



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Πειραματική μελέτη αεροδυναμικής αλληλεπίδρασης επίγειων οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΑΡΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Μαθιουλάκης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά η αεροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ δύο μοντέλων αυτοκινήτου κλίμακας $\approx 1/50$ κατά την φάση της προσπέρασης. Χρησιμοποιήθηκαν πανομοιότυπα ξύλινα μοντέλα διαστάσεων 90mm (μήκος-L), 40mm(πλάτος-l), 30mm(ύψος-H). Το ένα από αυτά ήταν σταθερά τοποθετημένο πάνω σε ένα πιεζοηλεκτρικό ζυγό τριών συνιστωσών, ενώ το άλλο κινείτο με μικρή ταχύτητα παράλληλα σε αυτό με χρήση κινητήρα DC. Η πλευρική απόσταση μεταξύ των οχημάτων ήταν $\approx 1/3, 1/2, 3/4$ του πλάτους του κάθε μοντέλου. Η διαμήκης απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων κυμαίνονταν σε διάστημα $[-1.5, 3]$ του μήκους κάθε οχήματος, Η ροή του ελεύθερου ρεύματος αεροδυναμικής σήραγγας όπου διεξήχθησαν τα πειράματα σχημάτιζε γωνία $0^\circ, \pm 20^\circ$ σε σχέση με το διαμήκη άξονα των δύο οχημάτων. Επιπλέον, μελετήθηκε το πεδίο ταχυτήτων της ροής με ένα διδιάστατο σύστημα PIV στο μισό του ύψους του σταθερού μοντέλου .

Abstract

In the present diploma thesis the aerodynamic interference between two $\sim 1/50$ scale models of road vehicles is experimentally examined in a wind tunnel. Two identical wooden models were used with dimensions 90mm (length-L), 40mm (width-l), 30mm (height-h) with sharp edges. One of them was stationary, positioned on a piezoelectric 3-component balance, while the other was slowly moving parallel to the first via a DC motor. The lateral distance between the models was $\sim 1/3$, $1/2$ and $3/4$ of the models width. The longitudinal distance between the two vehicles was varying in the range of $[-1.5, 3]$ of the length of each model. The free stream velocity was at an angle of $0^\circ, \pm 20^\circ$ with respect to the longitudinal axis of the two vehicles. Moreover, the flow characteristics were examined with a 2D PIV system at the mid-height of the stationary model.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δημήτριο Μαθιουλάκη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και πρακτικό θέμα. Ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να μου προσφέρει τις γνώσεις του και την εμπειρία του στο αντικείμενο, δείχνοντας μου πώς με την επιμονή φτάνει κανείς στο αποτέλεσμα παρά τις όποιες αντιξοότητες. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ιστορική αναδρομή & στοιχεία θεωρίας ρευστομηχανικής	3
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	3
1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....	10
1.2.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή.....	11
1.2.2 Αποκόλληση οριακού στρώματος.....	13
1.2.3 Άνωση -Αντίσταση.....	13
1.2.4 Αντίσταση τριβής.....	14
1.2.5 Αντίσταση πίεσης.....	14
1.3 ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ.....	16
1.3.1 Μέθοδοι εργασίας.....	20
1.3.1.1 Εξωτερική ροή.....	22
1.3.1.2 Εσωτερική ροή.....	24
1.3.1.3 Συνολικές δυνάμεις και ροπές.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	30
2.1 ΤΕΛΙΟΝΙΣ κ.ά: (AN EXPERIMENTAL STUDY OF HIGHWAY AERODYNAMIC INTERFERENCES), 1979 ^(4.)	30
2.2 ΥΑΜΑΜΟΤΟ κ.ά (AERODYNAMIC INFLUENCE OF A PASSING VEHICLE ON THE STABILITY OF THE OTHER VEHICLES), 1996 ^(14.)	38

2.3 HAMMACHE κ.ά (AERODYNAMIC FORCES ON TRUCK MODELS, INCLUDING TWO TRUCKS IN TANDEM), 2001 ^(10.)	45
2.4 CORIN κ.ά. (A CFD INVESTIGATION INTO THE TRANSIENT AIRFORCES ON OVERTAKING ROAD VEHICLE MODELS), 2008 ^(12.)	50
2.5 C. NOGER κ.ά (INVESTIGATION OF THE TRANSIENT AERODYNAMIC PHENOMENA ASSOCIATED WITH PASSING MANOEUVRES), 2004 ^(3.)	56
2.6 K. MINATO κ.ά (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES IN TUNNELS - FLOW VISUALISATION USING THE LASER LIGHT SHEET METHOD AND ITS DIGITAL IMAGE PROCESSING), 1991 ^(8.)	60
2.7 Παράθεση διαφορετικών μορφών μοντέλων οχημάτων από άλλες εργασίες	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.....	64
3.1 Πειραματική διάταξη μελέτης σε αεροδυναμική σήραγγα του πεδίου ταχυτήτων της ροής με τη μέθοδο PIV.....	65
3.1.1 Αεροδυναμική σήραγγα.....	67
3.1.2 Συσκευή εκπομπής Laser.....	67
3.1.3 Σύστημα καταγραφής /CCD Camera.....	69
3.1.4 Τροφοδοτικό καπνού:.....	70
3.1.5 Λογισμικό Insight 4G.....	71

3.2 Μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά το προσπέρασμα δύο μοντέλων αυτοκινήτου.....	72
3.2.1 Λογισμικό Dynoware.....	73
3.2.2 Σήραγγα:.....	75
3.2.3 Ζυγός.....	77
3.2.4 Ενισχυτής φορτίου.....	79
3.2.5 Κάρτα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικά αποτελέσματα.....	82
4.1 Καταγραφή του Πεδίου Ταχυτήτων δύο διαστάσεων γύρω από μοντέλα αυτοκινήτων με τη μέθοδο PIV.....	82
4.1.1.1α) 1 ^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.35-14\text{mm}$:.....	83
4.1.1.1β) Σχολιασμός μετρήσεων για πρώτη πλευρική απόσταση.....	91
4.1.1.2α) 2 ^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.5-20\text{mm}$:.....	92
4.1.1.2β) Σχολιασμός μετρήσεων στη 2 ^η πλευρική απόσταση.....	99
4.1.1.3α) 3 ^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.75-30\text{mm}$:.....	100
4.1.1.3β) Σχολιασμός αποτελεσμάτων για την 3 ^η πλευρική απόσταση.....	107
4.1.2.1α) 1 ^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.35-14\text{mm}$:.....	108
4.1.2.1β) Σχολιασμός γραφημάτων για την 1η πλευρική απόσταση, ($\Delta y/l=0.35$).....	112
4.1.2.2α) 2 ^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.5-20\text{mm}$:.....	114
4.1.2.1β) Σχολιασμός γραφημάτων για την 2η πλευρική απόσταση, ($\Delta y/l=0.5$).....	118
4.1.2.3α) 3 ^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.75-30\text{mm}$:.....	119
4.1.2.3β) Σχολιασμός γραφημάτων για την 3 ^η πλευρική απόσταση, ($\Delta y/l=0.75$).....	122
4.1.3 Εποπτική παρουσίαση χαρακτηριστικών της ροής για την περιοχή υψηλών ταχυτήτων.....	122

4.2 Μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά το προσπέρασμα δύο μοντέλων αυτοκινήτου.....	125
4.2.1α) Συντελεστές αντίστασης για γωνίες εκτροπής $0^\circ, \pm 20^\circ$	126
4.2.1β) Σχολιασμός διαγράμματος συντελεστών αντίστασης:.....	127
4.2.2α) Συντελεστές πλευρικής δύναμης για γωνίες εκτροπής $0^\circ, \pm 20^\circ$..	127
4.2.2β) Σχολιασμός διαγράμματος συντελεστών πλευρικής δύναμης....	128
4.2.3) Σύγκριση αποτελεσμάτων με εργασίες άλλων.....	129
4.2.3.1) Συντελεστής αντίστασης c_D :.....	129
4.2.3.2) Συντελεστής πλευρικής δύναμης c_{SF} :.....	130
4.2.4) Εποπτική παρουσίαση διδιάστατης δύναμης που ασκείται στο σταθερό όχημα.....	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα από τις μετρήσεις.....	133
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απόδοση και ο χειρισμός ενός αυτοκινήτου επηρεάζονται σημαντικά από την αεροδυναμική του συμπεριφορά. Μια χαμηλότερη αντίσταση στην κίνηση των οχημάτων θα βοηθούσε σίγουρα στη μείωση κατανάλωσης καυσίμων, πράγμα πολύ σημαντικό αν αναλογιστούμε την αυξανόμενη έλλειψη σε φυσικούς πόρους.

Οι αεροδυναμικές δυνάμεις είναι σημαντικός παράγοντας της σταθερότητας του οχήματος, γιατί μειώνοντας το βάρος του οχήματος μειώνουμε δραστικά τις δυνάμεις τριβής από τα λάστιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να αυξάνονται οι αεροδυναμικές επιδράσεις στη σταθερότητα (α) λόγω της μειωμένης μάζας του οχήματος (β) εξαιτίας της μειωμένης δυνατότητας να εξουδετερώσουν πλευρικές δυνάμεις με δυνάμεις τριβής από λάστιχα.

Να σημειωθεί ότι δεν ισχύει το ίδιο με τις αδρανειακές δυνάμεις. Με τη μείωση της μάζας του οχήματος, παρότι μειώνεται η ικανότητα των ελαστικών να αντέχουν-κρατούν τις πλευρικές δυνάμεις μέσω τριβής, η αδράνεια του οχήματος (φυγόκεντρες δυνάμεις) μειώνεται αναλογικά. Με αποτέλεσμα, η σταθερότητα ενός ελαφρού οχήματος, όσον αφορά τις αδρανειακές δυνάμεις παραμένει περίπου η ίδια με εκείνη ενός παρόμοιου βαρύτερου οχήματος με τις ίδιες εξωτερικές διαστάσεις. Αυτό δεν ισχύει με τις αεροδυναμικές δυνάμεις, αφού τέτοιες δυνάμεις είναι συνάρτηση του μεγέθους και γεωμετρικών διαμορφώσεων του οχήματος. Δυο γεωμετρικά όμοια οχήματα, γι' αυτό το λόγο, παρουσιάζουν τις ίδιες αεροδυναμικές δυνάμεις και έτσι ελαχιστοποιείται σημαντικά η δυνατότητα ενός ελαφρύτερου οχήματος να εξουδετερώνει μέσω δυνάμεων τριβής αεροδυναμικές επιδράσεις.

Με μείωση του μεγέθους-μάζας, γίνεται σταθερή η επίδραση από τις αδρανειακές δυνάμεις, αλλάζει όμως αυτή από τις αεροδυναμικές.

Αντικείμενο μελέτης, πέρα από τις διάφορες αλλαγές στη μορφή του οχήματος για να βελτιωθεί η αεροδυναμική του συμπεριφορά, είναι η αεροδυναμική παρεμβολή μεταξύ δύο οχημάτων. Κι αυτό γιατί πέρα από σημαντικές αλλαγές στην τιμή της αντίστασης που ασκείται στα οχήματα στη συγκεκριμένη περίπτωση σε σχέση με αυτή που θα είχαν αν κινούταν μόνα τους στο πεδίο ροής, χρήζει διερεύνησης και η σταθερότητά αυτών ειδικά στο ενδεχόμενο προσπέρασης του ενός από το άλλο.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η αεροδυναμική παρεμβολή μεταξύ δύο μοντέλων οχημάτων σε σήραγγα με χρήση της τεχνικής 2D PIV και ενός ισοζυγίου δυνάμεων.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της μορφής του αυτοκινήτου καθώς και μία παρουσίαση βασικών στοιχείων θεωρίας της ρευστομηχανικής καθώς και της διαμόρφωσης της ροής γύρω από ένα αυτοκίνητο.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρατίθενται στοιχεία από εργασίες διεθνούς βιβλιογραφίας, μέσω των οποίων μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά κατά την προσπέραση ενός αυτοκινήτου από ένα άλλο.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται διεξοδική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και κάθε παραμέτρου της που την αποτελεί. Επιπλέον αναλυτικά παρατίθενται οι μέθοδοι δειγματοληψίας και η λειτουργία των προγραμμάτων που μας παρείχαν τα αποτελέσματα του πειράματος.
















Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων και γίνεται σχολιασμός των σχημάτων για κάθε ξεχωριστή περίπτωση.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα των μετρήσεών μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ιστορική αναδρομή & στοιχεία θεωρίας ρευστομηχανικής

1.1. Ιστορική αναδρομή

Η αεροδυναμική οχημάτων διακρίνεται χρονολογικά σε τέσσερις περιόδους

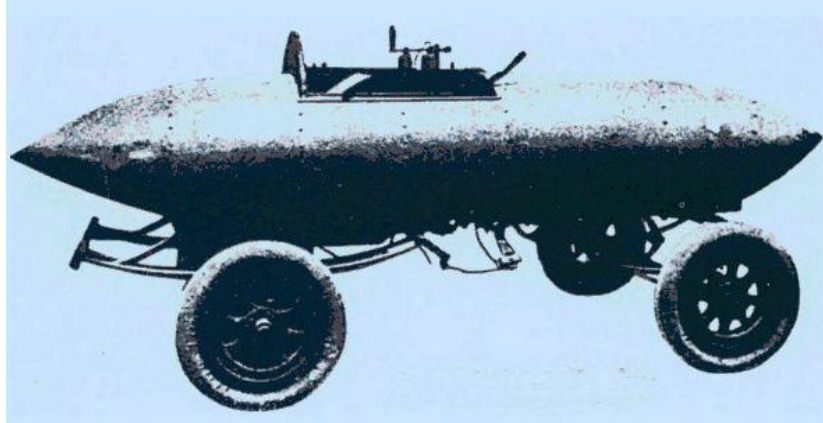
Basic shapes	1900 to 1930			
		Torpedo	Boat tail	Air ship
Streamlined cars	1921 to 1923			
	1922 to 1939			Jaray
	1934 to 1939			
	Since 1955			
Detail optimization	Since 1974			
		VW-Scirocco I	VW-Golf I	
Shape optimization	Since 1983			
		Audi 100 III	Ford Sierra	

Εικόνα 1 1:Οι τέσσερις πρώτες φάσεις της αεροδυναμικής οχημάτων

Βασικά σχήματα: Σε αυτή την περίοδο έγινε προσπάθεια να εφαρμοστούν αεροδυναμικά σχήματα που είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί στην αεροναυπηγική και τα πλοία. Λόγω των χαμηλών επιδόσεων των οχημάτων (χαμηλές ταχύτητες) η αεροδυναμική αντίσταση δεν έπαιζε

καθοριστικό ρόλο. Επίσης αγνοούνταν οι επιδράσεις από το έδαφος και οι μη ακάλυπτοι από περίβλημα τροχοί διατάρασσαν τη ροή.

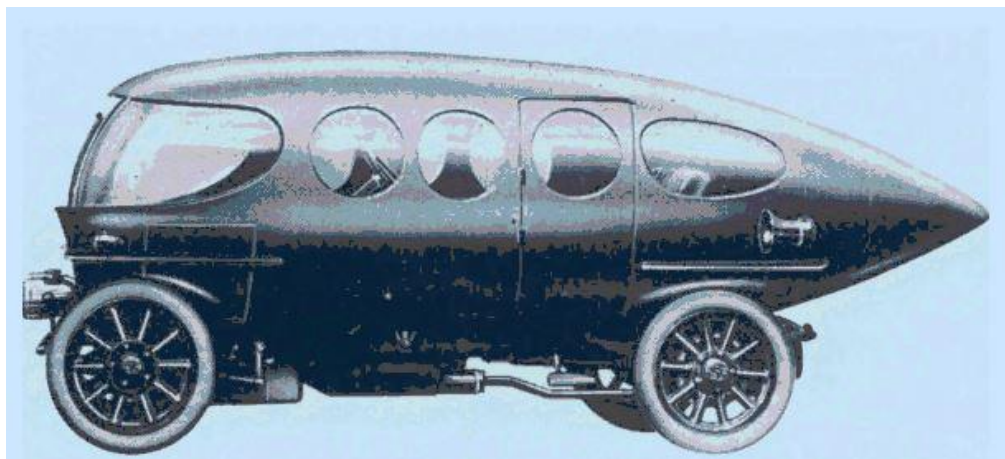
Το πρώτο καταγεγραμμένο όχημα δημιουργήθηκε το 1899 από τον Camille Jenatzy.



Εικόνα 1 2: Το όχημα του Jenatzy,1899

Κινούταν με ηλεκτρική ενέργεια. Με το αεροδυναμικό σώμα του σε σχήμα τορπύλης και λόγω μήκους - διαμέτρου ίσο με 4, έσπασε το φράγμα των 100 km/h, ενώ ο εκτεθειμένος στον αέρα οδηγός και οι τροχοί αύξαναν αισθητά την αντίσταση.

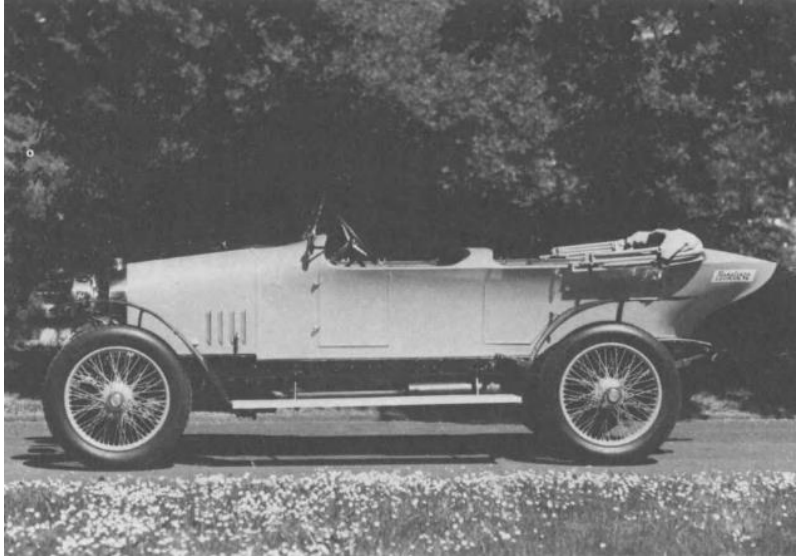
Η επόμενη προσπάθεια έγινε με ένα αυτοκίνητο σε σχήμα αερόπλοιου με μία Alfa Romeo του 1913.



Εικόνα 1 3: Alfa Romeo,1913

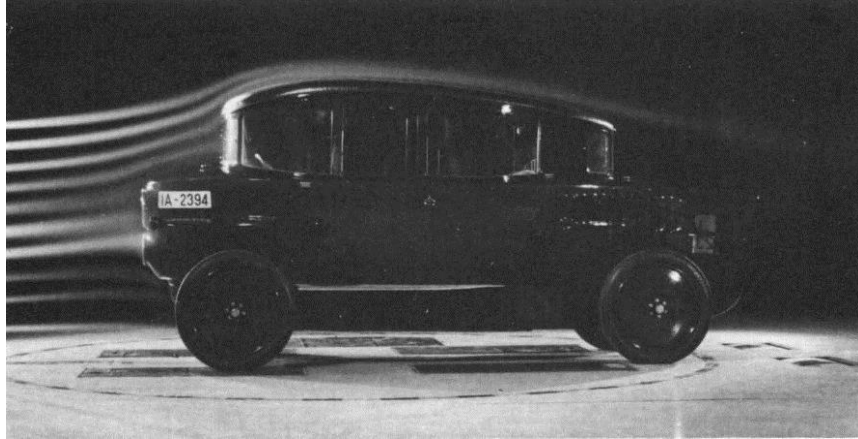
Με λόγο μήκους προς ύψος ίσο με τρία, ήταν πιο συμπαγές σαν όχημα από του Jenatzy. Λόγω του περικλειόμενου από το όχημα οδηγού και των τροχών είχαμε καλύτερα χαρακτηριστικά ροής. Παρόμοια σχέδια υπήρχαν με τους τροχούς μερικώς καλυμμένους από το σώμα του οχήματος (από τον O. Bergman).

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες εγχειρήματα, το αποκαλούμενο μοντέλο “boat-tail” ήταν αεροδυναμικά αναποτελεσματικό. (Η ροή αποκολλάται μπροστά και στο σασί πάνω από τους τροχούς, χωρίς να επανακολλάται εξαιτίας της διαμόρφωσης ουράς πλοίου στο πίσω μέρος του.)

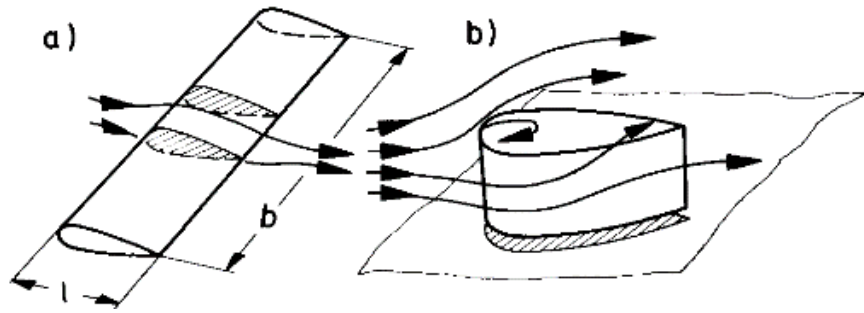


Εικόνα 1 4: Boat-tailed ‘Audi-Alpensieger’, 1913

Αεροδυναμικά σχήματα: Το 1911 με την ανάλυση της αντίστασης πρόσφυσης από τον Riedler το 1911 μπήκαν τα θεμέλια για την αεροδυναμική οχημάτων. Μάλιστα μετά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο ο E. Rumpler σχεδίασε διάφορα οχήματα που τα όρισε ως «οχήματα σε σχήμα σταγόνας». Για να χρησιμοποιήσει το στενό διάστημα στο πίσω μέρος του οχήματος επινόησε τη διαμόρφωση της μηχανής στο πίσω μέρος. Λαμβάνοντας υπόψη το τρισδιάστατο πεδίο ροής, το αυτοκίνητο του Rumpler ειδικωμένο από πάνω είχε τη μορφή αεροτομής, ενώ και η οροφή του ήταν αρκετά αεροδυναμική. Παρά τις ακάλυπτες ρόδες του, είχε συντελεστή αντίστασης $c_D=0.28$.



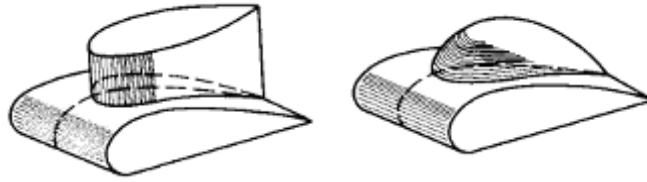
Εικόνα 1 5:Rumpler car,1924



Εικόνα 1 6: Διδιάστατη ροή γύρω από ένα προφίλ

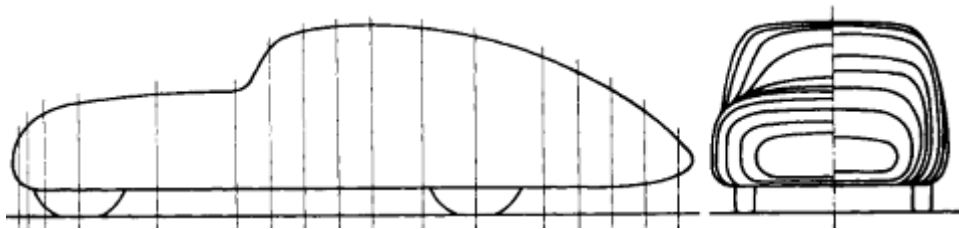
Το 1923 το αυτοκίνητο από τον Bugatti δημιουργήθηκε βάση της θεωρίας δυο διαστάσεων. Το οριζόντιο προφίλ που είχε το όχημα επικεντρωνόταν στη διέλευση της ροής κοντά στο έδαφος είτε με το κυρτό σχήμα του που διευκολύνει την κάλυψη των τροχών είτε με την προέκταση του σώματος του αυτοκινήτου προς τα κάτω.

Στη συνέχεια ο Jaray σε συνεργασία με τον Klempereger ασχολήθηκαν με την επίδραση του εδάφους σε ένα όχημα που ήταν σώμα εκ περιστροφής (η αντίσταση αυξάνεται με την απομάκρυνση από αυτό). Δημιούργησαν οχήματα από συνδυασμό άλλων αεροδυναμικών σωμάτων. Μάλιστα περιόρισαν την αποκόλληση στο πίσω μέρος επιμηκύνοντας την ουρά του αυτοκινήτου. Κατάφεραν να πέτυχουν συντελεστή αντίστασης c_D περίπου 0.3, αλλά αυτό δε βρήκε ανταπόκριση στην αγορά.



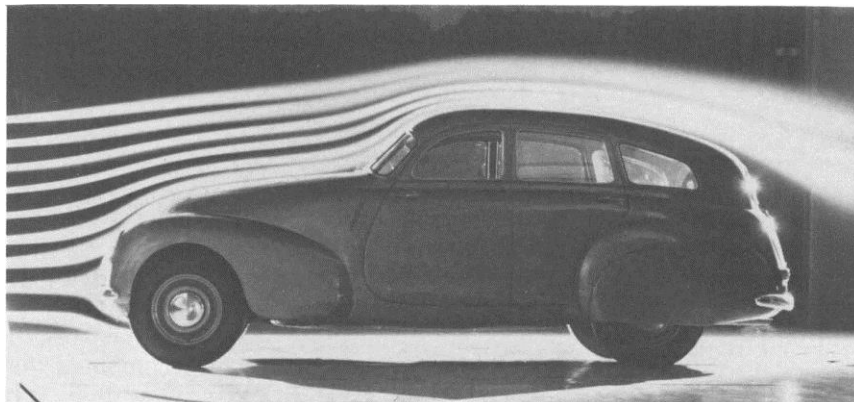
Εικόνα 1 7:Σχηματικά οι συνδυασμοί αεροδυναμικών σωμάτων του P.Jaray

Το 1937 ο Lange βασίστηκε στο προφίλ δύο οριζόντιων πτερυγών και πέτυχε συντελεστή αντίστασης 0.14.



Εικόνα 1 8:Το όχημα του Lange, μήκος/ύψος=3.52, $C_D=0.14$

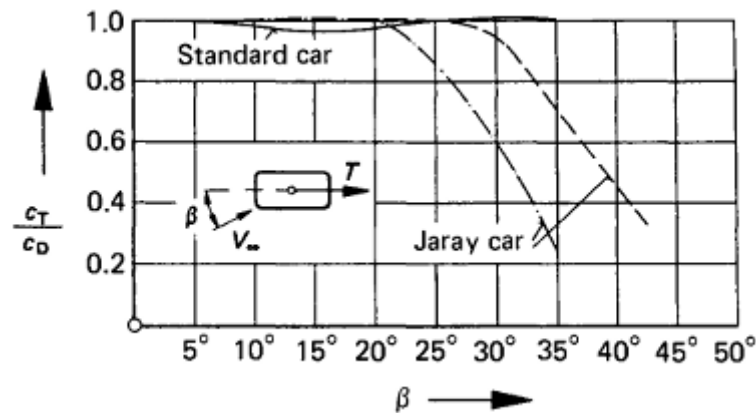
Ο Lay από τις αρχές του 1930 παρατήρησε την ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των πεδίων ροής στο μπροστά και πίσω μέρος του αυτοκινήτου. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1939, με το Kammback επιτεύχθηκε χαμηλή αντίσταση, επειδή η ροή παραμένει προσκολλημένη για όσο το δυνατό και μετά εξαναγκάζεται σε αποκόλληση, κόβοντας το πίσω τέλος σε μία ήδη μειούμενη διατομή. Λεπταίνοντας το σώμα αρκετά, η ροή τίθεται σε άυληση της πίεσης, το οποίο εξασφαλίζει ότι η πίεση βάσης στο πίσω μέρος του οχήματος είναι σχετικά υψηλή, μειώνοντας την αντίσταση. Με το Kammb3 επιτεύχθη $C_D \sim 0.37$.



Εικόνα 1 9:Το όχημα του Kammb σε σήραγγα,1979

Παρότι η αεροδυναμική μελέτη επικεντρώθηκε αρχικά στην αντίσταση σε ευθεία ροή αέρα, από τον Klempereger έγινε αντιληπτό ότι χρειαζόταν μελέτη για τις επιδράσεις του πλευρικού

ανέμου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά του, η αντίσταση μεταβαλλόταν λίγο με την αύξηση της γωνίας εκτροπής για αυτοκίνητα με αιχμηρά άκρα-που είχαν ήδη υψηλή αεροδυναμική αντίσταση, αλλά μειώθηκε απότομα (μετά από μια μικρή αύξηση) με χρήση αεροδυναμικών σχημάτων.

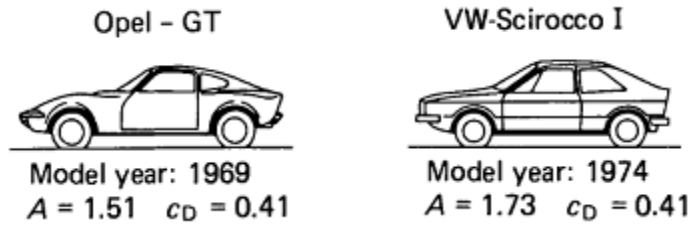


Εικόνα 1 10: Διακύμανση της δύναμης αντίστασης (D) ανάλογα με τη γωνία εκτροπής, σύμφωνα με τον Klemperer

Η διατήρηση της κατεύθυνσης σε πλάγιους ανέμους γινόταν όλο και περισσότερο σημαντική με υψηλότερες ταχύτητες οδήγησης, όταν έγινε αντιληπτό ότι τα οχήματα με χαμηλή αντίσταση συχνά διέθεταν μικρή σταθερότητα σε πλάγιους ανέμους. Βρέθηκε τελικά ότι μόνο οχήματα με μακρύ λεπταίνον πίσω μέρος είχαν αυτό το πρόβλημα, ενώ η εκτροπή αυτών με περικομμένη πίσω άκρη δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλη.

Μετά την προσθήκη πτερυγίων που βελτίωνε αποδεδειγμένα την ευστάθεια στη ροπή εκτροπής (Sawatzki) αλλά ήταν ακατάλληλη για οχήματα μαζικής παραγωγής, έγιναν μελέτες που ασχολούνταν με τη βελτίωση της αεροδυναμικής στη ροή μέσα από το όχημα. Ο Klemperer έδειξε ότι η ροή του αέρα μέσα από το ψυγείο του αυτοκινήτου αυξάνει την αντίσταση του οχήματος, ενώ ο Kamn διερεύνησε τη σχέση μεταξύ του πεδίου της εξωτερικής ροής και του όγκου του αέρα που περνά από την καμπίνα επιβατών.

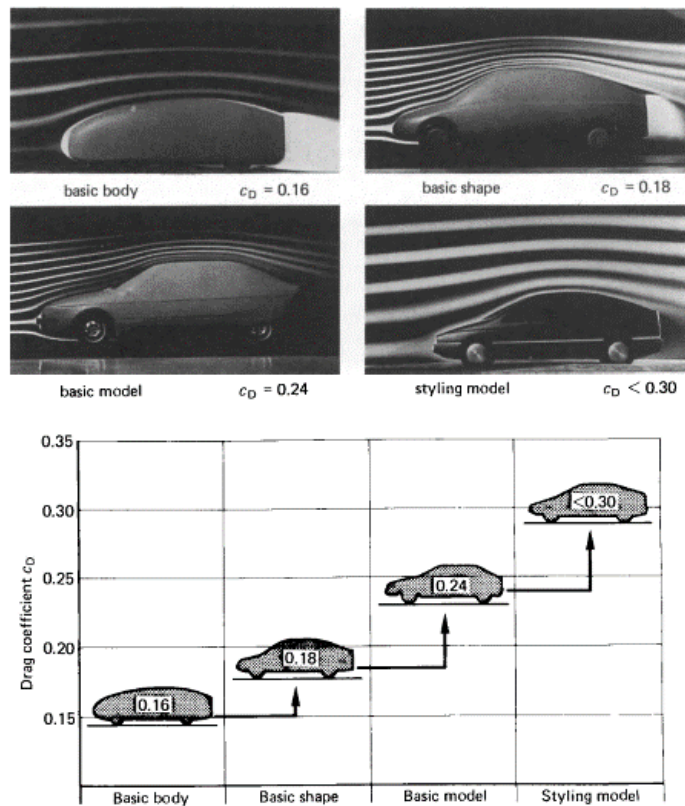
Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του σώματος: Το αεροδυναμικό σχήμα των οχημάτων δεν ήταν πάντα το πρώτο μέλημα στη σχεδίαση (π.χ. εμφάνιση, φορτίο, ασφάλεια). Η μέθοδος βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών του σώματος του οχήματος αποτελεί την τρίτη φάση στη σχεδίαση οχημάτων. Έγιναν τροποποιήσεις σε στοιχεία όπως ακτίνες, καμπυλότητα, σπόιλερ κ.ά. ώστε να προληφθεί ή να ελεγχθεί η αποκόλληση, ή να ελαχιστοποιηθεί η αντίσταση. Η εμβάθυνση σε αυτή την προσπάθεια σπέδειξε ότι μπορούν να υπάρξουν σημαντικές μειώσεις στην αντίσταση.



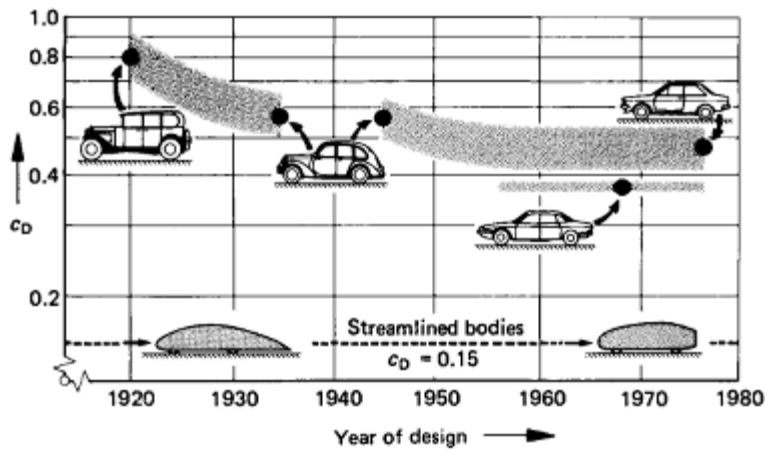
Εικόνα 1 11: Σύγκριση των συντελεστών αντίστασης για το Opel-GT, Volkswagen Scirocco I

Το c_D του εικονιζόμενου Scirocco βελτιώθηκε το από 0.5 σε 0.41. Ακόμα και με τη χρήση αυτής της μεθόδου όμως ο c_D δε γινόταν χαμηλότερος από 0.40.

Βελτιστοποίηση σχήματος: Άλλη μέθοδος κατασκευής οχημάτων ήταν αυτή με τη μετατροπή ενός σώματος χαμηλής αντίστασης με τις ίδιες διαστάσεις όσο το τελικό, βήμα βήμα σε ένα πραγματικό αυτοκίνητο εφαρμόζοντας τις τεχνικές βελτιστοποίησης για κάθε βήμα. Το Audi 100 III (1983) είναι ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου.



Εικόνα 1 12: Ανάπτυξη ενός οχήματος χαμηλής αντίστασης, ξεκινώντας από ένα αεροδυναμικό σώμα



Εικόνα 1 13: Τάσεις του αεροδυναμικού συντελεστή αντίστασης (c_D) με την πάροδο του χρόνου

1.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Συνεκτικότητα προκαλείται από την τριβή μεταξύ των μορίων μεταξύ των σωματιδίων του ρευστού και συσχετίζει την ορμή της ροής με το δυναμικό ταχύτητας ή την εφαρμοσμένη τάση με τον ρυθμό της καταπόνησης. Σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα για την παράλληλη ροή ως προς τον τοίχο.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

Η διατμητική τάση είναι ανάλογη στο δυναμικό της ταχύτητας du/dy . Ο σταθερός παράγοντας μ είναι μια ιδιότητα του ρευστού και αποκαλείται δυναμική συνεκτικότητα. Γενικά η τιμή του εξαρτάται από τη θερμοκρασία, συχνά χρησιμοποιείται το πηλίκο:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Το οποίο ονομάζεται κινηματική συνεκτικότητα και το οποίο εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Για τα ασυμπύεστα ρευστά μόνο, μία θερμοκρασιακή εξάρτηση υπάρχει για τα μ, ν . Για φυσιολογικές συνθήκες οι τιμές είναι

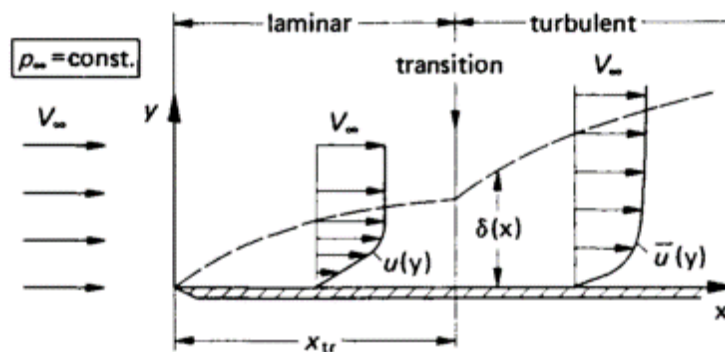
$$\mu = 1.7894 * 10^{-5} \text{ N s/m}^2$$

$$\nu = 1.4607 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Η συνεκτικότητα ενός πραγματικού ρευστού είναι η φυσική αιτία για την περίπτωση της αντίστασης τριβής κατά την παρουσία ενός δυναμικού ταχύτητας πάνω στο τοίχωμα.

Στρωτή και τυρβώδης ροή

Η ροή σε ένα οριακό στρώμα κατά μήκος μιας λεπτής επίπεδης πλάκας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η αντίστοιχη εξωτερική ροή έχει παράλληλες γραμμές ροής και συνεχή ταχύτητα V_∞ , και η πίεση p_∞ . Η συνεκτική ροή εντός του οριακού στρώματος πληροί τον όρο «μη-ολίσθησης» κατά μήκος του τοίχου. Στο μπροστινό μέρος της πλάκας το οριακό στρώμα της ροής είναι σταθερό και (σχεδόν) παράλληλο προς τον τοίχο.



Εικόνα 1.14: Οριακό στρώμα κατά μήκος μίας λεπτής επίπεδης πλάκας

Αυτή η κατάσταση της ροής ονομάζεται στρωτή. Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει προς τα κάτω σύμφωνα με τη σχέση: $\delta \sim \sqrt{\frac{\nu}{U_\infty}}$

Με την αύξηση της απόστασης x και της κινηματικής συνεκτικότητας ν και με μειούμενη ταχύτητα ελεύθερης ροής V_∞ , το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει.

Η κατάσταση στρωτής ροής του οριακού στρώματος είναι σταθερή έναντι διαταραχών μόνο υπό προϋποθέσεις. Σε μια απόσταση $x = x_{cr}$ από την μπροστά ακμή της πλάκας γίνεται μετάβαση στη λεγόμενη τυρβώδη κατάσταση του οριακού στρώματος. Η μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων της ροής του οριακού στρώματος σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds. Για την επίπεδη πλάκα, η μετάβαση συμβαίνει για

$$Re_{x_{cr}} = \frac{V_\infty * x_{cr}}{\nu} = 5 * 10^5,$$

αλλά αυτή η τιμή ισχύει μόνο για αμελητέα κλίση πίεσης στην εξωτερική ροή.

Σε περιπτώσεις με κλίση πίεσης, η μείωση της πίεσης στη ροή κατεύθυνσης οδηγεί σε σταθεροποίηση του στρωτού οριακού στρώματος, ενώ μια δυσμενής κλίση πίεσης προκαλεί μια νωρίτερη μετάβαση στην τυρβώδη κατάσταση. Επιπλέον, διαταραχές της στρωτής ροής, π.χ.

από την τραχύτητα της επιφάνειας, μπορεί να οδηγήσει σε μετάβαση. Σε γενικές γραμμές, για τους μεσαίους αριθμούς Reynolds η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη εμφανίζεται στην περιοχή της ελάχιστης πίεσης, και με την αύξηση του αριθμού Reynolds το σημείο μετάβασης μετακινείται ανάντη.

Στην περιοχή του τυρβώδους οριακού στρώματος η ροή είναι ασταθής. Η μέση χρονικά ροή εξακολουθεί να είναι προσκολλημένη και (σχεδόν) παράλληλη στον τοίχο, αλλά εκτός από την μέση ταχύτητα $\overline{u}(y)$, οι διακυμάνσεις u' , v' , w' υπερτίθενται στις συντεταγμένες των τριών κατευθύνσεων. Η συνιστώσα ταχύτητας παράλληλη προς τον τοίχο στο Σχ. 1.14 είναι επομένως

$$u(y, t) = \overline{u}(y) + u'(y, t)$$

Και η $\overline{u}(y)$ ορίζεται ως (a): $\overline{u}(y) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u(y, t) dt$

όπου Δt επιλέγεται τόσο μεγάλο, ώστε η $u(y)$ να μην εξαρτάται από αυτό. Λόγω των διακυμάνσεων της ταχύτητας, γίνεται εντατική ανάμιξη. Επομένως, εκτός από την διατμητική τάση που προκαλείται από την τριβή των μορίων σύμφωνα με την εξίσωση της διατμητικής τάσης, εμφανίζεται μια διατμητική τάση λόγω της τυρβώδους ανάμιξης.

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u'v'}$$

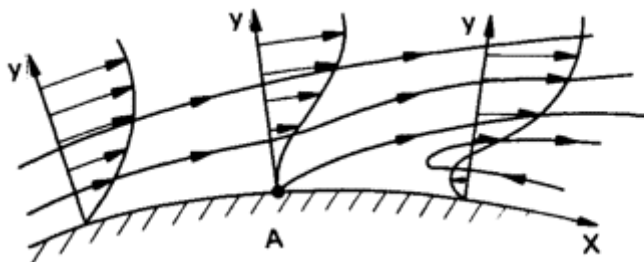
Σε αυτή την έκφραση u' και v' υποδηλώνουν τις διακυμάνσεις της ταχύτητας στις κατευθύνσεις x και y και $u'v'$ είναι η χρονική μέση παράγωγος από Εξ(a). Μιας και τα u' και v' έχουν πάντα το αντίθετο πρόσημο, η έκφραση για το τ_{turb} είναι πάντα θετική. Οι διακυμάνσεις της τυρβώδους ταχύτητας εκδηλώνονται σε μία εμφανή αύξηση στο ιξώδες του ρευστού. Ως εκ τούτου, το πάχος του οριακού στρώματος πάνω στην επίπεδη πλάκα στην εικόνα 1.14 αυξάνει πιο ραγδαία κατάντι του σημείου μετάβασης ως

$$\delta \sim \sqrt[5]{\frac{\nu}{V_\infty}} * x^{4/5}$$

Εξαιτίας της διαδικασίας ανάμιξης κατά την τυρβώδη ροή οριακού στρώματος, οι κατανομές ταχύτητας δείχνουν μεγαλύτερες ταχύτητες κοντά στον τοίχο από ότι στην στρωτή ροή.

Αποκόλληση οριακού στρώματος

Το οριακό στρώμα της στρωτής και τυρβώδους ροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή της πίεσης η οποία επιβάλλεται από την εξωτερική ροή. Για μία αύξηση πίεσης κατά την κατεύθυνση ροής το οριακό στρώμα της ροής καθυστερεί, ειδικά κοντά στον τοίχωμα, ενώ ενδέχεται να γίνει και αναστροφή ροής. Αυτή η κατάσταση παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 1.15.



Εικόνα 1 15:Αποκόλληση ροής οριακού στρώματος σε έναν τοίχο (σχηματικά)

Μπορεί να φανεί ότι, μεταξύ εμπρόσθιας και αναστρεφόμενης ροής, μια διαχωριζόμενη γραμμή ροής αφήνει τον τοίχο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αποκόλληση ροής. Για το σημείο διαχωρισμού A, η κατάσταση διατηρείται.

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_w = 0$$

Τα τυρβώδη οριακά στρώματα μπορούν να υποστούν πολύ πιο απότομο δυναμικό πίεσης χωρίς αποκόλληση από όσο μπορούν αυτά στη στρωτή ροή. Αυτό γίνεται επειδή η διαδικασία τυρβώδους ανάμιξης οδηγεί σε μια εντεινόμενη μεταφορά της ορμής από την εξωτερική ροή προς τον τοίχο. Για μείωση της πίεσης κατά την κατεύθυνση της ροής δεν υπάρχει τάση για αποκόλληση ροής.

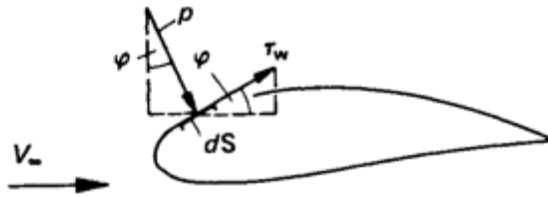
Άωση -Αντίσταση

Οι αεροτομές, δηλ. τομές πτερυγίων συναντώνται σε πλήθος εφαρμογών, όπως πτερύγια αεροσκαφών, συμπιεστών, στροβίλων, αντλιών κτλ. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι το σχετικά πεπλατυσμένο μέτωπό τους (μέτωπο προσβολής) που συναντά η ροή κατ'αρχήν, η οξεία ακμή τους (ακμή φυγής) στο πίσω μέρος τους, η μέση γραμμή καμπυλότητας, δηλ. η καμπύλη που περνά από το μέσο του πάχους τους και η χορδή, ευθεία που συνδέει το μέτωπο προσβολής με την ακμή φυγής.

Οι αεροτομές εκτεθειμένες σε ρεύμα ρευστού δέχονται δυνάμεις, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από το σχήμα τους και τη λεγόμενη γωνία πρόσπτωσης, δηλ. τη γωνία που σχηματίζει η χορδή τους με την ταχύτητα του ρευστού σε άπειρη απόσταση.

Μία από αυτές είναι κάθετη προς την αρχική κατεύθυνση της ροής και ονομάζεται αεροδυναμική άνωση (L), ενώ αν η επίδραση της συνεκτικότητας είναι σημαντική ασκείται και η αεροδυναμική αντίσταση ή οπισθέλκουσα (D), παράλληλα στην κατεύθυνση της ροής.

Αντίσταση τριβής



Εικόνα 1.16: Σχηματικός προσδιορισμός της αντίστασης ενός σώματος (παράδειγμα διδιάστατης ροής)

Αν το δυναμικό πίεσης εμφανίζεται σε ένα συνεκτικό ρευστό στον τοίχο, εξαιτίας της τριβής των μορίων, μία διατμητική τάση τ_w επενεργεί παντού πάνω στην επιφάνεια του σώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 1.16. Η ολοκλήρωση των αντίστοιχων συνιστωσών δύναμης στην κατεύθυνση του ελεύθερου ρεύματος σύμφωνα με

$$D_f = \oint \tau_w \cos \varphi dS$$

οδηγεί στην αποκαλούμενη αντίσταση τριβής D_f . Στην απουσία αποκόλλησης της ροής, αυτή είναι η κυρίαρχη συνεισφορά στη συνολική αντίσταση ενός σώματος σε διδιάστατη συνεκτική ροή.

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα ανεξάρτητα των διαστάσεων της λεπτής πλάκας (μήκος l , πλάτος b) και των συνθηκών της ροής (δυναμική πίεση ίση με $\rho V_\infty^2/2$ ορίζουμε έναν αδιάστατο συντελεστή αντίστασης c_D , όπου

$$c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 b l}$$

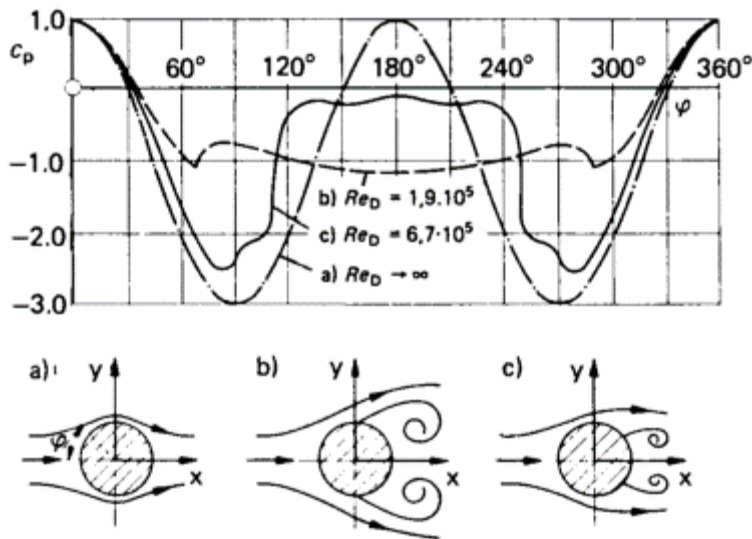
Παρατηρείται ότι για τυρβώδη οριακά στρώματα η αντίσταση τριβής είναι πολύ υψηλότερη απ'όσο στη στρωτή κι αυτό γιατί η τυρβώδης ανάμιξη οδηγεί σε κατανομές ταχύτητας με πολύ πιο απότομη κλίση πίεσης στον τοίχο από όσο στην στρωτή, ενώ η D_f αυξάνεται με την τραχύτητα της επιφάνειας.

Αντίσταση πίεσης

Μη αεροδυναμικά σώματα όπως κύλινδροι, μια σφαίρα ή μια επίπεδη πλάκα κάθετη προς τη ροή, δείχνουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά οπισθέλκουσας. Στο πίσω μέρος τέτοιων σωμάτων κατά τη μη συνεκτική εξωτερική ροή, συμβαίνουν εξαιρετικά απότομα δυναμικά

πίεσης, που οδηγούν στην αποκόλληση της ροής (Εικ. 1.20). Η κατανομή της πίεσης μεταβάλλεται έτσι σημαντικά σε σύγκριση με τη θεωρητική υπόθεση της μη συνεκτικής ροής. Ως παράδειγμα, η εικόνα 1.17 δείχνει την κατανομή της πίεσης για ένα κυκλικό κύλινδρο. Στο μπροστινό μέρος η κατανομή πίεσης είναι παρόμοια με αυτή της μη συνεκτικής ροής, ενώ στο πίσω μέρος η αποκόλληση της ροής οδηγεί σε σημαντική αναρρόφηση. Η κατανομή της πίεσης εκ τούτου, είναι ασύμμετρη σε σχέση με τον γ - άξονα. Ολοκληρώνοντας τις συνιστώσες δύναμης στην κατεύθυνση ελεύθερης ροής, που προκύπτει από την κατανομή της πίεσης,

$$D_p = \oint p \sin \varphi dS$$



Εικόνα 1 17: Κατανομή πίεσης και πεδίο γραμμών ροής για ένα κυκλικό κύλινδρο σε διαφορετικούς αριθμούς Reynolds: a)μη συνεκτική ροή, b)υποκρίσιμη ροή,γραμμικό οριακό στρώμα, c)υπερκρίσιμη ροή, τυρβώδες οριακό στρώμα

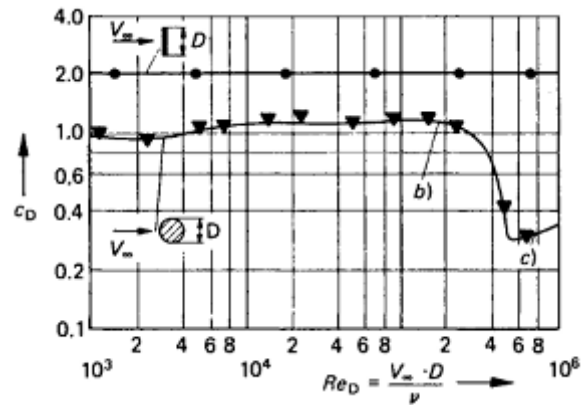
Δίνεται η αποκαλούμενη αντίσταση πίεσης D_p , σχήμα 1.16. Η αντίσταση τριβής επίσης προέρχεται από τις διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα, αλλά στα μη-αεροδυναμικά σώματα παρατηρείται κυρίως η αντίσταση πίεσης. Σε γενικές γραμμές, η αντίσταση του σώματος μπορεί να αποδοθεί και ως:

$$D = D_f + D_p$$

Για μη αεροδυναμικά σώματα ο συντελεστής αντίστασης

$$c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A}$$

Βασίζεται στη δυναμική πίεση $\rho V_{\infty}^2/2$ του ελεύθερου ρεύματος και στη μέγιστη διατομή του σώματος A. Αυτή είναι η προβολή του σώματος σε μια επίπεδη επιφάνεια κάθετα στην ελεύθερη ροή (μπροστινή περιοχή).



Εικόνα 1 18: Συντελεστές αντίστασης μη αεροδυναμικών σωμάτων ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds

Στην εικόνα 1.18 απεικονίζεται το διάγραμμα συντελεστών αντίστασης βάσει αριθμού Re για κύλινδρο και επίπεδη πλάκα. **Υπογραμμίζεται η ανεξαρτησία της αποκόλλησης ροής από τον αριθμό Re για σώματα με αιχμηρές άκρες. αντίθετα, για πιο στρογγυλεμένα σώματα, η θέση της αποκόλλησης της ροής εξαρτάται από την κατάσταση του οριακού στρώματος.** Περίπτωση b) εικόνα 1.17 και 1.18. Σε χαμηλούς Re η ροή αυτή είναι στρωτή Η θέση αυτή είναι κοντά στο σημείο με το μεγαλύτερο πάχος. Η προκύπτουσα περιοχή ομόρρου πίσω από το σώμα είναι πλατιά και ο αντίστοιχος c_D είναι υψηλός. Με κρίσιμο $Re=10^5$, έχουμε απότομη μετάβαση σε τυρβώδες οριακό στρώμα στο μπροστινό μέρος του σώματος. Το οποίο παραμένει προσκολλημένο Περίπτωση c) εικόνα 1.17. Η περιοχή ομόρρου είναι στενή και ο συντελεστής αντίστασης πολύ χαμηλότερος από εκείνον του κρίσιμου Re.

Γι' αυτό το λόγο φροντίζουμε να αποφεύγουμε αυτή την απότομη μετάβαση συναρτήσει του Re, καθορίζοντας τη θέση της αποκόλλησης σε συγκεκριμένα σημεία. Στο αυτοκίνητο για παράδειγμα, στην πάνω άκρη του κεκλιμένου πίσω παράθυρου. Μέχρι τότε η ροή θα πρέπει να παραμένει προσκολλημένη και ο ομόρρος στενός για χαμηλή αντίσταση. Γενικά ο συντελεστής αντίστασης είναι λίγο υψηλότερος από 0.3, δείχνοντας χαμηλή εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης από τον αριθμό Re και δεν παρατηρούμε μη αναμενόμενες μεταβάσεις σε τυρβώδη ροή. Για αυτό το λόγο λέμε ότι το αυτοκίνητο έχει κυρίαρχα αντίσταση πίεσης.

1.3. ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

Το όχημα κατά την κίνησή του υποβάλλεται σε ροή που διακρίνεται σε τρεις περιπτώσεις:

- ροή αέρα γύρω από το όχημα
- ροή αέρα μέσα από το σώμα του οχήματος

- διαδικασίες ροής μέσω του μηχανικού εξοπλισμού.

Παρατηρείται αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πρώτων πεδίων ροής. Για παράδειγμα, η ροή του αέρα μέσα από το χώρο του κινητήρα εξαρτάται άμεσα από το πεδίο ροής γύρω από το όχημα. Και οι δύο τομείς θα πρέπει να εξεταστούν από κοινού. Από την άλλη πλευρά, οι διαδικασίες ροής εντός του κινητήρα και του κιβωτίου ταχυτήτων δε συνδέονται άμεσα με τις δύο πρώτες, και δεν αντιμετωπίζονται εδώ.

Η εξωτερική ροή υποβάλλει το όχημα σε δυνάμεις και ροπές που επηρεάζουν σημαντικά τις επιδόσεις του οχήματος και τη σταθερότητα της κατευθυνσης. Μέχρι πρόσφατα, η αεροδυναμική του οχήματος ασχολήθηκε σχεδόν αποκλειστικά με αυτές τις δύο επιδράσεις.

Από το πεδίο ροής που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 1.19), ορισμένες σημαντικές διεργασίες ροής μπορεί να διακριθούν, για παράδειγμα η αποκόλληση της ροής στο πίσω μέρος του οχήματος. Αν και οι γραμμές ροής ακολουθούν το περίγραμμα του οχήματος σε μεγάλες εκτάσεις, ακόμη και στην περιοχή των αιχμηρών καμπυλών, η ροή αέρα διαχωρίζεται στο πίσω άκρο της οροφής, σχηματίζοντας ένα μεγάλο ομόρρου που μπορεί να παρατηρηθεί (Εικ. 1.20) με την εισαγωγή καπνού μέσα στη φυσαλίδα πίσω από το όχημα αντί στη γειτονική εξωτερική ροή όπως στην εικόνα 1.19.



Εικόνα 1 19:Γραμμές ροής σε διαμήκη ημιτομή ενός VW Golf I σε όχημα κανονικών διαστάσεων σε σήραγγα

Η αντίσταση ορίζεται ως η δύναμη εμπέδησης της κίνησης του οχήματος σε οριζόντια κίνηση, αποτελείται από την αεροδυναμική αντίσταση(που θα ασχοληθούμε) και την αντίσταση κύλισης στα ελαστικά. Η αεροδυναμική αντίσταση αποτελείται από:

1. την τυρβώδη ροή του αέρα γύρω από το σώμα του οχήματος(85%), **με την οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία και θα αναφέρεται ως «αντίσταση».**
2. την τριβή του αέρα πάνω στο σώμα του οχήματος (12%)
3. την αντίσταση των εξαρτημάτων του οχήματος, από το ψυγείο και το σύστημα εξαερισμού (3%)

Η αντίσταση D όπως και οι άλλες συνιστώσες και ροπές δύναμης αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας του οχήματος V .

$$D \sim V^2$$

Με ένα μεσαίου μεγέθους ευρωπαϊκό αυτοκίνητο, η αεροδυναμική αντίσταση υπολογίζεται ως σχεδόν το 80 % της συνολικής αντίστασης στο δρόμο στα 100 km / h (62 μίλια / ώρα). Υπάρχει εκ τούτου πολύ περιθώριο για βελτίωση της οικονομίας μέσω της μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης. Για το λόγο αυτό, η οπισθέλκουσα παραμένει το σημείο εστίασης στην αεροδυναμική του οχήματος, εάν ο στόχος είναι η ταχύτητα ή η οικονομία καυσίμου. Η πλήρης έκφραση για την εξίσωση ($D \sim V^2$)

$$\text{είναι: } D = c_D A \frac{\rho}{2} V^2$$

όπου το c_D είναι ο αδιάστατος συντελεστής οπισθέλκουσας, A είναι η προβαλλόμενη μπροστινή επιφάνεια του οχήματος (Εικόνα 1.21) και ρ είναι η πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα.

Η οπισθέλκουσα D ενός οχήματος καθορίζεται συνεπώς από μετωπική επιφάνεια A της, και από το σχήμα του, η αεροδυναμική ποιότητα του οποίου περιγράφεται από το συντελεστή οπισθέλκουσας c_D . Γενικά το μέγεθος του οχήματος, και ως εκ τούτου εμπρόσθια επιφάνεια, καθορίζεται από τις απαιτήσεις σχεδιασμού, και οι προσπάθειες για τη μείωση της αντίστασης συγκεντρώνονται για τη μείωση του συντελεστή αντίστασης.

Η απόσταση μεταξύ των γραμμών ροής μπροστά από το αυτοκίνητο σε σύγκριση με εκείνες πάνω από το όχημα παρέχει μία ένδειξη της άνωσης (Εικόνα 1.19). Γραμμές ροής στενά τοποθετημένες σημαίνουν υψηλή ταχύτητα και κατά συνέπεια χαμηλή στατική πίεση. Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στις άνω και κάτω πλευρές του οχήματος παράγει μία προκύπτουσα δύναμη, σε ορθή γωνία προς την κατεύθυνση της κίνησης, η οποία ονομάζεται άνωση.

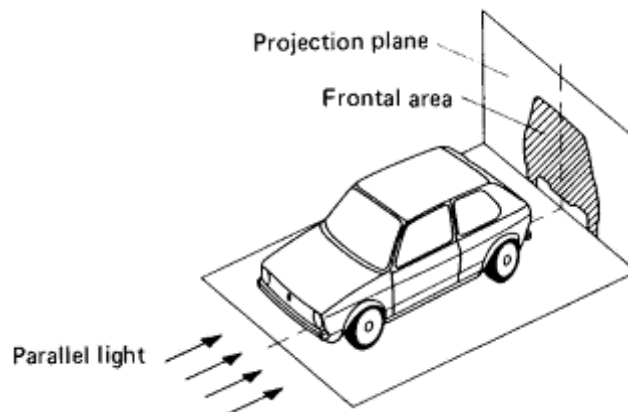
Κατά κανόνα ο μηχανισμός είναι σε ανοδική κατεύθυνση, δηλαδή τείνει να άρει το όχημα και ως εκ τούτου μειώνει αποτελεσματικά τα φορτία των τροχών. Είναι σε συνδυασμό με μια ροπή ρίψης, η οποία επηρεάζει διαφορικά τα φορτία των τροχών στο μπροστινό και πίσω μέρος. Κάτω από τα 100 km / h η άνωση και η ροπή pitch έχουν μόνο μια μικρή επίδραση επί του οχήματος, ακόμη και στον πλευρικό άνεμο. Αλλάζουν τη στάση του αυτοκινήτου σε σχέση με το δρόμο και ως εκ τούτου, επηρεάζουν ελαφρώς την αεροδυναμική αντίσταση. Η μείωση των φορτίων των τροχών, όμως, είναι μικρή σε σχέση με το στατικό φορτίο του τροχού και η σταθερότητα της κατευθυντικότητας επηρεάζεται ελάχιστα από την άνωση.

Αυτό δεν ισχύει για τα σπορ αυτοκίνητα υψηλών ταχυτήτων, όπου spoilers προστίθενται συχνά για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της ανύψωσης. Με τα αγωνιστικά αυτοκίνητα, τα φτερά εξασφαλίζουν ότι τα φορτία των τροχών αυξάνονται με την ταχύτητα

Με τους πλάγιους ανέμους η ροή του αέρα γύρω από το όχημα είναι ασύμμετρη προς το επίπεδο διαμήκης κέντρο. Το σχήμα του αυτοκινήτου πρέπει είναι τέτοιο ώστε οι πρόσθετες δυνάμεις και ροπές να παραμείνουν τόσο μικρές ώστε η σταθερότητα της κατεύθυνσης να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό. Πρώτον, η ανάγκη να αντιδράσει σε ένα πλευρικό άνεμο μεταβαλλόμενης έντασης και της κατεύθυνσης δεν είναι βολικό, καθώς ο οδηγός πρέπει να εφαρμόζει συνεχώς διορθώσεις με το τιμόνι. Δεύτερον, σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις υπάρχει ο κίνδυνος της συνολικής απώλειας του ελέγχου αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με την κατάλληλη αεροδυναμική σχεδίαση. Ωστόσο, είναι επίσης σημαντικό να αποτρέψει τους οδηγούς από το να εκπλαγούν από ριπές στην πλευρά του ανέμου, και δεν είναι σε θέση να αντιδράσει αρκετά γρήγορα. Καλύτερος σχεδιασμός δρόμων και το περιβάλλον τους μπορεί να βοηθήσει να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα.



Εικόνα 1 20:Αποτύπωση με καπνό του ομόρρου σε ένα όχημα



Εικόνα 1.21: Ορισμός της μπροστινής περιοχής ενός οχήματος

Το σχήμα 1.19 δείχνει πώς το πεδίο εξωτερικής ροής αναφέρεται σε ροή διεργασίες στο εσωτερικό του οχήματος. Η ροή στο ψυγείο προσδιορίζεται από το πεδίο ροής μπροστά από το όχημα. Μπορεί να φανεί ότι το σημείο ανακοπής είναι στο επίπεδο του προφυλακτήρα, και ότι η ροή του αέρα είναι λοξή προς τα ανοίγματα πάνω και κάτω από τον προφυλακτήρα (δε φαίνονται στο σχήμα). Η σχάρα θα πρέπει να σχεδιαστεί για να κατευθύνει αυτόν τον αέρα προς το ψυγείο, το οποίο είναι γενικά κάθετο, διατηρώντας παράλληλα την απώλεια πίεσης όσο το δυνατόν χαμηλότερα.

Η ροή είναι προσκολλημένη στην περιοχή του κοίλου χώρου που σχηματίζεται από το καπό του κινητήρα και το παρμπρίζ. Στα περισσότερα οχήματα το άνοιγμα εισόδου του φρέσκου αέρα τοποθετείται στη μέση του εν λόγω τομέα. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο η πίεση εξαρτάται από την ταχύτητα οδήγησης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροής αέρα καθώς αυξάνει η ταχύτητα, καθιστώντας τη συντήρηση σταθερών συνθηκών στο διαμέρισμα των επιβατών αρκετά δύσκολη.

Αν τα ανοίγματα εισόδου για το φρέσκο αέρα μετακινηθούν σε σημεία στο σώμα που είναι σε πίεση περιβάλλοντος, είναι δυνατόν να διαχωρισθούν τα πεδία εξωτερικής και εσωτερικής ροής, τουλάχιστον ενώ η επερχόμενη ροή είναι συμμετρική (κανένας πλευρικός άνεμος). Ο ανεμιστήρας που πρέπει να είναι αντίστοιχα μεγαλύτερος, τότε παρέχει μία ροή η οποία είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του αυτοκινήτου (αν και μόνο όταν οι αεραγωγοί εξόδου στο σώμα βρίσκονται σε περιοχές της πίεσης περιβάλλοντος).

Οι στόχοι του έργου του αεροδυναμικού σχεδιασμού που περιγράφονται παραπάνω επηρεάζονται από τον τύπο του υπό εξέταση οχήματος. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της αεροδυναμικής σχεδίασης ενός επιβατικού αυτοκινήτου, το κύριο μέλημα είναι η αντίσταση. Σε ένα μικρό λεωφορείο υψηλής ταχύτητας ή ημιφορτηγό, η μείωση της ευαισθησίας σε πλευρικούς ανέμους, μπορεί να είναι ο πρωταρχικός στόχος. Διάφορες λύσεις είναι διαθέσιμες ανάλογα με τον τύπο του οχήματος. Σε ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο ο στόχος θα είναι να βελτιωθεί η πρόσφυση των ελαστικών, χρησιμοποιώντας αρνητική αεροδυναμική άνωση, ανεξάρτητα από το στυλ, τα φτερά στο εμπρός και πίσω έχουν γίνει ακόμη χαρακτηριστικά των σύγχρονων αγωνιστικών αυτοκινήτων. Από την άλλη πλευρά, η ελαχιστοποίηση της έλξης ενός επιβατικού οχήματος πρέπει να επιτευχθεί με λιγότερο εμφανείς μεθόδους οι οποίες είναι σύμφωνες με τα τρέχοντα στυλ.

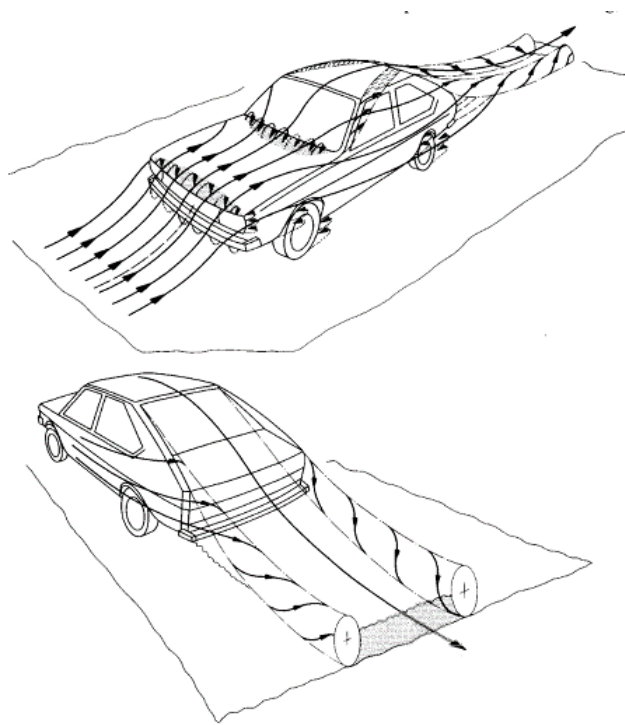
Μέθοδοι εργασίας

Στα οχήματα με κινητήρα ένας τρόπος μελέτης της αεροδυναμικής τους είναι πειραματικά. Κατ' αρχήν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ακολουθούνται. Μέχρι πρόσφατα, το έργο ξεκίνησε με ένα μοντέλο (πλήρους κλίμακας ή μικρής κλίμακας) που σχεδιάστηκε από το τμήμα σχεδιασμού. Η αεροδυναμική εξέλιξη αυτή ήταν κυρίως μικρορρύθμιση, διατηρώντας το στυλ ενώ ελάχιστα όσο το δυνατόν πράγματα έχουν αλλάξει (λεπτομέρεια βελτιστοποίησης).

Σήμερα το έργο συχνά ξεκινά με σωμα χαμηλής αντίστασης που παριστάνει ένα αυτοκίνητο στην αεροδυναμική σήραγγα.

Οι μικρότερες διαστάσεις του μηχανοκίνητου οχήματος προσφέρουν το πλεονέκτημα της δοκιμής στην αεροδυναμική σήραγγα των μοντέλων πλήρους κλίμακας ή ακόμα και έτοιμων για οδήγηση πρωτότυπων. Υπάρχουν κυρίως δύο λόγοι για τους οποίους η διαδικασία διαφέρει από αυτή του σχεδιασμού αεροσκαφών. Σε αντίθεση με ένα αεροσκάφος, ο σχεδιασμός ενός οχήματος δεν υπαγορεύεται εξ ολοκλήρου από την αεροδυναμική. Στυλ, επιδόσεις, ο χειρισμός, η ασφάλεια, η άνεση και, φυσικά, η ρύθμιση της παραγωγής είναι όλα σημαντικές εκτιμήσεις. Οι αυξημένες τιμές των καυσίμων έχουν, ωστόσο, οδήγησει σε μεγαλύτερη έμφαση στην αεροδυναμική. Οι επανειλημμένες προσπάθειες έχουν γίνει για να εφαρμοστεί τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής των αεροσκαφών των οχημάτων με κινητήρα και σημαντικά επιτεύγματα υπήρξαν στην επίλυση επιμέρους προβλημάτων. Ωστόσο, μια ολοκληρωμένη θεωρία της αεροδυναμικής των οχημάτων με κινητήρα που δεν υπάρχει ακόμα. Ο υπολογισμός της ροής του αέρα γύρω από το αεροσκάφος απλοποιείται από το γεγονός ότι τα πεδία ροής γύρω από τα μεμονωμένα συστατικά, όπως το φτερό, η άτρακτος και η ουρά της μονάδας μπορεί να αντιμετωπιστούν ξεχωριστά. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών μπορεί επίσης να αξιολογηθεί θεωρητικά. Δεδομένου ότι η ροή του αέρα είναι γενικά «προσκολλημένη», ο υπολογισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια. Πρώτον, καθορίζεται το μη συνεκτικό πεδίο ροής τότε η επίδραση της συνεκτικότητας υπολογίζεται από τη θεωρία «οριακού στρώματος». Οι θεωρητικές μεθόδους στις οποίες βασίζεται αυτή η διαδικασία αναπτύσσονται συνεχώς και έχουν επεκταθεί για να περιλάβουν άλλες απαιτήσεις, όπως αυτές που προκύπτουν από τις υψηλότερες ταχύτητες πτήσης (επιδράσεις αριθμού Mach).

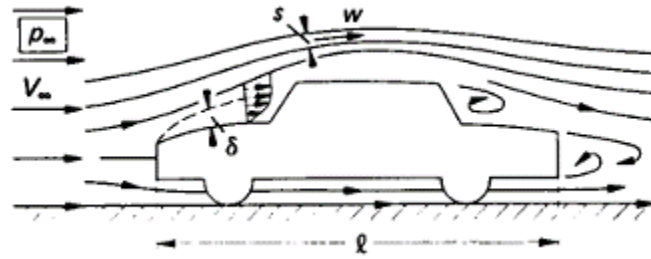
Το πεδίο ροής γύρω από ένα αυτοκίνητο δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο, για δύο λόγους. Από τα σχήματα 1.19 και 1.20, είναι σαφές ότι η ροή που περνά από ένα αυτοκίνητο διέπεται έντονα από αποκόλληση ροής. Εικόνα 1.22 παρέχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με το τύπος και η θέση της αποκόλληση ροής. Η επίδραση του ιξώδους δεν είναι πλέον περιορισμένη σε συγκριτικά μικρές ζώνες κοντά στην επιφάνεια του σώματος (Οριακό στρώμα). Επιπλέον, με ένα αυτοκίνητο, δεν είναι δυνατόν να γίνει διάκριση αρκετά περισσότερο ή λιγότερο ανεξάρτητων πεδίων ροής. Το πεδίο ροής γύρω από ένα σώμα αυτοκινήτου πρέπει να αντιμετωπίζεται ως σύνολο.



Εικόνα 1 22: Σχηματική αποτύπωση της ροής τρισδιάστατα γύρω από ένα επιβατικό όχημα

Εξωτερική ροή

Η εξωτερική ροή γύρω από ένα όχημα φαίνεται στην εικόνα 1.23. Σε συνθήκες άπνοιας, η αδιατάρακτη ταχύτητα V_∞ είναι η ταχύτητα του αυτοκινήτου. Υπό την προϋπόθεση ότι κάποια αποκόλληση ροής λαμβάνει χώρα, οι επιδράσεις συνεκτικότητας στο ρευστό περιορίζεται σε ένα λεπτό στρώμα με πάχος λίγων χιλιοστών, που ονομάζεται οριακό στρώμα. Πέρα από αυτό το στρώμα η ροή είναι μη συνεκτική και η πίεση της επιβάλλεται στο οριακό στρώμα. Εντός του οριακού στρώματος, η ταχύτητα μειώνεται από την τιμή της μη συνεκτικής εξωτερικής ροής στην εξωτερική άκρη του οριακού στρώματος στο μηδέν στο τοίχωμα, όπου το ρευστό πληροί μία κατάσταση μη ολίσθησης. Όταν η ροή διαχωρίζεται στο πίσω μέρος του οχήματος (εικόνα 1.23) το οριακό στρώμα είναι



Εικόνα 1 23: Πλευρική διδιάστατη αποτύπωση της ροής γύρω από ένα όχημα

διεσπαρμένο, και η ροή εξ ολοκλήρου διέπεται από συνεκτικές επιδράσεις. Τέτοιες περιοχές είναι αρκετά σημαντικές σε σύγκριση με το χαρακτηριστικό μήκος του οχήματος. Σε κάποια απόσταση από το όχημα, δεν υπάρχει διαφορά ταχύτητας μεταξύ του ελεύθερου ρεύματος και του εδάφους. Ως εκ τούτου, σε σταθερές συντεταγμένες του οχήματος, το επίπεδο εδάφους είναι μια επιφάνεια ρεύματος με σταθερή ταχύτητα V και σε αυτή την επιφάνεια κανένα οριακό στρώμα δεν είναι παρόν. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για την προσομοίωση της ροής γύρω από τα οχήματα σε αεροσήραγγες.

Η έννοια του οριακού στρώματος είναι μόνο έγκυρη για μεγάλες τιμές.

$$Re_l = \frac{V_\infty l}{\nu} > 10^4$$

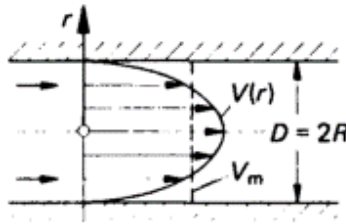
Ο χαρακτήρας της ιξώδους ροής γύρω από ένα σώμα εξαρτάται μόνο από το σχήμα του σώματος και τον αριθμό Reynolds. Για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds εντελώς διαφορετικές ροές μπορεί να εμφανισθούν για την ίδια γεωμετρία του σώματος. Έτσι, ο αριθμός Reynolds είναι η αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει μια συνεκτική ροή.

Ροές γύρω από γεωμετρικά παρόμοια σώματα που ονομάζεται «μηχανικά παρόμοια» αν ο αριθμός Reynolds έχει την ίδια τιμή για διαφορετικά μήκη σώματος, ταχύτητες αέρα V_∞ και τις ιδιότητες του ρευστού ν . Η μηχανική ομοιότητα είναι η βάση για τις δοκιμές μοντέλου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μοντέλα κλίμακας όσον αφορά τους αδιάστατους αεροδυναμικούς συντελεστές είναι ίδια όπως και για το αρχικό όχημα, αν οι αριθμοί Reynolds είναι ίσοι. Μερικές φορές είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί η απαίτηση αυτή ομοιότητα. Για τα μοντέλα μικρότερο από το αρχικό όχημα, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η ταχύτητα ελεύθερης ροής ταχύτητα V_∞ , αλλά η τιμή πρέπει να παραμένει στο χαμηλό υποηχητικά καθεστώς. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν δοκιμές σε πολύ μικρά μοντέλα σε υπερηχητική ροή από το νόμο ομοιότητας συμπιεστής ροής, που απαιτεί ίσο αριθμό Mach $Ma_\infty = V_\infty/a_\infty = ct$ και για τις δύο περιπτώσεις, που τότε θα παραβιαστεί.

Μερικές φορές θα πρέπει να διερευνηθεί η ροή γύρω από λεπτομέρειες, όπως ένας καθρέφτης, ξεχωριστά από το αυτοκίνητο. Σε μια τέτοια περίπτωση, σωστά αποτελέσματα θα λαμβάνονται

εάν οι δοκιμές εκτελούνται στον ίδιο αριθμό Reynolds ως χαρακτηριστική διάσταση της παρούσας λεπτομέρειας, για παράδειγμα η διάμετρος του κατόπτρου, και στην τοπική ταχύτητα στην περιοχή της παρούσας λεπτομέρειας στο όχημα, η οποία είναι συνήθως διαφορετική από την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος

Εσωτερική ροή



Εικόνα 1 24: Κατανομή ταχύτητας της ροής μέσα σε ένα σωλήνα

Η εσωτερική ροή είναι αυτή που περιβάλλεται από τους τοίχους στη σήραγγα. Στην απλή περίπτωση του προηγούμενου σχήματος, όλες οι γραμμές ροής είναι παράλληλες στον άξονα του σωλήνα. Γενικά, οι εσωτερικές ροές δεν μπορούν να διαιρεθούν σε μία μη συνεκτική ροή πολύ μακριά από τους τοίχους και ένα συνεκτικό οριακό στρώμα να ρέει κοντά στους τοίχους. Οι επιδράσεις της συνεκτικότητας βρίσκονται παντού στο πεδίο ροής. Η ανάπτυξη μιας εσωτερικής συνεκτικής ροής χαρακτηρίζεται ξανά από τον αριθμό Reynolds:

$$Re_D = \frac{V_m D}{\nu}$$

Βασισμένη σε ένα τυπικό πρόβλημα ταχύτητας, π.χ. την μέση ταχύτητα V_m εικόνα 1.24 και τη διάμετρο του σωλήνα ως ένα τυπικό μέγεθος. Για διαφορετικές τιμές του Re_D , διαφορετικοί τύποι ροής μπορούν να συμβούν.

Η ανάπτυξη του μη συνεκτικής ροής στο εξωτερικό άκρο του οριακού στρώματος καθορίζει την κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια του σώματος. Επομένως, κατά πρώτον θα αναλυθούν οι βασικές αρχές μιας τέτοιας ροής.

Κατ' αρχάς, ο νόμος της διατήρησης μάζας πρέπει να διατυπωθεί. Η πιο απλή μορφή του νόμου αυτού είναι για την ασυμπίεστη ροή

$$ws=ct$$

όπου το s δείχνει τη διατομή ενός σωλήνα και w είναι η τοπική ταχύτητα, η οποία θεωρείται σταθερή κατά την s . Επιπλέον η ροή υπακούει στο νόμο του Νεύτωνα για διατήρηση της ορμής: $\Sigma F = ma$. Αν αυτός ο νόμος εφαρμοστεί σε μη συνεκτική ροή, καταλήγει στο ότι οι αδρανειακές δυνάμεις και οι δυνάμεις από πίεση ισορροπούν. Η ολοκλήρωση αυτής της εξίσωσης ορμής κατά μήκος μιας γραμμής ροής για ασυμπιεστή ροή οδηγεί στην εξίσωση του Bernoulli

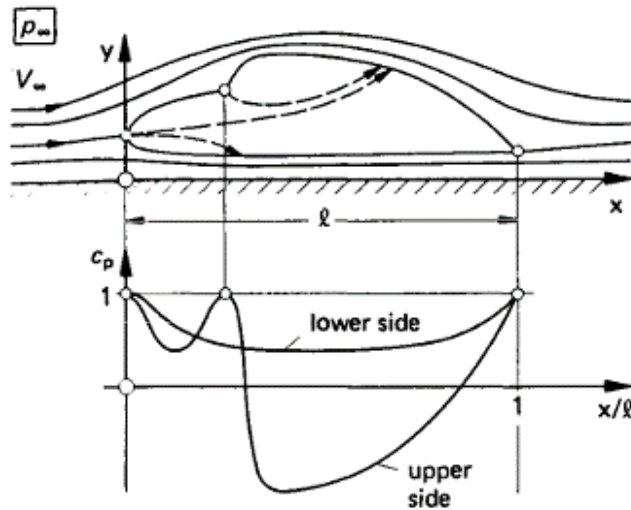
$$g = p + \frac{\rho}{2} w^2 = ct$$

Η οποία συσχετίζει την πίεση p και την ταχύτητα w ορμής κατά μήκος μιας γραμμής ροής (p είναι η στατική πίεση, $\rho w^2/2$ η δυναμική πίεση και g η συνολική πίεση).

Στη μη συνεκτική ροή, το άθροισμα της στατικής πίεσης και δυναμικής πίεσης είναι σταθερό κατά μήκος μιας γραμμής ροής. Η προηγούμενη εξίσωση υποδεικνύει ότι έχουμε χαμηλή πίεση σε περιοχές με υψηλές τοπικές ταχύτητες και αντίστροφα. Αν η ροή έρχεται σε ηρεμία, $w = 0$, ένα λεγόμενο «σημείο ανακοπής», όπως στη μύτη ενός οχήματος (Εικ. 1.23), η στατική πίεση θα υπάρχει ίση με τη συνολική πίεση, και αυτή είναι η υψηλότερη δυνατή πίεση στο πεδίο ροής. Για την εξωτερική ροή γύρω από ένα όχημα, όπως στην εικόνα 1.23, όλες οι γραμμές ροής ξεκινούν από το ίδιο ελεύθερο ρεύμα με στατική πίεση p_∞ και ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος V_∞ . Ως εκ τούτου, η συνολική πίεση g είναι σταθερά για όλες τις γραμμές ροής

$$g = p_\infty + \frac{\rho}{2} V_\infty^2 = ct$$

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις για τη μη συνεκτική ροή μπορεί να εφαρμοστούν σε απλά παραδείγματα που σχετίζονται με την αεροδυναμική του οχήματος και τις πειραματικές τεχνικές. Η δισδιάστατη ροή γύρω από ένα σώμα οχήματος σε σχήμα φαίνεται στην εικόνα 1.25. Αυτή η ροή είναι μια σημαντική απλοποίηση της μίας τρισδιάστατης ροής γύρω από ένα όχημα, και μπορεί να θεωρηθεί μια ποιοτική εικόνα της ροής στο κεντρικό τομέα του αυτοκινήτου. Το επάνω σχήμα δείχνει τις γραμμές ροής.



Εικόνα 1.25: Πεδίο ροής και κατανομή πίεσης για ένα σώμα με μορφή οχήματος σε διδιάστατη μη-συνεκτική ροή

Τρία σημεία αποκοπής συμβαίνουν - στην περιοχή της μύτης, στη γωνία μεταξύ καπό και παρμπρίζ, και στην πίσω άκρη. Η κατανομή της πίεσης στο περίγραμμα σχεδιάζεται σχηματικά ως c_p (X / l) στο κάτω σχήμα, όπου

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho V_\infty^2}{2}}, \text{ είναι ο συντελεστής αδιάστατης πίεσης.}$$

Η εφαρμογή των εξισώσεων Bernoulli $p + \frac{\rho}{2} w^2 = p_\infty + \frac{\rho}{2} V_\infty^2$ οδηγεί σε

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho V_\infty^2}{2}} = 1 - \left(\frac{w}{V_\infty}\right)^2$$

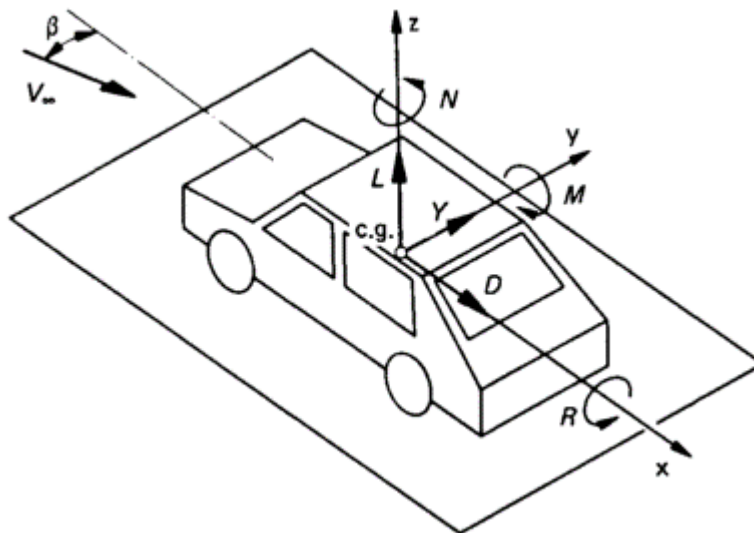
Στα σημεία ανακοπής του πεδίου ροής, $w = 0$, η παραπάνω εξίσωση αποδίδει $c_p = 1$. Στην κάτω επιφάνεια του οχήματος, η πίεση είναι υψηλότερη από την πίεση ελεύθερου ρεύματος, $c_p > 0$, αλλά για πολύ μικρές αποστάσεις έδαφους μπορεί να εμφανιστεί ακόμη και αναρρόφηση, $c_p < 0$. Στην άνω επιφάνεια, υψηλές πιέσεις, $c_p > 0$, παρατηρούνται στην περιοχή του καπό και του παρμπρίζ, ενώ υψηλή αναρρόφηση, $c_p < 0$, βρίσκεται στην οροφή του αυτοκινήτου. Στο πίσω μέρος της ανώτερης επιφάνειας του οχήματος λαμβάνει χώρα μια απότομη αύξηση της πίεσης, και είναι σε αυτή την περιοχή όπου υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της πραγματικής ροής ενός συνεκτικού ρευστού και της μη συνεκτικής ροής που δείχνεται εδώ.

Η κατανομή της πίεσης στο παραπάνω σχήμα υποδεικνύει ότι το επίπεδο πίεσης στην άνω πλευρά του οχήματος είναι πολύ χαμηλότερο από ό, τι στην κάτω πλευρά. Αυτό σημαίνει ότι μία συνισταμένη δύναμη άνωσης προς τα πάνω ενεργεί επί του οχήματος. Εάν όλες οι

συνιστώσες x-της κατανομής πίεσης επί της επιφάνειας του οχήματος ολοκληρωθούν, το αποτέλεσμα για την αντίσταση θα είναι η $D = 0$. Αυτό είναι το γνωστό παράδοξο d'Alembert, το οποίο σημαίνει ότι σε ασυμπίεστη, μη συνεκτική, δισδιάστατη ροή δεν υπάρχει αντίσταση. Στην πραγματικό συνεκτική ροή υπάρχει μια δύναμη αντίστασης, αλλά δεν μπορεί να εξηγηθεί από την εξέταση ένα ιδανικού μη συνεκτικού ρευστού.

Συνολικές δυνάμεις και ροπές

Εκτός από την αντίσταση που συζητήθηκε λεπτομερώς μέχρι τώρα, άλλες δυνάμεις και ροπές συμβαίνουν σε όχημα που φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα. Σε συμμετρική ροή ($\beta = 0$) η αντίσταση D συνοδεύεται από μια δύναμη άνωσης L (βλέπε την κατανομή της πίεσης). Επιπλέον, μια ροπή pitch M σε σχέση με τον εγκάρσιο άξονα (y-άξονας) είναι παρούσα. Τα τρία συστατικά L, D και M καθορίζουν πλήρως το διάνυσμα της προκύπτουσας αεροδυναμικής δύναμης. Για μια γνωστή θέση του κέντρου βάρους, το οποίο χρησιμοποιείται ως το σημείο αναφοράς της ροπής pitch, οι επιπλέον δυνάμεις που ασκούνται στο μπροστινό και πίσω άξονα που προκύπτει από τη ροή γύρω από το όχημα μπορεί εύκολα να αξιολογηθεί.



Εικόνα 1 26: Δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε ένα όχημα

Σε συνθήκες με καθόλου πλευρικό άνεμο ($\beta = 0$) εμφανίζεται ένα ασύμμετρο πεδίο ροής γύρω από το όχημα. Σε αυτή την περίπτωση, εκτός από τις δυνάμεις και ροπές που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής, παρατηρείται μια πλευρική δύναμη Y . Επιπλέον, δημιουργείται ροπή κύλισης R σε σχέση με τον διαμήκη άξονα (x-άξονας) και μία ροπή εκτροπής N σε σχέση με τον

κατακόρυφο άξονα (άξονα Z). Έτσι, έξι συνιστώσες L, D, M και Y, R, N καθορίζουν το διάνυσμα της συνολικής δύναμης. Για μία γνωστή θέση του σημείου αναφοράς οι πρόσθετες δυνάμεις που ενεργούν στους τέσσερις τροχούς του οχήματος μπορούν να αξιολογηθούν.

Οι δυνάμεις και ροπές που ενεργούν για οχήματα μπορούν να ληφθούν από μετρήσεις σε αεροσήραγγα για τα αυτοκίνητα σε πλήρη κλίμακα ή σε μικρότερα μοντέλα. Οι μετρήσεις τριών και έξι συνιστωσών διεξάγονται σε συμμετρική και σε ασύμμετρη ροή αντίστοιχα. Για να πάρουμε τα αποτελέσματα από τις δοκιμές μοντέλου που ισχύουν και για την πλήρη κλίμακα του οχήματος, ο νόμος της ομοιότητας Reynolds πρέπει να πληρείται. Αυτό σημαίνει ότι για αμφότερες τις περιπτώσεις, ο αριθμός Reynolds,

$$Re_l = \frac{V_{\infty} * l}{\nu}, \text{πρέπει να είναι ο ίδιος.}$$

Τα αποτελέσματα θα είναι ανεξάρτητα από τις πραγματικές διαστάσεις των δοκιμών, αν αδιάστατοι συντελεστές σχηματιστούν αναλογικά με το συντελεστή αντίστασης ως:

$$c_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A} \text{(άνωση)}$$

$$c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A} \text{(αντίσταση)}$$

$$c_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A l} \text{(ροπή pitch)}$$

$$c_{SF} = \frac{Y}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A} \text{(πλευρική δύναμη)}$$

$$c_R = \frac{R}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A l} \text{(ροπή κύλισης)}$$

$$c_Y = \frac{N}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 A l} \text{(ροπή εκτροπής)}$$

Όλοι αυτοί οι συντελεστές βασίζονται στη δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής, $\rho V_{\infty}^2/2$ και στη μεγαλύτερη διατομή, την πρόσθια περιοχή A, του σώματος. Επιπλέον, μια χαρακτηριστική διάσταση, όπως το συνολικό μήκος l του οχήματος χρησιμοποιείται για τις τρεις ροπές.

Οι αδιάστατοι αεροδυναμικοί συντελεστές μπορεί να εξαρτώνται μόνο από άλλες αδιάστατες παραμέτρους του προβλήματος ροής, π.χ. τον αριθμό Reynolds Re_l ή με τη γωνία εκτροπής β . Σε αυτή τη σχέση, συμβαίνει ένα πρόβλημα της ευστάθειας το οποίο μπορεί να εξηγηθεί για ένα όχημα σε πλευρικό άνεμο. Στην ασύμμετρη ροή, μια ροπή εκτροπής ενεργεί στο σώμα και ο αντίστοιχος συντελεστής είναι c_N . Αυτή η ροπή εκτροπής έχει την τάση να περιστρέφει το όχημα γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (άξονα z) του. Το όχημα είναι αεροδυναμικά σταθερό εάν η προκύπτουσα ροπή εκτροπής έχει την τάση να μειώσει τη γωνία εκτροπής. Με το συμβολισμό του Σχ. 1.26, αυτό ισχύει για $\frac{dc_N}{d\beta} > 0$ (σταθερό)

Αντίστροφα, το όχημα είναι αεροδυναμικά σταθερό για $\frac{dc_N}{d\beta} < 0$

Τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά τύπου κουτιού είναι γενικά αεροδυναμικά ασταθή. Μόνο πολύ μακρά και ως εκ τούτου μη αποδεκτά πίσω πτερύγια θα οδηγήσουν σε αεροδυναμική ευστάθεια σύμφωνα με την εξίσωση $\frac{dc_N}{d\beta} > 0$ (σταθερό).

Ομοίως, όπως συζητείται για τον συντελεστή αντίστασης, όλα οι άλλες δυνάμεις και ροπές μπορεί να επηρεαστούν από το κατάλληλο σχήμα του οχήματος. Χωρίς να υπεισέλθουμε σε λεπτομέρειες, μερικές δυνατότητες μπορούν να συζητηθούν. Το σχήμα του κάτω μέρους του αυτοκινήτου έχει μια μεγάλη επίδραση στη συνολική άνωση. Με μικρές αποστάσεις από το έδαφος και ένα λείο σχήμα της κάτω επιφάνειας, υψηλές ταχύτητες μπορεί να αποκτηθούν μεταξύ του οχήματος και του εδάφους. Αυτό οδηγεί σε χαμηλές πιέσεις στο κάτω μέρος του οχήματος που διατηρούν τη δύναμη άνωσης μικρή. Αποκολλήσεις ροής τύπου δίνης, που συνδέονται με κεκλιμένα σχήματα της βάσης του οχήματος, μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές συνεισφορές στη συνολική άνωση. Επιπλέον, η συμπεριφορά των οχημάτων σε συνθήκες πλευρικού-ανέμου μπορεί να επηρεαστούν αρκετά έντονα από την κατάλληλη διαμόρφωση.

Για μικρές γωνίες πλευρικού ανέμου, μπορεί να επιτρέπονται μεγαλύτερες τιμές της παραγώγου της ροπής εκτροπής $dc_N/d\beta$ αφού η ροπή εκτροπής N είναι ακόμα μικρή και το κύριο πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι να μειώσουμε την αντίσταση. Για μεγαλύτερες γωνίες εκτροπής, η αντίσταση πρέπει να αφήνεται να αυξηθεί δεδομένου ότι το κύριο πρόβλημα τώρα είναι να κρατήσουμε τη ροπή εκτροπής σε αποδεκτή τάξη μεγέθους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

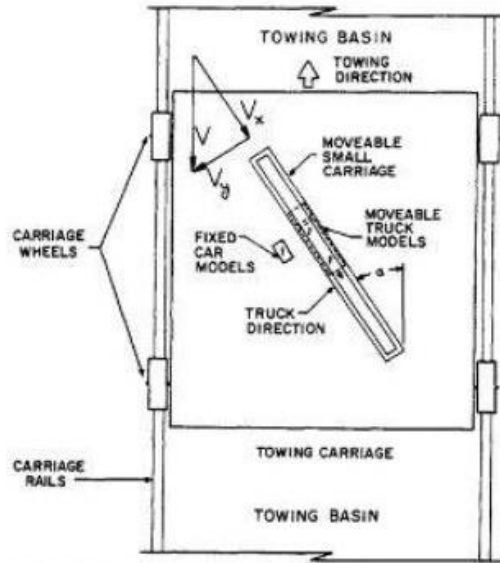
2.1. TELIONIS κ.ά:(AN EXPERIMENTAL STUDY OF HIGHWAY AERODYNAMIC INTERFERENCES), 1979 ^(4.)

Το 1979 οι **Telionis κ.ά.** διερεύνησαν πειραματικά την παρεμβολή των αεροδυναμικών δυνάμεων μεταξύ δύο οχημάτων (επιβατικά αυτοκίνητα και αρθρωτά φορτηγά). Τα αποτελέσματα ήταν κάπως ποιοτικά, αλλά δείχνουν την σωστή τάξη μεγέθους των αναμενόμενων δυνάμεων και ροπών. Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν συγκρίθηκαν με προηγούμενες εργασίες σε αυτόν τον τομέα (Brown & Seeman). Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε δεξαμενή ρυμούλκησης VPI και σε σήραγγες.

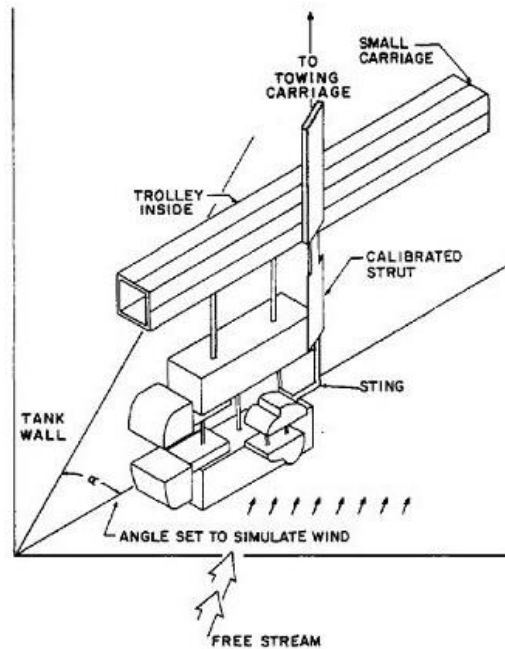
Η πειραματική έρευνα εκτελούμενη σε δεξαμενή ρυμούλκησης των δυνάμεων παρεμβολής σε οχήματα αυτοκινητόδρομων, είχε το πλεονέκτημα προσαρμογής της σχετικής ταχύτητας των διερχόμενων οχημάτων κατάλληλα για ίδιο αριθμό Reynolds, εκμεταλλευόμενοι το υπερπολλαπλάσιο ιξώδες του νερού, μπορούσαν να θέσουν τα οχήματα σε αρκετά μικρότερες ταχύτητες και να εξετάσουν πολλές περιπτώσεις λόγου σχετικής/απόλυτης ταχύτητας.

Διάταξη εγκατάστασης

- Τα μοντέλα τοποθετούνται στο καρότσι ρυμούλκησης σε γωνία πρόσβολής που αντιστοιχεί της αξονικής κατεύθυνσης της δεξαμενής ρυμούλκησης, ώστε να προσπερνούν το ένα στο άλλο δυναμικά. Αυτό εξασφαλίζεται από ένα δεύτερο μικρότερο καρότσι που ενσωματώνεται στο μεγαλύτερο καρότσι ρυμούλκησης. Η ροή του αέρα είναι αντίθετη στην κατεύθυνση ρυμούλκησης. Η ταχύτητά της ροής είναι γι' αυτό αναλυμένη σε δυο συνιστώσες : $V_x = V \cos \alpha$, $V_y = V \sin \alpha$



Εικόνα 2.1: Κάτοψη πειραματικής διάταξης



Εικόνα 2.2: Πλευρική όψη διάταξης

- Οι γραμμές τροχιάς για το μικρό καρτσάκι φέρουν στο εσωτερικό τους ένα φορείο (trolley) που κυλά πάνω σε τροχούς.

- Από το κάτω μέρος του, δύο διάτρητα υποστηρίγματα επιφανειών φτιαγμένα συμμετρικά σε μορφή αεροτομής χρησιμοποιούνται για να κρατήσουν τα δύο μοντέλα φορτηγών. Τα υποστηρίγματα (struts) μπορούν να ρυθμιστούν σε οποιαδήποτε γωνία, έτσι ώστε με το μικρό καροτσάκι ορισμένο σε μια γωνία σε σχέση με τη ροή, να μπορεί να διατηρηθεί μια μηδενική γωνία προσβολής. Αυτό φαίνεται στο τελευταίο σχήμα, όπου ευθυγραμμίζονται τα υποστηρίγματα στη διεύθυνση ροής. Τα δύο υποστηρίγματα βιδωμένα σε μία πλάκα χάλυβα με στρογγυλεμένες γωνίες, η οποία με τη σειρά της είναι βιδωμένη στην κορυφή του ανώτερου μοντέλου.
- Τα μοντέλα ήταν ξύλινα, κλίμακας 1/21 με απλή σχεδίαση, γεωμετρικά παρόμοια σε σχήμα με τα αυτοκίνητα. Η επίδραση του εδάφους προσομοιώθηκε από την μέθοδο των ειδώλων. Δοκιμάστηκαν και μοντέλα αρθρωτών φορτηγών.
- Τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν επίσης για μετρήσεις στην αεροσήραγγα μαζί με το σύστημα στήριξης, την τροχιά κύλισης και το καροτσάκι.

Μετρητική εγκατάσταση

- Έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί συστήματα ισοζυγίου για τη μέτρηση δυνάμεων και ροπών. Αποτελούνται από υποστηρίγματα με διατομή μιας συμμετρικής αεροτομής. Μετρητές τάνυσης (strain gauges) προσαρτήθηκαν και το σύστημα ήταν βαθμονομημένο για τη μέτρηση της αντίστασης, της πλευρικής δύναμης και της ροπής εκτροπής άμεσα..
- Δύο μετρητές που προσαρτημένοι-στηριγμένοι στις αντίθετες πλευρές του υποστηλώματος, χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κατεύθυνση, για να διπλασιάσουν το σήμα της τάσης.

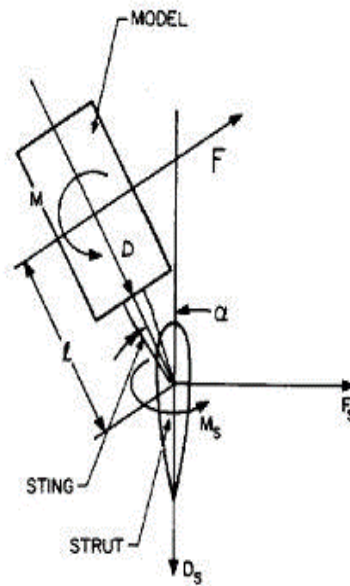
Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από τους μετρητές αντιστοιχούν στις δυνάμεις και ροπές με δείκτη s στο υποσύλωμα., όπως φαίνεται [στο σχήμα](#). Σε αυτό παρουσιάζονται μια άνοψη υπό γωνία πρόσπτωσης α και μια τομή του βαθμονομημένου υποστηλωματος.

Όμως οι πραγματικές αντιστάσεις, πλευρικές δυνάμεις και ροπή εκτροπής D , F , M προκύπτουν από το υποστήριγμα σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

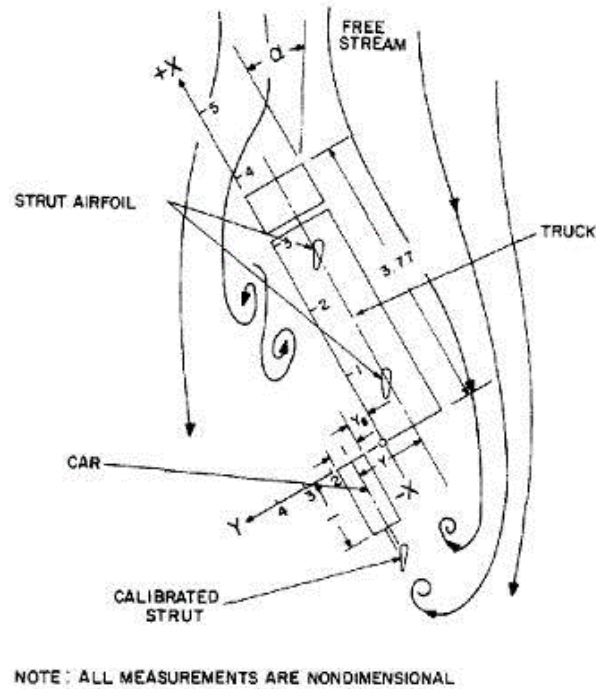
$$F = F_s \cos \alpha + D_s \sin \alpha$$

$$D = D_s \sin \alpha + F_s \cos \alpha$$

$$M = M_s + F_s l \cos \alpha - D_s l \sin \alpha$$



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση των συνιστωσών των δυνάμεων και των ροπών



Εικόνα 2.4: Σύστημα συντεταγμένων

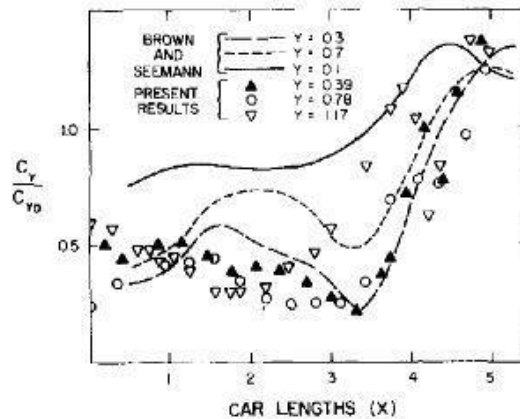
Όπως φαίνεται και από το τελευταίο σχήμα, για $X=0$ η μύτη του οχήματος ταυτίζεται με την ουρά του φορτηγού και για $X=3.77$ η μύτη του οχήματος ταυτίζεται με αυτή του φορτηγού. Τα δεδομένα των μετρήσεων ανάγονται στην ονομαστική (χωρίς παρεμβολή) τιμή τους.

Για $X < 2.5$ το αυτοκίνητο είναι πλήρως ενσωματωμένο στον ομόρρου του φορτηγού. Η ροή σε αυτή την περιοχή είναι πλήρως τυρβώδης και γι' αυτό αρκετά ανώμαλη. Η ακριβής μοντελοποίηση είναι δύσκολη, ειδικά αν ο Re δεν είναι ο ίδιος. Παρατηρούνται σχετικά μικρές αλλαγές σε αυτό το χώρο, γιατί οι επιδράσεις μειώνονται σε μέγεθος. Γι' αυτό το λόγο δίνουμε προσοχή σε περιοχές έντονων αλλαγών και αυτές συμβαίνουν στη μισή ή μια μονάδα μήκους μπροστά από αυτή την περιοχή.

Για $X \sim 3$ οι πλευρικές δυνάμεις έχουν μεγαλύτερη μείωση, η οποία ακολουθείται από ραγδαία αύξηση. Οι ενδιάμεσες τιμές για $1 < X < 2$ μπορεί να οφείλονται στη διασπορά του αέρα μεταξύ του οχήματος και του φορτηγού.

Με την εμφάνιση του οχήματος μπροστά στη μύτη του φορτηγού (δηλ. λίγο πριν την τιμή 3.77), ο C_{SF} αυξάνεται έντονα φτάνοντας το 200% της ονομαστικής τιμής του.

Οι πλευρικές δυνάμεις αυξάνονται έντονα στην περιοχή $4 < X < 5$ και τελικά ξεπερνούν την ονομαστική τιμή τους κατά 20 % και ακόμα και 30%.

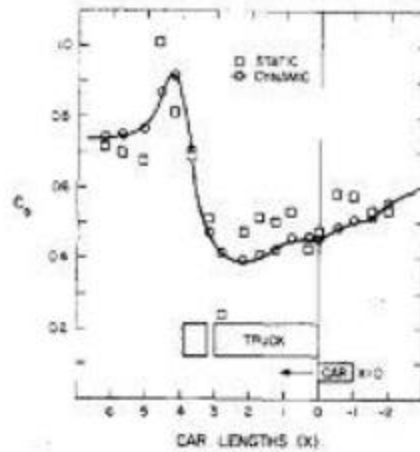


Εικόνα 2.5: Μεταβολή του συντελεστή πλευρικών δυνάμεων ανηγμένου σε αυτόν σε σταθερές συνθήκες κατά την κίνηση στον άξονα x.

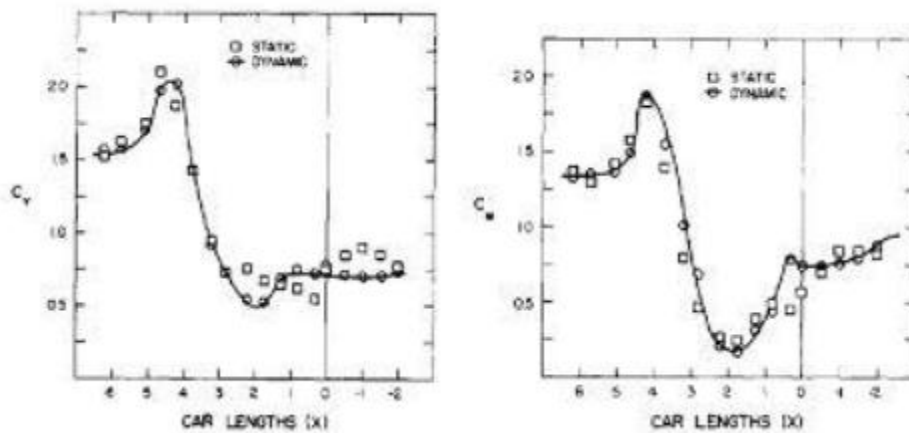
Σύγκριση δυναμικών-στατικών αποτελεσμάτων

Το φαινόμενο του παράλληλου περάσματος συμβαίνει στην πραγματική ζωή σε χαμηλές σχετικές ταχύτητες. Τα πειράματα διεξήχθησαν στατικά καθώς και δυναμικά για να διερευνηθούν τη σημασία των δυναμικών επιδράσεων. Απεδείχθη ότι, όπως αναμενόταν, δυναμικές επιδράσεις είναι μάλλον ασήμαντες, επηρεάζοντας τα μέγιστα των αεροδυναμικών συντελεστών πολύ περισσότερο από όσο τις κλίσεις τους. Τα στοιχεία που προκύπτουν από την εκτέλεση στατικών δοκιμών μπορούν να αποκλίνουν από ακριβέστερες δυναμικές δοκιμές κατά 10%.

Ενδιαφέρουσα είναι η συμπεριφορά του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D στην ίδια περιοχή. Φαίνεται ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας (C_D) αυξάνει απότομα σε σχεδόν στο διπλάσιο της αδιάραχτης τιμής του κατά τη διάρκεια του διαστήματος που το επιβατικό αυτοκίνητο είναι έτοιμο να προσπεράσει το μπροστά όριο του φορτηγού. Με άλλα λόγια, τα επιβατικά αυτοκίνητα συναντούν μια σημαντική αύξηση της οπισθέλκουσας, λες και το ηγούμενο φορτηγό ασκεί μια δύναμη έλξης.



Εικόνα 2.6: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης κατά τις διάφορες σχετικές διαμήκεις θέσεις

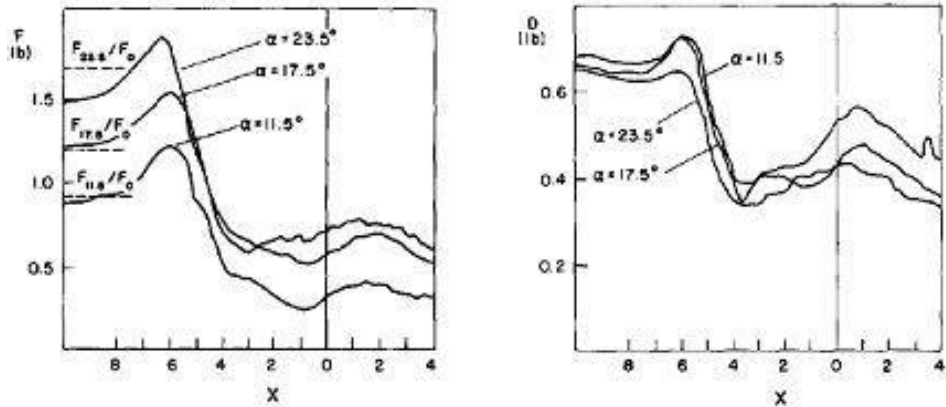


Εικόνα 2.7: Σύγκριση δυναμικών και στατικών αποτελεσμάτων των μετρήσεων για τους συντελεστές πλευρικής δύναμης και ροπής εκτροπής

Συγκρίσεις για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης ανέμου πλευρικού ανέμου στη δεξαμενή ρυμούλκησης

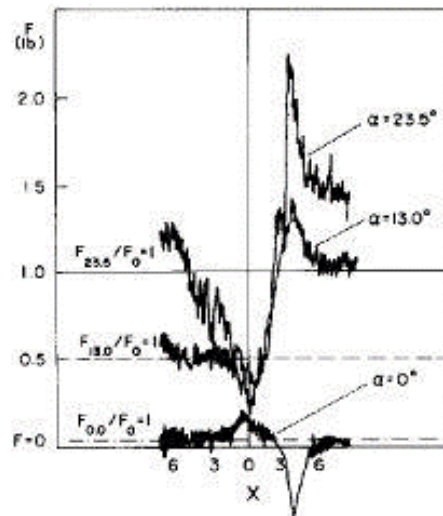
Τα παρακάτω σχήματα αντιστοιχούν σε μια τιμή πλευρικής απόστασης και διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης όσον αφορά την Fs&D. Όλα τα δεδομένα δείχνουν τη χαρακτηριστική πτώση, τη

ραγδαία αύξηση και τις υπερβάσεις. Οι επιδράσεις πλευρικής μετατόπισης εντοπίζονται στην αντίσταση και στην ροπή εκτροπής. Παρατηρείται ότι η κλίση της ραγδαίας αύξησης είναι σχεδόν συνεχής και ανεξάρτητη της γωνίας προσβολής.



Εικόνα 2.8α: Μετρήσεις πλευρικής δύναμης και αντίστασης για διαφορετικές γωνίες εκτροπής

Δοκιμές σε σήραγγα



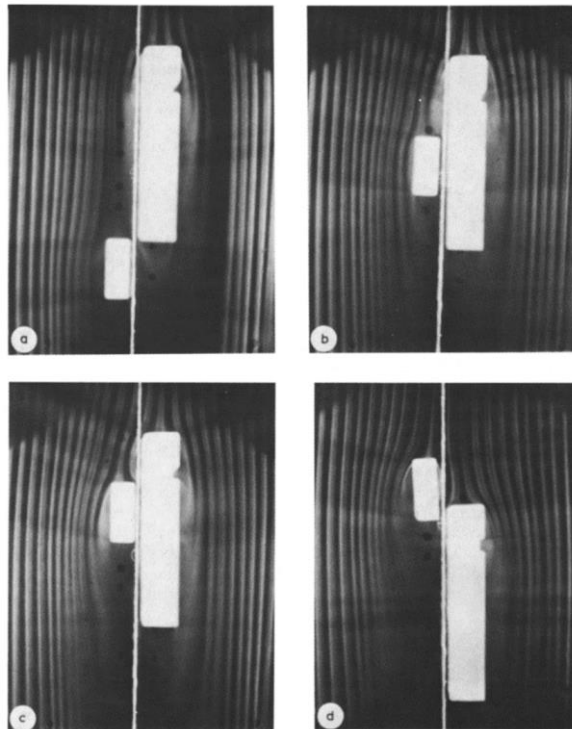
Εικόνα 2.8β: Μέτρηση της αντίστασης σε σήραγγα για διαφορετικές γωνίες εκτροπής

- Υπάρχει διαφοροποίηση για $\alpha=0$. Τα δεδομένα στη δεξαμενή ρυμούλκησης έδειχναν υπολειπόμενη δύναμη στο 50% της αδιατάραχης τιμής κατά τη γωνία προσβολής των 23.5° και μια σχετική αύξηση κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Αντίθετα αυτά στη σήραγγα δείχνουν μια αισθητά χαμηλότερη τιμή της πλευρικής δύναμης για $\alpha=0^\circ$ και μέγιστη κατ' απόλυτο αρνητική τιμή στο σημείο που όλα τα άλλα δεδομένα δείχνουν θετικό μέγιστο

Οπτικοποίηση της ροής

Ενώ από τη μέθοδο χωρίς πλευρικό άνεμο παρατηρούμε ότι η ροή χωρίζεται στις μπροστά γωνίες και ουσιαστικά εξαναγκάζει το όχημα να υφίσταται το ελεύθερο ρεύμα υπό γωνία λόγω της καμπίνας του φορτηγού, ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο ροής αναπτύσσεται, **ενώ το αυτοκίνητο πλησιάζει το περιθώριο καμπίνας-τρέηλερ**. Η ροή που δεν πέρασε ανάμεσα στα δύο οχήματα, τώρα βρίσκει διάβαση στα δεξιά.

Η ακολουθία εικόνων στο προηγούμενο δείχνει τα πεδία ροής για ένα **αυτοκίνητο που περνά στην ανάντι πλευρά ενός φορτηγού για μέτριους πλευρικούς ανέμους**. Γίνεται γρήγορα προφανές ότι κατά τη διάρκεια του περισσότερου προσπεράσματος, το μικρό όχημα βρίσκεται τον εαυτό του εντελώς βυθισμένο στον ομόρρου του φορτηγού. Στα αρχικά στάδια αυτής της διαδικασίας, οι συνθήκες χαμηλής πίεσης στον ομόρρου έχουν αποτέλεσμα ένα στρώμα αναρρόφησης της ελεύθερης ροής από την προσήνεμη πλευρά, το οποίο εμφανίζεται στη μορφή μιας δέσμης κάθετης στον άξονα του φορτηγού. Η επίδραση δεν είναι τόσο αντιληπτή σε 3D ροές. Οι πιο ενδιαφέρουσες επιδράσεις φαίνονται ενώ το μικρό όχημα πλησιάζει στο μπροστά μέρος του φορτηγού. Περνώντας από αυτήν την περιοχή, οι αεροδυναμικοί συντελεστές φτάνουν ένα μοναδικό ελάχιστο και μετά αυξάνουν ραγδαία υπερβαίνοντας τις αδιατάραχες ροές τους.

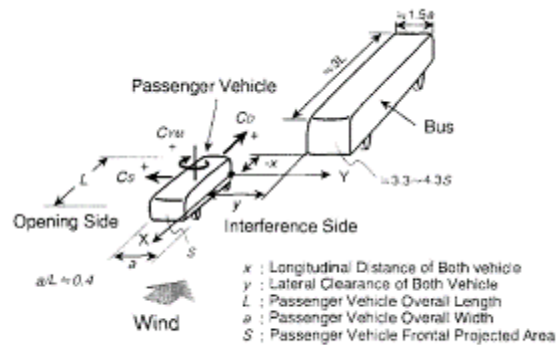


Εικόνα 2. 9: Οπτικοποίηση του πεδίου της ροής γύρω από τα δύο οχήματα

2.2. YAMAMOTO κ.ά (AERODYNAMIC INFLUENCE OF A PASSING VEHICLE ON THE STABILITY OF THE OTHER VEHICLES), 1996 ^(14.)

Το 1997 ο Yamamoto κ.ά. μελέτησαν την αεροδυναμική επίδραση ενός διερχόμενου οχήματος στη σταθερότητα κίνησης άλλων οχημάτων. Όπως είχε προκύψει από αποτελέσματα δοκιμών σε σήραγγα και σε πραγματικά αυτοκίνητα, το, το φαινόμενο παρεμβολής μπορεί να αντιμετωπίζεται ως ημιμόνιμο πρόβλημα όταν η σχετική ταχύτητα μεταξύ τους είναι μικρή. Παράλληλα εξετάστηκε η επίδραση της σχετικής ταχύτητας στην κίνηση των οχημάτων και λόγω του χρονικού διαστήματος που εφαρμοζόταν πάνω σε αυτά.

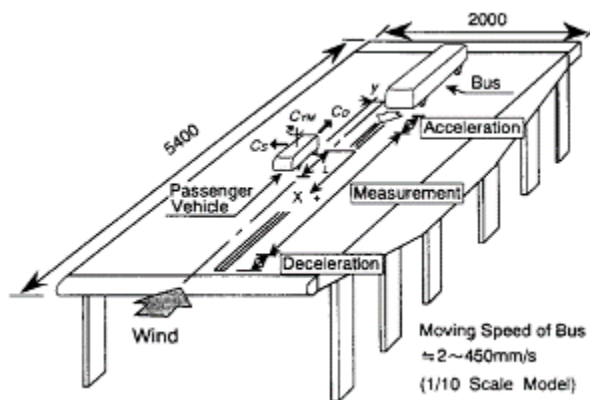
Διάταξη



Εικόνα 2. 9: Σύστημα συντεταγμένων των μετρήσεων και ορισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κλίμακας 1/10. Το μέγεθος των δυνάμεων είναι μετρήσιμο από το σύστημα ισοζυγίου 6 συνιστωσών σε σήραγγα μικρής κλίμακας. Η στατική αεροδυναμική δύναμη που προξενήθηκε από το μοντέλο λεωφορείου που τοποθετήθηκε κοντά στο επιβατικό όχημα, μετρήθηκε στη σήραγγα μικρής κλίμακας αλλάζοντας τη θέση του σχετικά με το όχημα.

Η δυναμική αεροδυναμική δύναμη υπολογίστηκε από την ολοκλήρωση της κατανομής πίεσης που μετρήθηκε από 160 μετρητές πίεσης πάνω στην επιφάνεια του οχήματος. Στην κάτω εικόνα φαίνεται ο πειραματικός εξοπλισμός όπως τοποθετήθηκε σε σήραγγα κανονικής κλίμακας.



Εικόνα 2. 10: Εξοπλισμός δοκιμών για τη μέτρηση μεταβαλλόμενων χρονικά αεροδυναμικών δυνάμεων

Το μοντέλο λεωφορείου μετακινήθηκε από το πίσω μέρος του οχήματος στην ροή που αντιστοιχεί στην ταχύτητα του οχήματος. Έτσι προσομοιώνεται το φαινόμενο αεροδυναμικής παρεμβολής που προξενείται από το πέρασμα του μοντέλου λεωφορείου. Η παροδική αεροδυναμική δύναμη υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της κατανομής πίεσης πάνω στην επιφάνεια του οχήματος, που δημιουργήθηκε από το πέρασμα του μοντέλου λεωφορείου.

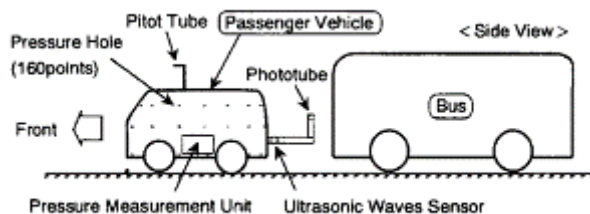


Fig. 3. Testing method in full-scale vehicles.

Εικόνα 2. 11: Μέθοδος μετρήσεων σε οχήματα πλήρους κλίμακας

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο της πειραματικής μεθόδου σε οχήματα κανονικής κλίμακας. Η παροδική αεροδυναμική δύναμη υπολογίζεται όπως περιγράφηκε για τη μέθοδο σε σήραγγα κανονικής κλίμακας. Η πλευρική απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων καταγράφεται συνεχώς από έναν αισθητήρα υπερηχητικών κυμάτων. Η διαμήκης απόσταση εκτιμάται από ένα φωτιστήρα για να καθοριστεί η σταθερή θέση.

Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος επηρεάζονται από το πέρασμα του λεωφορείου μελετάται στατικά όπως δείχνει το επόμενο διάγραμμα. Όταν η μύτη του λεωφορείου φτάσει το πίσω άκρο του οχήματος έχουμε τις μέγιστες τιμές των συντελεστών αντίστασης και πλευρικής δύναμης (C_D , C_{SF} αντίστοιχα), ενώ όταν αυτή φτάσει στην κεντρική

θέση του οχήματος, γίνεται μέγιστος ο συντελεστής της ροπής εκτροπής c_y , με κατεύθυνση της περιστροφής προς την απέναντι πλευρά του λεωφορείου. Αυτό όπως εξηγείται, οφείλεται στη διαφορά πίεσης που υπάρχει στις πλευρές του αυτοκινήτου. Η θετική πίεση στην εσωτερική του πλευρά (που δημιουργήθηκε λόγω της θετικής στο μπροστινό άκρο-σημείο αποκοπής- του λεωφορείου), μιας και στην εξωτερική πλευρά του υπάρχει αρνητική πίεση, ωθεί το όχημα σε αντίθετη κατεύθυνση από το λεωφορείο.

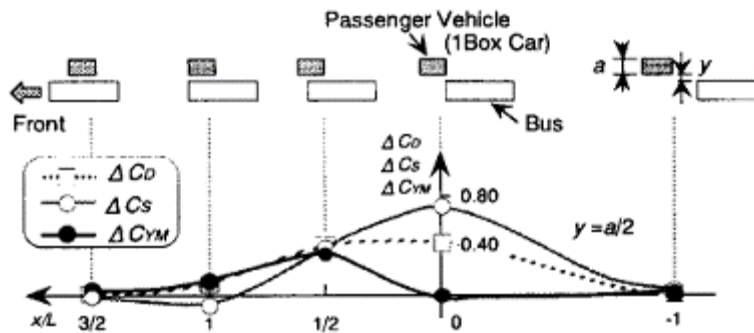


Fig. 4. Variation of aerodynamic forces on a passenger vehicle.

Εικόνα 2. 12: Διακύμανση αεροδυναμικών συνάμεων σε ένα επιβατικό όχημα

Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν ότι οι c_D , c_S , c_Y αυξάνουν σε μέγεθος, όταν το λεωφορείο πλησιάζει προς το όχημα. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των οχημάτων αυτών δείχνουν μόνο μια μικρή εξάρτηση από το σχήμα του σώματός τους, και είναι ποιοτικά τα ίδια, αν και οι αεροδυναμικές δυνάμεις στα οχήματα της 2^{ης} και 3^{ης} περίπτωσης είναι μικρότερες από αυτές της 1^{ης}. (Τα μοντέλα 2 και 3 έχουν μικρότερο ύψος από το 1, άρα και μικρότερη επιφάνεια)

Έτσι παρατηρούμε, ότι η θέση στην οποία έχουμε τις μέγιστες τιμές σε c_D , c_S διαφέρει ελαφρά για όχημα τύπου 2 και 3. Αφού η μικρότερη πλευρική περιοχή του οχήματος, όπου η πίεση αυξάνεται σε μέγεθος, ως αποτέλεσμα της παρεμβολής ροής, δεν μπορεί να προκαλέσει μείωση των αεροδυναμικών δυνάμεων

Η πλευρική περιοχή των περιπτώσεων 2 και 3, που είναι μικρότερη από της 1^{ης}, δεν απομόνωσε τη ροή στη θέση $x / L = 0$, ως εκ τούτου η μέγιστη τιμή της αεροδυναμική δύναμης έρχεται σε πιο μπροστινές περιοχές κατάντι στη ροή. (σχετική θέση $\sim 0,3$ αντί για 0).

Ως αποτέλεσμα, μια αύξηση στην πίεση στην πλευρά παρεμβολής (εσωτερική) του οχήματος συμβανει μετά βίας (επισήμανση α), και γίνεται μικρή η περιοχή διαχωρισμού της ροής στο μπροστινό μέρος του επιβατικού οχήματος στην προς τα έξω πλευρά γίνεται μικρή(επισήμανση c)

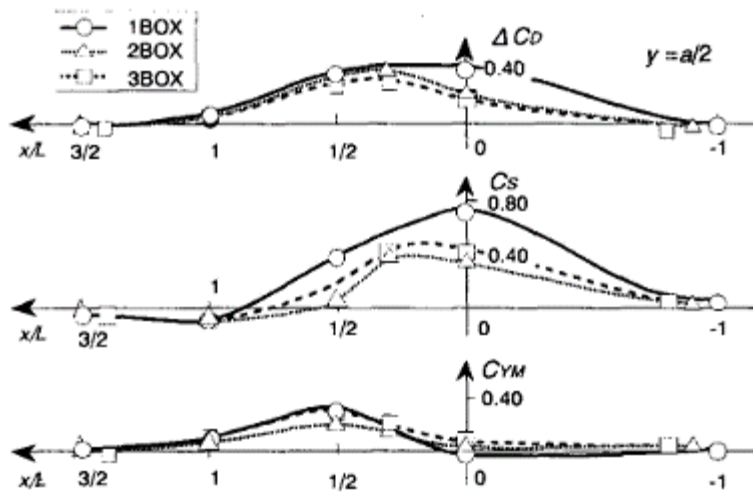
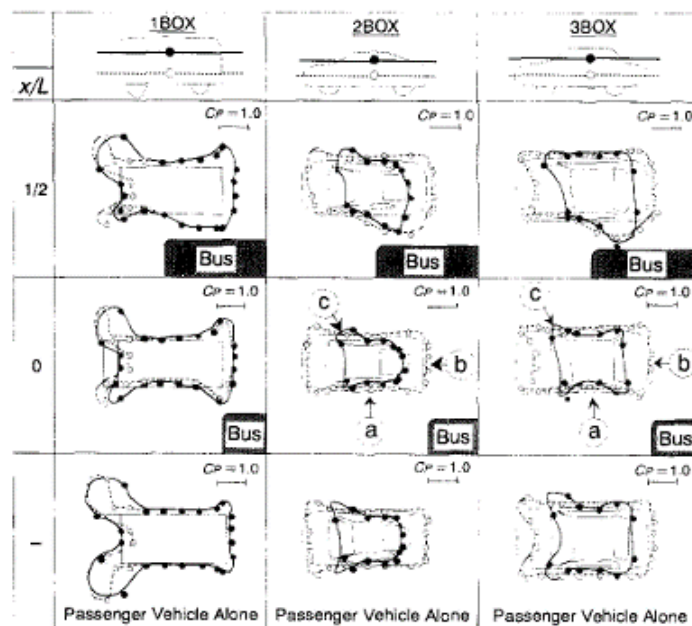


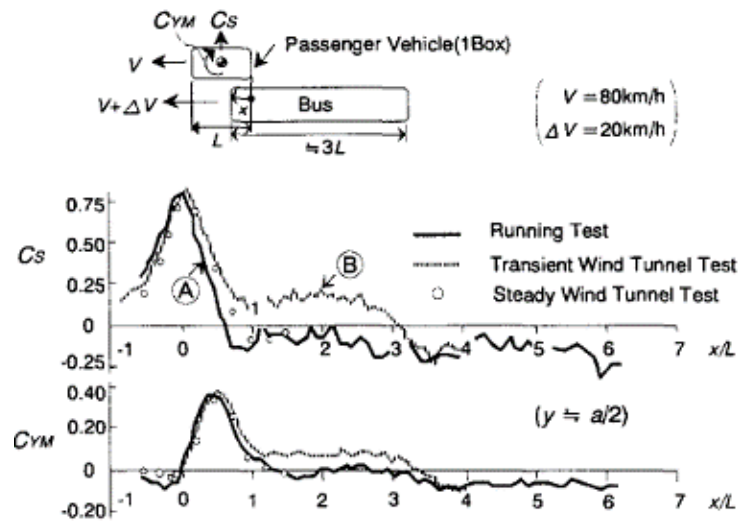
Fig. 6. Effect of body shape on C_D , C_S and C_{YM} .

Εικόνα 2. 13: Επίδραση του σχήματος του σώματος στους συντελεστές αντίστασης, πλευρικής δύναμης και ροπής εκτροπής



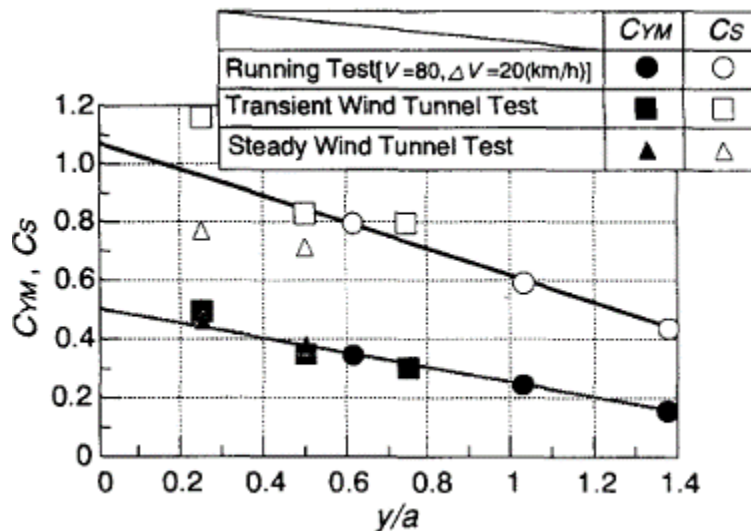
Εικόνα 2. 14: Σύγκριση της επιφανειακής κατανομής πίεσης για πλευρική απόσταση μεταξύ των οχημάτων ίση με το μισό του πλάτους

Δυναμική επιρροή πάνω στο όχημα



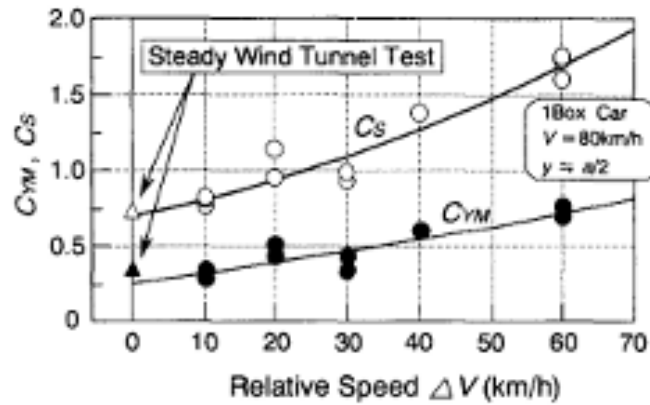
Εικόνα 2. 15: Διακύμανση των συντελεστών πλευρικής δύναμης και ροπής εκτροπής κατά την κίνηση στον άξονα x

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών με την οδήγηση οχημάτων κανονικής κλίμακας, και της δυναμικής και στατικής επίδρασης σε σήραγγα. Αυτές συμπίπτουν στην περιοχή του μέγιστου, αλλά η περίπτωση πραγματικών διαστάσεων και αυτή της δυναμικής επίδρασης διαφοροποιούνται στην περιοχή σταθερής κατάστασης (επισήμανση B), λόγω της ροής στα απλοποιημένα πλευρικά τοιχώματα του μοντέλου και των διακυμάνσεων του ανέμου στην πραγματική περίπτωση.



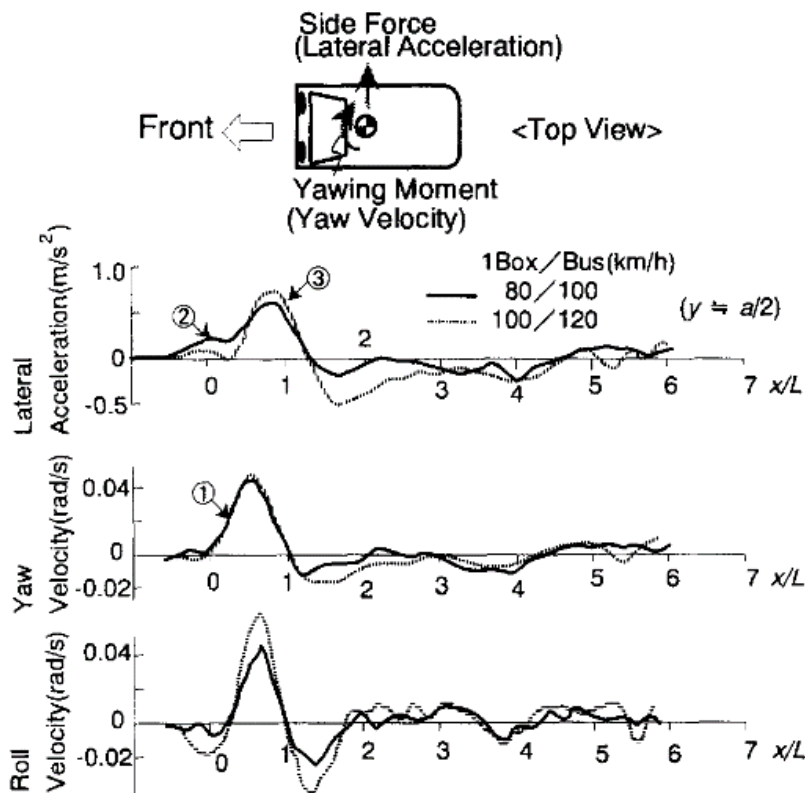
Εικόνα 2. 16: Επίδραση της πλευρικής απόστασης μεταξύ των οχημάτων

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μείωση των αεροδυναμικών δυνάμεων με την αύξηση της πλευρικής απόστασης μεταξύ των οχημάτων.



Εικόνα 2. 17: Διακύμανση των συντελεστών πλευρικής δύναμης και ροπής εκτροπής για μεταβαλλόμενη σχετική ταχύτητα μεταξύ των οχημάτων

Εδώ παρατηρείται αύξηση των αεροδυναμικών δυνάμεων με την αύξηση της σχετικής ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων.



Εικόνα 2. 18: Διακύμανση της πλευρικής επιτάχυνσης, της ταχύτητας εκτροπής (yaw) και της ταχύτητας κύλισης (roll) κατά την κίνηση στον άξονα x.

Στο παραπάνω σχήμα εξετάζεται η επίδραση των αεροδυναμικών δυνάμεων που προκαλείται από τη διέλευση λεωφορείου στη σταθερότητα του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια του τεστ με οδήγηση.

Το όχημα έστριψε το μπροστά μέρος του προς την ανοιχτή (προς τα έξω) πλευρά για $x/L=0.1$. (1) Η πλευρική επιτάχυνση αυξάνει σύμφωνα με το συντελεστή αντίστασης C_s (2) και φτάνει στο μέγιστο υπό την επίδραση C_s και του C_{ym} . Η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζεται κυρίως από την πλευρική επιτάχυνση, ενώ η σταθερότητα στην κίνηση του επιβατικού οχήματος εξαρτάται από το μέγεθος της επιρροής της αεροδυναμικής δύναμης, ώστε μια υψηλή ταχύτητα ταξιδιού του οχήματος έχει μια σημαντική επίδραση ακόμα και στην ίδια σχετική ταχύτητα.

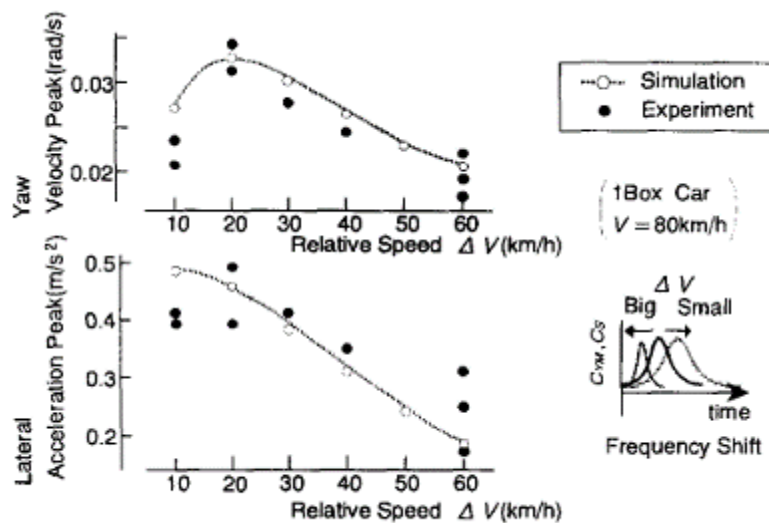


Fig. 13. Influence of relative speed on vehicle motion.

Εικόνα 2. 19: Επιρροή της σχετικής ταχύτητας στην κίνηση ενός οχήματος

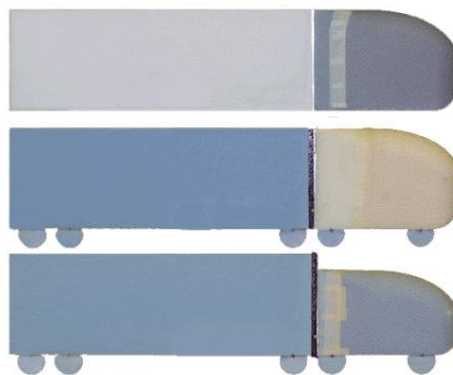
Στο προηγούμενο σχήμα απεικονίζεται η επιρροή της σχετικής ταχύτητας στην κίνηση ενός οχήματος αναλυτικά και πειραματικά. Με σταθερό μέτρο της ασκούμενης δύναμης, λήφθηκαν διάφορες τιμές για το χρόνο επίδρασης της αεροδυναμικής δύναμης μεταβάλλοντας τη σχετική ταχύτητα. Στο διάγραμμα η ταχύτητα εκτροπής και η πλευρική επιτάχυνση μειώνονται κατά την αύξηση της σχετικής ταχύτητας, ελαττώνοντας την επίδραση στην κίνηση του οχήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός εφόσον το μέγεθος της αεροδυναμικής δύναμης λαμβάνεται σταθερό, με την αύξηση της σχετικής ταχύτητας μειώνεται ο χρόνος επίδρασης πάνω στο όχημα, ο οποίος φαίνεται να έχει κυρίαρχη επιρροή σε σχέση με το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης.

2.3. HAMMACHE κ.ά (AERODYNAMIC FORCES ON TRUCK MODELS, INCLUDING TWO TRUCKS IN TANDEM), 2001 ^(10.)

Το 2001 οι Hammache, Michaelian, Browand ασχολήθηκαν πειραματικά με την παρεμβολή των αεροδυναμικών δυνάμεων σε απλοποιημένα μοντέλα αρθρωτών φορτηγών. Το πείραμα έγινε σε αεροσήραγγα με χρήση συστήματος καταγραφής των 6 συνιστωσων δυνάμεων και ροπών πάνω στο μοντέλο.

Τα μοντέλα είχαν λείο το μπροστινό τους μέρος (καμπίνα) ώστε να μη συμβεί αποκόλληση της ροής για μηδενική εκτροπή. Το πίσω μέρος τους (τρέηλερ) είχε στρογγυλεμένες μπροστινές κάθετες ακμές $R=45 \text{ mm}$ και αιχμηρές ακμές πάνω και κάτω. Υπήρχε διακύμανση στην απόσταση μεταξύ τους και η γωνία εκτροπής μεταξύ του επιπέδου συμμετρίας του μοντέλου και τον άξονα του αέρα της σήραγγας. Η ακτίνα καμπυλότητας της καμπίνας επιλέχθηκε για να εξασφαλίσει ότι δε θα συμβεί πρόωρη αποκόλληση στη ροή στους αριθμούς Re που γίνεται το πείραμα. (>70000).

Η αντίσταση αυτού του απλού σχήματος μπορεί να αυξηθεί με την τοποθέτηση ενός λεπτού επιφανειακού καλύμματος πάνω στην καμπίνα (10% αύξηση αντίστασης), κολλάρα κοντά στο μπροστινό μέρος του τρέηλερ για να αυξηθεί το πάχος του οριακού στρώματος και η αντίσταση (9% αύξηση) και ρόδες (25% αύξηση) και μία διαφορά ύψους 15% μεταξύ μπροστινού και πίσω μέρους (9% αύξηση της αντίστασης). Έτσι χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά μοντέλα φορτηγών.



Εικόνα 2. 20: Διαφοροποιήσεις στη μορφή των φορτηγών

Χαρακτηριστικά αντίστασης	C_D σε απομόνωση
Απλό φορτηγό <ul style="list-style-type: none"> • Χωρίς ρόδες • Όχι κολλάρο αντίστασης 	$C_D=0,427$

<ul style="list-style-type: none"> • (Δικτυωτή) κουκούλα 	
Συνθετο φορτηγό <ul style="list-style-type: none"> • Ρόδες • Κολάρο αντίστασης • Κουκούλα 	$c_D = 0,544$
«Με διαφορά ύψους» φορτηγό <ul style="list-style-type: none"> • 15% διαφορά ύψους • Ρόδες-20% • Κολάρο αντίστασης • Κουκούλα 	$c_D = 0,586$

Η γωνία εκτροπής μπορούσε να μεταβληθεί από 0-16 μοίρες.

Το μήκος του μπροστινού μέρους ήταν 331.47mm και του πίσω 685mm (χωρίς απόσταση μεταξύ τους συνολικό μήκος 983 mm) αντιστοιχώντας σε πραγματικές διαστάσεις 16.5 m.

Στην περίπτωση της παρεμβολής δύο φορτηγών, καθένα από αυτά συνδέεται σε ένα εσωτερικό υποζύγιο ικανό να μετρήσει την αντίσταση στο εύρος $\pm 14N$.

Ο κάθε ζυγός ήταν στο ίδιο ύψος με το κάτω μέρος του φορτηγού, συνδεδεμένος με δύο λεπτά ατσάλινα δοκάρια σε ένα καρότσι ελεγχόμενο από βηματικό κινητήρα κάτω από το επίπεδο του εδάφους.

Αντίθετα οι μετρήσεις σε απομόνωση καθενός φορτηγού ξεχωριστά γίνονται με ένα ισοζύγιο που μπορεί να μετρήσουν δυνάμεις ως και 200N.

Ευθυγράμμιση οχημάτων και τοποθέτησή τους

Όταν δύο φορτηγά τρέχουν παράλληλα, έχουν τοποθετηθεί και ευθυγραμμίζονται ως εξής. Το πίσω φορτηγό τοποθετήθηκε στο περιστρεφόμενο δίσκο εκτροπής, και ευθυγραμμίστηκε με την ελεύθερη ροή αυξάνοντας τη γωνία εκτροπής μέχρι η πλευρική δύναμη και η ροπή εκτροπής να είναι ουσιαστικά μηδέν. Το μπροστά όχημα στη συνέχεια τοποθετείται σε ένα ξεχωριστό εξάρτημα μπροστά από το δίσκο εκτροπής. Αυτό το εξάρτημα επιτρέπει την πλευρική μετάθεση του φορτηγού, καθώς και μια μικρή διόρθωση της γωνίας εκτροπής. Το μπροστινό φορτηγό στη συνέχεια τοποθετείται ακριβώς μπροστά και παράλληλα από το πίσω φορτηγό όπως φαίνεται από έναν παρατηρητή ανάντι στη σήραγγα. Ο κινητήρας μεταβάλλει τη θέση του

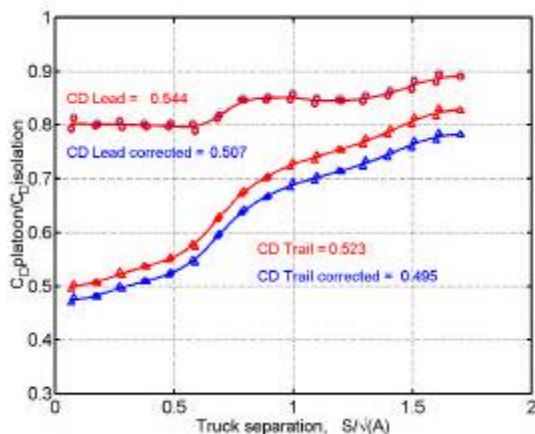
πίσω φορτηγού. Από τη θέση μηδενικής απόστασης που τα οχήματα είναι σε απόσταση ≈ 13 mm σε 16 βήματα των 2cm, φτάνουν στη μέγιστη απόσταση των 332.7 mm, $1.67 \cdot A^{0.5}$.

Για να εξεταστεί κάθε φορτηγό ξεχωριστά σε εκτροπή, η καμπίνα και το τρέηλερ τοποθετούνται σε ξεχωριστά εξαρτήματα πάνω στο δίσκο εκτροπής. Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση μεταξύ της καμπίνας και του τρέηλερ δημιουργείται πηγαίνοντας το τρέηλερ προς τα πίσω. Η θέση μηδενικής απόστασης μεταξύ τους αντιστοιχεί σε 2mm και υπάρχουν συνολικά 20 θέσεις με αυξήσεις 10-20 mm για μια συνολική απόσταση των 282 mm. Το τρέηλερ τότε επανέρχεται σε μηδενική απόσταση με την ίδια ακολουθία αυξήσεων.. Καμπίνα και τρέηλερ εκτρέπονται σαν ένα σώμα με 21 βήματα 1-2 μοιρών. Η εγκάρσια ακολουθία ξεκινά για μηδενική εκτροπή και μηδενική απόσταση και μετακινείται για όλα τα διαστήματα. Η μεγαλύτερη αρνητική γωνία εκτροπής εφαρμόζεται μετά και οι ίδιες αποστάσεις δοκιμάζονται. Η δειγματοληψία γίνεται για όλες τις αρνητικές γωνίες εκτροπής –περνώντας από τη μηδενική εκτροπή με βήμα +2 μοίρες και γυρνώντας πίσω τελικά στη μηδενική.

Η ταχύτητα στη σήραγγα κυμαίνεται από 16 σε 26 m/s αντιστοιχώντας σε Re 210000 με 360000.

Η διαμήκης απόσταση μεταξύ των 2 φορτηγών ανάγεται στην τετραγωνική ρίζα της διατομής των φορτηγών $A^{0.5} = 0.1955 \text{ m} = 195.5 \text{ mm}$

Ανάλυση σε διαγράμματα

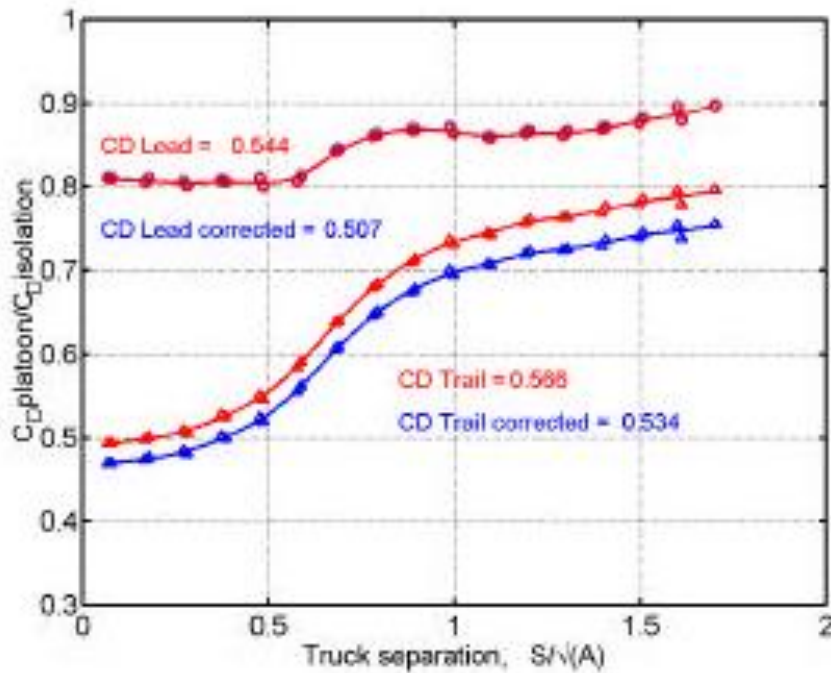


Εικόνα 2. 21: Διάγραμμα του λόγου συντελεστών αντίστασης των οχημάτων σε παρεμβολή και σε απομόνωση συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των δύο «σύνθετων» φορτηγών.

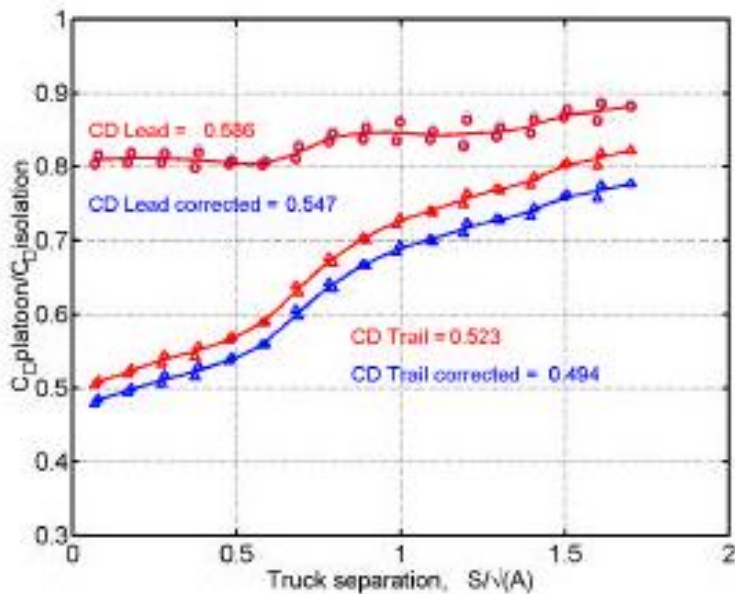
Σε ανηγμένη απόσταση μέχρι και 0.5 η μείωση του συντελεστή αντίστασης του πίσω φορτηγού φτάνει το 50%. Στο διάστημα 0.5 με 1 παρατηρείται τεράστια αύξηση στο c_D του πίσω που φτάνει στο 70% της τιμής σε απομόνωση. Σε μετέπειτα αποστάσεις η αύξηση συνεχίζει αλλά είναι πιο σταδιακή. Όλες οι καμπύλες του c_D για το πίσω όχημα έχουν παρόμοια μορφή, αν και το μέγεθος των μειώσεων στην αντίσταση ποικίλλει λόγω των διαφορετικών τιμών των c_D μεταξύ

των διάκριτων περιπτώσεων φορτηγών σε απομόνωση. Η αρχική σταδιακή αύξηση για μικρή απόσταση μεταξύ των φορτηγών αποδίδεται στην ύπαρξη ανακυκλοφορούμενης δομής ροής σε μορφή κοιλότητας ανάμεσα σε αυτά. Η συγκεκριμένη δομή ροής αποτελείται από μια σχετικά σταθερή δομή σπειροειδούς δίνης. Η ραγδαία αύξηση στο πίσω φορτηγό μεταξύ των τιμών 0.5 με 1 είναι αποτέλεσμα της εξαφάνιση αυτής της δομής. Η ροή διαμέσου της κοιλότητας γίνεται εξαιρετικά ασταθής και η δίνη εμφανίζεται στην κοιλότητα για μικρότερες χρονικές περιόδους. Μετά την ανηγμένη θέση 1.0, η ροή έχει μεταβεί σε μια δομή ομόρρου έγχυσης δινών που είναι χαρακτηριστική της ροής πίσω από απομονωμένα μη αεορδυναμικά σώματα.

Τα εξής σχήματα δείχνουν τη σχετικά μικρή επίδραση του συντελεστή αντίστασης c_d του μπροστά και πίσω οχήματος χρησιμοποιώντας μια διαφορά ύψους μεταξύ καμπίνας και τρέηλερ. Πάλι τα φορτηγά παρουσιάζουν μια μείωση στην αντίσταση, με μεγαλύτερη αυτή του πίσω οχήματος.

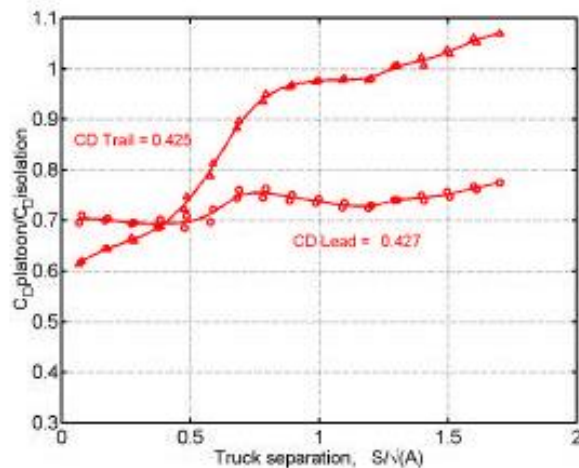


Εικόνα 2. 22: Ηγούμενο φορτηγό τύπου 'σύνθετο' με ακολουθία από φορτηγό τύπου 'σύνθετο' και με διαφορά ύψους



Εικόνα 2.24 :Ηγούμενο φορτηγό τύπου ‘σύνθετο’ με ακολουθία από φορτηγό με διαφορά ύψους

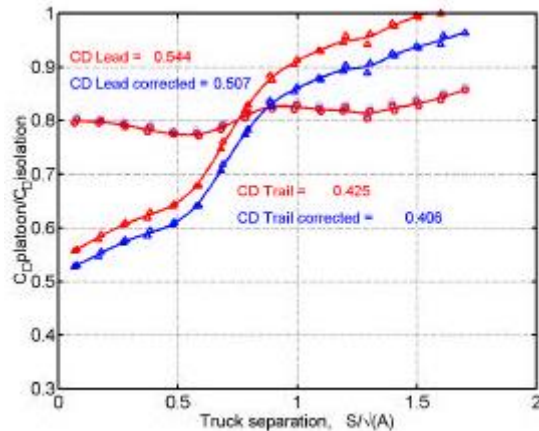
Το παρακάτω σχήμα δείχνει το αποτέλεσμα των δοκιμών για δύο απλές περιπτώσεις φορτηγών. Ας σημειωθεί ότι οι συντελεστές αντίστασης (σε απομόνωση) είναι σχετικά χαμηλοί, και ότι το αποτέλεσμα της μελέτης δεν βοηθά στην κατανόηση του φαινομένου, αφού το ηγούμενο φορτηγό ωφελείται κυρίως από την πορεία σε κομβόι. Το πίσω φορτηγό τελικά παρουσιάζει υψηλότερη πίεση από όσο στην περίπτωση απομόνωσης.



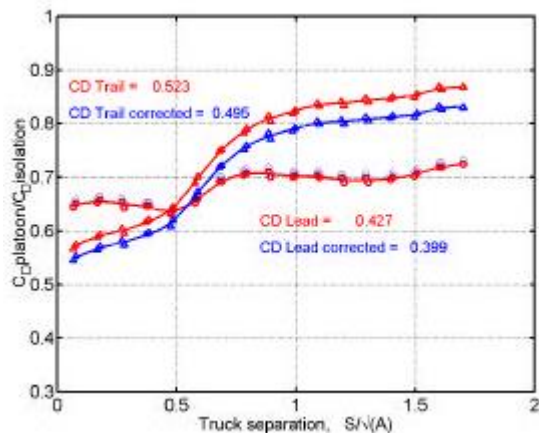
Εικόνα 2.25 :Ηγούμενο φορτηγό τύπου ‘απλό’ σε ακολουθία από φορτηγό τύπου ‘απλό’

Στις κάτωθι περιπτώσεις ακολουθούν τα αποτελέσματα δοκιμών μεταξύ απλών και σύνθετων αεροδυναμικά φορτηγών. Αποδεικνύεται ότι η ακολουθία απλού μπροστινού φορτηγού από σύνθετο είναι πολύ πιο ωφέλιμη από όσο η ανάποδη διάταξη.

Όντας μπροστά, το απλό όχημα αυξάνει κατά 10% την τιμή του C_D σε απομόνωση. Και αυτό γιατί το «σύνθετο» πίσω φορτηγό επιβάλλει μία αύξηση της πίεσης βάσης - πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα δημιουργούσε ένα «απλό». Αντίθετα, έχοντας το απλό στο πίσω μέρος εξαφανίζεται η επίδραση της βάσης του ηγούμενου 'σύνθετου'.



Εικόνα 2. 26: Ηγούμενο φορτηγό τύπου 'σύνθετο' με ακολουθία από τύπου 'απλό' φορτηγό



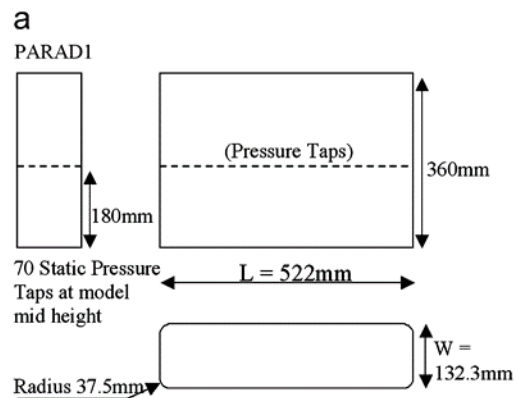
Εικόνα 2. 27: Ηγούμενο φορτηγό τύπου απλό ακολουθούμενο από τύπου σύνθετο

2.4. CORIN κ.ά. (A CFD INVESTIGATION INTO THE TRANSIENT AIRFORCES ON OVERTAKING ROAD VEHICLE MODELS), 2008 ^(12.)

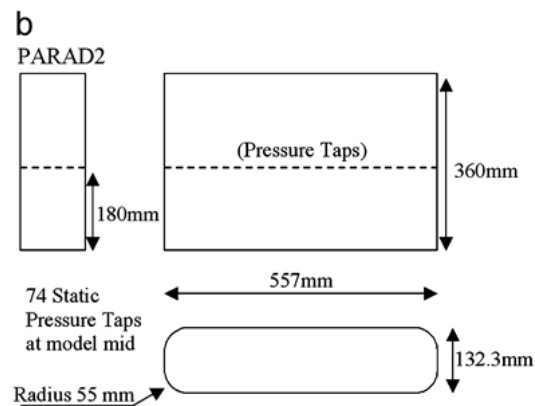
Το 2008 οι Corin, He, Dominy μελέτησαν τις παροδικές αεροδυναμικές δυνάμεις κατά τους ελιγμούς προσπέρασης ενός οχήματος από ένα άλλο υπό την επίδραση πλευρικού ανέμου χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Η σχετική ταχύτητα μεταξύ των οχημάτων μεταβαλλόταν για να γίνει συγκριση της ημι-μόνιμης και ασταθούς(=δυναμικής) μεθόδου.

Έγινε πειραματική δοκιμή σε σήραγγα στατικά σε κάθε ένα από τα μοντέλα σε απομόνωση για να παρέχει τα δεδομένα δοκιμών για την επικύρωση του επιλυτή στον υπολογιστή. Χρησιμοποιήθηκαν 2D μοντέλα, στα οποία είχαν τοποθετηθεί βαλβίδες πίεσης στο μεσαίο ύψος τους, ενώ πλάκες αλουμινίου με πλάγιες άκρες πάνω και κάτω από τα μοντέλα κάθετα στη ροή για να μειωθεί ο 3D χαρακτήρας της ροής. Τα μοντέλα προσκολλήθηκαν στο πάτωμα της σήραγγας σε τέσσερις κυλινδρικούς διαχωριστές για να αποφευχθεί η επίδραση του οριακού στρώματος του πατώματος της σήραγγας.

Τα πειράματα έγιναν με μέγιστη ταχύτητα στη σήραγγα στα 29 m/s που αντιστοιχούσε σε $Re=9.8 \cdot 10^5$



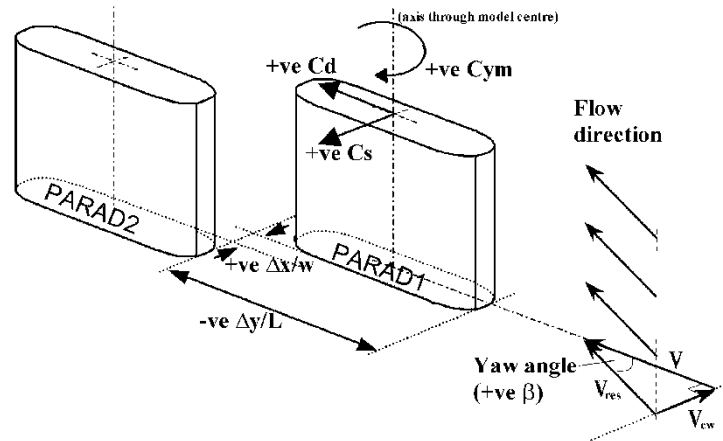
Εικόνα 2. 28: Διαστάσεις του μοντέλου τύπου 1 (προσπερασμένο όχημα)



Εικόνα 2. 23: Διαστάσεις του μοντέλου τύπου 2 (προσπερνόν-διερχόμενο όχημα)

Στη διάταξη θεωρούνται δύο μοντέλα: το M1 (προσπερασμένο όχημα) με μήκος 522 mm και πλάτος 132.3 mm, οι διαστάσεις του οποίου θα χρησιμοποιηθούν ως μονάδες μέτρησης της διάταξης και το M2 (προσπερνόν όχημα) με μήκος 557 mm και πλάτος 132.3 mm

Η οριζόντια μετατόπιση ανάγεται στο μήκος του μοντέλου 1-M1 για να αδιαστατοποιηθεί και στο παρόν πείραμα συμβολίζεται ως $\Delta Y/L$.



Εικόνα 2.30: Σύστημα συντεταγμένων για τις αεροδυναμικές δυνάμεις και ροπές, τις πλευρικές και διαμήκεις αποστάσεις μεταξύ των μοντέλων

Διαδικασία υπολογιστικής ανάλυσης

Έγιναν αρχικές δοκιμές επικύρωσης της γεωμετρίας για τα μοντέλα 1 και 2 σε απομόνωση χρησιμοποιώντας τον υπολογιστικό επιλυτή σταθερών περιπτώσεων.

Το μήκος του οχήματος δεκαπλασιάστηκε για να αντιστοιχεί σε πραγματικό ($L = 5.22\text{m}$) ο Re αυξήθηκε επίσης στα $9.4 \cdot 10^6$ για να αντιστοιχήσει σταθερές συνθήκες οδήγησης σε ταχύτητα 27m/s .

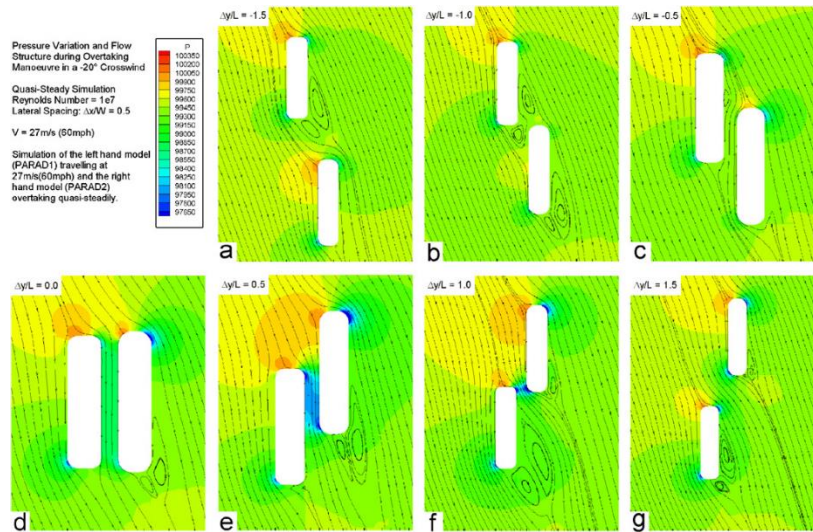
Η ημιμόνιμη μέθοδος ακολουθήθηκε για σχετικές ταχύτητες: 2.2, 4.5, 8.9, 13.4 m/s ($k = 0.083, 0.17, 0.33, 0.5$),

Οι ημιμόνιμες και ασταθείς προσομοιώσεις έγιναν για $\beta = -20^\circ$. Και για τις δύο η ταχύτητα του $M1$ ήταν 27m/s με πλευρικό άνεμο 9.8m/s . Η σχετική ταχύτητα για την ασταθή προσομοίωση ήταν στα 8.9m/s . ($k = 0.33$)

Επικύρωση γεωμετρίας κάθε μοντέλου ξεχωριστά.

Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζοντας το «δίπλωμα» στο διάγραμμα κατανομής πίεσης στη θέση $y/L = 0.04$ υπέδειξαν το σχηματισμό μιας μικρής φουσαλίδας αποκόλλησης στην μπροστά γωνία του μπροστινού μοντέλου.

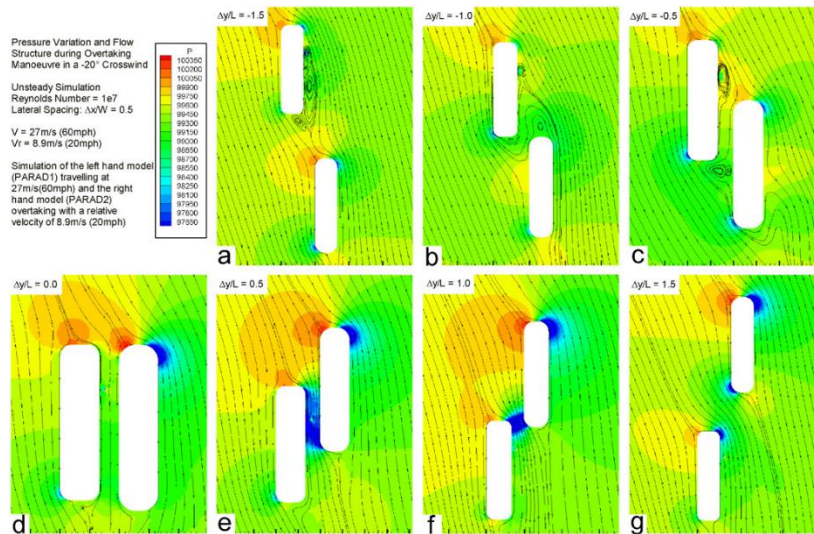
Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση πειραματικού-υπολογιστικού είναι στο πίσω μέρος του μοντέλου όπου η υπολογιστική προσομοίωση αδυνατεί να προβλεψει τη θέση της αποκόλλησης, όπως και την υποπρόβλεψη της πίεσης στις πλευρές του μοντέλου.



Εικόνα 2.31 : Πεδία πιέσεων και γραμμές ροής για την ημιμόνιμη μέθοδο κατά την προσπέραση των οχημάτων σε γωνία εκτροπής $\beta = -20^\circ$

Για $\Delta Y/L = -1.5$ τόσο η ημιμόνιμη όσο και η ασταθής ανάλυση δείχνουν μια περιοχή ανακυκλοφορούμενης αποκόλλησης στην υπήνεμη πλευρά του μοντέλου 1.

Για την ημιμόνιμη περίπτωση η αποκόλληση συνεχίστηκε και στο M2 ενώ αυτό εισερχόταν στην περιοχή ομόρρου ανακυκλοφορίας. Για θέσεις επικάλυψης των μοντέλων ($\Delta Y/L = -0.5, 0, 0.5$) η εγγύτητα του M2 εμπόδισε την αποκόλληση ροής στο M1. Μετά όταν το προσπερνόν (M2) όχημα ήταν μπροστά σε απόσταση ενός μήκους και παραπάνω από το άλλο, η περιοχή ανακυκλοφορούμενης αποκόλλησης επανέρχεται στην υπήνεμη πλευρά του M1. Μάλιστα, στη θέση $\Delta Y/L = 1.5$ η δομή της ροής αντιστοιχεί με σχετική ακρίβεια σε αυτή της $\Delta Y/L = 1.5$ (a,g)



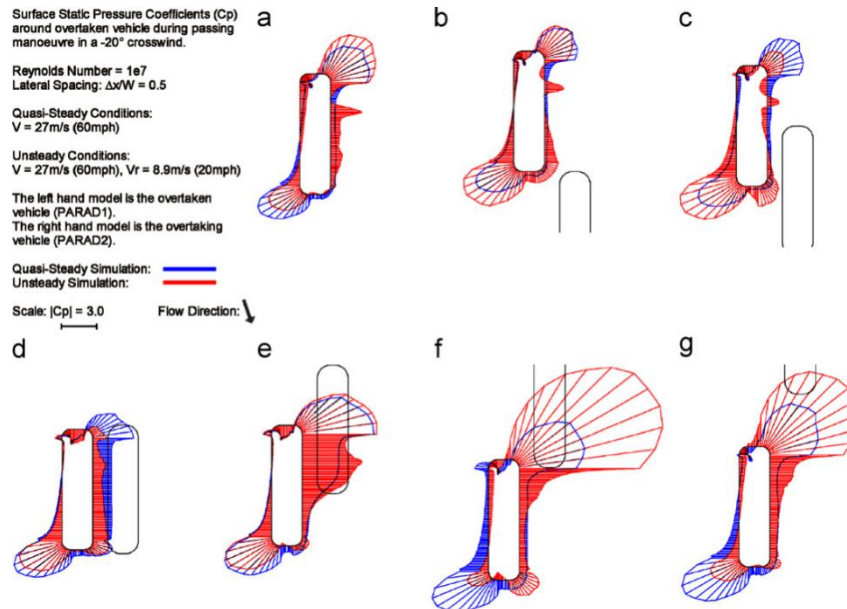
Εικόνα 2.32: Πεδία πιέσεων και γραμμές ροής για την ασταθή μέθοδο κατά την προσπέραση οχημάτων σε γωνία εκτροπής $\beta = -20^\circ$

Και εδώ έγινε η πρώτη αξιοσημείωτη παρατήρηση του πειράματος. Στην ασταθή περίπτωση παρατηρήθηκαν ποιοτικά παρόμοια αποτελέσματα από την αρχή της προσομοίωσης, με τη διαφορά ότι στη θέση $\Delta Y/L = 1.0$ δεν γίνεται επαναφορά της περιοχής ανακυκλοφορούμενης αποκόλλησης.

Αυτό επηρέασε σημαντικά την κατανομή των πιέσεων γύρω από τα μοντέλα. Στην ίδια θέση για τη δυναμική περίπτωση η μέγιστη αναρρόφηση είναι 2.2 φορές από όσο πρόβλεψε στην ίδια θέση η ημιμόνιμη προσέγγιση.

Η ακραία υπερεκτίμηση της μέγιστης αναρρόφησης κατά τη δυναμική προσομοίωση έδειξε να προκαλεί μία αντιωρολογιακή μετακίνηση του σημείου αποκοπής στο M1. Αυτό έφερε μια υπερπίεση στην προς τα έξω πλευρά του M1, μειώνοντας το βαθμό στροφής της ροής γύρω από την έξω χαμηλά γωνία. Γι' αυτό μείωσε το μέγεθος του μέγιστου υποπίεσης σε αυτή την περιοχή.

(f)



Εικόνα 2.33: Σύγκριση των επιφανειακών συντελεστών πίεσης που ασκούνται πάνω στο προσπερασμένο μοντέλο για τις προσομοιώσεις με ημιμόνιμη και ασταθή μέθοδο του προσπεράσματος οχημάτων για γωνία εκτροπής $\beta = -20^\circ$

Ποικιλομορφία πεδίου πιέσεων στο μοντέλο 2

Η κύρια διαφορά της δυναμικής με την ημιμόνιμη μέθοδο όσον αφορά τις κατανομές πίεσης γίνεται σε θέσεις που το M2 έχει πλέον προσπεράσει το M1, όπου δεν παρατηρείται αποκόλληση της ροής για το προσπερνόν μοντέλο. Πάλι σε αντίθεση με την ημι-μόνιμη προσομοίωση δε δείχνει αποκόλληση της ροής για το M2 σε αυτό το σημείο του ελιγμού προσπέρασης. Έτσι στο σημείο $\Delta Y/L = 1.5$, το μέγιστο της υποπίεσης είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερο.

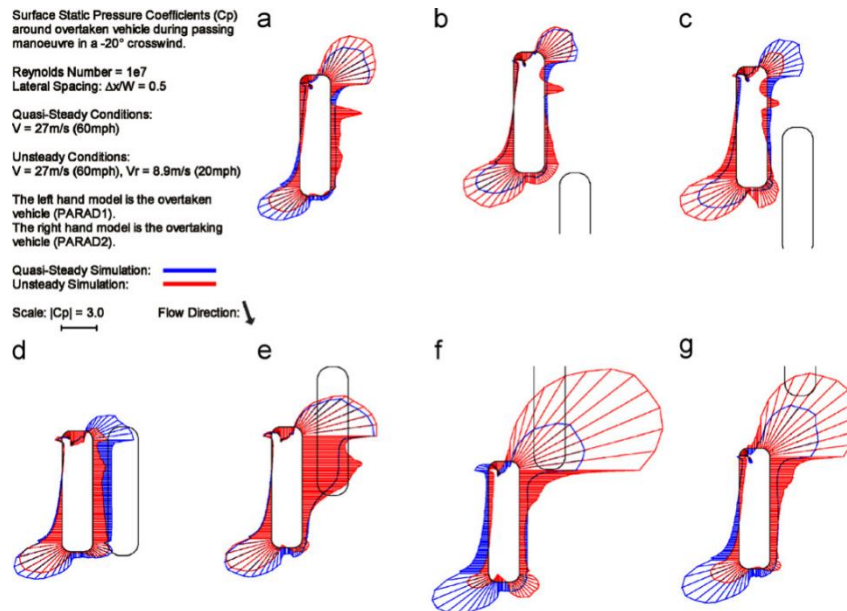
Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι κατά τη δυναμική προσομοίωσης η γωνία εκτροπής για το προσπερνόν όχημα είναι διαφορετική από τη δοθείσα (μειώνεται από 20 σε 15.3°) λόγω της ύπαρξης σχετικής ταχύτητας μεταξύ των οχημάτων.

Για τέτοιου είδους μη αεροδυναμικά σώματα η πρόβλεψη του σημείου αποκόλλησης είναι αδύνατη και είναι πιθανόν ότι παρουσία μείωσης εξηγεί την απουσία αποκόλλησης από το M2 κατά τη διάρκεια της δυναμικής προσομοίωσης. Η πλήρως προσκολλημένη ροή γύρω από το δυναμικό M2 υπόκειται σε μεγαλύτερο στρίψιμο της ροής και επιτάχυνση γύρω από τις γωνίες του μοντέλου από όσο στην περίπτωση αποκόλλησης ροής.

Ενώ η διαφορά στη γωνία εκτροπής χρειάζεται προσοχή κατά τη σύγκριση ημιμόνιμων και ασταθών αποτελεσμάτων για το προσπερνόν όχημα (M2), η γωνία εκτροπής του M1 παραμένει σταθερή και για τις δύο περιπτώσεις.

Όμως παρατηρείται ότι κατά τη διαδικασία προσπέρασης τα πεδία ροής γύρω από τα μοντέλα αλληλεπιδρούν. Για $\Delta Y/L > 1.5$ οι συντελεστές αντίστασης αυξάνουν και τα μέγιστα αναρρόφησης αποδεικνύονται εξαρτώμενα του χρόνου.

Η ημιμόνιμη ανάλυση απέτυχε να καταγράψει τις ταλαντώσεις και το μέγεθος των αεροδυναμικών δυνάμεων για τα M1 και M2. Στο M1, η ημιμόνιμη ανάλυση προέβλεψε έναν μεγάλο θετικό c_D ενώ η ασταθής έναν ισοδύναμο αρνητικό. Στο M1, οι διακυμάνσεις της αντίστασης, της πλευρικής δύναμης και της ροπής εκτροπής ήταν κατ' αντιστοιχία 400%, 120%, 200% από όσο προβλέφθηκε στην ημιμόνιμη.



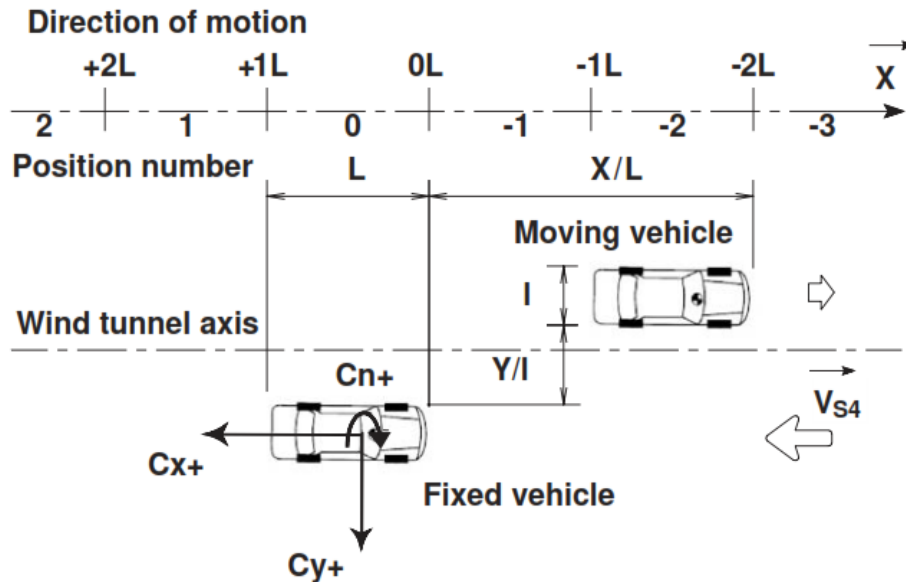
Εικόνα 2.34: Σύγκριση των επιφανειακών συντελεστών πίεσης που ασκούνται πάνω στο διερχόμενο μοντέλο για τις προσομοιώσεις με ημιμόνιμη και ασταθή μέθοδο του προσπεράσματος οχημάτων για γωνία εκτροπής $\beta = -20^\circ$

2.5 C. NOGER κ.ά (INVESTIGATION OF THE TRANSIENT AERODYNAMIC PHENOMENA ASSOCIATED WITH PASSING MANOEUVRES), 2004 ^(3.)

Οι παραπάνω προσπάθησαν να μελετήσουν πειραματικά την αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων κατά την προσπέρασή τους εξετάζοντας την επίδραση της σχετικής ταχύτητας των οχημάτων, της πλευρικής απόστασης και της ύπαρξης πλευρικού ανέμου. Η εγκατάσταση φτιάχτηκε έτσι ώστε να προσομοιώσει τις συνθήκες προσπέρασης μεταξύ μοντέλων κλίμακας 1/5, βάρους λιγότερου των 10 κιλών.

Η διάταξη δοκιμών φτάνει στο μέγιστο πλάτος 5m και μήκος 10m του τομέα δοκιμών της σήραγγας. Κατασκευασμένη από ένα υπερυψωμένο ξύλινο δάπεδο (215 mm ύψος) το οποίο στεγάζει όλο τον εξοπλισμό δοκιμών και τους συνδετήρες, που κρατούν τη διάταξη στη θέση

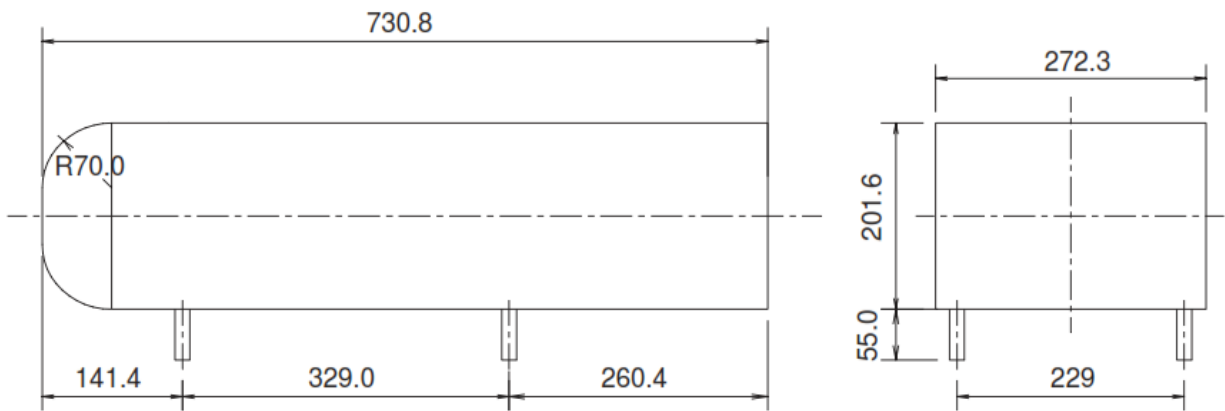
της. Ο εξοπλισμός αποτελείται από ένα σύστημα γραμμικής καθοδήγησης με έναν ιμάντα μεταφοράς και ένα σταθερό ζυγό 6 συνιστωσών. Η συσκευή δοκιμής επιτρέπει τη μεταβολή της διαμήκουσ απόστασης X/L (με L το μήκος του μοντέλου), της εγκάρσιας απόστασης Y/l (με l το πλάτος μοντέλου), της γωνίας εκτροπής b , (με τη χρήση μιας περιστρεφόμενης τράπεζας) της σχετικής ταχύτητας V_r και την ταχύτητα αεροδυναμικής σήραγγας V_{s4} .



Εικόνα 2. 35: Σύστημα συντεταγμένων Noger κ.α. (2004)

Τα δύο οχήματα κινούνται με ταχύτητα που κυμαίνεται από τα 20-40 m/s με σχετική ταχύτητα μεταξύ τους από 0.2-10 m/s. Επίσης διεξήχθησαν δοκιμές για σχετικές πλευρικές αποστάσεις Y/l (αδιαστατοποιημένες με το πλάτος του οχήματος) 0.25, 0.5, 0.7. Όπως επίσης και με παρουσία πλευρικού ανέμου $\pm 10^\circ$.

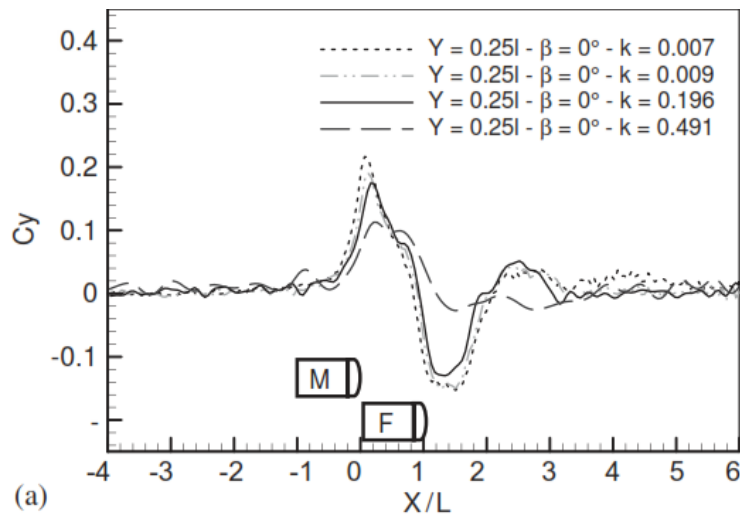
Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 πανομοιότυπα μη αεροδυναμικά σώματα που ακολουθούσαν την προτυποποίηση Ahmed με λόγο μήκους – πλάτους 2.7 και στρογγυλεμένες άκρες. Το προσπερασμένο όχημα ήταν πακτωμένο πάνω στον ασταθή αεροδυναμικό ζυγό ενώ το διερχόμενο πάνω σε μια άμαξα που οδηγούταν από ιμάντα και τα δύο απείχαν από το έδαφος 55mm.



Εικόνα 2. 36: Σκαρίφωμα μοντέλου οχήματος που χρησιμοποιήθηκε

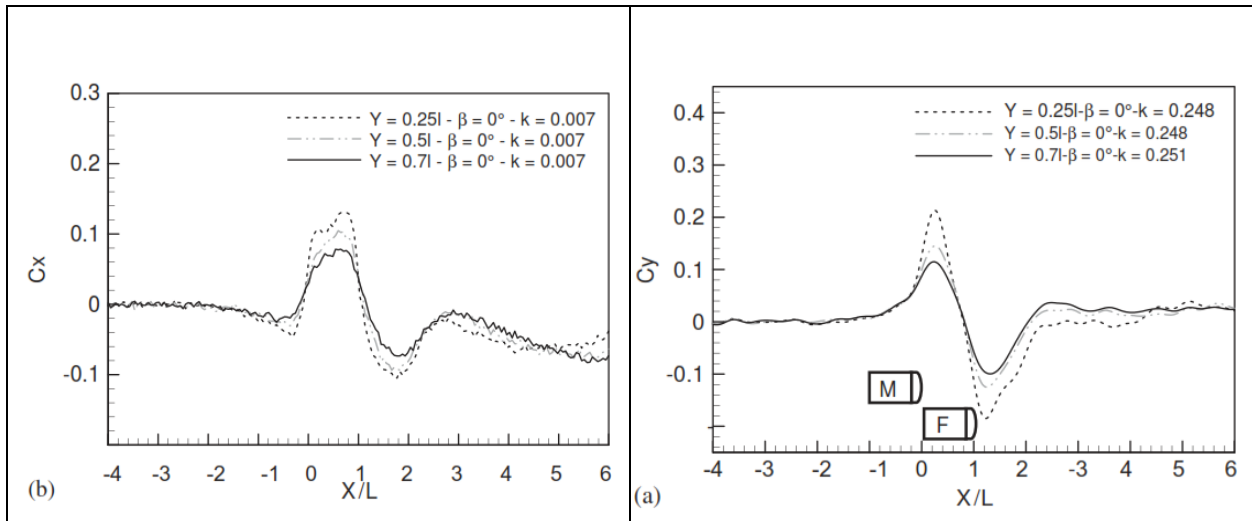
Ας σημειωθεί ότι έγινε αναγωγή των θέσεων κατά τον άξονα χ στο δικό μας σύστημα συντεταγμένων για ευκολία στη σύγκριση

Παρατήρησαν μικρή επίδραση της σχετικής ταχύτητας στο συντελεστή πλευρικής δύναμης (διακύμανση από 0.18 σε 0.22) για λόγους σχετικής ταχύτητας/ ταχύτητας διερχομένου από 0.007-0.5, σε τέτοιο βαθμό που το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης να μπορεί να θεωρηθεί ημι-μόνιμο.



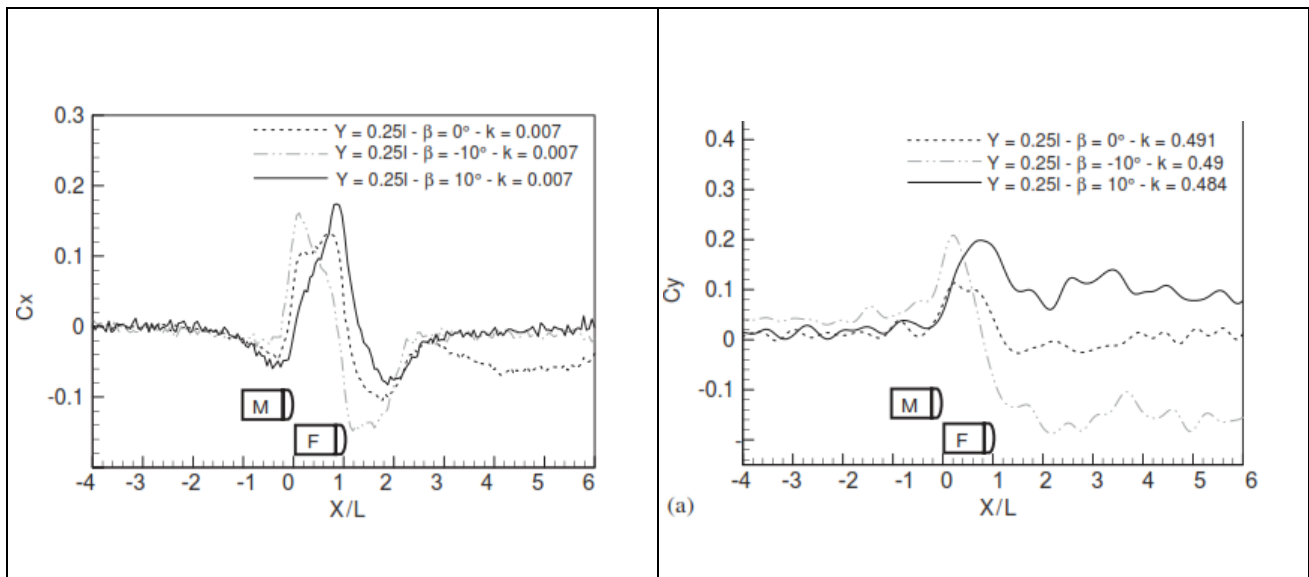
Εικόνα 2. 37: Διάγραμμα του συντελεστή πλευρικής δύναμης c_{SF} για τις διάφορες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων σε διάφορες περιπτώσεις σχετικής ταχύτητας μεταξύ των οχημάτων

Οι Noger κ.ά. παρατήρησαν μείωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης με την αύξηση της πλευρικής απόστασης μεταξύ των μοντέλων



Εικόνα 2.38: Διαγράμματα συντελεστών αντίστασης c_D (έχοντας αφαιρεθεί η μέση τιμή της, 0.38) και πλευρικής δύναμης c_{SF} με αλλαγή της πλευρικής απόστασης μεταξύ των οχημάτων

Ακόμα παρατήρησαν αύξηση των τιμών των μεγίστων σε συντελεστή αντίστασης και πλευρικής δύναμης καθώς και μετατόπιση της σχετικής θέσης που αυτά συμβαίνουν για τις περιπτώσεις παρουσίας πλευρικού ανέμου $\pm 10^\circ$.



Εικόνα 2.39: Διαγράμματα συντελεστών αντίστασης c_D (έχοντας αφαιρεθεί η μέση τιμή της, 0.38) και η πλευρικής δύναμης c_{SF} (έχοντας αφαιρεθεί η μεσή τιμή ± 0.4) για γωνία εκτροπής $0^\circ, \pm 10^\circ$

2.6 K. MINATO κ.ά (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES IN TUNNELS - FLOW VISUALISATION USING THE LASER LIGHT SHEET METHOD AND ITS DIGITAL IMAGE PROCESSING), 1991 ^(8.)

Στο εξεταζόμενο paper στόχος ήταν να ξεκαθαριστεί η συμπεριφορά της ροής, ειδικά η δομή-διαμόρφωση του ομόρρου πίσω από τα οχήματα καθώς και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που παρατηρούνται κατά το προσπέρασμα σε σήραγγες (τούνελ) αυτοκινήτων με τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και τρισδιάστατη αριθμητική ανάλυση (μέθοδος πεπερασμένου όγκου και μοντέλο τύρβης k-ε).

Χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα κλίμακας 1/40 από ακρυλικό, (πλάτους 62mm, ύψους 72 mm, μήκους 300 mm), σε σήραγγα με ρεύμα αέρα ταχύτητας 20m/s & $Re = 95000$. Η αντίσταση και η πίεση γύρω από τα οχήματα μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας αισθητήρες δύναμης και μεταδότες/μορφοτροπείς πίεσης.

Ο θάλαμος δοκιμών είχε διαστάσεις 600 mm ύψος, 600 mm πλάτος, 1200 mm μήκος, με μέγιστη ταχύτητα 50 m/s. Το τούνελ από την άλλη: 212 mm πλάτος, 110 mm ύψος & 2000 mm μήκος, τοποθετημένο μέσα στο θάλαμο δοκιμών. Τα δεδομένα αποκτήθηκαν με μετρήσεις 30 sec.

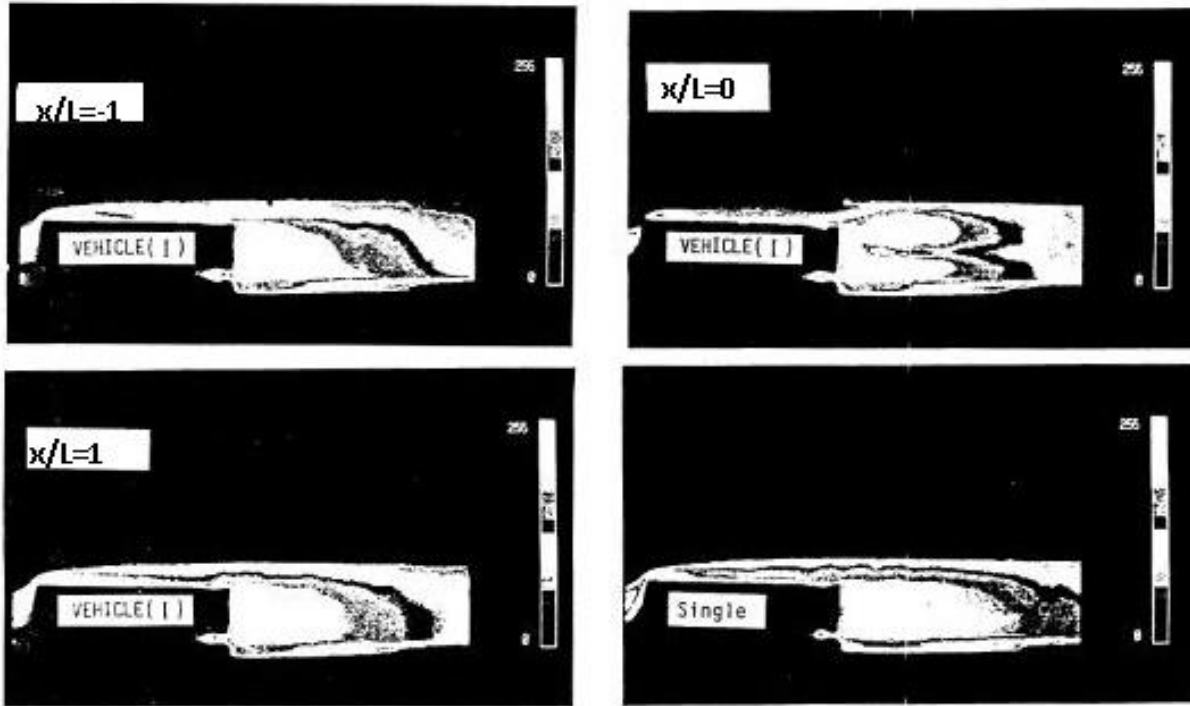
Οπτικοποίηση της ροής:

Δημιουργήθηκαν σταγονίδια που απεικόνιζαν το πεδίο της ροής από σταγονίδια κηροζίνης σε μορφή καπνού που εισέρχονταν στην είσοδο στο μπροστινό μέρος του τούνελ. Για την απεικόνιση των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της τυρβώδους ροής δημιουργήθηκε ένα φωτεινό φύλλο ακτινών laser. Η πηγή του φύλλου ακτινών προέρχονταν από ένα laser ιονισμένου αργού (4 watt ισχύς, πάχος φύλλου ακτινών 10mm. Το σύστημα οπτικοποίησης της ροής αποτελούνταν από σύστημα κάμερας ccd (ανάλυση πλάνου 570*485) και ο πίνακας επεξεργασίας των εικόνων αποτελούταν από 512 * 512 στοιχεία με 256 διαβαθμίσεις/pixel. Για να ξεπεραστεί η ανομοιορφία φωτεινότητας όταν λαμβάνονται οι φωτογραφίες, γίνεται ομαλοποίηση της μέσω υπέρθεσης-(λήψη μέσου όρου) της φωτεινότητας 10 εικόνων τραβηγμένων σε ίδιες συνθήκες γύρω από το σώμα του οχήματος. Μετά έγινε αριθμητική επεξεργασία του πεδίου της ροής γύρω από το όχημα ως μία τρισδιάστατη ασταθή ασυμπίεστη ιξώδης ροή χρησιμοποιώντας μοντέλο τύρβης k-ε.

Αποτελέσματα:

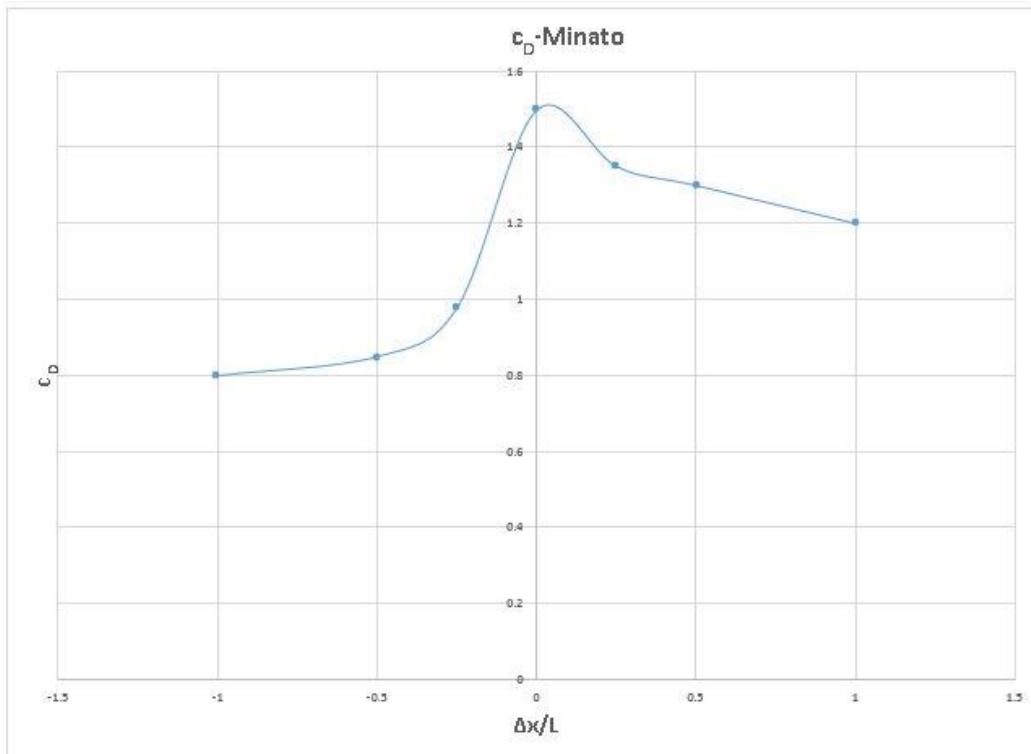
Όταν τα οχήματα είναι μόνα τους, σχετικά μεγάλες δίνες δημιουργούνται στο χαμηλότερο μέρος του ομόρρου των οχημάτων κοντά στην πίσω επιφάνεια του οχήματος δημιουργώντας περιοχές υποπίεσης. Επίσης, σχηματίζεται ένα ζεύγος ισχυρών δινών που περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις η μία στην άλλη κοντά στην πάνω επιφάνεια της οροφής, ρέοντας διαγώνια πάνω από τις πλευρές του οχήματος. Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ριζική αλλαγή

στη δομή του ομόρρου κατά το προσπέρασμα των οχημάτων(θέση $x=0$). Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ξεκάθαρα ο διαχωρισμός του πεδίου της ροής κατά το προσπέρασμα.



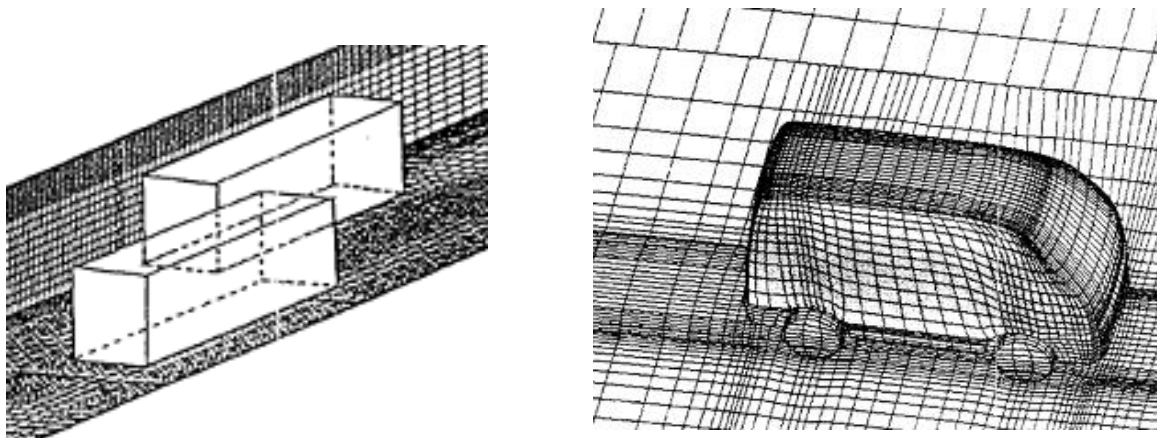
Εικόνα 2. 40: Πεδία ομόρρου κατά το προσπέρασμα με απεικόνιση από φύλλα δεσμών από laser

Μέτρηση πιέσεων: Παράλληλα έγινε πειραματικά μέτρηση του συντελεστή αντίστασης του σταθερού οχήματος κατά το προσπέρασμά του από το διερχόμενο. Με μέγιστο στη θέση που το μπροστινό μέρος του διερχόμενου είναι στην ίδια ευθεία με το πίσω μέρος του προσπερασμένου (θέση $x=0$, σε αντιστοιχία με τη δικό μας σύστημα συντεταγμένων-εικόνα 3.10)

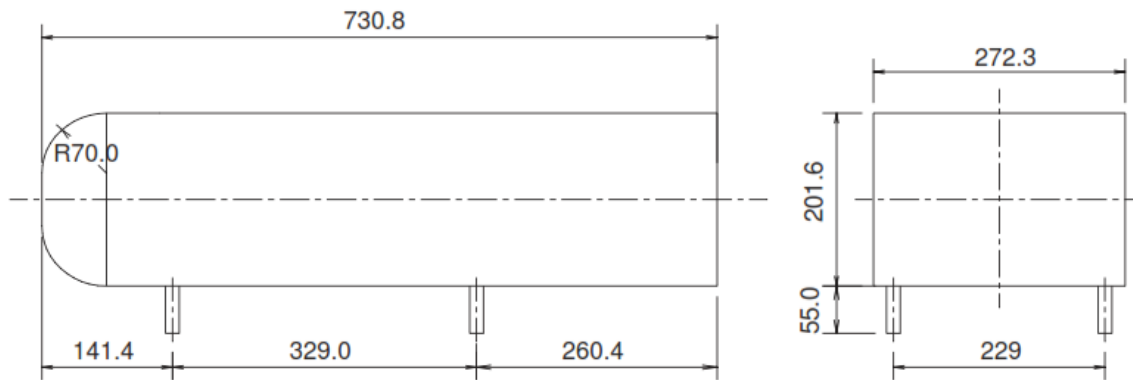


Εικόνα 2.41: Διάγραμμα αδιάστατου συντελεστή αντίστασης προπερασμένου οχήματος κατά τη διέλευση του προπερνόντος

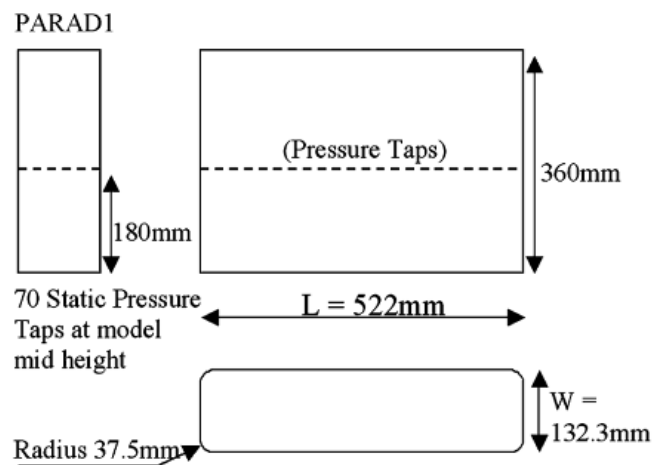
2.7. Παράθεση διαφορετικών μορφών μοντέλων οχημάτων από άλλες εργασίες



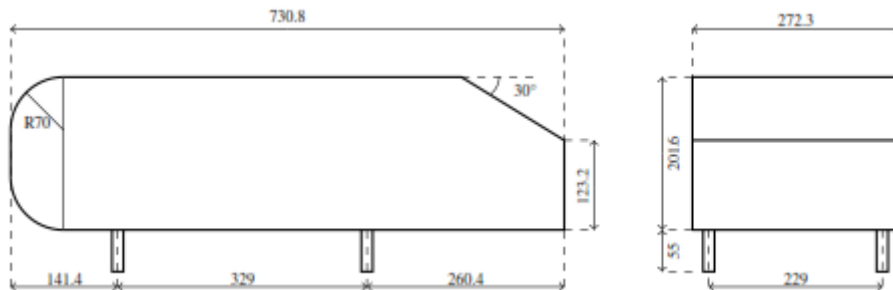
Εικόνα 2.42: Αριστερά: Minato et al (1991), Clarke & Filippone (2007), Δεξιά: Okumura & Kuriyama (1997)



Εικόνα 2.43: Noger et al (2004)



Εικόνα 2.44: Corin et al (2008)



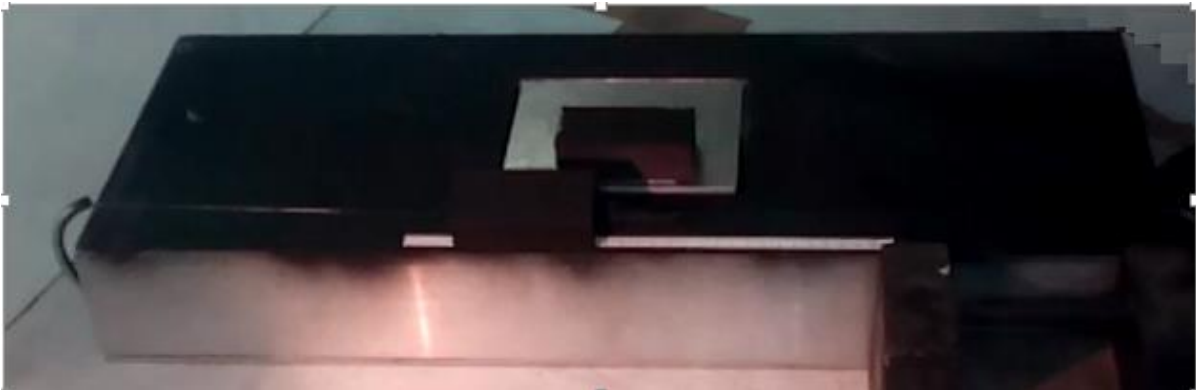
Εικόνα 2.45: Krajnovic & Uysterpruyt (2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

Το πείραμα περιλαμβάνει δυο μέρη: i) Μελέτη σε αεροδυναμική σήραγγα του πεδίου ταχυτήτων της ροής με τη μέθοδοPIV (Particle Image Velocimetry) & ii) μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά το προσπέρασμα δύο μοντέλων αυτοκινήτου με τη βοήθεια ζυγού.

Πίστα διέλευσης οχημάτων & μοντέλα οχημάτων

Βασικό μέρος της πειραματικής διάταξης αποτελεί η πίστα-πλαίσιο φτιαγμένη από αλουμίνιο,σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, στην πάνω έδρα της οποίας υπάρχει μια εγκάρσια ορθογωνική οπή.



Εικόνα 3.1: Η πίστα με τοποθετημένα πάνω της τα μοντέλα οχημάτων



Εικόνα 3. 2: Η οπή στο πάνω μέρος της πίστας για την υποδοχή του ζυγού

Έχει ανοιχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να γίνει η ενσωμάτωση και πάκτωση του ζυγού. Αντίθετα κατά την εξέταση του πεδίου ταχυτήτων με PIV, καλύπτεται η οπή με ξύλινο κάλυμμα, το οποίο φτάνει ακριβώς στο επίπεδο του πάνω μέρους της πίστας. επί της οποίας τοποθετείται το σταθερό μοντέλο.

Το κινούμενο-διερχόμενο μοντέλο είναι περασμένο κατά μήκος με σκοινί που μετακινείται οριζόντια από κινητήρα (moter) που βρίσκεται στο εσωτερικό μέρος της πίστας. Τα δύο μοντέλα αυτοκινήτων είναι κατασκευασμένα από ξύλο και έχουν διαστάσεις **(90mm μήκος(L)-40mm πλάτος(l) -30mm ύψος(H))**

Αριστερά από το διερχόμενο μοντέλο έχει τοποθετηθεί μια μετρητική ταινία για την εύρεση των αντίστοιχων σχετικών θέσεων.

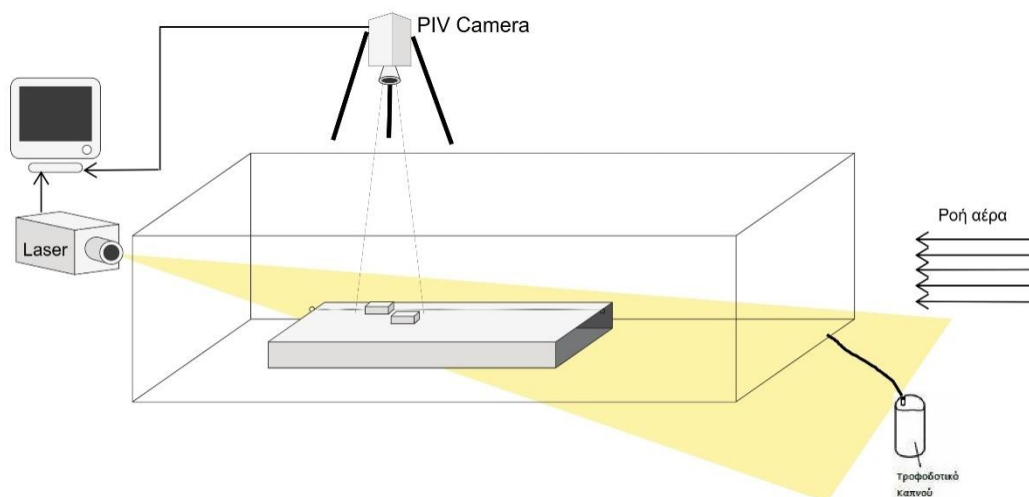
3.1. Πειραματική διάταξη μελέτης σε αεροδυναμική σήραγγα του πεδίου ταχυτήτων της ροής με τη μέθοδο PIV

Σε αυτό το μέρος του πειράματος καταγράφηκε το πεδίο ταχυτήτων της ροής γύρω από το σταθερό μοντέλο αυτοκινήτου κατά το προσπέρασμά του από άλλο με τη μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη μικρή σήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής. Το τμήμα δοκιμών της σήραγγας είναι φτιαγμένο από Plexiglas, επιτρέποντας την οπτική πρόσβαση κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Η οπή στο πάνω μέρος της προαναφερθείσας πίστας είναι καλυμμένη με ένα ξύλινο κάλυμμα πάνω στο οποίο το σταθερό-προσπερασμένο μοντέλο είναι στερεωμένο με κολλητική ταινία διπλής όψευς.

Το σύνολο της πίστας που θα παρουσιαστεί στο πεδίο καταγραφής της κάμερας (πλαίσιο από αλουμίνιο, μοντέλα αυτοκινήτων και ξύλινο κάλυμμα) είναι βαμμένο μαύρο για να βοηθήσει την καταγραφή του πεδίου με τη μέθοδο PIV, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι η κάμερα εντοπίζει πολύ καλύτερα τα σωματίδια που κινούνται εντός της ροής, όταν εστιάζει σε φόντο σκούρου χρώματος. Η πίστα τοποθετήθηκε με ακρίβεια στο κεντρο του τμήματος δοκιμών της σήραγγας κατά τη διάσταση του πλάτους. Για τον ίδιο λόγο τα πειράματα με PIV πραγματοποιήθηκαν βραδινές ώρες, ώστε να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα ο φωτισμός του εργαστηρίου.

Η πειραματική εγκατάσταση του πρώτου μέρους του πειράματος απεικονίζεται στο εξής σχήμα.



Εικόνα 3. 3: Σχηματική απόδοση της εγκατάστασης για τη μέθοδο PIV

Πριν ξεκινήσει το πείραμα καταγράφονται οι συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν: Η θερμοκρασία του αέρα με θερμόμετρο (για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του αέρα) και η δυναμική πίεση με σωλήνα Pitot και διαφορικό μανόμετρο (FURNESS) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος. Στη συνέχεια, θέτουμε σε λειτουργία το σύστημα τροφοδοσίας καπνού, διαχέοντας σταγονίδια λαδιού μέσα στη ροή. Τα σταγονίδια αυτά έχουν διάμετρο περί το 1μm και σκοπός τους είναι η σκέδαση του φωτός Laser για την μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων του ρευστού. Το τροφοδοτικό καπνού συνδέεται με την αεροδυναμική σήραγγα μέσω ενός ακροφυσίου, το οποίο τοποθετείται στην αναρρόφηση αέρα του φυσητήρα, ώστε να μην επηρεάζει τη ροή.

Αμέσως μετά τοποθετούνται η συσκευή εκπομπής Laser σε απόσταση 3m από την έξοδο της σήραγγας με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργεί ένα φύλλο φωτισμού παράλληλο προς την επιφάνεια του πάνω μέρους της πίστας στο ύψος του μέσου ύψους των μοντέλων αυτοκινήτου και η κάμερα (CCD-Camera) σε απόσταση 400 mm από την πάνω επιφάνεια του τμήματος δοκιμής της σήραγγας, η οποία καταγράφει 200 ζεύγη εικόνων σε κάθε περίπτωση του πειράματος. Αυτές οι δύο συσκευές «επικοινωνούν» μέσω του synchronizer, ώστε κάθε πλάνο της κάμερας να αντιστοιχεί σε ένα παλμό του laser.

Έτσι, καθώς το φως πέφτει στο υπό εξέταση επίπεδο, το φως σκεδάζεται από τα σταγονίδια του λαδιού και η κάμερα καταγράφει τη θέση του σωματιδίου τις χρονικές στιγμές t και $t+\Delta t$. Με γνωστό το χρονικό διάστημα $\Delta t=20\mu s$, προκύπτουν τα διανύσματα της ταχύτητας. Σε κάθε περίπτωση καταγράφονται 200 ζεύγη εικόνων μέσω των οποίων γίνεται στη συνέχεια ο υπολογισμός του μέσου πεδίου ταχυτήτων σε $42 \times 31 = 1302$ σημεία.

3.1.1. Αεροδυναμική σήραγγα

Το πείραμα διεξήχθη στη μικρή σήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής. Είναι τύπου ανοιχτού κυκλώματος (με εργαζόμενο μέσο άερα), υποηχητική-χαμηλής ταχύτητας και συνεχούς λειτουργίας ορθογωνικής διατομής (400mm πλάτος*225mm ύψος *1500 mm μήκος).

Η κίνηση του αέρα γίνεται μέσω ενός φυσητήρα αξονικού τύπου, ενώ με τη ρύθμιση των στροφών του (με τη χρησενός ρυθμιστή που διαθέτει στρόφαλο) επιτυγχάνεται η ρύθμιση της ταχύτητας της ροής. Το εύρος των ταχυτήτων που μπορεί να πετύχει η σήραγγα κυμαίνεται μεταξύ 3 m/sec και 20 m/sec.

Στον κάτωθι πίνακα φαίνονται **τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της σήραγγας**

Κατασκευαστική εταιρεία	Neovent
Τύπος	VM 60.10.28°
Στροφές (RPM)	2910 rpm
Ισχύς κινητήρα (HP)	7.5 HP
Ωφέλιμη ολική πίεση (kg/m ²)	70 kp/m ²

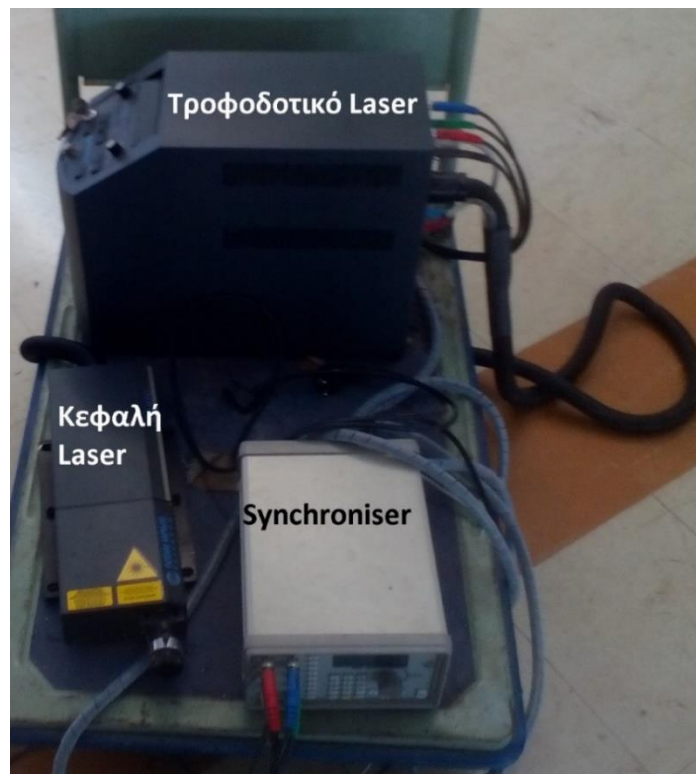
Πίνακας 3. 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά μικρής σήραγγας

3.1.2. Συσσκευή εκπομπής Laser

Η συσκευή εκπομπής Laser που χρησιμοποιήθηκε είναι το **σύστημα PIV Laser II-30**, της σειράς solo της εταιρείας **Wave Research**. Είναι τύπου **Nd:YAG διπλής κεφαλής** και είναι ιδανική για χρήση σε πειράματα PIV.

Αποτελείται από το τροφοδοτικό και την κεφαλή, η οποία είναι υδρόψυκτη. Η συσκευή τοποθετήθηκε σε απόσταση 2.5-3 m από την έξοδο της αεροδυναμικής σήραγγας με τέτοιο τρόπο ώστε η πράσινη δέσμη φωτός (παράλληλη στο επίπεδο του δαπέδου) να φτάνει ακριβώς στο ύψος της πάνω επιφάνειας του αλουμινένιου πλαισίου.

Το τροφοδοτικό της συσκευής συνδέθηκε με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να πάρουμε τα κατάλληλα πειραματικά αποτελέσματα. Το σύστημα laser συνδέθηκε επιπλέον με ένα synchroniser στην κάμερα καταγραφής, ώστε οι παλμοί του φωτός να αντιστοιχίζονται στη στιγμή λήψης κάθε πλάνου της κάμερας.



Εικόνα 3.4: Σύστημα Laser: κεφαλή Laser, τροφοδοτικό Laser, synchroniser

Τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής Laser		
Ενέργεια	mJ	30
Ενεργειακή σταθερότητα	%	+/-4
Διάμετρος δέσμης Laser	mm	3
Πλάτος έντασης	ns	3-5
Απόκλιση	mrad	<4
Σταθερότητα εστίασης ακτίνας	urad	>3
Περιοδική απόκλιση	ns	+/-1

Πίνακας 3. 2

Λειτουργικές Απαιτήσεις		
Θερμοκρασία	°C	10-30
Σχετική Υγρασία	%	20-80
Τάση	V	95-240
Ισχύς	W	900

Πίνακας 3. 3

Ονομαστικές διαστάσεις τροφοδοτικού-κεφαλής		
Μήκος	mm-mm	461/350

Πλάτος	mm-mm	194/178
Ύψος	mm/mm	363/81
Βάρος	kg/kg	22/4.5

Πίνακας 3. 4

3.1.3. Σύστημα καταγραφής /CCD Camera

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι η κάμερα **PowerView 1.4 MP, μοντέλο 630066** της εταιρείας **TSI**. Παρέχει τη δυνατότητα μεταβλητού χρόνου έκθεσης, μικρούς χρόνους εναλλαγής καρέ (frame straddling times) και είναι σχεδιασμένη για εφαρμογές PIV, microPIV και PLIF. Τοποθετήθηκε σε απόσταση 40cm πάνω από την πάνω επιφάνεια του τμήματος δοκιμών της σήραγγας.

Χαρακτηριστικά Κάμερας POWER VIEW, 1.4 MP, NO. 630066, TSI	
Αριθμός pixels	1376(H)* 1040(V)
Μέγεθος pixel	6.45 μm * 6.45 μm
Θερμοκρασία CCD	-12 °C
Δυναμικό εύρος	12 bit
Ρυθμός καρέ	10 fps
Φασματικό εύρος	270-1100 nm
Κβαντική απόδοση	62% στα 500nm
Ενεργοποιημένος χρόνος έκθεσης	500ns-1000s
Ελάχιστος χρόνος εναλλαγής καρέ PIV	200 ns
Βάση Φακού	f-mount
Μήκος καλωδίου Μεταφοράς Δεδομένων	5 m
Interface K	PCI board Υψηλής ταχύτητας

Πίνακας 3. 4

3.1.4. Τροφοδοτικό καπνού:

Το τροφοδοτικό καπνού που χρησιμοποιήθηκε είναι κατάλληλο για τη τροφοδοσία ροών τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες ταχύτητες κατά τη διάρκεια μετρήσεων με PIV.



Εικόνα 3. 5: Ακροφύσιο τροφοδοτικού καπνού στην είσοδο της σήραγγας

Αυτό με ένα ακροφύσιο στην αναρρόφηση της αεροσήραγγας τροφοδοτεί τη ροή με σταγονίδια λαδιού. Η λειτουργία του παρουσιάζεται συνοπτικά ως εξής: Πεπιεσμένος αέρας από το σύστημα παροχής του εργαστηρίου ψεκάζει το λάδι στο ρεζερβουάρ της γεννήτριας για να δημιουργήσει σταγονίδια. Η ποσότητα του καπνού ελέγχεται από την παροχή του αέρα που ρυθμίζεται από μία βάννα.

Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού Oil Droplet Generator, TSI 9307		
Πίεση αέρα παροχής	kPa	170 (Ελάχιστη) 2720 (Μέγιστη)
Θερμοκρασία αέρα παροχής	°C	20(Κανονική)-65 (μέγιστη)
Εσωτερική πίεση αέρα	kPa kPa	170 550 (Μέγιστη)
Μέγιστη οπισθέλκουσα πίεση	kPa	120
Ρυθμός ροής αερολύματος	l/min	30(Κανονική λειτουργία)
Μέσο μέγεθος σταγονιδίου	μm	1 (για ελαιόλαδο)

Πίνακας 3. 5

Ονομαστικές διαστάσεις		
Ύψος	mm	395
Διάμετρος	mm	150
Διάμετρος σωλήνα εξόδου αερολύματος	mm mm	15.9 (Εξωτερική) 9.5 (Εσωτερική)
Βάρος	kg	3.9

3.1.5. Λογισμικό Insight 4G

Για να επεξεργαστούμε τις φωτογραφίες που λάβαμε μέσω της μεθόδου PIV έγινε χρήση του λογισμικού Insight 4G, αφού προηγουμένως βαθμονομήσαμε το λογισμικό έχοντας γνωστές τις διαστάσεις των μοντέλων .

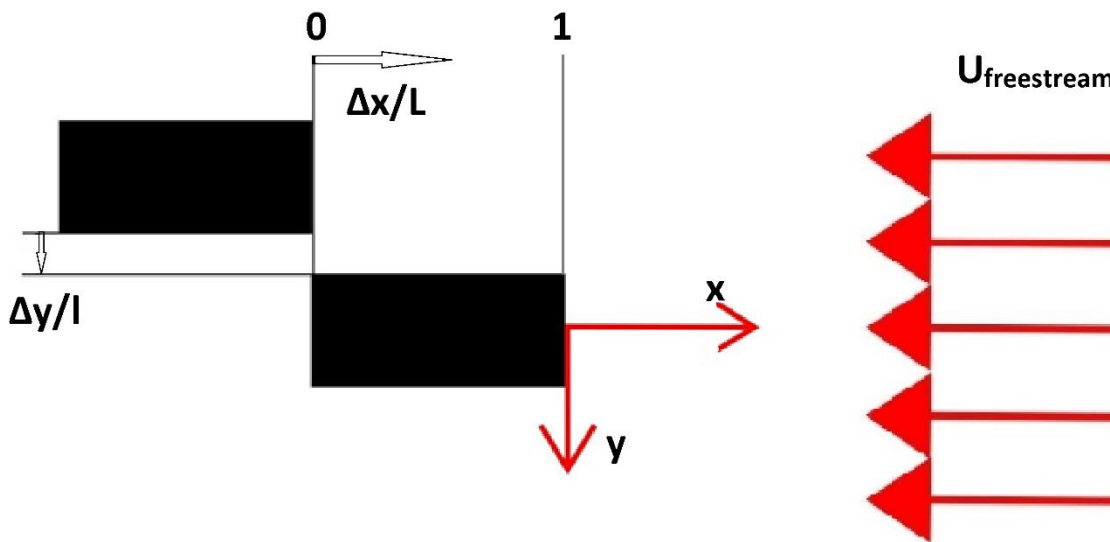
Οι μετρήσεις έγιναν σε 2 διαφορετικές μέρες. Με δεδομένες τις μετρήσεις θερμοκρασίας (23.1 °C & 22.8 °C) και πίεσης ($P_{δυν}=55$ Pa και $P_{στατ}= 11$ Pa την πρώτη φορά και $P_{δυν}=54.1$ Pa και $P_{στατ}= 11$ Pa τη δεύτερη) προέκυψαν οι ταχύτητες του ελεύθερου ρεύματος.

$$\text{Από την εξίσωση: } p_{δυν} - p_{στατ} = \frac{1}{2} \rho * U_{\infty}^2 \Rightarrow U_{\infty} = \sqrt{\frac{\Delta p * 2}{\rho}} \Rightarrow$$

$U_{\infty}=8.56$ m/s και $U_{\infty}=8.47$ m/s τη δεύτερη φορά. Με αριθμούς Reynolds 49703 και 49181 αντίστοιχα.

Ο ρυθμός υστέρησης των παλμών του laser ήταν και τις 2 φορές στα 20 μs. Με το υποδεκάμετρο μετρήσαμε στην οθόνη του υπολογιστή σε πόσα pixel αντιστοιχούσε 1cm. Στο πρώτο πλάνο αντιστοιχούσαν 11.4 pixels/mm και στο δεύτερο 10.86 pixels/mm.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε τρεις σχετικές αποστάσεις μεταξύ των μοντέλων κατά πλάτος. 14-20-30 mm, αναγόμενες στο πλάτος $l=40$ mm των οχημάτων, δηλαδή ($\Delta y/l=0.35, 0.5, 0.75$)

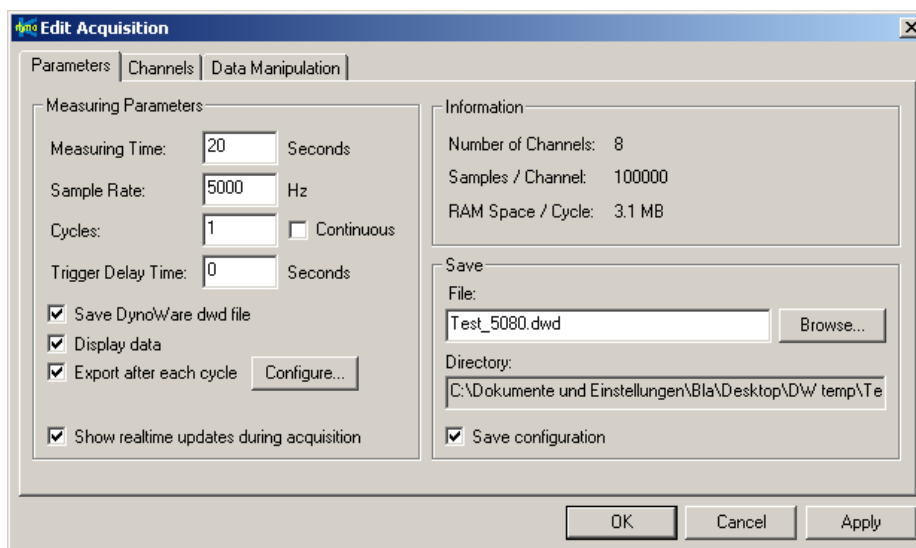


Εικόνα 3. 6: Σύστημα συντεταγμένων για τη μέθοδο PIV

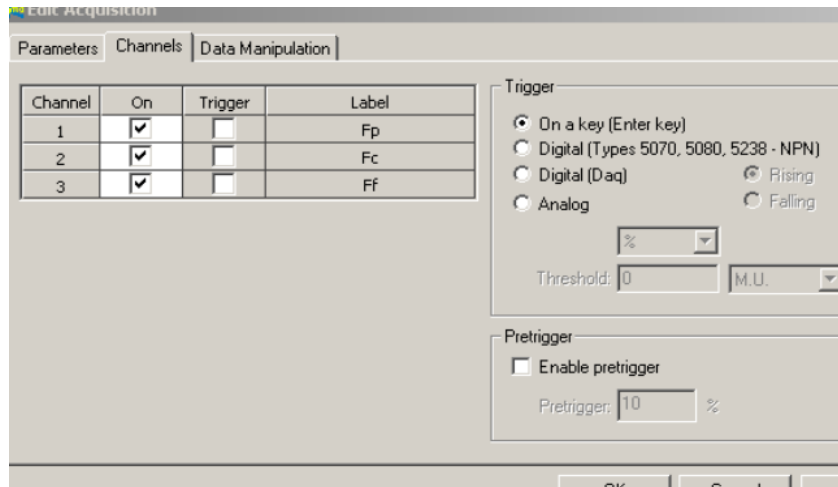
3.2. Μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά το προσπέρασμα δύο μοντέλων αυτοκινήτου.

Σε αυτό το μέρος του πειράματος μετρήθηκαν με ζυγό τριών συνιστωσών δύναμης οι δυνάμεις αντίστασης (**D**) και πλευρικής δύναμης (**SF**) που ασκούνται στο σταθερό μοντέλο κατά την προσπέρασή του από το διερχόμενο. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη μεγάλη κλειστού κυκλώματος, υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του ΕΜΠ. Σε αυτό το κομμάτι του πειράματος στην οπή της πίστας, τοποθετήθηκε και πακτώθηκε ο ζυγός φροντίζοντας η πάνω πλακέτα που στερεώνεται πάνω σε αυτόν να είναι στο επίπεδο της πάνω επιφάνειας της πίστας. Αφού αρχίσαμε να λειτουργούμε τη σήραγγα, φτάσαμε τη διαφορά δυναμικής-στατικής πίεσης στα 452 Pascal ήτοι (με πυκνότητα αέρα 1.2 kg/m^3) σε ταχύτητα αέρα **27.45 m/s** ($Re= 159387$) για να προσεγγίσουμε αυτήν που διεξήχθησαν κάποια από τα πειράματα της βιβλιογραφίας. Ο ζυγός ήταν συνδεδεμένος κατάλληλα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (αναλύεται παρακάτω). Μέσω του προγράμματος Dynoware μπορούμε να ελέγξουμε τη λειτουργία αυτού για να πραγματοποιήσουμε το πείραμα.

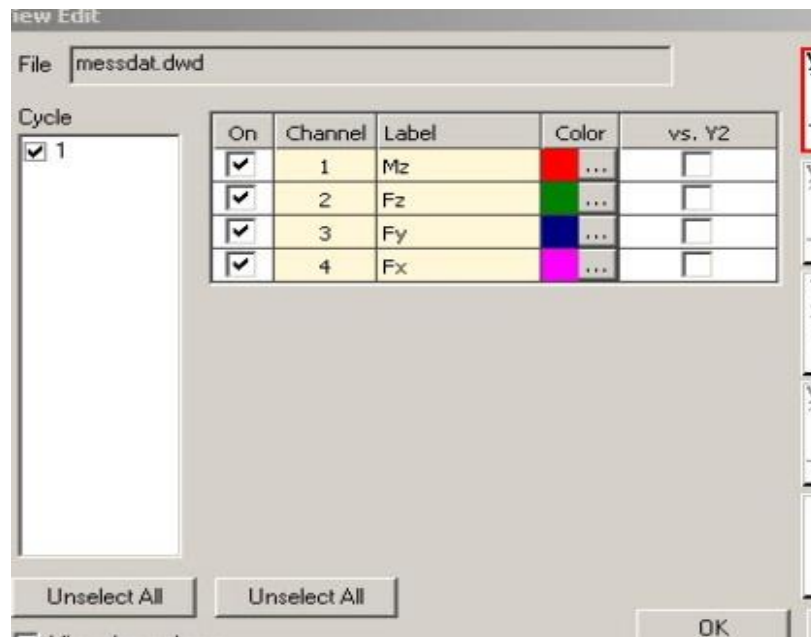
3.2.1 Λογισμικό Dynoware



Εικόνα 3.7: Στιγμιότυπο από τη χρήση του προγράμματος Dynoware, από τον καθορισμό των συνθηκών της δειγματοληψίας, του ονόματος του αρχείου κλπ



Εικόνα 3.8: Στιγμιότυπο από τη χρήση του προγράμματος Dynoware από την επιλογή των αξόνων του ζυγού που θα καταγραφούν οι μετρήσεις

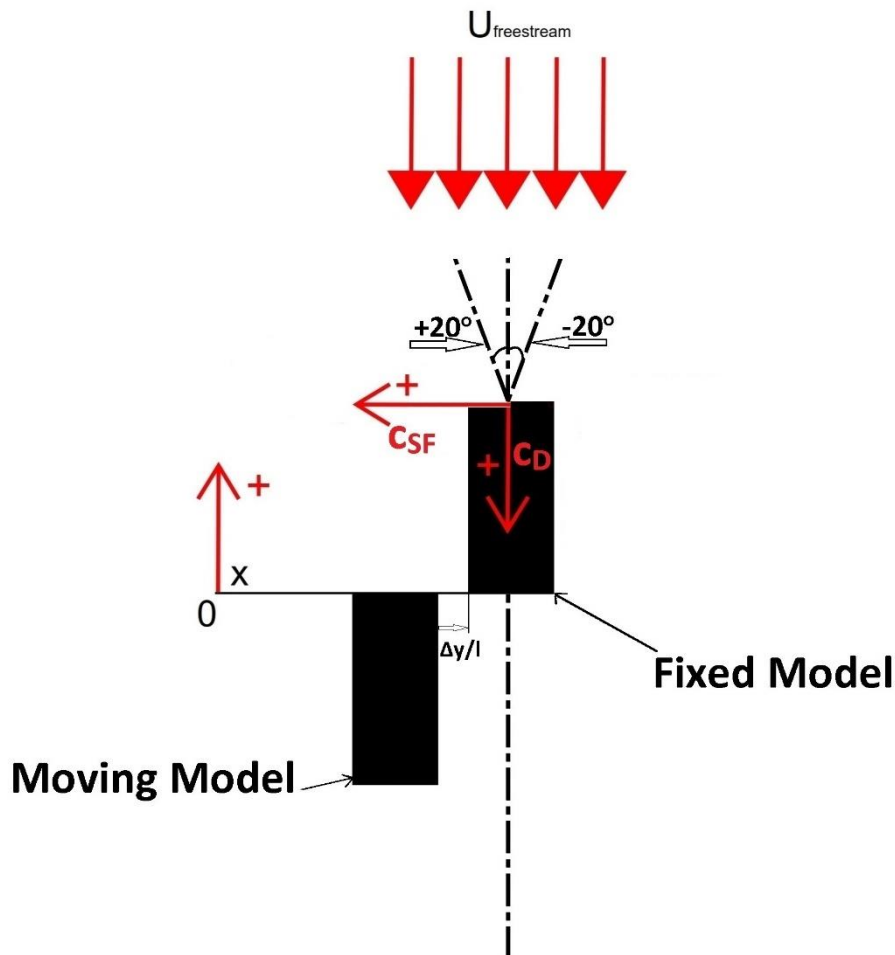


Εικόνα 3. 9: Στιγμιότυπο από τη χρήση του προγράμματος Dynoware, από την επιλογή του τρόπου που θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα των δυνάμεων

Αφού επιλέξουμε χρονική σταθερά -«Time Constant»-“Long” και φίλτρο «Filter»-“OFF”, ρυθμό δειγματοληψίας-«Sample Rate»- 20 Hz και κατά σειρά τις επιλογές «Reset-Set Parameters-

Measure» έγινε ένα δοκιμαστικό τεστ για μικρό χρονικό διάστημα για να ελέγξουμε τη λειτουργία του ζυγού . Μετά το πέρας του τεστ, θέσαμε χρόνο για κάθε κύκλο πειράματος τα 1000s με ισχύουσες τις προαναφερθείσες ρυθμίσεις για τη χρονική σταθερά, φίλτρο και ρυθμό δειγματοληψίας , έχοντας πάντα επιλέξει στο τελικό παράθυρο όπως σε κάθε εκτέλεση μέτρησης κατά σειρά «Reset-Set Parameters-Measure» για να ξεκινήσει η δειγματοληψία του πειράματος,

Το διερχόμενο όχημα τοποθετήθηκε στην πιο μακρινή ανάντι θέση. Τα πειράματα που έγιναν ήταν για σχετική εγκάρσια απόσταση μεταξύ των οχημάτων $\Delta y/l=0.35=14\text{mm}$, σε γωνίες εκτροπής 0° , $+20^\circ$, -20° και αφορούσαν την καταγραφή των δυνάμεων κατά τις κατευθύνσεις x & y , δηλαδή κατ'αντιστοιχία της δύναμης οπισθέλκουσας- Drag Force (D) και της πλευρικής δύναμης- Side Force (SF).



Εικόνα 3. 10: Σύστημα των συντεταγμένων των μετρήσεων και ορισμός των αεροδυναμικών συντελεστών της αντίστασης και της πλευρικής δύναμης

Σε κάθε μέτρηση η διαδικασία που ακολουθείτο ήταν η εξής:

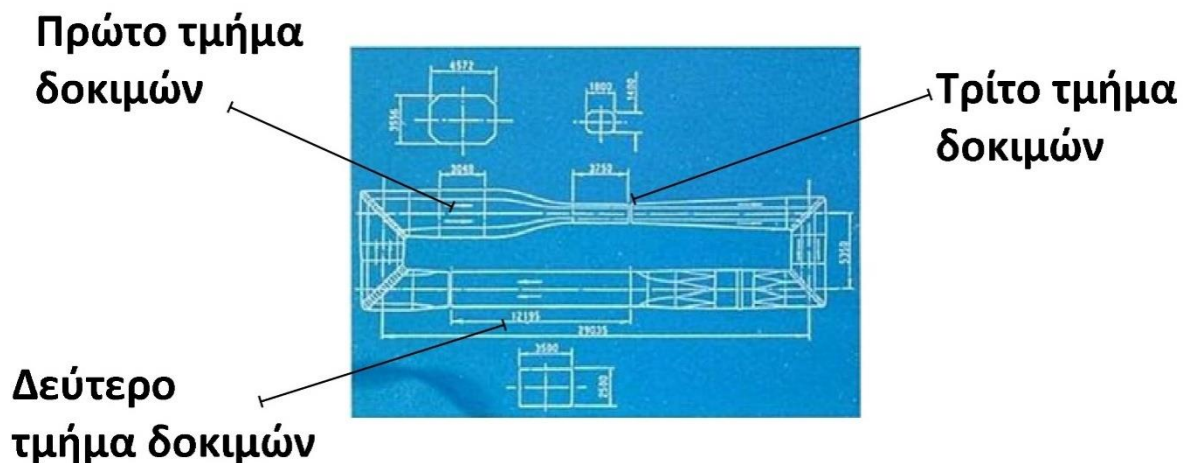
1. Ξεκίνημα της μέτρησης από το πρόγραμμα για να υπολογιστεί το λάθος
2. Έναρξη λειτουργίας και ρύθμιση της σήραγγας στην επιλεγμένη πίεση 452 Pascal με έλεγχο της ένδειξης του σωλήνα pitot.
3. Ξεκίνημα του κινητήρα αλλαγής θέσης του διερχομένου οχήματος.
4. Μετά το πέρας του τεστ κλείσιμο της σήραγγας.
5. Διακοπή της καταγραφής στον υπολογιστή.

Κάθε σημαντική στιγμή, δηλ.αλλαγή σταδίου πειράματος, θέσης διερχομένου οχήματος, καταγραφόταν σε ηλεκτρονικό χρονόμετρο ακριβείας για να γίνει η αντιστοίχιση με το αρχείο των καταγεγραμμένων δεδομένων στον υπολογιστή.

3.2.2 Σήραγγα:

Ένας αξονικός συμπίεστος επτά πτερυγίων, που κινείται από κινητήρα ισχύος 350 HP παράγει την επιθυμητή ταχύτητα αέρα μέσω ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου των στροφών του κινητήρα.

Το συνολικό μήκος της σήραγγας είναι περίπου τριάντα δύο μέτρα και έχει τρία τμήματα δοκιμών όπως φαίνονται στο παρακάτω σκαρίφημα:



Εικόνα 3. 11: Σκαρίφημα της μεγάλης σήραγγας του εργαστηρίου αεροδυναμικής

Τμήμα δοκιμών	Πλάτος (m)	Ύψος(m)	Μέγιστη ταχύτητα(m/s)
1 ^ο	4.5	3.5	9.5
2 ^ο	3.5	2.5	17
3 ^ο	1.8	1.4	60

Πίνακας 3.7: Διαστάσεις της μεγάλης σήραγγας

Το πείραμα διεξήχθη στο 3^ο τμήμα δοκιμών λόγω του μεγέθους της απαιτούμενης ταχύτητας.

3.2.3 Ζυγός

Για τη μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται πάνω στο σταθερό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ο μετρητικός ζυγός τριών συνιστωσών δύναμης 9327C της εταιρείας KISTLER.

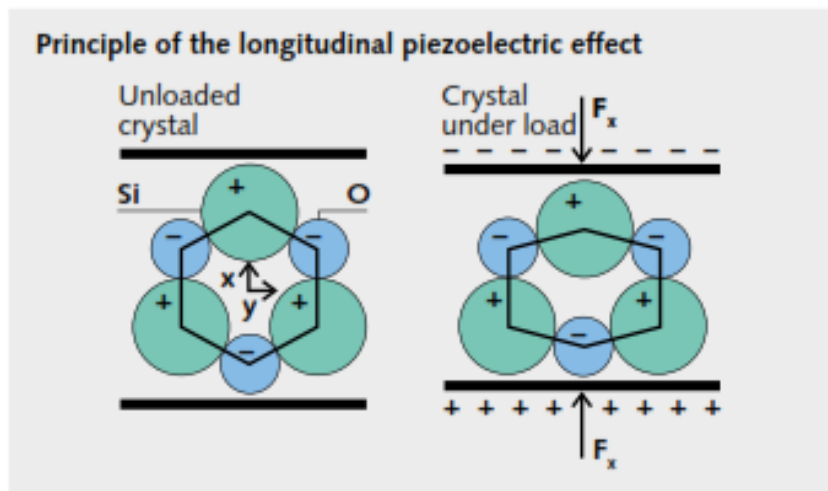


Εικόνα 3. 12: Ο ζυγός τριών συνιστωσών της Kistler 9327C

Χαρακτηριστικά 9327C	Μονάδες	Τιμές
Διαστάσεις	mm	42*42*42
Βάρος	g	380
Εύρος δυνάμεων F_x, F_y	kN	-1...1
F_z	kN	-8...8
Εύρος θερμοκρασίας	°C	-40...120
Επιτρεπόμενη άσκηση ροπής	N*m	3
Ακαμψία $c_{s,xy}$	kN/μm	0.39
$c_{A,z}$	kN/μm	1.4
Ενεργειακό κατώφλι	N	1
Ευαισθησία: F_x, F_y	pC/N	≈-7.8
F_z	pC/N	≈-3.8
Φυσική συχνότητα $f_n(x), f_n(y)$	kHz	≈3.2
$f_n(z)$	kHz	≈12
Σύνδεσμος		√3 negative

Πίνακας 3.8: Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ζυγού των μετρήσεων

Η λειτουργία αυτής της συσκευής βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο: όταν ένας κρύσταλλος quartzυπόκειται σε μηχανικό φορτίο, δημιουργεί ένα σημειακό φορτίο το οποίο είναι ανάλογο στην ασκούμενη δύναμη. Λόγω της ακαμψίας αυτού του υλικού, η μετρητική απόκλιση είναι μικρή.



Εικόνα 3. 13: Απεικόνιση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Εάν χρησιμοποιείται ένας σύνδεσμος δύναμης quartz, ο φορέας δύναμης που προκύπτει θα πρέπει να διέρχεται από το κέντρο του αισθητήρα όπου είναι δυνατόν. Η εφαρμογή έκκεντρης δύναμης δημιουργεί μια ροπή που ασκείται στον αισθητήρα. Αυτό επιτρέπεται μόνο μέχρι τις καθορισμένες τιμές. Οι διακυμάνσεις της μέγιστης δύναμης πρέπει να μειωθούν αντίστοιχα. Ένα δυναμόμετρο επαρκούς άκαμπτης δομής με τέσσερις συνδέσμους δύναμης από quartz εμποδίζει την πολύ μεγάλη φόρτιση του φορτίου της ροπής στο μοναδικό στοιχείο αισθητήρα.

Στο συγκεκριμένο ζυγό, οι σύνδεσμοι των 4 δυνάμεων quartz παραλληλίζονται μηχανικά. Τα σήματα των μετρήσεων (ηλεκτρικό φορτίο) των τεσσάρων αισθητήρων μπορούν επίσης να παραλληλιστούν (συνοψιστούν). Το συνολικό σήμα αντιστοιχεί στην συνολική συνισταμένη των εκάστοτε δυνάμεων.

Για το μετρητικό σύστημα χρειάζεται ένας ενισχυτής φορτίου. Αυτός μετατρέπει το ηλεκτρικό φορτίο σε τάση. Η τιμή που εξάγει είναι ανάλογη στη δύναμη. Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής τύπου 5070 A της ίδιας εταιρείας.

3.2.4: Ενισχυτής φορτίου



Εικόνα 3.14: Ο ενισχυτής φορτίου της Kistler 5070A

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Νούμερο καναλιών		4
Επιλεκτικά		8
Τύπος συνδέσμου		BNC neg.
Επιλεκτικά		Fischer 9-pole
Εύρος μετρήσεων FS	pC	±200...200000
Επιλεκτικά	pC	±600...600000
Ανακρίβεια μετρήσεων (0-50°C)	%	<±0,3/<±1
Drift, επιλογή μέτρησης DC (Long) στους 25°C, μέγιστη σχετική υγρασία RH of	pC/s	<±0,05 (typ.<±0,03)
Στους 25°C, μέγιστη σχετική υγρασία RH of 70%	pC/s	typ.<±0.05
Στους 50°C, μέγιστη σχετική υγρασία RH of 70% (μη-συμπύκνωσης)	pC/s	<±0.2
Εύρος συχνοτήτων (20Vpp)	kHz	≈0...>45
Group delay	μs	<9

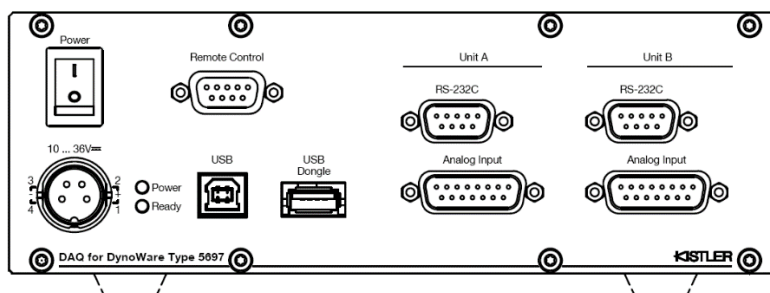
Πίνακας 3.9

Έξοδος Τάσης

Σύνδεσμος τύπου		D-Sub 15f
Τάση εξόδου	V	± 10
Ρεύμα εξόδου	mA	$< \pm 2$
Αντίσταση εξόδου	Ω	10
Reset-μετάβαση μέτρησης	μC	$< \pm 2$
Σφάλμα μηδενικού λάθους (Reset)	mV	$< \pm 10$
Σήμα παρεμβολής εξόδου(0.1 Hz-1MHZ)	mVp ρ	< 10

Πίνακας 3.10

Ο ενισχυτής φορτίου συνδέεται με καλώδια με το σύστημα απόκτησης δεδομένων Dynoware 2825A με ενσωματωμένη κάρτα A/D. Η τελευταία (PC-CARD-DAS16/16) μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό και συνδέεται σε μία υποδοχή του υπολογιστή, ενώ το σύστημα DAQ 5697A σε μια θύρα USB.



Εικόνα 3. 15: Συνδεσμολογία στο DAQ-SystemType 5697A

3.2.5:Κάρτα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Τεχνικά Χαρακτηριστικά DAQ-SystemsType 5697A

Διαστάσεις	mm	208*70*249
Βάρος	Kg	2.15
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	$^{\circ}C$	0...50
Ελάχιστη/Μέγιστη θερμοκρασία	$^{\circ}C$	-10/60

Ηλ. Μόνωση μεταξύ εισόδου-τάσης τροφοδοσίας (max)	V	40
Εύρος τάσης εισόδου	VDC	10...36
Κατανάλωση ισχύος	VA	5
Αριθμός καναλιών		28
Ανάλυση	Bits	16
Τάση εισόδου	V	+ -20
Εύρος τάσης εισόδου	V	$\pm 0,1 / \pm 0,2 / \pm 0,5$ $\pm 1 / \pm 2 / \pm 5 / \pm 10$

Πίνακας 3.11

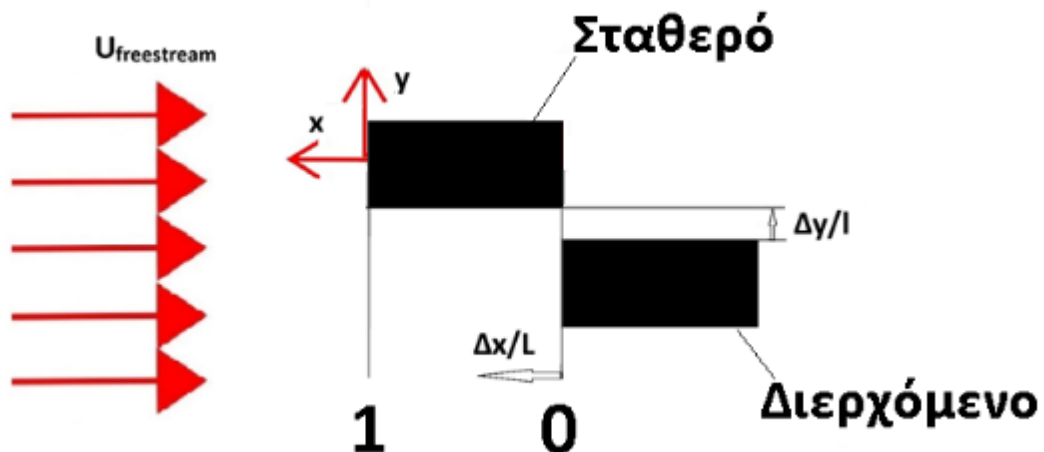
Ένα καλώδιο τύπου 1700A111A2 ή 1700A113A2 συνδέει το κουτί συνδέσεων του DAQ-System στον ενισχυτή φορτίου στη θέση 'Analog Input'.

Ένα καλώδιο διασύνδεσης τύπου RS-232C τύπου 1200A 27 απαιτείται για τον έλεγχο του ενισχυτή φορτίου. Η σύνδεση με τον υπολογιστή γίνεται επίσης από τη θέση σύνδεσης RS-232C. Στην υποδοχή «USB Dongle» του 5697^A εισάγεται το HASP (USB flash drive) που παρέχει την άδεια λογισμικού του συστήματος απόκτησης δεδομένων Dynoware 2825A.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματικά αποτελέσματα

4.1. Καταγραφή του Πεδίου Ταχυτήτων δύο διαστάσεων γύρω από μοντέλα αυτοκινήτων με τη μέθοδο PIV

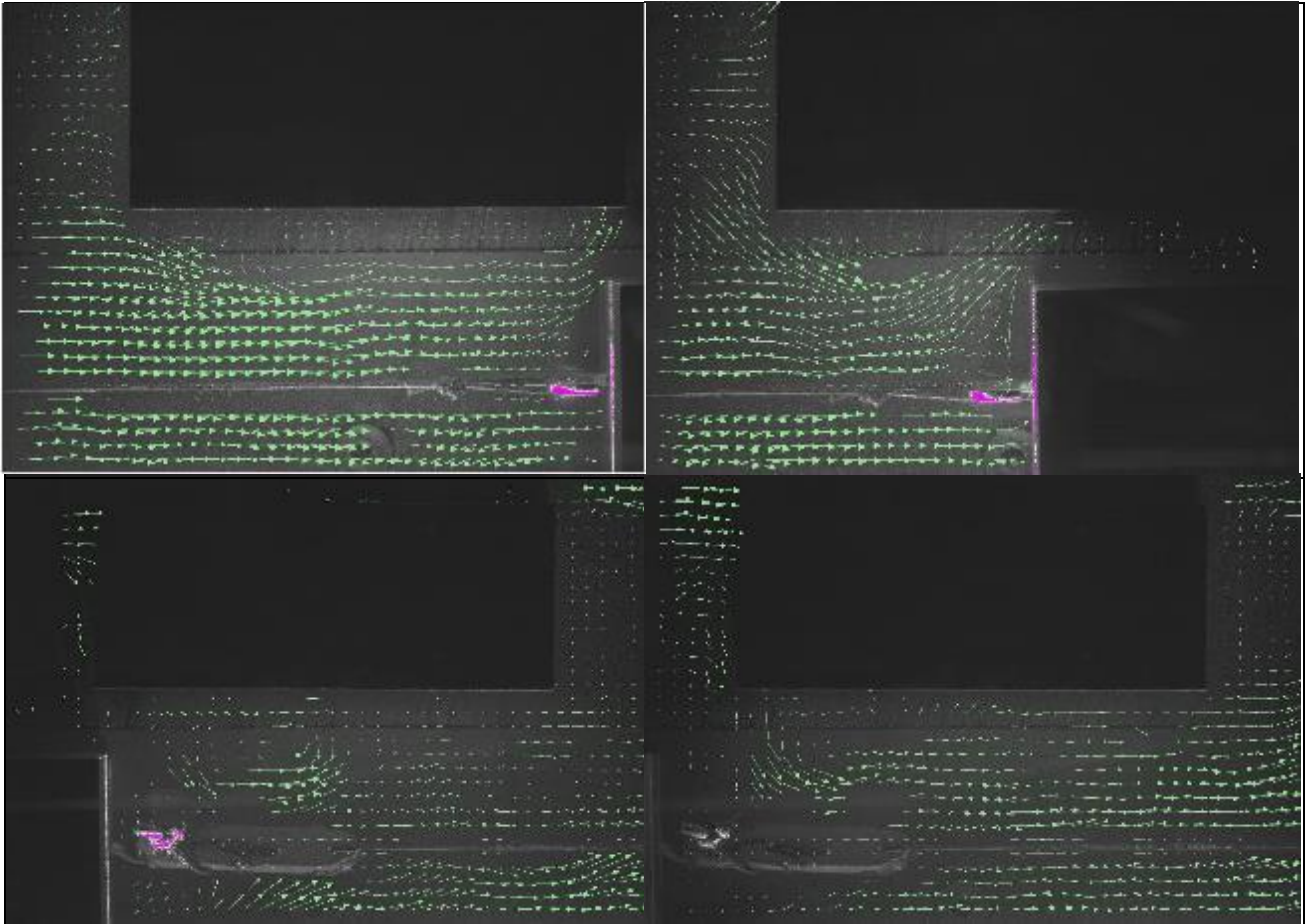
Στο κομμάτι του ελέγχου του πεδίου ταχυτήτων με PIV οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες σχετικές διαμήκεις θέσεις μεταξύ των μοντέλων αυτοκινήτων σε 3 διαφορετικές πλευρικές αποστάσεις μεταξύ τους: 14, 20, 30mm, δηλ. $(\Delta y/l) = 0.35, 0.5, 0.75$. Οι ταχύτητες του ελεύθερου ρεύματος αέρα στη μικρή σήραγγα ήταν 8.56 και 8.47 m/s. Η αντιστοιχία pixel σε mm ήταν αντίστοιχα ήταν 11.4 και 10.86. Αξίζει να σημειώσουμε ότι σε κάθε περίπτωση του πεδίου ταχυτήτων προέκυπτε ο μέσος όρος του από 200 ζεύγη φωτογραφιών που κατέγραφε η κάμερα PIV. Το μέγεθος του πλάνου της κάμερας ήταν 42*31 (μήκος πλάτος). Σύμφωνα με το σχήμα [4.1] της πειραματικής διάταξης, οι σχετικές πλευρικές αποστάσεις $(\Delta y/l)$ ορίζονται από τη δεξιά ακμή του διερχόμενου αυτοκινήτου ως την αριστερή ακμή του σταθερού κοιτάζοντας αντίθετα με τη ροή της σήραγγας. Οι διαμήκεις θέσεις ορίζονται ανάλογα με το αν η μύτη του διερχόμενου οχήματος βρίσκεται ανάντι (+) ή κατάντι (-) σε σχέση με το πίσω μέρος του σταθερού.



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση του πεδίου συντεταγμένων κατά τις μετρήσεις με PIV

4.1.1.1α):1^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.35-14\text{mm}$:

Σε αυτή την περίπτωση έγιναν δύο κύκλοι μετρήσεων. Στις θέσεις μεταξύ $-1.33L$ έως $1L$ η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος είναι 8.56 m/s , ενώ στις άλλες από $+2L$ μέχρι $+3L$ 8.47m/s και επιπλέον αλλάζουν οι διαστάσεις του πραγματικού πλάνου που καταγράφει η κάμερα από $10.34*7.63 \text{ cm}$ σε $11.4*8.41 \text{ cm}$ κατά xy αντίστοιχα γι' αυτό άλλαξε και η αντιστοιχία των pixel με mm από 11.4 σε 10.86 .



Εικόνα 4.2: Εικόνες από Insight για πλευρική απόσταση $\Delta y/l= 0.35$ στις σχετικές διαμήκεις θέσεις $0,+0.5,+2+2.22L$

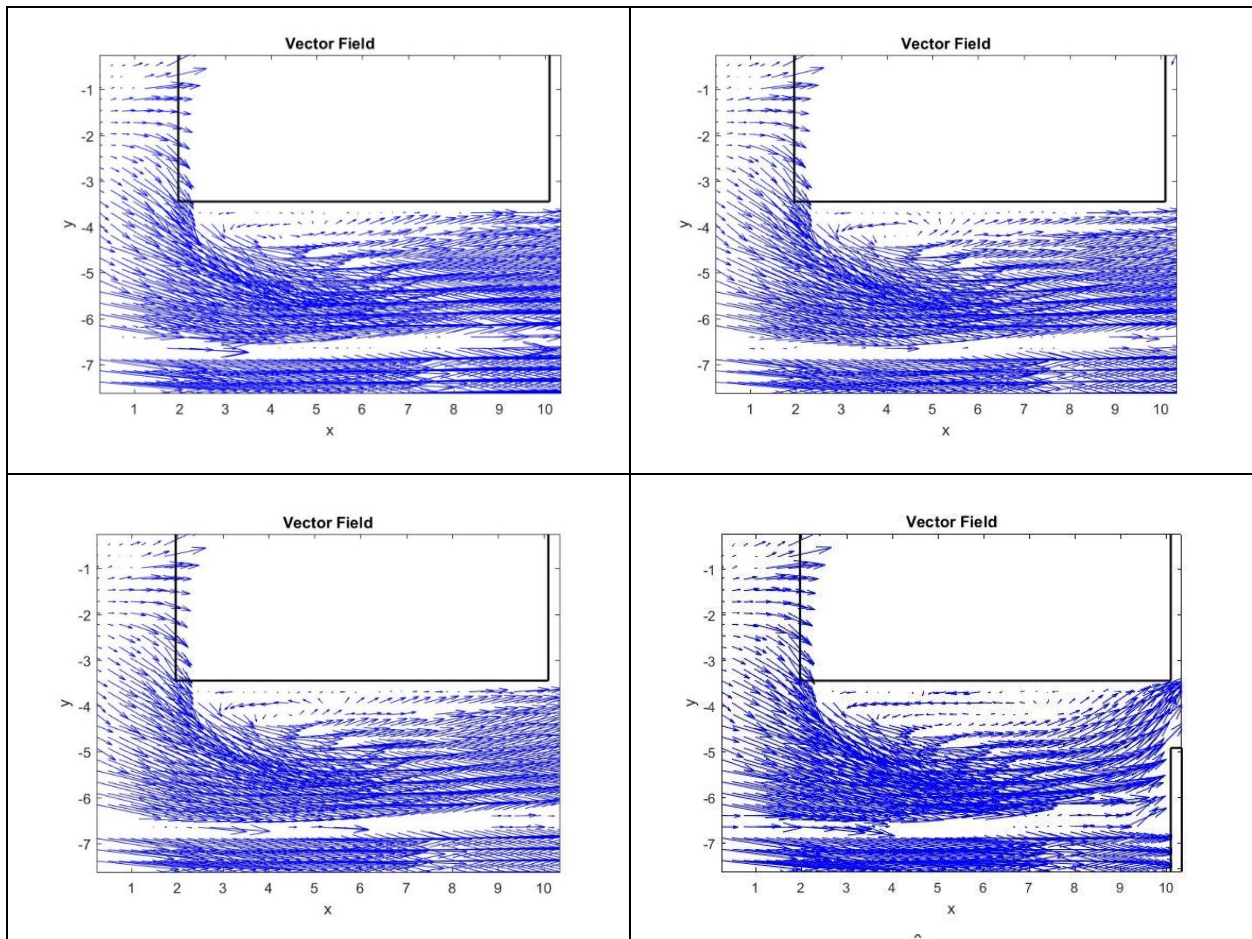
Φωτογραφίες από πρόγραμμα Insight για πλευρική απόσταση $\Delta y/l= 0.35$ στις διαμήκεις θέσεις $0,+0.5,+2,+2.22$. Εδώ, όπως και στα επόμενα γραφήματα, στο πάνω του πλάνου βρίσκεται το σταθερό μοντέλο και στο κάτω το διερχόμενο.

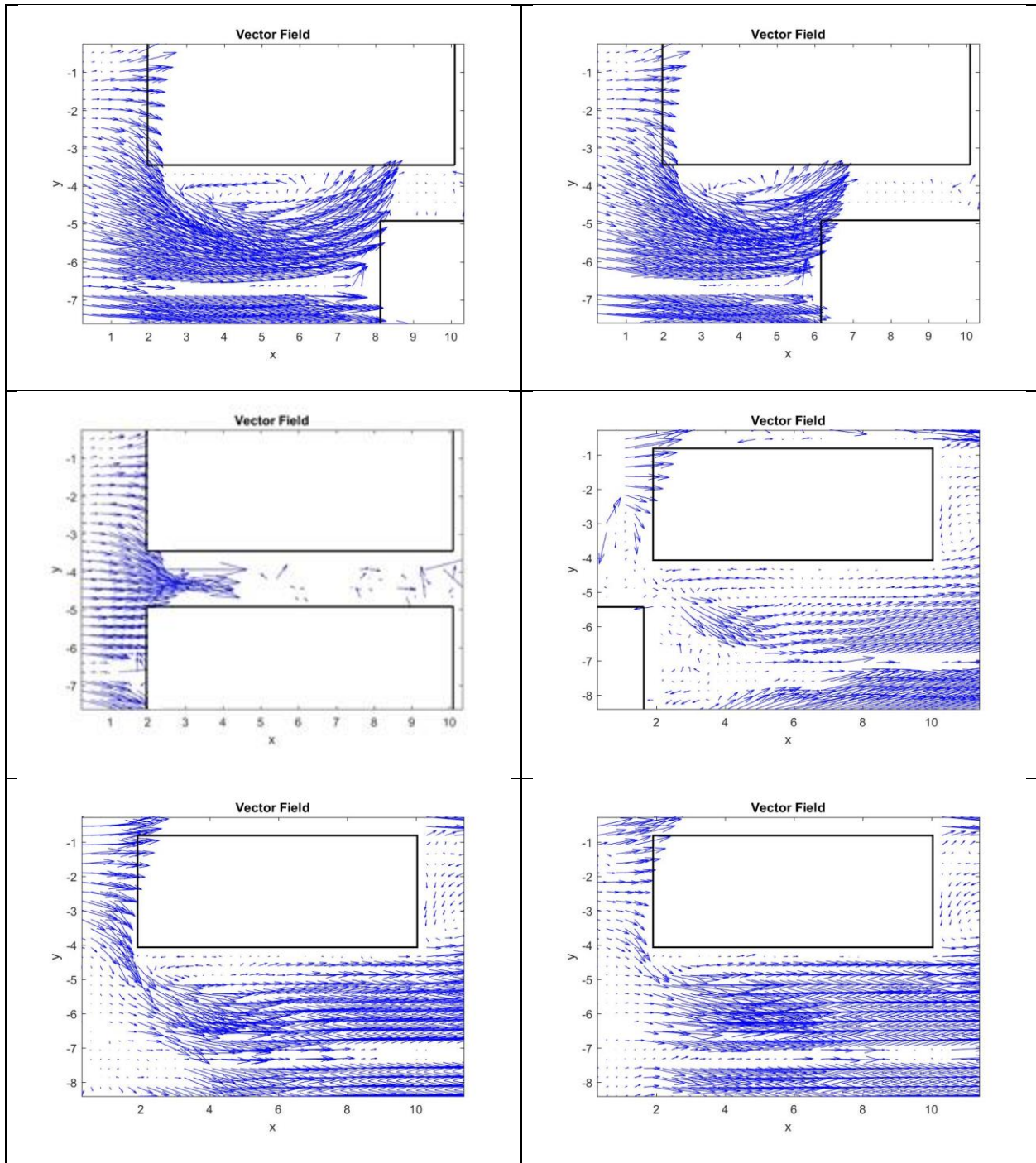
Σε αυτή την πλευρική απόσταση διακρίνεται στο πεδίο ροής της ταχύτητας η μεγαλύτερη αλληλεπίδραση μεταξύ των μοντέλων λόγω της εγγύτητάς τους.

Σημειωτέον, ότι στην προσπάθεια να γίνουν πιο εύκολοι οι υπολογισμοί και οι συγκρίσεις μεταξύ των διάφορων περιπτώσεων, κάθε μέγεθος είναι αδιαστατοποιημένο με το μέτρο της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος στη σήραγγα. Παρακάτω παρατίθενται αποτελέσματα από την απεικόνιση των συνιστωσών του πεδίου ταχυτήτων, του μέτρου της ταχύτητας και των τυπικών αποκλίσεων της αξονικής και ακτινικής ταχύτητας για δέκα διαμήκεις θέσεις :(-95, -45, -25, 0, +25, +45, +90, +180, +220, +270) κατ' αντιστοιχία με τις αδιαστατοποιημένες: -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3.

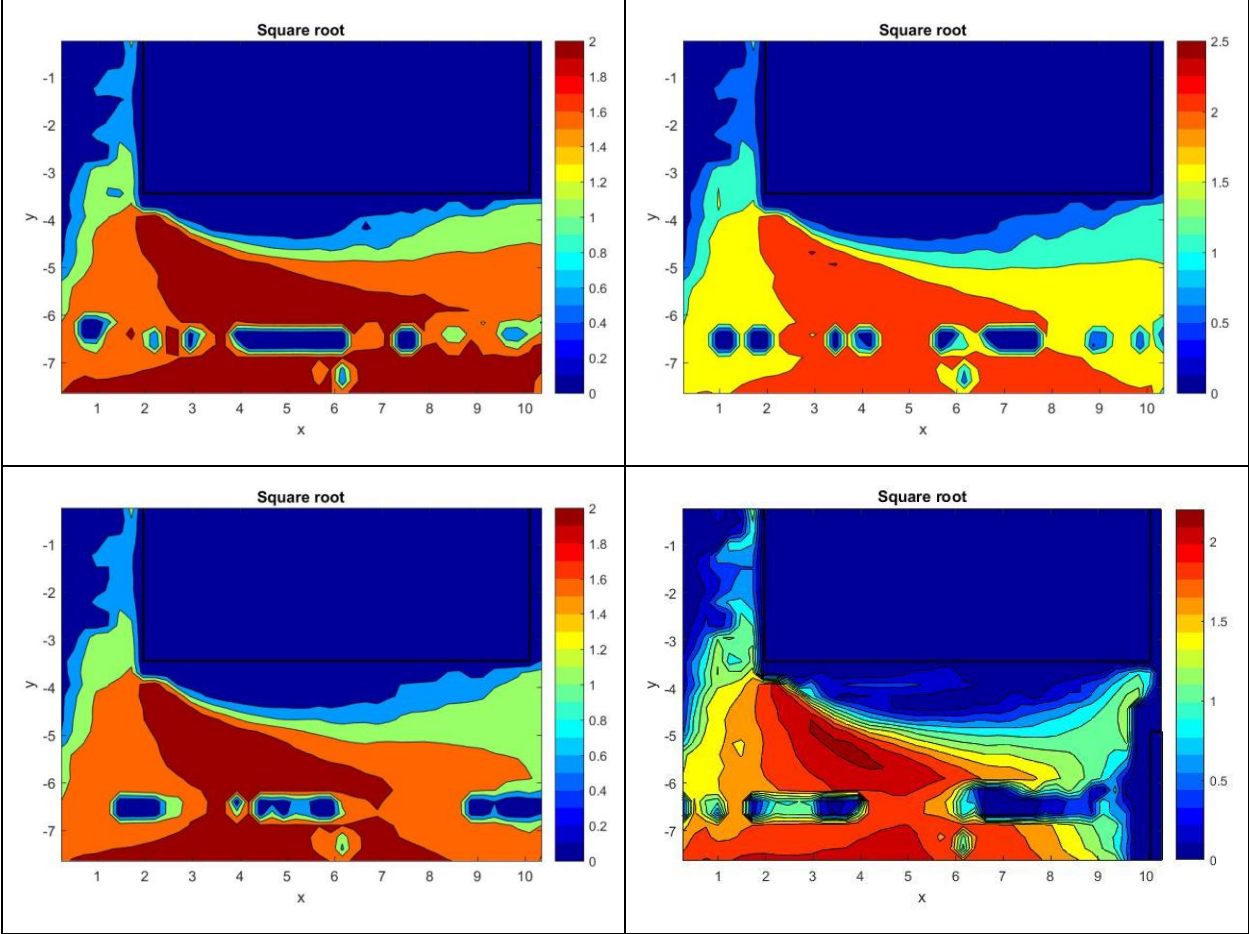


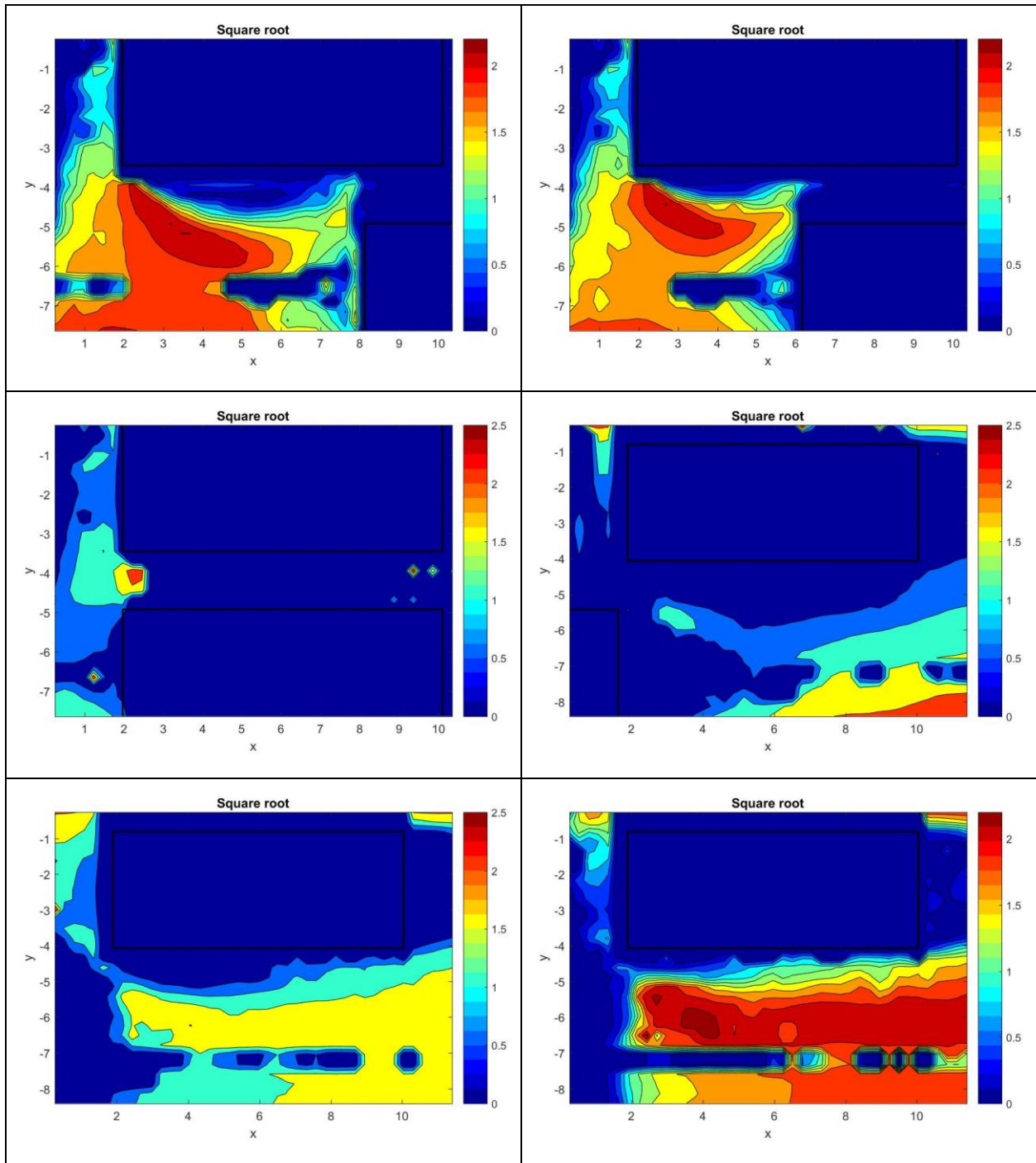
Εικόνα 4.3:Μοναδιαίο δiάνυσμα ταχύτητας



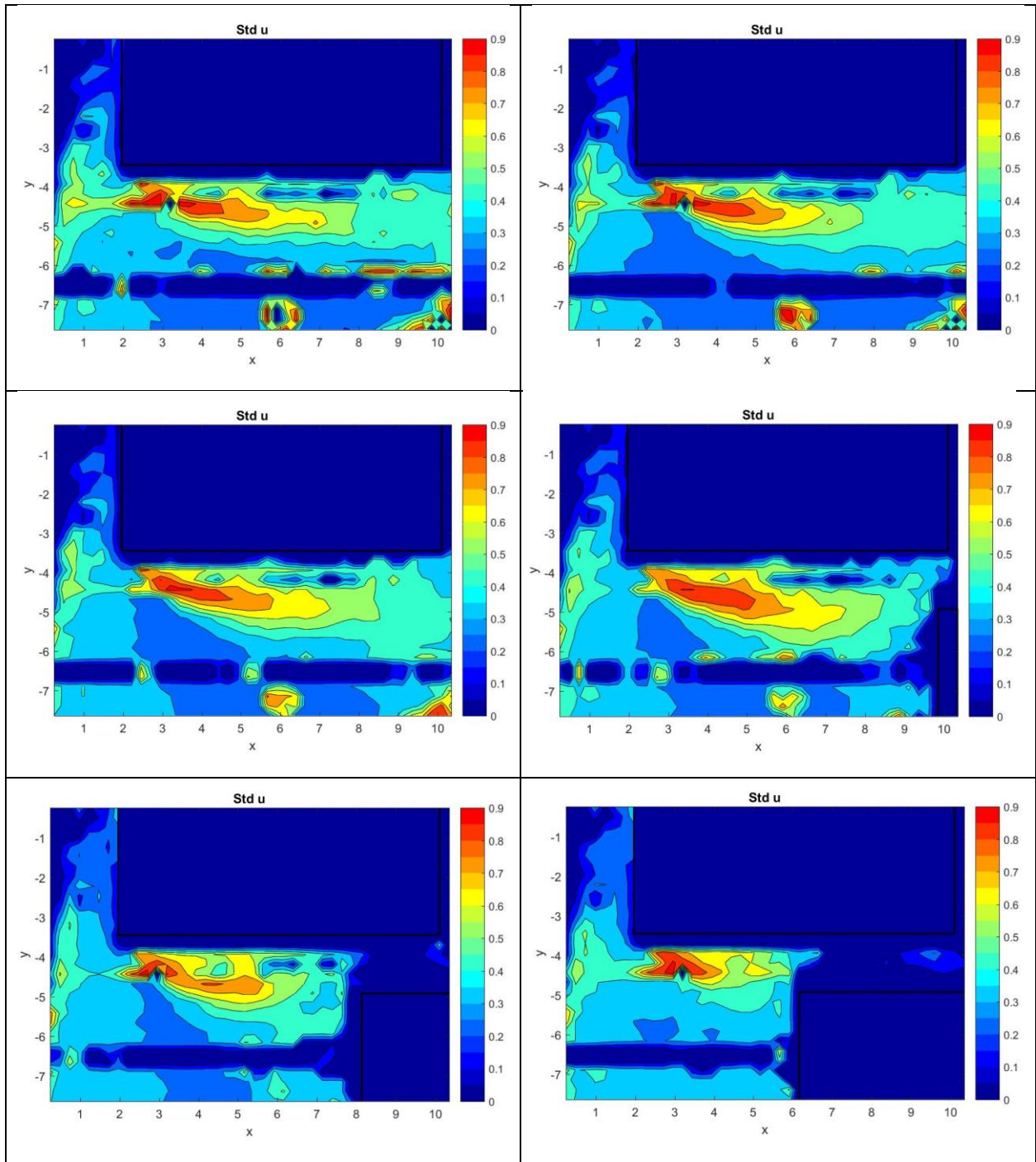


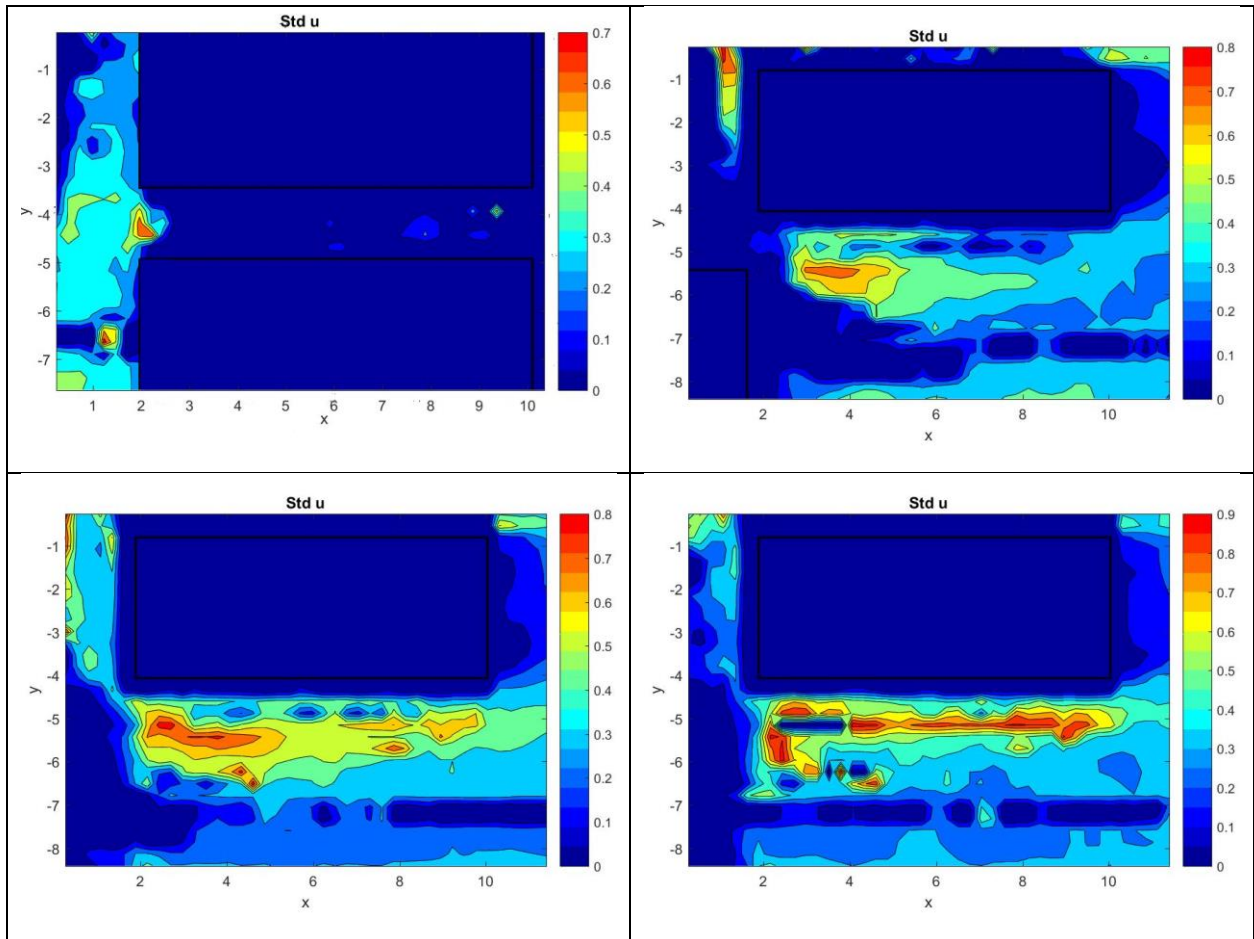
Εικόνα 4.4: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3



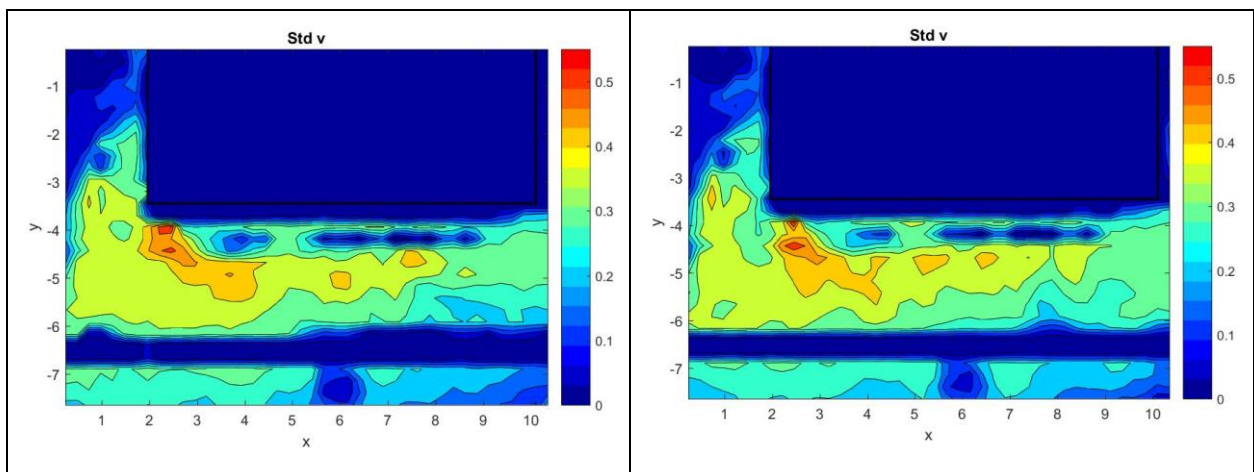


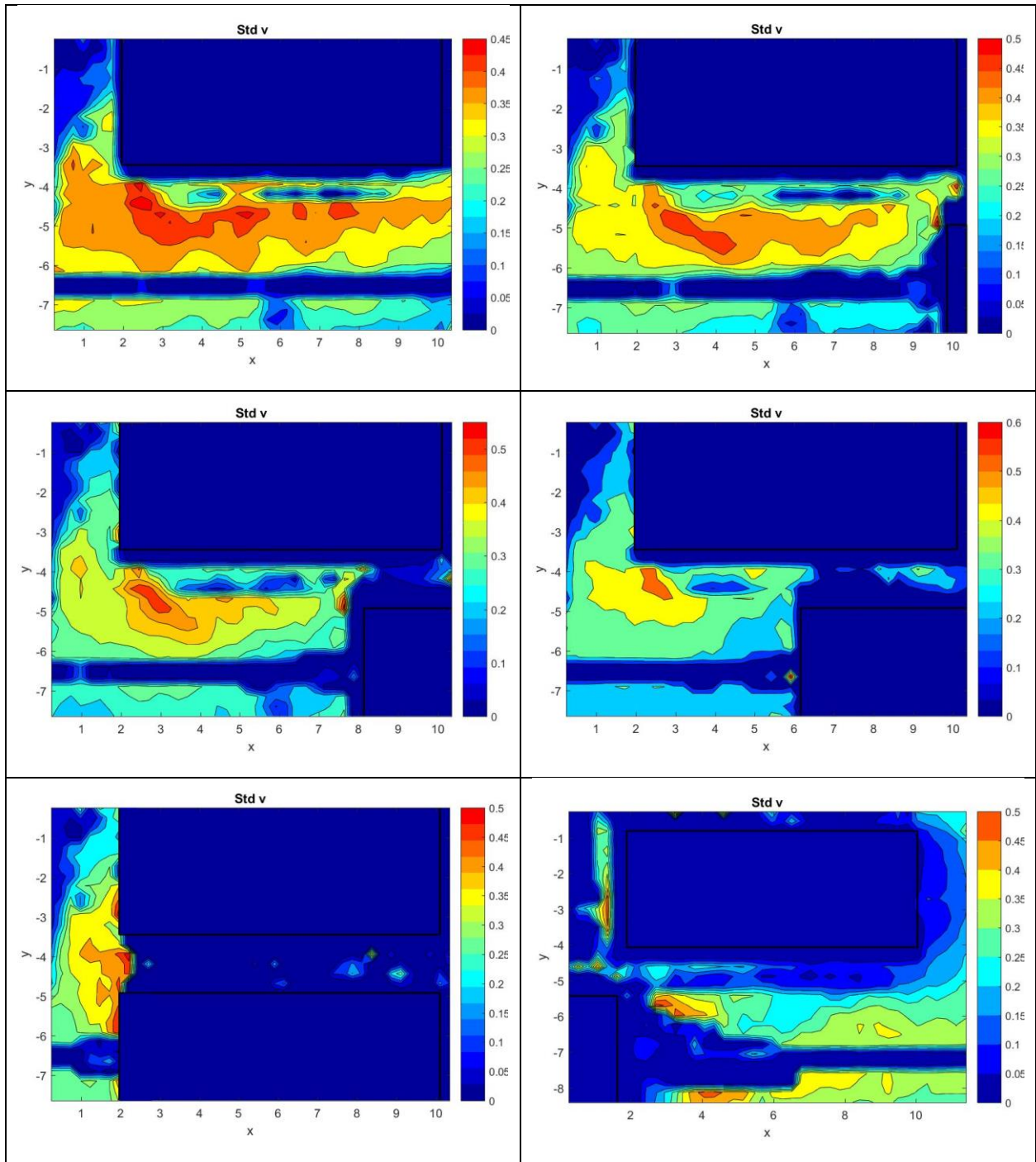
Εικόνα 4. 5: Μέτρο της ταχύτητας στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

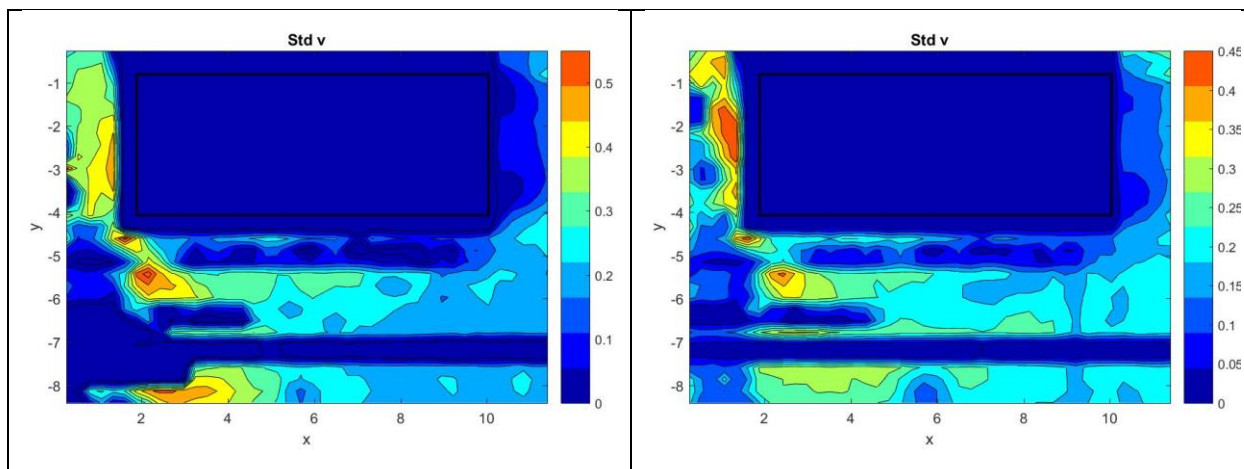




Εικόνα 4. 6: Τυπική απόκλιση (standard deviation) της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας, στις σχετικές διαμήκειες θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3







Εικόνα 4. 7: Τυπική απόκλιση (standard deviation) της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

4.1.1.1β): Σχολιασμός μετρήσεων για πρώτη πλευρική απόσταση

Παρατηρείται μια μεταβολή της περιοχής αποκόλλησης της ροής καθώς το διερχόμενο όχημα πλησιάζει το σταθερό. Αρχικά με το να δημιουργούνται περισσότερες διαφορετικές «διαβαθμίσεις» στο μέτρο της ταχύτητας (Εικόνα 4.4, από τη θέση $-0.28L$ σε $0L$), το οποίο φτάνει σε τιμές έως 250% της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος. Στη συνέχεια με το να μειώνεται ξεκάθαρα η έκτασή της στο χώρο που καλύπτει πλέον το διερχόμενο όχημα (εικόνα 4.4 -εξέλιξη πλάνου μεταξύ 0 και $1L$). Μετέπειτα παρατηρείται μία μείωση στο εύρος των ζωνών των υψηλών ταχυτήτων (κάτω από το σταθερό μοντέλο κατά μήκος) στις θέσεις 2 και $2.2L$, λόγω της επίδρασης σε αυτή τη περιοχή του ομόρρου του διερχόμενου οχήματος, μέχρι η ροή στη θέση $+3L$ να επανέλθει στα επίπεδα των θέσεων κοντά στη διαμήκη θέση $-1L$. Σημειώνεται ότι η έντονη διαφοροποίηση του εκάστοτε απεικονιζόμενου μεγέθους για $y=-6:-7$ στο πρώτο στήσιμο και $y=-7:-8$ στο δεύτερο σε αρκετά πλάνα οφείλεται στην παρουσία του σκοινιού που ήταν περασμένο στο διερχόμενο μοντέλο.

Όσον αφορά τα επίπεδα τύρβης, (βλ.Εικόνα 4.5, 4.6 για την πρώτη πλευρική απόσταση και 4.10, 4.11, 4.15, 4.16 των άλλων δύο), θα πρέπει αρχικά να αναφέρουμε τον τρόπο με τον οποίο υπολογίστηκαν και διαμορφώθηκαν. Για όλα τα διανύσματα που είχαμε και για τις 200

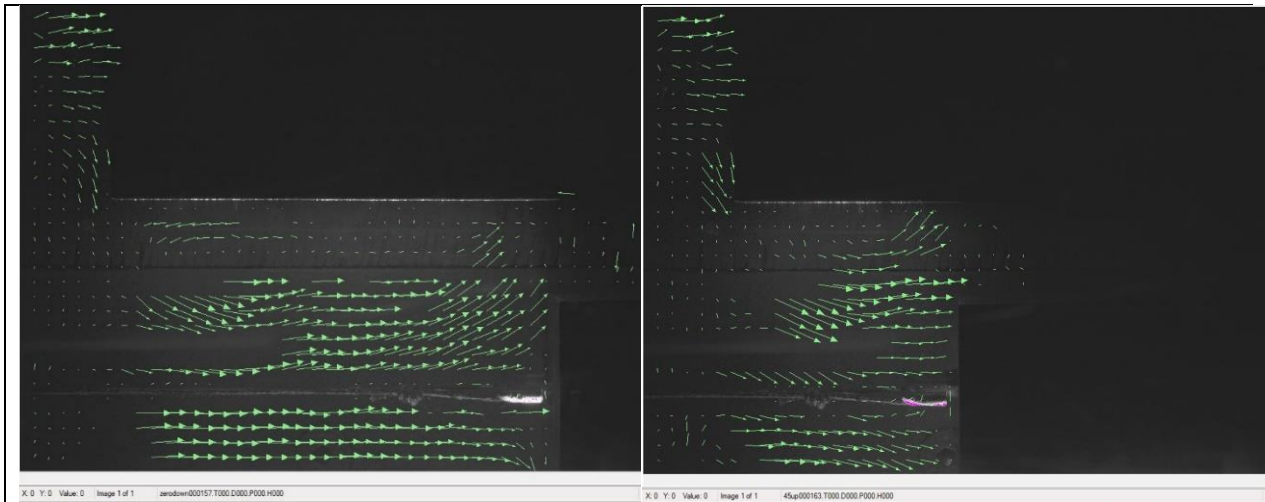
απεικονίσεις της κάμερας PIV υπολογίσαμε τον παρακάτω όρο $\sqrt{\frac{\sum_1^{200}(u_i - \bar{u})^2}{200}}$, όπου ο όρος στην παρένθεση του αριθμητή είναι η διαφορά της στιγμιαίας από τη μέση ταχύτητα.

Δημιουργήσαμε έτσι μια μέση τιμή των τετραγώνων των διαταραχών της ροής και παίρνοντας την τετραγωνική ρίζα αυτού του όρου και διαιρώντας με το U_∞ , δηλαδή 8.56m/s και 8.47m/s αντίστοιχα βρίσκουμε τα επίπεδα τύρβης της ροής. Έτσι παρατηρούμε ότι οι τιμές της τυπικής

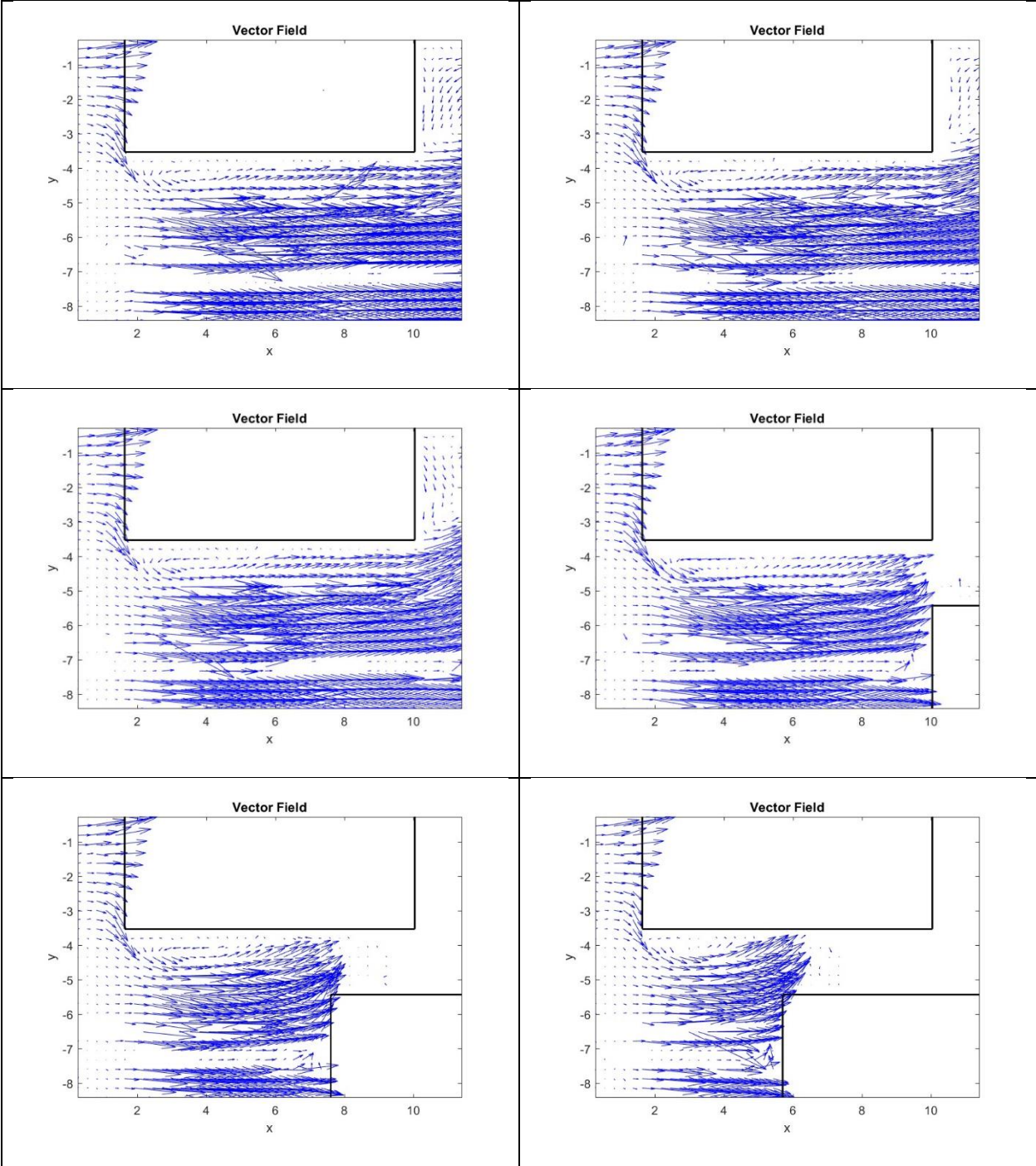
απόκλισης της αξονικής ταχύτητας φτάνουν ως και το 90% της ταχύτητας ρεύματος, ενώ αντίθετα της εγκάρσιας στο 50%. Αυτό είναι φυσιολογικό αν αναλογιστούμε τη διαταραχή που φέρνει στο ρεύμα αέρα η οξεία ακμή του σταθερού μοντέλου.

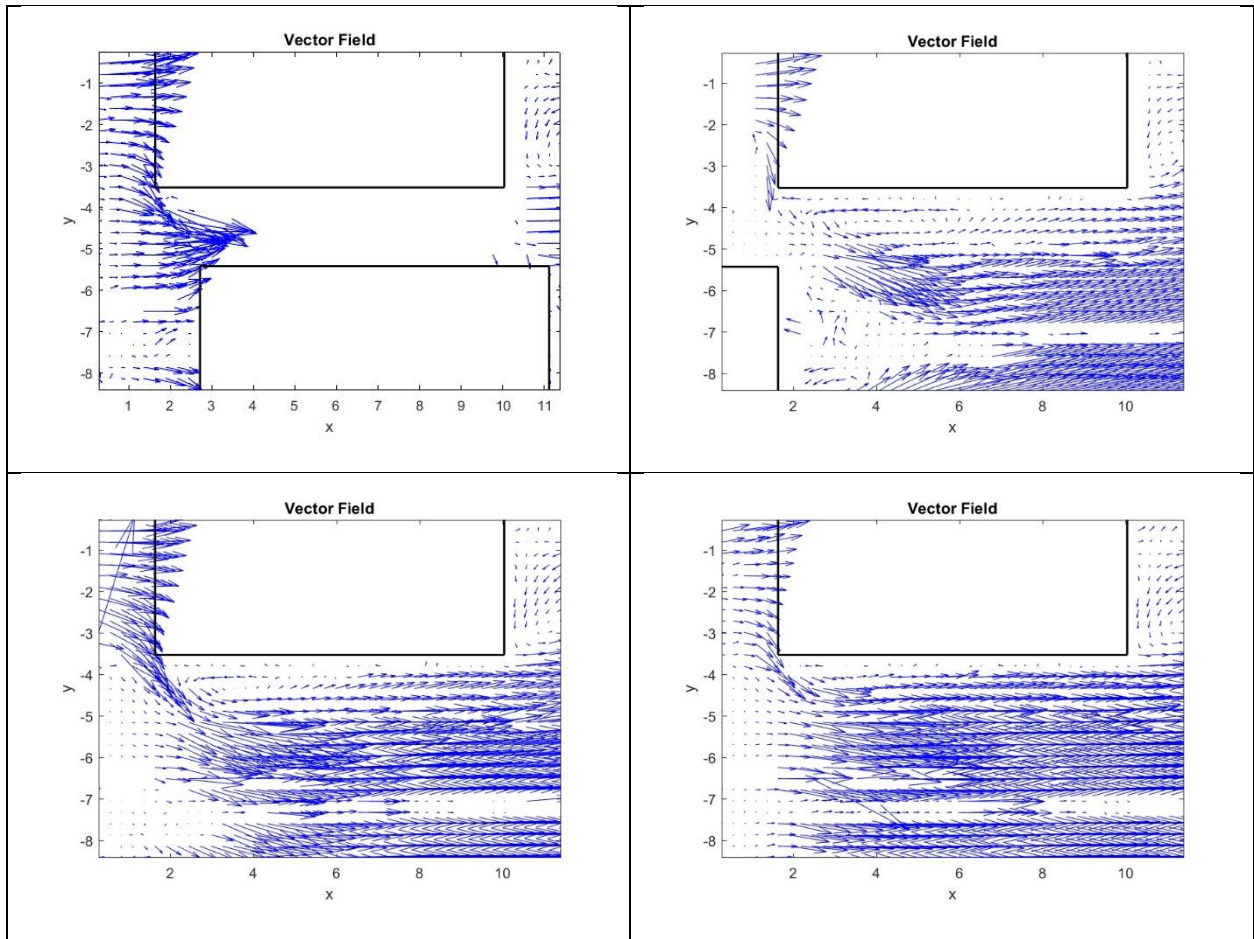
4.1.1.2α): 2^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.5-20mm$:

Σε αυτή την περίπτωση έγιναν μετρήσεις στις θέσεις μεταξύ $-1.33L$ έως $3L$ και η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος είναι 8.47 m/s , ενώ οι διαστάσεις του πραγματικού πλάνου που καταγράφει η κάμερα είναι $11.4*8.41\text{cm}$ κατά xy αντίστοιχα και η αντιστοιχία των pixel σε mm 10.86 .

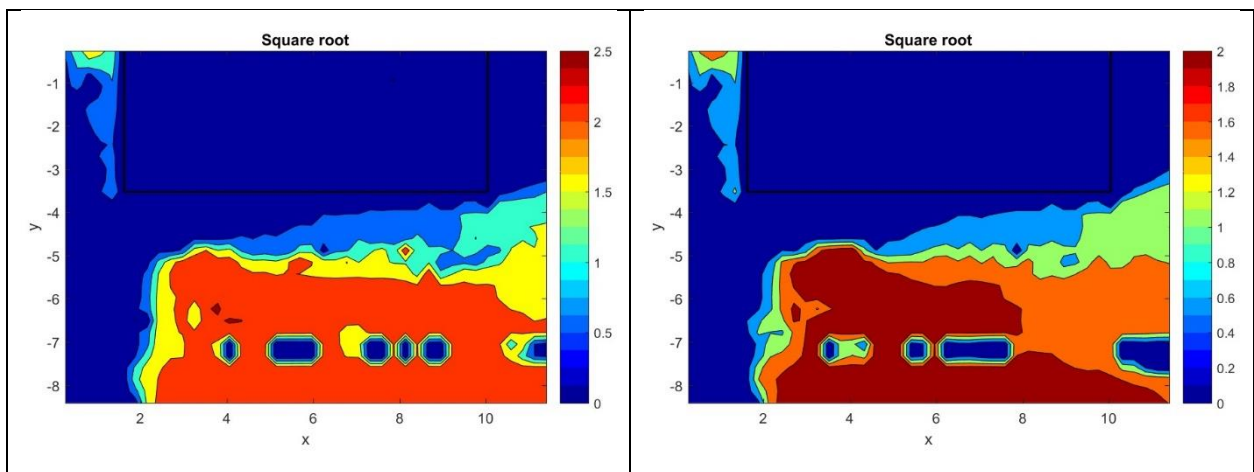


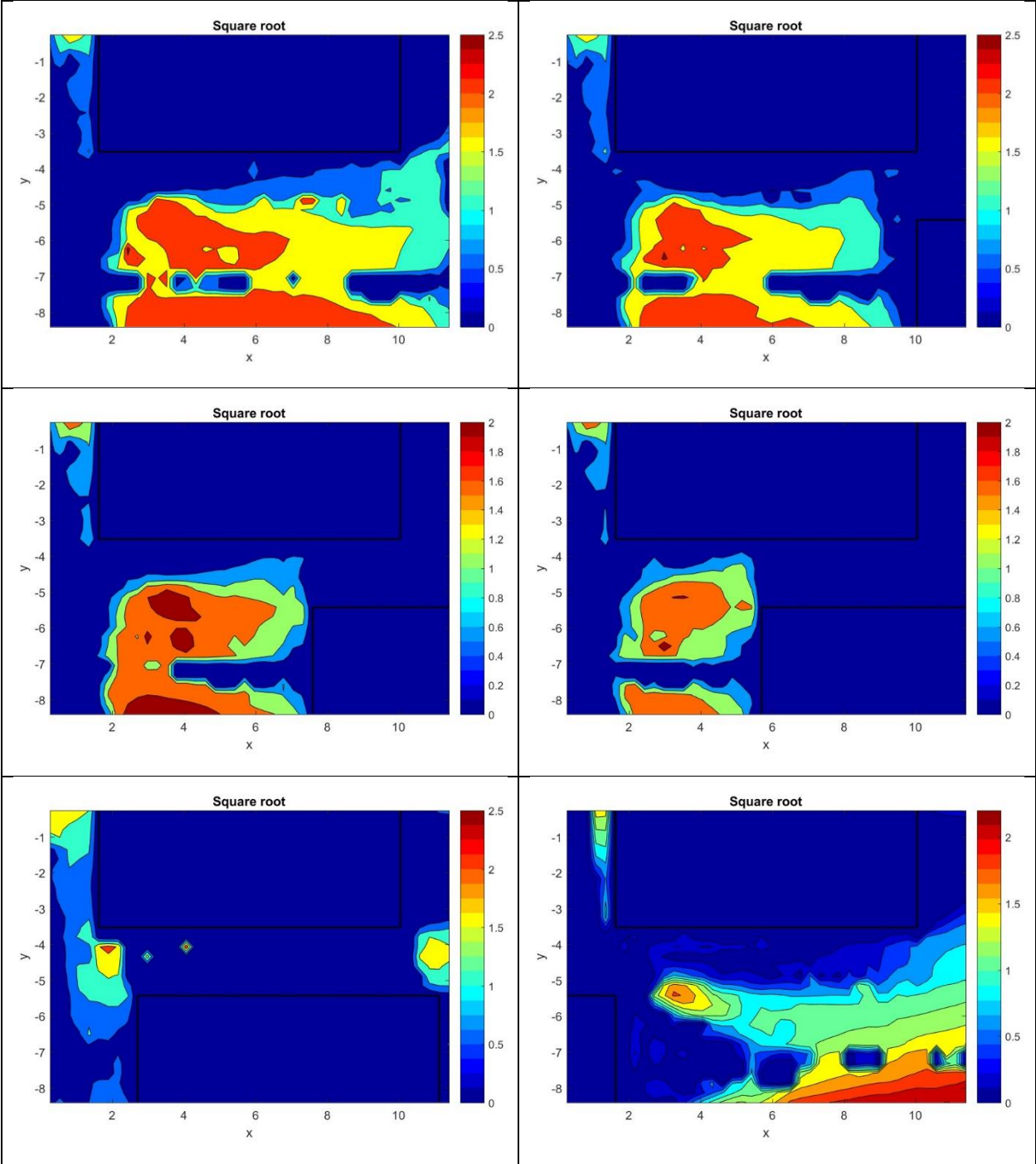
Εικόνα 4. 8: Εικόνες από το πρόγραμμα Insight για σχετική πλευρική απόσταση $\Delta y/l=0.5$ στις σχετικές διαμήκεις θέσεις $0,+0.5L$

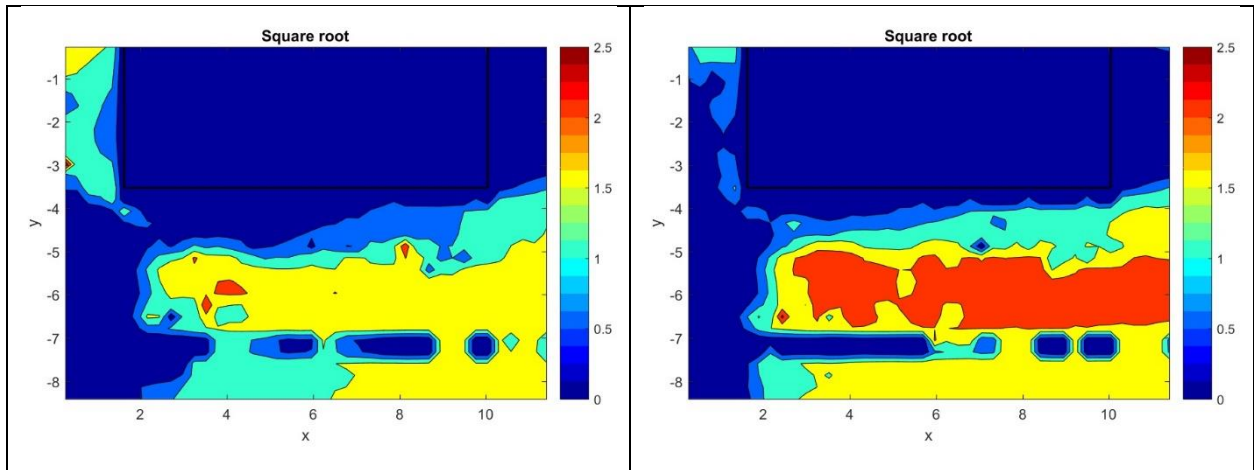




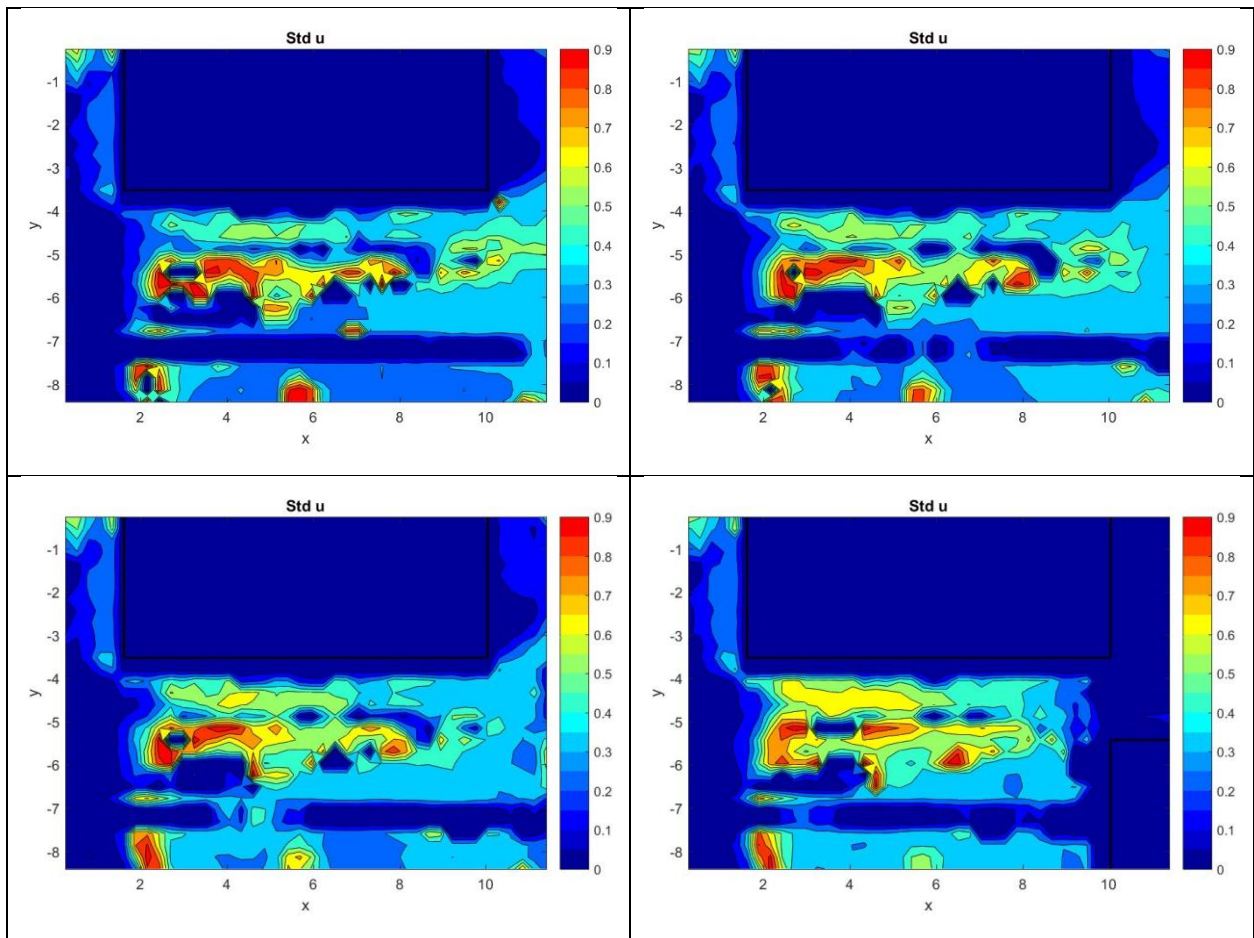
Εικόνα 4. 9: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις σχετικές διαμετρικές θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +0.88, +2, +2.44, +3

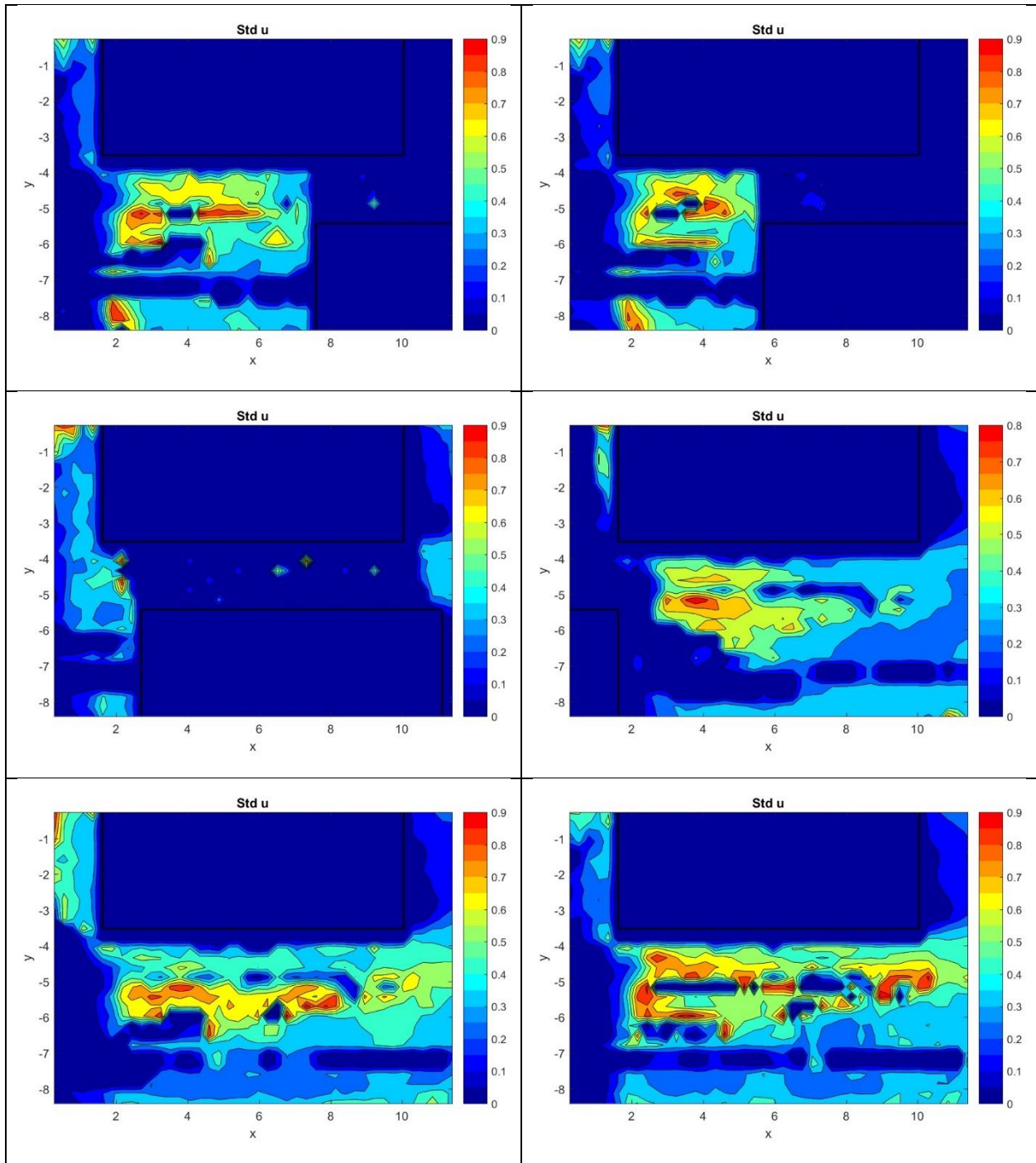




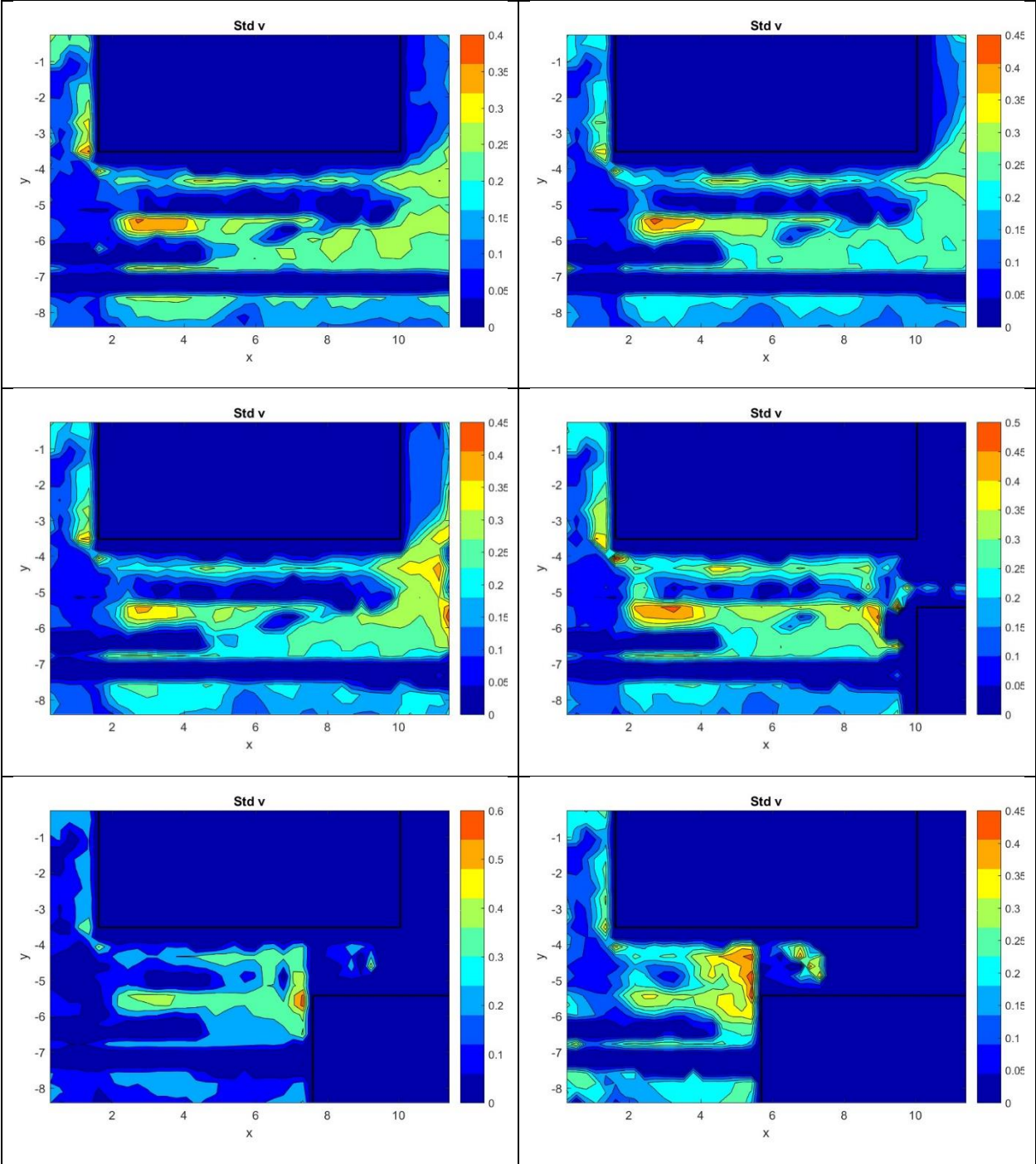


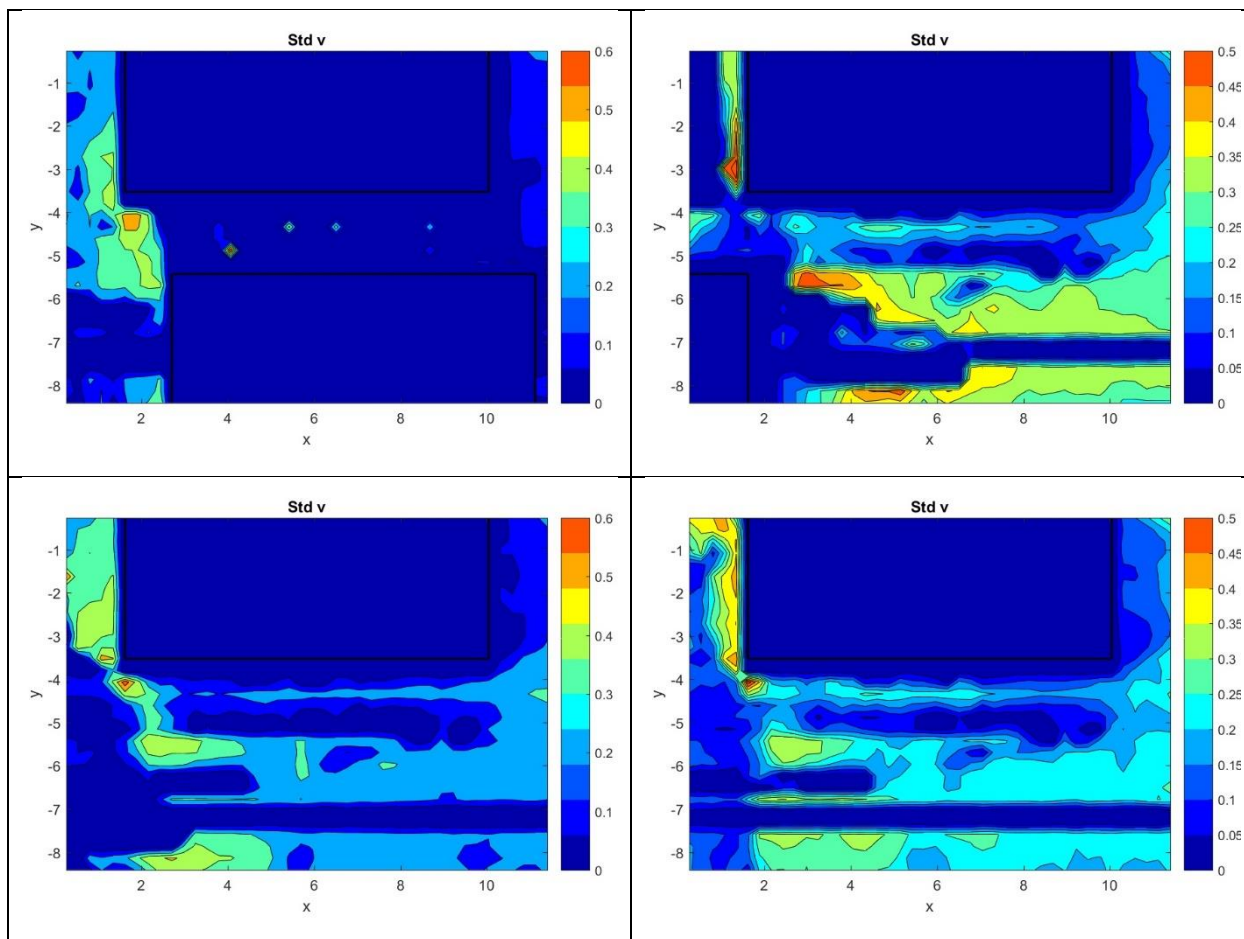
Εικόνα 4.10: Μέτρο της ταχύτητας στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +0.88, +2, +2.44, +3





Εικόνα 4.11:Τυπική απόκλιση (standard deviation) της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας, στις σχετικές διαμήκειες θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +0.88, +2, +2.44, +3





Εικόνα 4.12: Τυπική απόκλιση (standard deviation) της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας στις σχετικές διαμήκειες θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +0.88, +2, +2.44, +3

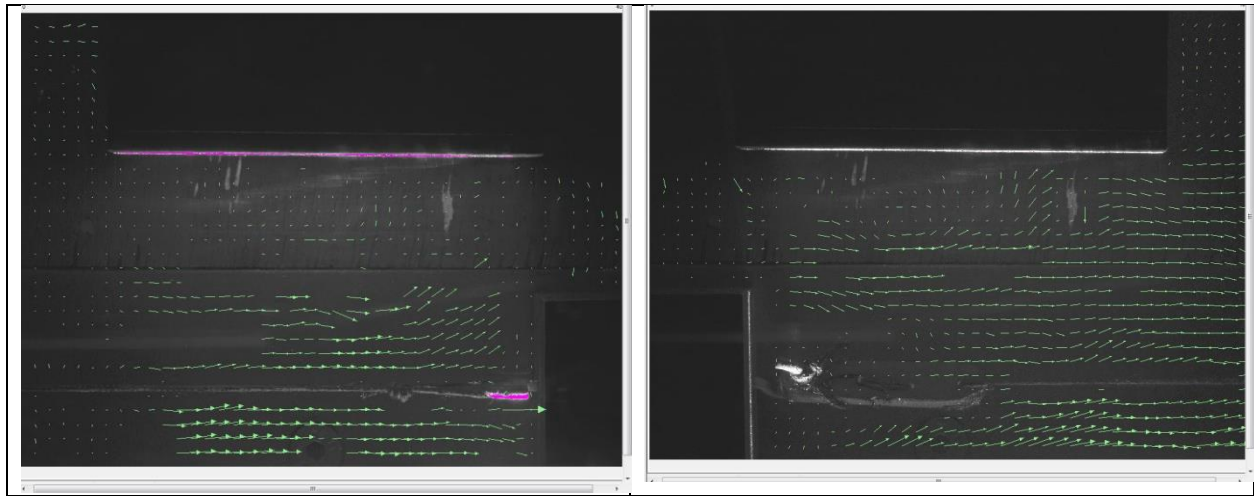
4.1.1.2β):Σχολιασμός μετρήσεων στη 2^η πλευρική απόσταση

Και εδώ παρατηρείται διαφοροποίηση στη ζώνη κάτω του σταθερού μοντέλου κατά την προσέγγιση του από το διερχόμενο, μόνο που λόγω της μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ τους, η «διαβάθμιση» των διαφορετικών επιπέδων της ταχύτητας δεν είναι το ίδιο ομοιόμορφη με πριν και παρατηρούνται μόνο σημειακά υψηλές ταχύτητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της μεγαλύτερης πλευρικής απόστασής του το διερχόμενο όχημα δεν επηρεάζει το ίδιο έντονα το πεδίο ταχυτήτων του πρώτου. Που στην πρώτη περίπτωση κατά την προσέγγιση του ($\Delta x/L=0 \div 1$) φαινόταν να συμπιέζει αυτή τη ζώνη κυρίως κατά x αλλά και κατά y.

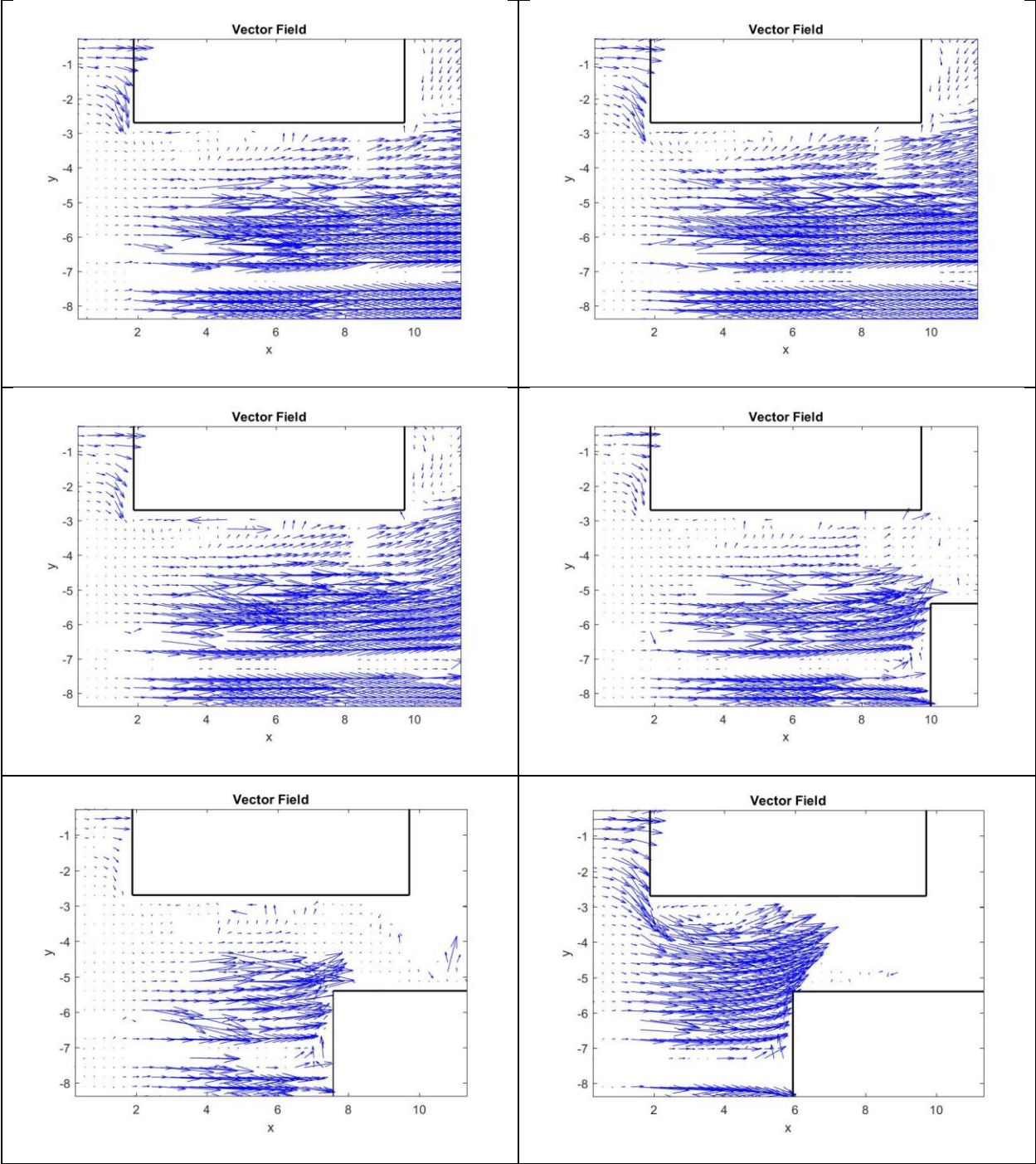
Όσον αφορά τα επίπεδα τύρβης και σε αυτή την πλευρική απόσταση παρατηρούμε μεν τα ίδια μέγιστα με την πρώτη περίπτωση αλλά σε κάθε περίπτωση οι περιοχές με μεγαλύτερη τυπική απόκλιση είναι μεγαλύτερες από αυτές στην πρώτη. Το μεγαλύτερο πλευρικό διάκενο μεταξύ των μοντέλων ίσως έδωσε μεγαλύτερο περιθώριο στο ρεύμα αέρα που αλλάζει κατεύθυνση από

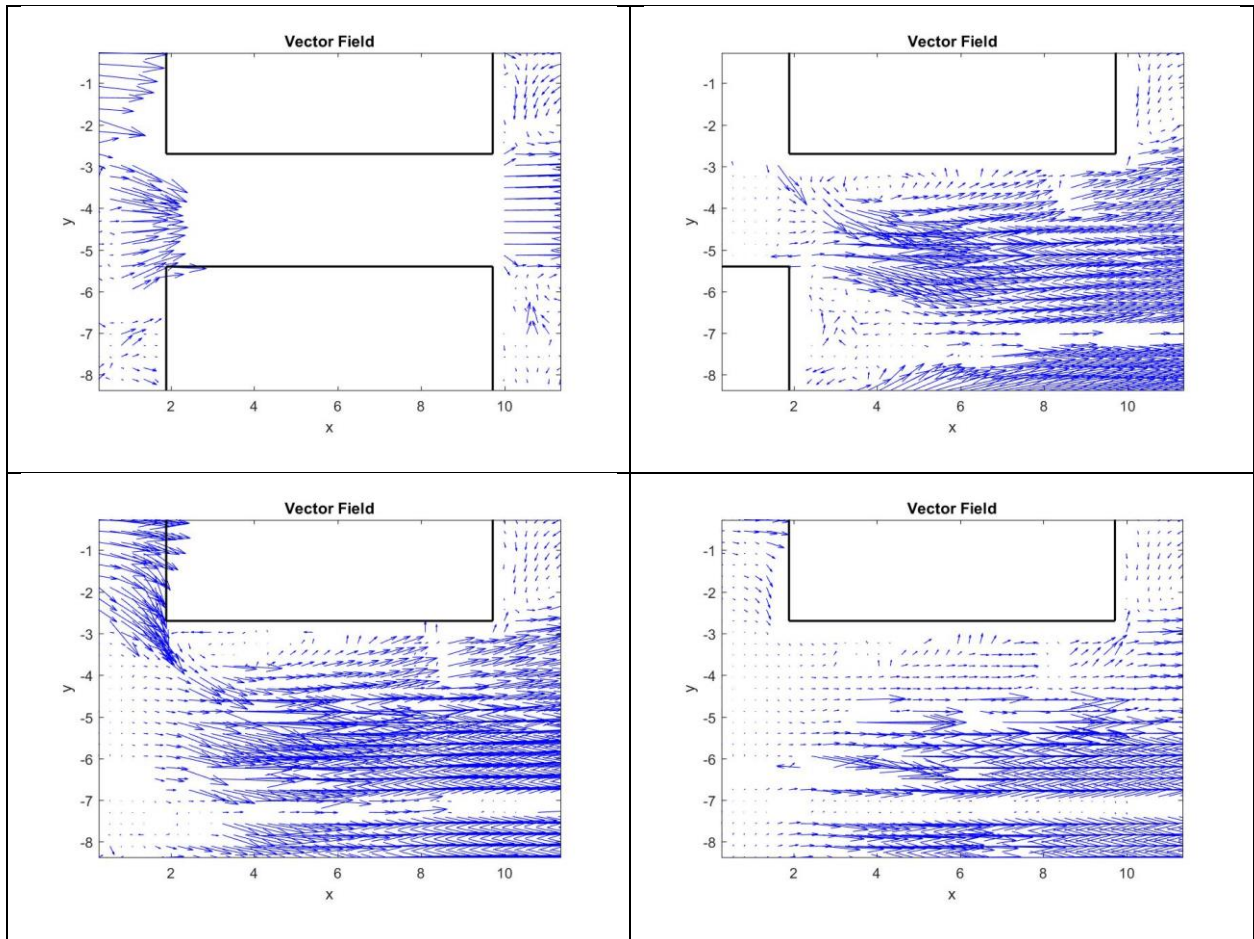
την αριστερά οξεία ακμή του σταθερού μοντέλου (σχεδόν κάθετα σε αυτή του ελεύθερου ρεύματος), επομένως η κατοπινή επαναφορά της τελευταίας έφερε μεγαλύτερη περιοχή «αστάθειας» της ταχύτητας.

4.1.1.3α) 3^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.75-30\text{mm}$:

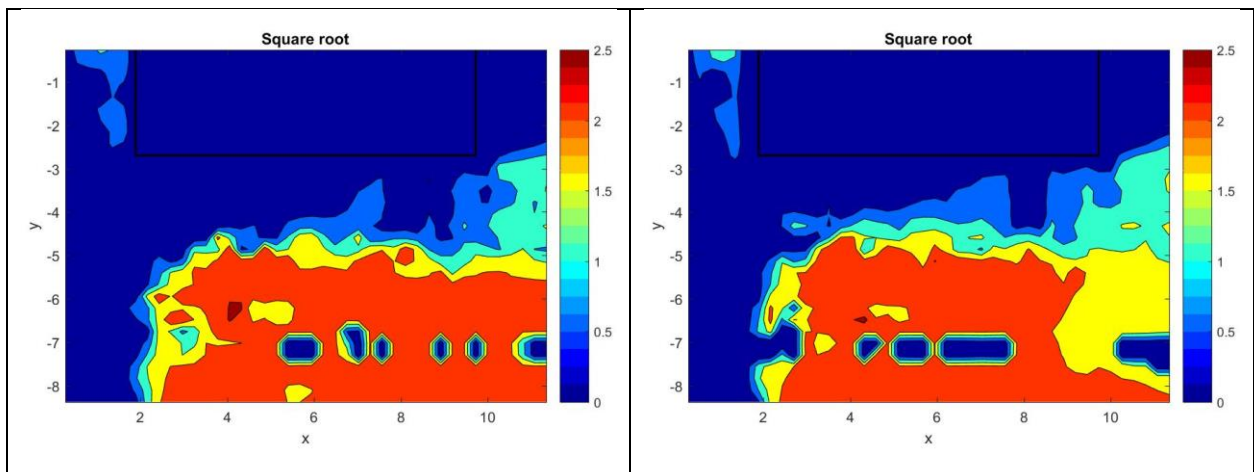


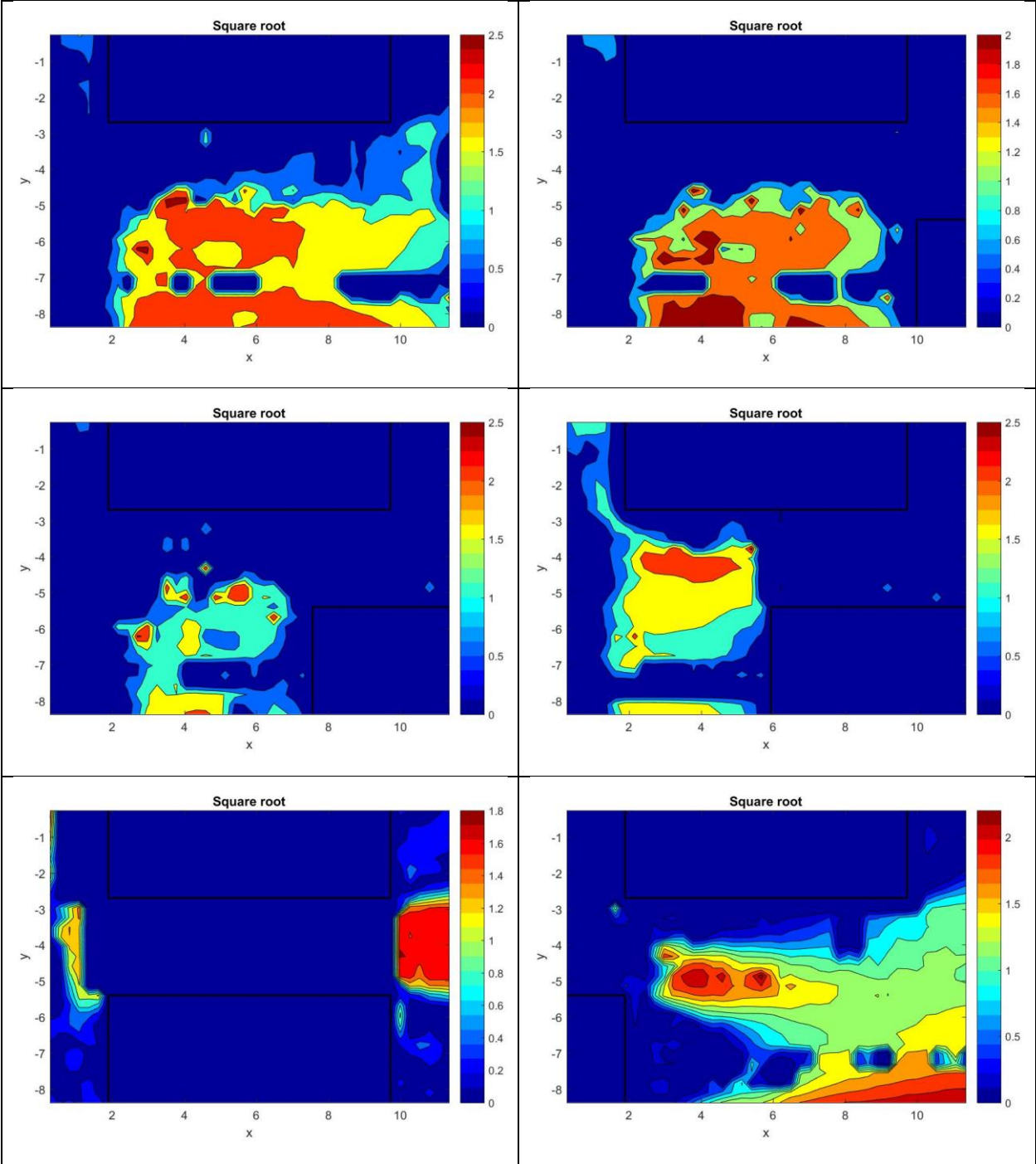
Εικόνα 4.13: Εικόνες από το πρόγραμμα Insightγια σχετική πλευρική απόσταση $\Delta y/l=0.75$ στις σχετικές διαμήκεις θέσεις 0,+2L

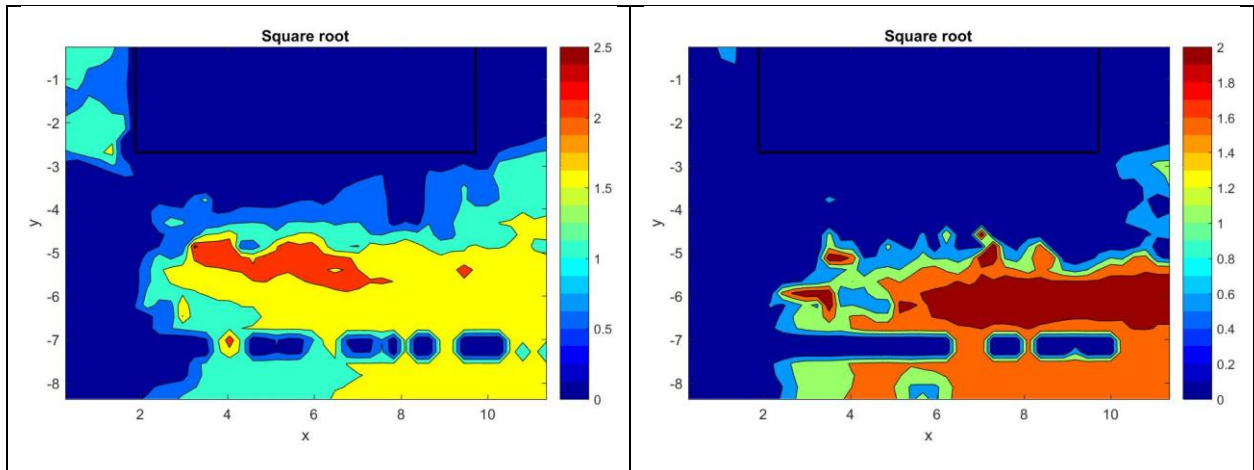




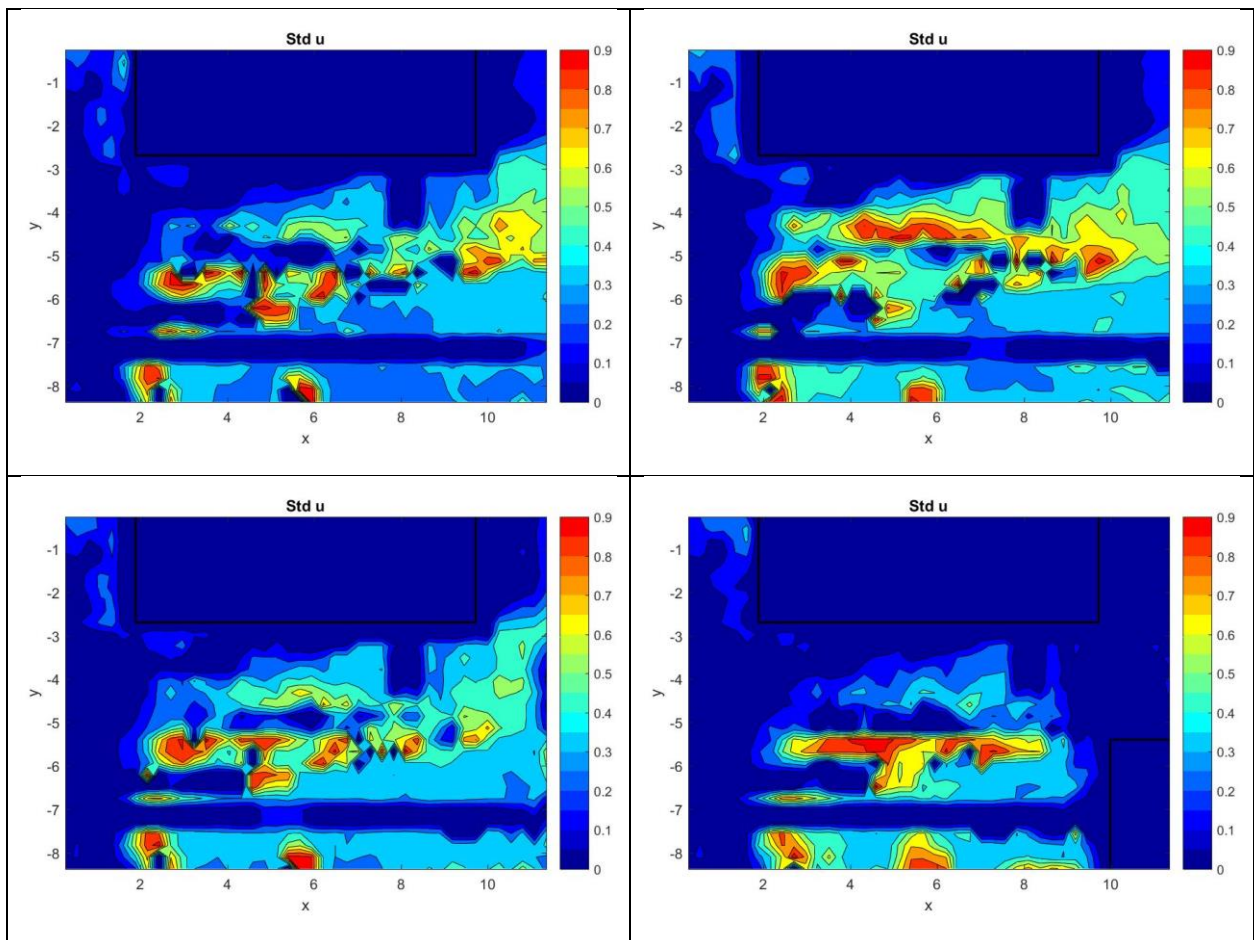
Εικόνα 4.14: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

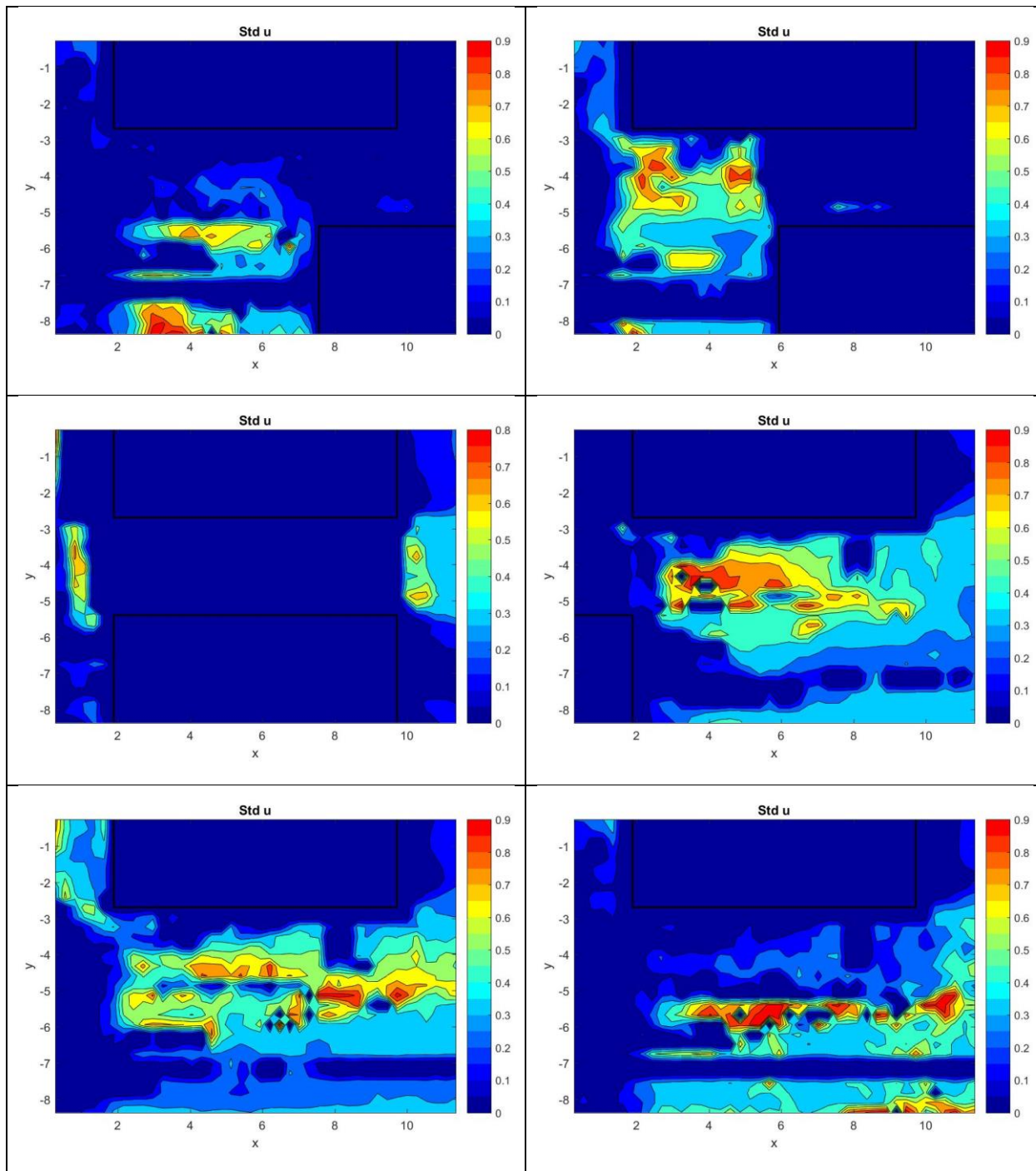




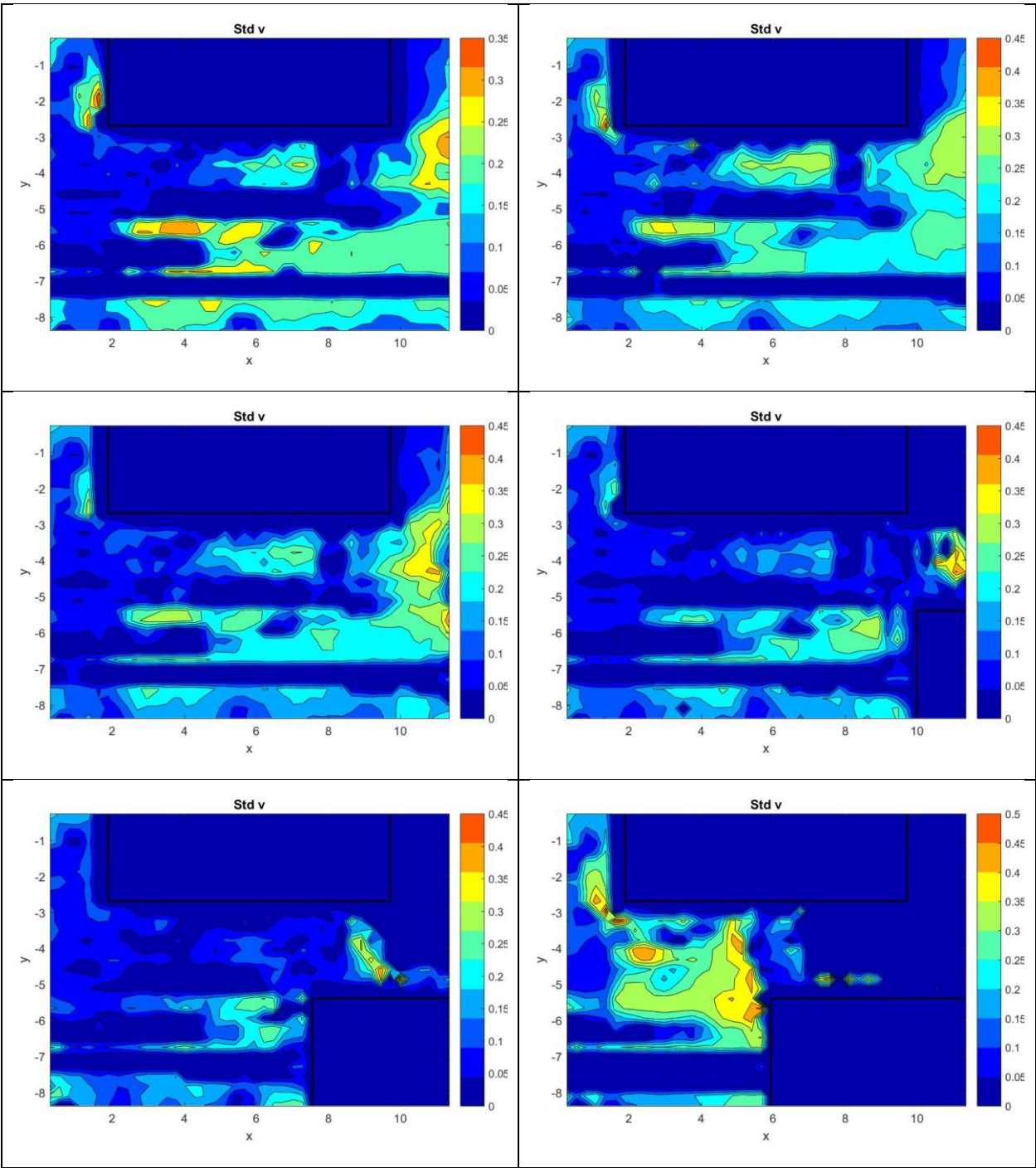


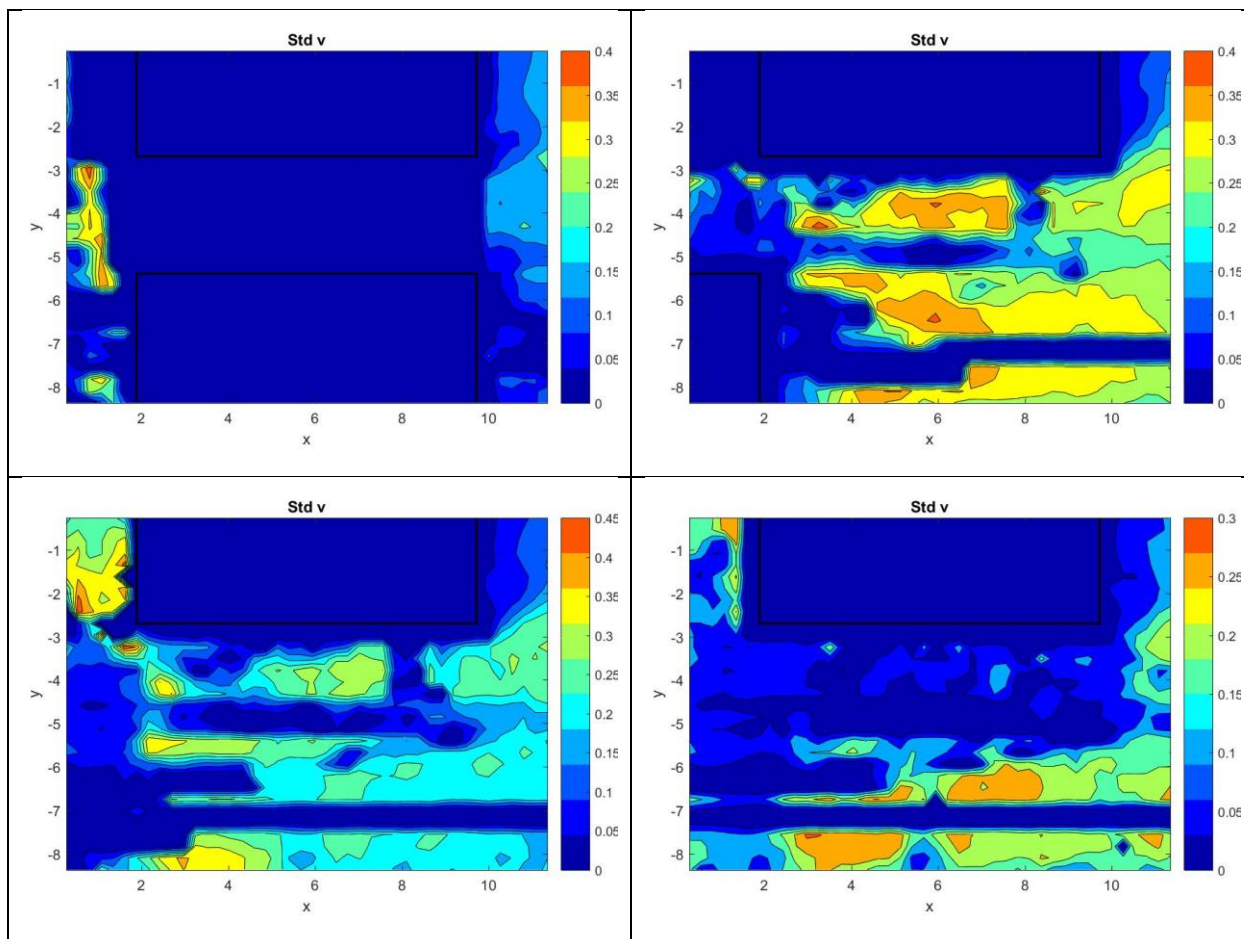
Εικόνα 4.15: Μέτρο της ταχύτητας στις σχετικές διαμήκειες θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3





Εικόνα 4.16: Τυπική απόκλιση (standard deviation) της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας, στις σχετικές διαμήκειες θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3





Εικόνα 4.17:Τυπική απόκλιση (standard deviation) της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

4.1.1.3β):Σχολιασμός αποτελεσμάτων για την 3^η πλευρική απόσταση

Όπως και στην περίπτωση της πλευρικής απόστασης $\Delta y/L=0.5$ παρατηρείται μια αρκετά πιο ανομοιομορφη διαβάθμιση της ταχύτητας σε σχέση με την περίπτωση πλευρικής απόστασης $\Delta y/L=0.35$ στη ζώνη κάτω του σταθερού μοντέλου κατά την προσέγγιση του από το διερχόμενο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της μεγαλύτερης πλευρικής απόστασής του το διερχόμενο όχημα δεν επηρεάζει το ίδιο έντονα το πεδίο ταχυτήτων του πρώτου που στην πρώτη περίπτωση κατά την προσέγγιση του ($\Delta x/L = 0 \div 1$) φαινόταν να συμπιέζει αυτή τη ζώνη κυρίως κατά x αλλά και κατά y.

Στο κομμάτι των επιπέδων τύρβης παρατηρείται μια ελαφριά πτώση στις τιμές, ίσως εξηγούμενο από το γεγονός ότι τα οχήματα απείχαν πλέον αρκετά μεταξύ τους και η επίδραση άρα διαταραχή της ταχύτητας ήταν περιορισμένη.

Χαρακτηριστικά σημεία μελέτης στο πεδίο ροής αποτελούν το μπροστινό (αριστερά στο πλάνο) μέρος του σταθερού οχήματος, η περιοχή αποκόλλησης της ροής (μπροστινό μέρος μέχρι περίπου το κέντρο του σταθερού οχήματος) και η περιοχή του ομόρρου στο πίσω μέρος του σταθερού οχήματος.

Μπροστινό μέρος οχήματος:

Σε αυτή την περιοχή με ενδιαφέρον παρατηρείται η λοξότητα (skewness) της ροής που αλλάζει κατεύθυνση όταν το διερχόμενο μοντέλο είναι ανάντι ή κατάντι του σταθερού οχήματος. Πραγματοποιήθηκε παρεμβολή 3 διαδοχικών σημείων σύμφωνα με τον τύπο $\overline{v_{i,j}'} = 0.25 * \overline{v_{i-1,j}} + 0.5 * \overline{v_{i,j}} + 0.25 * \overline{v_{i+1,j}}$ για να αποδοθεί με ξεκάθαρο τρόπο η αλλαγή αυτή στη ροή.

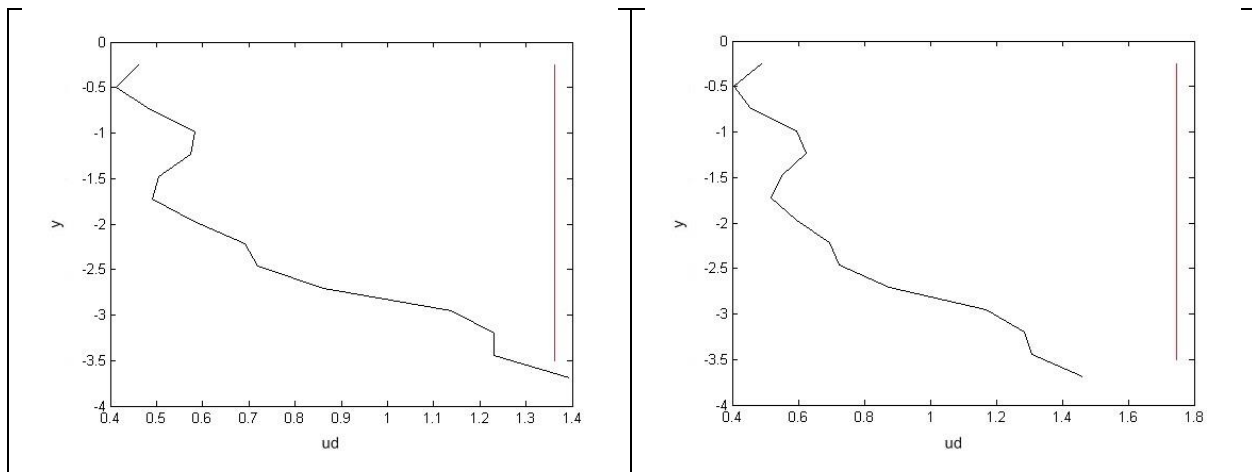
Περιοχή αποκόλλησης της ροής:

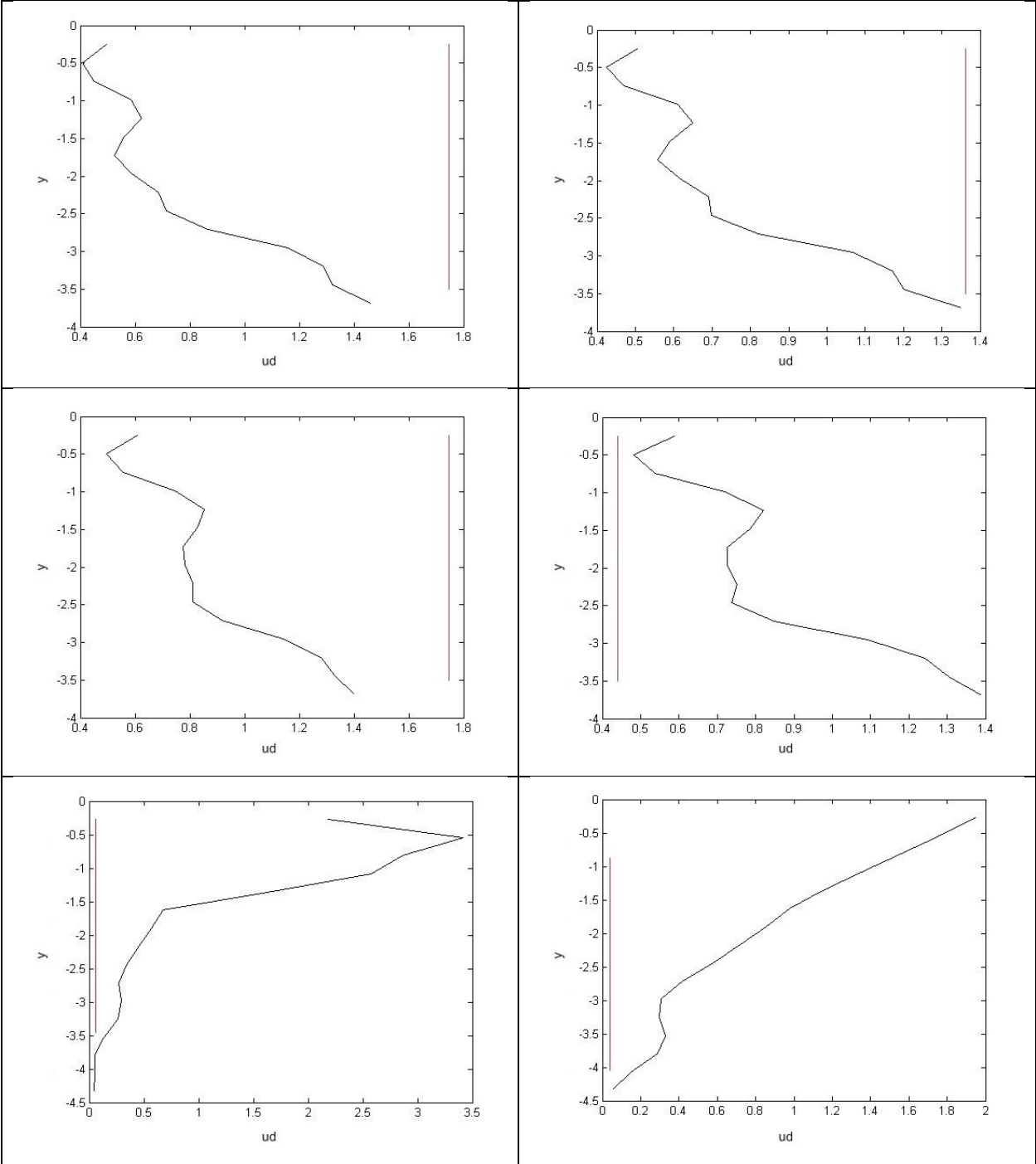
Το ενδιαφέρον που παρουσιάζεται εδώ είναι η ανακυκλοφορία της ροής. Γι αυτό παρατίθενται σε διαγράμματα τα σημεία του πεδίου ταχύτητας με αρνητική αξονική ταχύτητα ($U < 0$).

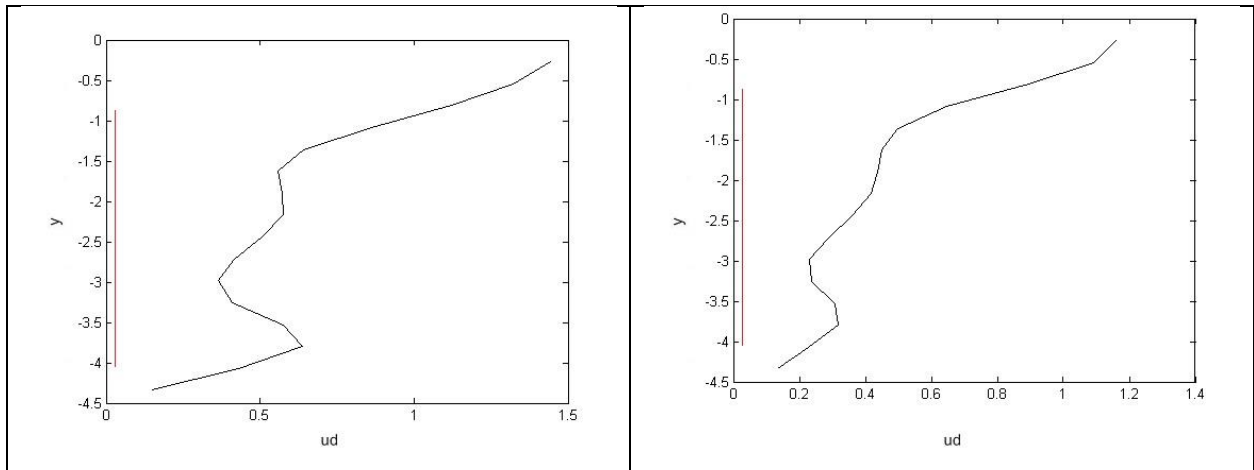
Περιοχή ομόρρου:

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ροή στο πίσω μέρος του σταθερού οχήματος, καθώς αν και η ταχύτητα στην πλειοψηφία του πεδίου είναι αρκετά μεγαλύτερη αυτής του ελεύθερου ρεύματος (ακόμα και 250%), σε αυτό την περιοχή γίνεται πολύ μικρή με ενδιαφέρουσα ποικιλία στην κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας.

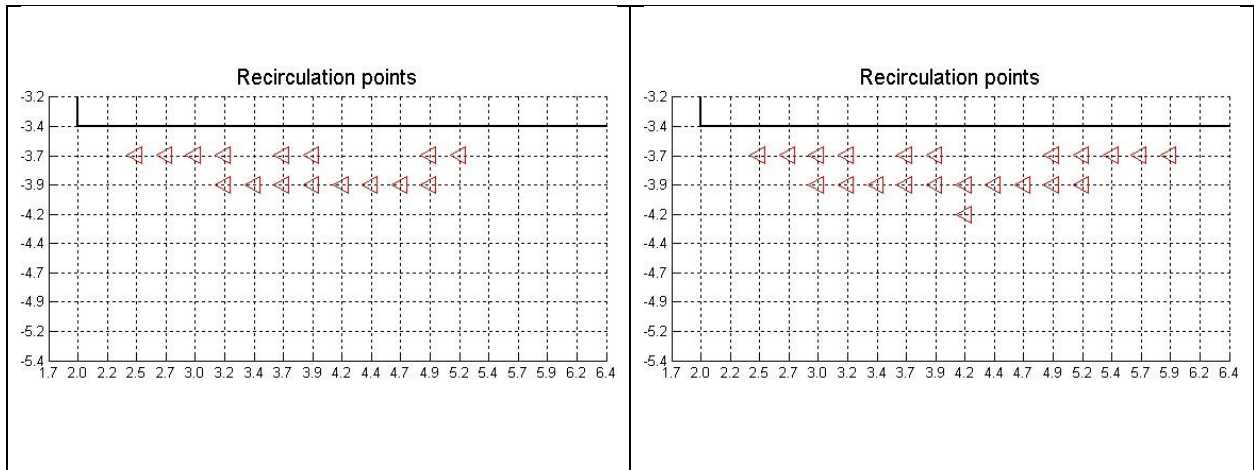
4.1.2.1α):1^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.35-14mm$:

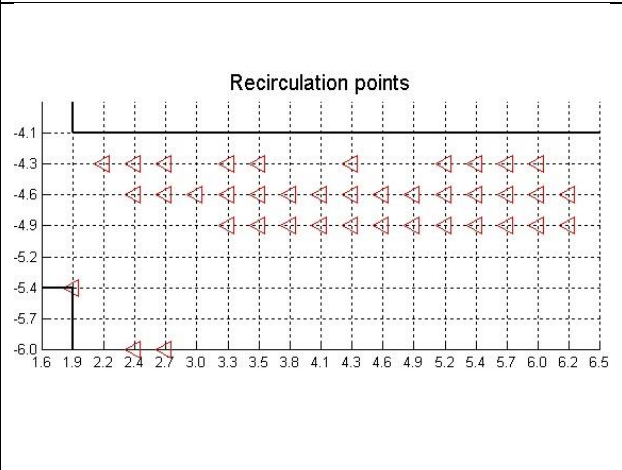
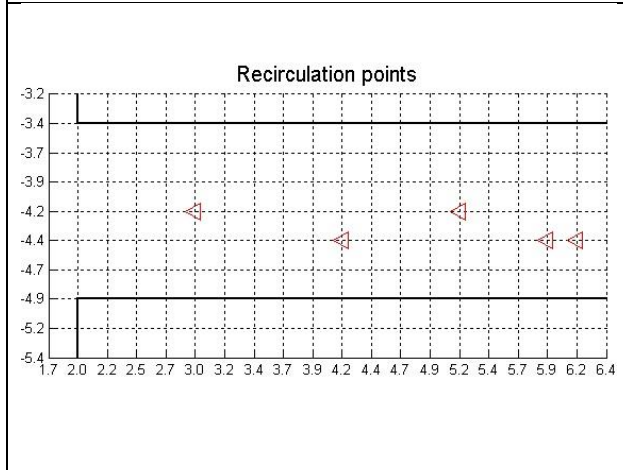
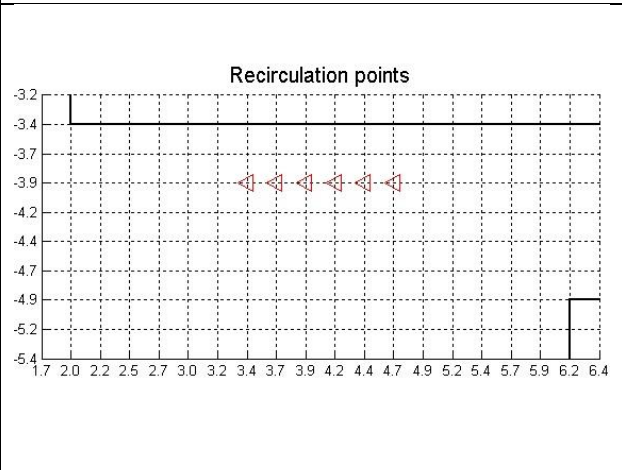
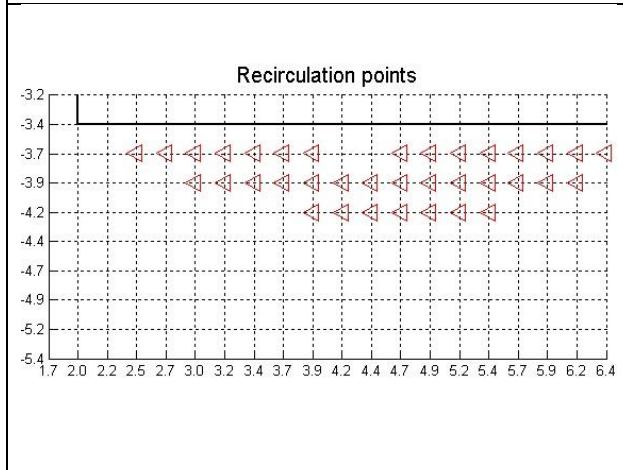
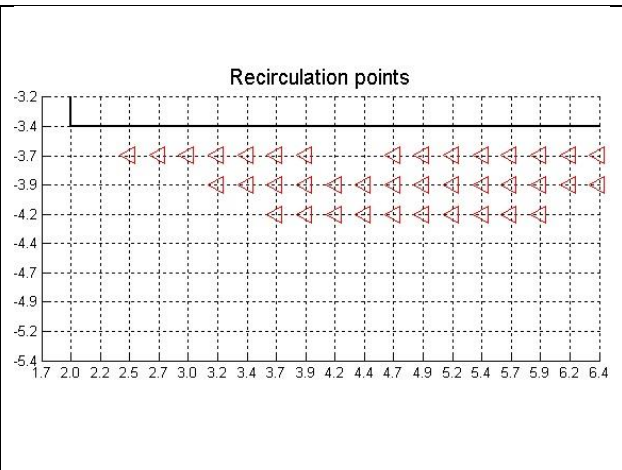
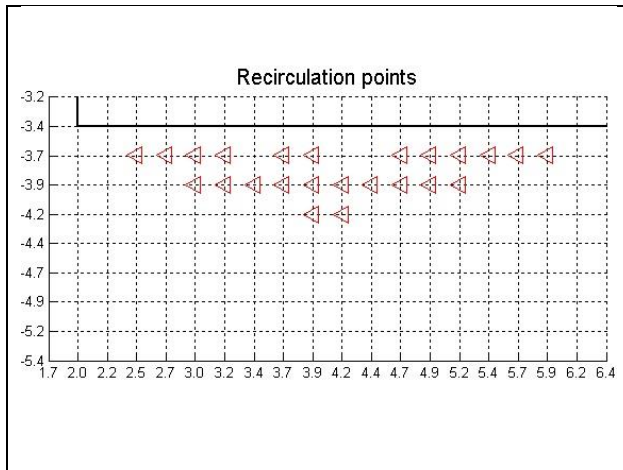


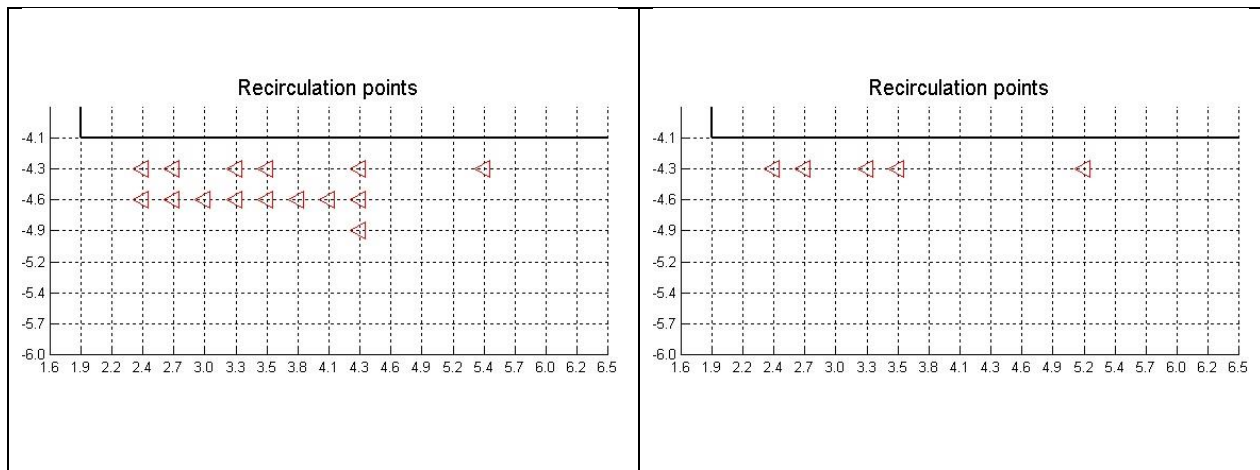




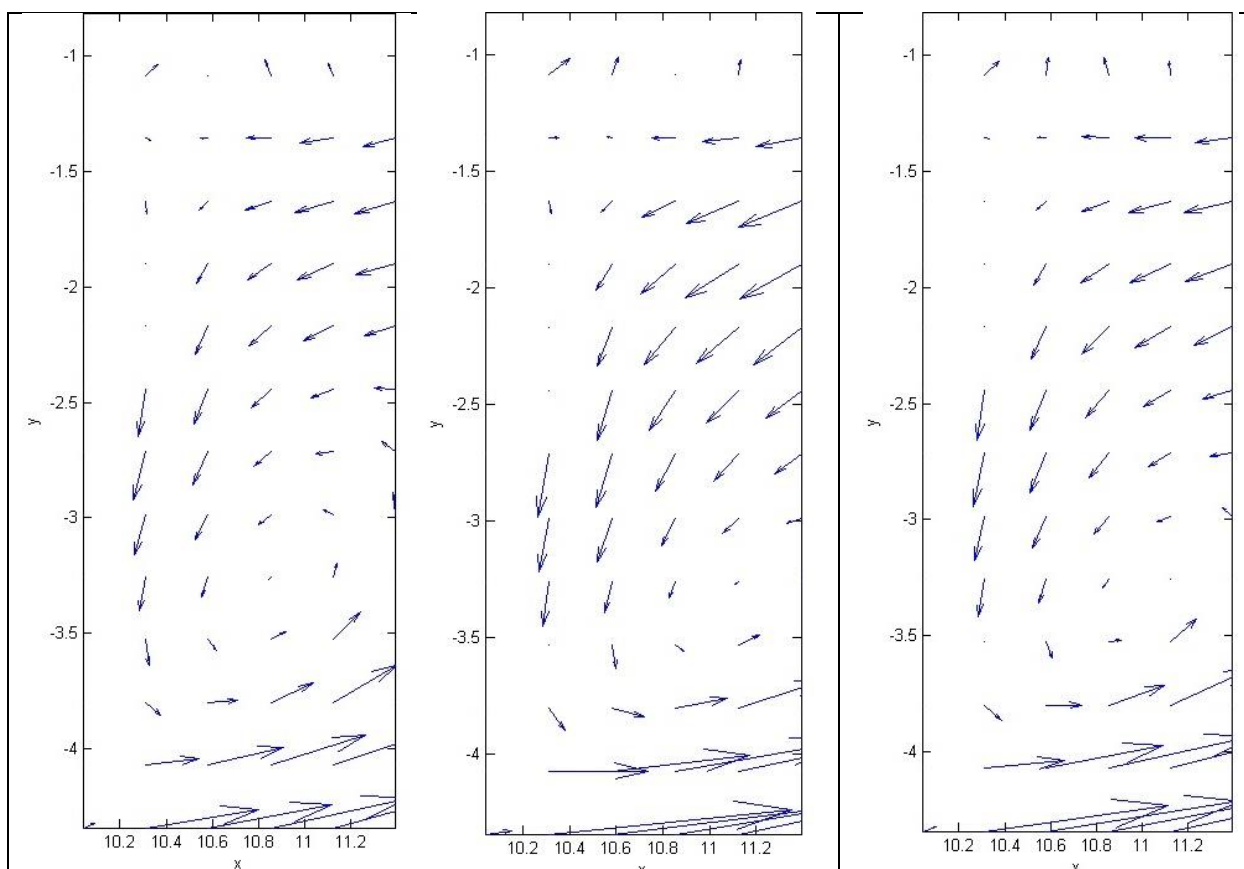
Εικόνα 4.18: Λοξότητα (skewness) της ταχύτητας στην περιοχή μπροστά από το σταθερό όχημα στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

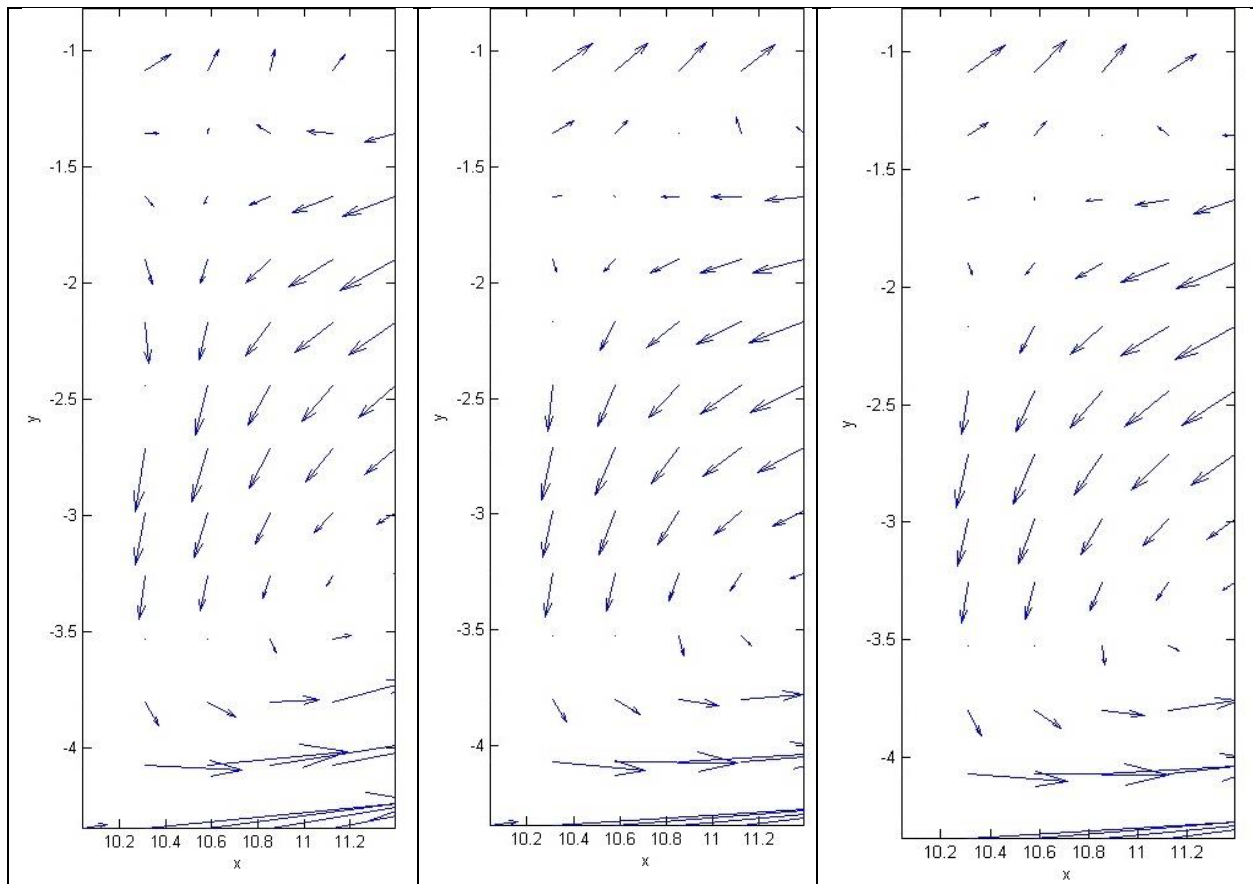






Εικόνα 4.19: Σημεία ανακυκλοφορίας της ροής στο ενδιάμεσο των δύο μοντέλων στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3





Εικόνα 4.20: Ομόρρους του πεδίου ταχυτήτων στο πίσω μέρος του σταθερού οχήματος στις σχετικές θέσεις +2, +2.11, +2.22, +2.44, +2.78, +3

4.1.2.1β): Σχολιασμός γραφημάτων για την 1η πλευρική απόσταση, ($\Delta y/l=0.35$)

Μπροστινή περιοχή – λοξότητα (εικόνα 4.17): Θεωρήθηκε σκόπιμη αυτή η τοποθέτηση των αξόνων (στον κατακόρυφο άξονα το y , η τιμή της μέσης τιμής της ταχύτητας στον x) για να φανεί πιο εποπτικά ο τρόπος που επηρεάζεται το ρεύμα του αέρα κατά την πρόσπτωσή του στην εμπρόσθια επιφάνεια του σταθερού αντικειμένου. Για τον ίδιο λόγο **παρουσιάζεται σε τυχαία οριζόντια θέση μια κόκκινη κατακόρυφη γραμμή ακριβώς όσο το πλάτος του μοντέλου που απεικονίζεται στην καταγραφή από PIV.**

Για τις θέσεις πριν το 1L όσο πλησιάζουμε από το πάνω μέρος του πλάνου στην αριστερή ακμή του σταθερού μοντέλου παρατηρείται μια αύξηση της ταχύτητας κάτι που αλλάζει ριζικά στις επόμενες εξεταζόμενες διαμήκειες θέσεις (τελευταίες 4 φωτογραφίες).

Περιοχή ανακυκλοφορίας (εικόνα 4.18):

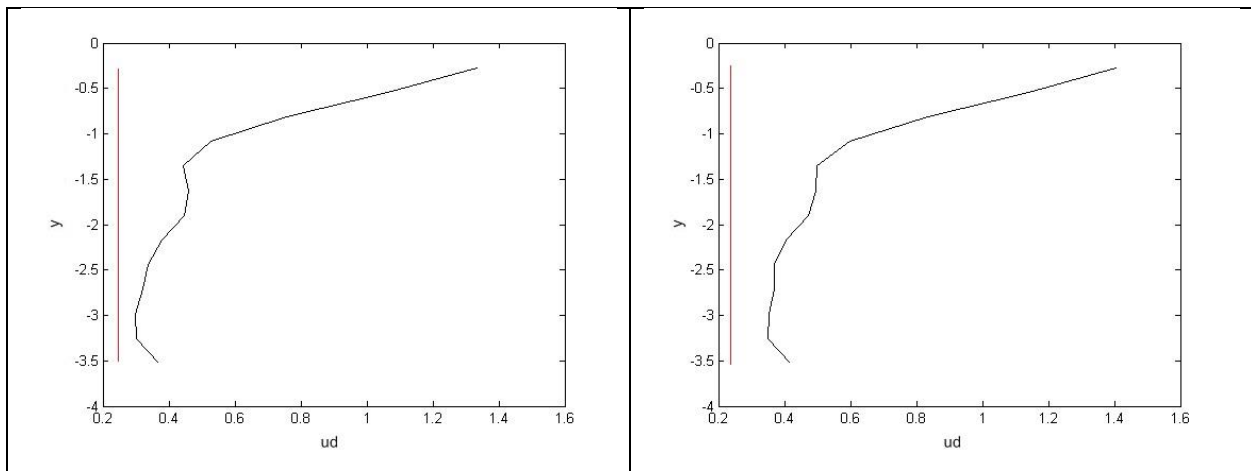
Εδώ επιλέχθηκε να απεικονιστεί η περιοχή που εκτείνεται κατά μήκος από τη μύτη (μπροστινό μέρος) του σταθερού οχήματος μέχρι το μέσο του και κατά πλάτος από την αριστερή-κάτω στο πλάνο- ακμή του σταθερού μοντέλου μέχρι το ύψος στο μισό του πλάτους του διερχόμενου

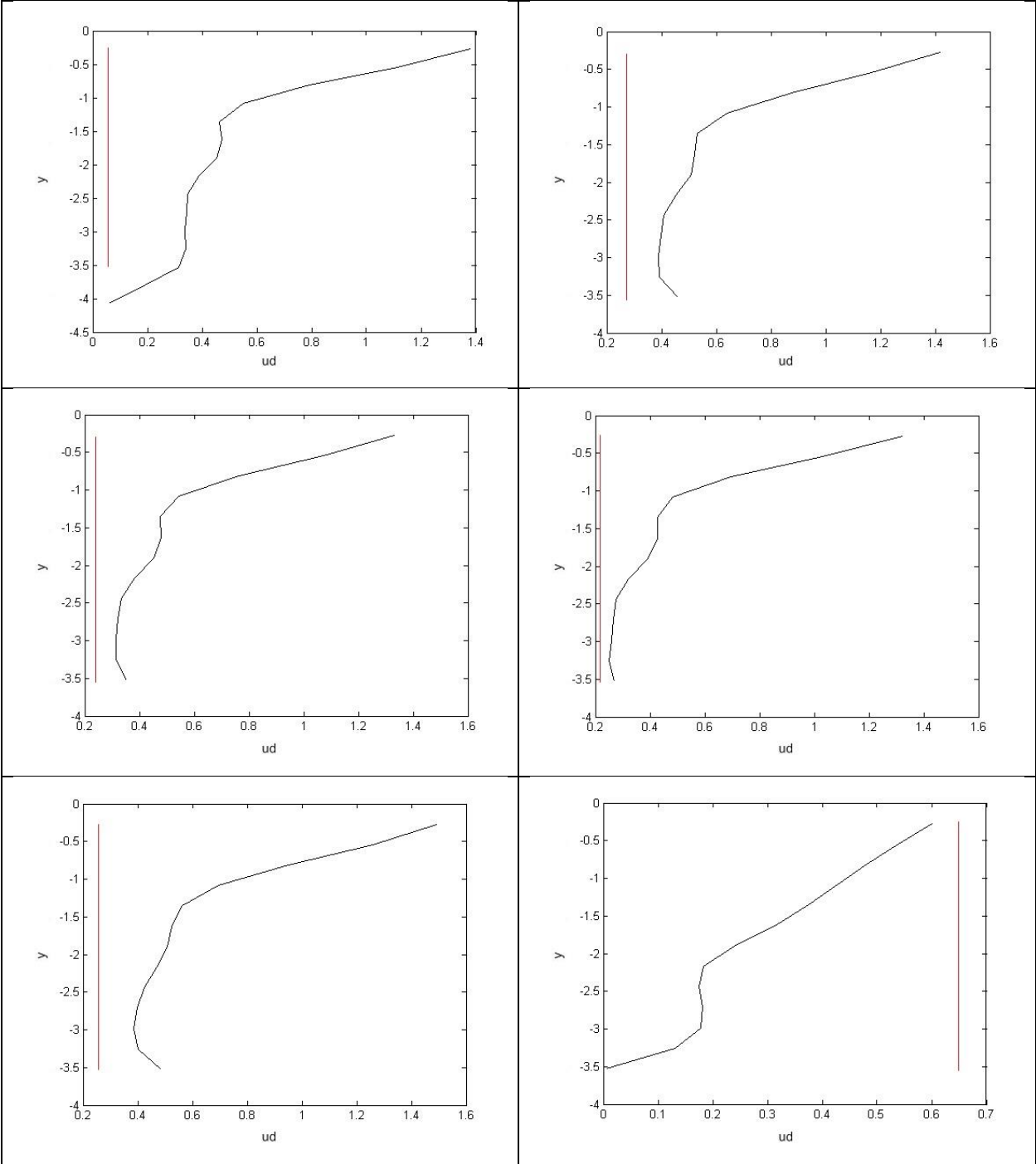
μοντέλου. Στα σχήματα φαίνονται τα όρια των δύο μοντέλων (σε κάθε πλάνο του σταθερού, όπου εμφανίζεται σε πλάνο του διερχόμενου) και για είναι πιο εμφανής η οριοθέτηση της εξεταζόμενης περιοχής και για να γίνεται πιο εύκολα κατανοητή η επίδραση των οξείων ακμών των δύο μοντέλων.,

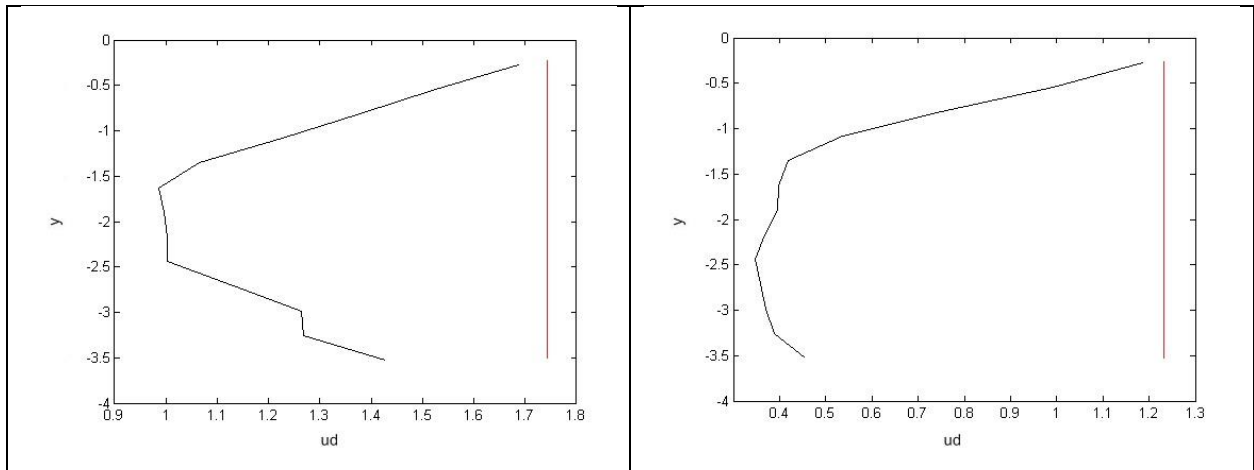
Παρατηρούμε ότι υπάρχει αύξηση των σημείων με αρνητική ταχύτητα σε σχέση με την πρώτη περίπτωση θέσης (-1.05L), όσο το διερχόμενο όχημα προσεγγίζει το πίσω μέρος του σταθερού, δηλ. τη θέση 0 (που φτάνουν το μέγιστο πλήθος). Μετά στο διάστημα(0-1) μειώνεται λόγω του περιορισμού της ροής μεταξύ των οχημάτων. Στην οριζόντια θέση +2L, παρατηρούνται τα περισσότερα αρνητικά σημεία λόγω του συνδυασμού της επίδρασης από την αριστερά οξεία ακμή του σταθερού αντικειμένου όσο και από τον ομόρρου του διερχόμενου αντικειμένου.

Περιοχή ομόρρου (εικόνα 4.19): Διαλέχθηκε να απεικονιστεί το μέρος του πεδίου στα όρια του πλατους του σταθερού αντικειμένου. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τόσο η έντονη περιδίνηση της ροής όπως και το πολύ μικρό μέτρο της ταχύτητας εν συγκρίσει με γειτονικά σημεία όπως είναι αντιληπτό και από το σχήμα (ίδιο μήκος διανυσμάτων της ταχύτητας της ροής στο μεγαλύτερο μέρος του πλάνου από πάνω ως κάτω, μέχρι τα όρια του μοντέλου όπου το μήκος των διανυσμάτων υπερδιπλασιάζεται).

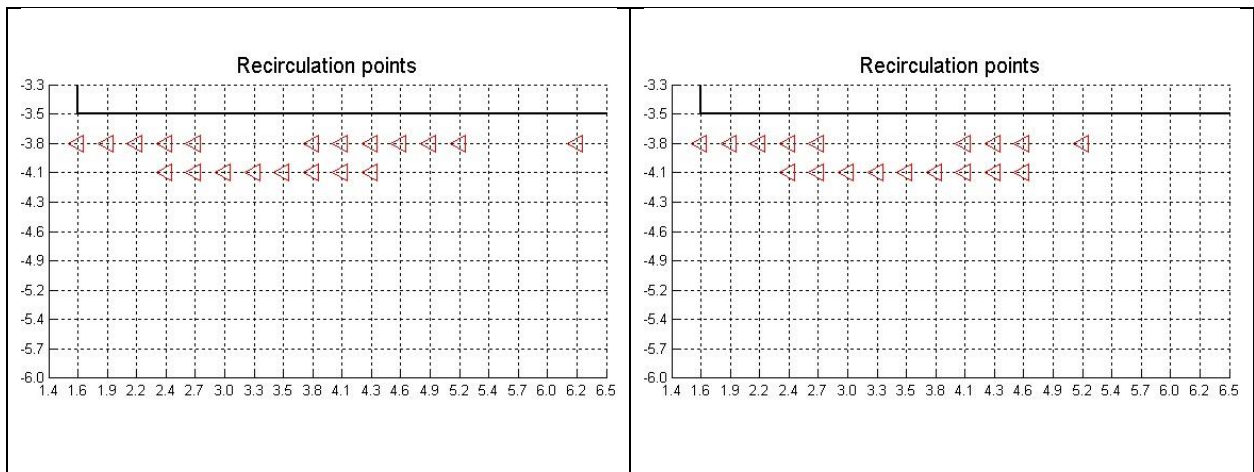
4.1.2.2α):2^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.5-20mm$:

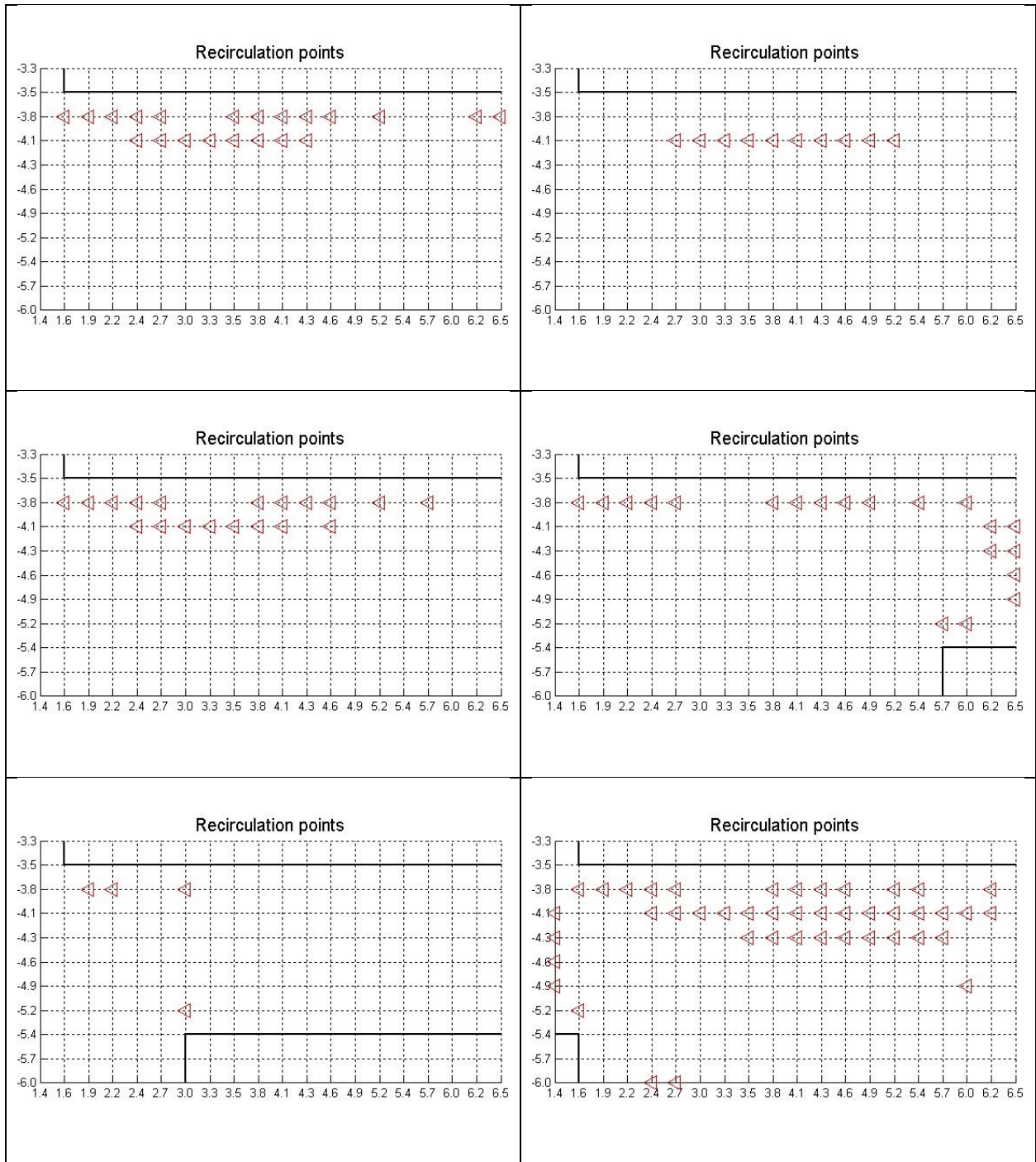


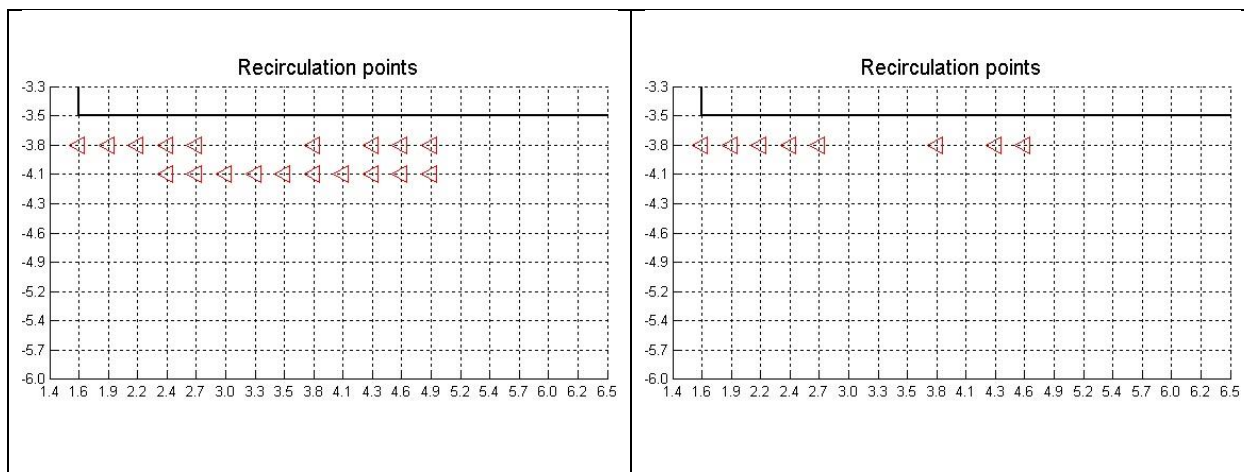




Εικόνα 4.21: Λοξότητα (skewness) της ταχύτητας στην περιοχή μπροστά από το σταθερό όχημα στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +0.88, +2, +2.44, +3







Εικόνα 4.22: Σημεία ανακυκλοφορίας της ροής στο ενδιάμεσο των δύο μοντέλων στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

4.1.2.1β) Σχολιασμός γραφημάτων για την 2η πλευρική απόσταση, ($\Delta y/l=0.5$)

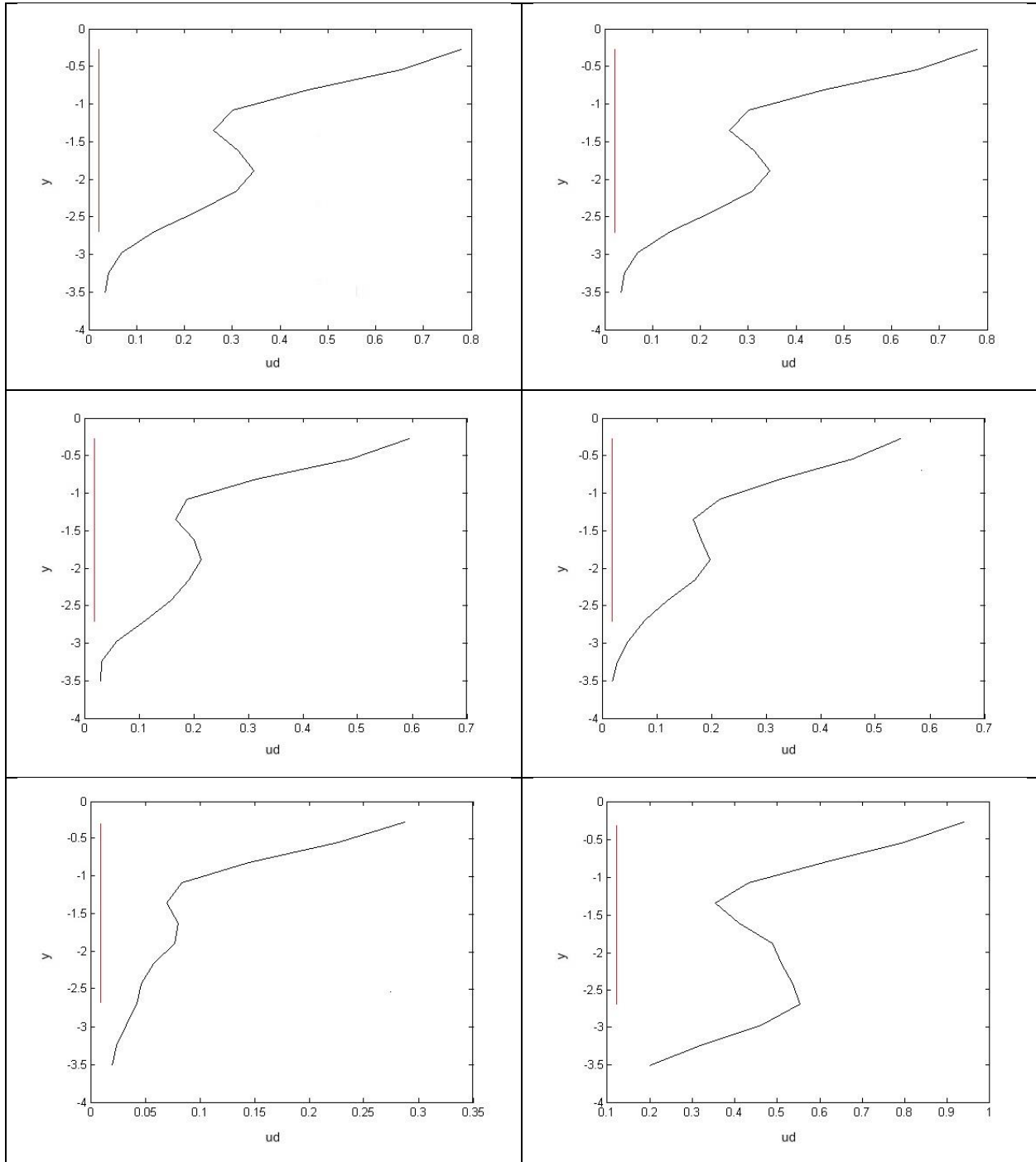
Λοξότητα- (εικόνα 4.20):

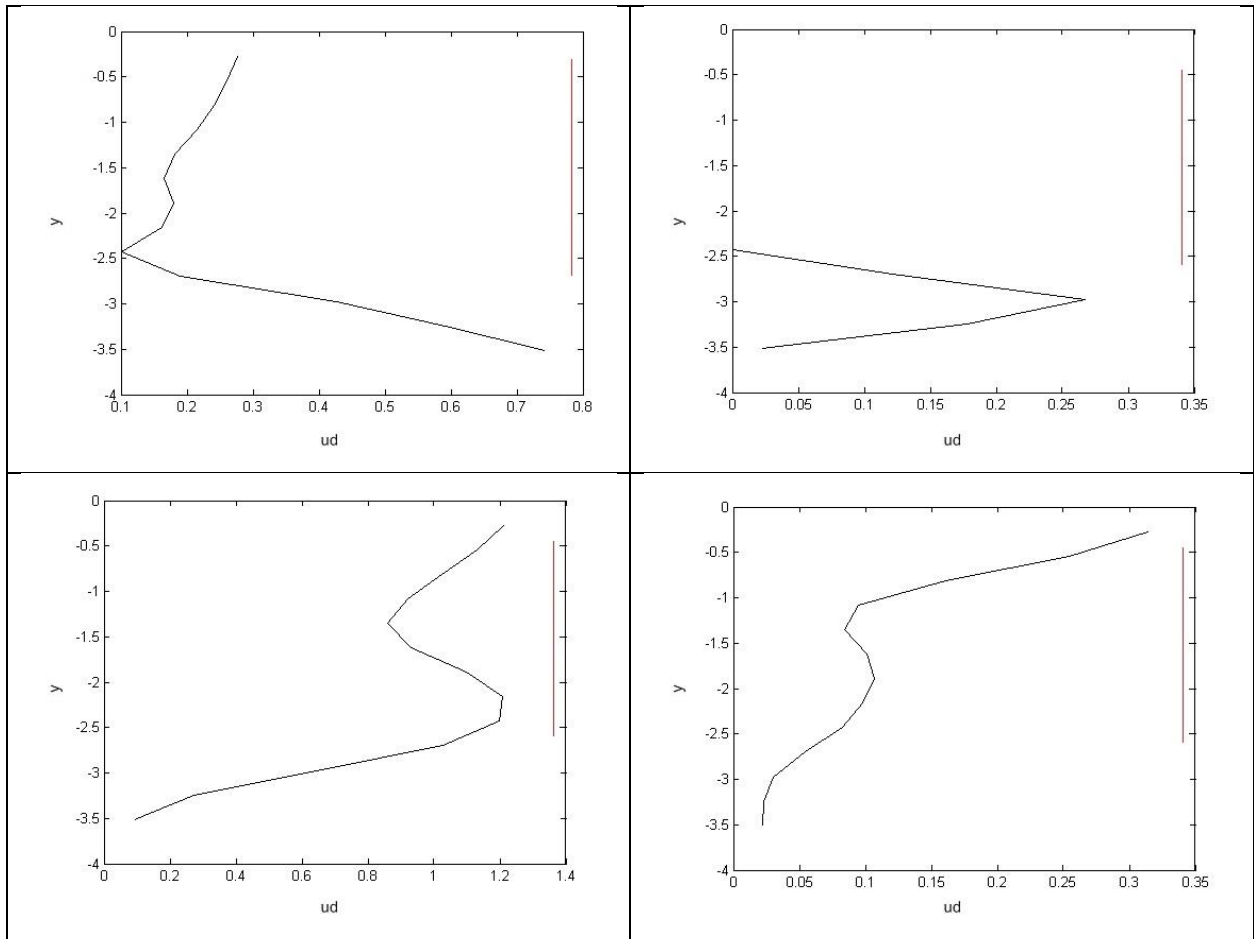
Εδώ η επίδραση της διέλευσης του προσπερνόντος οχήματος δεν είναι το ίδιο έντονη στην περιοχή μπροστά από το σταθερό μοντέλο λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που τους χωρίζει. Παρ' όλ' αυτά διακρίνεται μια ξεκάθαρη αλλαγή από τη θέση $\Delta x/L=0$ (4^η φωτογραφία και μετά, εικόνα 4.20)

Περιοχή ανακυκλοφορίας (εικόνα 4.21):

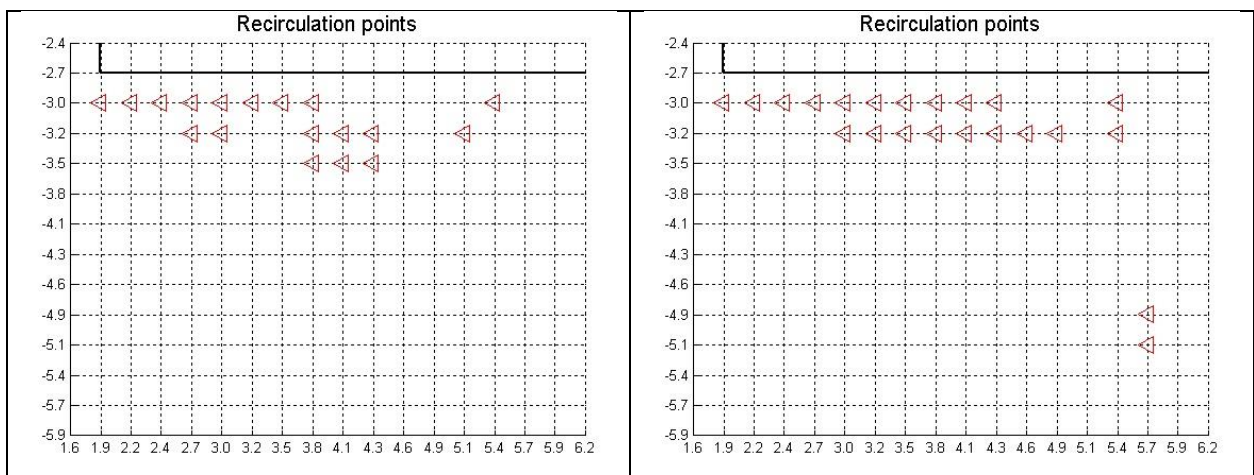
Και εδώ μειώνεται η επίδραση λόγω της άυξης της απόστασης παρουσιάζοντας μια αυξημένη παρουσία σημείων με αρνητική αξονική ταχύτητα κοντά-παράλληλα στις οριζόντιες γειτονικές ακμές των 2 μοντέλων σε σχέση με τα ενδιάμεσα σημεία .

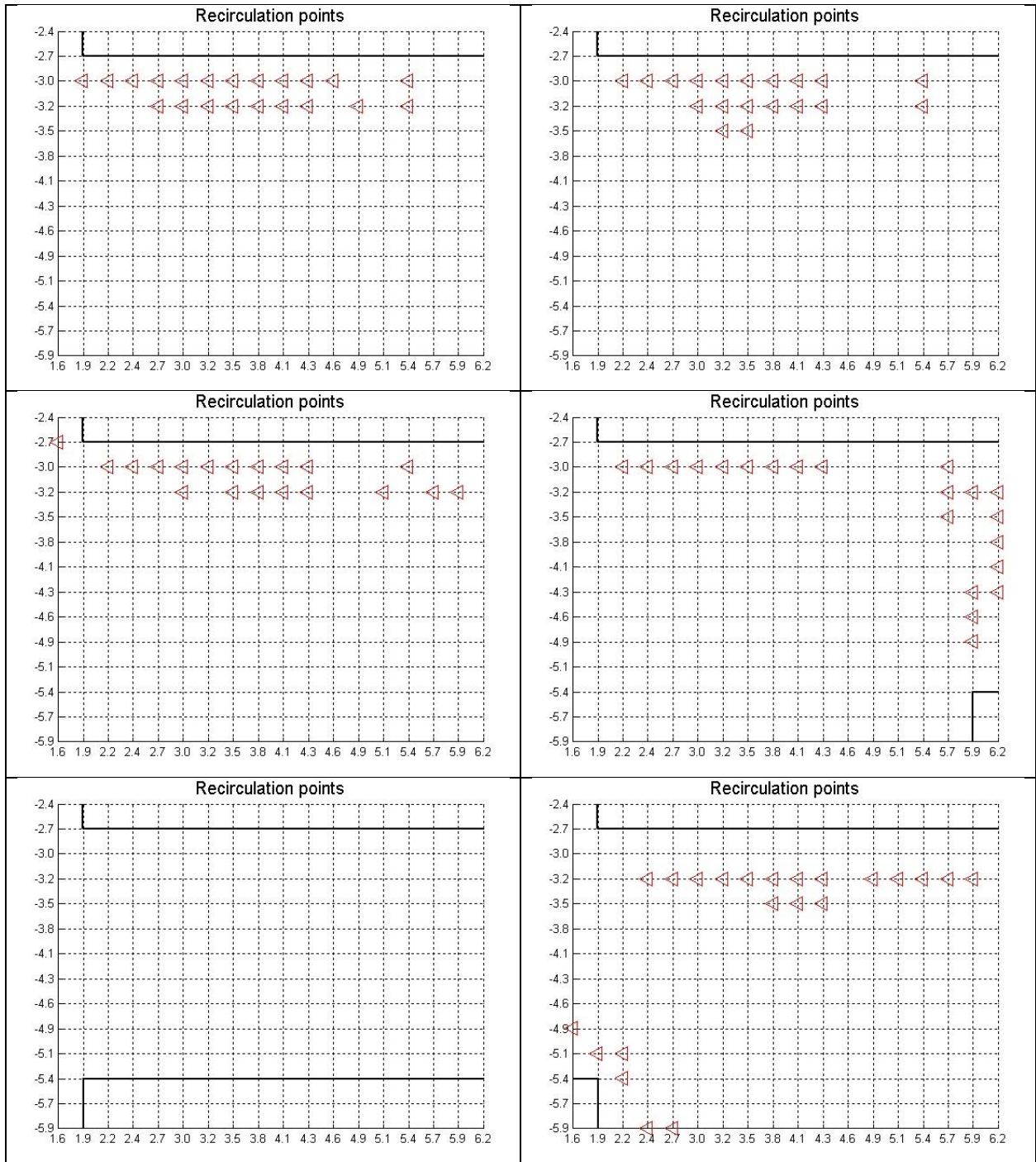
4.1.2.3α): 3^η πλευρική απόσταση, $\Delta y/l=0.75-30\text{mm}$:

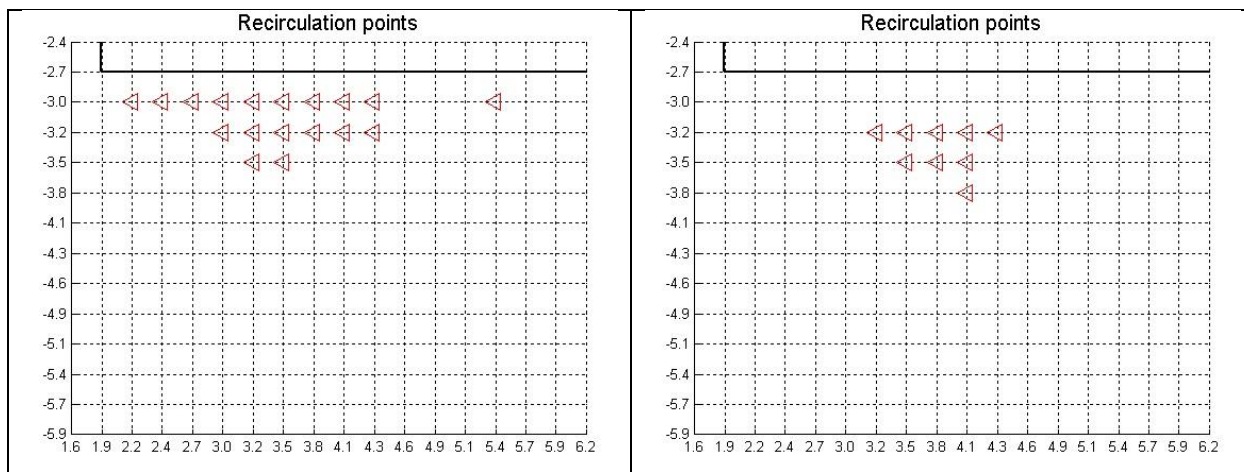




Εικόνα 4.23: Λοξότητα (skewness) της ταχύτητας στην περιοχή μπροστά από το σταθερό όχημα στις σχετικές διαμήκειες θέσεις ($\Delta x/L$): -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3







Εικόνα 4.24: Σημεία ανακυκλοφορίας της ροής στο ενδιάμεσο των δύο μοντέλων στις σχετικές διαμήκεις θέσεις ($\Delta x/L$) : -1.05, -0.5, -0.28, 0, +0.28, +0.5, +1, +2, +2.44, +3

4.1.2.3β):Σχολιασμός γραφημάτων για την 3^η πλευρική απόσταση,($\Delta y/l=0.75$)

Λοξότητα-(εικόνα 4.22):

Παρομοίως εδώ η επίδραση της διέλευσης του προσπερνόντος οχήματος δεν είναι το ίδιο έντονη στην περιοχή μπροστά από το σταθερό μοντέλο λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που τους χωρίζει σε μεγαλύτερο βαθμό και από την πλευρική απόσταση ($\Delta y/l=0.5$) Μάλιστα η όποια αλλαγή επιφέρει η διέλευση δεν ξεκινά πλέον από το «φτάσιμο» του διερχομένου (το μπροστινό του μέρος να είναι παράλληλα με το πίσω του σταθερού, θέση $\Delta x/L=0$ (4^η φωτογραφία, εικόνα 4.22) αλλά από όταν τα μπροστινά μέρη είναι στην ίδια ευθεία, θέση $\Delta x/L=1$ (7^η φωτογραφία, εικόνα 4.22)

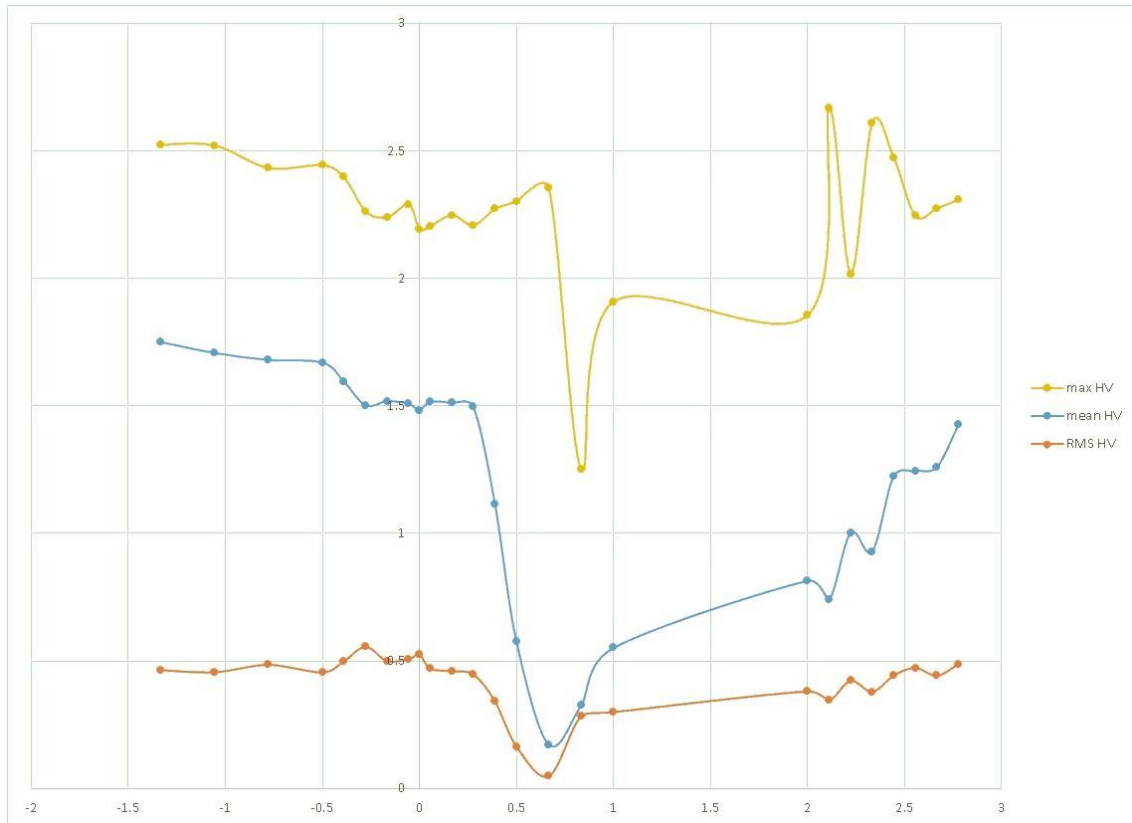
Περιοχή ανακυκλοφορίας-(εικόνα 4.23):

Και εδώ μειώνεται η επίδραση λόγω της άυξης της απόστασης παρουσιάζοντας μια αυξημένη παρουσία σημείων με αρνητική αξονική ταχύτητα κοντά-παράλληλα στις οριζόντιες γειτονικές ακμές των 2 μοντέλων σε σχέση με τα ενδιάμεσα σημεία.

4.1.3.Εποπτική παρουσίαση χαρακτηριστικών της ροής για την περιοχή υψηλών ταχυτήτων.

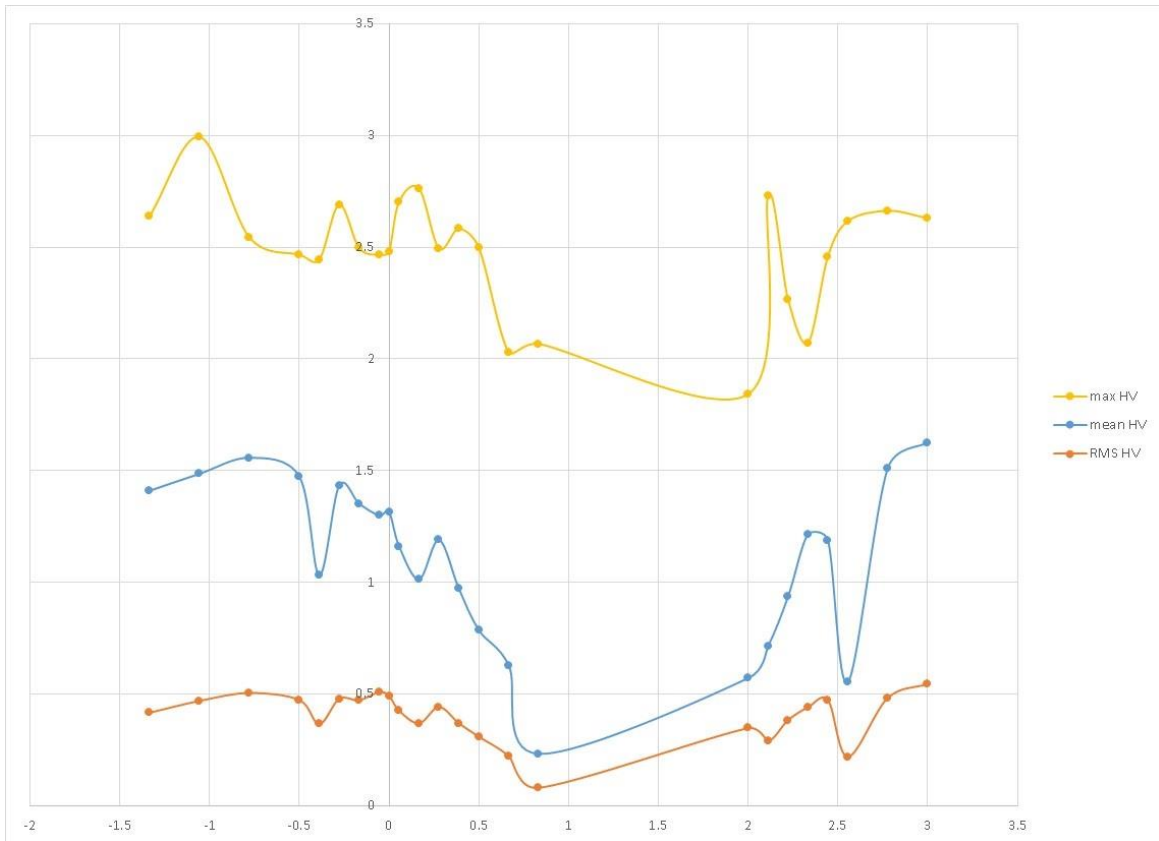
Άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό στη ροή γύρω από τα μοντέλα είναι μία ζώνη υψηλών ταχυτήτων που παρατηρείται στην περιοχή αποκόλλησης της ροής κάτι που προκύπτει τόσο από τα διαγράμματα διανυσματικής απεικόνισης όσο και από το μέτρο της ταχύτητας.

Σε αυτή την περιοχή έγινε σύγκριση της μέγιστης, της μέσης και της μέσης τιμής της τυπικής απόκλισης της αξονικής ταχύτητας για κάθε πλευρική απόσταση.



Εικόνα 4.25: Σύγκριση της μέγιστης, της μέσης και της μέσης τιμής της τυπικής απόκλισης της αξονικής ταχύτητας για $\Delta y/l=0.35$

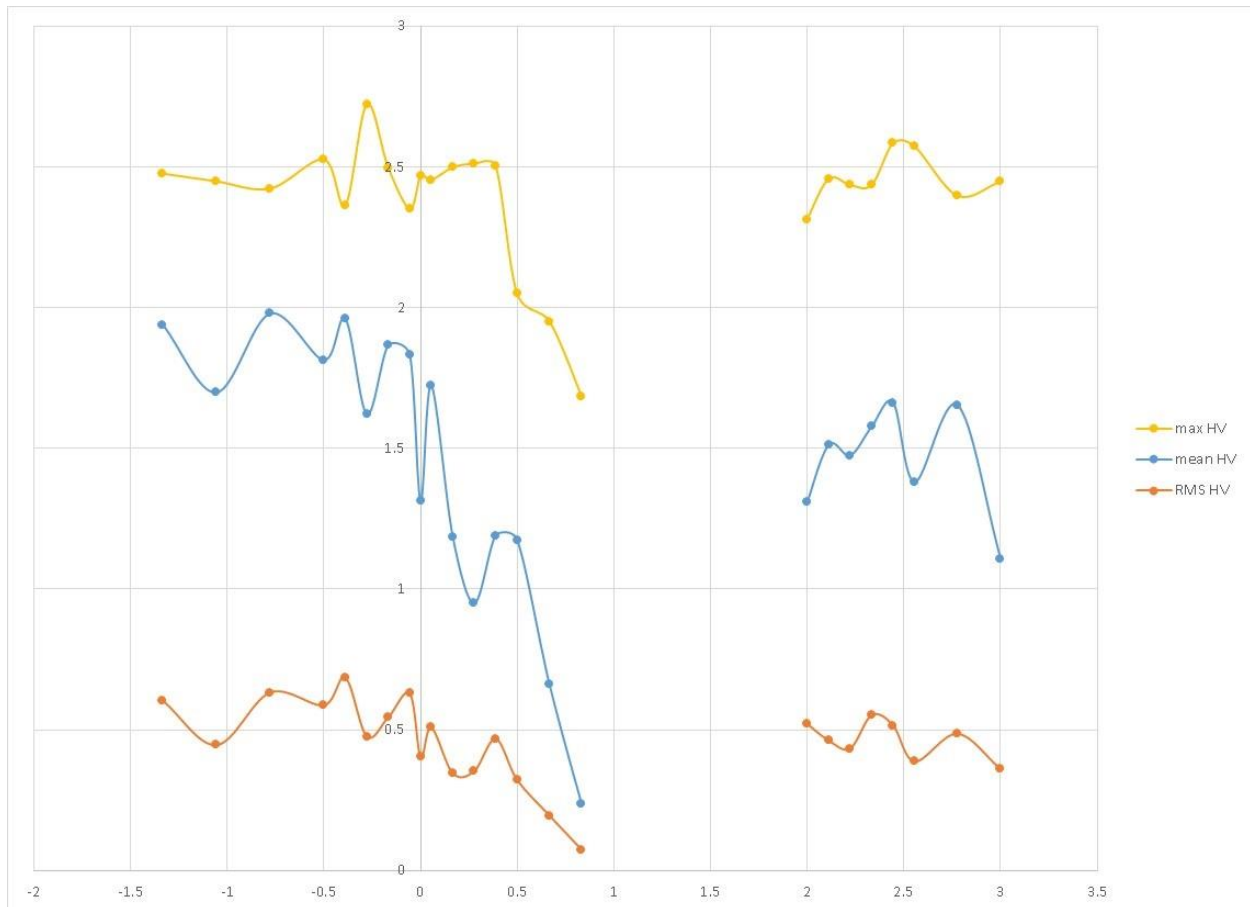
Στην εικόνα 4.24 παρατηρείται ομοιόμορφα μεταξύ των διάφορων καμπυλών από τη θέση $\Delta x/L=-1.05$ ως και τη $\Delta x/L=0$ μία πτώση των τιμών των μεγεθών όσο το διερχόμενο αντικείμενο πλησιάζει. Από τη θέση $\Delta x/L=+2$ και έπειτα αντίθετα υπάρχει μια άυξηση ώστε τα μεγέθη να επανέρθουν στις αρχικές τιμές τους δείχνοντας ξεκάθαρα ότι η επίδραση του κινούμενου οχήματος υποχωρεί όσο αυτό απομακρύνεται.



Εικόνα 4.26: Σύγκριση της μέγιστης, της μέσης και της μέσης τιμής της τυπικής απόκλισης της αξονικής ταχύτητας για $\Delta y/l=0.5$

Παρόμοια αν και όχι τόσο ομοιόμορφη τάση γίνεται και αντιληπτή και στις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις πλευρικών αποστάσεων όσον αφορά τη μείωση των μεγεθών όσο το διερχόμενο όχημα προσεγγίζει το σταθερό (περίπου στη θέση 0) και αντίστοιχα την επαναφορά στις τιμές των μεγεθών από τη θέση $\Delta x/L = +2$ και μετά.

Στα τρία παραπάνω σχήματα είναι λογικό ότι δεν μπορούν εξαχθούν αποτελέσματα ακριβείας στις αδιάστατες θέσεις κατά x , $0.45 \div 1$, επειδή η εξεταζόμενη περιοχή καλύπτεται από το διερχόμενο μοντέλο.



Εικόνα 4.27: Σύγκριση της μέγιστης, της μέσης και της μέσης τιμής της τυπικής απόκλισης της αξονικής ταχύτητας για $\Delta y/l=0.75$

4.2) Μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά το προσπέρασμα δύο μοντέλων αυτοκινήτου.

Στο κομμάτι αυτό του πειράματος έγινε καταγραφή των δυνάμεων αντίστασης (D) και πλευρικής δύναμης (SF) στο σταθερό μοντέλο αυτοκινήτου κατά το προσπέρασμά του από το διερχόμενο. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρεις περιπτώσεις γωνιών εκτροπής: 0° , $\pm 20^\circ$ κατά τον τρόπο που απεικονίζεται στο σχήμα της πειραματικής διάταξης (Εικόνα 3.10). Η πλευρική απόσταση μεταξύ των οχημάτων κρατήθηκε σταθερή, ίση με 14mm ($\Delta y/l=0.35$).

Αρχικά βρέθηκε η μέση τιμή του σφάλματος που αφαιρέθηκε από κάθε μέτρηση. Για ευκολία χειρισμού και συγκρίσεων με άλλες εργασίες οι τιμές των δυνάμεων από το ζυγό διαιρέθηκαν με τον αριθμό 0.5424 για να αδιαστατοποιηθούν.

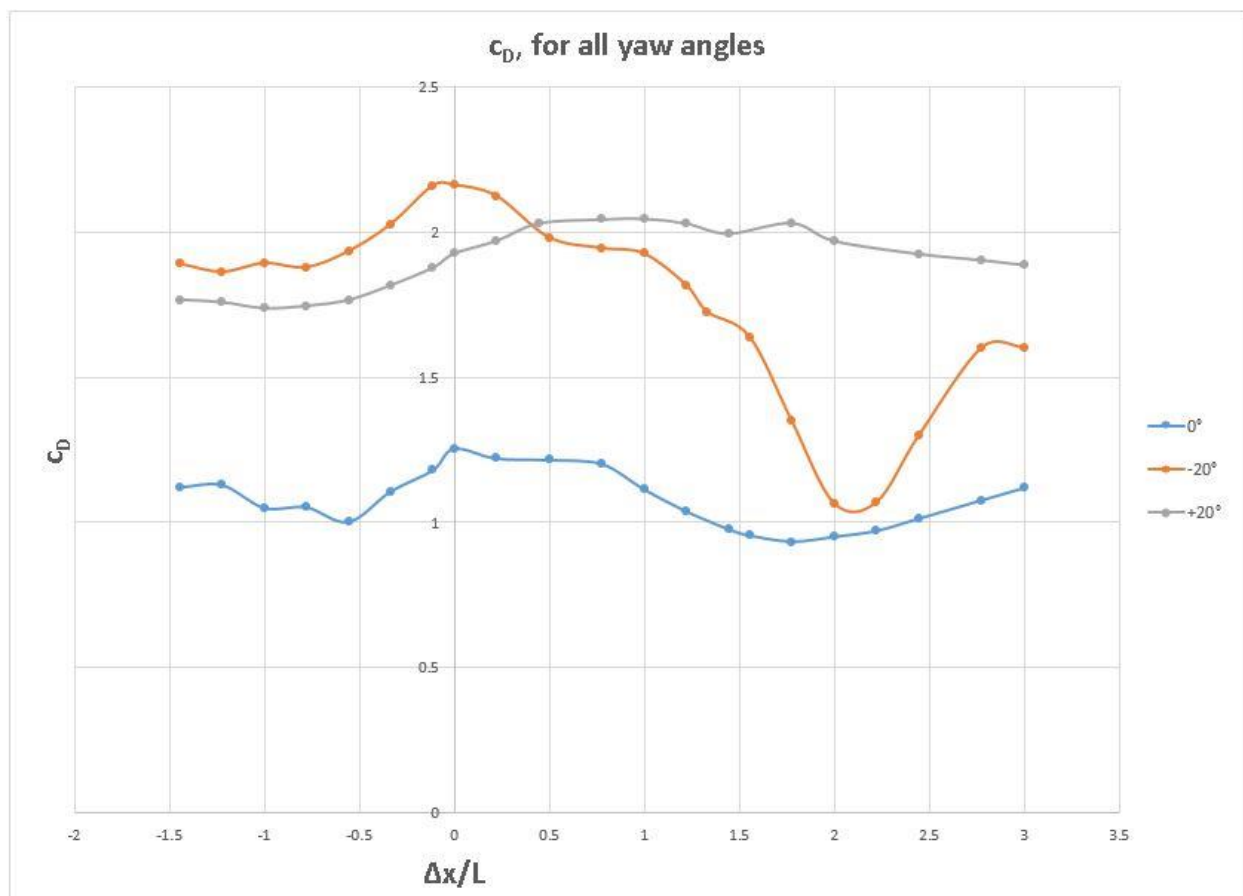
Αυτός προκύπτει ως εξής: $c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} * U_{\infty}^2 * A}$, $c_{SF} = \frac{SF}{\frac{\rho}{2} * U_{\infty}^2 * A}$,

όπου $\frac{\rho}{2} * U_{\infty}^2 = 452 \frac{N}{m^2}$ (ένδειξη μανομέτρου) και A η επιφάνεια αναφοράς ($30 * 40 * 10^{-4} m^2$).

Άρα $c_D = \frac{D}{0.5424}$, $c_{SF} = \frac{SF}{0.5424}$

Οι τιμές των αδιάστατων συντελεστών των δυνάμεων που απεικονίζονται προέκυψαν από επεξεργασία των μετρήσεων με moving average.

4.2.1α) Συντελεστές αντίστασης για γωνίες εκτροπής 0°, ±20°



Εικόνα 4.28: Διάγραμμα με τη μεταβολή του συντελεστή αντίστασης (c_D) για τις διάφορες θέσεις κατά άξονα x για κάθε περίπτωση γωνίας εκτροπής

4.2.1β) Σχολιασμός διαγράμματος συντελεστών αντίστασης:

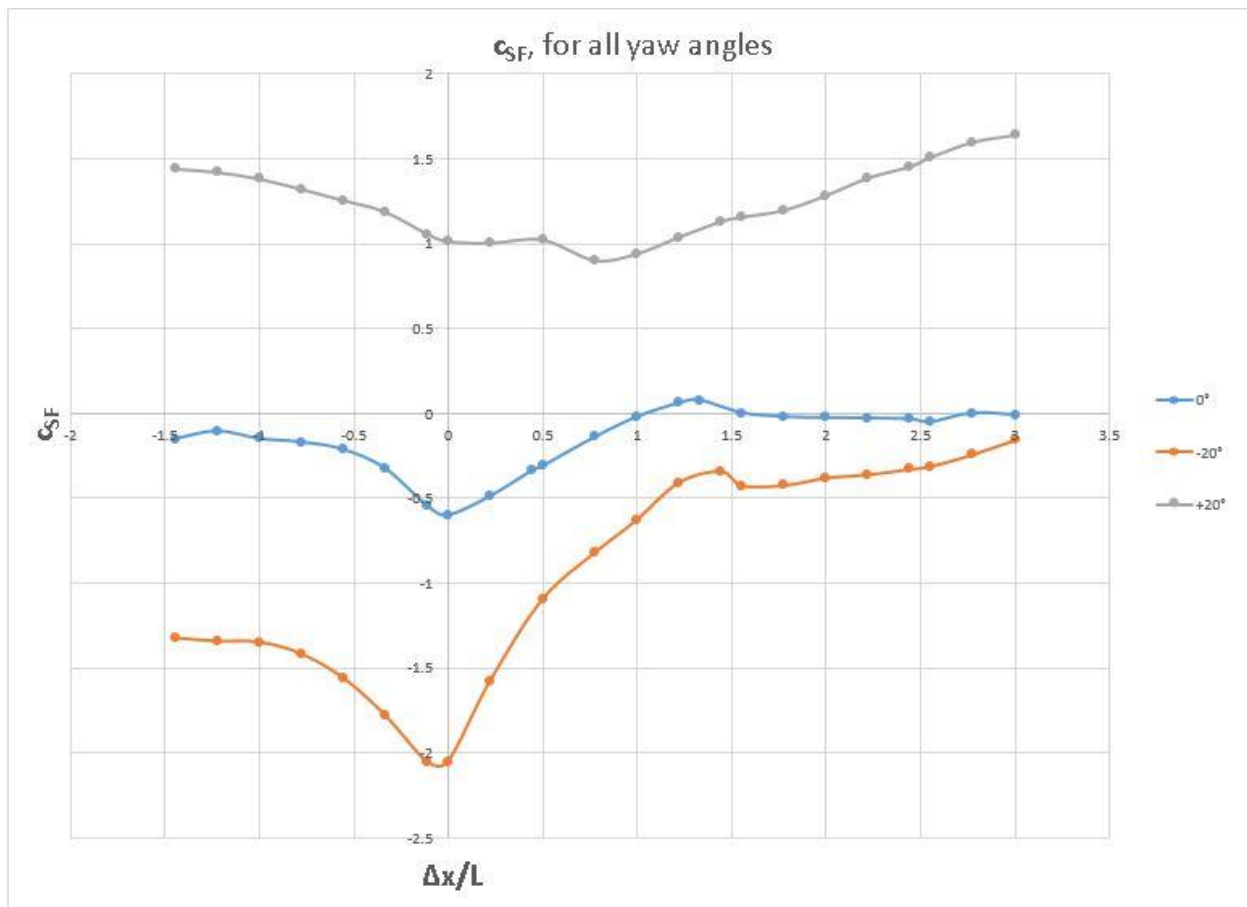
Για την περίπτωση της μηδενικής γωνίας εκτροπής παρουσιάζεται μέγιστο στη θέση $\Delta x/L=0$ (αυτή που το μπροστινό μέρος του διερχόμενου οχήματος είναι στην ίδια ευθεία με το πίσω του σταθερού) σε τιμή 1.25, ενώ αντίθετα ελάχιστο στη θέση 1.78 (τιμή 0.93).

Για γωνία εκτροπής (yaw angle) -20° το μέγιστο μετατοπίζεται κατάντι (λίγο πριν τη θέση $\Delta x/L = -0.11$, με τιμή 2.16) και αποτελεί την περίπτωση με τη μεγαλύτερη διακύμανση (από περίπου 1.06 σε 2.16). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αρχικά το σταθερό μοντέλο βρισκόταν προσήνεμα στο ρεύμα του αέρα μέχρι να μπει μπροστά του το διερχόμενο και να το φέρει σε υπήνεμη θέση.

Αντίθετα, για γωνία εκτροπής $+20^\circ$, με μικρότερες διακυμάνσεις αντίστασης, το μέγιστο μετατοπίζεται ανάντι του μηδέν (θέση $\Delta x/L=1$, τιμή 2.045) και κυμαίνεται από 1.6 ως 2.1. Η μικρή μεταβολή εξηγείται από το γεγονός ότι είναι τέτοια η διάταξη που η προς τα έξω πλευρά του σταθερού μοντέλου βρίσκεται πάντα προσήνεμα στο ρεύμα αέρα ανεξάρτητα της διέλευσης του άλλου μοντέλου, περιορίζοντας αισθητά την επίδρασή του.

Οι τιμές της αντίστασης είναι μεγάλες αν σκεφτούμε ότι ένα σύγχρονο αυτοκίνητο έχει $c_D=0.3$, αλλά σημαντική επίδραση σε αυτό παίζει η μορφή των μοντέλων οχημάτων του πειράματος – ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο αντί του πιο αεροδυναμικού σχήματος των σύγχρονων οχημάτων. Μάλιστα αν συγκρίνουμε με τη θεωρία παίρνουν την τιμή του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης που έχει ένα ορθογώνιο: περίπου 1.1.

4.2.2α) Συντελεστές πλευρικής δύναμης για γωνίες εκτροπής $0^\circ, \pm 20^\circ$



Εικόνα 4.29: Διάγραμμα με τη μεταβολή του συντελεστή πλευρικής δύναμης (c_{SF}) για τις διάφορες θέσεις κατά άξονα x για κάθε περίπτωση γωνίας εκτροπής

4.2.2β) Σχολιασμός διαγράμματος συντελεστών πλευρικής δύναμης

Για την περίπτωση μηδενικής γωνίας εκτροπής, η πλευρική δύναμη που ασκείται στο σταθερό όχημα είναι αρνητική-απωστική (εικόνα 3.10) απομακρύνοντάς το από το διερχόμενο μέχρι τη θέση $\Delta x/L=1$. Λαμβάνει μέγιστη αρνητική τιμή ($c_{SF}=-0.6$) στη θέση 0. Μετά μέχρι τη θέση $\Delta x/L=1.5$ η δύναμη είναι θετική-ελκτική με θετικό μέγιστο στη θέση $\Delta x/L = 1.33$ ($c_{SF}=-0.08$).

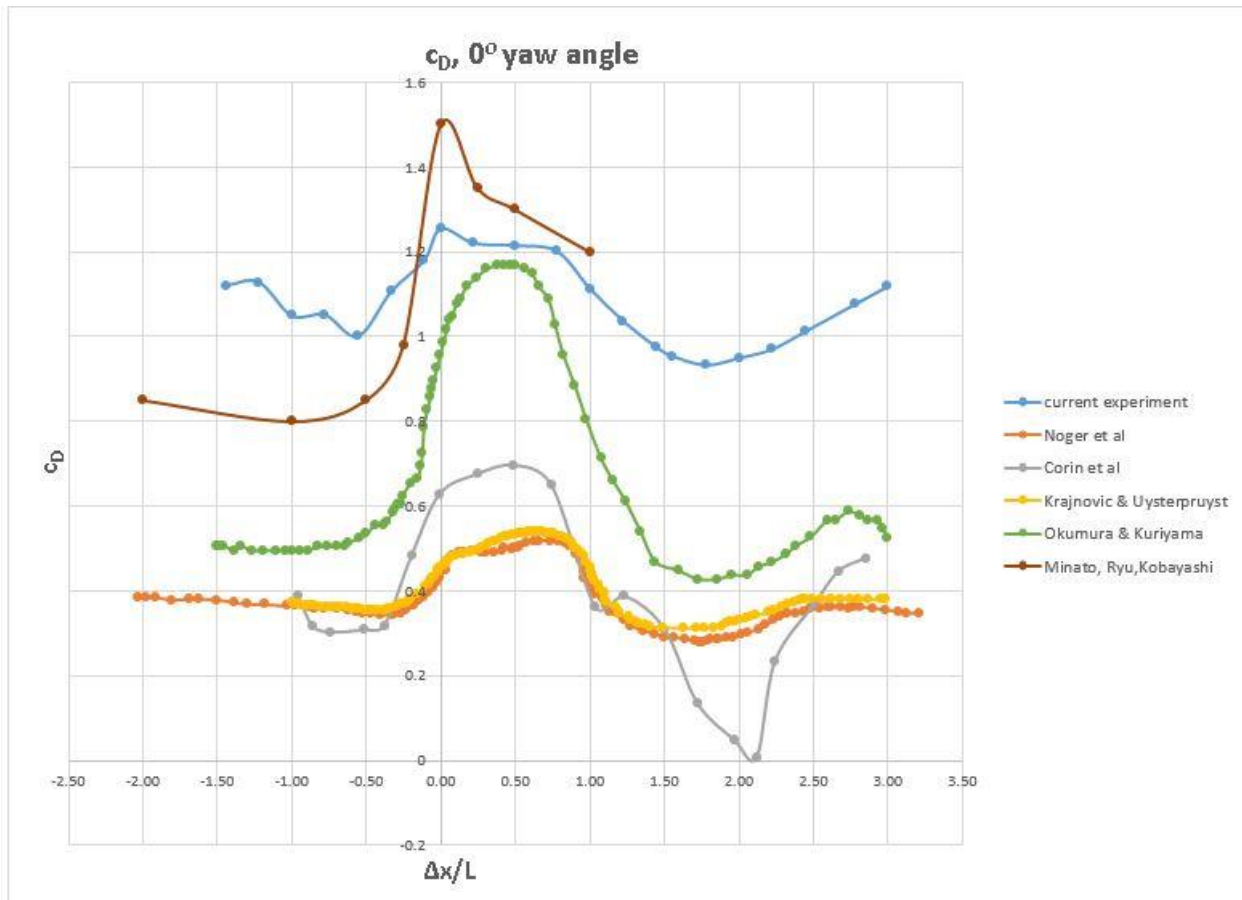
Για γωνία εκτροπής -20° , παρατηρείται ξανά η μεγαλύτερη διακύμανση του αδιάστατου συντελεστή πλευρικής δύναμης, που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του λίγο πριν το 0, θέση $x=-0.11$ με τιμή -2.06 .

Για γωνία εκτροπής $+20^\circ$, παρατηρείται και όσον αφορά τον αδιάστατο συντελεστή πλευρικής δύναμης αρκετά μικρότερη διακύμανση από τις -20° . Με τη διάταξη να είναι έτσι τοποθετημένη

ως προς το ελεύθερο ρεύμα, ώστε σε όλη τη διάρκεια το σταθερό αντικείμενο να ωθείται προς το διερχόμενο, η ελάχιστη τιμή που λαμβάνεται είναι στη θέση $\Delta x/L = 0.78$ και είναι ίση με 0.9.

4.2.3) Σύγκριση αποτελεσμάτων με εργασίες άλλων

Παράλληλα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μας για την περίπτωση της μηδενικής γωνίας εκτροπής με αναγωγή αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας στις δικές μας συνθήκες (αδιαστατοποίηση, αντιστοιχία σχετικών θέσεων στο δικό μας σύστημα συντεταγμένων). Τα μοντέλα των συγκρινόμενων εργασιών απεικονίζονται στις εικόνες 2.42 με 2.45 της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.



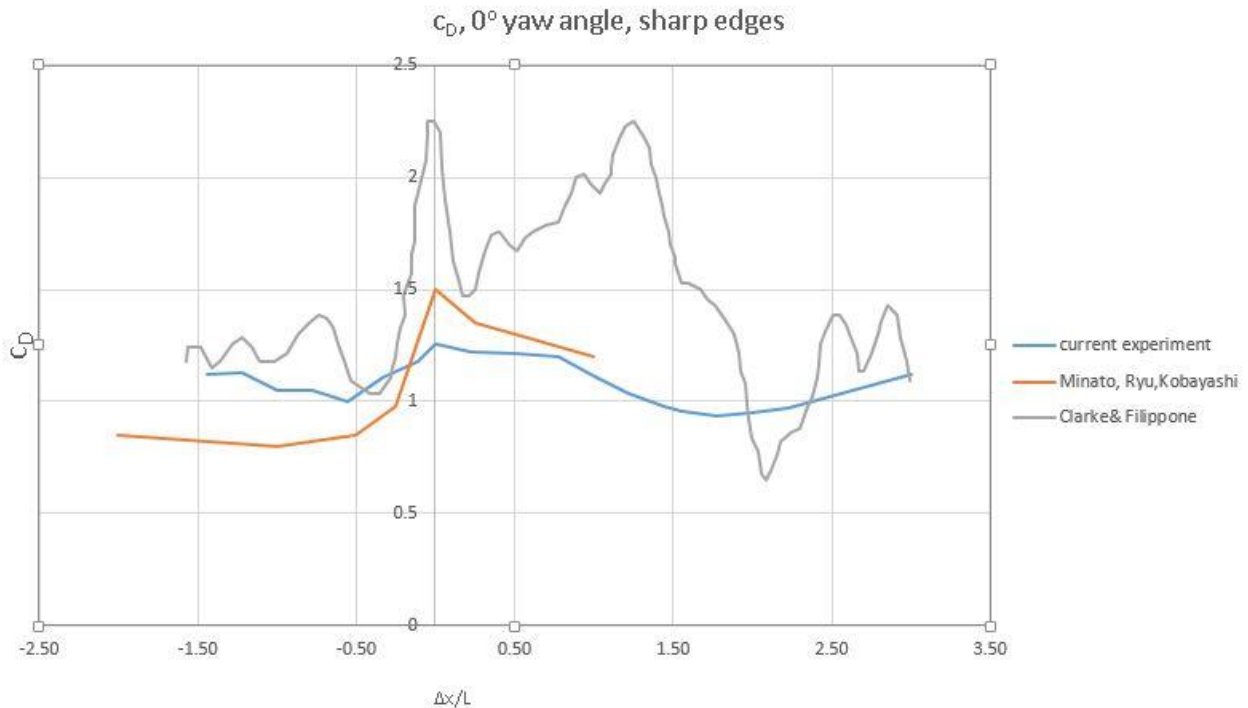
Εικόνα 4.30: Σύγκριση του συντελεστή αντίστασης c_D για γωνία 0° με εργασίες

4.2.3.1) Συντελεστής αντίστασης c_D :

Στη σύγκριση με τους υπολοίπους όσον αφορά τους αδιάστατους συντελεστές αντίστασης παρατηρείται παρόμοια διακύμανση στις τιμές του εξεταζόμενου μεγέθους ειδικά στην περιοχή $0 \div 1$. Απλά το μέγιστο έχει μετατοπιστεί σε θέση περίπου στο $x=0.6$ σε αυτά που έχουν ακολουθήσει την προτυποποίηση Ahmed (Noger ^(3.) & Krajnovic^(5.)) και σε θέση λίγο πιο κοντά

στο μηδέν σε αυτά με λίγο πιο διαφορετικό σχήμα (Corin ^(12.) & Okumura ^(11.)). Επίσης λόγω της πιο στρογγυλεμένης μορφής των μοντέλων σε σχέση με αυτή την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε μοντέλο με αιχμηρές ακμές, εξηγείται και η μεγάλη απόκλιση των μεγίστων τιμών (περίπου 0.6 και 1.25 αντίστοιχα).

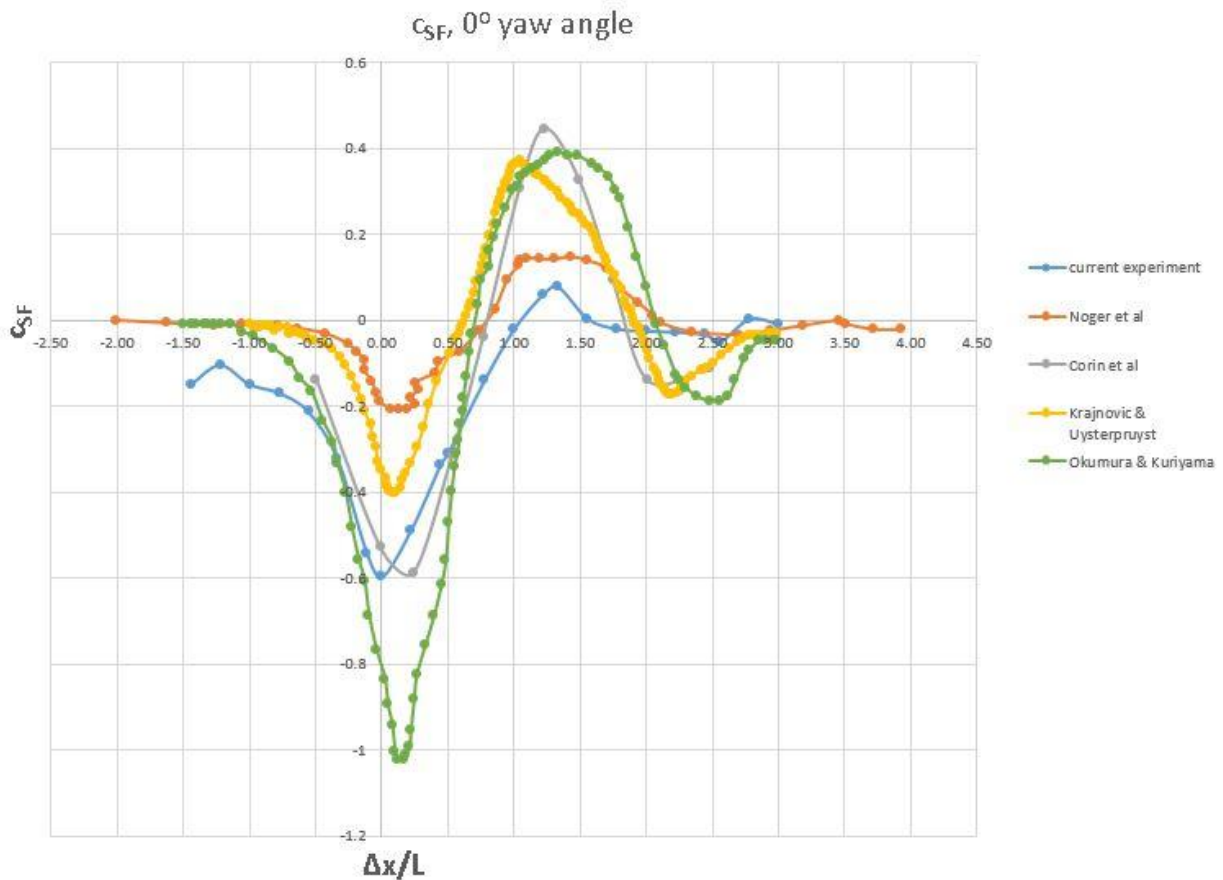
Για σύγκριση μόνο με όσους χρησιμοποίησαν ορθογώνια μοντέλα με αιχμηρές ακμές όπως στο παρόν πείραμα (Minato κ.α ^(9.), Clarke & Filippone^(7.)), είτε πειραματικά είτε αναλυτικά, προκύπτει το εξής διάγραμμα.



Εικόνα 4.31: Σύγκριση των συντελεστών αντίστασης c_D του παρόντος πειράματος με εργασίες άλλων που χρησιμοποίησαν μοντέλα με αιχμηρές ακμές.

4.2.3.2) Συντελεστής πλευρικής δύναμης c_{SF} :

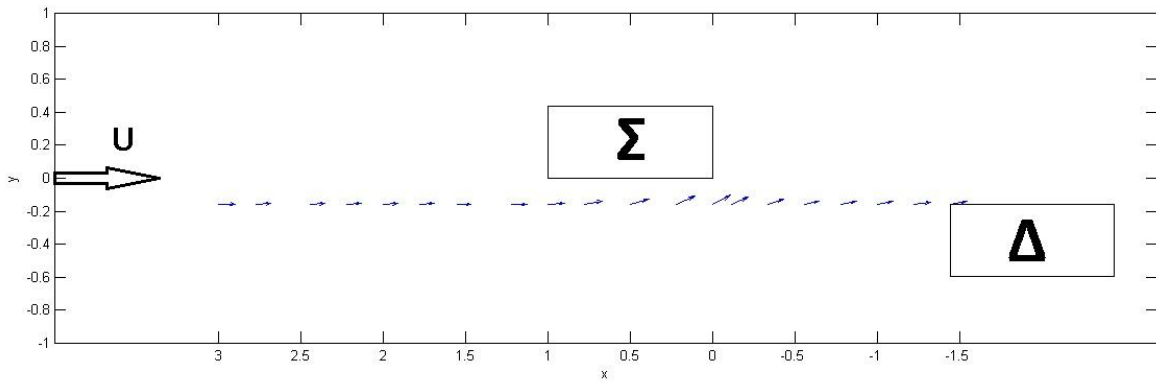
Παρόμοια συμπεράσματα μπορούμε να εξάγουμε από τη σύγκριση με τα πειράματα άλλων. Παρότι υπήρχε παρόμοια πορεία των καμπυλών και πολύ κοντινές θέσεις που πήραν μέγιστα και στις δυο κατευθύνσεις, η χρήση μοντέλου με αιχμηρές ακμές έφερε μεγαλύτερες τιμές από αυτές αρκετών από τους υπόλοιπους: 0.6 στην περίπτωσή μας και στην ημιμόνιμη μέθοδο 2D των Corin κ.ά ^(12.) αντί για 0.2 του Noger κ.ά ^(3.) και καθυστέρηση στην αλλαγή προσήμου της δύναμης (στην περίπτωσή μας για $x \sim 1$ σε άλλους για $x \sim 0.75$). Σίγουρα πάντως μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι το διερχόμενο όχημα απωθεί το προσπερασμένο (σε περιπτώσεις με σταθερή ταχύτητα)-σταθερό μέχρι περίπου το σημείο που τα μπροστινά μέρη τους θα έρθουν στην ίδια ευθεία (από τη θέση κατά x , 0.75 με 1).



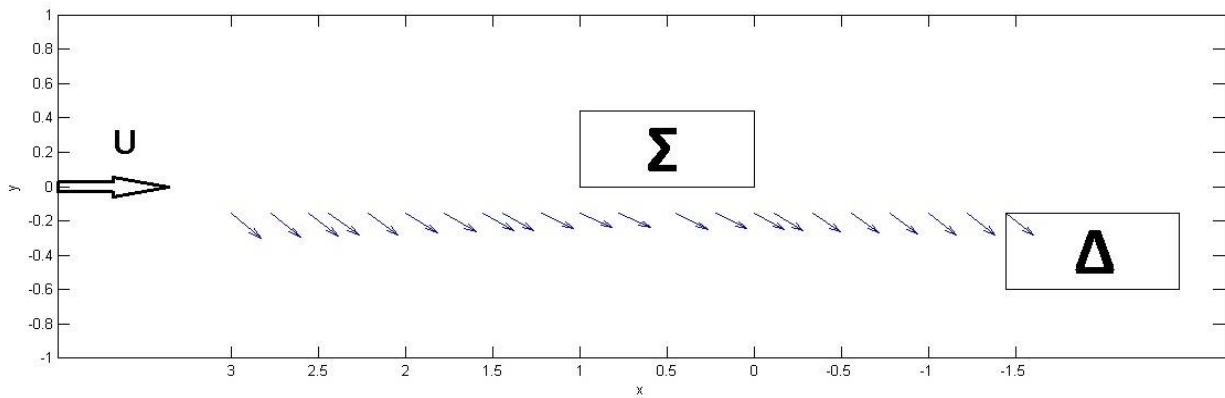
Εικόνα 4.32: Σύγκριση του συντελεστή πλευρικής δύναμης c_{SF} για γωνία 0° με άλλες πειραματικές/αναλυτικές διαδικασίες

4.2.4) Εποπτική παρουσίαση διδιάστατης δύναμης που ασκείται στο σταθερό όχημα

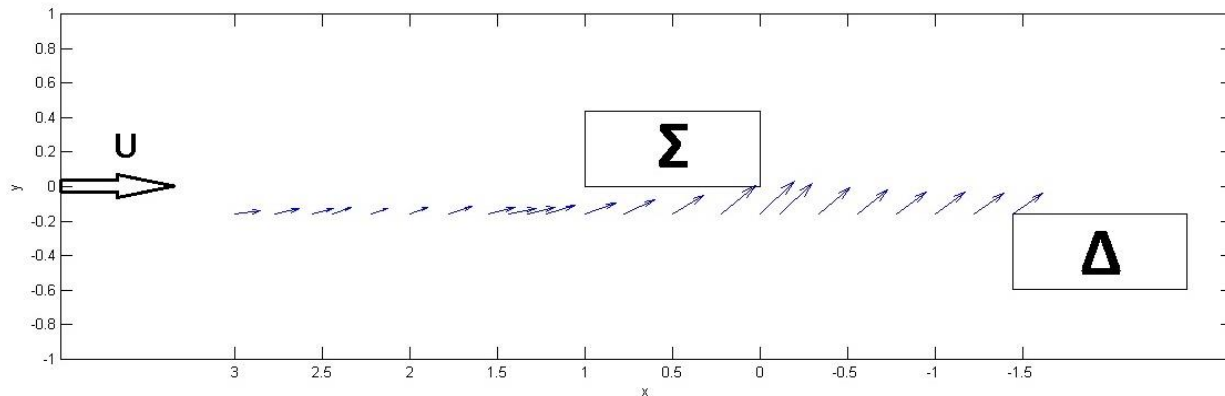
Μετά για κάθε σχετική διαμήκη θέση ορίσαμε τη συνισταμένη διδιάστατη δύναμη που δέχεται το σταθερό όχημα κατά το προσπέρασμά του από το διερχόμενο. Παρατηρούμε ότι αυτή είναι απωστική μέχρι τα μπροστινά μέρη των δύο μοντέλων να βρίσκονται στην ίδια ευθεία.



Εικόνα 4.33: Διανυσματική απεικόνιση της συνολικής διδιάστατης δύναμης που δέχεται το σταθερό μοντέλο για γωνία εκτροπής 0° .



Εικόνα 4.34: Διανυσματική απεικόνιση της συνολικής διδιάστατης δύναμης που δέχεται το σταθερό μοντέλο για γωνία εκτροπής $+20^\circ$.



Εικόνα 4.35: Διανυσματική απεικόνιση της συνολικής διδιάστατης δύναμης που δέχεται το σταθερό μοντέλο για γωνία εκτροπής -20° .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα από τις μετρήσεις

Στο πρώτο μέρος του πειράματος (**καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων με PIV**) παρατηρείται ότι

- όσο το διερχόμενο όχημα πλησιάζει το σταθερό, προκαλείται αποκόλληση της ροής από την επιφάνεια του σταθερού οχήματος στην περιοχή μεταξύ των δυο οχημάτων. Η έκταση αυτής της ζώνης ανακυκλοφορίας μειώνεται αισθητά, όταν το διερχόμενο όχημα βρίσκεται ανάντι του σταθερού και σε απόσταση $3L$ από το σταθερό.
- με την αύξηση της πλευρικής απόστασης μεταξύ των οχημάτων, η διέλευση του κινούμενου μοντέλου επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό το πεδίο της ροής γύρω από το σταθερό.
- Στην περιοχή αποκόλλησης της ροής παρατηρείται ότι το μέτρο της ταχύτητας φτάνει μέχρι και στο 250% της ταχύτητας ελεύθερου ρεύματος λόγω επιτάχυνσης του ρευστού στην οξεία ακμή του.
- Τα επίπεδα της τύρβης ήταν αυξημένα, αποτυπώνοντας την έντονη επίδραση στο πεδίο της ροής τόσο της αιχμηρής ακμής του σταθερού μοντέλου που εκτρέπει τη ροή κατά την εγκάρσια κατεύθυνση όσο και του διερχόμενου μοντέλου το οποίο συμπιέζει τη ζώνη αποκόλλησης κατά τη διάρκεια του προσπεράσματος.

Στο δεύτερο τμήμα του πειράματος (μέτρηση δυνάμεων αντίστασης και πλευρικής δύναμης σε σταθερό μοντέλο με χρήση ζυγού) παρουσιάστηκε

- 30% διακύμανση του **συντελεστή αντίστασης** για 0° και $+20^\circ$ γωνία εκτροπής (γ_{aw} angle) ενώ για την περίπτωση των -20° η διακύμανση ήταν στο επίπεδο του 100%. Για μηδενική γωνία γ_{aw} και -20° ο συντελεστής αντίστασης μεγιστοποιείται στη θέση $x=0$ και ελαχιστοποιείται για γωνία -20 στη θέση $x/L=2.1$. Για γωνία $\gamma_{aw} +20$ η μεταβολή του είναι σχετικά μικρή με τιμές διπλάσιες σχεδόν σε σχέση με τη μηδενική γωνία γ_{aw} .
- Παρατηρήθηκε συμφωνία με τη θεωρητική ανάλυση που ανέφερε συντελεστή αντίστασης 1.1 για ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (μοντέλα παρούσας εργασίας) με αιχμηρές ακμές.
- Όσον αφορά την **πλευρική δύναμη**, για μηδενική γωνία γ_{aw} το διερχόμενο όχημα απωθούσε το σταθερό μέχρι τα δύο μοντέλα να έρθουν το ένα δίπλα στο άλλο (στην ίδια ευθεία) οπότε και η δύναμη άλλαζε φορά. Για τις μη μηδενικές γωνίες εκτροπής, στην περίπτωση -20° η πλευρική δύναμη μεταβάλλονταν έντονα συναρτήσει της θέσης του διερχόμενου οχήματος. Συγκεκριμένα η πλευρική δύναμη πήρε την μεγαλύτερη τιμή (σε σχέση με τις άλλες δυο γωνίες γ_{aw}) στη θέση $x=0$, ενώ όταν το διερχόμενο όχημα βρίσκονταν ανάντι του σταθερού η πλευρική δύναμη ελαχιστοποιείτο.
- Επίσης, παρατηρήθηκε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών όσον αφορά την κατεύθυνση (απωστική) της πλευρικής δύναμης που ασκείται στο σταθερό όχημα κατά το προσπέρασμά του από το διερχόμενο μέχρι τη στιγμή που τα μπροστινά μέρη των δύο μοντέλων είναι στην ίδια ευθεία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσαγγάρης Σ., (2005) Μηχανική των Ρευστών, *Εκδόσεις Συμεών*, Αθήνα.
2. Μαθιουλάκης Δ.,(2006). Μηχανική Ρευστών ΙΙ, Σημειώσεις για το προπτυχιακό μάθημα Μηχανική Ρευστών ΙΙ, *Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ*, Αθήνα.
3. C. Noger, C. REGARDIN, E. Szechenyi, (2005). Investigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing manoeuvres. *Journal of Fluids and Structures* 21, 231-241.
4. D. P. Telionis, C. J. Fahrner, G. S. Jones, (1984) An experimental study of highway aerodynamic interferences, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 17 267 – 293.
5. D. Uystepuyst, S. Krajnovic (2015). Numerical simulation of the transient aerodynamic phenomena induced by passing manoeuvres.
6. G.J. Brown and G.R. Seemann. (1972). An experimental investigation of the unsteady aerodynamics of passing highway vehicle. *Rep. DOT-HS-800671*.
7. J. Clarke, A. Filippone (2007). Unsteady computational analysis of vehicle passing. *Journal of Fluid Engineering* 129 , 359 – 367.
8. T.Lajos. Basics of vehicle aerodynamics.
9. K.Minato, H.Ryu,T.Kobayashi(1991). Aerodynamics of vehicles in tunnels-flow visualizations using the laser light sheet method and its digital image processing. *SAE paper no. 910314*, 123–131.
10. M.Hammache, M. Michaelian, F.Browand (2001). Aerodynamic Forces on Truck Models, Including Two Trucks in Tandem.
11. K.Okumura, T.Kuriyama. (1997). Transient aerodynamic simulation in crosswind and passing an automobile. *SAE Paper No. 970404*.
12. R. J. Corin, L. He, R.G. Dominy (2008). A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, 1390-1411.
13. Al.Vdonin, Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars.
14. S. Yamamoto, K. Yanagimoto, H. Fukuda, H. China, K. Nakagawa, Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles, *JSAE Review* 18 (1997), 39–44.

15. Al. Tallamelli, University of Bologna. Vehicle aerodynamics.(<https://www.mech.kth.se/courses/5C1211/Intro07.pdf>)
16. Ar. Tautkus, Kaunas University Longitudinal and lateral dynamics
17. Hucho, W.-H. (Ed.), 1998. Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, fourth ed. SAE Inc.

Περαιτέρω ευχαριστίες:

Θα ήθελα να αποδώσω τα εύσημα για την πολύτιμη βοήθειά τους στους παρακάτω:

Τον Δημήτρη Γκιόλα, για τη βοήθεια της συγγραφής του κώδικα στη MATLAB

Τους Γιάννη Παναγέα και Ναταλία Σταματάκη, για τη βοήθεια τους στην επεξεργασία με MATLAB

Τον Ξενοκράτη Βαρτζίκο, για το σχεδιασμό του σκαριφήματος της εγκατάστασης σε PIV

