

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Ενεργητικός Έλεγχος Ροής γύρω από Πρότυπο Όχημα με Έγχυση Ρευστού

**του φοιτητή
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ
ΑΕΜ:1627**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η αεροδυναμική ενός πρότυπου οχήματος (Ahmed body) και επιδιώκεται μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας με χρήση διατάξεων ενεργητικού ελέγχου της ροής και συγκεκριμένα με δέσμες έγχυσης ρευστού στον ομόρου. Η μελέτη έγινε με αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης του ρευστού σε μη-μόνιμη κατάσταση σε ένα δισδιάστατο υπολογιστικό χωρίο. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έγινε χρήση του μοντέλου IDDES SST k- ω που διατίθεται στον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS/FLUENT. Η μελέτη έγινε για ταχύτητα ροής 40 m/s που αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds 7.68×10^5 . Αρχικά εξετάστηκε η επίδραση του πάχους της περιοχής γύρω από το στερεό τοίχωμα όπου χρησιμοποιείται δομημένο υπολογιστικό πλέγμα, η οποία περιοχή καθορίζει την ανάπτυξη του οριακού στρώματος. Επιλέχθηκε το πιο κατάλληλο πάχος από τα τρία που εξετάστηκαν, με βάση τον συντελεστή οπισθέλκουσας και τις κατανομές (προφίλ) της μέσης ταχύτητας με την κατακόρυφη απόσταση, από την υπό κλίση επιφάνεια και τον ομόρου του οχήματος που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, σε σύγκριση με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση τριών διαφορετικών διατάξεων έγχυσης ρευστού επί της πίσω κατακόρυφης επιφάνειας του πρότυπου οχήματος και για κάθε διάταξη έγινε παραμετρική μελέτη της ταχύτητας της δέσμης έγχυσης εντός του εύρους 0 - 60 m/s. Στην πρώτη περίπτωση εξετάστηκε η έγχυση ρευστού από μονή δέσμη παράλληλα στην προσερχόμενη ροή από το μέσο της πίσω κατακόρυφης επιφάνειας. Η ταχύτητα της δέσμης ορίζεται από 10 έως 60 m/s αυξανόμενη κατά 10 m/s. Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής οπισθέλκουσας αυξάνεται για τις μικρότερες ταχύτητες έγχυσης και στη συνέχεια μειώνεται έως και 23% στα 60 m/s σε σύγκριση με την τιμή αναφοράς χωρίς έγχυση. Στη δεύτερη διάταξη γίνεται έγχυση από διπλή δέσμη στην άνω και κάτω ακμή της πίσω κατακόρυφης επιφάνειας, παράλληλα στην προσερχόμενη ροή με ταχύτητα 20, 40 και 60 m/s. Σε αντίθεση με τη μονή δέσμη έγχυσης, με τη διπλή δέσμη επιτυγχάνεται μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας έως 4.8% στις μικρότερες ταχύτητες ενώ στη συνέχεια αυξάνεται και πλησιάζει την τιμή αναφοράς για τη μεγαλύτερη ταχύτητα έγχυσης. Στην τρίτη διάταξη, γίνεται έγχυση από τις ίδιες θέσεις όπως και στη δεύτερη διάταξη αλλά τώρα οι δέσμες είναι επικλινείς ως προς τη διεύθυνση της ροής με κλίση 45° προς το εσωτερικό της πίσω επιφάνειας. Με αυτή τη διάταξη, ο συντελεστής οπισθέλκουσας μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της ταχύτητας έγχυσης έως και 49% στα 60 m/s. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο η ενεργειακή απόδοση των διατάξεων έγχυσης όπου συνεκτιμάται η ενέργεια που δαπανάται για τη δημιουργία των δεσμών έγχυσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η ενέργεια που καταναλώνεται στην δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης μπορεί να μειωθεί έως και 29% με τη βέλτιστη διάταξη που είναι έγχυση διπλής δέσμης με κλίση στα 40 m/s.

Active control of flow around a prototype vehicle by steady blowing

Abstract

Aerodynamics is the study of motion of air, which interacts with a solid object. There are two methods to study the effects of the air flow on an object. The first one is through experiments. The object of interest is placed inside a wind tunnel and via proper equipment the scientists are able to measure the properties of flow. Methods like these are often avoided as a result of high cost. An alternative way is by solving the governing equations of fluid motion, using a computer. This method is called Computational Fluid Dynamics (CFD) and nowadays is more desirable due to the low cost and high accuracy for industrial projects.

The aerodynamic performance of a prototype car body (Ahmed body) subject to active flow control through steady blowing at its back surface is studied by means of numerical simulations at a Reynolds number of 7.68×10^5 . For this purpose the IDDES SST $k-\omega$ model was implemented in a two-dimensional computational domain with commercial CFD solver ANSYS/FLUENT. Preliminary tests examined the influence of the thickness of the region around the body surface where a structured mesh is employed. The final computational mesh was selected on the basis of these preliminary tests by comparing the drag coefficient and mean velocity profiles over the body for the reference case without blowing control. Subsequently, three different configurations of blowing on the vertical surface at the back of the body were examined: a) single jet located in the middle of the back surface, b) twin jets aligned with flow direction located at the two edges of the back surface, and c) twin jets as in case b but inclined towards the body surface by 45° with respect to the horizontal plane. The results have shown that configuration c can reduce the drag coefficient by up to 49% at a blowing velocity of 60 m/s while energy consumption can be reduced by up to 29% at 40 m/s.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	12
1.1 Πρότυπο όχημα και πειραματικές μελέτες	12
1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι επίλυσης.....	17
1.3 Εφαρμογές υπολογιστικών μεθόδων.....	20
1.4 Έλεγχος της ροής.....	21
Μεθοδολογία	24
2.1 Δημιουργία του πεδίου υπολογισμών	24
2.2 Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας.....	28
2.3 Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας μετά την εισαγωγή των jet	32
Αποτελέσματα	34
3.1 Μελέτη ευαισθησίας πάχους δομημένου πλέγματος	34
3.1.1 Σύγκριση πεδίου ταχύτητας στην υπό κλίση επιφάνεια	36
3.1.2 Σύγκριση πεδίου ταχύτητας στον ομόρου	46
3.1.3 Μελέτη του συντελεστή οπισθέλκουσας.....	53
3.2 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού.....	60
3.2.1 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 10 m/s	60
3.2.2 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s	63
3.2.3 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 30 m/s	64
3.2.4 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s	65
3.2.5 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 50 m/s	67
3.2.6 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s	70
3.2.7 Ενεργειακή μελέτη μονής έγχυσης ρευστού.....	74
3.3 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού	76
3.3.1 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s	76
3.3.2 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s	80
3.3.3 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s	82
3.3.4 Ενεργειακή μελέτη διπλής έγχυσης ρευστού.....	84
3.4 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με κλίση 45 ⁰	86
3.4.1 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s και κλίση 45 ⁰	86
3.4.2 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s και κλίση 45 ⁰	89
3.4.3 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s και κλίση 45 ⁰	92
3.4.4 Ενεργειακή μελέτη διπλής έγχυσης ρευστού με κλίση 45 ⁰	95
Συμπεράσματα	97
Βιβλιογραφία.....	99

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Η τελική μορφή του σχήματος Ahmed με τις διαστάσεις σε mm.....	13
Σχήμα 2: Η μορφολογία του πίσω μέρος του οχήματος από 0° έως 40°	13
Σχήμα 3: Η μορφολογία του μέσου πεδίου ροής πάνω στο σώμα αλλά και στον ομόρου.	14
Σχήμα 4: Γραφική αναπαράσταση του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας φ	17
Σχήμα 5: Οι διαστάσεις του σχήματος προς μελέτη σε mm. Ο δρόμος έχει απόσταση 50 mm από το σώμα.	25
Σχήμα 6: Η αποστάσεις του σώματος από τα όρια του πεδίου υπολογισμών σε mm ...	25
Σχέδιο 7: Η αντιστοίχιση του ονόματος ορίου με την επιφάνεια του σώματος.	26
Σχήμα 8: Η διαμόρφωση των περιπτώσεων μικρού, μεσαίου και μεγάλου ύψους, ξεκινώντας από το πρώτο πλέγμα αντίστοιχα. Το ύψος καθορίζεται από την μαύρη συμπαγής γραμμή.	28
Σχήμα 9: Η θέση του jet (άσπρο χρώμα) και η διεύθυνση του αέρα που εγχέεται από αυτό.....	33
Σχήμα 10: Η θέση των jet και η διεύθυνση έγχυσης, παράλληλα στη ροή (αριστερή εικόνα) και με κλίση 45° (δεξιά εικόνα) για 20, 40 και 60 m/s.....	33
Σχήμα 11: Οι θέσεις των μετρήσεων στην υπό κλίση επιφάνεια με τη σειρά να πηγαίνει από αριστερά προς τα δεξιά.	35
Σχήμα 12: Οι θέσεις των μετρήσεων στον ομόρου με τη σειρά να πηγαίνει από αριστερά προς τα δεξιά.	36
Σχήμα 13: Το προφίλ της \bar{U} για το μικρότερο, το μεσαίο και το μεγάλο ύψος αντίστοιχα.....	38
Σχήμα 14: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 2 της υπό κλίση επιφάνειας.....	39
Σχήμα 15: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 3 της υπό κλίση επιφάνειας.....	40
Σχήμα 16: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις 4 και 5 αντίστοιχα.	41
Σχήμα 17: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 6.	42
Σχήμα 18: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 7.	42
Σχήμα 19: Η γκριζα ζώνη αναπαριστά την περιοχή ανακυκλοφορίας για κάθε ύψος ξεκινώντας από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο, ενώ η μαύρη γραμμή αναπαριστά τη θέση 7.....	43
Σχήμα 20: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 8.	44

Σχήμα 21: Η τυρβώδης κινητική ενέργεια στη θέση 4. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος.	44
Σχήμα 22: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 9.	45
Σχήμα 23: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις 10, 11 και 12 αντίστοιχα.	46
Σχήμα 24: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 1.	47
Σχήμα 25: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 2.	48
Σχήμα 26: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 3.	48
Σχήμα 27: Το πεδίο της μέσης ταχύτητας \bar{U} στον ομόρου από το μικρότερο στο μεγαλύτερο πάχος δομημένου πλέγματος. Η μαύρη γραμμή αναπαριστά τη θέση 3 στον ομόρου.....	49
Σχήμα 28: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 4.	50
Σχήμα 29: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις του ομόρου 5 και 6 αντίστοιχα.	51
Σχήμα 30: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις του ομόρου 7 και 8 αντίστοιχα.	52
Σχήμα 31: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις του ομόρου 9 και 10 αντίστοιχα.	53
Σχήμα 32: Η μεταβολή της τιμής του C_D για κάθε περίπτωση ύψους. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος.....	54
Σχήμα 33: Το πεδίο της μέσης πίεσης για το μικρό, μεσαίο και μεγάλο ύψος αντίστοιχα	55
Σχήμα 34: Η περιοχή ανακυκλοφορίας στο άνω μέρος του οχήματος για όλες τις περιπτώσεις	57
Σχήμα 35: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 10 m/s (κάτω εικόνα).	61
Σχήμα 36: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 10 m/s (κάτω εικόνα).	62

Σχήμα 37: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μονής έγχυσης ρευστού παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με ταχύτητα 20 m/s .	63
Σχήμα 38: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 30 m/s .	64
Σχήμα 39: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 40 m/s (κάτω εικόνα).	66
Σχήμα 40: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 40 m/s (κάτω εικόνα).	67
Σχήμα 41: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s (πάνω εικόνα) και 50 m/s (κάτω εικόνα).	68
Σχήμα 42: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s (πάνω εικόνα) και 50 m/s (κάτω εικόνα).	69
Σχήμα 43: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s (πρώτη εικόνα), 50 m/s (μεσαία εικόνα) και 60 m/s (τελευταία εικόνα).	72
Σχήμα 44: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μονής έγχυσης ρευστού παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με ταχύτητα 60 m/s .	73
Σχήμα 45: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (αριστερά) και για διπλή έγχυση με ταχύτητα 20 m/s (δεξιά).	76
Σχήμα 46: Το σημείο επανακόλλησης τη ροής στην υπό κλίση επιφάνεια στο $x_{10} = -0.063$ mm . Η σκιασμένη περιοχή ορίζει τα σημεία όπου $\bar{U} \leq 0$.	77
Σχήμα 47: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με ταχύτητα 20 m/s (δεύτερη εικόνα).	78
Σχήμα 48: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (επάνω εικόνα) και για διπλή έγχυση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή (κάτω εικόνα).	79
Σχήμα 49: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (πρώτη εικόνα), για διπλή έγχυση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με σταθερή ταχύτητα 20 m/s (μεσαία εικόνα) και 40 m/s (τελευταία εικόνα).	81
Σχήμα 50: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου με την χρήση διπλής έγχυσης παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με σταθερή ταχύτητα 40 m/s .	82
Σχήμα 51: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση διπλής έγχυσης με σταθερή ταχύτητα 60 m/s .	83
Σχήμα 52: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου όπως διαμορφώνεται από τη διπλή σταθερή έγχυση αέρα με 60 m/s .	84

Σχήμα 53: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με ταχύτητα 20 m/s και κλίση (δεύτερη εικόνα).	87
Σχήμα 54: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (επάνω εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση 45^0 (κάτω εικόνα).	88
Σχήμα 55: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση και ταχύτητα 40 m/s (δεύτερη εικόνα).	90
Σχήμα 56: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (επάνω εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση 45^0 (κάτω εικόνα).	91
Σχήμα 57: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση και ταχύτητα 60 m/s (δεύτερη εικόνα).	93
Σχήμα 58: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου μετά τη χρήση διπλής έγχυσης με κλίση 45^0 και ταχύτητα 60 m/s.	94

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Οι οριακές συνθήκες του πεδίου ροής και οι ιδιότητες τους.	25
Πίνακας 2: Τιμές που ορίζονται για τον σχηματισμό του δομημένου πλέγματος	28
Πίνακας 3: Οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν στη μελέτη.....	31
Πίνακας 4: Οι συντεταγμένες των θέσεων της εικόνας 11.	35
Πίνακας 5: Οι συντεταγμένες των θέσεων του ομόρου της εικόνας 12.	36
Πίνακας 6: Οι συντεταγμένες του τελευταίου σημείου της ανακυκλοφορίας του ομόρου στον x άξονα και y άξονα.	52
Πίνακας 7: Οπισθέλκουσα πίεσης $\vec{F}_{D,pressure}$ [N]	56
Πίνακας 8: Οπισθέλκουσα τριβής $\vec{F}_{D,friction}$ [N]	57
Πίνακας 9: Συνολική δύναμη και συντελεστής οπισθέλκουσας.....	58
Πίνακας 10: Η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας ανάμεσα στα διάφορα ύψη δομημένου πλέγματος.	59
Πίνακας 11: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 10 m/s.	62
Πίνακας 12: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 20 m/s.	64
Πίνακας 13: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 30 m/s.	65
Πίνακας 14: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s και 50 m/s.	70
Πίνακας 15: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 50 m/s και 60 m/s.	73
Πίνακας 16: Η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα σε κάθε περίπτωση μονής έγχυσης.....	75
Πίνακας 17: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s.	79
Πίνακας 18: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s.	82
Πίνακας 19: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s.....	84
Πίνακας 20: Η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα σε κάθε περίπτωση διπλής έγχυσης.....	85
Πίνακας 21: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s και κλίση.....	88
Πίνακας 22: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s και κλίση.....	91
Πίνακας 23: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s και κλίση.....	94
Πίνακας 24: Η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα σε κάθε περίπτωση διπλής έγχυσης με κλίση.	96

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Η συσχέτιση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας με την ταχύτητα έγχυσης στη περίπτωση μονού jet.	74
Διάγραμμα 2: Η συσχέτιση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας με την ταχύτητα έγχυσης στη περίπτωση διπλού jet.	85
Διάγραμμα 3: Η μεταβολή του συνολικού συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της ταχύτητας έγχυσης για κάθε διάταξη. Με τη πράσινη γραμμή ορίζεται η μονή έγχυση, με κόκκινη η διπλή και με μπλε η διπλή με κλίση.	95
Διάγραμμα 4: Η συσχέτιση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας με την ταχύτητα έγχυσης στη περίπτωση διπλού jet με κλίση 45°	95
Διάγραμμα 5: Η μεταβολή της συνολικής ενέργειας συναρτήσει της ταχύτητας έγχυσης για κάθε διάταξη. Με τη πράσινη γραμμή ορίζεται η μονή έγχυση, με κόκκινη η διπλή και με μπλε η διπλή με κλίση.	96

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο τέλος αυτού του επικοινωνιακού ταξιδιού, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευστάθιο Κωνσταντινίδη, που πρωτίστως δέχθηκε να συνεργαστούμε για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και για τον χρόνο που αφιέρωσε προκειμένου να μου δώσει τις κατάλληλες συμβουλές για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας που με εφοδίασαν με γνώσεις, ώστε στο μέλλον να μπορώ να χτίσω μια αξιοπρεπή επαγγελματική καριέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

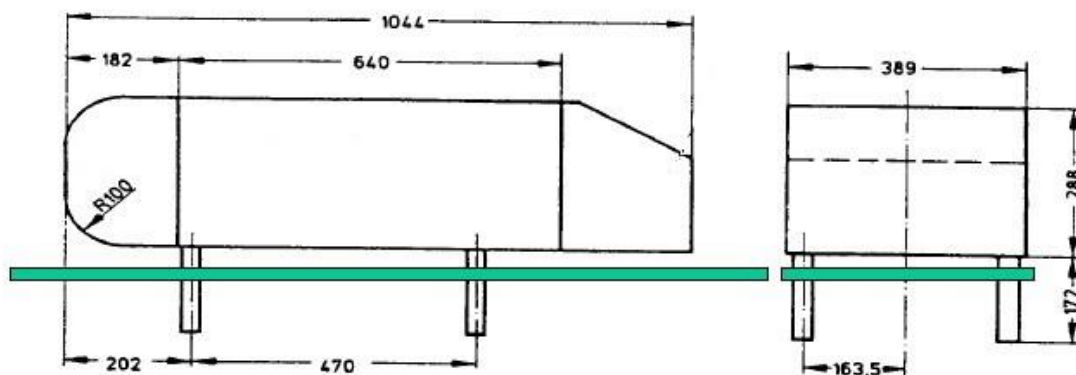
Η μηχανική των ρευστών αποτελεί ένα συναρπαστικό κλάδο της επιστήμης και μια πρόκληση για όποιον επιθυμεί να ασχοληθεί μαζί της. Σημαντικό κομμάτι αυτής, είναι η μελέτη της δυναμικής του εκάστοτε ρευστού το οποίο αλληλεπιδρά με ένα σώμα. Αυτός ο κλάδος της μηχανικής ρευστών ονομάζεται αεροδυναμική. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός μιας αεροδυναμικής μελέτης είναι να ερευνηθούν οι νόμοι που διέπουν την κίνηση ενός ρευστού (συνήθως αέρα), μόλις βρει εμπόδιο ένα κινούμενο ή ακίνητο σώμα. Ανά τα χρόνια, οι γεωμετρίες που αποτέλεσαν αντικείμενο αεροδυναμικής μελέτης διαφέρουν σε μέγεθος. Από κτίρια και γέφυρες, μέχρι αεροσκάφη και αυτοκίνητα, με τη δεύτερη κατηγορία να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον των ερευνητών. Παρατηρήθηκε πως η βελτίωση στις αεροδυναμικές ιδιότητες των επιβατικών οχημάτων, συνδυάζει την επίτευξη καλύτερων επιδόσεων σε συνδυασμό με τη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου.

1.1 Πρότυπο όχημα και πειραματικές μελέτες

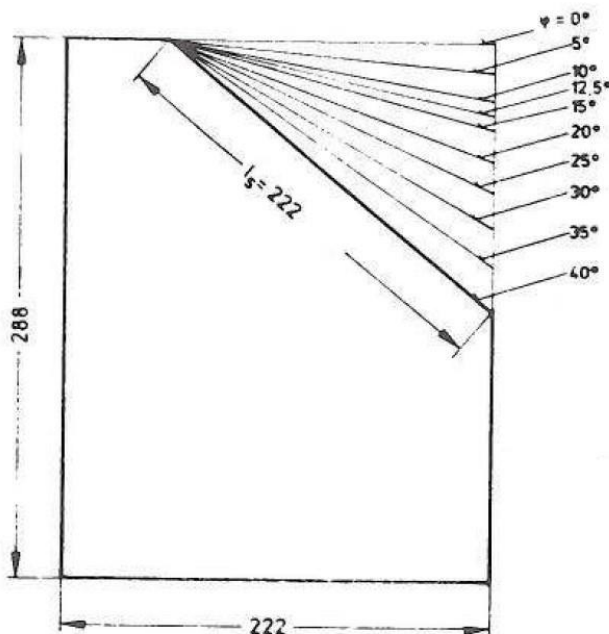
Μέχρι το 1980, οι παράμετροι που απασχολούσαν τους κατασκευαστές στη σχεδίαση των επιβατικών οχημάτων ήταν η αισθητική και η εύκολη πρόσβαση στα μηχανικά του μέρη με σκοπό την επισκευή. Με το πέρασμα των χρόνων και όσο μειωνόταν η διαθεσιμότητα του καυσίμου, η αεροδυναμική σχεδίαση του οχήματος έμοιαζε η μόνη λύση για την μείωση της κατανάλωσης. Λόγω του ότι τα διαθέσιμα εργαλεία που είχαν στην κατοχή τους οι επιστήμονες δεν τους έδιναν την δυνατότητα να μελετήσουν με ακρίβεια την αεροδυναμική ενός οχήματος, το 1984 δημοσιεύτηκε μια εργασία για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Οι Ahmed et al. (1984) (το όνομα του οποίου δόθηκε στο σχήμα της μελέτης) ήταν ο πρώτος που οραματίστηκε και έκανε πειράματα πάνω σε απλουστευμένη μορφή επιβατικού οχήματος.

Θεώρησε πως η μελέτη πρέπει να επικεντρωθεί στα σημεία όπου υπάρχει έντονη αποκόλληση της ροής, μη λαμβάνοντας υπόψη τις ρόδες του οχήματος και οποιαδήποτε απότομη αλλαγή γεωμετρίας στο εμπρός ή πλάγιο κομμάτι του οχήματος. Έτσι, διέγραψε τις καμπύλες από όλο το όχημα, στρογγυλοποίησε όλες τις άκρες της εμπρός κάθετης

επιφάνειας για να εξασφαλίσει την ομαλότητα της ροής στο εμπρός μισό του οχήματος. Έδωσαν μεγαλύτερη βαρύτητα στην επίδραση της υπό κλίσης επιφάνειας, καθώς και της πίσω κάθετης επιφάνειας. Το τελικό σχήμα (όλες οι διαστάσεις σε χιλιοστά) παρουσιάζεται στην εικόνα 1. Στην εικόνα 2 απεικονίζεται η μορφολογία του πίσω μέρους του οχήματος μεταβάλλοντας τις μοίρες της υπό κλίσης επιφάνειας. Μεγαλύτερη προσοχή στη δομή του πεδίου δόθηκε στις περιπτώσεις των 25° και 30° , με εκείνη των 25° να απασχολεί μεγαλύτερο μερίδιο των μετέπειτα εργασιών πάνω στο σώμα Ahmed, συμπεριλαμβανομένων και της συγκεκριμένης.



Σχήμα 1: Η τελική μορφή του σχήματος Ahmed με τις διαστάσεις σε mm



Σχήμα 2: Η μορφολογία του πίσω μέρους του οχήματος από 0° έως 40° .

Οι μετρήσεις του πειράματος έγιναν θέτοντας μια εισερχόμενη ομοιόμορφη ταχύτητα $U_{\infty} = 60 \text{ m/s}$ που αντιστοιχεί σε ένα αριθμό Reynolds (σχέση 1), με χαρακτηριστικό μήκος το συνολικό μήκος του σώματος, ίσο με $Re_L = 4.29 \cdot 10^6$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για γωνία $\varphi \geq 12.5^\circ$, το πεδίο ροής είναι πλήρως ασταθές, με αποτέλεσμα στο πίσω μέρος του σώματος να δημιουργούνται τριών ειδών δομές, το μέγεθος το οποίων μεταβάλλεται συναρτήσει της γωνίας φ . Μια περιοχή αποκόλλησης στην υπό γωνία επιφάνεια (E), ένα ζεύγος δινών με φορά αντίθετη του ρολογιού με το όνομα C pillar vortices ή απλούστερα C-vortices (C) και δυο περιοχές ανακυκλοφορίας στην πίσω κάθετη επιφάνεια (A και B) (εικόνα 3).

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} = \frac{U_{\infty} L}{\nu} \quad (1)$$

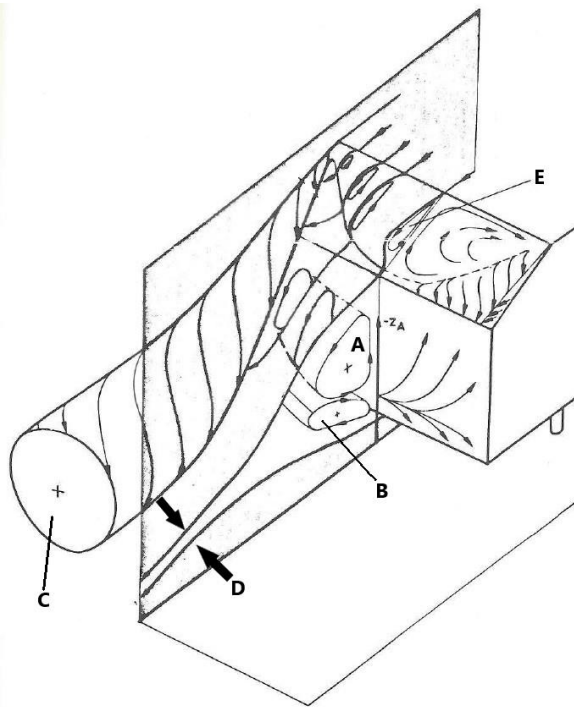
Όπου: $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του ρευστού στους 20°C

$U_{\infty} [\text{m/s}]$: ταχύτητα του οχήματος (ταχύτητα της αεροσήραγγας)

$L [\text{m}]$: χαρακτηριστικό μήκος

$\mu [\text{kg/m} \times \text{s}]$: το δυναμικό ιξώδες του ρευστού $\mu = 1.806 \times 10^{-5}$

$\nu [\text{m}^2/\text{s}]$: το κινηματικό ιξώδες του ρευστού από τον τύπο $\nu = \frac{\mu}{\rho} = 1.5 \times 10^{-5}$



Σχήμα 3: Η μορφολογία του μέσου πεδίου ροής πάνω στο σώμα αλλά και στον ομόρου.

Η ροή προερχόμενη από τα πλάγια του σώματος έλκεται από την περιοχή χαμηλής πίεσης στην υπό κλίση επιφάνεια δημιουργώντας διατμητικά στρώματα τα οποία στη συνέχεια ενώνονται σε μια μεγάλη δίνη με φορά αντίθετη του ρολογιού (δίνη C από σχήμα 3). Η ροή στην οροφή του οχήματος μόλις φτάσει στο τέλος της αποκολλάται, με συνέπεια να δημιουργείται μια περιοχή ανακυκλοφορίας στην επικλινή επιφάνεια, όπως καταγράφεται στην παραπάνω εικόνα με το γράμμα E. Οι δίνες A και B δημιουργούνται στην άνω και κάτω άκρη αντίστοιχα της πίσω κάθετης επιφάνειας εξαιτίας του ότι τα διατμητικά στρώματα “τυλίγονται” μόλις η ροή φτάσει στα άκρα της επικλινής και κάτω επιφάνειας αντίστοιχα. Οι δίνες A και B μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελούν μέρος μιας μεγαλύτερης περιοχής ανακυκλοφορίας του ομόρου (περιοχή D στην εικόνα 3). Η ισχύ της δίνης A εξαρτάται από την ισχύ της C που με τη σειρά της εξαρτάται από τη γωνία φ . Έτσι, η ένταση της A είναι συνυφασμένη με την γωνία, ενώ η ισχύς της B ορίζεται από τις συνθήκες ροής κάτω από το όχημα.

Οι Lienhart et al. (2002) κατάφεραν να αποδείξουν με πειραματικές μετρήσεις ότι στην περίπτωση που $\varphi = 35^\circ$, η ανακυκλοφορία E της εικόνας 3, εκτείνεται σε όλο το μήκος της επιφάνειας, σε αντιδιαστολή με την περίπτωση $\varphi = 25^\circ$, όπου η έκταση και το μέγεθος της αποκόλλησης είναι σημαντικά μικρότερα εξαιτίας της επίδρασης που έχουν οι δίνες C σε αυτή την περιοχή. Ουσιαστικά βοηθούν στην επανακόλληση της ροής στην επιφάνεια, κάτι που δεν συμβαίνει σε πολύ μεγάλες γωνίες. Επιπλέον κατάφεραν να αποδείξουν ότι υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στη γωνία φ και στο μέσο πεδίο ανακυκλοφορίας στον ομόρου, με εκείνο της γωνίας των 35 μοιρών να είναι μεγαλύτερο και ισχυρότερο. Πιο αναλυτική μελέτη πάνω στις δίνες, πραγματοποίησαν οι Zhang et al. (2014), σε σχήμα όπου $\varphi = 25^\circ$ και αριθμό Reynolds από 0.45×10^5 έως 2.4×10^5 .

Όπως αναφέρεται παραπάνω, καίριος παράγοντας στη λεπτομερή ενασχόληση με τη σχεδίαση επιβατικού οχήματος, αποτέλεσε η ανάγκη εξοικονόμησης καυσίμου. Οι ερευνητές αναζητούσαν τρόπους ώστε το όχημα να πραγματοποιεί μια διαδρομή με την ελάχιστη δυνατή αντίσταση. Μεγάλο μερίδιο αυτής αποτελεί η αντίσταση που οφείλεται στη ροή αέρα γύρω από το σώμα, δηλαδή στην ύπαρξη μιας δύναμης με φορά αντίθετη στην κίνηση του σώματος. Η δύναμη αυτή ονομάζεται δύναμη οπισθέλκουσας και συμβολίζεται ως \vec{F}_D . Αποτελεί την συνισταμένη των δυνάμεων πίεσης και διάτμησης. Το δεύτερο είδος προκαλείται πάνω στην επιφάνεια του σώματος, εξαιτίας των φαινομένων συνεκτικότητας μεταξύ του ρευστού και της εκάστοτε επιφάνειας. Όταν ο αριθμός Reynolds είναι αρκετά μικρός τότε θα ήταν λάθος να μην λάβουμε υπόψη μας την επίδρασή τους στο σώμα μας. Στην περίπτωση τόσο του Ahmed et al. (1984) όσο και των Lienhart et al. (2002), η τιμή του Reynolds είναι αρκετά μεγάλη και έτσι δεν παρέθεσαν κάποιες τιμές για αυτή τη συνιστώσα της οπισθέλκουσας.

Από την άλλη μεριά όμως η δύναμη πίεσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην τελική τιμή της οπισθέλκουσας. Η μορφολογία το πεδίου ροής, με όλες τις περιοχές ανακυκλοφορίας που περιγράφηκαν με γνώμονα την εικόνα 3, δημιουργούν μια διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εμπρός και πίσω κομμάτι του οχήματος η οποία πολλαπλασιασμένη με την μετωπική επιφάνεια δίνουν την δύναμη πίεσεων. Επειδή οι δυνάμεις οπισθέλκουσας εξαρτώνται από την πυκνότητα ρ του αέρα, την ταχύτητα που κινείται το όχημα V , το μέγεθος, το σχήμα

και τον προσανατολισμό του σώματος μεταξύ άλλων παραγόντων, δεν είναι πρακτικό να προσπαθούμε να τις ορίσουμε λόγω πολυπλοκότητας. Αντίθετα, συμφέρει να υπολογίσουμε αδιάστατους αριθμούς που αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά της δύναμης οπισθέλκουσας. Θεωρούμε τον συντελεστή οπισθέλκουσας C_D από τη σχέση 2.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

Όπου: $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του αέρα στους 20°C

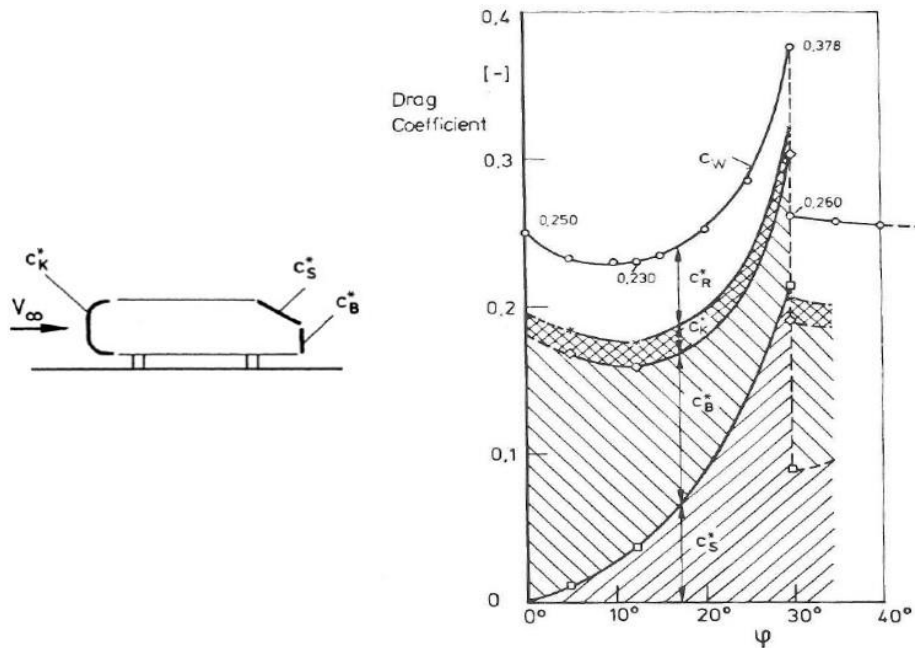
F_D [N]: η δύναμη οπισθέλκουσας.

V [m/s]: η ταχύτητα του οχήματος.

A [m²]: η επιφάνεια του οχήματος που βλέπει παρατηρητής κινούμενος με το ρευστό (μετωπική).

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα από τα πειράματα του ο συγγραφέας της πρωτότυπης εργασίας, δημιούργησε ένα διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει λεπτομερώς τις τιμές του συντελεστή αντίστασης για ένα εύρος γωνιών από $0 - 40^\circ$, όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Με βάση την εικόνα, έχουν υπολογισμοί για το συντελεστή στο εμπρός μέρος C_K , στην πίσω κάθετη επιφάνεια C_B , στην υπό κλίση επιφάνεια C_S , στο friction drag C_R και προφανώς για τον ολικό C_W .

Μέσα από μετρήσεις οι Ahmed et al. (1984) κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η τιμή του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας αυξάνεται με την μεταβολή της γωνίας φ , με τη μέγιστη τιμή της να υπολογίζεται όταν $\varphi = 30^\circ$. Για γωνίες μέχρι $\varphi = 12.5^\circ$, η ροή μένει προσκολλημένη σε όλο το μήκος της επικλινής επιφάνειας. Η ελάχιστη τιμή του ολικού συντελεστή παρουσιάζεται σε αυτή τη γωνία και η ροή χαρακτηρίζεται ως δισδιάστατη. Αυξάνοντας την γωνία, μέχρις ότου φτάσουμε στις 30° , η ροή στην υπό κλίση επιφάνεια γίνεται τρισδιάστατη, η δύναμη οπισθέλκουσας αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό έως ότου φτάσει την μέγιστη τιμή και γι' αυτό ονομάζεται κρίσιμη. Τιμές μεγαλύτερες αυτής αλλάζει δραστικά το πεδίο ροής καθώς παρατηρείται μεγάλη μείωση στη τιμή του ολικού συντελεστή. Όταν η γωνία παίρνει τιμές κοντά στις 30° , η ροή αποκολλάται από την επικλινή επιφάνεια δημιουργώντας δύο δίνες υπεύθυνες για τους υψηλούς αριθμούς της δύναμης οπισθέλκουσας. Οι δίνες αποδυναμώνονται σε περίπτωση που γωνία περάσει την κρίσιμη τιμή.



Σχήμα 4: Γραφική αναπαράσταση του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας φ .

1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι επίλυσης

Όλες οι προαναφερθείσες μετρήσεις πάνω στη ροή ρευστού πραγματοποιήθηκαν μέσα σε ένα εργαστήριο. Αυτό σημαίνει πως κατασκευάστηκε ένα μοντέλο, έπειτα τοποθετήθηκαν πάνω του αισθητήρες, ανάλογα με τις μετρήσεις που επιθυμεί ο επιστήμονας να κάνει. Τέλος τοποθετήθηκε σε μια αεροσήραγγα μέσα στην οποία διοχετεύεται ρευστό με κάποιες ιδιότητες. Αυτή η διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων ονομάζεται πειραματική. Εκτός από την διεξαγωγή πειραμάτων ο ερευνητής μπορεί να επιλύσει τέτοιου είδους προβλήματα επιλύοντας εξισώσεις είτε αναλυτικά είτε υπολογιστικά. Η μέθοδος επίλυσης εξισώσεων ονομάζεται υπολογιστική. Οι σχέσεις πάνω στις οποίες βασίστηκε όλη η μελέτη κίνησης ενός ρευστού γύρω από ένα σώμα, προέρχονται από τρεις βασικές αρχές της φύσης. Την αρχή διατήρησης της μάζας, το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα και την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Αυτές είναι η εξίσωση συνέχειας (σχέση 3) και η διαφορική μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes (σχέση 4), προς τιμή των επιστημόνων που τις ανέπτυξαν των 19^ο αιώνα. Οι διαφορικές εξισώσεις 3 και 4 μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε σημείο του πεδίου μιας ασταθής ή μη ροής.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} + \vec{\nabla}P = \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 V \quad (4)$$

Εδώ πρέπει να αναφερθεί πως το διάνυσμα της ταχύτητας αναλύεται στου όρους $\vec{V} = U_x + V_y + W_z$, με τον αριθμό των όρων να μεταβάλλεται ανάλογα με τις διαστάσεις του πεδίου (δισδιάστατο ή τρισδιάστατο). Το γεγονός ότι οι μαθηματικές σχέσεις είναι πολύπλοκες, ειδικά για σύνθετες γεωμετρίες και πολύπλοκες ροές, η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων αποτελεί μια επίπονη, χρονοβόρα και επιρρεπής στα λάθη δοκιμασία. Χάρης την εξέλιξη των υπολογιστών, είμαστε σε θέση να επιλύουμε τις εξισώσεις υπολογιστικά, σε μικρότερο χρόνο συγκριτικά με την αναλυτική προσέγγιση. Η διαδικασία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν μια ροή ρευστού, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή ονομάζεται υπολογιστική ρευστομηχανική ή στα αγγλικά Computational Fluid Dynamics (CFD). Η ανάγκη για την χρήση υπολογιστή, οδήγησε τους επιστήμονες να χρησιμοποιήσουν μαθηματικές τεχνικές που θα ανέλυαν τις διαφορικές εξισώσεις σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, δίνοντας βέβαια μια προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα.

Το πρώτο και αναπόσπαστο βήμα σε μια CFD ανάλυση είναι η δημιουργία ενός πλέγματος που ορίζει τα κελιά ή αλλιώς στοιχεία, στα κέντα των οποίων πρόκειται να υπολογιστούν οι μεταβλητές των εξισώσεων κίνησης (ταχύτητα, πίεση κ.τ.λ.). Το πλέγμα ενός πεδίου ροής μπορεί να είναι δομημένο ή μη-δομημένο. Το δομημένο πλέγμα αποτελείται από στοιχεία που έχουν τέσσερις ακμές, για δισδιάστατο πεδίο μελέτης (2D) είτε από κελιά όγκου με έξι επιφάνειες, για τρισδιάστατο πεδίο (3D). Ένα μη δομημένο πλέγμα μπορεί να αποτελείται από τετραγωνικά ή τριγωνικά κελιά σε 2D μελέτη και τετραεδρικά ή εξαεδρικά κελιά για 3D πεδίο. Σε περίπλοκες γεωμετρίες, η δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος είναι πιο εύκολη, ωστόσο το δομημένο πλέγμα προσφέρει πλεονεκτήματα. Το πεδίο μελέτης απαιτεί μικρότερο αριθμό κελιών για να γεμίσει όταν εξετάζεται δομημένο πλέγμα, συγκριτικά με το μη –δομημένο που απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό. Στο οριακό στρώμα, που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας μελέτης, οι ροϊκές μεταβλητές υφίστανται έντονες μεταβολές κάθετα του τοιχώματος και απαιτείται υψηλής διακρισιμότητας (resolution) πλέγμα για καλύτερη ανάλυση αυτών των μεταβολών. Το δομημένο πλέγμα μπορεί να επιτύχει αυτό το σκοπό για παρόμοιο αριθμό κελιών σε σχέση με το μη-δομημένο.

Σε πληθώρα υπολογιστικών αναλύσεων προτιμάται πλέγμα όπου συνδυάζει περιοχές του πεδίου με δομημένο και μη-δομημένο πλέγμα, γνωστό και ως υβριδικό πλέγμα. Για παράδειγμα, είναι σύνηθες να ορίζεται δομημένο πλέγμα στη περιοχή κοντά στο τοίχωμα για την μελέτη του οριακού στρώματος και μη δομημένο έξω από αυτό. Χάρης σε αυτό το συνδυασμό ο ερευνητής είναι σε θέση να καθορίσει ποιες περιοχές χρήζουν περισσότερης και ποιες λιγότερης ακρίβειας. Η δημιουργία ενός καλού πλέγματος είναι χρονοβόρα διαδικασία και πολλές φορές απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή από την υπόλοιπη μελέτη ρευστοδυναμικής. Ένα πλέγμα με κακοσχηματισμένα κελιά, μη επαρκή αριθμό και αναρίθμητους άλλους παράγοντες, είναι σχεδόν σίγουρο πως θα οδηγήσει, στην καλύτερη των περιπτώσεων, σε λανθασμένη λύση. Το πρόβλημα υφίσταται σε απλές γραμμικές ροές, αλλά αποκτά μεγάλες διαστάσεις όταν η ροή είναι τυρβώδης.

Σύμφωνα με τους Cengel et al. (2006), η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από ακατάστατες και ταχέως εξελισσόμενες διαταραχές στροβιλιζόμενων περιοχών ικανές να μεταφέρουν πολύ γρήγορα μάζα, ορμή και ενέργεια σε όλο το μήκος του πεδίου συγκριτικά με τη μοριακή διάχυση, με αποτέλεσμα στις τυρβώδεις ροές να υφίστανται υψηλότερες τιμές συντελεστών τριβής μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Οι διαταραχές αυτές ονομάζονται δίνες και μπορούν να πάρουν διάφορες μορφές στην διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Θεωρητικά, μπορούμε να επιλύσουμε μια τυρβώδης ροή λύνοντας αριθμητικά τις εξισώσεις, με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται DNS (DIRECT NUMERICAL SIMULATION), αλλά δεν εφαρμόζεται σχεδόν ποτέ καθώς είναι υπολογιστικά και χρονικά κοστοβόρα. Εναλλακτικά, υπάρχουν άλλες μέθοδοι επίλυσης, όπως είναι η LES και η RANS που έχουν συχνότεροι εφαρμογή.

Η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση στην βιομηχανία λόγω της εφαρμογής της σε μεγάλο εύρος προβλημάτων και της μειωμένης ανάγκης σε υπολογιστική ισχύ, είναι η RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes). Βασισμένη πάνω στην τεχνική αποδόμησης Reynolds., κάθε στιγμιαία μεταβλητή του πεδίου (ταχύτητα, πίεση κ.α.), μπορεί να αναλυθεί σαν το άθροισμα της μέσης τιμής της και της συνιστώσας διαταραχής. Χάρη αυτή τη μέθοδο, οι εξισώσεις που αφορούν μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, παράγουν σχέσεις για το μέσο πεδίο. Εξαιτίας αυτής της ενσωμάτωσης και της διαίρεσης των όρων με τον χρόνο, δημιουργούνται νέοι όροι στο σύστημα που αφορούν την τυρβώδη μεταφορά της ορμής και μάζας, γνωστοί ως τάσεις Reynolds ή τυρβώδεις τάσεις. Η μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds και κατ' επέκταση η ανάγκη για το "κλείσιμο" των εξισώσεων του συστήματος, οδήγησε στη δημιουργία ημι-εμπειρικών σχέσεων για την εύρεση αυτών των νέων όρων και της συσχέτισής τους μέσα στο πεδίο. Με το πέρασμα των χρόνων δημιουργήθηκαν πολλά μοντέλα και το ANSYS/FLUENT, δίνει στο χρήστη πρόσβαση σε πληθώρα από αυτά, με τα βασικότερα να είναι το Spalart-Allmaras, k- ω (k-omega) και k- ϵ (k-epsilon) μαζί με όλα τα παράγωγά τους, τα οποία αναλύονται τη συνέχεια.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η μέθοδος RANS δεν είναι επαρκής, με την LES (Large Eddy Simulation) να αποδεικνύεται πιο χρήσιμη. Με την LES, χρονικά εξαρτώμενες σχέσεις "φιλτράρονται" ώστε να αφαιρεθούν πολύ μικρές δομές από το πεδίο ροής, καθιστώντας το ακατάλληλο για την περιοχή πολύ κοντά στο τοίχωμα. Έχει τη δυνατότητα να δώσει πληροφορίες για μεγάλες δομές δινών, με τάξη μεγέθους κοντά σε αυτή των διατμητικών στρωμάτων. Το τμήμα αυτού του μοντέλου είναι μικρά χρονικά βήματα, σε συνδυασμό με το υπολογισμό μεγάλου αριθμού χρονικών βημάτων και πολύ πυκνό πλέγμα σε ροές γύρω από τοίχο.

Συνήθης στρατηγική στην επίλυση τυρβώδους ροής αποτελεί ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων μοντέλων και ονομάζεται Hybrid RANS-LES. Η ιδέα πίσω από τον συνδυασμό των δυο είναι πως το LES μοντέλο αποδεικνύεται υπολογιστικά δαπανηρό για περίπλοκες ροές υψηλού αριθμού Reynolds, που επηρεάζονται από την περιοχή πολύ κοντά στο σώμα, ευρέως γνωστή ως οριακό στρώμα. Κατά τη χρήση αυτής της μεθόδου επιστρατεύεται το RANS μοντέλο στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα, ενώ το LES επιλύεται έξω από τα όριά της, όπου οι ασταθείς και μεγάλοι μεγέθους δίνες παίζουν καίριο ρόλο. Μια διαδεδομένη μορφή Hybrid RANS-LES μοντέλου είναι το DES (Detached Eddy Simulation) εξαιτίας του εύρους των εφαρμογών που μπορεί να αξιοποιηθεί και της αισθητής μείωσης του υπολογιστικού κόστους σε σχέση με τη μέθοδο LES. Λόγω της

συνεχούς εφαρμογής του τα τελευταία χρόνια έχει δεχθεί σημαντικές μαθηματικές βελτιώσεις. Έτσι, η εξελιγμένη μορφή του ονομάστηκε Improved DDES (IDDES). Προϋπόθεση για την εφαρμογή των μοντέλων απαιτεί η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου. Πρέπει δηλαδή το πεδίο πάνω στο οποίο θα λυθούν οι εξισώσεις, να χωριστεί σε στοιχεία ή διαφορετικά σε κελιά (elements) που αντιστοιχούν σε θεωρητικό όγκο ελέγχου στον οποίο επιλύεται η διακριτοποιημένη έκδοση των σχέσεων 3 και 4.

1.3 Εφαρμογές υπολογιστικών μεθόδων

Με την πάροδο των χρόνων, έχουν δημιουργηθεί πολλών ειδών μοντέλα και συνεχίζουν μέχρι σήμερα να εξελίσσονται. Όμως, δεν μπορεί κανείς με βεβαιότητα να προδικάσει αν κάποιο μοντέλο είναι πιο ακριβές από κάποιο άλλο. Κάθε ένα προσφέρει τις δικές του δυνατότητες, με το είδος του εκάστοτε πεδίου ροής να παίζει καίριο ρόλο στην επιλογή. Στην περίπτωση του Ahmed body υπήρξε πληθώρα ερευνητών που προσπάθησαν να διαπιστώσουν πιο μοντέλο είναι ικανό να δώσει αποτελέσματα που συνάδουν καλύτερα με του πειράματος. Επειδή το πρόβλημα ροής γύρω από πρότυπο όχημα είναι χρονικά εξαρτώμενο, στις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει εισαχθεί και η παράμετρος του χρόνου, ενώ τα συμπεράσματα για την καταλληλότητα του εκάστοτε μοντέλου έχουν εξαχθεί με βάση το μέσο πεδίο.

Οι υπολογιστικές μελέτες που ακολουθούν, πραγματοποιήθηκαν αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της πειραματική μελέτης των Lienhart et al. (2002). Αυτό σημαίνει πως το Ahmed Body έχει γωνία $\varphi = 25^\circ$, η ταχύτητα του αέρα εισερχόμενος στη σήραγγα είναι $U_\infty = 40$ m/s και ο αριθμός Reynolds έχει τιμή $Re_H = 7.68 \times 10^5$ με το χαρακτηριστικό μήκος να είναι το ύψος του σώματος. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στο προφίλ της ταχύτητας, στην κατεύθυνση της ροής (U), στην υπό κλίση επιφάνεια και στο ομόρου. Οι Ashton et al. (2016), μετά από δοκιμή τεσσάρων μοντέλων RANS, παρατήρησαν ότι κανένα από τα μοντέλα δεν προβλέπει σωστά την περιοχή ανακυκλοφορίας πάνω στην επικλινή επιφάνεια. Διαπίστωσαν πως παρόλο που τα μοντέλα έχουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους, έχουν την τάση να υπερδιαστασιολογούν την αποκόλληση της ροής. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μειωμένης κινητικής ενέργειας λίγο μετά το ξεκίνημα της γωνίας, δηλαδή στο αρχικό διατμητικό στρώμα, που σημαίνει μικρότερη τυρβώδης μίξη και κατά συνέπεια μεγαλύτερη ανακυκλοφορία.

Στην αξιοποίηση του Hybrid RANS-LES και πιο συγκεκριμένα του SST-IDDES, παρατηρήθηκε κάποια βελτίωση στην πρόβλεψη του προφίλ ταχύτητας, σαν αποτέλεσμα της υψηλότερης κινητικής ενέργειας στη περιοχή αποκόλλησης. Όμως, για ακόμα μια φορά η ενέργεια είναι κατώτερη από αυτή που υποδεικνύει το πείραμα, με συνέπεια την μεγέθυνση της περιοχής ανακυκλοφορίας. Διαφορετική μορφή αποκτά η ροή στην περίπτωση του απλού μοντέλου DES, πιο συγκεκριμένα του DES-SST. Σύμφωνα με την υπολογιστική μελέτη των Serre et al. (2013), το μοντέλο δεν είναι ικανό να προβλέψει την επανακόλληση της ροής στην επικλινή επιφάνεια, αντίθετα δείχνει αποκόλληση σε όλο το μήκος της. Η μεγάλη ανακυκλοφορία επιδρά και στην μορφολογία του ομόρου, αφού η άνω δίνη του ζεύγους που σχηματίζεται κοντά στο σώμα (δίνη A εικόνα 3), έχει μεγαλύτερο μέγεθος καλύπτοντας όλη την κάθετη επιφάνεια. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι το διατμητικό

στρώμα εμφανίζεται σε απόσταση μεγαλύτερη από την αρχή της γωνίας, όπως αποδείχθηκε στο πείραμα.

Αν και όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα πρόβλεψαν σωστά την ανακυκλοφορία πίσω από το όχημα, το LES-SVV ήταν εκείνο που κατάφερε να υποδείξει την επανακόλληση της ροής στην επικλινή επιφάνεια. Καθοριστικός παράγοντας φαίνεται να έπαιξε το γεγονός ότι το πλέγμα που δημιουργήθηκε για αυτό το μοντέλο ήταν πιο πυκνό. Όσον αφορά τη μέση τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D , το μοντέλο LES-SVV παρουσιάζει υπερεκτίμηση της τάξης του 44% από αυτή του πειράματος, ενώ τα DES-SST και LES-NWR 15% και 16% αντίστοιχα. Παραδόξως, η καλή συμφωνία του μοντέλου LES-SVV με το πείραμα όσον αφορά τη μορφολογία της ροής, δε συνάδει με τη ταύτιση του μέσου συντελεστή. Το αρνητικό του μοντέλου είναι ότι προβλέπει μια πολύ μεγάλη περιοχή αποκόλλησης στο εμπρός μέρος του οχήματος που περιλαμβάνουν τυρβώδεις μορφές που μεταφέρονται περαιτέρω στην οροφή, καθυστερώντας έτσι την αποκόλληση στην επικλινή επιφάνεια.

Την ανικανότητα του μοντέλου RANS να προσομοιώσει την μορφολογία του πεδίου ροής γύρω από το όχημα Ahmed, έρχεται να επιβεβαιώσει η μελέτη των Guilmineau et al. (2016). Σημαντική βελτίωση όμως παρατηρείται όταν επιστρατεύεται το IDDES μοντέλο. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από την μελέτη του Thacker (2010), η απόκλιση μεταξύ του σημείου επανακόλλησης της ροής είναι σχεδόν ασήμαντη, ενώ η ανακυκλοφορία του DES καλύπτει όλη την υπό γωνία επιφάνεια. Συμπεράσματα για το μέγεθος της περιοχής ανακυκλοφορίας μπορούν να εξαχθούν και από την τυρβώδης κινητική ενέργεια, όπου στο RANS είναι μικρότερη του πειράματος με συνέπεια μικρότερη τυρβώδης μίξη και μεγαλύτερη δίνη. Τέλος ο συντελεστής οπισθέλκουσας υπολογίζεται μεγαλύτερος του πειραματικού, με το μοντέλο IDDES να έχει την μικρότερη απόκλιση.

1.4 Έλεγχος της ροής

Μέσα από συνεχείς μελέτες οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η μείωση της αντίστασης του αέρα θα επέλθει μεταβάλλοντας τη μορφολογία του πεδίου ροής κοντά στο σώμα. Η διαδικασία κατά την οποία επιστρατεύονται διάφορες μέθοδοι με σκοπό τη χειραγώγηση του πεδίου ροής για την επίτευξη συγκεκριμένων αποτελεσμάτων ονομάζεται έλεγχος ροής. Με τη σωστή χρήση μιας τέτοιας μεθόδου πάνω σε ένα όχημα, μπορεί να αυξήσει την τελική του ταχύτητα, να μειώσει τον παραγόμενο θόρυβο ακόμα και να συμβάλει στην ευελιξία του οχήματος. Η ελάττωση στην κατανάλωση του καυσίμου αποτελεί τον απώτερο σκοπό για την εφαρμογή μεθόδου ελέγχου ροής πάνω σε επιβατικό όχημα. Πιο συγκεκριμένα, μείωση του C_D κατά 0.01 μπορεί να βελτιώσει την κατανάλωση του καυσίμου κατά 0.014 l/100km (λίτρα ανά εκατό χιλιόμετρα), ενώ παρόμοια μείωση σε φορτηγά είναι 0.027 l/100km. Για παράδειγμα, εάν ένα αυτοκίνητο χρειάζεται 6.3 λίτρα καυσίμου για εκατό χιλιόμετρα, μετά την μεταβολή του συντελεστή θα καταναλώνει 6.286.

Σύμφωνα με τον Konstantinidis (2019), οι δύο μέθοδοι ελέγχου ροής είναι ο ενεργητικός και ο παθητικός. Ο παθητικός έλεγχος, δεν απαιτεί πρόσδοση επιπρόσθετης ενέργειας, αλλά βασίζεται σε τροποποιήσεις πάνω στο σχήμα ή κάποια άλλα χαρακτηριστικά της

εξωτερικής επιφάνειας. Παράδειγμα μιας τέτοιας μεθόδου είναι επικάλυψη της μεταλλικής επιφάνειας με διαφορετικό ύφασμα. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μετατροπή του πεδίου είναι ο ενεργητικός τρόπος. Αντίθετα από τον παθητικό, απαιτείται πρόσδοση ενέργειας για την λειτουργία μηχανισμών που διαταράσσουν τη ροή με σταθερό ή μη τρόπο. Το πρώτο είδος ενεργητικών μηχανισμών προεξέχουν από την εξωτερική επιφάνεια (π.χ. κινούμενα πτερύγια) μεταβάλλοντας τη, συναρτήσει του χρόνου. Το δεύτερο είδος που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής, δεν στοχεύει στη μεταβολή της επιφάνειας. Στόχος αυτών των μηχανισμών είναι να προσδίδουν ή να αφαιρούν ενέργεια από την εξωτερική ροή, μέσω μικρών οπών πάνω στην επιφάνεια του οχήματος, τα επονομαζόμενα και ως jet (εγχυτήρας).

Μια ιδιαίτερη κατηγορία jet αποτελούν τα synthetic jet, τα οποία δεν απαιτούν εξωτερική παροχή αέρα αλλά λειτουργούν με την προσφορά ρευστού από το εξωτερικό πεδίο. Το synthetic jet πετυχαίνει τον έλεγχο της ροής μέσω οπών στην επιφάνεια του οχήματος, με το ρευστό του πεδίο να εισέρχεται και εξέρχεται από τις ίδιες οπές. Κατά την εκτόξευση του ρευστού από την οπή, σχηματίζεται ένα "στρώμα" αέρα και στη συνέχεια δημιουργεί μια δίνη, η οποία κινείται χάρις στη δική της εσωτερική κινητική ενέργεια. Τη στιγμή της απορρόφησης, η δίνη έχει μετακινηθεί αρκετά και έτσι δεν επηρεάζεται από το κομμάτι της ροής που εισέρχεται στην οπή. Αυτή η διαδικασία είναι χρονικά εξαρτώμενη με τη συχνότητα να παίζει καίριο ρόλο. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιούνται synthetic jet, αλλά εγχυτήρες με συνεχή παροχή αέρα μέσα στο πεδίο ροής.

Οι διατάξεις των jet, ο αριθμός τους, η ισχύς λειτουργίας και ο τρόπος έγχυσης είναι κάποιοι από τους παράγοντες που απασχόλησαν τους επιστήμονες, με τον εκάστοτε να τροποποιεί έναν ή όλους για την μέγιστη δυνατή μείωση της αντίστασης. Για παράδειγμα, οι Brunn et al. (2007) στην περίπτωση όπου $\varphi = 25^\circ$ τοποθέτησαν δύο διατάξεις στα δύο άκρα του σώματος στην αρχή της υπό κλίση επιφάνειας. Η έγχυση του ρευστού γίνεται κάθετα στο σώμα. Μέσα από πειράματα και με την χρήση υπολογιστή παρατήρησε αποδυνάμωση των δινών, με την πολύ μικρή μείωση του C_D της τάξης του 2.5% για ένα μικρό εύρος ισχύς. Αύξηση αυτής προκαλεί την αύξηση του συντελεστή, μιας και η αποδυνάμωση των δινών στην επιφάνεια επιτεύχθηκε, αλλά το μέγεθος της ανακυκλοφορίας αυξήθηκε.

Πιο ελπιδοφόρα αποτελέσματα παρουσίασαν οι Aubrun et al. (2011), όταν εγκατέστησε ένα σύνολο εγχυτήρων λίγο μετά το τέλος της οροφής, καλύπτοντας όλο το μήκος. Αυτή η διάταξη επέφερε μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας 9% έως και 14%. Ποσοστό που διατηρείται σε περίπτωση που η ισχύς των jet αποκτήσει μια συγκεκριμένη τιμή. Όσο για τον συντελεστή άνωσης C_L , ελαττώνεται στο 42% της αρχικής τιμής, αλλά με την αύξηση της ισχύς παίρνει την ίδια τιμή με την περίπτωση όπου δεν έχουμε jet. Πιο ολοκληρωμένη έρευνα πάνω στη μελέτη του οχήματος δημοσιεύτηκε από τον Eichinger (2012). Το όχημα Ahmed είχε γωνία $\varphi = 0^\circ$ και όρισε σταθερή έγχυση αέρα περιμετρικά της πίσω κάθετης επιφάνειας με κλίση $\theta = 0, 20, 45, 60$ και κατεύθυνση προς το κέντρο της επιφάνειας. Απέδειξε υπολογιστικά ότι όσο αυξάνεται η γωνία, προκαλείται ποσοστιαία μείωση του C_D 2.1, 9.2, 10.9 και 10.4 αντίστοιχα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των Zhang et al. (2014) με την εγκατάσταση πολλαπλών διατάξεων, που είτε δουλεύουν ατομικά είτε σε συνδυασμό. Η σταθερή έγχυση ρευστού από την αρχή της γωνίας, με έγχυση ρευστού κάθετα στην επιφάνεια, αποδείχθηκε αποτελεσματική στην καταπολέμηση της ανακυκλοφορίας και με την κατάλληλη ισχύς των jet έγινε μείωση του συντελεστή κατά 12%. Για την αποδυνάμωση των C-vortices αξιοποιήθηκε στα άκρα της επικλινής επιφάνειας σειρά από jet με σταθερή έγχυση, μειώνοντας τον συντελεστή C_D κατά 6%. Οι διατάξεις στο άνω και κάτω άκρο της πίσω κάθετης επιφάνειας προκάλεσαν ελάττωση κατά 12% και 15% αντίστοιχα. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω διατάξεων έφερε μείωση της δύναμης οπισθέλκουσας κατά 25%.

Ο απώτερος στόχος της διπλωματικής δεν διαφέρει σε τίποτα από τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τη βελτίωση της ροής. Προτεραιότητα αποτελεί η αποτύπωση του σώματος σε δύο διαστάσεις μέσα σε ένα πεδίο αρκετά μεγάλο για την αποφυγή ανεπιθύμητης αλληλεπίδρασης με τα όριά του. Με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος γίνεται διαχωρισμός του πεδίου με δισδιάστατα στοιχεία, προκειμένου να λυθούν οι εξισώσεις κίνησης με υπολογιστική μέθοδο. Στη συνέχεια, δημιουργείται δομημένο πλέγμα γύρω από το σώμα για την προσομοίωση του οριακού στρώματος. Λόγω του ότι δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε εκ των προτέρων το ύψος αυτού, επιλύθηκαν τρεις περιπτώσεις με αυξανόμενο ύψος δομημένου πλέγματος. Η μικρή διαφορά στις τιμές ορισμένων παραμέτρων ανάμεσα στα ύψη και η συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις, θα υποδείξει τη μορφή του οριακού στρώματος σύμφωνα με τις συνθήκες εισερχόμενης ροής από τα πειράματα των Lienhart et al. (2002).

Η λύση των σχέσεων απαιτεί πρόγραμμα το οποίο θα δίνει πρόσβαση, όχι μόνο στις σχέσεις 3 και 4, αλλά και σε πλήθος μοντέλων. Χάρης στο ANSYS-FLUENT διεξήχθησαν οι υπολογισμοί για τις παραμέτρους του πεδίου ροής και η εξαγωγή του μέσου πεδίου καθώς επίσης η χρονική μεταβολή των συντελεστών οπισθέλκουσας και άνωσης. Η συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων οριακών στρωμάτων επιτεύχθηκε εξάγοντας τα προφίλ της μέσης ταχύτητας στην επικλινής επιφάνεια και τις τιμές του C_D για κάθε περίπτωση. Ταυτόχρονα όμως προϋπόθεση για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος είναι και η συμφωνία αυτού με τα πειραματικά δεδομένα, σε όσο δυνατό περισσότερες παραμέτρους.

Τέλος, αφού επιλεχθεί το πλέγμα εισάγουμε στο σύστημα και τις διάφορες διατάξεις jet σε κομβικά σημεία του πεδίου ροής. Για την απλότητα στο στήσιμο του προβλήματος, αποφασίστηκε πως η έγχυση ρευστού θα διεξάγεται σε όλη τη χρονική διάρκεια μελέτης και με σταθερή ταχύτητα. Θέλοντας να ελαττωθεί η περιοχή ανακυκλοφορίας στον ομόρου, εγκαταστάθηκε ένα jet στο μέσο της πίσω κάθετης επιφάνειας με ταχύτητα έγχυσης 10 m/s μέχρι 60 m/s και διεύθυνση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή. Δεύτερο σενάριο που εξετάστηκε είναι η τοποθέτηση δυο jet στο άνω και κάτω άκρο της κάθετης επιφάνειας του οχήματος στα 20, 40 και 60 m/s με διεύθυνση παράλληλα στη ροή. Σαν τελευταίο και πιο ελπιδοφόρο σενάριο έγινε δοκιμή στην επιρροή που θα είχαν τα δύο jet, με ταχύτητες όμοιες του δεύτερου σεναρίου αλλά αυτή τη φορά η έγχυση του αέρα γίνει και από τα δύο με κλίση 45° , προς το κέντρο της δίνης του ομόρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μεθοδολογία

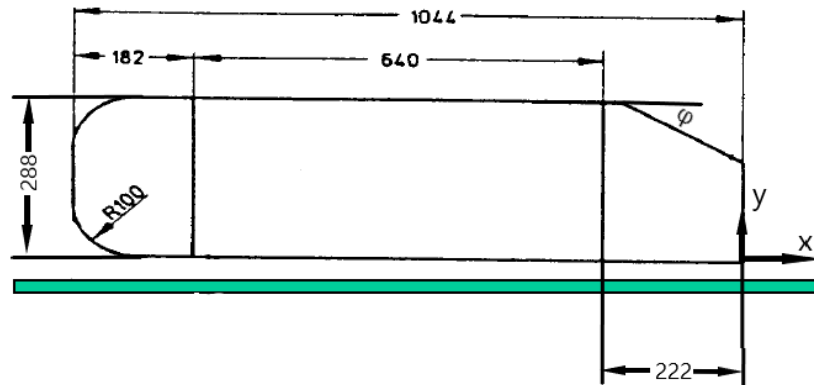
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά όλη η υπολογιστική διαδικασία με την οποία εξήχθησαν τα αποτελέσματα. Γίνεται αναφορά για την δημιουργία του πεδίου ροής, για τις οριακές συνθήκες και τους παράγοντες που συμβάλλουν στη δημιουργία του δομημένου πλέγματος. Έπειτα μέσω του ANSYS-FLUENT θα ορίσουμε τις τιμές για τις οριακές συνθήκες και θα εφαρμοστεί το μοντέλο τύρβης. Στις περιπτώσεις όπου εισάγουμε στο σύστημα την έγχυση ρευστού, θα γίνει προσπάθεια δικαιολόγησης της εκάστοτε διάταξης και τέλος οι υπολογισμοί στη συνολική ενέργεια θα φανερώσει εάν τελικά είναι συμφέρουσες αυτές οι διατάξεις εγχυτήρων.

2.1 Δημιουργία του πεδίου υπολογισμών

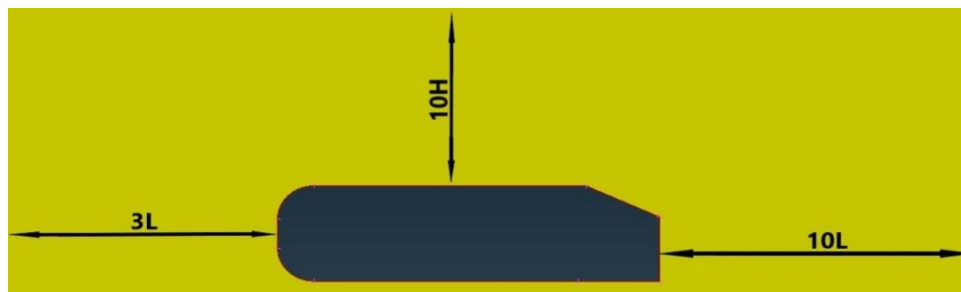
Πρώτο μέλημα σε μια μελέτη CFD είναι η δημιουργία του πεδίου μέσα στο οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιώντας το ANSA σχεδιάστηκε το Ahmed body σύμφωνα με τις διαστάσεις που ορίστηκαν στην πρότυπη εργασία, με το σύστημα συντεταγμένων να είναι τοποθετημένο στην κάτω δεξιά γωνία του σώματος (εικόνα 5). Έπειτα γύρω από το σώμα σχεδιάστηκε ο χώρος στον οποίο θα τεθούν οι οριακές συνθήκες που απαιτούνται για την επίλυση. Ο χώρος γύρω από το όχημα προσομοιώνει το περιβάλλον που κινείται και έτσι πρέπει να έχει τις κατάλληλες διαστάσεις ώστε να μην αλλοιώνει το πεδίο ροής γύρω από το σώμα. Οι διαστάσεις του πεδίου μελέτης απεικονίζονται στην εικόνα 6.

Το εμπρός όριο έχει απόσταση από το εμπρός μέρος του σώματος ίση με $3L = 3132 \text{ mm}$ ενώ το πίσω μέρος $10L = 10440 \text{ mm}$. Ο δρόμος βρίσκεται 50 mm κάτω από σώμα όπως ορίστηκε και στην αρχική εργασία, παράλληλα έχουν αφαιρεθεί οι ρόδες καθώς θεωρούμε πως παίρνουμε το επίπεδο όπου $z = 0$, ενώ το άνω όριο είναι πάνω από την οροφή του οχήματος όσο $10H = 2880 \text{ mm}$. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα ονόματα των ορίων

καθώς και οι οριακές συνθήκες του πεδίου ροής, ενώ στην εικόνα 7 φαίνεται με διαφορετικά χρώματα η αντιστοίχιση του ονόματος με τις εκάστοτε επιφάνειες του οχήματος.



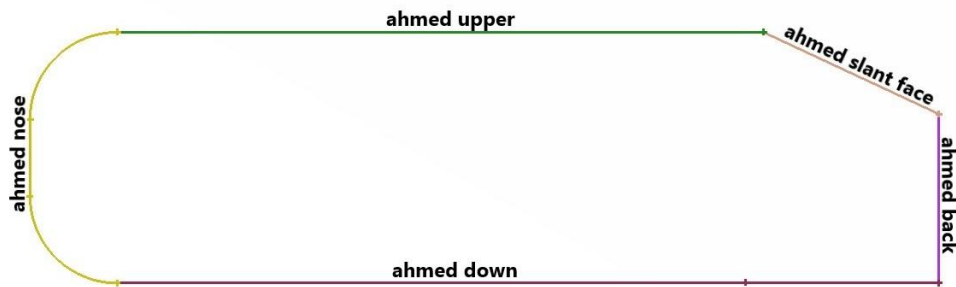
Σχήμα 5: Οι διαστάσεις του σχήματος προς μελέτη σε mm . Ο δρόμος έχει απόσταση 50 mm από το σώμα.



Σχήμα 6: Η αποστάσεις του σώματος από τα όρια του πεδίου υπολογισμών σε mm .

Πίνακας 1: Οι οριακές συνθήκες του πεδίου ροής και οι ιδιότητες τους.

Όριο πεδίου	Όνομα ορίου	Συνθήκη
Άνω όριο	box upper	wall
Κάτω όριο (δρόμος)	road	wall
Εισερχόμενος αέρας	inlet	velocity inlet
Εξερχόμενος αέρας	outlet	pressure outlet
Οροφή	ahmed upper	wall
Κάτω μέρος	ahmed down	wall
Κυρτό μέρος	ahmed nose	wall
Πίσω κάθετη επιφάνεια	ahmed back	wall
Υπό κλίση επιφάνεια	ahmed slant face	wall



Σχέδιο 7: Η αντιστοίχιση του ονόματος ορίου με την επιφάνεια του σώματος.

Επόμενο βήμα στη μελέτη είναι η δημιουργία επιφανειακών στοιχείων στα οποία το ANSYS/FLUENT καλείται να επιλύσει της εξισώσεις. Η δημιουργία ενός πεδίου δεν είναι εύκολη και ξεκάθαρη διαδικασία. Λογικό είναι για τον οποιοδήποτε να θεωρήσει πως μεγάλος αριθμός και μικρότερο σχήμα στοιχείων θα φέρει και το ευκταίο αποτέλεσμα, διότι έτσι λύνεται διεξοδικότερα τα πεδία ροής. Το τίμημα μιας τέτοιας συλλογιστικής είναι η υπολογιστική ισχύς και ο απαιτούμενος χρόνος για την εξαγωγή των ιδιοτήτων του πεδίου. Στόχος ενός ερευνητή είναι να βρει την ισορροπία μεταξύ των στοιχείων επίλυσης και των εργαλείων που διαθέτει. Έτσι αποτελεί ανάγκη, πριν ξεκινήσει η δημιουργία του πλέγματος, να μελετηθεί όσο καλύτερα γίνεται το σώμα, ώστε να καθοριστεί μια περιοχή όπου τα στοιχεία θα είναι μικρότερα σε μέγεθος, ενώ σταδιακά θα μεγαλώνουν όσο πλησιάζουμε περισσότερο προς τα όρια μελέτης.

Έτσι, ένα κομμάτι του πεδίου απομονώθηκε ώστε να μπορέσει να επεξεργαστεί διαφορετικά και τα στοιχεία να είναι πυκνά γύρω απ' αυτό. Αρχικά, ορίστηκε το μήκος των στοιχείων πάνω στο όχημα στα 3 mm και έπειτα σχεδιάστηκε ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σε απόσταση $2.5H = 670$ mm πάνω από την οροφή, $1.1L = 1123$ mm μπροστά από το όχημα και $3L = 3100$ mm πίσω από την κάθετη επιφάνεια. Όσο απομακρυνόμαστε από το όχημα και φτάνουμε στα όρια του ορθογώνιου ο ρυθμός αύξησης του μήκους είναι 1.5, μέχρι στα όρια όπου το μεγαλύτερο στοιχείο έχει μήκος 6 mm. Στο άνω όριο του πεδίου μελέτης το μήκος των στοιχείων είναι 70 mm, στην εισαγωγή και στον εξερχόμενο αέρα 50 mm ενώ στο δρόμο 20 mm. Με τη χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου, δημιουργείται το τελικό πεδίο υπολογισμών με συνολικό αριθμό στοιχείων 147966.

Προτού προχωρήσουμε στην επίλυση και αφού έχει δημιουργηθεί το πλέγμα, γύρω από το σώμα ορίζεται μια περιοχή όπου θα αποτελείται μόνο από δομημένο πλέγμα. Αυτή η περιοχή προσομοιώνει το οριακό στρώμα που θα σχηματιστεί γύρω από το σώμα. Αποτελεί μια από τις πιο καίριες περιοχές, καθώς μέσα της επενεργούν όλες οι δυνάμεις που έχουν επίπτωση στην ροή γύρω από το σώμα και κατ' επέκταση στην αεροδυναμική του. Οι δυνάμεις αυτές είναι δυνάμεις αδράνειας και οι συνεκτικές δυνάμεις, με τις δεύτερες να προκαλούνται από την συνθήκη μη ολίσθησης ανάμεσα στο ρευστό και στο εκάστοτε σώμα. Σε περιπτώσεις ροής εξωτερικού ρεύματος όπως αυτή που μελετάται εδώ, οι συνεκτικές δυνάμεις και η στροβιλότητα παίζουν σημαντικό ρόλο στην μορφή του πεδίου.

Χάρης στην προσομοίωση του οριακού στρώματος, η αποκόλληση σε περιοχές μεγάλης κλίσης πίεσης, μπορεί να προλεχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επειδή δεν μπορεί κανείς να προδικάσει το ύψος του οριακού στρώματος σε μια ασταθής ροή, τουλάχιστον όχι με μεγάλη ακρίβεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση προκειμένου να γίνουν ξεκάθαρα τα όρια του οριακού στρώματος. Το σχήμα του δομημένου πλέγματος αποτελείται από στρώματα ή επίπεδα (layers) το ένα πάνω στο άλλο, το συνολικό ύψος των οποίων προσομοιώνει το ύψος του οριακού στρώματος. Για τη δημιουργία των επιπέδων, ο χρήστης εισάγει τον αριθμό των στρωμάτων, τον ρυθμό αύξησης του εκάστοτε ύψους, το μέγιστο aspect και το ύψος του πρώτου στρώματος. Πρέπει να επισημανθεί πως το aspect είναι ο λόγος του ύψους του επιπέδου προς το μήκος του, με τύπο $\text{height}_{\text{layer}}/\text{length}_{\text{layer}}$. Η σπουδαιότητά του έγκειται στο γεγονός πως σε κάθε υπολογιστική μελέτη θέλουμε η μετάβαση από το τελευταίο στρώμα στο υπόλοιπο πλέγμα και κατ' επέκταση στο πεδίο ροής να είναι ομαλή.

Ιδιαίτερη βαρύτητα σε μια υπολογιστική μελέτη ροής ελεύθερου ρεύματος, παίζει το ύψος του πρώτου στρώματος. Η εύρεσή του απαιτεί ο μηχανικός να γνωρίζει τις ιδιότητες του αέρα (στην περίπτωση της μελέτης θεωρούνται ίδιες με αυτές στο επίπεδο της θάλασσας στους $20^{\circ}C$), την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος και το χαρακτηριστικό μήκος. Συνοπτικά, ο μηχανικός πρέπει να γνωρίζει τον αριθμό Reynolds. Από τα δεδομένα του πειράματος των Lienhart et al. (2002), θέτουμε σαν ταχύτητα $U_{\infty} = 40 \text{ m/s}$ και χαρακτηριστικό μήκος το ύψος του σώματος $L = 0.288 \text{ m}$ προκύπτει $Re_H = 7.68 \times 10^5$. Η ολοκλήρωση του υπολογισμού τελειώνει μόλις θέσουμε τιμή στο συντελεστή y^+ (σχέση 5) ίσο με τη μονάδα ($y^+ = 1$). Μέσω του διαδικτύου, υπολογίζεται πως το ύψος του πρώτου στρώματος θα είναι $8.659 \times 10^{-6} \text{ m}$. Στην επόμενη υποενότητα θα καταστεί πιο σαφές η ιδιαιτερότητα του να επιλεγεί σωστά η συγκεκριμένη τιμή.

$$y^+ = \frac{yu_*}{\nu} \quad (5)$$

Όπου: y [m]: ύψος του πρώτου στρώματος

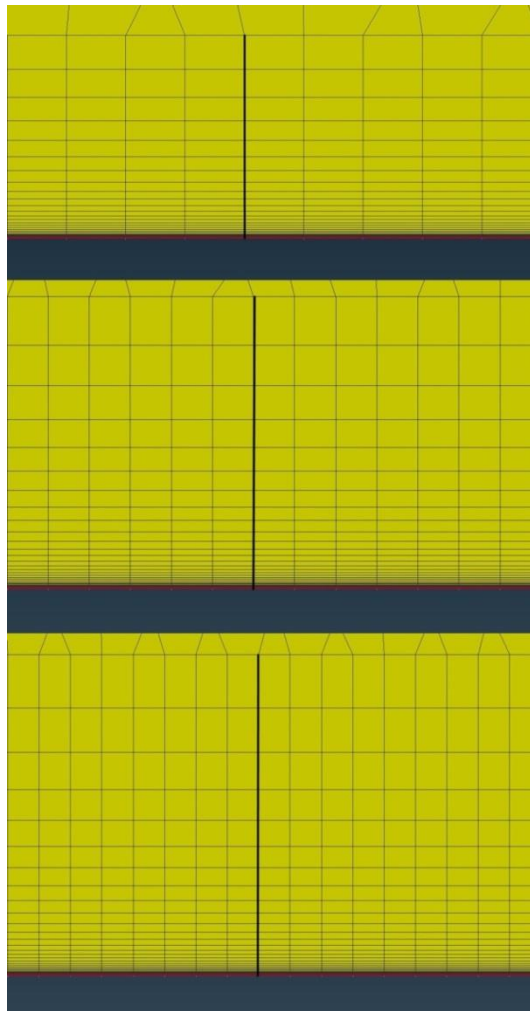
u_* [m/s]: ταχύτητα τριβής

ν [m²/s]: κινηματικό ιξώδες του ρευστού από τον τύπο $\nu = \frac{\mu}{\rho} = 1.5 \times 10^{-5}$

Το συνολικό ύψος του δομημένου πλέγματος, τροποποιήθηκε μεταβάλλοντας κατάλληλα τους παραπάνω παράγοντες, κρατώντας πάντα σταθερό το ύψος του πρώτου στρώματος. Διερευνήθηκαν τρεις περιπτώσεις με αυξανόμενο ύψος, με την κατάλληλη τροποποίηση των παραμέτρων. Τα ύψη που προκύπτουν είναι 10.23 mm, 21.26 mm και 30.64 mm με τις τιμές των παραμέτρων να παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Στο σχήμα 8 φαίνεται η μορφή που έχει το δομημένο πλέγμα για την προσομοίωση του οριακού στρώματος, ξεκινώντας από το μικρότερο ύψος και καταλήγοντας στο μεγαλύτερο.

Πίνακας 2: Τιμές που ορίζονται για τον σχηματισμό του δομημένου πλέγματος

Περιπτώσεις	Ύψη (mm)	Αριθμός στρωμάτων	Ρυθμός αύξησης	Μέγιστο Aspect	Αριθμός Στοιχείων
Μικρό ύψος	10.23	30	1.2	2	171738
Μεσαίο ύψος	21.26	34	1.2	2	174106
Μεγάλο ύψος	30.64	36	1.2	2	175360



Σχήμα 8: Η διαμόρφωση των περιπτώσεων μικρού, μεσαίου και μεγάλου ύψους, ξεκινώντας από το πρώτο πλέγμα αντίστοιχα. Το ύψος καθορίζεται από την μαύρη συμπαγής γραμμή.

2.2 Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας

Το πεδίο ροής γύρω από ένα τέτοιο σώμα χαρακτηρίζεται από χαοτικές δομές και ανήκει στη κατηγορία των τυρβωδών ροών. Η κατανόηση των δομών μια τέτοιας ροής επιτυγχάνεται λύνοντας το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα. Έτσι, με την εκκίνηση του ANSYS/FLUENT επιλέγουμε την επίλυση του χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου. Μετά από μελέτη της βιβλιογραφίας, αποφασίστηκε πως το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί σε όλες

της αναλύσεις είναι Hybrid RANS-LES και πιο συγκεκριμένα το IDDES (Improved Delayed DES). Το RANS μοντέλο, αν και αποτελεί το πιο υπολογιστικά οικονομικό μοντέλο απ' όλα, κρίνεται ακατάλληλο για μια τέτοια μελέτη, διότι είναι ανίκανο να αποτυπώσει τις χαοτικές δομές, γεγονός που επιβεβαιώνεται σε πολλές μελέτες. Το LES, μπορεί να δώσει μια υποτυπώδης εικόνα για το πεδίο ροής μακριά από το σώμα αλλά κοντά σε αυτό και πιο συγκεκριμένα στο οριακό στρώμα είναι αναξιόπιστο.

Το γεγονός ότι χρησιμοποιείται το IDDES, σημαίνει πως θα πρέπει να επιλεγεί και ένα μοντέλο τύρβης για το "κλείσιμο" των εξισώσεων RANS. Τα είδη των μοντέλων τύρβης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα Eddy Viscosity Models με υποκατηγορίες τα μοντέλα μιας εξίσωσης (One-Equation Model), στα μοντέλα δύο εξισώσεων (Two-Equation Models) και στα μοντέλα τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Model ή RSM). Σε αυτές τις κατηγορίες ανήκουν αντίστοιχα τα εξής μοντέλα: Spalart-Allmaras, Standard k- ω (k- ω) μαζί με το SST k- ω και το Standard k- ϵ (k- ϵ), με τα παράγωγά του RNG k- ϵ και Realizable k- ϵ , ενώ στα Reynolds Stress Model ανήκουν τα k-k ℓ - ω Transition Model και SST Transition Model. Ο σκοπός πίσω από την εφαρμογή τους είναι ίδιος, ωστόσο κάθε ένα προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η επιλογή του σωστού μοντέλου πολλές φορές αποτελεί πρόκληση και δεν είναι μια απόφαση που πρέπει να παίρνεται αλόγιστα, αφού πρώτα ο μηχανικός δεν έχει επίγνωση των δυνατοτήτων κάθε μοντέλου.

Τα RSM είναι μοντέλα κατάλληλα για πολύπλοκες τρισδιάστατες ροές που χαρακτηρίζονται από υψηλό στροβιλισμό, αλλά είναι περίπλοκα σε σχέση με τα Eddy Viscosity, όπου οι όροι μοντελοποιούνται θεωρώντας όρο τυρβώδους ιξώδους. Από την άλλη μεριά το μοντέλο Spalart-Allmaras δεν αποτελεί την ιδανικότερη επιλογή για τρισδιάστατες ροές και για ροές με έντονες αποκολλήσεις. Σχεδιάστηκε αποκλειστικά για μελέτες αεροδυναμικής και αφορούν ροές κοντά στο τοίχωμα όπου το πλέγμα είναι πολύ πυκνό. Καλύτερες προϋποθέσεις για την εξαγωγή αξιόπιστου αποτελέσματος δίνει το Standard k- ϵ , αφού εφαρμόζεται σε πληθώρα προσομοιώσεων. Εντούτοις κρίνεται ακατάλληλο για περίπλοκες ροές που περιλαμβάνουν αρνητικές κλίσεις πίεσης και περιοχές αποκόλλησης πολύ κοντά στο εκάστοτε σώμα. Ανώτερης αποδοτικότητας από όλα τα προαναφερθέντα αποδεικνύεται το μοντέλο Standard k- ω . Ενδείκνυται για προβλήματα χαμηλού Reynolds που απαιτούν επίλυση του οριακού στρώματος κάτω από συνθήκες δυσμενής πίεσης, ωστόσο δεν μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την αποκόλληση της ροής.

Η απαίτηση για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα μέσα από την υπολογιστική διαδικασία, ήταν επόμενο να φέρει και την εξέλιξη των παραπάνω μοντέλων τύρβης. Το μοντέλο k- ω ωστόσο χαίρει ιδιαίτερης εύνοιας τα τελευταία χρόνια, λόγω της καλύτερης επίδοσης που έχει από το Standard k- ϵ και των παράγωγων του, σε προσομοίωση ροής στο οριακό στρώμα (μετάβαση από στρωτό σε τυρβώδες οριακό στρώμα, αποκόλληση ροής και περιοχές χαμηλού Reynolds). Σπουδαιότερο επίτευγμα αποτελεί το γεγονός ότι βρέθηκε τρόπος ώστε ο ερευνητής να μπορεί να εφαρμόσει Standard k- ω κοντά στο τοίχωμα, μιας και έχει καλύτερη απόδοση σε αυτή την περιοχή και Standard k- ϵ έξω από αυτό. Το μοντέλο ονομάζεται k- ω SST (Shear Stress Transport) και αποτελεί μια τροποποίηση του Standard k- ω ικανή να αλλάζει τον τρόπο επίλυσης ανάλογα την περιοχή, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο αρχικών μοντέλων. Λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη όλα τα

παραπάνω και σε συνδυασμό με τη βιβλιογραφία, αποφασίστηκε να είναι αυτό το μοντέλο επιλογής για όλες τις μετέπειτα αναλύσεις.

Στη συγκεκριμένη εργασία, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επίδραση που έχει το ύψος του οριακού στρώματος στο πεδίο ροής. Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ο όρος y^+ και η συμβολή του στην εύρεση του ύψους του πρώτου επιπέδου. Η επιλογή της τιμής του όρου ίση με τη μονάδα δεν είναι τυχαία. Σύμφωνα με τον τρόπο που έχει δημιουργηθεί το μοντέλο k- ω SST είναι ικανό να επιλύσει το πεδίο ροής πολύ κοντά στο τοίχωμα, δηλαδή στο συνεκτικό υπόστρωμα (viscous sublayer) του οριακού στρώματος. Η επίτευξη αυτού του στόχου όμως απαιτεί και τη δημιουργία του κατάλληλου πεδίου κοντά στο όχημα, καθώς πολλά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει μπορεί να χαθούν σε περίπτωση που το πλέγμα δεν είναι αρκετά πυκνό. Έτσι, εάν ο μηχανικός θέλει να εκμεταλλευτεί στο έπακρο το συγκεκριμένο μοντέλο πρέπει να ορίσει $y^+ \leq 1$, να υπολογίσει το ύψος του πρώτου στρώματος και έπειτα να συνεχίσει με τη δημιουργία του υπόλοιπου δομημένου πλέγματος.

Ανακεφαλαιώνοντας, το μοντέλο επίλυσης είναι το IDDES-SST k- ω , θέτοντας τον όρο y^+ ίσο με τη μονάδα. Επόμενο βήμα για την επίλυση των εξισώσεων είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών, όπου έχει ήδη γίνει μια συνοπτική αναφορά στη δημιουργία του πλέγματος. Πιο συγκεκριμένα, η πειραματική μελέτη πάνω στην οποία βασίστηκε η υπολογιστική διαδικασία είναι από τους Lienhart et al. (2002) και γι' αυτό οι παράμετροι που ορίστηκαν στην εισαγωγή του αέρα είναι ομοιόμορφη ροή κάθετα στην επιφάνεια, με ταχύτητα $U_\infty = 40$ m/s, που αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds ίσο με $Re_H = 7.68 \times 10^5$ εάν θεωρήσουμε το ύψος του Ahmed body σαν χαρακτηριστικό μήκος, και με ένταση στροβιλότητας (Turbulent Intensity) στο 0.25%. Στο τέλος του ορίου μελέτης θεωρείτε ότι η σχετική πίεση είναι ίση με μηδέν. Το σώμα διαχωρίστηκε σε μέρη, ο δρόμος ορίστηκε σαν τοίχωμα με συνθήκες μη-ολίσθησης ενώ το άνω όριο του πεδίου υπολογισμών θεωρούνται συνθήκες ολίσθησης. Αναλυτικότερα οι συνθήκες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3: Οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν στη μελέτη

Όριο	Συνθήκη	Ιδιότητες
box upper	wall	Slip
road	wall	No slip
inlet	velocity inlet	Normal to boundary $U_{\infty} = 40m/s$
outlet	pressure outlet	Gauge Pressure=0
Ahmed upper	wall	No slip
Ahmed down	wall	No slip
Ahmed nose	wall	No slip
Ahmed back	wall	No slip
Ahmed slant face	wall	No slip

Σαν μέθοδο επίλυσης επιλέγεται η SIMPLE καθώς είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τέτοιου είδους προβλήματα, ειδικά μετά τις τροποποιήσεις που έχει δεχθεί στην γρήγορη εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την επικείμενη σύγκλιση. Για τη χωρική διακριτοποίηση, σύμφωνα με το βιβλίο χρήσης του ANSYS, η πρώτης τάξης (first order) και ο νόμος της δύναμης (power law), πρέπει να αποφεύγονται σαν μέθοδοι διότι μπορεί να μειώσουν της ενέργεια των δινών. Έτσι, στη διακριτοποίηση της ορμής, χρησιμοποιήθηκε μια υπό όρους κεντρική μέθοδος (Bounded Central Differencing Scheme) που ορίζεται σαν προεπιλογή με την χρήση μοντέλου DES. Αποτελεί πολύ χρήσιμη επιλογή για Hybrid RANS-LES μοντέλα, εξαιτίας των λύσεων που παρέχει στις περιοχές που επιλύονται με RANS. Επίσης με βάση το ANSYS Fluent Theory Guide (2010), κρίνεται κατάλληλο για τις μελέτες LES εξαιτίας της μικρής αριθμητικής διάχυσης που προσφέρει. Η χρονική διακριτοποίηση έγινε με περιορισμένου δευτέρου βαθμού Implicit μέθοδο (Bounded Second Order Implicit) μετά από προτροπή του προγράμματος ANSYS/FLUENT για τη χρήση του μοντέλου DES. Δεύτερης τάξης Upwind (2nd Order Upwind) μέθοδος ορίστηκε για τη τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ρυθμό “διασποράς”, μετά από μελέτες των Ashton et al. (2016). Περισσότερες πληροφορίες για τις μαθηματικές σχέσεις και την ανάλυση των παραπάνω διαδικασιών μπορούν να εξαχθούν από τα βιβλία των Ferziger et al. (2002) και των Drikakis et al. (2005).

Σε μελέτες όπου η χρονική εξέλιξη των δινών αποτελεί καίριο κομμάτι για την εξαγωγή συμπερασμάτων, το χρονικό βήμα δεν μπορεί να αποφασιστεί αφήφιστα. Το χρονικό βήμα που θα οριστεί πρέπει να εξασφαλίζει ότι ο αριθμός Courant-Friedrichs-Levy (CFL), από τη σχέση 6, είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας. Η τιμή του αριθμού Courant σε μια υπολογιστική αεροδυναμική ανάλυση, καθορίζει το πως θα κινείται το ρευστό μέσα στο πλέγμα που δημιουργήθηκε. Αν $CFL \leq 1$ τότε το άτομα του αέρα κινούνται από το ένα στοιχείο στο άλλο μέσα σε ένα χρονικό βήμα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση προσπερνούν περισσότερα από ένα κελιά και μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη σύγκλιση. Στα σημερινά προγράμματα επίλυσης υπάρχουν δικλείδες ασφαλείας για περιπτώσει μεγάλου αριθμού Courant, όμως εξαρτάται και από τις μεθόδους της χωρικής διακριτοποίησης που επιλέγει ο χρήστης. Θέλοντας να σιγουρέψουμε ότι ο όρος CFL θα είναι μικρότερος της μονάδας, τέθηκε σαν ταχύτητα η μέγιστη μέση που προκύπτει από την ανάλυση, δηλαδή $\bar{U} = 80 \text{ m/s}$

και σαν Δx ορίστηκε μικρότερο από αυτό του πλέγματος ($\Delta x = 0.002 \text{ m}$). Αν θέσουμε τη σχέση 6 ίση με 1 και αντικαταστήσουμε τις τιμές της ταχύτητας και μήκος στοιχείου προκύπτει χρονικό βήμα $\Delta t = 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}$, το οποίο κατά τη διάρκεια της επίλυσης παραμένει σταθερό.

$$CFL = \frac{U \Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (6)$$

Όπου: U [m/s]: μέγιστη ταχύτητα του ρευστού με κατεύθυνση παράλληλα της ροής
 Δt [s]: χρονικό βήμα επίλυσης
 Δx [m]: μήκος των στοιχείων που βρίσκονται στην επιφάνεια του σώματος

Η συνολική χρονική διάρκεια της επίλυσης είναι 0.125 s, που σημαίνει ότι ο αριθμός των χρονικών βημάτων ανέρχεται στα 5000. Δεδομένα για το μέσο πεδίο όμως συγκεντρώθηκαν μετά τα 1800 πρώτα βήματα, καθώς έπρεπε να περάσει ένας αριθμός βημάτων ώστε η λύση να συγκλίνει προς μια τιμή. Άρα η χρονική διάρκεια εξαγωγής του μέσου πεδίου είναι 0.08 s.

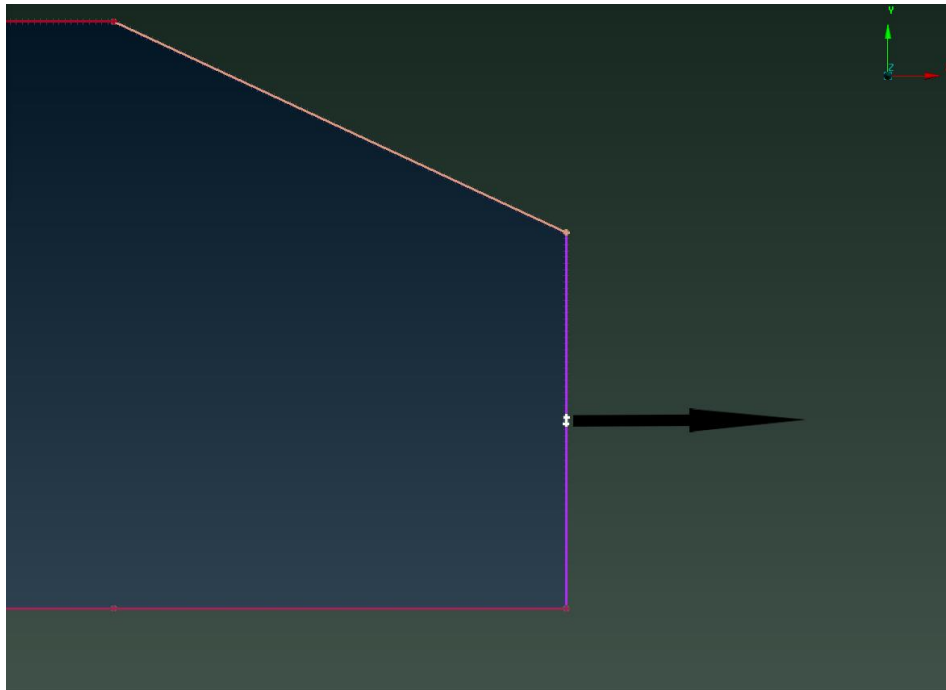
2.3 Παράμετροι υπολογιστικής διαδικασίας μετά την εισαγωγή των jet

Η τοποθέτηση των εγχυτήρων γίνεται σε σημεία όπου υπάρχουν μικρές ή μεγάλες δομές δινών, με στόχο να τις ‘σπάσουν’, μειώνοντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εμπρός και πίσω μέρους του οχήματος και κατ’ επέκταση την αεροδυναμική αντίσταση. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας έδειξε πως οι θέσεις που προτιμούνται είναι λίγο πριν την περιοχή αποκόλλησης στην υπό κλίση επιφάνεια και στο ομόρου του οχήματος. Τα αποτελέσματα από την πρώτη περίπτωση δεν δίνουν κάποια ελπίδα στο να μετατρέψουν το σχήμα σε κάτι πιο αεροδυναμικό, καθώς τα jet δεν βοηθούν ή συμβάλλουν ελάχιστα στην καταστροφή των δινών. Γι’ αυτό αποφασίστηκε να γίνει μια διάταξη έγχυσης στο μέσο της πίσω κάθετης επιφάνειας, με σταθερή ταχύτητα από 10 έως 60 m/s με ρυθμό αύξησης ανά δέκα.

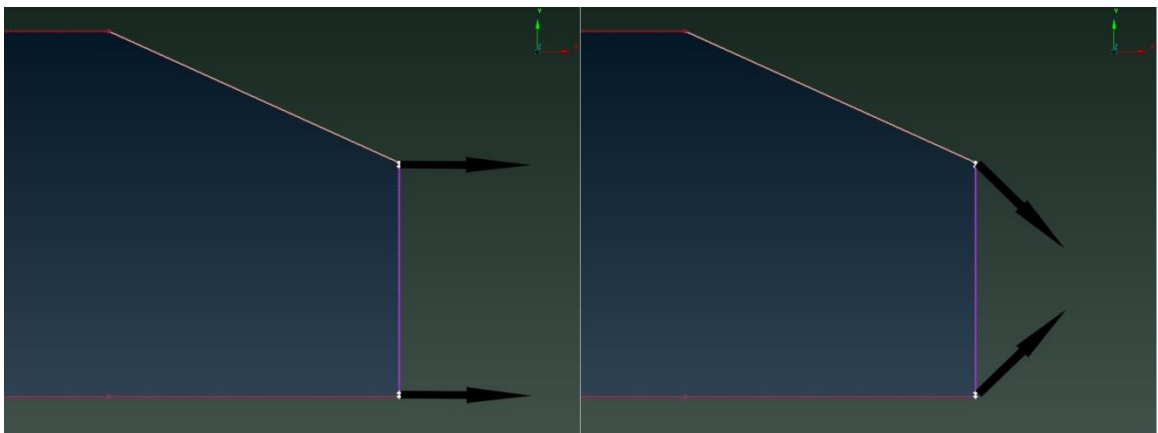
Πρωταρχικό βήμα στην ανάλυση είναι να τροποποιηθεί το πλέγμα και πιο συγκεκριμένα ένα κομμάτι της πίσω επιφάνειας, προκειμένου να οριστεί σαν εισαγωγή αέρα (velocity-inlet). Στην εικόνα 9 φαίνεται με ακρίβεια η θέση του jet καθώς και η διάσταση της οπής του διαμέτρου 3 mm, με το μήκος της οπής να εκτείνεται σε όλο το πάχος του σώματος. Η ταχύτητα θα εγχέεται παράλληλα στη ροή, με σταθερό ρυθμό καθ’ όλη τη χρονική διάρκεια επίλυσης του πεδίου ενώ κατά την έξοδο από την υποτιθέμενη διάταξη η ένταση των δινών θα είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει, διότι προσομοιώνεται ένα δοχείο πίεσης και η εισαγωγή δινών μέσα από μια τέτοιου είδους διάταξη, αυξάνει την πολυπλοκότητά της. Πέραν αυτής της τροποποίησης, οι παράμετροι της μελέτης δεν δέχθηκαν κάποια αλλαγή.

Παρόμοιες συνθήκες έγχυσης ισχύουν και στην περίπτωση που εγκαταστήσουμε δύο jet στο άνω και κάτω άκρο της επιφάνειας, με τη μόνη διαφορά να έγκειται στην ταχύτητα εκτόξευσης ρευστού που ορίζεται στα 20, 40 και 60 m/s. Σκοπός για την τοποθέτηση σε αυτό το σημείο είναι η προσπάθεια να ‘καταστραφούν’ οι δύο ζώνες ανακυκλοφορίας που σχηματίζονται στον ομόρου από την εικόνα 3 (εικόνα 10 αριστερά). Τέλος,

πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές στην περίπτωση όπου η έγχυση στο διπλό jet γίνεται στις ίδιες ταχύτητες, αλλά με κλίση 45° προς το κέντρο της επιφάνειας, σύμφωνα με την εικόνα 10 (δεξιά εικόνα).



Σχήμα 9: Η θέση του jet (άσπρο χρώμα) και η διεύθυνση του αέρα που εγχέεται από αυτό.



Σχήμα 10: Η θέση των jet και η διεύθυνση έγχυσης, παράλληλα στη ροή (αριστερή εικόνα) και με κλίση 45° (δεξιά εικόνα) για 20, 40 και 60 m/s.

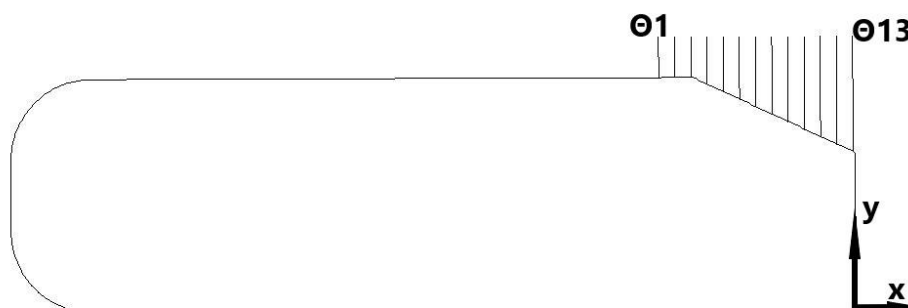
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αποτελέσματα

Πρώτο βήμα της μελέτης είναι να καθοριστεί εάν τα διάφορα δομημένα πλέγματα που δημιουργήθηκαν έχουν μεγάλες αποκλείσεις μεταξύ τους, εξετάζοντας τα προφίλ της ταχύτητας παράλληλα στη ροή (U), τη περιοχή ανακυκλοφορίας στον ομόρου και τέλος το συντελεστή οπισθέλκουσας. Έπειτα θα γίνει σύγκριση των διάφορων πλεγμάτων με τα πειραματικά δεδομένα που ανακτήθηκαν από το διαδίκτυο. Τέλος θα γίνει μελέτη της επιρροής που έχουν οι διατάξεις του jet στην ανακυκλοφορία του ομόρου καθώς και στο συντελεστή C_D . Τελικό στόχος είναι να βρεθεί εκείνη η διάταξη που συνδυάζει βελτίωση της αεροδυναμικής του οχήματος, με τη μικρότερη δαπάνη ενέργειας.

3.1 Μελέτη ευαισθησίας πάχους δομημένου πλέγματος

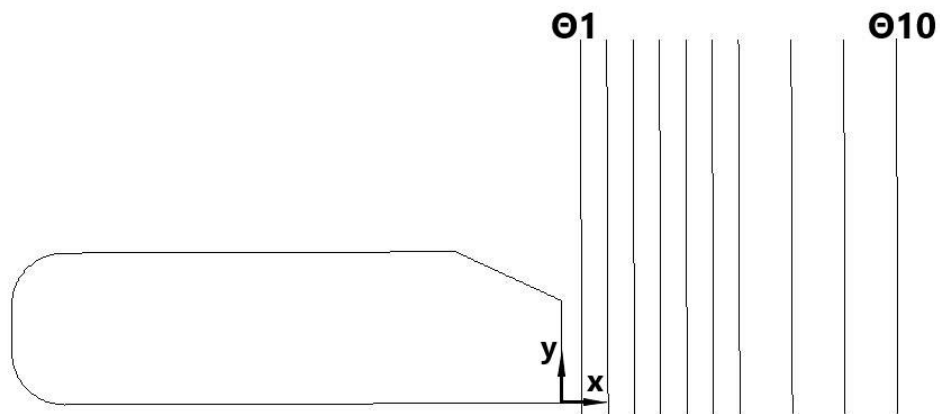
Η μελέτη της ταχύτητας στο οριακό στρώμα ξεκινά θέτοντας τα σημεία πάνω στην υπό κλίση επιφάνεια στο επίπεδο $z = 0$. Επιλέχθηκε αυτό το κομμάτι του οχήματος αφού παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον αναφορικά με το πώς μεταβάλλεται η αποκόλληση της ροής καθώς επίσης οποιοδήποτε σημείο της οροφής δεν παρουσιάζει μεταβολή στην εξέλιξη της ταχύτητας. Ο ορισμός των σημείων γίνεται με το σχεδιασμό ευθειών κάθετων στο σώμα, επειδή σκοπός είναι να καταστεί σαφές ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα. Στο σχήμα 11 απεικονίζονται οι θέσεις που θα γίνουν οι μετρήσεις, ενώ στον πίνακα 4 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των ευθειών. Στο σχήμα 12 απεικονίζονται οι θέσεις του ομόρου που πρόκειται να μελετηθούν και στον πίνακα 5 οι συντεταγμένες των θέσεων.



Σχήμα 11: Οι θέσεις των μετρήσεων στην υπό κλίση επιφάνεια με τη σειρά να πηγαίνει από αριστερά προς τα δεξιά.

Πίνακας 4: Οι συντεταγμένες των θέσεων της εικόνας 11.

Αριθμός Θέσης	X συνιστώσα (mm)	Y1 συνιστώσα (mm)	Y2 συνιστώσα (mm)
Θέση 1	-243	288	338
Θέση 2	-223	288	338
Θέση 3	-203	279.14	338
Θέση 4	-183	269.814	338
Θέση 5	-163	260.4878	338
Θέση 6	-143	251.1617	338
Θέση 7	-123	241.8355	338
Θέση 8	-103	232.5094	338
Θέση 9	-83	223.1832	338
Θέση 10	-63	213.8571	338
Θέση 11	-43	204.531	338
Θέση 12	-23	195.2048.	338
Θέση 13	-3	185.8786	338



Σχήμα 12: Οι θέσεις των μετρήσεων στον ομόρου με τη σειρά να πηγαίνει από αριστερά προς τα δεξιά.

Πίνακας 5: Οι συντεταγμένες των θέσεων του ομόρου της εικόνας 12.

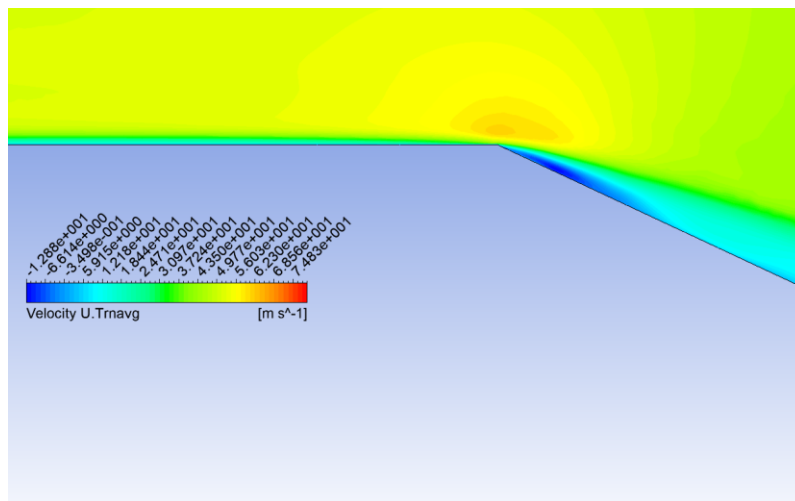
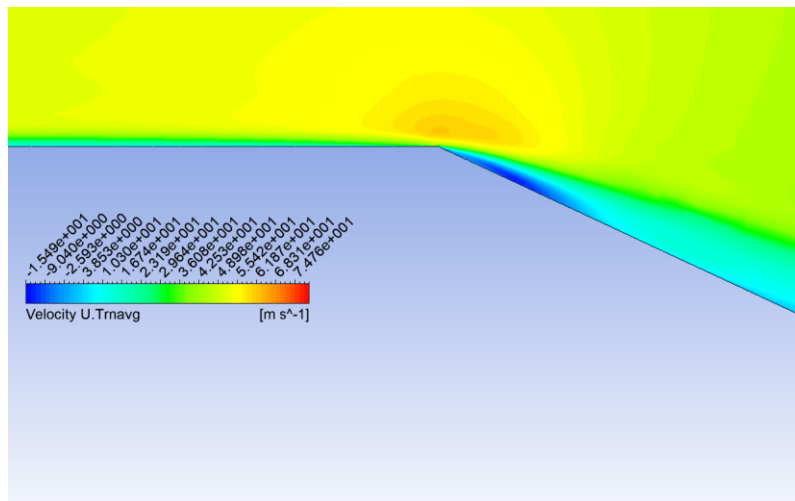
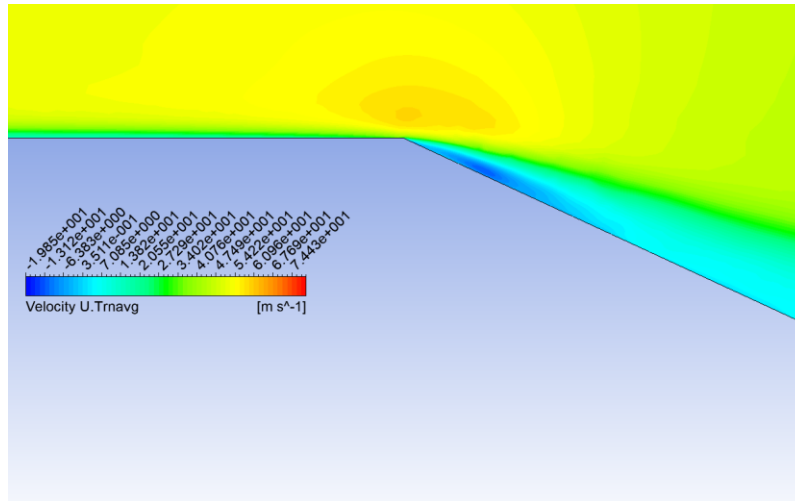
Αριθμός Θέσης	X συνιστώσα (mm)	Y1 συνιστώσα (mm)	Y2 συνιστώσα (mm)
Θέση 1	38	-22	688
Θέση 2	88	-22	688
Θέση 3	138	-22	688
Θέση 4	188	-22	688
Θέση 5	238	-22	688
Θέση 6	288	-22	688
Θέση 7	338	-22	688
Θέση 8	438	-22	688
Θέση 9	538	-22	688
Θέση 10	638	-22	688

3.1.1 Σύγκριση πεδίου ταχύτητας στην υπό κλίση επιφάνεια

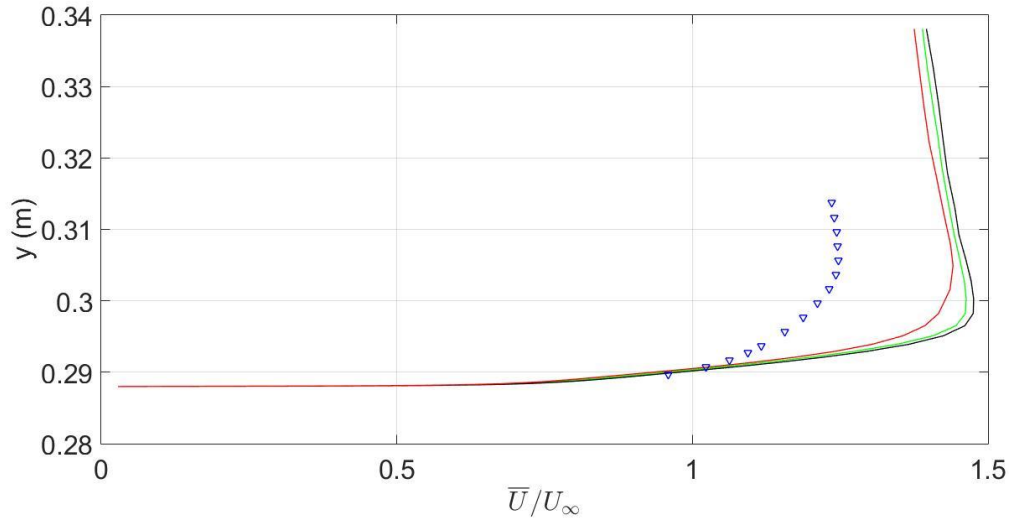
Προτού ξεκινήσει η διαδικασία μελέτης ευαισθησίας πλέγματος, πρέπει να τεθούν κάποιες παράμετροι που θα καθορίσουν την τελική απόφαση. Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί η περιοχή αποκολλημένης ροής στην υπό κλίση επιφάνεια. Με βάση τη βιβλιογραφία, αυτό που αναμένεται είναι να υπάρξει μια περιοχή ανακυκλοφορίας, λίγο μετά το τέλος της οροφής και στο ξεκίνημα της γωνίας. Για την εύρεση της ανακυκλοφορίας εξετάζεται ποιες

περιοχές του πεδίου έχουν τιμές της μέσης ταχύτητας στη x συνιστώσα, μικρότερες ή ίσες του μηδενός. Δηλαδή πρέπει να βρεθούν οι περιοχές του πεδίου κοντά στο σώμα όπου ισχύει η σχέση $\bar{U} \leq 0$. Στο σχήμα 13 απεικονίζεται η αποκόλληση της ροής για τις περιπτώσεις μικρότερου, μεσαίου και μεγάλου ύψους δομημένου πλέγματος, αντίστοιχα.

Φαίνεται πως το ρευστό δε συμπεριφέρεται πανομοιότυπα και για τα τρία ύψη. Παρατηρώντας την έκταση της περιοχής με μπλε χρώμα για το μικρό ύψος φαίνεται να είναι μεγαλύτερη σε μήκος από τις άλλες δύο. Οι περιοχές αποκόλλησης για τις άλλες δύο περιπτώσεις παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα. Παρόλα αυτά όμως η περιοχή ξεκινά σε όλες τις περιπτώσεις από το ίδιο σημείο. Διεξοδικότερη ανάλυση γίνεται με τη σχεδίαση του προφίλ της ταχύτητας, στις θέσεις του σχήματος 11. Η μεταβολή της μέσης ταχύτητας συναρτήσει του ύψους, μπορεί να δώσει μια αναλυτική εικόνα όσον αφορά τη συμπεριφορά της ανακυκλοφορίας για κάθε ύψος πλέγματος και ταυτόχρονα να συσχετίσει τα αποτελέσματα με τα πειραματικά δεδομένα. Στο σχήμα 14 απεικονίζονται τα προφίλ της μέσης ταχύτητας στη θέση 2 ($x_2 = -223 \text{ mm}$) όπως προκύπτουν από το σχήμα 13.



Σχήμα 13: Το προφίλ της \bar{U} για το μικρότερο, το μεσαίο και το μεγάλο ύψος αντίστοιχα.



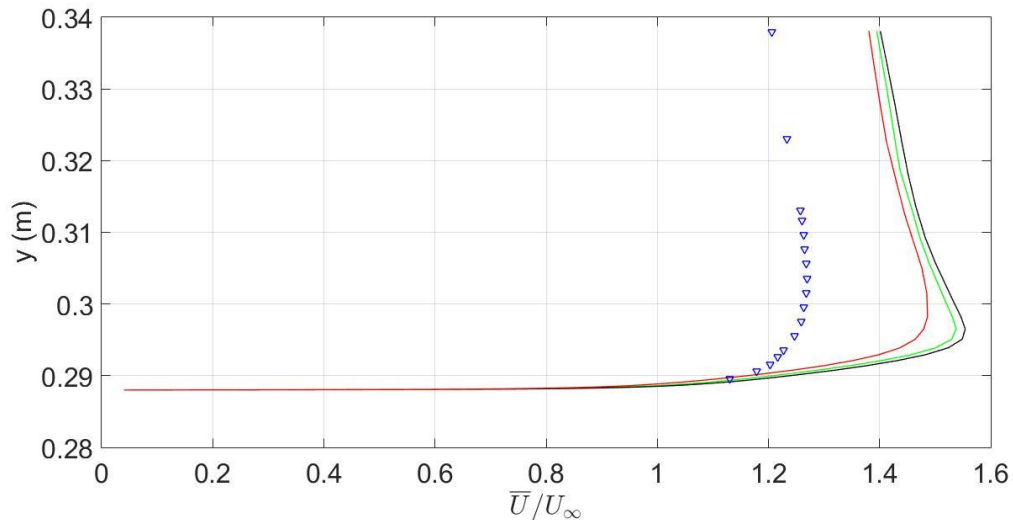
Σχήμα 14: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 2 της υπό κλίση επιφάνειας.

Τα χαρακτηριστικό του οριακού στρώματος είναι πως μέσα σε αυτό η μεταβολή της ταχύτητας παρουσιάζει απότομη κλίση μέχρι το τέλος του όπου η ταχύτητα είναι ίση με αυτή που εισέρχεται στο πεδίο. Μελετώντας το διάγραμμα, συμπεραίνουμε πως σε ύψος 0.3 m δεν παρατηρείται ιδιαίτερη αλλαγή στη συμπεριφορά της, που σημαίνει ότι το τέλος του οριακού στρώματος βρίσκεται από αυτή τη τιμή του ύψους. Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης έρχονται σε συμφωνία με το πείραμα. Επιπλέον, σε χαμηλότερο ύψος η κλίση της ταχύτητας είναι πανομοιότυπος και στις τρεις περιπτώσεις, αλλά παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στις μέγιστες ταχύτητες ανάμεσα στην υπολογιστική διαδικασία και στο πείραμα. Συνοψίζοντας, ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα είναι ίδιος για όλα τα ύψη και σε συμφωνία με το πείραμα, υπολογίζοντας όμως μεγαλύτερες τελικές τιμές.

Επόμενη θέση προς μελέτη είναι η θέση 3 με x συνιστώσα $x_3 = -203 \text{ mm}$ και το διάγραμμα της ταχύτητας παρουσιάζεται στο σχήμα 15. Σε σχέση με την θέση 2, όσον αφορά το ύψος του οριακού στρώματος, δεν έχει υπάρξει ιδιαίτερη αλλαγή, καθώς φαίνεται πως η μεταβολή της μέσης ταχύτητας ομαλοποιείται πέρα της τιμής $y = 0.3 \text{ m}$. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με το σχήμα 14, είναι πως οι τελικές ταχύτητες σε όλες τις περιπτώσεις και στο πείραμα είναι ελάχιστα μεγαλύτερες. Οι θέσεις 2 και 3 δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς βρίσκονται πάνω στην οροφή του οχήματος και είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι δεν υπάρχει κάποια αποκόλληση ροής. Από την άλλη οι θέσεις 4 και 5 που βρίσκονται μέσα στην περιοχή αποκόλλησης θα ξεκαθαρίσουν πιο από τα τρία μοντέλα έρχεται σε συμφωνία με το πείραμα.

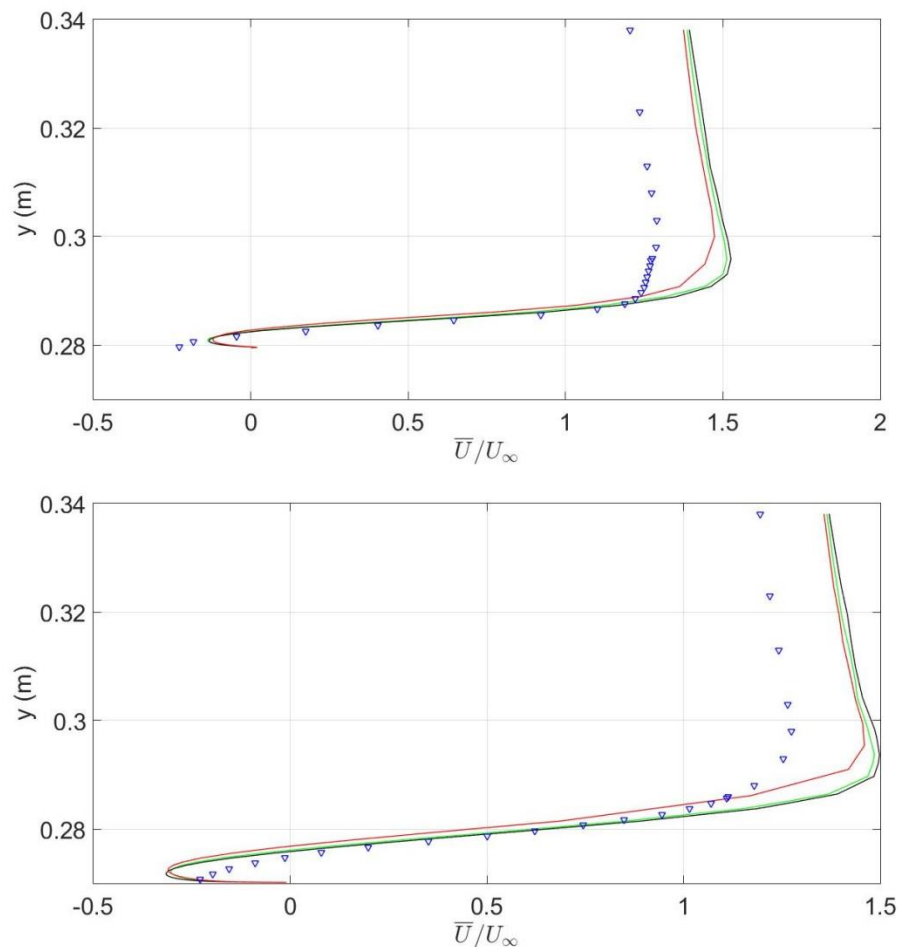
Στο σχήμα 16 απεικονίζονται τα προφίλ της μέσης ταχύτητας για τη θέση 4 (πάνω διάγραμμα) και θέση 5 (κάτω διάγραμμα). Το χαρακτηριστικό ενός πεδίου ροής πολύ κοντά σε ένα σώμα είναι πως μόλις η κλίση πίεσης γίνει αρκετά δυσμενής τότε παρατηρείται ανακυκλοφορία της ροής. Στο διάγραμμα ταχύτητας αυτό αποτυπώνεται σε αρνητικές

τιμές, με την απόλυτη τιμή να καθορίζει την ισχύ της ανακυκλοφορίας. Το πάνω διάγραμμα του σχήματος 16 (θέση 4 με x συνιστώσα $x_4 = -183$ mm), απεικονίζει αυτό το χαρακτηριστικό του οριακού στρώματος. Όλα τα ύψη εκτιμούν εύστοχα αποκόλληση της ροής σε απόλυτη συμφωνία με το πείραμα τόσο στο ύψος της όσο και στο ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας. Η μόνη διαφοροποίηση έγκειται στο ότι η ανακυκλοφορία του πειράματος φαίνεται να είναι ελάχιστα πιο έντονη. Το μεγάλο και μεσαίο ύψος δομημένου πλέγματος (30.64 mm και 21.26 mm αντίστοιχα), παρουσιάζει εντονότερη ανακυκλοφορία συγκριτικά με αυτή του μικρού ύψους.



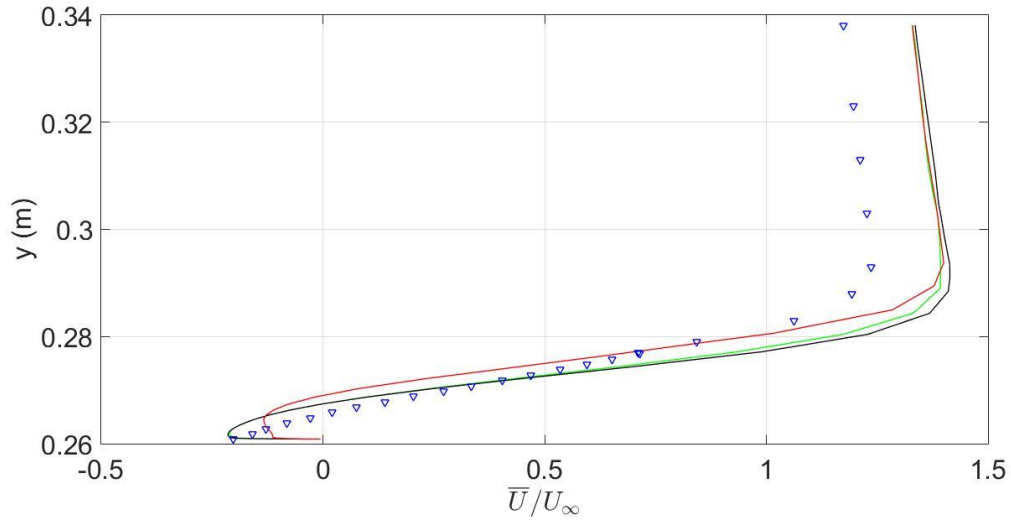
Σχήμα 15: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 3 της υπό κλίση επιφάνειας.

Το πεδίο της ταχύτητας για κάθε περίπτωση δομημένου πλέγματος αρχίζει να διαφοροποιείται στην θέση 5 ($x_5 = -163$ mm). Τα ύψη 10.23 mm και 30.64 mm, παρουσιάζουν μικρή διαφορά όσον αφορά την ένταση αναστροφής της ροής, μιας και η πράσινη γραμμή παίρνει μικρότερες τιμές ταχύτητας. Επίσης φαίνεται πως το ύψος της ανακυκλοφορίας του μικρού ύψους είναι μεγαλύτερο. Γενικά, παρατηρείται πως τα δύο μεγάλα ύψη έρχονται σε σχεδόν απόλυτη συμφωνία στον ρυθμό μεταβολής κοντά στο τοίχωμα. Σημαντικότερο συμπέρασμα από το σχήμα είναι πως όλα τα ύψη παρουσιάζουν αποκλίσεις σε σχέση με το πείραμα όσον αφορά την ένταση της ανακυκλοφορίας, μιας και οι απόλυτες τιμές της μέση ταχύτητας είναι μεγαλύτερες. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε πως καμία από τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν δεν μπόρεσαν να προβλέψουν το ύψος της ανακυκλοφορίας, αφού το ύψος y όπου ισχύει $\bar{U} = 0$, είναι μεγαλύτερο.

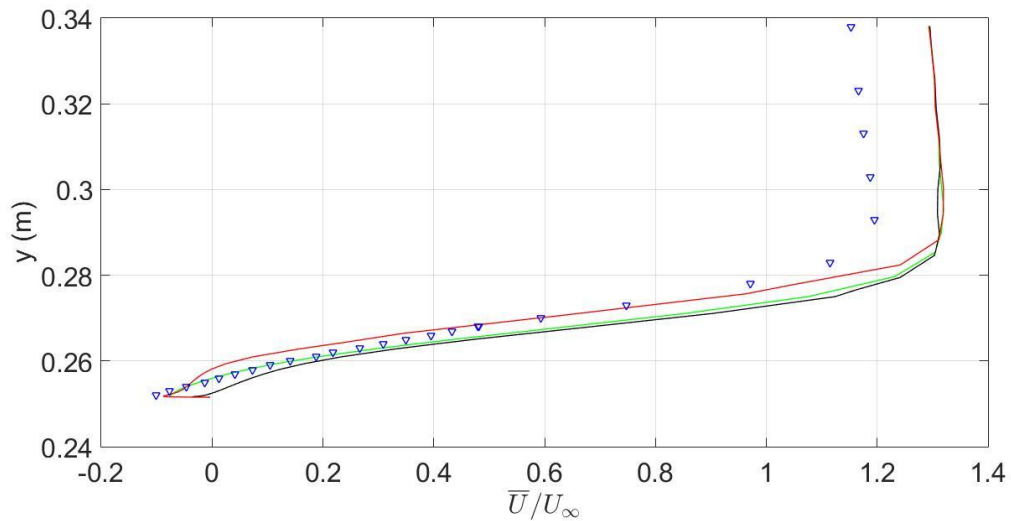


Σχήμα 16: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις 4 και 5 αντίστοιχα.

Επόμενο ευθεία προς μελέτη είναι η θέση 6 με συνιστώσα $x_6 = -143 \text{ mm}$. Και σε αυτή τη περίπτωση όλα τα ύψη επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα από το πείραμα, προβλέποντας σωστά ότι η ανακυκλοφορία φτάνει μέχρι αυτό το σημείο (σχήμα 17). Το διάγραμμα της ταχύτητας δείχνει πως το μεσαίο ύψος πλέγματος επιβεβαιώνει καλύτερα την ένταση της ανακυκλοφορίας αφού πιάνει όμοιες τιμές αρνητικής ταχύτητας με το πείραμα. Τα υπόλοιπα δύο ύψη από την άλλη, παρουσιάζουν απόκλιση στην τελική τιμή της ταχύτητας και μάλιστα αισθητή. Ένας ακόμη παράγοντας που υπερτερεί το πλέγμα ύψους 24.26 mm είναι το ύψος της αντιστροφής της ροής, αφού η τιμή του y όπου η μέση ταχύτητα είναι μηδέν, ορίζεται στο $y = 0.26 \text{ m}$ περίπου, ενώ για το ύψος 10.23 mm ορίζεται στο $y = 0.2688 \text{ m}$. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα προφίλ της ταχύτητας στις θέσεις 7 ($x_7 = -123 \text{ mm}$) και 8 ($x_8 = -103 \text{ mm}$), όπου γίνεται αντιληπτή η μεγαλύτερη και πιο σημαντική ασυμφωνία ανάμεσα στις αναλύσεις και συγκριτικά με το πείραμα (σχήμα 18).

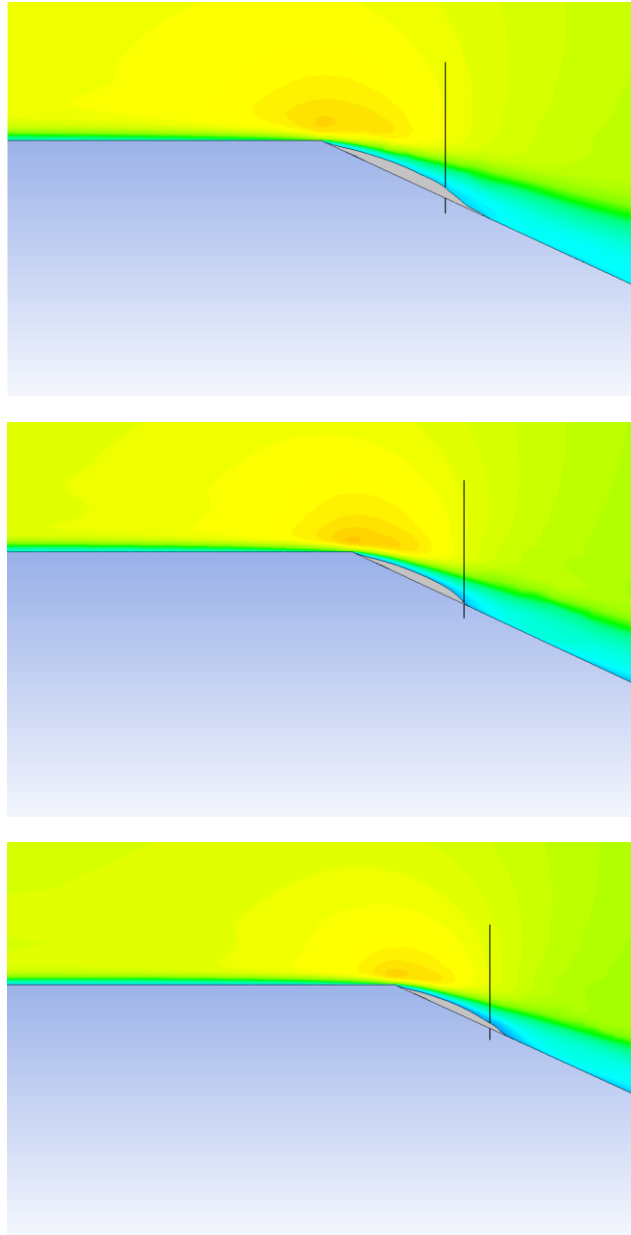


Σχήμα 17: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 6.



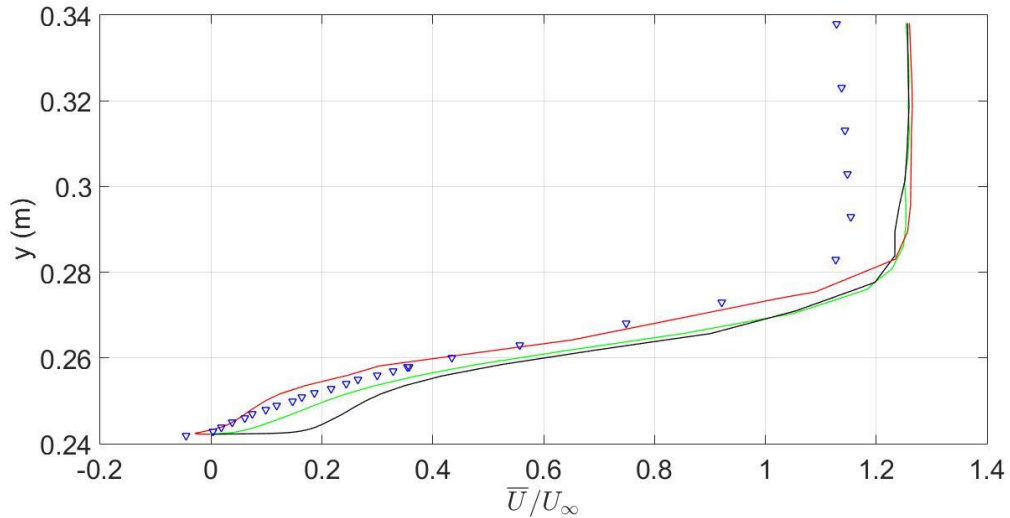
Σχήμα 18: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 7.

Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν πως η ανακυκλοφορία επεκτείνεται μέχρι τη θέση 7, γεγονός που δε μπορεί να προβλέψει το μεσαίο ύψος. Μάλιστα είναι τόσο λάθος που όχι μόνο δεν ορίζει περιοχή ανακυκλοφορίας σε αυτή τη θέση, φαίνεται η επανακόλληση της ροής. Το μικρό και το μεγάλο ύψος όμως προβλέπουν αποκόλληση ροής με το μικρότερο να θέτει καλύτερα την ένταση. Το παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται και από τις ισοϋψείς γραμμές (Contour Lines) του σχήματος 19. Η μαύρη γραμμή (θέση 7) διαπερνά τη σκιασμένη περιοχή (σημεία όπου $\bar{U} \leq 0$) της πρώτης εικόνας με αποτέλεσμα η κόκκινη γραμμή του διαγράμματος να περνάει από τις αρνητικές τιμές της ταχύτητας, όπως και στη περίπτωση της τρίτης εικόνας. Αντίθετα, στη μεσαία εικόνα δεν ταυτίζονται η ευθεία με την γκριζα περιοχή και έτσι στο σχήμα 18 η μαύρη ευθεία παίρνει μόνο θετικές τιμές.



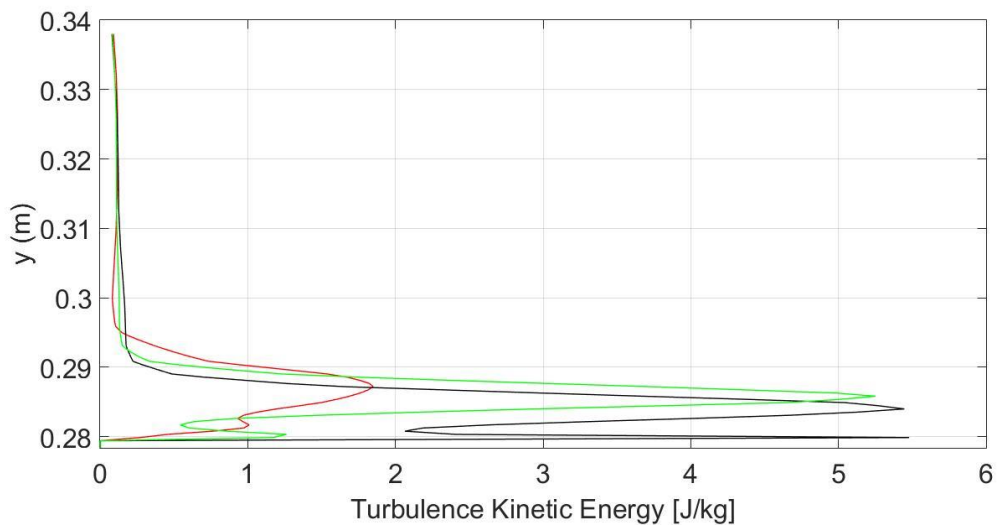
Σχήμα 19: Η γκριζα ζώνη αναπαριστά την περιοχή ανακυκλοφορίας για κάθε ύψος ξεκινώντας από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο, ενώ η μαύρη γραμμή αναπαριστά τη θέση 7.

Στο προφίλ της μέσης ταχύτητας στη θέση 8 (σχήμα 20), παρατηρείται η πιο εμφανής ως τώρα διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων μελέτης. Σύμφωνα με το σχήμα 19, η μαύρη γραμμή βρίσκεται στα όρια των περιοχών ανακυκλοφορίας για τα δύο μεγάλα ύψη, ενώ στο μικρότερο ύψος περισεύει μια αρκετά μεγάλη περιοχή, η οποία εκτείνεται μέχρι το $x_8 = -103 \text{ mm}$. Αυτό σημαίνει πως για το μικρότερο πάχος πλέγματος η αποκόλληση της ροής φτάνει μέχρι εκείνο το σημείο. Η σπουδαιότερη παρατήρηση είναι το γεγονός ότι τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν αρνητικές τιμές σε αυτή τη θέση, χαρακτηριστικό που μόνο το μικρότερο ύψος καταφέρει να προβλέψει και μάλιστα είναι ακριβέστερο όσον αφορά το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας.



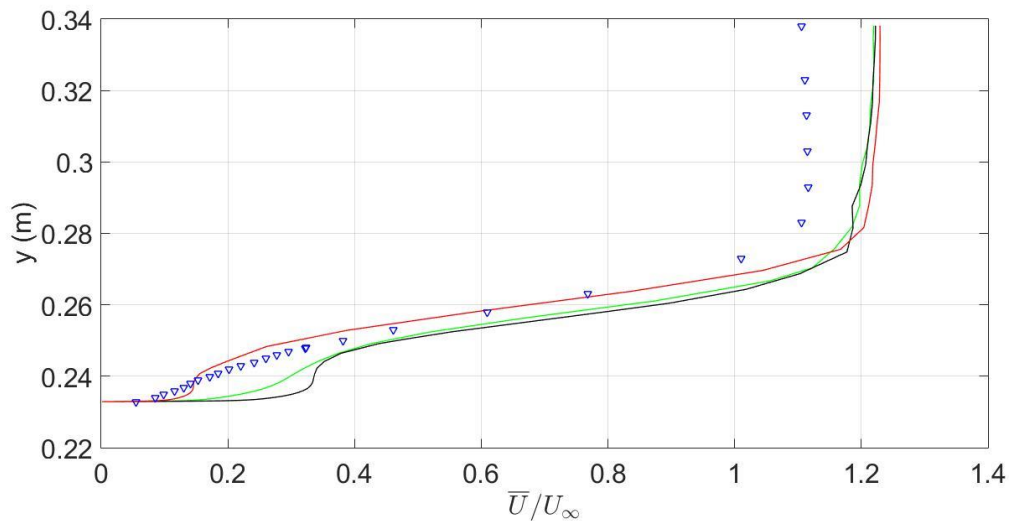
Σχήμα 20: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 8.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Ashton et al. (2016), βασικός παράγοντας που έχει άμεση σχέση με το μέγεθος της ανακυκλοφορίας είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια, λίγο μετά την αποκόλληση. Όσο πιο ισχυρές οι δίνες τόσο περισσότερη ορμή προσφέρεται στο σύστημα, διευκολύνοντας την επανακόλληση της ροής. Στην εικόνα 21 φαίνεται η μεταβολή της τυρβώδης κινητικής ενέργειας (Turbulent Kinetic Energy) για όλα τα ύψη στη θέση 4. Το διάγραμμα του σχήματος αποτελεί επιβεβαίωση της τοποθέτησης των Ashton et al. (2016), όπως και πολλών άλλων επιστημόνων της βιβλιογραφίας. Οι τιμές της τυρβώδης κινητικής ενέργειας του μεσαίου ύψους είναι μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα δύο, με αποτέλεσμα η περιοχή ανακυκλοφορίας να είναι μικρότερη, συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις.



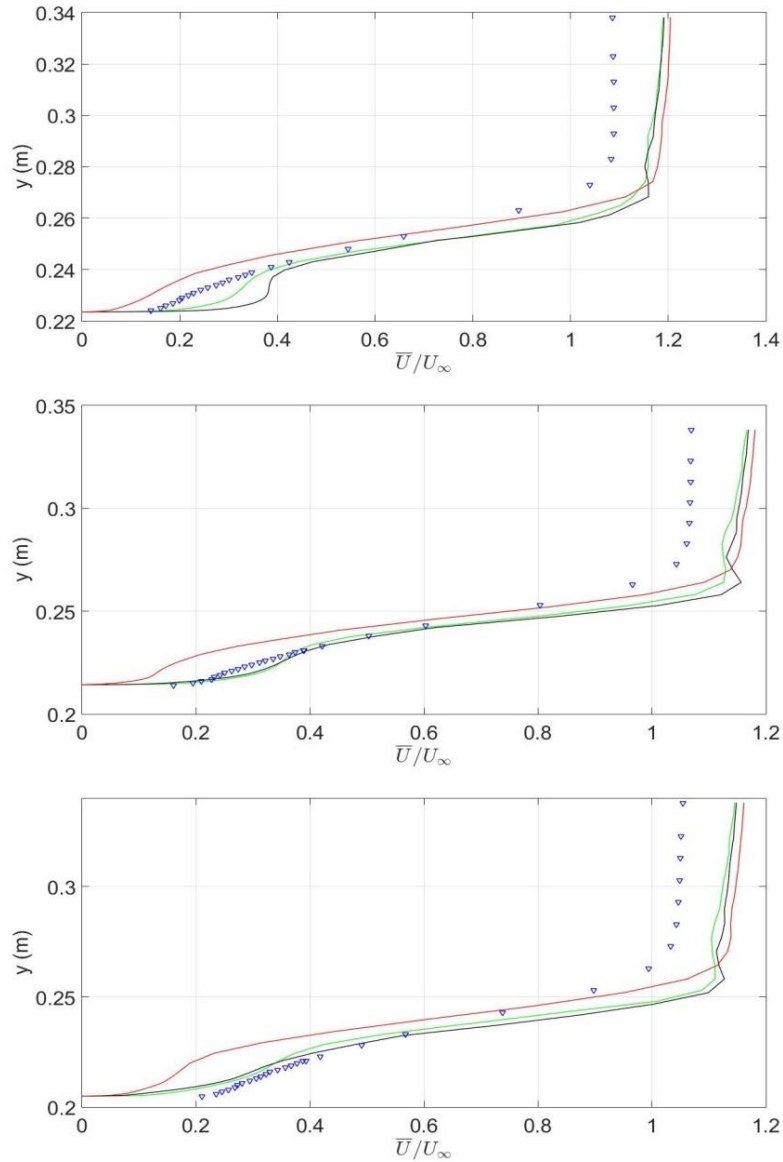
Σχήμα 21: Η τυρβώδης κινητική ενέργεια στη θέση 4. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος.

Όσο μετακινούμαστε στην κατεύθυνση της ροής (σχήμα 22), το πείραμα δείχνει πλήρη επανακόλληση της ροής. Σε αυτό το σημείο, επανακόλληση της ροής προβλέπουν όλες οι περιπτώσεις δομημένων πλεγμάτων, με το μικρότερο πάχος να αναπαριστά με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας. Στο σχήμα 23 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των επόμενων τριών θέσεων. Φαίνεται πως κανένα από τα πάχη δομημένου πλέγματος δεν είναι σε θέση να αναπαραστήσει με ακρίβεια τις τιμές της μέσης ταχύτητας. Σε κάποιες θέσεις ορίζουν μεγαλύτερες τιμές \bar{U} (θέση 12), ενώ σε άλλες (θέση 11) το δύο μεγαλύτερα πάχη έχουν ίδιο ρυθμό μεταβολής με το πείραμα.



Σχήμα 22: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση 9.

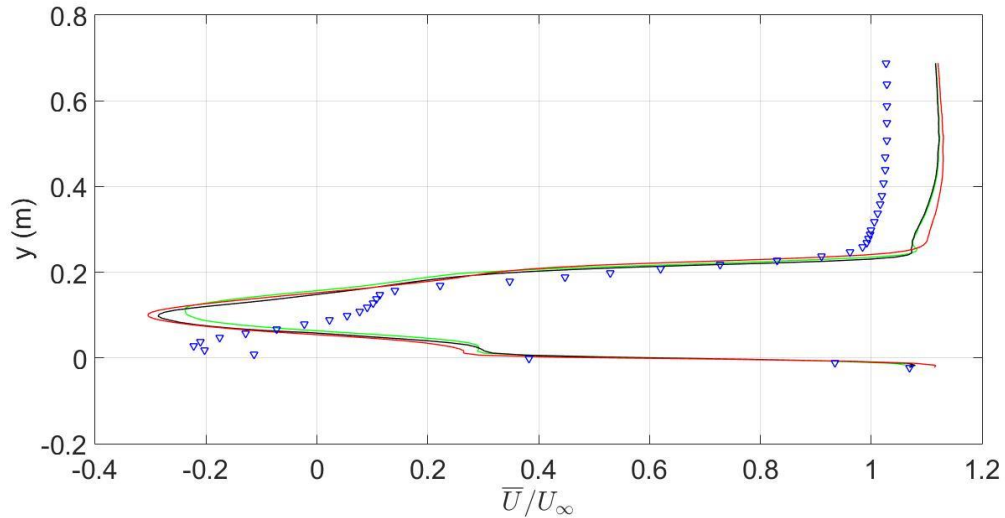
Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα από το προφίλ της μέσης ταχύτητας πάνω από την υπό κλίση επιφάνεια, μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί στη μετέπειτα μελέτη. Οι πρώτες μετρήσεις έδειξαν πως όλα ύψη χαρακτηρίζονται από το ίδιο πεδίο ταχύτητας, σε απόλυτη συμφωνία με το πείραμα, πέρα του γεγονότος ότι υπολογίζονται μεγαλύτερες ταχύτητες με την απομάκρυνση από την επιφάνεια. Το δομημένο πλέγμα που ξεχώρισε είναι αυτό με το μικρότερο ύψος. Χάρης σε αυτό ο ερευνητής είναι σε θέση να προσδιορίσει με μεγάλη ακρίβεια τόσο το μέγεθος της ανακυκλοφορίας όσο και το πόσο δυσμενής είναι η κλίση πίεσης. Η υπόθεση πως η αύξηση του πάχους θα προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα, δεν είναι τελικά ικανή να προσδιορίσει το πεδίο ροής, για κανένα από τους προαναφερθείς παράγοντες. Έτσι, δεν είναι λάθος να θεωρηθεί πως το μικρότερο ύψος αποτελεί την καλύτερη λύση ώστε τα αποτελέσματα από τον έλεγχο ροής να αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες. Για την τελική επιλογή αποτελεί ανάγκη να γίνει μελέτη και στον ομόρου κάθε περίπτωσης, προτού παρθεί η απόφαση.



Σχήμα 23: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις 10, 11 και 12 αντίστοιχα.

3.1.2 Σύγκριση πεδίου ταχύτητας στον ομόρου

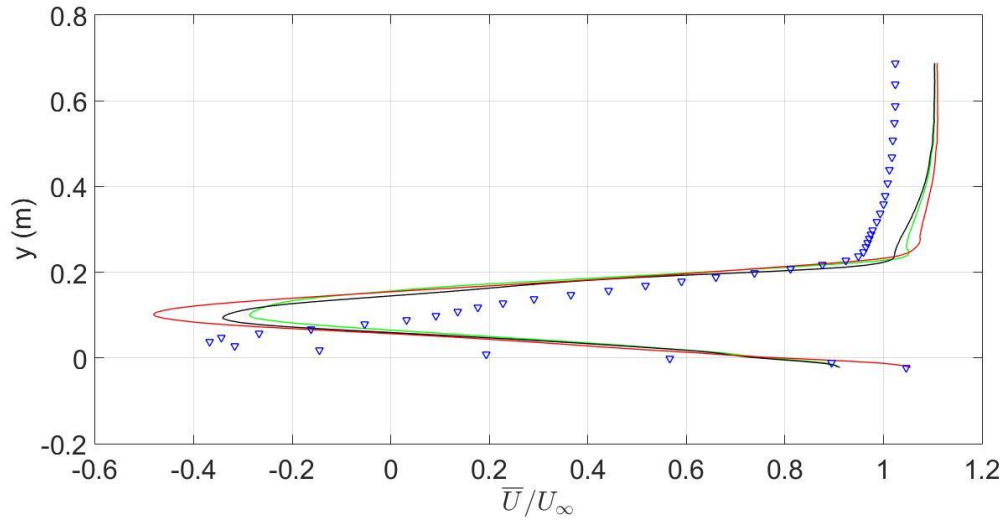
Όπως και στην προηγούμενη μελέτη, τα προφίλ της μέσης ταχύτητας στον ομόρου θα γίνουν στο επίπεδο $z = 0$. Οι θέσεις προς μελέτη απεικονίζονται στο σχήμα 12, με τις συντεταγμένες να αναγράφονται στον πίνακα 5. Μέσα από τα διαγράμματα επιδιώκεται η διαστασιολόγηση της ανακυκλοφορίας στον ομόρου για όλα τα πάχη δομημένου πλέγματος, με στόχο την εύρεση εκείνου του πλέγματος που ταυτίζεται καλύτερα με το πείραμα. Στο σχήμα 24 παρουσιάζεται το διάγραμμα για την θέση ομόρου 1 ή εν συντομία ομόρου 1.



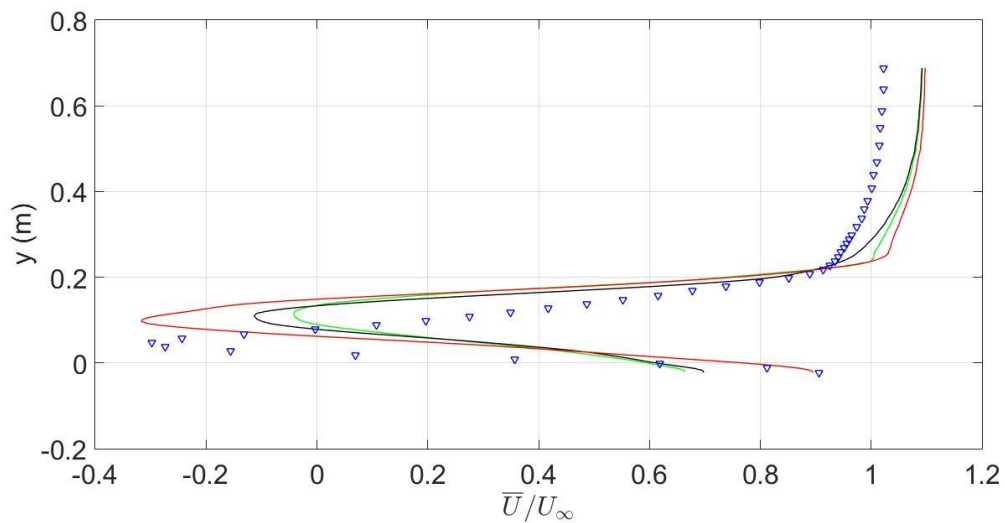
Σχήμα 24: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 1.

Όπως και στην περίπτωση της ανακυκλοφορίας στην υπό κλίση επιφάνεια, η εύρεση της στροβιλότητας στον ομόρου ορίζεται από την περιοχή όπου ισχύει $\bar{U} \leq 0$. Στο διάγραμμα 24 παρατηρείται πως υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ του μικρού και μεσαίου ύψους. Παρουσιάζουν την ίδια μεταβολή μέχρι το πρώτο σημείο μηδενικής μέσης ταχύτητας, το άνω όριο της αναστροφής της ταχύτητας είναι παρόμοιο και έρχονται σε συμφωνία στην ένταση της ανακυκλοφορίας. Καμία όμως από τις περιπτώσεις δεν ταυτίζεται με τα δεδομένα του πειράματος όσον αφορά το μέγεθος και τις ακραίες τιμές της περιοχής αρνητικών μέσων ταχυτήτων, πέρα από την περίπτωση του μεγαλύτερου πάχους όπου ταυτίζεται η ένταση της ανακυκλοφορίας με αυτή του πειράματος. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η περιοχή ξεκινά και τελειώνει σε χαμηλότερο σημείο. Πιο συγκεκριμένα ξεκινά από τον άξονα x ($y_1 = 0$) και φτάνει μέχρι το $y_2 = 0.08$ m περίπου. Μελετώντας την διαφορά $y_2 - y_1$ για κάθε γραμμή του διαγράμματός, συμπεραίνεται ότι η ανακυκλοφορία μικρού και μεσαίου πάχους είναι μεγαλύτερη από του πειράματος, διότι ισχύει και για τις δύο ότι $y_2 - y_1 \approx 0.10$ m.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το προφίλ της μέσης ταχύτητας για την θέση 2 στον όμορο. Για ακόμα μια φορά καμία από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν είναι αποτελεσματικές στην ακριβή περιγραφή της ανακυκλοφορίας. Συγκρίνοντας τα διάφορα πάχη, φαίνεται πως το μικρότερο υπολογίζει μικρότερες τιμές ταχύτητας, αν και είναι αισθητά μεγαλύτερες από του πειράματος. Το μεσαίο ύψος από την άλλη προβλέπει σωστά την ένταση της περιοχής. Κανένα όμως πλέγμα δεν μπορεί για άλλη μια φορά να ορίσει σωστά την αρχή και το τέλος της “φούσκας” στο ύψος της θέσης 3. Στη θέση 3 του ομόρου ($x_{w3} = 138$ mm), τα αποτελέσματα των αναλύσεων αρχίζουν να διαφοροποιούνται αισθητά καθώς απομακρυνόμαστε από την ανακυκλοφορία, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 26.

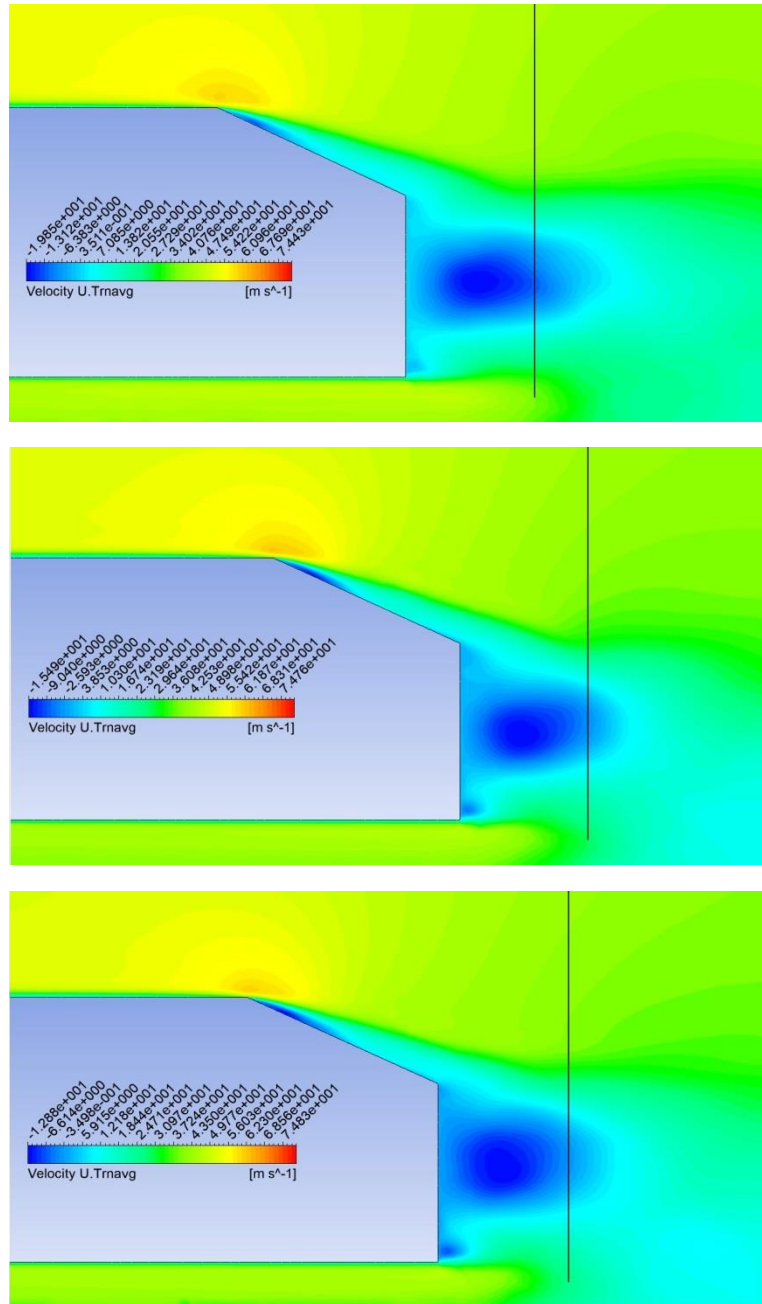


Σχήμα 25: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 2.



Σχήμα 26: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 3.

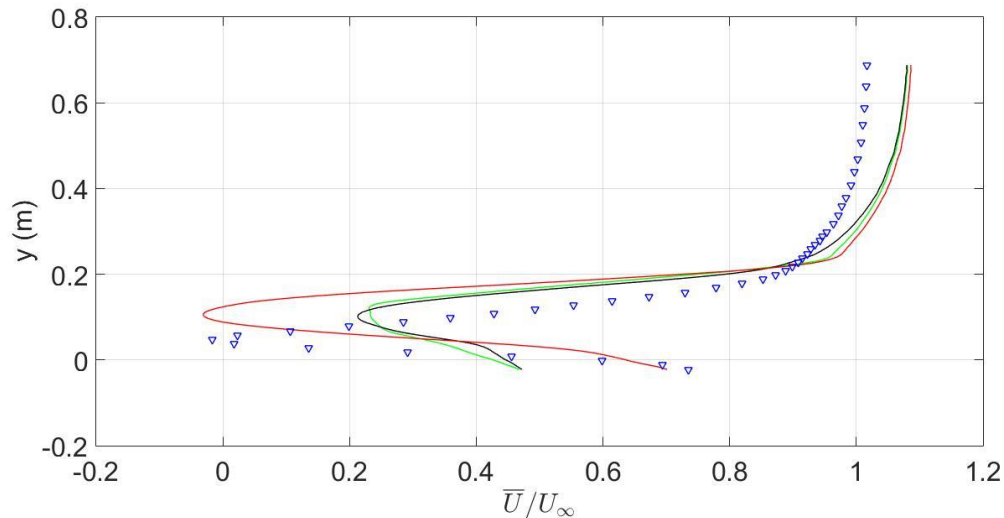
Το μεγάλο ύψος βρίσκεται στα όρια τη περιοχής λόγω του ότι η τελική τιμή της μέσης ταχύτητας είναι πάρα πολύ κοντά στο μηδέν. Με τη μείωση του πάχους του πλέγματος, παρατηρείται μια αύξηση της έντασης των δινών του ομόρου. Μέχρι το μικρότερο απ' όλα τα πλέγματα (10.23 mm), όπου έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τις τελικές τιμές ταχύτητας του πειράματος. Ακόμη μια φορά όμως, δεν καταφέραμε να προσεγγίσουμε την αρχή και το τέλος, μιας και οι αναλύσεις παρουσιάζονται ελάχιστα μετατοπισμένες προς τα επάνω. Η συλλογιστική που προκύπτει από το σχήμα 26 επιβεβαιώνεται από την παρακάτω εικόνα, με την χρήση ισοϋψών γραμμών (Contour Lines) για το μικρό, μεσαίο και μεγάλο πάχος πλέγματος αντίστοιχα.



Σχήμα 27: Το πεδίο της μέσης ταχύτητας \bar{U} στον ομόρου από το μικρότερο στο μεγαλύτερο πάχος δομημένου πλέγματος. Η μαύρη γραμμή αναπαριστά τη θέση 3 στον ομόρου.

Μετατοπίζοντας την μαύρη γραμμή του σχήματος 27 στην επόμενη θέση, όπου $x_{W4} = 188 \text{ mm}$, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι βρίσκεται έξω από την περιοχή ανακυκλοφορίας για όλες της περιπτώσεις. Υπόθεση που επιβεβαιώνεται από το σχήμα 28 και τα διαγράμματα ταχύτητας. Είναι προφανές πως υπάρχει ακόμα η επιρροή του σώματος πάνω στο πεδίο, με εκείνη του μικρότερου πλέγματος να αντιστοιχεί καλύτερα στο πείραμα. Στις άλλες δύο περιπτώσεις, η επίδραση του σώματος εξασθενίζει πιο γρήγορα απ’

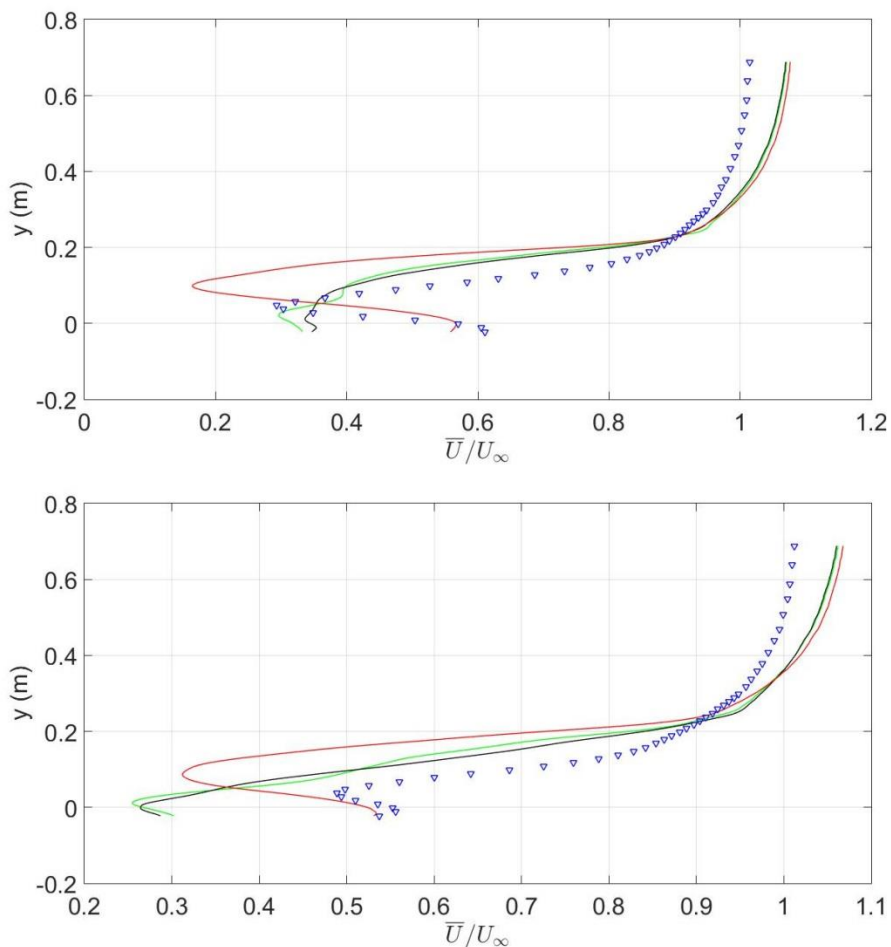
ότι προβλέπουν οι ερευνητές. Για ακόμη μια φορά όμως, το πάχος του μικρότερου ύψους είναι πολύ μεγαλύτερο από του πειράματος.



Σχήμα 28: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τη θέση ομόρου 4.

Στο σχήμα 29 παρουσιάζονται τα προφίλ για τις θέσεις 5 και 6 αντίστοιχα. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα δύο μεγαλύτερα πάχη πλέγματος έρχονται σε καλύτερη συμφωνία μεταξύ τους, ενώ τα δεδομένα από το μικρότερο πλέγμα, αν και παρουσιάζουν αισθητή διαφορά, πλησιάζουν καλύτερα εκείνα του πειράματος. Οι τεράστιες διαφορές στις ταχύτητες μεταξύ υπολογιστικής διαδικασίας και πειράματος παραμένουν και μάλιστα όσο μετατοπίζεται η μελέτη μακρύτερα του σώματος το πρόβλημα διογκώνεται (κάτω εικόνα του σχήματος 29). Μπορεί η διαφορά στις θέσεις μέτρησης να είναι πολύ μικρή ($x_{w5} = 238 \text{ mm}$ και $x_{w6} = 288 \text{ mm}$), το πεδίο ροής του πειράματος σταματά να επηρεάζεται από το σώμα με γρηγορότερο ρυθμό συγκριτικά με τις περιπτώσεις πλέγματος.

Απεικονίζοντας και τις υπόλοιπες θέσεις (σχήμα 29) βλέπουμε την επίδραση του σώματος πάνω στο πεδίο ροής. Η επίδραση του σώματος στο πείραμα απεικονίζεται με την μείωση της μέσης ταχύτητας όσο κινούμαστε κάθετα στην ευθεία. Στην περίπτωση του πειράματος η ταχύτητα συνεχώς αυξάνεται, μέχρι να αποκτήσει μια σταθερή τιμή από ένα συγκεκριμένο ύψος και έπειτα. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι η αρχή της εκάστοτε θέσης είναι πολύ κοντά στο ο όριο του δρόμου, όπου υπάρχουν συνεκτικά φαινόμενα μειώνοντας κατά συνέπεια τη \bar{U} . Η περαιτέρω απομάκρυνση (σχήμα 30) οδηγεί και τις υπολογιστικές μελέτες, σε ανεξαρτητοποίηση του πεδίο από το σώμα. Συνοπτικά, φαίνεται πως το μικρό πάχος δομημένου πλέγματος είναι αυτό που κερδίζει τη μάχη του πιστότερου αντιγράφου ομόρου, αν και η απόκλισή του είναι αρκετά μετρήσιμη.

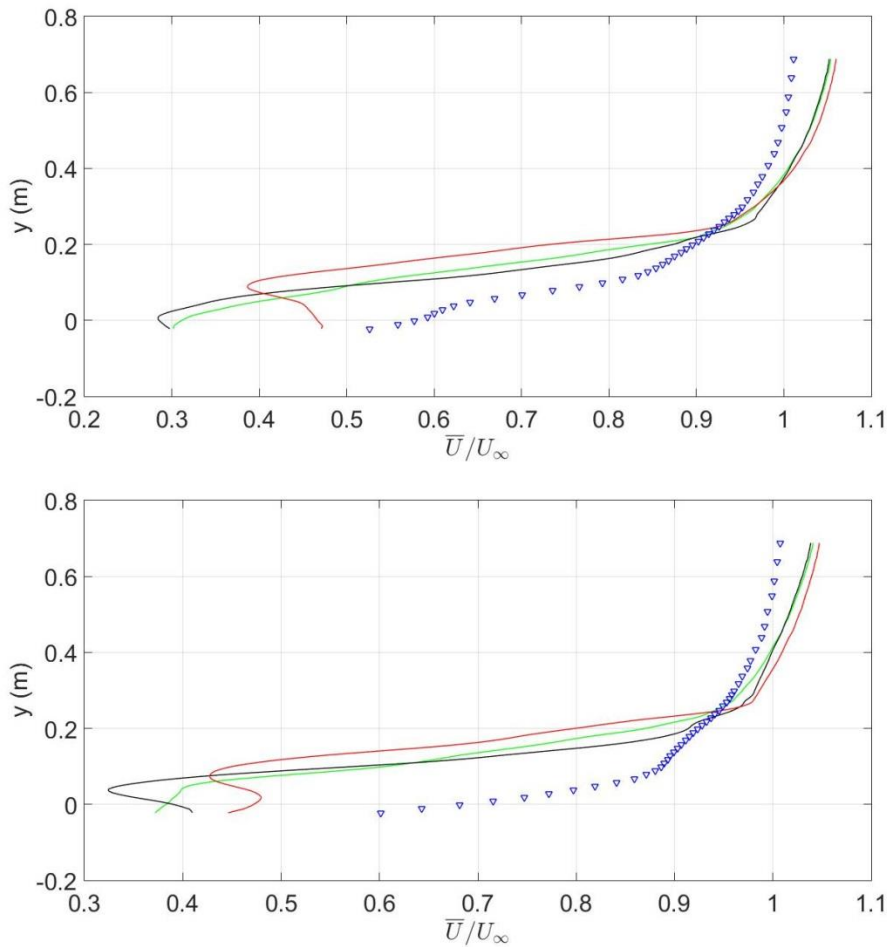


Σχήμα 29: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις του ομόρου 5 και 6 αντίστοιχα.

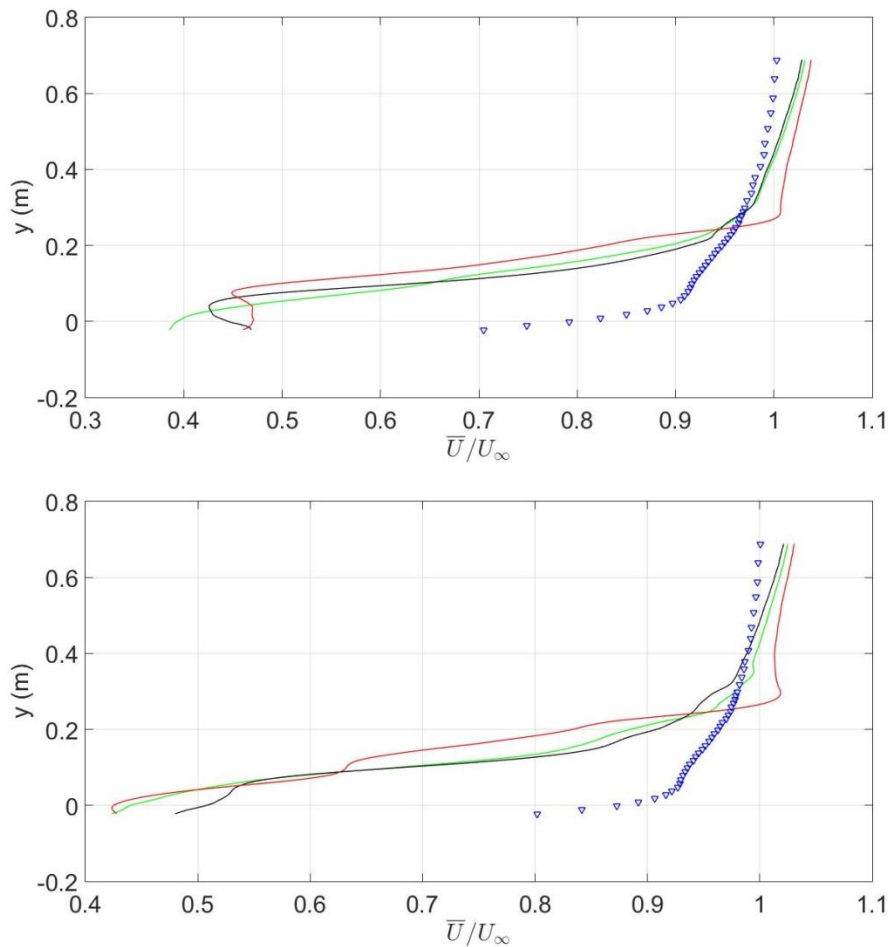
Κλείνοντας το κεφάλαιο για την ανάλυση του πεδίου ταχύτητας του ομόρου, πρέπει να επισημανθεί ότι οι θέσεις που παρουσιάστηκαν συμβαδίζουν με αυτές που θεωρούσαν οι ερευνητές ότι ήταν καίριες στη μελέτη του πεδίου ροής. Καμία από αυτές όμως δεν μπορεί να υποδείξει το ακριβές σημείο, στον άξονα x , που τελειώνει η περιοχή ανακυκλοφορίας. Μέσα από τα διαγράμματα δηλαδή, δεν είναι δυνατό να οριστεί το σημείο όπου $\bar{U} = 0$. Στον πίνακα 6 καταγράφονται οι συντεταγμένες των σημείων για κάθε περίπτωση πάχους δομημένου πλέγματος. Η τοποθέτηση των σημείων πάνω στο γράφημα της εικόνας 27, δίνει την ακριβή τοποθεσία του τέλους της ανακυκλοφορίας του ομόρου. Γίνεται εμφανής η τάση μείωσης του μήκους με την αύξηση του πάχους δομημένου πλέγματος. Το γεγονός ότι στην περίπτωση του μικρού ύψους η ανακυκλοφορία έχει μεγαλύτερο μήκος από τις υπόλοιπες, μπορεί να εξηγήσει και την επιρροή του σώματος σε μεγάλη απόσταση από αυτό. Ανατρέχοντας στα διαγράμματα μέσης ταχύτητας του ομόρου, το σημείο των πειραματικών δεδομένων όπου $\bar{U} = 0$ είναι στη θέση 4 με συνιστώσα $x_{w4} = 188 \text{ mm}$. Συγκρίνοντας την τιμή αυτή με τον πίνακα 6, επιβεβαιώνεται ξανά πως το μικρό πάχος προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες ροής γύρω από το σώμα.

Πίνακας 6: Οι συντεταγμένες του τελευταίου σημείου της ανακυκλοφορίας του ομόρου στον x άξονα και y άξονα.

Περιπτώσεις	Ύψη(mm)	X άξονας (m)	Y άξονας (m)
Μικρό ύψος	10.23	0.1962	0.1076
Μεσαίο Ύψος	21.27	0.1555	0.1083
Μεγάλο Ύψος	34.38	0.1457	0.1179



Σχήμα 30: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις του ομόρου 7 και 8 αντίστοιχα.



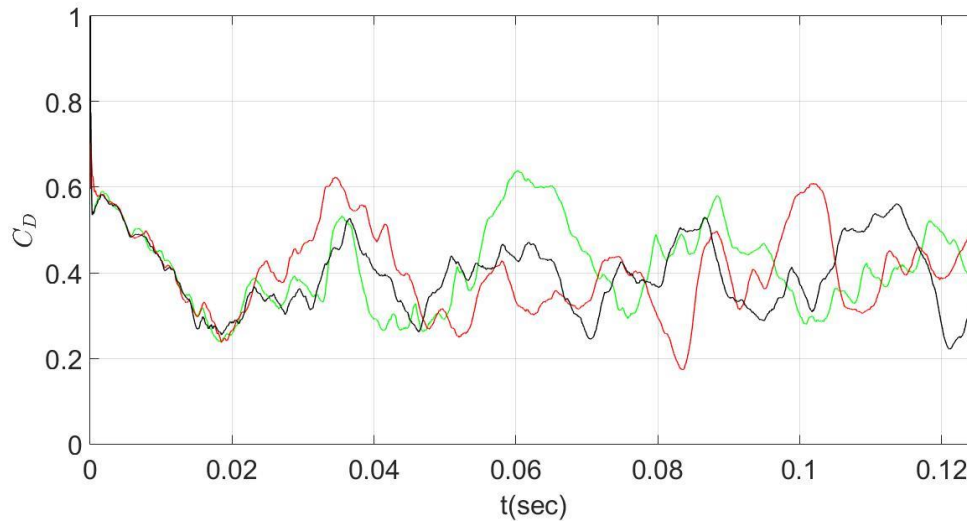
Σχήμα 31: Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος, ενώ με τρίγωνα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για τις θέσεις του ομόρου 9 και 10 αντίστοιχα.

3.1.3 Μελέτη του συντελεστή οπισθέλκουσας

Η μελέτη της αεροδυναμικής ενός οχήματος μπορεί να συνοψιστεί σε ένα και μόνο συντελεστή. Ο συντελεστή οπισθέλκουσας C_D καθορίζει κατά πόσο ένα επιβατικό όχημα είναι κατάλληλο για μετακίνηση, μιας και κρίνει σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση καυσίμου. Αποτελεί έναν τρόπο μέτρησης της αντίστασης του αέρα στην κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτή την εργασία πραγματοποιείται εμπειρισταωμένη ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ του πάχους του δομημένου πλέγματος και της τιμής του συντελεστή. Επειδή η υπολογιστή μελέτη είναι χρονικά εξαρτώμενη, η τιμή του C_D θα αλλάζει σε κάθε χρονικό βήμα, με αποτέλεσμα να μας δίνεται ένα χρονικά μεταβαλλόμενο διάγραμμα. Μέσω του διαγράμματος πρέπει να βρεθεί η μέση τιμή του λόγω του ότι επικεντρωνόμαστε στο μέσο πεδίο ροής.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο το χρονικό βήμα είναι 2.5×10^{-5} s, με τον συνολικό αριθμό βημάτων να ανέρχεται στα 5000. Ο πολλαπλασιασμός των δύο τιμών δίνει το συνολικό χρόνο μελέτης στα 0.125 s. Από αυτά μόνο τα 0.08 s ορίστηκαν για τον

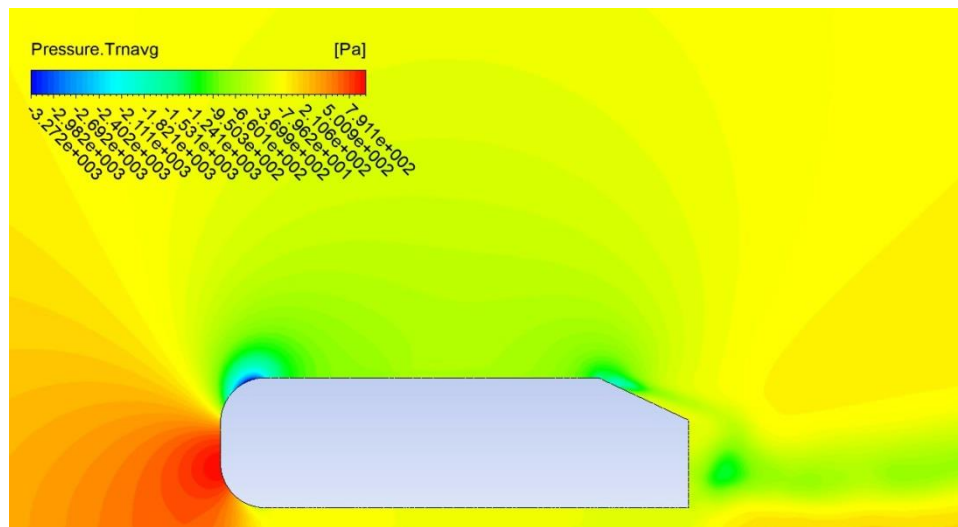
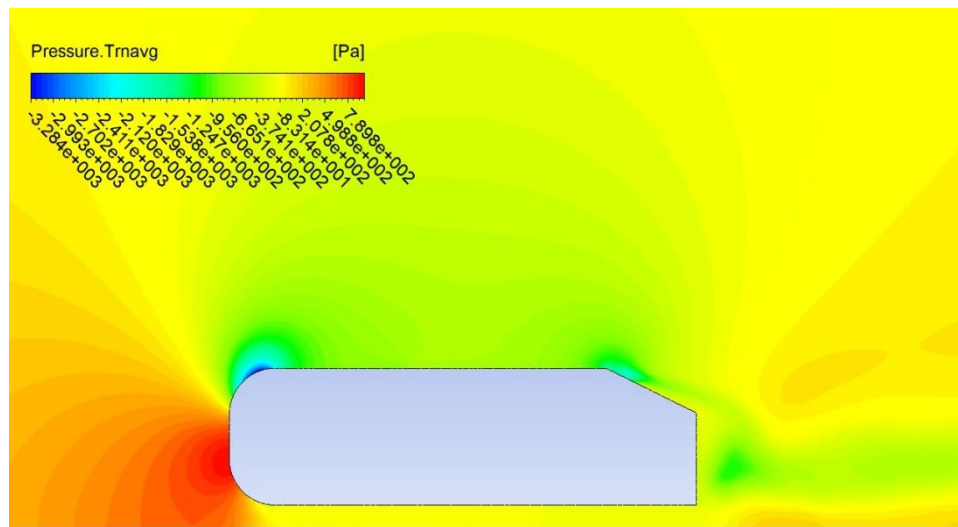
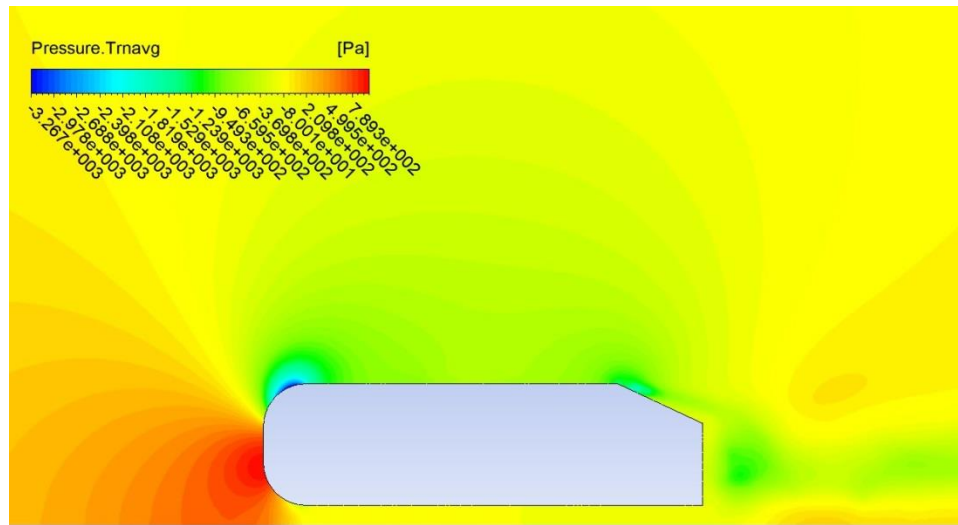
υπολογισμό του μέσου πεδίου, δηλαδή τα 3600 από τα συνολικά 5000 χρονικά βήματα. Τα πρώτα 1800 (0.045 s) δε συμπεριλήφθηκαν, έτσι ώστε το σύστημα να έχει φτάσει σε μια υποτυπώδη σύγκλιση. Το σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζει τη μεταβολή του συντελεστή για κάθε περίπτωση ύψους πλέγματος.



Σχήμα 32: Η μεταβολή της τιμής του C_D για κάθε περίπτωση ύψους. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μικρό ύψος, η μαύρη γραμμή στο μεσαίο ύψος, η πράσινη στο μεγάλο ύψος.

Η αντίσταση του αέρα πάνω σε ένα σώμα είναι ουσιαστικά μια δύναμη αντίθετη στην κίνησή του. Σύμφωνα με τους Cengel et al (2006), η δύναμη αυτή αποτελεί το άθροισμα δύο άλλων γνωστές και ως οπισθέλκουσα πίεσης και οπισθέλκουσα τριβής. Η δύναμη πίεσης $\vec{F}_{D,pressure}$ προκύπτει από την διαφορά πίεσης μεταξύ του εμπρός και πίσω τμήματος του σώματος και υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της πίεσης ως προς το εμβαδό της επιφάνειας $\vec{F}_{D,pressure} = \int_A \vec{P}dA$. Η εύρεση της μέσης δύναμης πίεσης για κάθε τοίχωμα της

μελέτης, προκύπτει με την αντικατάσταση της μέσης πίεσης στο κομμάτι του οχήματος προς μελέτη και την επιφάνειά του. Η τιμή του όρου A ορίζεται ως το αποτέλεσμα από τον πολλαπλασιασμό του μήκους της εκάστοτε επιφάνειας με το πάχος του οχήματος, όπως αναγράφεται στο σχήμα 1. Στο σχήμα 33 απεικονίζεται το μέσο πεδίο πίεσης για κάθε ένα από τα πλέγματα. Παίρνοντας τις τιμές της πίεσης για κάθε κομμάτι του οχήματος (πίνακας 1) και την επιφάνειά του, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την δύναμη για κάθε ύψος, από τον πίνακα 7, επισημαίνοντας πως η κατεύθυνση των δυνάμεων είναι στον άξονα x .



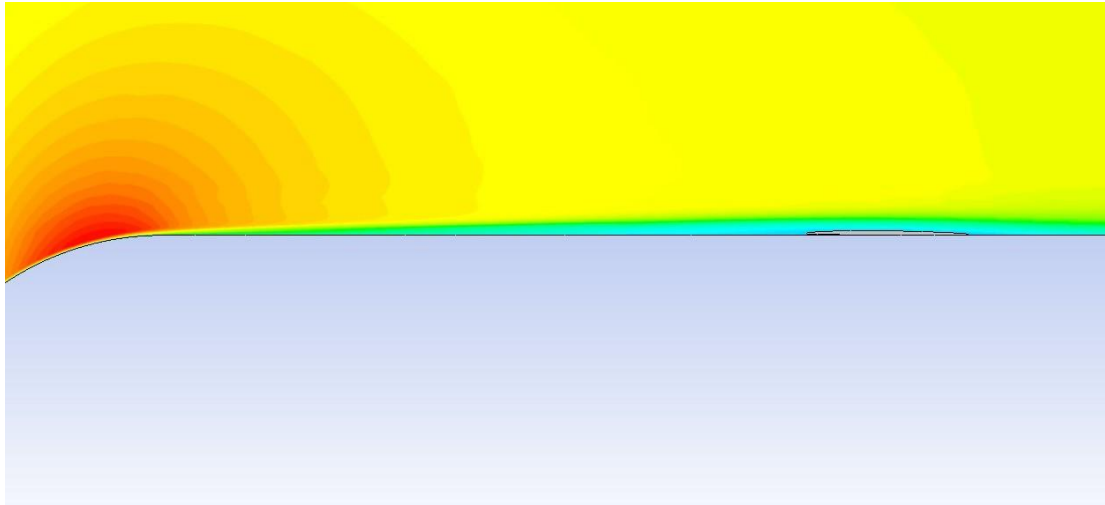
Σχήμα 33: Το πεδίο της μέσης πίεσης για το μικρό , μεσαίο και μεγάλο ύψος αντίστοιχα

Πίνακας 7: Οπισθέλκουσα πίεσης $\vec{F}_{D,pressure}$ [N]

Μέρη Οχήματος \ Πλέγμα	Μικρό Ύψος	Μεσαίο Ύψος	Μεγάλο Ύψος
Οροφή	0	0	0.004
Κάτω επιφάνεια	0	0	0
Κυρτή επιφάνεια	-8.504	-8.69	-8.387
Πίσω επιφάνεια	21.745	22.913	27.508
Επικλινής επιφάνεια	25.56	26.149	24.891
Συνολική δύναμη	38.802	40.372	44.015

Γίνεται ξεκάθαρο, συγκρίνοντας το άθροισμα των δυνάμεων, ότι η συνεχής αύξηση του πάχους του πλέγματος οδηγεί και στην αύξηση της δύναμης πίεσης. Μια επιφάνεια προκειμένου να εμφανίσει δύναμη πίεσης, πρέπει να τοποθετηθεί υπό κλίση μέσα στη ροή του ρευστού, ώστε να δημιουργηθεί διαφορά πίεσης. Αυτός είναι και ο λόγος που οι επικλινής επιφάνεια και η πίσω κάθετη είναι αυτές με τις μεγαλύτερες τιμές στη δύναμη αντίστασης. Τα δύο αυτά κομμάτια του οχήματος απαιτούν την μεγαλύτερη προσοχή μιας και επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από το πάχος του δομημένου πλέγματος, συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέρη του οχήματος. Εδώ πρέπει να επισημανθεί πως η τιμή της δύναμης στην οροφή του οχήματος δεν είναι απολύτως μηδενική. Οι αναλύσεις έδειξαν πως υπάρχει μια μικρή περιοχή δινών (σχήμα 34). Όμως, το μέγεθός της είναι τόσο μικρό που η συνεισφορά της στη συνολική δύναμη πίεσης μπορεί να αγνοηθεί. Πιο συγκεκριμένα η τιμή της είναι 0.000372241 N.

Αυτή η ανακυκλοφορία δεν επιβεβαιώνεται από πληθώρα υπολογισμών είτε πειραματικών είτε υπολογιστικών. Οι Minguez et al. (2008) ήταν εκείνοι που ανακάλυψαν μέσα από την υπολογιστική διαδικασία που ακολούθησαν, πως ίσως και να υπάρχει μια τέτοια περιοχή. Πιστεύεται ότι ο λόγος που δε βρέθηκε αυτή η περιοχή και σε άλλες μελέτες είναι πως οι συγγραφείς (κυρίως εκείνοι που διεξήγαγαν πειράματα) επικεντρώθηκαν στις περιοχές υψηλότερης σημασίας. Αυτές αποτελούνται από την υπό κλίση επιφάνεια και τον ομόρου. Επιβεβαίωση στο εύρημα, έρχεται να δώσουν οι Zhang et al. (2015). Δε μπορούμε να γνωρίζουμε εάν οφείλεται στην υπολογιστική διαδικασία, πάντως χρειάζεται πιο διεξοδική εάν θέλουμε μια πλήρη εικόνα του πεδίου ροής. Το μέγεθος της ανακυκλοφορίας είναι τόσο μικρό σε όλες τις περιπτώσεις πλεγμάτων και κατ' επέκταση η δύναμη αντίστασης μπορεί να αγνοηθεί, μιας και δεν προκαλεί αξιοσημείωτη μεταβολή στο άθροισμα και κατ' επέκταση στο συντελεστή οπισθέλκουσας.



Σχήμα 34: Η περιοχή ανακυκλοφορίας στο άνω μέρος του οχήματος για όλες τις περιπτώσεις

Η δεύτερη παράμετρος του συντελεστή οφείλεται στις διατμητικές τάσεις τ_w πάνω στα τοιχώματα και καλείται οπισθέλκουσα επιφανειακής τριβής $\vec{F}_{D,friction}$. Υπολογίζεται μέσω

$$\vec{F}_{D,friction} = \int_A \vec{\tau}_w dA.$$

Οι διατμητικές τάσεις είναι αποτέλεσμα των διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μέσα στο οριακό στρώμα, πολλαπλασιασμένες με την επιφάνεια (όμοια με τη δύναμη πίεσης). Αυτό σημαίνει πως η ολοκλήρωση των μέσων διατμητικών τάσεων στην κατεύθυνση του άξονα x , θα μας δώσει την μέση δύναμη τριβής (πίνακας 8). Φαίνεται πως η συνολική οπισθέλκουσα τριβής είναι πάρα πολύ μικρή συγκριτικά με την οπισθέλκουσα πίεσης, γεγονός που οφείλεται στον μεγάλο αριθμό Reynolds. Η τιμή του είναι αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του ρευστού, και επειδή ο αριθμός στη μελέτη είναι αρκετά μεγάλος, συγκεκριμένα $Re_H = 7.68 \times 10^5$, αυτό σημαίνει πως το ιξώδες είναι μικρό με αποτέλεσμα οι δυνάμεις πάνω στο τοίχωμα να είναι μικρές.

Πίνακας 8: Οπισθέλκουσα τριβής $\vec{F}_{D,friction}$ [N]

Πλέγμα Μέρη οχήματος	Μικρό Ύψος	Μεσαίο Ύψος	Μεγάλο Ύψος
Οροφή	0.475	0.501	0.489
Κάτω μέρος	1.128	1.134	1.143
Κυρτό μέρος	0.770	0.771	0.772
Πίσω επιφάνεια	0	0	0
Επικλινής επιφάνεια	-0.030	-0.019	-0.02
Συνολική Δύναμη	2.344	2.387	2.383

Με αντικατάσταση του αθροίσματος των δύο δυνάμεων στη σχέση 2 προκύπτει η μέση τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D (πίνακας 9). Σαν μετωπική επιφάνεια ορίζεται το

ύψος του οχήματος επί το πάχος αυτού. Η πράξη ορίζεται ως $0.288 \times 0.389 = 0.112032 \text{ m}^2$. Η τιμή του μέσου συντελεστή μπορεί επίσης να υπολογιστεί μέσω του σχήματος 31, βρίσκοντας το εμβαδόν της περιοχής που αντιστοιχεί στο μέσο πεδίο, με την ολοκλήρωση αυτής της περιοχής και έπειτα διαιρώντας με τον συνολικό χρόνο του μέσου πεδίου, δηλαδή 0.08 s . Η συμφωνία των δύο μεθόδων υπολογισμών είναι της τάξης των τεσσάρων πρώτων δεκαδικών ψηφίων.

Πίνακας 9: Συνολική δύναμη και συντελεστής οπισθέλκουσας

Πλέγμα Δύναμη, C_D	Μικρό Ύψος	Μεσαίο Ύψος	Μεγάλο Ύψος	Πείραμα $Re_L = 4.29 \times 10^5$
$F_{D,total} \text{ [N]}$	41.145	42.758	46.399	-
$C_{D,total}$	0.381	0.396	0.430	0.298

Η τιμή του συντελεστή που αναγράφεται στην στήλη πείραμα του πίνακα, προέρχεται από το διάγραμμα του σχήματος 4, μέσα από τα πειράματα των S.R. Ahmed et al. (1984). Τα πειράματα όμως έγιναν με διαφορετικό αριθμό Reynolds από εκείνα που βασίστηκα η παρούσα εργασία και μάλιστα πολύ μεγαλύτερο. Η σύγκριση με αυτή τη τιμή γίνεται για δύο βασικούς λόγους. Στην εργασία τους οι Lienhart et al. (2002) δεν αναφέρουν κάποια τιμή για το συντελεστή στα πειράματά τους και επίσης μετά από ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στην αναπαραγωγή αυτών των μετρήσεων, κανείς δεν υπολογίζει αυτή τιμή. Ο δεύτερος λόγος είναι πως μετά από υπολογισμούς και αναλύσεις που έγιναν για τη συσχέτιση του C_D με τον αριθμό Reynolds, βρέθηκε πως η διαφορά στις δύο τιμές δεν επιφέρει σημαντική μεταβολή στην τιμή του $C_{D,total}$. Σε πειραματική μελέτη, οι Bello-Millan et al. (2016), κατάφεραν να απεικονίσουν σε διάγραμμα αυτή την μεταβολή, συγκεντρώνοντας μάλιστα τιμές και από άλλες μελέτες. Μέσω του διαγράμματος γίνεται ξεκάθαρο πως η αύξηση του Reynolds από $Re_H = 7.68 \times 10^5$ σε $Re_L = 4.29 \times 10^5$ οδηγεί σε πολύ μικρή μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας. Για το λόγο αυτό η σύγκριση των συντελεστών στη παρούσα, αλλά και σε άλλες εργασίες, θα γίνει με την τιμή που ορίζεται από την πρότυπη εργασία.

Η διαφορά του αριθμού Reynolds είναι ένας από τους παράγοντες που σε όλες τις υπολογιστικές μελέτες υπερεκτιμάται η τιμή του μέσου συντελεστή C_D . Επιπλέον, μετά τη μελέτη στον ομόρου του οχήματος, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η επίδραση του σώματος γίνεται εμφανής σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτή του πειράματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη διαφορά πίεσης εμπρός και πίσω, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή. Τέλος, μια παράμετρος που δεν εξετάζεται σε αυτή την εργασία και παίζει καίριο ρόλο είναι τα μοντέλα τύρβης. Κάθε μοντέλο τύρβης δίνει διαφορετικά αποτελέσματα, είτε σε χρονικά εξαρτώμενη ροή είτε σε σταθερή. Αποτελεί ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα για τους ερευνητές η εύρεση ενός μοντέλου που να μπορεί να προβλέψει σωστά το πεδίο ροής και ταυτόχρονα το C_D .

Στη συνέχεια ορίζεται μια νέα παράμετρος ε , μεταξύ δύο συντελεστών οπισθέλκουσας. Η παράμετρος είναι ικανή να δώσει μια τιμή στη διαφορά των αποτελεσμάτων από τα διαφορετικά πλέγματα. Η τιμή της παραμέτρου υπολογίζεται από τη σχέση 7. Ο στόχος σε κάθε μελέτη ευαισθησίας πλέγματος είναι να βρεθεί ένα πλέγμα, η πύκνωση του οποίου να μην μεταβάλει τα αποτελέσματα πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή. Αφού βρεθεί αυτό το πλέγμα τότε η περαιτέρω πύκνωσή του θεωρείται μη αναγκαία. Συνήθως αυτή η τιμή είναι της τάξης του $\varepsilon = 3\%$. Το ποσοστό μπορεί να μεταβάλλεται μέσα από διάφορους παράγοντες, όπως είναι το είδος της μελέτης, η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ κ.α. Οι τιμές της παραμέτρου ε αποτυπώνονται στον πίνακα 10 για κάθε περίπτωση συγκριτικά με τι άλλες δύο.

$$\varepsilon = \left| \frac{C_{D,smaller} - C_{D,bigger}}{C_{D,bigger}} \right| \times 100 \quad (7)$$

Όπου: $C_{D,smaller}$: η τιμή του συντελεστή του μικρότερου από τα δύο πλέγματα

$C_{D,bigger}$: η τιμή του συντελεστή του μεγαλύτερου από τα δύο πλέγματα

Πίνακας 10: Η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας ανάμεσα στα διάφορα ύψη δομημένου πλέγματος.

	Μικρό Ύψος	Μεσαίο Ύψος	Μεγάλο Ύψος	$C_{D,total}$
Μικρό Ύψος	0	3.761	11.305	0.381
Μεσαίο Ύψος	3.761	0	7.839	0.396
Μεγάλο Ύψος	11.305	7.839	0	0.43

Μελετώντας τις τιμές του πίνακα, διαπιστώνεται πως η αύξηση του πάχους προκαλεί αύξηση στη ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας. Η μετάβαση από το ένα πλέγμα στο άλλο αυξάνεται σταδιακά με τα ύψη 10.23 mm και 21.27 mm να βρίσκονται μέσα σε αποδεκτά όρια μεταβολής (3.76%) σε περίπτωση απόφασης μεταξύ αυτών των δύο πλεγμάτων. Από το τρόπο που μεταβάλλονται οι τιμές και διαμορφώνονται τα προφίλ ταχύτητας, δεν είναι λάθος να υποθέσουμε πως περαιτέρω μείωση του ύψους (για παράδειγμα στα 5 mm) θα οδηγήσει σε καλύτερη συμφωνία με το πείραμα και η ποσοστιαία μεταβολή από τα 5 mm στα 10.23 mm (μικρό ύψος) να οδηγήσει σε μια ποσοστιαία μεταβολή μικρότερη του 3%. Άλλωστε αναφερόμαστε σε μελέτη οριακού στρώματος και χαρακτηριστικό αυτού είναι πως σε τυρβώδεις ροές είναι πολύ λεπτό. Είναι μια υπόθεση που αξίζει περαιτέρω υπολογισμούς.

Συμπερασματικά, η τοποθέτηση του συστήματος έγχυσης ρευστού θα γίνει στην περίπτωση όπου το δομημένο πλέγμα έχει ύψος 10.23 mm. Τα διαγράμματα των ταχυτήτων στην υπό κλίση επιφάνεια συμφωνούν πολύ καλύτερα με του πειράματος. Μπόρεσε να προβλέψει με πολύ καλή ακρίβεια το μέγεθος της περιοχής αποκόλλησης, αλλά και τον τρόπο μεταβολής της ταχύτητας μέσα στο οριακό στρώμα, συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις. Στον ομόρου δεν μπόρεσε να ορίσει με ακρίβεια την περιοχή όπου το σώμα επιδρά πάνω στο πεδίο, αλλά είναι σε θέση να ορίσει καλύτερα το σημείο όπου τελειώνει η ανακυκλοφορία ($\bar{U} = 0$) συγκριτικά με τα άλλα δύο πάχη. Τέλος, από όλες τις

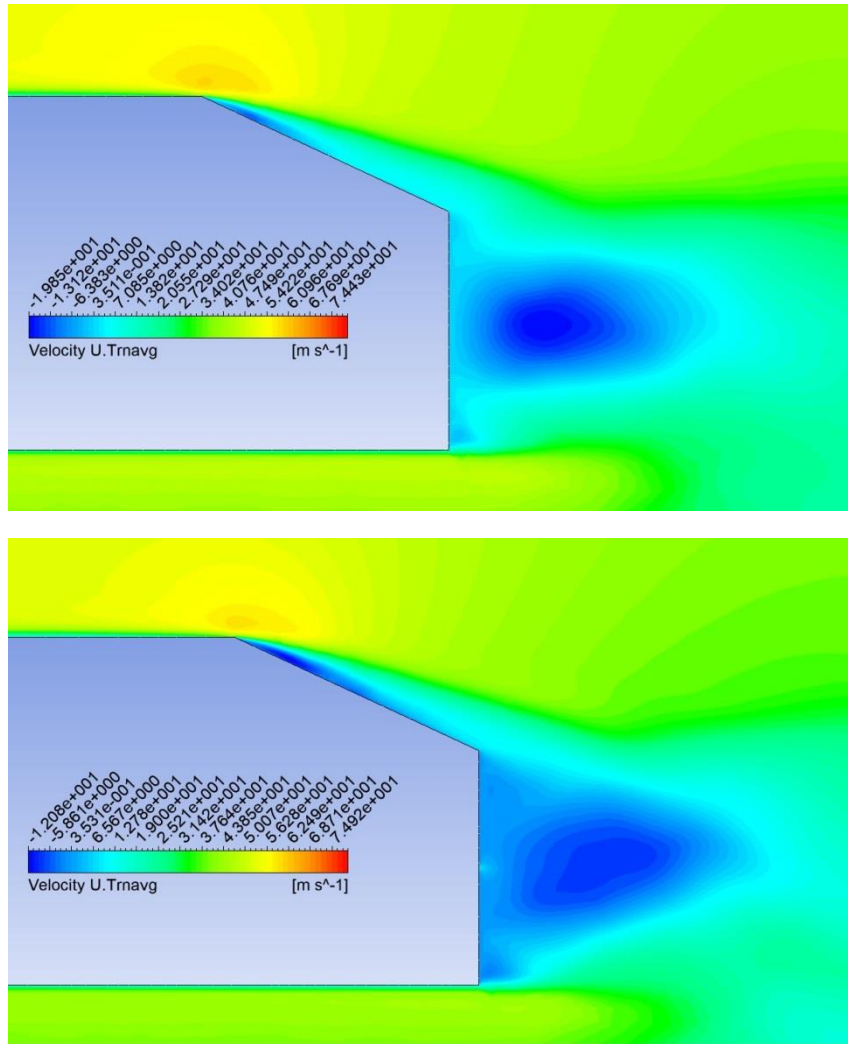
περιπτώσεις πλέγματος ήταν εκείνη που έφτασε πιο κοντά στην επιθυμητή τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D .

3.2 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού

Η διαδικασία εύρεσης διάταξης για τον έλεγχο της ροής ξεκίνησε μελετώντας πρώτα την διαθέσιμη βιβλιογραφία. Μόλις καταγράφηκαν όλες οι παράμετροι, παρατηρήθηκε πως ένα μεγάλο μέρος αυτών συγκέντρωναν την προσοχή τους στην ανακυκλοφορία στην υπό κλίση επιφάνεια. Θέλοντας να γίνει μια καινοτόμα μελέτη και επειδή η ανακυκλοφορία στον ομόρου είναι καίριας σημασίας, αποφασίστηκε όλες οι διατάξεις των εγχυτήρων να επικεντρωθούν στον ομόρου. Έτσι, η πρώτη μελέτη έγινε με τη χρήση μονού jet κατά μήκος όλου του σώματος και εγκαταστάθηκε στο μέσο της πίσω κάθετης επιφάνειας. Η ταχύτητα έγχυσης ρευστού παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστική διαδικασίας, με τιμές από 10 m/s έως 60 m/s αυξάνοντας τη κάθε φορά κατά 10.

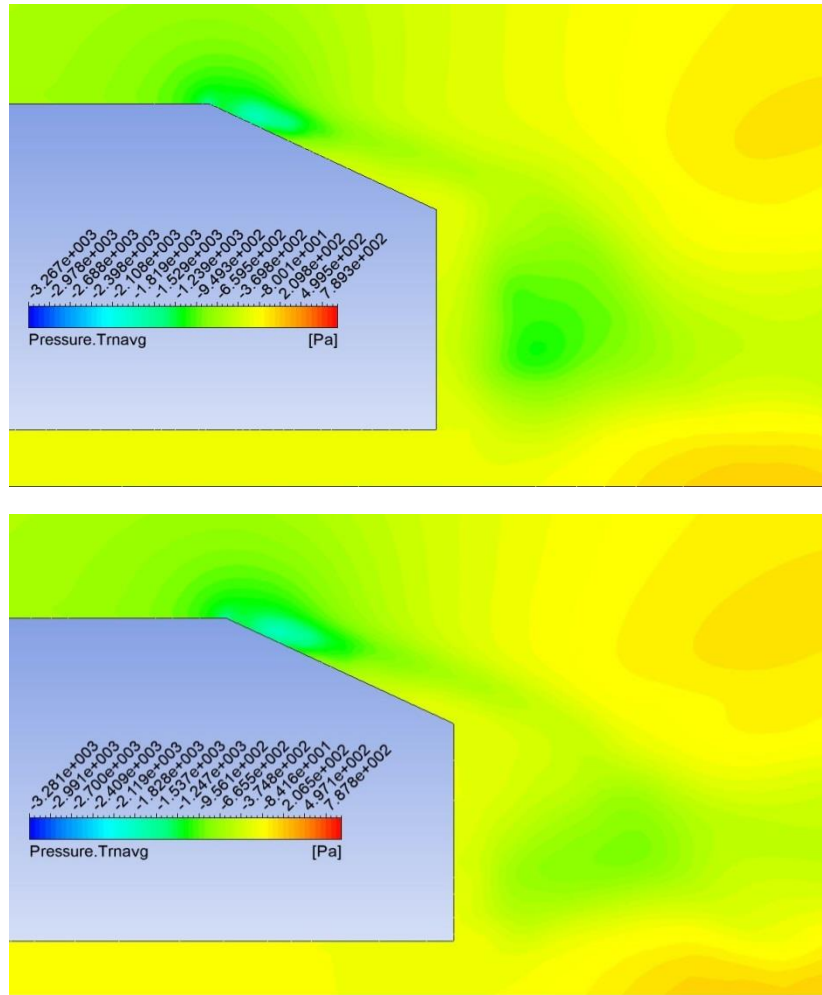
3.2.1 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 10 m/s

Στο σχήμα 35 απεικονίζεται το πεδίο της \bar{U} για την πρώτη ταχύτητα έγχυσης συγκριτικά με την απλή περίπτωση. Πρώτη παρατήρηση που εξάγεται είναι πως το μέγεθος της ανακυκλοφορίας στην επικλινή επιφάνεια έχει αυξηθεί κατά τη διεύθυνση x . Οι ταχύτητες όμως που επικρατούν μέσα σε αυτή την περιοχή είναι περίπου όμοιες για τις δύο περιπτώσεις. Όσον αφορά την ανακυκλοφορία του ομόρου, το μέγεθός της δε μεταβάλλεται σημαντικά στην διεύθυνση x , φαίνεται όμως να είναι μεγαλύτερη στην άλλη διεύθυνση.



Σχήμα 35: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγκυση με ταχύτητα 10 m/s (κάτω εικόνα).

Στο σχήμα 36 απεικονίζεται το πεδίο μέσης πίεσης για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις του σχήματος 35. Η επίδραση που έχει η έγκυση αέρα στον ομόρου είναι ευκαταία, αλλά ταυτόχρονα αναμενόμενη. Χάρης στη πρόσδοση ενέργειας στο σύστημα, η περιοχή χαμηλής πίεσης του ομόρου μικραίνει, με επίπτωση στις δυνάμεις πίεσης και τριβής. Δυστυχώς, φαίνεται πως η διάταξη με αυτή την ταχύτητα επηρεάζει και την περιοχή ανακυκλοφορίας στην επικλινή επιφάνεια, με τον αντίθετο τρόπο. Η χαμηλή πίεση που επικρατεί στην περιοχή μειώνεται αισθητά, έχοντας τα αντίθετα αποτελέσματα στις δυνάμεις από τον ομόρου. Στον πίνακα 11 καταγράφονται όλες οι τιμές των δυνάμεων, επιβεβαιώνοντας την παραπάνω συλλογιστική. Η μείωση της δύναμης στην πίσω επιφάνεια, σχεδόν αντισταθμίζεται από την αύξηση της δύναμης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια. Αυτό έχει σαν επίπτωση, την μεταβολή μεν του ολικού συντελεστή, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό.



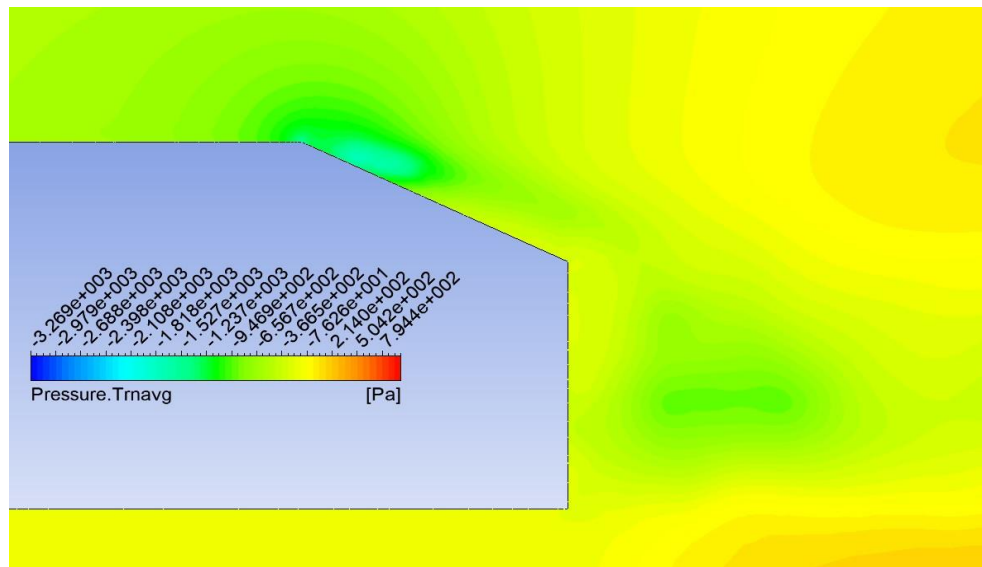
Σχήμα 36: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 10 m/s (κάτω εικόνα).

Πίνακας 11: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 10 m/s.

Μελέτες Όχημα	Αρχική Μελέτη		Μονή Έγχυση $U_{jet} = 0.25 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.479
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.116
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.714	0.767
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	17.839	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	28.285	-0.038
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	37.41	2.324
C_D	0.360	0.022	0.347	0.022
$C_{D,total}$	0.381		0.368	

3.2.2 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του διπλασιασμού της ταχύτητας έγχυσης, δηλαδή η μελέτη όπου $U_{jet} = 0.5 \cdot U_{\infty}$. Γνωρίζοντας το σκοπό που έχουν οι εγχυτήρες και παρατηρώντας τα αποτελέσματα της μικρότερης ταχύτητας, δε θα ήταν λάθος να υποθέσει κανείς, πως η επίρεια της αύξησης αυτής θα ήταν προς όφελος του απώτερου στόχου της μελέτης. Συγκρίνοντας το πεδίο πίεσης του σχήματος 37, με εκείνο του σχήματος 36 (πάνω εικόνα) διαπιστώνεται πως συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Η περιοχή χαμηλής πίεσης στην επικλινή επιφάνεια φαίνεται να μην τροποποιείται με την αύξηση της ταχύτητας έγχυσης, η ίδια περιοχή στον ομόρου μεγεθύνεται αισθητά. Αυτό σημαίνει πως η διαφορά πίεσης μεταξύ του εμπρός και πίσω μέρους του οχήματος αυξάνεται. Σύμφωνα με τον ορισμό της οπισθέλκουσας δύναμης, οδηγούμαστε σε αύξηση αυτής και κατ' επέκταση οδηγούμαστε σε αύξηση του συντελεστή. Ο παρακάτω πίνακας επιβεβαιώνει τις ανησυχίες όσον αφορά τη μεταβολή του συντελεστή, μιας και η δύναμη πίεσης παρουσιάζει αισθητή αύξηση της τάξης των 2 N περίπου. Η ταυτόχρονη αύξηση και στην επικλινή επιφάνεια προκαλεί τη μη επιθυμητή μεταβολή του ολικού συντελεστή.



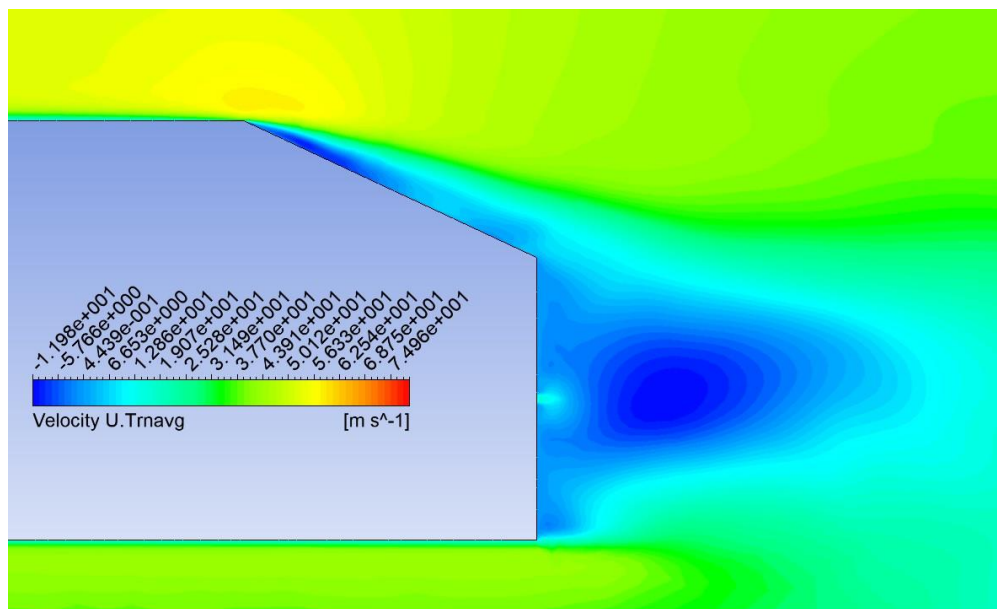
Σχήμα 37: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μονής έγχυσης ρευστού παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με ταχύτητα 20 m/s .

Πίνακας 12: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 20 m/s .

Μελέτες Όχημα	Αρχική Μελέτη		Μονή Έγχυση $U_{jet} = 0.5 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.486
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.150
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.037	0.771
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	23.667	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	28.464	-0.033
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	44.094	2.373
C_D	0.360	0.022	0.409	0.022
$C_{D,total}$	0.381		0.431	

3.2.3 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 30 m/s

Μετά από τα ενδιαφέροντα αποτελέσματα στο πεδίο μέσης πίεσης, αποφασίστηκε η ταχύτητα έγχυσης να αυξάνεται κατά 10 m/s, με στόχο την πιο διεξοδική μεταβολή του πεδίου ροής. Μέσω του σχήματος 38 παρατηρείται η επίδραση που έχει το σύστημα ελέγχου με τη την ταχύτητα έγχυσης $U_{jet} = 0.75 \cdot U_{\infty}$.



Σχήμα 38: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινής επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 30 m/s.

Όπως και στις περιπτώσεις των προηγούμενων ταχυτήτων, η περιοχή ανακυκλοφορίας στην επικλινής επιφάνεια είναι μεγαλύτερη της μελέτης χωρίς έλεγχο ροής. Περισσότερο

ενδιαφέρον όμως παρουσιάζεται στην ανακυκλοφορία το ομόρου. Η ταχύτητα έγχυσης είναι αρκετά μεγάλη, παρ' όλα αυτά δεν είναι ικανή να 'σπάσει' έστω και λίγο την ανακυκλοφορία. Το μέγεθός της δε μεταβάλλεται σε κανένα από τις δύο διευθύνσεις. Η συμβολή του συστήματος ελέγχου ροής είναι πως η ταχύτητα στο κέντρο ανακυκλοφορίας είναι μεγαλύτερη από την απλή περίπτωση, με τιμές -11.97 m/s και -19.85 m/s αντίστοιχα. Η επίδραση λοιπόν που έχει το jet πάνω στη ροή έχει θετικό πρόσημο. Παράλληλα με την ταχύτητα αναπόφευκτα επηρεάζεται και η μέση πίεση που εξ ορισμού επηρεάζει τις δυνάμεις πίεσης.

Επειδή η έγχυση αέρα προέρχεται από την πίσω κάθετη επιφάνεια, είναι λογικό η ανακυκλοφορία στην υπό κλίση επιφάνεια να μην μεταβάλλεται σε τεράστιο βαθμό. Μετά από την επεξεργασία των τιμών της πίεσης πίσω από το όχημα προκύπτει πως χάρης στην έγχυση, αρχίζει να εξισορροπείται μεταξύ εμπρός και πίσω μέρους. Η μικρότερη τιμή μέσης πίεσης για την περίπτωση χωρίς το σύστημα ελέγχου είναι $\bar{P}_{no,jet} = -1108.14 \text{ Pa}$, ενώ για τη μελέτη που εξετάζουμε είναι $\bar{P}_{single,30 \text{ m/s}} = -856.99 \text{ Pa}$. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτό θα έχει επίπτωση στον ολικό συντελεστή οπισθέλκουσας, όπως αποδεικνύεται στον πίνακα 13. Σε αντίθεση με την περίπτωση όπου $U_{jet} = 0.5 \cdot U_{\infty}$, το σύστημα ελέγχου ροής λειτουργεί υπέρ της μετατροπής του οχήματος σε πιο αεροδυναμικό, αφού εξαιτίας αυτού υφίσταται μείωση ο C_D .

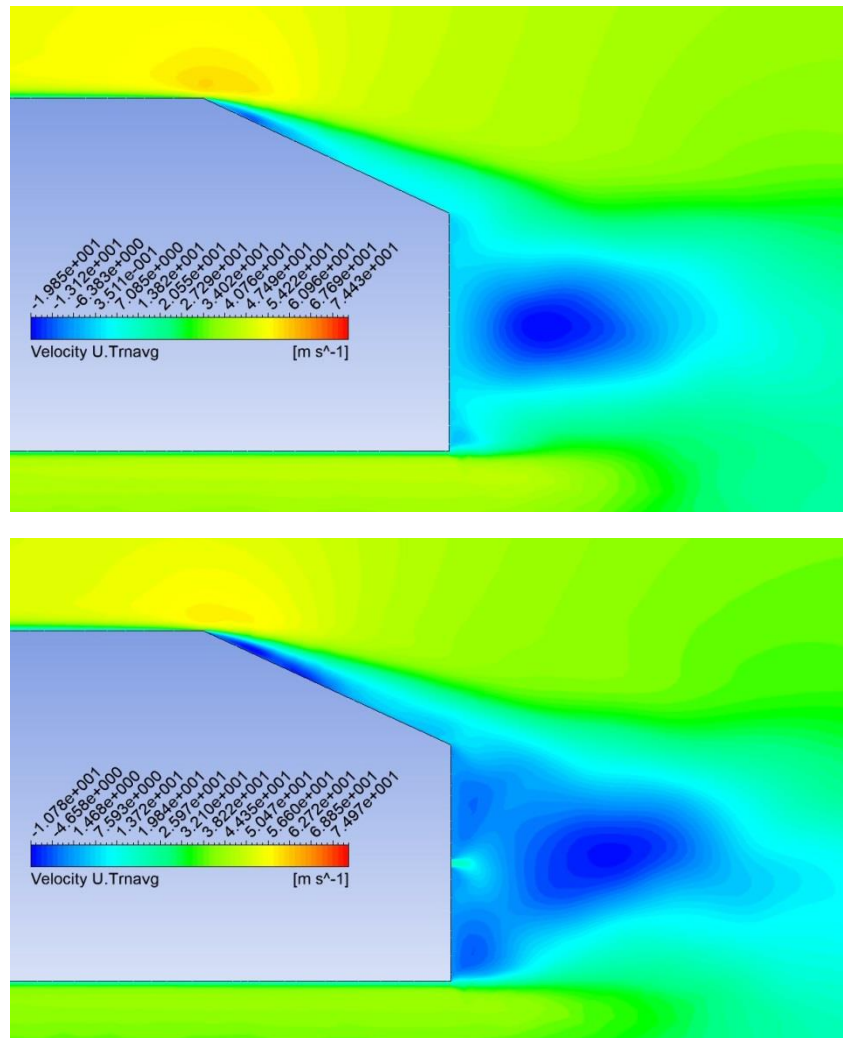
Πίνακας 13: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 30 m/s.

Μελέτες Όχημα	Αρχική Μελέτη		Μονή Έγχυση $U_{jet} = 0.75 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.468
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.08
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.727	0.762
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	18.108	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	27.716	-0.033
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	37.096	2.278
C_D	0.360	0.022	0.344	0.021
$C_{D,total}$	0.381		0.365	

3.2.4 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s

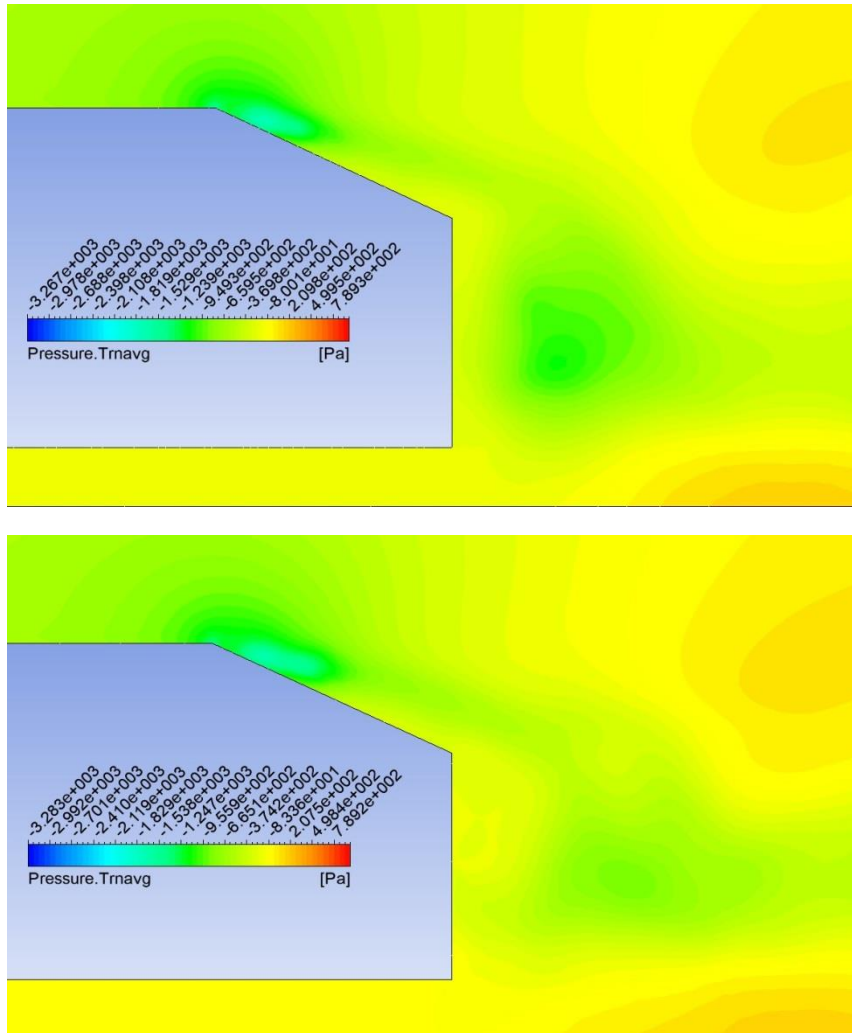
Οι δίνες που προκαλούνται μέσα σε μια τυρβώδης ροή είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο κομμάτι αντίστασης λόγω αέρα, ειδικά στη περίπτωση ενός οχήματος. Με την 'καταστροφή' αυτών ή τουλάχιστον ένα μέρος τους, ο μηχανικός είναι σε θέση να βελτιώσει την απόδοση κάθε οχήματος, αλλά και κάθε σώματος που διαπερνάτε από ρευστό. Οι προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι το εύρος λειτουργίας των jet δεν είναι ικανό να διασπάσει έστω και στο ελάχιστο τη δίνη. Πέρα από την ταχύτητα των 30 m/s, όπου παρατηρείται ένα μικρό κενό, αλλά και πάλι δεν είναι ευδιάκριτο ούτε η μεταβολή της

συνολικής δύναμης είναι σημαντική. Με την αύξηση της ταχύτητας σε $U_{jet} = U_{\infty}$, τότε η επίδραση πάνω στο πεδίο της μέσης ταχύτητας γίνεται ευδιάκριτη (σχήμα 39).



Σχήμα 39: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 40 m/s (κάτω εικόνα).

Το μέγεθος της δίνης στον άξονα x δε φαίνεται να μεταβάλλεται, αλλά γίνεται γρήγορα αντιληπτό πως στην περιοχή γύρω από την οπή, η δίνη έχει τη μικρότερη επίπτωση. Μέσα από αυτή την αλληλεπίδραση όμως έχουμε την δημιουργία δύο μικρότερων ανακυκλοφοριών, που σε προηγούμενες διατάξεις δεν υπήρχαν. Ουσιαστικά, η δίνη δεν ‘καταστρέφεται’, αλλά διασπάται σε μικρότερες. Από την μια περίπτωση είναι καλό γιατί αυτές οι δίνες εξασθενούν γρηγορότερα με την πάροδο του χρόνου, από την άλλη η διαφορά πίεση δεν εξισορροπείται στο σημείο που θα επιθυμούσαμε. Για μια ακόμα φορά, η λειτουργία της διάταξης σε αυτή τη ταχύτητα επηρεάζει άμεσα την ανακυκλοφορία στην επικλινή επιφάνεια. Μεγαλώνει σε μέγεθος και στις δύο διευθύνσεις, αλλά και σε ισχύς. Από την άλλη το σχήμα 40 απεικονίζει το μέσο πεδίο πίεσης και η εμφανής επίδραση πάνω στο πεδίο.



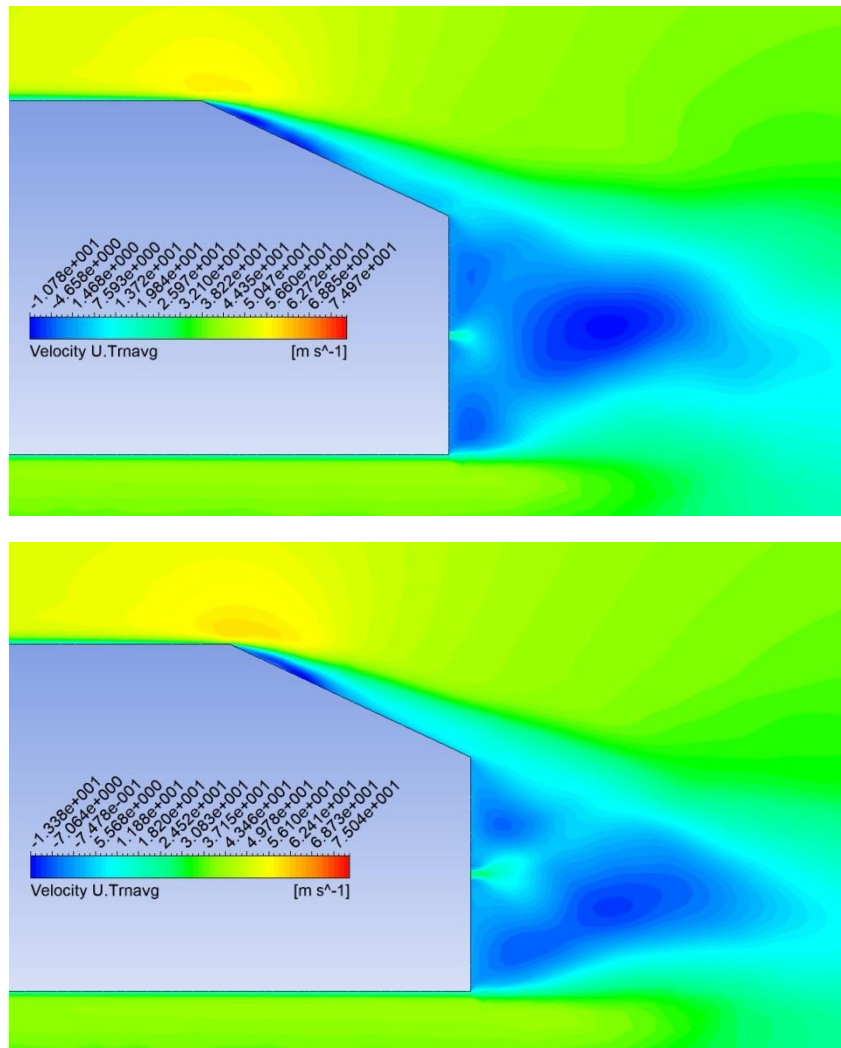
Σχήμα 40: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (πάνω εικόνα) και για μονή έγχυση με ταχύτητα 40 m/s (κάτω εικόνα).

Παρατηρούμε πως η περιοχή ελάχιστης πίεσης μεταφέρεται μακρύτερα από το σώμα και επιπλέον οι πιέσεις στην κάτω εικόνα είναι μεγαλύτερες σχετικά με την πάνω. Συνοπτικά, η δύναμη πίεσης στην πίσω κάθετη επιφάνεια μειώνεται αισθητά από τα 21.75 N της απλής περίπτωσης στα 16.33 N με $U_{jet} = U_{\infty}$. Αν και η δύναμη πίεσης στην επικλινή επιφάνεια αυξάνεται, από 25.56 N σε 27.37 N, δεν είναι ικανή για εμποδίσει το έργο του συστήματος έγχυσης στο να μειώσει τον ολικό συντελεστή οπισθέλκουσας σε $C_{D,total} = 0.348$.

3.2.5 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 50 m/s

Ανατρέχοντας στα προηγούμενα σχήματα, γίνονται ξεκάθαρες οι επιπτώσεις που έχει η μονή έγχυση ρευστού με σταθερή ταχύτητα και ρυθμό. Όσο αυξάνεται η ένταση της έγχυσης, η ανακυκλοφορία της ροής στον ομόρου σπάει σε επιμέρους μικρότερες δίνες. Αυτές οι δίνες είναι μικρότερης έντασης και φυσικά διαχέονται γρηγορότερα από τις αρχικές που είναι μεγαλύτερες και πιο ισχυρές. Δεν είναι λάθος να υποθέσουμε ότι και σε

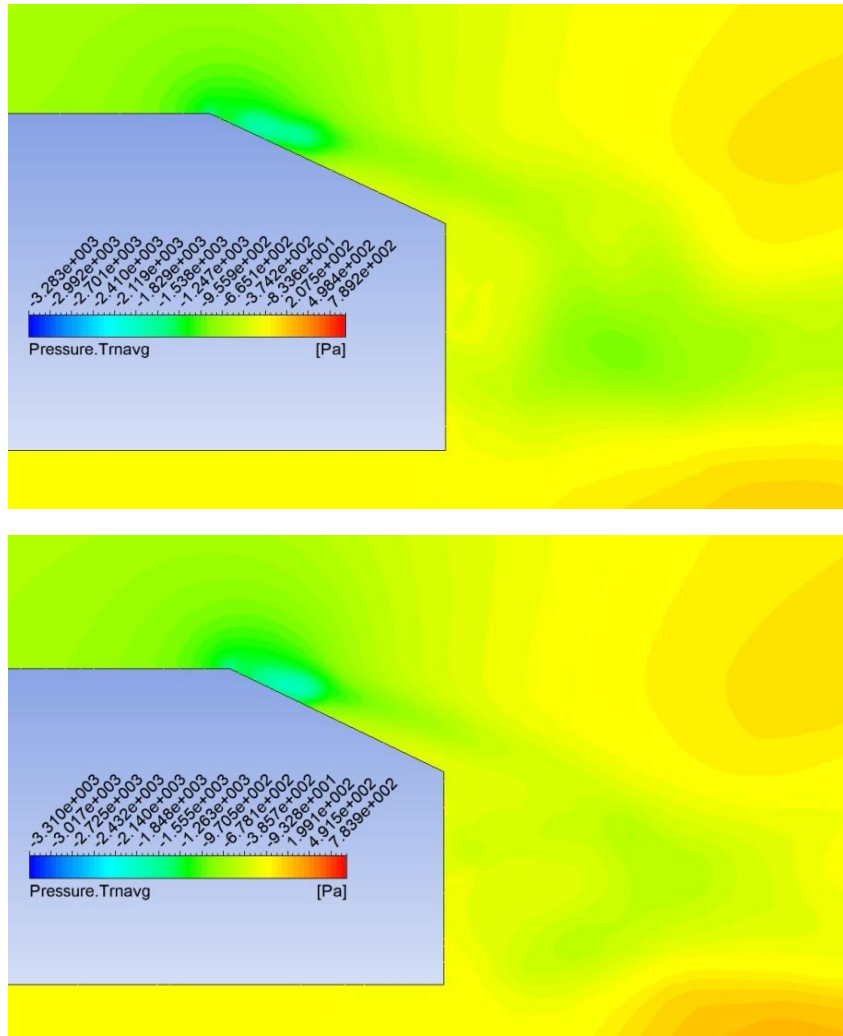
ταχύτητα $U_{jet} = 1.25 \cdot U_{\infty}$, το φαινόμενο αυτό θα γίνει πιο έντονο. Απόδειξη αποτελεί το σχήμα 41.



Σχήμα 41: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s (πάνω εικόνα) και 50 m/s (κάτω εικόνα).

Η δέσμη αέρα που εξέρχεται από το σώμα, είναι αρκετά δυνατή ώστε καταφέρνει να διαχωρίσει τη δίνη σε μικρότερες, σχετικά με τη μελέτη όπου $U_{jet} = U_{\infty}$. Γίνεται ξεκάθαρο πως η ισχύς της ανακυκλοφορίας του ομόρου, είναι τόσο μεγάλη που απαιτούνται πολύ υψηλές ταχύτητες έγχυσης για την διάσπασή του. Στο σχήμα 41 απεικονίζεται το πεδίο πίεσης συγκριτικά με εκείνο όπου $U_{jet} = U_{\infty}$. Το εύρος τιμών πίεσης που επικρατεί στην επικλινή επιφάνεια είναι σχεδόν όμοιο για τις δύο μελέτες. Αντίθετα, η αντίστοιχη περιοχή του ομόρου φαίνεται να αλλοιώνεται και ταυτόχρονα ένα μέρος αυτής να απομακρύνεται από το σώμα. Αναλύοντας τις πιέσεις στις αντίστοιχες δυνάμεις (πίνακας 14) για τις δύο περιπτώσεις προκύπτει πως εν τέλει δεν παρατηρείται αισθητή μείωση του C_D . Και αυτό

διότι η μείωση στη δύναμη πίεσης από τον ομόρου αντισταθμίζεται από την αύξηση της αντίστοιχης στην υπό κλίση επιφάνεια.



Σχήμα 42: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s (πάνω εικόνα) και 50 m/s (κάτω εικόνα).

Πίνακας 14: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s και 50 m/s.

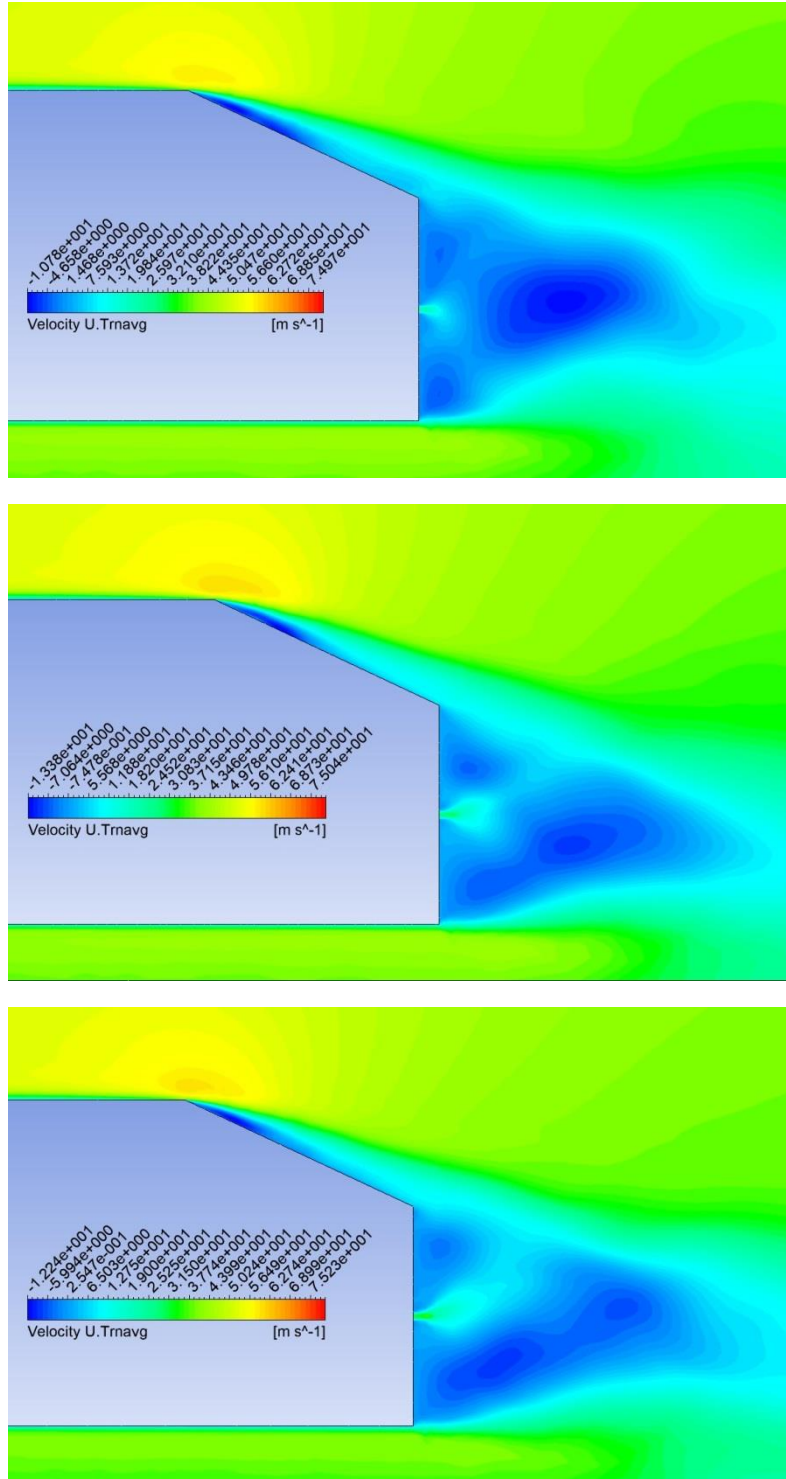
Μελέτες Όχημα	Μονή Έγχυση $U_{jet} = U_{\infty}$		Μονή Έγχυση $U_{jet} = 1.25 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.473	0	0.491
Κάτω μέρος	0	1.086	0	1.036
Κυρτό μέρος	-8.428	0.763	-9.155	0.761
Πίσω επιφάνεια	16.326	0	15.527	0
Επικλινής επιφάνεια	27.369	-0.033	28.808	-0.038
Συνολική Δύναμη	35.267	2.289	35.180	2.250
C_D	0.327	0.021	0.326	0.021
$C_{D,total}$	0.348		0.347	

3.2.6 Μελέτη επίδρασης μονής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s

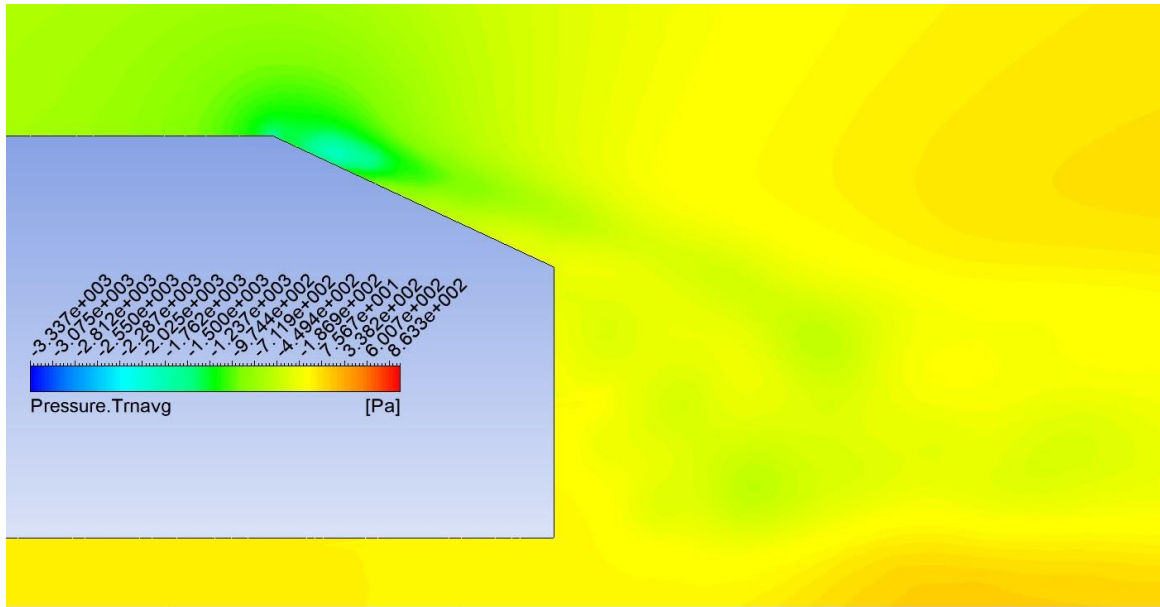
Στο σχήμα 43 απεικονίζεται ξεκάθαρα η διαδικασία της διάσπασης της δίνης στον ομόρου, με την αύξηση της ταχύτητας έγχυσης. Μόλις η ταχύτητα γίνει $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$, ο διαχωρισμός γίνεται ξεκάθαρος. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, στη ταχύτητα $U_{jet} = U_{\infty}$ υφίσταται ο διαχωρισμός σε τρεις δίνες. Δύο μικρές στο άνω και κάτω άκρο και μια μεγαλύτερη πιο μακριά της κάθετης επιφάνειας. Με την συνεχή αύξησή της, η μεγαλύτερη δίνη ‘καταστρέφεται’ περαιτέρω, καταλήγοντας στην τελευταία περίπτωση όπου φτάνει στη μικρότερη τιμή από όλες τις μελέτες. Αυτό σημαίνει πως δεν περιέχουν μεγάλη κινητική ενέργεια. Γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δύναμη αντίσταση και κατ’ επέκταση ο όρος C_D θα κυμαίνονται σε χαμηλές τιμές. Απόδειξη για την πίεση αποτελεί το σχήμα 44 που απεικονίζει το μέσο πεδίο πίεσης για την τελευταία ταχύτητα που εξετάστηκε.

Γίνεται γρήγορα αντιληπτό πως η περιοχή πίσω από το όχημα αυξάνεται σε πίεση φέρνοντας τις δύο περιοχές σε κάποια υποτυπώδη ισορροπία στην πίεση που ασκείται. Πιο συγκεκριμένα, η ελάχιστη πίεση που ασκείται πίσω από το σώμα έχει $\bar{P}_{min, single, 60 \text{ m/s}} = -569.63 \text{ Pa}$. Αξίζει να αναφερθεί πως οι συντεταγμένες του σημείου σε μέτρα είναι (0.0020, 0.2359). Με αντικατάσταση στο σχήμα, είναι ελάχιστα πάνω από το άνω άκρο της κάθετης επιφάνειας, που σημαίνει ότι οφείλεται από τις εκλυόμενες δίνες της επικλινής επιφάνειας. Εξαιτίας της υψηλής ενέργειας του συστήματος ελέγχου μόνο αυτού του είδους οι δίνες προκαλούν το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης πίεσης. Οι τιμές για τις μελέτες με $U_{jet} = U_{\infty}$ και $U_{jet} = 1.25 \cdot U_{\infty}$ είναι $\bar{P}_{min, single, 40 \text{ m/s}} = -870.81 \text{ Pa}$ και $\bar{P}_{min, single, 50 \text{ m/s}} = -588.36 \text{ Pa}$ αντίστοιχα.

Στον πίνακα 15 αναγράφονται συγκεντρωτικά οι δυνάμεις που ενεργούν πάνω στο σώμα για τις περιπτώσεις $U_{jet} = 1.25 \cdot U_{\infty}$ και $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$. Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα αλλά παρατηρώντας και τις εικόνες, η ανακυκλοφορία στην υπό κλίση επιφάνεια παραμένει ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Όσον αφορά τον ομόρου, επιβεβαιώνεται για μια ακόμη φορά πως αυτή η μεταβολή διαφοροποιεί αισθητά το πεδίο, παρ' όλο που ο ρυθμός αύξησης είναι ίδιος καθ' όλη τη μελέτη μονής έγχυσης. Τελικά, η μεγαλύτερη ταχύτητα είναι ικανή να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τον ολικό συντελεστή οπισθέλκουσας, βοηθώντας στη μειωμένη κατανάλωση καυσίμων.



Σχήμα 43: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 40 m/s (πρώτη εικόνα), 50 m/s (μεσαία εικόνα) και 60 m/s (τελευταία εικόνα).



Σχήμα 44: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μονής έγχυσης ρευστού παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με ταχύτητα 60 m/s.

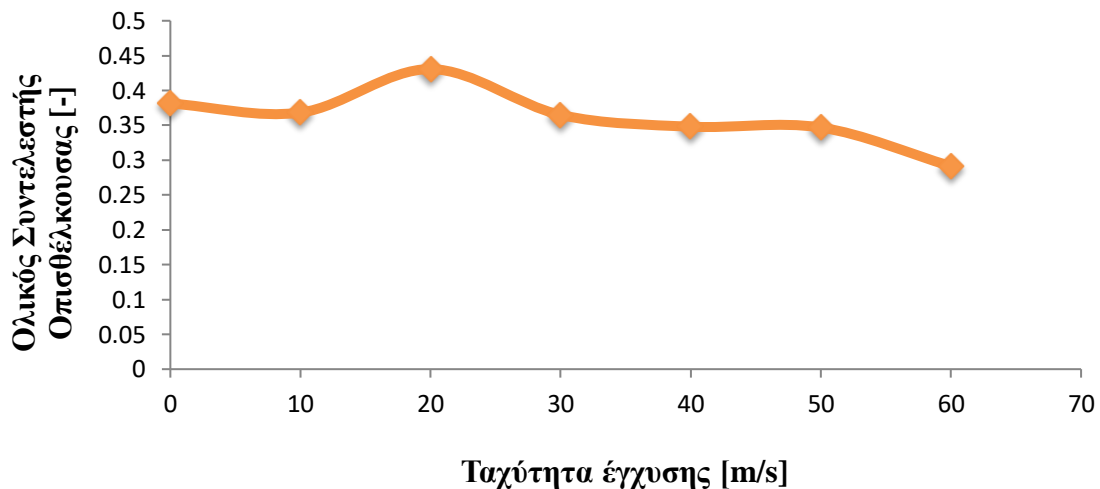
Πίνακας 15: Οι οπισθέλκουσες πιέσεις και τριβής στη περίπτωση μονής έγχυσης με ταχύτητα 50 m/s και 60 m/s.

Όχημα \ Μελέτες	Μονή Έγχυση $U_{jet} = 1.25 \cdot U_{\infty}$		Μονή Έγχυση $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.491	0	0.488
Κάτω μέρος	0	1.036	0	0.975
Κυρτό μέρος	-9.155	0.761	-9.976	0.75
Πίσω επιφάνεια	15.527	0	10.403	0
Επικλινή επιφάνεια	28.808	-0.038	28.83	-0.035
Συνολική Δύναμη	35.180	2.250	29.259	2.18
C_D	0.326	0.021	0.271	0.020
$C_{D,total}$	0.347		0.291	

3.2.7 Ενεργειακή μελέτη μονής έγχυσης ρευστού

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι επιπτώσεις πάνω στο πεδίο ροής που έχει κάθε ταχύτητα έγχυσης στην περίπτωση μονής έγχυσης αέρα. Το θεωρητικό σύστημα που εγκαθίσταται είχε ως στόχο τη διάσπαση της ανακυκλοφορίας στον ομόρου του οχήματος. Αποτέλεσμα της διάσπασης είναι να εξισορροπηθεί η πίεση ανάμεσα στο εμπρός και πίσω μέρος, ώστε να μειωθεί ο ολικός συντελεστής οπισθέλκουσας. Καταγράφοντας τις τιμές για την εκάστοτε ανάλυση (διάγραμμα 1), προκύπτει μια ενδιαφέρουσα συνάρτηση μεταξύ του C_D και της ταχύτητας έγχυσης που απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ενώ θα περίμενε κανείς ότι θα σημειωνόταν συνεχής πτώση στη τιμή του συντελεστή, παρατηρείται αύξηση αυτού ανάμεσα στις πρώτες δύο ταχύτητες. Έπειτα, έχει συνεχώς πτωτική πορεία με την κλίση της ευθείας να είναι μεγαλύτερη ανάμεσα στις δύο μεγαλύτερες ταχύτητες.

Διάγραμμα 1: Η συσχέτιση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας με την ταχύτητα έγχυσης στη περίπτωση μονού jet.



Η τελική επιλογή για τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος ελέγχου ροής, δε μπορεί να γίνει με γνώμονα μόνο την τιμή του C_D . Πρέπει ο εκάστοτε μηχανικός να λάβει υπόψη του την ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία του συστήματος. Πέρα της αντίστασης του αέρα, το όχημα καλείται να υπερνικήσει και την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των εγχυτήρων. Έτσι, η συνολική ενέργεια (E_{total}) που καλείται να καλύψει το όχημα προκύπτει από τη σχέση 8.

$$E_{total} = E_{Drag} + E_{Jet} \quad [W] \quad (8)$$

Όπου: E_{Drag} [W]: η ενέργεια που ξοδεύεται για να υπερνικηθεί η αντίσταση του αέρα (σχέση 9)

E_{Jet} [W]: η ενέργεια που ξοδεύεται για την λειτουργία του συστήματος έγχυσης (σχέση 10)

$$E_{Drag} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{\infty}^3 \cdot C_D \cdot A \quad [\text{W}] \quad (9)$$

Όπου: $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του αέρα στους 20°C

$U_{\infty} = 40 \text{ m/s}$: η εισερχόμενη στο πεδίο μελέτης ταχύτητα του αέρα

$C_D [-]$: ο ολικός συντελεστής οπισθέλκουσας

$A [\text{m}^2]$: η μετωπική επιφάνεια του οχήματος στη διεύθυνση του αέρα., που ορίζεται ως το γινόμενο του ύψους επί το μήκος (0.288×0.389)

$$E_{Jet} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{jet}^3 \cdot A_{jet} \right) / \eta_{jet} \quad [\text{W}] \quad (10)$$

Όπου: $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$: η πυκνότητα του αέρα στους 20°C

$U_{\infty} = 40 \text{ m/s}$: η ταχύτητα έγχυσης του ρευστού

$A_{jet} [\text{m}^2]$: η μετωπική επιφάνεια της οπής στη διεύθυνση του αέρα., που ορίζεται ως το γινόμενο του ύψους του ανοίγματος επί το μήκος (0.003×0.389)

$\eta_{jet} = 0.89 [-]$: ο βαθμός απόδοσης ενός μέσου συμπίεστη

Πίνακας 16: Η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα σε κάθε περίπτωση μονής έγχυσης.

Ενέργεια U_{jet}	$E_{Drag} [\text{W}]$	$E_{Jet} [\text{W}]$	$E_{total} [\text{W}]$	$\frac{E_{total,case} - E_{total,0}}{E_{total,0}} [\%]$
0	1645.83	0	1645.83	0
$0.25 \cdot U_{\infty}$	1589.29	0.79	1590.08	-3.39
$0.5 \cdot U_{\infty}$	1858.63	6.31	1864.94	13.31
$0.75 \cdot U_{\infty}$	1575.04	21.31	1596.36	-3.01
U_{∞}	1502.10	50.52	1552.62	-5.66
$1.25 \cdot U_{\infty}$	1496.92	98.67	1595.59	-3.05
$1.5 \cdot U_{\infty}$	1257.36	170.50	1427.86	-13.24

Αντικαθιστώντας τις τιμές του συντελεστή από το διάγραμμα 1 στις σχέσεις 8, 9 και 10 προκύπτουν οι ενέργειες του πίνακα 16. Σε όλες τις μελέτες ταχύτητας η μεταβολή της συνολικής ενέργειας συμβαδίζει με εκείνη του συντελεστή. Πέρα από την περίπτωση όπου $U_{jet} = 20 \text{ m/s}$, όλες οι άλλες επιφέρουν μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Ένας άλλος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στη τιμή της ενέργειας είναι η ταχύτητα έγχυσης. Μεταξύ των περιπτώσεων όπου η μείωση του συντελεστή είναι ελάχιστη, όπως για παράδειγμα όταν $U_{jet} = 40 \text{ m/s}$ και $U_{jet} = 50 \text{ m/s}$, τότε αύξηση της U_{jet} επιφέρει και αύξηση της δαπανούμενης ενέργειας. Αν η τεχνογνωσία και το κόστος κατασκευής ενός

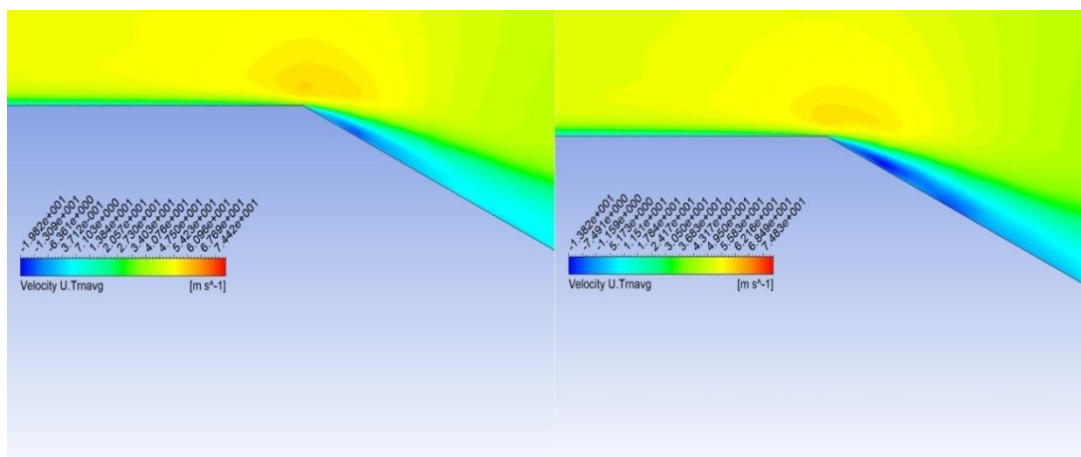
τέτοιου συστήματος το επιτρέπουν, τότε πρέπει να εγκατασταθεί σύστημα με την τελευταία ταχύτητα έγχυσης. Αποτελεί την καλύτερη λύση στο συνεχή αγώνα για μείωση στην κατανάλωση καυσίμου.

3.3 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού

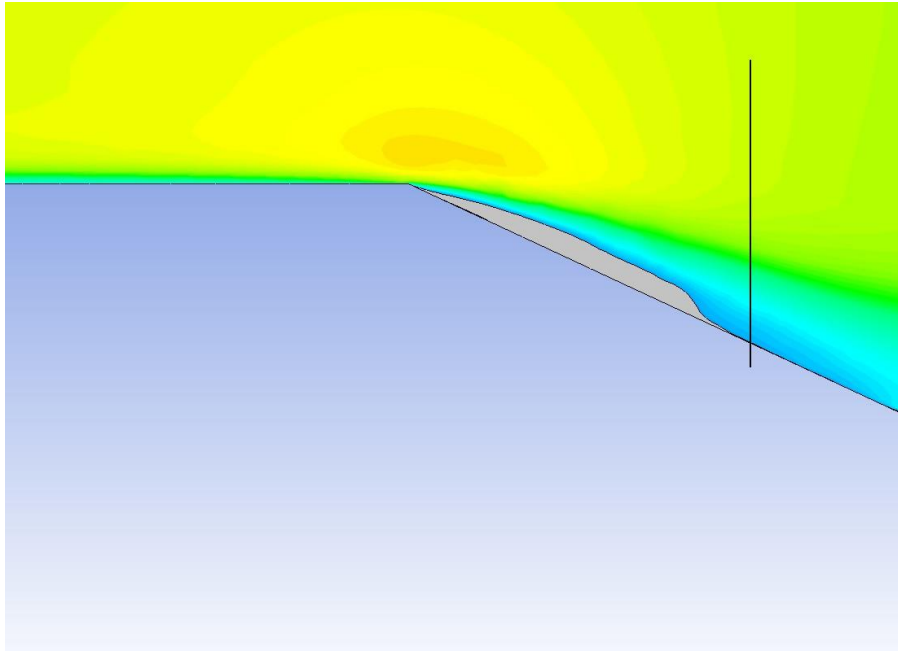
Η δεύτερη περίπτωση έγχυσης αέρα που δοκιμάστηκε, είναι το διπλό jet στο άνω και κάτω άκρο της πίσω κάθετης επιφάνειας. Η κατεύθυνση της έγχυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 10 (αριστερή εικόνα), με ταχύτητες (U_{jet}) 20 40 και 60 m/s, οι οποίες είναι σταθερές σε όλη τη διάρκεια υπολογισμού. Οι παράμετροι που θα καθορίσουν εάν αυτός ο τρόπος έγχυσης αέρα εξομαλύνει τις επιπτώσεις των δινών, είναι παρόμοιοι με την προηγούμενη περίπτωση. Θα εξεταστεί το πεδίο ροής στην υπό κλίση επιφάνεια, στην πίσω κάθετη επιφάνεια και φυσικά η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας στις διάφορες ταχύτητες. Τέλος θα γίνει υπολογισμός στην ενέργεια που απαιτείται να καταναλωθεί για τη λειτουργία των δύο jet.

3.3.1 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s

Η δίνη στην επικλινή επιφάνεια παραμένει, μιας και το σύστημα έγχυσης δεν έχει σκοπό να επηρεάσει άμεσα αυτή την περιοχή. Παρόλα αυτά, επειδή η άνω οπή είναι στο τέλος αυτής της γραμμής επιδρά στο μέγεθός της, συγκριτικά με την περίπτωση μη ύπαρξης της οπής. Το σχήμα 45 αποδεικνύει τον παραπάνω συλλογισμό. Γίνεται ξεκάθαρο πως είναι πιο έντονη με τη χρήση της διπλής έγχυσης, μιας και οι ταχύτητες που υπολογίζονται είναι μικρότερες από την περίπτωση μη ελέγχου ροής. Επιπλέον γίνεται ξεκάθαρο πως το μέγεθος της ανακυκλοφορίας είναι μεγαλύτερο στην κάτω εικόνα. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναλύθηκε παραπάνω, το σημείο όπου τελειώνει συμβαίνει στη θέση 8 ($x_8 = -103$ mm), ενώ η διπλή έγχυση καθυστερεί την επανακόλληση μέχρι το σημείο 10 όπου $x_{10} = -0.063$ mm (σχήμα 46).



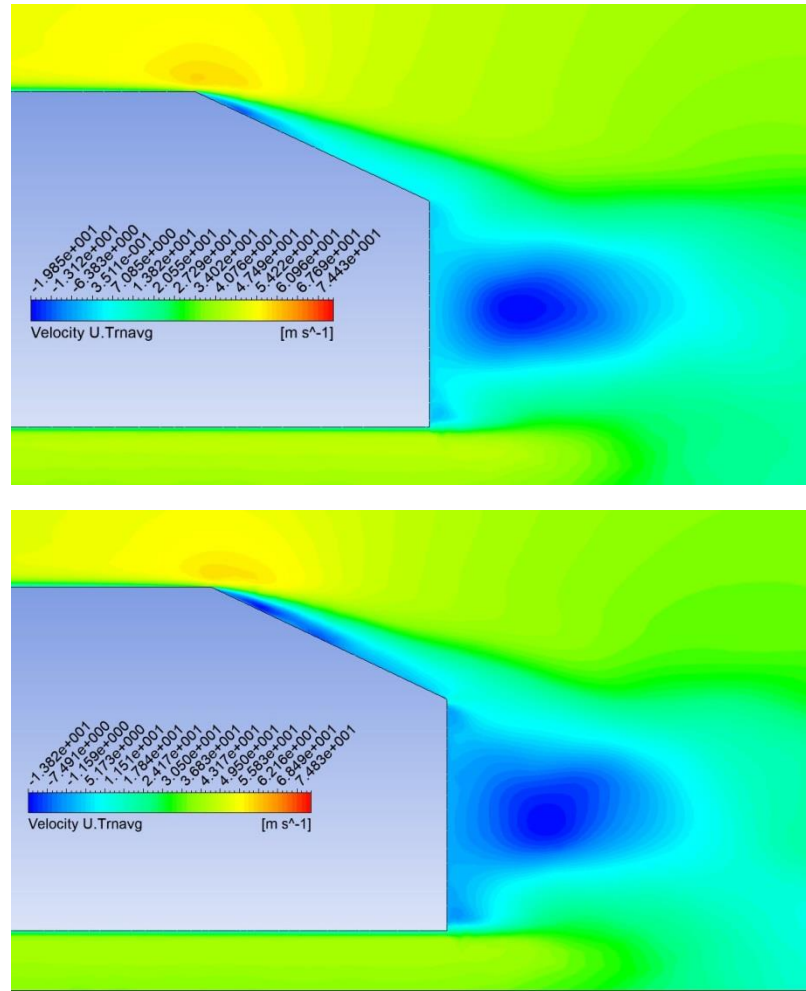
Σχήμα 45: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (αριστερά) και για διπλή έγχυση με ταχύτητα 20 m/s (δεξιά).



Σχήμα 46: Το σημείο επανακόλλησης τη ροής στην υπό κλίση επιφάνεια στο $x_{10} = -0.063 \text{ mm}$. Η σκιασμένη περιοχή ορίζει τα σημεία όπου $\bar{U} \leq 0$.

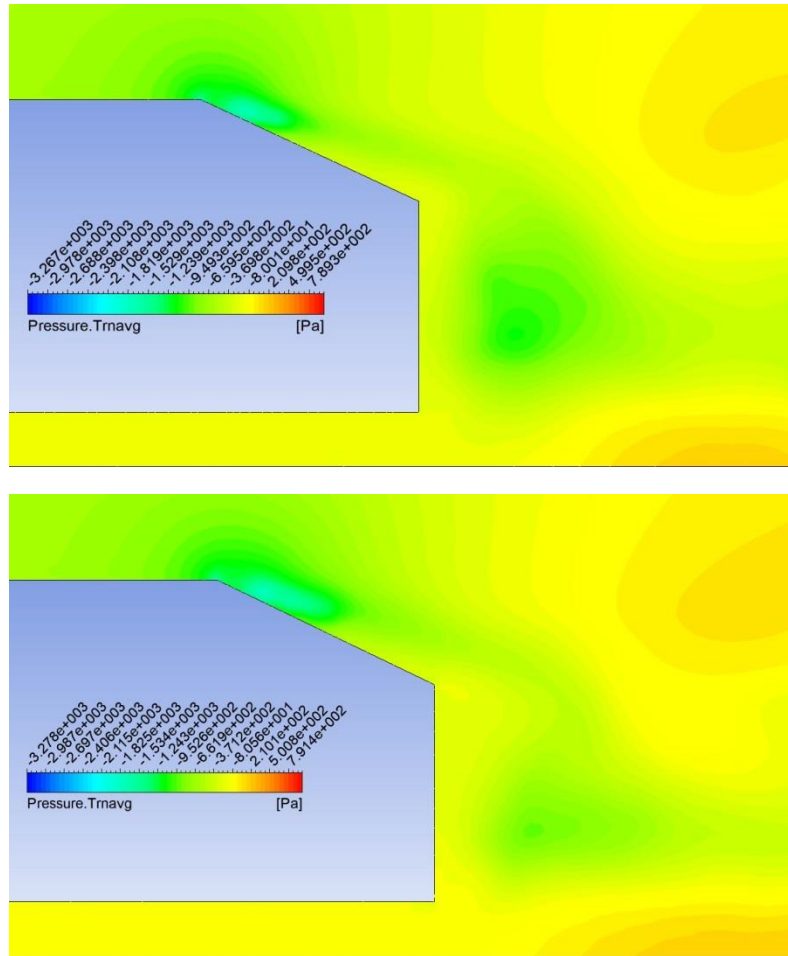
Μελετώντας την εξέλιξη του πεδίου ροής, παρατηρείται στο τέλος της επικλινής επιφάνειας και στο τέλος του κάτω μέρους του οχήματος, εκλύονται δίνες που οφείλονται στο φαινόμενο von Karman. Αυτή η μορφή ροής επιβεβαιώνεται από πληθώρα εργασιών, με εκείνη των Zhang (2015) να την αποδίδει με περισσότερη λεπτομέρεια. Μάλιστα αυτές οι δύο δίνες εναλλάσσονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Η γωνία φ είναι αυτή που θα καθορίσει το μέγεθος και την ενέργεια των δύο δινών. Η διάταξη των δυο εγχυτήρων έχει ως στόχο να προσδώσει ενέργεια στις δύο αυτές δίνες, ελαττώνοντας το μέγεθος τους. Το γεγονός όμως ότι η άνω οπή βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο σχηματισμού της άνω δίνης, οδηγεί στη παραμόρφωση με τον οποίο δημιουργείται και αλληλεπίδραση με τη ροή πάνω ακριβώς από την υπό κλίση επιφάνεια. Έτσι αυτή η αλληλεπίδραση οδηγεί στην καθυστέρηση της επανακόλλησης της ροής, κάτι που επηρεάζει τη δύναμη λόγω πίεσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια.

Μεγαλύτερη επιρροή όμως της έγχυσης εντοπίζεται στην πίσω κάθετη επιφάνεια. Όπως αναγράφεται προηγουμένως, ο σκοπός που εγκαταστάθηκαν σε αυτά τα σημεία είναι η προσπάθεια μείωσης της περιοχής ανακυκλοφορίας και κατ' επέκταση της δύναμης που αναπτύσσεται στη περιοχή του ομόρου. Στο σχήμα 47 παρουσιάζεται ο ομόρου για την περίπτωση ύπαρξης και μη έγχυσης ρευστού. Παρατηρώντας ενδελεχώς τις δύο εικόνες μπορούν να εντοπιστούν δύο μεγάλες διαφορές. Αρχικά, φαίνεται πως η περιοχή σκιασμένη με έντονο μπλε χρώμα είναι μικρότερη σε έκταση από την αρχική περίπτωση μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, από τον πίνακα 6 η τιμή στον άξονα x όπου τελειώνει η περιοχή ανακυκλοφορίας είναι $x_{\text{no,jet}} = 0.1962 \text{ m}$, ενώ στην άλλη περίπτωση $x_{\text{double,20 m/s}} = 0.1710 \text{ m}$.



Σχήμα 47: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με ταχύτητα 20 m/s (δεύτερη εικόνα).

Η δεύτερη διαφορά μπορεί να γίνει περισσότερο αντιληπτή στο σχήμα 48 και στα πεδία μέσης πίεσης. Γίνεται ξεκάθαρο ότι η περιοχή χαμηλών μέσων πιέσεων του απλού σώματος είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από εκείνη με τη διπλή έγχυση ρευστού. Εξάγοντας το αρχείο με όλες τις τιμές του πεδίου και μελετώντας τα σημεία μετά το τέλος του σώματος, είμαστε σε θέση να εξάγουμε τη μέγιστη μέση πίεση για τις δύο περιπτώσεις. Έτσι η ελάχιστη τιμή μέσης πίεσης στον ομόρου για τις δύο μελέτες είναι $\bar{P}_{\min, \text{no, jet}} = -1108.14 \text{ Pa}$ και $\bar{P}_{\min, \text{double, 20 m/s}} = -896.52 \text{ Pa}$. Το γεγονός ότι το πεδίο πίεσης μπροστά από το σώμα παραμένει αμετάβλητο, αυτό σημαίνει πως οδηγούμαστε σε εξισορρόπηση πίεσης μεταξύ εμπρός και πίσω μέρος οχήματος. Συνεπώς, η οπισθέλκουσα λόγω πίεσης, θα μειωθεί. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι δυνάμεις και οπισθέλκουσες για τη μελέτη διπλής έγχυσης αέρα με $U_{\text{jet}} = 0.5 \cdot U_{\infty}$, σε σχέση με την αρχική μελέτη.



Σχήμα 48: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου, για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (επάνω εικόνα) και για διπλή έγχυση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή (κάτω εικόνα).

Πίνακας 17: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s .

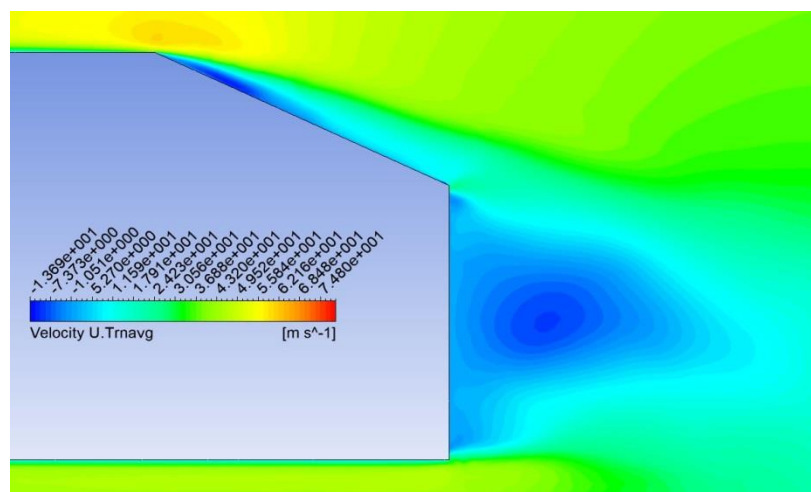
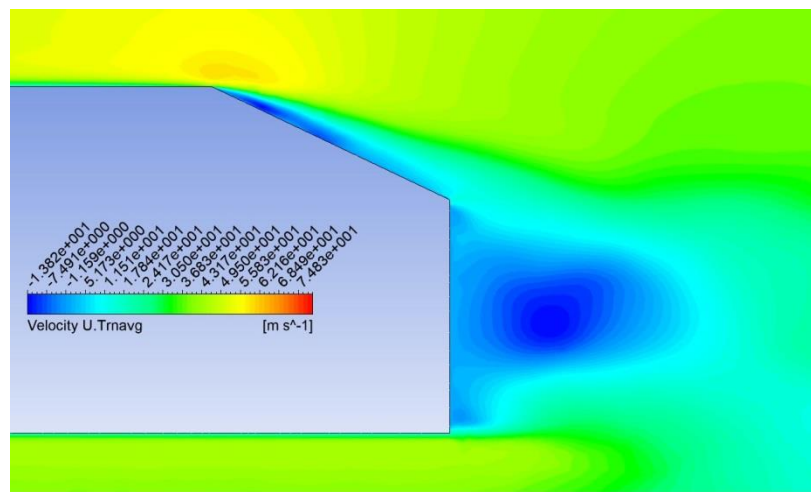
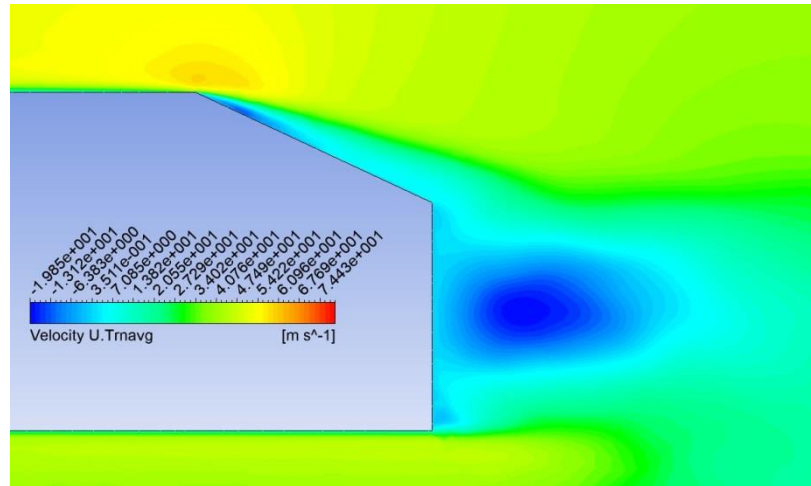
Μελέτες Όχημα	Αρχική Μελέτη		Διπλή Έγχυση $U_{jet} = 0.5 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.483
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.125
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.402	0.77
Πίσω επιφανεια	21.745	0	15.55	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	29.68	-0.049
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	36.827	2.328
C_D	0.360	0.022	0.341	0.022
$C_{D,total}$	0.381		0.363	

Παρατηρώντας τους δύο πίνακες που παρουσιάζουν τις δυνάμεις πίεσης και τριβής γίνεται πλήρως φανερό η επιρροή του ελέγχου ροής και σε ποια σημεία. Η μεγάλη αλλαγή που αναλύθηκε προηγουμένως για τον ομόρου, αποτυπώνεται στην μεγάλη μεταβολή της δύναμης πίεσης. Λόγω της χρήσης των οπών, καταφέραμε να μειώσουμε την δύναμη που επιδρά πάνω στην επιφάνεια κατά 7 N . Αλλαγή που αντισταθμίζεται, ως ένα σημείο, από την αύξηση της ανακυκλοφορίας στην υπό κλίση επιφάνεια. Αυτός είναι και ο λόγος που η μείωση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας δεν είναι ο αναμενόμενος. Για την αρχική μελέτη ισχύει ότι $C_{D,\text{no, jet}} = 0.381$, ενώ για την περίπτωση που περιγράφηκε παραπάνω $C_{D,\text{jet}} = 0.363$.

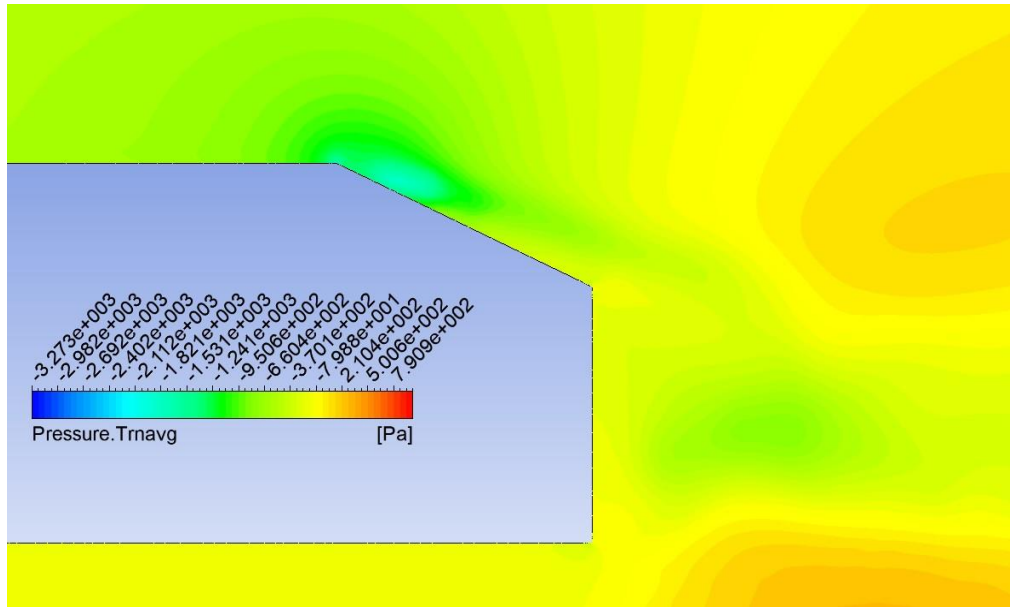
3.3.2 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s

Οι παράμετροι που εξετάζονται για σταθερή ταχύτητα έγχυσης αέρα με $U_{\text{jet}} = U_{\infty}$ είναι όμοιοι με την προηγούμενη ενότητα. Στο σχήμα 49 απεικονίζεται η περιοχή ανακυκλοφορίας στο πίσω μέρος του οχήματος, στην αρχική μελέτη και στην περίπτωση έγχυσης. Όπως και στην περίπτωση όπου η ταχύτητα των jet στα 20 m/s , έτσι και εδώ, η ανακυκλοφορία στην υπό κλίση επιφάνεια επηρεάζεται από την έγχυση. Μάλιστα παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο μεγέθυνσης της ανακυκλοφορίας, τόσο στο μέγεθος όσο και στην ένταση. Ενώ θα περιμέναμε η μετάβαση από την μια ταχύτητα έγχυσης στην άλλη να κάνει πιο έντονο το φαινόμενο, φαίνεται πως συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Είναι ευδιάκριτο ότι το μέγεθος της ανακυκλοφορίας μικραίνει σε μέγεθος και μάλιστα είναι σχεδόν ομοιόμορφο με εκείνο της αρχικής μελέτης (πρώτη εικόνα του σχήματος 38).

Κομβική αλλαγή συντελείται στο ομόρου του οχήματος, η ανακυκλοφορία του οποίου φαίνεται να υποχωρεί αισθητά. Από το εύρος και μόνο των τιμών μέσα στη μπλε σκιασμένη περιοχή, καταλαβαίνει κανείς ότι η ταχύτητες είναι πολύ μικρότερες. Επιπλέον, το τελευταίο σημείο της ανακυκλοφορίας μετατοπίζεται πιο κοντά στο σώμα και η τετμημένη του είναι $x_{\text{double},40 \text{ m/s}} = 0.1474 \text{ m}$. Μείωση της ταχύτητας συνεπάγεται με αύξηση της πίεσης, εξισορροπώντας ως ένα σημείο τη διαφορά πίεσης με το εμπρός τμήμα. Εξάγοντας τις τιμές της πίεσης στην περιοχή του ομόρου, η υπολογιστική διαδικασία επιβεβαιώνει τη παραπάνω συλλογιστική καθώς η ελάχιστη πίεση αντιστοιχεί σε $\bar{P}_{\text{min, double},40 \text{ m/s}} = -774.24 \text{ Pa}$. Πιο ενδελεχής εικόνα για το πεδίο μέσης πίεσης δίνει το σχήμα 50. Η πίεση στον ομόρου δεν διαφέρει πάρα πολύ από την πρώτη περίπτωση διπλού ελέγχου της ροής. Μελετώντας και τις τιμές των δυνάμεων από τους πίνακες 17 και 18, δε προκύπτει καμία εξωφρενική διαφορά από τις δύο ταχύτητες στον έλεγχο ροής. Οι τελικές τιμές του συντελεστή οπισθέλκουσας (προκύπτει από το άθροισμα των συντελεστών πίεσης και τριβής) είναι $C_{D,\text{double},40 \text{ m/s}} = 0.362$.



Σχήμα 49: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (πρώτη εικόνα), για διπλή έγχυση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με σταθερή ταχύτητα 20 m/s (μεσαία εικόνα) και 40 m/s (τελευταία εικόνα).



Σχήμα 50: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου με την χρήση διπλής έγχυσης παράλληλα στην εισερχόμενη ροή με σταθερή ταχύτητα 40 m/s

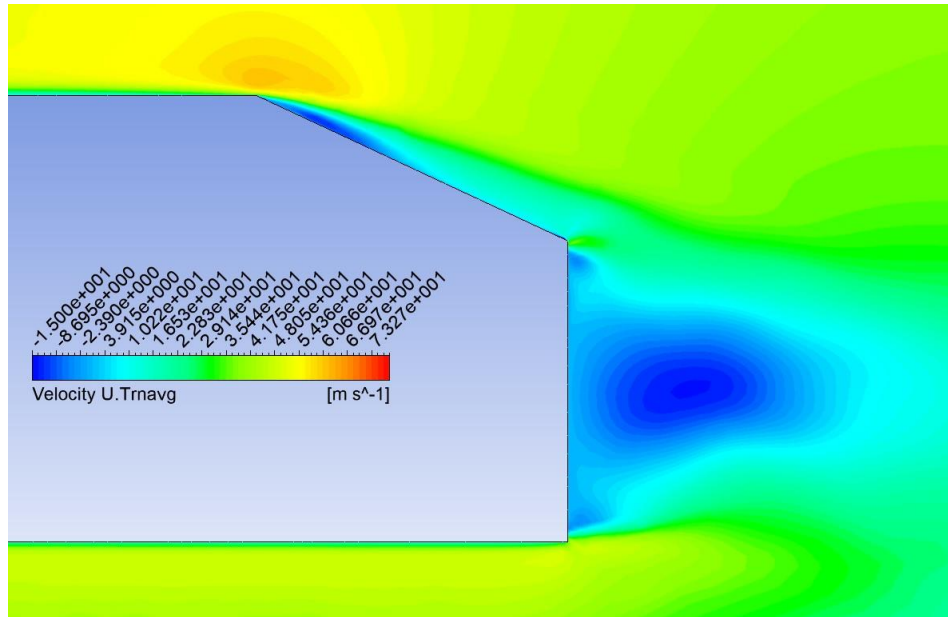
Πίνακας 18: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s .

Όχημα \ Μελέτες	Αρχική Μελέτη		Διπλή Έγχυση $U_{jet} = U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.491
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.144
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.59	0.775
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	15.502	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	29.751	-0.057
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	36.664	2.351
C_D	0.360	0.022	0.340	0.022
$C_{D,total}$	0.381		0.362	

3.3.3 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s

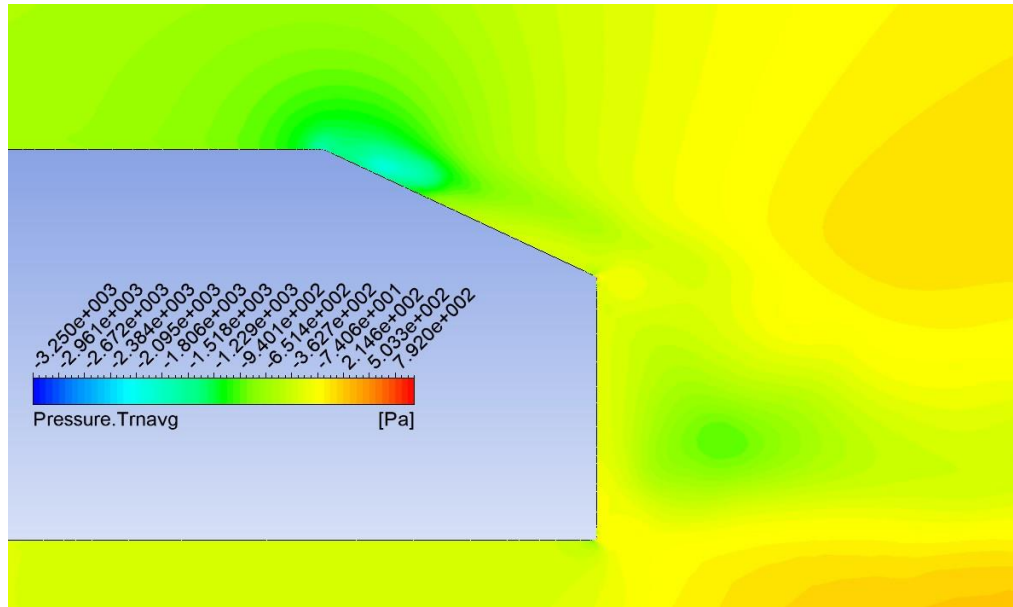
Τελευταία μελέτη με αυτή τη διάταξη είναι η έγχυση αέρα με ταχύτητα $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$. Στην εικόνα 51 απεικονίζεται το πεδίο της \bar{U} . Η κλίμακα με το εύρος των τιμών μεταβλήθηκε, προκειμένου ο αναγνώστης να μπορέσει να συγκρίνει καλύτερα τα πεδία από τις διάφορες περιπτώσεις. Σύμφωνα με το πρόγραμμα εξαγωγής των αποτελεσμάτων, οι χαμηλότερη ταχύτητα που καταγράφεται είναι -24.4087 m/s. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι τιμές της \bar{U} με αυτές συνθήκες έγχυσης είναι χαμηλότερες από εκείνες των άλλων

δύο περιπτώσεων. Φαίνεται μάλιστα πως η ταχύτητα στην υπό κλίση επιφάνεια και στο κέντρο δίνης του ομόρου είναι αισθητά μικρότερες. Αυτό αποτελεί μια πρώτη ένδειξη πως ίσως η αύξηση της ταχύτητας έγχυσης να μην συντελεί προς όφελος της μείωσης του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας. Όσον αφορά το μέγεθος των δύο ανακυκλοφοριών, δεν παρατηρείται αισθητή αλλαγή με την περίπτωση έγχυσης στα 40 m/s. Το τελικό της ανακυκλοφορίας στον ομόρου είναι σε απόσταση από το όχημα $x_{\text{double},60 \text{ m/s}} = 0.1566 \text{ m}$, ενώ η πλήρης επανακόλληση της ροής στην υπό κλίση επιφάνεια γίνεται στο σημείο $x_8 = -0.103 \text{ m}$.



Σχήμα 51: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση διπλής έγχυσης με σταθερή ταχύτητα 60 m/s.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το πεδίο μέσης πίεσης με το εύρος των τιμών αυτή τη φορά να μην έχει τροποποιηθεί. Μπορεί κανείς να αντιληφθεί πως η μέση πίεση στην υπό κλίση επιφάνεια και στον ομόρου είναι μικρότερη από τις άλλες δύο μελέτες. Ακόμα και από την περίπτωση μη ελέγχου της ροής. Στον ομόρου η μικρότερη μέση πίεση που καταγράφεται είναι $\bar{P}_{\text{min},\text{double},60 \text{ m/s}} = -940.22 \text{ Pa}$. Αυτό σημαίνει πως η διαφορά μεταξύ του εμπρός και πίσω μέρους του οχήματος μεταβάλλεται εις βάρος της μείωσης του συντελεστή οπισθέλκουσας. Πράγματι, βλέποντας τις τιμές του πίνακα των δυνάμεων, ο συνολικός συντελεστής οπισθέλκουσας αυξάνεται. Η τελική τιμή του είναι $C_{D,\text{double},60 \text{ m/s}} = 0.386$. Φαίνεται λοιπόν πως σε αυτή τη ταχύτητα, το σύστημα ελέγχου ροής δεν λειτουργεί υπέρ της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου, που συνεπάγεται από τη μείωση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας.



Σχήμα 52: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου όπως διαμορφώνεται από τη διπλή σταθερή έγχυση αέρα με 60 m/s.

Πίνακας 19: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s.

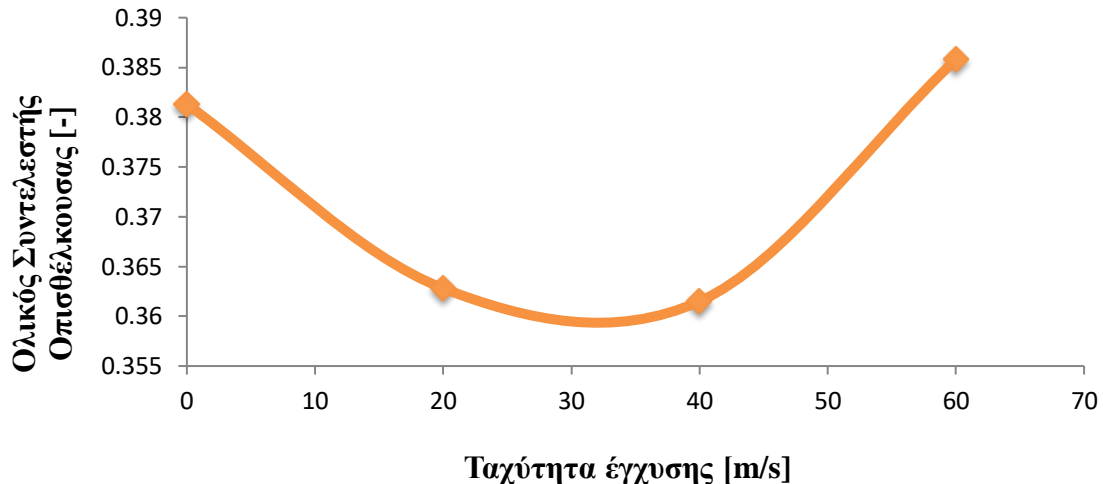
Όχημα \ Μελέτες	Αρχική Μελέτη		Διπλή Έγχυση $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.512
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.249
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.779	0.789
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	18.138	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	29.793	-0.066
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	39.153	2.484
C_D	0.360	0.022	0.363	0.023
$C_{D,total}$	0.381		0.386	

3.3.4 Ενεργειακή μελέτη διπλής έγχυσης ρευστού

Η αποτύπωση της μεταβολής του συντελεστή οπισθέλκουσας στη μελέτη διπλής έγχυσης με κατεύθυνση παράλληλα με τη ροή (διάγραμμα 2), παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Σε περίπτωση μονής έγχυσης και για $U_{jet} > 0.5 \cdot U_{\infty}$, ο ολικός συντελεστής οπισθέλκουσας παρουσιάζει πτωτική πτώση. Με την τελευταία ταχύτητα να ορίζει την μικρότερη τιμή του. Στη διπλή πρόσδοση ενέργειας, ο C_D ελαχιστοποιείται περίπου σε $U_{jet} = 35$ m/s, με μικρότερη τιμή από την αντίστοιχη του μονού jet. Η περαιτέρω αύξησής της δε βοηθά

καθόλου τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής. Φαίνεται μάλιστα πως με ταχύτητα $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$ η αεροδυναμική ικανότητα του οχήματος χάνεται, μιας και η αντίσταση του αέρα είναι μεγαλύτερη από εκείνη χωρίς το σύστημα ελέγχου. Παρ' όλα αυτά, πραγματοποιήθηκε ενεργειακή μελέτη και σε αυτή τη διάταξη (πίνακας 20). Οι εξισώσεις είναι όμοιες όπως και προηγουμένως, με τη μόνη διαφορά ότι η ενέργεια του jet πολλαπλασιάζεται επί δυο.

Διάγραμμα 2: Η συσχέτιση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας με την ταχύτητα έγχυσης στη περίπτωση διπλού jet.



Πίνακας 20: Η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα σε κάθε περίπτωση διπλής έγχυσης

Ενέργεια U_{jet}	E_{Drag} [W]	E_{Jet} [W]	E_{total} [W]	$\frac{E_{total,case} - E_{total,0}}{E_{total,0}}$ [%]
0	1645.83	0	1645.83	0
$0.5 \cdot U_{\infty}$	1565.98	12.63	1578.61	-4.08
U_{∞}	1560.37	101.04	1661.41	0.95
$1.5 \cdot U_{\infty}$	1665.26	341.01	2006.26	21.90

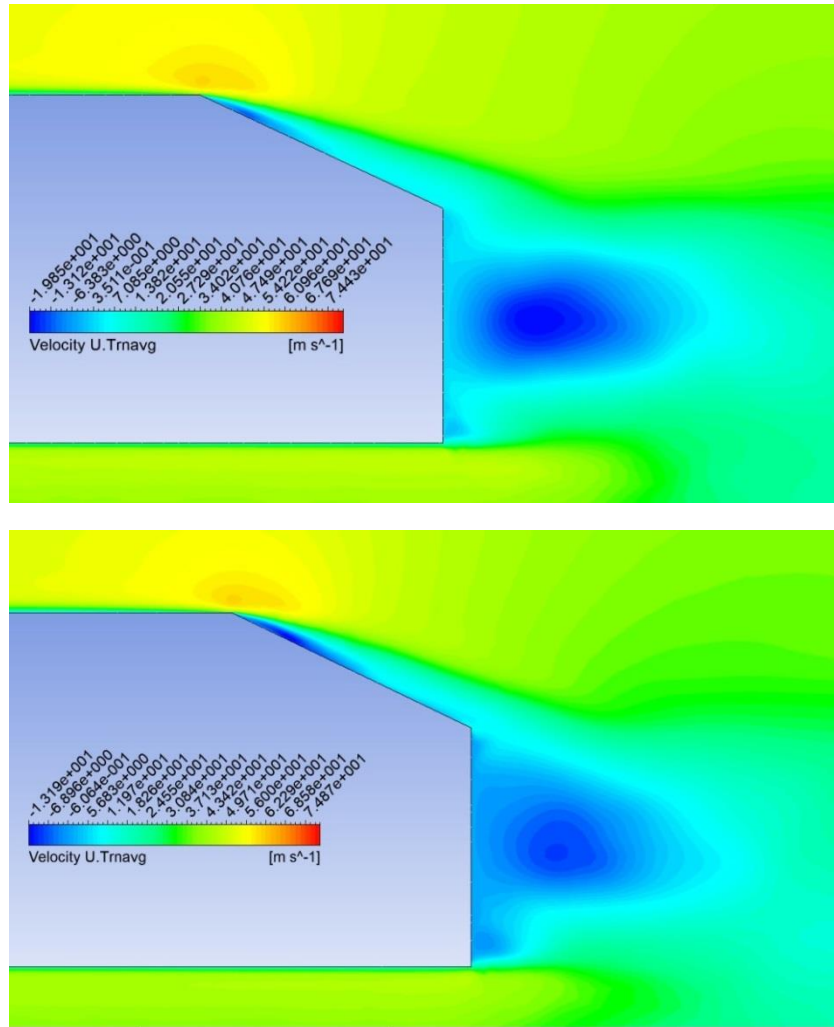
Αναλύοντας τα νούμερα από την τελευταία στήλη του πίνακα, μόνο στην περίπτωση της μικρότερης ταχύτητας η ενέργεια που χρειάζεται να δαπανηθεί είναι μικρότερη από την αρχική μελέτη. Σε ταχύτητα jet ίση με την ερχόμενη, μπορεί ο συντελεστής να μειώνεται αισθητά, όμως ενέργεια που χρειάζεται για να λειτουργήσει το σύστημά μας μεγαλώνει αισθητά και έτσι απαιτείται επιπλέον δαπάνη. Η διαφορά τους όμως δεν είναι αρκετά μεγάλη για μας αποτρέψει από την εγκατάσταση του συστήματος με αυτές τις συνθήκες. Η τελευταία μελέτη είναι πέρα για πέρα αποτρεπτική, διότι η επιπρόσθετη ενέργεια που πρέπει να δαπανηθεί είναι αισθητή, ενώ ταυτόχρονα δε προσφέρει τίποτα όσον αφορά την ελάττωση της αντίστασης του αέρα.

3.4 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με κλίση 45°

Η επίδραση που είχε η διάταξη της προηγούμενης παραγράφου πάνω στην αστάθεια του ομόρου, ήταν καίρια για την επίτευξη του στόχου που είναι η μείωση του C_D . Με εξαίρεση τη περίπτωση της σταθερής έγχυσης στα 60 m/s, οι δυνάμεις λόγω πίεσης στον ομόρου μειώνονται με αποτέλεσμα να μειώνεται και η δύναμη αντίστασης πάνω στο σώμα. Η μεταβολή του πεδίου ροής όμως δεν είναι αισθητή, καθώς το ρευστό αλληλεπιδρά με τις δίνες που εκλύονται στην αρχή του σχηματισμού τους. Θέλοντας οι εγχυτήρες να δρουν απευθείας στο κέντρο ανακυκλοφορίας και αφού έχει πλήρως σχηματιστεί, τροποποιήθηκε η κατεύθυνση του εξερχόμενου αέρα στις 45° προς το κέντρο της επιφάνειας. Η ταχύτητα εισέρχεται στο σύστημα καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης με τη τιμή της να παραμένει σταθερή και όμοια με τη προαναφερθείσα διπλή εισαγωγή αέρα.

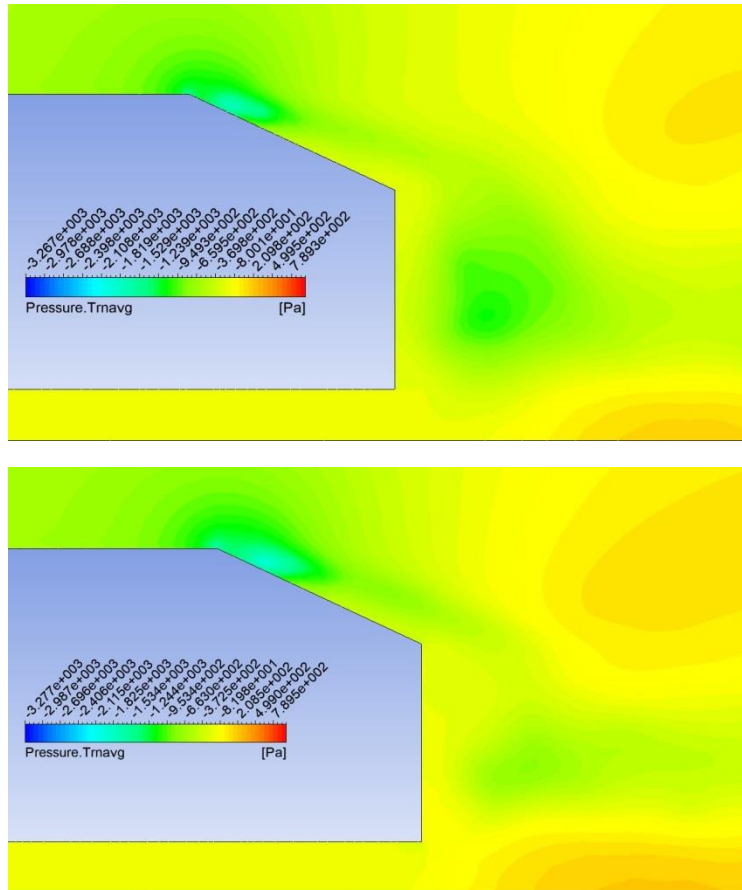
3.4.1 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s και κλίση 45°

Στο σχήμα 53 απεικονίζεται το πεδίο της μέσης ταχύτητας στη διεύθυνση x (\bar{U}), για την πρώτη ανάλυση χωρίς πρόσδοση ενέργειας και με την εγκατάσταση των jet, ταχύτητας $U_{jet} = 0.5 \cdot U_\infty$ αντίστοιχα. Η ανακυκλοφορία στην υπό κλίση επιφάνεια είναι σχεδόν όμοια στις δύο εικόνες, συγκριτικά με την παράλληλα στην εισερχόμενη ροή έγχυση, όπου η το μέγεθός της είναι σαφώς μεγαλύτερο (σχήμα 47). Φαίνεται όμως πως στην κάτω εικόνα αποσυντίθεται, γεγονός που προμηνύει μεγαλύτερη δύναμη που επιδρά πάνω της. Επικεντρώνοντας την πρόσδοση ενέργειας προς το κέντρο του ομόρου, παρατηρείται και αποδυνάμωση της ανακυκλοφορίας αλλά και σμίκρυνσή της. Το σημείο όπου ο όρος \bar{U} παίρνει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός είναι πιο κοντά στο σώμα σε σχέση με την παράλληλη ροή. Συγκεκριμένα, $x_{no,jet} = 0.1962$ m ενώ για την περίπτωση με κλίση έγχυσης είναι $x_{inclined,double,20\text{ m/s}} = 0.1408$ m.



Σχήμα 53: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με ταχύτητα 20 m/s και κλίση (δεύτερη εικόνα).

Στο σχήμα 54 απεικονίζονται τα αντίστοιχα πεδία πίεσης από το σχήμα 53. Μελετώντας το εύρος των τιμών στην κάτω εικόνα, παρατηρείται ότι η περιοχή μικρή πίεσης στον ομόρου ελαττώνεται πολύ σε μέγεθος. Αντίθετα, στην επικλινή επιφάνεια η περιοχή χαμηλής πίεσης μεγαλώνει περαιτέρω, με επιπτώσεις στη δύναμη πίεσης πάνω στην επιφάνεια. Με τη βοήθεια του Matlab εξάγεται ότι η μικρότερη τιμή της μέσης πίεσης στο ομόρου είναι $\bar{P}_{\min, \text{inclined, double, 20 m/s}} = -746 \text{ Pa}$. Η διαφορά από την τιμή στη περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής ορίζεται στα 362 Pa, ενώ στη μελέτη με παράλληλη έγχυση κυμαίνεται στα 124 Pa. Έτσι, συμπεραίνεται πως αυτή η διάταξη συμβάλει στη μείωση της δύναμης λόγω πίεσης συγκριτικά με το απλό όχημα, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει βελτίωση σε σύγκριση με την παράλληλα στη ροή πρόσδοση αέρα. Στον πίνακα 21 καταγράφονται οι δυνάμεις πίεσης και τριβής για τη διάταξη των εγχυτήρων με κλίση σε σχέση με το απλό όχημα.



Σχήμα 54: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (επάνω εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση 45° (κάτω εικόνα).

Πίνακας 21: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 20 m/s και κλίση.

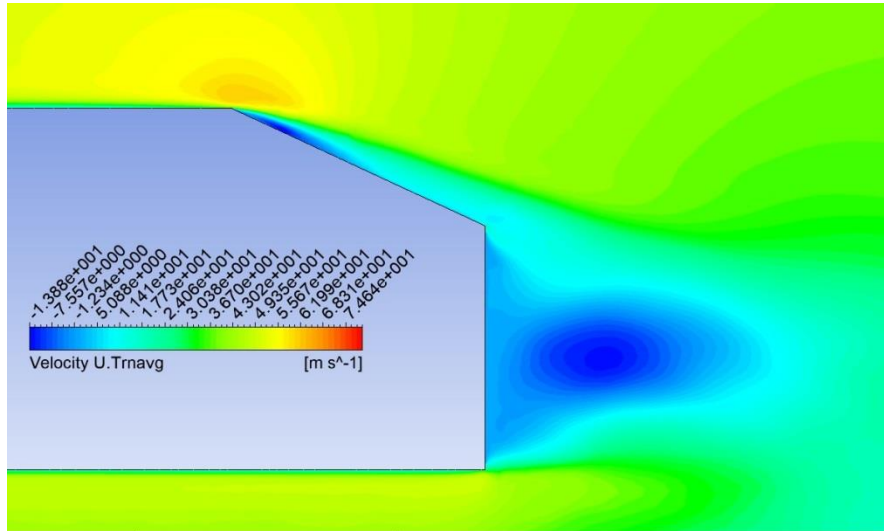
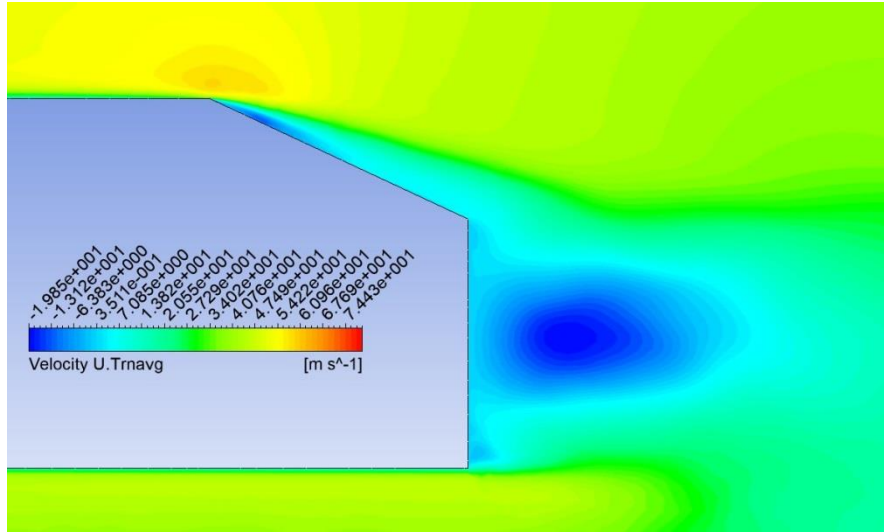
Όχημα \ Μελέτες	Αρχική Μελέτη		Διπλή Έγχυση $U_{jet} = 0.5 \cdot U_\infty$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.498
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.171
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-8.819	0.775
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	12.924	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	30.309	-0.033
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	34.414	2.411
C_D	0.360	0.022	0.319	0.022
$C_{D,total}$	0.381		0.341	

Η διαφορά της δύναμης λόγω πίεσης στην πίσω κάθετη επιφάνεια σημειώνει σημαντική πτώση, εάν σκεφτούμε πως τροποποιήσαμε μόνο την κλίση έγχυσης. Ταυτόχρονα με τη μείωση της δύναμης στην πίσω επιφάνεια, συμβαίνει και αύξηση στη δύναμη πάνω στην επικλινή επιφάνεια. Αυτή η εναλλαγή στις δυνάμεις έχει ως επακόλουθο ο συνολικός συντελεστής οπισθέλκουσας με τη νέα διάταξη, να μην σημειώνει σημαντική βελτίωση συγκριτικά με την απλή περίπτωση σώματος. Πιο συγκεκριμένα, από τον πίνακα προκύπτει ότι $C_{D,no,jet} = 0.381$ και $C_{D,inclined,double,20\text{ m/s}} = 0.341$. Σημειώθηκε ουσιαστικά μια διαφορά της τάξης του 10% , που όπως θα δούμε στη συνέχεια μπορεί να αυξηθεί.

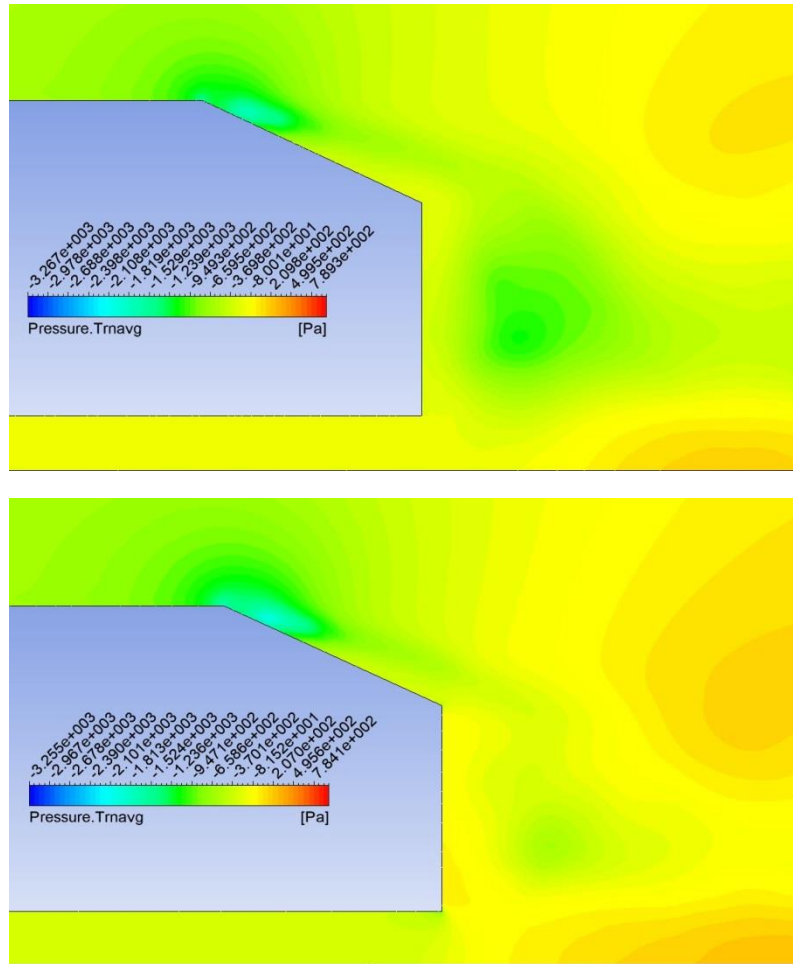
3.4.2 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s και κλίση 45°

Τα αποτελέσματα από την προαναφερθείσα ταχύτητα έγχυσης δείχνουν να είναι πολύ ενθαρρυντικά, μιας και η μείωση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνες των άλλων δυο διατάξεων. Στο σχήμα 55 παρουσιάζεται το πεδίο ροής της \bar{U} , με τη διάταξη διπλής έγχυσης με κλίση και σταθερή ταχύτητα $U_{jet} = U_{\infty}$. Αν και στη δεύτερη εικόνα γίνεται αντιληπτό ότι η περιοχή ανακυκλοφορίας τελειώνει περίπου στο ίδιο σημείο με την απλή περίπτωση οχήματος ($x_{inclined,double,40\text{ m/s}} = 0.1809\text{ m}$), το μέγεθος της ανακυκλοφορίας στον άξονα y είναι μικρότερο. Όπως και στην προηγούμενη μελέτη με μικρότερη ταχύτητα, έτσι και εδώ παρατηρείται να υπάρχει επίδραση στην περιοχή ανακυκλοφορίας στην υπό κλίση επιφάνεια. Θετικό δείγμα αποτελεί το γεγονός ότι το μέγεθός της δεν επηρεάζεται. Παρ' όλα αυτά όμως οι ταχύτητες μέσα σε αυτή είναι μικρότερες γεγονός που δηλώνει δυσμενέστερη κλίση πίεσης. Το πεδίο μέσης πίεσης (σχήμα 56) θα δώσει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για την επίδραση που έχει η αύξηση της ταχύτητας.

Παρατηρώντας το εύρος τιμών στις δύο εικόνες, η μέση πίεση στον ομόρου αυξάνεται. Η μικρότερη τιμή της μέσης πίεσης στον ομόρου είναι $\bar{P}_{min,inclined,double,40\text{ m/s}} = -592.49\text{ Pa}$, πολύ μεγαλύτερη τιμή από εκείνη χωρίς τα jet ($\bar{P}_{min,no,jet} = -1108.14\text{ Pa}$). Παράλληλα όμως υπάρχει μείωση στην περιοχή πάνω από την επικλινή επιφάνεια. Η επίδραση αυτής της διαφορά γίνεται ξεκάθαρη από τις δυνάμεις (πίνακας 22). Χάρης στη νέα διάταξη του συστήματος ελέγχου η δύναμη λόγω πίεσης στην πίσω κάθετη επιφάνεια μειώθηκε σχεδόν στο ένα τέταρτο. Αν και ταυτόχρονα αυξήθηκε η δύναμη πίεσης στην υπό κλίση επιφάνεια, η τόσο μεγάλη διαφορά στη δύναμη της πίσω επιφάνειας είναι φυσικό να οδηγήσει στην δραστική μείωση στον ολικό συντελεστή οπισθέλκουσας. Σύμφωνα με τον πίνακα η νέα τιμή του συντελεστή είναι $C_{D,inclined,double,40\text{ m/s}} = 0.247$.



Σχήμα 55: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση και ταχύτητα 40 m/s (δεύτερη εικόνα).



Σχήμα 56: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση μη ελέγχου ροής (επάνω εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση 45° (κάτω εικόνα).

Πίνακας 22: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 40 m/s και κλίση.

Όχημα \ Μελέτες	Αρχική Μελέτη		Διπλή Έγχυση $U_{jet} = U_\infty$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.511
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.287
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-9.744	0.791
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	4.614	0
Επικλινή επιφάνεια	25.560	-0.030	29.241	-0.021
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	24.112	2.568
C_D	0.360	0.022	0.223	0.024
$C_{D,total}$	0.381		0.247	

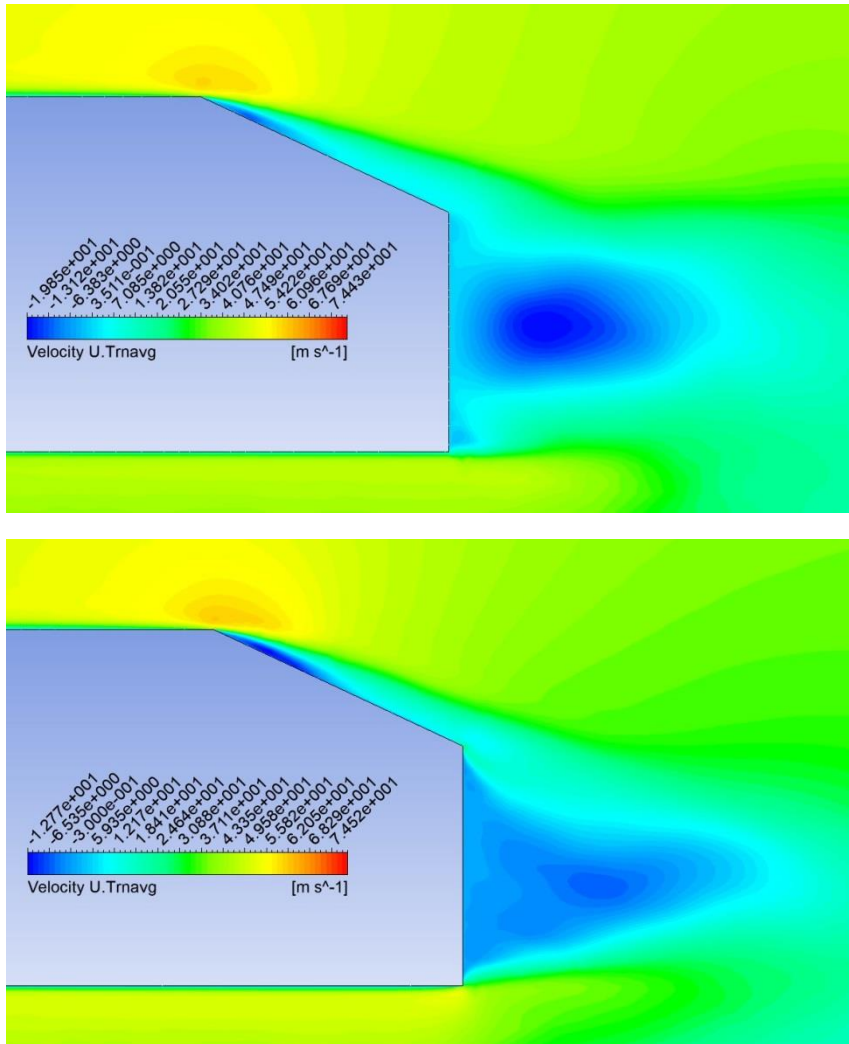
3.4.3 Μελέτη επίδρασης διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s και κλίση 45°

Γίνεται ξεκάθαρο πως προσδίδοντας κλίση στα δύο jet, η εξάλειψη της ανακυκλοφορίας στον ομόρου είναι σχεδόν σίγουρη, με την αύξηση βέβαια της ταχύτητας έγχυσης. Ο διπλασιασμός μάλιστα αυτής οδηγεί σε δραστικότερη μείωση του C_D , κάτι που δε συμβαίνει με την παράλληλα στη ροή πρόσδοση ενέργειας. Σε προηγούμενο κεφάλαιο η υπολογιστική διαδικασία έδειξε πως περαιτέρω αύξηση τη ταχύτητας έγχυσης όχι μόνο δε συμβάλει στη μείωση του συντελεστή, αντίθετα επιδεινώνει την αεροδυναμική ικανότητα του οχήματος. Στο σχήμα 57 αποδεικνύεται πως με $U_{jet} = 1.5 \cdot U_{\infty}$, η διάταξη υπό κλίση προσφέρει τεράστια βελτίωση του πεδίου ροής.

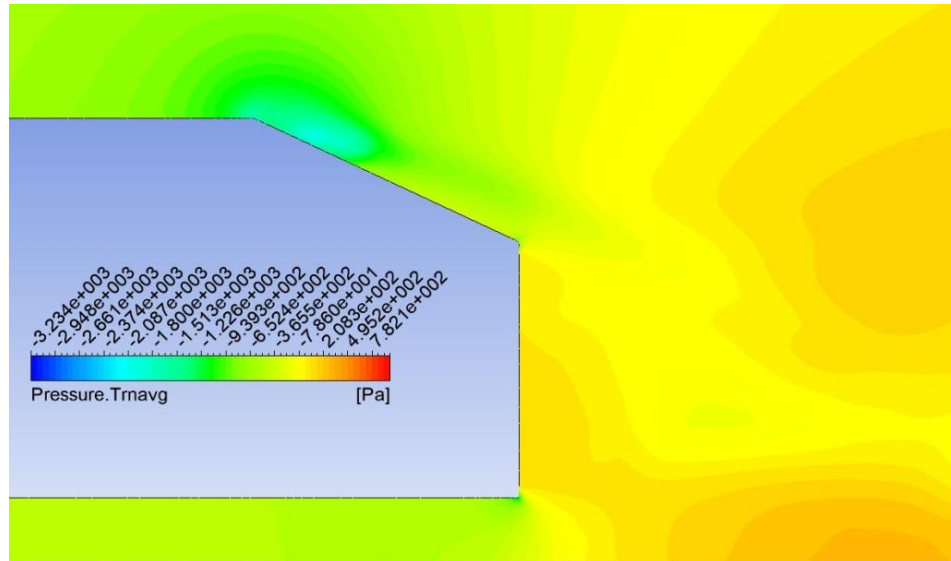
Οι τιμές της \bar{U} στη δεύτερη εικόνα είναι σαφέστατα μεγαλύτερες από εκείνη στην πρώτη. Ενώ το σημείο πέρα του οποίου η ταχύτητα παίρνει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός είναι σχεδόν όμοιο και για τις δύο περιπτώσεις ($x_{no,jet} = 0.1962 \text{ m}$, $x_{inclined,double,40 \text{ m/s}} = 0.1787 \text{ m}$ για τη περίπτωση χωρίς και με τα jet αντίστοιχα), το πάχος της ανακυκλοφορίας είναι εμφανώς πολύ μικρότερο του αρχικού. Συγκρίνοντας και τις προηγούμενες περιπτώσεις έγχυσης με κλίση συμπεραίνεται πως η δίνη στον ομόρου είναι αρκετά ισχυρή. Αν και όλες οι διατάξεις στοχεύουν στην εξάλειψη της ανακυκλοφορίας, εκείνη των 60 m/s είναι η μοναδική που μπόρεσε να εξουθενώσει αισθητά τις επιπτώσεις της πάνω στο σώμα. Άξιο αναφοράς είναι επίσης το γεγονός ότι από αυτή τη διάταξη επηρεάζεται αρνητικά και η ανακυκλοφορία στην επικλινή επιφάνεια. Παρ' όλο που η κλίση της έγχυσης είναι προς το κέντρο της πίσω κάθετης επιφάνειας, η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα επιδρά και σε αυτή την επιφάνεια.

Το σχήμα 58 είναι εκείνο που θα βοηθήσει να γίνει κατανοητή η επίδραση που έχει το σύστημα ελέγχου με αυτή την ισχύ. Η πίεση στο ξεκίνημα της υπό κλίση επιφάνειας είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη της απλής μελέτης. Αυτό προϋποθέτει την αυξημένη δύναμη λόγω πίεσης σε αυτή την επιφάνεια. Φαίνεται μάλιστα πως πρόκειται να είναι αρκετά αυξημένη, γεγονός που δεν συμβάλει θετικά στον απώτερο σκοπό της βελτίωσης ροής. Στον ομόρου όμως τα πράγματα είναι διαφορετικά. Η εικόνα του πεδίου μέσης πίεσης φανερώνει πως η πίεση πολύ κοντά στην επιφάνεια παίρνει θετικές τιμές. Η περιοχή πολύ χαμηλής πίεσης που υπάρχει στην περίπτωση μη ελέγχου της ροής, αλλά και στις υπόλοιπες διατάξεις έγχυσης αέρα, έχει εξαφανιστεί. Αυτό σημαίνει πως η δύναμη στην επιφάνεια έχει αλλάξει κατεύθυνση, αυτή τη φορά προς τις αρνητικές τιμές του x .

Ο πίνακας 23 επιβεβαιώνει την παραπάνω συλλογιστική. Η δύναμη πίεσης στην υπό κλίση επιφάνεια μεγαλώνει αισθητά. Το γεγονός ότι ο ολικός συντελεστής έχει τέτοια μείωση, οφείλεται αποκλειστικά στο γεγονός ότι η δύναμη στην πίσω κάθετη επιφάνεια παίρνει αρνητική τιμή. Αυτό σημαίνει πως η δίνη του ομόρου έχει σχεδόν εξαφανιστεί και πως η διαφορά στην πίεση και κατ' επέκταση η δύναμη αντίστασης, προκαλείται αποκλειστικά από την επικλινή επιφάνεια.



Σχήμα 57: Το πεδίο της \bar{U} στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου για την περίπτωση χωρίς έλεγχο της ροής (πρώτη εικόνα) και για διπλή έγχυση με κλίση και ταχύτητα 60 m/s (δεύτερη εικόνα).



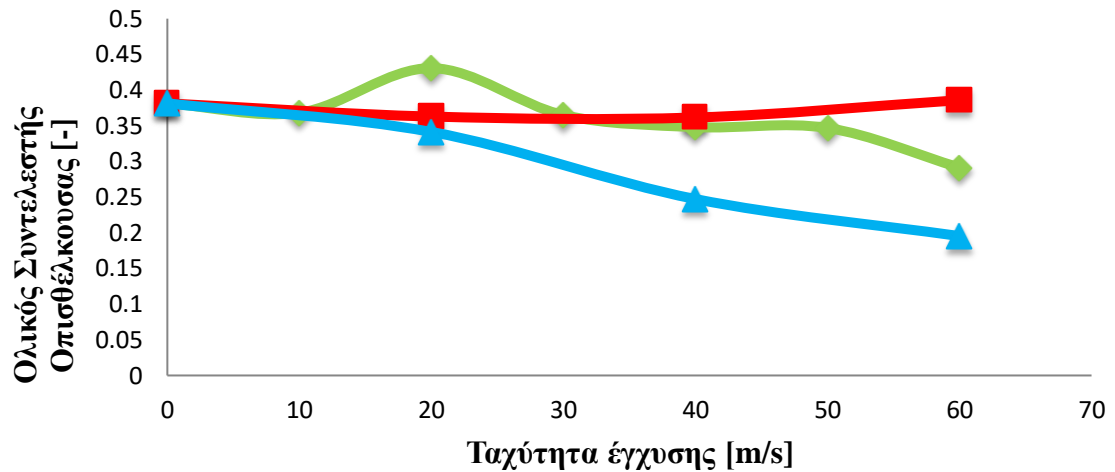
Σχήμα 58: Το πεδίο μέσης πίεσης στην επικλινή επιφάνεια και στον ομόρου μετά τη χρήση διπλής έγχυσης με κλίση 45° και ταχύτητα 60 m/s .

Πίνακας 23: Οι οπισθέλκουσες πίεσης και τριβής για τη περίπτωση διπλής έγχυσης ρευστού με ταχύτητα 60 m/s και κλίση.

Όχημα \ Μελέτες	Αρχική Μελέτη		Διπλή Έγχυση $U_{jet} = 1.5 \cdot U_\infty$	
	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]	$F_{D,pressure}$ [N]	$F_{D,friction}$ [N]
Οροφή	0	0.475	0	0.514
Κάτω μέρος	0	1.128	0	1.402
Κυρτό μέρος	-8.504	0.770	-10.54	0.807
Πίσω επιφάνεια	21.745	0	-3.163	0
Επικλινής επιφάνεια	25.560	-0.030	32.079	-0.017
Συνολική Δύναμη	38.802	2.344	18.378	2.706
C_D	0.360	0.022	0.170	0.025
$C_{D,total}$	0.381		0.195	

Στο διάγραμμα 3 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας για όλες τις περιπτώσεις έγχυσης. Η μονή έγχυση συμφέρει σε πολύ υψηλές ταχύτητες συγκριτικά με τη διπλή έγχυση, ενώ σε μικρές τιμές η διπλή εξυπηρετεί το σκοπό της μελέτης. Τέλος, γίνεται ξεκάθαρο πως η περίπτωση διπλής έγχυσης με κλίση έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατάξεις, ανεξαρτήτως της ταχύτητας. Προδίδοντας κλίση στους εγχυτήρες αποτελεί την καλύτερη λύση στο πρόβλημα της κατανάλωσης καυσίμου.

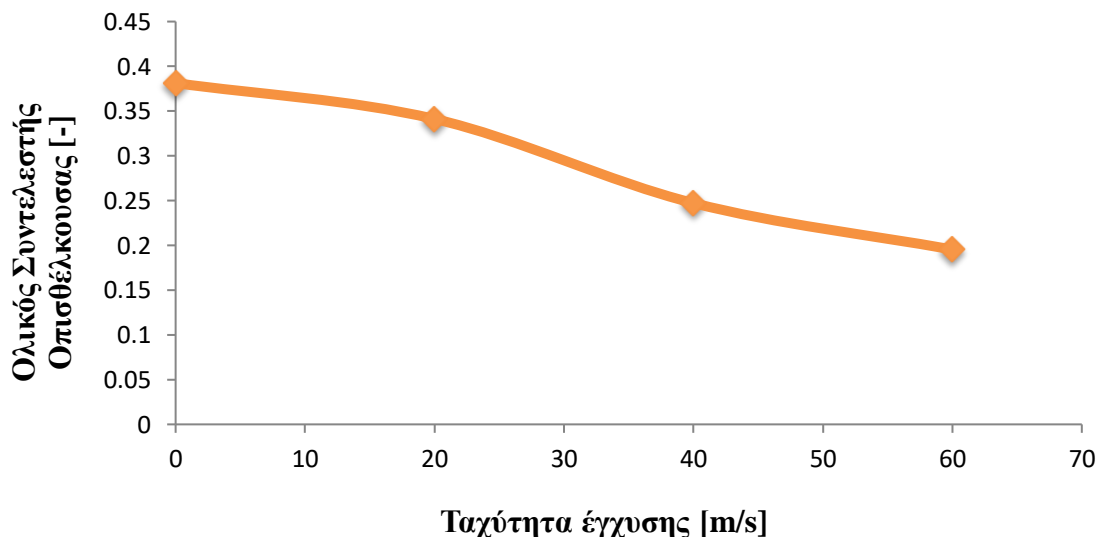
Διάγραμμα 3: Η μεταβολή του συνολικού συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της ταχύτητας έγχυσης για κάθε διάταξη. Με τη πράσινη γραμμή ορίζεται η μονή έγχυση, με κόκκινη η διπλή και με μπλε η διπλή με κλίση.



3.4.4 Ενεργειακή μελέτη διπλής έγχυσης ρευστού με κλίση 45°

Η συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ελέγχου αποτελεί την πιο ελπιδοφόρα για καλύτερα αποτελέσματα. Στο διάγραμμα 3 φαίνεται η πορεία που ακολουθεί ο ολικός συντελεστής με την αύξηση της ταχύτητας. Με αυτό τον τρόπο λειτουργίας, δεν υφίστανται αυξομειώσεις στη τιμή του C_D . Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι συγκριτικά για κάθε ταχύτητα έγχυσης, παρουσιάζουν την μικρότερη δυνατή τιμή του συντελεστή. Τέλος ο ρυθμός ελάττωσής του είναι μεγαλύτερος με την αύξηση της ταχύτητας.

Διάγραμμα 4: Η συσχέτιση του ολικού συντελεστή οπισθέλκουσας με την ταχύτητα έγχυσης στη περίπτωση διπλού jet με κλίση 45°.



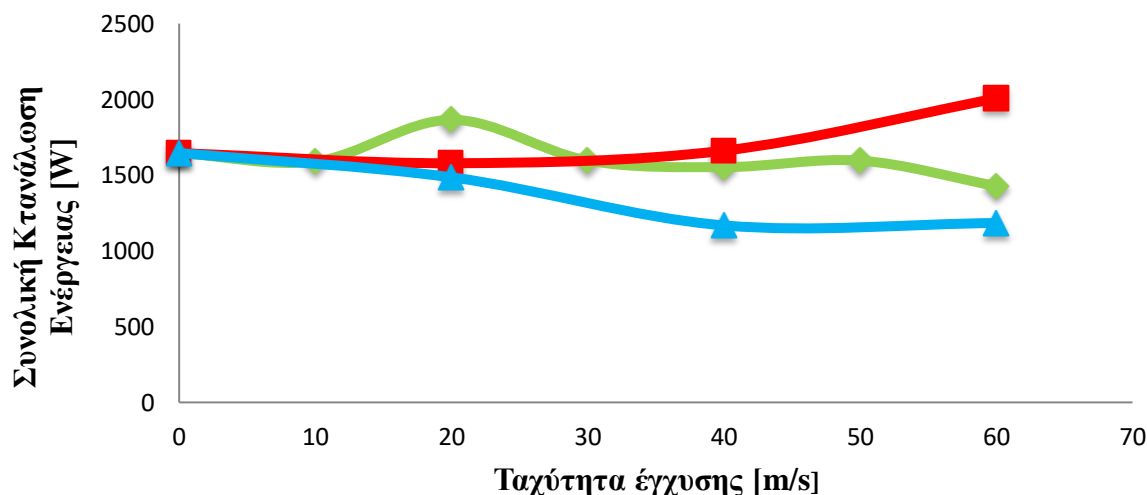
Τα αποτελέσματα από την ενεργειακή μελέτη είναι πολύ ενθαρρυντικά. Η ενέργεια που χρειάζεται να υπερνικήσει το όχημα είναι μικρότερη σε κάθε ταχύτητα. Μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται όταν $U_{jet} = 40$ m/s. Αυτό συμβαίνει γιατί τα 60 m/s είναι πολύ μεγάλη ταχύτητα και αντισταθμίζει την εξωφρενική πτώση του συντελεστή. Σε συνάρτηση με το πώς διαμορφώνεται το πεδίο και την ανάγκη για ενέργεια, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι και μικρότερες τιμές έγχυσης μπορούν να φέρουν όμοια αποτελέσματα. Δεν χρειάζεται έτσι να ξεφύγουμε σε υψηλές τιμές ταχύτητας έγχυσης.

Πίνακας 24: Η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα σε κάθε περίπτωση διπλής έγχυσης με κλίση.

Ενέργεια U_{jet}	E_{Drag} [W]	E_{Jet} [W]	E_{total} [W]	$\frac{E_{total,case} - E_{total,0}}{E_{total,0}}$ [%]
0	1645.83	0	1645.83	0
$0.5 \cdot U_{\infty}$	1472.75	12.63	1485.37	-9.75
U_{∞}	1067.01	101.04	1168.04	-29.03
$1.5 \cdot U_{\infty}$	842.99	341.01	1183.99	-28.06

Στο διάγραμμα 5 αποτυπώνεται η αλλαγή της συνολικής ενέργειας για όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις πρόσδεσης ενέργειας στο πεδίο. Είναι εμφανής η συσχέτιση που έχει ο συντελεστής οπισθέλκουσας με την συνολική ενέργεια. Από τη στιγμή που η διπλή έγχυση με κλίση, μειώνει σε μεγαλύτερο ποσοστό το C_D τότε και η ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα παρουσιάζει πτωτική τάση σε όλες τις ταχύτητες. Ακόμη μια παράμετρος που υποδηλώνει πως η τελευταία διάταξη πρέπει να προτιμηθεί από τις άλλες.

Διάγραμμα 5: Η μεταβολή της συνολικής ενέργειας συναρτήσει της ταχύτητας έγχυσης για κάθε διάταξη. Με τη πράσινη γραμμή ορίζεται η μονή έγχυση, με κόκκινη η διπλή και με μπλε η διπλή με κλίση.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογιστική μελέτη για την ροή αέρα γύρω από πρότυπο όχημα και έπειτα προτάθηκαν επεμβάσεις πάνω σε αυτό για την βελτίωση των αεροδυναμικών ιδιοτήτων του. Πρωταρχικό μέλημα ήταν, μέσω της μελέτης της βιβλιογραφίας να οριστούν οι υπολογιστικοί παράμετροι με του οποίου θα διεξαχθούν όλες οι μελέτες. Έτσι αποφασίστηκε οι αναλύσεις να γίνουν χρονικά εξαρτώμενες και σαν μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το IDDES SST k- ω . Επόμενο βήμα ήταν η προσομοίωση του οριακού στρώματος, με τη δημιουργία δομημένου πλέγματος γύρω από το όχημα, με τρία διαφορετικά ύψη. Αφού αποσπάστηκαν τα δεδομένα από τους υπολογισμούς, έγινε σύγκριση του καθενός πλέγματος μεταξύ τους και με τα πειραματικά δεδομένα των Lienhart et al. (2002). Οι παράμετροι στους οποίους δόθηκε σημασία είναι τα μεγέθη ανακυκλοφορίας της υπό κλίση επιφάνειας και του ομόρου, όπως επίσης και ο συντελεστής οπισθέλκουσας.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν, γίνεται ξεκάθαρη η επίδραση του δομημένου πλέγματος στο πεδίο ροής γύρω από το σώμα. Κάθε ένα από αυτά δίνει τη δική του εκδοχή στην ανακυκλοφορία στην επικλινή επιφάνεια, με το μικρό και το μεγάλο ύψος να συμφωνούν ως ένα σημείο στη μορφολογία. Το μεσαίο ύψος από την άλλη, παρουσιάζει αισθητές διαφορές συγκριτικά με τα άλλα δύο αλλά και με το πείραμα. Προβλέπει την σμίκρυνσή της στη διεύθυνση x , σε αντίθεση με τα άλλα δύο. Αν και όλα τα πλέγματα αδυνατούν να υπολογίσουν σωστά το πεδίο ταχύτητας στον ομόρου, το μικρότερο όλων είναι αυτό που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι πιο συμβατό. Τέλος, ο συντελεστής οπισθέλκουσας που υπολογίζεται αποκλίνει σε μεγάλο βαθμό από τον πραγματικό, αλλά το μικρότερο ύψος πλέγματος είναι πιο συμβατό.

Στη συνέχεια το επικρατέστερο πλέγμα χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της επίδρασης ενεργητικού ελέγχου ροής. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, εγκαθίσταται μια θεωρητική διάταξη η οποία προσδίδει ενέργεια στο πεδίο ροής, με την εισαγωγή κάποιου ρευστού

(συνήθως αέρα) σε κάποια ταχύτητα. Στην παρούσα εργασία, σχεδιάστηκαν πάνω στο όχημα οπές κατά μήκος όλου του σώματος, μέσω των οποίων εξέρχεται αέρας. Η πρώτη διάταξη αφορά την ύπαρξη μιας εξόδου, στο μέσο της πίσω κάθετης επιφάνειας με ταχύτητα έγχυσης 10 m/s έως 60 m/s αυξανόμενη κατά 10 με κατεύθυνση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή. Στη δεύτερη περίπτωση θεωρήσαμε δύο σειρές οπών, στο άνω και κάτω άκρο της κάθετης επιφάνειας με ταχύτητα 20, 40 και 60 m/s με κατεύθυνση παράλληλα στην εισερχόμενη ροή. Τέλος, η ίδια διάταξη διπλών οπών εξετάστηκε και για την περίπτωση εισαγωγής αέρα με κλίση 45° προς το κέντρο της επιφάνειας.

Η μονή έγχυση, αν και στοχεύει απευθείας την ανακυκλοφορία του ομόρου, δεν συμβάλει στη μεγάλη μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας για όλες τις ταχύτητες. Η μεγαλύτερη ταχύτητα έχει πιο αισθητή επίδραση στο συντελεστή με ποσοστό μείωση 23% , ενώ σε μικρότερες ταχύτητες παρατηρείται ακόμα και αύξηση. Η χρήση διπλών εγχυτήρων από την άλλη, πρέπει να προτιμηθεί σε χαμηλές ταχύτητες αν και η ελάττωση του συντελεστή είναι αμυδρή (4.8%). Προτιμότερη όλων είναι η διάταξη διπλή έγχυσης με κλίση, αφού βελτιώνει την αεροδυναμική του οχήματος ανεξάρτητα από τη ταχύτητα έγχυσης. Σε πολύ υψηλές συνθήκες λειτουργίας είναι ικανή να μειώσει τον συντελεστή κατά 49%. Η μεγάλη ελάττωση του συντελεστή επηρεάζει άμεσα και την ενέργεια που πρέπει να υπερνικήσει το όχημα για να κινηθεί. Στην έγχυση αέρα με κλίση και ταχύτητα 40 m/s παρατηρείται και η μεγαλύτερη ποσοστιαία πτώση της ενέργειας κατά 29%. Αυτός είναι άλλος ένας παράγοντας που καθιστά τη τελευταία περίπτωση έγχυσης καταλληλότερη από τις δύο προηγούμενες.

Η επιρροή που ασκείται από την τελευταία διάταξη, θα μπορούσε στο μέλλον να μελετηθεί και σε δυσμενέστερες γωνίες της υπό κλίσης επιφάνειας. Ενδιαφέρουσα θα ήταν η μελέτη της επίδρασης που θα έχει ένα σύστημα synthetic jet, παρουσιάζοντας μια πιο ολοκληρωμένη και εύκολα εφαρμόσιμη στην πραγματικότητα διάταξη ενεργητικού ελέγχου ροής. Μεγάλο ενδιαφέρον θα έχει να μελετηθεί το σύστημα αυτό και διαφορετικού τύπου οχήματα, όπως για παράδειγμα τα φορτηγά, καθώς υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην αγορά για περαιτέρω βελτίωση αυτού του τύπου επιβατικών οχημάτων. Με τη χρήση κατάλληλου υπολογιστή θα ήταν σκόπιμο να γίνει μελέτη ευαισθησίας όσον αφορά τον συνολικό αριθμό των στοιχείων του πλέγματος. Ακόμα, ο επανασχεδιασμός του συστήματος σε τρεις διαστάσεις θα μπορούσε να μας δώσει μια πληρέστερη εικόνα για την μορφολογία της ροής και πως επιδρούν πάνω της οι διάφορες διατάξεις ελέγχου ροής που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία. Σε συνδυασμό με την εφαρμογή σχετικής κίνησης στην οριακή συνθήκη του δρόμου, θα συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση της αλληλεπίδρασης εισερχόμενης ροής-οχήματος σε πραγματικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/840300>
- ANSYS Inc. (2010). ANSYS FLUENT User's Guide-13.2.1. In *ANSYS Inc* (Vol. 15317). Retrieved from <http://www.ansys.com>
- Ashton, N., West, A., Lardeau, S., & Revell, A. (2016). Assessment of RANS and DES methods for realistic automotive models. *Computers and Fluids*, *128*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.01.008>
- Aubrun, S., McNally, J., Alvi, F., & Kourta, A. (2011). Separation flow control on a generic ground vehicle using steady microjet arrays. *Experiments in Fluids*, *51*(5), 1177–1187. <https://doi.org/10.1007/s00348-011-1132-0>
- Bello-Millán, F. J., Mäkelä, T., Parras, L., del Pino, C., & Ferrera, C. (2016). Experimental study on Ahmed's body drag coefficient for different yaw angles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *157*, 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.08.005>
- Brunn, A., Wassen, E., Sperber, D., Nitsche, W., & Thiele, F. (2007). Active drag control for a generic car model. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, *95*, 247–259. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71439-2_15
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Drikakis, D., & Rider, W. (2005). High resolution methods for incompressible and low speed flows. In *Computational Fluid and Solid Mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Eichinger, S. (2012). *Active flow separation control of ground transportation vehicle configurations*. Technischen Universität Berlin.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. In *Springer-Verlag* (3rd ed., Vol. 91). Springer.
- Guilmineau, E., Deng, G. B., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M., & Wackers, J. (2016). Assessment of RANS and DES methods for the Ahmed body. *ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, *1*, 912–921. <https://doi.org/10.7712/100016.1860.10023>
- Konstantinidis, E. (2019). Active Control of Bluff-Body Flows Using Plasma Actuators. *Actuators*, *8*(3), 66. <https://doi.org/10.3390/act8030066>
- Lienhart, H., Stoots, C., & Becker, S. (2002). Flow and Turbulence Structures in the Wake

of a Simplified Car Model (Ahmed Modell). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*, pp. 323–330. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45466-3_39

Minguez, M., Pasquetti, R., & Serre, E. (2008). High-order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model. *Physics of Fluids*, 20(9). <https://doi.org/10.1063/1.2952595>

Serre, E., Minguez, M., Pasquetti, R., Guilmineau, E., Deng, G. B., Kornhaas, M., ... Rodi, W. (2013). On simulating the turbulent flow around the Ahmed body: A French-German collaborative evaluation of LES and DES. *Computers and Fluids*, 78, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.05.017>

Thacker, A. (2010). *Contribution expérimentale à l'analyse stationnaire et instationnaire de l'écoulement à l'arrière d'un corps de faible allongement*. Université d'Orléans.

Zhang, B. F., Zhou, Y., & To, S. (2014). Active drag reduction of a simplified car model using a combination of steady actuators. *Proceedings of the 19th Australasian Fluid Mechanics Conference, AFMC 2014*.

Zhang, B. F., Zhou, Y., & To, S. (2015). Unsteady flow structures around a high-drag Ahmed body. *Journal of Fluid Mechanics*, 777, 291–326. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.332>