

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΧΗΛJANA SEIDAS

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΑΝΕΜΟΦΡΑΚΤΗ ΣΕ ΤΡΕΝΟ ΠΟΥ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ
ΓΡΑΜΜΗ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΤΑΙ ΣΕ ΔΥΝΑΤΟΥΣ ΑΝΕΜΟΥΣ

Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2023

Επιβλέπων: ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Μάρτιος 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2023

SEIDAS XHULJANA

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΑΝΕΜΟΦΡΑΚΤΗ ΣΕ ΤΡΕΝΟ ΠΟΥ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ
ΓΡΑΜΜΗ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΤΑΙ ΣΕ ΔΥΝΑΤΟΥΣ ΑΝΕΜΟΥΣ

Επιβλέπων: ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Μάρτιος 2023

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Αεροδυναμική προσομοίωση των επιπτώσεων ανεμοφράκτη σε τρένο που κινείται σε σιδηροδρομική γραμμή που υπόκειται σε δυνατούς ανέμους

Μέλη Εξεταστική Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Μουστρής	Αναπληρωτής καθηγητής	
3	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	

Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Xhuljana Seidas του, Αριστεΐδη με αριθμό μητρώου 51204406, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Η Δηλούσα

Xhuljana Seidas



ABSTRACT

As the train moves creates turbulence which is associated with high air velocities and rapidly changing pressure fields. This works seeks to explain the flow field properties of a freight train locomotive. A Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) model, based on the k- ω turbulence model, is used to simulate the locomotive aerodynamic performance. The aerodynamic behavior of a locomotive moving with crosswinds, with and without a windbreak is also studied. The flow structure, velocity, pressure, pressure coefficient, turbulent kinetic energy k, specific dissipation factor ω , and the effect of the windbreak wall on the flow around the locomotive is defined using OpenFoam code.

Keywords: slipstreams; locomotive; boundary layers; wakes; yaw angles; Computational fluid dynamics (CFD); k- ω turbulent model; OpenFoam;

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Λεκάκη που για κάθε φορά που παρευρισκόμουν στο εργαστήριο ήταν πρόθυμος να μου λύσει την οποιαδήποτε απορία που είχα. Τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή για τους υπολογιστικούς πόρους που μου παρείχε και την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την ανάθεση του θέματος και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα. Τον ευχαριστώ θερμά για την επιστημονική του καθοδήγηση και τις υποδείξεις του, για την υπομονή του και την επιμονή του, για τη συνεχή συμπαράσταση και υποστήριξη του καθώς και για το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή έως το τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ πολύ την ομάδα του εργαστηρίου που ήταν πάντα δίπλα μου σε κάθε δυσκολία και απορία που είχα σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου και θέλω να τους ευχαριστήσω θερμά για την συμπαράσταση και το κουράγιο που μου δώσανε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τους συμφοιτητές που με στήριξαν και βρίσκόντουσαν δίπλα μου σε κάθε επιτυχία και αποτυχία των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Και τέλος θέλω να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου για την στήριξη και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια και φυσικά καμία μου επίτευξη δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τους γονείς μου οι οποίοι μου προσέφεραν ηθικά, πνευματικά και υλικά αγαθά σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
Ευχαριστίες	ii
Κατάλογος FIGURES	iv
Κατάλογος Πινάκων	vii
Κατάλογος Εξισώσεων	viii
LIST OF ABBREVIATIONS	ix
1 Εισαγωγή	10
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	12
2.1 Πειράματα ροής πραγματικής κλίμακας τρένων	12
2.2 Πειράματα ροής μικρής κλίμακας τρένων	14
2.3 Αριθμητική ανάλυση ροής γύρω από τρένα	16
2.4 Ροή γύρω από τρένο υπό την ύπαρξη ανεμοφράκτη και ανέμων	18
3 Μεθοδολογία	21
3.1 Υπολογιστική ρευστοδυναμική	21
3.2 Εξισώσεις Navier-Stokes	22
3.3 Μοντελοποίηση της τύρβης	24
3.4 Μοντέλα τύρβης για εξισώσεις RANS	25
4 Ροή ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης	26
4.1 Γεωμετρία μηχανής έλξης	26
4.2 Υπολογιστικό χωρίο μηχανής έλξης case 1	27
4.3 Υπολογιστικό πλέγμα case 1	28
4.4 Οριακές συνθήκες case 1	29
4.5 Αποτελέσματα	31
5 Ροή ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης με γωνία εκτροπής και παρουσία ανεμοφράκτη	37
5.1 Εξεταζόμενη γεωμετρία	37
5.2 Υπολογιστικό χωρίο	38
5.3 Υπολογιστικό πλέγμα	40
5.4 Οριακές συνθήκες	40
5.5 Αποτελέσματα ροής χωρίς την ύπαρξη ανεμοφράκτη (case2)	43
5.6 Αποτελέσματα ροής υπό την ύπαρξη του ανεμοφράκτη (3 ^η περίπτωση case3)	50
6 Σύγκριση περιπτώσεων	57
6.1 Προφίλ ταχύτητας	57
6.2 Συντελεστής πίεσης	62
6.3 Συντελεστής άνωσης και συντελεστής αντίστασης	65
6.4 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο	66
7 Συμπεράσματα	69
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

Κατάλογος FIGURES

Εικόνα 2-1 Διακύμανση του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή περιοχή τρένων. FS (πειραματικά αποτελέσματα τρένου πραγματικής κλίμακας) MS (πειραματικά αποτελέσματα τρένου μικρότερης κλίμακας). Εικόνα από Baker (2014).....	13
Εικόνα 2-2 Ροή γύρω από τρένο υπό την ύπαρξη ανέμων. Γωνία εκτροπής ($\theta < 45^\circ$). Εικόνα από Copley (1987).	18
Εικόνα 2-3 Σχηματισμός δινών στην υπήνεμη πλευρά τρένου. Εικόνα (a) από Khier, Breuer et al. (2000), εικόνα (b) από Niu, Zhou et al. (2018).	19
Εικόνα 2-4 Σχηματισμός δινών υπό την παρουσία ανεμοφράκτη. Εικόνα από Niu, Zhou et al. (2018).....	20
Εικόνα 4-1 Πρότυπη γεωμετρία της μηχανής έλξης	26
Εικόνα 4-2 Απλοποιημένη γεωμετρία της μηχανής έλξης.....	27
Εικόνα 4-3 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου 1 ^{ης} περίπτωσης (case1)	28
Εικόνα 4-4 Υπολογιστικό πλέγμα 1 ^{ης} περίπτωσης (case1)	29
Εικόνα 4-5 Οριακές συνθήκες στα σύνορα του υπολογιστικού χωρίου 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1)	31
Εικόνα 4-6 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της κατανομής των πιέσεων στο επίπεδο συμμετρίας για την 1 ^η περίπτωση (case 1)	32
Εικόνα 4-7 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)....	33
Εικόνα 4-8 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο $Z/H=0,5$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	34
Εικόνα 4-9 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο $Z/H=0,75$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	34
Εικόνα 4-10 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο $Z/H=0,9$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	35
Εικόνα 4-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο συμμετρίας για την αδιάστατη κατανομή του k	36
Εικόνα 4-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1 ^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο συμμετρίας για την αδιάστατη κατανομή του ω	36
Εικόνα 5-1 Διαστάσεις μηχανής έλξης και του ανεμοφράκτη.....	37

Εικόνα 5-2 Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου περίπτωση 2 ^η (case 2)	39
Εικόνα 5-3 Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου περίπτωση 3 ^η (case 3)	39
Εικόνα 5-4 υπολογιστικό πλέγμα (a) case 2, (b) case 3.....	40
Εικόνα 5-5 Σύνθεση ταχυτήτων και γωνία εκτροπής	41
Εικόνα 5-6 Οριακές συνθήκες της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2).....	42
Εικόνα 5-7 Οριακές συνθήκες της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3).....	43
Εικόνα 5-8 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο συμμετρίας για την κατανομή των πιέσεων.....	44
Εικόνα 5-9 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)....	45
Εικόνα 5-10 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο $Z/H=0,5$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	46
Εικόνα 5-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο $Z/H=0,75$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	46
Εικόνα 5-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο $Z/H=0,9$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	47
Εικόνα 5-13 Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών στο δισδιάστατο πεδίο Z,Y για τα επίπεδα (a) $X/H=0.64$, (b) $X/H=1.28$, (c) $X/H=1.60$ και (d) $X/H=2.14$ για την 2 ^η περίπτωση (case 2).....	48
Εικόνα 5-14 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο συμμετρίας για την αδιάστατη κατανομή της τυρβώδης κινητικής ενέργειας k	49
Εικόνα 5-15 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2 ^{ης} περίπτωσης στο επίπεδο συμμετρίας για την κατανομή του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή ω)	49
Εικόνα 5-16 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή των πιέσεων	50
Εικόνα 5-17 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)....	51
Εικόνα 5-18 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο $Z/H=0,5$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	52
Εικόνα 5-19 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο $Z/H=0,75$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	52
Εικόνα 5-20 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο $Z/H=0,9$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞).....	53

Εικόνα 5-21 Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών στο δισδιάστατο πεδίο Z,Y για τα επίπεδα (a) $X/H=0.64$, (b) $X/H=1.28$, (c) $X/H=1.60$ και (d) $X/H=2.14$ για τη 3 ^η περίπτωση (case 3).....	54
Εικόνα 5-22 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για την αδιάστατη κατανομή της τυρβώδης κινητικής ενέργειας k	55
Εικόνα 5-23 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3 ^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για την κατανομή του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή ω mega)	56
Εικόνα 6-1 Σημεία προφίλ ταχύτητας	57
Εικόνα 6-2 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (a) στο σημείο 1 (point 1), (b) στο σημείο 2 (point 2).....	59
Εικόνα 6-3 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (c) στο σημείο 3 (point 3), (d) στο σημείο 4 (point 4).....	60
Εικόνα 6-4 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (e) στο σημείο 5 (point 5), (f) στο σημείο 6 (point 6).....	61
Εικόνα 6-5 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (g) στο σημείο 7 (point 7), (h) στο σημείο 8 (point 8).....	62
Εικόνα 6-6 Συντελεστής πίεσης C_p για τη περίπτωση ροής χωρίς πλάγιους ανέμους (case 1)	63
Εικόνα 6-7 Συντελεστής πίεσης C_p για τη περίπτωση ροής πλάγιων ανέμων χωρίς ανεμοφράκτη (case 2)	64
Εικόνα 6-8 Συντελεστής πίεσης C_p για τη περίπτωση ροής πλάγιων ανέμων με ανεμοφράκτη (case 3)	65
Εικόνα 6-9 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο για τη πρώτη περίπτωση της ροής (case 1).....	67
Εικόνα 6-10 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο για τη δεύτερη περίπτωση της ροής (case 2).....	67
Εικόνα 6-11 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο για τη τρίτη περίπτωση της ροής (case 3).....	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1 Διαστάσεις των μερών της μηχανής έλξης.....	27
Πίνακας 5-1 : Διαστάσεις του ανεμοφράκτη.....	38
Πίνακας 6-1 : Απόσταση σημείων (points) από το σημείο αναφοράς (0,0,0)....	58
Πίνακας 6-2 : Συντελεστές άνωσης και αντίστασης για τις τρεις περιπτώσεις ..	65

Κατάλογος Εξιιώσεων

(3-1).....	23
(3-2).....	23
(3-3).....	23
(3-4).....	23
(3-5).....	23
(3-6).....	24
(4-1).....	30
(4-2).....	30
(4-3).....	30
(6-1).....	62
(6-2).....	65
(6-3).....	65

LIST OF ABBREVIATIONS

CFD	Computational Fluid Dynamic
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
OpenFOAM	Open Field Operation And Manipulation

1 Εισαγωγή

Τη τελευταία δεκαετία οι μέγιστες ταχύτητες των επιβατικών και των εμπορικών τρένων φαίνεται να αυξάνονται όλο και περισσότερο τόσο στην ηπειρωτική Ευρώπη όσο και στην ανατολική Ασία. Η χρήση των τρένων υψηλών ταχυτήτων καθιστά αναγκαία τη δημιουργία εκσυγχρονισμένων υποδομών και τη βελτίωση των σιδηροδρομικών γραμμών. Η αναβάθμιση των μικτών σιδηροδρόμων που χρησιμοποιούνται από τις επιβατικές και τις εμπορικές αμαξοστοιχίες τείνει να οδηγήσει σε αύξηση της ταχύτητας των εμπορευματικών τρένων. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των σιδηροδρομικών οχημάτων. Με τη βελτίωση της αεροδυναμικής γεωμετρίας ενός τρένου εξοικονομείται ουσιαστικό κόστος διότι σχεδιάζεται και κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η απόδοση του να καθίσταται αποδοτική αλλά και φιλική προς το περιβάλλον. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει στον τομέα των σιδηροδρομικών οχημάτων αφορούν την οπισθέλκουσα δύναμη με σκοπό την ελαχιστοποίηση της για τη μείωση των καυσίμων άρα και της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία τους.

Η αεροδυναμική αποτελεί πλέον το κλειδί για τη κατανόηση φυσικών φαινομένων που διενεργούνται σε μια αμαξοστοιχία, όπως για παράδειγμα η κατανομή των πιέσεων όταν αυτό εισέρχεται σε ένα τούνελ ή η ροή του ανέμου γύρω από το τρένο όταν υπόκειται σε δυνατούς πλευρικούς ανέμους. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών μίας εμπορευματικής μηχανής έλξης και η κατανόηση της ροής του ανέμου που αναπτύσσεται γύρω από αυτή όταν ο άνεμος προσβάλει τη μηχανή υπό γωνία και ποια είναι η επίδραση της ροής όταν υφίσταται ανεμοφράκτης.

Οι μελέτες της ροής του ανέμου γύρω από τρένα διεξάγονται με διάφορους τρόπους. Παλαιότερα πραγματοποιούνταν πειραματικές μελέτες σε τρένα πραγματικής κλίμακας είτε σε υπό κλίμακα μοντέλα. Ωστόσο ακόμα και μέχρι σήμερα πραγματοποιούνται πειραματικές μελέτες γύρω από επιβατικές ή εμπορικές αμαξοστοιχίες. Τα τελευταία χρόνια η υπολογιστική ρευστοδυναμική

καλύπτει όλο και μεγαλύτερο εύρος βιομηχανικών και μη πεδίων εφαρμογής όσον αφορά τη προσομοίωση της ροής καθώς αποτελεί την οικονομικότερη και απλούστερη εφαρμογή μελέτης. Η αεροδυναμική προσομοίωση της ροής επιτυγχάνεται με τη χρήση μοντέλων τύρβης όπου στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο των μέσων τιμών του Reynolds για τις εξισώσεις Navier Stokes (RANS- Reynolds Averaged Navier Stokes).

Η ανάλυση της αεροδυναμικής προσομοίωσης που θα εξεταστεί στα επόμενα κεφάλαια αφορά τρεις περιπτώσεις ροής για μία εμπορευματική μηχανή έλξης. Στη πρώτη περίπτωση της ροής (case 1) προσομοιώνεται η κίνηση της μηχανής έλξης με ταχύτητα ροής 20 m/s και μελετάται η κατανομή της ταχύτητας (U), της πίεσης (P) και του συντελεστή πίεσης (C_p), της τυρβώδης κινητικής ενέργειας(k) και του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας(ω). Στη δεύτερη περίπτωση (case 2) εξετάζονται τα ίδια χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν αλλά για ροή γύρω από τη μηχανή έλξης όταν υπόκειται σε πλάγιους ανέμους. Στη τρίτη περίπτωση (case 3) η μηχανή έλξης υπόκειται σε υπό γωνία ανέμους, όπως και στη δεύτερη περίπτωση, με τη διαφορά ότι κοντά στη γεωμετρία της μηχανής υπάρχει ανεμοφράκτης που εμποδίζει την προσβολή της πλάγιας ροής. Η προσομοίωση της ροής των παραπάνω που αναφέρθηκαν πραγματοποιήθηκε μέσω του ελεύθερου λογισμικού OpenFoam.

Εκτός από την μεμονωμένη μελέτη των περιπτώσεων θα ακολουθηθεί και η σύγκριση των χαρακτηριστικών τους. Η σύγκριση αφορά το προφίλ ταχύτητας και τον συντελεστή πίεσης (C_p) στο πεδίο συμμετρίας του άξονα Y ώστε να κατανοηθεί η ροή στην επίδραση που έχει ο πλευρικός άνεμος και ο ανεμοφράκτης. Τέλος θα παρουσιαστούν οι ροικές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο ώστε να απεικονιστούν τυχόν δίνες, ανακυκλοφορίες επανακκολήσεις κτλ.

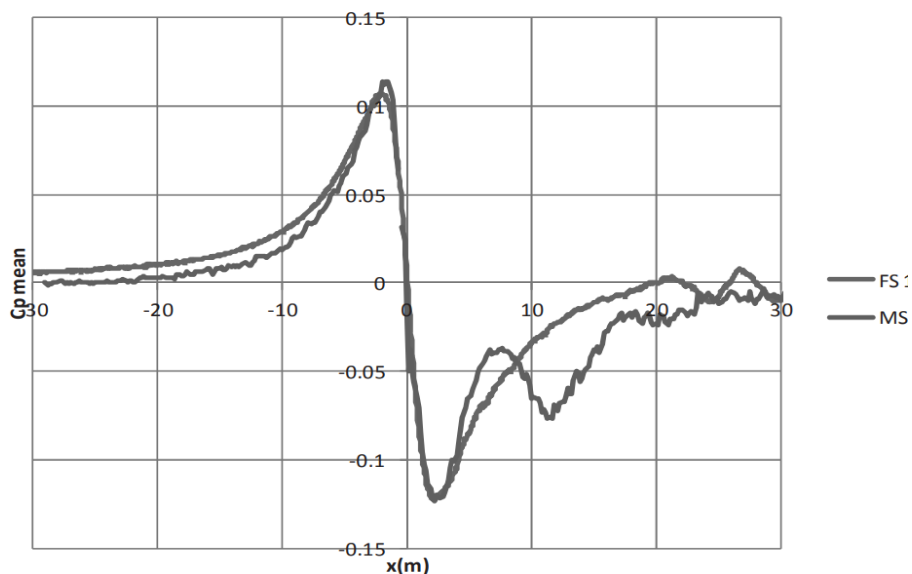
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Πειράματα ροής πραγματικής κλίμακας τρένων

Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές επικεντρώνουν την προσοχή τους στην αεροδυναμική συμπεριφορά των τρένων. Το πεδίο ροής που σχηματίζεται κατά την κίνηση του οχήματος προκαλούν αεροδυναμικές πιέσεις στο τρένο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ολόκληρη σειρά αεροδυναμικών ζητημάτων.

Ο (Baker, Quinn et al. 2013) μαζί με τους συνεργάτες του μελέτησαν την ροή γύρω από τρένα, πραγματικής κλίμακας, διαφορετικού μήκους και διαφορετικών τιμών ταχυτήτων. Σκοπός της μελέτης αυτής, ήταν η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για την TSI (Technical Specifications for Interoperability) η οποία καθορίζει τα τεχνικά και επιχειρησιακά πρότυπα κάθε συστήματος για την διασφάλιση του σιδηροδρομικού δικτύου της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο ρύγχος και γύρω από αυτό η ταχύτητα αυξάνεται και μειώνεται ραγδαία. Οι Sterling, Baker et al. (2008) αναφέρουν πως η διακύμανση της παραπάνω αυξομείωσης διαρκεί 0,1-0,2 δευτερόλεπτα. Κατά το μήκος του τρένου η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι την ουρά και έπειτα φτάνει σε μια μέγιστη τιμή μέχρι να διακοπεί. Επίσης αποδείχτηκε πως η ταχύτητα μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από το έδαφος. Τέλος, τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα τρένα με πιο αμβλεία μύτη η ουρά, προκαλούν αύξηση της ταχύτητας στα πλευρικά τους σε σχέση με εκείνα που παρουσιάζουν λιγότερη αμβλεία μύτη η ουρά.

Όσον αφορά το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται κατά μήκος της αμαξοστοιχίας, είναι ανάλογο του ύψους, του μήκους και της αεροδυναμικής σχεδίασης του τρένου. Εντός του οριακού στρώματος και σε συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων ανέμων, ο συντελεστής πίεσης είναι συνήθως κοντά στο μηδέν. Ωστόσο, εάν υπάρχουν σημαντικές ασυνέχειες κατά μήκος του τρένου, όπως μεγάλα κενά μεταξύ των βαγονιών τότε ο συντελεστής πίεσης θα είναι αρνητικός ακολουθώντας μια αυξομείωση της τιμής του έως το απόρευμα της ροής όπου και θα μηδενιστεί.



Εικόνα 2-1 Διακύμανση του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή περιοχή τρένων. FS (πειραματικά αποτελέσματα τρένου πραγματικής κλίμακας) MS (πειραματικά αποτελέσματα τρένου μικρότερης κλίμακας). Εικόνα από Baker (2014)

Οι Sterling, Baker et al. (2008) δίνουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το οριακό στρώμα των τρένων όπως είναι το πάχος μετατόπισης και η ένταση της τύρβης (turbulence intensity). Από πειραματικές μελέτες που διεξάχθηκαν, το οριακό στρώμα στα πλευρικά των τρένων αυξάνεται κατά το μήκος τους. Το πάχος μετατόπισης διακυμαίνεται ακολουθώντας όμως μια σταθερή αύξηση ενώ η ένταση της τύρβης μένει λίγο πολύ σταθερή παρόλο που η τιμή της διακυμαίνεται.

Τα τρένα υψηλής ταχύτητας μπορεί να προκαλέσουν το φαινόμενο εκτόπισης του έρματος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα τόσο στο τρένο όσο και στην σιδηροδρομική τροχιά. Οι (Kwon and Park 2006) μελέτησαν την ροή ενός κορεάτικου τρένου υψηλής ταχύτητας σε πραγματική κλίμακα. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων που έλαβαν ήταν για διαφορετικά ύψη, στην κάτω περιοχή του τρένου, ενώ η ταχύτητα του ήταν 300 χιλιόμετρα ανά ώρα, περίπου δηλαδή 83 m/s. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως για το ύψος των 18 εκατοστών οι τιμές των ταχυτήτων έφταναν το 40% της ταχύτητας του τρένου. Στο ύψος του στρωτήρα (ύψος 0 mm) η ταχύτητα έφτανε έως τα 20 m/s ενώ όσο αυξανόταν το ύψος οι τιμές των ταχυτήτων αυξανόντουσαν εκθετικά. Επίσης κάτω από τη μπροστινή περιοχή του τρένου η ταχύτητα αυξομειώνεται απότομα

έως ότου αναπυχθεί η ροή. Στην περιοχή της ανεπτυγμένης ροής, η ροή γίνεται εξαιρετικά τυρβώδης λόγω της τραχύτητας του περιβάλλοντος. Πανομοιότητα αποτελέσματα παρουσιάζουν και οι Quinn and Hayward (2008) οι οποίοι όμως μελέτησαν και την πίεση στην κάτω περιοχή του τρένου. Στην αρχή της αμαξοστοιχίας η πίεση αυξάνεται και μειώνεται ραγδαία σε γρήγορο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια η διακύμανση της αυξομειώνεται λόγω των κενών μεταξύ των βαγονιών, ενώ στη περιοχή της ουράς η τιμή της πίεσης θα παρουσιάσει μια μικρή αλλά σημαντική αύξηση. Τέλος, οι Ido, Saitou et al. (2008) διεξήγαγε πειράματα σε Ιαπωνικό τρένο και τα αποτελέσματα των ταχυτήτων στην περιοχή του στρωτήρα ήταν παρόμοια με τους παραπάνω που αναφέρθηκαν.

Πλήθος ερευνητών μελετούν το απόρευμα των τρένων για την δυνατή μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης. Οι Sims-Williams, Dominy et al. (2001), Vino, Watkins et al. (2005) και οι Nouzawa, Hiasa et al. (1992) αναφέρουν πως το απόρευμα των τρένων ποικίλει ανάλογα το είδος τους αλλά φαίνεται πως ο μηχανισμός της ροής στο σημείο αυτό είναι ο ίδιος. Οι Sterling, Baker et al. (2008) απέδειξαν πειραματικά πως στην ουρά του τρένου η ταχύτητα της ροής αυξάνεται στο μέγιστο της αλλά στη συνέχεια διακόπτεται. Η αύξηση της ταχύτητας στη περιοχή αυτή οφείλεται στη δημιουργία δινών που δημιουργούνται στο απόρευμα της ροής. Τα ίδια αποτελέσματα διεξήγαγε και οι Baker, Quinn et al. (2013) οι οποίοι δείχνουν, επίσης, πως τα τρένα με πιο οξεία μύτη και ουρά παρουσιάζουν μικρότερες τιμές ταχύτητας στο απόρευμα σε σχέση με τα τρένα αμβλείας μύτης και ουράς.

2.2 Πειράματα ροής μικρής κλίμακας τρένων

Η διεξαγωγή πειραμάτων τρένων πραγματικής κλίμακας παρουσιάζει κάποια σημαντικά προβλήματα τα οποία λύνονται με την χρήση μοντέλων-μικρής κλίμακας τρένων. Η χρήση μικρότερης κλίμακας τρένων καθιστά τα πειράματα πιο σύντομα και πιο οικονομικά καθώς και υπάρχει δυνατότητα ελεγχόμενου περιβάλλοντος (ύπαρξη η μη ανέμων). Ο Schetz (2001) αναφέρει πως στις αεροσήραγγες πρέπει να ρυθμίζεται ο αριθμός Mach και ο αδιάστατος αριθμός Reynolds ώστε τα αποτελέσματα να συμπίπτουν με τα τρένα πραγματικής

κλίμακας. Για παράδειγμα, στις συνθήκες ροής ενός τρένου μικρής κλίμακας, ο αριθμός Reynolds πρέπει να είναι μεγάλος. Ο Willemssen (1997) εξέτασε την πίεση και τον συντελεστή οπισθέλκουσας σε τρένα μικρής κλίμακας μέσα σε αεροσήραγγα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως σε σχέση με αυτά των τρένων πραγματικής κλίμακας είχαν 10% απόκλιση λόγω του ακατάλληλου αριθμού Reynolds και της μικρής διαφοροποίησης της μύτης του τρένου (nose region) Οι Brockie and Baker (1990) μελέτησαν εξίσου τον συντελεστή οπισθέλκουσας σε πανομοιότητα τρένα πραγματικής και μικρής κλίμακας και τα αποτελέσματα είχαν μεταξύ τους 30% διαφορά.

Οι Mackrodt, Steinheuer et al. (1980) και Mackrodt (1980) αναφέρουν πως η οπισθέλκουσα δύναμη του τρένου δεν εξαρτάται σημαντικά από τις ομαλές επιφάνειες του, αρκεί οι γωνίες του να μην είναι μυτερές. Μελέτησαν λοιπόν σε αεροσήραγγα μικρής κλίμακας, τρένο, τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά. Τα αποτελέσματα που διεξήγαγε ήταν πως το σχήμα της μύτης και της ουράς του τρένου δεν επηρέαζε τόσο την οπισθέλκουσα δύναμη αλλά σημαντική επιρροή είχε η ροή στην κάτω περιοχή του τρένου, δηλαδή στον στρωτήρα.

Όσον αφορά την ροή του αέρα στην οροφή του τρένου λίγες είναι οι μελέτες εκείνες που αναφέρουν το οριακό στρώμα στο σημείο εκείνο. Οι Brockie and Baker (1990) έδειξαν πως το οριακό πάχος μετατόπισης είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το πάχος μετατόπισης στις πλευρικές περιοχές του τρένου. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην οροφή του τρένου η ροή είναι συγκλίνουσα ενώ στα πλευρικά αποκλίνουσα. Το αντίθετο αποδείχθηκε από τους Baker, Dalley et al. (2001) όταν μελέτησαν τρένο κλίμακας 1/25. Στο πείραμα τους φάνηκε πως το πάχος μετατόπισης στα πλευρικά του τρένου ήταν κατά λίγο αυξημένο σε σχέση με το πάχος στην οροφή του.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι Willemssen (1997) εξέτασαν τον συντελεστή οπισθέλκουσας και τον συντελεστή πίεσης σε τρένα μικρής κλίμακας και για διαφορετικές τιμές Reynolds. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως και οι δύο συντελεστές μειώνονται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Οι Kwon, Park et al. (2001) μελέτησαν δυο μοντέλα διαφορετικής κλίμακας για αριθμούς Reynolds από 4×10^5 έως $8,5 \times 10^5$ και αποδείχθηκε ότι ο συντελεστής

οπισθέλκουσας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον αριθμό Reynolds. Άλλη μια έρευνα των Schober, Weise et al. (2010) δείχνει πως με την αύξηση του αριθμού Reynolds ο συντελεστής ροπής κύλισης πέφτει κάτω από το 3%. Επίσης οι Cheli, Giarrino et al. (2013) εξέτασαν τον αεροδυναμικό συντελεστή δύναμης τρένου για γωνία εκτροπής 0° έως 90° και για αριθμούς Reynolds από $1,3 \times 10^5$ έως 7×10^5 και αποδείχθηκε πως με την αύξηση του αριθμού Reynolds αυξάνεται και ο αεροδυναμικός συντελεστής. Τέλος οι Niu, Liang et al. (2016) διεξήγαγε πειράματα μικρής κλίμακας τρένων για να εξετάσουν την επίδραση που έχει ο αριθμός Reynolds στην αεροδυναμική δύναμη και πίεση του τρένου. Χρησιμοποίησαν δυο μοντέλα τρένων κλίμακας $1/8$ και $1/20$, διαφορετικό εύρος αριθμού Reynolds ($3,02 \times 10^5$ έως $2,27 \times 10^6$) και γωνία εκτροπής από 0 έως 90 μοίρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν, πως για γωνία εκτροπής μηδέν, με την αύξηση του αριθμού Reynolds, ο αεροδυναμικός συντελεστής μειώνεται ενώ στην περιοχή της μύτης του τρένου ο συντελεστής άντωσης αυξάνεται. Για γωνία εκτροπής 15 μοιρών, ο συντελεστής οπισθέλκουσας μειώνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Τέλος αναφέρεται πως με την αύξηση του Reynolds ο συντελεστής πίεσης αυξάνεται.

2.3 Αριθμητική ανάλυση ροής γύρω από τρένα

Οι (Schulte-Werning, Heine et al. 2003) χρησιμοποίησαν μοντέλα τύρβης Navier Stokes (RANS) για να μελετήσουν το απόρρευμα ροής ενός γερμανικού τρένου. Στη περιοχή αυτή και χαμηλά στο έδαφος, εμφανίζεται ασταθής συμπεριφορά ελικοειδών δινών, η οποία εκτείνεται σε μεγάλη απόσταση από το τρένο. Αναφέρεται λοιπόν, πως οι δίνες σχηματίζονται λόγω της αποκόλλησης του οριακού στρώματος στην ουρά του τρένου. Στο σημείο της αποκόλλησης η ροή θα αποκτήσει μια περιοδικότητα στο χρόνο δημιουργώντας την ταλάντωση της.

Οι (Shin and Park 2003) μελέτησαν τις αεροδυναμικές δυνάμεις ενός ταχύρρυθμου τρένου όταν αυτό εισέρχεται μέσα σε τούνελ. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιήθηκε επιλύτης Navier- Stokes σε συνθήκες συμπιεστής και μεταβαλλόμενης ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στην μύτη του τρένου

σχηματίζονται δίνες και η πίεση κατά το μήκος του, αυξάνεται ραγδαία με αποτέλεσμα να αυξηθεί και η δύναμη οπισθέλκουσας.

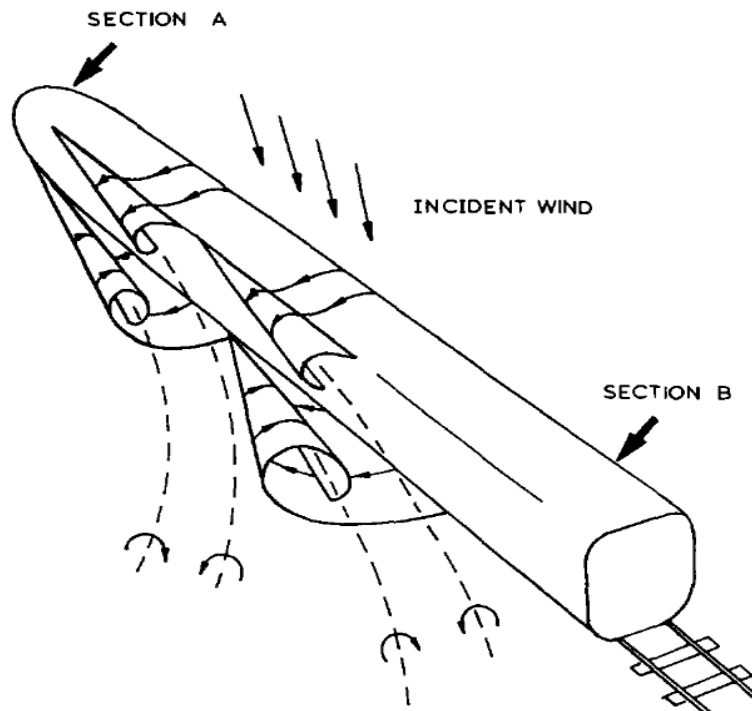
Το κυριότερο ζήτημα της σιδηροδρομικής βιομηχανίας είναι η ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας δύναμης και κατά συνέπεια την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας. Ο Tian (2009) αναφέρει πως η οπισθέλκουσα δύναμη είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας άρα αυξάνοντας την ταχύτητα αυξάνεται και η δύναμη. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων έδειξαν πως με τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης της κεφαλής του τρένου, η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη μειώνεται. Επίσης, χρησιμοποιώντας κατάλληλα “κλύσματα” (outer wind shields) στα κενά των βαγονιών και (bottom cover) στην κάτω περιοχή του τρένου, η οπισθέλκουσα δύναμη μειώνεται κατά 15% και 50% αντίστοιχα.

Οι Yao, Sun et al. (2013) μελέτησαν το απόρρευμα ταχύρρυθμου τρένου για να συγκρίνουν τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποίησαν- Detached Eddy Simulation (DES) και Unsteady Reynolds-averaged Navier- Stokes (URANS). Η μελέτη έγινε με και χωρίς τη παρουσία ανέμων. Τα αποτελέσματα έδειξαν, χωρίς την ύπαρξη ανέμων, πως σχηματίζονται δύο δίνες στην ουρά του τρένου τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή με το έδαφος, ενώ υπό την παρουσία ανεμών, δημιουργούνται τρεις δίνες γύρω από την αμαξοστοιχία. Τέλος το μοντέλο DES είχε καλύτερη ανταπόκριση στην ανάλυση μικρότερων δινών σε σχέση με τη μέθοδο URANS.

Οι (Li, Zhang et al. 2013) θέλοντας να μελετήσουν τον βέλτιστο αεροδυναμικό σχεδιασμό της μύτης του τρένου (nose region) χρησιμοποίησαν μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Σκοπός της μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση της πίεσης και της οπισθέλκουσας δύναμης. Αναφέρεται ότι στο υπολογιστικό κομμάτι, η ροή του αέρα είναι συμπιεστή, μεταβαλλόμενη και τυρβώδης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως με την αύξηση του μήκους της μύτης του αυξάνεται και η πίεση στη περιοχή αυτή. Από την άλλη με την μείωση της μύτης η οπισθέλκουσα δύναμη μειώνεται.

2.4 Ροή γύρω από τρένο υπό την ύπαρξη ανεμοφράκτη και ανέμων

Η ύπαρξη δυνατών ανέμων κατά τη κίνηση τρένων μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στην αμαξοστοιχία και να δημιουργήσει σοβαρότερα προβλήματα. Για τον λόγο αυτό έχουν γίνει αρκετές έρευνες για την μελέτη της ροής που αναπτύσσεται γύρω από τρένα υπό την παρουσία ανέμων. Οι πρώτες έρευνες έγιναν από τους (Mair and Stewart 1985, Copley 1987, Robinson and Baker 1990, Chiu 1991) οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα ιδεατό τρένο για να προβλέψουν θεωρητικά την ροή γύρω από αυτό. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται μέθοδοι υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την προσομοίωση της ροής υπό την ύπαρξη ανέμων. Στο παρακάτω γράφημα, για

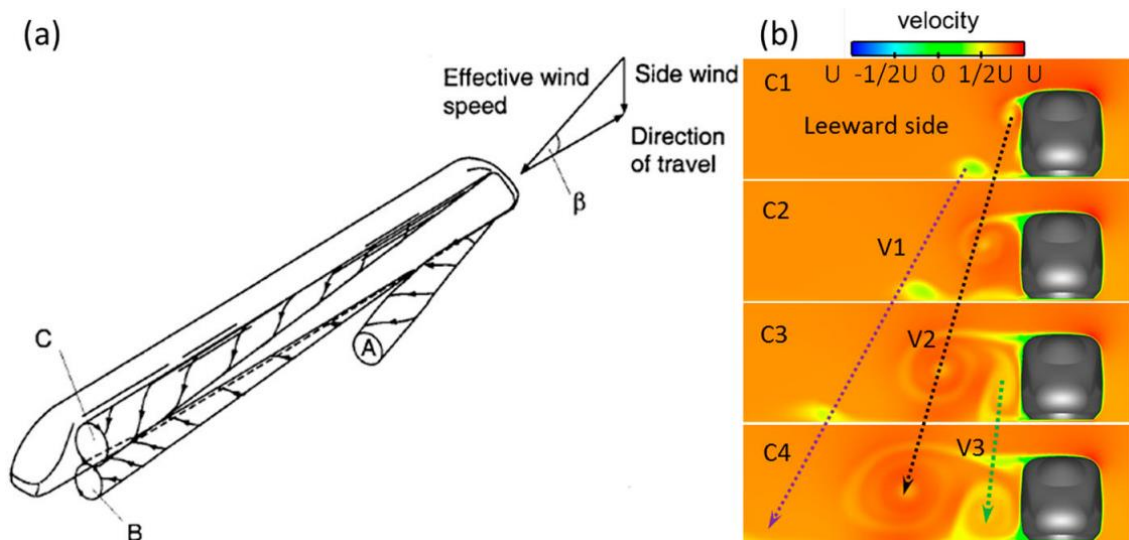


Εικόνα 2-2 Ροή γύρω από τρένο υπό την ύπαρξη ανέμων. Γωνία εκτροπής ($\theta < 45^\circ$). Εικόνα από Copley (1987).

γωνία εκτροπής μικρότερης των 45 μοιρών παρουσιάζεται η δημιουργία ροής σε δύο διαφορετικά σημεία, στην οροφή και στην κάτω περιοχή του τρένου. Όπως είναι αντιληπτό και στις δύο αυτές περιοχές σχηματίζονται δίνες στην επιφάνεια του τρένου. Οι δίνες αυτές αποκολλώνται και στη θέση τους

σχηματίζονται άλλες δίνες. Στους Boccione, Cheli et al. (2008) αναφέρεται πως για γωνία εκτροπής από 60 έως 90 μοίρες δημιουργούνται κεκλιμένες δίνες στην υπήνεμη πλευρά του τρένου. Οι Chiu and Squire (1992) αποδεικνύουν πως για γωνίες εκτροπής μεταξύ 45 και 60 μοιρών εμφανίζεται ένα ενδιάμεσο φαινόμενο των παραπάνω που αναφέρθηκαν.

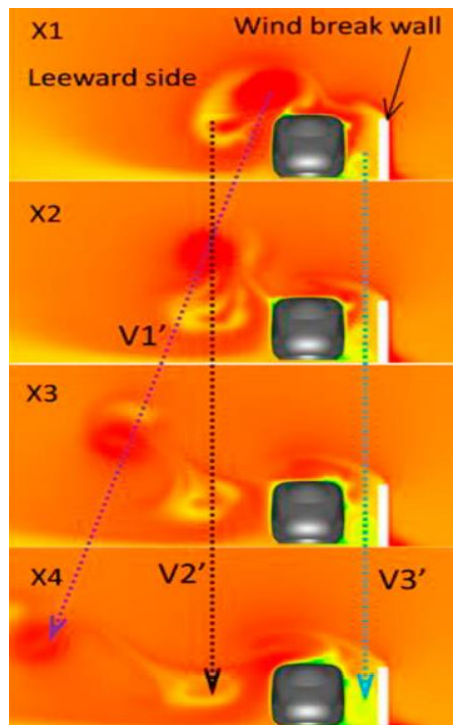
Εικόνα σχηματίζονται τρεις μεγάλες δίνες στην υπήνεμη πλευρά του τρένου. (A, B και C). Η δίνη A δημιουργείται στη χαμηλή υπήνεμη γωνία στη μύτη του τρένου και αποκολλάται γρήγορα. Η δίνη C σχηματίζεται στην επάνω υπήνεμη γωνία ενώ η δίνη B στην κάτω περιοχή όπου αναπτύσσονται και οι δύο σταθερά



Εικόνα 2-3 Σχηματισμός δινών στην υπήνεμη πλευρά τρένου. Εικόνα (a) από Khier, Breuer et al. (2000), εικόνα (b) από Niu, Zhou et al. (2018).

κατά το μήκος του τρένου. Οι V1, V2 και V3 αναπαριστούν τις A, B και C αντίστοιχα. Η δίνη V1 σχηματίζεται πάντα στο έδαφος εξασθενώντας σταδιακά την ένταση της. Η V2 κινείται προς τα κάτω κατά το μήκος του τρένου, προκαλώντας της περιστροφική κίνηση. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε από τους Cheli, Riramonti et al. (2010). Η δημιουργία της δίνης V3 σχηματίζεται κατά τη φάση της C3, στην οποία η δίνη θα απομακρυνθεί με την αύξηση του μήκους του τρένου αλλά η ένταση και το μέγεθος της θα αυξηθεί.

Η ροή του αέρα υπό την ύπαρξη ανεμοφράκτη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η δίνη $V1'$ αναπτύσσεται στη κεφαλή του τρένου και απομακρύνεται κατά το



Εικόνα 2-4 Σχηματισμός δινών υπό την παρουσία ανεμοφράκτη. Εικόνα από Niu, Zhou et al. (2018)

Εικόνα (b), η ταχύτητα της ροής στην υπήνεμη πλευρά του τρένου, υπό την ύπαρξη του ανεμοφράκτη, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή χωρίς τον ανεμοφράκτη. Ο ανεμοφράκτης μειώνει τον αριθμό των δινών στην υπήνεμη πλευρά της αμαξοστοιχίας απομακρύνοντας τας άμεσα.

Οι (Niu, Zhou et al. 2018) εξετάζουν υπολογιστικά την αεροδυναμική των τρένων, υπό την παρουσία ανέμων, με ή χωρίς ανεμοφράκτη. Μελέτησαν τέσσερα πανομοιότυπα τρένα διαφορετικού μήκους και διαφορετικό αριθμό βαγονιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην ουρά επηρεάζονται με το μέγεθος της αμαξοστοιχίας. Χωρίς την ύπαρξη του ανεμοφράκτη, η αύξηση του μήκους του τρένου, αυξάνει την δύναμη οπισθέλκουσας και η συσχέτιση τους είναι γραμμική. Υπό την παρουσία ανεμοφράκτη, η δύναμη οπισθέλκουσας μειώνεται με το μήκος του τρένου.

Επίσης, απέδειξαν πως το μήκος του τρένου επηρεάζει εξίσου σημαντικά την πίεση για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

3 Μεθοδολογία

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού των χαρακτηριστικών της ροής γύρω από ένα κινούμενο σώμα, όπως η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων πραγματικής κλίμακας, μετρήσεις δοκιμών υπό κλίμακα, χρήση αναλυτικών μεθόδων και χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational fluid dynamics). Η αναλυτική μέθοδος είναι δυνατή μόνο για απλές, δισδιάστατες και γραμμικές εφαρμογές. Από την άλλη, τα πειράματα πραγματικής κλίμακας καθιστούν την εφαρμογή τους δύσκολη, χρονοβόρα και οικονομικά ακριβής. Επίσης, τα πειράματα μικρότερης κλίμακας, αν και εφαρμόζονται συχνά από τους μηχανικούς, παρουσιάζουν δυσκολίες και περιορισμούς στην διεξαγωγή τους. Για παράδειγμα, η μέτρηση ταχύτητας ενός τρισδιάστατου πεδίου ροής γύρω από ένα κινούμενο σώμα είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί λόγω περιορισμένων σημείων άντλησης δεδομένων, δηλαδή είναι αδύνατη η μέτρηση της ταχύτητας σε όλο το εύρος της ροής καθώς χρειάζονται άπειρα σημεία για να ληφθούν οι τιμές της. Για τον λόγο αυτόν, η εναλλακτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τρισδιάστατες ροές είναι η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD).

3.1 Υπολογιστική ρευστοδυναμική

Η υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης της ροής των ρευστών, το οποίο παρέχει προσεγγιστικές λύσεις με βάση των θεμελιωδών εξισώσεων που διέπουν τα ρευστομηχανικά φαινόμενα. Μπορεί και αντικαταστεί τις μερικές διαφορικές εξισώσεις με διακριτοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις. Στη συνέχεια, οι αλγεβρικές εξισώσεις αυτές, επιλύονται αριθμητικά ώστε να παρέχονται οι τιμές των ιδιοτήτων του πεδίου ροής σε διακριτά σημεία στο χώρο η και στον χώρο Gerhart, Hochstein et al. (2020).

Στο περιβάλλον ενός κώδικα CFD, προκειμένου να εισαχθούν οι παράμετροι του προβλήματος και να εξεταστούν τα αποτελέσματα, περιλαμβάνονται τρία βασικά στοιχεία: ο προ-επεξεργαστής, ο επιλυτής και ο μετά -επεξεργαστής. Στον προ -επεξεργαστή ορίζεται η γεωμετρία της περιοχής ενδιαφέροντος, δημιουργείται το πλέγμα των κελιών και επιλέγονται τα φυσικά φαινόμενα που χρειάζονται για να μοντελοποιηθούν. Στον επιλυτή υπάρχουν τρεις βασικές κατευθύνσεις στις τεχνικές αριθμητικής επίλυσης, αλλά εμείς θα ασχοληθούμε με την τεχνική των πεπερασμένων όγκων. Στη τεχνική αυτή, πραγματοποιείται η ολοκλήρωση των εξισώσεων που κυβερνούν τη ροή του ρευστού, η διακριτοποίηση- μετατροπή των ολοκληρωτικών εξισώσεων που προκύπτουν σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων και η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με μία επαναληπτική μέθοδο. Τέλος, στον μετά -επεξεργαστή γίνεται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων όπως είναι η παρουσίαση του υπολογιστικού χώρου και του πλέγματος, διανυσματικά γραφήματα 2D και 3D, διαγράμματα επιφανειών διαγράμματα ισοϋψών κτλ. Versteeg and Malalasekera (2007).

3.2 Εξισώσεις Navier-Stokes

Για την πλήρη ανάλυση και περιγραφή της πραγματικής ροής, δηλαδή της τρισδιάστατης ροής ρευστού με τριβή και πεδιακές δυνάμεις, χρησιμοποιούνται εξισώσεις διατήρησης της συνέχειας, της ορμής και της ενέργειας. Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται εξισώσεις Navier-Stokes και περιγράφουν με ακρίβεια όλες τις καταστάσεις ροής από τις πιο απλές, όπως ροή μέσα σε κυλινδρικούς αγωγούς και οριακά στρώματα πάνω σε επίπεδες επιφάνειες (ασυμπίεστη και μόνιμη ροή, χωρίς τριβές) μέχρι και τις πλέον πιο περίπλοκες όπως τυρβώδη ροή μέσα σε στροβιλοκινητήρες (συμπιεστή, μη μόνιμη ροή με ύπαρξη τριβής).

Οι παρακάτω εξισώσεις αναπαριστούν το σύνολο των εξισώσεων Navier-Stokes για την γενική περίπτωση της τρισδιάστατης ροής συμπιεστού ρευστού με τριβή, στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3-1)$$

Εξισώσεις ορμής:

Άξονας x

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \bar{X} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \\ &+ \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3-2)$$

Άξονας y

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \bar{Y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \\ &+ \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3-3)$$

Άξονας z

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \bar{Z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \\ &+ \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3-4)$$

Εξίσωση ενέργειας

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} + \\ &+ uX + vY + wZ + K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \end{aligned} \quad (3-5)$$

Όπου Φ είναι συνάρτηση αναντιστρεπτών απωλειών τριβής και δίνεται από τη σχέση:

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

$$+ \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2$$

3.3 Μοντελοποίηση της τύρβης

Η τύρβη ή αλλιώς τυρβώδη ροή χαρακτηρίζεται από χαοτικές αλλαγές των ιδιοτήτων του ρευστού. Κατά τη τυρβώδη ροή η κατάσταση της κίνησης του ρευστού είναι τυχαία και απρόβλεπτη, ενώ η ταχύτητα και η μεταβολή της πίεσης μεταβάλλονται συνεχώς με το χρόνο. Η τύρβη λαμβάνει χώρα σε μεγάλους αριθμούς Reynolds και η εμφάνιση της έχει να κάνει με την αύξηση της κινητικής ενέργειας στην ροή του ρευστού όπου οι δυνάμεις αδράνειας υπερνικούν τις δυνάμεις ιξώδους του ρευστού με αποτέλεσμα η ροή από στρωτή να μετατραπεί σε τυρβώδεις. Καθώς η τύρβη εμφανίζεται τυχαία στον χώρο και στον χρόνο δύσκολα μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια, παρά μόνο με κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης της τύρβης.

Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν και θα αναλυθούν τα **RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes)** μοντέλα τύρβης, ωστόσο αξίζει να αναφερθούν και τα :

- μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων δινών **LES (Large Eddy Simulation)** που επιλύουν μεγάλες κλίμακες τύρβης
- μοντέλο άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης **DNS (Direct Numerical Simulation)**, το οποίο είναι ένα είδος προσομοίωσης της δυναμική των ρευστών που υπολογίζει τη μέση ροή και όλες τις διακυμάνσεις της τυρβώδους ταχύτητας. Επιλύεται όλο το φάσμα των χώρο-χρονικών

κλιμάκων από κλίμακες μήκους Kolmogorov μέχρι την ολοκληρωτική κλίμακα L .

- ο **Μοντέλα DES (Detached Eddy Simulation)**, το οποίο αποτελεί ένα υβριδικό συνδυασμό των LES και RANS μοντέλων που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο παραπάνω, δηλαδή την επίλυση των μεγάλων τυρβωδών δομών (LES) και την επίλυση των μικρότερων κλιμάκων (RANS)

3.4 Μοντέλα τύρβης για εξισώσεις RANS

Τα RANS μοντέλα τύρβης έχουν τη δυνατότητα να τροποποιούν τις αρχικές ασταθείς εξισώσεις Navier-Stokes εισάγοντας μέσες και κυμαινόμενες επιπρόσθετες ποσότητες ώστε να παραχθούν οι ευσταθείς Reynolds- Averaged Navier Stokes Εξισώσεις. Σκοπός της τροποποίησης αυτής είναι ο διαχωρισμός των χρονικών εξαρτώμενων διακυμάνσεων της ταχύτητας από την μέση ταχύτητα της ροής. Με αυτόν τον τρόπο οι RANS εξισώσεις αντιπροσωπεύουν μόνο τις κύριες ποσότητες της ροής. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο, εμφανίζονται νέοι όροι οι οποίοι μοντελοποιούνται με κλασικά μοντέλα τύρβης, όπως το μοντέλο $k-\omega$ που θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα εργασία Alfonsi (2009).

Τα RANS μοντέλα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες και σε ορισμένες υποκατηγορίες και ενδεικτικά είναι :

- A. Γραμμικά μοντέλα ιξώδους δινών (Linear Eddy viscosity models)
 - 1) Αλγεβρικά μοντέλα (Algebraic models)
 - 2) Μοντέλα μίας εξίσωσης (One equation models)
 - 3) Μοντέλα δύο εξισώσεων (Two equation models)
- B. Μη γραμμικά μοντέλα ιξώδους δινών (Nonlinear eddy viscosity models)
 - 1) v_2 -f model
 - 2) zeta-f model
- C. Μοντέλο τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Model)

4 Ροή ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο ερευνάτε η ροή γύρω από μία απλοποιημένη μηχανή έλξης, ενός εμπορικού τρένου, χρησιμοποιώντας την προσομοίωση RANS. Στο παρών κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί αρχικά η προ-επεξεργασία (pre-processing) του προβλήματος, δηλαδή η δημιουργία της γεωμετρίας τόσο της μηχανής έλξης όσο και του υπολογιστικού χωρίου, το πλέγμα και η εισαγωγή των οριακών συνθηκών και έπειτα θα επιτευχθεί η μετά-επεξεργασία (post-processing) δηλαδή η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους.

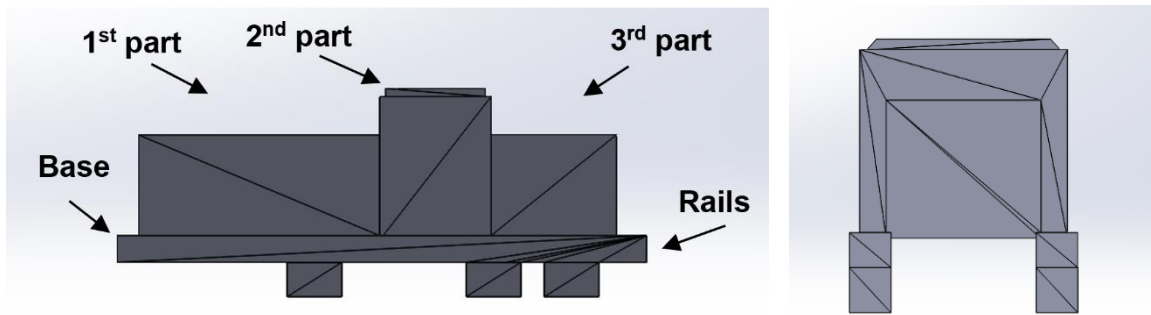
4.1 Γεωμετρία μηχανής έλξης

Το πρότυπο της μηχανής έλξης είναι από το εμπορικό τρένο DHG 700 Diesel (Εικόνα 4-1) και η απλοποιημένη της γεωμετρία (Εικόνα 4-2) χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-2 η μηχανή έλξης αποτελείται από πέντε διαφορετικές γεωμετρίες και για την διευκόλυνση των σχολιασμών σε επόμενο υπό κεφάλαιο είναι συνετό να δοθούν για την κάθε αποτελούμενη γεωμετρία οι εξής ονομασίες: πρώτο μέρος (1st part), δεύτερο μέρος (2nd part), τρίτο μέρος (3rd part), η βάση (base) και οι τροχοί (rails).



Εικόνα 4-1 Πρότυπη γεωμετρία της μηχανής έλξης

Οι διαστάσεις της μηχανής πραγματικής κλίμακας, έχει συνολικό ύψος $H=3.74$ μέτρα, μήκος $L= 9.8$ μέτρα και πλάτος $W=3.43$ μέτρα. Οι διαστάσεις για το κάθε μέρος της γεωμετρίας παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 4-1 προς τον λόγο του συνολικού ύψους της μηχανής έλξης.



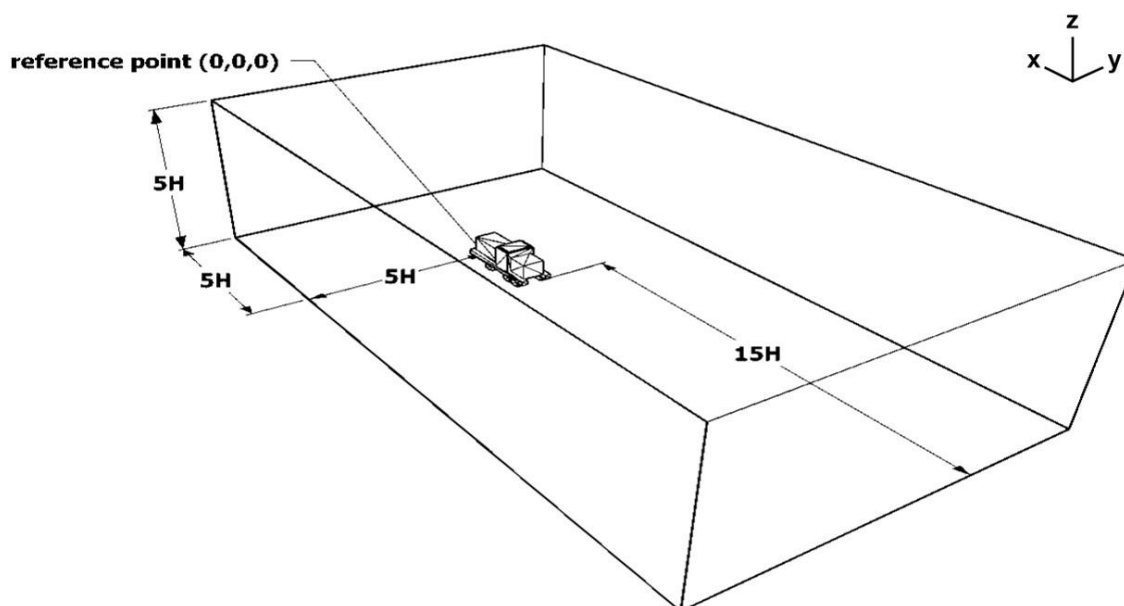
Εικόνα 4-2 Απλοποιημένη γεωμετρία της μηχανής έλξης

Parts	Height/H	Length/H	Width/H
1st part	0,484	1,19	0,620
2nd part	0,706	0,55	0,834
3rd part	0,484	0,62	0,620
Base	0.128	2,62	0,168
Rails	0.166	0,27	0,168

Πίνακας 4-1 Διαστάσεις των μερών της μηχανής έλξης

4.2 Υπολογιστικό χωρίο μηχανής έλξης case 1

Το υπολογιστικό χωρίο (domain) είναι ένα τμήμα του χώρου στο οποίο υπολογίζεται η λύση της προσομοίωσης CFD και οι διαστάσεις του εξαρτώνται από τη γεωμετρία του υπό εξεταζόμενου σώματος. Στον χώρο αυτόν ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος και δημιουργείται το πλέγμα όπου θα επιλύσει τις εξισώσεις που διέπουν την ροή. Στην Εικόνα 4-3 παρουσιάζονται οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου ως αναλογία του συνολικού ύψους (H) της μηχανής έλξης και επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η ροή γύρω από το εξεταζόμενο σώμα. Η απόσταση από το σημείο αναφοράς (0,0,0) έως τη μπροστινό οριακό σύνορο είναι πέντε ύψη (5H) και το ύψος του υπολογιστικού χωρίου παρουσιάζει εξίσου πέντε ύψη (5H). Οι αποστάσεις από το σημείο αναφοράς δεξιά και αριστερά της μηχανής έλξης είναι επίσης 5 ύψη (5H) και από το τέλος της γεωμετρίας έως το τέλος του χωρίου η απόσταση υφίσταται στα δεκαπέντε ύψη (15H).



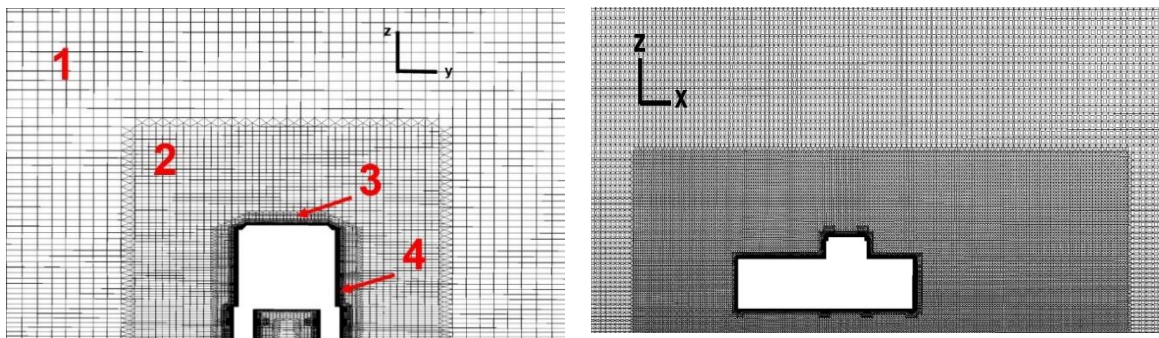
Εικόνα 4-3 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου 1^{ης} περίπτωσης (case1)

4.3 Υπολογιστικό πλέγμα case 1

Η προσεγγιστική λύση των μη γραμμικών συστημάτων διαφορικής η ολοκληρωματικής μορφής επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της διακριτοποίησης. Η διακριτοποίηση μετατρέπει τα παραπάνω συστήματα σε συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων και η προσέγγιση της αριθμητικής λύσης εφαρμόζεται σε ορισμένα σημεία η σε ορισμένες διακριτικές περιοχές με αποτέλεσμα να δημιουργείται το αριθμητικό-υπολογιστικό πλέγμα (grid or mesh). Η διαδικασία της διακριτοποίησης εφαρμόζεται στον χρόνο και στον χώρο και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την πυκνότητα του πλέγματος, τις ιδιότητες του αλγορίθμου και από το αριθμητικό σχήμα της διακριτοποίησης.(Ferziger, Perić et al. 2002)

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι διακριτοποίησης αλλά στη παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων στην οποία χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μορφή των νόμων διατήρησης. Ο χώρος στον οποίον υπολογίζεται η ροή αριθμητικά διαιρείται σε ένα πεπερασμένο αριθμό όγκων στους οποίους διακριτοποιούνται οι εξισώσεις από την ολοκλήρωση των νόμων διατήρησης.(Moukalled, Mangani et al. 2016)

Το υπολογιστικό πλέγμα της συγκεκριμένης εργασίας δημιουργήθηκε μέσω του εργαλείου snappyHexmesh του OpenFoam το οποίο αναπτύσσει αδόμητο πλέγμα. Το εργαλείο αυτό πυκνώνει τα υπολογιστικά κελιά γύρω από τη μηχανή έλξης (όγκος 2) και στη συνέχεια πυκνώνει ακόμα περισσότερο τις περιοχές κοντά στην επιφάνεια της γεωμετρίας (όγκος 3, ;4). Στην Εικόνα 4-4 παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα για την περίπτωση της ροής ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης χωρίς πλάγιους ανέμους και αποτελείται από περίπου 3.500.000 κελιά. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα δημιουργούνται τέσσερις διαφορετικές πυκνώσεις γύρω από την εξεταζόμενη γεωμετρία και αριθμούνται από την αραιότερη (1) έως την πυκνότερη (4).



Εικόνα 4-4 Υπολογιστικό πλέγμα 1ης περίπτωσης (case1)

4.4 Οριακές συνθήκες case 1

Για την επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αρχικών και των οριακών συνθηκών. Στο υπολογιστικό χωρίο της παρούσας εργασίας αποδίδονται αριθμητικές τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών στην είσοδο, και καθορίζονται συνθήκες ροής στην έξοδο, στα οριακά σύνορα του υπολογιστικού πεδίου και στην επιφάνεια της μηχανής έλξης.

Τα μεγέθη ενδιαφέροντος που θα σχολιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο είναι η πίεση (P), η ταχύτητα (U), η τυρβώδης κινητική ενέργεια (k) και ο ειδικός ρυθμός καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή omega). Στην είσοδο του πεδίου ροής (velocity inlet) έχει καθοριστεί η ταχύτητα ίση με $U=20$ m/s και στην έξοδο της ροής η σχετική πίεση ισούται με μηδέν. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια

εισήχθη στην επιφάνεια της μηχανής έλξης και στο έδαφος με τιμή 0,06 (m²/s²) που υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$k = \frac{3}{2}(IU_m)^2 \quad (4-1)$$

όπου U_m είναι η ταχύτητα 20 m/s και I είναι η ένταση της τύρβης (στην παρούσα εργασία έχει οριστεί I=0,01). Το ω ή omega έχει λάβει τη τιμή 1,71 (s⁻¹) και υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{0.07HC_\mu^{1/4}} \quad (4-2)$$

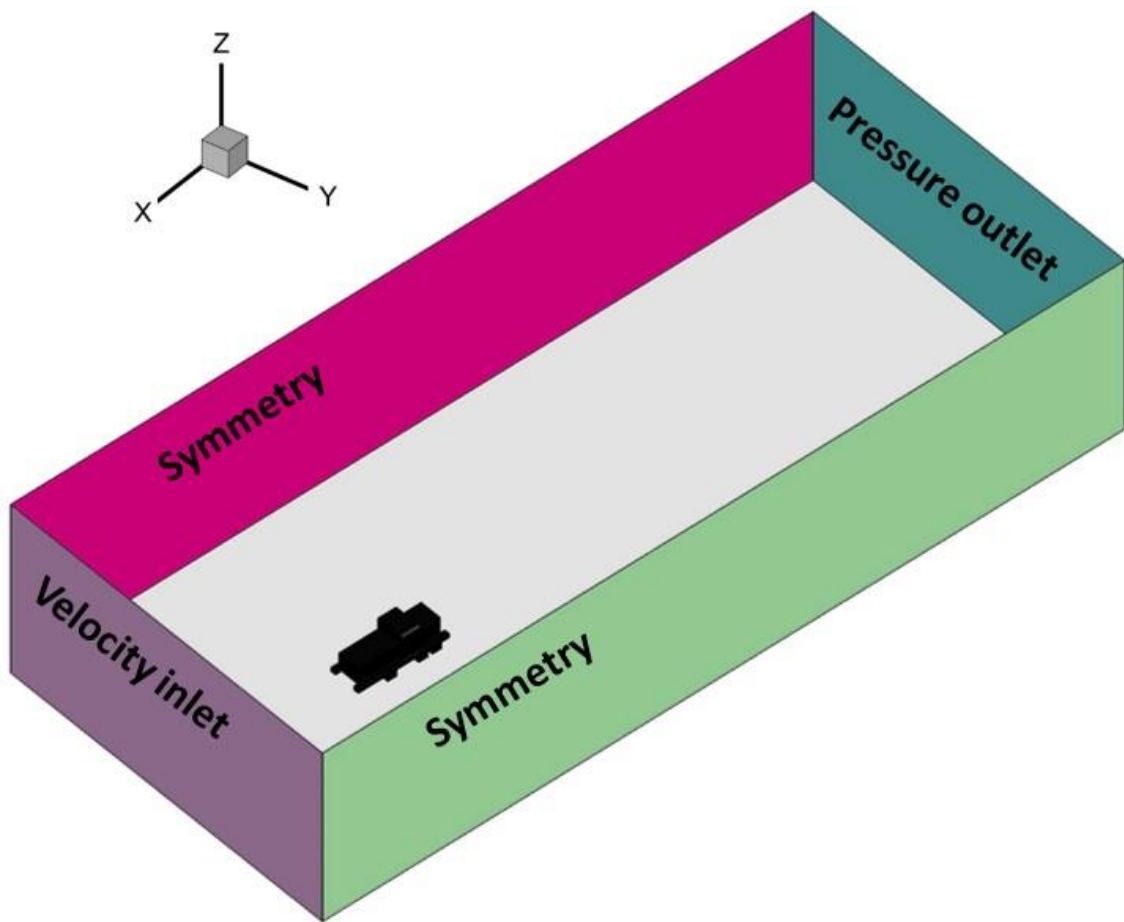
όπου k η τυρβώδης κινητική ενέργεια, H το ύψος της μηχανής έλξης και C_μ είναι εμπειρικός συντελεστής ίσος με 0,09.

Ο αριθμός Reynolds είναι 5*10⁶ και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$Re = \frac{\rho U_m H}{\eta} \quad (4-3)$$

όπου U_m η ταχύτητα 20m/s, ρ η πυκνότητα του αέρα ίση με 1,225kg/m³ και η το δυναμικό ιξώδες ίσο με 1,83*10⁻⁵ Pa*s.

Στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζεται η οριακή συνθήκη σε κάθε σύνορο του πεδίου ροής. Στην είσοδο του πεδίου (Velocity inlet) εισάγεται η ταχύτητα του ανέμου ώστε να προσομοιωθεί η κίνηση της μηχανής έλξης, στο έδαφος ορίζεται ταχύτητα ίση με αυτή στην είσοδο ενώ στην επιφάνεια της γεωμετρίας λαμβάνεται συνθήκη μη ολίσθησης (no-Slip condition). Τέλος το δεξί, το αριστερό και το άνω σύνορο έχουν λάβει συνθήκη συμμετρίας (Symmetry) δηλαδή η μεταβολή της παράλληλης συνιστώσας της ταχύτητας, της κινητικής ενέργειας της τύρβης και του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας στον κατακόρυφο άξονα θα είναι 0 και η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας θα παραμένει 0.

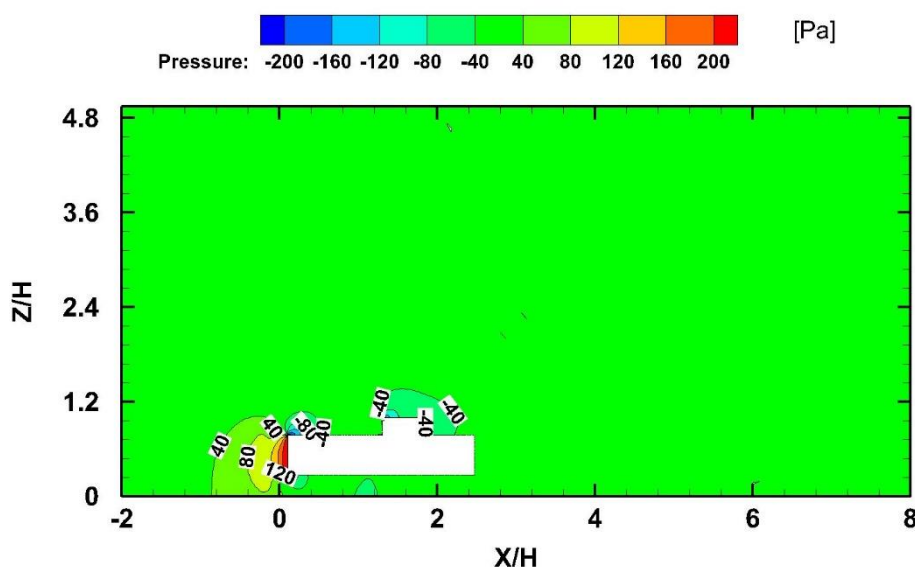


Εικόνα 4-5 Οριακές συνθήκες στα σύνορα του υπολογιστικού χωρίου 1^{ης} περίπτωσης (case 1)

4.5 Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 4-6 παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης γύρω από τη μηχανή έλξης στο επίπεδο συμμετρίας. Στο ρύγχος του σώματος η πίεση είναι αρκετά μεγάλη λόγω της πρόσκρουσης της ροής στη γεωμετρία του. Ωστόσο στην

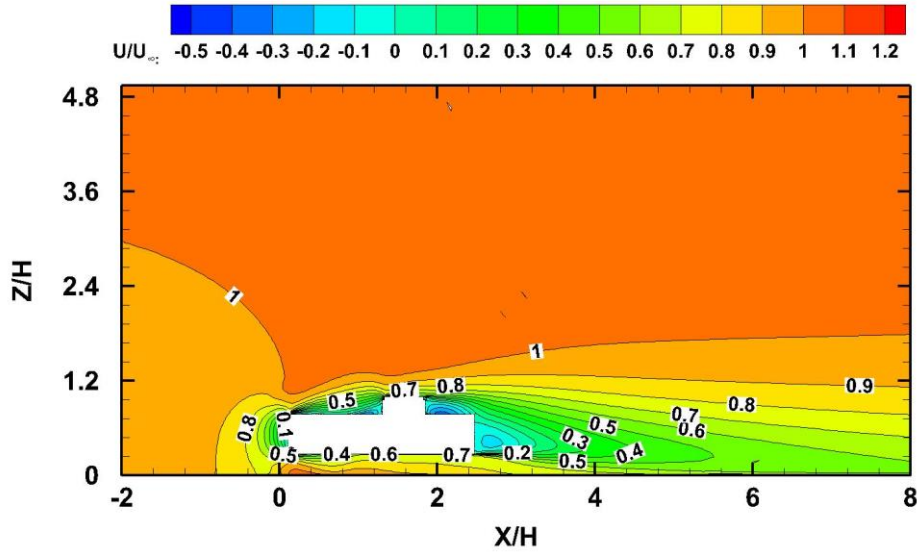
επάνω και κάτω άκρη του ρύγχους οι τιμές πίεσης αποκτούν αρνητική τιμή. Το ίδιο συμβαίνει στην επάνω άκρη της δεύτερης γεωμετρίας καθώς και στην κάτω επιφάνεια της μηχανής έλξης, στη θέση $X/H=1$. Παρατηρώντας την Εικόνα 4-7, στις θέσεις που εμφανίζονται αρνητικές πιέσεις, δημιουργείται στένωση της ροής. Στη στένωση οι τιμές των ταχυτήτων αυξάνονται και η τιμές των πιέσεων μειώνονται (Elger, LeBret et al. 2020).



Εικόνα 4-6 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της κατανομής των πιέσεων στο επίπεδο συμμετρίας για την 1^η περίπτωση (case 1)

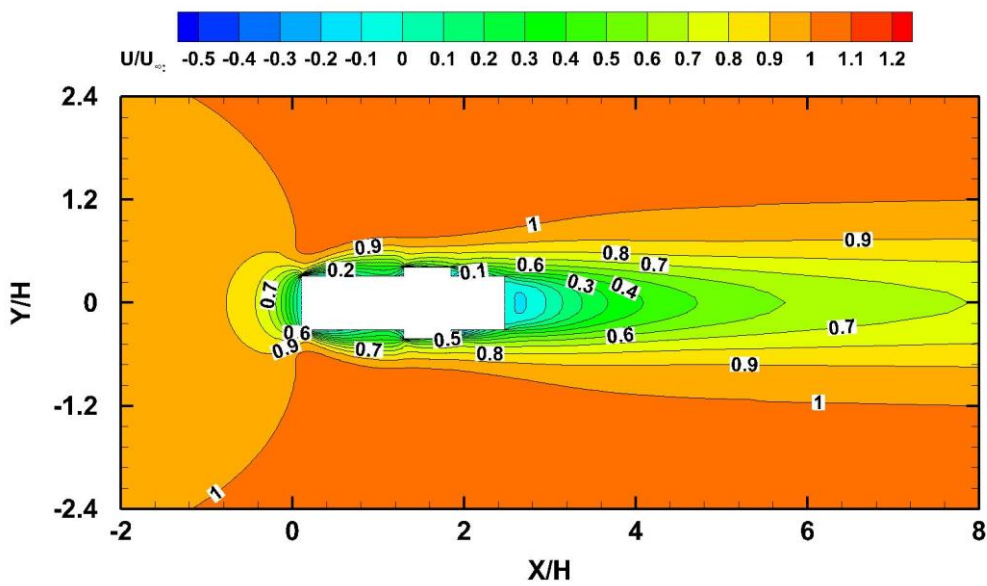
Στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζονται οι μέσες αδιάστατες τιμές των ταχυτήτων του αέρα γύρω από τη μηχανή έλξης στο επίπεδο συμμετρίας. Όπως παρατηρείται, στο ρύγχος της μηχανής παρουσιάζεται μια περιοχή με διαφορετικές τιμές ταχυτήτων, η οποία οφείλεται στην πρόσκρουση της ροής με την γεωμετρία του σώματος. Κατά μήκος της μηχανής έλξης αναπτύσσεται το οριακό στρώμα το οποίο, στην επάνω επιφάνεια, παρουσιάζει σχετικά μεγάλο οριακό πάχος. Αντιθέτως στην κάτω επιφάνεια του σώματος το πάχος του οριακού στρώματος είναι μικρό. Επίσης σε κάποια σημεία της επιφάνειας κατόντη της ροής οι ταχύτητες αποκτούν αρνητικές τιμές λόγω της ανακυκλοφορίας που δημιουργείται. Η απεικόνιση των δινών θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο μαζί με

τον σχολιασμός τους. Τέλος παρουσιάζεται το εύρος ταχυτήτων στο απόρρευμα της μηχανής έλξης.



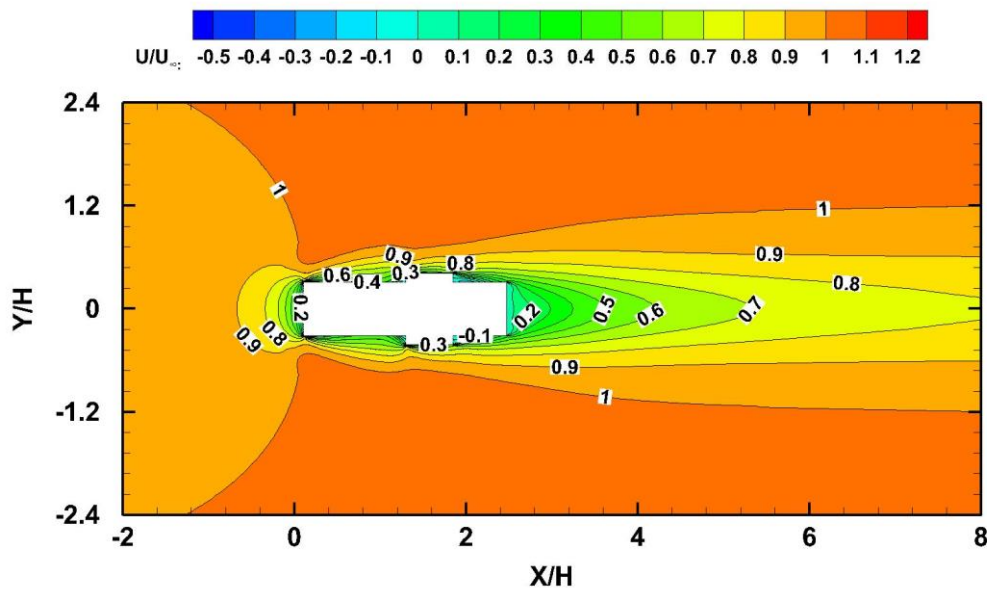
Εικόνα 4-7 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

Στην

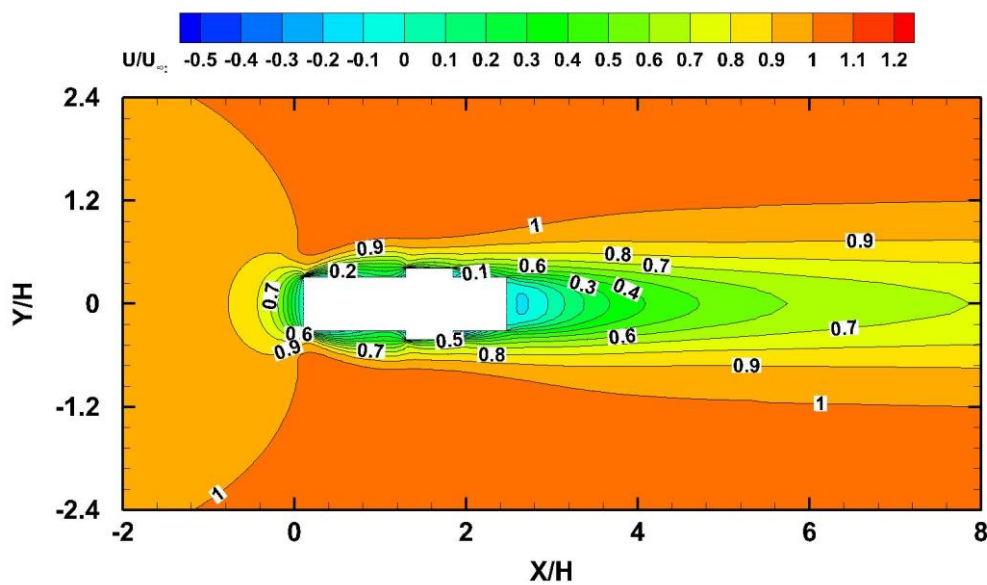


Εικόνα

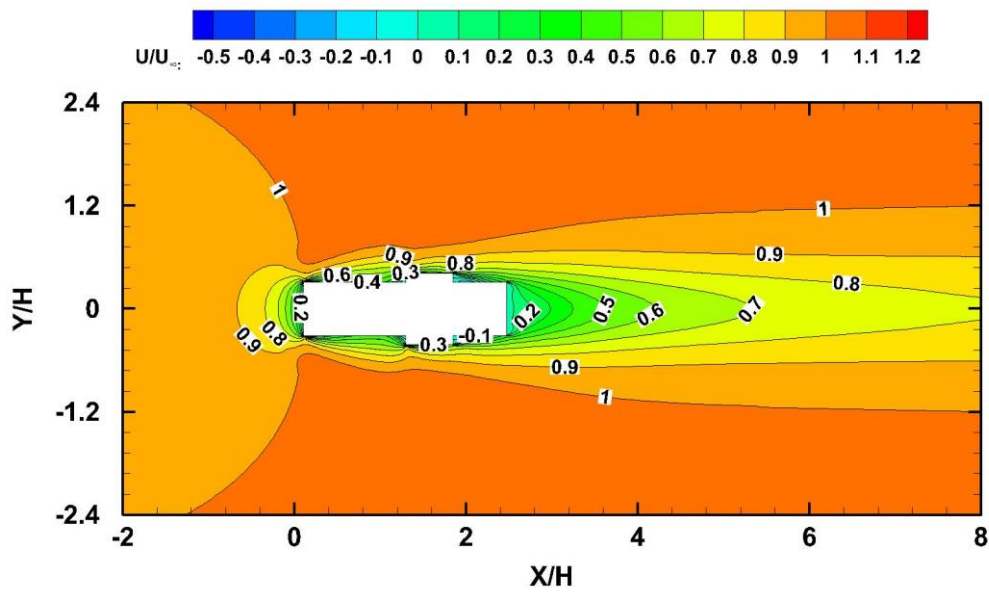
4-8και



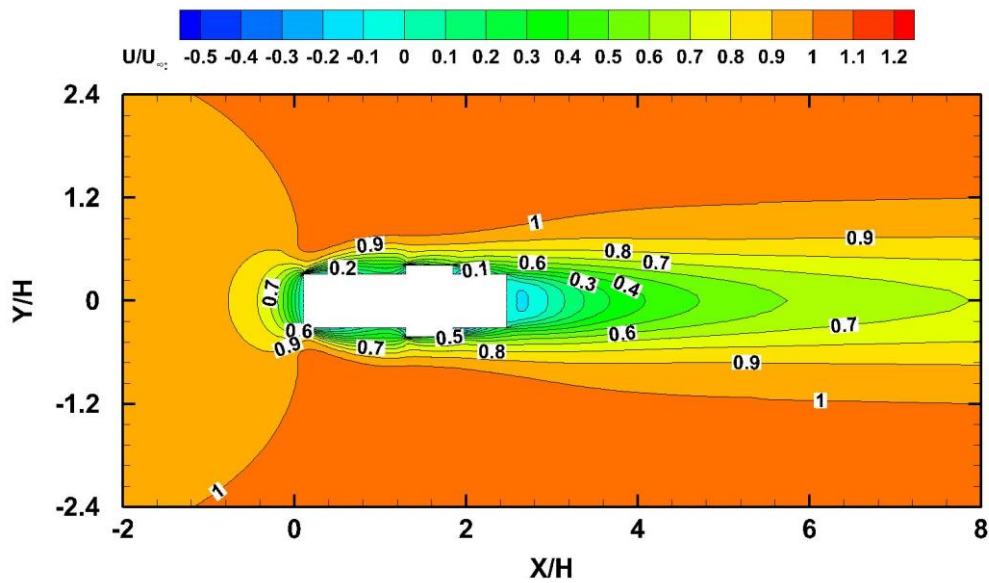
Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται η ροή γύρω από τη μηχανή έλξης στο επίπεδο $Z=1,87$ μέτρα, δηλαδή στο ήμισυ του ύψους ($Z/H=0,5$) και στο επίπεδο $Z=2,8$ μέτρα το οποίο είναι τα $3/4$ του συνολικού ύψους ($Z/H=0,75$). Στο ρύγχος της γεωμετρίας εμφανίζεται η ίδια τοξοειδής περιοχή που αναφέραμε προηγουμένως λόγω ανακοπής της ροής. Κατά μήκος του σώματος δημιουργείται το οριακό στρώμα, το οποίο και στα δύο επίπεδα ροής δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Στο απόρευμα της



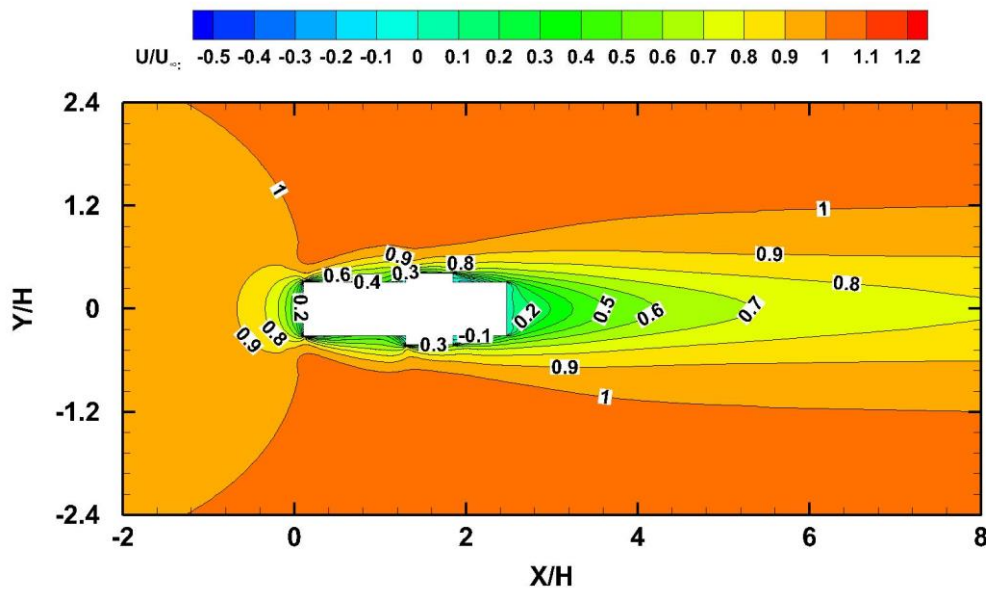
Εικόνα 4-8 και κοντά στη γεωμετρία του σώματος εμφανίζεται μεγαλύτερο εύρος αρνητικών τιμών ταχυτήτων σε σχέση με την



Εικόνα 4-9 διότι χαμηλά στο έδαφος δημιουργούνται οι δίνες με αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερες αρνητικές τιμές ταχύτητας στα χαμηλά επίπεδα της ροής.

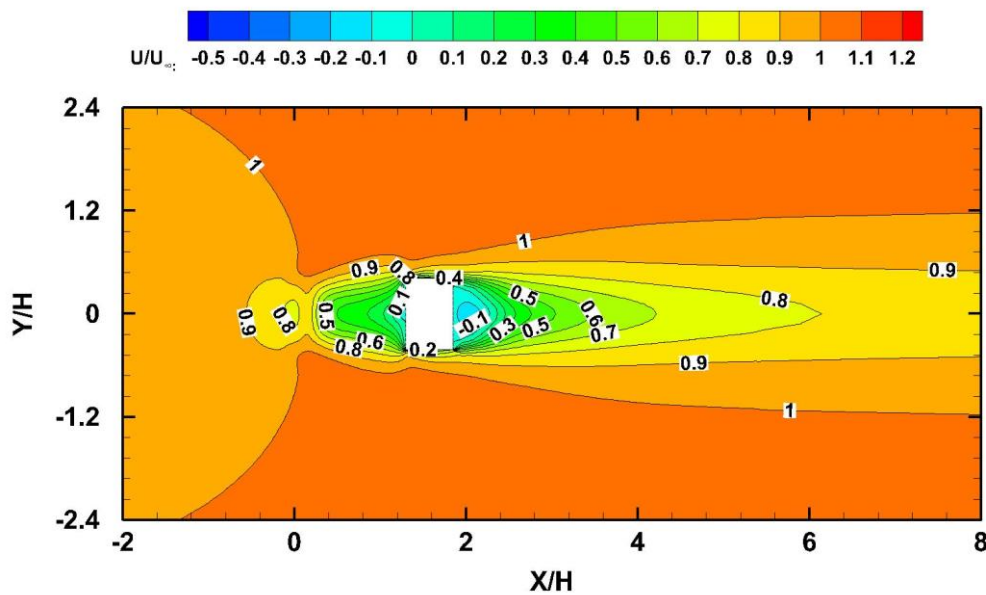


Εικόνα 4-8 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο $Z/H=0,5$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)



Εικόνα 4-9 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1ής περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο $Z/H=0,75$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

Το επίπεδο ροής που εμφανίζεται στην Εικόνα 4-10 αφορά το επίπεδο $Z/H=0,9$ είναι δηλαδή η ροή λίγο επάνω από την επιφάνεια του πρώτου και του τρίτου μέρους της μηχανής έλξης. Στο επίπεδο $Z/H=0,9$ γίνεται αντιληπτή μόνο η γεωμετρία του δεύτερου μέρους της μηχανής έλξης ωστόσο εμφανίζεται η ανακοπή της ροής από τη πρόσκρουση της δεύτερης γεωμετρίας της. Κατά μήκος του άξονα X/H εμφανίζεται ένα οριακό στρώμα ανάντη του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας, το οποίο είναι το οριακό στρώμα που σχηματίζεται στην επιφάνεια του πρώτου μέρους. Κατάντη του δεύτερου μέρους δημιουργείται το απόρευμα στο οποίο απεικονίζονται αρνητικές τιμές ταχυτήτων λόγω σχηματισμού των δινών..



Εικόνα 4-10 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 1^{ης} περίπτωσης (case 1) στο επίπεδο $Z/H=0,9$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

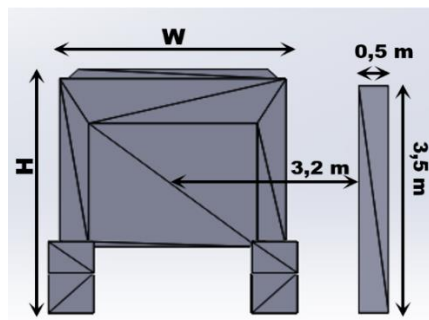
Η κατανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης (k) εμφανίζεται στην παρακάτω Εικόνα 4-11. Όπως γίνεται αντιληπτό μεγάλη τυρβώδη κινητική ενέργεια δημιουργείται στο ρύγχος της γεωμετρίας του σώματος στην οποία περιοχή γίνεται η ανακοπή της ροής. Φαίνεται επίσης πως το k διαχωρίζεται στην επάνω και στην κάτω επιφάνεια του ρύγχους. Κατά μήκος του X/H και στην κάτω περιοχή της μηχανής έλξης η κινητική ενέργεια της τύρβης μειώνεται σχετικά πιο γρήγορα από ότι στην πάνω περιοχή. Στην οροφή της μηχανής έλξης το k φαίνεται να είναι σταθερό μέχρι το σημείο $X/H \approx 1,2$, στο οποίο σημείο αυξάνεται απότομα λόγω ανακοπής της ροής με τη δεύτερη γεωμετρία και στη συνέχεια μειώνεται εξίσου απότομα.

5 Ροή ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης με γωνία εκτροπής και παρουσία ανεμοφράκτη

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η 1^η περίπτωση (case 1) κατά την οποία το τρένο που βρίσκεται σε κίνηση δεν επηρεάζεται από πλευρικούς ανέμους ενώ στο παρών κεφάλαιο μελετάται η 2^η περίπτωση (case2), δηλαδή το τρένο που βρίσκεται σε κίνηση επηρεάζεται από δυνατούς πλευρικούς ανέμους και η 3^η περίπτωση (case 3) κατά την οποία το τρένο που βρίσκεται σε κίνηση επηρεάζεται από πλευρικούς ανέμους με την ύπαρξη ανεμοφραχτή. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί είναι παρόμοια με την 1^η περίπτωση (case 1), δηλαδή θα πραγματοποιηθεί η προ επεξεργασία του προβλήματος (γεωμετρίας, υπολογιστικό χωρίο, πλέγμα, οριακές συνθήκες) και θα αναλυθεί η μετά επεξεργασίας (σχολιασμός και παρουσίαση αποτελεσμάτων).

5.1 Εξεταζόμενη γεωμετρία

Η μηχανή έλξης παραμένει ίδια στις διαστάσεις και στη κλίμακα της 1^{ης} περίπτωσης (case 1) με τη μόνη διαφορά της προσθήκης της γεωμετρίας του ανεμοφράκτη.



Εικόνα 5-1 Διαστάσεις μηχανής έλξης και του ανεμοφράκτη

Από το κέντρο της μηχανής έλξης έως τον ανεμοφράκτη η απόσταση υφίσταται στα 3.2 μέτρα και οι διαστάσεις του ανεμοφράκτη είναι οι εξής: ύψος $h=3.5$ m, μήκος $l=9.7$ m και πλάτος $w=0.5$ m. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις διαστάσεις του ανεμοφράκτη προς το συνολικό ύψος της μηχανής έλξης (H).

Dimensions	h/H	l/H	w/H
------------	-------	-------	-------

windbreak	0.94	2.59	0.13
-----------	------	------	------

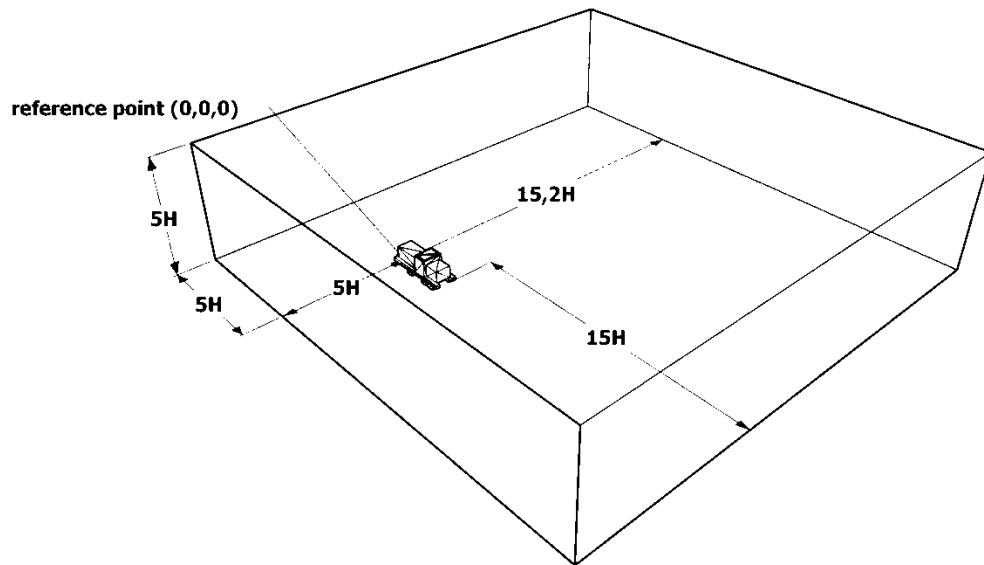
Πίνακας 5-1 : Διαστάσεις του ανεμοφράκτη

5.2 Υπολογιστικό χωρίο

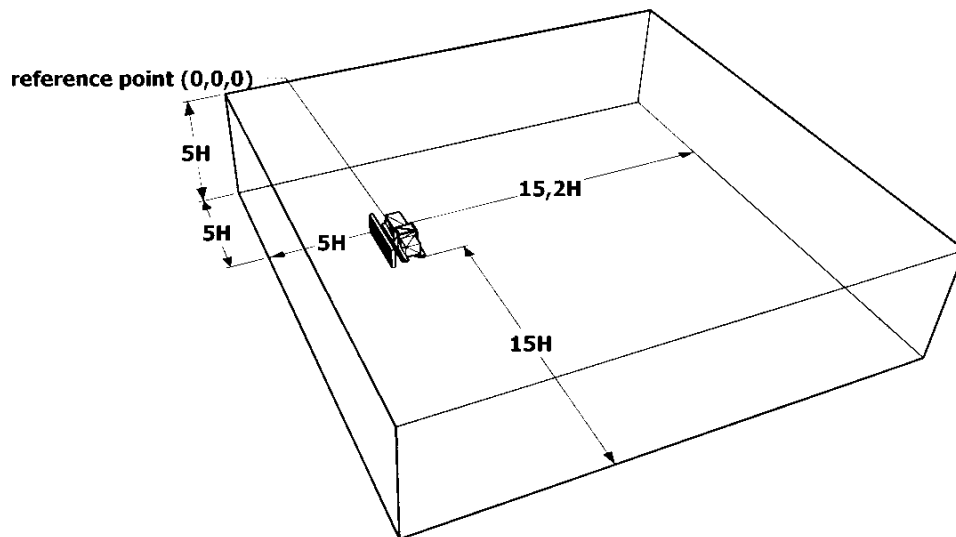
Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο το υπολογιστικό χωρίο έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε να διασφαλίζεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Στις δύο περιπτώσεις της ροής που μελετώνται περίπτωση 2^η και 3^η (case 2, case 3) το σημείο αναφοράς τους είναι το ίδιο και το υπολογιστικό χωρίο περιλαμβάνει τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις. Οι διαστάσεις αυτές παρουσιάζονται ως αναλογία του ύψους της μηχανής έλξης (H).

Στην είσοδο της ροής (velocity inlet) η απόσταση μεταξύ του σημείου αναφοράς (reference point) και της εισόδου είναι πέντε ύψη (5H). Από το σημείο αναφοράς έως το αριστερό σύνορο η απόσταση περιλαμβάνει πέντε ύψη (5H) ενώ η απόσταση από τα δεξιά είναι 15,2 ύψη (15,2H). Η απόσταση από το τέλος της μηχανής έλξης έως την έξοδο είναι δεκαπέντε ύψη ενώ το ύψος του υπολογιστικού χωρίου περιλαμβάνει πέντε ύψη (5H).

Η Εικόνα 5-2 και Εικόνα 5-3 παρουσιάζουν τις διαστάσεις των υπολογιστικών χωρίων των υπο εξεταζόμενων περιπτώσεων και αναφέρεται ξανά πως στη περίπτωση της παρουσίας του ανεμοφράκτη (case 3) η απόσταση του σημείου αναφοράς έως τον ανεμοφράκτη είναι 3,2 μέτρα.



Εικόνα 5-2 Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου περίπτωση 2^η (case 2)

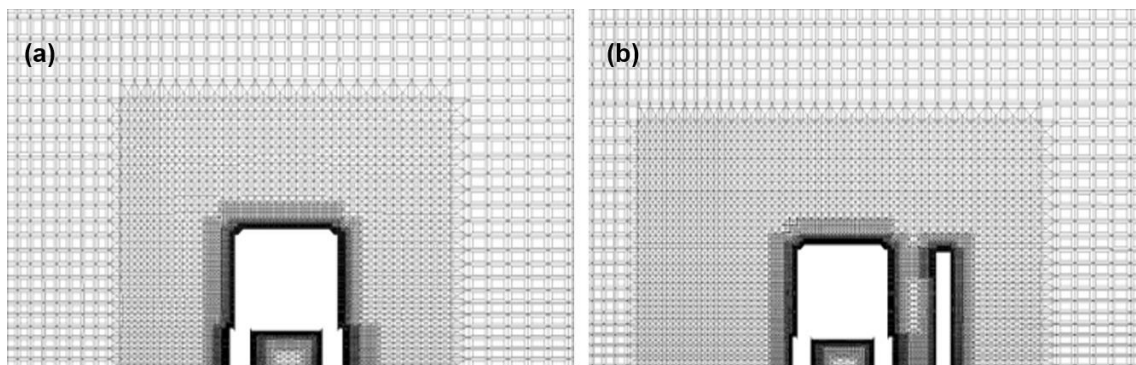


Εικόνα 5-3 Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου περίπτωση 3^η (case 3)

5.3 Υπολογιστικό πλέγμα

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκε ο ορισμός του υπολογιστικού πλέγματος, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση του πλέγματος και το υπολογιστικό εργαλείο για τη δημιουργία του. Η ίδια μέθοδος, με την πρώτη περίπτωση της ροής, χρησιμοποιείται και για τις δύο παρούσες περιπτώσεις της ροής

Πριν τη κατασκευή του πλέγματος είναι απαραίτητος ο εντοπισμών των περιοχών όπου απαιτείται πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος. Στη παρακάτω Εικόνα 5-4 εμφανίζεται πυκνότερο πλέγμα κοντά στη γεωμετρία της μηχανής έλξης και του ανεμοφράκτη. Και στις δύο περιπτώσεις η πύκνωση έγινε από το εργαλείο snappyHexmesh του OpenFoam. Το υπολογιστικό πλέγμα της δεύτερης και της τρίτης περίπτωσης της ροής αποτελείται από περίπου 3.600.000 και 3.700.000 κελία αντίστοιχα.



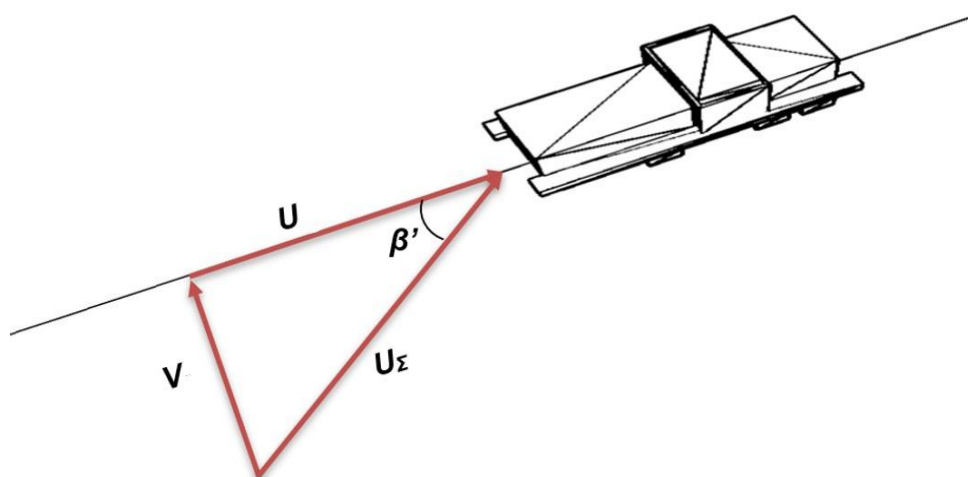
Εικόνα 5-4 υπολογιστικό πλέγμα (a) case 2, (b) case 3

5.4 Οριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο οι οριακές συνθήκες είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της λύσης του προβλήματος. Τα μεγέθη που θα διερευνηθούν και θα σχολιαστούν στη συνέχεια είναι τα ίδια με αυτά της πρώτης περίπτωσης της ροής και είναι η πίεση (P) η ταχύτητα (U), η τυρβώδης

κινητικής ενέργειας (k) και ο ειδικός ρυθμός καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή ω omega).

Στις περιπτώσεις που μελετάμε η κίνηση του τρένου είναι $U = 20$ m/sec και προσομοιώνεται με την είσοδο μιας σταθερής ταχύτητας στην είσοδο που υπολογιστικού πεδίου στην διεύθυνση του άξονα x . Ο πλευρικός άνεμος προσομοιώνεται με μια σταθερή ταχύτητα $V = 10$ m/sec στην εισόδο του υπολογιστικού πεδίου κατά την διεύθυνση του άξονα y . Σε αυτή τη περίπτωση είναι αναγκαία η σύνθεση των δύο κάθετων ταχυτήτων για την εύρεση της συνισταμένης της ταχύτητας U_{Σ} και της γωνίας εκτροπής β' . Η μέθοδος της σύνθεσης των δύο ταχυτήτων ροής χρησιμοποιείται ευρέως για τη προσωμοίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός τρένου (Suzuki, Tanemoto et al. 2003, Baker 2010, Cheli, Ripamonti et al. 2010).



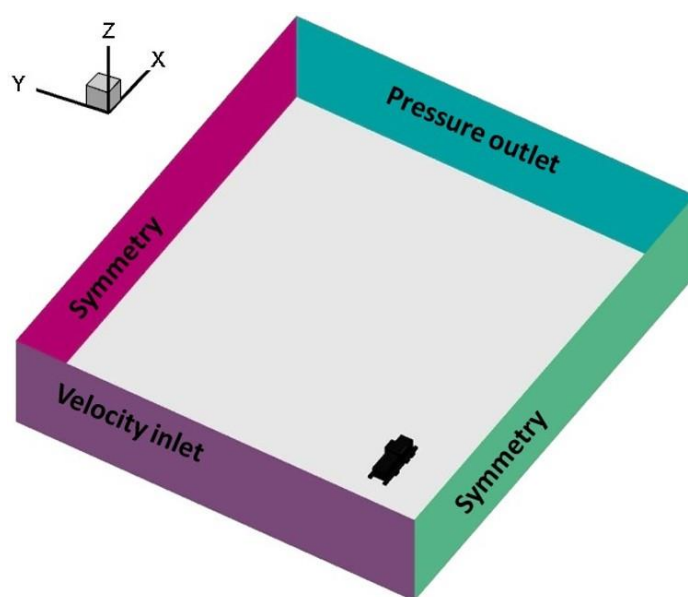
Εικόνα 5-5 Σύνθεση ταχυτήτων και γωνία εκτροπής

Στην Εικόνα 5-5 παρουσιάζονται οι συνιστώσες των ταχυτήτων (U , V , U_{Σ}) και η γωνία εκτροπής β' . Από το παραπάνω τρίγωνο που σχηματίζεται γίνεται εύκολος ο υπολογισμός της συνισταμένης ταχύτητας της οποίας η τιμή είναι $U_{\Sigma} = 22.36$ m/s ενώ της γωνίας εκτροπής είναι $\beta' = 30^{\circ}$.

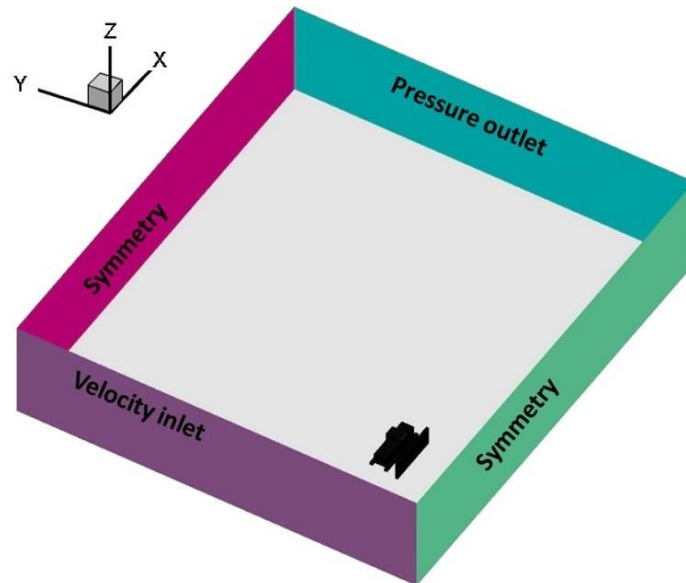
Ο αριθμός Reynolds είναι ίδιος με την πρώτη περίπτωση και ίσος με $5 \cdot 10^6$.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια k και ο ρυθμός καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας ω έχουν τις ίδιες τιμές με την πρώτη περίπτωση της ροής.

Τέλος παρατίθενται οι οριακές συνθήκες στα οριακά σύνορα των υπολογιστικών χωρίων οι οποίες είναι ίδιες στις δύο περιπτώσεις ροής που εξετάζονται. Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, εφαρμόζεται ταχύτητα $U=20$ m/sec στην διεύθυνση x και ταχύτητα $V=20$ m/sec στην διεύθυνση y. Το έδαφος λαμβάνει τη τιμή εισόδου δηλαδή 20 m/s ενώ στην επιφάνεια τόσο της μηχανής έλξης όσο και του ανεμοφράκτη εφαρμόζεται συνθήκη μη ολίσθησης (no-slip condition). Στο αριστερό και στο δεξί οριακό σύνορο της μηχανής έλξης λαμβάνεται συνθήκη συμμετρίας (symmetry) και το σύνορο κατόπιν της μηχανής έλξης περιέχει τη συνθήκη πίεσης εξόδου (Pressure outlet).



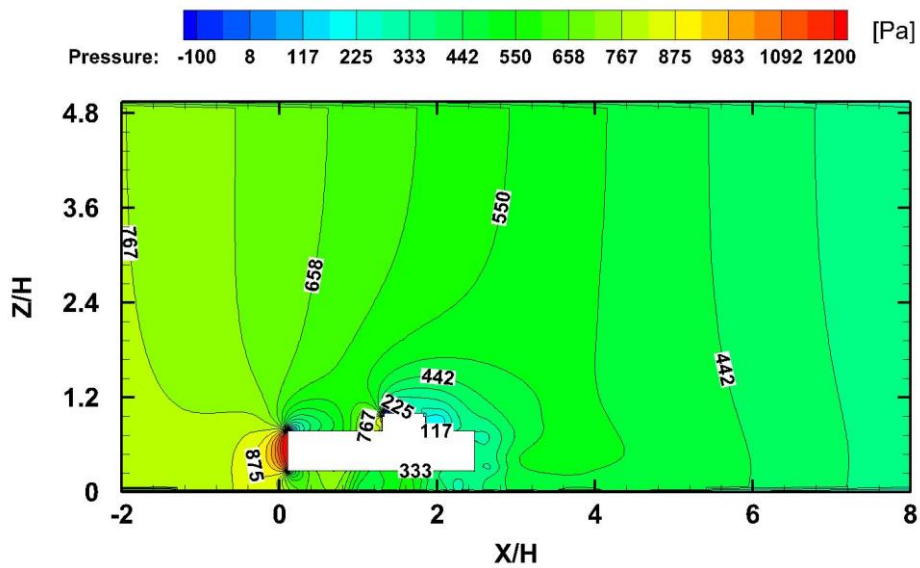
Εικόνα 5-6 Οριακές συνθήκες της 2^{ης} περίπτωσης (case 2)



Εικόνα 5-7 Οριακές συνθήκες της 3^{ης} περίπτωσης (case 3)

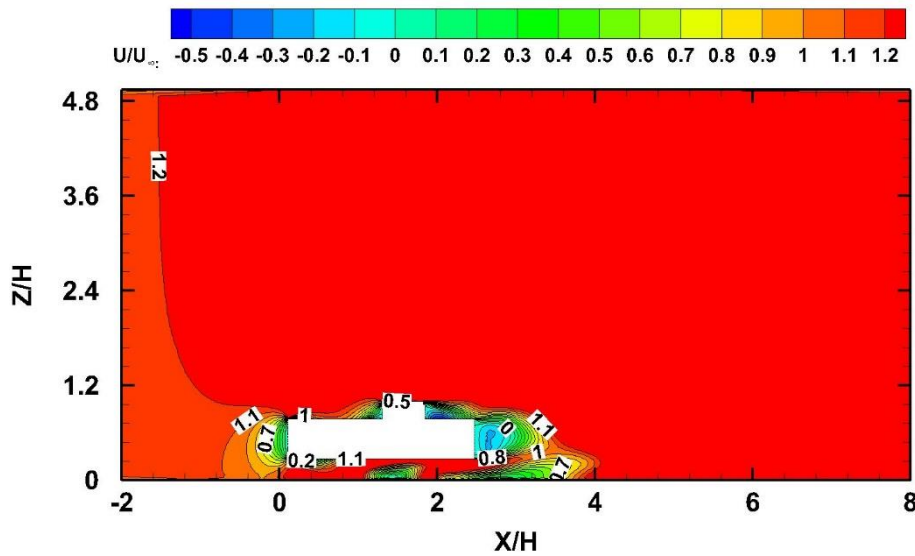
5.5 Αποτελέσματα ροής χωρίς την ύπαρξη ανεμοφράκτη (case2)

Η Εικόνα 5-8 παρουσιάζει την κατανομή της πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας γύρω από τη μηχανή έλξης. Στο ρύγχος της μηχανής αναπτύσσονται μεγάλες τιμές πίεσης λόγω της πρόσκρουσης της ροής με τη γεωμετρία του σώματος. Στις γωνίες του ρύγχους είναι αναμενόμενη η στένωση της ροής οπότε στα σημεία αυτά δημιουργούνται χαμηλές τιμές πίεσης όπως προβάλλονται στην παραπάνω εικόνα. Στο ύψος του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας (εκεί δηλαδή που αλλάζει η γεωμετρία) λόγω πρόσκρουσης ξανά της ροής με το σώμα αναπτύσσονται μεγάλες τιμές πίεσης ενώ στη στένωση που θα αναπτυχθεί οι πιέσεις λαμβάνουν χαμηλότερη τιμή. Τέλος χαμηλές τιμές πιέσεων εμφανίζονται στη περιοχή κατόντη του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας του σώματος.



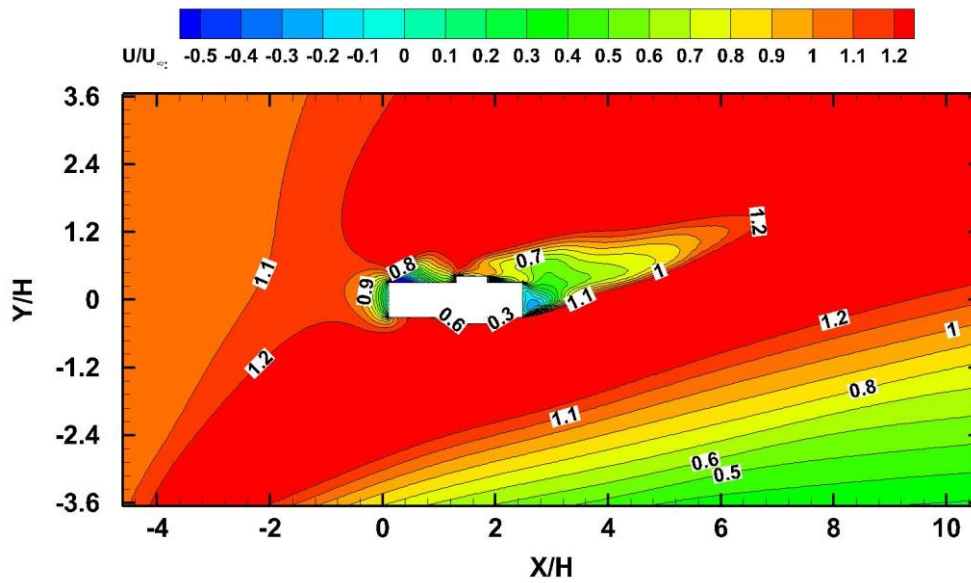
Εικόνα 5-8 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο συμμετρίας για την κατανομή των πιέσεων

Στην Εικόνα 5-9 παρουσιάζεται η ροή ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης στο επίπεδο συμμετρίας χωρίς την ύπαρξη του ανεμοφράκτη. Στο ρύγχος εμφανίζεται η περιοχή πρόσκρουσης της ροής με τη γεωμετρία του σώματος. Το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται πάνω από τη γεωμετρία φαίνεται να έχει μικρό πάχος διότι η ροή υπό γωνία εκτοπίζει το οριακό στρώμα και το σπρώχνει κατάντη της μηχανής έλξης. Το ίδιο συμβαίνει και στο απόρρευμα της γεωμετρίας.

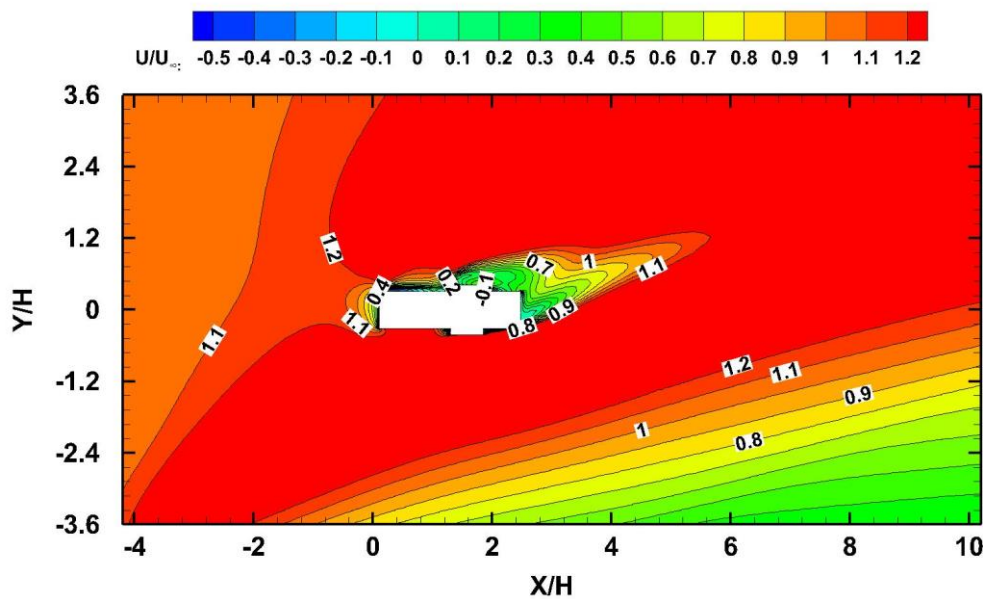


Εικόνα 5-9 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

Στην Εικόνα 5-10, το οριακό στρώμα που δημιουργείται κατόπιν της ροής περιλαμβάνει μεγαλύτερο οριακό πάχος μέχρι τα μισά περίπου της μηχανής έλξης ($X/H \approx 1,5$) σε σχέση με αυτό που σχηματίζεται στο επίπεδο $Z/H=0,75$ (Εικόνα 5-11). Επίσης στο απόρρευμα κοντά στην επιφάνεια του σώματος δημιουργούνται μεγαλύτερες τιμές αδιάστατων ταχυτήτων σε σχέση με το επίπεδο $Z/H=0,75$. Αυτό οφείλεται στις δίνες που αναπτύσσονται χαμηλά στο ύψος του τρένου προκαλώντας το διάνυσμα της ταχύτητα να κινηθεί και σε άλλες διεύθυνσης. Τέλος το απορρεύμα της μηχανής έλξης στο επίπεδο $Z/H=0,5$ έχει μεγαλύτερο μήκος από ότι το απόρευμα του επιπέδου $Z/H=0,75$.



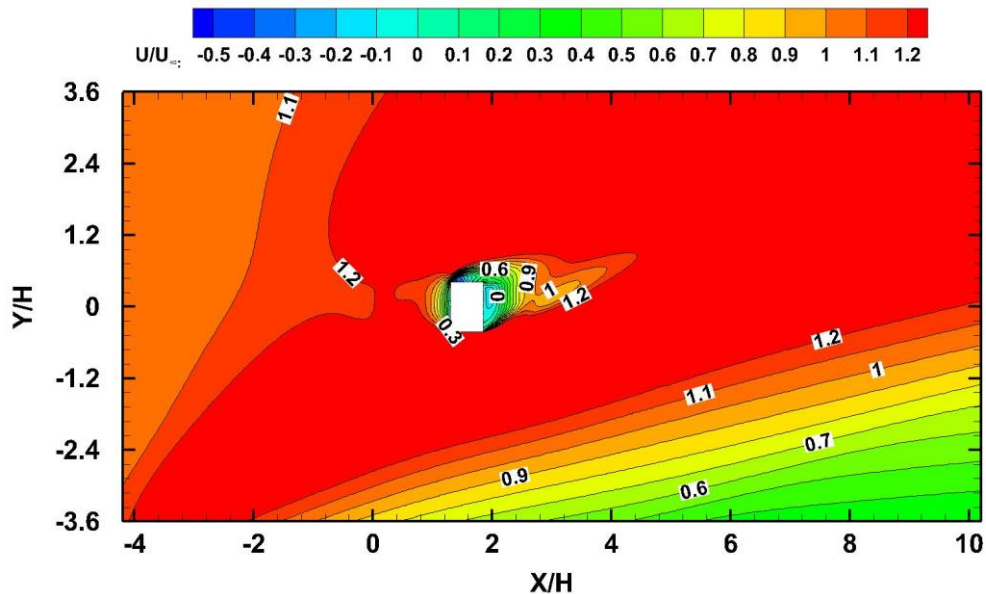
Εικόνα 5-10 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο $Z/H=0,5$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_{∞})



Εικόνα 5-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο $Z/H=0,75$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_{∞})

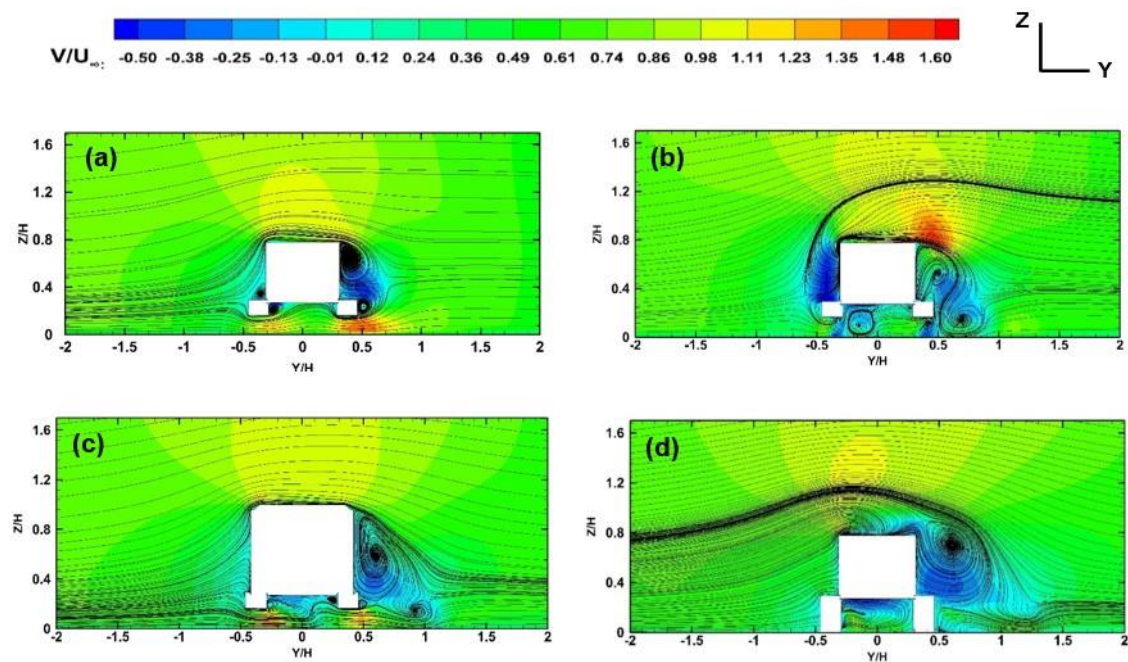
Στην Εικόνα 5-12 είναι φανερό πως το οριακό στρώμα που σχηματίζεται γύρω από το δεύτερο μέρος της γεωμετρίας του σώματος έχει μικρότερο πάχος λόγω

της μικρής γεωμετρίας ενώ το απόρρευμα του εμφανίζει μικρό μήκος. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αρνητικές τιμές που αναπτύσσονται στο ύψος του δεύτερου μέρους καθώς καταλαμβάνουν σχετικά μεγάλο χώρο του οριακού πάχους.



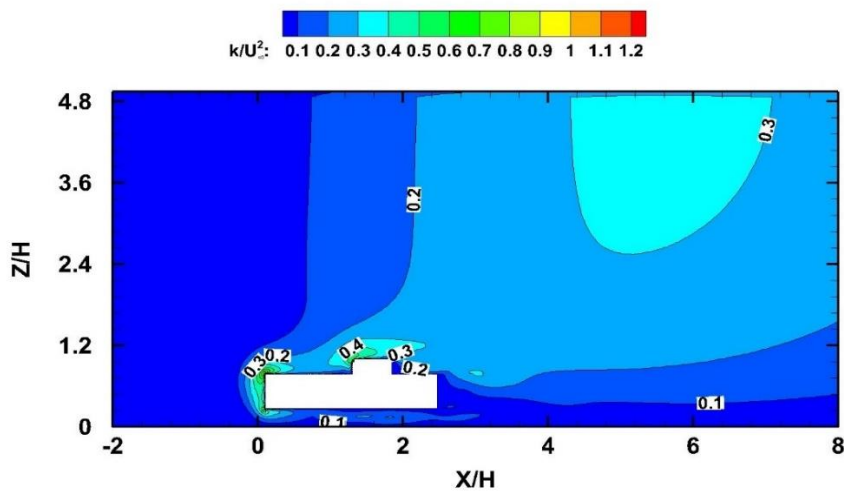
Εικόνα 5-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο $Z/H=0,9$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

Στην Εικόνα 5-13 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές στο πεδίο X,Y για διαφορετικά επίπεδα X . Στη περίπτωση (a) εμφανίζονται δίνες κατάντη της ροής στην άνω επιφάνεια και στο κάτω μέρος των βάσεων της μηχανής έλξης. Στα σημεία που εμφανίζονται οι δίνες οι αδιάστατες ταχύτητες έχουν αρνητική τιμή. Κατά μήκος του άξονα X στο επίπεδο $X/H=1.28$ δεν παρουσιάζονται οι δίνες του επιπέδου $X/H=0.64$ και οι αδιάστατες ταχύτητες αποκτούν μεγαλύτερη αρνητική τιμή από ότι στη περίπτωση (a). Επίσης κατάντη του σώματος και σχετικά σε μια μικρή απόσταση εμφανίζεται μια ανακυκλοφορία. Εν συνέχεια, στη περίπτωση (c) σχηματίζεται δίνη μικρού μήκους στη μία ράγα της μηχανής έλξης και κατάντη της ροής να δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες διαφορετικού μήκους. Τέλος στο επίπεδο $X/H=2.14$ δημιουργείται ανακυκλοφορία της ροής με ακόμη μεγαλύτερο μήκος.



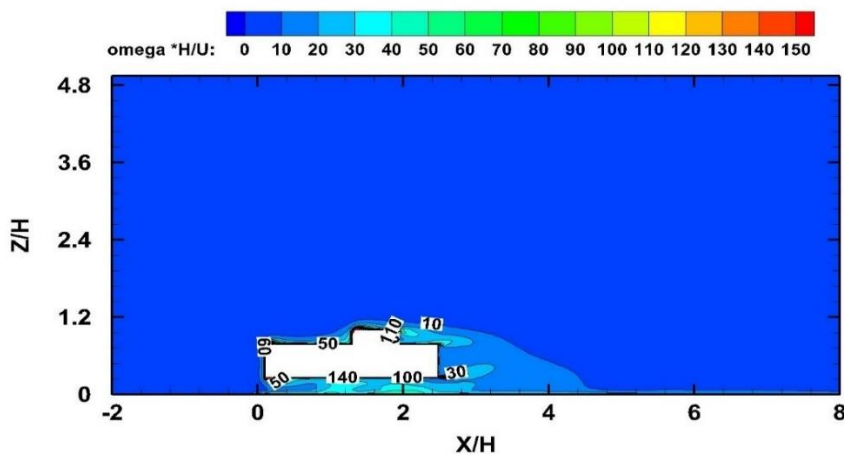
Εικόνα 5-13 Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών στο δισδιάστατο πεδίο Z,Y για τα επίπεδα (a) $X/H=0.64$, (b) $X/H=1.28$, (c) $X/H=1.60$ και (d) $X/H=2.14$ για την 2^η περίπτωση (case 2)

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια (k) παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-14 στο επίπεδο συμμετρίας του πεδίου ροής. Μεγάλες τιμές κινητικής ενέργειας εμφανίζονται στις γωνίες του ρύγχους της μηχανής έλξης. Επίσης μεγάλες τιμές αναπτύσσονται ανάντη του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας με τη μεγιστοποίηση της τιμής του k να εμφανίζεται εξίσου στη γωνία της συγκεκριμένης γεωμετρίας. Η ανάπτυξη των μεγάλων τιμών της τυρβώδης κινητικής ενέργειας στο ρύγχος της μηχανής έλξης δημιουργεί ένα οριακό στρώμα με αρκετά μεγάλο πάχος το οποίο φαίνεται να αναπτύσσεται απότομα κάθετα και οριζόντια της μηχανής δημιουργώντας μάλιστα μια περιοχή αυξημένης τιμής k μακριά από την γεωμετρία του σώματος.



Εικόνα 5-14 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης (case 2) στο επίπεδο συμμετρίας για την αδιάστατη κατανομή της τυρβώδης κινητικής ενέργειας k

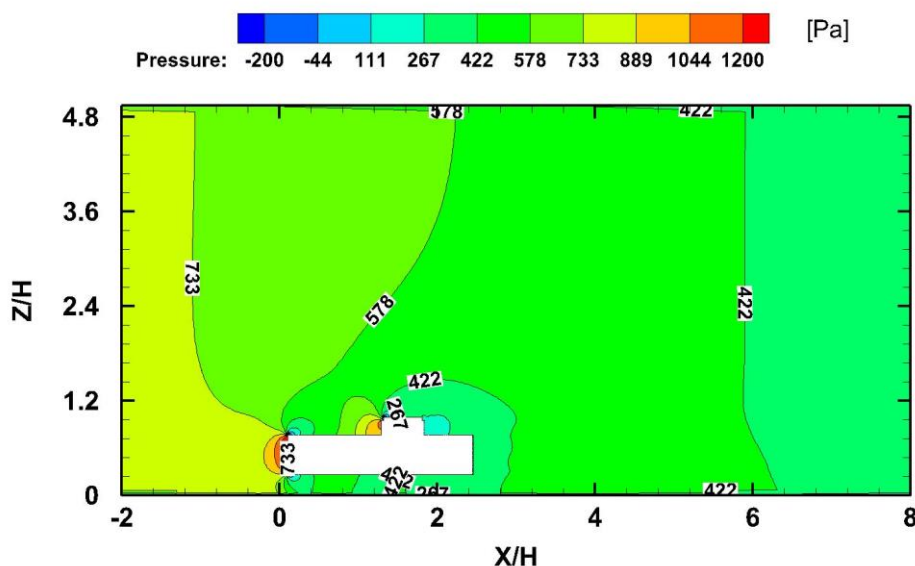
Η κατανομή του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή ω) γύρω από τη γεωμετρία του σώματος προβάλλεται στην Εικόνα 5-15. Το ω αναπτύσσει μεγάλες τιμές στην επιφάνεια της μηχανής και συγκεκριμένα στις γωνίες ανάντη της ροής. Επίσης μεγάλες τιμές δημιουργούνται και στη κάτω περιοχή της μηχανής έλξης.



Εικόνα 5-15 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 2^{ης} περίπτωσης στο επίπεδο συμμετρίας για την κατανομή του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή ω)

5.6 Αποτελέσματα ροής υπό την ύπαρξη του ανεμοφράκτη (3^η περίπτωση case3)

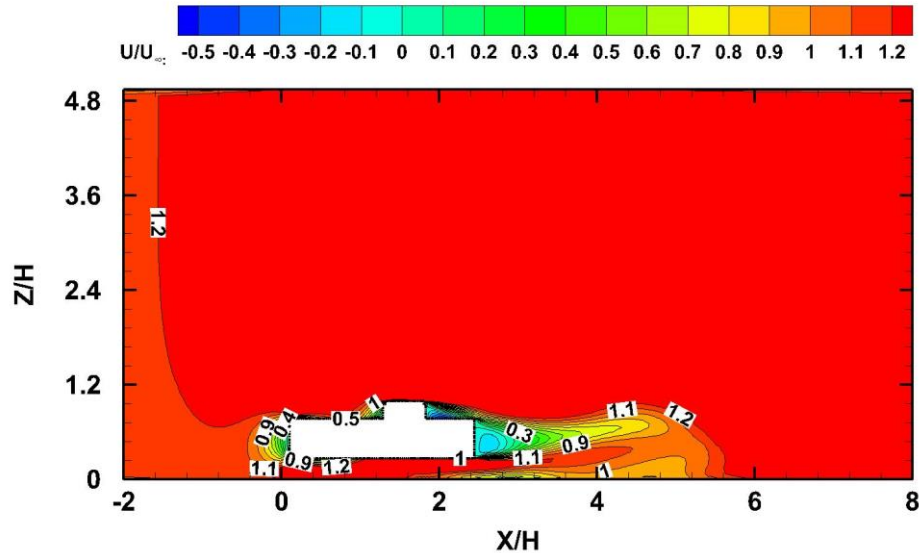
Η Εικόνα 5-16 παρουσιάζει τη κατανομή της πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας γύρω από τη μηχανή έλξης υπό την ύπαρξη του ανεμοφράκτη. Στο ρύγχος της μηχανής αναπτύσσονται μεγάλες τιμές πίεσης λόγω ανακοπής τη ροής. Στις γωνίες του ρύγχους οι τιμές πίεσης ελαττώνονται απότομα από τη δημιουργία της στένωσης της ροής. Ανάντη του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας η πίεση αυξάνεται ξανά λόγω πρόσκρουσης και στη στένωση μειώνεται και πάλι. Τέλος χαμηλές τιμές πιέσεων εμφανίζονται και στη περιοχή κατόντη του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας του σώματος.



Εικόνα 5-16 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή των πιέσεων

Στην Εικόνα 5-17 παρουσιάζεται η ροή ανέμου γύρω από τη μηχανή έλξης στο επίπεδο συμμετρίας υπό την ύπαρξη του ανεμοφράκτη. Στο ρύγχος εμφανίζεται η περιοχή πρόσκρουσης της ροής με τη γεωμετρία του σώματος. Επάνω από τη γεωμετρία του σώματος το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται είναι σχεδόν μηδενικού πάχους με εξαίρεση να αποτελεί η περιοχή ανάντη και κατόντη της δεύτερης γεωμετρίας του σώματος. Τέλος κατόντη του σώματος

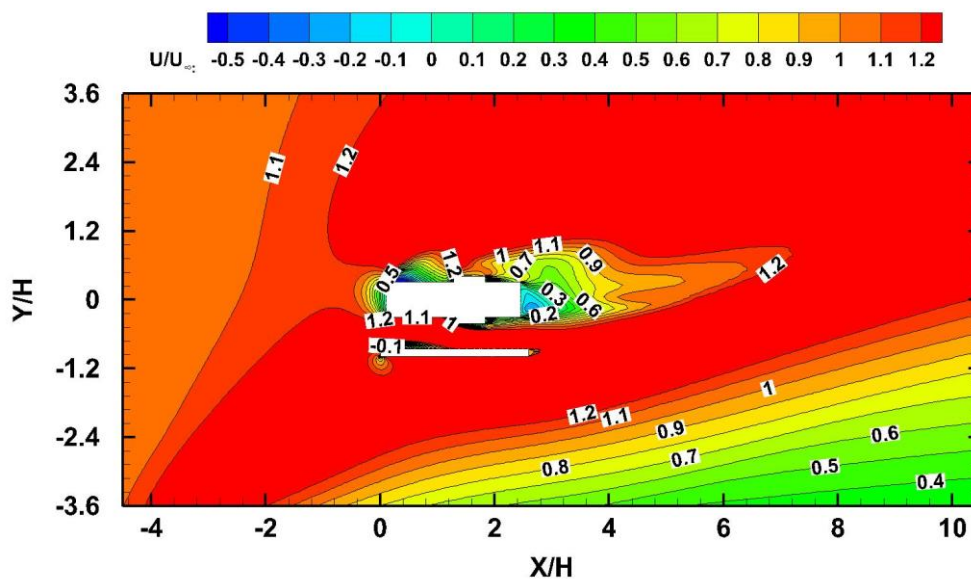
δημιουργούνται δίνες εφόσον υπάρχουν αρνητικές τιμές των αδιάστατων ταχυτήτων.



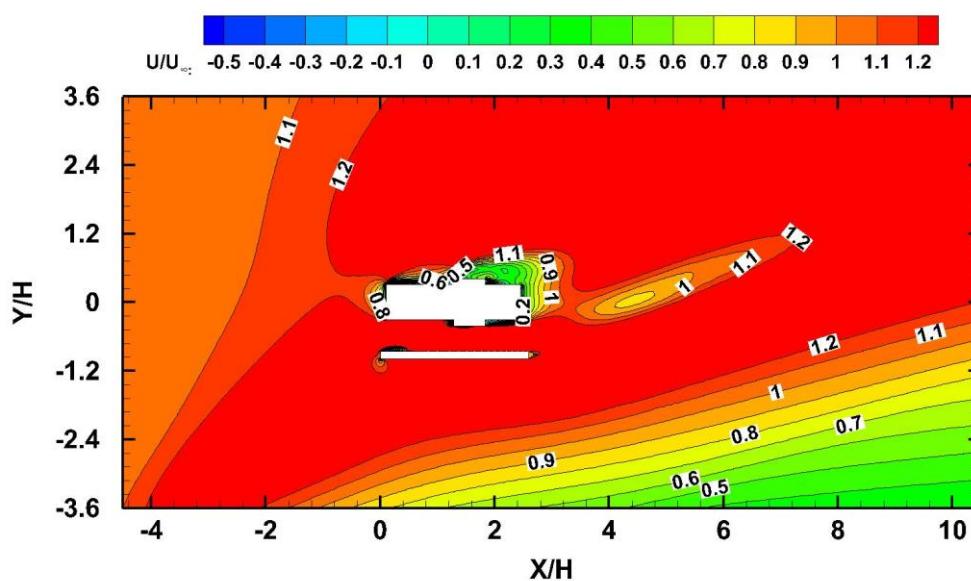
Εικόνα 5-17 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_{∞})

Στην Εικόνα 5-18, παρουσιάζεται η κατανομή των αδιάστατων ταχυτήτων γύρω από τη μηχανή έλξης και του ανεμοφράκτη υπό γωνία εκτροπής ανέμου. Και οι δύο γεωμετρία εμφανίζουν την τοξοειδή περιοχή ανάντη τους, λόγω ανακοπής της ροής. Το οριακό στρώμα που δημιουργείται γύρω από τη μηχανή έλξης είναι αρκετά ανομοιόμορφο διότι ο ανεμοφράκτης αποκόπτει τη ροή που εισέρχεται κάθετα της γεωμετρίας της μηχανής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη εκτόπιση του οριακού στρώματος από την κάθετη ροή με κυρίαρχη ροή να είναι πλέον η οριζόντια ροή.

Το οριακό στρώμα που δημιουργείται στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0,75$ (Εικόνα 5-19) φαίνεται να είναι ομοιόμορφο και οι αδιάστατες ταχύτητες να παρουσιάζουν μια ομαλή διακύμανση σε σχέση με το επίπεδο $Z/H=0,5$. Στην Εικόνα 5-19 το απόρρευμα που σχηματίζεται φαίνεται να έχει διαχωριστεί χωρίς όμως να αναπτύσσεται κάποια δίνη.



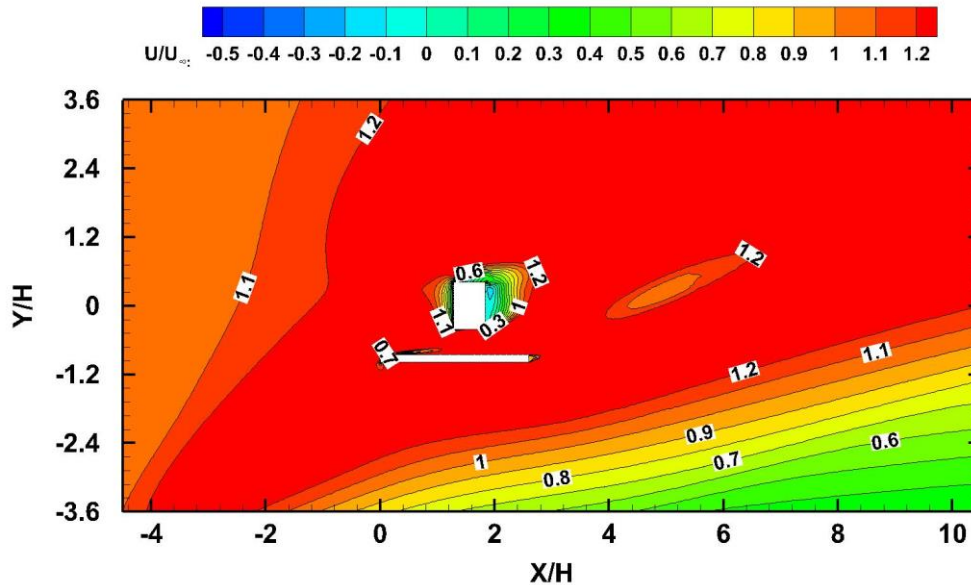
Εικόνα 5-18 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο $Z/H=0,5$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)



Εικόνα 5-19 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο $Z/H=0,75$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

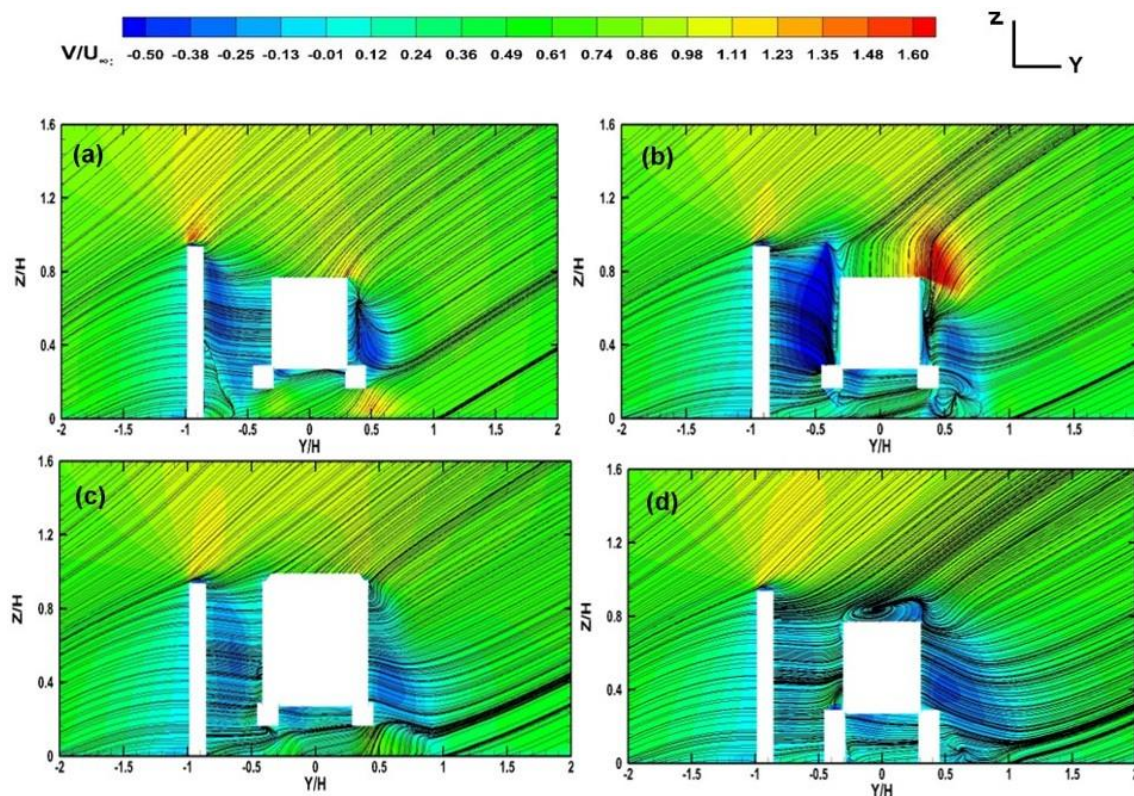
Στην Εικόνα 5-20 παρουσιάζεται η ροή στο επίπεδο $Z/H=0,9$. Ο διαχωρισμός του απορεύματος που αναφέρθηκε προηγουμένως εμφανίζεται και σε αυτή τη περίπτωση ενώ φαίνεται επίσης το οριακό στρώμα που δημιουργείται γύρω

από τη δεύτερη γεωμετρία με την ύπαρξη δινών καθώς κατάντη της ροής σχηματίζονται αρνητικές τιμές των αδιάστατων ταχυτήτων.



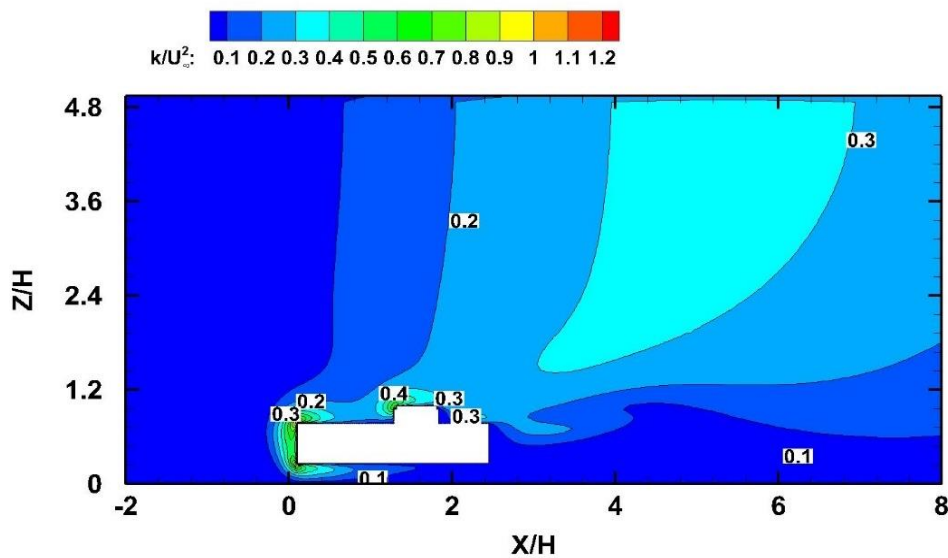
Εικόνα 5-20 Κατακόρυφο ισούψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο $Z/H=0,9$ για τη κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας (U/U_∞)

Οι ροϊκές γραμμές στο δισδιάστατο πεδίο X, Y παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-21 για τα επίπεδα του άξονα X . Παρατηρείται πως για τα τρία επίπεδα του άξονα X (περίπτωση a, b και c) δεν εμφανίζεται καμία δίνη ενώ στο επίπεδο $X/H=2,14$ δημιουργείται μια μικρή κυκλοφορία στο άνω μέρος της επιφάνειας του σώματος. Συγκρίνοντας την Εικόνα 5-13 και Εικόνα 5-21 συμπεραίνεται πως ο ανεμοφράκτης περιορίζει τον πλάγιο άνεμο και κατά συνέπεια ελαχιστοποιεί τον αριθμό της δημιουργίας των δινών.



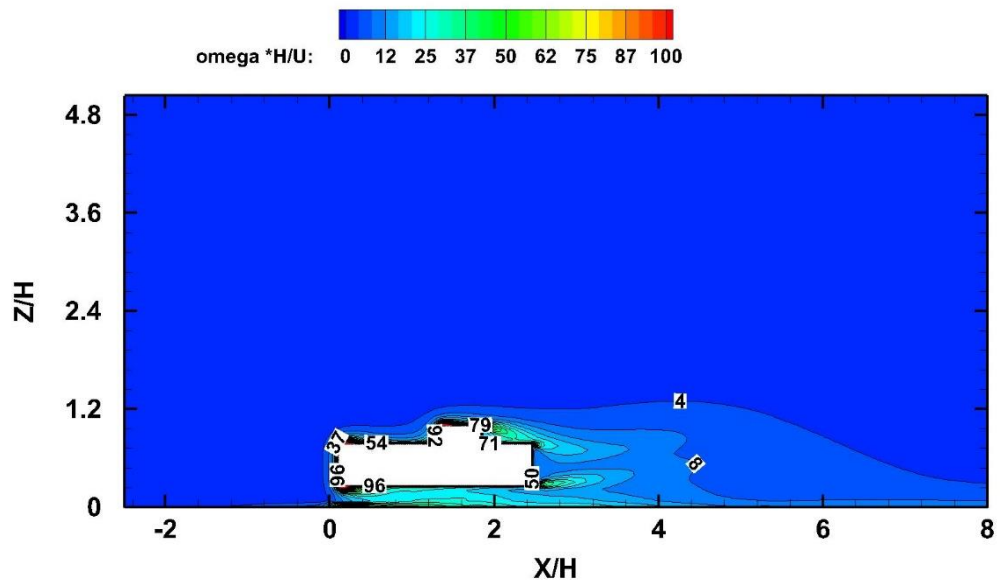
Εικόνα 5-21 Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών στο δισδιάστατο πεδίο Z,Y για τα επίπεδα (a) $X/H=0.64$, (b) $X/H=1.28$, (c) $X/H=1.60$ και (d) $X/H=2.14$ για τη 3^η περίπτωση (case 3)

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια (k) προβάλλεται στην Εικόνα 5-21 στο επίπεδο συμμετρίας του πεδίου ροής. Μεγάλες τιμές κινητικής ενέργειας εμφανίζονται στο ρύγχος της μηχανής έλξης και να διαχωρίζονται άνω και κάτω του ρύγχους. Επίσης μεγάλες τιμές αναπτύσσονται ανάντη του δεύτερου μέρους της γεωμετρίας και συγκεκριμένα στην επάνω του γωνία. Η ανάπτυξη των μεγάλων τιμών της τυρβώδης κινητικής ενέργειας στο ρύγχος της μηχανής έλξης δημιουργεί ένα μεγάλο οριακό στρώμα το οποίο αναπτύσσεται απότομα κάθετα και οριζόντια της μηχανής. Μάλιστα υπάρχει μια περιοχή του οριακού στρώματος αυτού στο οποίο η τιμή του k εμφανίζει μεγάλη τιμή μακριά από τη μηχανή έλξης κάτι το οποίο παρουσιάστηκε και στο case 2.



Εικόνα 5-22 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για την αδιάστατη κατανομή της τυρβώδης κινητικής ενέργειας k

Ο ειδικός ρυθμός καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω) γύρω από τη μηχανή έλξης εμφανίζεται στην Εικόνα 5-23. Μεγάλες τιμές k αναπτύσσονται σε κάθε γωνία της γεωμετρίας με μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στις γωνίες αυτές που βρίσκονται ανάντη της ροής. Επίσης μεγάλες σχετικές τιμές δημιουργούνται στην κάτω περιοχή της μηχανής έλξης



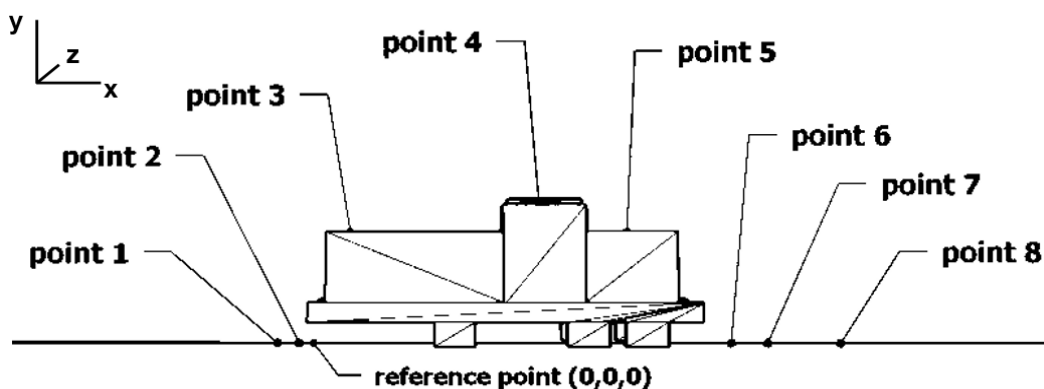
Εικόνα 5-23 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της 3^{ης} περίπτωσης (case 3) στο επίπεδο συμμετρίας για την κατανομή του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (ω ή ω)

6 Σύγκριση περιπτώσεων

Στο παρών κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των τριών περιπτώσεων που αναλύθηκαν ξεχωριστά σε προηγούμενα κεφάλαια για να εξεταστεί η επίδραση της ροής ανέμου της μηχανής έλξης όταν υπόκειται σε πλάγιους ανέμους και πώς αυτή επηρεάζεται όταν υφίσταται ο ανεμοφράκτης. Θα απεικονιστούν τα προφίλ ταχύτητας του ανέμου στον άξονα x, x' και θα παρουσιαστεί η κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p ακολουθώντας ο σχολιασμός τους. Τέλος θα παρουσιαστούν οι ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο του χώρου της μηχανής έλξης ώστε να απεικονιστούν όλες οι ανακυκλοφορίες, οι επανακολλήσεις και οι δίνες που δημιουργούνται για τη κάθε περίπτωση.

6.1 Προφίλ ταχύτητας

Τα προφίλ ταχύτητας λήφθηκαν από οχτώ σημεία του επιπέδου συμμετρίας του άξονα Z και απεικονίζονται στην παρακάτω **Εικόνα 6-1**. Οι αποστάσεις των σημείων από το σημείο αναφοράς παρατίθενται στον Πίνακα 6-1 μαζί με τη συσχέτιση τους με το ύψος του τρένου (H). Το case 1 αφορά την πρώτη περίπτωση της ροής, το case 2 αφορά τη περίπτωση των πλάγιων ανέμων της ροής και το case 3 αντιπροσωπεύει τη πλάγια ροή ανέμου υπό την παρουσία του ανεμοφράκτη.



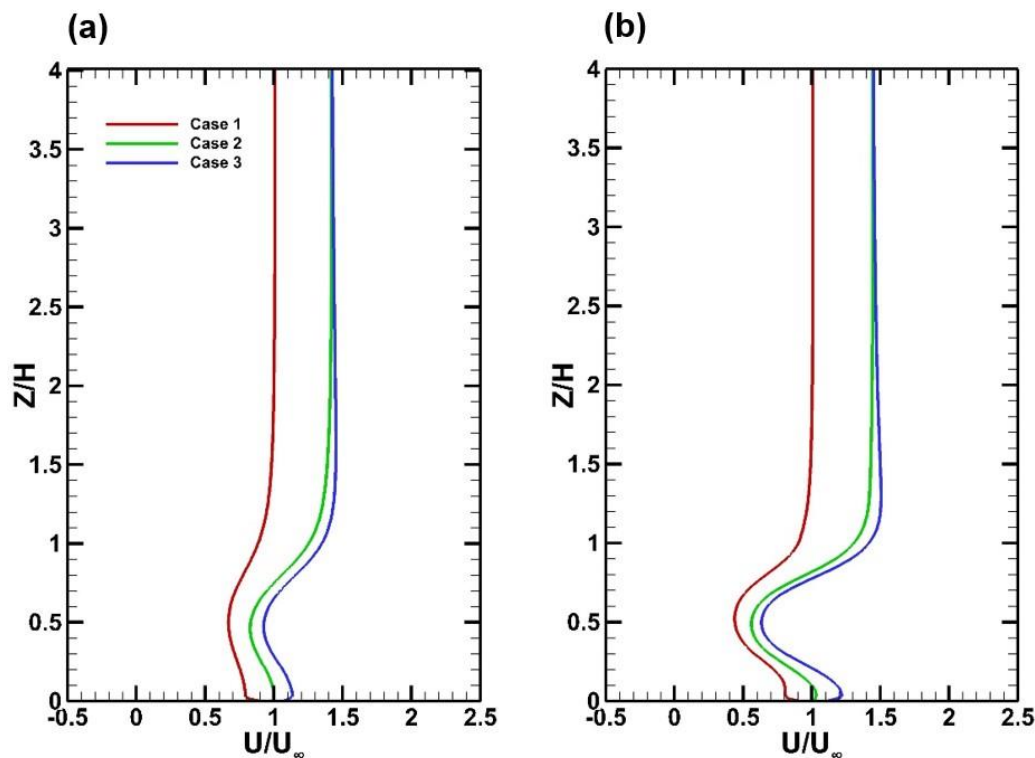
Εικόνα 6-1 Σημεία προφίλ ταχύτητας

Points	1	2	3	4	5	6	7	8
Distance from (0,0,0)	-0,935 m	-0,374 m	0,935 m	6 m	8,041 m	10,735 m	11,67 m	13,54 m
	0,25H	0,1H	0,25H	1,6H	2,15H	2,87H	3,12H	3,62H

Πίνακας 6-1 : Απόσταση σημείων (points) από το σημείο αναφοράς (0,0,0)

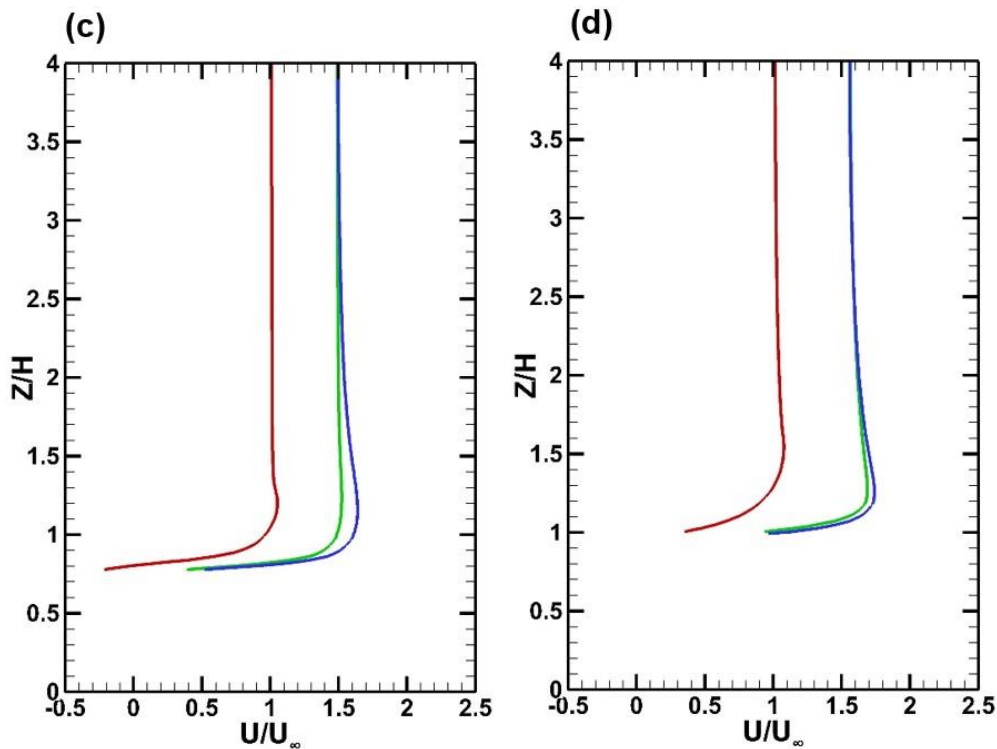
Στην Εικόνα 6-2 παρουσιάζονται τα προφίλ της ταχύτητας των τριών περιπτώσεων για τα σημεία ένα (point 1) και δύο (point 2). Η καμπύλες που απεικονίζονται στις εικόνες (a) και (b) σχηματίζονται λόγω της ανακοπής της ροής στο ρύγχος της μηχανής έλξης. Σε αυτή τη περιοχή, δημιουργείται ένα οριακό στρώμα στο οποίο οι ταχύτητες μειώνονται κοντά στην επιφάνεια του ρύγχους της μηχανής έλξης. Για τον λόγο αυτόν στην εικόνα (b) οι ταχύτητες έχουν μικρότερη τιμή από ότι η εικόνα (a) αφού το σημείο 2 (point 2) είναι πιο κοντά στην επιφάνεια της μηχανής έλξης.

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, το έδαφος λαμβάνει τη τιμή της ταχύτητας εισόδου δηλαδή τα 20 m/s. Στη πρώτη περίπτωση ροής που προσομοιώνεται η κίνηση του τρένου χωρίς πλάγιους ανέμους και χωρίς τον ανεμοφράκτη έχει τη τιμή $U=20$ m/s. Στις άλλες περιπτώσεις όπου υφίσταται πλάγιος άνεμος με η χωρίς ανεμοφράκτη το έδαφος λαμβάνει τη τιμή των δύο εισόδων δηλαδή στην είσοδο κατά τον x' , x παίρνει τη τιμή 20 m/s και στην είσοδο κατά τον $y'y$ θα λάβει τη τιμή των 10 m/s. Είναι αναμενόμενο λοιπόν στο ύψος $Z/H=0$ οι αδιάστατες ταχύτητες να είναι μηδέν (Εικόνα 6-2). Στις δύο περιπτώσεις των πλάγιων ανέμων (case 2, case 3) οι αδιάστατες ταχύτητες στην αδιατάρακτη ροή δηλαδή $Z/H>1$ λαμβάνουν τη τιμή του 1,5. Αυτό συμβαίνει διότι στην περιοχή αυτή η ροή επιταχύνεται προς τον x' και προς τον $y'y$ λόγο του πλάγιου ανέμου.



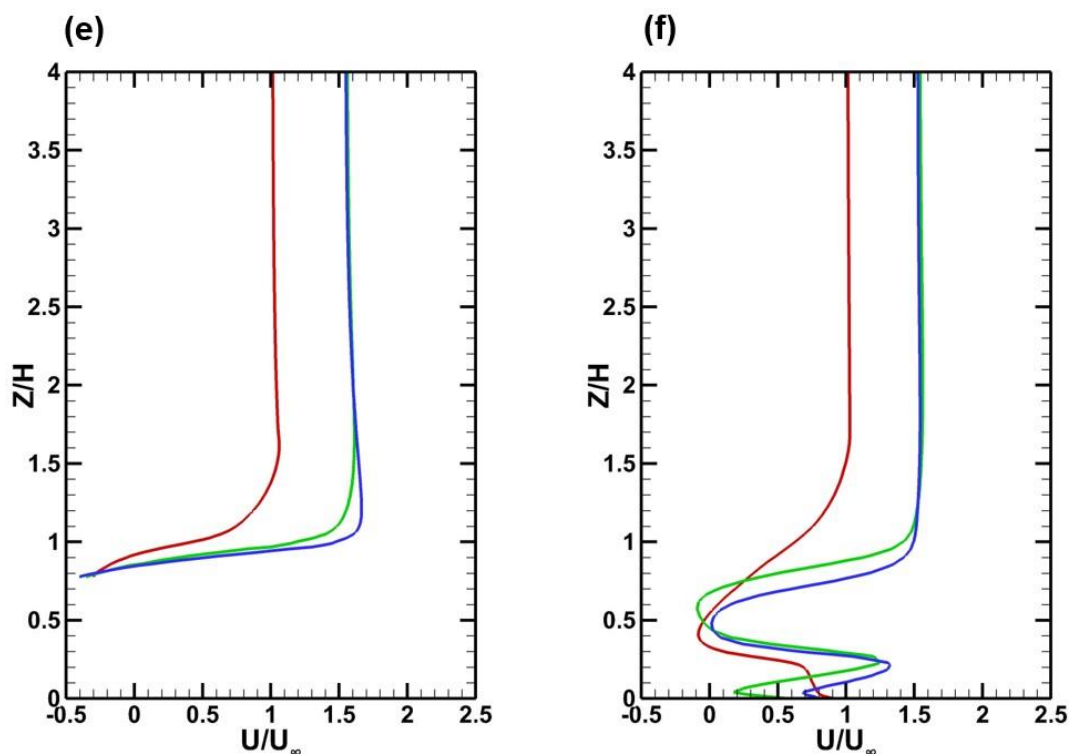
Εικόνα 6-2 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (a) στο σημείο 1 (point 1), (b) στο σημείο 2 (point 2)

Στην Εικόνα 6-3 παρουσιάζονται τα προφίλ ταχύτητας στην επιφάνεια της μηχανής έλξης. Όπως προαναφέρθηκε στην επιφάνεια της γεωμετρίας έχει οριστεί συνθήκη μη ολίσθησης. Αυτό σημαίνει ότι η σχετική πίεση ισούται με μηδέν. Στην Εικόνα 6-3 για τη πρώτη περίπτωση της ροής η σχετική πίεση είναι μηδέν (case 1) ενώ στις άλλες περιπτώσεις η τιμή της αδιάστατης ταχύτητας είναι κοντά στο 0,5. Από το ύψος $Z/H=1,5$ και άνω, η ροή χωρίς πλάγιο άνεμο (case 1) αποκτά αδιάστατη τιμή ταχύτητας ίσο με ένα και οι ροές με πλάγιο άνεμο (case 2, case 3) λαμβάνουν τη τιμή 1,5 για τον λόγο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Τέλος κατά μήκος του Z/H η διαφορά των αδιάστατων τιμών ταχυτήτων της πρώτης περίπτωσης ροής με των άλλων δύο περιπτώσεων είναι 0,5.



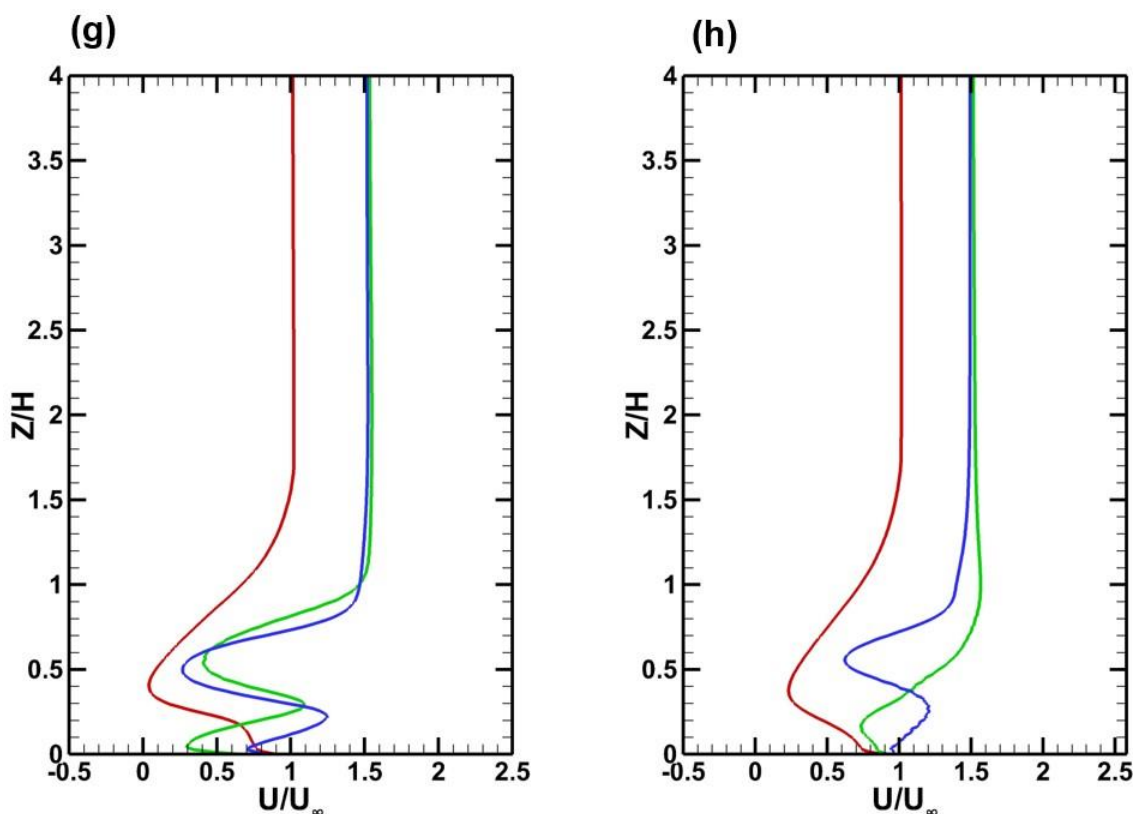
Εικόνα 6-3 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (c) στο σημείο 3 (point 3), (d) στο σημείο 4 (point 4)

Το προφίλ ταχύτητας στη τρίτη γεωμετρία της μηχανής έλξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-4 ε. Για τις τρεις περιπτώσεις ροής στην επιφάνεια της γεωμετρίας του σώματος οι αδιάστατες ταχύτητες παίρνουν αρνητική τιμή διότι στο σημείο αυτό 5 (point 5) δημιουργούνται δίνες για τη κάθε περίπτωση. Στο σημείο 6 (point 6) τα προφίλ ταχύτητας που σχηματίζονται για τις δύο ροές με πλάγιους ανέμους (case 2, case 3) έχουν μια κυματοειδής μορφή έως το ύψος Z/H . Ο λόγος στον οποίο εμφανίζεται αυτή η μορφή του προφίλ ταχύτητας είναι διότι σε αυτό το σημείο επικρατεί μια χαστική ροή ανέμου. Είναι αναμενόμενο πως ο πλάγιος άνεμος με τον άνεμο στον άξονα $x'x$ δημιουργούν μία αρκετά ανομοιόμορφη ροή γύρω από τη μηχανή έλξης. Από την άλλη η ροή χωρίς τον πλάγιο άνεμο παρουσιάζει ένα προφίλ ταχύτητας με καμπύλη έως το ύψος Z/H .



Εικόνα 6-4 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (e) στο σημείο 5 (point 5), (f) στο σημείο 6 (point 6)

Στην Εικόνα 6-5 απεικονίζονται τα σημεία στο απόρευμα της ροής της μηχανής έλξης. Για τις περιπτώσεις του πλάγιου ανέμου τα προφίλ ταχύτητας εμφανίζουν τη μορφή που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ωστόσο στο σημείο 8 φαίνεται πως η κυματοειδής μορφή έχει εξασθενήσει αφού απέχει από τη μηχανή έλξης σε τέτοια απόσταση ώστε να επηρεάζεται λιγότερο από τη χαοτική ροή. Τέλος στη πρώτη περίπτωση της ροής για όλα τα σημεία του απορευμάτος (σημείο 5, σημείο 6, σημείο 7) το προφίλ ταχύτητας παραμένει σχετικά σταθερό. Παρόμοια αποτελέσματα για τη πρώτη περίπτωση της ροής εμφανίζονται και στους (Taylor, Palombi et al. 2011)



Εικόνα 6-5 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας (g) στο σημείο 7 (point 7), (h) στο σημείο 8 (point 8)

6.2 Συντελεστής πίεσης

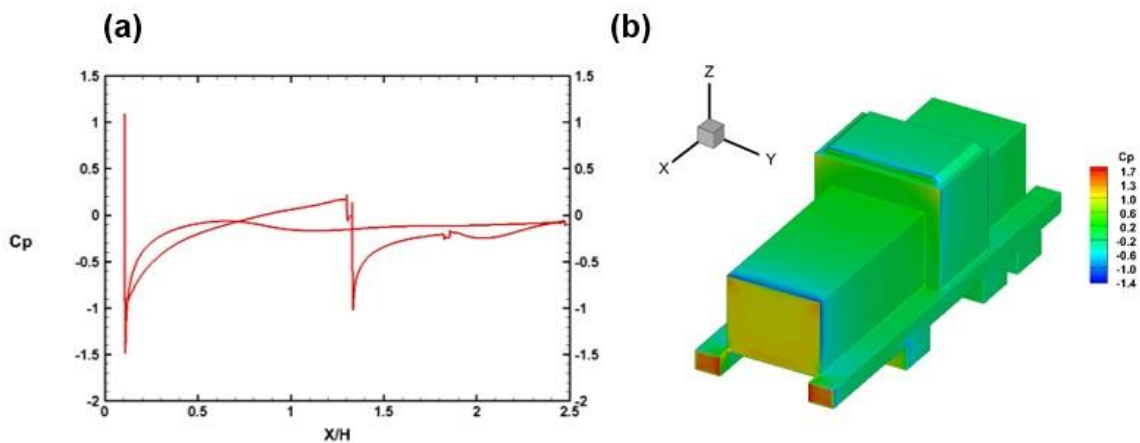
Οι μηχανικοί, προκειμένου να περιγράψουν το πεδίο της πίεσης γύρω από ένα σώμα χρησιμοποιούν μία αδιάστατη παράμετρος η οποία υπολογίζει τη στατική προς τη δυναμική πίεση. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται συντελεστής πίεσης και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_p = \frac{p - p_r}{0,5\rho U_\infty^2} \quad (6-1)$$

Όπου p η στατική πίεση του σημείου ενδιαφέροντος, p_r η στατική πίεση στο πεδίο ελεύθερης ροής, ρ η πυκνότητα του αέρα και U_∞ η ταχύτητα της ροής.

Στην Εικόνα 6-6 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή πίεσης στον άξονα $y'y'$ άνω και κάτω της επιφάνειας της μηχανής έλξης. Οι τιμές του C_p λαμβάνουν

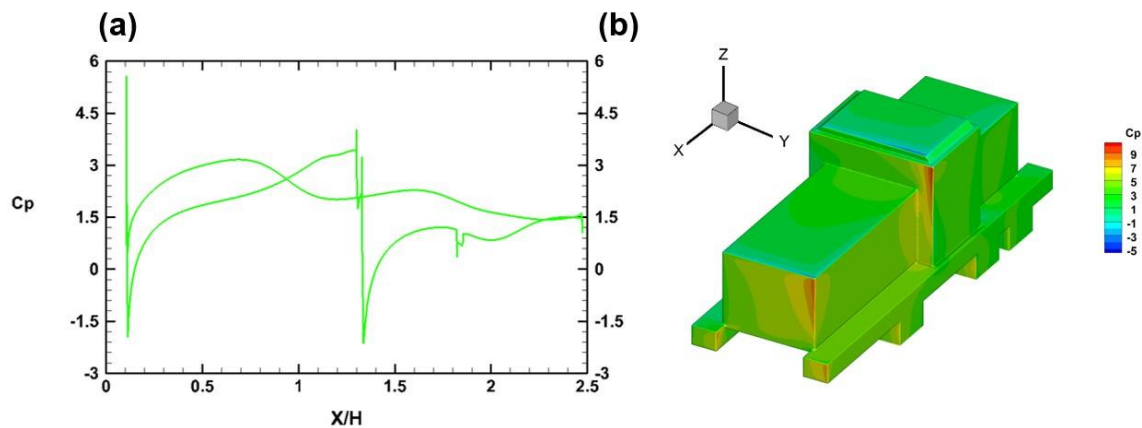
μεγαλύτερη τιμή στις περιοχές πρόσκρουσης της ροής με τη γεωμετρία του σώματος. Η διακύμανση του συντελεστή πίεσης λαμβάνει τη τιμή 1 στη περιοχή πρόσκρουσης στο ρύγχος της μηχανής έλξης και στη συνέχεια μειώνεται απότομα στη περιοχή των άκρων της γεωμετρίας. Κατά μήκος του άξονα x' ο συντελεστής πίεσης αυξάνεται έως τη περιοχή που η ροή ανακόπτεται λόγω του ύψους της δεύτερης γεωμετρίας του σώματος. Έπειτα ξανά μειώνεται στα άκρα και αυξάνεται σταθερά στην υπόλοιπη γεωμετρία. Η διακύμανση στη κάτω επιφάνεια της μηχανής έλξης μειώνεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα στις άκρες του ρύγχους της γεωμετρίας. Έπειτα αυξάνεται έως ότου λάβει τη τιμή 0 όπου και θα παραμείνει σταθερή σε όλο το μήκος του άξονα x' . Παρόμοια αποτελέσματα έδειξαν και οι (Östh and Krajnović 2014).



Εικόνα 6-6 Συντελεστής πίεσης C_p για τη περίπτωση ροής χωρίς πλάγιους ανέμους (case 1)

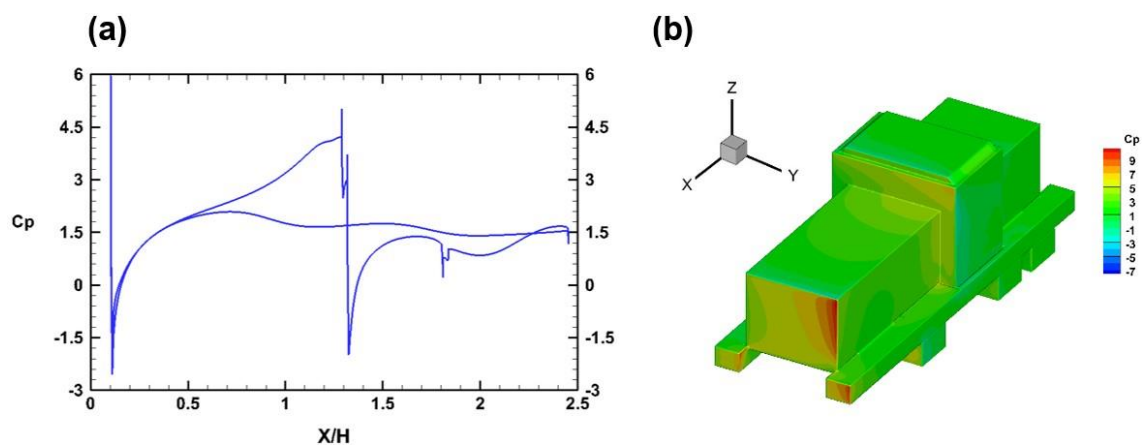
Για τη δεύτερη περίπτωση ροής η διακύμανση του συντελεστή πίεσης απεικονίζεται στην Εικόνα 6-7. Μεγάλες τιμές του C_p εμφανίζονται στις άκρες που προσβάλλονται από τη ροή υπό γωνία. Η κατανομή του συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο διάγραμμα παρουσιάζει παρόμοια μορφή με αυτή της πρώτης περίπτωσης. Παρόλα αυτά οι θετικές τιμές του C_p της δεύτερης περίπτωσης είναι αρκετά μεγαλύτερες από ότι αυτών της πρώτης. Επίσης παρατηρείται πώς το εύρος του συντελεστή πίεσης στο κάτω μέρος της

μηχανής έλξης κατά μήκος του άξονα x' έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι το εύρος των τιμών στην άνω επιφάνεια.



Εικόνα 6-7 Συντελεστής πίεσης C_p για τη περίπτωση ροής πλάγιων ανέμων χωρίς ανεμοφράκτη (case 2)

Ο συντελεστής πίεσης για τη τρίτη περίπτωση της ροής παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-8. Η περιοχή που εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή του C_p είναι στο ρύγχος της μηχανής έλξης στο σημείο όπου προσκρούεται η ροή υπό γωνία (Εικόνα 6-8 b). Στη δεύτερη γεωμετρία όπου υφίσταται ανακοπή της ροής ο συντελεστής πίεσης δεν εμφανίζει την ίδια τιμή με τη περιοχή πρόσκρουσης στο ρύγχος του σώματος ενώ στη δεύτερη περίπτωση της ροής οι δύο περιοχές αυτές λαμβάνουν το ίδιο εύρος τιμών (Εικόνα 6-7 b). Στην Εικόνα 6-8 a η διακύμανση του συντελεστή πίεσης εμφανίζει παρόμοια μορφή με αυτή της δεύτερης με τη διαφορά ότι οι τιμές του C_p στην άνω επιφάνεια του σώματος έχουν στο εύρος τους μεγαλύτερες τιμές από ότι στο κάτω μέρος της μηχανής έλξης.



Εικόνα 6-8 Συντελεστής πίεσης C_p για τη περίπτωση ροής πλάγιων ανέμων με ανεμοφράκτη (case 3)

6.3 Συντελεστής άνωσης και συντελεστής αντίστασης

Οι συντελεστές άνωσης (C_L) και αντίστασης (C_D) εκφράζουν τα χαρακτηριστικά της απόδοσης του τρένου και υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις

➤ Συντελεστής άνωσης

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 S} \quad (6-2)$$

➤ Συντελεστής Αντίστασης

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 S} \quad (6-3)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, U_∞ η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, S το εμβαδόν της κάτοψης του τρένου, L η ανωστική δύναμη η οποία είναι κάθετη στη U_∞ και D η συνολική αντίσταση η οποία είναι παράλληλη της U_∞ .

cases	C_D	C_L
1η περίπτωση	0,5744	0,1728
2η περίπτωση	2,504	0,4094
3η περίπτωση	2,513	-0,5127

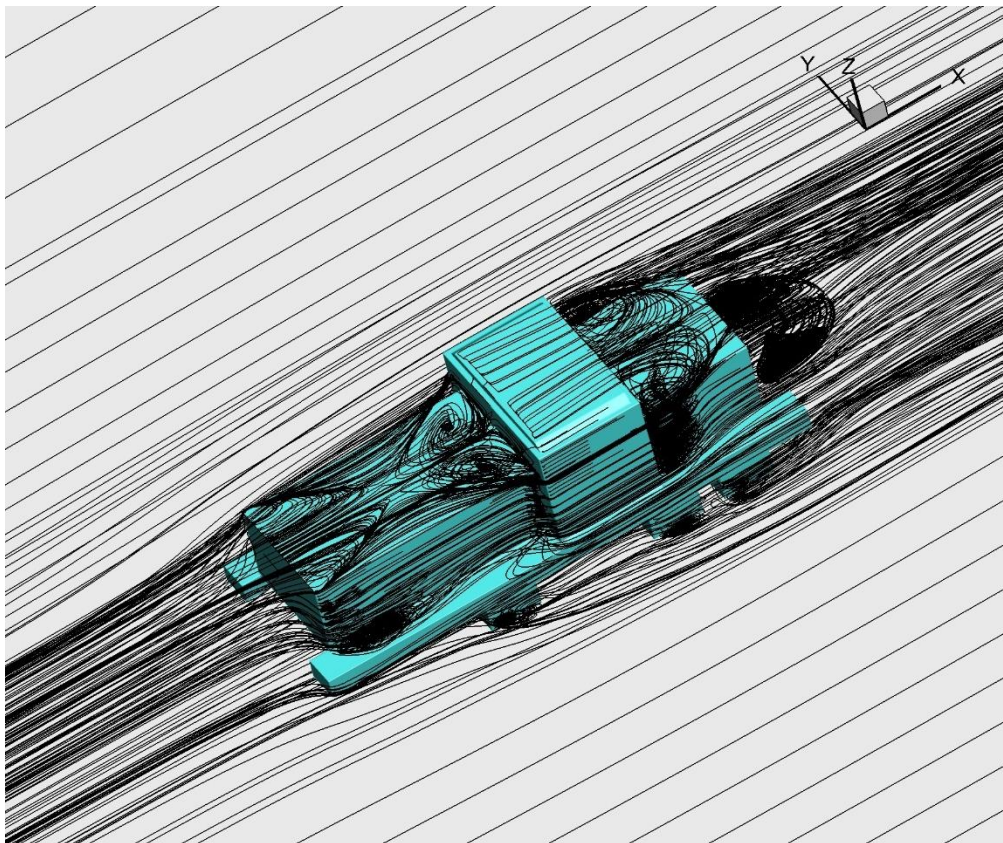
Πίνακας 6-2 : Συντελεστές άνωσης και αντίστασης για τις τρεις περιπτώσεις

Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης εμφανίζουν μικρότερη τιμή στη περίπτωση χωρίς τους πλάγιους ανέμους. Στις περιπτώσεις των πλάγιων ανέμων ο συντελεστής αντίστασης αυξάνεται ενώ συγκρίνοντας τη δεύτερη με τη τρίτη περίπτωση είναι εμφανές ότι ο ανεμοφράκτης δεν επηρεάζει σημαντικά τον C_D . Ωστόσο η ύπαρξη του ανεμοφράκτη στον συντελεστή άνωσης μειώνει

τη τιμή της κάνοντας την αρνητική διότι σε αυτή τη περίπτωση το τρένο έχει καλύτερη πρόσφυση με το έδαφος.

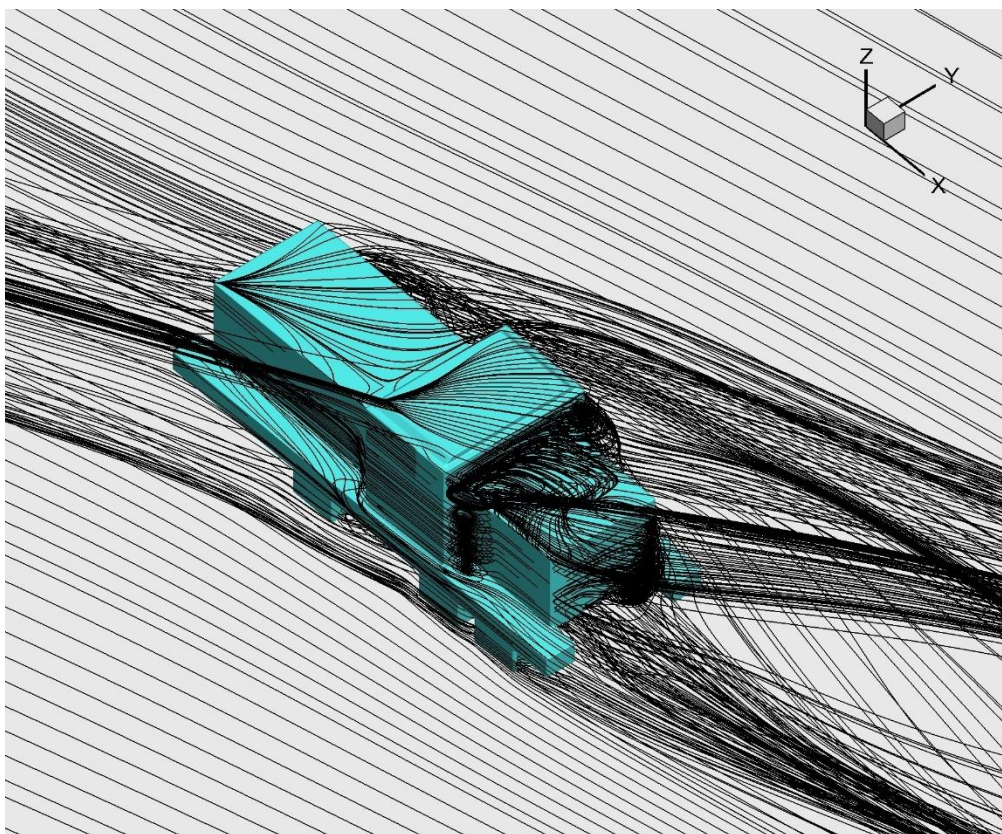
6.4 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο

Οι ροϊκές γραμμές γύρω από τη μηχανή έλξης για τη ροή χωρίς πλάγιους ανέμους παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα Εικόνα 6-9. Στην άνω επιφάνεια του ρύγχους της γεωμετρίας του σώματος σχηματίζεται επανακόλληση της ροής δημιουργώντας μία ανακυκλοφορία. Στην αριστερή πλευρική περιοχή του ρύγχους εμφανίζεται επανακόλληση της ροής και κατά συνέπεια λόγω συμμετρίας της γεωμετρίας της μηχανής έλξης θα δημιουργηθεί και στη δεξιά πλευρά του. Το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται και στις ράγες του τρένου. Ανάντη της ροής στη δεύτερη γεωμετρία του τρένου αναπτύσσονται δύο συμμετρικές δίνες. Επίσης κατάντη της ροής της δεύτερης γεωμετρίας σχηματίζονται οι δίνες στα πλευρικά και στην άνω επιφάνεια της τρίτης γεωμετρίας της μηχανής έλξης. Τέλος δημιουργείται ή δίνη στο απόρευμα της ροής η οποία φαίνεται να εμφανίζει σχετικά μεγάλο μήκος.



Εικόνα 6-9 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο για τη πρώτη περίπτωση της ροής (case 1)

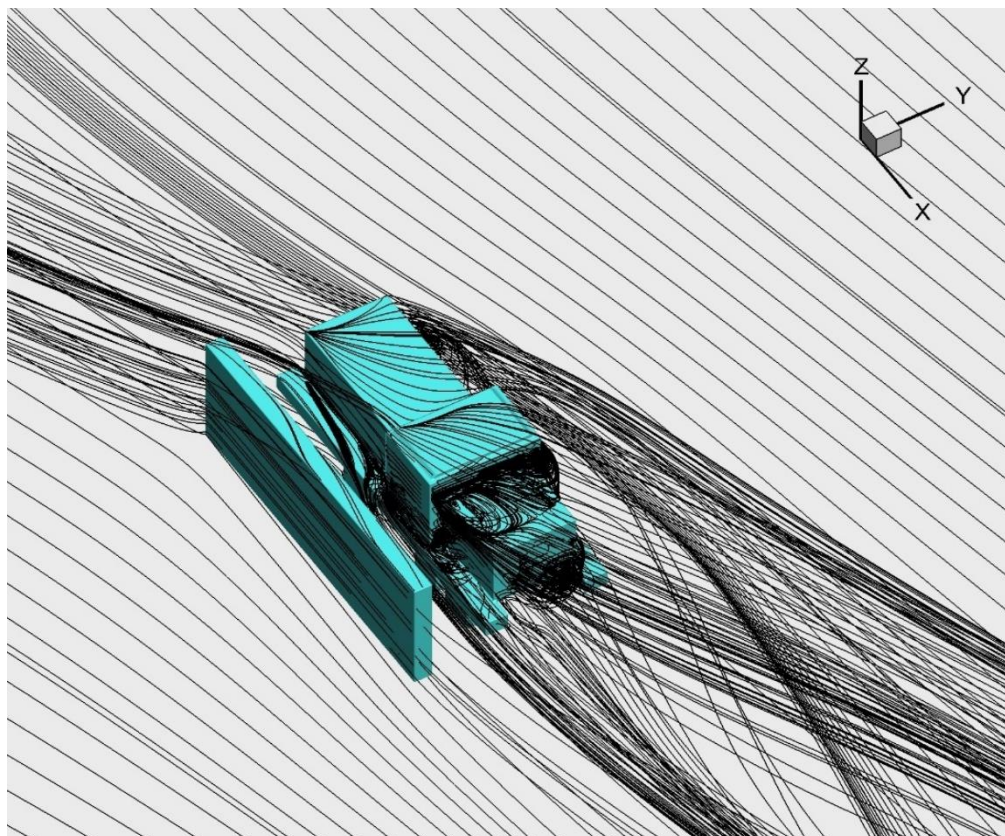
Στη περίπτωση της δεύτερης ροής, οι ροϊκές γραμμές φαίνεται να παρουσιάζονται στη παρακάτω Εικόνα 6-10. Ο πλευρικός άνεμος εκτοπίζει τις ροϊκές γραμμές προς τον άξονα y . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται ανακυκλοφορίες και δίνες ανάντη της επιφάνειας της γεωμετρίας του σώματος. Κατάντη της ροής εμφανίζονται δίνες στο απόρρευμα και στην επιφάνεια της τρίτης γεωμετρίας του σώματος.



Εικόνα 6-10 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο για τη δεύτερη περίπτωση της ροής (case 2)

Στη περίπτωση της τρίτης ροής όπου υφίσταται ανεμοφράκτης, οι ροϊκές γραμμές απεικονίζονται στην Εικόνα 6-11. Ο σχηματισμός των δινών φαίνεται να εμφανίζεται στις περιοχές με αυτές της δεύτερης περίπτωσης της ροής. Ωστόσο, στη πλευρική επιφάνεια ανάντη της δεύτερης γεωμετρίας της ροής

δημιουργείται δίνη εφόσον σε αυτό το σημείο ο ανεμοφράκτης εμποδίζει τη προσβολή του πλάγιου ανέμου. Τέλος σχηματισμός δίνης εμφανίζεται και στη περιοχή του ρύγχους της μηχανής έλξης στη πλευρική μεριά προς τον άξονα y.



Εικόνα 6-11 Ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστατο πεδίο για τη τρίτη περίπτωση της ροής (case 3)

7 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε αριθμητικά η αεροδυναμική συμπεριφορά μιας κινούμενης μηχανής έλξης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ροής. Διερευνήθηκαν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της μηχανής έλξης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις ροής χωρίς των πλάγιων ανέμων, υπό την παρουσία των πλάγιων ανέμων με η χωρίς τον ανεμοφράκτη.

Αρχικά έγιναν κάποιες βιβλιογραφικές αναφορές για το υπόβαθρο της μελέτης και στη συνέχεια παρουσιάστηκε η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας. Στο κεφάλαιο 4 προβλήθηκε η γεωμετρία της μηχανής έλξης και κατασκευάστηκε το υπολογιστικό χωρίο με τις απαραίτητες αποστάσεις για τη πρώτη περίπτωση της ροής χωρίς πλάγιους ανέμους και χωρίς τον ανεμοφράκτη. Έπειτα αναδείχθηκε το υπολογιστικό πλέγμα των κελιών στο πεδίο ροής και γύρω από την επιφάνεια της εξεταζόμενης γεωμετρίας. Για τη επίλυση του υπολογιστικού προβλήματος αποδόθηκαν αριθμητικές τιμές στις εξαρτημένες μεταβλητές και ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες στα οριακά σύνορα του πεδίου ροής. Τέλος ακολούθησε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τη κατανομή της πίεσης, της ταχύτητας, της τυρβώδης κινητικής ενέργειας και του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδης κινητικής ενέργειας.

Το κεφάλαιο 5 ακολούθησε την ίδια διαδικασία ανάλυσης με αυτή του 4. Παρουσιάστηκαν οι διαστάσεις του ανεμοφράκτη και η απόσταση του από το σημείο αναφοράς της μηχανής έλξης για τη περίπτωση της ροής υπό την παρουσία του ανεμοφράκτη. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το υπολογιστικό χωρίο και παρουσιάστηκε το πλέγμα του πεδίου για τις περιπτώσεις ροής των πλάγιων ανέμων. Ορίστηκαν οι εξαρτημένες μεταβλητές και οι οριακές συνθήκες στα σύνορα του υπολογιστικού χώρου. Στο τέλος έγινε η παρουσίαση και ο σχολιασμός των ίδιων μεγεθών της πρώτης περίπτωσης.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα και των τριών περιπτώσεων η κατανομή της ταχύτητας, της πίεσης, του k και του ω διαφέρει στις περιπτώσεις των πλάγιων ανέμων όπου στο μεγαλύτερο εύρος του πεδίου εμφανίζονται

μεγαλύτερη τιμή. Το οριακό στρώμα στους πλάγιους ανέμους εκτοπίζεται κατάντη της ροής του πλάγιου ανέμου δημιουργώντας στρώμα με σχετικά μικρό οριακό πάχος σε σχέση με τη πρώτη περίπτωση ροής. Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις των πλάγιων ανέμων, η επίδραση που έχει ο ανεμοφράκτης στη ροή είναι στον διαχωρισμό του απορεύματος της μηχανής έλξης κατά τον άξονα x . Από την απεικόνιση των ροϊκών γραμμών στα επίπεδα του άξονα x , ο ανεμοφράκτης φαίνεται να περιορίζει τον σχηματισμό των δινών γύρω από τη μηχανή έλξης..

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα προφίλ της ταχύτητας για οκτώ διαφορετικά σημεία στο επίπεδο ροής του άξονα x . Στα σημεία του απορεύματος της ροής για τις περιπτώσεις των πλάγιων ανέμων η ροή φαίνεται να είναι χαοτική. Επίσης παρουσιάστηκε ο συντελεστής πίεσης κατά μήκος της μηχανής έλξης στην άνω και κάτω επιφάνεια της μηχανής έλξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στους πλάγιους ανέμους το C_p στην άνω επιφάνεια λαμβάνει αρκετά μεγάλη τιμή ενώ στη περίπτωση του ανεμοφράκτη σε κάποια σημεία της γεωμετρίας του σώματος το C_p είναι μικρότερο σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς τον ανεμοφράκτη. Τέλος απεικονίστηκαν οι ροϊκές γραμμές στο τρισδιάστο πεδίο για τη παρουσίαση των δινών και φαίνεται πως στη πρώτη περίπτωση της ροής ο αριθμός των δινών είναι μεγαλύτερος από ότι στις περιπτώσεις των πλάγιων ανέμων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alfonsi, G. (2009). "Reynolds-averaged Navier–Stokes equations for turbulence modeling." Applied Mechanics Reviews **62**(4).
- Baker, C. (2010). "The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains." Journal of wind engineering and industrial aerodynamics **98**(2): 88-99.
- Baker, C. J. (2014). "A review of train aerodynamics Part 1 – Fundamentals." The Aeronautical Journal **118**(1201): 201-228.
- Baker, C. J., S. J. Dalley, T. Johnson, A. Quinn and N. G. Wright (2001). "The slipstream and wake of a high-speed train." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit **215**(2): 83-99.
- Baker, C. J., A. Quinn, M. Sima, L. Hoefener and R. Licciardello (2013). "Full-scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes. Part 1: Ensemble averages." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit **228**(5): 451-467.
- Bocciolone, M., F. Cheli, R. Corradi, S. Muggiasca and G. Tomasini (2008). "Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses." Journal of wind engineering and industrial aerodynamics **96**(5): 584-610.
- Brockie, N. J. W. and C. J. Baker (1990). "The aerodynamic drag of high speed trains." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **34**(3): 273-290.
- Cheli, F., S. Giappino, L. Rosa, G. Tomasini and M. Villani (2013). "Experimental study on the aerodynamic forces on railway vehicles in presence of turbulence." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **123**: 311-316.
- Cheli, F., F. Ripamonti, D. Rocchi and G. Tomasini (2010). "Aerodynamic behaviour investigation of the new EMUV250 train to cross wind." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **98**(4-5): 189-201.
- Chiu, T. (1991). "A two-dimensional second-order vortex panel method for the flow in a cross-wind over a train and other two-dimensional bluff bodies." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **37**(1): 43-64.
- Chiu, T. and L. Squire (1992). "An experimental study of the flow over a train in a crosswind at large yaw angles up to 90." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **45**(1): 47-74.
- Copley, J. (1987). "The three-dimensional flow around railway trains." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **26**(1): 21-52.
- Ferziger, J. H., M. Perić and R. L. Street (2002). Computational methods for fluid dynamics, Springer.

- Gerhart, A. L., J. I. Hochstein and P. M. Gerhart (2020). Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics, John Wiley & Sons.
- Ido, A., S. Saitou, K. Nakade and S. Iikura (2008). Study on under-floor flow to reduce ballast flying phenomena. Proceedings of the World Congress on Rail Research, Seoul, South Korea.
- Khier, W., M. Breuer and F. Durst (2000). "Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study." Computers & Fluids **29**(2): 179-195.
- Kwon, H.-b., Y.-W. Park, D.-h. Lee and M.-S. Kim (2001). "Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **89**(13): 1179-1195.
- Kwon, H. and C. Park (2006). An experimental study on the relationship between ballast-flying phenomenon and strong wind under high-speed train. Proceedings of the World Congress on Rail Research, Montreal, QC, Canada.
- Li, T., J.-y. Zhang and W.-h. Zhang (2013). "A numerical approach to the interaction between airflow and a high-speed train subjected to crosswind." Journal of Zhejiang University SCIENCE A **14**(7): 482-493.
- Mackrodt, P. (1980). "Zum Luftwiderstand, von Schienenfahrzeugen." DFVLR AVA IB **251**.
- Mackrodt, P., J. Steinheuer and G. Stoffers (1980). Aerodynamisch optimale Kopfformen für Triebzüge, DFVLR.
- Mair, W. and A. Stewart (1985). "The flow past yawed slender bodies, with and without ground effects." Journal of wind engineering and industrial aerodynamics **18**(3): 301-328.
- Moukalled, F., L. Mangani, M. Darwish, F. Moukalled, L. Mangani and M. Darwish (2016). The finite volume method, Springer.
- Niu, J., X. Liang and D. Zhou (2016). "Experimental study on the effect of Reynolds number on aerodynamic performance of high-speed train with and without yaw angle." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **157**: 36-46.
- Niu, J., D. Zhou and X. Liang (2018). "Numerical investigation of the aerodynamic characteristics of high-speed trains of different lengths under crosswind with or without windbreaks." Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics **12**(1): 195-215.
- Nouzawa, T., K. Hiasa, T. Nakamura, A. Kawamoto and H. Sato (1992). Unsteady-Wake Analysis of the Aerodynamic Drag of a Notchback Model with Critical Afterbody Geometry, SAE Technical Paper.
- Östh, J. and S. Krajnović (2014). "A study of the aerodynamics of a generic container freight wagon using Large-Eddy Simulation." Journal of Fluids and Structures **44**: 31-51.

- Quinn, A. and M. Hayward (2008). "Full-scale aerodynamic measurements underneath a high speed train." Proceedings of the BBAA VI, Milano, Italy: 1-9.
- Robinson, C. and C. Baker (1990). "The effect of atmospheric turbulence on trains." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **34**(3): 251-272.
- Schetz, J. A. (2001). "AERODYNAMICS OF HIGH-SPEED TRAINS." Annual Review of Fluid Mechanics **33**(1): 371-414.
- Schober, M., M. Weise, A. Orellano, P. Deeg and W. Wetzel (2010). "Wind tunnel investigation of an ICE 3 endcar on three standard ground scenarios." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **98**(6-7): 345-352.
- Schulte-Werning, B., C. Heine and G. Matschke (2003). "Unsteady Wake Flow Characteristics of High-Speed Trains." PAMM **2**(1): 332-333.
- Shin, C.-H. and W.-G. Park (2003). "Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel." Mechanics Research Communications **30**(4): 287-296.
- Sims-Williams, D. B., R. G. Dominy and J. P. Howell (2001). "An Investigation into Large Scale Unsteady Structures in the Wake of Real and Idealized Hatchback Car Models." SAE Transactions **110**: 1197-1208.
- Sterling, M., C. Baker, S. Jordan and T. Johnson (2008). "A study of the slipstreams of high-speed passenger trains and freight trains." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit **222**(2): 177-193.
- Suzuki, M., K. Tanemoto and T. Maeda (2003). "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds." Journal of wind engineering and industrial aerodynamics **91**(1-2): 209-218.
- Taylor, Z. J., E. Palombi, R. Gurka and G. A. Kopp (2011). "Features of the turbulent flow around symmetric elongated bluff bodies." Journal of Fluids and Structures **27**(2): 250-265.
- Tian, H.-q. (2009). "Formation mechanism of aerodynamic drag of high-speed train and some reduction measures." Journal of Central South University of Technology **16**(1): 166-171.
- Versteeg, H. K. and W. Malalasekera (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson education.
- Vino, G., S. Watkins, P. Mousley, J. Watmuff and S. Prasad (2005). "Flow structures in the near-wake of the Ahmed model." Journal of Fluids and Structures **20**(5): 673-695.
- Willemsen, E. (1997). "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains." Journal of wind engineering and industrial aerodynamics **69**: 437-447.

Yao, S.-B., Z.-X. Sun, D.-L. Guo, D.-W. Chen and G.-W. Yang (2013). "Numerical study on wake characteristics of high-speed trains." Acta Mechanica Sinica **29**(6): 811-822.