πιο ρεαλιστικές προσομοιώσεις του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται και λειτουργεί ένα όχημα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν δυσκολίες που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες του συνεχούς και μη ελεγχόμενου ανέμου. Ειδικοί χειρισμοί είναι απαραίτητοι ώστε τα αποτελέσματα να έχουν νόημα και να είναι έγκυρα [8].

Για να καλύπτουν την ζήτηση των καταναλωτών επαρκώς και φυσικά να μένουν στον ανταγωνισμό, οι αυτοκινητοβιομηχανίες στις μέρες μας πρέπει να αναπτύξουν πιο οικονομικά, ασφαλή και πιο άνετα οχήματα με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό. Χρησιμοποιώντας μόνο τις παραδοσιακές τεχνικές, τις αεροσήραγγες και οι δοκιμές δρόμου, ο μεγάλος κύκλος ανάπτυξης που απαιτείται, συχνά παρουσιάζει προβλήματα. Έτσι, μετά από αυτό, παρουσιάστηκε ενδιαφέρον στη χρήση της μεθόδου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics -CFD) έτσι ώστε να προσομοιωθούν τα πειράματα που γίνονται σε αεροσήραγγες. Συνεπώς, το CFD σιγά σιγά

αναδύεται σαν επιπρόσθετο εργαλείο στον αεροδυναμικό σχεδιασμό. Οι αεροσήραγγες και το CFD είναι και τα δύο προσομοιωτές, αναλογικοί και ψηφιακοί αντίστοιχα. Ο σχετικός ρόλος των δύο τεχνικών προσομοίωσης, ωστόσο, αναμένεται να αλλάξει με το καιρό. Στο μέλλον, οι αεροσήραγγες μπορεί να χρησιμοποιούνται περισσότερο για αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των μοντέλων για το συνολικό πεδίο ροής παρά για εκτενής μελέτες όπως γίνονται στις βιομηχανίες σήμερα.

Παραπάνω συζητήθηκε μια από τις θετικές πλευρές του ρόλου του CFD στην επίλυση των προβλημάτων της αεροδυναμικής των βιομηχανιών. Αυτή η θετική πλευρά ήταν εν μέρει σχετική με την εντυπωσιακή εκτέλεση του κώδικα CFD για τα προβλήματα των βιομηχανικών αεροσκαφών, όπου διαφαίνεται να αναδεικνύεται – συμπεριλαμβανομένων και των αεροσηράγγων και των τεστ πτήσεων – σε ένα ολοκληρωμένο τμήμα της συνολικής διαδικασίας σχεδιασμού.

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο γεγονός ότι οι κώδικες CFD, που αρχικά αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών, δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμοι ή αρκετοί ώστε να αντιμετωπίσουν προβλήματα στην αεροδυναμική των αυτοκινήτων. Η αναστολή της αποκόλλησης και η μεγιστοποίηση της αναλογίας άνωσης και οπισθέλκουσας (lift-to drag) είναι οι κύριες ανησυχίες στις εμπορικές βιομηχανίες, οι οποίες μελετούν τα παραπάνω φαινόμενα που εμφανίζονται σε οχήματα. Αντίθετα, η αποκόλληση της ροής και η εγγύτητα της επίδρασης εδάφους (ground effect) είναι αναπόφευκτο κομμάτι της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων. Πρόσφατα το ενδιαφέρον ως προς το CFD για την λύση της αποκόλλησης της ροής, για τη μελέτη πτήσεων με μεγάλη γωνία προσβολής (angle of attack) σε σκάφη του στρατού, μεγαλώνει στη βιομηχανία αεροσκαφών. Από οικονομικής πλευράς, ο αυξανόμενος αριθμός των ωρών των πειραμάτων σε αεροσήραγγες για την ανάπτυξη νέων μοντέλων αυτοκινήτων είναι ένα κίνητρο για να βρεθούν οικονομικές και αποτελεσματικές εναλλακτικές στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού σε αεροσήραγγες. Ακόμη και αν οι ώρες των πειραμάτων αυξάνονται απότομα, η τάση αυτή θα σταματήσει όταν βελτιωθούν οι τεχνικές και όταν θα γίνει προσεκτικός προσχεδιασμός σε μικρότερης κλίμακας αεροσήραγγες, κάτι που μειώνει σημαντικά το κόστος.

Οι προσομοιώσεις CFD συμβαδίζουν με την ανάλυση σε ένα ευρύ πεδίο επιλογών, για παράδειγμα, στο στάδιο αρχικής σχεδίασης, έτσι αυξάνεται η προοπτική να αναγνωριστεί ένα βελτιστοποιημένο σχήμα. Κάποιες φορές το CFD επιτρέπει την διερεύνηση μια κατάστασης που κανονικά δεν θα μπορούσε να προσομοιωθεί σε μια αεροσήραγγα. Η αεροδυναμική πάνω σε δύο οχήματα την στιγμή της προσπέρασης, για παράδειγμα, δημιουργεί πολλά προβλήματα για την μελέτη σε αεροσήραγγα.

Τα τυπικά χαρακτηριστικά της ροής γύρω από ένα όχημα είναι: Οι τρεις διαστάσεις, οι απότομες κλίσεις πίεσης (lateral to direction of flow) και οι περιοχές αποκόλλησης ροής. Οι μικρότερες κλειστές περιοχές αποκόλλησης συμβαίνουν στα εξαρτήματα του κορμού όπως οι καθρέφτες, τα χερούλια στις πόρτες και οι υαλοκαθαριστήρες. Παρουσιάζονται μεγαλύτερες και τριών διαστάσεων περιοχές αποκόλλησης στο πίσω μέρος, κάτω από το αυτοκίνητο και στους τροχούς. Η ταχύτητα και η πορεία του οχήματος διαφέρουν από αυτά του αέρα. Το αποτέλεσμα της εκτροπής της ροής είναι ασυμμετρικό και περιλαμβάνει αποκολλήσεις ροής στις απάνεμες περιοχές επιπρόσθετα της πολυπλοκότητας του πεδίου ροής. Χρονικά μεταβαλλόμενες αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες υπερθέτουν επιπλέον ένα χρονικό ιστορικό στο φαινόμενο της αστάθειας

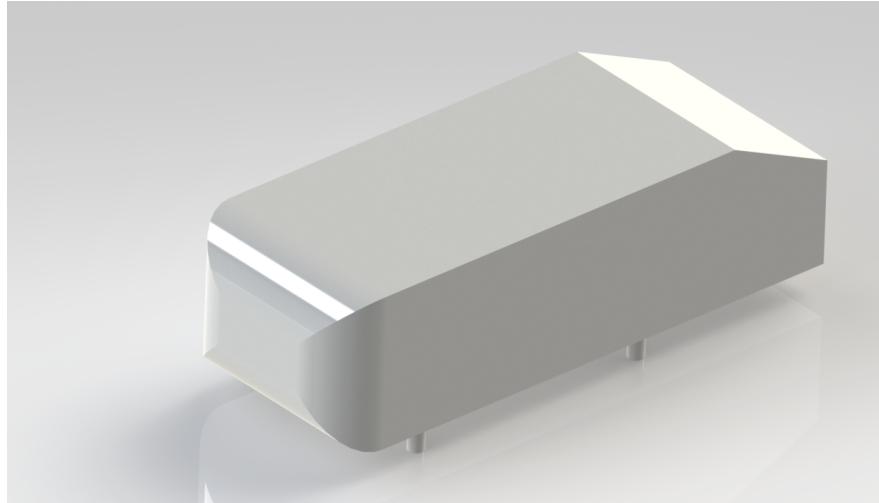
της αποκόλλησης.

2.1 Σύντομη ανασκόπηση του Ahmed Body

Με σκοπό να εξερευνήσει τη συμπεριφορά των τότε δημιουργηθέντων μοντέλων τύρβης για περιπτώσεις που εμπεριέχουν πολύπλοκη γεωμετρία, ένα μοντέλο απλοποιημένου οχήματος, γνωστό ως Ahmed body (εικόνα 2.1), δοκιμάστηκε από τον Ahmed και άλλους [1] το 1984. Τα πειραματικά δεδομένα που δημοσίευσε έδωσαν το εναρκτήριο λάκτισμα για μια σειρά από μελέτες πάνω σε αυτό το μοντέλο. Το Ahmed body, που πήρε το όνομά του από το δημιουργό του, αποτελεί ένα απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου και η γεωμετρία του αποτελείται από ένα στρογγυλό μπροστινό μέρος και ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που έχει μια ιδιομορφία στο πίσω μέρος του. Σε αυτό το οπίσθιο μέρος υπάρχει ένα επίπεδο που μπορεί να τοποθετηθεί σε διαφορετικές γωνίες κλίσης (0° - 40°) και είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί. Οι δύο διαμορφώσεις που έχουν ενδιαφέρον για περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση είναι οι 25° και 35° . Σε αυτές τις κλίσεις έχουμε μεγάλες και ξεκάθαρες αλλαγές στα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια είτε των πειραματικών μελετών είτε των προσομοιώσεων CFD και θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια. Η ταχύτητα και η τυρβώδης κινητική ενέργεια μετρήθηκαν με ανεμόμετρο τύπου Λασερ-Δοπλερ (Laser-Doppler Anemometer -LDA) σε διάφορα σημεία του μοντέλου, σε ειδικούς ερευνητικούς χώρους [16].

Το μοντέλο της σήραγγας σχεδιάστηκε με σκοπό να μπορεί να δημιουργήσει βασικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής στο πίσω μέρος ενός οχήματος, αγνοώντας τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στη ροή οι τροχοί (οποίοι έχουν αναπαρασταθεί ως στατικά μέλη), ο κινητήρας και ο θάλαμος επιβατών, οι τραχείες επιφάνειες στο δάπεδο και επιφανειακές προβολές. Έτσι λοιπόν το μοντέλο μπορεί να δημιουργήσει μια ισχυρή μετατόπιση της ροής στο εμπρόσθιο τμήμα του, σχετικά ομοιόμορφη ροή στο μεσαίο τμήμα και ένα μεγάλο δομημένο ομόρου στο πίσω τμήμα.

Το συνολικό μήκος του μοντέλου είναι 1.044 m ενώ οι αναλογίες μήκους:πλάτους:ύψους είναι 3.36:1.37:1. Αποτελείται από 3 τμήματα: το εμπρόσθιο τμήμα, το μεσαίο τμήμα και το πίσω μέρος. Οι ακμές του εμπρόσθιου τμήματος είναι στρογγυλεμένες έτσι ώστε η ροή να μην αποκολλάται από την επιφάνειά του. Το μεσαίο τμήμα είναι ένα κουτί ορθογώνιας διατομής με αιχμηρές ακμές στις άκρες του. Το πίσω τμήμα μπορεί να ρυθμιστεί σε 9 διαφορετικές διατάξεις με διαφορετική κλίση που αλλάζει με βήμα 5 μοιρών από το 0 μέχρι το 40. Όλες οι κεκλιμένες επιφάνειες έχουν το ίδιο μήκος 222mm με αιχμηρές ακμές.



Σχήμα 2.1: 3Δ μοντέλο του Ahmed body σε Solid Works

Κατά τη διάρκεια πολλών μελετών πάνω σε αυτό το μοντέλο τα φαινόμενα που εμφανίζονται έχουν να κάνουν με την αλλαγή της κλίσης του Ahmed body. Το ενδιαφέρον σε αυτές τις μελέτες είναι η αποκοπή της ροής σε διάφορα σημεία ανάλογα με το κάθε σενάριο. Φαινόμενα άξια μελέτης επίσης εντοπίζονται στον ομόρου του μοντέλου, δηλαδή την ροή που αφήνει πίσω η γεωμετρία του Ahmed body και την οπισθέλκουσα δύναμη που παρουσιάζεται. Το Ahmed και οι μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις του στην μελέτη των φαινομένων με τα οποία ασχολούμαστε και οι δυνατές βελτιώσεις στην μορφή του, έρχονται να δώσουν λύση στο πρόβλημα των πολύωρων μελετών και της υπολογιστικής ισχύς που ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθούν ακόμη και για την εξακρίβωση ενός πολύ απλού προβλήματος. Ακόμη, το πρόβλημα που υπάρχει συχνά στα πειράματα περίπλοκων γεωμετριών καθιστούν δύσκολη και χρονοβόρα την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα. Το Ahmed body έρχεται να εμφανίσει τις συγκρίσεις μεταξύ, όπως για παράδειγμα στη παρούσα μελέτη, δυο διαφορετικών παραλλαγών της μορφής του όπως γίνεται ξεκάθαρα παρακάτω.

Πρώτος ο Ahmed παρατήρησε όλα τα παραπάνω φαινόμενα πραγματοποιώντας το πείραμα του σε μια σήραγγα με ταχύτητα ροής 60 m / s και αριθμό Reynolds $4.29 \cdot 10^6$ με βάση το μήκος του μοντέλου.

Ο αριθμός Reynolds είναι:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{\rho L}{\nu} \quad (2.1)$$

όπου:

$$\nu = \mu/\rho \quad (2.2)$$

και επι μέρους αναλυτικά:

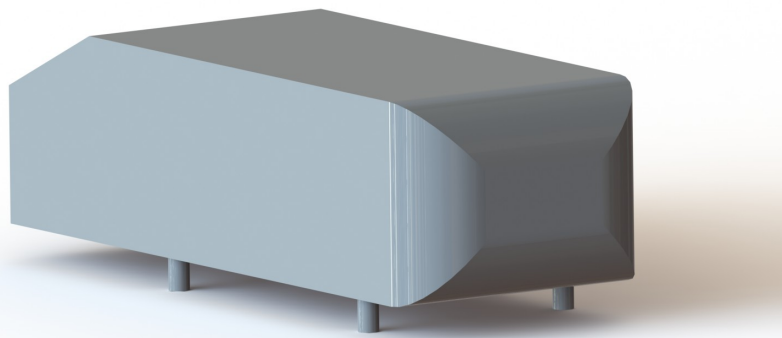
- μ : η μέση ταχύτητα του αέρα (SI μονάδες: m/s)
- L : η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση που ακολουθεί το ρευστό βάσει το μήκος του Ahmed body (m)

- μ : το δυναμικό ιξώδες του αέρα ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ ή $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ή $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
- ν : το κινηματικό ιξώδες του αέρα (m^2/s)
- ρ : η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3).

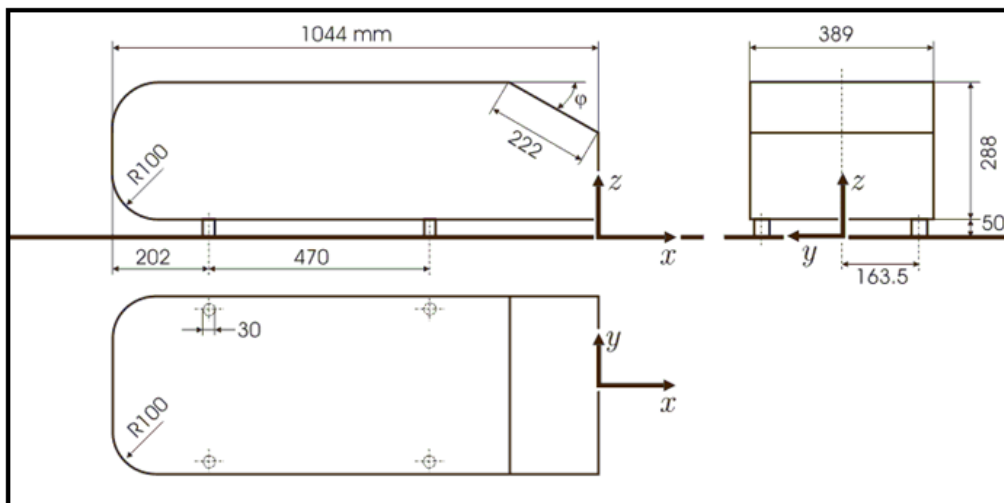
Στη συνέχεια με λεπτομερείς μετρήσεις LDA, ο Lienhart και οι συνεργάτες του [14, 15] επανέλαβαν το πείραμα σε μία χαμηλής ταχύτητας αεροσήραγγα με διατομή $1.87 \times 1.4 \text{ m}^2$ (πλάτος x ύψος) και ταχύτητα εισόδου αέρα τα 40 m/s . Η παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθεί τα βήματα του Lienhart ενώ διαθέτει τα πειραματικά δεδομένα που έχει συλλέξει ο ίδιος. Το σχήμα του Ahmed είναι αρκετά απλό και επιτρέπει μια ακριβή προσομοίωση της ροής γύρω του. Την ίδια στιγμή, υπάρχουν αρκετά σημαντικά χαρακτηριστικά που το συνδέουν με τα πραγματικά μοντέλα αυτοκινήτων όπως αναλύεται στην συνέχεια.

Αρχικά κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί η γεωμετρία που επιλέχτηκε για την παρούσα μελέτη. Τα χαρακτηριστικά ανήκουν στο απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου που αναφέρθηκε παραπάνω και είναι γνωστό ως Ahmed Body.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Ahmed Body είναι καθορισμένα από τον ίδιο του το δημιουργό S.R. Ahmed και φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

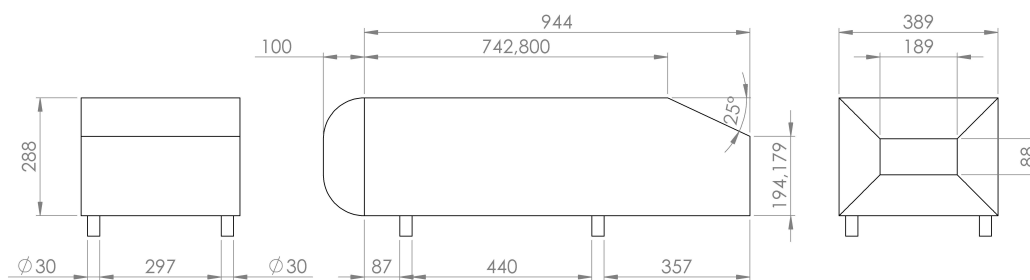


Σχήμα 2.2: Ahmed Body



Σχήμα 2.3: Γεωμετρική Περιγραφή Ahmed Body

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η σχεδίαση είναι απλή και αποτελείται από παράλληλες ευθείες και καμπυλότητες στο εμπρόσθιο μέρος. Στο μοντέλο που μελετάται η γεωμετρία ακολουθεί τις δυο παραλλαγές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Οι παραλλαγές αυτές έχουν να κάνουν με το πίσω κεκλιμένο μέρος του μοντέλου και χαρακτηρίζεται από γωνία 25 και 35 μοιρών.

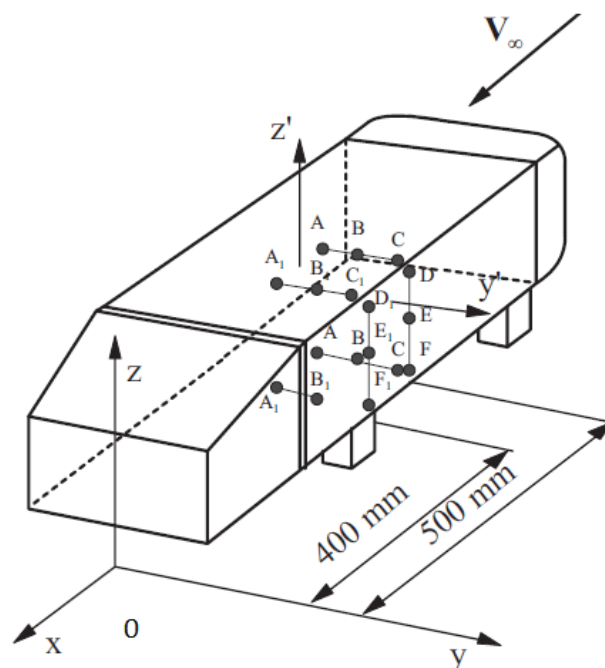


Σχήμα 2.4: Ahmed Body 25 μοιρών



Σχήμα 2.5: Ahmed Body 35 μοιρών

Το μισό μέρος του μοντέλου αποτελείται από όργανα μέτρησης πίεσης (pressure taps). Από αυτά, 210 όργανα είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο εμπρόσθιο τμήμα και 83 στο μεσαίο τμήμα. Μόνο 3 διατάξεις φέρουν όργανα για μέτρηση της πίεσης στο πίσω μέρος του οχήματος, συγκεκριμένα



Σχήμα 2.6: Θέσεις αισθητήρων στις πειραματικές μετρήσεις του [1]

για 5, 12.5 και 30 μοίρες. Στο πρώτο υπάρχουν 444 οπές πίεσης εξίσου κατανομημένα στο μισό της επιφάνειας του οχήματος, στο δεύτερο 430 και στο τελευταίο 450. Μετρητικά όργανα πίεσης (scanivalves) για τη συλλογή δεδομένων βρίσκονται στο εσωτερικό του μοντέλου. Οπτικά αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6.

Καθώς αλλάζει η κλίση, η κάθετη περιοχή του μοντέλου αλλάζει και συνεπώς αυτό επηρεάζει και την κατανομή της πίεσης. Στις πειραματικές μετρήσεις αλλάζοντας τη γωνία από τις 5 στις 30 μοίρες έχει ως συνέπεια τη μείωση του λόγου της κάθετης περιοχής ως προς την εμπρόσθια περιοχή από 93% στο 61.5%, το οποίο μειώνει τον αντίστοιχο συντελεστή οπισθέλκουσας για το πίσω μέρος του οχήματος από 86% στο 29% της συνολικής οπισθέλκουσας. Αντίθετα ο συντελεστής οπισθέλκουσας για το κεκλιμένο τμήμα αυξάνεται από 5.4% στα 66.4%. Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν ότι η οπισθέλκουσα παράγεται κυρίως από το κεκλιμένο και πίσω τμήμα του οχήματος. Παρόμοια συμπεριφορά αναμένουμε και τις προσομοιώσεις με υπολογιστικά πακέτα.

2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Πειραματικών Μετρήσεων

Αναμφισβήτητα υπάρχουν πολλές αναφορές και μελέτες σε απλοποιημένα μοντέλα αυτοκινήτων. Από αυτές επιλέχθηκαν οι εργασίες-ορόσημα και κάποιες νεότερες που είναι αντιπροσωπευτικές για τη μελέτη απλοποιημένων επιβατικών οχημάτων και παρουσιάζουν επιστημονικό ενδιαφέρον. Συνοπτικά, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Αυτό γίνεται για να αναφερθεί η σπουδαιότητα των πρώτων εφαρμογών και να αποτυπωθεί στη συνέχεια πως εξελίχθηκε ο αντίστοιχος επιστημονικός τομέας από το 1975.

Συγγραφέας	Έτος
W.H. Hucho και άλλοι	1975
S.R. Ahmed και άλλοι	1984
K.Burgin και άλλοι	1986
H. Lienhart και άλλοι	2002
S. Krajnovic και L. Davidson	2005
J.L. Aider και άλλοι	2010
L. Jowsey και M. Passmore	2010
K. Gosse και άλλοι	2011
W. Meile και άλλοι	2011

Πίνακας 2.1: Λίστα βιβλιογραφικών πηγών

Ένα βασικό (χοντροκομμένο) μοντέλο οχήματος σχεδιασμένο για το έδαφος παρουσιάστηκε στο [1]. Συγκεκριμένα, με τη χρήση πειραματικών διατάξεων αναλύθηκε η δομή του ομόρου και η γεωμετρία του οχήματος. Βασισμένο στο μήκος του μοντέλου, με αριθμό Reynolds 4.29 εκατομμύρια, λεπτομερείς μετρήσεις πίεσης και δυνάμεων πραγματοποιήθηκαν, και ο ομόρου ερευνήθηκε σε μια αεροσήραγγα. Οπτικές αναπαραστάσεις της ροής λήφθηκαν και διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις δοκιμάστηκαν. Αναλύοντας τις συνιστώσες της οπισθέλκουσας περίπου το 85% της οπισθέλκουσας του σώματος οφείλεται σε οπισθέλκουσα λόγω πίεσης ενώ ο εμπρόσθιο κομμάτι συνεισφέρει το πολύ κατά 9% στην οπισθέλκουσα πίεσης. Το μεγαλύτερο κομμάτι αυτού δημιουργείται στο πίσω μέρος του οχήματος. Το υπόλοιπο είναι οπισθέλκουσα τριβής. Η συμπεριφορά της ροής σχολιάζεται ως εξής: Η ροή του ομόρου παρουσιάζει ένα σύστημα επιπέδων με δίνες σε σχήμα "πέταλο", το ένα πάνω από το άλλο σε σφαιρικά επίπεδα στη βάση του οχήματος. Οι δίνες ξεκινούν από το κεκλιμένο επίπεδο. Επιπλέον, η ένταση, ύπαρξη και ανάμιξη των δινών εξαρτάται στη διαφορετική γωνία του κεκλιμένου τμήματος στο πίσω μέρος του οχήματος. Περιγράφονται τα σημαντικά χαρακτηριστικά της ροής του ομόρου για διατάξεις χαμηλής και υψηλής οπισθέλκουσας. Η διάταξη με χαμηλή οπισθέλκουσα στο πίσω μέρος επιφέρει μια ασθενής εγκάρσια ροή στον ομόρου που δημιουργείται. Η ροή με υψηλή οπισθέλκουσα χαρακτηρίζεται από ισχυρές δίνες στις πλαϊνές ακμές του οχήματος, μια φούσκα αποκόλλησης στη βάση της κεκλιμένης επιφάνειας και μια φούσκα αποκόλλησης που προέρχεται από το κάθετο πίσω τμήμα της βάσης του οχήματος. Ακόμη, η ροής υψηλής οπισθέλκουσας είναι ασταθής: το σημείο που αλλάζει η σταθερή ροή συνδέεται με την εξάλειψη της ισχυρής κάθετης κίνησης στον ομόρου. Τέλος, η σχετικότητα όλων αυτών των φαινομένων ως προς τα πραγματικά οχήματα επισημαίνεται.

Ο Burgin και οι άλλοι [6] πραγματοποίησαν πειραματικές μετρήσεις σε ένα μοντέλο υπό κλίμακα για να μελετήσουν την επίδραση του εδάφους με τη χρήση ενός κυλιόμενου διαδρόμου σε μια αεροσήραγγα. Το φαινόμενο αυτό απασχολεί ένα μεγάλο φάσμα της αυτοκινητοβιομηχανίας, από τα αγωνιστικά οχήματα έως τα φορτηγά. Η κίνηση των τροχών επηρεάζει τις πειραματικές μετρήσεις και φυσικά ο αριθμός Reynolds, που εξαρτάται από τις διαστάσεις του οχήματος. Επίσης το μοντέλο μελετήθηκε ενώ στρίβει και με πλάγιο άνεμο ως προς το σώμα του. Το μέγεθος του κυλιόμενου διαδρόμου εξαρτάται από το όχημα. Εκεί δοκιμάστηκαν διαφορετικές γωνίες έως και 20 μοίρες. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για μοντέλα με περιστρεφόμενους τροχούς. Τέλος οι πειραματικές μετρήσεις συγκρίνονται με άλλα πειράματα με ποικίλες διαστάσεις, που επαληθεύονται οι αρχικές παρατηρήσεις και υποθέσεις των συγγραφέων.

Στα πλαίσια του πρότζεκτ Μοντέλων για Αεροδυναμική οχημάτων, τελευταίας γενιάς μοντέλα τύρβης αναπτύχθηκαν, βελτιώθηκαν και επαληθεύτηκαν, όπως συζητούνται στο [15]. Καθώς τα πειραματικά δεδομένα είναι απαραίτητα για την επαλήθευση των δεδομένων, οι συγγραφείς πραγματοποίησαν τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο μοντέλο Ahmed για δύο διαφορετικές γωνίες κεκλιμένου οχήματος (για 25 και 35 μοίρες) και ταχύτητα αέρος 40 m/s. Τα δεδομένα αναπαριστούν τις πιο κρίσιμες περιοχές της ροής και μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με αριθμητικές προσομοιώσεις. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αεροσήραγγα χαμηλής ταχύτητας και ένα LDA. Οι διαφορετικές γωνίες που μελετήθηκαν πλαισιώνουν μια κρίσιμη αστάθεια όταν η ροή αποσπάται από την κεκλιμένη επιφάνεια. Όλες οι μετρήσεις που λήφθηκαν (3 συνιστωσών μέσης ταχύτητας, των μέσων τετραγωνικών ριζών αυτών, οι τάσεις Reynolds και άλλες ορμές τρίτης τάξης) ξεκάθαρα δείχνουν τις διαφορές στην αποκόλληση ροής και στην ανακυκλοφορία. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλα τα στάδια από την ανάπτυξη μέχρι την επαλήθευση υπολογιστικών μοντέλων για την αεροδυναμική οχημάτων.

Τα αποτελέσματα ενός κυλιόμενου δαπέδου στη ροή ενός απλοποιημένου οχήματος (υπό κλίμακα 1:3) μελετώνται ερευνώντας επίσης στο [12]. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από δύο προσομοιώσεις τύπου μεγάλων-δινών με στατικό και κινούμενο δάπεδο, παρατηρείται ότι η κίνηση του δαπέδου μειώνει την οπισθέλκουσα κατά 8% και την άντωση κατά 16%. Οι αλλαγές στη ροή παρατηρούνται σε όλην περιοχή του υπολογιστικού πεδίου, με εντονότερη την περιοχή κοντά στο έδαφος και στο πίσω μέρος του οχήματος και στο κεκλιμένο επίπεδο, τα οποία επαληθεύονται και πειραματικά στο [9]. Ο ομόρου είναι σχετικά έντονος στην κίνηση του δαπέδου, το οποίο βρίσκεται σε αρμονία με προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα, η ροή της μάζας αέρα στο κάτω μέρος του οχήματος αυξάνεται όταν είναι παράλληλη με τη ροή αέρα και μειώνεται όταν είναι κάθετη σε αυτή, εν συγκρίσει με στατικό πάτωμα. Η περιοδικότητα των φαινομένων ροής φαίνεται να εξαρτάται στην κινητικότητα του δαπέδου. Καθοριστικοί παράγοντες είναι το σχήμα του οχήματος, η απόσταση από το έδαφος και, φυσικά, η ταχύτητα του οχήματος. Οι αλλαγές στην επιφανειακή πίεση πάνω στο σώμα του οχήματος και η εξέλιξη της ροής πάνω σε αυτό υποδεικνύουν την αναγκαιότητα λήψης πειραματικών δεδομένων και υπολογιστικών προσομοιώσεων με κυλιόμενο διάδρομο.

Ο έλεγχος της ροής σε ένα απλοποιημένο όχημα με δημιουργία δινών μελετάται στο [2]. Το αρχικό Ahmed body τροποποιείται με καμπυλωτό πίσω τμήμα αντί για κεκλιμένο, έτσι ώστε η ροή να μην αποκολλάται λόγω του σχήματός του. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή μιας γραμμής από μη-συμβατικές τραπεζοειδείς γεννήτριες δινών πάνω στο απλοποιημένο μοντέλο. Παρουσιάζονται οι ευαισθησίες των αποτελεσμάτων σε αλλαγές γεωμετρικών και άλλων φυσικών παραμέτρων. Η μέγιστη μείωση οπισθέλκουσας είναι 12% ενώ η μείωση της ολικής οπισθέλκουσας είναι περισσότερο από 60% με ισχυρή σύνδεση με την αδιατάρακτη ροή. Τελικά επιλέγεται μια δυναμική παράμετρος και μια νέα διάταξη με μηχανοκίνητες γεννήτριες δινών. Αυτό οδήγησε σε νέα μείωση της άντωσης και της οπισθέλκουσας. Επίσης, πειραματικά ανακαλύφθηκε ότι η μείωση της οπισθέλκουσας και της άντωσης συνδέεται στενά με τη μείωση της ανακυκλοφορίας των δινών που παράγονται από τις πλαϊνές ακμές του πίσω μέρους και είναι παράλληλες προς την κίνηση του οχήματος. Φαίνεται ότι οι γεννήτριες δινών αποκαλούν τη ροή νωρίτερα και προκαλούν μεγαλύτερη ανακυκλοφορία πάνω στο κεκλιμένο επίπεδο. Συνεπώς, μείωση της οπισθέλκουσας σχετίζεται άμεσα με μεγάλη περιοχή αποκόλλησης και ασθενείς δίνες παράλληλα προς την κίνηση

του οχήματος. Οπότε, ενεργοποιώντας πρόωρη αποκόλληση μειώνει τη συνολική οπισθέλκουσα όταν οι πίσω δίνες και οι φυσαλίδες ανακυκλοφορίας αλληλεπιδρούν στον κοντινό ομόρου.

Με αφορμή τη χρήση των διαχυτών σε αγωνιστικά αυτοκίνητα, οι οποίοι αυξάνουν τις επιδόσεις του οχήματος στις στροφές καθώς μειώνουν την οπισθέλκουσα, η χρήση τους μελετάται στα επιβατικά οχήματα [10], το οποίο θα μειώσει και τις εκπομπές καυσαερίων. Ένα απλοποιημένο μοντέλο χρησιμοποιείται σε αεροσήραγγα όπου ένα απλός διαχύτης χωρίζεται σε πολλαπλά κανάλια, όπου μετράται η δύναμη και η πίεση. Διαφορετικοί σε γεωμετρία διαχύτες μελετώνται που είναι κατάλληλη για εφαρμογές σε δρόμο και σε αγώνες. Οι μεταβολές σε οπισθέλκουσα, άντωση και του λόγου αυτών συζητείται σε όρους πίεσης στο κάτω μέρος του οχήματος. Ενώ παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται σε όλες τις εκδοχές, ανακαλύφθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των καναλιών εξαρτάται από της περιοχές της ροής που βρίσκονται στο επίπεδο του διαχύτη. Σε γωνίες ακριβώς πάνω από το επίπεδο του βέλτιστου διαχύτη, όπου η ροή είναι μερικώς αποκολλημένη, οι διατάξεις πολλαπλών καναλιών βελτιώνουν αισθητά την κάθετη δύναμη που επιδρά στο όχημα με ελάχιστη αύξηση της οπισθέλκουσας, επεκτείνοντας σημαντικά το παράθυρο βέλτιστης απόδοσης. Οι χάρτες πίεσης υποδεικνύουν ότι τα κέρδη προκύπτουν από την βελτιωμένη άντληση αέρα μέσω διαχύτη και την επαναφορά πίεσης τόσο στα εσωτερικά όσο και εξωτερικά κανάλια. Συνολικά 10 γωνίες διαχύτη και 8 ύψη εξετάστηκαν. Εξετάζοντας τους διαχύτες παρατηρήθηκαν τα εξής αποτελέσματα. Για την απλό διαχύτη: Η βέλτιστη γωνία βρίσκεται μεταξύ 13 και 16 μοίρες, άνω του διαστήματος τα επίπεδα τις κάθετης δύναμης μειώνονται και η οπισθέλκουσα αυξάνεται. Πάνω από τις 13 μοίρες παρατηρείται τοπική αποκόλληση στην είσοδο του διαχύτη και από τις 25 μοίρες ο διαχύτης μπλοκάρει αν και συνεχίζει να παράγει κάθετη δύναμη. Για τον διαχύτη πολλαπλών επιπέδων: παρόμοιες τάσεις οπισθέλκουσας και άντωσης βρέθηκαν και οι βέλτιστες γωνίες είναι από τις 13 μοίρες και πάνω. Η κάθετη δύναμη βελτιώνεται αισθητά και τα ποσοστά κέρδους αυξάνονται όσο αυξάνεται η γωνία του διαχύτη. Στο διάστημα μεταξύ 16 και 19 μοιρών, όπου ο βαθμός αποκόλλησης είναι μικρός, τα πολλαπλά κανάλια δείχνουν μεγάλα αποτελέσματα στην κάθετη δύναμη και ελάχιστη αύξηση στην οπισθέλκουσα. Σε αυτό το εύρος η οπισθέλκουσα αυξάνεται κατά 13% εν συγκρίσει με το βέλτιστο απλό διαχύτη, που αυξάνει σημαντικά το παράθυρο λειτουργίας του. Πάνω από 19 μοίρες μεγάλη βελτίωση στην απόδοση παρατηρείται συγκρινόμενο με την απλή διάταξη, ειδικά για 3 και 4 κανάλια. Ωστόσο, τα επίπεδα κάθετης δύναμης που παράγονται παραμένουν χαμηλά. Τα δεδομένα πίεσης υποδεικνύουν ότι τα κέρδη οφείλονται στην επαναφορά της πίεσης στα εξωτερικά κανάλια.

Πειραματικές μετρήσεις με εκπομπές καυσαερίων σε απλοποιημένα οχήματα μελετήθηκαν στο [7]. Συγκεκριμένα, ένα Ahmed body με γωνία κεκλιμένου επιπέδου 25 μοίρες, στο οποίο αναπαρίστανται οι εκπομπές καυσαερίων εισάγεται θερμαινόμενος αέρας μέσω ενός μικρού σωλήνα στο ένα άκρο της βάσης του μοντέλου. Ειδικός εξοπλισμός μετρά τις στιγμιαίες διαχυμάνσεις της θερμοκρασίας στον ομόρου κοντά στο μοντέλο. Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας μετρήθηκαν με το LDA Συλλέγοντας και αναλύοντας δεδομένα ταχυτήτων και θερμότητας, παρατηρήθηκε ότι η μικρομίξη δεν είναι περιοριστικός παράγοντας για χημικές αντιδράσεις στον ομόρου κοντά στο μοντέλο. Οι μετρήσεις αποκάλυψαν ισχυρή ανομοιογένεια στο βαθμωτό πεδίο κυρίως εξαιτίας του σύνθετου μονοπατιού των βαθμωτών στον ομόρου κοντά στο μοντέλο και της τοποθεσίας όπου παράγεται ο ρύπος (λόγω της μη συμμετρίας). Η παρουσία ενός ζεύγους δινών που εισάγεται από το μοντέλο συγκεντρώνει το θερμικό πεδίο στις δύο πλευρές του ομόρου και χαμηλώνει

το επίπεδο της θερμοκρασίας κατά μήκος του μοντέλου. Λόγω του ανισοτροπικού πεδίου της θερμοκρασίας και της τιμής του χημικού χρόνου η μετατροπή του NO σε NO₂ μέσω οξειδωσης δεν είναι πιθανό να συμβεί στον ομόρου κοντά στο μοντέλο.

Η αεροδυναμική συμπεριφορά του Ahmed body εξερευνάται πειραματικά για 25 και 35 μοίρες και αριθμούς Reynolds 2.784 εκατομμύρια στο [17]. Για τη μελέτη ένας εμπορικός κώδικας (με Reynolds Stress Model) χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα επαληθεύονται μέσω διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων. Αν και οι αριθμητικές τιμές δεν είναι σε απόλυτη συμφωνία, οι τάσεις είναι ίδιες, ειδικά για την οπισθέλκουσα. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξαρτήθηκε από τον τύπο και την πυκνότητα του πλέγματος καθώς και από το μοντέλο τύρβης. Αυτά τα εργαλεία είναι πολύτιμα για την αυτοκινητοβιομηχανία, ειδικά τα πρώιμα στάδια σχεδιασμού οχήματος και όταν τα χρονικά περιθώρια είναι στενά. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων μπορεί να βελτιωθεί αν αυξηθεί ο αριθμός των κελιών του πλέγματος στις περιοχές όπου οι κλίσεις των πεδίων είναι μεγάλες.

2.3 CFD Μέθοδοι για αεροδυναμικά οχήματα.

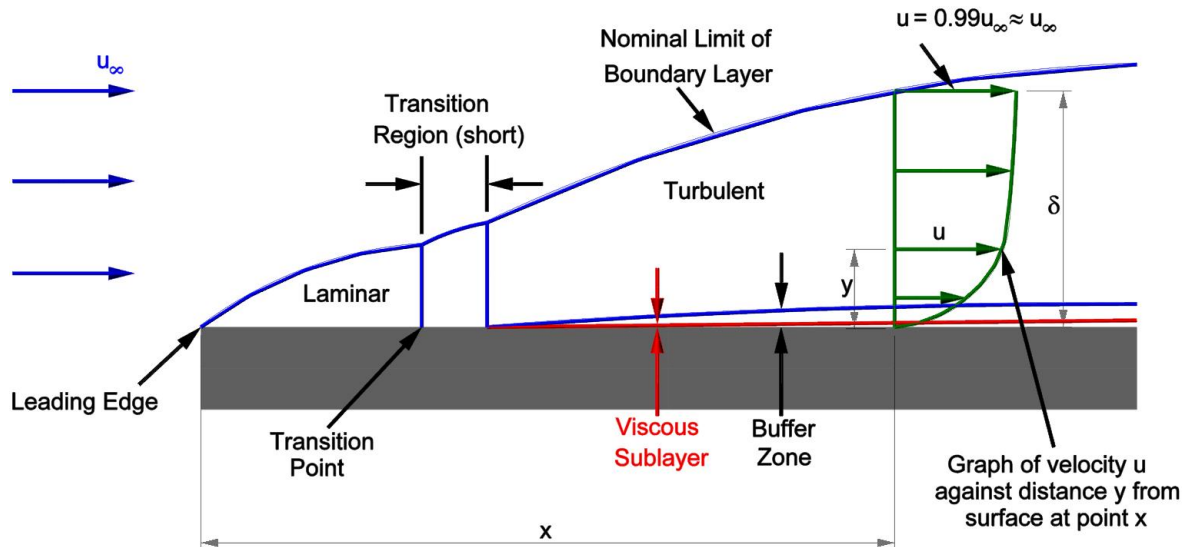
2.3.1 Γενικές παρατηρήσεις

Η κατανόηση και πρόβλεψη της τύρβης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές της ρευστοδυναμικής και έχει χαρακτηριστεί από τον Feynman ως το πιο σημαντικό άλυτο πρόβλημα της κλασσικής φυσικής.

Ο Bradshaw ορίζει την τύρβη ως εξής:

‘Τύρβη είναι μια τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή, στην οποία η έκταση των δινοσωλήνων προκαλεί διαταραχές ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες μεταξύ ελάχιστης (που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες) και μεγίστης (που καθορίζεται από την συνεκτικότητα του ρευστού).’

Το πολύπλοκο φαινόμενο της τύρβης επιλύεται με κατάλληλη μοντελοποίηση, ανάλογα με το μέγεθος της και λοιπά χαρακτηριστικά όπως αναλύεται στην Εικόνα 2.7. Λόγω της πολυπλοκότητάς του, μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί μια καθολική θεωρία και μεθοδολογία που να περιγράφει με πλήρη ακρίβεια την τύρβη. Ανά τα χρόνια πολλές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για την επίλυση της τύρβης χρησιμοποιώντας μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Έτσι λοιπόν, το πρόβλημα της τύρβης επιλύεται επαναληπτικά και λόγω του μεγάλου μεγέθους του προβλήματος, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 2.7: Οριακό Στρώμα Τύρβης

Με την κίνηση του, ένα όχημα δρόμου εκτοπίζει τον αέρα γύρω του. Η ροή του αέρα που δημιουργείται γύρω του, δημιουργεί ένα πεδίο πίεσης όμοιο με αυτό ενός πτερύγιου αεροσκάφους. Αυτό το πεδίο πίεσης, με μια ολοκληρωμένη έννοια, είναι ο λόγος για τις δυνάμεις που δέχεται το όχημα. Οι δυνάμεις εξαρτώνται από τη γεωμετρία του κορμού και από το αν είναι παρών πλευρικός άνεμος.

Ενώ σε κάθε σημείο στον κορμό της διεπιφάνειας (επιφάνεια -αέρα) υπάρχει μια δύναμη ισορροπίας (η δύναμη που ασκείται από το σώμα είναι ίση και αντίθετη με αυτήν που ασκείται από τον αέρα ή αντίστροφα) που είναι επουσιώδης σε μια προσομοίωση είτε το όχημα κινείται και ο αέρας είναι στατικός είτε το αντίθετο. Το προηγούμενο ισχύει πρώτα για τις δοκιμές δρόμου και έπειτα για τα πειράματα σε αεροσήραγγες.

Για όλες τις πρακτικές μελέτες, η ροή γύρω από οχήματα δρόμου είναι τυρβώδης (δηλαδή ο αριθμός Reynolds υπερβαίνει το 10^6). Αυτού του είδους ροή περιγράφεται επαρκώς από τις εξισώσεις Navier Stokes (NS). Αυτές οι εξισώσεις εκφράζουν την ισορροπία όλων των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα στοιχείο όγκου της ροής. Αυτές είναι η αδράνεια, η πίεση και οι δυνάμεις ιξώδους. Οι πιθανολογούμενες ισορροπίες της δύναμης μαζί με την εξίσωση της συνέχειας (διατήρηση της μάζας) είναι η βάση όλων των θεωρητικών μεθόδων και εμφανίζονται στη συνέχεια. Για συμπιεστή ροή, η εξίσωση που εκφράζει την διατήρηση της ενέργειας απαιτείται ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα της συμπιεστότητας είναι αμελητέα για ταχύτητες πάνω από 350km/h, έτσι ώστε για τα οχήματα του δρόμου η ροή να θεωρείται ασυμπίεστη.

Οι εξισώσεις NS είναι ένα σύστημα συζευγμένων, μη γραμμικών, δεύτερης τάξης, μερικών εξισώσεων. Ακριβείς λύσεις αυτών των εξισώσεων είναι γνωστές μόνο για μερικές ειδικές περιπτώσεις για τις οποίες δεν έχει ενδιαφέρον να αναφερθούμε στη συγκεκριμένη μελέτη. Όμως οι αεροδυναμιστές συνήθως καταφεύγουν σε προσεγγίσεις των NS, οι οποίες επιδέχονται μια αριθμητική λύση. Αυτές οι προσεγγίσεις εισάγουν φαινομενολογικά σφάλματα στη μελέτη της ροής. Για κάθε μαθηματικό τύπο οι αριθμητικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να λύσουν τις εξισώσεις και τις οριακές συνθήκες εισάγουν αριθμητικά σφάλματα. Ειδικότερα, αυτά τα σφάλματα είναι

Όνομασία κώδικα	Δίλη lattice / Μέθοδος panel	Μέθοδος Euler	Μέθοδος RANS	Μέθοδος LES / DNS
Απλουστευτική παραδοχή	Ασυμπίεστο μη συνεκτικό και αστρόβιλο μέσο	Μεσαίο ιξώδες	Υποθετικό μοντέλο τύρβης	LES : Μοντελοποίηση μικρών δινών DNS; Καμία βλ. Μέθοδος RANS
Φύση αποτελεσμάτων των εξισώσεων	Γραμμική εξίσωση Laplace	Μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης (εξισώσεις Euler)	Μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις δεύτερης τάξης (εξισώσεις RANS)	LES : Μοντελοποίηση μικρών δινών DNS; Καμία βλ. Μέθοδος RANS
Μέθοδος αποτελέσματος	Υπέρθεση των βασικών αναλυτικών λύσεων, όρους επαναληπτικών αριθμητικών λύσεων που προκύπτουν από το σύστημα πως η πηγή, βύθισμα (sink) δίπολο, δίνη,ροές επαναληπτικών αριθμητικών λύσεων που προκύπτουν από το σύστημα των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων	Λύσεις των εξισώσεων συνέχειας και Euler μαζί με την εξίσωση συνέχειας (και εντl ενέργεια) Επαναληπτική λύση της παραχθείσας διακριτοποιημένης εξίσωσης με τη χρήση τεχνικών πεπερασμένων όγκων ή πεπερασμένων στοιχείων(Finite Volume or Finite Element)	Λύσεις των εξισώσεων συνέχειας και μοντέλου τύρβης με την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων(Finite Volume or Finite Element)	Λύσεις εξισώσεων Navier Stokes (NS) και συνέχειας. Τεχνικές βλ . Μέθοδος Euler και RANS βλ. μεθόδους Euler
Παραγωγή πλέγματος	Απαραίτητα μόνο αντικείμενο με διακριτοποιημένη επιφάνεια	Χρειάζεται αντικείμενο με διακριτοποιημένη επιφάνεια και υπολογιστικό πεδίο	βλ. Μέθοδος Euler	Euler και RANS βλ. μεθόδους Euler

Σχήμα 2.8: Μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής βασισμένα στις εξισώσεις NS

λόγω της μη επαρκούς διακριτοποίησης της ροής του πεδίου ή της μη ολοκληρωμένης επεξεργασίας και περιπλοκότητας της διαμόρφωσης της γεωμετρίας. Οι επιπτώσεις των αποτελεσμάτων, είναι ότι τα φυσικά φαινόμενα δεν παρουσιάζονται σωστά.

2.3.2 Προσεγγίσεις των εξισώσεων Navier-Stokes

Η ιεραρχία των μεθόδων CFD για τον υπολογισμό της ροής με σειρά αυξανόμενης δυσκολίας (προσπάθειας) αποτελείται από:

1. Γραμμικές Μεθόδους (Vortex lattice and Panel methods)
2. Μη γραμμικές μεθόδους
 - (α') Μη συνεκτικό (Μέθοδοι Euler)
 - (β') χρονικά-μεσοτιμημένο (σταθερού) ιξώδους RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Methods)
 - (γ') Ασταθές ιξώδες
 - i. Προσομοίωση μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation) LES
 - ii. Άμεση αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation) DNS

Αγνοώντας τους όρους ιξώδους και επιβάλλοντας τη συνθήκη αστρόβιλων ροών, το πρόβλημα της επίλυσης των ασυμπίεστων NS εξισώσεων μετατρέπεται σε επίλυση της γραμμικής εξίσωσης Laplace. Αυτή η ροή ενός 'ιδανικού' ρευστού καλείται Δυναμική Ροή. Οι μέθοδοι Vortex lattice και panel χρησιμοποιούν αριθμητικές τεχνικές για να επιλύσουν την εξίσωση Laplace.

Μεταχειρίζοντας το ρευστό ως μη συνεκτικό αλλά αναιρώντας τη συνθήκη της αστρόβιλης ροής, οι εξισώσεις NS μετατρέπονται σε εξισώσεις Euler οι οποίες περιέχουν τους μη-γραμμικούς όρους μεταφοράς στροβιλότητας. Εξαιτίας της μη γραμμικότητας, η μεθοδολογία επίλυσης αλλάζει

από την προσανατολισμένη προς το οριακό στρώμα/επιφάνεια μέθοδο στις τεχνικές που είναι προσανατολισμένες στο υπολογιστικό πεδίο με αποτέλεσμα να αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος. Οι μη-γραμμικές μέθοδοι συχνά αναφέρονται ως 'Μέθοδοι Πεδίου'. Οι εξισώσεις Euler μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μελετήσουν τη μεταφορά στροβιλότητας στη ροή όταν, για παράδειγμα, η στροβιλότητα που υπολογίζεται από τον υπολογισμό του οριακού στρώματος εισάγεται στην κατάλληλη τοποθεσία του υπολογιστικού πεδίου.

Η Δυναμική ροή και οι μέθοδοι Euler αμελούν τους όρους ιξώδους και επομένως προσομοιώνουν μόνο τις μη συνεκτικές προσκολλώμενες ροές. Η αποκόλληση, που προκύπτει στην πραγματική ροή, δε μπορεί να μελετηθεί. Η εκτίμηση της οπισθέλκουσας πίεσης και οπισθέλκουσας τριβής δεν είναι δυνατή. Επειδή η αναλογία της αδράνειας στις δυνάμεις ιξώδους καθορίζει τον αριθμό Reynolds της ροής, οι δυναμικές ροές έχουν άπειρο αριθμό Reynolds και συνεπώς είναι ανεξάρτητες από αυτή την παράμετρο.

Ένα σημαντικό βήμα προς την προσομοίωση πραγματικής ροής πραγματοποιείται αν ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις ιξώδους. Όταν το όχημα κινείται με ταχύτητα όπου ο αριθμός Reynolds είναι ιδιαίτερα μεγάλος (της τάξης 10^6), τότε όλες οι εξωτερικές ροές μπορούν να θεωρηθούν πλήρως τυρβώδεις. Η ταχύτητα σε μια τέτοια ροή είναι ασταθής λόγω των κυμαινόμενων κινήσεων των δινών στον αέρα προς την κατεύθυνση της ροής και τις κάθετες γωνίες προς αυτήν. Η επίδραση της τυρβώδους κίνησης είναι φανερά αυξημένη στο ιξώδες από μικρή μέχρι πολλές τάξεις μεγέθους.

Κλασική προσέγγιση για την περιγραφή της τυρβώδους ροής με τις εξισώσεις NS είναι η ανάλυση της κίνησης σε δύο τμήματα: ένα μέσης σταθερής ροής στην οποία μια δεύτερη ασταθής ροή υπέρκειται. Αυτό το σκεπτικό των ασταθών εξισώσεων NS και των όρων που σταθμίζονται αθροιστικά ως προς το χρόνο οδηγεί στις γνωστές RANS εξισώσεις. Αυτές οι εξισώσεις περιέχουν, εκτός από τη μέση ταχύτητα και πίεση, όρους όπως το μέσο γινόμενο συνιστωσών ταχύτητας. Επιπλέον πληροφορία που συνδέει αυτούς τους όρους με τη μέση ροή (που παρέχεται από τη μοντελοποίηση της τύρβης) είναι απαραίτητη για να επιλυθούν οι εξισώσεις RANS. Η ποιότητα της προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις RANS, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται.

Το αποτέλεσμα υπολογισμών μια προσομοίωσης RANS σε 3Δ αποτελείται από μέσες τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας, πίεσης και δυνάμεων ιξώδους στην επιφάνεια του σώματος όπως επίσης και σε ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο. Κατά κανόνα, αυτό επιτρέπει την πρόβλεψη της πίεσης και της οπισθέλκουσας τριβής.

Ένα επιπλέον βήμα προς την προσέγγιση πραγματικής ροής είναι η προσομοίωση των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation - LES). Η κύρια ιδέα είναι να υπολογιστούν απευθείας οι μεγάλες δίνες ενός ρευστού χρησιμοποιώντας τις πλήρεις ασταθείς εξισώσεις NS και να μοντελοποιηθούν οι μικρότερες δίνες. Έτσι λοιπόν, οι μικρές δίνες παρουσιάζουν "καθολικό" χαρακτήρα και αλλάζουν από τη μη εξαρτημένη ως προς τη ροή μοντελοποίηση, όπου οι μεγάλες δίνες εξαρτώνται από τη ροή.

Η προσομοίωση άμεσης αριθμητικής (Direct Numerical Simulation- DNS), όπως αναφέρει και το όνομα, είναι η λύση των πλήρους εξισώσεων NS χωρίς κάποια μοντελοποίηση της τύρβης. Οι υπολογισμοί ΛΕΣ και ΔΝΣ, όντας πλήρως προσομοιωτικοί, παράγουν τις συνιστώσες της εξαρ-

τημένης ως προς το χρόνο ταχύτητας και των δυνάμεων ιξώδους στην επιφάνεια του σώματος και στο υπολογιστικό πεδίο. Οι τυρβώδεις ποσότητες (συνιστώσες των τανυστών τάσεων Reynolds) επίσης καθορίζονται πλήρως.

Παρά τις μεθόδους CFD που κατηγοριοποιήθηκαν παραπάνω, μια ομάδα υβριδικών μεθόδων έχουν αναπτυχθεί. Ανάλογα με την επικρατέστερη φυσική στην περιοχή που εξετάζεται, το πεδίο ροής χωρίζεται και η κατάλληλη προσομοίωση NS χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η ροή σε κάθε κομμάτι του πεδίου. Έτσι λοιπόν, είναι δυνατόν να μελετηθούν οι περιοχές κοντά στην επιφάνεια με τις εξισώσεις οριακού στρώματος, η εξωτερική ροή με δυναμική θεωρία και η αποκολλημένη ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με τις εξισώσεις RANS.

2.3.3 Βασικά βήματα για ένα υπολογισμό CFD

Τα βασικά βήματα ενός υπολογισμού CFD είναι ουσιαστικά τα ίδια ανεξαρτήτου της μεθόδου. Μόλις επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος, η σειρά των βημάτων είναι η εξής:

1. Διακριτοποίηση της επιφάνειας του σώματος ή του υπολογιστικού πεδίου, γνωστό ως προεπεξεργασία
2. Η επίλυση
3. Κατάλληλη γραφική αναπαράσταση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, μετεπεξεργασία

Το πρώτο βήμα της διακριτοποίησης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ειδικούς κώδικες προεπεξεργασίας. Αυτοί κυρίως ασχολούνται με την κατασκευή της γεωμετρίας και τους πλέγματος και θα αναφερθούν στη συνέχεια. Οι τεχνικές επίλυσης του δεύτερου βήματος θα περιγραφούν επίσης στη συνέχεια. Το τρίτο βήμα, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα τους χρήστες, είναι η εμφάνιση, χειρισμός και ανάλυση του μεγάλου πλήθους των δεδομένων που περιέχονται σε μια λύση CFD. Εξελιγμένα διαδραστικά συστήματα για σταθμούς εργασίας είναι πλέον διαθέσιμα τα οποία επιτρέπουν την εμφάνιση οποιωνδήποτε μεταβλητών ροής πάνω σε διάφορες επιφάνειες εντός του πεδίου ροής. Τα ίχνη των σωματιδίων επιτρέπουν την οπτικοποίηση και την ανάλυση της 3D συμπεριφοράς της ροής. Τα αποτελέσματα από τους ασταθείς υπολογισμούς μπορούν ακόμη και να συγκεντρωθούν και να παρουσιασθούν ως βίντεο για την κίνηση της ροής.

2.3.4 Σχεδιασμός πλέγματος 3Δ

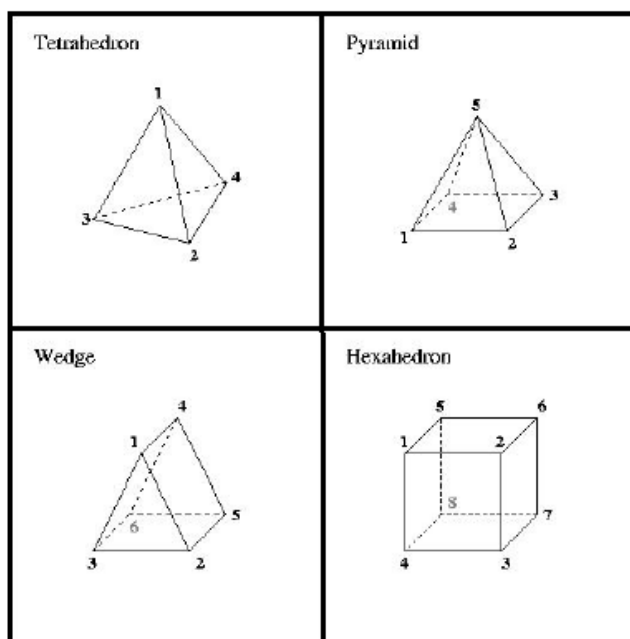
Ένα από τα πιο σημαντικά προαπαιτούμενα πριν τον υπολογισμό του CFD είναι η διαθεσιμότητα ενός κατάλληλου πλέγματος. Αν δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα πλέγμα γρήγορα και αξιόπιστα τότε η ανάλυση CFD αποκλείεται. Η δημιουργία πλέγματος συνδέεται με την προσέγγιση της συνεχούς επιφάνειας του σώματος, οδοστρώματος και του συνεχούς όγκου του υπολογιστικού πεδίου μέσω ενός συνόλου διακριτών συντεταγμένων 3Δ. Κατά κανόνα, η δημιουργία

του πλέγματος δεν σχετίζεται με την αεροδυναμική: ωστόσο, το πλέγμα μεταφέρει/επεκτείνει την πληροφορία γεωμετρίας στον επιλυτή ροής. Ένα μη κατάλληλο πλέγμα μπορεί να επηρεάσει ριζικά την φυσική της ροής που προσομοιώνεται, την σταθερότητα των υπολογισμών και του υπολογιστικού χρόνου. Με το πέρας των χρόνων, η δημιουργία του πλέγματος έλαβε την κατάλληλη προσοχή.

Οι γραμμικές μέθοδοι όπως, οι μέθοδοι Panel χρειάζονται μόνο ένα πλέγμα στην επιφάνεια του σώματος και του οδοστρώματος. Η δημιουργία του πλέγματος στην επιφάνεια ενός πραγματικού σχήματος ώστε να καλύπτει τα κρίσιμα φαινόμενα της ροής δεν είναι κοινή υπόθεση. Τα προερχόμενα από CAD δεδομένα για τον ορισμό της επιφάνειας που δημιουργείται για την κατασκευή του πλαισίου του σώματος στη βιομηχανία είναι χρήσιμα για τη δημιουργία τέτοιων πλεγμάτων. Οι μη γραμμικές μέθοδοι CFD (Euler, NS) χρειάζονται ένα πλέγμα που περιβάλλει το σώμα για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Το εσωτερικό όριο αυτού του πλέγματος είναι η επιφάνεια του σώματος και το εξωτερικό όριο είναι η συνοριακή επιφάνεια ενός επαρκώς μεγάλου υπολογιστικού πεδίου γύρω από το σώμα.

Η μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε εξισώσεις διαφορών και των μετέπειτα υπολογιστικών πράξεων απαιτεί γρήγορη πρόσβαση σε αυτά τα σημεία. Ο απλούστερος τύπος πλέγματος αποτελείται από καμπυλόγραμμα ορθοκανονικά σύνολα γραμμών όπως φαίνεται στην εικόνα. Όλα τα κομβικά σημεία που εξαπλώνονται σε μια γραμμή του πλέγματος μπορούν άμεσα να αναγνωριστούν και να προσπελαστούν. Τέτοια 'προ-οργανωμένα' πλέγματα ονομάζονται 'δομημένα' (structured) πλέγματα και είναι ο πιο συχνός τύπος που συναντάται σε τέτοιες εφαρμογές.

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου είναι η χρήση πολυεδρικών κελιών. Τα πιο συνηθισμένα σχήματα κελιών αναλύονται στην Εικόνα 2.9.



Συνήθη σχήματα όγκων ελέγχου σε τρεις διαστάσεις.

Σχήμα 2.9: Τύποι κελιών πλέγματος

Τοποθετώντας τέτοια κελιά ποικίλου μεγέθους - με τη βάση στην επιφάνεια του σώματος και τις κορυφές μακριά από αυτό - και γεμίζοντας τα κενά με αντεστραμμένα πολυεδρικά κελιά, ολόκληρο το πεδίο μπορεί να διακριτοποιηθεί όπως φαίνεται στην εικόνα. Αυτή είναι η προσέγγιση των πεπερασμένων στοιχείων για τη δημιουργία του πλέγματος για ένα πρόβλημα αεροδυναμικής πεπερασμένου όγκου. Προφανώς με αυτή τη μέθοδο δεν είναι δυνατόν να γίνει απλή διάκριση των κομβικών σημείων (πολυεδρικών κορυφών) του πλέγματος και οι μηχανισμοί προσπέλασης της υπολογιστικής μνήμης είναι χρονοβόροι. Ωστόσο, τα μη δομημένα πλέγματα είναι ιδιαίτερα εύελικτα όταν μελετώνται πολύπλοκες γεωμετρικές επιφάνειες και επιτρέπουν τοπική πύκνωση ή αραιώση των κελιών χωρίς να επιβαρύνονται οι υπόλοιπες περιοχές τους πλέγματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι άλλοι τύποι κελιών μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθούν μη δομημένα πλέγματα.

Κατά την κατασκευή του πλέγματος πρέπει να ληφθούν δύο σημαντικές αποφάσεις. Πρώτη είναι η γενική ιδέα (concept) και μετά το σχήμα του πλέγματος. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του σχήματος του οχήματος, η πιο συχνή γενική ιδέα είναι το "πολυσύνολο" (μυλτι-βλοσκ) όπου το υπολογιστικό πεδίο χωρίζεται σε μικρότερα υπο-πεδία (σύνολα). Κάθε ένα από αυτά διακριτοποιείται, για παράδειγμα, με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος που αντίστοιχα καλύπτει τοπικά τη φυσική της ροής. Έτσι λοιπόν η δημιουργία ενός πλέγματος προσανατολισμένο στο σώμα είναι επιτακτική ανάγκη για τους υπολογισμούς NS. Αυτό σημαίνει ότι μια σειρά από γραμμές του πλέγματος προέρχεται από την επιφάνεια του σώματος με ορθοκανονικό (κάθετο) τρόπο, καθώς οι άλλες γραμμές του πλέγματος τυλίγονται γύρω από το σώμα και στοιβάζονται κοντά του. Τα δύο σχήματα με τα οποία αυτό μπορεί να υλοποιηθεί είναι αλγεβρικά και διαφορικά. Κάθε σχήμα

έχει παραλλαγές. Οι πιο συχνές εκδόσεις που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οχημάτων δρόμου είναι αλγεβρικές. Διαφορικά σχήματα συναντώνται κυρίως σε εφαρμογές αεροναυπηγικής και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ελλειπτικά, υπερβολικά και παραβολικά. Ξεκινώντας από την επιφάνεια του σώματος, η τοποθεσία των σημείων πλέγματος καθορίζεται επιλύοντας ένα σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων. Εν συντομία, η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10 για ένα ρεαλιστικό όχημα εδάφους χρησιμοποιώντας την ιδέα του πολυσυνόλου. Επειδή το φυσικό περιβάλλον ενός οχήματος δεν έχει σύνορα, πρέπει να είναι πεπερασμένο για προσομοίωση CFD, το μέγεθος του υπολογιστικού πεδίου επιλέγεται με τους παρακάτω παράγοντες:

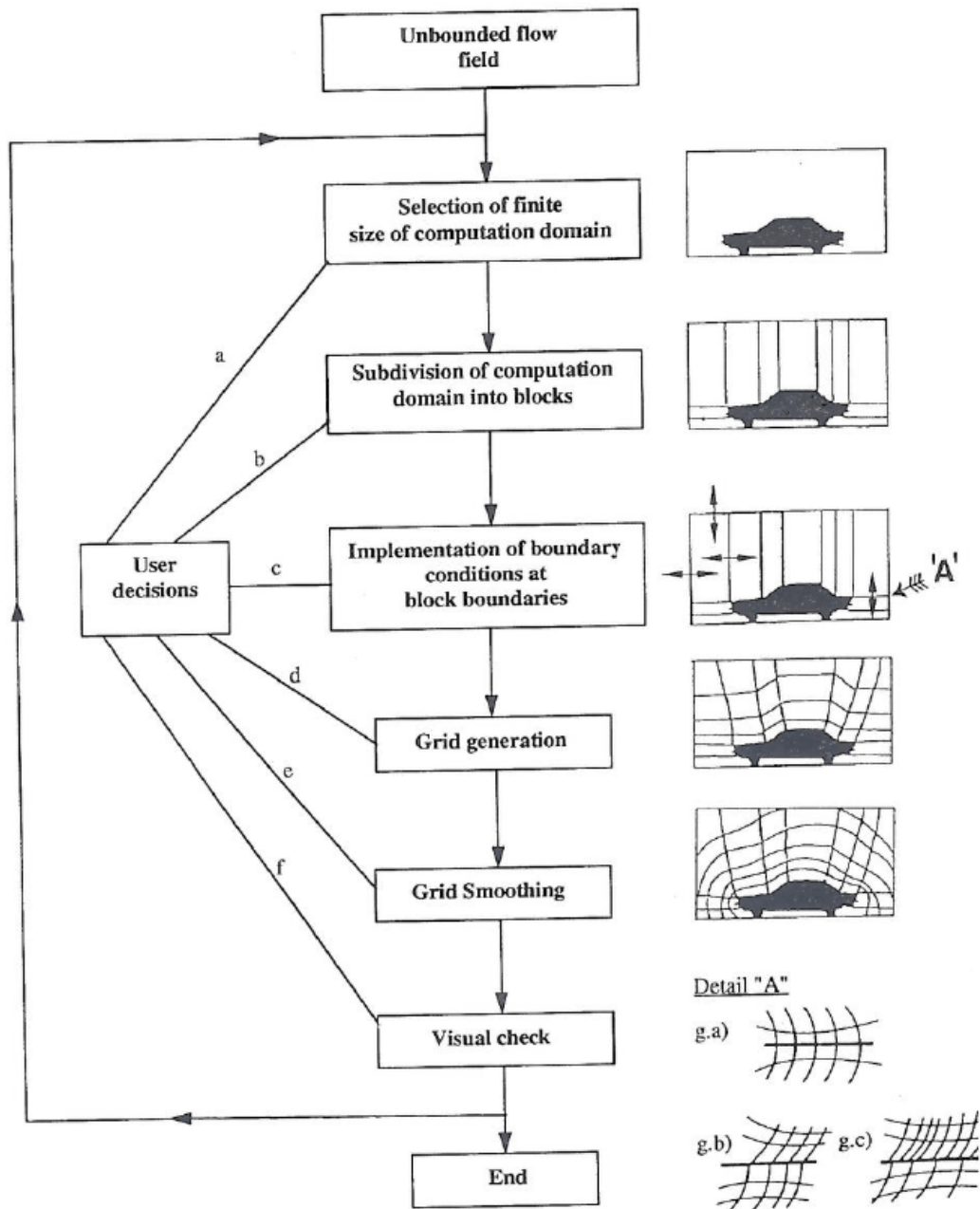
- Σκοπός του υπολογισμού: (λεπτομερείς) ποσότητες ροής σε ολικό ή τοπικό επίπεδο.
- Επαρκής υπολογιστικός χώρος στο μπροστινό, άνω, πλάγιο και πίσω μέρος του οχήματος που περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής. Αυτό απαιτεί εξοικείωση με τον κώδικα CFD και καλή εκτίμηση της προσδοκώμενης ροής. Δεν υπάρχει κάποια θεωρητική μέθοδος που να καθορίζει το κατάλληλο μέγεθος για το υπολογιστικό πεδίο εκτός από τα αριθμητικά πειράματα.
- Διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι και οικονομική ευρωστία για τον υπολογισμό.

Σπανίως χρειάζεται ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος έτσι ώστε το επιλεγθέν υπολογιστικό πεδίο να διαιρείται σε σύνολα (2ο βήμα). Στις περιοχές που αναμένεται οι ποσότητες της ροής να αλλάζουν γρήγορα, όπως πολύ κοντά στην επιφάνεια, στην περιοχή του ομόρου, στις έντονα καμπυλωτές επιφάνειες κτλ, η πυκνότητα του πλέγματος είναι αυξημένη (Εικόνα 2.11).

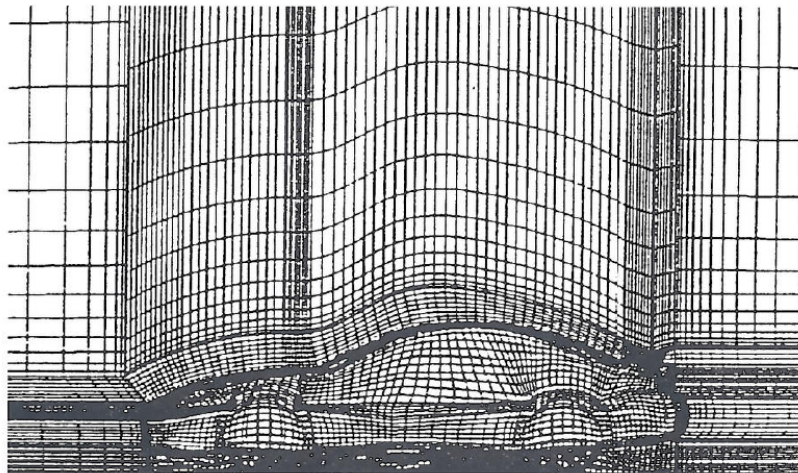
Μια άλλη παραλλαγή για την επιλογή των συνόλων σχετίζεται με τις 'χαρακτηριστικές γραμμές' που χωρίζουν την επιφάνεια του σώματος στα δεδομένα του σχεδίου CAD σε κομμάτια όπως το καπό, το παρμπρίζ, η οροφή, το πορτμπαγκάζ, κτλ. Από αυτά τα δεδομένα ένα 'συρμάτινο πλαίσιο' κατασκευάζεται (Εικόνα 2.12). Αυτό το πλαίσιο ορίζει τις τέσσερις πλευρές της βάσης του συνόλου στην επιφάνεια του σώματος. Μια κάθετη προβολή των τεσσάρων γωνιών βάσης προσανατολίζεται (δείχνει) προς την εξωτερική περιφέρεια του υπολογιστικού πεδίου που ορίζει τον όγκο του συνόλου.

Οι γραμμές πλέγματος διασταυρώνονται με τα όρια του συνόλου με διάφορους τρόπους. Κάποιες από αυτές αναφέρονται στην εικόνα 2.10g . Στην Εικόνα 2.10 οι γραμμές πλέγματος από ένα σύνολο ταιριάζουν στην τοποθεσία και κλίση με τις γραμμές πλέγματος του άλλου συνόλου. Οι γραμμές ταιριάζουν μόνο στην τοποθεσία αλλά όχι στη κλίση και στην Εικόνα 2.10c οι γραμμές πλέγματος από ένα σύνολο δεν ευθυγραμμίζονται με τις γραμμές από το άλλο σύνολο. Ειδική μεταχείριση αυτής της ασυνέχειας, ειδικά αν αυτή συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια του σώματος, χρειάζεται (3ο βήμα) για να εξασφαλίσει τη σωστή υλοποίηση των οριακών συνθηκών και να αναστείλει οποιαδήποτε αριθμητική αστάθεια.

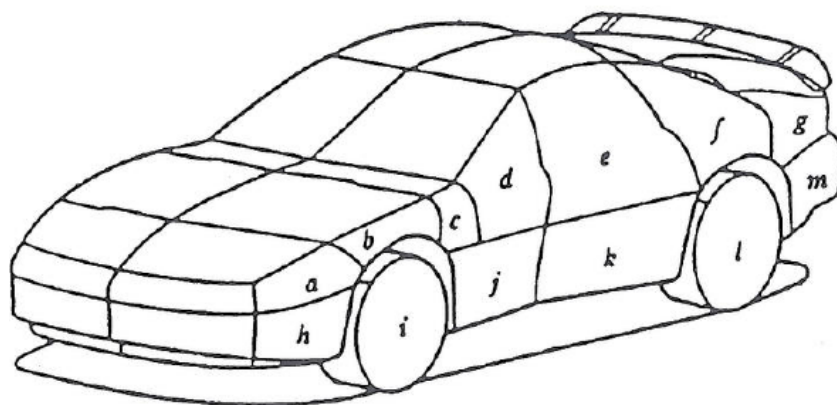
Μια συνήθης τεχνική για να εντοπιστούν τα σημεία του πλέγματος στο υπολογιστικό υπο-πεδίο είναι η πεπερασμένη παρεμβολή (transfinite interpolation) (4ο βήμα). Επιπλέον διαδικασίες χρειάζονται για να μεταβάλλουν, για παράδειγμα την πυκνότητα του πλέγματος στην κοντινή επιφάνεια



Σχήμα 2.10: Διαδικασία δημιουργίας πλέγματος[8]



Σχήμα 2.11: Πλέγμα για τον υπολογισμό με τη χρήση μεθόδων Euler ή NS [8]



Σχήμα 2.12: Μοντέλο οχήματος δρόμου με συρμάτινο πλαίσιο [8]

του σώματος, και να βελτιώσουν την ακρίβεια της αναπαράστασης της επιφάνειας προβάλλοντας τα σημεία που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια που έχει οριστεί στο σχέδιο CAD.

Μετά την κατασκευή των υποθετικών σημείων του πλέγματος από όλα τα σύνολο σε ένα ενιαίο σύνολο, μια ρουτίνα λείανσης χρησιμοποιείται για να εξομαλύνει (όσο είναι δυνατόν) τις ασυνέχειες σε ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο (5ο βήμα). Το τελικό βήμα αποτελείται από ένα οπτικό έλεγχο, όπου τα επίπεδα του πλέγματος μπορούν να εξετασθούν ένα προς ένα, ή ο όγκος των κελιών ελέγχεται για να παραμένει πάντα θετικός.

Οι νεότερες τάσεις στη δημιουργία του πλέγματος συνάδουν πλέγματα που προσαρμόζονται στη λύση τα οποία βελτιώνουν την ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής καθώς ο υπολογισμός προχωρά. Μια απλή προσέγγιση είναι να υποδιαιρούνται ένα ή περισσότερα υπολογιστικά κελιά ώστε να ισχύουν τα κριτήρια, για παράδειγμα, για υψηλότερη ανάλυση ροής, μικρότερο σφάλμα αποκοπής, λιγότερο απότομες κλίσεις κτλ.

2.3.5 Μη γραμμικές μέθοδοι CFD - Σχήματα επίλυσης για μη γραμμικές μεθόδους

Τα αριθμητικά σχήματα για την επίλυση των (μη γραμμικών) εξισώσεων Euler και NS βασίζονται κυρίως σε τρεις προσεγγίσεις: Πεπερασμένες Διαφορές (ΠΔ), Πεπερασμένοι Όγκοι (ΠΟ) και πεπερασμένα στοιχεία (ΠΣ).

Η τεχνική ΠΔ αναπτύχθηκε πρώτη. Θέτει αρκετούς περιορισμούς για το υπολογιστικό πλέγμα που χρειάζεται για ένα σύνθετο σχηματισμό όπως τα οχήματα δρόμου. Περίτεχνοι αλγεβρικοί μετασχηματισμοί χρειάζονται για να αντιστοιχίσουν ένα πλέγμα που ταιριάζει στο σώμα σε ένα ορθοκανονικό υπολογιστικό πλέγμα. Τέτοιοι μετασχηματισμοί δε μπορούν να υπάρχουν για μια συγκεκριμένη γεωμετρία. Επίσης οι κυρίαρχες εξισώσεις, που κανονικά περιγράφονται με ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων, χρειάζεται να μετασχηματισθούν πριν υλοποιηθεί το σχήμα. Η βασική ιδέα των τεχνικών ΠΔ είναι να εκφραστούν οι μερικές παράγωγοι των κυβερνοσών διαφορικών εξισώσεων προσεγγιστικά με εξισώσεις αλγεβρικών διαφορών στα κομβικά σημεία του πλέγματος. Λόγω των δυσκολιών που προαναφέρθηκαν, οι τεχνικές ΠΔ σπανίως χρησιμοποιούνται σε CFD οχημάτων δρόμου.

Στη γενική ιδέα των ΠΟ ικανοποιούνται οι κυβερνώντες μερικές διαφορικές εξισώσεις με τη μορφή ολοκληρώματος. Αυτό γίνεται για κάθε ένα από τα στοιχειώδη κελιά του υπολογιστικού πεδίου που δημιουργούνται από το πλέγμα ΠΣ. Τα κελιά μπορούν, κατά κανόνα, να έχουν αυθαίρετο σχήμα. Όμως, σχήματα κανονικών μορφών προτιμώνται όπως κύβιοι, τετράεδρα, εξαέδρα κτλ. Το κύριο πλεονέκτημα των τεχνικών ΠΟ είναι ότι η μέθοδος του πλέγματος αποσυνδέεται από τη διαδικασία επίλυσης. Μόνο τα κομβικά σημεία των κελιών χρειάζονται για να υλοποιήσουν τη διαδικασία και ο μετασχηματισμός των κυβερνώντων διαφορικών εξισώσεων, όπως απαιτείται από τις τεχνικές ΠΔ, δεν είναι πλέον απαραίτητος. Αυτό διευκολύνει πάρα πολύ τη διαδικασία δημιουργίας πλέγματος που ταιριάζει για το σώμα. Οι περισσότεροι από τους τρέχοντες κώδικες CFD, στις εφαρμογές αεροδυναμικής στην αυτοκινητοβιομηχανία, χρησιμοποιούν τη διατύπωση των ΠΟ. Η συνήθης διαδικασία είναι να χρησιμοποιούνται δομημένα πλέγματα. Ωστόσο μη δομη-

μένα πλέγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το επιπλέον κόστος της αυξημένης υπολογιστικής προσπάθειας.

Στην εικόνα, η βασική ιδέα των τεχνικών ΠΟ παρουσιάζεται για την εξίσωση συνέχειας μιας 2Δ ροής. Για τον πεπερασμένο όγκο ΑΒΓΔ ενός μοναδιαίου ύψους, η ολοκλήρωση της εξίσωσης συνέχειας δίνει..

$$\int_{ABCD} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy = 0 \quad (2.3)$$

ή εφαρμόζοντας το θεώρημα του Green

$$\int_{ABCD} \vec{H} \cdot \vec{n} ds = 0 \quad (2.4)$$

όπου $\vec{H} = (u, v)$. Σε καρτεσιανές συντεταγμένες,

$$\vec{H} \cdot \vec{n} ds = u dy - v dx \quad (2.5)$$

Η εξίσωση 2.4 είναι επομένως

$$\int_{ABCD} (u dy - v dx) = 0 \quad (2.6)$$

Μια προσεγγιστική εκτίμηση/λύση της εξίσωσης 2.6 είναι

$$\sum_{ABCD} (u \Delta y - v \Delta x) = 0 \quad (2.7)$$

όπου στην ανωτέρω εξίσωση:

$$\Delta y_{AB} = y_B - y_A \quad (2.8)$$

$$\Delta x_{AB} = x_B - x_A \quad (2.9)$$

$$u_{AB} = (u_{j,k-1} + u_{j,k}) / 2 \quad (2.10)$$

$$v_{AB} = (v_{j,k-1} + v_{j,k}) / 2 \quad (2.11)$$

παρομοίως για Δy_{BC} , Δy_{CD} και Δy_{DA} . Με αυτό τον τρόπο η μερική διαφορική εξίσωση μετατρέπεται σε μια απλή αλγεβρική εξίσωση. Όπως είναι προφανές, οι ποσότητες της ροής (εδώ οι ταχύτητες u και v) σε ένα κελί συνδέονται με τις αντίστοιχες τιμές για τα κελιά που την περιβάλλουν.

Η μέθοδος ΠΣ χρησιμοποιεί πολυεδρικά κελιά για να διακριτοποιήσει τον υπολογιστικό πεδίο. Ένα μείγμα των άλλων τύπων κελιών είναι επίσης δυνατόν. Η διαφορά μεταξύ των μεθόδων ΠΟ και ΠΣ δεν είναι τόσο στη χρήση διαφορετικών τύπων στοιχείων πλέγματος αλλά στις τεχνικές επίλυσης που χρησιμοποιούνται. Η μέθοδος ΠΣ υπολογίζει τις μεταβλητές ροής στις κορυφές των κελιών με τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων και χρησιμοποιεί τη μορφή ολοκληρώματος για

τις κυβερνώντες διαφορικές εξισώσεις για κάθε όγκο κελιού χωρίς να αναφέρεται άμεσα σε άλλα κελιά. Τα εμπορικά λογισμικά που δημιουργούν πλέγματα ΠΣ χρησιμοποιούν εξεζητημένους αλγορίθμους για να δημιουργήσουν μη δομημένα πλέγματα γύρω από σύνθετα σχήματα που επιτρέπουν τα κελιά να συγκεντρώνονται όπου χρειάζονται χωρίς αυτό να έχει επίπτωση σε άλλες περιοχές.

Κεφάλαιο 3

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ AHMED BODY

3.1 Διάκριση Υπολογιστικών Μοντέλων

Οι πιο γνωστές αριθμητικές μέθοδοι, διατεταγμένες με σειρά αυξανόμενου υπολογιστικού κόστους, είναι οι RANS, LES, DNS όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω. Αναλυτικά θα ακολουθήσουν αυτά τα υπολογιστικά μοντέλα και θα γίνει η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το επίπεδο αξιοπιστίας του μοντέλου και του αντίστοιχου υπολογιστικού κόστους. Οι δύο αυτές έννοιες συνδέονται μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογα. Όλα τα μοντέλα βασίζονται στην εξίσωση NS, όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, που ανήκουν στην κατηγορία των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων και περιγράφουν την κίνηση των ρευστών. Η πρώτη κατηγορία είναι η πιο απλή.

Μεταξύ των προαναφερθέντων μοντέλων, υπάρχουν και υποκατηγορίες που βρίσκουν εφαρμογή σε ειδικού τύπου προβλήματα, όπως για παράδειγμα η DES.

Το μαθηματικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει τη φυσική της ροής των ρευστών πρέπει να εκφράζεται με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια έτσι ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις και περιορισμοί του προβλήματος. Ειδικότερα, τα μοντέλα τύρβης και οι νόμοι διατήρησης είναι οι κύριοι συμμετέχοντες. Η μετάβαση από τα προσεγγιστικά (κατά μέσο όρο) προς τα περισσότερο χρονικά ακριβή αλλά και πιο ακριβή υπολογιστικά είναι τα μοντέλα Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES) και Direct Numerical Simulation (DNS), και είναι οι τρεις μεγάλες κατηγορίες που συναντά κανείς. Έτσι γνωρίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε μαθηματικού μοντέλου, το επιθυμητό επίπεδο πληροφορίας ως προς το αντίστοιχο κόστος μπορεί να επιτευχθεί.

Τα προαναφερθέντα τρία μοντέλα παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, καθώς αυτά επηρεά-

ζουν τη μελέτη του προβλήματος. Στο RANS η τύρβη μοντελοποιείται σε κάθε κλίμακα, αλλά η πολυπλοκότητα δε λαμβάνεται επακριβώς. Στο LES η 'μικρής' κλίμακας τύρβη μοντελοποιείται, ενώ οι 'μεγάλης' κλίμακας επιλύεται. Ως εκ τούτου, το RANS θεωρείται λιγότερο ακριβές, ενώ το LES παραμένει μη πρακτικό για ροές διαφόρων τύπων. Λόγω της υπερεπάρκειας υπολογιστικής ισχύος η μεταφορά μερικών έργων από RANS σε LES εμφανίζεται στο προσκήνιο, αν και εξακολουθούν να υπάρχουν αμφιβολίες σχετικά με το ερώτημα εάν αξίζει η μεταφορά με το αντίστοιχο κόστος. Το DNS επιλύει την τύρβη οποιασδήποτε κλίμακας, ακόμη και από το μικρόδινών Kolmogorov, αλλά αυτό δεν είναι εφικτό για πολύ υψηλό αριθμό Reynolds (Re), λόγω του υπολογιστικού κόστους και της μεγάλης πολυπλοκότητας των εξισώσεων NS. Συχνά υβριδικές εκδόσεις προκύπτουν για τις ειδικές περιπτώσεις που αποτελούν προσαρμογή των παραπάνω, όπως, Unsteady-RANS (URANS) και τα hybrid-RANS-LES. Σε αυτές το κόστος μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα παράγονται ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η ποιότητα και ποσότητα της ζητούμενης πληροφορίας σε συνάφεια με το ποσοστό των υπολογιστικών πόρων και του διαθέσιμου χρόνου υποδεικνύουν την καταλληλότητα του μοντέλου.

Υπάρχουν και μερικοί πρακτικοί κανόνες. Στο RANS ο χρήστης ενδιαφέρεται κυρίως για την κάθετη κατεύθυνση ως προς τον τοίχο. Σε αυτή την κατεύθυνση $\Delta y^+ = 1$. Στις άλλες δύο κατευθύνσεις το μέγεθος του πλέγματος μπορεί να είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερο και ως εκ τούτου και το κέρδος. Το κενό στις άλλες δύο κατευθύνσεις εξαρτάται από τη ζητούμενη ακρίβεια. Ενώ το DNS παρουσιάζει μόνο αριθμητικό σφάλμα, το LES και το RANS εμφανίζουν σφάλματα αριθμητικά και μοντελοποίησης της τύρβης.

3.2 Απαιτήσεις σε μια προσομοίωση CFD

Η ακρίβεια των ποσοτικών αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων CFD αναμένεται να ταιριάζει με αυτά των πειραμάτων που παίρνουν μέρος σε αεροσήραγγες. Είναι πιθανό, για παράδειγμα, οι μετρήσεις της μεταβολής της οπισθέλκουσας να είναι της τάξης του 0.002. Ακόμη ο υπολογιστικός χρόνος, συμπεριλαμβανοντας τα πάντα, θα πρέπει επίσης να συγκρίνεται με την μετεξέλιξη του χρόνου για την ίδια περίπτωση σε αεροσήραγγα. Το συμπέρασμα είναι ότι η πρόβλεψη της πίεσης και της διατμητικής τάσης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κορμού (περιοχές στις οποίες παρατηρείται αποκόλληση ροής) πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής αφού οι αεροδυναμικές δυνάμεις αξιολογούνται με ολοκλήρωση της επιφανειακής πίεσης και της διατμητικής τάσης.

Οι συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω (που αφορούν την ακρίβεια) είναι πολύ αυστηρές ώστε να τις φτάσει κάποιος από τους κώδικες CFD που υπάρχουν σήμερα και πιθανόν δεν θα υπάρξει βελτίωση ούτε και στα επόμενα χρόνια. Παρόλα αυτά, ο σκοπός του CFD δεν είναι να γίνει το υποκατάστατο των πειραμάτων σε αεροσήραγγα. Οι λύσεις που παρέχονται από τις αεροσήραγγες, σπανίως μας εξηγούν το 'γιατί'. Μια προσομοίωση CFD, αν έχει παρουσιάσει σωστά την φυσική γύρω από το πρόβλημα, τείνει να δώσει πληροφορίες. Είναι πολύ σημαντικό να εκτιμήσουμε τις δυο αυτές διαφορετικές μεθόδους και τα δυνατά σημεία της κάθε μιας έτσι ώστε να δουλέψουν αποτελεσματικά.

3.3 Επιλογή Υπολογιστικού Μοντέλου

Στην παρούσα εργασία κρίθηκε κατάλληλο να γίνει χρήση του RANS υπολογιστικού μοντέλου αν και θεωρείται λιγότερο ακριβές. Ωστόσο, η ποιότητα της προσομοίωσης δεν εξαρτάται μόνο από το υπολογιστικό μοντέλο αλλά κατά κύριο λόγο από το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται όπως αναφέρεται στη συνέχεια. Σε αυτήν την εργασία λοιπόν επιλέχτηκε το RANS για να πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής εισαγωγή στον υπολογιστικό κόσμο του CFD χρησιμοποιώντας το αυτό το απλό μοντέλο σαν αρχικό στάδιο μιας ευρύτερης μελέτης που θα συνεχιστεί και μετέπειτα της παρούσας εργασίας. Πέρα από αυτό, όπως περιγράφηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η μελέτη έχει σαν στόχο την προσομοίωση ροής γύρω από ένα απλοποιημένο μοντέλου αυτοκινήτου που φέρει ένα πολύ απλό σχήμα και δεν συναντά κάποια δυσκολία στο χειρισμό του, τη μοντελοποίηση αλλά και την επίλυση του. Έτσι, προσδοκούνται αποτελέσματα που να μπορούν να προβλέψουν κατάλληλα τα φυσικά φαινόμενα.

Κεφάλαιο 4

Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RANS

Σκοπός των μοντέλων τύρβης για τις εξισώσεις RANS είναι να υπολογίσουν τις τάσεις Reynolds. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις βασικές κατηγορίες μοντέλων τύρβης, όπως θα συζητηθεί παρακάτω. Τα περισσότερα μοντέλα βασίζονται στις μέσες, κατά Reynolds, εξισώσεις Navier-Stokes (RANS). Συνοπτικά τα πιο γνωστά μοντέλα τύρβης κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. Γραμμικά μοντέλα δίνης - ιξώδους

(α') Αλγεβρικά μοντέλα

- i. μοντέλο Cebeci-Smith
- ii. μοντέλο Baldwin-Lomax
- iii. μοντέλο Johnson-King
- iv. μοντέλο εξαρτώμενο από την τραχύτητα

(β') Μοντέλο μίας εξίσωσης

- i. μοντέλο μίας εξίσωσης του Prandtl
- ii. μοντέλο Baldwin-Barth
- iii. μοντέλο Spalart-Allmaras
- iv. Rahman-Siikonen-Agarwal

(γ') Μοντέλο δύο εξισώσεων

- i. μοντέλο k-ε

- A'. μοντέλο Standard k-ε

- B'. μοντέλο Realizable k-ε
- Γ'. μοντέλο RNG k-ε
- Δ'. μεταχείριση κοντά σε τοίχο

ii. μοντέλο k-ω

- A'. μοντέλο του Wilcox k-ω
- B'. τροποποιημένο μοντέλο του Wilcox k-ω
- Γ'. μοντέλο k-ω SST
- D. Near-wall treatment

iii. Θέματα Realizability

- A'. τροποποίηση Kato-Launder
- B'. περιορισμός realizability του Durbin
- Γ'. διόρθωση Yap
- D. Realizability και ανισότητα του Schwarz

2. Μη γραμμικά μοντέλα δίνης - ιξώδους

(α') Ρητή μη-γραμμική constitutive σχέση

- i. κυβικό k-ε
- ii. Ρητά αλγεβρικά μοντέλα τάσεων Reynolds

(β') μοντέλα $\nu^2 - f$

- i. μοντέλο $\overline{u^2} - \varphi$
- ii. μοντέλο ζ-φ

3. Μοντέλα τάσεων Reynolds

4.1 Σύντομη περιγραφή επιλεγμένων μοντέλων 2 εξισώσεων

Τα μοντέλα τύρβης και η μοντελοποίηση της τύρβης έχει χαρακτηριστεί ως ένας από τους τρεις πιο σημαντικούς παράγοντες στην υπολογιστική ρευστοδυναμική [24] με τους υπόλοιπους δυο να

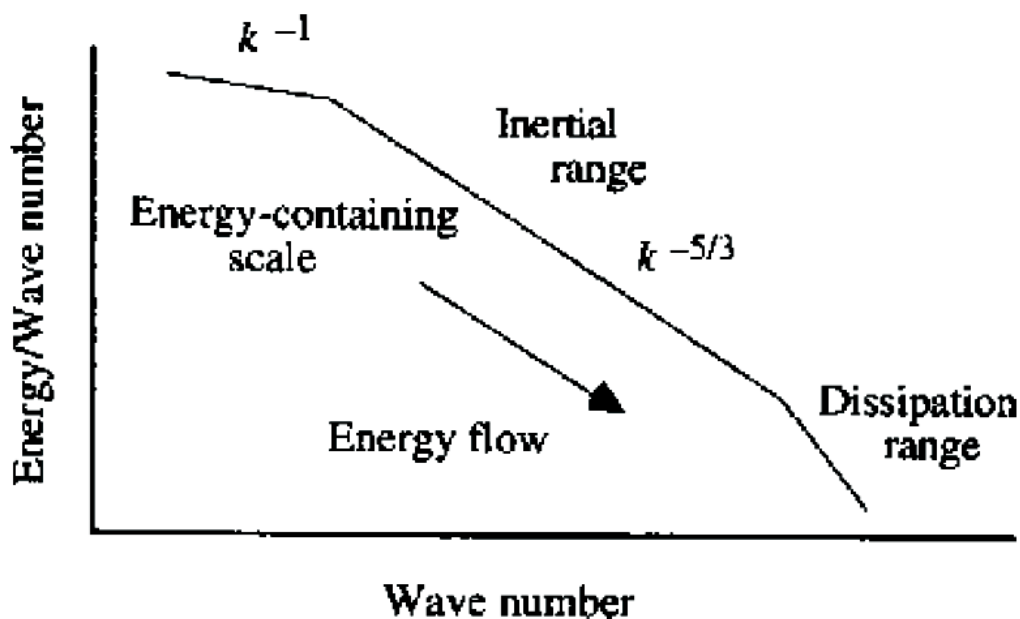


Figure 4.1: Κλίμακες τύρβης

είναι η ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων και αλγορίθμων για την επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων καθώς και για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Η τύρβη μπορεί να χαρακτηριστεί ως προς τις κλίμακες της (scales), όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 4.1 το οποίο δείχνει το turbulent energy cascade οι κλίμακες της τύρβης που έχουν μεγάλη ενέργεια έχουν μικρή συχνότητα και όσο η ενέργεια των κλιμάκων ή βαθμίδων μειώνεται τόσο αυξάνει η συχνότητα τους (dissipation range) όπου βρίσκονται τα λεγόμενα Kolmogorov scales. Όταν χρησιμοποιούμε τις RANS εξισώσεις κάνουμε average in time και βασικά μοντελοποιούμε όλες τις βαθμίδες της τύρβης (τις επιδράσεις της τύρβης στην εκάστοτε ροή). Μια θεμελιώδης προσέγγιση στην μοντελοποίηση της τύρβης είναι η υπόθεση του Boussinesq όπου οι τάσεις της τύρβης (turbulent stresses) σχετίζονται με την μέση ροή του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα των RANS εξισώσεων μετά από την χωρική και χρονική μέση τους τιμή (spatial averaging and time averaging) καταλήγει σε ένα ανοιχτό σύστημα (closure problem) και αυτό γίνεται εξαιτίας του μη γραμμικού όρου

$$\overline{u'_i u'_j} \quad (4.1)$$

στις εξισώσεις της ορμής

Η εξίσωση 4.1 δείχνει τα λεγόμενα Reynolds stresses (σε δυο διαστάσεις) τα οποία πρέπει, ώστε να κλείσει το σύστημα των εξισώσεων, να ικανοποιούνται από μια μαθηματική σχέση. Η υπόθεση του Boussinesq στην ουσία σχετίζει αυτόν τον μη γραμμικό όρο με μια αναλογική σταθερά (constant of proportionality) η οποία ονομάζεται eddy viscosity.

4.1.1 Μοντέλο k-ε

Αυτό το βασικό (ημι-εμπειρικό) μοντέλο 2 εξισώσεων μεταφοράς λύνει την κινητική ενέργεια k και την τυρβώδη διάχυση ε. Οι συντελεστές έχουν ορισθεί εμπειρικά και είναι έγκυρες για

πλήρως τυρβώδεις ροές. Οι δίνες που σχηματίζονται καθορίζονται από μια κλίμακα μήκους. Το μοντέλο k-ε όμως προβλέπει δίνες και διαταραχές στη ροή μόνο σε μια συγκεκριμένη κλίμακα κάτι που προφανώς στη πραγματικότητα δεν συμβαίνει και το μοντέλο αδυνατεί να το προσομοιώσει. Το k-ε είναι ένα οικονομικό μοντέλο, ως προς τους υπολογιστικούς πόρους και έχει εφαρμογή σε πληθώρα προβλημάτων και ειδικά σε προβλήματα της βιομηχανίας όπως η εσωτερική ροή ενός σωλήνα καθώς και σε εξωτερικές ροές (external flows) όπως η ροή πάνω σε ένα κτήριο. Συμπεριφέρεται ανεπαρκώς στις πολύπλοκες ροές που συμπεριλαμβάνουν ισχυρή αποκόλληση ενώ ταυτόχρονα το μοντέλο που μελετάται έχει σημεία με μεγάλη καμπυλότητα που επηρεάζουν τις ροϊκές γραμμές. [18, 19].

Από τη μια μεριά το εν λόγω μοντέλο παρουσιάζει πλεονεκτήματα, όπως το ότι είναι σταθερό, χρησιμοποιείται ευρέως παρά τους γνωστούς περιορισμούς, υλοποιείται εύκολα, αλλά είναι έγκυρο μόνο για τυρβώδεις ροές που έχουν αναπτυχθεί πλήρως. Είναι ιδανικό για αρχικές υπολογιστικές επαναλήψεις, αρχική διαλογή για εναλλακτικά σχέδια και παραμετρικές μελέτες.

Από την άλλη μεριά στα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνεται η μη επάρκεια για πολύπλοκες ροές που περιλαμβάνουν ισχυρές κλίσεις πίεσης, αποκόλληση[18, 19].

4.1.2 Πρότυπο μοντέλο k-ω

Επιλύει την κινητική ενέργεια k και την τυρβώδη συχνότητα ω. Αυτή είναι το προεπιλεγμένο k-ω μοντέλο. Αυτό το μοντέλο παρουσιάζει με περισσότερη ακρίβεια τις περιοχές κοντά στα τοιχώματα. Επιδεικνύει εξαιρετική απόδοση για ροές που περικλείονται από τοίχους και χαμηλό αριθμό Reynolds. Δείχνει ότι έχει δυνατότητες για την πρόβλεψη του μεταβατικού σταδίου στη ροή. Η επιλογή του μοντέλου αφορά τα προβλήματα με μεταβατικές, free shear, και συμπιεστές ροές. Το μοντέλο k-ε χρησιμοποιεί την διάχυση ε στους υπολογισμούς του. Το k-ω επιλύει μια εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και μια δεύτερη εξίσωση για την τυρβώδη συχνότητα ω. Επιπλέον, συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα υπό συνθήκες με αντίθετες κλίσεις πίεσης. Εδώ γίνεται χρήση των οριακών συνθηκών Dirichlet. Συνεπώς αυτό επιφέρει μεγαλύτερη αριθμητική ευστάθεια. Αυτό το μοντέλο όμως υποεκτιμεί το ποσοστό της αποκόλλησης.

Πλεονεκτήματα: Υψηλή απόδοση για ροές με οριακό στρώμα κοντά σε τοίχο, free shear, και χαμηλό αριθμό Reynolds. Κατάλληλο για πολύπλοκες ροές οριακού στρώματος υπό αντίθετη κλίση πίεσης και αποκόλληση (εξωτερικού τύπου αεροδυναμική και στροβιλομηχανές). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταβατικές ροές (αν και τείνει να προβλέπει πρόωρη μετάβαση).

Μειονεκτήματα: Η αποκόλληση συνήθως προβλέπεται να είναι υπερβολική και πρόωρη και απαιτεί υψηλότερη ανάλυση πλέγματος κοντά στον τοίχο.

4.1.3 BSL k-ω

Μια μεταβλητή του κλασικού k-ω μοντέλου. Συνδυάζει το αρχικό μοντέλο Wilcox k-ω για χρήση κοντά στα τοιχώματα και το κλασικό k-ε μοντέλο για μακριά από αυτά. Αυτό έχει ως συνέπεια να μειώνεται η υπερβολική ευαισθησία του k-ω σε περιπτώσεις ελεύθερης ροής χωρίς να μειώνεται η απόδοση κοντά στα τοιχώματα.

4.1.4 SST k- ω

Το Shear Stress Transport (SST) είναι μια ποικιλία του κλασικού μοντέλου k- ω . Συνδυάζει το αρχικό μοντέλο Wilcox k- ω για χρήση κοντά στα τοιχώματα και το κλασικό k- ϵ μοντέλο για μακριά από αυτά [18, 19].

Πλεονεκτήματα: προσφέρει παρόμοια οφέλη με το κλασικό k- ω . Το SST μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά της τυρβώδους διατμητικής τάσης και δίνει εξαιρετικά ακριβείς προβλέψεις στα σημεία του διαχωρισμού της ροής υπό μεγάλες κλίσεις πίεσης. Το SST συνιστάται για προσομοιώσεις υψηλής ακρίβειας του οριακού στρώματος.

Μειονεκτήματα: Η εξάρτηση από την απόσταση τοίχου το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για ροές που δεν περιλαμβάνουν διατμητικές τάσεις, εν συγκρίσει με το κλασικό k- ω . Απαιτεί ανάλυση πλέγματος κοντά στα τοιχώματα. Απαιτεί πυκνό πλέγμα κοντά στα τοιχώματα. Ένα μοντέλο Reynolds Stress μπορεί να είναι πιο κατάλληλο για ροές με ξαφνικές αλλαγές στις περιστρεφόμενες ροές, ενώ το SST μοντέλο μπορεί να είναι πιο κατάλληλο για ροές με αποκόλληση.

4.2 Επιλογή του Realizable μοντέλου k- ϵ

Το εν λόγω μοντέλο (Realizable k- ϵ) επιλέχθηκε λόγω: της απλότητας του, της σταθερότητας του, της γρήγορης σύγκλισης και της καταλληλότητάς του για το αρχικό στάδιο μελέτης CFD. Κατ'επέκταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πρότυπο για τη μελέτη.

Τα μοντέλα των δυο εξισώσεων χρησιμοποιούνται συχνά και επειδή έχουν γίνει βιομηχανικά πρότυπα επιλέγονται για προβλήματα μηχανικής. Είναι επίσης αντικείμενο επικείμενης έρευνας. Κατά τον ορισμό οι δυο επιπλέον εξισώσεις αναπαριστούν τις τυρβώδεις ιδιότητες ροής και επιτρέπουν την παρατήρηση φαινομένων/επιδράσεων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως η μεταφορά και διάχυση της τυρβώδους ενέργειας. Οι δυο μεταβλητές είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια, k, και η τυρβώδης διάχυση, ϵ . Η πρώτη προσδιορίζει την ενέργεια στην τύρβη, ενώ η δεύτερη θεωρείται ως η μεταβλητή που καθορίζει την κλίμακα του στροβιλισμού (κλίμακα μήκους ή χρόνο-κλίμακα)

[4]

Το realizable μοντέλο k- ϵ [22] είναι σχετικά πρόσφατο μοντέλο και έχει επαληθευθεί εκτενώς σε ένα φάσμα εφαρμογών συμπεριλαμβανομένου των 'homogeneous shear flows', ελευθέρων ροών που περιέχουν δίνες, ανάμιξη, οριακά στρώματα και αποκολλήσεις [11, 22]. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις έχει βρεθεί ότι η απόδοση του μοντέλου είναι ουσιαστικά καλύτερη από τα κλασικά μοντέλα k- ϵ . Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το εν λόγω μοντέλο επιλύει τις δίνες, δηλαδή, προβλέπει το ρυθμό εξάπλωσης (spreading rate) τόσο για συμμετρικές ως προς τον άξονα δίνες όσο και για επίπεδες και διαφέρει από τα υπόλοιπα δύο μοντέλα της κατηγορίας του επειδή

- Θεωρεί μια νέα εξίσωση μεταφοράς για το ρυθμό διάχυσης, ϵ όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα k- ϵ , χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση για τον υπολογισμό του k, όμως η φόρμουλα για το ϵ είναι διαφορετική. Ο όρος στην εξίσωση του ϵ (ο δεύτερος

όρος στο δεξί μέρος της εξίσωσης 4.6) δε συμπεριλαμβάνει την παραγωγή του k , καθώς δεν περιέχει τον ίδιο όρο G_k . Έτσι αναπαριστάται καλύτερα η μεταφορά ενέργειας. Επίσης λόγω του όρου καταστροφής (δίπλα στον τελευταίο όρο του δεξιού μέρους της ίδιας εξίσωσης) ο παρονομαστής δεν εξαλείφεται ακόμη και αν το k εξαφανιστεί ή γίνει μικρότερο του μηδενός. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα k - ϵ .

Η επιλογή του μοντέλου στηρίχθηκε στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει. Αρχικά, ικανοποιεί συγκεκριμένους μαθηματικούς περιορισμούς στις τάσεις Reynolds, που είναι σε συμφωνία με τη φυσική των τυρβωδών ροών. Αυτή η ιδιότητα δε συναντάται σε άλλα μοντέλα k - ϵ . Συνεπώς, ο ρυθμός εξάπλωσης των δινών (planar and round jets) προβλέπεται με περισσότερη ακρίβεια. Τόσο το realizable όσο και το RNG k - ϵ μοντέλο είναι αισθητά βελτιωμένα έναντι του αρχικού σε περιπτώσεις που περιλαμβάνουν μεγάλες καμπυλότητες, στρόβιλους και δίνες. Λόγω της νεότητας του μοντέλου, δεν είναι ακόμη γνωστό σε ποιους τομείς υπερτερεί του RNG. Ωστόσο παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση στην κατηγορία του για αρκετές επαληθευμένες περιπτώσεις όπου εμφανίζεται η αποκόλληση της ροής και για ροές με πολύπλοκα χαρακτηριστικά.

Οι αδυναμίες του μοντέλου, που είναι γενικές για όλη την κατηγορία, εντοπίζονται στην εξίσωση για το ρυθμό διάχυσης, ϵ . Η ανωμαλία των δινών οφείλεται κυρίως στην μοντελοποιημένη εξίσωση διάχυσης. Αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας:

- μια νέα διατύπωση για eddy-viscosity που περιλαμβάνει τη μεταβλητή C_μ (που αρχικά είχε προταθεί από τον Reynolds [20])
- μια νέα εξίσωση για τη διάχυση βασισμένη στη δυναμική εξίσωση ελαχίστων-τετραγώνων διακυμάνσεων στροβιλότητας (mean-square vorticity fluctuation).

Ωστόσο, όταν το υπολογιστικό πεδίο περιέχει και περιστροφικές και στατικές ζώνες ρευστών (όπως για παράδειγμα τα περιστρεφόμενα πλέγματα που ολισθαίνουν), τότε εμφανίζεται ένας περιορισμός: τα τυρβώδη ιξώδη που παράγονται δεν είναι φυσιολογικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι επιδράσεις της μέσης περιστροφής συμπεριλαμβάνονται στον ορισμό της τυρβώδους δίνης, όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις 4.10, 4.13 και 4.14.

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη του Ahmed Body.

4.3 Ανακεφαλαίωση των εξισώσεων των μαθηματικών μοντέλων

Αρχικά δηλώνονται οι εξισώσεις NS που εκφράζουν την διατήρηση της ορμής του ρευστού και στις τρεις κατευθύνσεις x_i με αντίστοιχες ταχύτητες u_i :

Συγγράμματα	CFD		LES	Αεροσήραγγα
	k-ε	k-ω		
C. Hinterberger και άλλοι			χ	
Y. Liu και A. Moser	χ			
W.H. Hucho, 1975				χ
S.R. Ahmed, 1984				χ
K.Burgin και άλλοι, 1986				χ
Lung και άλλοι, 1992		χ	χ	
H. Lienhart και άλλοι, 2002				χ
S. Krajnovic και L. Davidson, 2005			χ	χ
G. Franck και άλλοι, 2009		χ		
J.L. Aider και άλλοι, 2010				χ
Damjanovic και άλλοι, 2010	χ			
L.Gagnon και M.J. Richard, 2010		χ		
L. Jowsey και M. Passmore, 2010				χ
K. Gosse και άλλοι, 2011				χ
W. Meile και άλλοι, 2011				χ
J.Osth και S. Krajnovic, 2012			χ	

Πίνακας 4.1: Βιβλιογραφική έρευνα μοντέλων

εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} = 0 \quad (4.2)$$

εξίσωση ορμής:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (-p\delta_{ij} + \sigma_{ij}) + f_i = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (4.3)$$

Οι κυριότεροι όροι στην παραπάνω εξίσωση είναι οι $u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$ και f_i . Ο πρώτος όρος εκφράζει την συνεισφορά δια μεταφοράς στη διατήρηση της ορμής μάζας ρευστού. Ο επόμενος όρος εκφράζει τη συνεισφορά με διάχυση και τέλος ο f_i το πεδίο των εξωτερικών δυνάμεων.

Ο όρος σ_{ij} εκφράζει τις διαμητικές τάσεις που αναπτύσσονται και που οφείλονται στη συνεκτικότητα του ρευστού. Για τα νευτώνεια ρευστά οι τάσεις συνδέονται με το ρυθμό παραμόρφωσης στοιχείου ρευστού με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left(\lambda + \frac{2}{3}\mu \right) \delta_{ij} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} = 2\mu e_{ij} + \left(\lambda + \frac{2}{3}\mu \right) \delta_{ij} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \quad (4.4)$$

Η σχέση μεταξύ τάσης και ρυθμού παραμόρφωσης είναι η απλούστερη σχέση που μπορεί να συσχετίσει δυο ισότροπους τανιστές δευτέρου βαθμού. Ο όρος μ είναι ο συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας του ρευστού που εκφράζει τη φυσική ιδιότητα του ρευστού. Ο λ είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας του Stokes.

Για το απλό μοντέλο k-ε ισχύει:

Οι βασικές εξισώσεις μεταφοράς είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4.6)$$

όπου

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (4.7)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (4.9)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, το G_k συμβολίζει τη δημιουργία κινητικής ενέργειας της τύρβης εξαιτίας των κλίσεων μέσης ταχύτητας. Το G_b αναπαριστά τη δημιουργία κινητικής ενέργειας της τύρβης εξαιτίας της άνωσης. Το Y_M είναι η συνεισφορά του fluctuating dilatation στη συμπιεστή τύρβη στο συνολικό ρυθμό διάχυσης. Τα C_2 , $C_{1\varepsilon}$ είναι σταθερές, τα σ_k και σ_ε είναι οι αριθμοί τύρβης Prandtl για τα k και ε αντίστοιχα. Οι τιμές των σταθερών αναγράφονται στον Πίνακα 4.2. Ο χρήστης ορίζει τα S_k και S_ε .

Επιπλέον, κατά τη μοντελοποίηση της τυρβώδους συνεκτικότητα (eddy viscosity) χρησιμοποιείται η σχέση σχέση Prandtl – Kolmogorov – Taylor:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.10)$$

όπου

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (4.11)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (4.12)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (4.13)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (4.14)$$

Στο παραπάνω σετ εξισώσεων, η ποσότητα $\overline{\Omega_{ij}}$ αναπαριστά τον πίνακα μέσου βαθμού περιστροφής με γωνιακή ταχύτητα ω_k . Οι ποσότητες A_0 και A_s δίνονται από:

$$A_0 = 4.04 \quad (4.15)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (4.16)$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} (6W) \quad (4.17)$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (4.18)$$

Πίνακας 4.2: Τιμές σταθερών του μοντέλου k-ε

$C_{1\varepsilon}$	1.44
C_2	1.9
σ_k	1.0
σ_ε	1.2

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (4.19)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.20)$$

Οι υπόλοιπες σταθερές του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Προφανώς, αυτό το μοντέλο χρησιμοποιεί διαφορετική διατύπωση για το ιξώδες της δίνης και οι σταθερές του μοντέλου έχουν διαφορετικές τιμές από τα άλλα μοντέλα.

Το μοντέλο Realizable k-ε όπως αναλύθηκε και πριν έχει πολλά πλεονεκτήματα. Παρέχει καλύτερη πρόβλεψη των λύσεων στην περίπτωση ροών που περιλαμβάνουν ανακυκλοφορίες καθώς και στροβιλισμούς. Κατά την υπολογιστική επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Realizable k-ε.

Το realizable k-ε μοντέλο λύνει:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4.22)$$

όπου

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.23)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (4.24)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (4.25)$$

Όσον αφορά τη συνεκτικότητα της τύρβης, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.26)$$

όπου ο όρος μ δεν είναι σταθερός, όπως στα μοντέλα Standard και RNG, αλλά δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (4.27)$$

Κεφάλαιο 5

ΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

5.1 Περιγραφή του αριθμητικού κώδικα FLUENT

Στην παρούσα ενότητα θα πραγματοποιηθεί μια αναλυτική περιγραφή της αριθμητικής μεθοδολογίας για την επίλυση της ασυμπίεστης μόνιμης ροής, προσπαθώντας παράλληλα να εισάγουμε τη θεωρία που έχει ήδη περιγραφεί στα παραπάνω κεφάλαια. Αρχικά θα ασχοληθούμε με τα χαρακτηριστικά, το πως μας διευκολύνουν στην σύνδεση των εξισώσεων του υπό επίλυση συστήματος αλλά και τον τρόπο υπολογισμού των κύριων μεταβλητών στο υπολογιστικό χωρίο. Συνοπτικά, η πορεία επίλυσης περιλαμβάνει τα εξής:

Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου, οι συνιστώσες της ταχύτητας που προκύπτουν από τις εξισώσεις NS με βάση τα παραπάνω, χρησιμοποιούνται για τις εξισώσεις του μοντέλου τύρβης *realizable k-ε* που επιλύονται ξεχωριστά από τις εξισώσεις του ασυμπίεστου ρευστού. Για τον υπολογισμό των μη συνεκτικών όρων των εξισώσεων χρησιμοποιείται ένα ανάντι σχήμα δεύτερης τάξης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η χρονική ολοκλήρωση των δύο συστημάτων εξισώσεων (NS και *k-ε*) χρησιμοποιώντας ένα σχήμα Runge – Kutta 4ης τάξης. Μετέπειτα θα αναλυθεί η θεωρία του οριακού στρώματος που θα χρησιμοποιήσουμε καθώς και οι οριακές συνθήκες, όσον αφορά το είδος και τον τρόπο επιβολής τους.

5.2 Απαιτούμενες ιδιότητες της αριθμητικής μεθόδου

Η αριθμητική μέθοδος επίλυσης του ρευστομηχανικού προβλήματος θα πρέπει να παρουσιάζει συγκεκριμένες ιδιότητες. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, δεν είναι δυνατό να αναλυθεί στο σύνολό της η μέθοδος για αυτό προτιμάμε την ανάλυση σε διακεκριμένα μέρη. Αν αυτά τα «κομμάτια» δεν ικανοποιούν τις απαραίτητες ιδιότητες τότε ούτε ολόκληρη η αριθμητική μέθοδος θα τις ικανοποιεί με το αντίστροφο να μην επαληθεύεται πάντα. Παρακάτω θα ασχοληθούμε με αυτά τα κριτήρια που θα πρέπει να ικανοποιούνται.

Συνακολουθία (consistency) : Μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών είναι συνακόλουθη εάν η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών προσεγγίζει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις το μέγεθος του πλέγματος τείνει στο μηδέν. Με άλλα λόγια, η διακριτοποίηση γίνεται ακριβής όταν το μέγεθος του υπολογιστικού πλέγματος τείνει στο μηδέν. Η διαφορά μεταξύ της διακριτοποιημένης εξίσωσης και της πλήρης αποτελεί το σφάλμα αποκοπής (προσέγγισης) που αποτελεί το εργαλείο για την ικανοποίηση του κριτηρίου (τείνει στο μηδέν όταν το χρονικό βήμα είναι διαρκώς μειούμενο και το πλέγμα τείνει στο μηδέν). Έτσι ένα σχήμα που είναι συνακόλουθο μας εξασφαλίζει το γεγονός ότι λύνουμε τις κυρίαρχες εξισώσεις και τίποτα παραπάνω. Ιδεατά, όλοι οι όροι της αριθμητικής μεθόδου θα πρέπει να διακριτοποιηθούν με προσεγγίσεις της ίδιας τάξεως ακρίβειας. Παρόλα αυτά κάποιοι όροι, όπως οι όροι εκ μεταφοράς ή οι όροι διάχυσης οι οποίοι είναι κυρίαρχοι σε ροές υψηλού αριθμού Reynolds και σε ροές μικρού αριθμού Reynolds αντίστοιχα, είναι λογικό να προσπαθήσουμε η διακριτοποίησή τους να είναι υψηλότερης τάξης ακρίβειας από των άλλων. Όμως ακόμα και αν οι προσεγγίσεις είναι συνακόλουθες, αυτό δεν σημαίνει ότι και η λύση του διακριτοποιημένου συστήματος εξισώσεων θα είναι η ακριβής λύση των διαφορικών εξισώσεων μόνο με τον περιορισμό του μικρού βήματος του αλγορίθμου. Για να συμβεί αυτό η αριθμητική μέθοδος θα πρέπει να είναι σταθερή όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Σταθερότητα (stability): Μια αριθμητική μέθοδος λέγεται ότι είναι σταθερή αν οποιοδήποτε σφάλμα που εμφανίζεται στην πεπερασμένη διαφορική εξίσωση δεν αυξάνεται με την λύση αυτής. Με άλλα λόγια, η αριθμητική μέθοδος επίλυσης χαρακτηρίζεται ως σταθερή όταν δεν αυξάνει τα σφάλματα που κάνουν την εμφάνισή τους κατά την διάρκεια της πορείας επίλυσης του συστήματος. Για πρόσκαιρα προβλήματα, η σταθερότητα εγγυάται ότι η μέθοδος παράγει φραγμένη λύση όποτε η λύση της πλήρης εξίσωσης είναι φραγμένη. Για επαναληπτικές μεθόδους, μια σταθερή μέθοδος είναι αυτή που δεν αποκλίνει. Το κριτήριο της σταθερότητας μπορεί να είναι δύσκολο να ερευνηθεί, ειδικότερα ότι είναι παρόν. Για αυτό το λόγο, είναι σύνηθες να ερευνάται η σταθερότητα της μεθόδου για γραμμικά προβλήματα με σταθερούς συντελεστές χωρίς οριακές συνθήκες. Τα δεδομένα που εξάγουμε με αυτό τον τρόπο μπορούν αρκετές φορές να εφαρμοστούν σε πιο περίπλοκα προβλήματα αλλά με σημαντικές εξαιρέσεις. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την διερεύνηση της σταθερότητας των αριθμητικών σχημάτων είναι η ανάλυση von Neumann.

Σύγκλιση (convergence) : Ένα πεπερασμένο διαφορικό σχήμα συγκλίνει εάν η λύση της πεπερασμένης διαφορικής εξίσωσης προσεγγίζει εκείνη της μερικής διαφορικής εξίσωσης όταν το μέγεθος του υπολογιστικού πλέγματος τείνει στο μηδέν. Για γραμμικά προβλήματα αρχικών τιμών, η θεωρία του Lax καθορίζει ότι δεδομένου του ότι ένα καλά τοποθετημένο πρόβλημα αρχικών τιμών στο οποίο έχει εφαρμοστεί προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών που ικανοποιεί το κριτήριο της συνακολουθίας, η σταθερότητα αποτελεί το αναγκαίο και επαρκές κριτήριο για την επίτευξη της σύγκλισης. Προφανώς, ένα σχήμα που ικανοποιεί μόνο την συνακολουθία είναι άχρηστο εκτός και αν η μέθοδος επίλυσης συγκλίνει. Για μη γραμμικά προβλήματα που παρουσιάζουν ισχυρή εξάρτηση από τις οριακές συνθήκες, η σταθερότητα και η σύγκλιση της μεθόδου είναι δύσκολο να καταδειχθούν. Για αυτό η σύγκλιση συνήθως ελέγχεται χρησιμοποιώντας αριθμητικά πειράματα, όπως με την επανάληψη των υπολογισμών σε μια σειρά εξευγενισμένων υπολογιστικών πλεγμάτων. Αν η μέθοδος είναι σταθερή και εάν όλες οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία διακριτοποίησης είναι συνακόλουθες, συνήθως βρίσκουμε ότι η λύση συγκλίνει

και είναι ανεξάρτητη του πλέγματος. Για επαρκώς μικρά μεγέθη πλέγματος, ο ρυθμός σύγκλισης καθορίζεται από το την τάξη του σφάλματα αποκοπής, επιτρέποντας μας να εκτιμήσουμε το λάθος της λύσης.

Συντηρητικότητα (conservation) : Από την στιγμή που οι προς επίλυση εξισώσεις είναι νόμοι διατήρησης, το αριθμητικό σχήμα θα πρέπει, σε τοπική αλλά και ολική βάση, να τους ικανοποιεί και εκείνο. Αυτό σημαίνει ότι, για μόνιμη κατάσταση και με απουσία πηγών, το ποσοστό της συντηρητικής ποσότητας που εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου ισούται με το ποσοστό εκείνου που εισέρχεται. Εάν χρησιμοποιείται η αυστηρή συντηρητική μορφή των εξισώσεων και η μέθοδος πεπερασμένων όγκων, εξασφαλίζεται για κάθε αυτόνομο όγκο ελέγχου και για το πεδίο λύσεων σαν σύνολο. Άλλες μέθοδοι διακριτοποίησης μπορούν να γίνουν συντηρητικές με την κατάλληλη επιλογή των προσεγγίσεων. Αυτή είναι μια σημαντική ιδιότητα της αριθμητικής μεθόδου, από την στιγμή που εισάγει περιορισμό στο σφάλμα της λύσης. Αν η διατήρηση της μάζας και της ορμής ικανοποιούνται, το σφάλμα μπορεί να διανείμει αυτές τις ποσότητες σε όλο το υπολογιστικό πεδίο. Μη συντηρητικά σχήματα μπορούν να παράγουν τεχνητές πηγές αλλάζοντας την ισορροπία τοπικά αλλά και ολικά. Παρόλα αυτά, μπορούν να είναι συνακόλουθα και σταθερά και να οδηγούν σε ορθές λύσεις στο όριο αρκετά μεγάλων πλεγμάτων. Τα σφάλματα λόγω της μη ικανοποίησης της συντηρητικότητας στις περισσότερες των περιπτώσεων γίνονται αισθητά σε χονδροειδή πλέγματα. Τα πρόβλημα έγκειται στο ότι είναι δύσκολο να εντοπιστούν τα πλέγματα στα οποία τα σφάλματα αυτά είναι αρκετά μικρά οδηγώντας μας στην χρήση συντηρητικών σχημάτων.

Ακρίβεια (accuracy) : Οι αριθμητικές λύσεις ρευστομηχανικών προβλημάτων αποτελούν προσεγγιστικές λύσεις. Εκτός από τα σφάλματα που εισάγονται κατά την διάρκεια των επαναλήψεων του υπολογιστικού αλγορίθμου, αλλά και από την επιβολή οριακών συνθηκών, οι αριθμητικές λύσεις πάντα περιλαμβάνουν τρία είδη συστηματικών σφαλμάτων :

- Σφάλματα μοντελοποίησης, τα οποία ορίζονται ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής ροής και της ακριβής λύσης του μαθηματικού μοντέλου
- Σφάλματα διακριτοποίησης, τα οποία ορίζονται ως η διαφορά ανάμεσα στην ακριβή λύση των συντηρητικών εξισώσεων και την ακριβή λύση του αλγεβρικού συστήματος των εξισώσεων που έχουν διακριτοποιηθεί από αυτές τις εξισώσεις
- Σφάλματα επαναλήψεων, τα οποία ορίζονται ως η διαφορά μεταξύ των επαναληπτικών και ορθών λύσεων του συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων.

Τα σφάλματα επαναλήψεων συχνά καλούνται σφάλματα σύγκλισης. Παρόλα αυτά, ο όρος σύγκλιση χρησιμοποιείται όχι μόνο για το σφάλμα αποκοπής των επαναληπτικών μεθόδων, αλλά συχνά και την σύγκλιση των αριθμητικών σχημάτων προς μια λύση ανεξάρτητη του πλέγματος, εμφανίζοντας έτσι μια σύνδεση με το σφάλμα διακριτοποίησης. Είναι σημαντικό να λαμβάνουμε υπ'Α όψιν την ύπαρξη τέτοιων σφαλμάτων και ακόμα να προσπαθούμε να τα ξεχωρίσουμε. Κάποια σφάλματα μπορεί να αλληλοεξουδετερωθούν με τέτοιο τρόπο ώστε η λύση που αποκτάται από ένα χονδροειδές (coarse) πλέγμα μπορεί να συμπίπτει περισσότερο με την πειραματική λύση από ότι η λύση από ένα ραφινρισμένο πλέγμα, το οποίο εξ' ορισμού είναι πιο ακριβές.

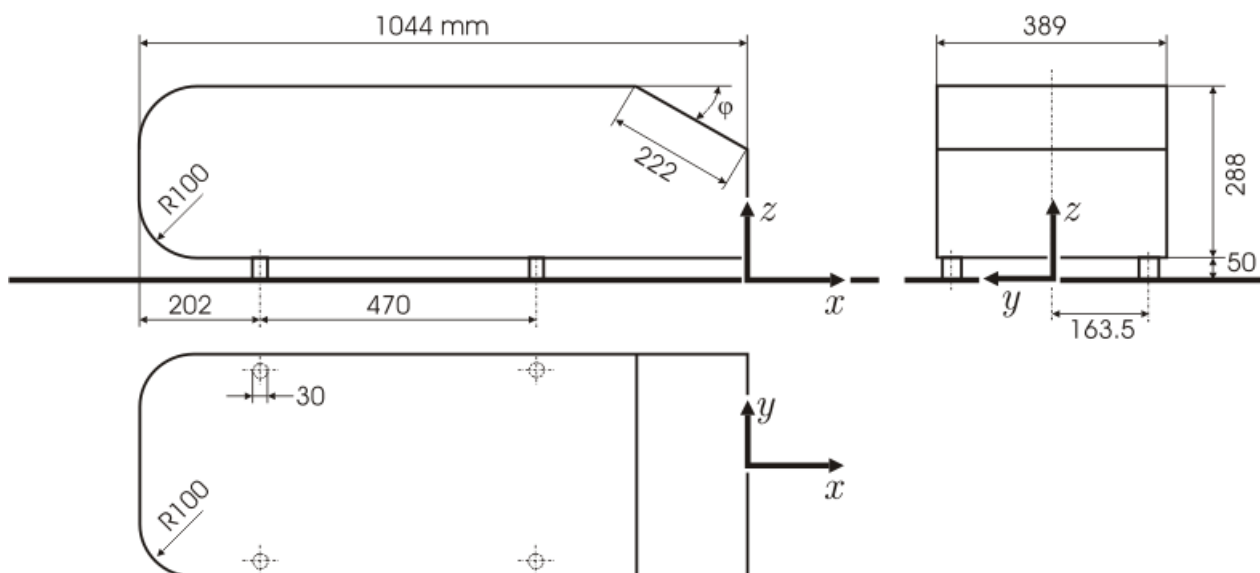
Τα σφάλματα μοντελοποίησης εξαρτώνται από τις υποθέσεις που κάνουμε παράγοντας τις εξισώσεις μεταφοράς για τις μεταβλητές. Μπορεί να θεωρούνται αμελητέα όταν μελετάμε στρωτές ροές από την στιγμή που οι NS αναπαριστούν επαρκώς ένα ακριβές μοντέλο της ροής. Από την άλλη, για τυρβώδεις και διαφασικές ροές, τα σφάλματα αυτά μπορεί να είναι πολύ μεγάλα καθιστώντας την ακριβή λύση των μοντελοποιημένων εξισώσεων ποιοτικά εσφαλμένη. Επίσης σφάλματα μοντελοποίησης εισάγονται απλοποιώντας την γεωμετρία του υπολογιστικού πεδίου ή τις οριακές συνθήκες. Αυτά δεν είναι απόλυτα γνωστά αλλά μπορούν να εκτιμηθούν από την σύγκριση λύσεων στις οποίες τα σφάλματα διακριτοποίησης και σύγκλισης είναι αμελητέα με ακριβή πειραματικά δεδομένα ή από δεδομένα που έχουν παρθεί από πιο ακριβή μοντέλα.

Παραπάνω αναφερθήκαμε στο ότι οι διακριτοποιημένες προσεγγίσεις εισάγουν σφάλματα τα οποία μειώνονται καθώς το πλέγμα ραφινάρεται και η τάξη της προσέγγισης είναι μια μέθοδος μέτρησης της ακρίβειας. Από την άλλη, για γνωστό πλέγμα, μέθοδοι της ίδιας τάξης ακρίβειας μπορούν να παράγουν σφάλματα στην λύση που διαφέρουν και κατά μία τάξη μεγέθους. Κάτι τέτοιο συμβαίνει γιατί η τάξη ακρίβειας μας δίνει το ρυθμό κατά τον οποίο τα σφάλματα μειώνονται καθώς το πλέγμα ραφινάρεται, μη δίνοντάς μας πληροφορία γι αυτό όταν υπάρχει μοναδικό πλέγμα. Τα σφάλματα επαναλήψεων και στρογγυλοποίησης είναι πιο εύκολο να ελεγχθούν.

Τέλος, στις ιδιότητες των αριθμητικών μεθοδολογιών ανήκει και η ανάγκη, οι αριθμητικές λύσεις να περιορίζονται ανάμεσα σε κατάλληλα όρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε να κάνουμε με φυσικές ποσότητες που είναι πάντα θετικές. Η ιδιότητα αυτή είναι δύσκολο να διατηρηθεί με τα σχήματα μιας τάξης ακρίβειας μόνο να εγγυάται την ικανοποίησή της. Συνήθως μη φραγμένες λύσεις προκύπτουν για χονδροειδή κυρίως πλέγματα καθιστώντας τα σχήματα αυτά επίφοβα για εμφάνιση προβλημάτων σταθερότητας και σύγκλισης.

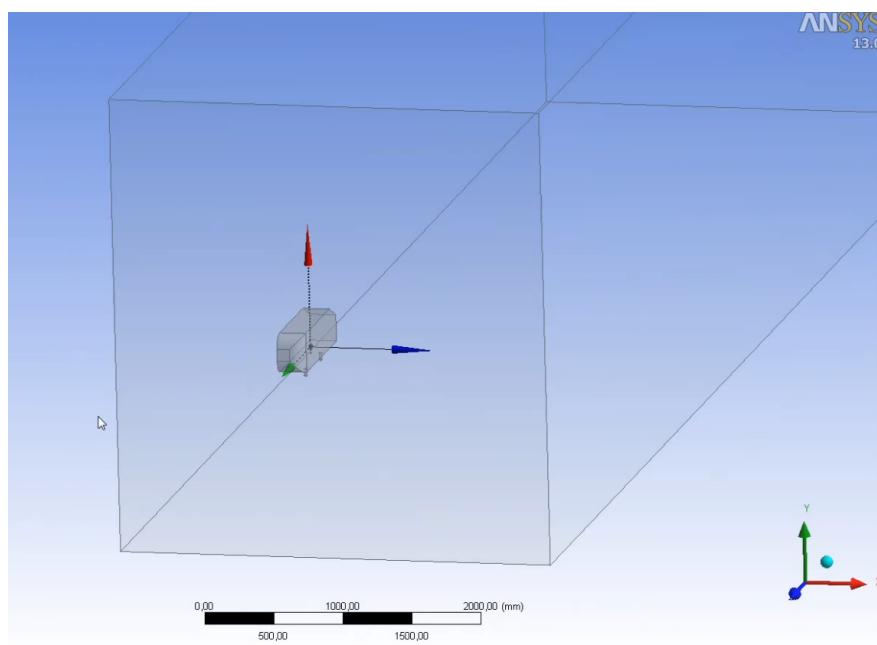
5.3 Κατασκευή Γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου Ahmed body έχει δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας το solid works, ένα 3D computer-aided design πρόγραμμα (CAD). Αυτό το πρόγραμμα επιλέχθηκε επειδή είναι εύχρηστο αλλά και επειδή θεωρείται ένα από τα καλύτερα εργαλεία στο τομέα του σχεδιασμού. Η σχεδίαση του βασικού μοντέλου της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε με βάση την περιγραφή της γεωμετρίας που το χαρακτηρίζει όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Κατά την κατασκευή του μοντέλου ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε επίσης στην τοποθέτηση της αρχής συντεταγμένων που κρίθηκε σκόπιμο να ταυτιστεί με την επίσημη περιγραφή των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών. Γι αυτόν τον λόγο, λοιπόν, η αρχή των αξόνων τοποθετείται στο πίσω μέρος του μοντέλου όπως φαίνεται στην εικόνα.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρικές Διαστάσεις

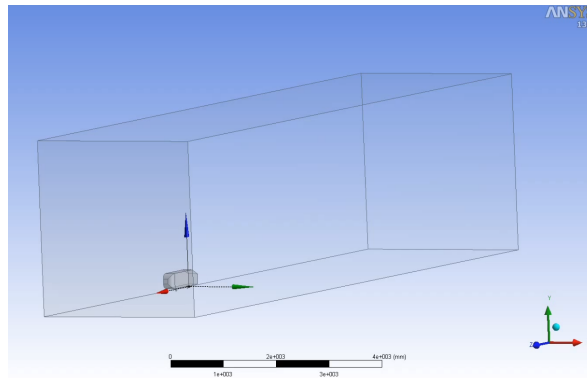
Το solid works δίνει την επιλογή στους χρήστες να εξάγουν, απευθείας, τη γεωμετρία τους στο workbench του ANSYS. Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ANSYS 13.0. Ο σχεδιασμός της αεροσφήραγας η οποία περιβάλλει το σώμα έγινε με βάση το εργαλείο Design Modeler του ANSYS όπου, το Ahmed body κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί σε συμμετρία πράγμα που απαιτεί λιγότερη υπολογιστική δύναμη και χρόνο. Όπως γίνεται κατανοητό από τις εικόνες του απλοποιημένου αυτού μοντέλου, το Ahmed body είναι συμμετρικό ως προς τη μία του διάσταση (συμμετρικό ως προς το επίπεδο yz) και εν τέλει παίρνει τη μορφή της εικόνας που ακολουθεί.



Σχήμα 5.2: Κατασκευή της συμμετρίας στο Design Modeler του ANSYS

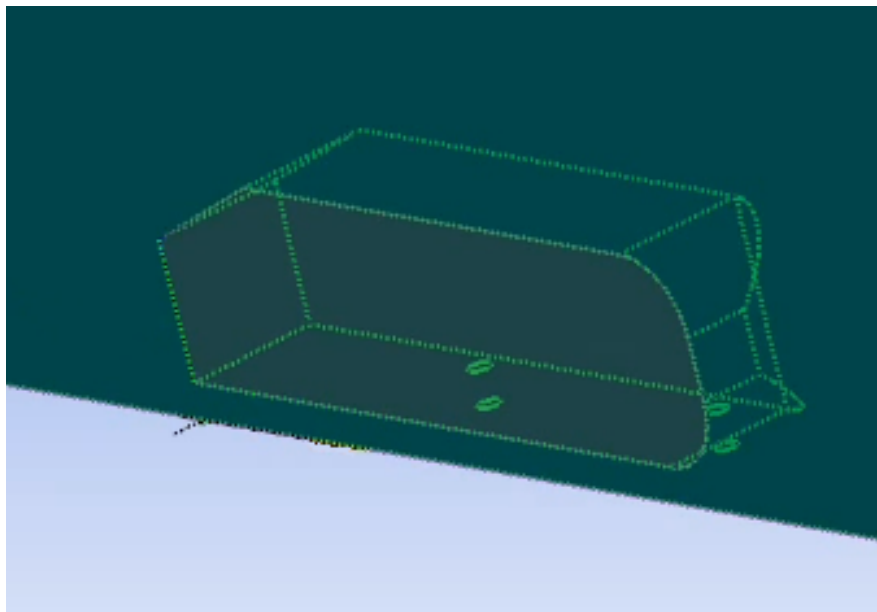
Η τοποθέτηση του μοντέλου μέσα στην σήραγγα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Οι διαστάσεις της σήραγγας του πειράματος του H. Lienhart είναι 1.87 x 1.4 x 2.4m. Λόγω συμμετρίας, το

υπολογιστικό πεδίο είναι 1.87 x 0.935 x 2.4m.



Σχήμα 5.3: Ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο

Στην συνέχεια του σχεδιασμού με το Design Modeler του ANSYS επιλέχθηκε ο αέρας για το περιβάλλει το μοντέλο . Έτσι στην συνέχεια αφαιρούμε το στερεό Ahmed body από το κουτί αέρα που προσομοιώνει την πραγματική σήραγγα και το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 5.4.



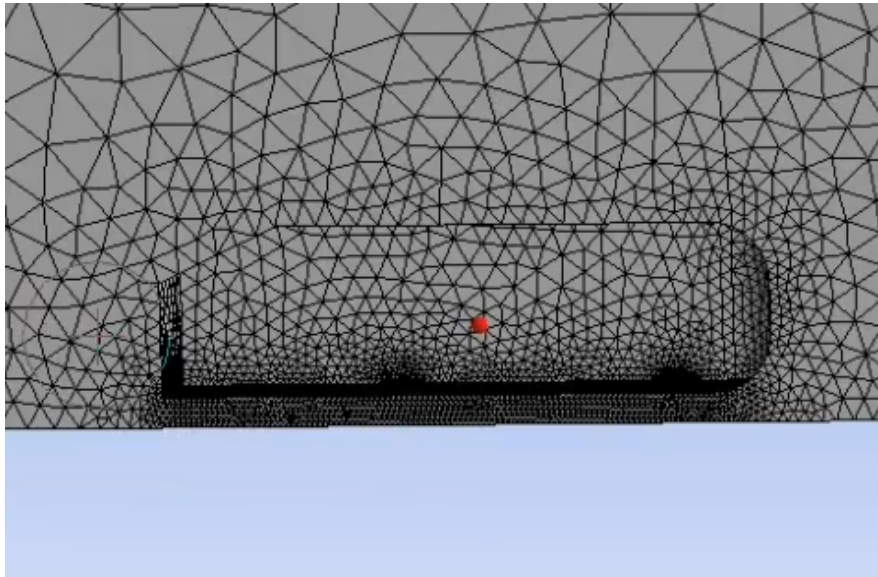
Σχήμα 5.4: Μετά την αφαίρεση του Ahmed body την αεροσήραγγα

5.4 Κατασκευή Πλέγματος

Για την κατασκευή του πλέγματος, το σημαντικότερο κομμάτι της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το ANSYS MESHING. Στην κατασκευή του μη-δομημένου πλέγματος μας ορίστηκε το τετράεδρο γεωμετρικό σχήμα των κελιών στις επιλογές του ANSYS MESHING.

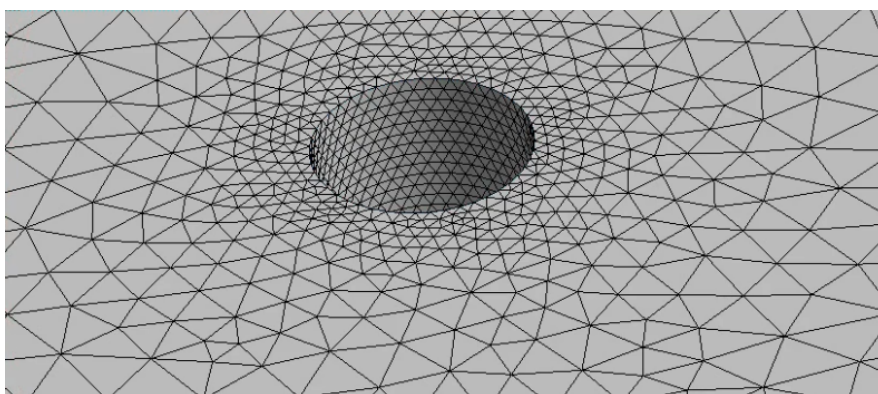
Στην πρώτη επαφή με το πλέγμα επιλέχθηκε η δημιουργία ενός αραιού πλέγματος πάνω στο οποίο επιλέχθηκαν να αναδειχθούν οι κρίσιμες περιοχές. Όπως φαίνεται στην εικόνα το αραιό αυτό πλέγμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από μεγάλα κελιά σε σημεία που βρίσκονται μακριά

από το σώμα κάτι που είναι αρκετά λογικό αλλά επίσης και εξίσου μεγάλα κελιά σε περιοχές μεγάλου ενδιαφέροντος, πράγμα που δημιουργεί πρόβλημα. Οπότε το επόμενο βήμα είναι να βελτιωθεί η κατάσταση σε αυτές τις προβληματικές περιοχές.



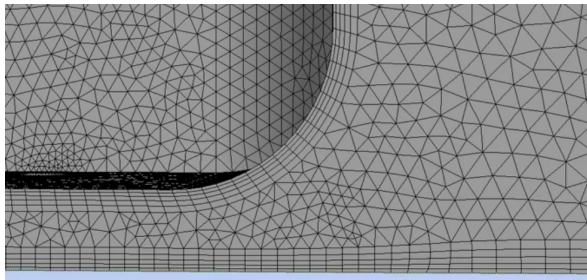
Σχήμα 5.5: Αρχικό αραιό πλέγμα

Η δεύτερη επαφή με το πλέγμα αφορά στην πυκνωση στα πόδια του μοντέλου όπου είναι λογικό να δοθεί ιδιαίτερη βάση καθώς είναι ένα δύσκολο σημείο και παρουσιάζει ενδιαφέρον. Έγινε, λοιπόν, η επιλογή μικρότερων σε μέγεθος κελιών ειδικά στα σημεία που φαίνονται στην εικόνα 5.6.

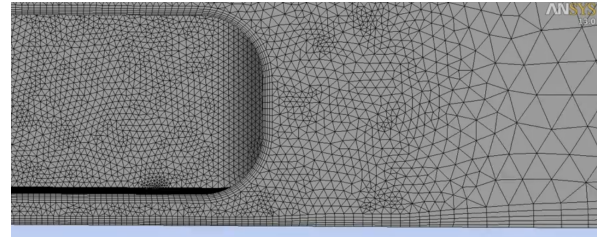


Σχήμα 5.6: Πλέγμα στο σημείο του ποδιού στήριξης του Ahmed body

Το κομμάτι του κάτω μέρους του μοντέλου είναι εξίσου σημαντικό και γι αυτό έχει επιλεγεί ένα πιο πυκνό πλέγμα κάτω από το κύριο σώμα του μοντέλου πράγμα που γίνεται εύκολα αντιληπτό σε σύγκριση με τα διπλανά κελιά στην εικόνα 5.7.



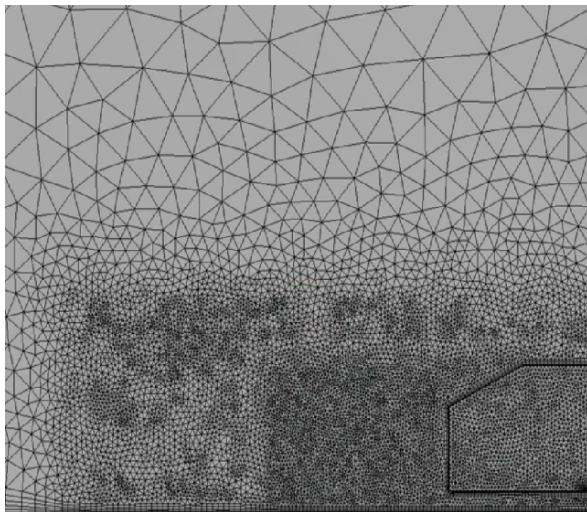
(α') Εμπρόσθιο μέρος, κοντινή λήψη



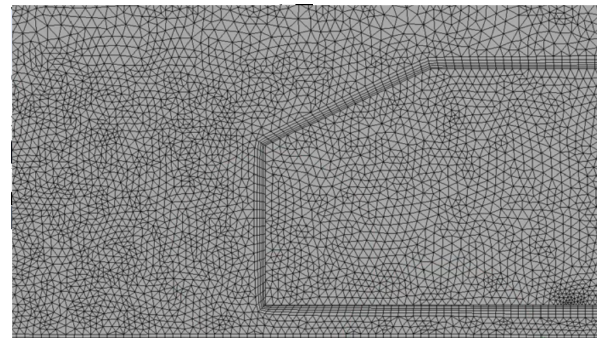
(β') Εμπρόσθιο μέρος, κοντινή λήψη

Σχήμα 5.7: Πυκνότερο πλέγμα ανά περιοχές (κάτω μέρος του μοντέλου) συγκριτικά με τα διπλανά κελιά.

Στη σημαντικότερη περιοχή της αεροσήραγγας προβλέπεται περαιτέρω ανάλυση. Το τμήμα (ομόρου) της ροής που απομακρύνεται από το Ahmed body στο πίσω μέρος του εμφανίζει δίνες αλλά και αποκόλληση ροής. Γι' αυτόν τον λόγο ειδικά σε αυτό το σημείο έχει πυκνώσει το πλέγμα σε μεγαλύτερο βαθμό ώστε να γίνουν αντιληπτά όλα τα παραπάνω φαινόμενα. Το πυκνό πλέγμα απεικονίζεται στην εικόνα 5.8.



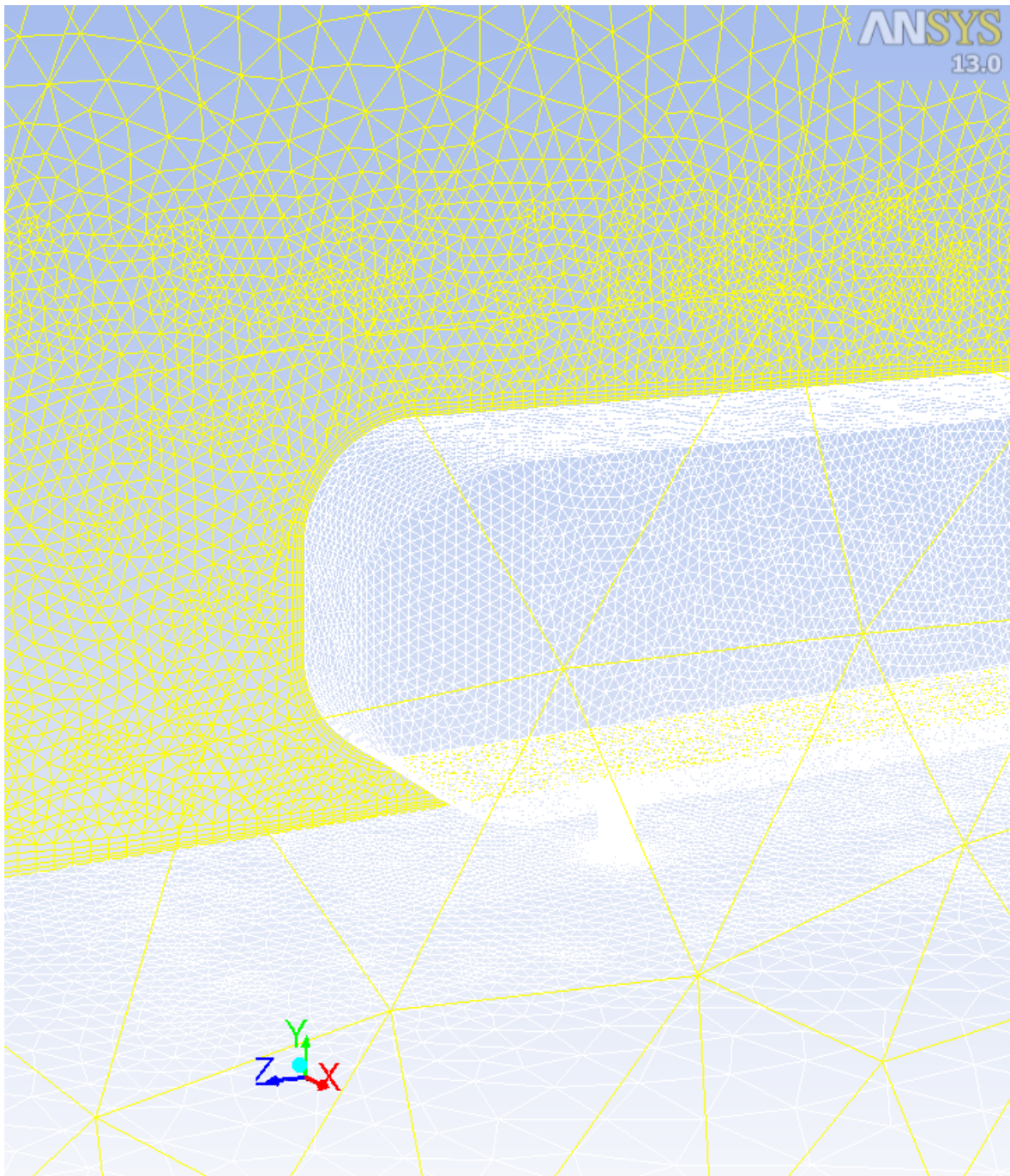
(α') Πίσω μέρος, απομακρυσμένη λήψη



(β') Πίσω μέρος, κοντινή λήψη

Σχήμα 5.8: Πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος στο πίσω μέρος της ροής

Για κάθε μια διαφορετική γεωμετρική διάταξη της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν δυο πλέγματα με διαφορετικό αριθμό κελιών. Το μικρό και το μεγάλο πλέγμα αποτελούνται από 2 και 3.6 εκατομμύρια κελιά, αντίστοιχα. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα μεγέθη ενδιαφέροντος (κυρίως ταχύτητα και πίεση) έχουν μεγάλη απόκλιση για τους δύο διαφορετικούς τύπους πλέγματος. Από τις εικόνες γίνεται εύκολα αντιληπτό το υπολογιστικό πλέγμα για όλες τις περιπτώσεις.

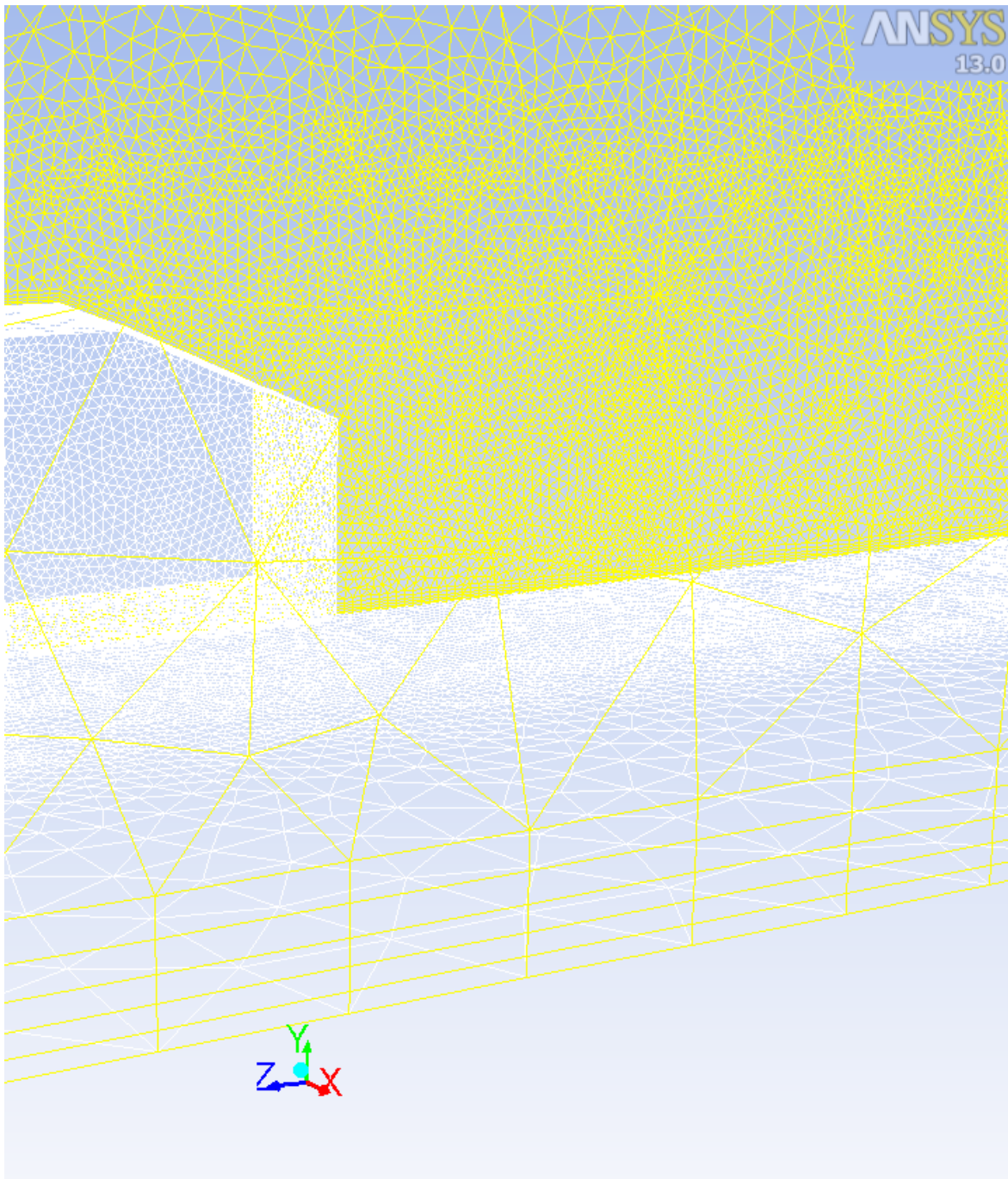


Mesh

Jun 20, 2013

ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

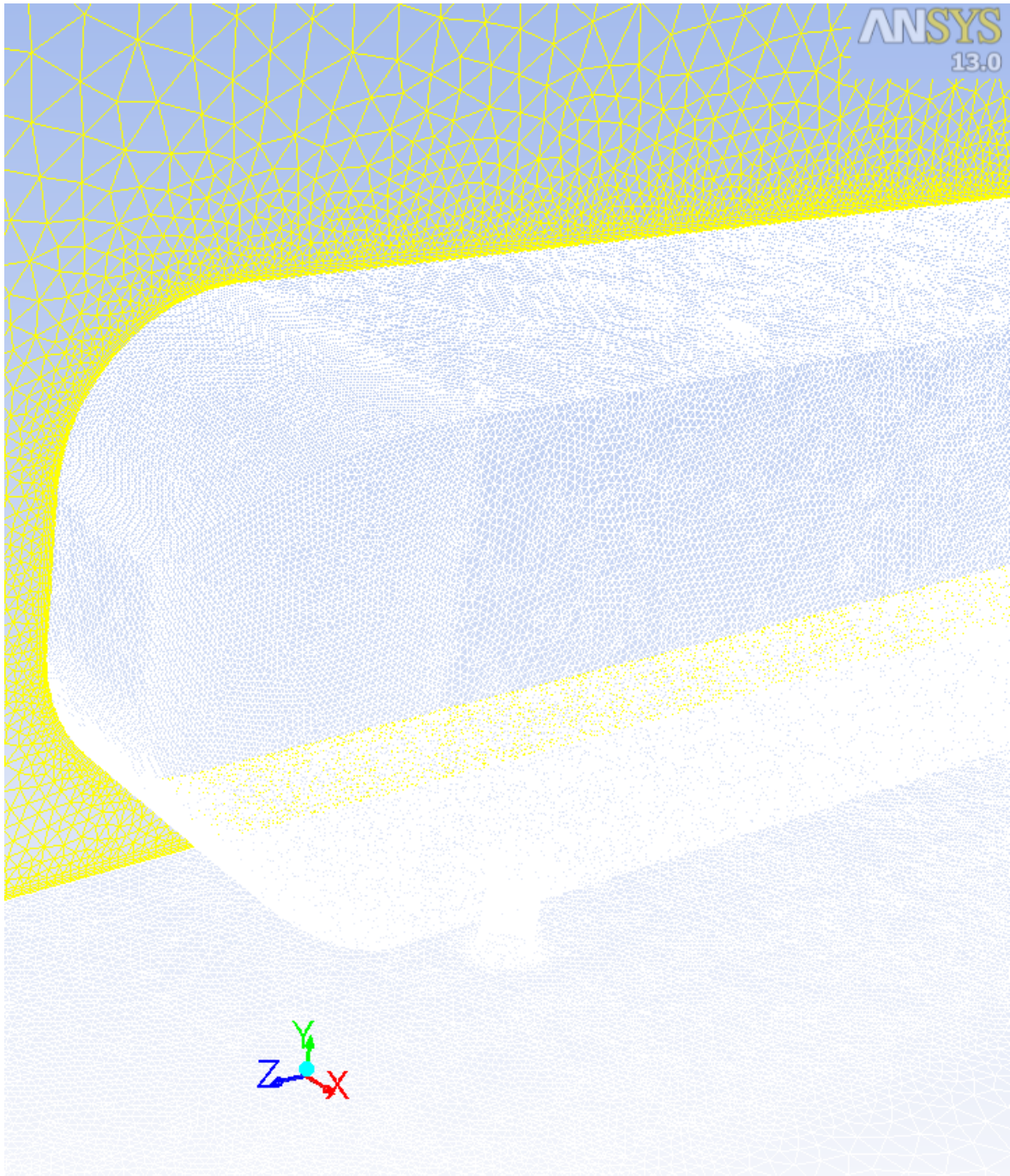
Σχήμα 5.9: Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών



Mesh

Jun 20, 2013
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

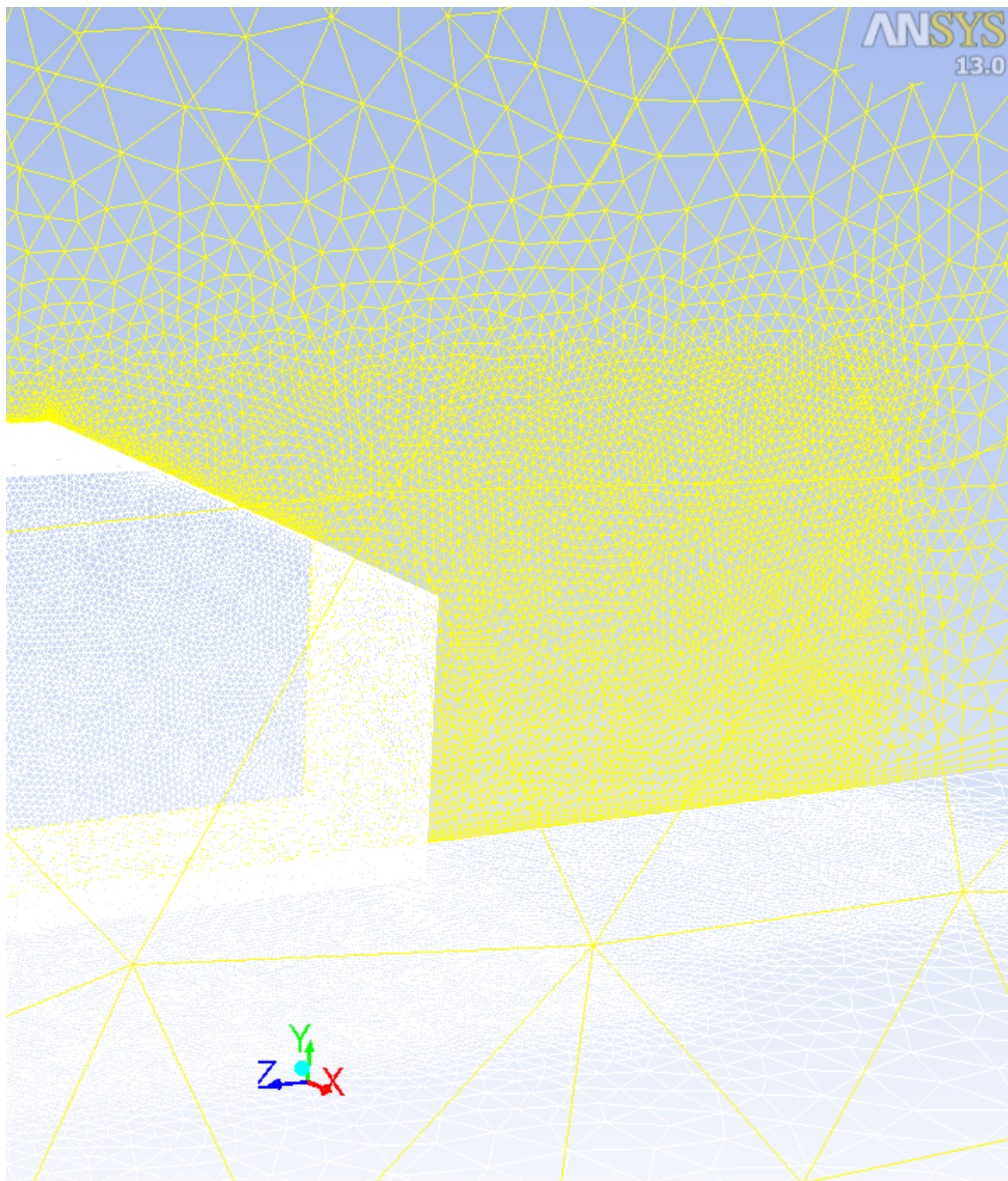
Σχήμα 5.10: Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών



Mesh

Jun 20, 2013
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

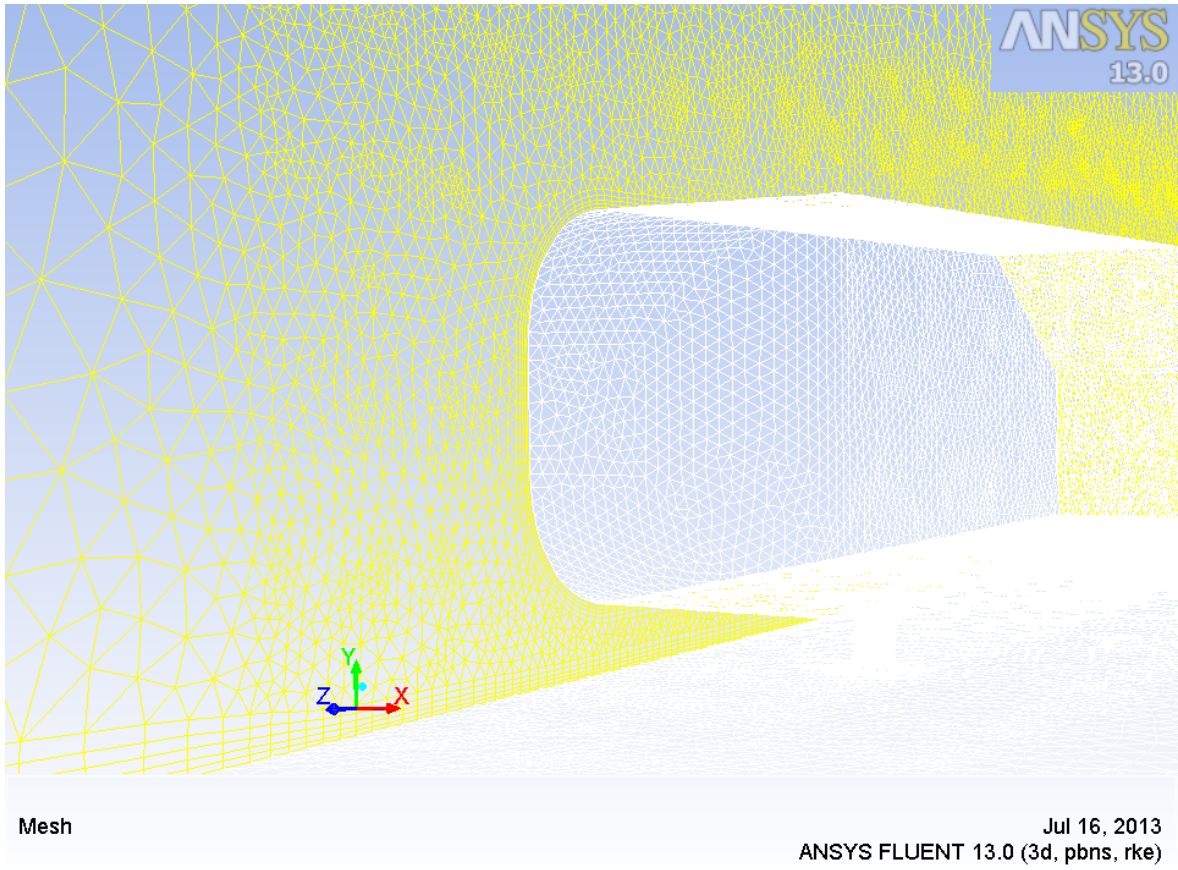
Σχήμα 5.11: Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών



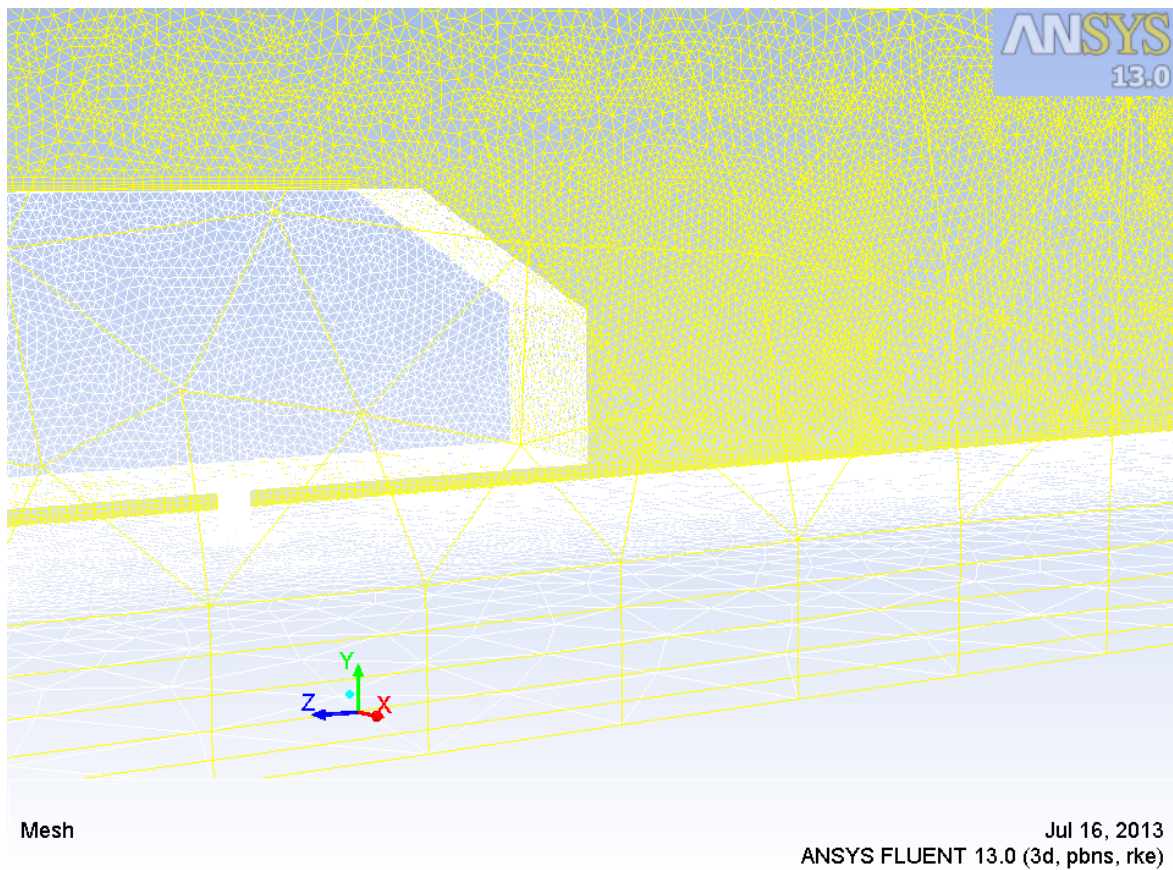
Mesh

Jun 20, 2013
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

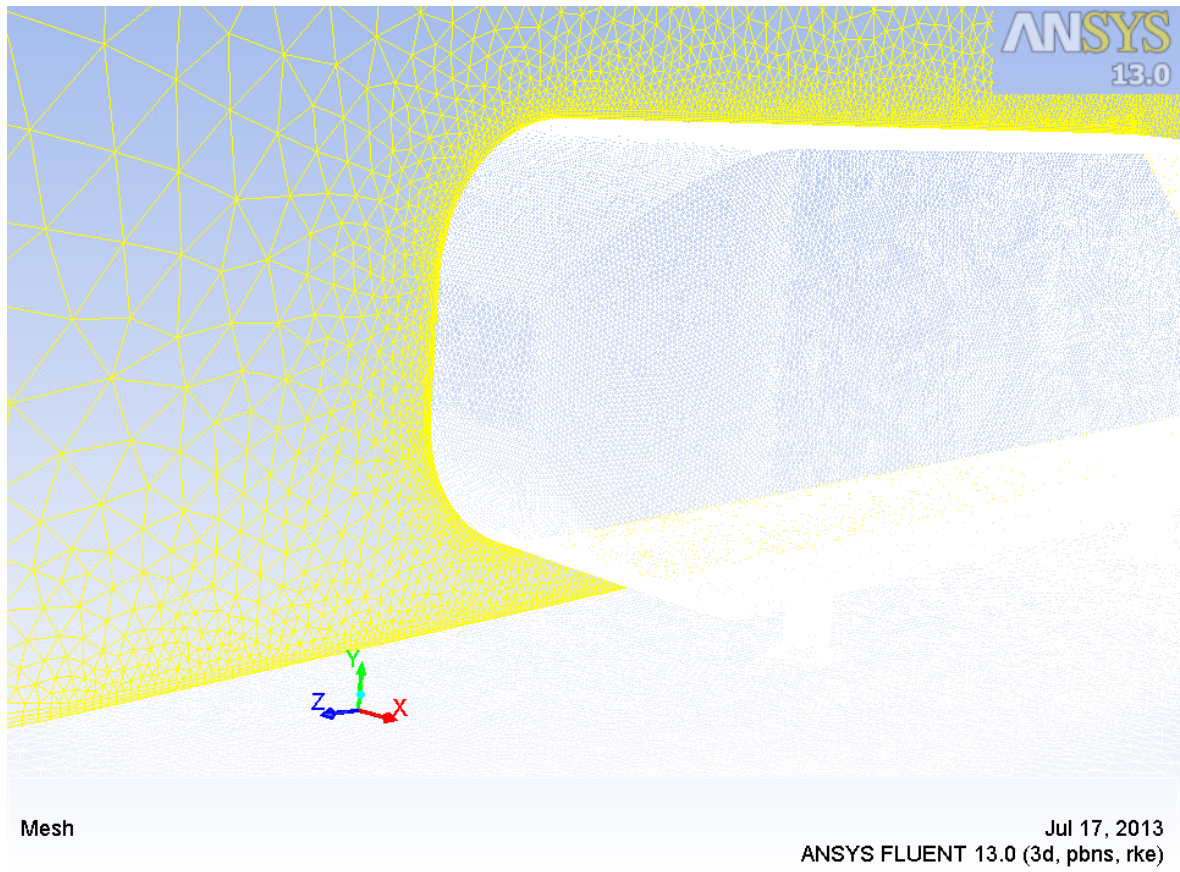
Σχήμα 5.12: Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 25 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών



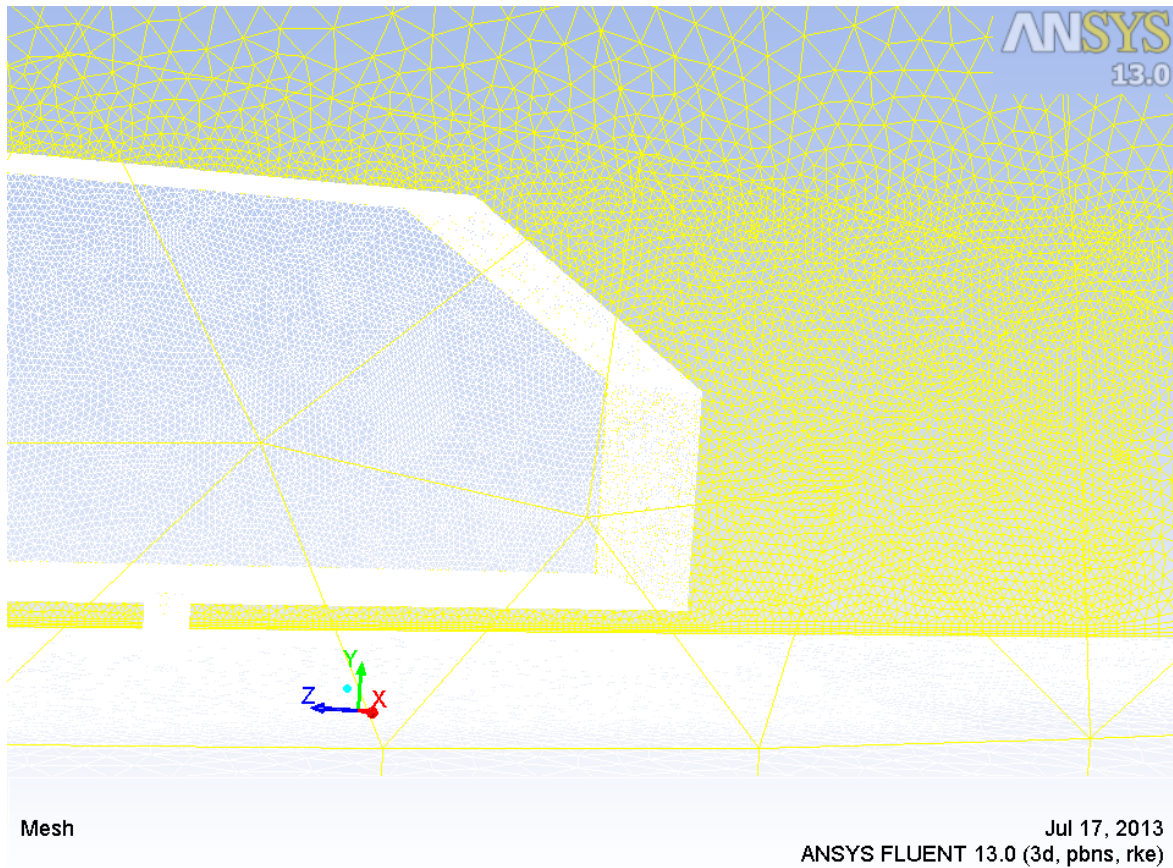
Σχήμα 5.13: Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών



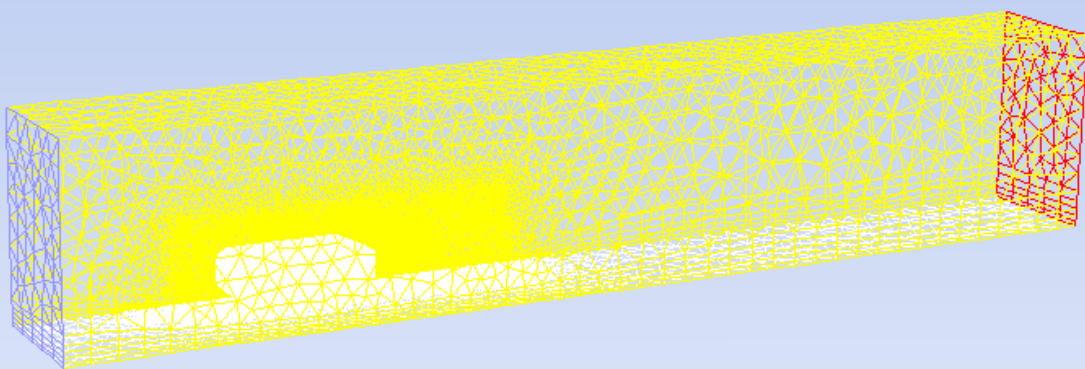
Σχήμα 5.14: Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών



Σχήμα 5.15: Εμπρόσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών



Σχήμα 5.16: Οπίσθιο υπολογιστικό πλέγμα για Ahmed Body 35 μοιρών και 3.6 εκατομμυρίων κελιών



Mesh

Jun 20, 2013

ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

Σχήμα 5.17: Υπολογιστικό πεδίο για Ahmed Body

5.5 Οριακές Συνθήκες

Ακολουθώντας τις οδηγίες των δημιουργών του λογισμικού FLUENT, για προσομοίωση ροών σε εξωτερικούς χώρους προτείνεται εύρος ένταση τύρβης (turbulence intensity) μεταξύ 1-5%. Στη

περίπτωση του απλοποιημένου οχήματος, τα πειραματικά δεδομένα έχουν ληφθεί μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα, όπου όλες οι συνθήκες είναι ελεγχόμενες στις περισσότερες περιπτώσεις, για να εξασφαλιστεί σταθερή ταχύτητα ροής εισόδου προς το αντικείμενο μελέτης, χρησιμοποιείται ένα πλέγμα από κυψελίδες στο σχήμα μελισσοφωλιάς στην είσοδο της σήραγγας. Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται ειδικά ακροφύσια για να παράγεται μια ήρεμη ροή. Συνεπώς επιλέγεται η χαμηλότερη τιμή για την ταχύτητα εισόδου, δηλαδή 1%. Αντίστοιχα, η πίεση εξόδου ορίζεται στο 5% καθώς η ροή αέρα θα περάσει πάνω από ένα εμπόδιο (στην προκειμένη περίπτωση το μοντέλο Ahmed) και αναμένεται να υπάρξει ένα ποσοστό τύρβης σύμφωνα με το εγχειρίδιο του ANSYS.

Αναλυτικά:

Είσοδος: Ταχύτητα εισόδου αέρα $U=40$ m/s

Έξοδος Σταθερή πίεση εξόδου $d(\varphi)/dx=0$ ($\varphi=u, v, w, k, \epsilon$)

Αναλυτικά κάθε επιφάνεια:

Το μοντέλο Ahmed ορίζεται σαν σταθερός και λείος τοίχος

Ο δρόμος (έδαφος αεροσήραγγας) θεωρείται σταθερός και λείος τοίχος.

Συμμετρία στο επίπεδο y-z (προσομοίωση της μισής γεωμετρίας Ahmed body)

Συμμετρία απέναντι κάθετος τοίχος

Συμμετρία στην οροφή της σήραγγας

Στο εσωτερικό της σήραγγας θεωρείται ότι υπάρχει αέρας

Γενικότερα ισχύει για τα τοιχώματα με λεία επιφάνεια :

$$\Upsilon_P = \begin{cases} \frac{u_* z_P}{v} & \text{for } \frac{u_* z_P}{v} \leq Y \\ \frac{u_*}{x} \lambda v (E \frac{u_* z_P}{v}) & \text{for } \frac{u_* z_P}{v} > Y \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου:

x : σταθερά von Karman,

E, Υ : εμπειρικές σταθερές,

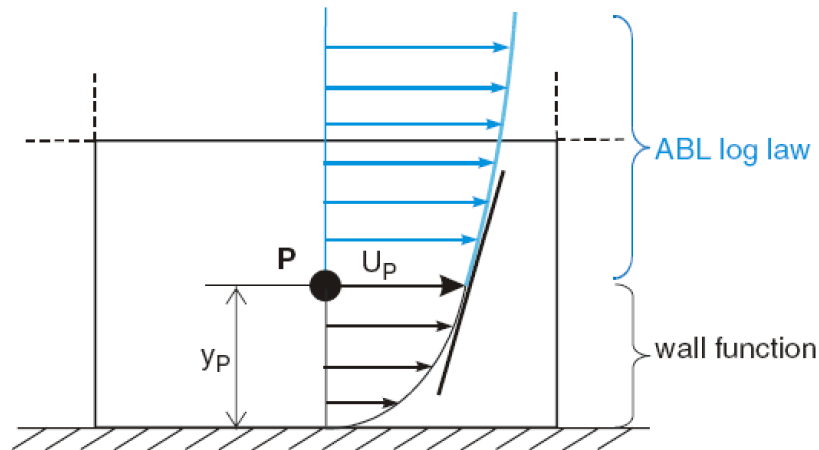
U_P : μέση ταχύτητα ενός ρευστού σε ένα σημείο P, εικόνα 5.18,

k_P : τυρβώδης κινητική ενέργεια στο σημείο P

z_P : απόσταση μεταξύ ενός σημείου P του τοίχου

v : κινηματικό ιξώδες

u^* : ταχύτητα τριβής



Σχήμα 5.18: Γραφική αναπαράσταση της μέσης ταχύτητας σε ένα κεντρικό σημείο P για ένα κελί που είναι γειτονικό με τον τοίχο [5]

Εν ακολουθία του 4.2, εάν το μοντέλο k-ε[13] χρησιμοποιείται, η τυρβώδης κινητική ενέργεια και η τυρβώδης εξασθένιση στο κελί δίπλα στον τοίχο περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\chi_P = \frac{u_*^2}{\sqrt{\mu}} \quad (5.2)$$

και

$$\varepsilon_P = \frac{u_*^3}{\chi z_p} = \frac{\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\chi z_p} \quad (5.3)$$

όπου $\mu = 0.09$

Στην περίπτωση μελλοντικής μελέτης με το μοντέλο k- ω /SST και k- ω /k-ε [24] η ειδική διάχυση στο κελί κοντά στο τοίχωμα δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_P = \frac{\sqrt{k_p}}{\chi z_p \mu^{1/4}} \quad (5.4)$$

η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι η ίδια όπως στην εξίσωση 5.2.

5.6 Επίλυση Προβλήματος

Επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης coupled λόγω λιγότερης απαίτησης επαναλήψεων μέχρι το σημείο της σύγκλισης.

Χωρική διακριτοποίηση: Ορμή, τυρβώδης κινητική ενέργεια, τυρβώδης ρυθμός διάχυσης πρώτης τάξης.

Οι εξισώσεις της ταχύτητας και της ορμής επιλύονται ως συζευγμένες. Η προσομοίωση θα φθάσει στη σύγκλιση γρηγορότερα, καταναλώνοντας 1.5 με 2 φορές περισσότερους πόρους. Τα σχήματα upwind έχουν σχεδιαστεί αριθμητικά ώστε να προσομοιώνουν καλύτερα τη διεύθυνση μετάδοσης

πληροφορίας σε ένα πεδίο ροής κατά μήκος των χαρακτηριστικών καμπυλών. Ως συνέπεια, αν έχει υλοποιηθεί σωστά, μπορεί να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός πολύ απότομων ασυνεχειών χωρίς ταλαντώσεις. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το σχήμα κεντρικών διαφορών έχει αδυναμίες να αναπαραστήσει με ακρίβεια τη ροή. Αναλυτικά περιγράφεται στο [3]. Πληροφορίες για Pressure based solvers; SIMPLE & COUPLED βρίσκονται στο [23].

Αρχικά επιλέγεται η πρώτη τάξη, που είναι λιγότερο ακριβής αλλά δίνει σταθερότητα από την αρχή. Στη συνέχεια, μετά το πέρας 100 επαναλήψεων, επιλέγεται η δεύτερη τάξη. Τα υπόλοιπα θα αυξηθούν απότομα, όμως από αυτή τη στιγμή μετά τα δεδομένα της προσομοίωσης είναι περισσότερο ακριβή.

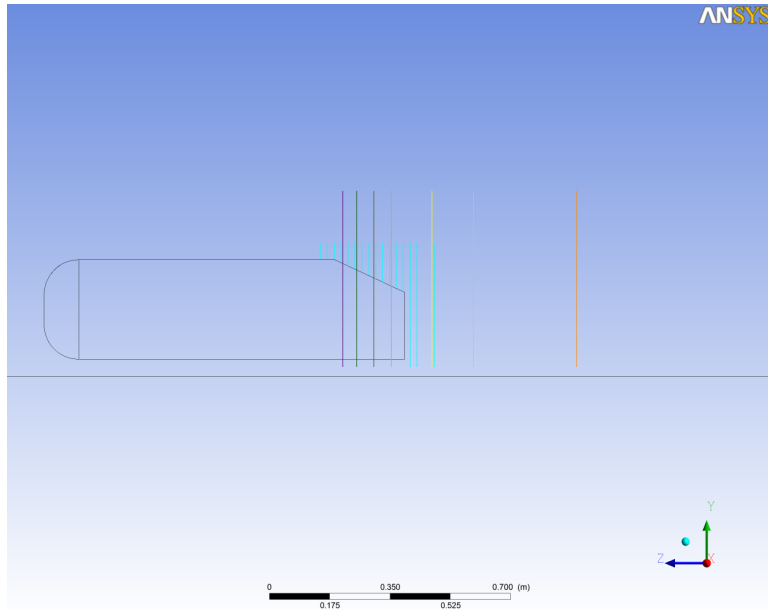
Για την έναρξη της λύσης 10 γρήγορες επαναλήψεις εκτελούνται με το μοντέλο στρωτής ροής. Έτσι η κατανομή πίεσης και ταχύτητας στο υπολογιστικό πλέγμα θα μοιάζει περισσότερο ρεαλιστική, ακολουθώντας σχετικώς τη φυσική του προβλήματος. Αυτό μπορεί να επιταχύνει τους υπολογισμούς μέχρι 50 επαναλήψεις συγκριτικά με το αν χρησιμοποιούταν μοντέλο τύρβης. Στη συνέχεια οι υπολογισμοί θα εκτελεσθούν όπως περιγράφηκε παραπάνω.

5.7 Αποτελέσματα

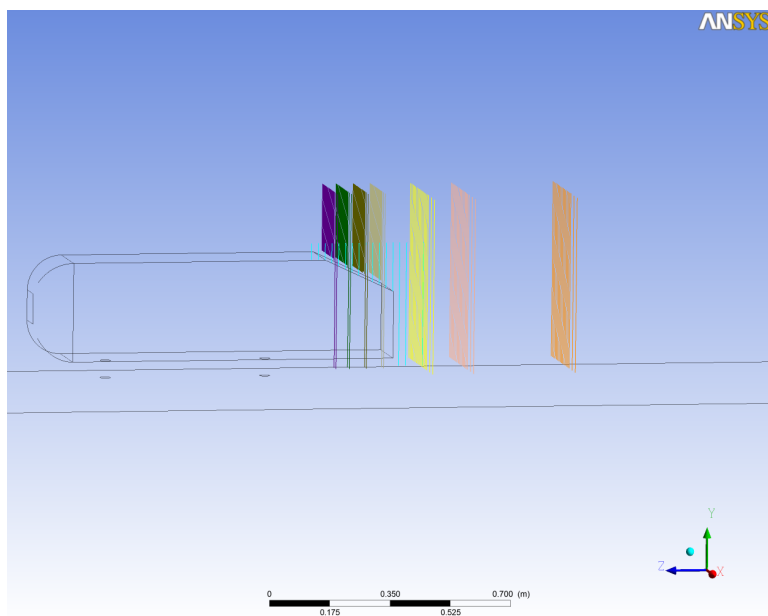
Σκοπός της διπλωματικής είναι να μπορέσουν να προβλεφθούν τιμές ταχύτητας σε συγκεκριμένα σημεία (ίδια με αυτά όπου μετρήθηκαν στα πειράματα) με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια. Σύμφωνα με το [1], όπου περιγράφονται οι φυσικές ιδιότητες και συμπεριφορές του προβλήματος, η προσοχή στρέφεται στο πίσω μέρος του οχήματος και στον ομόρου που σχηματίζεται. Η οπισθέλκουσα που παρατηρείται στα οχήματα κυρίως προέρχεται από την οπισθέλκουσα πίεσης που είναι συνέπεια της αποκόλλησης ροής. Το εμπρόσθιο τμήμα συνεισφέρει ελάχιστα στην οπισθέλκουσα και παραμένει σταθερό μέχρι τις 30 μοίρες. Αναλύοντας την οπισθέλκουσα, κατά κύριο λόγο οφείλεται στους μηχανισμούς ροής του πίσω μέρους του οχήματος. Παραπλήσια συμπεριφορά και τάσεις αναμένουμε και από τα αποτελέσματα προσομοίωσης για να θεωρηθεί έγκυρο το υπολογιστικό πακέτο και η μελέτη.

5.7.1 Σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις

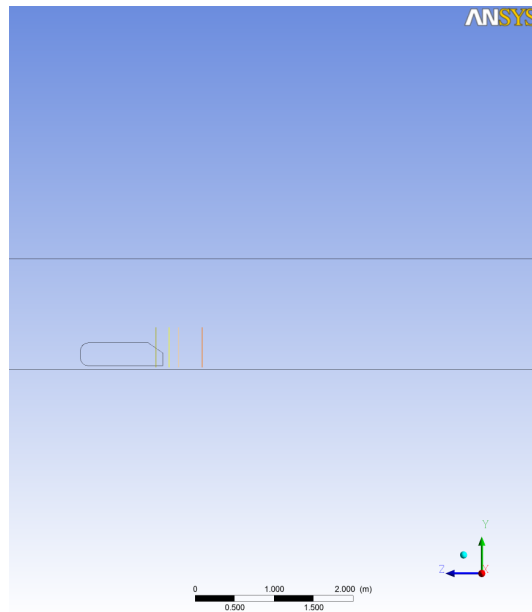
Παρακάτω παρατηρούμε τις συγκρίσεις των κάθετων προφίλ ταχύτητας u των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με τα αντίστοιχα των πειραματικών δεδομένων του H. Lienhart. Οι διακεκομμένες γραμμές στα διαγράμματα παρακάτω αντιπροσωπεύουν τις πειραματικές μετρήσεις (EXP) από το πείραμα του H. Lienhart και χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια των συγκρίσεων. Οι συνεχείς γραμμές από την άλλη εμφανίζουν τα αποτελέσματα του FLUENT (FL). Το σημείο $X=-88$ παρατηρείται στην παρακάτω εικόνα. Είναι ένα σημείο άξιο μελέτης καθώς βρίσκεται σε μια από τις περιοχές ενδιαφέροντος του σώματος και μας δίνει την ευκαιρία να συγκρίνουμε τις κλίσεις μεταξύ τους. Για τις συγκρίσεις σε αυτό το σημείο επιλέχθηκαν τα $Y=20$, $Y=100$ και $Y=160\mu\text{m}$ που βρίσκονται κατά πλάτος του σώματος. Για καλύτερη κατανόηση των σημείων παρατηρούμε τους άξονες και την τοποθέτηση των πολύχρωμων αισθητήρων στις εικόνες που ακολουθούν.



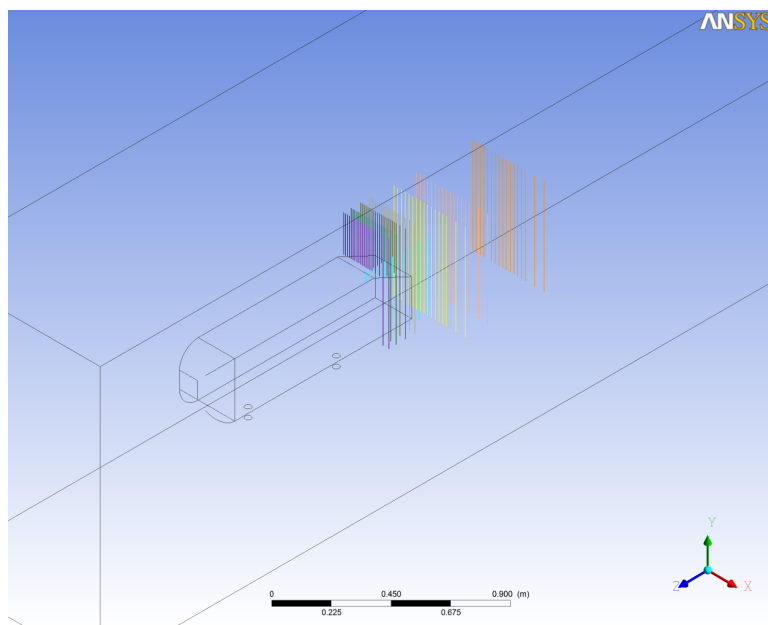
Σχήμα 5.19: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 25 μοιρών



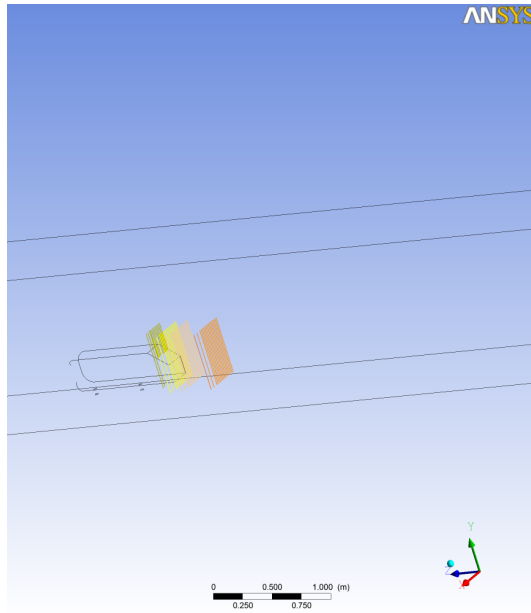
Σχήμα 5.20: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 25 μοιρών



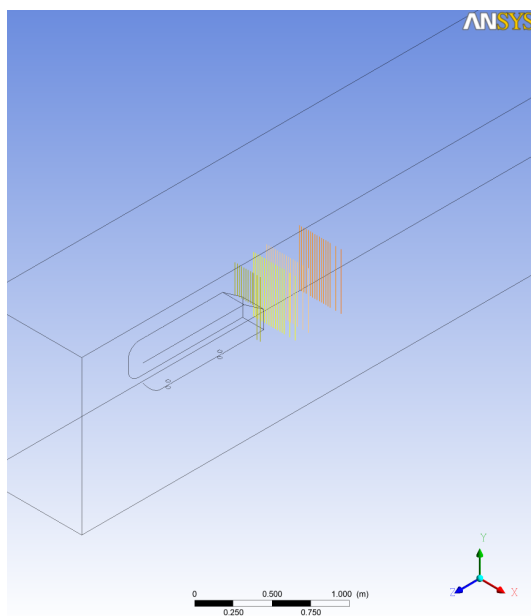
Σχήμα 5.22: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών



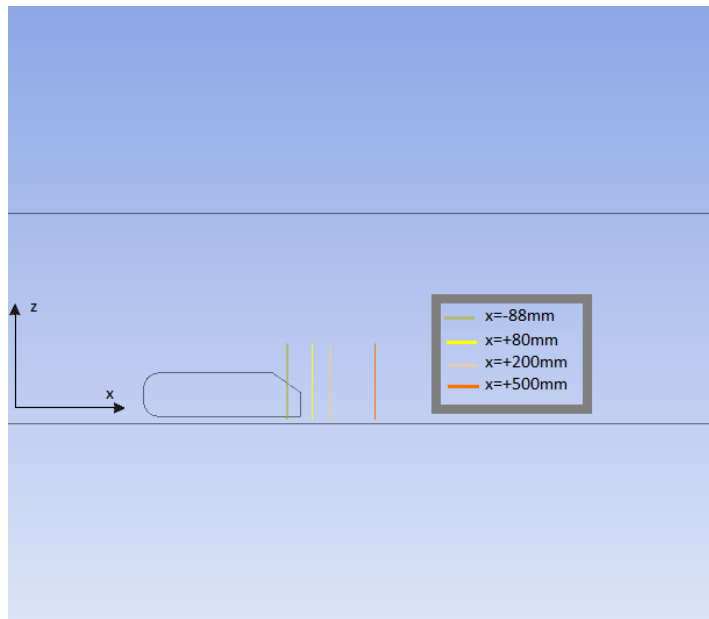
Σχήμα 5.21: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 25 μοιρών



Σχήμα 5.23: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών



Σχήμα 5.24: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών



Σχήμα 5.25: Αισθητήρες πειραματικών δεδομένων για Ahmed Body 35 μοιρών

Να σημειωθεί ότι οι συντεταγμένες των πειραματικών δεδομένων και των αντίστοιχων του FLUENT είναι διαφορετικές και χρειάστηκαν να μετατραπούν για τις ανάγκες των συγκρίσεων. Αυτό συνέβει διότι τα πειραματικά δεδομένα δεν υπήρχαν από την αρχή της διπλωματικής εργασίας οπότε η γεωμετρία και το πλέγμα δημιουργήθηκαν νωρίτερα.

Πιο συγκεκριμένα ισχύει ότι:

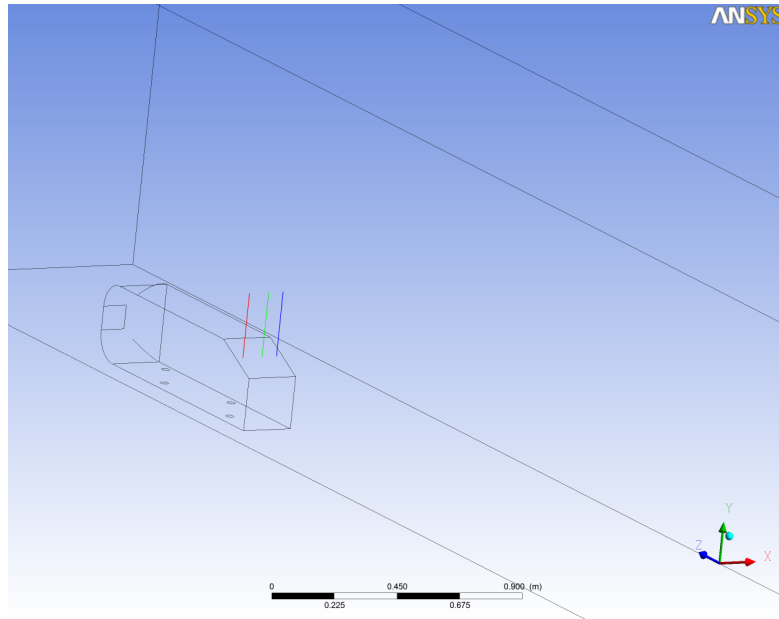
$$x_exp = -z_flu$$

$$y_exp = x_flu$$

$$z_exp = y_flu$$

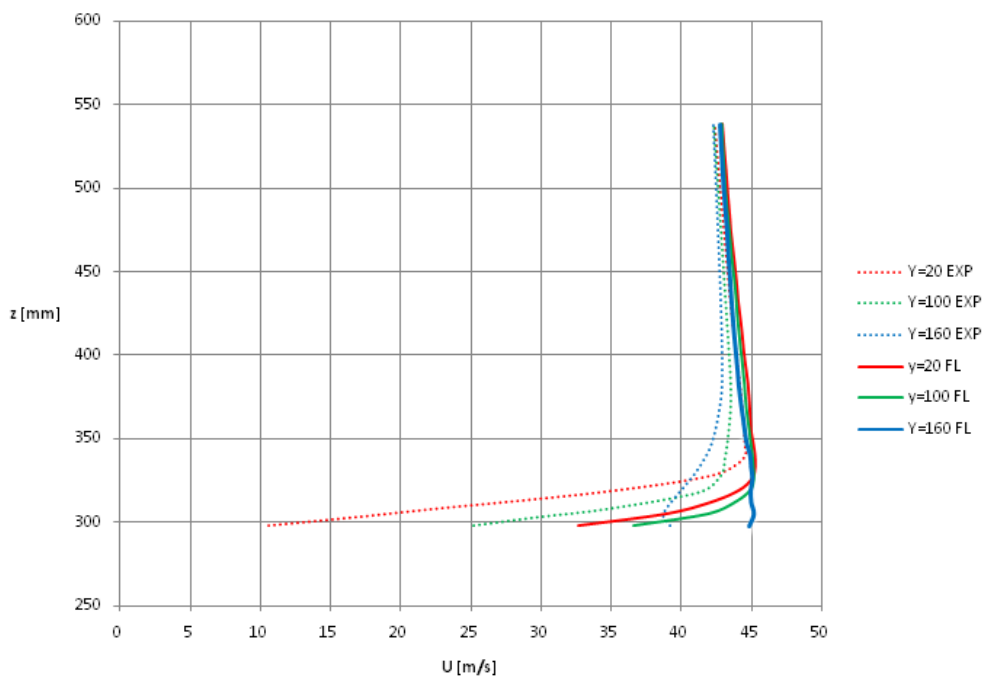
Δηλαδή ο X άξονας του FLUENT αντιστοιχεί στον Y των πειραματικών, ο Y άξονας του FLUENT αντιστοιχεί στον Z των πειραματικών και τέλος ο Z άξονας του FLUENT αντιστοιχεί στον -X των πειραματικών.

Παρακάτω βλέπουμε ότι το X=-88 που απεικονίζεται και δείχνει το σημείο στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι αισθητήρες (επάνω στον άξονα Z του FLUENT). Αντίστοιχα τα πειραματικά Y=20, Y=100 και Y=160μm αντιστοιχούν στον αρνητικό άξονα X του FLUENT.



Σχήμα 5.26: Αισθητήρες στην περιοχή σύγκρισης Ahmed Body 25 και 35 μοιρών

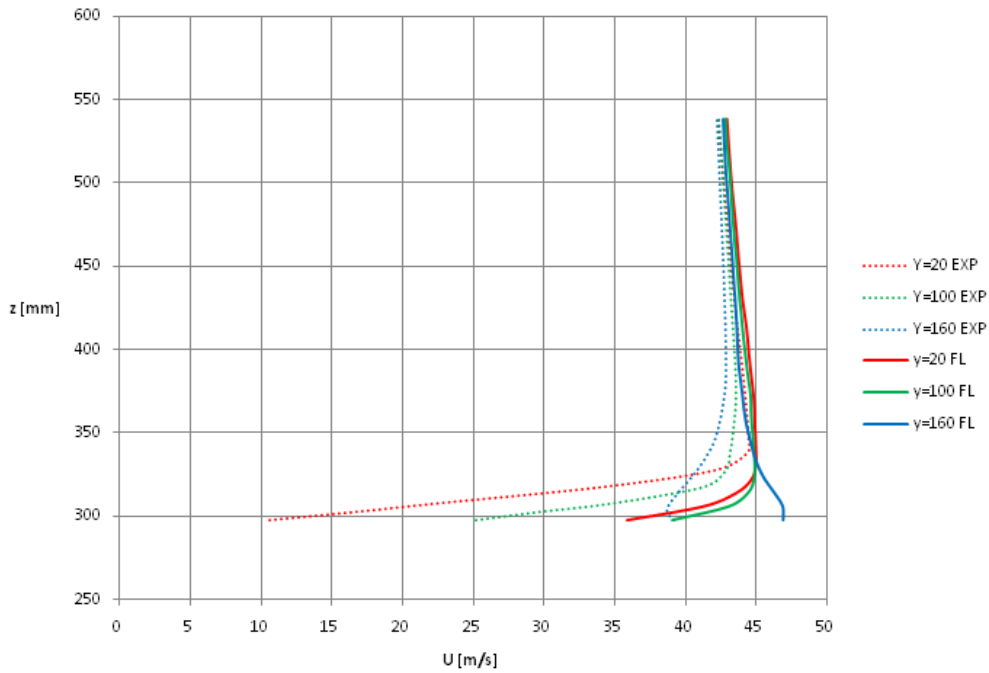
**Προφίλ ταχύτητας 25°
2 εκ κελιά
X=-88**



Σχήμα 5.27: Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 2 εκ. κελιά

Για την πιο απλή περίπτωση, αυτή των 25 μοιρών και για 2 εκατομμύρια κελιά παρατηρείται ότι τα πειραματικά δεδομένα του FLUENT για $\Upsilon=160\mu\text{m}$ δεν δείχνουν να ακολουθούν την κλίση όπως συμβαίνει στα υπόλοιπα. Γενικά όμως, τα αποτελέσματα που συγκρίνονται είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.

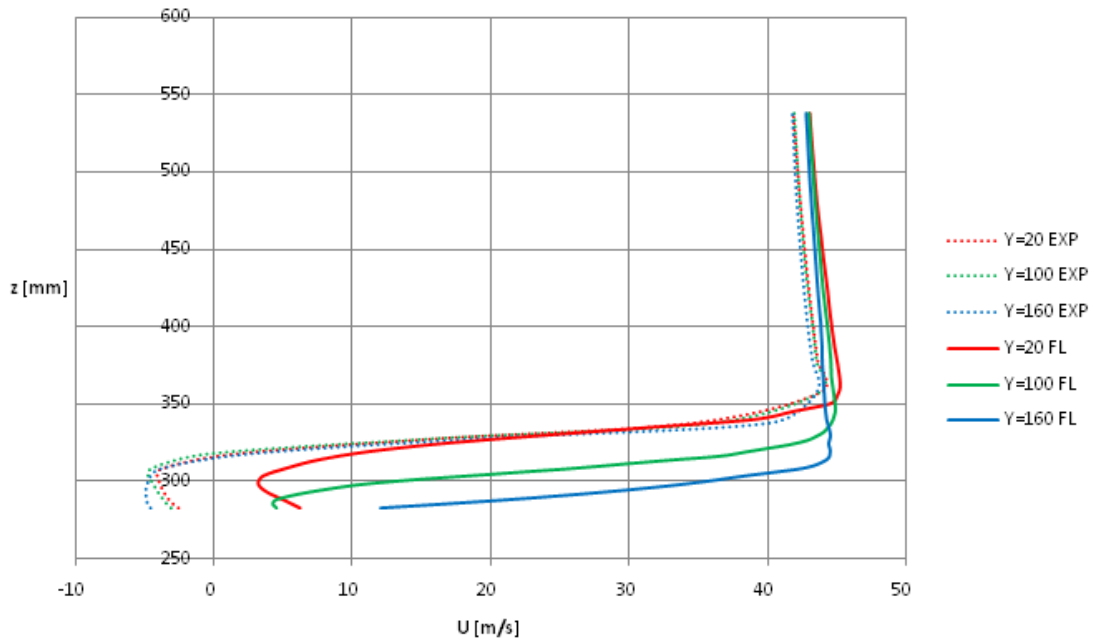
Προφίλ ταχύτητας 25°
3.6 εκ κελιά
X=-88



Σχήμα 5.28: Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

Για τις 25 μοίρες και 3.6 εκατομμύρια κελιά έχουμε την εξής ανάλυση. Παρατηρούνται κάποιες ανωμαλίες στην κλίση των πειραματικών και του FLUENT για το ίδιο ακριβώς σημείο, $\Upsilon=160\mu\text{m}$. Παρόλα αυτά τα υπόλοιπα δεδομένα εμφανίζονται να είναι κοντινά στο μεγαλύτερο μέρος της πορείας τους.

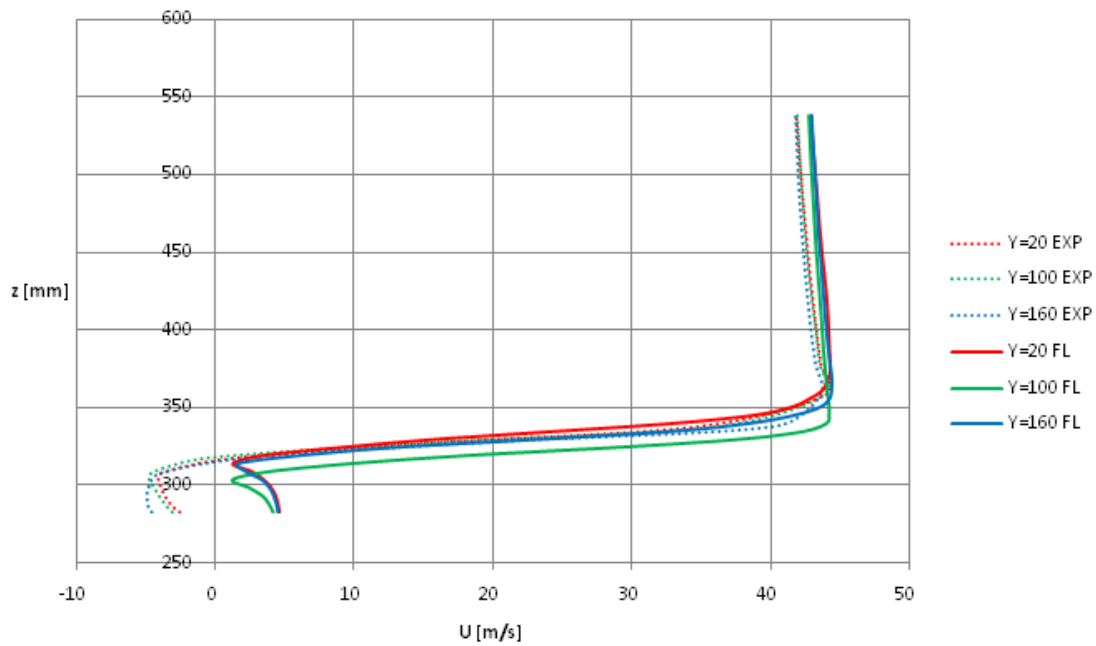
Προφίλ ταχύτητας 35°
2 εκ κελιά
X=-88



Σχήμα 5.29: Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 2 εκ. κελιά

Παρατηρείται ότι για 35 μοίρες και 2 εκατομμύρια κελιά, οι μετρήσεις έχουν μια μικρή απόσταση μεταξύ τους όμως ακολουθούν την ίδια κλίση και τείνουν προς το ίδιο σημείο. Όσο μετακινούμαστε κατά Y παρατηρούμε ότι τα δεδομένα ελαφρώς απομακρύνονται.

Προφίλ ταχύτητας 35°
3.6 εκ κελιά
X=-88

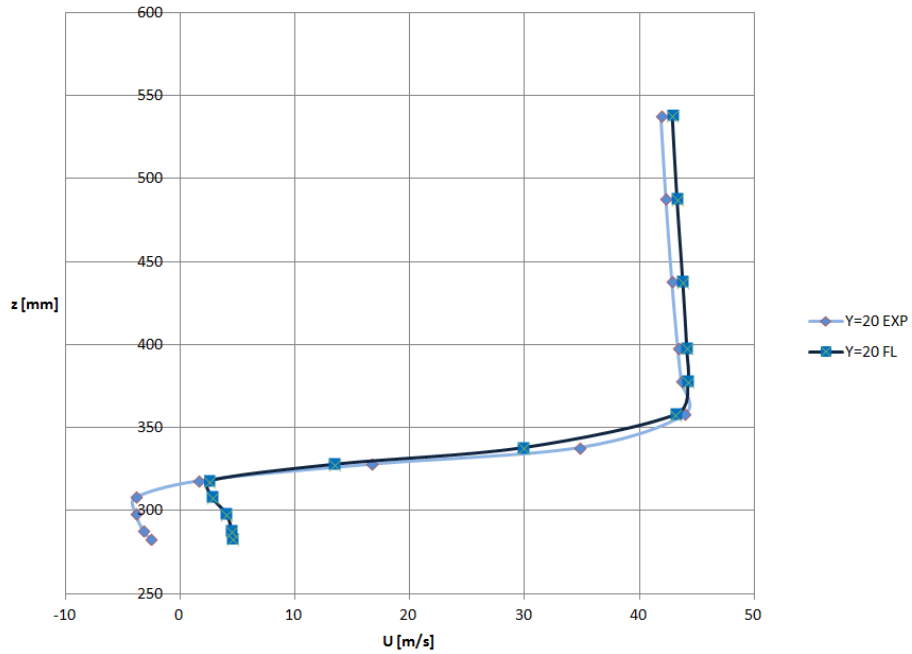


Σχήμα 5.30: Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

Το προφίλ ταχύτητας στις 35 μοίρες και 3.6 εκατομμύρια κελιά μας απεικονίζει πολύ καλύτερα την σύγκριση πειραματικών και FLUENT δεδομένων. Τα δεδομένα στο FLUENT όμως φαίνονται να βιάζονται να πάρουν κλίση. Παρόλα αυτά είναι δεδομένα που ταυτίζονται περισσότερο από τα υπόλοιπα.

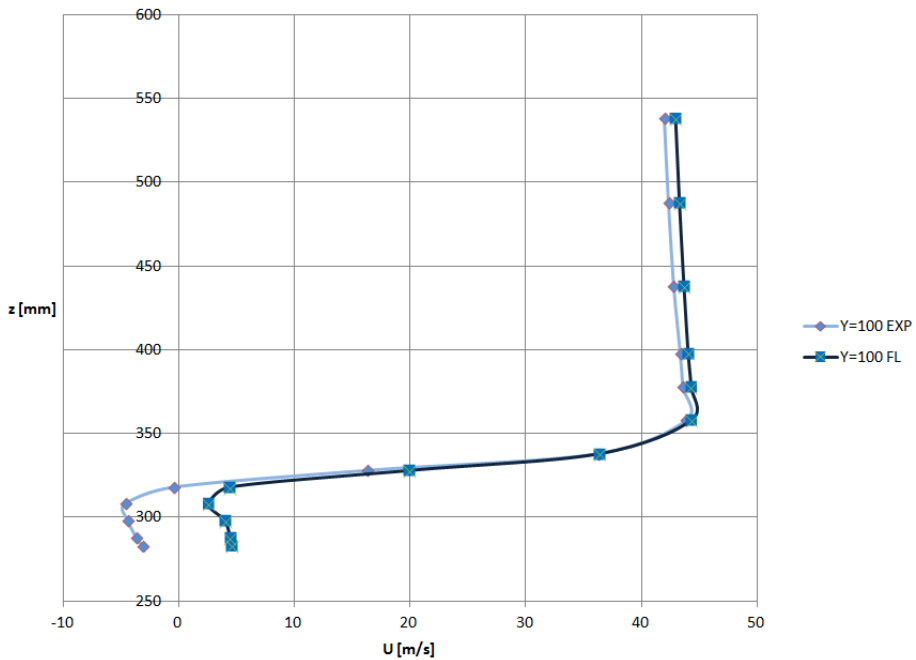
Αναλυτικότερα έχουμε ξεχωριστά:

Προφίλ ταχύτητας 35°
3.6 εκ κελιά
Χ=-88 mm



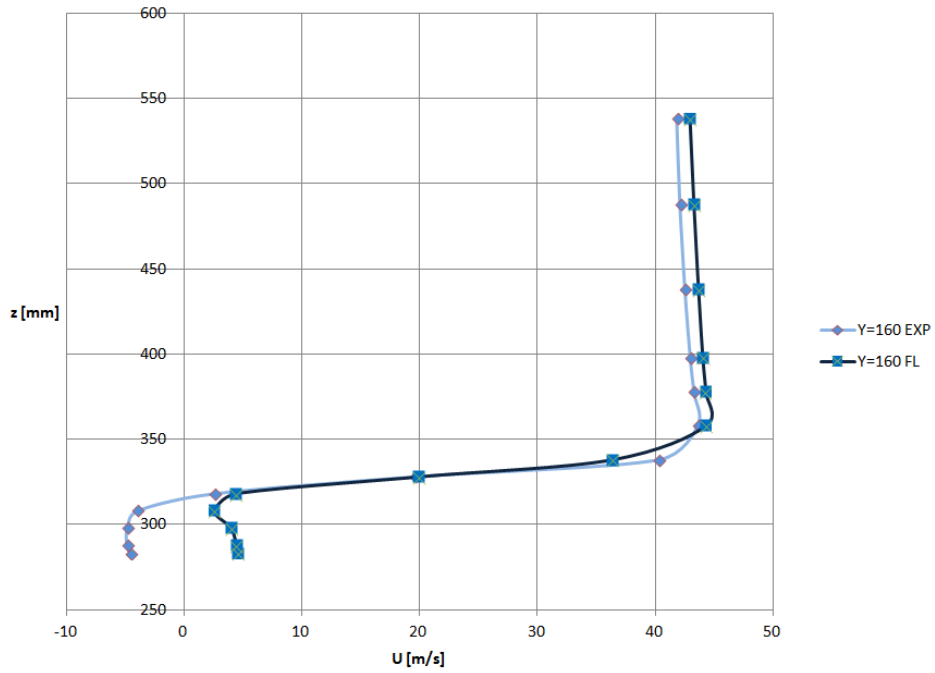
Σχήμα 5.31: Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

Προφίλ ταχύτητας 35°
3.6 εκ κελιά
Χ=-88 mm



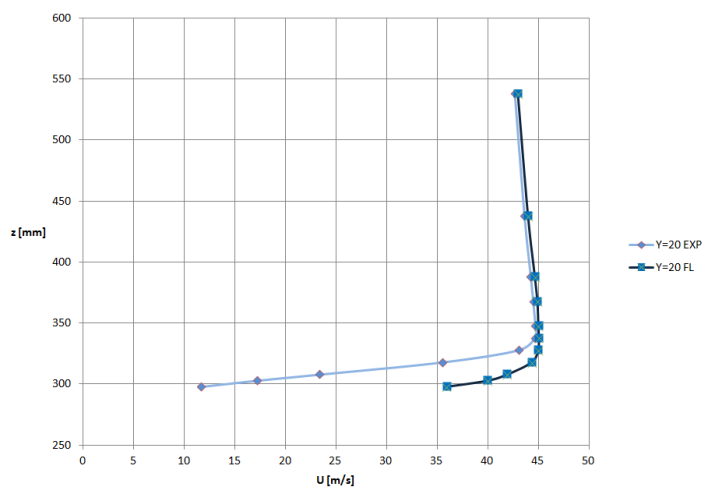
Σχήμα 5.32: Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

Προφίλ ταχύτητας 35°
 3.6 εκ κελιά
 $\chi = 88 \text{ mm}$



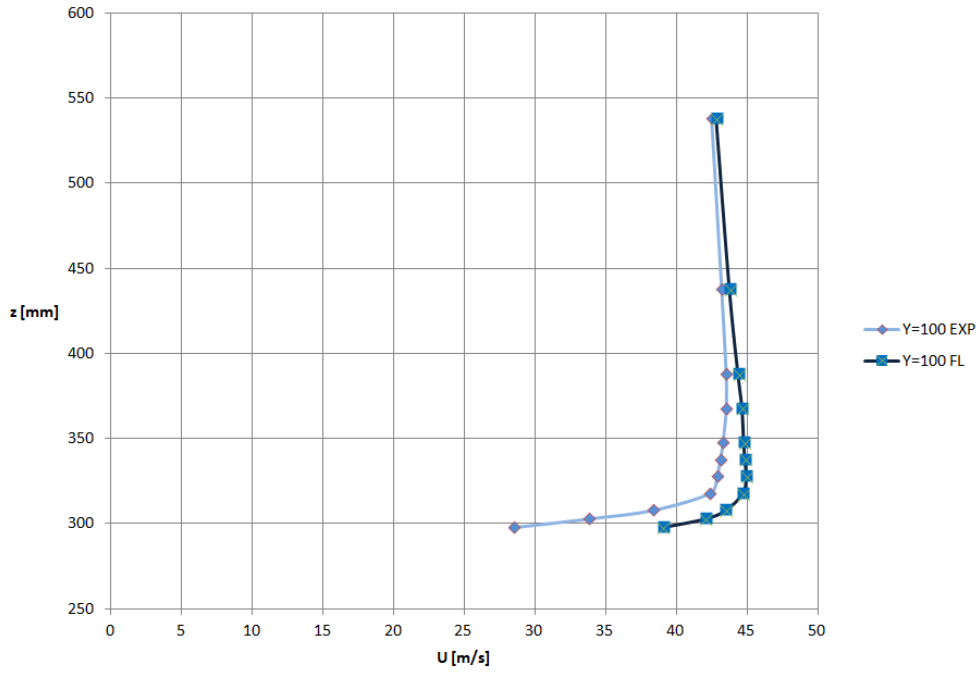
Σχήμα 5.33: Προφίλ ταχύτητας 35 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

Προφίλ ταχύτητας 25°
 3.6 εκ κελιά
 $\chi = 88 \text{ mm}$



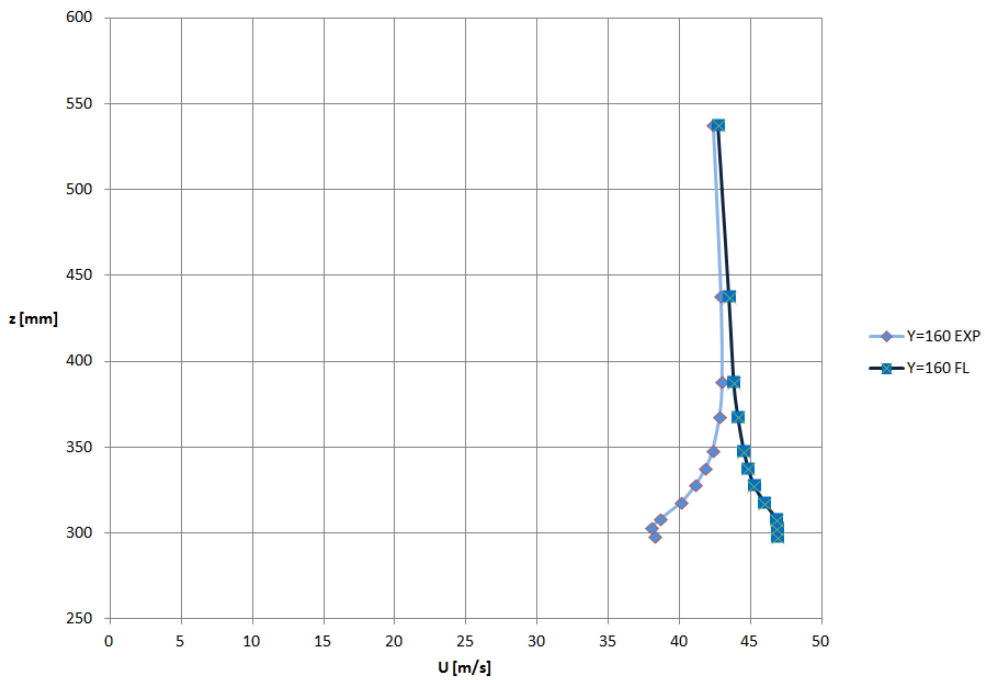
Σχήμα 5.34: Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

Προφίλ ταχύτητας 25°
3.6 εκ κελιά
X=80mm



Σχήμα 5.35: Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

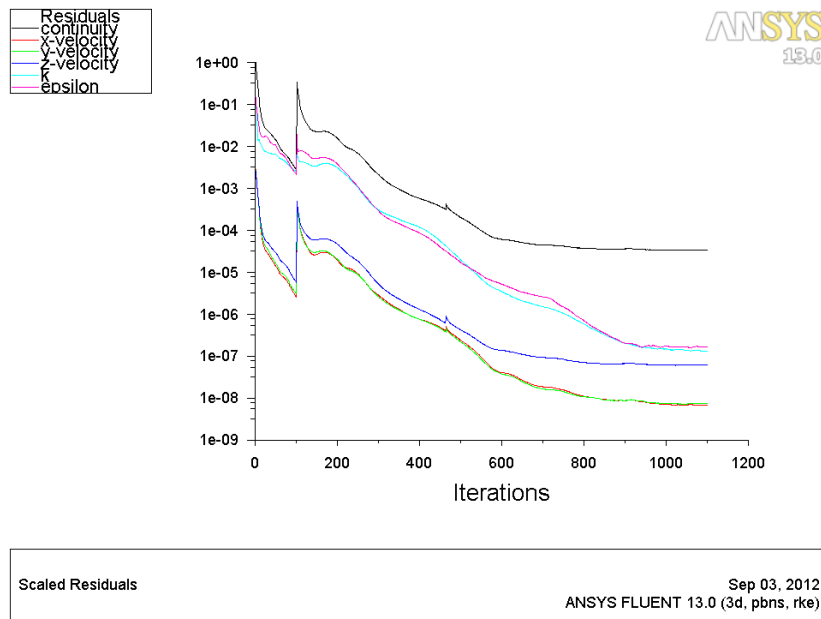
Προφίλ ταχύτητας 25°
3.6 εκ κελιά
X=-88 mm



Σχήμα 5.36: Προφίλ ταχύτητας 25 μοιρών για 3.6 εκ. κελιά

5.7.2 25 Μοίρες 2 εκ. κελιά

Οι εικόνες που μας δείχνουν τα υπόλοιπα έχουν ιδιαίτερη ανάλυση. Οι εξισώσεις που έχουμε τη δυνατότητα να παρακολουθούμε την εξέλιξη τους ενώ επιλύονται είναι οι συνέχειας, ορμής, το k και το ϵ . Στον οριζόντιο άξονα παρατηρούμε τις επαναλήψεις που χρειάστηκε η προσομοίωση για να συγκλίνει.

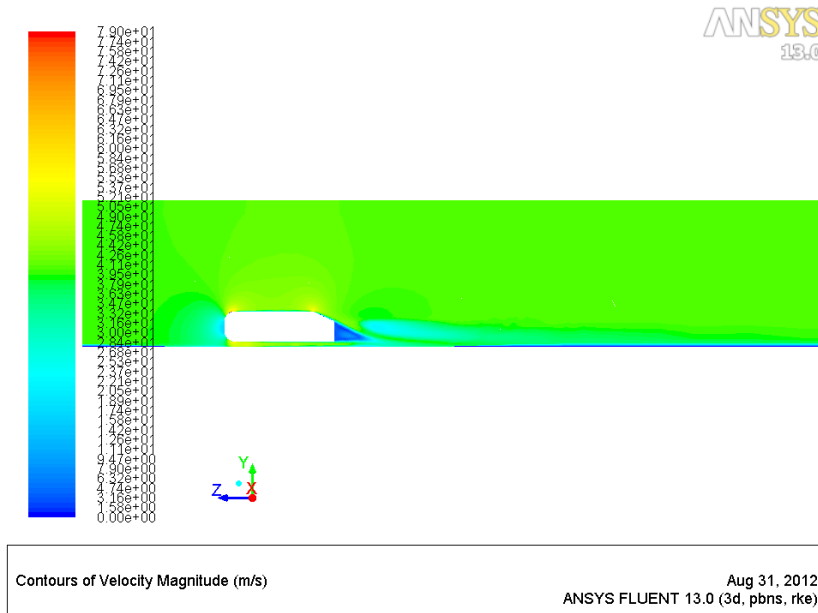


Σχήμα 5.37: Υπόλοιπα

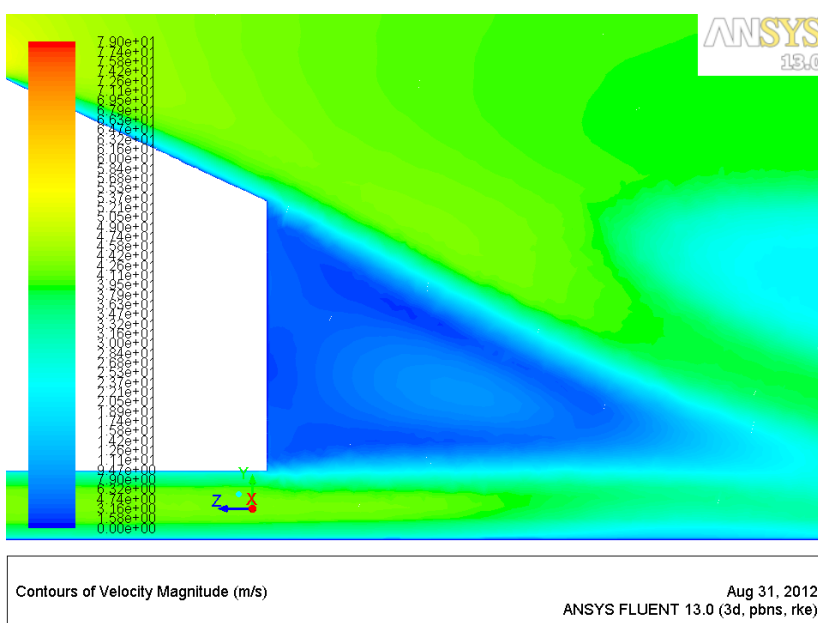
Σαν μεθοδολογία ακολουθήθηκε η επιλογή πρώτης τάξης Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια, ορμή και turbulent dissipation ratio για μόνο 100 επαναλήψεις αρχικά και στη συνέχεια δεύτερης τάξης όπου και εμφανίζεται αυτή η ανωμαλία στα σχήματα (πηδηματάκι). Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε σταθερότητα (δίνουμε βάση) και αποφεύγουμε τη περίπτωση να αποτύχει η προσομοίωση από την αρχή των επαναλήψεων. Η ακρίβεια δεν επιλέχτηκε όπως γίνεται συνήθως. Σε περίπτωση που επιλεγεί ακρίβεια 10^{-4} το πρόγραμμα σταματάει απευθείας τις επαναλήψεις μόλις τα υπόλοιπα φτάσουν στο 10^{-4} . Με την αποεπιλογή της ακρίβειας υπάρχει μεγαλύτερη ελευθερία στη σύγκλιση και στις επαναλήψεις αφού επιλέγουμε εμείς τον αριθμό τους και κρίνουμε την πρόοδο (ανάλογα με την πορεία των διαγραμμάτων) και με ίσως μεγαλύτερη ακόμη ακρίβεια κατ' επιλογή. Στο επιθυμητό σημείο, όπου οι πορείες των υπόλοιπα μας ικανοποιεί τερματίζουμε την προσομοίωση.

Στην εικόνα παρατηρούμε τα σημεία που αναλύθηκαν και παραπάνω. Είναι ξεκάθαρος ο αριθμός των επαναλήψεων (1100) και το σημείο στο οποίο συνέκλινε.

Η ροή αναμένεται να αποκολληθεί από το σώμα του οχήματος, παράγοντας στροβιλισμούς στο πίσω μέρος. Καθώς οι προσομοιώσεις είναι σταθερής κατάστασης, αυτό αναμένεται να είναι ένας λόγος για την ανώμαλη συμπεριφορά σύγκλισης στα υπόλοιπα στην περιοχή των 1000-1300 επαναλήψεων.

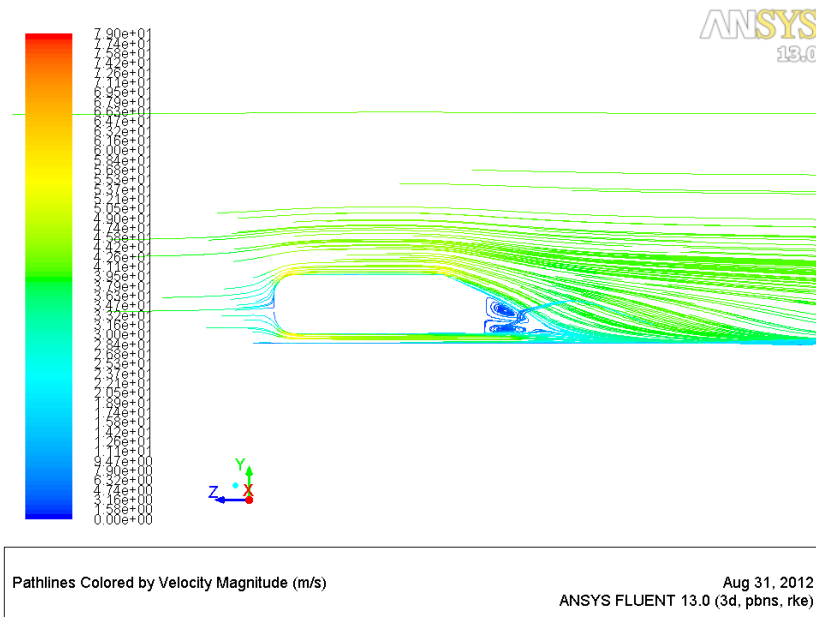


Σχήμα 5.38: Κατανομή ταχύτητας

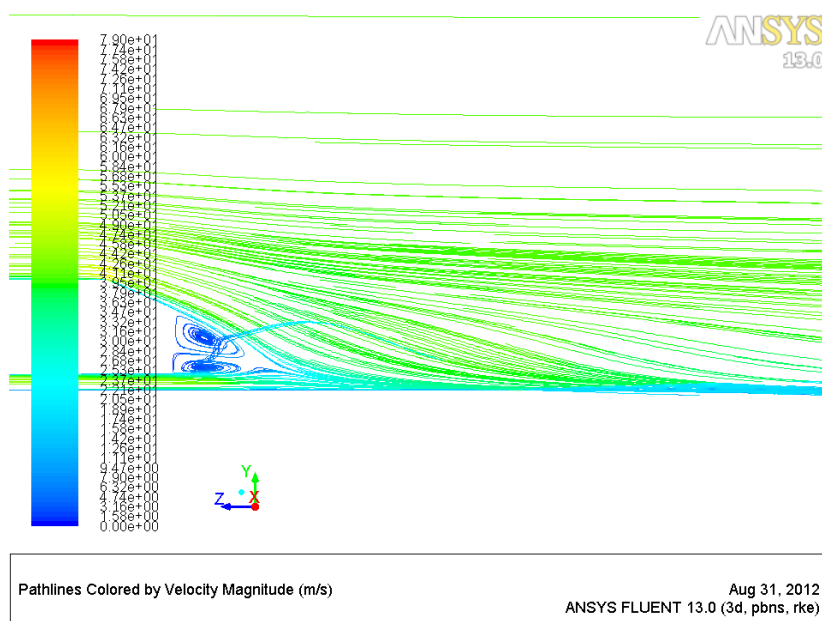


Σχήμα 5.39: Κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος

Στα παραπάνω σχήματα απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας για τη περίπτωση 25 μοιρών και 2 εκατομμυρίων κελιών . Παρατηρείται ότι στο προστινό μέρος η ταχύτητα είναι πολύ χαμηλή και ότι στο ύψος που ξεκινάει η καμπύλη ξεκινάει η επιτάχυνση της ροής, όπως και στην αρχή την πίσω κλίσης του μοντέλου. Επίσης στο πίσω μέρος φαίνεται η απουσία ταχύτητας. Δεν παρατηρείται κάποιο άλλο αξιοσημείωτο φαινόμενο.

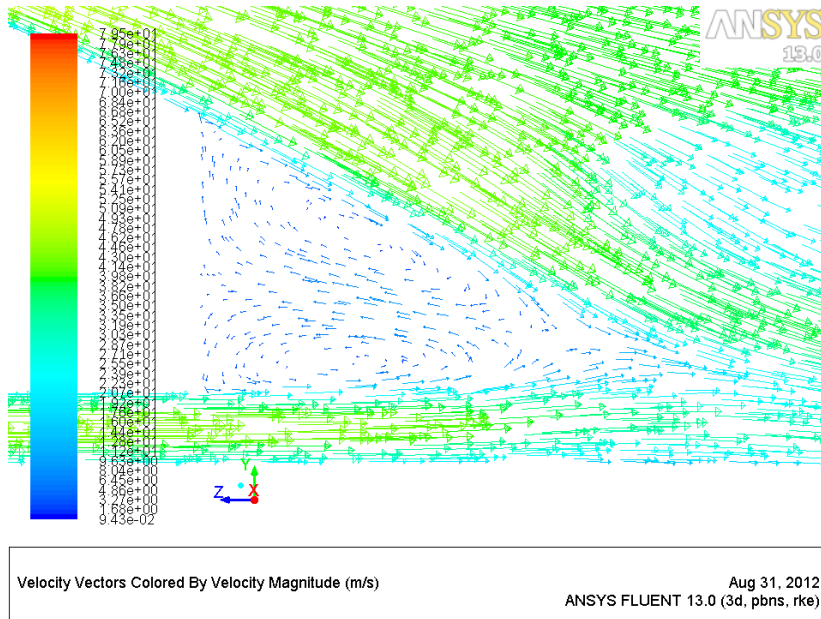


Σχήμα 5.40: Γραμμές ροής



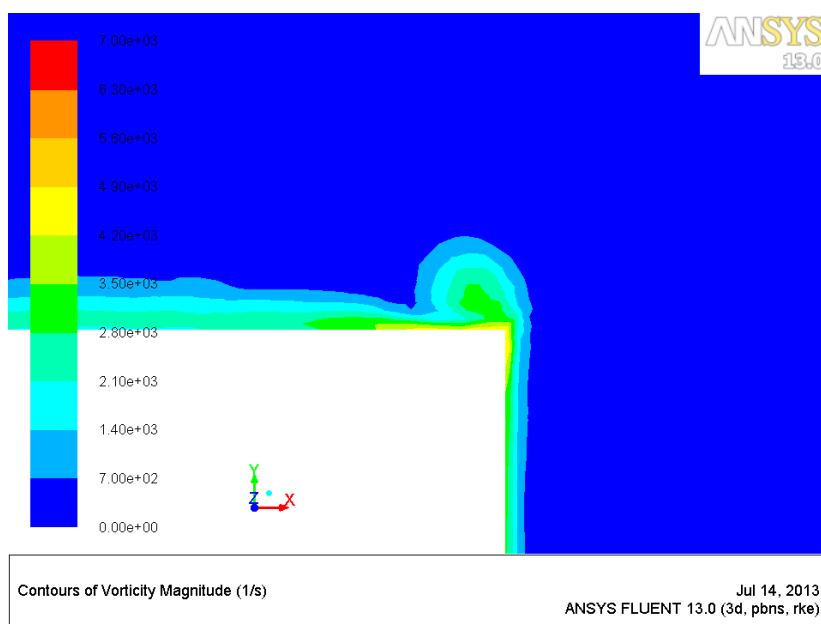
Σχήμα 5.41: Γραμμές ροής στο πίσω μέρος

Στις εικόνες απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω και πίσω από το Ahmed body. Στο πίσω μέρος του φαίνονται οι δίνες που σχηματίζονται.

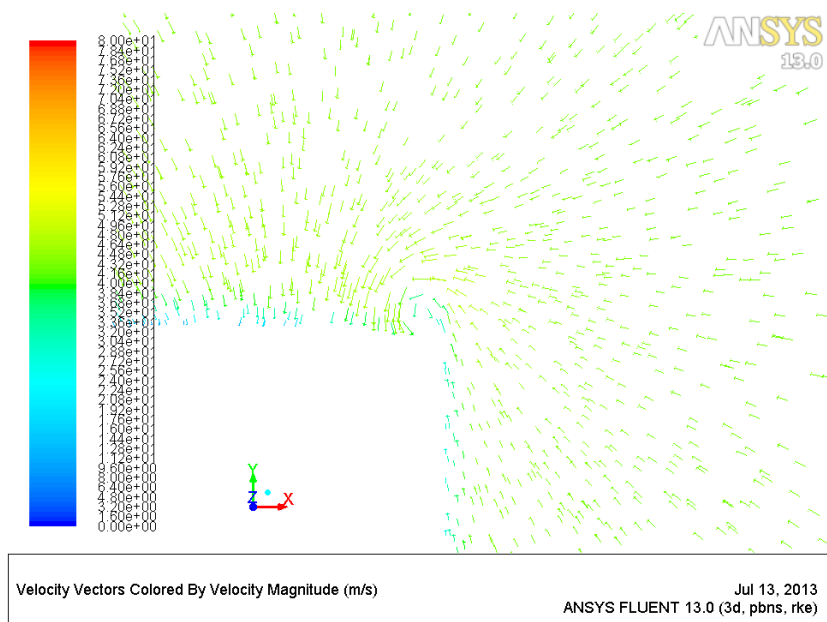


Σχήμα 5.42: Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος

Το διανυσματικό πεδίο αποκαλύπτει το ίδιο φαινόμενο στο πίσω μέρος του μοντέλου.

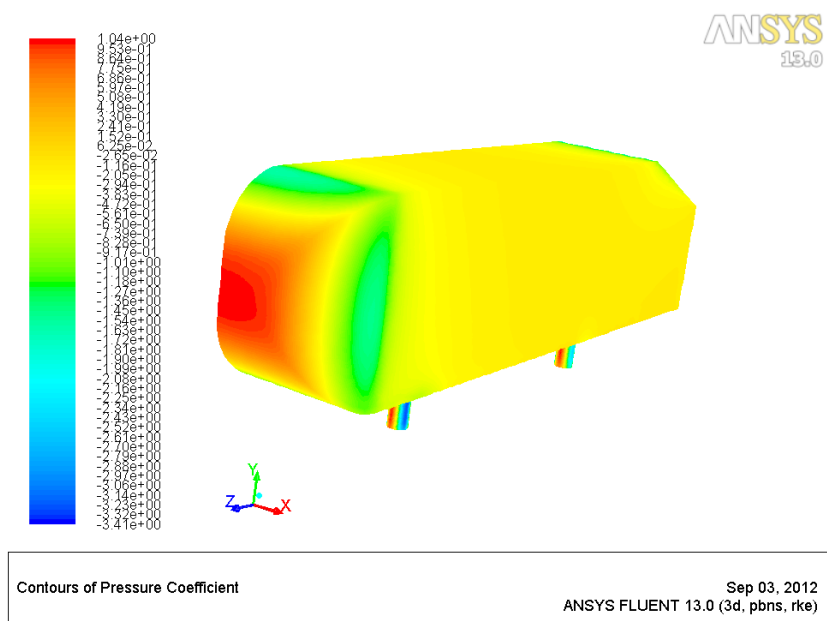


Σχήμα 5.43: Στροβιλότητα



Σχήμα 5.44: Διάγραμμα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης

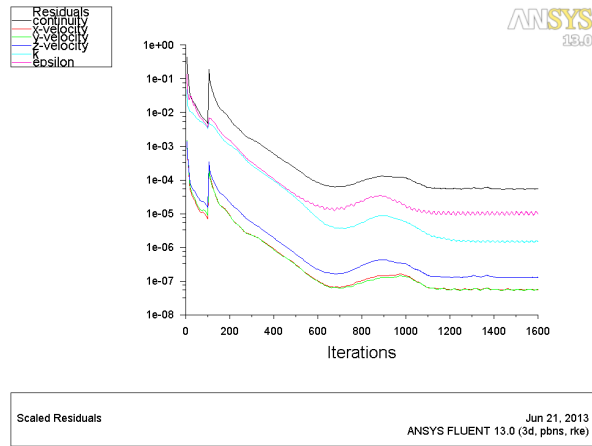
Στην εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα ο σχηματισμός μιας δίνης. Το επίπεδο που απεικονίζεται βρίσκεται στο μέσο της πίσω κλίσης του Ahmed Body.



Σχήμα 5.45: Συντελεστής Πίεσης

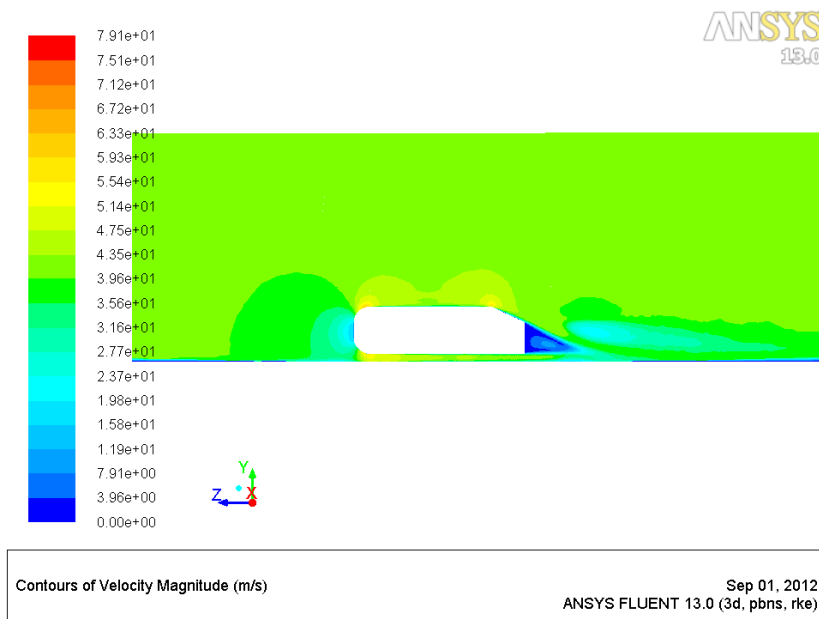
Όπως ήταν λογικό, εμφανίζεται μεγάλη πίεση στο σημείο που περιμένουμε, στο κέντρο. Εκεί όπου η ροή επιταχύνεται όμως, ο συντελεστής C_p μειώνεται.

5.7.3 25 Μοίρες 3.6 εκ. κελιά

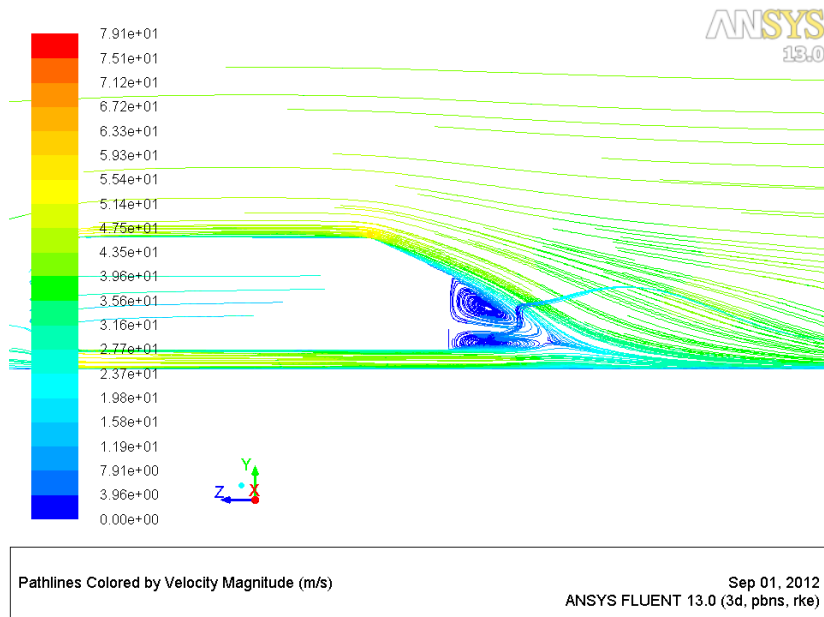


Σχήμα 5.46: Υπόλοιπα

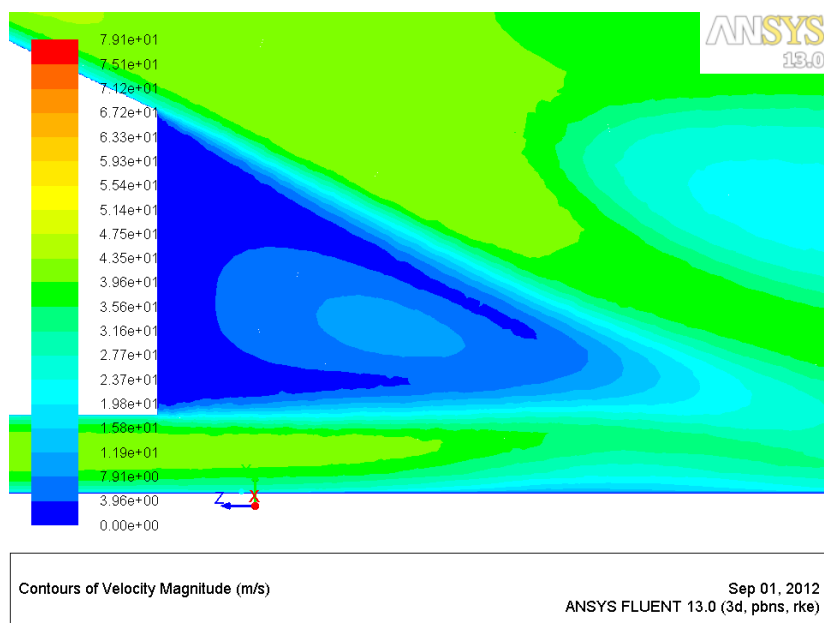
Εδώ παρατηρούμε ότι ο αριθμός των επαναλήψεων είναι εμφανέστατα μεγαλύτερος. Το μοντέλο άργησε να συγκλίνει σε αυτήν την περίπτωση (1600 επαναλήψεις)



Σχήμα 5.47: Κατανομή ταχύτητας



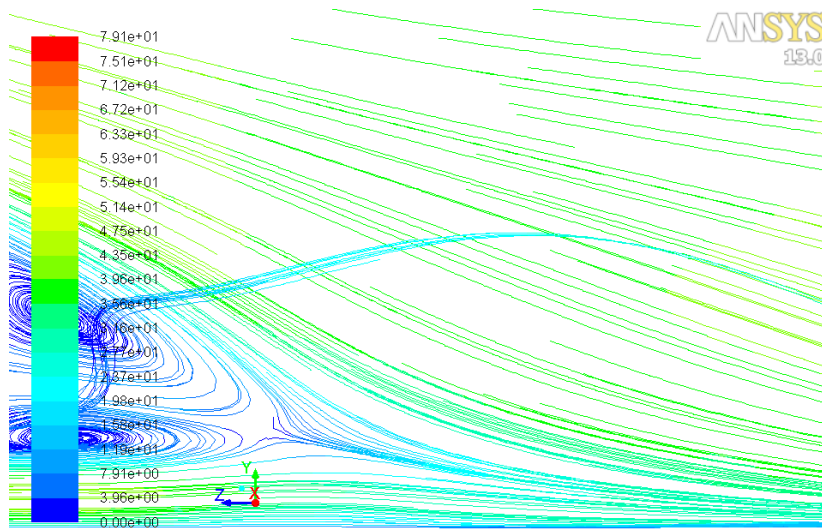
Σχήμα 5.49: Γραμμές ροής



Σχήμα 5.48: Κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος

Στην εικόνα απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας. Παρατηρείται ότι εμφανίζονται μεγαλύτερες περιοχές επιτάχυνσης ροής και είναι εμφανής μία βελτίωση στην εικόνα της κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος.

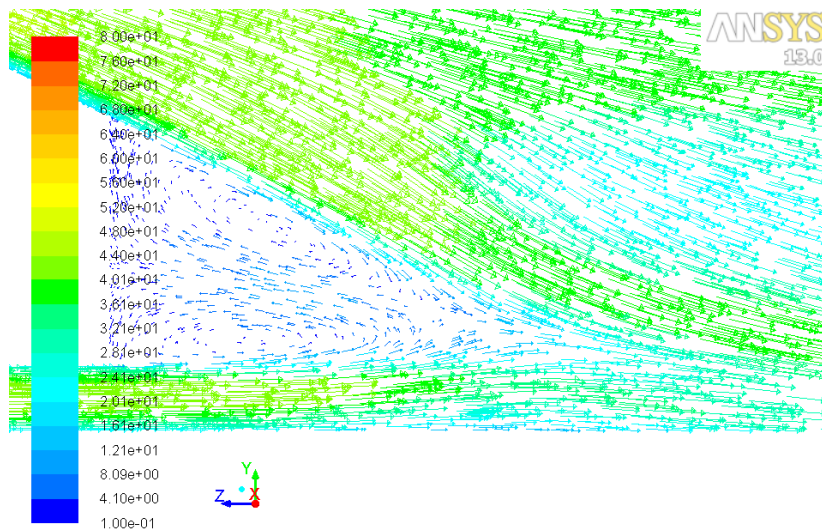
Στην εικόνα απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές με περισσότερη λεπτομέρεια γύρω και πίσω από το Ahmed body. Ενώ στο πίσω μέρος του φαίνονται οι δίνες που σχηματίζονται.



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Sep 01, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

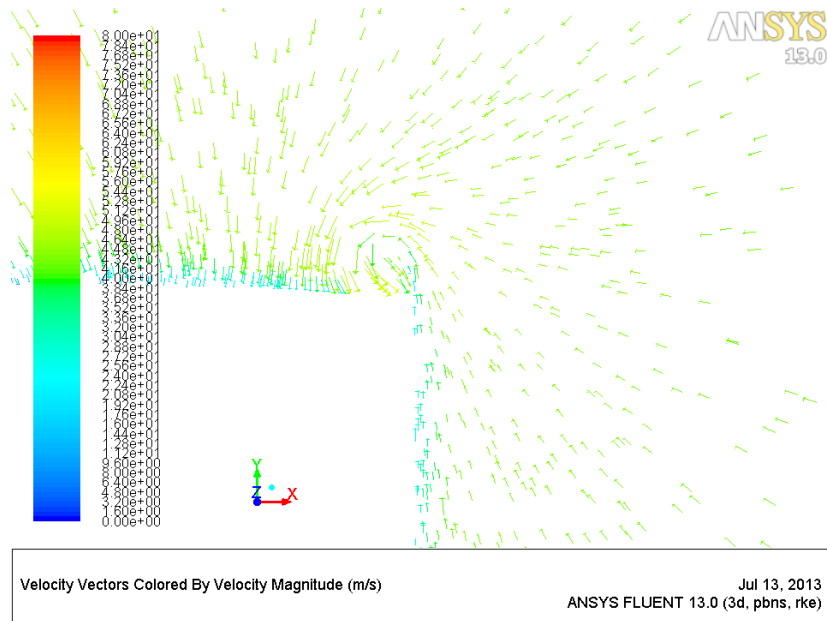
Σχήμα 5.50: Γραμμές ροής στο πίσω μέρος



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

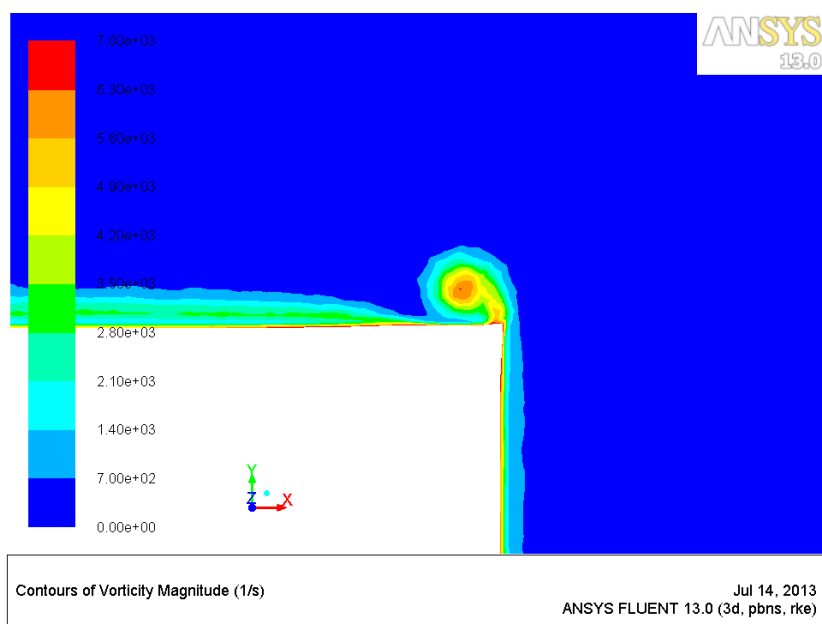
Sep 01, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, rke)

Σχήμα 5.51: Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος



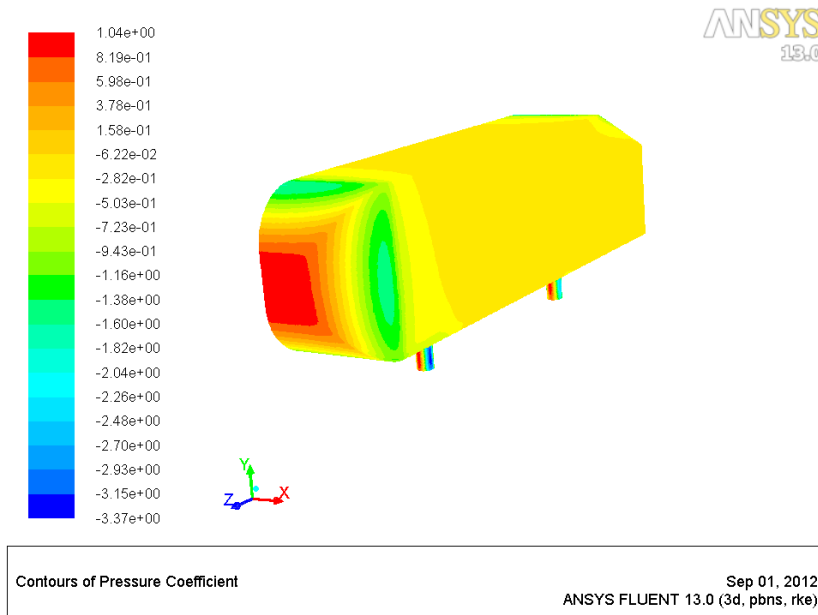
Σχήμα 5.53: Διανύσματα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης

Το διανυσματικό πεδίο μας αποκαλύπτει το ίδιο φαινόμενο με πριν στο πίσω μέρος του μοντέλου. Παρατηρούνται περισσότερα Διανύσματα που διαμορφώνουν τις πισινές δίνες .



Σχήμα 5.52: Στροβιλότητα

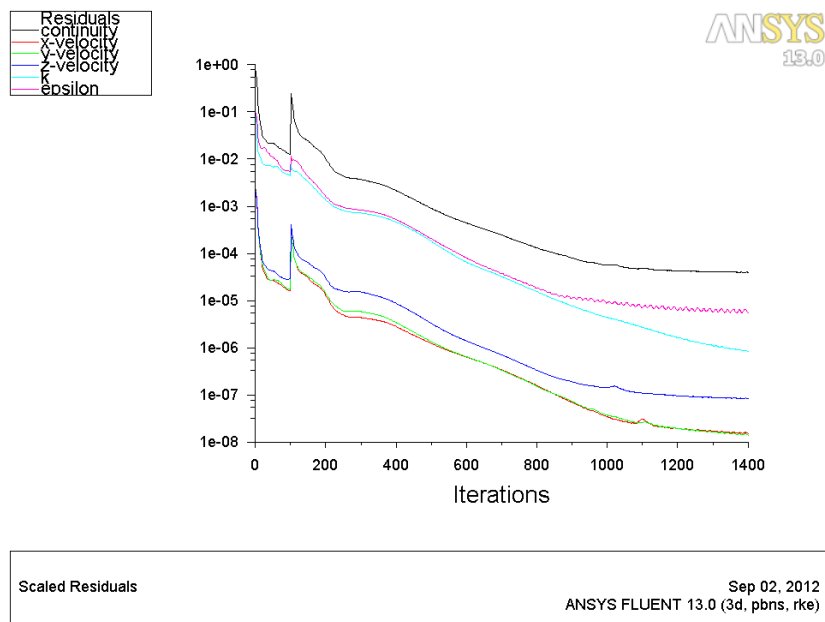
Ο σχηματισμός της δίνης στην περίπτωση των 25 μοιρών και 3,6 εκατομμυρίων κελιών. Το επίπεδο που απεικονίζεται βρίσκεται στο μέσο της πίσω κλίσης του Ahmed Body.



Σχήμα 5.54: Κατανομή πίεσης

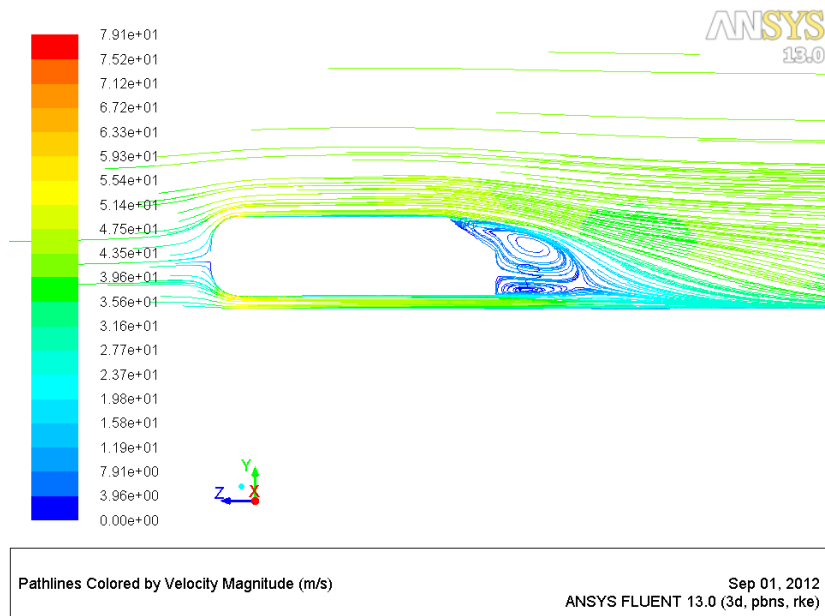
Εμφανίζεται μεγάλη πίεση στο κέντρο της όψης. Εκεί όπου η ροή επιταχύνεται όμως, ο συντελεστής C_p μειώνεται.

5.7.4 35 Μοίρες 2 εκ. κελιά



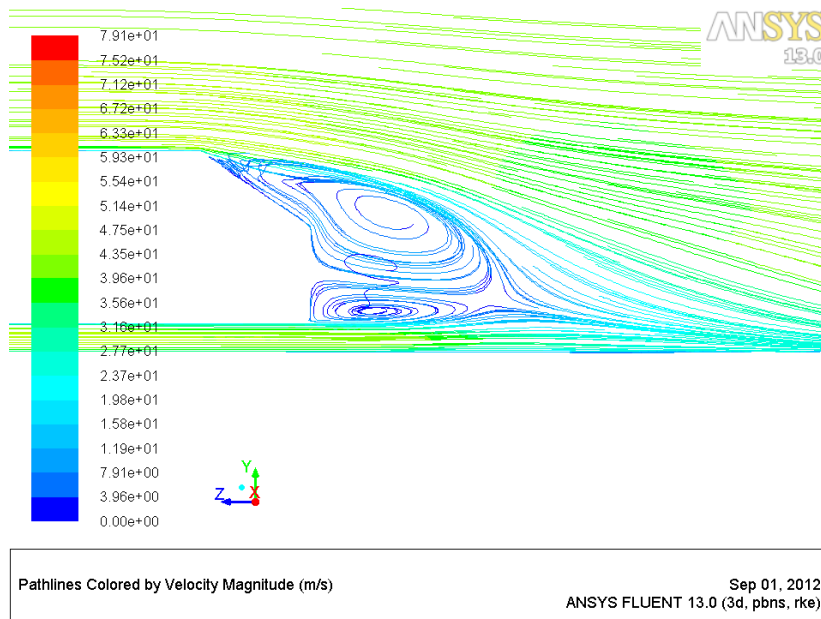
Σχήμα 5.55: Υπόλοιπα

Ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάστηκε για να συγκλίνει σε αυτήν την περίπτωση είναι 1400.



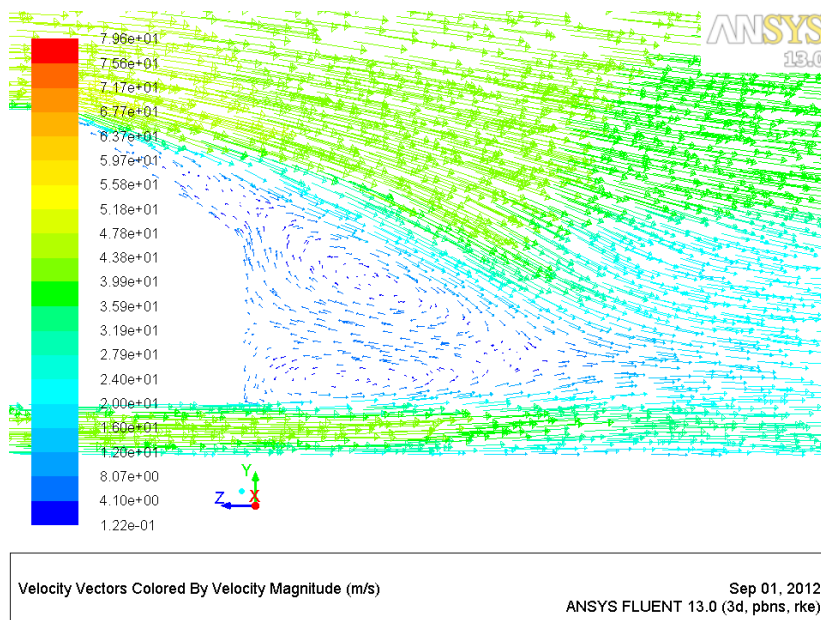
Σχήμα 5.56: Γραμμές ροής

Εντονότερες δίνες που οφείλονται στην μεγαλύτερη κλίση του μοντέλου στο πίσω μέρος του



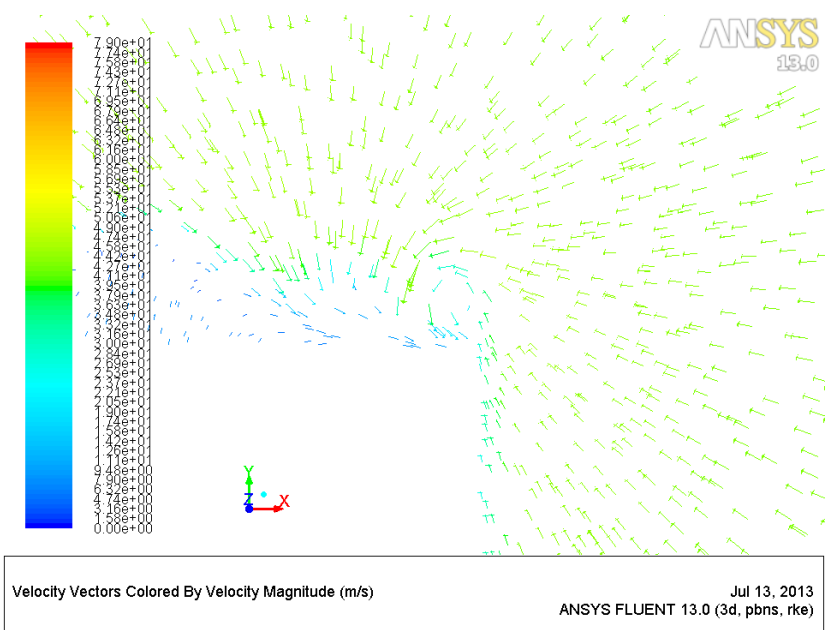
Σχήμα 5.57: Γραμμές ροής στο πίσω μέρος

Παρατηρούνται οι δίνες που σχηματίζονται με τη βοήθεια ροϊκών γραμμών γύρω και πίσω από το Ahmed body.

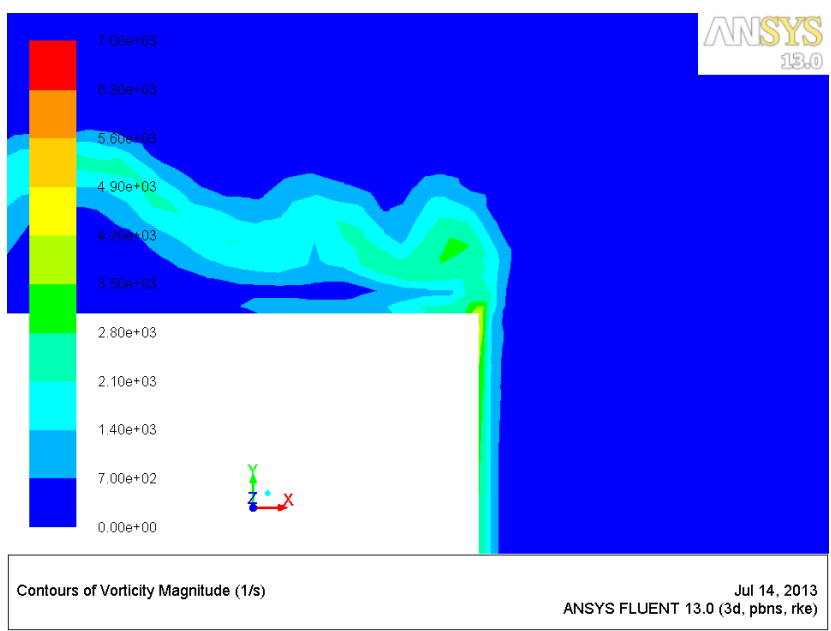


Σχήμα 5.58: Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος

Το διανυσματικό πεδίο μας αποκαλύπτει το ίδιο φαινόμενο στο πίσω μέρος του μοντέλου.

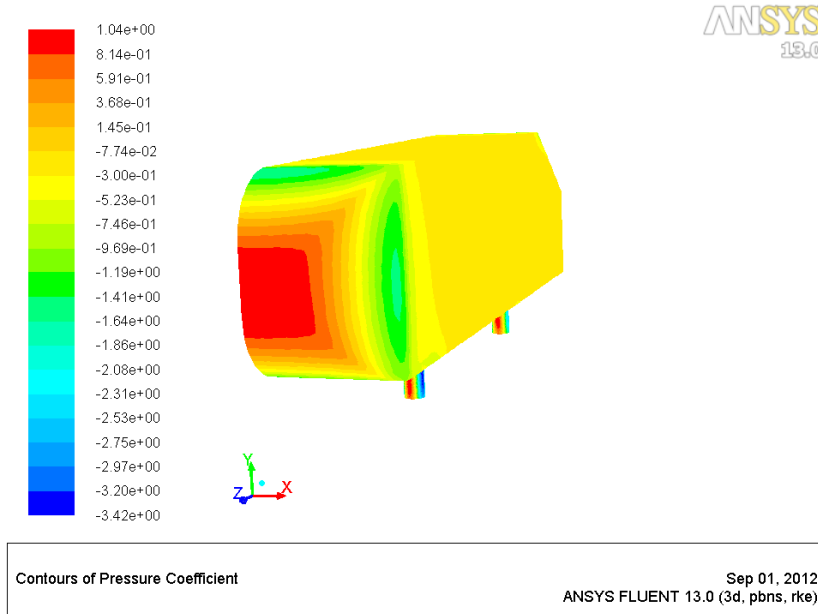


Σχήμα 5.60: Διανύσματα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης



Σχήμα 5.59: Στροβιλότητα

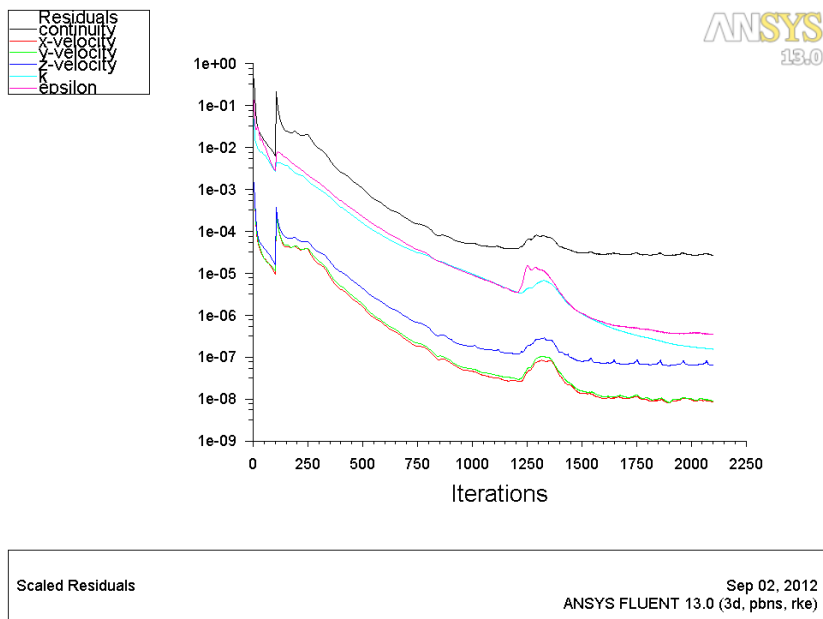
Ο σχηματισμός της δίνης σε μεγαλύτερο μέγεθος συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις των 25 μοιρών.



Σχήμα 5.61: Συντελεστής Πίεσης

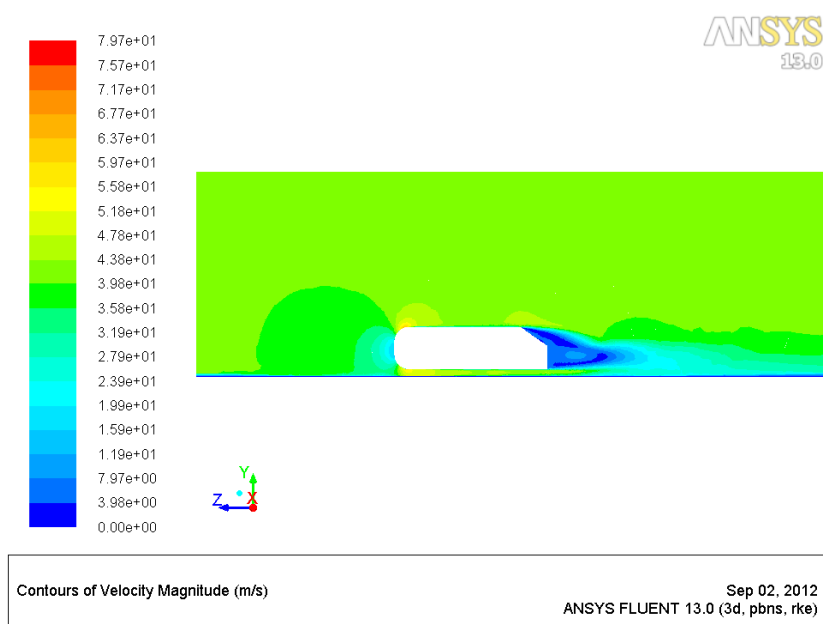
Εμφανίζεται η ίδια μεγάλη πίεση στο κέντρο της όψης. Σε εκείνο το σημείο όμως που η ροή επιταχύνεται, ο συντελεστής C_p μειώνεται. Δεν παρουσιάζονται διαφορές με τις άλλες περιπτώσεις.

5.7.5 35 Μοίρες 3.6 εκ. κελιά

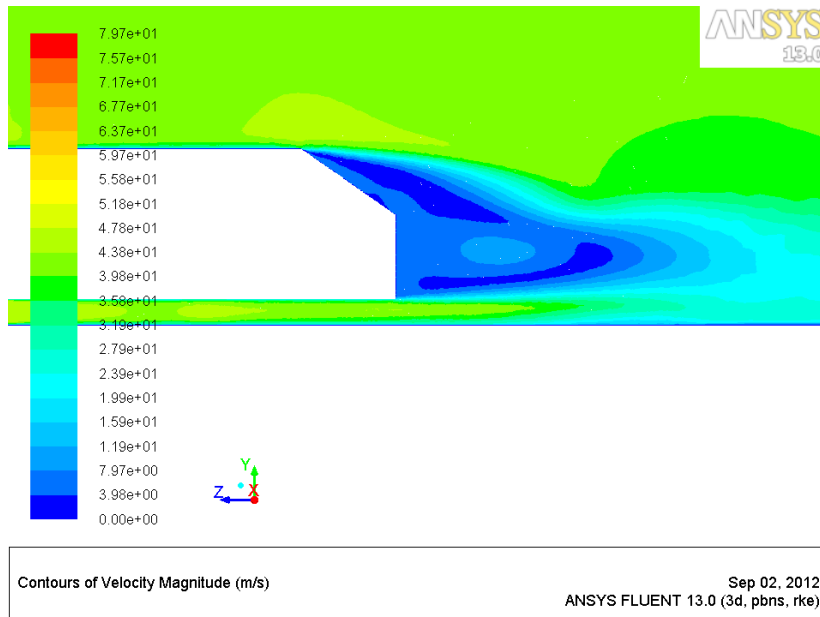


Σχήμα 5.62: Υπόλοιπα

Εδώ παρατηρούμε ότι ο αριθμός των επαναλήψεων αυξήθηκε πολύ. Το μοντέλο άργησε να συγκλίνει και σε αυτήν την περίπτωση χρειάστηκαν 2100 επαναλήψεις.

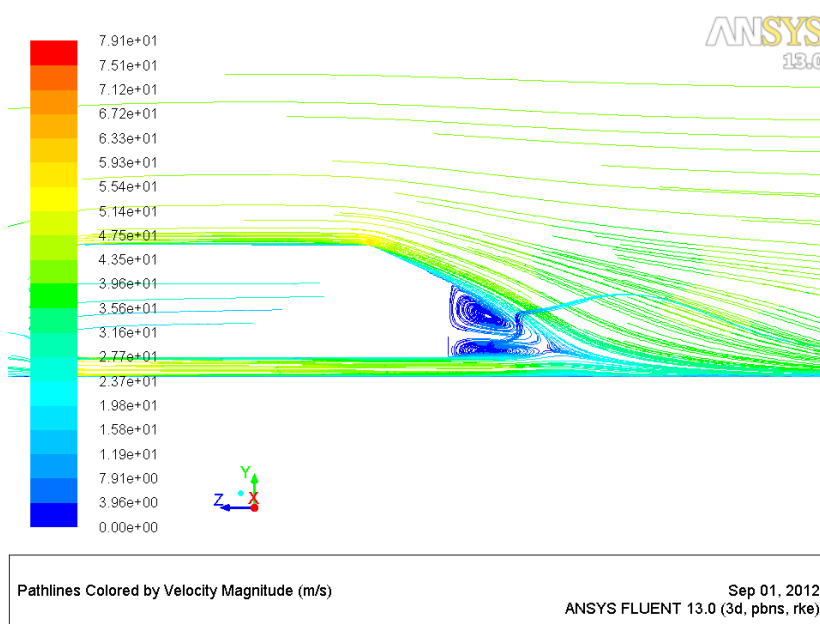


Σχήμα 5.63: Κατανομή ταχύτητας

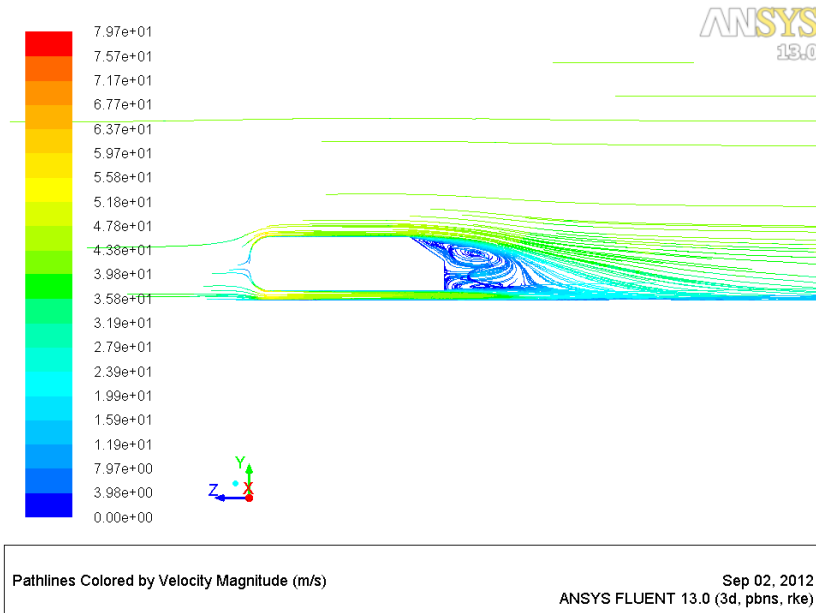


Σχήμα 5.64: Κατανομή ταχύτητας στο πίσω μέρος

Στην εικόνα απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας. Παρατηρείται ότι εμφανίζονται μεγαλύτερες περιοχές πλέον στο πίσω μέρος του μοντέλου για κλίση γωνίας 35 μοιρών.

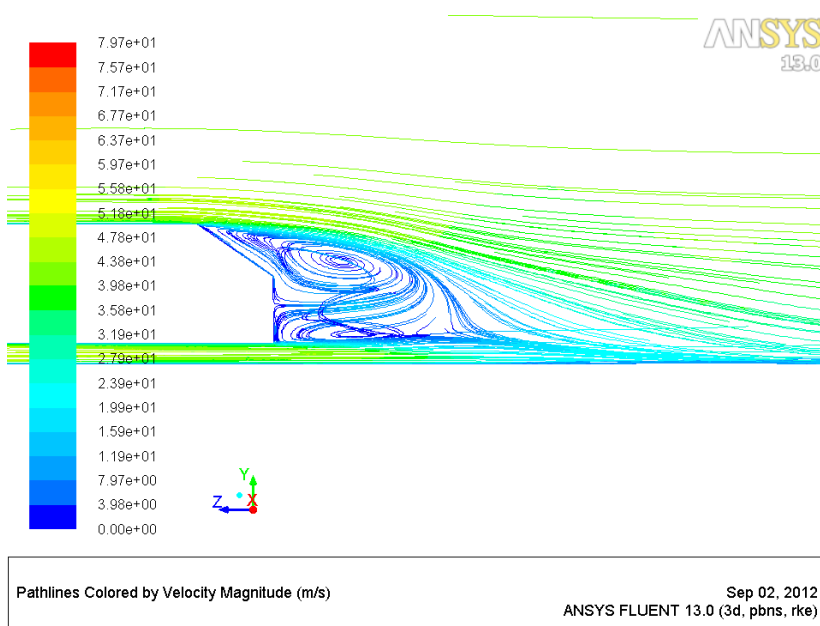


Σχήμα 5.65: Γραμμές ροής

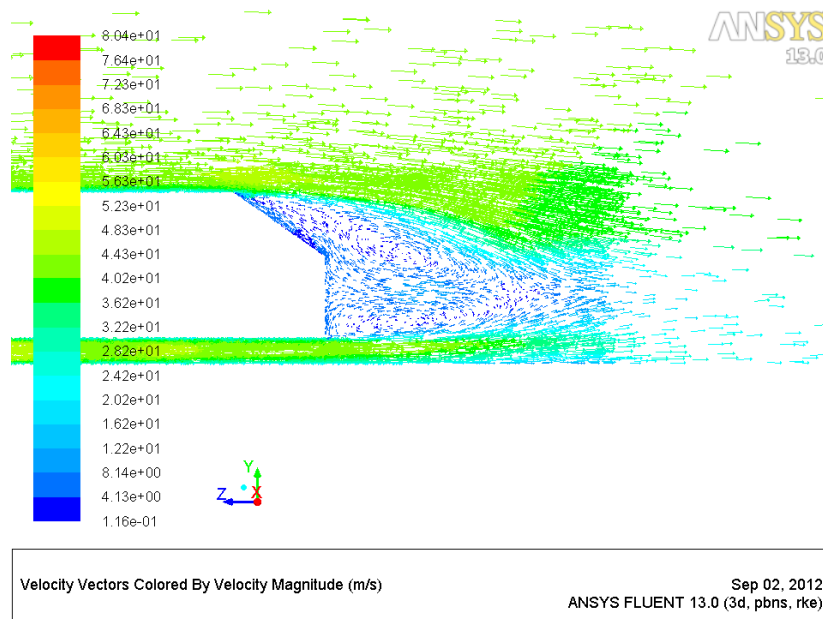


Σχήμα 5.66: Γραμμές ροής

Παρατηρούνται οι δίνες που σχηματίζονται γύρω και πίσω από το Ahmed body. Το πυκνότερο πλέγμα εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα στην περιοχή που εμφανίζονται οι δίνες.

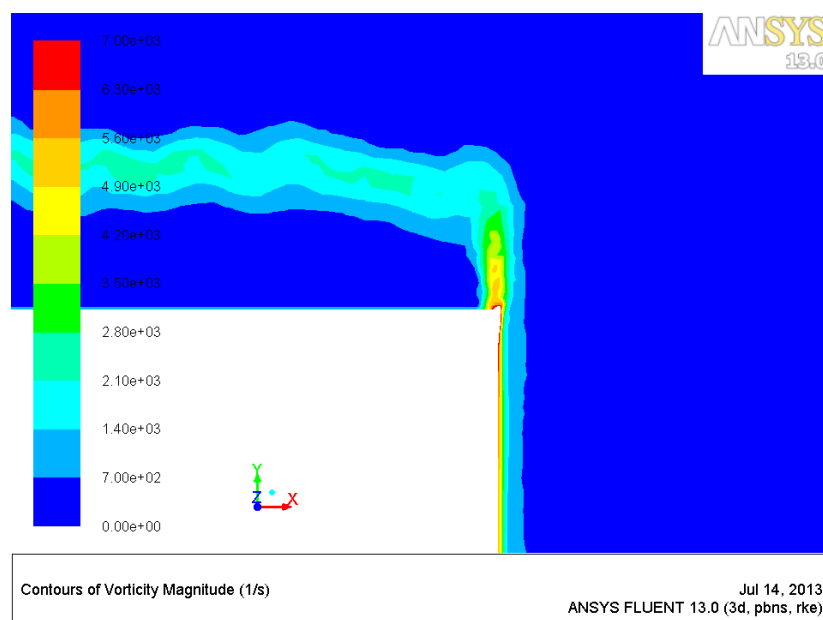


Σχήμα 5.67: Γραμμές ροής στο πίσω μέρος



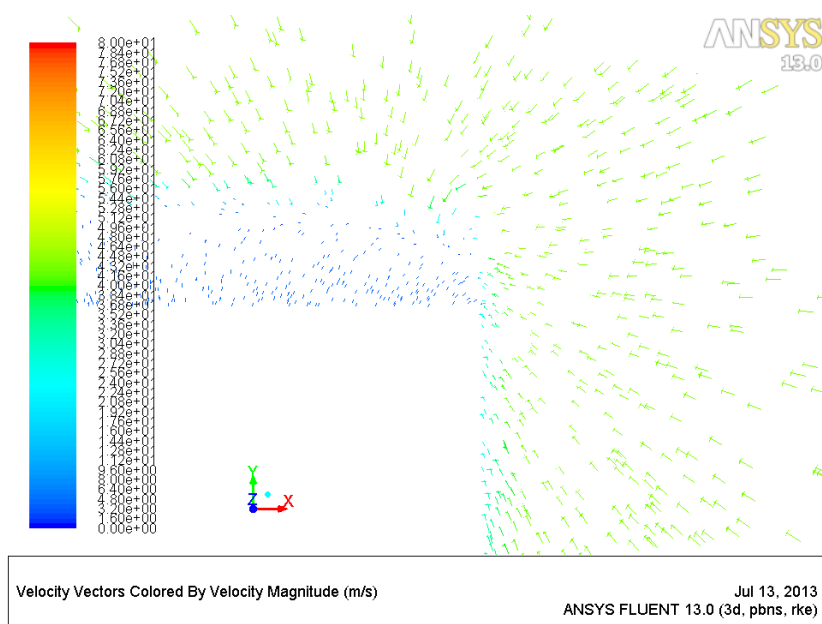
Σχήμα 5.68: Διανυσματικό πεδίο στο πίσω μέρος

Το διανυσματικό πεδίο εμφανίζει τα ίδια φαινόμενα με τις ροϊκές γραμμές.

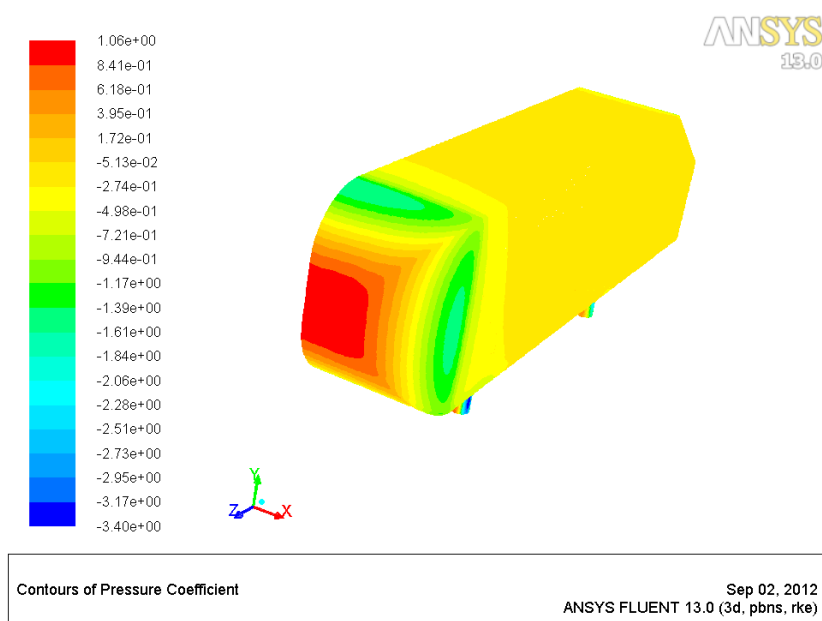


Σχήμα 5.69: Στροβιλότητα

Ο σχηματισμός της δίνης σε μεγαλύτερο μέγεθος συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις των 25 μοιρών αλλά και των 35 μοιρών και 2 εκατομμυρίων. Το μεγαλύτερο πλέγμα αποδίδει καλύτερα τα φυσικά φαινόμενα.



Σχήμα 5.70: Διανύσματα ταχύτητας στην περιοχή σχηματισμού δίνης



Σχήμα 5.71: Συντελεστής Πίεσης

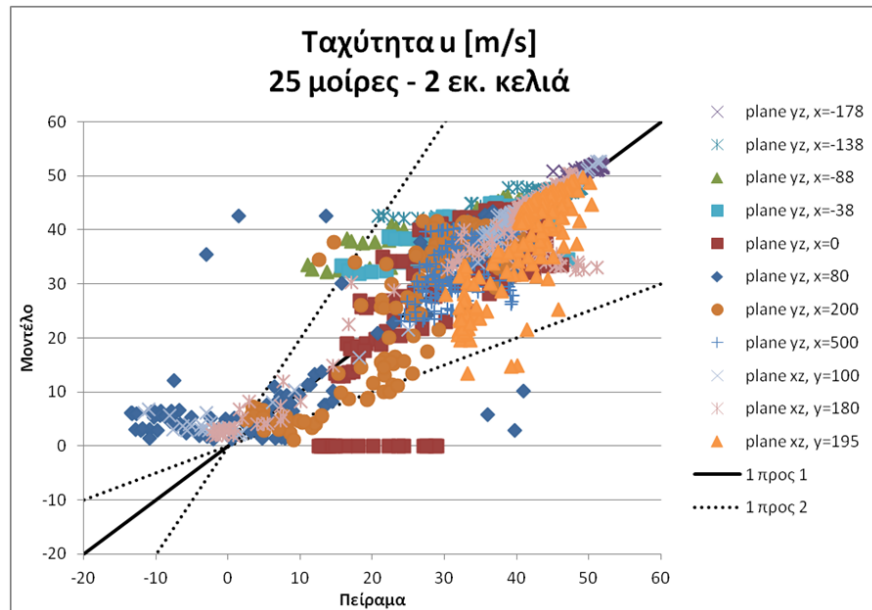
Όπως ήταν λογικό, εμφανίζεται μεγάλη πίεση στο σημείο που περιμένουμε, στο κέντρο. Εκεί όπου η ροή επιταχύνεται όμως, ο συντελεστής C_p μειώνεται. Καμία διαφορά με τις παραπάνω περιπτώσεις.

5.8 Διαγράμματα Διασποράς και Δείκτες Αξιολόγησης

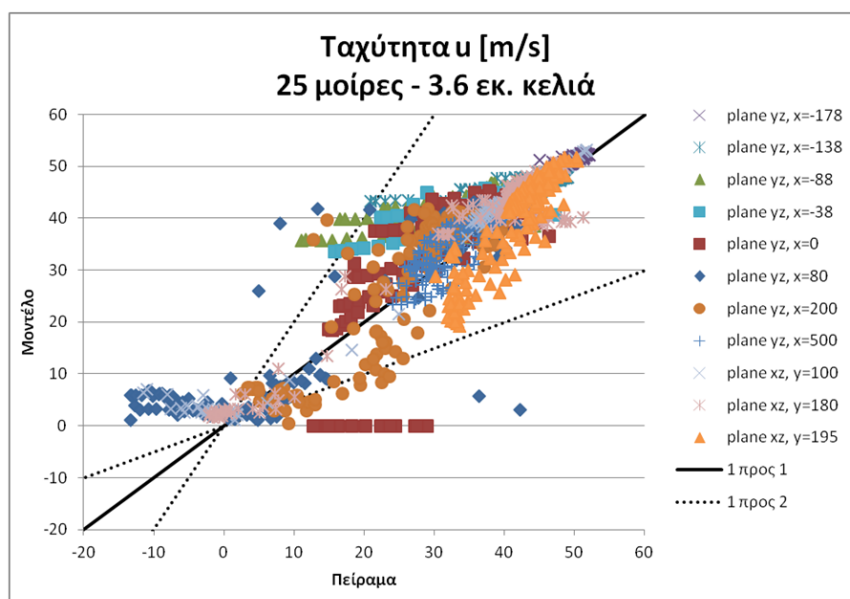
Στα διαγράμματα διασποράς απεικονίζεται η πιστοποίηση του κώδικα CFD. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας εμφανίστηκαν καλύτερα αποτελέσματα στις προσομοιώσεις με πυκνό πλέγμα. Αυτό είναι ξεκάθαρο παρατηρώντας την διασπορά των αποτελεσμάτων που απεικονίζον-

ται σε μια καμπύλη 1:1 και 1:2. Τα αποτελέσματα στην περίπτωση των 2 εκατομμυρίων κελιών έχουν μεγαλύτερη διασπορά ενώ αυτά των 3.6 εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά. Το συμπέρασμα, λοιπόν, είναι ότι τα αποτελέσματα των 2 εκατομμυρίων κελιών δεν μας δίνουν καλά αποτελέσματα και άρα δεν θα συνεχίσουν να μας απασχολούν.

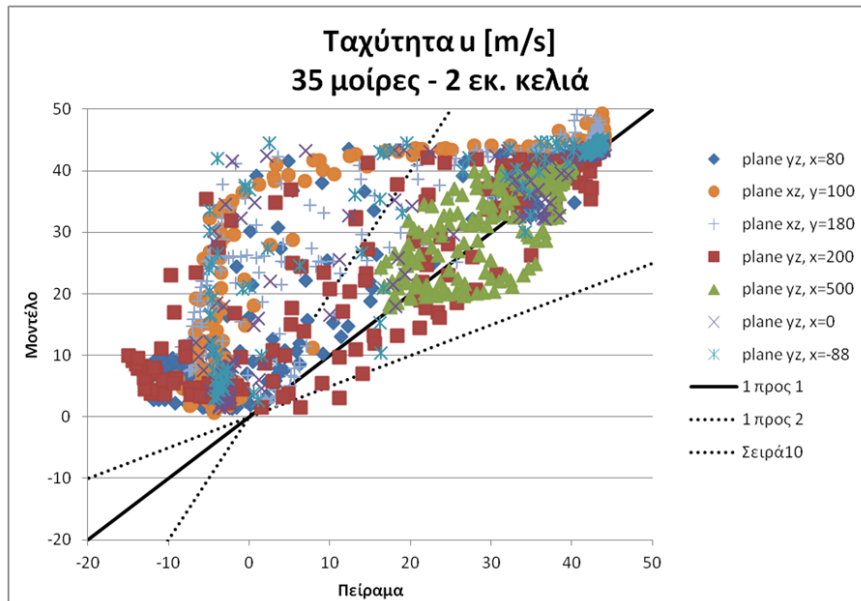
Διαγράμματα διασποράς:



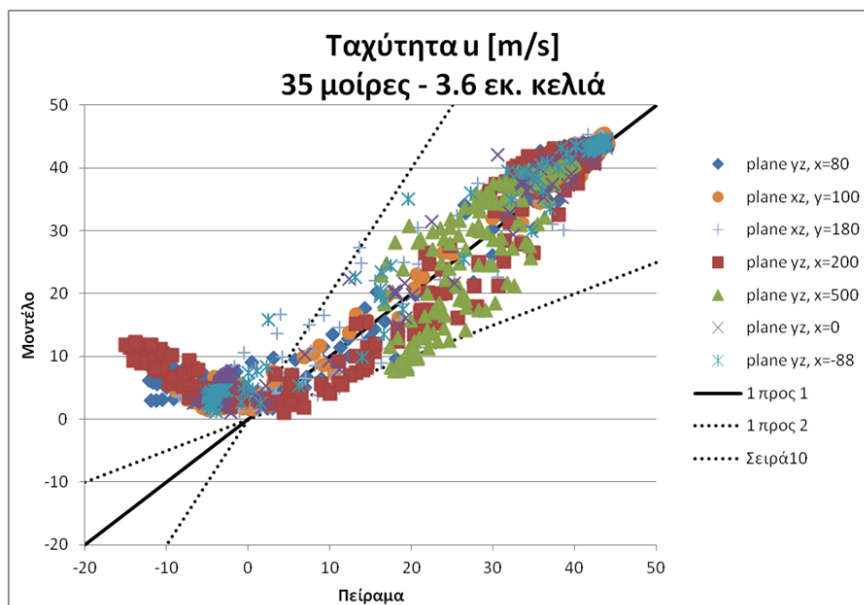
Σχήμα 5.72: Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 25 μοιρών και 2 εκ κελιών



Σχήμα 5.73: Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 25 μοιρών και 3.6 εκ κελιών



Σχήμα 5.74: Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 35 μοιρών και 2 εκ κελιών



Σχήμα 5.75: Διάγραμμα διασποράς Ahmed Body 35 μοιρών και 3.6 εκ κελιών

Δείκτες αξιολόγησης:

Στη βιβλιογραφία η ποσοτική σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των παρατηρήσεων πραγματοποιείται συνήθως με στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τέτοια προβλήματα είναι:

- Η κλασματική μεροληψία (fractional bias (FB)):

$$FB = \frac{(\bar{c}_0 - \bar{c}_P)}{0.5(\bar{c}_0 + \bar{c}_P)} \quad (5.5)$$

όπου $\bar{\sigma}_0$ είναι η μέση τιμή του πειράματος και είναι η $\bar{\sigma}_P$ μέση τιμή του μοντέλου.

Η κλασματική μεροληψία είναι μία γραμμική μέτρηση της μέσης απόκλισης και εμφανίζει, αν υπάρχουν, συστηματικά σφάλματα. Από τον ορισμό του προκύπτει ότι ένα αρνητικό FB υποδηλώνει μία συστηματική υπερεκτίμηση του μοντέλου και αντιστρόφως.

- Το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (normalized mean square error (NMSE)):

$$NMSE = \frac{(C_0 - C_P)^2}{\bar{\sigma}_0 \bar{\sigma}_P} \quad (5.6)$$

Ο δείκτης αυτός είναι μία μέτρηση της διασποράς των δεδομένων και φανερώνει συστηματικά και σφάλματα τυχειότητας.

- Το κλάσμα των προβλέψεων μέσα στο διπλάσιο/υποδιπλάσιο εύρος των παρατηρήσεων (fraction of predictions within a factor of two of observations, FAC2):

$$FAC2 = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (5.7)$$

όπου:

$$N_i \begin{cases} 1, & 0,5 \leq \frac{C_{pi}}{C_{oi}} \leq 2,0 \\ 0, & \frac{C_{pi}}{C_{oi}} \leq 0,5 \text{ ή } \frac{C_{pi}}{C_{oi}} \geq 2,0 \end{cases} \quad (5.8)$$

Το FAC2 υπολογίζει το ποσοστό των προβλέψεων που βρίσκονται μέσα στο διπλάσιο/υποδιπλάσιο εύρος των παρατηρήσεων με βάση το λόγο της πρόβλεψης C_{pi} προς την παρατήρηση C_{oi} .

Για ένα ιδανικό μοντέλο θα πρέπει να ισχύει $FB = 0$ και $FAC2 = 1$ (δηλαδή 100%).

Ποιοτικά κριτήρια αποδοχής για παρόμοια προβλήματα [21]

Αποδεκτά θεωρούνται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου για τα οποία ισχύει ότι:

$$|FB| < 0.3 \quad (5.9)$$

$$NMSE < 4 \quad (5.10)$$

$$FAC2 > 0.5 \quad (5.11)$$

25 μοίρες	FAC2	NMSE	FB
2εκ / 3.6 εκ.	0.96 / 0.96	0.015 / 0.015	-0.032 / -0.043

35 μοίρες	FAC2	NMSE	FB
2εκ / 3.6 εκ.	0.76 / 0.80	0.11 / 0.032	-0.17 / -0.082

Πίνακας 5.1: Δείκτες αξιολόγησης

5.9 Συντελεστής Οπισθέλκουσας

Η αεροδυναμική αντίσταση ή δύναμη οπισθέλκουσας (aerodynamic drag) οφείλεται στις τριβές που αναπτύσσονται όταν ένα σώμα (όχημα) κινείται σε ένα ρευστό ή όταν το ρευστό κινείται γύρω από το όχημα. Συνήθως το μέγεθος αυτό συμβολίζεται ως D [N] και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, όπου γίνεται αντιληπτό πως όσο αυξάνεται η ταχύτητα του οχήματος τόσο αυξάνεται και η αεροδυναμική αντίσταση. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_d είναι ένας αριθμός που ορίζει την ροή του αέρα, την ομαλότητα με την οποία αυτός περνά γύρω από ένα σώμα. Το C_d είναι μία τιμή που μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή ως μέτρο σύγκρισης για την αεροδυναμική των σύγχρονων οχημάτων και εκφράζει την αεροδυναμική ροή του αυτοκινήτου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη όμως το μέγεθος του αμαξώματος αλλά η μετωπική επιφάνεια. Ο συντελεστής επιδιώκεται να είναι μικρός ώστε να έχουμε μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho A u^2$$

όπου:

- C_d : Συντελεστής αντίσταση σώματος (εξαρτάται κατά βάση από τη γεωμετρία)
- ρ : Πυκνότητα του ρευστού
- A : Η μέγιστη μετωπική επιφάνεια του κινούμενου σώματος
- u : Η σχετική ταχύτητα σώματος-ρευστού

Έχουμε λοιπόν:

$$A = 0.115 m^2$$

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$u = 40 m/s$$

	πλήθος κελιών	D[N]	Cd	Cd Ahmed
Ahmed Body 25 μοιρών	3.6 εκ. κελιά	33.13	0.3	0.28
Ahmed Body 35 μοιρών	3.6 εκ. κελιά	30.65	0.27	0.25

Πίνακας 5.2: Σύγκριση συντελεστών οπισθέλκουσας

Τα μεγέθη των συντελεστών έτσι όπως υπολογίστηκαν είναι πολύ κοντά σε αυτά που αναφέρονται στην βιβλιογραφία από τον Ahmed. Η ροή κοντά στη βάση του κεκλιμένου μέρους του Ahmed Body στις πειραματικές και υπολογιστικές μετρήσεις αποκολλάται. Αυτό προκαλεί μεγάλη μείωση στη δύναμη οπισθέλκουσας με τη γωνία του κεκλιμένου επιπέδου να αυξάνεται καθώς οι δίνες στα πλαϊνά του κεκλιμένου επιπέδου είναι πιο αδύναμες λόγω αποκόλλησης.

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάστηκε η υπολογιστική προσομοίωση ενός απλοποιημένου επιβατικού οχήματος, γνωστό ως Ahmed body, για δύο διαφορετικά μεγέθη πλέγματος και για δύο διαφορετικές γεωμετρικές αναπαραστάσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα δεδομένα που προέκυψαν από τις πειραματικές διατάξεις μέσα σε αεροσήραγγα του πειράματος του H. Lienhart και των συνεργατών του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία συγκρίθηκαν τα κάθετα προφίλ ταχύτητας, οι δίνες και οι αποκολλήσεις που προσομοιώνονται από το μικρό και το μεγάλο πλέγμα. Γενικά το μοντέλο realizable k-ε προσομοιώνει καλά την ροή αλλά δεν φαίνεται να την λύνει επαρκώς στην περιοχή που εμφανίζονται δίνες. Ακόμη, με βάση τα αποτελέσματα, τα πυκνά πλέγματα εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα αραιά πλέγματα.

Στη συνέχεια παρατηρήσαμε ότι η αύξηση της κλίσης στο οπίσθιο μέρος του οχήματος προκαλεί αποκόλληση της ροής στο πίσω τμήμα του οχήματος. Συγκεκριμένα, η δύναμη οπισθέλκουσας (Drag Force) μειώνεται με την αύξηση την πίσω κλίσης λόγω της μικρής δύναμης αντίστασης στο ροϊκό πεδίο στις περιοχές αποκόλλησης της ροής. Έτσι με την μείωση της δύναμης οπισθέλκουσας έχουμε και τη μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας Cd. Με αυτήν την λογική το όχημα με τη μεγαλύτερη κλίση στο οπίσθιο τμήμα καταναλώνει λιγότερα καύσιμα. Οι συντελεστές οπισθέλκουσας που υπολογίστηκαν βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτούς που αναφέρει η βιβλιογραφία.

Μελλοντικά, αξίζει να ερευνηθεί η χρήση ενός διαφορετικού μοντέλου τύρβης και/ή μιας μαθηματικής μοντελοποίησης LES για πιστότερη αναπαράσταση της φυσικής συμπεριφοράς και πιο έγκυρα αποτελέσματα. Ακόμη, η ανάλυση ευαισθησίας πλέγματος θα επιφέρει πιο ακριβή αποτέλεσμα όμως με έξτρα υπολογιστικό κόστος.

Τέλος, η βελτιστοποίηση του σχήματος του Ahmed Body με επιπρόσθετη αεροτομή στο πίσω μέρος του θα μας δώσει μια επιθυμητή μείωση του συντελεστή αντίστασης.

Bibliography

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. In *SAE Special Publications*, pages 1–31, 1984.
- [2] J. L Aider, J. F Beaudoin, and J. E. Wesfreid. Drag and lift reduction of a 3d bluff-body using active vortex generators. *Experiments in Fluids*, 48(5):771–789, 2010.
- [3] J. D. Anderson. *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. McGraw-Hill New York, 1st edition, 1995.
- [4] Inc ANSYS. Fluent 12 theory guide, 2009.
- [5] B. Blocken, T. Stathopoulos, and J. Carmeliet. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2):238–252, 2007.
- [6] K. Burgin, P. C. Adey, and J. P. Beatham. Wind tunnel tests on road vehicle models using a moving belt simulation of ground effect. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 22(2-3):227–236, 1986.
- [7] K. Gosse, M. Gonzalez, and P. Paranthoñ. Mixing in the three-dimensional wake of an experimental modelled vehicle. *Environmental Fluid Mechanics*, 11(6):573–589, 2011.
- [8] W. H. Hucho. *Aerodynamics of Road Vehicles*. Society of Automotive Engineers,U.S., 4th edition, 1998.
- [9] W. H. Hucho, L. J. Janssen, and G. Schwarz. The Wind Tunnel’s Ground Plane Boundary Layer - Its Interference with the Flow Underneath Cars. Technical Report 750066, SAE Technical Paper, 1975.
- [10] L. Jowsey and M. Passmore. Experimental study of multiple-channel automotive underbody diffusers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(7):865–879, 2010.
- [11] S. E Kim, D. Choudhury, and B. Patel. Computations of complex turbulent flows using the commercial code ansys fluent. In *In Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows*, 1997.
- [12] S. Krajnovic and L. Davidson. Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(9):677–696, 2005.

- [13] B. E. Launder and D. B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2):269–289, 1974.
- [14] H. Lienhart and S. Becker. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. *SAE paper 2003-01-0656*, 2003.
- [15] H. Lienhart, C. Stoots, and S. Becker. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Modell). 77:323–330, 2002.
- [16] Y. Liu and A. Moser. Numerical modeling of airflow over the ahmed body.
- [17] W. Meile, G. Brenn, A. Reppenhagen, B. Lechner, and A. Fuchs. Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the ahmed body. *CFD Letters*, 3(1):32–38, 2011.
- [18] F. R. Menter. Zonal two equation Kappa-Omega turbulence models for aerodynamic flows. *24th Fluid Dynamics Conference*, 1993.
- [19] F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605, 1994.
- [20] W. C. Reynolds. Fundamentals of turbulence for turbulence modeling and simulation. lecture notes for von karman institute agard report no. 755, 1987.
- [21] M. Schatzmann, H. Olesen, and J. Franke. COST 732 model evaluation case studies: approach and results. 2010.
- [22] T. H Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu. A new k-epsilon eddy-viscosity model for high reynolds number turbulent flows - model development and validation. *Computers Fluids*, 24(3):227–238, 1995.
- [23] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Approach*. Longman Scientific, Technical, 1995.
- [24] D. C. Wilcox. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, 3rd edition, 2006.