

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ: ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ
ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Χ. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

ΠΑΤΡΑ – ΙΟΥΝΙΟΣ 2008

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

1.1: Βασικές αρχές της αεροδυναμικής.....	1
1.2: Ιδιαιτερότητες της αεροδυναμικής.....	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ.

2.1: Φαινόμενα ροής σχετικά με την κίνηση των οχημάτων.....	19
2.1.1: Φαινόμενα εξωτερικής ροής.....	19
2.1.2: Φαινόμενα εσωτερικής ροής.....	21
2.2: Προβλήματα της εξωτερικής ροής.....	22
2.2.1: Βασικές εξισώσεις της ανιζώδους εξωτερικής ροής.....	22
2.2.2: Εφαρμογές.....	24
2.2.3: Επίδραση του ιζώδους.	27
2.2.3.1: Ανάπτυξη γραμμικού & τυρβώδους οριακού στρώματος.....	28
2.2.3.2: Αποκόλληση της ροής.....	31
2.2.3.3: Αντίσταση λόγω τριβής.....	32
2.2.3.4: Αντίσταση λόγω πίεσης.....	36
2.2.3.5: Συνολικές δυνάμεις και ροπές.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΟΧΗΜΑΤΑ ΥΨΗΛΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ.

3.1: Ορισμοί.....	47
3.2: Σταθμοί ορόσημο στην ιστορία των αγωνιστικών αυτοκινήτων... 52	
3.3: Η σπουδαιότητα της αεροδυναμικής στα οχήματα υψηλών επιδόσεων.....	62
3.3.1: Αντίσταση – Άνωση.....	63
3.3.2: Χειρισμός.....	65
3.3.2.1: Δοκιμές οδήγησης.....	65
3.3.2.2: Γωνία προσβολής – Παρεκκλίνουσα ροή του αέρα.....	67
3.3.2.3: Απόρρευμα – Κενά αέρος.....	70
3.3.2.4: Θεωρητικές διερευνήσεις.....	71
3.3.3: Ψύξη – Εξαερισμός.....	75
3.4: Εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού.....	76
3.4.1: Αντίσταση – Άνωση.....	77
3.4.1.1: Επίδραση των βασικών ρυθμίσεων του οχήματος.....	82
3.4.1.2: Πτερύγια.....	82
3.4.1.3: Επίδραση του εδάφους.....	84
3.4.1.4: Ειδικές ρυθμίσεις του αμαξώματος – Μονοθέσια.....	89
3.4.2: Χειρισμός.....	93
3.4.3: Ψύξη – Εξαερισμός.....	96

3.5: Ειδικά προβλήματα.....	98
3.5.1: Χρόνος γύρου – Εξοικονόμηση καυσίμου.....	98
3.5.2: Ηχητικές ταχύτητες.....	99
3.5.3: Ακάλυπτοι τροχοί.....	101
3.5.4: Περιστρεφόμενοι – Στατικοί τροχοί στα μονοθέσια.....	102
3.5.4.1: Έκδοση δρόμου.....	102
3.5.4.2: Έκδοση υψηλών ταχυτήτων.....	103
3.5.5: Επίδραση της μεταβολής του οριακού στρώματος στις μετρήσεις.....	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΕΣ.

4.1: Γενικά.....	105
4.1.1: Η ανάγκη για αεροσήραγγα οχημάτων.....	105
4.1.2: Προσομοίωση σε διάφορες όψεις οδήγησης στο δρόμο.....	110
4.2: Μερικές βασικές αρχές της τεχνικής αεροσηράγγων.....	114
4.2.1: Επιλογή τεχνικής.....	114
4.2.2: Εκτιμήσεις διαμόρφωσης.....	115
4.2.3: Ιδιότητες των θεμελιωδών τμημάτων.....	117
4.2.3.1: Σχεδιάζοντας μία δοκιμή.....	117
4.2.3.2: Τμήμα δοκιμής.....	119
4.2.3.3: Ακροφύσιο.....	133
4.2.3.4: Προσδιορισμός της ταχύτητας του αέρα.....	141
4.2.3.5: Θάλαμος τμήματος δοκιμής.....	148
4.2.3.6: Εναλλάκτης θερμότητας και φορτίου ηλίου.....	149

4.2.3.7: Εξοπλισμός.....	150
4.3: Περιορισμοί της προσομοίωσης.....	151
4.3.1: Συστηματικά λάθη.....	151
4.3.2: Αναπαράσταση του δρόμου.....	152
4.3.3: Διορθώσεις αεροσηράγγων.....	181
4.3.3.1: Στόχοι.....	181
4.3.3.2: Κλειστό τμήμα δοκιμής.....	185
4.3.3.3: Ανοικτό τμήμα δοκιμής.....	192
4.3.3.4: Αποτελέσματα οριακού στρώματος.....	195
4.3.3.5: Παρακεκλιμένο πρότυπο.....	196
4.3.3.6: Θερμικές δοκιμές.....	197
4.4: Δοκιμές με πρότυπα μειωμένης κλίμακας.....	197
4.4.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	197
4.4.2: Λεπτομέρειες της πρότυπης τεχνικής και κατασκευής.....	200
4.4.3: Αποτελέσματα του αριθμού Reynolds.....	205
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ.	
5.1: Εισαγωγή.....	221
5.2: Μοντελοποίηση Αεροτομής.....	222
5.2.1: Προετοιμασία του πλέγματος.....	223
5.2.2: Προετοιμασία και εξομοίωση του μοντέλου με το λογισμικό FLUENT.....	233

*Σε όσους δεν ήταν εκεί,
όταν τους χρειάστηκα...*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στη μελέτη που γίνεται στον τομέα της αεροδυναμικής κατά την παραγωγή οχημάτων υψηλών επιδόσεων καθώς επίσης και κατά την προετοιμασία αγωνιστικών οχημάτων. Η μελέτη εκτείνεται σε διάφορους τομείς ξεκινώντας από ορισμένες βασικές αρχές της μηχανικής των ρευστών, κυρίως όσον αφορά τις ιδιότητες της εξωτερικής ροής, από τις οποίες απορρέουν οι αρχές που διέπουν την αεροδυναμική των οχημάτων.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο βασικό θέμα που είναι η αεροδυναμική ανάλυση των αγωνιστικών οχημάτων. Παρουσιάζονται αρχικά οι σημαντικότερες καινοτομίες που επιτεύχθηκαν στην ιστορία των αγωνιστικών αυτοκινήτων και οι οποίες έδωσαν λύση σε προβλήματα που ανέδειξαν τη σπουδαιότητα της αεροδυναμικής. Παράλληλα αναφέρεται και η αρνητική επίδρασή τους στη συνολική βελτίωση των επιδόσεων του αυτοκινήτου όπως και η επίδραση της αεροδυναμικής στην επίλυσή τους.

Ακολουθεί η μελέτη του βασικότερου μέσου για την επίτευξη της αεροδυναμικής μελέτης των οχημάτων, που είναι οι αεροσήραγγες. Οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις αποτελούν το ισχυρότερο εργαλείο για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό του οχήματος. Αναλύεται η αρχή λειτουργίας τους αλλά και η αρχιτεκτονική τους με σκοπό να καταστεί κατανοητή η διαδικασία αεροδυναμικής μελέτης και ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στους περιορισμούς των δοκιμών αυτών αναλύοντας τους λόγους για τους οποίους τα αποτελέσματα των δοκιμών στην αεροσήραγγα πάντα αποκλίνουν από τα πραγματικά. Επίσης, γίνεται αναφορά στην πλέον σύγχρονη μέθοδο αεροδυναμικής μελέτης με την ονομασία Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD).

Τέλος περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης, η οποία περιλαμβάνει την προετοιμασία μοντέλου αεροτομής, κατασκευή πλέγματος επί αυτού, προετοιμασία πλέγματος και εξομοίωση. Το μοντέλο της αεροτομής αποτελεί το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα εξωτερικής ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

1.1: Βασικές αρχές της αεροδυναμικής

Οι διαδικασίες ροής στις οποίες υπόκειται ένα κινούμενο όχημα, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Ροή γύρω από το όχημα.
2. Ροή στο εσωτερικό του οχήματος.
3. Ροή εντός των μηχανικών τμημάτων του οχήματος.

Οι δύο πρώτες κατηγορίες σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η ροή εντός του χώρου της μηχανής σχετίζεται άμεσα με τη ροή γύρω από το όχημα. Και τα δύο πεδία ροής, υπολογίζονται ταυτόχρονα. Όμως οι διαδικασίες ροής του αέρα που εισέρχεται στην ίδια τη μηχανή ή το σύστημα ταχυτήτων, δεν σχετίζονται άμεσα με τις ανωτέρω, δεν μελετώνται από την αεροδυναμική και για το λόγο αυτό δεν θα αναφερθούμε στις συγκεκριμένες διαδικασίες.

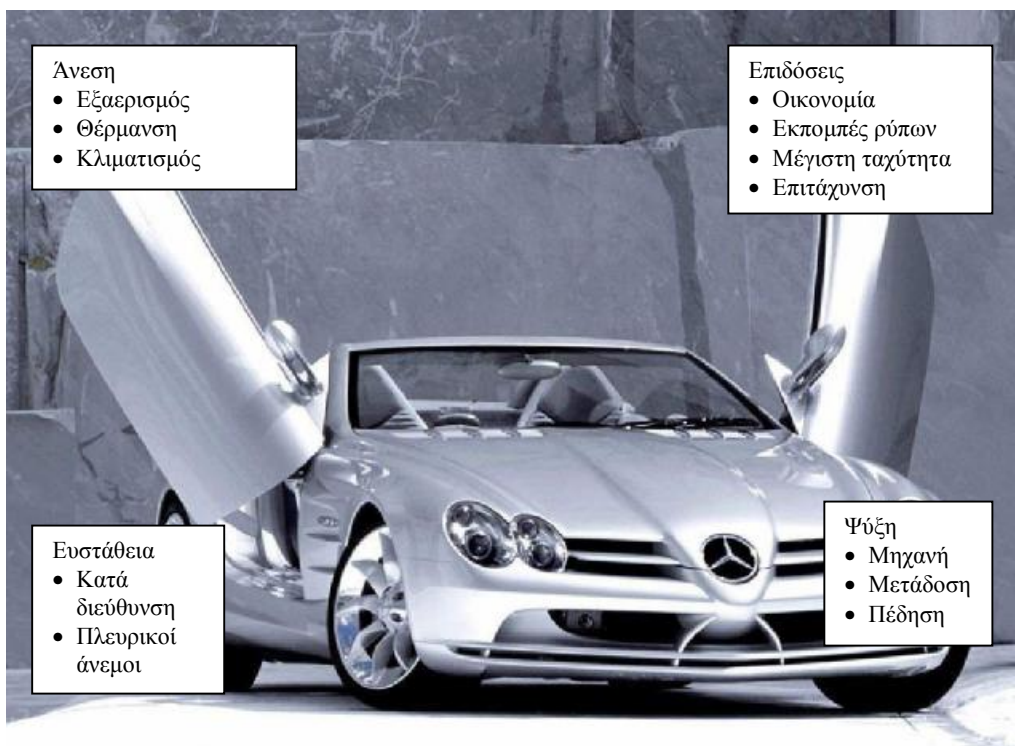
Στην αεροδυναμική του αυτοκινήτου, το γενικότερο ενδιαφέρον εστιάζεται στην αεροδυναμική αντίσταση, και ακόμα πιο συγκεκριμένα στον αδιάστατο αριθμό της, το συντελεστή αεροδυναμικής C_D . Πράγματι δεν μπορούμε να αρνηθούμε τη σπουδαιότητα του ρόλου του ο οποίος θα μπορούσε να συγκριθεί με αυτόν του λόγου συμπίεσης μίας μηχανής εσωτερικής καύσης. Επιδόσεις, εκπομπές καυσαερίων, οικονομία καυσίμων και τελική ταχύτητα αποτελούν σημαντικές παραμέτρους ενός οχήματος οι οποίες επηρεάζονται όλες από συντελεστή αεροδυναμικής.

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε πως η αεροδυναμική περιλαμβάνει πολύ περισσότερους τομείς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η σταθερότητα, το δυναμικό ή παθητικό στρίψιμο και η αντίδραση του οχήματος στους πλευρικούς ανέμους, είναι ορισμένες παράμετροι που εξαρτώνται από το πεδίο της

εξωτερικής ροής. Επιπλέον, η εξωτερική ροή πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε να εμποδίζει τη συγκέντρωση σταγόνων βροχής στα παράθυρα και τους εξωτερικούς καθρέπτες, να διατηρεί τα φώτα όσο πιο καθαρά γίνεται, να μειώνει το θόρυβο του ανέμου και να ψύχει ορισμένα μέρη όπως την ελαιολεκάνη, το σιγαστήρα ή τα φρένα του οχήματος.

Η εσωτερική ροή συνδέεται με τις απώλειες θερμότητας της μηχανής. Πρέπει να διασφαλιστεί πως με τη βοήθεια του ψυγείου του οχήματος, η εκλυόμενη από τη μηχανή θερμότητα παρασύρεται μακριά, κάτω από όλες τις συνθήκες οδήγησης.

Τέλος ένα άλλο σύστημα εσωτερικής ροής, άνετο κλιματισμό στο χώρο των επιβατών. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις (ψύξη μηχανής και αερισμός καμπίνας), λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν τα σχετικά θερμοκρασιακά πεδία.



Σχήμα 1.1: Το φάσμα των διεργασιών για τις οποίες είναι υπεύθυνη η αεροδυναμική μελέτη ενός οχήματος.

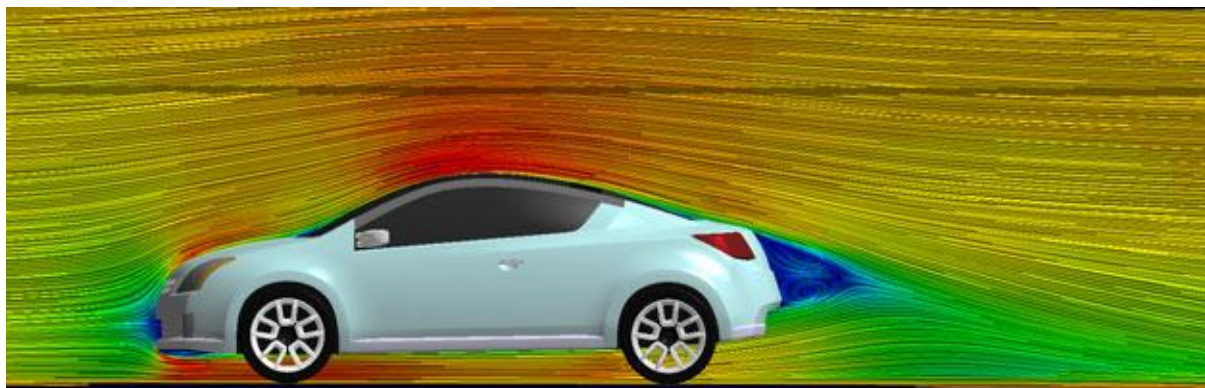
Εν γένει, η αεροδυναμική επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό ενός οχήματος. Ωστόσο ένας αεροδυναμιστής, πρέπει να γνωρίζει πως η ολική

μορφή καθώς και πολλές λεπτομέρειες του οχήματος, καθορίζονται αρχικά από άλλους παράγοντες οι οποίοι δεν σχετίζονται με την αεροδυναμική. Μέσα σε αυτούς είναι η λειτουργικότητα, ασφάλεια, κανονισμοί, οικονομία και τελευταίο μα εξίσου σημαντικό, η αισθητική. Μόνο εάν είναι έτοιμος να το αποδεχτεί αυτό και να συνεργαστεί με τους εκπροσώπους των ανάλογων ειδικοτήτων θα καταφέρει να επηρεάσει με τη σκέψη του.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής γύρω από ένα όχημα μπορούν να γίνουν ορατά. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μίας αεροσήραγγας και μίας γεννήτριας καπνού. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά τις ρευματικές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας ενός αυτοκινήτου για συνθήκες συμμετρικής ροής, δηλαδή ροή απουσία πλευρικών ανέμων. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η αποκόλληση της ροής στο πίσω άκρο του οχήματος. Ενώ οι ρευματικές γραμμές ακολουθούν την περίμετρο του σώματος σχηματίζοντας επιμήκεις λωρίδες, ακόμα και σε περιοχές με απότομη καμπυλότητα, η ροή του αέρα τελικά διαχωρίζεται στο τελικό άκρο της οροφής, σχηματίζοντας ένα μεγάλο απόρρευμα. Το απόρρευμα αυτό, που ορισμένες φορές λέγεται και περιοχή «αύλακος πλοίου», μπορεί να παρατηρηθεί εισάγοντας καπνό πάνω σε αυτό στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου και όχι στη ροή που περνάει πάνω από αυτό (Σχήμα 1.2 και 1.3). Η αποκόλληση είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στη ροή γύρω από ένα όχημα. Πάνω από όλα προκαλεί αντίσταση κι έτσι η κύρια διεργασία της αεροδυναμικής ανάπτυξης ενός οχήματος είναι να την παρεμποδίσει ή αν δεν είναι εφικτό, να την ελέγξει.



Σχήμα 1.2: Ρευματικές γραμμές κατά τη δοκιμή σε αεροδυναμική σήραγγα.



Σχήμα 1.3: Εμφάνιση απορρεύματος στο ουραίο τμήμα οχήματος κατά την εξομοίωση της αεροδυναμικής του συμπεριφοράς.

Η αεροδυναμική αντίσταση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας:

$$D \sim V^2$$

Για ένα μεσαίου μεγέθους όχημα, η αεροδυναμική αντίσταση, αποτελεί το 75 – 80 % της συνολικής αντίστασης για ταχύτητα κίνησης 100 Km/ h. Είναι προφανές ότι μειώνοντας την αντίσταση αυτή, επιτυγχάνουμε ταυτόχρονα σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου.

Η πλήρης μορφή της παραπάνω έκφρασης είναι:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2$$

Όπου:

C_D = Συντελεστής αεροδυναμικής.

ρ = Πυκνότητα του αέρα.

A = Επιφάνεια του οχήματος.

U = Ταχύτητα ροής του αέρα.

Πρέπει να διευκρινίσουμε πως ως επιφάνεια στη συγκεκριμένη περίπτωση, εννοούμε την επιφάνεια της αποτύπωσης της εμπρόσθιας όψης όπως περιγράφεται και στο σχήμα 1.4. Συνεπώς η αντίσταση ενός οχήματος, καθορίζεται από το μέγεθός του και από το σχήμα του, του οποίου η αεροδυναμική ποιότητα χαρακτηρίζεται από το συντελεστή αεροδυναμικής.



Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση της εμπρόσθιας επιφάνειας οχήματος.

Γενικά το μέγεθος ενός αυτοκινήτου και κατ' επέκταση η μπροστινή του επιφάνεια, καθορίζεται από τις απαιτήσεις της σχεδίασης. Συνεπώς οι προσπάθειες για μείωση της αντίστασης συγκεντρώνονται στη μείωση του συντελεστή αντίστασης, με κατάλληλη διαμόρφωση του αμαξώματος.

Η ανάπτυξη του διάκενου μεταξύ των ρευματικών γραμμών στο σχήμα 1.2 είναι ενδεικτική της καθαρής δύναμης που ασκείται σε κάθετη διεύθυνση. Ρευματικές γραμμές με μικρό διάκενο σημαίνουν υψηλές ταχύτητας και κατ' επέκταση μικρή στατική πίεση. Η διαφορά πίεσης μεταξύ της ανώτερων και των κατώτερων επιφανειών ενός οχήματος, παράγει μία συνισταμένη δύναμη σε κατάλληλη γωνία προς τη διεύθυνση της ροής η οποία λέγεται άνωση. Ο κανόνας θέλει την άνωση να δρα προς τα πάνω, δηλαδή η δύναμη αυτή τείνει να ανυψώσει το όχημα και για το λόγο αυτό μειώνει την αποτελεσματικότητα των ελαστικών. Αυτό είναι κατ' αρχή μειονέκτημα για την ευστάθεια ενός αυτοκινήτου διότι για δεδομένη πλευρική δύναμη η οποία μπορεί να προκύπτει από πλευρικούς ανέμους, η γωνία ολίσθησης αυξάνεται όταν το φορτίο των ελαστικών μειώνεται. Επιπλέον, η άνωση συζευγνύεται με μία ισχυρή ροπή πρόνευσης, γεγονός το οποίο έχει δύο βασικές συνέπειες:

1. Η μεταβολή φορτίου στον πρόσθιο άξονα διαφέρει από αυτή του πίσω άξονα, με αποτέλεσμα το δυναμικό – παθητικό στρίψιμο του οχήματος να μεταβάλλεται.
2. Η διεύθυνση του οχήματος ως προς το οδόστρωμα η λεγόμενη γωνία προσβολής, μεταβάλλεται και αυτό μπορεί να αυξήσει την αντίσταση.

Όσο η ταχύτητα του οχήματος είναι χαμηλή, $U \leq 100 \text{ km/h}$, η άνωση και η ροπή επηρεάζουν ελάχιστα την ευστάθεια του οχήματος, ακόμα και αν αυτό υπόκειται σε πλευρικούς ανέμους. Ωστόσο, στις υψηλότερες ταχύτητες κάτι τέτοιο δεν ισχύει και για το λόγο αυτό γίνονται συνεχώς απόπειρες για τον έλεγχό τους.

Η μικρού μεγέθους άνωση κυρίως στον πίσω άξονα οχήματος με κίνηση στους μπροστινούς τροχούς είναι ένας δεδηλωμένος στόχος των σχεδιαστών. Πολλές φορές, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, γίνεται μικρή ανοχή στην αύξηση της αντίστασης. Οι αεροτομές μπροστά και πίσω, κάτι που αρχικά εφαρμόστηκε μόνο στα αυτοκίνητα αγώνων, αλλά πλέον ολοκληρώνονται συνεχώς στην κύρια κατεύθυνση της παραγωγής των αυτοκινητοβιομηχανιών, αποτελούν οφθαλμοφανές δείγμα της προσπάθειας για επίτευξη μικρής άνωσης. Αυτό ισχύει περισσότερο βέβαια για τα αγωνιστικά οχήματα, όπου το φορτίο στους τροχούς θέτει τα όρια για την ταχύτητα του οχήματος όταν αυτό στρίβει. Χωρισμένα πτερύγια μπροστά και πίσω από τα οχήματα αυτά, παράγουν μεγάλου μέτρου αρνητική άνωση. Δυστυχώς αυτό συνεπάγεται σημαντική αντίσταση.

Στους πλευρικούς ανέμους, η ροή του αέρα που περνάει πάνω από ένα όχημα γίνεται ασυμμετρική ως προς το διάμηκες επίπεδο του οχήματος. Το σχήμα του αυτοκινήτου θα έπρεπε να είναι τέτοιο ώστε οι επιπρόσθετες δυνάμεις και ροπές να μην μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στην ευστάθειά του. Προς το παρόν, το πρόβλημα της ευαισθησίας ως προς τους πλευρικούς

ανέμους έχει χάσει την ένα μεγάλο ποσοστό από την προσοχή που του αποδίδονταν στο παρελθόν. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι μαζί με την τάση για κίνηση των αυτοκινήτων στους μπροστινούς τροχούς, το κέντρο βάρους του μέσου αυτοκινήτου έχει μεταφερθεί προς τα μπροστά, και τα αυτοκίνητα με τη μηχανή στο πίσω μέρος έχουν γίνει πιο σπάνια. Όμως η κατάσταση μπορεί να αλλάξει ξανά διότι με επιδίωξη τη μέγιστη δυνατή οικονομία καυσίμου, το βάρος των αυτοκινήτων πρέπει να μειωθεί. Το παραπάνω γεγονός σε συνδυασμό με αμαξώματα χαμηλής αντίστασης, έχει ως αποτέλεσμα τα αυτοκίνητα να είναι πιο ευαίσθητα στους πλευρικούς ανέμους.

Συνεπώς η ευαισθησία στους πλευρικούς ανέμους δεν πρέπει να παραβλεφθεί ακόμα και σήμερα για ουσ εξής δύο λόγους:

1. Η ανάγκη συνεχούς αντίδρασης από τον οδηγό σε πλευρικούς ανέμους μεταβαλλόμενης έντασης και διεύθυνσης είναι πολύ ενοχλητική για τον οδηγό, ο οποίος αναγκάζεται να στρίβει συνεχώς προκειμένου να διορθώσει την πορεία του.
2. Υπάρχει το ενδεχόμενο, βίαιες συνθήκες περιβάλλοντος να οδηγήσουν σε πλήρη απώλεια ελέγχου το οχήματος με άγνωστες συνέπειες.

Και οι δύο ανωτέρω καταστάσεις πρέπει να προλαμβάνονται από έναν κατάλληλο αεροδυναμικό σχεδιασμό. Ωστόσο, είναι εξίσου σημαντική η προστασία των οδηγών από μη αναμενόμενες ριπές πλευρικών ανέμων, στις οποίες ενδεχομένως κάποιοι να μην είναι ικανοί να αντιδράσουν τόσο γρήγορα. Η κατάλληλη σχεδίαση και αρχιτεκτονική των δρόμων μπορούν να περιορίσουν τα φαινόμενα αυτά.

Μία πρώτη επίγνωση στην αλληλεπίδραση εξωτερικής και εσωτερικής ροής μπορεί να αποκτηθεί με τη βοήθεια των αποτυπωμάτων καπνού όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Η ροή εντός του ψυγείου του αυτοκινήτου καθορίζεται

από τη ροή στο εμπρόσθιο τμήμα του αυτοκινήτου. Για να κάνουμε χρήση του φαινομένου προσβολής, το άνοιγμα της εισαγωγής του ψυγείου τοποθετείται σε περιοχές υψηλής στατικής πίεσης δηλαδή κοντά στο σημείο στασιμότητας του εμπρόσθιου τμήματος του αυτοκινήτου. Αφ' ετέρου, μία λύση για να συγκρατήσουμε την αντίσταση σε χαμηλά επίπεδα, είναι να κρατήσουμε το σημείο stagnation όσο χαμηλότερα γίνεται. Συνεπώς με την πάροδο του χρόνου, το άνοιγμα για τον αέρα του ψυγείου έχει μετακινηθεί προς τα κάτω, ακόμα πιο χαμηλά από τον προφυλακτήρα και κατ'επέκταση, το ρύγχος του αυτοκινήτου έχει μετατοπιστεί επίσης προς τα κάτω, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5. Συνεπώς οι ρευματικές γραμμές κάτω από τον προφυλακτήρα κινούνται προς τα πάνω και όχι παράλληλα προς το δημιουργηθέν πλέγμα. Αυτό πρέπει να ισχύει κατά το σχεδιασμό της εισαγωγής και των εσωτερικών οδηγών πτερυγίων. Προκειμένου να αποτραπεί η απώλεια της χαρακτηριστικής όψης του εκάστοτε αυτοκινήτου, οι εμπρόσθιες γρίλιες που άλλοτε ήταν τμήμα του σήματός του, πλέον χρησιμοποιούνται ως άνοιγμα του αέρα για το ψυγείο.

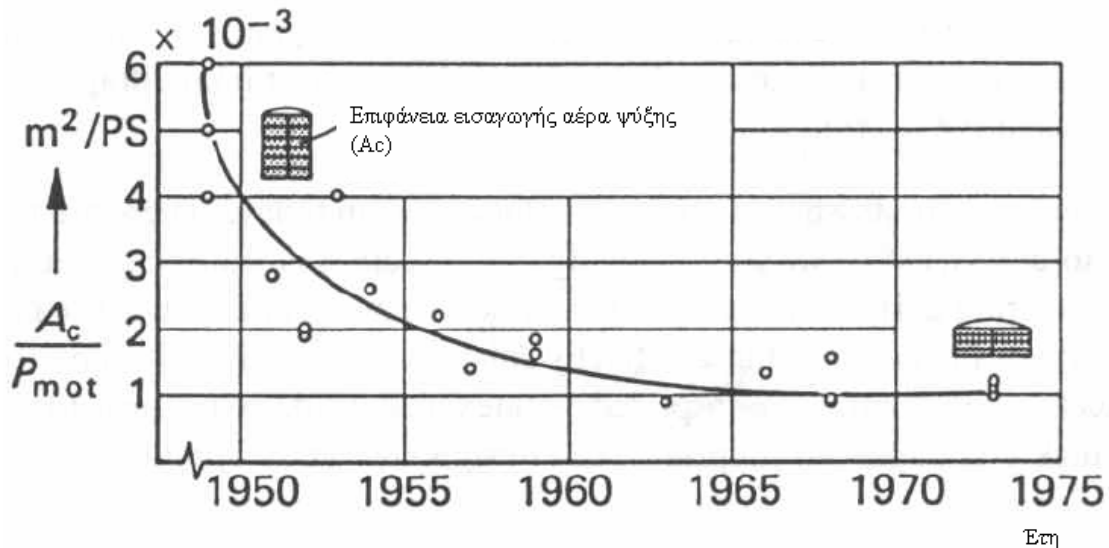
Η ροή ακινητοποιείται εν μέρει στο διάκενο που σχηματίζεται από το κάλυμμα της μηχανής και το παρμπρίζ. Η πίεση που αναπτύσσεται στο σημείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καθοδήγηση του αέρα διαμέσου του συστήματος εξαερισμού και θέρμανσης. Στα περισσότερα οχήματα, η υποδοχή του καθαρού αέρα είναι τοποθετημένη κοντά στο επίπεδο συμμετρίας, όπου η στατική πίεση είναι η υψηλότερη δυνατή (κατά την έλλειψη πλευρικών ανέμων). Ωστόσο στο σημείο αυτό, η πίεση εξαρτάται από την ταχύτητα οδήγησης με αποτέλεσμα η ροή καθαρού αέρα να αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυτή. Σε περίπτωση που οι υποδοχές καθαρού αέρα μετακινηθούν σε σημεία του αμαξώματος όπου η πίεση που επικρατεί είναι η ατμοσφαιρική, τότε η εξωτερική και η εσωτερική πίεση μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες μεταξύ τους, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι και τα σημεία εξαγωγής του αέρα θα βρίσκονται σε σημεία όπου επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση. Σαφώς αν ίσχυε κάτι

τέτοιο, οι ανεμιστήρες τροφοδοσίας του αέρα θα έπρεπε να είναι μεγαλύτεροι και να λειτουργούν ασταμάτητα.

Αυξημένη προσοχή δίδεται κατά τη μελέτη των εσωτερικών ροών τόσο της μηχανής όσο και του χώρου των επιβατών. Μέχρι πρόσφατα το ψυγείο ήταν τοποθετημένο ελεύθερα στο χώρο της μηχανής, αλλά τώρα αποτελεί τμήμα ενός προσεκτικά σχεδιασμένου αεραγωγού. Ορισμένες κατηγορίες αυτοκινήτων, όπως είναι τα αγωνιστικά και όχι μόνο, έχουν ξεχωριστούς αγωγούς για την ψύξη του νερού, την ψύξη του λιπαντικού ή και των φρένων, καθώς επίσης ξεχωριστούς αεραγωγούς για την τροφοδοσία της μηχανής.

Το σύστημα ψύξης της μηχανής έχει ως διεργασία να απομακρύνει τη ροή θερμότητας Q , η οποία για κινητήρες με αναφλεκτήρα είναι κατά προσέγγιση ίση με την ωφέλιμη ισχύ της μηχανής P . Δηλαδή:

$$Q \approx P$$



Σχήμα 1.5: Λόγος επιφάνειας εισαγωγής αέρα ψύξης προς τη μηχανική ισχύ συναρτήσει του χρόνου σε έτη.

Κατά την εξέλιξη του σχεδιασμού των οχημάτων, οι απαιτήσεις του συστήματος ψύξης αυξήθηκαν:

- Καθώς η ισχύς των μηχανών αυξάνεται, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα ψύξης.
- Ως αποτέλεσμα των απαιτήσεων του σχεδιασμού και της αεροδυναμικής, το ρύγχος των αυτοκινήτων μετατοπίστηκε προς τα κάτω με το πέρασμα του χρόνου. Για το λόγο αυτό, η διαθέσιμη επιφάνεια που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υποδοχή του αέρα μειώθηκε. Επιπλέον, η μέχρι πρότα μεγάλη συνεχής επιφάνεια εισαγωγής, διασπάστηκε σε περισσότερες υποπεριοχές.
- Λόγω του συμπαγούς σχεδιασμού, ο διαθέσιμος χώρος που προορίζεται για το ψυγείο και τους αεραγωγούς στην καμπίνα της μηχανής, έχει μειωθεί.
- Για λόγους ασφαλείας το αμάξωμα ενισχύθηκε στο μπροστινό άκρο με αποτέλεσμα η ροή του αέρα να παρακωλύεται από το μεγάλο προφυλακτήρα.

Ο αέρας ψύξης πρέπει να εισάγεται βίαια, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα του μπροστά από το ψυγείο (ταχύτητα επιφάνειας), να είναι όσο πιο ομοιόμορφη γίνεται, γεγονός που σημαίνει την άριστη αποδοτικότητα του ψυγείου. Επιπλέον, η αεροδυναμική αντίσταση του αυτοκινήτου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της απώλειας ορμής στον αεραγωγό ψύξης. Κάτω από ορισμένες συνθήκες οδήγησης, ο εισερχόμενος αέρας δεν επαρκεί για την ψύξη, και ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση ανεμιστήρα. Ψυγείο και ανεμιστήρας πρέπει να αποτελούν ένα καλό συνδυασμό έτσι ώστε να αποτελούν

ένα σύστημα οικονομικό τόσο από οικονομικής άποψης, όσο και από άποψης ισχύος.

Ο εισερχόμενος στην καμπίνα των επιβατών αέρας πρέπει να εκτελεί τρεις κατηγορίες διεργασιών:

1. Πρέπει να εξασφαλιστεί επαρκής εξαερισμός. Όλα τα ρυπαντικά στοιχεία υπό τη μορφή αερίων, ατμού και σκόνης πρέπει να αποβάλλονται από την καμπίνα. Ταυτοχρόνως, κάτι τέτοιο εξασφαλίζει τις ανάγκες για ανακύκλωση του οξυγόνου που καταναλώνεται από τους επιβάτες.
2. Πρέπει να παράγεται ένα άνετο θερμοκρασιακό επίπεδο το οποίο θα διασφαλίζεται για ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών συνθηκών.
3. Η εσωτερική ροή πρέπει να περνάει κατά μήκος των επιφανειών των παραθύρων προκειμένου να εξατμίζεται η υγρασία και να λιώνει ο πάγος, ο οποίος μπορεί να αναπτυχθεί και στις δύο πλευρές των παραθύρων.

Όσον αφορά τα δυναμικά χαρακτηριστικά και των δύο συστημάτων εσωτερικής ροής, και για τα δύο συστήματα υπάρχουν ορισμένες ειδικές απαιτήσεις. Παραδείγματος χάριν, το καλοριφέρ αναμένεται να παρέχει θερμότητα γρήγορα μετά την εκκίνηση της μηχανής. Ωστόσο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, η εσωτερική θερμοκρασία πρέπει να είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του οχήματος, την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής και την εξωτερική θερμοκρασία.

Τόσο η εξωτερική όσο και η εσωτερική ροή, πρέπει να παράγουν όσο το δυνατό λιγότερο θόρυβο. Συνεπώς τα ανοίγματα στο αμάξωμα μέσω των οποίων η εσωτερική ροή συνδέεται με την εξωτερική πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένα έτσι ώστε το νερό να μην μπορεί να μπει στο εσωτερικό του

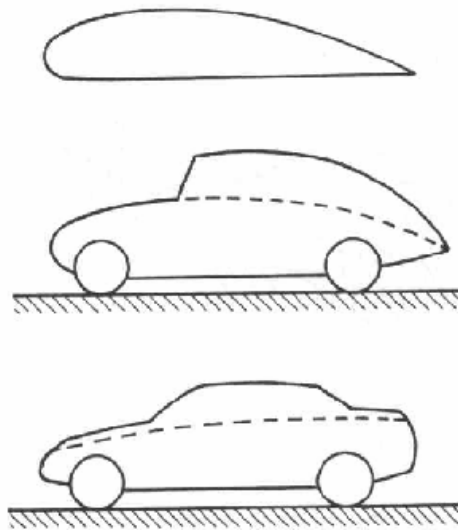
αυτοκινήτου έστω και κάτω από αντίξοες συνθήκες όπως θα ήταν σε μία τέτοια περίπτωση το πλύσιμο του αυτοκινήτου.

Οι ιδιαίτεροι στόχοι της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων επηρεάζονται από τον τύπο του οχήματος. Ωστόσο, ακόμα κι ένας δεδομένος στόχος όπως είναι η χαμηλή αντίσταση, μπορεί να έχει ένα ευρύ φάσμα λύσεων. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό ενός επιβατηγού οχήματος, ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η αντίσταση, ενώ για ένα μικρό λεωφορείο υψηλής ταχύτητας ο πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση της ευαισθησίας στους πλευρικούς ανέμους.

Στα αγωνιστικά οχήματα, στόχος είναι η αύξηση της ελκτικής δύναμης που ασκείται στα ελαστικά χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της αρνητικής άνωσης και κατάλληλα σχεδιασμένες γεωμετρίες. Πτέρυγες μπροστά και πίσω, μέθοδοι δανεισμένες από την αεροναυτική, έχουν γίνει τα βασικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων αυτοκινήτων αγώνων σε πολλές κατηγορίες.

1.2: Ιδιαιτερότητες της αεροδυναμικής

Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία πως η αεροδυναμική των χερσαίων οχημάτων έχει προέλθει από την αεροδυναμική των αεροπλάνων. Το σχήμα 1.7, αναπαριστά σχηματικά πως η ολική μορφή των αυτοκινήτων έχει εξελιχθεί βάσει του περιγράμματος ενός πτερυγίου. Η σπουδαιότητα της αεροδυναμικής βέβαια είναι πολύ διαφορετική ανάμεσα στα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα. Τα αεροπλάνα δεν μπορούν να υπάρχουν χωρίς αεροδυναμική. Τα αυτοκίνητα μπορούν. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν πολλοί παραλληλισμοί ανάμεσα στους δύο αυτούς επιστημονικούς κλάδους, καθώς οι βασικοί τους στόχοι σχετίζονται άμεσα.



Σχήμα 1.7: Η εξέλιξη της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων προέρχεται από την αεροναυτική, πλέον όμως είναι ανεξάρτητη.

Προκειμένου να επιτευχθούν τα καλύτερα χαρακτηριστικά οδήγησης ή πτήσης, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη χαμηλή αεροδυναμική αντίσταση. Με κατάλληλη εξισορρόπηση των δυνάμεων και των ροπών, στους δυο άξονες που είναι κάθετοι ως προς την εμπρόσθια κίνηση, αλλά και γύρω από αυτούς, επιτυγχάνεται πολύ καλή οδική και πτητική σταθερότητα. Επίσης η επακόλουθη διαδικασία των αεροδυναμικών δεδομένων στις εξισώσεις κίνησης έχει πολλές ομοιότητες και στις δύο περιπτώσεις.

Ωστόσο, τα πεδία ροής γύρω από ένα χερσαίο όχημα και ένα αεροπλάνο διαφέρουν σημαντικά όσον αφορά τις εξής τρεις θέσεις:

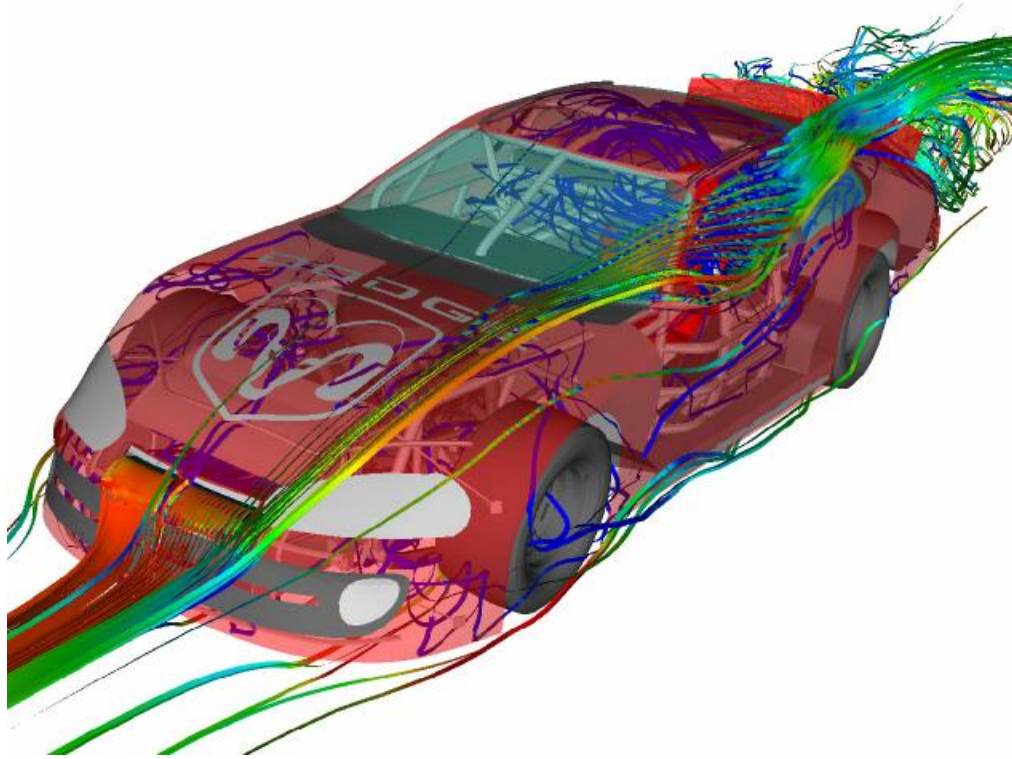
1. Στην ορολογία της ρευστομηχανικής, τα οχήματα χαρακτηρίζονται ως «απότομα» σώματα. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.8, τα πεδία ροής τους, χαρακτηρίζονται από αποκολλήσεις. Οπουδήποτε μία αντίστροφη μεταβολή πίεσης είναι πολύ απότομη, η ροή χωρίζεται από την περιμετρική της πορεία και ακολουθεί μία νέα δικιά της. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην απώλεια κινητικής ενέργειας λόγω τριβής στα

τοιχώματα. Πρέπει να διαχωρίσουμε δύο βασικούς τύπους αποκόλλησης της ροής, το **απόρρευμα** και **διαμήκειες δίνες**. Και οι δύο κατηγορίες αντιδρούν σθεναρά με το κύριο πεδίο της ροής στο οποίο η τριβή διαδραματίζει έναν ασήμαντο ρόλο. Ως εκ τούτου, για τα χερσαία οχήματα η επίδραση της τριβής δεν περιορίζεται απλά σε ένα λεπτό στρώμα ρευστού, το λεγόμενο οριακό στρώμα, αλλά είναι παρούσα σε ευρείες περιοχές του περιβάλλοντα χώρου. Αυτή είναι και η βασική διεργασία των αεροδυναμιστών των αυτοκινήτων, να παρεμποδίσουν αυτές τις αποκολλήσεις ή όπου αυτό δεν είναι εφικτό, να τις ελέγξουν ώστε να μην παρεμποδίζουν τη ροή. Με τον όρο «παρεμπόδιση» εδώ εννοούμε τη δημιουργία υπέρμετρης αντίστασης η οποία δημιουργεί ισχυρό θόρυβο ή επιτρέπει στο νερό να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του οχήματος. Αντίθετα το πεδίο ροής γύρω από ένα αεροσκάφος, χαρακτηρίζεται από ροή αέρα η οποία είναι προσκολλημένη πάνω σε μεγάλα τμήματα της επιφάνειάς του. Τα φτερά, το ουραίο τμήμα, η άτρακτος καθώς και τα κελύφη των κινητήρων είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να συγκρατούν τη ροή ήπια και προσκολλημένη επάνω τους. Η επίδραση του ιξώδους του αέρα περιορίζεται στο πολύ μικρών διαστάσεων οριακό στρώμα, το οποίο είναι παρακείμενο στις επιφάνειες, και στο επίσης περιορισμένο απόρρευμα στο πίσω μέρος του αεροσκάφους. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ανιξώδους εξωτερικής ροής και του οριακού στρώματος είναι αδύναμη, τουλάχιστον σε χαμηλές υποηχητικές ροές.

2. Με κριτήριο τη γεωμετρία τους, τα οχήματα διαφέρουν από τα αεροπλάνα στο ότι τα αμαξώματά τους δεν μπορούν να διαχωριστούν σε διακριτά ρευστοδυναμικά τμήματα τα οποία να είναι εύκολα ορατά. Έτσι στα αγωνιστικά οχήματα, ακόμα και στα επικαθήμενα φορτηγά όπου κάτι τέτοιο θα μπορούσε να είναι δυνατό, η ξεχωριστή κατεργασία των

τμημάτων τους δεν αποτελεί κατάλληλη λύση, λόγω των ισχυρών αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Αυτού του είδους η διαίρεση σε τμήματα χρησιμοποιείται στον αεροδυναμικό σχεδιασμό των αεροπλάνων. Αρχικά κάθε κομμάτι βελτιστοποιείται ξεχωριστά. Οι αλληλεπιδράσεις ερμηνεύονται σε κάποιο άλλο στάδιο της κατεργασίας. Ακόμα και κάποια από τα μεμονωμένα τμήματα όπως είναι το φτερό, μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε τμήματα. Στη συνέχεια οι επιδράσεις της ροής σε τρεις διαστάσεις διαχωρίζονται από αυτές της διδιάστατης ροής, κι έπειτα συγκεντρώνονται αθροιστικά. Μία τέτοια βήμα προς βήμα διαδικασία δεν μπορεί να ακολουθηθεί για την ανάπτυξη του σχήματος ενός αυτοκινήτου. Το σχήμα πρέπει να μελετάται σαν ένα ενιαίο.

3. Τα αυτοκίνητα λειτουργούν σε ένα πολύ μικρό σχετικό διάκενο εδάφους. Με τον όρο σχετικό εννοούμε την απόσταση από το έδαφος, ως προς μία κύρια διάσταση του οχήματος. Θα μπορούσε να είναι το μήκος του. Η αντίδρασή του με το οδόστρωμα είναι τόσο ισχυρή που δε θα μπορούσε να θεωρηθεί αμελητέα κάτω από καμία περίπτωση.



Σχήμα 1.8: Αναπαράσταση της ροής γύρω από το αμάξωμα αγωνιστικού οχήματος

Το εφαρμόσιμο του να διαιρεθεί ένα αεροπλάνο στα μικρά επιμέρους τμήματά του, έχει απλουστεύσει την θεωρητική προσέγγιση της αεροδυναμικής του, και αυτό ισχύει από την πρώτη πτήση που πραγματοποιήθηκε. Αντίθετα, η αεροδυναμική των οχημάτων κυριαρχείται από εμπειριαρχία, που ουσιαστικά είναι η διαδικασία βελτιστοποίησης της μορφής (Shape optimization). Παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει για χρήση αριθμητικών κωδικών, αυτού του είδους η μορφοποίηση πρέπει να πραγματοποιηθεί σχεδόν αποκλειστικά βασισμένη σε πειραματικές διαδικασίες. Σήμερα, μόνο εξειδικευμένα προβλήματα μπορούν να λυθούν με αριθμητικές μεθόδους, όπως για παράδειγμα ο προσδιορισμός των δυνάμεων και των ροπών που αναπτύσσονται στα τμήματα της επιφάνειας όπου η ροή παραμένει προσκολλημένη σε αυτά, και σε συστήματα εσωτερικής ροής (όπως η ροή κάτω από το κάλυμμα της μηχανής και εντός του χώρου των επιβατών).

Η βελτιστοποίηση της μορφής πραγματοποιείται σε αεροσήραγγες. Το μέσο μέγεθος των περισσότερων κατηγοριών οχημάτων, επιτρέπει μετρήσεις σε μοντέλα πλήρους κλίμακας ή και σε έτοιμα οχήματα. Καθώς οι σχεδιαστές προτιμούν να εργάζονται σε πλήρη κλίμακα, υπάρχουν ρεαλιστικά μοντέλα που είναι διαθέσιμα για πειράματα σε αεροσήραγγες. Για τα μεγάλα φορτηγά και τα λεωφορεία, οι μελέτες γίνονται με χρήση μοντέλων μικρότερης κλίμακας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ.

2.1: Φαινόμενα ροής σχετικά με την κίνηση των οχημάτων.

Τα ποικίλα φαινόμενα ροής που παρουσιάζονται κατά την κίνηση ενός οχήματος, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Φαινόμενα **εξωτερικής** ροής και **εσωτερικής** ροής. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ροής φαινόμενα που αναπτύσσονται γύρω από το όχημα, και στη δεύτερη κατηγορία φαινόμενα που αναπτύσσονται στους αεραγωγούς του.

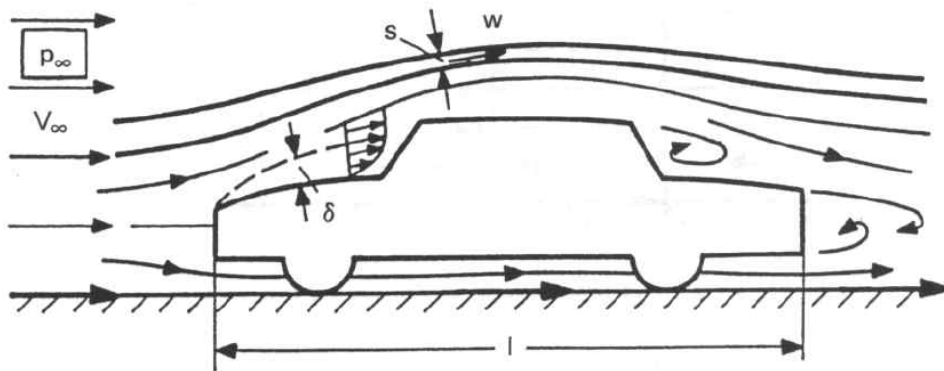
2.1.1: Φαινόμενα εξωτερικής ροής.

Η εξωτερική ροή γύρω από ένα όχημα αναπαρίσταται στην εικόνα 2.2. Στον ακίνητο αέρα, η ταχύτητα V_{∞} , αντιστοιχεί στην ταχύτητα του αυτοκινήτου. Υπό τον όρο ότι δεν υφίσταται αποκόλληση της ροής, η επίδραση του ιξώδους στη ροή του αέρα περιορίζεται σε ένα μικρό στρώμα πάχους ορισμένων χιλιοστών του μέτρου, το οποίο λέγεται οριακό στρώμα. Ανωτέρω του οριακού στρώματος, η ροή μπορεί να θεωρηθεί ως ανιξώδης. Εντός του οριακού στρώματος, η ταχύτητα μειώνεται από τη μέγιστη τιμή της στο εξωτερικό τμήμα του οριακού στρώματος σε μηδενική επί του τοιχώματος, όπου το ρευστό βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας. Τη στιγμή που η ροή αποκολλάται, το οριακό στρώμα διασκορπίζεται και η ροή του αέρα εξαρτάται αποκλειστικά από την επίδραση του ιξώδους.

Η έννοια του οριακού στρώματος ισχύει μόνο για μεγάλες τιμές του αριθμού Reynolds, μία αδιάστατη παράμετρος η οποία ισούται με:

$$Re_l = \frac{V_{\infty} l}{\nu} > 10^4 \quad (1)$$

Η παράμετρος αυτή αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας του οχήματος V_∞ , του κινηματικού ιξώδους ν , και του χαρακτηριστικού του μήκους, όπως αυτό ορίζεται στην σχήμα 2.1. Ο χαρακτήρας της ιξώδους ροής γύρω από ένα αμάξωμα εξαρτάται μόνο από το σχήμα του αμαξώματος και από τον αριθμό Reynolds. Για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, μπορεί να αναπτύσσονται πολύ διαφορετικές ροές γύρω από αμάξωμα ίδιας γεωμετρίας. Συνεπώς η τιμή του αριθμού Reynolds είναι εκείνη η αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει την ιξώδη ροή.



Σχήμα 2.1: Ροή του αέρα γύρω από το όχημα.

Οι ροές γύρω από γεωμετρικώς παρόμοια οχήματα, χαρακτηρίζονται ως **μηχανικώς παρόμοιες** στην περίπτωση που ο αριθμός Reynolds λαμβάνει την ίδια τιμή για διαφορετικά μήκη l , ταχύτητες ροής V_∞ , και ιδιότητες αέρα ν . Η μηχανική ομοιότητα αποτελεί τη βάση για τις δοκιμές πάνω σε μοντέλα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών πάνω στα μοντέλα κλίμακας σε όρους αδιάστατων αεροδυναμικών συντελεστών, είναι ίδια με αυτά που αναφέρονται στο πραγματικό όχημα αν και ο αριθμός Reynolds έχει την ίδια τιμή. Για μοντέλα μικρότερα από το πραγματικό όχημα, είναι ανάγκη να αυξήσουμε την ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος V_∞ , χωρίς όμως η τιμή της να ξεπεράσει την περιοχή χαμηλών υποηχητικών ταχυτήτων. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε

να πραγματοποιήσουμε δοκιμές σε πολύ μικρά μοντέλα με υπερηχητικές ταχύτητες, εφόσον ο νόμος της ομοιότητας της συμπιεστής ροής που απαιτεί ίσες τιμές αριθμού Mach και για τις δύο περιπτώσεις, παραβιάζεται.

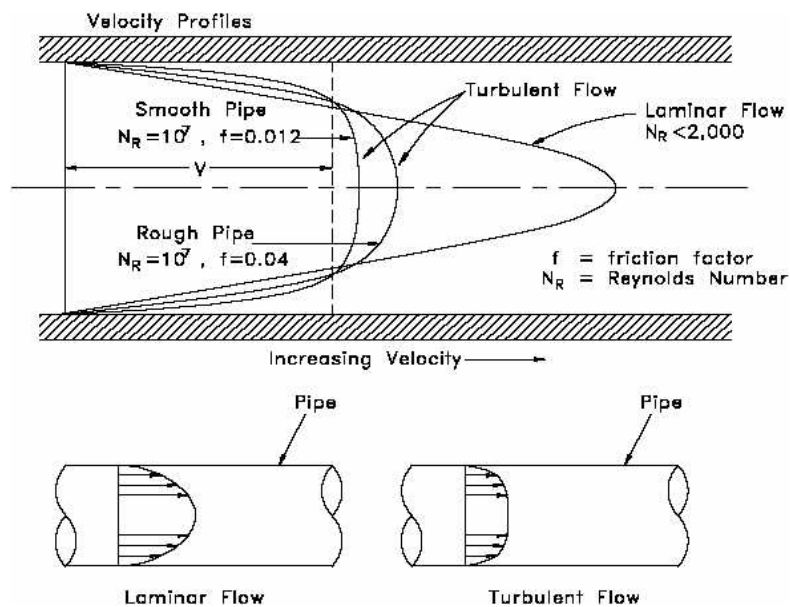
Ορισμένες φορές, αναγκαζόμαστε να διερευνήσουμε τη ροή γύρω από λεπτομέρειες της γεωμετρίας όπως στους καθρέπτες, ξεχωριστά από το υπόλοιπο όχημα. Σε τέτοιες περιπτώσεις για να εξάγουμε σωστά αποτελέσματα πρέπει ο αριθμός Reynolds να βασιστεί στη χαρακτηριστική διάσταση του συγκεκριμένου τμήματος, όπως είναι η διάμετρος στη προκειμένη περίπτωση, και στην τοπική ταχύτητα κοντά σε αυτό, η οποία διαφέρει σε σχέση με την ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος.

2.1.2: Φαινόμενα εσωτερικής ροής.

Εσωτερική λέμε τη ροή η οποία περιβάλλεται από τοιχώματα. Στην πιο απλή περίπτωση που αναπαρίσταται στην εικόνα 2.2, όλες οι ρευματικές γραμμές είναι παράλληλες με τον διαμήκη άξονα του αγωγού. Σε γενικές γραμμές, οι εσωτερικές ροές δεν μπορούν να χωριστούν σε ανιζώδη ροή μακριά από τα τοιχώματα και σε ιζώδες οριακό στρώμα κοντά σε αυτά. Η επίδραση του ιζώδους παρατηρείται σε ολόκληρο το πεδίο ροής. Και αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Reynolds.

$$\text{Re}_d = \frac{V_m d}{\nu} \quad (2)$$

Στην περίπτωση αυτή, η τιμή του εξαρτάται από την ταχύτητα στο μέσον του αγωγού καθώς επίσης και από τη διάμετρό του. Για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds ενδέχεται να αναπτύσσονται διαφορετικοί τύποι ροών.



Σχήμα 2.2: Κατανομές ταχύτητας κατά τη ροή εντός αγωγού, για διάφορα είδη επιφάνειας των τοιχωμάτων.

2.2: Προβλήματα της εξωτερικής ροής.

2.2.1: Βασικές εξισώσεις της ανιζώδους εξωτερικής ροής.

Η ανάπτυξη της ανιζώδους ροής στο εξωτερικό τμήμα του οριακού στρώματος, καθορίζει την κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια του αμαξώματος. Για το λόγο αυτό, πρώτα θα ασχοληθούμε με τις βασικές αρχές μίας τέτοιας ροής.

Αρχικά αναφερόμαστε στην αρχή διατήρησης της μάζας. Η πιο απλή μορφή αυτής της αρχής έχει ως εξής:

$$Q = \rho \int v \, dA \Rightarrow \rho A U = \rho \int v \, dA \quad (3)$$

Όπου:

A = η διατομή ενός αγωγού

U = η ταχύτητα ροής στη διατομή A .

Η παραπάνω σχέση σημαίνει ουσιαστικά ότι η απόσταση μεταξύ των ρευματικών γραμμών σε περιοχές όπου η ροή αναπτύσσει υψηλή ταχύτητα είναι μικρή και το αντίστροφο.

Επίσης, η ροή ακολουθεί το νόμο του Νεύτωνα περί διατήρησης της ορμής. Η μάζα πολλαπλασιασμένη με την επιτάχυνση ισούται με το σύνολο των δυνάμεων. Αν η αρχή αυτή εφαρμοστεί σε ανιζώδη ροή, θα προκύψει ότι οι δυνάμεις αδράνειας και πίεσης είναι ίσες. Η ολοκλήρωση της εξίσωσης της ορμής γύρω κατά μήκος ρευματικής γραμμής για ανιζώδη ροή, οδηγεί στη σχέση:

$$p_t = p + \frac{\rho}{2} U^2 = \text{σταθ} \quad (4)$$

Όπου:

p = η στατική πίεση

ρ = η πυκνότητα του ρευστού

U = η ταχύτητα ροής

$\frac{\rho}{2} U^2$ = η δυναμική πίεση

Η παραπάνω σχέση είναι η εξίσωση του Bernoulli, η οποία συσχετίζει την πίεση p και την ταχύτητα U κατά μήκος μίας ρευματικής γραμμής.

Σε ανιζώδη ροή, το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής πίεσης είναι σταθερό κατά μήκος μίας ρευματικής γραμμής. Η εξίσωση του Bernoulli μας λέει ότι σε περιοχές χαμηλών ταχυτήτων ροής επικρατεί υψηλή στατική πίεση και αντίστροφα. Όταν η ροή εισέρχεται σε κατάσταση ηρεμίας, $U = 0$,

σχηματίζεται «stagnation point», στο ρύγχος του οχήματος. Η στατική πίεση είναι ίση με την ολική πίεση, και στο σημείο αυτό έχουμε την υψηλότερη δυνατή πίεση στο πεδίο ροής. Για την εξωτερική ροή γύρω από ένα όχημα, όλες οι ρευματικές γραμμές ξεκινούν από το ίδιο ελεύθερο ρεύμα όπου η στατική πίεση ισούται με p_∞ και η ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος με U_∞ . Για το λόγο αυτό, η ολική πίεση p_t , είναι σταθερή για όλες τις ρευματικές γραμμές.

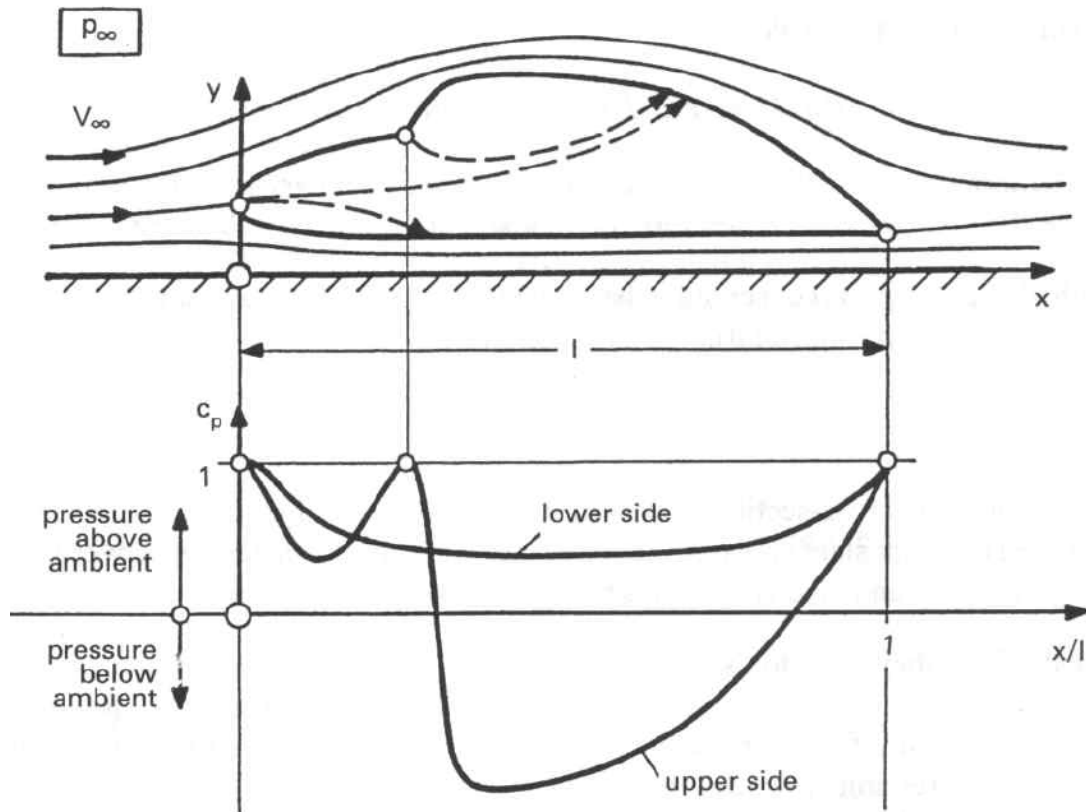
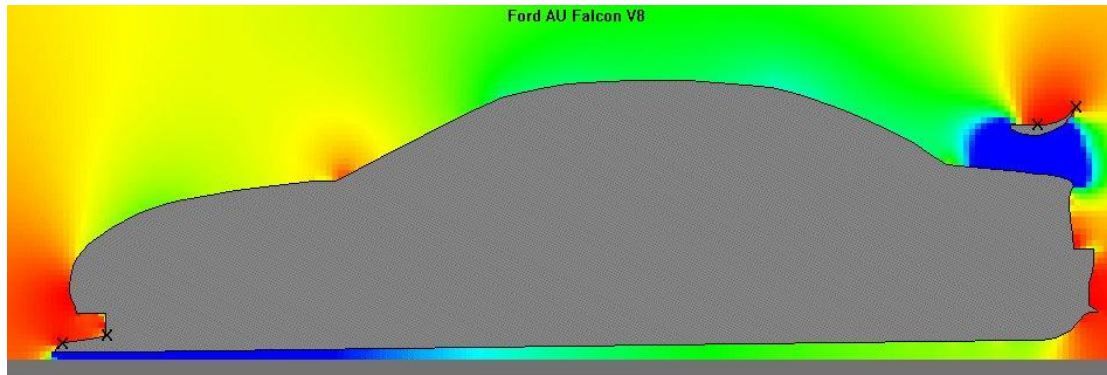
$$p_t = p_\infty + \frac{\rho}{2} U_\infty^2 = \text{σταθ} \quad (5)$$

Ένα τέτοιο πεδίο ροής λέγεται ίσο – ενεργητικό, και η p_t αντιστοιχεί στη σταθερά του Bernoulli.

2.2.2: Εφαρμογές

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις της ανιζώδους ροής μπορούν να εφαρμοστούν σε απλές περιπτώσεις εφαρμογών που σχετίζονται με την αεροδυναμική του οχήματος.

Η δύο διαστάσεων ροή γύρω από ένα αντικείμενο που έχει τη μορφή αυτοκινήτου, αναπαρίσταται παρακάτω, στο σχήμα 2.3 (α, β).



Σχήμα 2.3 : α) Αναπαράσταση της κατανομής της πίεσης όπως αυτή προκύπτει ύστερα από εξομοίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς, β) τυπικό διάγραμμα του πεδίου ροής και της κατανομής της πίεσης.

Μία τέτοια ροή, αποτελεί σημαντική απλούστευση της πραγματικής τρισδιάστατης ροής γύρω από το όχημα αυτό. Επίσης, το δεύτερο τμήμα της εικόνας, αποτελεί ποιοτικό διάγραμμα της ροής γύρω από το αμάξωμα κατά το διαμήκη άξονά του. Το πρώτο τμήμα της εικόνας, μας δείχνει καθαρά την τροχιά των ρευματικών γραμμών. Όπως φαίνεται, έχουμε τη δημιουργία τριών

σημείων στασιμότητας: Στο ρύγχος, στην περιοχή που τέμνονται το κάλυμμα της μηχανής και το μπροστινό τζάμι, και στην άκρη του ουραίου τμήματος. Η κατανομή της πίεσης στο περίγραμμα του αμαξώματος αναπαρίσταται στο δεύτερο τμήμα της εικόνας ως C_p , όπου:

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

Είναι ο αδιάστατος συντελεστής πίεσης. Η εξίσωση των σχέσεων (3) και (4), οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} * U_\infty^2} = 1 - \left(\frac{U}{U_\infty} \right)^2 \quad (7)$$

Στα σημεία στασιμότητας της ροής, όπου η τοπική ταχύτητα ισούται με μηδέν, προκύπτει από την παραπάνω σχέση ότι ο συντελεστής πίεσης ισούται με τη μονάδα ($C_p = 1$). Στην επιφάνεια του πατώματος του οχήματος, η πίεση είναι υψηλότερη από την πίεση της ελεύθερης ροής (πάνω από το αμάξωμα), $C_p > 0$, αλλά όταν το διάκενο ανάμεσα στο πάτωμα και την επιφάνεια του εδάφους είναι πολύ μικρό, δημιουργείται το φαινόμενο αναρρόφησης όπου η πίεση είναι μικρότερη του μηδενός, $C_p < 0$. Στην άνω επιφάνεια του οχήματος παρατηρούνται υψηλές πιέσεις, $C_p > 0$ και συγκεκριμένα, στην περιοχή τομής του καλύμματος της μηχανής και του μπροστινού τζαμιού, ενώ στην οροφή της καμπίνας αναπτύσσονται δυνάμεις αναρρόφησης, γεγονός που σημαίνει πως ο συντελεστής πίεσης είναι μικρότερος του μηδέν. Στο πίσω τμήμα της άνω επιφάνειας του οχήματος παρουσιάζεται ραγδαία αύξηση της πίεσης, και αυτό είναι το σημείο όπου έχουμε τις μεγαλύτερες και σημαντικότερες διαφορές

μεταξύ της πραγματικής ροής ιξώδους ρευστού και της ανιξώδους ροής που αναπαρίσταται εδώ.

Η κατανομή της πίεσης που περιγράφεται από το σχήμα 2.2, μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως το επίπεδο της πίεσης στην ανώτερη επιφάνεια του οχήματος, είναι πολύ χαμηλότερο από το αντίστοιχο της κατώτερης επιφανείας, γεγονός που σημαίνει ότι επί του οχήματος δρα μία καθαρή δύναμη άνωσης. Αν ολοκληρώσουμε όλες τις συνιστώσες ως προς τον άξονα X του πεδίου κατανομής πίεσης που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του αμαξώματος, σε μία ανιξώδη ροή το αποτέλεσμα θα είναι η ανάπτυξη μηδενικής αντίστασης, δηλαδή $D = 0$. Το φαινόμενο αυτό σημαίνει πρακτικά ότι σε ασυμπίεστη, ανιξώδη, δύο διαστάσεων ροή, δεν αναπτύσσονται δυνάμεις αντίστασης. Σε πραγματική, ιξώδη ροή, αναπτύσσονται δυνάμεις αντίστασης, χωρίς όμως να μπορούμε να τις αναλύσουμε αν θεωρήσουμε ροή ιδανικού ρευστού.

Από την κατανομή της πίεσης που αναπαρίσταται στο σχήμα 2.3, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ιδανικότερες θέσεις για την τοποθέτηση εισόδων και εξόδων, οι οποίες προορίζονται για τον αέρα ψύξης και εξαερισμού. Οι εισαγωγές, σε γενικές γραμμές, πρέπει να τοποθετούνται σε περιοχές υψηλής πίεσης, όπως είναι το ρύγχος, ενώ αντίθετα οι εξαγωγές σε περιοχές όπου αναπτύσσονται δυνάμεις αναρρόφησης. Σε μία τέτοια περίπτωση, η διαφορά πίεσης μπορεί να συμβάλει στην ενίσχυση του συστήματος ψύξης και εξαερισμού.

2.2.3: Επίδραση του ιξώδους.

Παρά το γεγονός ότι το οριακό στρώμα στην επιφάνεια του αμαξώματος είναι πολύ λεπτό, η ιξώδης ροή που αναπτύσσεται εντός αυτού, επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη ολόκληρου του πεδίου ροής. Η ύπαρξη δυνάμεων αντίστασης σε δύο διαστάσεων ασυμπίεστη ροή μπορεί να αιτιολογηθεί μόνο από την επίδραση του ιξώδους.

2.2.3.1: Ανάπτυξη γραμμικού & τυρβώδους οριακού στρώματος.

Η ροή εντός οριακού στρώματος, κατά μήκος λεπτής επίπεδης πλάκας, αναπαρίσταται στην εικόνα 2.6: Η ανάλογη εξωτερική ροή έχει παράλληλες ρευματικές γραμμές και τόσο η πίεση p_{∞} όσο και η ταχύτητα U_{∞} , είναι σταθερές. Η ιξώδης ροή εντός του οριακού στρώματος ικανοποιεί την κατάσταση μη ολίσθησης κατά μήκος της επιφάνειας της πλάκας. Στο εμπρόσθιο τμήμα, η ροή του οριακού στρώματος είναι σταθερή και σχεδόν παράλληλη προς την επιφάνεια. Σε μία τέτοια κατάσταση το οριακό στρώμα χαρακτηρίζεται ως γραμμικό.

Το πάχος του οριακού στρώματος αναπτύσσεται κατά μήκος της ροής σύμφωνα με τη σχέση:

$$d \sim \sqrt{\frac{\nu * c}{U_{\infty}}} \quad (8)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται ανάλογα με την απόσταση στον άξονα X , το κινηματικό ιξώδες ν και αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος U_{∞} .

Η γραμμική κατάσταση της ροής εντός του οριακού στρώματος παραμένει σταθερή έναντι των διαταράξεων της ροής για ορισμένες συνθήκες μόνο. Σε απόσταση $X = X_{tr}$, από την άκρη της πλάκας, παρουσιάζεται μετάβαση του γραμμικού οριακού στρώματος σε μία άλλη κατάσταση όπου πλέον χαρακτηρίζεται ως τυρβώδες. Η μετάβαση του οριακού στρώματος από τη μία κατάσταση στην άλλη, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του αριθμού Reynolds. Για επίπεδη πλάκα, η μετάβαση πραγματοποιείται για τιμές του αριθμού Reynolds:

$$\text{Re}_{x_{TR}} = \frac{U_{\infty} X_{TR}}{\nu} = 5 * 10^5 \quad (9)$$

Η παραπάνω τιμή ισχύει μόνο για αμελητέα μεταβολή της πίεσης στην εξωτερική ροή. Στην περίπτωση όπου έχουμε μεταβολές στην πίεση, η μείωση (της πίεσης) προς τη διεύθυνση της ροής, οδηγεί στη σταθεροποίηση του γραμμικού οριακού στρώματος, τη στιγμή που μία αντίστροφη μεταβολή (αύξηση πίεσης) συνεπάγεται ταχύτερη μετάβαση του οριακού στρώματος από γραμμικό σε τυρβώδες. Εν γένει, για μεσαίες τιμές του αριθμού Reynolds, η μετάβαση του οριακού στρώματος από γραμμικό σε τυρβώδες υφίσταται στην περιοχή όπου έχουμε τις ελάχιστες πιέσεις, και όσο οι τιμές του αυξάνονται, η μετατόπιση μεταφέρεται στον άξονα X.

Στην περιοχή του τυρβώδους οριακού στρώματος, η ροή είναι ασταθής. Η μέση τιμή της ροής ως προς το χρόνο κινείται πλέον σχεδόν παράλληλα ως προς την επιφάνεια, ενώ παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις της ταχύτητας στις τρεις συνιστώσες της, u' , v' και w' . Η συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλης ως προς την επιφάνεια της πλάκας, δίνεται από τη σχέση:

$$u(y, t) = \bar{u}(y) + u'(y, t) \quad (10)$$

Όπου $\bar{u}(y)$ ισούται με:

$$\bar{u}(y) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u(y, t) dt \quad (11)$$

Όπου η μεταβολή Δt έχει επιλεγεί τόσο μεγάλη, ώστε να μην επηρεάζεται από αυτή η $\bar{u}(y)$. Λόγω των μεταβολών των συνιστωσών της ταχύτητας, έχουμε την ανάπτυξη ανάμιξης της ροής. Συνεπώς, επιπρόσθετα με τη διατμητική τάση

λόγω μοριακής τριβής, έχουμε την ανάπτυξη μίας άλλης τάσης λόγω της τύρβης.

$$t_{turb} = -r\overline{u'n'} \quad (12)$$

Στη σχέση αυτή, οι συνιστώσες u' και v' , αντιστοιχούν στις μεταβολές της ταχύτητας στη διεύθυνση X και Y αντίστοιχα. Δεδομένου ότι οι συνιστώσες αυτές έχουν αντίθετο πρόσημο, η σχέση της τάσης λόγω τύρβης θα είναι πάντοτε θετική. Οι μεταβολές της τυρβώδους ταχύτητας εκδηλώνουν την παρουσία τους με μία εμφανή αύξηση του ιξώδους του ρευστού. Για το λόγο αυτό, το πάχος του οριακού στρώματος κατά μήκος της επίπεδης πλάκας αυξάνεται πολύ πιο απότομα από το σημείο της μετάβασης κι έπειτα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$d \sim \sqrt[5]{\frac{n}{U_\infty}} X^{4/5} \quad (13)$$

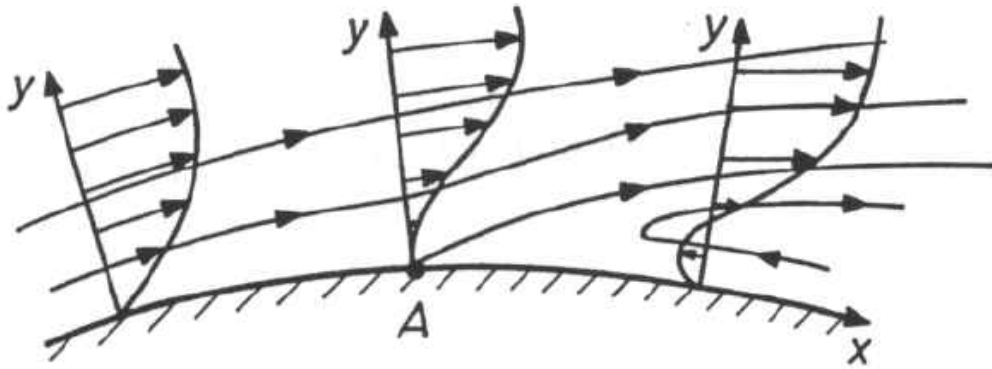
Λόγω των διαδικασιών μίξης στο τυρβώδες οριακό στρώμα, η κατανομή της ταχύτητας μας δείχνει υψηλότερες ταχύτητες κοντά στην επιφάνεια της επίπεδης πλάκας σε σχέση με αυτές του γραμμικού οριακού στρώματος.

2.2.3.2: Αποκόλληση της ροής.

Η ροή τόσο του γραμμικού όσο και του τυρβώδους οριακού στρώματος εξαρτάται από την κατανομή της πίεσης, η οποία εφαρμόζεται από την εξωτερική ροή. Όταν η πίεση αυξάνεται προς τη διεύθυνση της ροής, η ροή εντός του οριακού στρώματος επιβραδύνεται, κυρίως κοντά στην επιφάνεια του τοιχώματος, ενώ υπάρχει το ενδεχόμενο να εμφανιστεί το φαινόμενο αναστροφής της ροής. Αυτή η συμπεριφορά του οριακού στρώματος αναπαρίσταται στο σχήμα 2.4. Είναι εμφανές πως ανάμεσα στην κανονική και την ανάστροφη ροή, υπάρχει μία διαχωριστική ρευματική γραμμή η οποία απομακρύνεται από την επιφάνεια του τοιχώματος. Το φαινόμενο αυτό λέγεται αποκόλληση της ροής. Για το σημείο αποκόλλησης A, ισχύει η εξής σχέση:

$$\left(\frac{du}{dy} \right)_w = 0 \quad (14)$$

Τα τυρβώδη οριακά στρώματα, σε σύγκριση με τα γραμμικά, μπορούν και ανθίστανται σε πιο απότομες μεταβολές της πίεσης χωρίς να εμφανίσουν αποκόλληση της ροής. Αυτό ισχύει καθώς οι τυρβώδεις διαδικασίες μίξης συνεπάγονται ταυτόχρονα μία έντονη μεταφορά ορμής από το εξωτερικό τμήμα του στρώματος προς την επιφάνεια του εφαπτόμενου τοίχου. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί μείωση της πίεσης προς τη διεύθυνση της ροής, δεν υπάρχουν τάσεις για αποκόλληση της ροής.



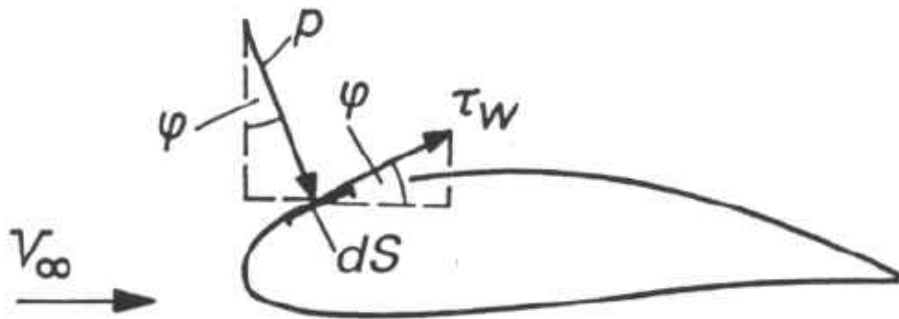
Σχήμα 2.4: Αποκόλληση του οριακού στρώματος κατά τη ροή ρευστού σε τοίχωμα

2.2.3.3: Αντίσταση λόγω τριβής.

Σε ροή ρευστού με εσωτερική τριβή (ιξώδες), παρατηρείται μεταβολή της ταχύτητας (du/dy) κοντά στην επιφάνεια του τοιχώματος ως προς τον κατακόρυφο άξονα Y . Λόγω της μοριακής τριβής αναπτύσσεται διατμητική τάση η οποία δρα παντού, δηλαδή σε όλη την επιφάνεια του σώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Η ολοκλήρωση των ανάλογων συνιστωσών των δυνάμεων στη ροή του ελεύθερου ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση

$$D_F = \oint t_w \cos f^* dS \quad (15)$$

Μας δίνει τη λεγόμενη αντίσταση λόγω τριβής. Όταν δεν υπάρχει αποκόλληση της ροής, η αντίσταση λόγω τριβής αποτελεί το σημαντικότερο ποσοστό της συνολικής αντίστασης κατά την κίνηση ενός σώματος σε δύο διαστάσεων ιξώδη ροή.



Σχήμα 2.5: Προσδιορισμός της αντίστασης αντικειμένου σε ροή δύο διαστάσεων.

Το σχήμα 2.6, αναπαριστά τα αποτελέσματα από τη μελέτη της ροής κατά μήκος λεπτής επίπεδης πλάκας. Προκειμένου να εξάγουμε αποτελέσματα τα οποία δεν θα εξαρτώνται από τις ακριβείς διαστάσεις μήκους και πλάτους της πλάκας και από τις συνθήκες στο στρώμα ελεύθερου ρεύματος όπως είναι η δυναμική πίεση $\frac{\rho}{2}U^2$, ορίζουμε έναν αδιάστατο συντελεστή αντίστασης ο οποίος περιγράφεται από τη σχέση:

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2}U_\infty^2 A} \quad (16)$$

Όπου:

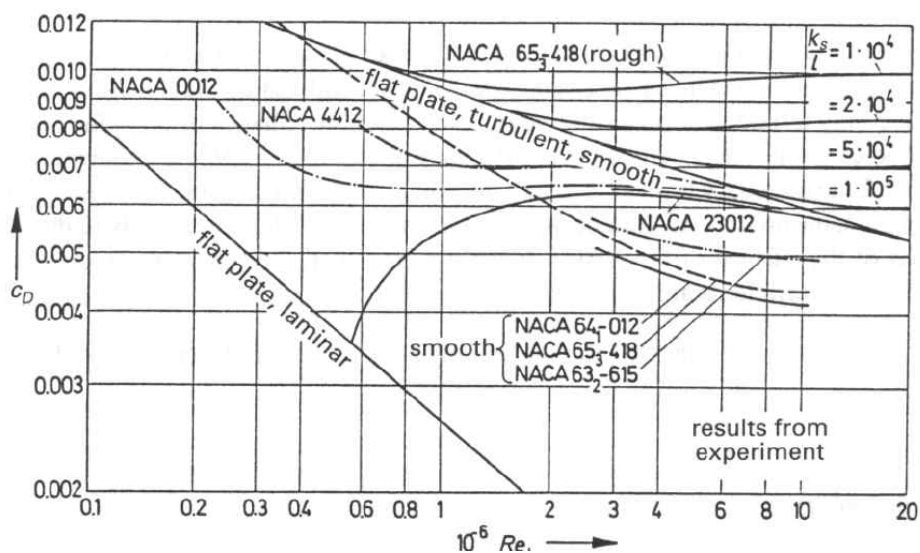
D = η αντίσταση

ρ = η πυκνότητα του ρευστού

U_∞ = η ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος

A = η επιφάνεια αναφοράς

Στην περίπτωση της επίπεδης πλάκας, η μόνη αντίσταση που αναπτύσσεται είναι λόγω τριβής και δρα και στις δύο πλευρές της επίπεδης πλάκας, $D = D_F$. Η επιφάνεια A , χρησιμοποιείται ως επιφάνεια αναφοράς. Στο σχήμα 2.6, αναπαρίσταται γραφικά η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης, ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds, για τον οποίο ως διάσταση αναφοράς λαμβάνεται το μήκος της επίπεδης πλάκας ή στην περίπτωση που αναλύουμε τη διατομή πτέρυγας, διάσταση αναφοράς λαμβάνεται το μήκος της χορδής.



Σχήμα 2.6: Συντελεστές αντίστασης για επίπεδες πλάκες συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Όσον αφορά την επίπεδη πλάκα, και για γραμμικό οριακό στρώμα, η αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$C_D = \frac{2.656}{\sqrt{Re_l}}, \quad \text{για } Re_l > 5 \cdot 10^5 \quad (17)$$

Και για τυρβώδες οριακό στρώμα κατά μήκος ολόκληρης της πλάκας και για μεσαίες τιμές του αριθμού Reynolds, η ανάλογη σχέση είναι η εξής:

$$C_D = \frac{0,148}{\sqrt[5]{Re_l}} \quad , \quad \text{για } 5 \cdot 10^5 < Re_l < 10^7 \quad (18)$$

Αν δεχτούμε ότι στο εμπρόσθιο τμήμα της επίπεδης πλάκας αναπτύσσεται γραμμικό οριακό στρώμα και στο πίσω τμήμα τυρβώδες, βλέπουμε πως μία ανάλογη καμπύλη που αντιστοιχεί στη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη εμφανίζεται στο γράφημα του σχήματος 2.6. Για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, η καμπύλη αυτή καταλήγει στην ευθεία της πλήρους γραμμικής ροής, γεγονός που σημαίνει ότι για τις τιμές αυτές δεν έχουμε ανάπτυξη τυρβώδους οριακού στρώματος. Αντίθετα, για υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds, η καμπύλη μετάβασης προσεγγίζει ασυμπτωτικά την ευθεία της πλήρους τυρβώδους ροής, δεδομένου ότι το μήκος του γραμμικού οριακού στρώματος μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού Reynolds. Στο τυρβώδες οριακό στρώμα, οι δυνάμεις τριβής είναι πολύ ισχυρότερες από τις αντίστοιχες στο γραμμικό. Επίσης, από την παραπάνω εικόνα συμπεραίνουμε πως εντός του γραμμικού οριακού στρώματος, η αντίσταση τριβής εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας. Καθώς η σχετική τραχύτητα K_s/l της επιφάνειας αυξάνεται, αυξάνεται και ο συντελεστής αντίστασης, η εξάρτηση του οποίου από τον αριθμό Reynolds μειώνεται.

Η αντίσταση των σωμάτων με περιορισμένο πάχος, συνιστά μία αντίσταση λόγω τριβής η οποία θα είναι σε κάθε περίπτωση μικρή, εφόσον όμως δεν έχουμε τη δημιουργία του φαινομένου αποκόλλησης της ροής. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη διαμόρφωση (προοδευτική λέπτυνση) του ουραίου τμήματος του σώματος, προκειμένου να αποτρέψουμε την απότομη αύξηση της πίεσης κατά τη διεύθυνση της ροής και κατ' επέκταση να αποφύγουμε την αποκόλλησή της. Αυτή τη μορφή έχουν οι πτέρυγες και οι αεροτομές των οχημάτων. Στο σχήμα 2.6, αναγράφονται οι συντελεστές αντίστασης για ορισμένες αεροτομές. Στις αεροτομές NACA 0012, 4412 και 23012, τα οριακά τους στρώματα είναι τυρβώδη και για το λόγο αυτό, οι

συντελεστές αντίστασης είναι ίδιου μεγέθους με αυτούς του τυρβώδους οριακού στρώματος της επίπεδης πλάκας. Για μεγάλα τμήματα της επιφάνειας όμως, οι αεροτομές της σειράς NACA 6, αναπτύσσουν γραμμικό οριακό στρώμα, και για το λόγο αυτό, οι συντελεστές αντίστασης είναι σημαντικά μικρότεροι.

2.2.3.4: Αντίσταση λόγω πίεσης.

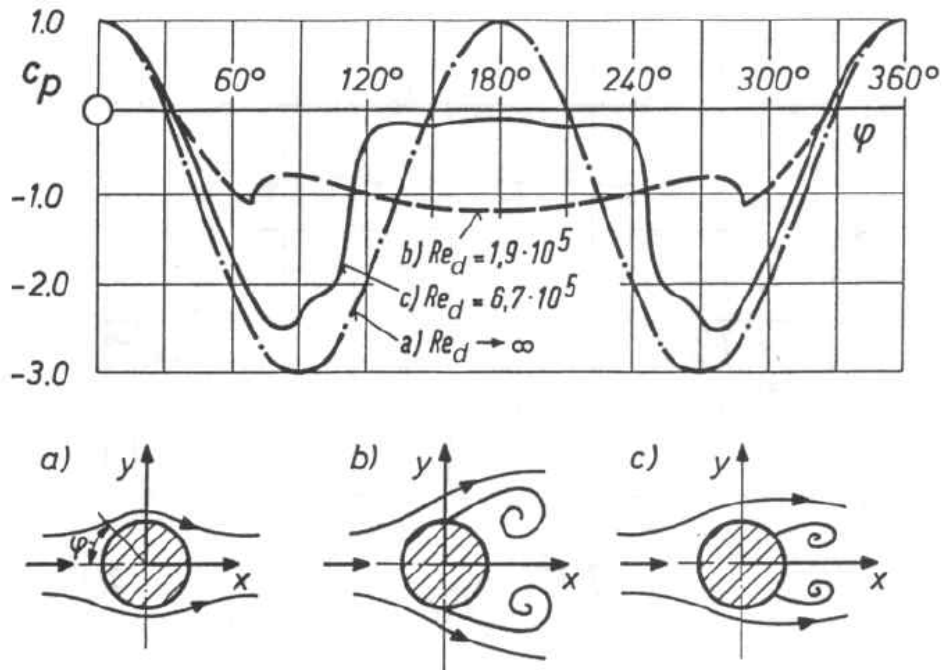
Τα αμβλύ αντικείμενα όπως είναι ο κύλινδρος ή η σφαίρα, παρουσιάζουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά αντίστασης. Στο πίσω τμήμα τέτοιων αντικειμένων και σε περίπτωση ανιζώδους ροής, αναπτύσσονται πολύ απότομες μεταβολές της πίεσης με αποτέλεσμα να δημιουργείται το φαινόμενο αποκόλλησης της ροής όταν αυτή είναι ιξώδης. Συνεπώς η κατανομή της πίεσης μεταβάλλεται σημαντικά όταν τη συγκρίνουμε με τη θεωρητική περίπτωση της ανιζώδους ροής. Η εικόνα 2.10 μας επιβεβαιώνει την παραπάνω πρόταση καθώς παρατηρούμε την κατανομή της πίεσης πάνω σε κυλινδρικό αντικείμενο. Στο εμπρόσθιο τμήμα του αντικειμένου, η κατανομή της πίεσης είναι παρόμοια με την αντίστοιχη της ανιζώδους ροής. Στο πίσω μέρος του αντικειμένου, παρατηρείται αποκόλληση της ροής, την οποία ακολουθεί ανάπτυξη δυνάμεων αναρρόφησης. Οπότε, η κατανομή της πίεσης ως προς τον άξονα Y είναι ασύμμετρη. Ολοκληρώνοντας τις συνιστώσες δύναμης που δρα στη διεύθυνση του ελεύθερου ρεύματος, οι οποίες προκύπτουν από την κατανομή της πίεσης, προκύπτει η σχέση

$$D_p = \oint p \cos f^* dS \quad (19)$$

η οποία αντιστοιχεί στη δύναμη αντίστασης λόγω πίεσης. Για αμβλύ αντικείμενα οι δυνάμεις αντίστασης λόγω πίεσης υπερσχύουν των δυνάμεων

αντίστασης λόγω τριβής. Εν γένει, η ολική αντίσταση ενός αντικειμένου δίνεται από τη σχέση:

$$D = D_F + D_P \quad (20)$$



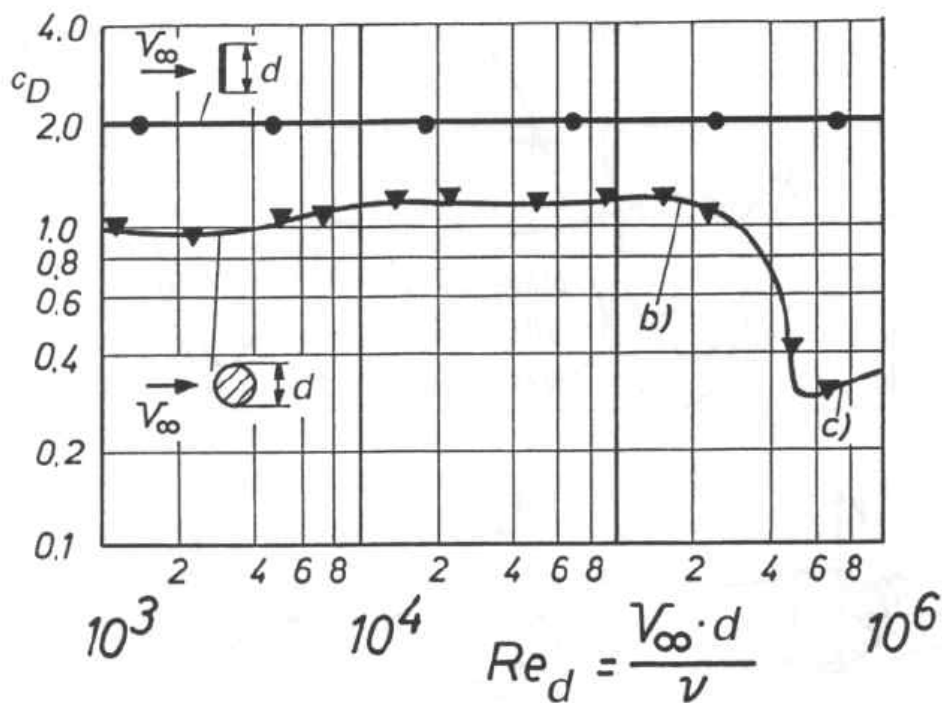
Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση κατανομής της πίεσης κατά τη ροή ρευστού γύρω από κυλινδρικό αντικείμενο. α) Ανιζώδης ροή, β) υποκρίσιμη ροή – γραμμικό οριακό στρώμα, γ) υπερκρίσιμη ροή – τυρβώδες οριακό στρώμα.

Για τα αμβλύ υλικά αντικείμενα, ο συντελεστής αντίστασης λόγω πίεσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{D,A} = \frac{D}{\frac{\rho}{2} U_{\infty}^2 A} \quad (21)$$

Για αμβλύ υλικά αντικείμενα, ο συντελεστής αντίστασης λόγω πίεσης βασίζεται στη δυναμική πίεση που αναπτύσσεται εντός του ελεύθερου ρεύματος $\frac{\rho}{2}U^2$, και στη μεγαλύτερη διατομή του αντικειμένου, **A**.

Το σχήμα 2.8, αναπαριστά τη γραφική παράσταση τη μεταβολή του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για επίπεδη πλάκα και για κύλινδρο. Με εξαίρεση τις πολύ μικρές τιμές του αριθμού Reynolds, για αντικείμενα με αιχμηρές ακμές, η αποκόλληση της ροής πραγματοποιείται κατά τον ίδιο τρόπο για όλες τις τιμές Reynolds, και κατ' επέκταση ο συντελεστής αντίστασης λόγω πίεσης δεν εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Ωστόσο, για καμπυλοειδή αντικείμενα η αποκόλληση της ροής δεν είναι σταθερή και το σημείο αποκόλλησης εξαρτάται από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το οριακό στρώμα. Για μικρές τιμές Reynolds, το οριακό στρώμα είναι γραμμικό. Το σημείο αποκόλλησης παρατηρείται κοντά στο σημείο που το οριακό στρώμα έχει το μέγιστο πάχος. Η περιοχή απορροεύματος που προκύπτει πίσω από το αντικείμενο είναι ευρεία, και ο ανάλογος συντελεστής αντίστασης, αναμενόμενα υψηλός. Στην κρίσιμη τιμή όπου $Re = 5 * 10^5$, πραγματοποιείται μία απότομη μεταβολή του οριακού στρώματος από γραμμικό σε τυρβώδες στο εμπρόσθιο τμήμα του αντικειμένου. Το τυρβώδες οριακό στρώμα παραμένει προσκολλημένο σε μεγαλύτερη έκταση του αντικειμένου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7, με αποτέλεσμα η περιοχή απορροής να είναι μικρότερη και ανάλογα μικρότερος να είναι και ο συντελεστής αντίστασης, σε σύγκριση με τους αντίστοιχους των χαμηλότερων τιμών Reynolds.



Σχήμα 2.8: Μεταβολή του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds για αμβλύ αντικείμενα.

Γενικότερα κατά την κίνηση ενός οχήματος, οι απότομες μεταβολές του συντελεστή αντίστασης λόγω μεταβολών του αριθμού Reynolds πρέπει να αποφεύγονται. Για το σκοπό αυτό, οι αποκολλήσεις της ροής έχουν σταθεροποιηθεί σε συγκεκριμένα σημεία, όπως είναι η άκρη στο άνω μέρος του πίσω παραθύρου. Μέχρι το σημείο αυτό, το αμάξωμα σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ροή να παραμένει προσκολλημένη πάνω σε αυτό και η αύξηση της πίεσης να είναι η μέγιστη δυνατή για διάφορες καταστάσεις του ελεύθερου ρεύματος. Έτσι η επακόλουθη περιοχή απορροής θα είναι η ελάχιστη δυνατή προκειμένου να έχουμε ανάπτυξη μικρών δυνάμεων αντίστασης. Οι συντελεστές αντίστασης φτάνουν στα σημερινά ευρωπαϊκά αυτοκίνητα (με εξαίρεση τα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής και τα οχήματα αγώνων) τιμές, από 0.25 μέχρι 0.45. Γενικά, οι τιμές αυτές εξαρτώνται ελάχιστα από τον αριθμό Reynolds και για το λόγο αυτό οι τιμές τους δεν παρουσιάζουν απότομες

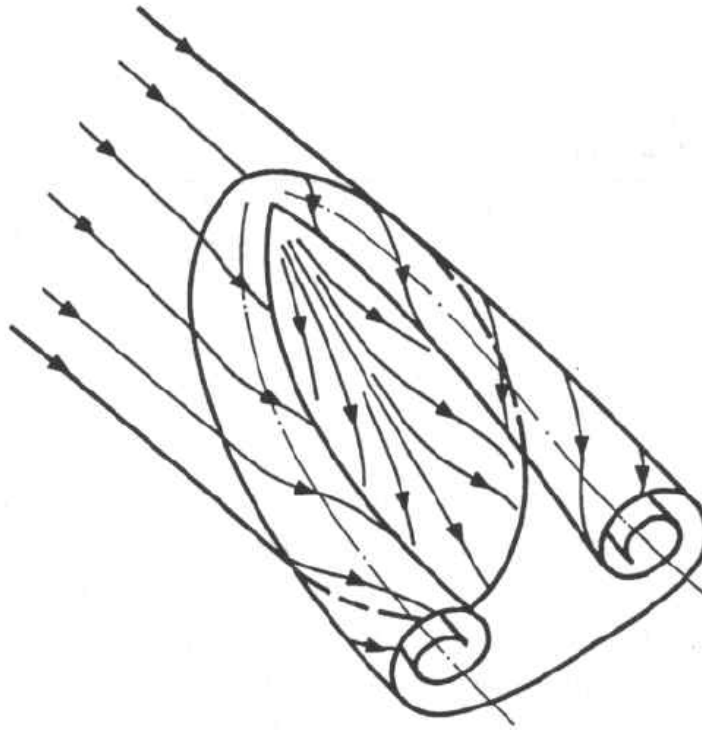
μεταβολές. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως το μεγαλύτερο ποσοστό της αντίστασης των οχημάτων αυτών το κατέχει η αντίσταση λόγω πίεσης. Για κάποια μη συνηθισμένα αεροδυναμικά σχήματα, οι συντελεστές αντίστασης είναι χαμηλότεροι και κυμαίνονται από 0.10 έως 0.25. για αυτού του είδους τα αμαξώματα, η συνεισφορά της αντίστασης λόγω πίεσης στη συνολική αντίσταση του οχήματος είναι σχετικά περιορισμένη. Αντίθετα, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις δυνάμεις αντίστασης λόγω τριβής και κατ' επέκταση από τις τιμές του αριθμού Reynolds.

Η αποκόλληση της ροής που μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη δυνάμεων αντίστασης λόγω πίεσης, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9, η γραμμή αποκόλλησης είναι κάθετη προς τη διεύθυνση της ροής. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε τη δημιουργία δινών, οι άξονες των οποίων είναι κάθετοι ως προς την εξωτερική ροή και παράλληλοι προς τη γραμμή αποκόλλησης. Συνεπώς, οι συνιστώσες της ταχύτητας που είναι παράλληλες προς τους άξονες των δινών είναι πολύ μικρές. Μόνο για μικρές τιμές του αριθμού Reynolds, η ροή στην περιοχή αποκόλλησης είναι συμμετρική, όπως είναι σε ένα μικρό κύλινδρο όπου $Re_d < 60$. Για υψηλότερες τιμές του αριθμού Reynolds, παρατηρείται πτώση της περιοδικότητας των δινών και η ροή στην περιοχή αποκόλλησης είναι κατά κύριο λόγο ασταθής. Η κινητική ενέργεια του πεδίου δίνης διαχέεται γρήγορα λόγω των διαδικασιών ανάμιξης της τύρβης και μετατρέπεται αμετάκλητα σε θερμότητα τριβής. Το φαινόμενο αυτό έχει ως συνέπεια σημαντική απώλεια της συνολικής πίεσης στην περιοχή πίσω από το αντικείμενο, και η ανάλογη έλλειψη της κινητικής ενέργειας στην περίπτωση αυτή είναι ίση με το έργο που απαιτείται για να υπερνικήσουμε την αντίσταση λόγω πίεσης. Πίσω από το υλικό αντικείμενο σχηματίζεται το αναμενόμενο απόρρευμα, εντός του οποίου αναπτύσσονται σχετικά ομοιόμορφες δυνάμεις αναρρόφησης και πολύ χαμηλές ταχύτητες ροής.



Σχήμα 2.9: Αποκόλληση της ροής σε αμβλύ αντικείμενο.

Η δεύτερη κατηγορία αποκόλλησης της ροής χαρακτηρίζεται από μία κεκλιμένη ως προς την εισερχόμενη ροή, γραμμή αποκόλλησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Στην περίπτωση αυτή, οι δίνες αυτές είναι διαχέουσες οι άξονες των οποίων είναι κατά προσέγγιση παράλληλοι προς τις γραμμές αποκόλλησης. Επίσης η συνιστώσα της ταχύτητας που είναι παράλληλη προς τη γραμμή αποκόλλησης είναι αρκετά μεγάλη. Συνεπώς συναντάμε μία καλά διατεταγμένη, σταθερή, τρισδιάστατη ροή. Στην πίσω επιφάνεια του σώματος, η διαχωριζόμενη αυτή ροή παράγει δυνάμεις αναρρόφησης εξαιτίας των οποίων αναπτύσσεται αντίσταση λόγω πίεσης. Η ροή είναι προσκολλημένη στην κεκλιμένη βάση του αντικειμένου. Στην εγγύς περιοχή ως προς τις δίνες, η κατανομή της πίεσης χαρακτηρίζεται από κορυφές αναρρόφησης. Πίσω από τα υλικά αντικείμενα καταγράφονται σχετικά μικρές απώλειες ολικής πίεσης. Ωστόσο, το πεδίο ροής των συγκεντρωμένων δινών εμπεριέχει σημαντικά ποσά κινητικής ενέργειας, τα οποία αναλογούν στο έργο που απαιτείται για να υπερνικήσουμε την αντίσταση λόγω πίεσης.

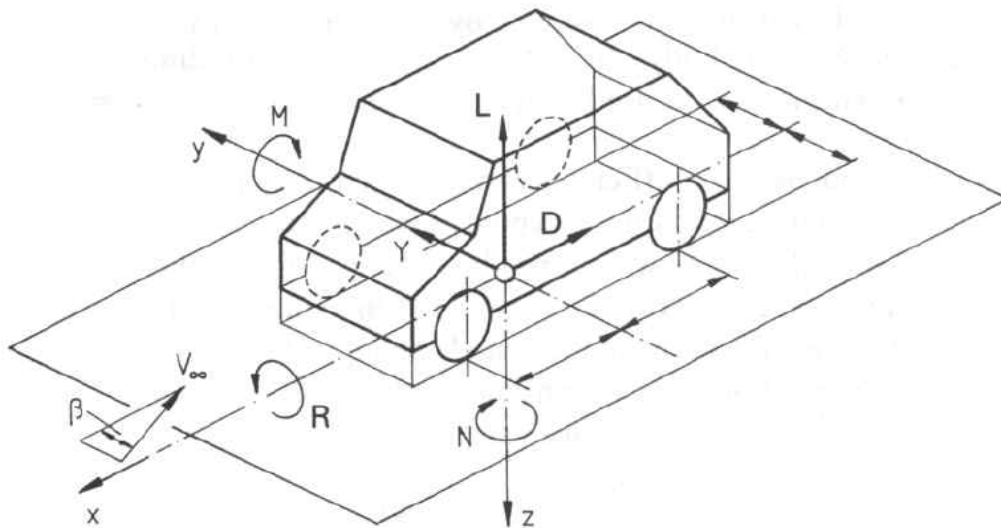


Σχήμα 2.10: Αποκόλληση της ροής σε αντικείμενο με αμβλεία βάση.

Όσον αφορά την αντίσταση ενός αντικειμένου, πρέπει να τονίσουμε πως το σχήμα του μπροστά από τη μεγαλύτερη διατομή του, επηρεάζει ελάχιστα στη συνολική αντίσταση, δεδομένου ότι δεν υφίσταται αποκόλληση ροής στο σημείο αυτό. Δεν είναι τόσο σημαντικό να σχεδιάσουμε το κατάλληλο σχήμα για να διαχωρίσουμε την εισερχόμενη ροή, όσο σημαντικό είναι να σχεδιάσουμε κατάλληλα την πίσω επιφάνεια του αντικειμένου ώστε να επιτύχουμε την ηπιότερη δυνατή επανένωση των ρευματικών γραμμών. Τα βέλτιστα σχήματα για το σκοπό αυτό είναι τα αεροδυναμικά σχήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από λεπτά ουραία τμήματα, τα οποία δεν είναι δυνατόν να δοθούν στα αμαξώματα των οχημάτων.

2.2.3.5: Συνολικές δυνάμεις και ροπές.

Επιπρόσθετα με την αντίσταση, και άλλες δυνάμεις και ροπές αναπτύσσονται πάνω σε ένα όχημα, οι οποίες αναπαρίστανται σχηματικά στο σχήμα 2.11. Στη συμμετρική ροή ($\beta = 0$), η δύναμη της αντίστασης συνοδεύεται από μία δύναμη άνωσης L . Επιπλέον, ως προς τον εγκάρσιο άξονα Y , αναπτύσσεται ροπή πρόνευσης. Τα τρία αυτά στοιχεία δύναμης και ροπής, (Αντίσταση D , Άνωση L , Ροπή Πρόνευσης L), συνιστούν απόλυτα το διάνυσμα της συνολικής δύναμης του αέρα που ασκείται πάνω σε ένα κινούμενο όχημα. Δεδομένου ότι το σημείο εφαρμογής της ροπής πρόνευσης είναι γνωστό (Συνήθως βρίσκεται στη μέση του μεταξονίου του οχήματος), οι υπόλοιπες δυνάμεις που προκύπτουν από τη ροή γύρω από το όχημα και δρουν στον εμπρόσθιο και τον πίσω άξονα του οχήματος, μπορούν εύκολα να εκτιμηθούν.



Σχήμα 2.11: Δυνάμεις και ροπές που δρουν στην επιφάνεια αυτοκινήτου.

Στην περίπτωση πλευρικών ανέμων ($\beta \neq 0$), έχουμε την ανάπτυξη ενός ασύμμετρου πεδίου ροής γύρω από το όχημα. Σε μία τέτοια περίπτωση, μαζί με τις δυνάμεις στις οποίες αναφερθήκαμε, παρατηρούμε την ύπαρξη μίας επιπλέον

δύναμης Y , η οποία είναι πλευρική με διεύθυνση τον άξονα Y . Ταυτόχρονα αναπτύσσεται μία ροπή περιστροφής R , ως προς το διαμήκη άξονα X , και μία ροπή παρέκκλισης N ως προς τον κατακόρυφο άξονα Z . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πλέον το διάνυσμα της δύναμης του αέρα που ασκείται στο όχημα αποτελείται από τρία επιπλέον στοιχεία τα οποία είναι (Πλευρική δύναμη Y , Ροπή περιστροφής R , Ροπή παρέκκλισης N).

Ο προσδιορισμός των στοιχείων αυτών, επιτυγχάνεται με μετρήσεις που γίνονται σε αεροσήραγγες σε μοντέλα είτε πλήρους κλίμακας είτε μικρότερης. Προκειμένου τα αποτελέσματα να μην εξαρτώνται από την κλίμακα του μοντέλου, οι μετρήσεις πρέπει να ακολουθούν το νόμο της ομοιότητας του Reynolds. Δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις (μοντέλο μικρής κλίμακας και μοντέλο πλήρους κλίμακας) ο αριθμός Reynolds ο οποίος δίνεται από τη σχέση,

$$Re_l = \frac{V_\infty l}{\nu}$$

πρέπει να είναι ίσος.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα είναι ανεξάρτητα των διαστάσεων των μοντέλων αρκεί οι αδιάστατοι συντελεστές να σχηματίζονται ανάλογα με το συντελεστή αντίστασης.

$$\text{Συντελεστής άνωσης: } C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A} \quad (22)$$

$$\text{Συντελεστής ροπής πρόνευσης: } C_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A l} \quad (23)$$

$$\text{Συντελεστής ροπής περιστροφής: } C_R = \frac{R}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A l} \quad (24)$$

$$\text{Συντελεστής πλευρικής δύναμης: } C_Y = \frac{Y}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A} \quad (25)$$

$$\text{Συντελεστής ροπής παρέκκλισης: } C_N = \frac{N}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A l} \quad (26)$$

Οι παραπάνω συντελεστές βασίζονται στη δυναμική πίεση της ροής του ελεύθερου ρεύματος $\frac{\rho}{2}V$ και στη μέγιστη διατομή που είναι η εμπρόσθια επιφάνεια A του οχήματος. Επίσης, όσον αφορά του συντελεστές ροπής, χρησιμοποιείται μία χαρακτηριστική διάσταση όπως είναι το συνολικό μήκος του οχήματος, αντί του οποίου ορισμένες φορές χρησιμοποιείται το μεταξόνιο.

Οι αδιάστατοι αεροδυναμικοί συντελεστές εξαρτώνται αποκλειστικά από άλλες αδιάστατες παραμέτρους του προβλήματος, όπως είναι η τιμή του αριθμού Reynolds και η κλίση της γωνίας παρέκκλισης β . Σε μία τέτοια σχέση προκύπτουν ορισμένα προβλήματα ευστάθειας του οχήματος, τα οποία θα μπορούσαν να επεξηγηθούν για μια περίπτωση όπως αυτή της κίνησης του οχήματος όταν αυτό βάλλεται από πλευρικούς ανέμους. Σε ασύμμετρη ροή αναπτύσσεται μία ροπή παρέκκλισης που δρα στο αμάξωμα, με συντελεστή C_N . Η ροπή αυτή, τείνει να περιστρέψει το όχημα ως προς τον κατακόρυφο άξονα Z . Το όχημα θα είναι αεροδυναμικώς ευσταθές εφόσον η προκύπτουσα ροπή παρέκκλισης τείνει να μειώσει τη γωνία παρέκκλισης β , δηλαδή εάν $\frac{dc_N}{d\beta} < 0$, το όχημα είναι αεροδυναμικώς ευσταθές. Αντίθετα αν $\frac{dc_N}{d\beta} > 0$ το όχημα δεν είναι.

Δυστυχώς, τα περισσότερα οχήματα και κυρίως τα φορτηγά είναι αεροδυναμικώς μη ευσταθή. Μόνο οχήματα που έχουν επιμήκη ουραία τμήματα, κάτι που πρακτικά δεν μπορεί να εφαρμοστεί, θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν αεροδυναμικώς ευσταθή.

Όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις δυνάμεις αντίστασης, ανάλογα και οι υπόλοιπες δυνάμεις και ροπές μπορούν να επηρεαστούν από την κατάλληλη διαμόρφωση του αυτοκινήτου. Το σχήμα του πατώματος του αυτοκινήτου διαδραματίζει ένα πολύ μεγάλο ρόλο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΟΧΗΜΑΤΑ ΥΨΗΛΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ.

3.1: Ορισμοί.

Τα οχήματα υψηλών επιδόσεων χαρακτηρίζονται κυρίως από έναν πολύ υψηλό λόγο ισχύος προς βάρος. Η πανίσχυρη επιτάχυνση με ανάλογη επιβράδυνση (πέδηση) και άριστη ευελιξία σε συνδυασμό με μια πολύ υψηλή τελική ταχύτητα και χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, είναι οι ζωτικής σημασίας απαιτήσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα αγωνιστικά οχήματα.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες οχημάτων υψηλών επιδόσεων: sport, racing και record.

1. Sport Cars: Τα αυτοκίνητα αυτά είναι σχεδιασμένα για καθημερινή χρήση σε δημόσιους δρόμους. Στο σχεδιασμό των οχημάτων αυτών δίνεται προτεραιότητα σε παράγοντες όπως ο υψηλός λόγος ισχύος – βάρος, χαμηλό κέντρο βάρους, και περιορισμένες εξωτερικές διαστάσεις, πολλές φορές εις βάρος του ωφελίμου φορτίου ή και της άνεσης κατά την οδήγηση. Η ενεργητική ασφάλεια αυξάνεται λόγω της υψηλής επιτάχυνσης αλλά και επιβράδυνσης που χαρακτηρίζουν τα οχήματα αυτά.
2. Racing Cars: Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούνται κατά κανόνα για να ανταγωνίζονται άλλα οχήματα της ίδιας κατηγορίας, σε ειδικά αυτοκινητοδρόμια κλειστά από την υπόλοιπη κυκλοφορία. Είναι σχεδιασμένα για μέγιστες επιδόσεις όσον αφορά την επιτάχυνση, την τελική ταχύτητα, την ισχύ πέδησης και τη συμπεριφορά στις στροφές. Σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό τους, διαδραματίζουν επίσης ορισμένοι ειδικοί κανονισμοί οι οποίοι αφορούν διάφορες παραμέτρους όπως τα όρια κατανάλωσης καυσίμου ή τις οδηγίες ασφάλειας.

3. Record Cars: Το φάσμα εφαρμογής ή χρησιμότητας των αυτοκινήτων αυτών είναι πολύ περιορισμένο. Σχεδιάζονται συνήθως με σκοπό να επιτύχουν την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα ή την υψηλότερη δυνατή επιτάχυνση σε συνδυασμό πάντα με την λιγότερη κατανάλωση.

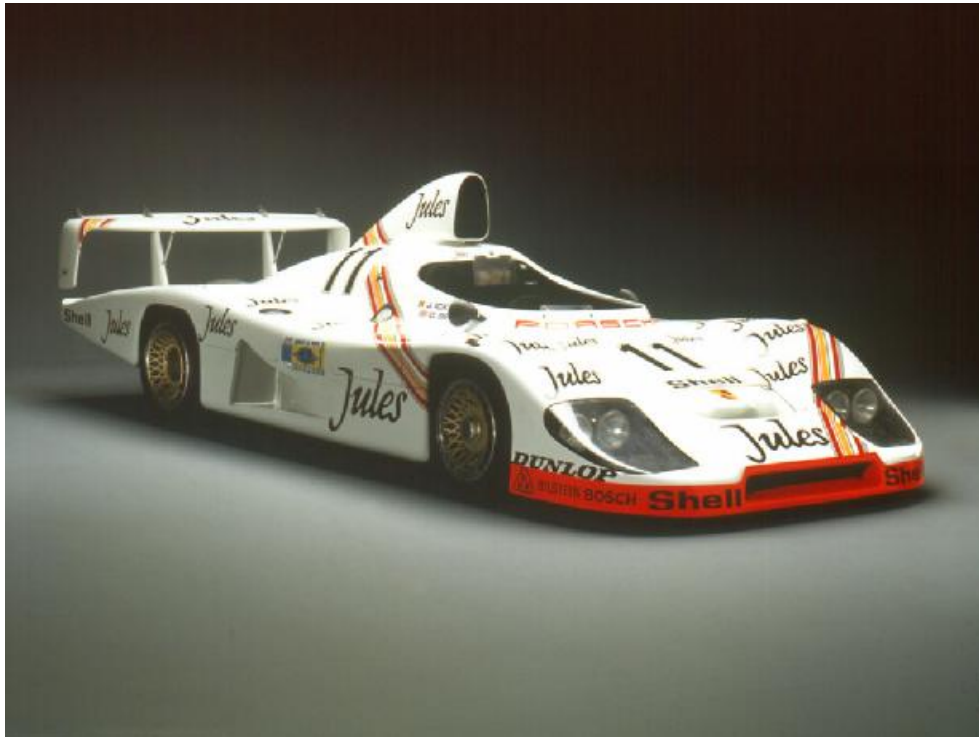
Οι τρεις κατηγορίες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ρυθμίσεων του αμαξώματος έτσι ώστε να τηρούν τους εκάστοτε κανονισμούς και να ανταποκρίνονται σε ολόκληρο το βεληνεκές των απαιτήσεων. Έτσι συναντούμε:

- Ανοικτά οχήματα με εκτεθειμένους τροχούς. Σήμερα χρησιμοποιούνται ως μονοθέσια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής είναι τα μονοθέσια της Formula 1 ή και του πρωταθλήματος CART (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Αγωνιστικά οχήματα F1 και American CART.

- Ανοικτά οχήματα με καλυμμένους τροχούς (Σχήμα 3.2) . Τα αγωνιστικά αυτοκίνητα αυτού του τύπου συνήθως συνοδεύονται και από μία αναδιπλωμένη οροφή.



Σχήμα 3.2: Ανοικτά αγωνιστικά οχήματα με καλυμμένους τροχούς.

- Κλειστά οχήματα με εκτεθειμένους τροχούς. Η συγκεκριμένη κατηγορία αμαξώματος χρησιμοποιείται μόνο για την κατασκευή Record Cars(Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Το όχημα Blue Flame που αναπτύσσει ταχύτητα 1001 km/h

- Κλειστά οχήματα με καλυμμένους τροχούς (Σχήμα 3.4) .



Σχήμα 3.4: Κλειστά οχήματα με καλυμμένους τροχούς.

3.2: Σταθμοί ορόσημο στην ιστορία των αγωνιστικών αυτοκινήτων.

Η σπουδαιότητα της αεροδυναμικής στο σχεδιασμό και την κατασκευή των record cars αναγνωρίστηκε από το τέλος του 19^{ου} αιώνα. Το πρώτο όχημα που κατάφερε να ξεπεράσει τα 100 km/h κατασκευάστηκε το 1899 με την ονομασία “La Jamais Contente”. Το ηλεκτροκίνητο αυτό όχημα είχε ένα κυλινδρικό σχήμα, οι γραμμές του οποίου είχαν επηρεαστεί εμφανώς από τις αντίστοιχες που ακολουθούνται κατά το σχεδιασμό των αερόπλοιων.

Τα μεταγενέστερα record cars, ήταν όλα σχεδιασμένα με λιγότερο ή περισσότερο αεροδυναμικά σχήματα, συχνά συμπεριλαμβάνοντας κάθετα ουραία πτερύγια για βελτιωμένη διαμήκη ευστάθεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το “Golden Arrow” κατασκευασμένο το 1929 το οποίο έφτασε την τελική ταχύτητα των 329, 456 km/h.



Σχήμα 3.5: Το record car “Golden Arrow” με μέγιστη ταχύτητα 329, 456 km/h.

Ένα χρόνο νωρίτερα όμως, η Opel είχε κατασκευάσει ένα όχημα με την ονομασία Opel Rak 2, και ήταν το πρώτο record car στο οποίο τοποθετήθηκαν οριζόντια πτερύγια για την παραγωγή αρνητικής άνωσης.

Ο συνδυασμός κάθετων και οριζόντιων πτερυγίων επιτεύχθηκε το 1939 από τη Mercedes με το μοντέλο T80, το οποίο με την ιπποδύναμη των 2200 Hp, μπορούσε να αναπτύξει τελική ταχύτητα 650 km/h.

Το πρώτο όχημα που κατάφερε να σπάσει το φράγμα του ήχου ήταν το “Budweiser Rocket” το οποίο το 1975 έφτασε την ταχύτητα των 1190.23 km/h.

Η αεροδυναμική ανάπτυξη των αγωνιστικών αυτοκινήτων έκανε την εμφάνισή της σχετικά αργά. Τα ανοικτά αυτοκίνητα με τους εκτεθειμένους τροχούς ήταν εφοδιασμένα με αιχμηρά ψυγεία και αεροδυναμικά αμαξώματα για χαμηλή οπισθέλκουσα δύναμη. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η Mercedes Lautenschlager η οποία είχε συντελεστή αεροδυναμικής $C_D = 0,65$ τιμή σχετικά μικρή για τα τότε δεδομένα. Το 1955 η ίδια κατασκευάστρια εταιρία, συμμετείχε στους αγώνες ταχύτητας του Le Mans με την πρωτοποριακή Benz 300 SLR η οποία διέθετε ένα ανακλήσιμο πτερύγιο χάριν στο οποίο η διαδικασία πέδησης στις υψηλές ταχύτητες βελτιωνόταν σημαντικά, καθώς το πτερύγιο αυτό μπορούσε να αυξήσει το συντελεστή οπισθέλκουσας από $C_D = 0,44$ σε 1,09.



Σχήμα 3.6: Mercedes – Benz 300 – SLR. Το πίσω προστατευτικό κάλυμμα του οδηγού ανασηκώνεται αυξάνοντας το συντελεστή οπισθέλκουσας σε 1.09.

Μέχρι τα τέλη του 1960 τα αγωνιστικά αυτοκίνητα σχεδιάζονταν δίνοντας υψηλότερη προτεραιότητα στη χαμηλή οπισθέλκουσα δύναμη, όπως η Porsche “Long Tail” με συντελεστή οπισθέλκουσας $C_D = 0,33$ και τελική ταχύτητα 265 km/h. Τα οχήματα που ακολούθησαν αυτή τη φιλοσοφία στο σχεδιασμό τους είχαν την ικανότητα να αναπτύσσουν υψηλές ταχύτητες, ταυτόχρονα όμως ανέπτυσαν δυνάμεις άνωσης οι οποίες επηρέαζαν τόσο την ευστάθεια όσο και την ταχύτητα εισόδου στις στροφές.



Σχήμα 3.7: Η Porsche “Longtail”

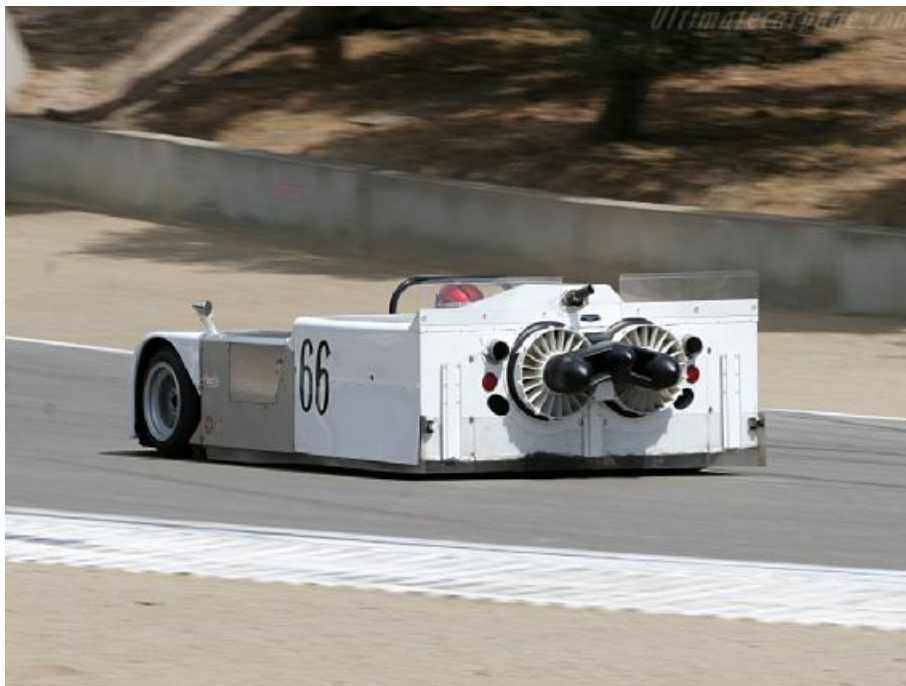
Το 1967 η Chaparral 2F ήταν το πρώτο αγωνιστικό αυτοκίνητο που χρησιμοποίησε αεροτομή με σκοπό την παραγωγή αρνητικής άνωσης για να αυξήσει το φορτίο στους τροχούς και κατ’ επέκταση να βελτιώσει το κράτημα και την ευστάθεια κατά την οδήγηση. Από τότε, και άλλες εταιρίες υιοθέτησαν την τακτική αυτή, με αποτέλεσμα όλα τα αγωνιστικά αυτοκίνητα κάποια στιγμή να διαθέτουν ανάλογα πτερύγια. Ανάμεσα σε αυτά είναι και η Porsche 935 “Moby Dick” με ιπποδύναμη συντελεστή οπισθέλκουσας $C_D = 0,36$.

Η ανάπτυξη αγωνιστικών αυτοκινήτων με ακάλυπτος τροχούς ακολούθησε μία παρόμοια τάση. Τα πρώτα μονοθέσια αυτού του τύπου κατασκευάστηκαν με όσο το δυνατόν πιο στενά, αεροδυναμικά αμαξώματα με σκοπό να περιορίσουν την αεροδυναμική αντίσταση. Αρχικά, μικρή σημασία είχε δοθεί στον έλεγχο των δυνάμεων άνωσης ενώ η ιδέα της δημιουργίας αρνητικών κάθετων δυνάμεων δεν είχε συλληφθεί καν.

Μόνο το 1968, άρχισαν να τοποθετούνται στις εμπρόσθιες και πίσω αναρτήσεις, πτερύγια για τη δημιουργία αρνητικής κάθετης δύναμης. Προκειμένου να

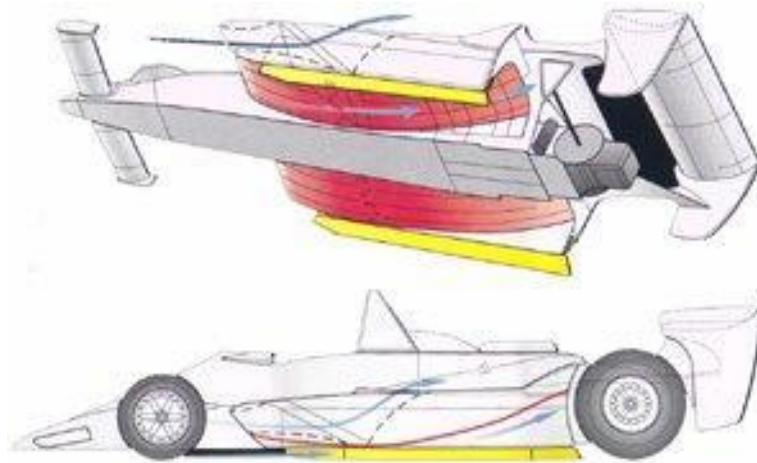
επιτραπεί στο βάλλοντα αέρα να ρέει ελεύθερα, τα πτερύγια αυτά τοποθετήθηκαν σε σχετικά μεγάλο ύψος πάνω από το όχημα. Δεδομένου όμως ότι τα πτερύγια αυτά πολλές φορές έσπαγαν, απαγορεύτηκαν από τους κανονισμούς ως επικίνδυνα και δύο χρόνια αργότερα αντικαταστάθηκαν από άλλα τα οποία ήταν πακτωμένα αυτή τη φορά στο αμάξωμα του αυτοκινήτου.

Η Chararral 2J το 1969, μία εντελώς πρωτοποριακή ιδέα για την παραγωγή αρνητικής άνωσης. Δύο περιστρεφόμενοι έλικες αναρροφούσαν αέρα κάτω από το όχημα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η δύναμη πίεσης μεταξύ αυτοκινήτου και οδοστρώματος. Η ιδέα όμως δεν έγινε πραγματικότητα καθώς απαγορεύτηκε από τους κανονισμούς. Ανάλογες απόπειρες έγιναν και από άλλες ομάδες όπως η Brabham Formula 1, οι οποίες επίσης δεν καθιερώθηκαν καθώς απαγορεύτηκαν από τους κανονισμούς.



Σχήμα 3.8: Chararral 2J η οποία διέθετε έλικες αναρρόφησης του διερχόμενου από το πάτωμα αέρα.

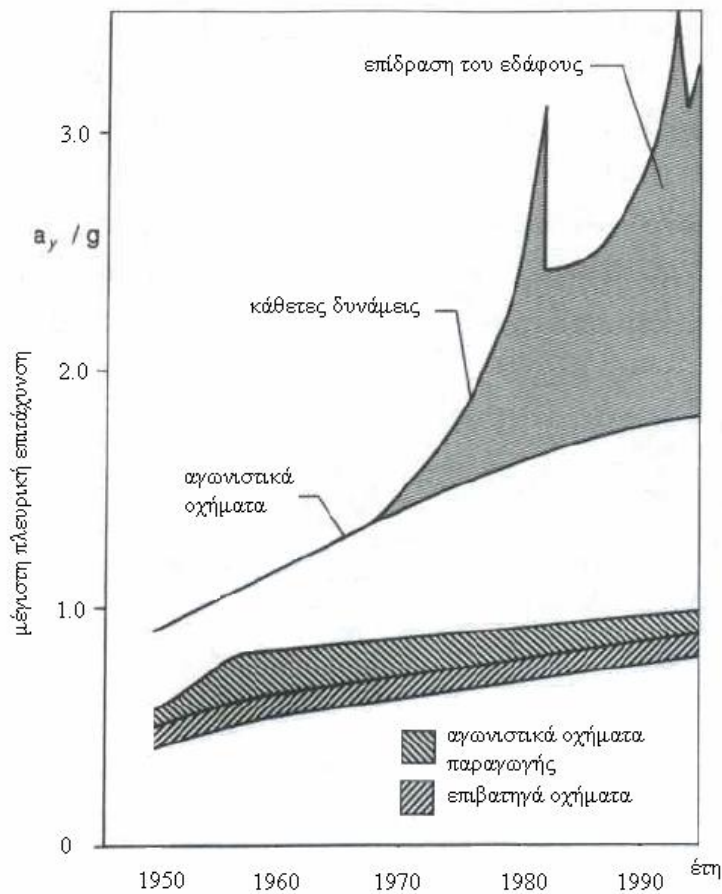
Το 1977 η αγωνιστική ομάδα της Lotus ανέπτυξε ένα ειδικά κατασκευασμένο πάτωμα το οποίο είχε ένα σημαντικό πλεονέκτημα τη λεγόμενη επίδραση του εδάφους (ground effect). Το χρησιμοποίησε στα αυτοκίνητά της το 1979. Το πάτωμα αυτό ήταν σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί κάτι σαν φαινόμενο Venturi σε σχέση με το έδαφος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9, οι πλευρικές προεκτάσεις σχεδόν ακουμπούν στο έδαφος, παρεμποδίζοντας έτσι τον αέρα να εισέλθει προς το κέντρο του αυτοκινήτου, γεγονός που θα εξασθενούσε την επίδραση της χαμηλής πίεσης. Δρώντας πάνω στη μεγάλη επιφάνεια του πατώματος, η χαμηλή πίεση δημιουργεί μία υψηλή δύναμη αρνητικής άνωσης, με αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερες μέγιστες πλευρικές επιταχύνσεις, ασκώντας ταυτόχρονα ισχυρές φυσικές καταπονήσεις στον οδηγό. Συνεπώς οι χαμηλές πλευρικές προεκτάσεις καταργήθηκαν ενώ το πάτωμα έπρεπε να είναι εντελώς επίπεδο.





Σχήμα 3.9: Lotus 79 Formula1. Το πρώτο αγωνιστικό όχημα Venturi όπου εφαρμόστηκε η ομώνυμη τεχνολογία αύξησης της στατικής πίεσης για τη βελτίωση της ευστάθειας στο οδόστρωμα.

Ως επακόλουθο αυτών των περιορισμών από τους κανονισμούς, η προσοχή στράφηκε πάλι στο σχεδιασμό και την κατάλληλη τοποθέτηση των πτερύγων. Σήμερα η «επίδραση του εδάφους» χρησιμοποιείται σε πολλά πρωταθλήματα αγώνων αυτοκινήτου όπως στη Formula 1. Στο σχήμα 3.10, αναπαρίσταται η επίδραση των αεροδυναμικών επινοήσεων πάνω στη μέγιστη πλευρική επιτάχυνση, ως προς το χρόνο. Όπως φαίνεται ανάμεσα στο 1950 και 1970, επιτεύχθηκαν μέτριες αυξήσεις στην πλευρική επιτάχυνση, και αυτές οφείλονταν σε βελτιώσεις των ελαστικών και του πλαισίου του οχήματος. Οι πλευρικές επιταχύνσεις αυξήθηκαν δραματικά μόλις καθίστατο δυνατή η παραγωγή αρνητικών κάθετων δυνάμεων.



Σχήμα 3.10: Γραφική παράσταση της εξέλιξης της πλευρικής επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου σε επιβατηγά, αγωνιστικά παραγωγής και αγωνιστικά οχήματα .

Η τάση αυτή επηρέασε σημαντικά την οπισθέλκουσα δύναμη. Ο πίνακας 3.1, δείχνει την εξέλιξη των συντελεστών οπισθέλκουσας και των εμπρόσθιων επιφανειών των αγωνιστικών αυτοκινήτων της Porsche από το 1953. Είναι προφανές πως τόσο ο συντελεστής οπισθέλκουσας όσο και η εμπρόσθια επιφάνεια αυξάνονταν συνεχώς όταν η αρνητική άνωση επιδιώκονταν με μετατροπές στο πλαίσιο και στα ελαστικά.

	Model Year	c_D	A (m ²)	$c_D \cdot A$ (m ²)
Porsche 550 Coupe	1953	0.36	1.13	0.41
Porsche 550 Spyder	1954	0.45	1.03	0.46
Porsche Formula II	1960	0.53	0.89	0.47
Porsche Formula I	1962	0.60	0.72	0.43
Porsche Abarth	1962	0.39	1.40	0.58
Porsche 904 Carrera GTS	1964	0.38	1.40	0.54
Porsche Carrera 6	1966	0.34	1.33	0.45
Porsche 910	1966	0.35	1.32	0.46
Porsche 906 Carrera	1966	0.39	1.34	0.52
Porsche 908/02 Spyder	1969	0.49	1.27	0.62
Porsche 917 (Short Tail)	1970	0.44	1.55	0.68
Porsche 914/6 GT Coupe	1970	0.45	1.66	0.75
Porsche 908/03 Spyder	1970	0.56	1.40	0.78
Porsche 917 (Long Tail)	1971	0.36	1.57	0.57
Porsche 917/10	1972	0.60	1.85	1.11
Porsche 917/30	1973	0.57	1.86	1.06
Porsche 911 Carrera GTS	1974	0.43	1.91	0.82
Porsche 936	1977	0.40	1.75	0.70
Porsche 935/78	1978	0.36	2.00	0.72
Porsche 936	1978	0.40	1.65	0.66
Porsche 924 Carrera GT	1980	0.34	1.94	0.66
Porsche 956 (Short Tail)	1982	0.54	1.80	0.97
Porsche 956 (Long Tail)	1982	0.44	1.69	0.74
Porsche 961	1987	0.43	2.11	0.91
Porsche 962 (Short Tail)	1988	0.53	1.80	0.95
Porsche 962 (Long Tail)	1988	0.40	1.69	0.68
Porsche 944 Turbo	1989	0.35	1.88	0.65
Porsche 911 Carrera 2	1990	0.31	1.77	0.55

Πίνακας 3.1: Εξέλιξη του συντελεστή οπισθέλκουσας και της εμπρόσθιας επιφάνειας των αγωνιστικών οχημάτων της Porsche από το 1953 μέχρι το 1990.

Τα αγωνιστικά αυτοκίνητα παραγωγής ακολούθησαν ένα πρότυπο όμοιο με αυτό που ακολουθήθηκε από τα αμιγώς αγωνιστικά. Πριν από τον πόλεμο, οι κατασκευαστές προτιμούσαν κλασικά σχέδια με μεγάλα ψυγεία και ξεχωριστά φτερά, όπως η Mercedes Benz 720 SSK, κατασκευασμένη το 1928 με συντελεστή οπισθέλκουσας $C_D = 0,91$ και εμπρόσθια επιφάνεια $A = 1,57 \text{ m}^2$.

Αμέσως μετά τον πόλεμο, οι κατασκευαστές των αγωνιστικών οχημάτων παραγωγής εστίασαν την προσοχή τους σε χαμηλότερους συντελεστές οπισθέλκουσας και μικρότερες εμπρόσθιες επιφάνειες. Το 1948 εμφανίζεται η Porsche 356 ($C_D = 0,46$, $A = 1,57 \text{ m}^2$). Η κλειστή Porsche 356A που κατασκευάστηκε 2 χρόνια αργότερα είχε πολύ χαμηλό συντελεστή οπισθέλκουσας, μόλις $C_D = 0,28$ και εμπρόσθια επιφάνεια $A = 1,68 \text{ m}^2$. Ταυτόχρονα το συγκεκριμένο αυτοκίνητο είχε πολύ υψηλό συντελεστή άνωσης $C_L = 0,28$, γεγονός όμως που δεν αποτελούσε σημαντικό πρόβλημα δεδομένου ότι η τελική ταχύτητα του οχήματος ήταν σχετικά μικρή.

Στα ακόλουθα χρόνια, οι προσπάθειες για βελτίωση του χειρισμού βασιζόμενες σε πιο εξελιγμένες αναρτήσεις και πιο πλατιά ελαστικά, παράμετροι οι οποίες προσέφεραν στους επιβάτες περισσότερη άνεση, είχαν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες εμπρόσθιες επιφάνειες και υψηλότερους συντελεστές οπισθέλκουσας δύναμης. Ένας άλλος επιδρών παράγοντας σε αυτήν την κατάσταση είναι ο συνεχώς αυξανόμενος αέρας ψύξης που απαιτείται για τις ολοένα ισχυρότερες μηχανές.

Κατά τη 10ετία 70 – 80 προσαρμόστηκαν ορισμένα αεροδυναμικά βοηθήματα υπό τη μορφή εμπρόσθιων προφυλακτών και αεροτομών στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου. Η Porsche 911 Turbo, αποτελεί παράδειγμα αυτής της τάσης.

Οι σχεδιαστές σήμερα εφαρμόζουν στην ανάπτυξη αγωνιστικών αυτοκινήτων παραγωγής, όλο και περισσότερο την αεροδυναμική που χρησιμοποιείται στα αμιγώς αγωνιστικά αυτοκίνητα. Ταυτόχρονα γίνονται προσπάθειες να δώσουν στην απείθαρχη και επιθετική ισχύ των αυτοκινήτων αυτών, μία πιο κομψή και ήπια εμφάνιση.

Ωστόσο, προκειμένου να διατηρηθούν οι αεροδυναμικές ιδιότητες καθώς και η ωφέλιμη επιρροή τους στην απόδοση και το χειρισμό του αυτοκινήτου, η

άλλοτε μεγάλη προεξέχουσα αεροτομή, εκτείνεται μόνο στις υψηλότερες ταχύτητες.



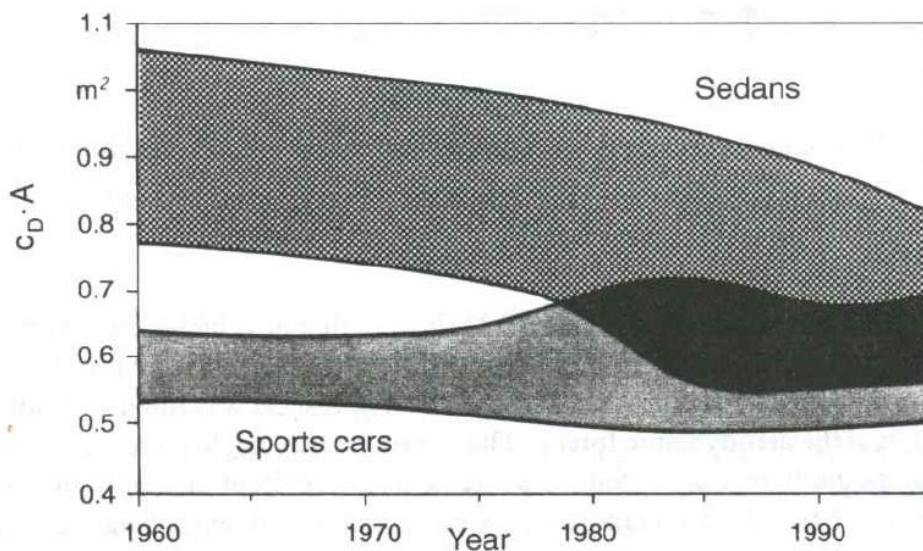
Σχήμα 3.11: Η αεροτομή της Porsche 911 Carrera, σηκώνεται μετά την ταχύτητα των 80 km/h.

3.3: Η σπουδαιότητα της αεροδυναμικής στα οχήματα υψηλών επιδόσεων.

Οι καλές αεροδυναμικές ιδιότητες αποτελούν βασικές προϋποθέσεις ώστε τα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής να αποδίδουν υψηλές ταχύτητες και ανώτερα χαρακτηριστικά χειρισμού.

3.3.1: Αντίσταση – Άνωση.

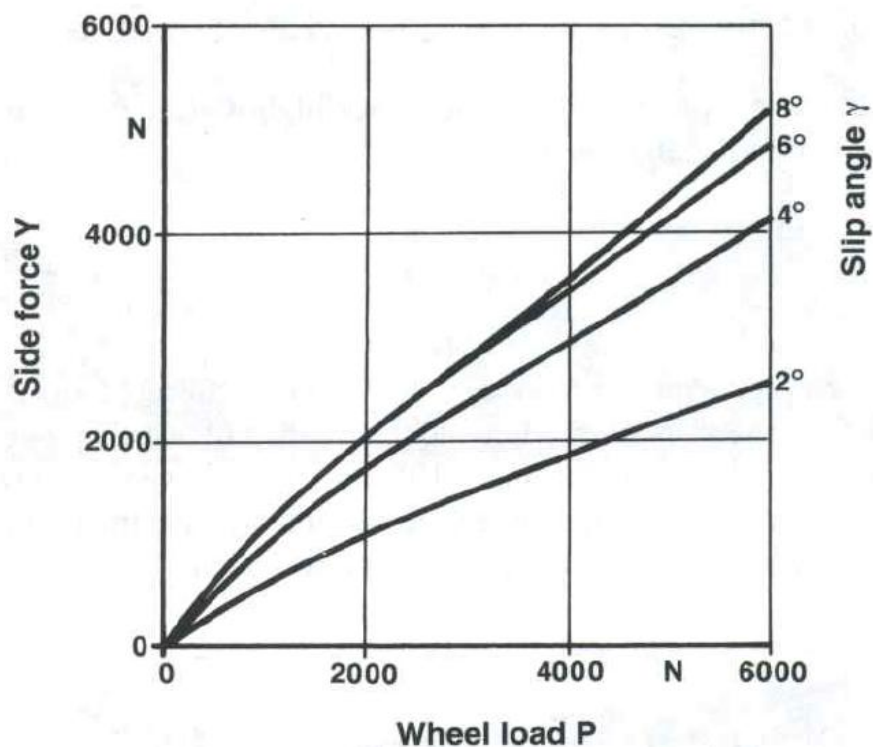
Η υψηλή μέγιστη ταχύτητα για δεδομένη μηχανική ισχύ, επιτυγχάνεται με τη μείωση της αντίστασης. Η αντίσταση αυξάνεται ανάλογα με το μέτρο της ταχύτητας του αέρα υψωμένο στη δεύτερη δύναμη, το συντελεστή οπισθέλκουσας C_D και το εμβαδόν της εμπρόσθιας επιφάνειας A . Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12, οι τιμές του γινομένου συντελεστή οπισθέλκουσας – επιφάνειας ($C_D \times A$) βρίσκονταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, τα οποία άρχισαν να αυξάνονται όταν οι το εσωτερικό των αυτοκινήτων έγινε πιο ευρύχωρο και τα ελαστικά πλατύτερα. Η τάση αυτή μπορούσε να αντισταθμιστεί μόνο με το σχεδιασμό ακόμα πιο αεροδυναμικών αμαξωμάτων.



Σχήμα 3.12: Τυπικό διάγραμμα της εξέλιξης του γινομένου του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D επί της εμπρόσθιας επιφάνειας A , συναρτήσει του χρόνου.

Αρχικά η αεροδυναμική εξέλιξη των επιβατηγών πραγματοποιούνταν με αργούς ρυθμούς, αλλά σήμερα οι συντελεστές οπισθέλκουσας των αυτοκινήτων αυτών είναι συγκρίσιμοι και πολλές φορές μικρότεροι από αυτούς των αγωνιστικών οχημάτων παραγωγής.

Έχουμε ήδη αναφέρει πως οι συνθήκες ροής του αέρα γύρω από το όχημα επηρεάζουν τόσο την αντίσταση όσο και τις κάθετες δυνάμεις που ασκούνται στους τροχούς. Οι κάθετες αυτές δυνάμεις, ανεξάρτητα με το αν είναι θετικές ή αρνητικές, μεταβάλλονται συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας ροής. Οποιαδήποτε μεταβολή στις κάθετες δυνάμεις των τροχών επηρεάζει τη μέγιστη δύναμη που μεταβιβάζεται πλέον στα ελαστικά ως πλευρική και κατ' επέκταση το χειρισμό του αυτοκινήτου.



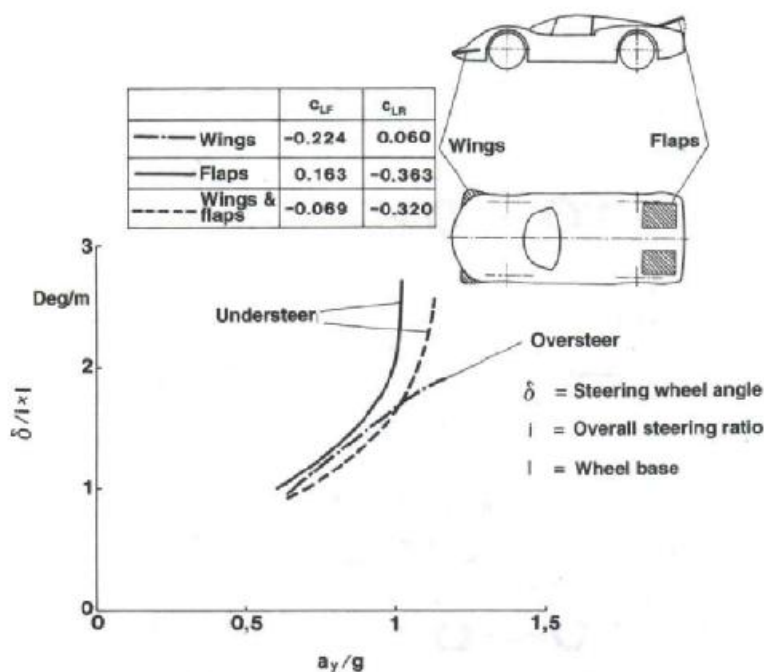
Σχήμα 3.13: Γραφική παράσταση της μέγιστης πλευρικής δύναμης συναρτήσει του φορτίου των ελαστικών.

3.3.2: Χειρισμός.

Ο χειρισμός ενός οχήματος επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από το πλαίσιο και τα ελαστικά του αυτοκινήτου, μπορεί όμως να βελτιωθεί σημαντικά με κατάλληλους υπολογισμούς αεροδυναμικής. Κάτι τέτοιο ισχύει βέβαια μόνο σε υψηλές ταχύτητες όπου οι αεροδυναμικές δυνάμεις φτάνουν σε κάποια σημαντικά επίπεδα.

3.3.2.1: Δοκιμές οδήγησης.

Οι δοκιμές οδήγησης έχουν δείξει κατά καιρούς ότι σε οχήματα με αρνητική αεροδυναμική άνωση, η μέγιστη πλευρική επιτάχυνση αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα οδήγησης. Η θετική επίδραση των αρνητικών δυνάμεων άνωσης στον πίσω άξονα αναπαρίσταται γραφικά στο σχήμα 3.14. Στη δοκιμή του αυτοκινήτου χρησιμοποιήθηκαν ρυθμιζόμενες πτέρυγες με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεταβολή των αεροδυναμικών δυνάμεων. Η γωνία περιστροφής του τιμονιού αυξήθηκε μαζί με την αυξανόμενη πλευρική επιτάχυνση καθώς οι πτέρυγες εκτεινόταν προς τα πάνω με σκοπό να δημιουργήσουν αρνητικές δυνάμεις στο πίσω τμήμα του αυτοκινήτου. Αυτό σημαίνει ότι το όχημα μπορούσε να υποστρέφει και κατ' επέκταση να είναι πιο εύκολα ελεγχόμενο. Δίνοντας στα εμπρόσθια πτερύγια αρνητική γωνία, η αρνητική άνωση που αναπτύσσεται στον άξονα μπροστά εξαναγκάζει το όχημα να υπερστρέφει, αντίδραση η οποία είναι λιγότερο επιθυμητή. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν για ταχύτητα 120 km/h.



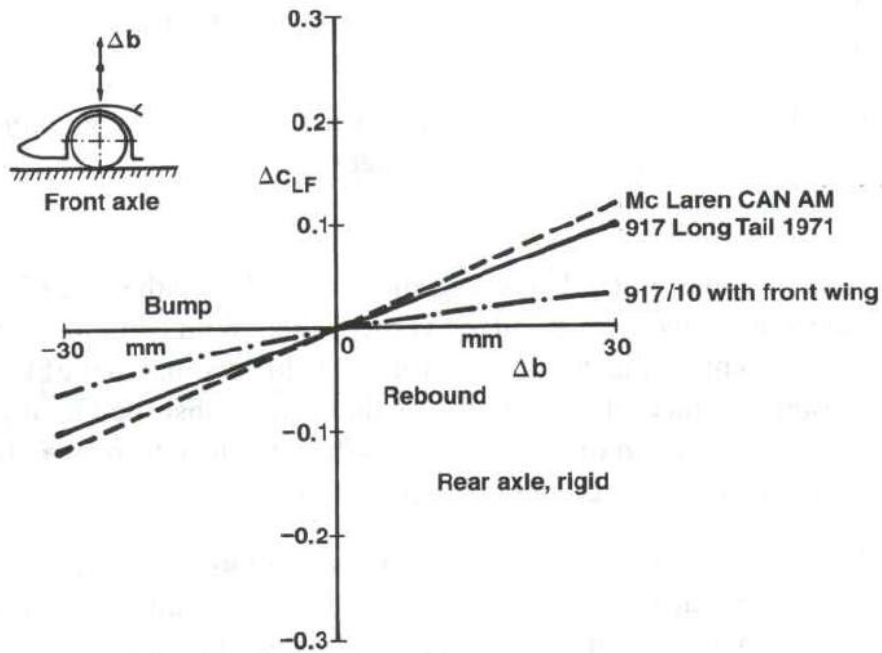
Σχήμα 3.14: Καθώς το όχημα στρίβει διατηρώντας την ευστάθειά του, εκδηλώνει τάσεις υποστροφής στην περίπτωση που στον πίσω άξονα αναπτυχθούν δυνάμεις αρνητικής άνωσης.

Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν πως μειώνοντας τις δυνάμεις άνωσης, η απόκριση του οχήματος μπορούσε να βελτιωθεί κατά τη διάρκεια των ελιγμών. Οι περιορισμένες δυνάμεις άνωσης βελτίωσαν την πέδηση και τη στροφή, τομείς όπου τα ελαστικά διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο. Η κάτω καμπύλη της εικόνας 8,36 δείχνει τις τιμές της επιβράδυνσης κατά τη διάρκεια της πέδησης σε ένα στενό δρόμο για δεδομένη αρχική ταχύτητα. Όπως φαίνεται, το όχημα που είναι εξοπλισμένο με αεροδυναμικά βοηθήματα για τη μείωση των δυνάμεων άνωσης, φρενάρει πιο αποτελεσματικά και ακινητοποιείται κατά 1'' νωρίτερα σε σύγκριση με το όχημα που δεν είναι εξοπλισμένο με τα βοηθήματα αυτά. Επίσης ο έλεγχος του αυτοκινήτου είναι ευκολότερος, δεδομένου ότι δεν χρειάστηκαν όπως φαίνεται να γίνουν τόσες πολλές διορθώσεις κατά τη στροφή.

3.3.2.2: Γωνία προσβολής – Παρεκκλίνουσα ροή του αέρα.

Μέχρι τώρα, τα συμπεράσματα έχουν βασιστεί στην υπόθεση κατά την οποία θέλαμε οι αεροδυναμικοί συντελεστές να είναι σταθεροί. Στην πραγματικότητα όμως, οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συμπεριφορά του οχήματος ως προς το οδόστρωμα και από τη διεύθυνση της ροής του αέρα με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Κατ' επέκταση, οι δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω της αεροδυναμικής και οι επιδράσεις τους στο χειρισμό του οχήματος, μεταβάλλονται ανάλογα.

Όταν το όχημα περνάει πάνω από κάποιο μικρό ύψωμα, η αναπήδηση του εμπρόσθιου άξονα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της γωνίας προσβολής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15, ο συντελεστής άνωσης C_L στον εμπρόσθιο άξονα αυξάνεται και εντείνει περαιτέρω το φαινόμενο της αναπήδησης. Κατά την ακόλουθη φάση των αναπηδήσεων, η διαδικασία αναστρέφεται και οι αναπηδήσεις μειώνονται λόγω της μειωμένης άνωσης.



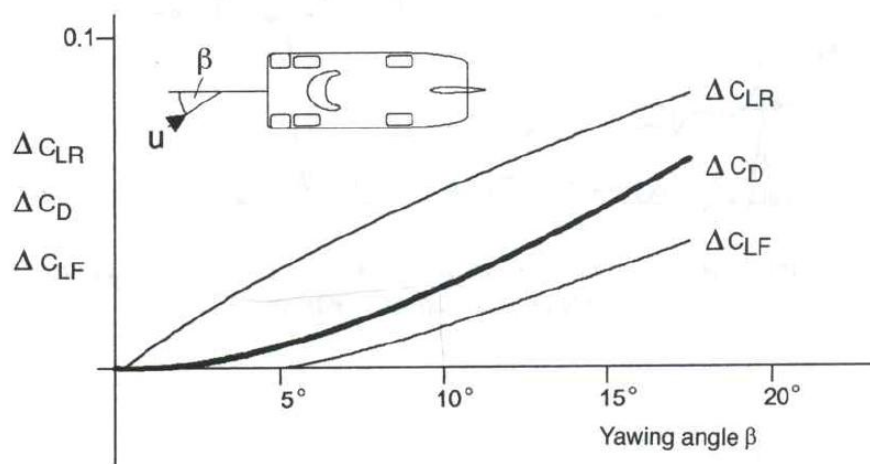
Σχήμα 3.15: Οι δυνάμεις άνωσης στον εμπρόσθιο άξονα, αυξάνονται σε περίπτωση που το όχημα πραγματοποιεί αναπηδήσεις.

Για να επιτευχθεί η ευστάθειας οδήγησης, πρέπει να υπάρξει η αντίθετη αντίδραση. Ωστόσο έχει αποδειχθεί πως όλες οι πρόσφατες ρυθμίσεις που έγιναν είτε στο εμπρόσθιο είτε στο ουραίο τμήμα του οχήματος, όλες παράγουν το αποτέλεσμα που περιγράφεται στο σχήμα 3.15. Δηλαδή δεν έχουν σταθερή συμπεριφορά κορυφής. Η μόνη επιλογή για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό είναι η χρήση ρυθμιζόμενων πτερυγίων, κάτι που απαγορεύεται όμως από τους κανονισμούς.

Οι συνθήκες παρεκκλίνουσας ροής του αέρα, δηλαδή ροή αέρα που βάλει το αυτοκίνητο από μία γωνία έστω U , ως προς το διαμήκη άξονα, δημιουργούνται λόγω των πλευρικών ανέμων ή όταν το όχημα στρίβει. Ο πλευρικός άνεμος και η ροή του αέρα που δημιουργείται από την ίδια την κίνηση του οχήματος συνδυάζονται και σχηματίζουν εν τέλει μία ροή αέρα η οποία δεν είναι προς την διεύθυνση του οχήματος. Κατά τη στροφή, τα ελαστικά πρέπει να αναπτύξουν μία ορισμένη γωνία ολίσθησης έτσι ώστε να παράγουν πλευρικές δυνάμεις. Η συνισταμένη γωνία παρέκκλισης του

αμαξώματος είναι ίση με τη γωνία ολίσθησης, δηλαδή περίπου 10° για τα κανονικά λάστιχα και μέχρι 8° για τα αγωνιστικά.

Η συνισταμένη παρεκκλίνουσα ροή του αέρα προκαλεί κατά κανόνα την αύξηση της αντίστασης και ταυτόχρονη μείωση της αρνητικής άνωσης (Σχήμα 3.16). Σε μία τέτοια κατάσταση, η απώλεια της αρνητικής άνωσης στον πίσω άξονα, πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από την αντίστοιχη στον εμπρόσθιο άξονα ούτως ώστε να βελτιωθεί η ευστάθεια στην οδήγηση και η ασφάλεια.



Σχήμα 3.16: Ο συντελεστής οπισθέλκουσας μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία παρέκκλισης.

Η παρεκκλίνουσα ροή του αέρα δεν επηρεάζει μόνο τις δυνάμεις οπισθέλκουσας και άνωσης, αλλά ασκεί μεγάλη επιρροή στις πλευρικές δυνάμεις που δρουν στο μπροστά και πίσω άξονα του οχήματος και κατ' επέκταση στη ροπή ως προς τον κάθετο άξονα του αυτοκινήτου. Στα συνηθισμένα οχήματα, το **κέντρο της πίεσης**, δηλαδή το σημείο που δρουν οι δυνάμεις αέρα, βρίσκεται μπροστά από το κέντρο βάρους, με αποτέλεσμα το σημείο εφαρμογής των πλευρικών δυνάμεων να απορροφάται από τα ελαστικά. Για το λόγο αυτό, η παρεκκλίνουσα ροή του αέρα προκαλεί τη δημιουργία ροπής, η οποία ωθεί το όχημα να περιστραφεί ως προς τη διεύθυνση του εισερχόμενου αέρα και συνεπώς να αποσταθεροποιηθεί.

Πραγματοποιώντας ιδιαίτερες ρυθμίσεις κατά το σχεδιασμό και με τη χρήση κάθετων πτερυγίων, το κέντρο πίεσης μπορεί να μετατοπιστεί προς το πίσω τμήμα του οχήματος. Η ροπή που θα προκύψει σε μία τέτοια περίπτωση βοηθά το όχημα να στρίβει εντός του πεδίου ροής του αέρα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ευστάθεια.

Η πίεση της ροής του αέρα που προκαλείται από την πλευρική ολίσθηση των ελαστικών κατά τη στροφή του οχήματος, ερμηνεύεται ως πλευρικές δυνάμεις οι οποίες δρουν κατά το εσωτερικό της στροφής και ουσιαστικά αντίθετα ως προς τις φυγόκεντρες δυνάμεις. Αυτό το φαινόμενο σταθεροποίησης του οχήματος εξουδετερώνεται από την απώλεια αρνητικής άνωσης η οποία με τη σειρά της προκαλεί την αποσταθεροποίησή του. Για μειούμενο φορτίο στους τροχούς, μία δεδομένη πλευρική δύναμη προκαλεί μεγαλύτερες γωνίες ολίσθησης.

3.3.2.3: Απόρρευμα – Κενά αέρος.

Μέχρι τώρα έχουμε δεχτεί πως τα οχήματα κινούνται ευθεία προς μία ομαλή (undisturbed) ροή. Κάτω από κανονικές συνθήκες οδήγησης όμως, κανένα αυτοκίνητο δεν κινείται αποκλειστικά στο δρόμο, αντίθετα πολλές φορές επηρεάζεται από τα απορρεύματα ή τα κενά αέρος που δημιουργούνται από τα προπορευόμενα οχήματα. Το φαινόμενο αυτό συναντάται πιο συχνά και σε μεγαλύτερη ένταση στους αγώνες ταχύτητας όπου τα αυτοκίνητα βρίσκονται σε μικρότερες μεταξύ τους αποστάσεις σε σχέση με τις αποστάσεις που τηρούνται στους δημόσιους δρόμους.

Δοκιμές που έγιναν σε αεροσήραγγες χρησιμοποιώντας επιβατηγά οχήματα, βάσει της απόστασης μεταξύ των αυτοκινήτων, η αντίσταση του αέρα μπορεί να μειωθεί μέχρι 30% για το προπορευόμενο αυτοκίνητο και μέχρι 37% για το αυτοκίνητο που ακολουθεί βρέθηκε ότι η επίδραση του απορρεύματος δεν επηρεάζει μόνο την αντίσταση, αλλά επίσης μεταβάλλει και τις δυνάμεις

άνωσης, δημιουργώντας την τάση για υπερστροφή και των δύο οχημάτων. Μελέτες για την επίδραση των πτερυγίων στα μονοθέσια όταν αυτά κινούνται σε σειρά, έδειξαν ότι η άνωση του εμπρόσθιου άξονα του αυτοκινήτου που ακολουθεί, δεν μεταβάλλεται. Ωστόσο, αν η τοποθέτηση των οχημάτων σχηματίζει εσοχή της τάξης του 42% του πλάτους τους, κατάσταση συνηθισμένη στους αγώνες, το όχημα που ακολουθεί παρουσιάζει απώλειες στην ολική άνωση ενώ παρουσιάζει την τάση για υπερστροφή.

3.3.2.4: Θεωρητικές διερευνήσεις.

Η μεταβολή των αεροδυναμικών συντελεστών ενός οχήματος και η διερεύνηση της επίδρασής της στο χειρισμό του, αποτελεί μία εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, δεδομένου ότι οι συντελεστές αυτοί είναι αλληλοεξαρτώμενοι και κανένας από αυτούς δεν μεταβάλλεται χωρίς να μεταβάλλει κάποιον άλλο. Επίσης οι απαιτούμενες δοκιμές οδήγησης κοστίζουν ακριβά και απαιτούν αρκετό χρόνο. Μία πιο εύκολη προσέγγιση λοιπόν είναι η χρήση της δυναμικής εξομοίωσης.

Το έτος 1975 είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται πρόγραμμα εξομοίωσης, για να εξεταστεί η επίδραση των μεταβαλλόμενων συντελεστών αεροδυναμικής στο χειρισμό του οχήματος, κατά τη διάρκεια οδήγησης με ελιγμούς. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Με τη μείωση του συντελεστή άνωσης C_{LF} , στον εμπρόσθιο άξονα, η τάση για υποστροφή ελαττώνεται και το κέρδος σε σταθερότητα του πίσω άξονα γεγονός που έχει αρνητικές συνέπειες στον έλεγχο του οχήματος. Στα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής, ο συντελεστής άνωσης έπρεπε να είναι μηδενικός ή στην χειρότερη περίπτωση να έχει μικρές θετικές τιμές ώστε να είναι αποδεκτός.

- Η αρνητική άνωση στον πίσω άξονα αυξάνει την ευστάθεια και βελτιώνει τον έλεγχο του οχήματος σε όλες τις συνθήκες οδήγησης. Για το λόγο αυτό, η άνωση στον πίσω άξονα πρέπει να είναι τουλάχιστον μηδενική. Θετική άνωση συνεπάγεται αρνητικές συνέπειες.
- Ο συντελεστής ροπής πρόνευσης C_M , διαδραματίζει πολύ σπουδαίο ρόλο. Πρέπει πάντοτε να είναι θετικός, ώστε να διασφαλίζεται υψηλή οδηγική ευστάθεια.
- Χαμηλώνοντας τον ολικό συντελεστή άνωσης C_L , αυξάνεται η μέγιστη πλευρική επιτάχυνση και ο χειρισμός του οχήματος βελτιώνεται σημαντικά. Η αρνητική ολική άνωση είναι μία σημαντική ανάγκη, κυρίως στα αγωνιστικά οχήματα.
- Μείωση του συντελεστή πλευρικών δυνάμεων C_Y , βελτιώνει το χειρισμό σε απέναντι σε πλευρικούς ανέμους, χωρίς όμως να έχει κάποια σημαντική επίδραση κατά την οδήγηση με ελιγμούς.
- Η αύξηση του συντελεστή πλευρικών δυνάμεων στον πίσω άξονα C_{YR} , συνεπάγεται βελτίωση των χαρακτηριστικών ελέγχου κάτω από όλες τις συνθήκες οδήγησης. Αυτό αποτελεί χαρακτηριστικό φαινόμενο της επίδρασης σταθεροποίησης των αεροδυναμικών πλευρικών δυνάμεων.
- Ο αυξανόμενος συντελεστής ορμής παρέκκλισης C_N , τείνει να αποσταθεροποιήσει το όχημα κάτω από συνθήκες ύπαρξης πλευρικών ανέμων.
- Ο συντελεστής ροπής περιστροφής C_R , δεν επηρεάζει καθόλου το χειρισμό των οχημάτων.

Ο χειρισμός δεν επηρεάζεται μόνο από τους αεροδυναμικούς συντελεστές που προκύπτουν κατά την ευθεία οδήγηση, αλλά και από συντελεστές που προκύπτουν κατά την οδήγηση με ελιγμούς καθώς επίσης και από την ακριβή κίνηση της ροής. Για το λόγο αυτό κατά καιρούς έχουν γίνει επιπρόσθετες δοκιμές στις οποίες συμπεριληφθήκαν οι μεταβολές των συντελεστών κατά την οδήγηση με ελιγμούς, μεταβολές οι οποίες οφείλονται στην αλλαγή θέσης του οχήματος ως προς το οδόστρωμα και ως προς τη γωνία προσβολής τη ροής.

Οι αριθμητικές εξομοιώσεις πραγματοποιούνται για να προσδιορίσουν την κατανομή των δυνάμεων άνωσης που απαιτούνται, προκειμένου τα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής να είναι εύκολα ελεγχόμενα κάτω από την επίδραση των εξωτερικών διαταράξεων και κατά την οδήγηση με ελιγμούς.

- **Στροφή σταθερής κατάστασης:** Οι ιδιότητες της στροφής σταθερής κατάστασης είναι πολύ σημαντικές δεδομένου ότι αναδεικνύουν τα χαρακτηριστικά του χειρισμού ενός οχήματος, κι έχουν σημαντική επίδραση σε οποιοδήποτε ελιγμό που μπορεί να γίνει κατά την οδήγηση. Οχήματα με ουδέτερη άνωση στον εμπρόσθιο άξονα και ουδέτερη ή αρνητική στον πίσω άξονα, δείχνουν χαρακτηριστικά ασφαλούς οδήγησης, με μία ελαφρά τάση υποστροφής. Θετική άνωση στον πίσω άξονα συνεπάγεται αυτόματα με υπερστροφή.
- **Γωνία στροφής:** Η γωνία στροφής αντιστοιχεί στη μετάβαση από την ευθύγραμμη κίνηση στην περιστροφική, όταν το αυτοκίνητο στρίβει, και είναι πολύ σημαντική δεδομένου ότι αναπαριστά την πρώτη φάση ενός ελιγμού για αποφυγή κάποιου εμποδίου. Και σε αυτήν την περίπτωση ένα όχημα με ουδέτερη ή αρνητική άνωση στον πίσω άξονα επιδεικνύει μεγαλύτερη απόκριση σε μία τέτοια κατάσταση.

- **Μεταβολή φορτίου κατά τη στροφή σταθερής κατάστασης:** Ο συγκεκριμένος ελιγμός εξαρτάται κυρίως από τη ροπή πέδησης της μηχανής και από τη σχέση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Επιπλέον, οχήματα με θετική άνωση στον εμπρόσθιο άξονα και ουδέτερη στον πίσω ή ουδέτερη και αρνητική αντίστοιχα, παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερη ευστάθεια. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να ασκούνται θετικές δυνάμεις άνωσης στον πίσω άξονα.
- **Σταθερή στροφή με ανωμαλίες στο οδόστρωμα:** Σε αυτή τη συχνή κατάσταση, τα οχήματα με ουδέτερη και αρνητική άνωση στον μπροστά και πίσω άξονα αντίστοιχα, παρουσιάζουν τις μικρότερες παρεκκλίσεις από την πορεία τους.
- **Δοκιμές σε πλευρικούς ανέμους:** Οχήματα με ουδέτερη άνωση στον εμπρόσθιο άξονα και ουδέτερη ή αρνητική άνωση στον πίσω άξονα είναι λιγότερο επιρρεπή από τα οχήματα με διαφορετικές ρυθμίσεις.

Η παραπάνω θεωρητική διερεύνηση μας λέει ουσιαστικά πως ένα όχημα, για να είναι εύκολα ελεγχόμενο κάτω από τις συνθήκες οδήγησης που αναφέρθηκαν ανωτέρω, πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Μηδενικό συντελεστή άνωσης στον εμπρόσθιο άξονα μόνο με μία ελάχιστη θετική άνωση να είναι αποδεκτή.
2. Μηδενικό συντελεστή άνωσης στον πίσω άξονα με μία ελάχιστη αρνητική άνωση να είναι επιθυμητή. Η θετική άνωση στον άξονα αυτό πρέπει οπωσδήποτε να αποφεύγεται.

3.3.3: Ψύξη – Εξαερισμός.

Ένα σύστημα ψύξης σχεδιάζεται για να απομακρύνει ικανοποιητικά από κάποιο θερμαινόμενο μηχανικό τμήμα προς τον περιβάλλοντα αέρα, χωρίς να παρεμποδίζει την εξωτερική αεροδυναμική συμπεριφορά. Στο σημείο αυτό, ο αέρας αποχωρίζεται από την υπόλοιπη ροή γύρω από το αυτοκίνητο, και κατευθύνεται στα σημεία που πρέπει να ψυχθούν. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο αέρας απορροφά τη θερμότητα των τμημάτων αυτών, και τη μεταφέρει προς τον περιβάλλοντα αέρα.

Οι απώλειες τριβής στο εσωτερικό των αγωγών αυξάνουν την αντίσταση του αυτοκινήτου. Η διακλάδωση του αέρα επίσης επηρεάζει τις δυνάμεις άνωσης που ασκούνται στο όχημα.

Ακόμα όμως και τα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής πρέπει να συμβιβαστούν ως προς τις απαιτήσεις για θέρμανση, εξαερισμό και κλιματισμό όπως ακριβώς γίνεται με τα επιβατηγά οχήματα. Όμως τα αμιγώς αγωνιστικά και τα οχήματα μέγιστων επιδόσεων, περιορίζονται σε απλές εισόδους εξαερισμού. Λόγω της υψηλής ισχύος των μηχανών, τα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής χρειάζονται ένα ειδικό σύστημα ψύξης ούτως ώστε να παρέχουν καθημερινά την ίδια καταλληλότητα που παρέχουν και τα επιβατηγά. Κάποιες από τις πιο κρίσιμες δοκιμές για τα συστήματα ψύξης είναι η ανάβαση σε χαμηλές ταχύτητες οδήγησης, η οδήγηση σε υψηλές ταχύτητες, οι αγώνες ταχύτητας σε αυτοκινητοδρόμια και η κυκλοφορία σε πόλη με κίνηση.

Η μελέτη των συστημάτων ψύξης των αμιγώς αγωνιστικών αυτοκινήτων ή των αυτοκινήτων μέγιστων επιδόσεων, καθώς έχουν ένα προκαθορισμένο φάσμα εφαρμογών, είναι πιο απλή. Ωστόσο, η ισχύς της μηχανής τους και κατ' επέκταση η θερμότητα που πρέπει να διασκορπιστεί, είναι πολύ περισσότερη από εκείνη των αγωνιστικών οχημάτων παραγωγής.

Τα μέρη ενός αυτοκινήτου που απαιτούν ψύξη από τον αέρα είναι τα εξής:

1. Ψυγείο νερού
2. Ψυγείο αέρος (Intercooler)
3. Ψυγείο λιπαντικού (Μηχανή, μετάδοση, Πίσω διαφορικό)
4. Μηχανή, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος παροχής καυσίμου.
5. Ηλεκτρικό σύστημα.
6. Συμπιεστής ή υπερτροφοδότης.
7. Διαφορικό.
8. Φρένα.

3.4: Εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού.

Οι απαιτήσεις της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων υψηλών επιδόσεων συνοψίζονται ως εξής:

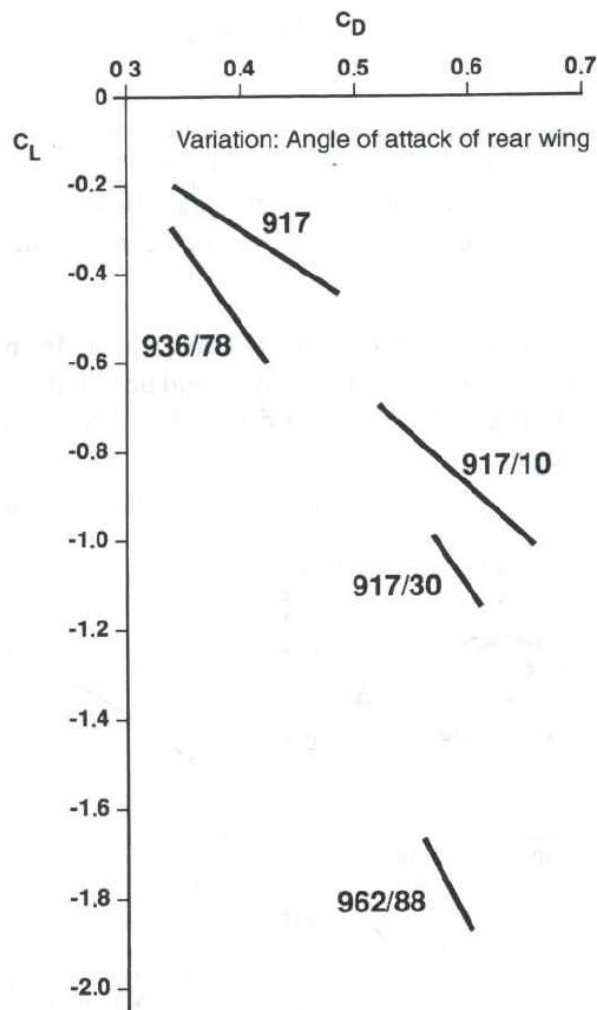
- Χαμηλός συντελεστής οπισθέλκουσας και μικρή εμπρόσθια επιφάνια για τον περιορισμό της αντίστασης του αέρα.
- Υψηλός λόγος αρνητικής άνωσης προς αντίσταση. Πάντοτε στην αεροδυναμική σχεδίαση δίνεται προτεραιότητα είτε στη μείωση της αντίστασης είτε στην αύξηση της αρνητικής άνωσης, ανάλογα πάντα με τον επιδιωκόμενο σκοπό.
- Μεγαλύτερες δυνάμεις αρνητικής άνωσης στον πίσω άξονα εν συγκρίσει με τον μπροστά. Καθόλου άνωση δεν πρέπει να υφίσταται από παρεκκλίνοντα ρεύματα αέρα με γωνία προσβολής μέχρι 10 – 15°, ανάλογα με την επιδιωκόμενη χρήση.
- Σε περίπτωση παρεκκλίνουσας ροής αέρα, πρέπει να παραχθεί κατάλληλη ροπή ως προς τον κάθετο άξονα.

- Επάρκεια σε ψύξη και εξαερισμό, χωρίς σημαντική αύξηση των συντελεστών αεροδυναμικής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι παραπάνω απαιτήσεις μπορούν να εκπληρωθούν βασιζόμενες στις εναλλακτικές λύσεις αεροδυναμικής σχεδίασης που περιγράφονται στη συνέχεια.

3.4.1: Αντίσταση – Άνωση.

Η οπισθέλκουσα δύναμη είναι άμεσα ανάλογη με το γινόμενο του συντελεστή οπισθέλκουσας και την εμπρόσθια επιφάνεια. Περιορίζοντας και τους δύο αυτούς παράγοντες σε ένα αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων μπορεί συχνά να οδηγήσει σε αντικρουόμενους σκοπούς. Δεν είναι πάντα εφικτό να ελαχιστοποιήσουμε το συντελεστή οπισθέλκουσας διότι οι κανονισμοί ενδέχεται να ορίζουν τη χρήση ακάλυπτων τροχών, πλατιών ελαστικών για καλύτερη πρόσφυση, υψηλές δυνάμεις αρνητικής πίεσης και μεγάλη ποσότητα αέρα ψύξης. Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις τείνουν να αυξήσουν την αεροδυναμική αντίσταση.

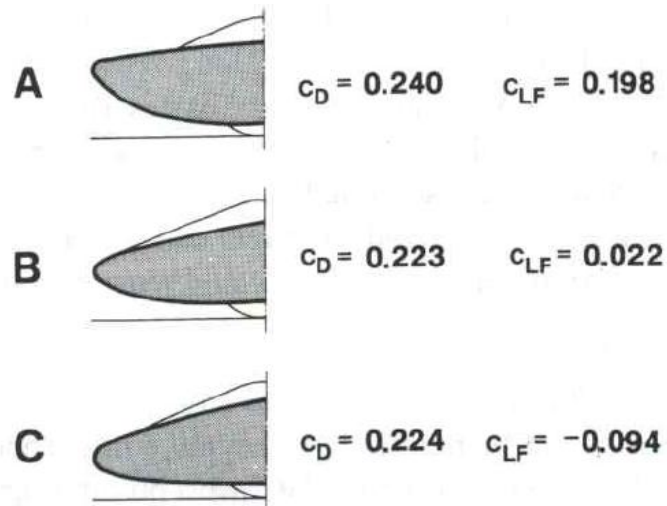


Σχήμα 3.17: Γραφική παράσταση που αναδεικνύει τις συνέπειες των ολοένα υψηλότερων δυνάμεων αρνητικής άνωσης οι οποίες επηρεάζουν τις τιμές του συντελεστή οπισθέλκουσας.

Η δυναμική μείωση της εμπρόσθιας επιφάνειας είναι περιορισμένη λόγω του ότι το όχημα πρέπει είναι πλατύ για την επίτευξη καλύτερου χειρισμού, ενώ οι τροχοί πρέπει να είναι μεγάλης διαμέτρου προκειμένου να χωρέσουν οι δίσκοι των αγωνιστικών φρένων.

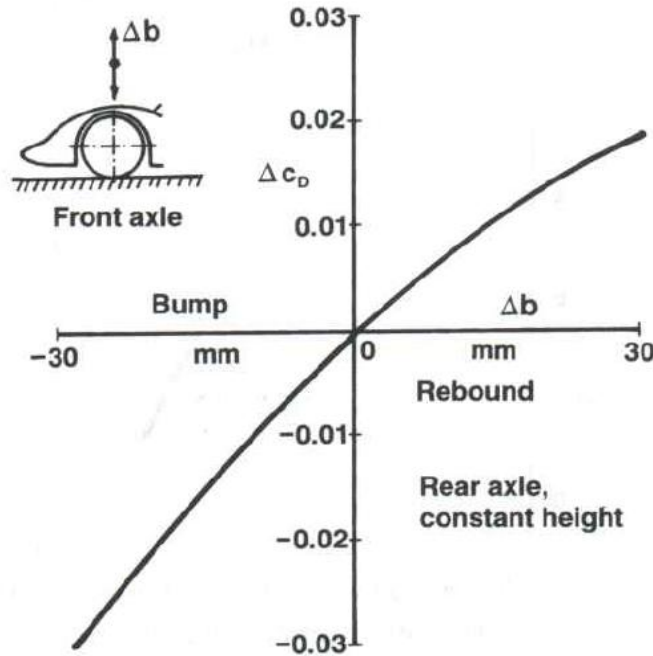
Ο σχεδιασμός του αμαξώματος επηρεάζει καθοριστικά την αντίσταση του αέρα. Ένα κωνικό και λεπτό ρύγχος μειώνει την αντίσταση του αέρα κάτι που εξαρτάται όμως σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή θέση της άκρης σχετικά με το οδόστρωμα. Εάν η άκρη του ρύγχους είναι σε σχετικά μεγάλη απόσταση από το

οδόστρωμα, τότε οι δυνάμεις άνωσης στον εμπρόσθιο άξονα είναι μεγάλες, δεδομένου ότι αναπτύσσεται θετική πίεση στο κάτω τμήμα του ρύγχους. Χαμηλώνοντας την άκρη, αρχίζει να παράγεται αρνητική άνωση. Σε μία μεσαία θέση, ο συντελεστής αντίστασης μειώνεται και η άνωση παραμένει θετική. Αυτό ισχύει επειδή το ρύγχος πρέπει να χαμηλώσει περαιτέρω έτσι ώστε να έχουμε χαμηλό συντελεστή αντίστασης και αρνητική άνωση.



Σχήμα 3.18: όσο χαμηλότερο είναι το εμπρόσθιο τμήμα τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής άνωσης στον εμπρόσθιο άξονα.

Τα δεδομένα που προέκυψαν στο σχήμα 3.18 αφορούν μοντέλο του οποίου το πάτωμα σχηματίζει μία ήπια καμπύλη. Κάτι τέτοιο όμως χρησιμοποιείται μόνο από ορισμένα οχήματα που εκμεταλλεύονται την επίδραση του εδάφους και όχι από τα οχήματα παραγωγής.

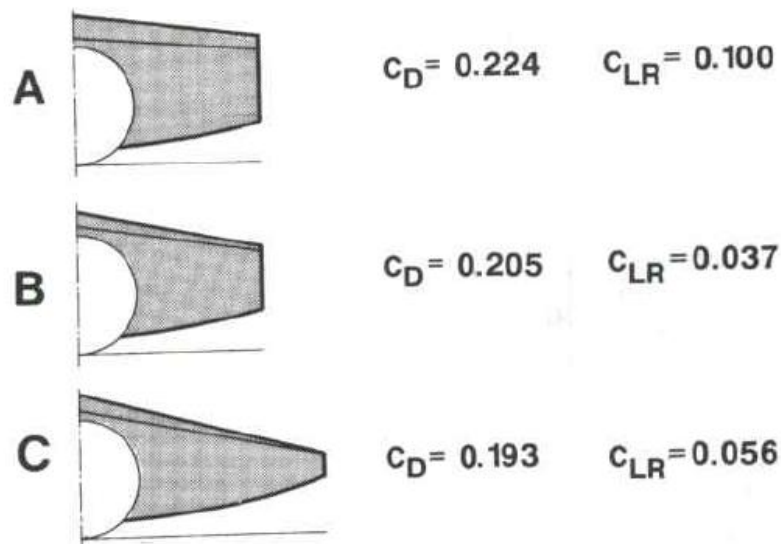


Σχήμα 3.19: Γραφική παράσταση της μεταβολής του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του ύψους του εμπρόσθιου τμήματος.

Τα αυτοκίνητα σήμερα σπάνια διαθέτουν καμπυλοειδές πάτωμα διότι είναι δύσκολο να καλυφθούν όλα τα τμήματα του πλαισίου τους, αλλά πολύ περισσότερο επειδή ορισμένα τμήματα πρέπει να είναι εκτεθειμένα στη ροή του αέρα. Ωστόσο, η αντίσταση και η άνωση μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με το να παρεμποδίσουμε τον αέρα να περάσει κάτω από το ακανόνιστο πάτωμα και αυτό μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση μίας κάθετης προέκτασης του ρύγχους. Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι να μειώσουμε την απόσταση μεταξύ του οχήματος και του εδάφους. Χαμηλώνοντας το εμπρόσθιο άκρο του οχήματος, η αντίσταση του αέρα μειώνεται, καθώς η ποσότητα του αέρα που περνάει από το πάτωμα του αυτοκινήτου είναι περιορισμένη.

Η ρύθμιση του πίσω άκρου είναι ακόμα μεγαλύτερης σπουδαιότητας για τις αεροδυναμικές ιδιότητες. Ένα επίμηκες κωνικό ουραίο άκρο έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μικρής δύναμης αντίστασης αλλά μειονεκτεί στο ότι αυξάνει σημαντικά το μήκος του αυτοκινήτου. Συνεπώς μία τέτοια ρύθμιση είναι εφικτή μόνο σε οχήματα δοκιμών (record cars). Και τα δύο ακραία

τμήματα του αυτοκινήτου μπορούν να κοπούν κάθετα σε κάποιο σημείο χωρίς αυτό να προκαλεί σημαντική αύξηση του συντελεστή αντίστασης. Στο σχήμα 3.20, γίνεται σύγκριση ουραίων τμημάτων τα οποία συγκλίνουν σε διαφορετικά μήκη. Μία μικρή περιοχή απορρεύματος είναι επιθυμητή και μπορεί να επιτευχθεί είτε με κωνική μορφή μικρού μήκους και μεγάλης κλίσης είτε με κωνική μορφή μεγάλου μήκους και μικρής κλίσης.



Σχήμα 3.20: Όσο πιο επίμηκες είναι το ουραίο τμήμα του οχήματος τόσο μικρότερος είναι και ο συντελεστής αντίστασης.

Έχει αποδειχτεί, πως σχεδόν όλες οι διαδικασίες μείωσης της αντίστασης, επηρεάζουν τις δυνάμεις άνωσης. Για ασφάλεια κατά την οδήγηση και καλό χειρισμό, τα οχήματα υψηλών επιδόσεων πρέπει να αναπτύσσουν αρνητικές δυνάμεις άνωσης. Για το λόγο αυτό το όχημα πρέπει να σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδει αρνητική άνωση και ταυτόχρονα, ελάχιστη δυνατή οπισθέλκουσα. Τρία είναι τα σημεία εφαρμογής στα οποία πρέπει να εστιάσουμε, ώστε να έχουμε παραγωγή αρνητικής άνωσης :

- Βασικές ρυθμίσεις του οχήματος.
- Αρνητικά κεκλιμένα πτερύγια.
- Ενσωμάτωση του φαινομένου «επίδρασης του εδάφους».

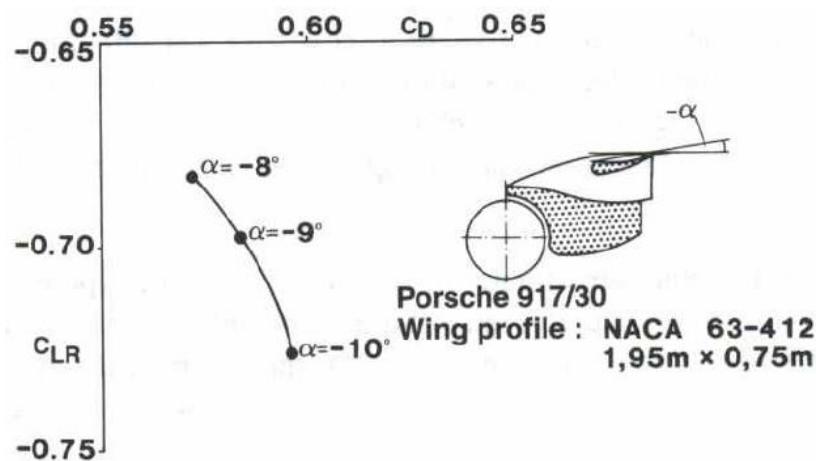
3.4.1.1: Επίδραση των βασικών ρυθμίσεων του οχήματος.

Οι βασικές ρυθμίσεις του οχήματος για την ελάχιστη δυνατή άνωση συνιστούν χαμηλό κοίλο ρύγχος μπροστά, επίπεδη άνω επιφάνεια, καθώς επίσης ανυψούμενο ουραίο τμήμα. Το ανυψούμενο ουραίο τμήμα μπορεί να αντικατασταθεί και από κατάλληλη αεροτομή, έτσι ώστε το τελικό άκρο του πίσω τμήματος να έχει μία σχετική διαφορά ύψους ως προς το υπόλοιπο αμάξωμα. Χαμηλώνοντας το εμπρόσθιο τμήμα του αυτοκινήτου δημιουργείται αρνητική γωνία προσβολής, και αυτή είναι μία επιπλέον μέθοδος μείωσης των δυνάμεων άνωσης.

3.4.1.2: Πτερύγια.

Οι υψηλές τιμές αρνητικής άνωσης ($C_L = -1$) δεν μπορούν να επιτευχθούν αποκλειστικά και μόνο από τις βασικές ρυθμίσεις του οχήματος. Για να γίνει αυτό απαιτούνται ανάλογα κεκλιμένα πτερύγια η επίδραση των οποίων αυξάνεται όσο αυξάνεται το ύψος τους από το αμάξωμα του οχήματος και εισέρχονται στην αδιατάραχτη ροή του αέρα. Επιπρόσθετες κάθετες δυνάμεις μπορούν να επιτευχθούν με την τοποθέτηση του ουραίου πτερυγίου μετά από τον πίσω άξονα και του εμπρόσθιου, μετά από τον μπροστινό άξονα, με αποτέλεσμα να παράγεται ισχυρότερο το φαινόμενο της «δύναμης του μοχλού».

Το σχήμα 3.21 αναπαριστά γραφική παράσταση κατά την οποία φαίνεται η σχέση ανάμεσα στη μεταβολή της γωνίας προσβολής της πίσω αεροτομής αυτοκινήτου και της μεταβολής των συντελεστών άνωσης και αντίστασης. Ο μέσος λόγος συντελεστή άνωσης πίσω άξονα και συντελεστή αντίστασης είναι $C_{LR}/C_D = -1.83$.



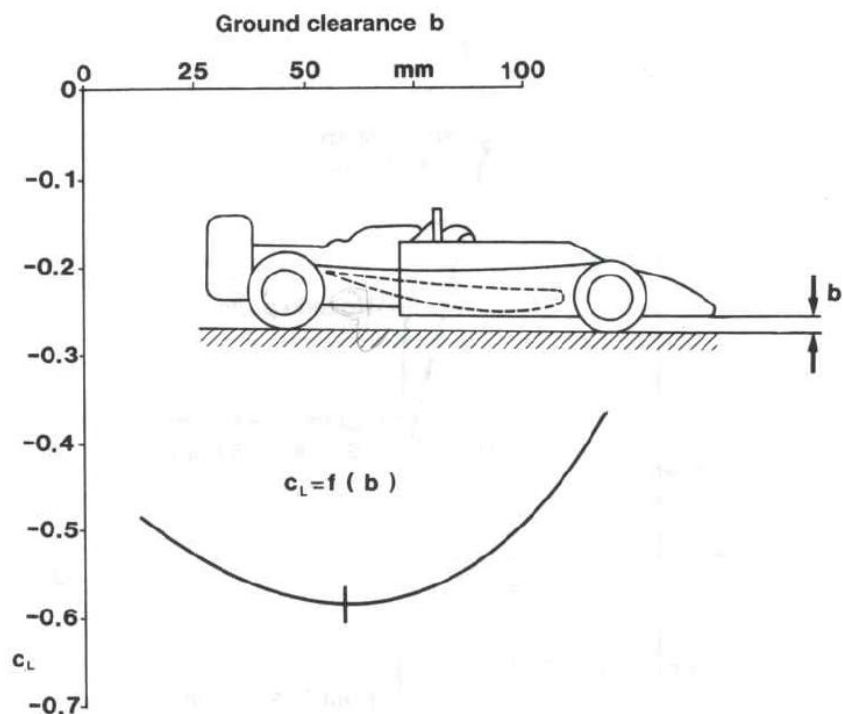
Σχήμα 3.21: Γραφική παράσταση σύμφωνα με την οποία αυξάνοντας τη γωνία της πίσω πτέρυγας του οχήματος, αυξάνονται οι δυνάμεις αρνητικής άνωσης ενώ παράλληλα η αντίσταση του αέρα γίνεται πιο έντονη.

Οι αεροτομές μας δίνουν πάντα ένα καλύτερο λόγο συντελεστή άνωσης προς αντίστασης σε σύγκριση με ένα ανυψωμένο ουραίο τμήμα. Έτσι και η συγκεκριμένη πτέρυγα στην οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αποδίδει ένα σαφώς υψηλότερο συντελεστή αρνητικής άνωσης σε σχέση με ένα ανυψωμένο ουραίο τμήμα ενώ ταυτόχρονα οι συντελεστές αντίστασης και στις δύο περιπτώσεις παραμένουν ίδιοι.

3.4.1.3: Επίδραση του εδάφους.

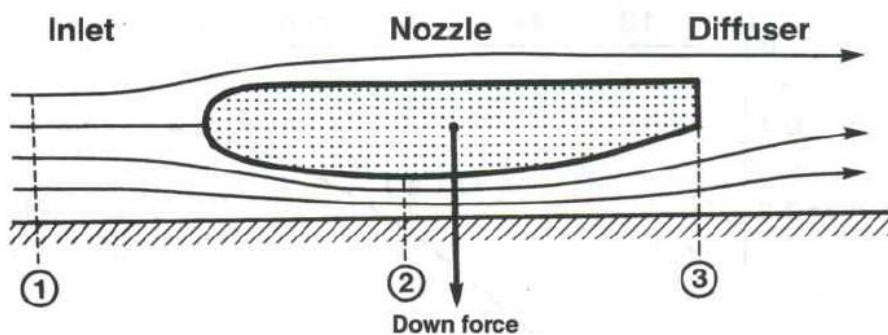
Η επίδραση του εδάφους χρησιμοποιεί τη ροή του αέρα ανάμεσα στην επιφάνεια του οδοστρώματος και του πατώματος για τη δημιουργία κάθετης δύναμης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στα αγωνιστικά αυτοκίνητα της Formula I, και τα αυτοκίνητα που την ακολούθησαν χαρακτηρίστηκαν ως «Wing Cars» ή «Venturi Cars» και ο δεύτερος χαρακτηρισμός είναι μάλλον ο πιο αντιπροσωπευτικός, δεδομένου ότι η χαμηλή πίεση που δημιουργείται, είναι αποτέλεσμα του ειδικά διαμορφωμένου πατώματος που σε συνδυασμό με το επίπεδο οδόστρωμα, συνθέτουν το λεγόμενο «ακροφύσιο Venturi». Η αρνητική πίεση διατηρείται χάριν των πλευρικών προεκτάσεων που είναι πακτωμένα στο όχημα και εκτείνονται μέχρι το έδαφος, εμποδίζοντας τον αέρα να εισέρθει στην περιοχή χαμηλής πίεσης.

Αποτέλεσμα αυτής της εφαρμογής είναι η επίτευξη των άνευ προηγουμένου θετικών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, από τα οποία ξεχωρίζει η υπερβολικά υψηλή αρνητική άνωση σε συνδυασμό με μία σχετικά επιθυμητή οπισθέλκουσα δύναμη. Χαρακτηριστικές μετρήσεις στα οχήματα αυτά έδειξαν πως ο συντελεστής αρνητικής άνωσης μπορούσε να φτάσει μέχρι και την τιμή $C_L = - 2.6$, η οποία αναλογεί σε κάθετη δύναμη 16 KN στην ταχύτητα των 290 Km/h, τη στιγμή που το βάρος του αυτοκινήτου ήταν μόλις 6.5 KN. Η επίδραση του εδάφους αναλογεί σε ένα ποσοστό της τάξης του 80% της ολικής αρνητικής άνωσης με τους συντελεστές πίεσης στο πάτωμα να αγγίζουν τιμές μέχρι και $C_p = - 2,0$. Επίσης, η αρνητική άνωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση του εδάφους και από το ύψος του διάκενου και του οδοστρώματος.



Σχήμα 3.22: Μεταβολή των δυνάμεων αρνητικής άνωσης συναρτήσει της απόστασης από το έδαφος

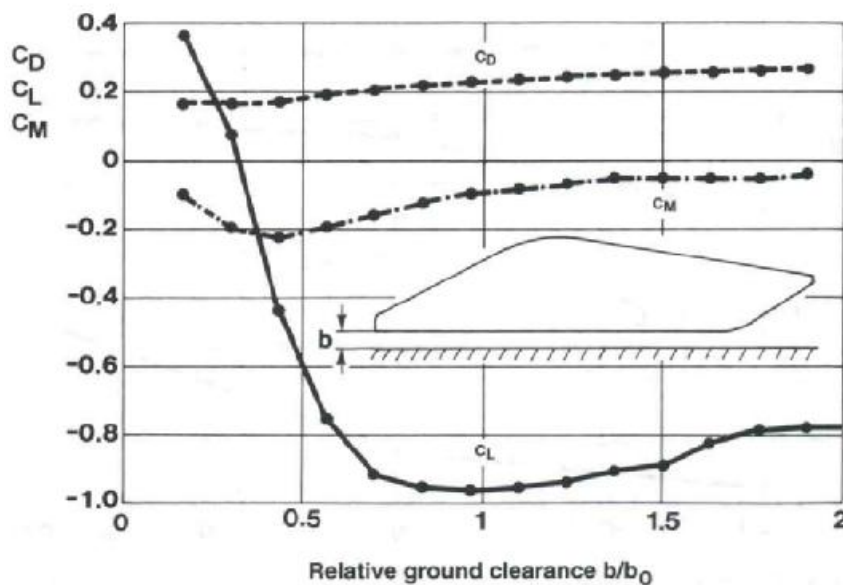
Το φαινόμενο της επίδρασης του εδάφους, βασίζεται στο γεγονός όπου η επιφάνεια του οδοστρώματος και του πατώματος σχηματίζουν ταυτόχρονα ένα ακροφύσιο κι ένα διαχύτη.



Σχήμα 3.23: Επιτάχυνση του αέρα και αύξηση της στατικής πίεσης καθώς διέρχεται από πάτωμα οχήματος Venturi.

Ένα μέρος του αέρα που προσκρούει πάνω στο αυτοκίνητο, οδηγείται κάτω από το αυτοκίνητο και επιταχύνεται στο διάστημα εκείνο που σχηματίζει ακροφύσιο ανάμεσα στο πάτωμα και το οδόστρωμα. Στο ακόλουθο τμήμα που σχηματίζει διαχύτη, η ροή του αέρα επιβραδύνεται στην αρχική ταχύτητα εισόδου. Η μείωση της πίεσης και κατ' επέκταση το μέτρο της αρνητικής κάθετης δύναμης που θα αναπτυχθεί, εξαρτάται κυρίως από το λόγο των διατομών διαχύτη/ ακροφυσίου.

Η ποσότητα του αέρα ανάμεσα στο όχημα και το οδόστρωμα εξαρτάται κυρίως από την απόσταση ανάμεσα στο πάτωμα και το οδόστρωμα και συνεπώς και οι κάθετες δυνάμεις που αναπτύσσονται, εξαρτώνται από την ίδια παράμετρο. Το σχήμα 3.24 αναπαριστά τη συσχέτιση αυτή.



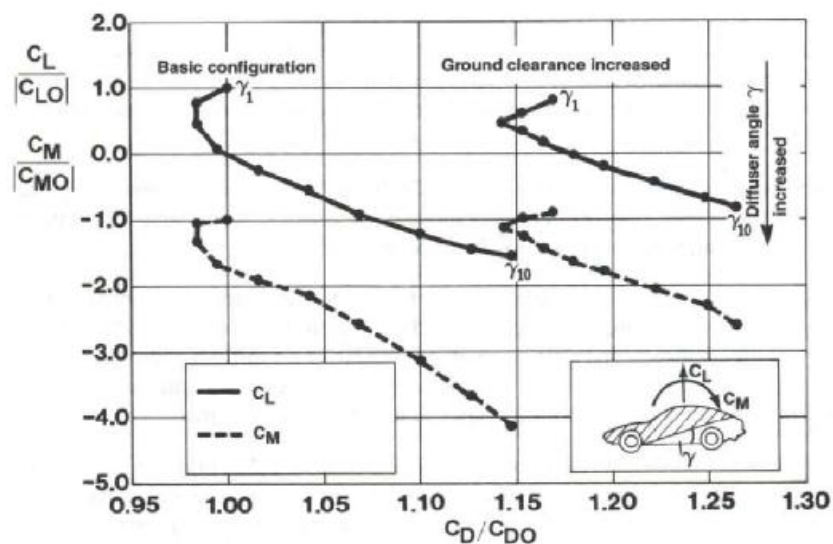
Σχήμα 3.24: Ο συντελεστής άνωσης μειώνεται ανάλογα με τη μείωση της απόστασης του πατώματος από το έδαφος και στη συνέχεια αυξάνεται ελάχιστα.

Πολύ μικρές αποστάσεις από το έδαφος συνεπάγονται την ανάπτυξη θετικών δυνάμεων άνωσης, δεδομένου ότι η ροή ανάμεσα στο πάτωμα και το οδόστρωμα είναι περιορισμένη. Με αυξημένη απόσταση ανάμεσα στις δύο

επιφάνειες (πάτωμα – οδόστρωμα), η ροή του αέρα στο τμήμα που σχηματίζει ακροφύσιο, παράγει χαμηλή πίεση γεγονός που σημαίνει, ότι η ολική άνωση του οχήματος μειώνεται και λαμβάνει αρνητικές τιμές και στη συνέχεια, όσο η απόσταση αυξάνεται (τμήμα διαχύτη), αυξάνεται συνεχώς. Η αύξηση της πίεσης οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας τη ροής.

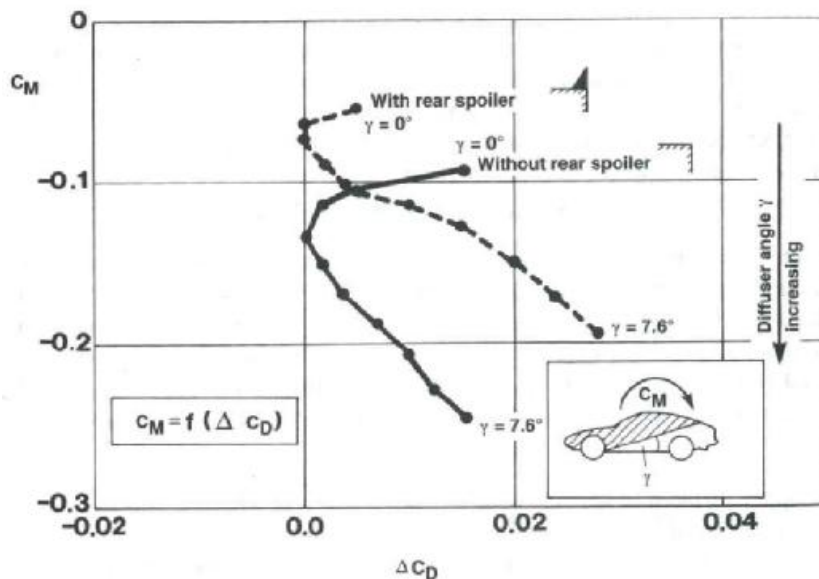
Η αντίσταση του αέρα αυξάνεται συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του πατώματος και του οδοστρώματος μολονότι η αύξηση αυτή είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη των δυνάμεων άνωσης. Επίσης, η απόκριση της ροπής πρόνευσης είναι παρόμοια με αυτή των δυνάμεων άνωσης. Συνεπώς οι δυνάμεις αυτές, έχουν ως σημείο εφαρμογής κυρίως την περιοχή του ρύγχους του αυτοκινήτου.

Μεταβάλλοντας το υψόμετρο ολόκληρου του αυτοκινήτου σε σχέση με το έδαφος, προκύπτει πως οι δυνάμεις άνωσης εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία προσβολής. Ο διαχύτης στο ουραίο τμήμα, επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή άνωσης και τη ροπή πρόνευσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία του διαχύτη τόσο μικρότεροι είναι οι συντελεστές άνωσης και ροπής πρόνευσης.



Σχήμα 3.25: Η αύξηση της γωνίας του πίσω διαχύτη συνεπάγεται μείωση της άνωσης και της ροπής πρόνευσης.

Δεν είναι ποτέ δυνατόν να επιτευχθεί θετική ροπή πρόνευσης με τροποποιήσεις που αφορούν το πάτωμα του αυτοκινήτου, αλλά μόνο εάν τοποθετηθούν αεροτομές ή πτέρυγες στο πίσω τμήμα του αυτοκινήτου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.26, μία επιπρόσθετη αεροτομή μειώνει την αρνητική ροπή πρόνευσης. Το μειονέκτημα βέβαια είναι, πως οι αεροτομές αυξάνουν την παραγωγή αρνητικής άνωσης, ταυτόχρονα όμως αυξάνουν και την αντίσταση του αέρα με αποτέλεσμα να διαταράσσεται ο ούτως ή άλλως θετικός λόγος C_L/C_D της επίδρασης του εδάφους.



Σχήμα 3.26: Μείωση της αρνητικής ροπής πρόνευσης ύστερα από τοποθέτηση επιπρόσθετης αεροτομής.

Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων αυτών επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι το φαινόμενο επίδρασης του εδάφους δεν επηρεάζεται μόνο από τις πλευρικές προεκτάσεις, αλλά εξαρτάται και από τις εξής παραμέτρους.

1. Τοποθέτηση συνδυασμού ακροφυσίου – διαχύτη (Αγωγός Venturi) στο επίπεδο πάτωμα με σκοπό την κατάλληλη ροή του αέρα κάτω από το όχημα.

2. Καθορισμός της κατάλληλης απόστασης μεταξύ οδοστρώματος και πατώματος με σκοπό το βέλτιστο επίπεδο χαμηλής πίεσης.
3. Τοποθέτηση αεροτομής στο πίσω τμήμα για την ανάπτυξη ευνοϊκής κατανομής της άνωσης.

Η επίδραση του βασικού αμαξώματος (εκτός του πατώματος) στην επίδραση του εδάφους έχει διερευνηθεί και στα μονοθέσια οχήματα, χρησιμοποιώντας δύο μοντέλα τύπου CART σε δύο διαφορετικές εκδόσεις, μία χαμηλών και μία υψηλών ταχυτήτων. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο εκδόσεις έγκειται κυρίως στην τοποθέτηση διαφορετικών εμπρόσθιων και πίσω πτερυγίων.

Σαφώς, το αμάξωμα από μόνο του παράγει λιγότερη αρνητική άνωση, με τη συνεισφορά του στο σύνολο των δυνάμεων αρνητικής άνωσης να φτάνει το 22%. Επίσης, η κατανομή της αρνητικής πίεσης στο βασικό αμάξωμα, είναι σχεδόν ίδια με την κατανομή σε ολόκληρο το αυτοκίνητο. Συνεπώς το βασικό αμάξωμα εξυπηρετεί τη σωστή κατανομή των δυνάμεων αρνητικής άνωσης ενώ οι πτέρυγες και οι αεροτομές, την αύξησή τους.

3.4.1.4: Ειδικές ρυθμίσεις του αμαξώματος – Μονοθέσια.

Αύξηση του πλάτους των διατομών των στομιών εισαγωγής μπροστά από τον πίσω άξονα του οχήματος: Η συνολική αρνητική άνωση αυξάνεται και η κατανομή της άνωσης μετατοπίζεται προς τα πίσω ενώ η δύναμη αντίστασης παραμένει αμετάβλητη. Οι υψηλότερες δυνάμεις αρνητικής άνωσης που προέκυψαν κατά την αύξηση του πλάτους των στομιών εισαγωγής, οφείλονται στο ότι η ροή του αέρα στην πίσω πτέρυγα βελτιώνεται. Κατά κανόνα, μία τέτοια ρύθμιση συνεπάγεται ταυτόχρονα την αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης. Στην περίπτωση των μονοθεσίων όμως, η μικρότερη

διατομή των στομίων εισαγωγής, στο πίσω τμήμα τους μειώνει την αντίσταση, με αποτέλεσμα οι δύο επιδράσεις να αντισταθμίζονται.

Ύψωση της άνω εμπρόσθιας επιφάνειας των στομίων εισαγωγής: Η ρύθμιση αυτή βελτιώνει τη συνολική αρνητική άνωση κατά 2.7% κατά προσέγγιση, και την αντίσταση κατά 0.5%. Η επίδρασή της στην κατανομή της αρνητικής άνωσης ωστόσο, είναι αξιοσημείωτη. Η αρνητική άνωση στον πίσω άξονα μπορεί να φτάσει μέχρι και το 2.1 %. Σε αντίθεση με τα εμπρόσθια πτερύγια, τα πίσω υπόκεινται σε περιοριστικούς κανονισμούς. Για το λόγο αυτό, η ανωτέρω αύξηση είναι ένα ευνοϊκό φαινόμενο το οποίο βελτιώνει σημαντικά την κατανομή των δυνάμεων αρνητικής άνωσης. Ανυψώνοντας την άνω εμπρόσθια επιφάνεια των στομίων εισαγωγής, αυξάνεται το ύψος του σημείου στασιμότητας, αυξάνοντας τη ροή του αέρα προς τα πίσω πτερύγια.

Αεροτομές στην άνω επιφάνεια των στομίων εισαγωγής μπροστά από τους πίσω τροχούς: Η συγκεκριμένη ρύθμιση αντιστρέφει τις θετικές συνέπειες της προηγούμενης. Η αντίσταση αυξάνεται περίπου κατά 0.7%, και ταυτόχρονα η συνολική αρνητική άνωση κατά 1,1%. Η αρνητική άνωση στον εμπρόσθιο άξονα αυξάνεται κατά 1% γεγονός που σημαίνει περιορίζεται στον πίσω άξονα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αέρας κινείται ανοδικά, παρεμποδίζοντας τη ροή προς την πίσω πτέρυγα και αυξάνοντας την έντασή της προς τα στόμια εισαγωγής. Οι επακόλουθες υψηλές ταχύτητες ροής στο ρύγχος αυξάνουν τις δυνάμεις αρνητικής άνωσης στον εμπρόσθιο άξονα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «επίδραση της αεροτομής» και παρατηρείται και σε άλλες κατηγορίες οχημάτων επίσης.

Χαμηλότερες εισαγωγές των στομίων εισαγωγής: Οι χαμηλότερες εισαγωγές των στομίων εισαγωγής είναι μία περιοχή η οποία επηρεάζει τη ροή του αέρα στο μεγαλύτερο τμήμα κάτω από αυτό. Οι επακόλουθες πολύ χαμηλές πιέσεις, επηρεάζουν την συνολική αρνητική άνωση, την κατανομή των κάθετων δυνάμεων και την ευαισθησία στις δυνάμεις πρόνευσης.

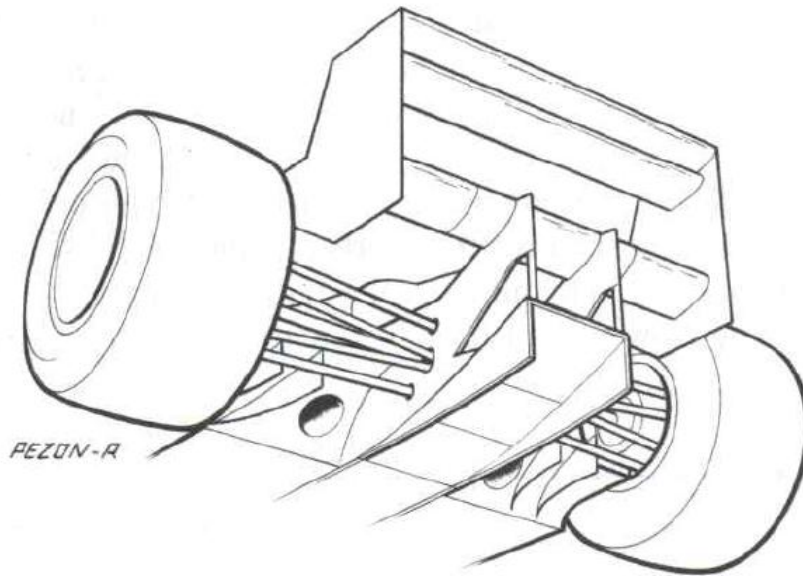
Τα δεδομένα δείχνουν πως η συνολική αρνητική άνωση αυξάνεται κατά 3,5% παρά το γεγονός ότι η αντίσταση αυξάνεται κατά 0,9%. Η κατανομή των κάθετων δυνάμεων μεταβάλλεται κατά 16,5%. Όπως φαίνεται στην εισαγωγή των στομίων εισαγωγής υπάρχει χαμηλή πίεση, η οποία οφείλεται στη σημαντική επιτάχυνση της ροής. Η αύξηση των δυνάμεων αρνητικής άνωσης μπορεί να αυξήσει και την ευαισθησία στις δυνάμεις πρόνευσης.

Ανύψωση του εμπρόσθιου άκρου: Το ανυψούμενο ρύγχος παρεκκλίνει τον εισερχόμενο αέρα προς τα πάνω και συνεπώς μειώνει τη ροή του κάτω από το όχημα. Αν έχει το κατάλληλο σχήμα, το πάτωμα του οχήματος συνεισφέρει σημαντικά στην ανάπτυξη αρνητικών δυνάμεων άνωσης, χωρίς να αυξάνονται σημαντικά οι δυνάμεις αντίστασης. Το ανυψωμένο εμπρόσθιο πτερύγιο βελτιώνει τις συνθήκες ροής κάτω από το αυτοκίνητο συνεισφέροντας στην αύξηση της αρνητικής άνωσης, υπό την προϋπόθεση πως το πάτωμα έχει την κατάλληλη μορφή.

Καλύμματα των τροχών: Τα καλύμματα των τροχών χρησιμοποιούνται σε αγώνες υψηλών ταχυτήτων. Τα ελικοειδή καλύμματα είναι τα πιο χρήσιμα στις ωοειδής πίστες όπου οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες είναι πολύ υψηλές και αφορούν κυρίως τους εμπρόσθιους τροχούς. Επιπλέον αυξάνουν την ένταση της ροής που οφείλεται κατά κανόνα στη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην εξωτερική και την εσωτερική πλευρά του τροχού, μεταβάλλοντας έτσι τις αρνητικές δυνάμεις άνωσης σύμφωνα με τη μελέτη κατασκευής του οχήματος. τα καλύμματα των τροχών επηρεάζουν επίσης την αεροδυναμική αντίσταση, μολονότι η συγκεκριμένη επίδραση εξαρτάται από την επάρκεια παροχής του αέρα. Όσον αφορά τα αγωνιστικά οχήματα παραγωγής, όπου η ταχύτητες είναι μικρότερες, τα ελικοειδή καλύμματα χρησιμοποιούνται για επιπρόσθετη ψύξη των φρένων.

Διοχέτευση των καυσαερίων σε διαχύτη: Ρυθμίσεις γίνονται για τη διοχέτευση των καυσαερίων σε διαχύτη με σκοπό την αύξηση της συνολικής

ροής του αέρα προκειμένου είτε να εντείνουμε είτε να εξασθενήσουμε ορισμένα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Στα ευθεία τμήματα των αυτοκινητοδρομίων, όπου η μηχανή παράγει τη μέγιστη ποσότητα καυσαερίων, η ροή των αναδεικνύει τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα.



Σχήμα 3.27: Έξοδος καυσαερίων κατασκευασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνει την επίδραση του φαινομένου Venturi.

Μπορούν να διοχετευθούν στο διαχύτη κάτω από το πίσω τμήμα του οχήματος, έτσι ώστε να περιορίσουν την ένταση της οπισθέλκουσας δύναμης. Στις στροφές, όπου η παροχή καυσαερίων είναι μικρότερη, ο διαχύτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μέγιστης αρνητικής άωσης, αυξάνοντας τις δυνάμεις χαμηλής πίεσης. Ωστόσο, οι εξατμίσεις το διαχύτη τείνουν να διαταράξουν τη ροή του αέρα, και για το λόγο αυτό απαιτούνται εκτεταμένες δοκιμές για την επίτευξη των αναμενόμενων αποτελεσμάτων.

Κατανομή της πίεσης κάτω από τα στόμια εισαγωγής: Με σχεδόν ίδια τα επίπεδα της ολικής αρνητικής άωσης και κατανομών των κάθετων δυνάμεων, η κατανομή πίεσης κάτω από τα στόμια εισαγωγής, επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του χειρισμού του αυτοκινήτου. Πολύ χαμηλή πίεση στην εισαγωγή των στομίων εισαγωγής, γεγονός που δημιουργεί υψηλές δυνάμεις

αρνητικής άνωσης, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μία πολύ σημαντική επίδραση δυνάμεων πρόνευσης με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η ικανοποιητική βελτίωση του πλαισίου του και της αεροδυναμικής του οχήματος ανάλογα με την απόσταση από το οδόστρωμα. Ιδανικό είναι βέβαια, οι περισσότερες κάθετες δυνάμεις να δρουν στο επίπεδο των στομιών εισαγωγής, κοντά στο κέντρο βάρους του οχήματος. Ως εκ τούτου, οι χαμηλές πιέσεις ή οι υψηλές αρνητικές δυνάμεις άνωσης επηρεάζονται λιγότερο από τις μεταβολές της απόστασης του οχήματος από το έδαφος, μεταβολές που οφείλονται από τις λόγω ροπής πρόνευσης κινήσεις του. Ωστόσο, αν τα υψηλότερα επίπεδα αρνητικής άνωσης δημιουργούνται στις εισόδους των στομιών εισαγωγής, τότε θα μεταβάλλονται συναρτήσει της ροπής πρόνευσης του οχήματος. Όσο υψηλότερες είναι οι κάθετες δυνάμεις που οφείλονται στο βασικό αμάξωμα σε σύγκριση με το σύνολο της αρνητικής άνωσης, τόσο ισχυρότερο είναι το φαινόμενο αυτό.

3.4.2: Χειρισμός.

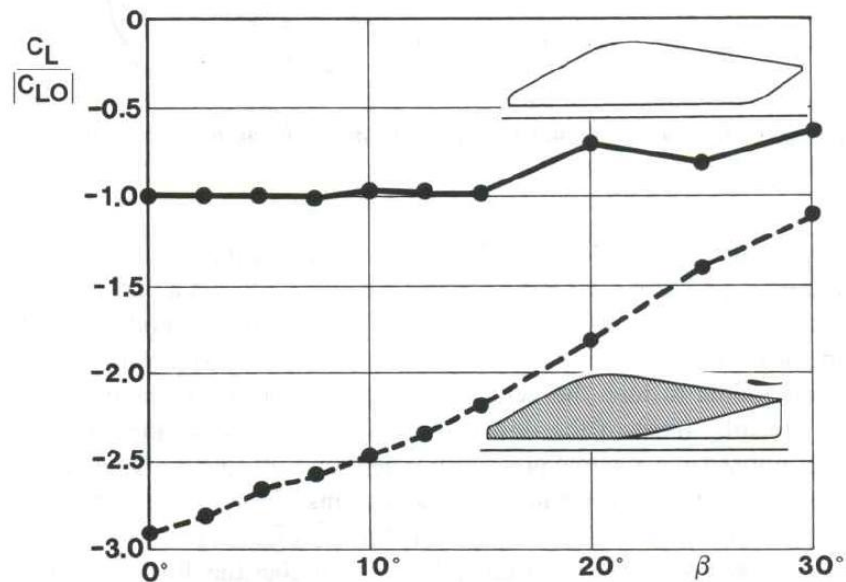
Τα οχήματα που αναπτύσσουν πολύ υψηλές ταχύτητες, όπως τα αγωνιστικά, πρέπει να χαρακτηρίζονται από αυξημένη ευστάθεια προκειμένου να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και να περιορίζεται η καταπόνηση του οδηγού. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με ρυθμίσεις στο πλαίσιο του οχήματος, όπως είναι η αύξηση του μεταξονίου και της τάσης για υποστροφή. Μία άλλη μέθοδος για βελτίωση του χειρισμού είναι η βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος.

Για άριστα χαρακτηριστικά χειρισμού, οι δυνάμεις άνωσης πρέπει να κατανέμονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να παράγεται συνεχώς μία θετική ροπή πρόνευσης. Συνεπώς, οι δυνάμεις αρνητικής άνωσης θα είναι μεγαλύτερες στον πίσω άξονα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μπροστά. Μία τέτοια κατανομή

άνωσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω τοποθέτησης πτερύγων και αεροτομών.

Η επίδραση του εδάφους προκαλεί τη δημιουργία σημαντικών δυνάμεων αρνητικής άνωσης, οι οποίες όμως δρουν στο εμπρόσθιο τμήμα του αυτοκινήτου. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση επιπρόσθετων πτερυγίων και αεροτομών στο πίσω τμήμα του οχήματος. Η αρνητική άνωση που δρα στο εμπρόσθιο άκρο, αναπτύσσεται είτε μέσω πτερυγίων είτε μέσω της επίδρασης του εδάφους με τη δεύτερη να είναι πιο ευνοϊκή, δεδομένου ότι δεν επηρεάζει τη δύναμη αντίστασης του αέρα.

Η ευστάθεια απέναντι στους πλευρικούς ανέμους μπορεί να διασφαλιστεί, επιτυγχάνοντας μία ευνοϊκή κατανομή της πίεσης. Πρέπει να τονίσουμε πως οι δυνάμεις αρνητικής άνωσης που προορίζονται για τη δημιουργία υψηλής αρνητικής δύναμης, περιορίζονται σημαντικά από την παρεκκλίνουσα ροή του αέρα. Επιπλέον η ευαισθησία στους πλευρικούς ανέμους μπορεί να περιοριστεί, μετατοπίζοντας το κέντρο πίεσης πίσω από το κέντρο βάρους του οχήματος, έτσι παράγεται μία ροπή παρέκκλισης η οποία εξουδετερώνει την επίδραση της παρεκκλίνουσας ροής αντισταθμίζοντας έτσι τις πλευρικές μετατοπίσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ενός κάθετου ουραίου πτερυγίου. Στα αγωνιστικά αυτοκίνητα μία ανάλογη λειτουργία πραγματοποιούν οι πλευρικές προεκτάσεις της αεροτομής.



Σχήμα 3.28: (Ανω γράφημα) Στις ρυθμίσεις όπου επικρατούν μικρές δυνάμεις αρνητικής άνωσης, το συνολικό επίπεδο της αρνητικής άνωσης μεταβάλλεται ελάχιστα και μόνο λόγω της γωνίας παρέκκλισης. (Κάτω γράφημα) Στις ρυθμίσεις για την εκμετάλλευση της επίδρασης του εδάφους και των δυνάμεων αρνητικής άνωσης, η συνολική άνωση μεταβάλλεται σημαντικά.

Τις περισσότερες φορές, η επίδραση μίας αεροδυναμικώς παραγόμενης ροπής παρέκκλισης είναι υπερτιμημένη. Είναι πολύ πιο εύκολο να περιορίσουμε την ευαισθησία στους πλευρικούς ανέμους επαναπροσδιορίζοντας το κέντρο βάρους και το σχεδιασμό του πλαισίου, παρά χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες της αεροδυναμικής όσον αφορά τις πλευρικές δυνάμεις και τη ροπή παρέκκλισης.

Εν συγκρίσει με τις ανωτέρω μεθόδους οι οποίες μεταβάλλουν τους αεροδυναμικούς συντελεστές αλλάζοντας μόνο το ύψος και τη γωνία προσβολής, η αεροδυναμική συμπεριφορά μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά μέσω κινούμενων αεροδυναμικών τμημάτων τα οποία βοηθούν στη διατήρηση της ευστάθειας του οχήματος. Κινούμενα πτερύγια και αεροτομές προσαρμόζονται στις αναρτήσεις κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ταλαντεύονται

ανάλογα με τις αναπηδήσεις των τροχών. Η χρησιμότητα των πτερυγίων αυτών μπορεί να αναδειχθεί στις εξής περιπτώσεις: Σε αριστερή στροφή, καθώς το αυτοκίνητο τείνει λόγω της φυγοκέντρου δύναμης να μετατοπίζεται προς τα δεξιά, το πτερύγιο στην αριστερή πλευρά ανυψώνεται, δημιουργώντας έτσι μία πλευρική ροπή αντίδρασης. Καθώς ένα όχημα κινείται πάνω σε οδόστρωμα ανωφερούς και κατωφερούς κλίσης, τα ανυψούμενα πτερύγια ωθούν το όχημα προς το οδόστρωμα όταν αυτό πραγματοποιεί αναπηδήσεις.

Μία άλλη λύση είναι η τοποθέτηση των υποστηριγμάτων των αεροτομών στο κέντρο των τροχών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αρνητική άνωση του οχήματος βελτιώνοντας τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του.

3.4.3: Ψύξη – Εξαερισμός.

Τα συστήματα ψύξης έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να διασκορπίζουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας χωρίς όμως να αυξάνουν την αεροδυναμική αντίσταση. Οι δυνάμεις αντίστασης δεν επηρεάζονται από το αν αναπτύσσονται μεγάλες απώλειες πίεσης σε ένα μικρών διαστάσεων ψυγείο ή το αντίστροφο, δηλαδή μικρές απώλειες πίεσης σε μεγάλων διαστάσεων ψυγείο. Ωστόσο η μεταφορά θερμότητας είναι πιο επαρκής όταν ο αέρας εντός του ψυγείου κινείται με χαμηλή ταχύτητα. Μετρήσεις που έχουν γίνει κατά καιρούς, έχουν δείξει πως η ελάχιστη δυνατή αντίσταση, σε σχέση με τη θερμότητα που διασκορπίζεται, επιτυγχάνεται εάν διοχετεύσουμε τον αέρα μέσω ενός μικρού ανοίγματος και πριν περάσει από την επιφάνεια του ψυγείου τον επιβραδύνουμε μέσω διαχύτη. Αφού περάσει από το ψυγείο, ο αέρας πρέπει πάλι να επιταχυνθεί με τη βοήθεια ενός ανάλογου ακροφυσίου. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ικανό να παράγει ώθηση όπως μία μηχανή αντίδρασης όταν η θερμική ενέργεια αντισταθμίζεται από την απώλεια πίεσης.

Λόγω περιορισμένου χώρου, είναι δύσκολο να τοποθετήσουμε σε ένα αγωνιστικό όχημα τις ιδανικές σωληνώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την ψύξη του αέρα. Για να παράγουμε τη μέγιστη δυνατή διαφορά πίεσης, ο αέρας ψύξης εισέρχεται στο ύψος του stagnation point, στο εμπρόσθιο άκρο, και εξέρχεται είτε προς τα πάνω είτε πλάγια είτε προς τα κάτω. Όταν η εξαγωγή του θερμού πλέον αέρα γίνεται προς τα πάνω, πρέπει να διασφαλιστεί ότι δεν θα θερμαίνει την καμπίνα των επιβατών. Στα αγωνιστικά οχήματα που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της «επίδρασης του εδάφους», ο αέρας ψύξης εξέρχεται προς το πάτωμα του οχήματος με αποτέλεσμα μία σημαντική αύξηση των δυνάμεων αρνητικής άνωσης.

Σε περίπτωση που ο αέρας ψύξης πρόκειται να εισέλθει από την άνω επιφάνεια, τότε συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται οι επονομαζόμενες εισαγωγές «NACA», οι οποίες έχουν αποδειχτεί πολύ αποτελεσματικές μέθοδοι. Οι συγκεκριμένες εισαγωγές έχουν το ιδιαίτερο πλεονέκτημα να παρέχουν μεγάλες ποσότητες αέρα χωρίς να αναπτύσσονται ισχυρές δυνάμεις αντίστασης. Οι δίνες οι οποίες δημιουργούνται στις αιχμηρές πλευρικές ακμές τους, δημιουργούν μία προς τα έσω συνιστώσα της ταχύτητας, διευκολύνοντας τη ροή προς το εσωτερικό της εισαγωγής και κατ' επέκταση αυξάνοντας την παροχή του αέρα.

Παρόλο που υπάρχουν ορισμένες σταθερές παράμετροι για τη βέλτιστη ρύθμιση των συστημάτων ψύξης, κάθε όχημα απαιτεί ξεχωριστή λύση, η οποία εξαρτάται από το σχεδιασμό του οχήματος, τις οριακές συνθήκες και το φάσμα των εφαρμογών του.

Χάριν παραδείγματος, στα αγωνιστικά οχήματα της ομάδας C (group C), ο αέρας ψύξης των φρένων και του χώρου του οδηγού, εισάγεται από εμπρόσθιο μέρος του οχήματος στο ύψος του σημείου στασιμότητας. Οι εισαγωγές αέρα για τα ψυγεία νερού, αέρα και λιπαντικού, τοποθετούνται συνήθως πλευρικά στις άνω επιφάνειες του αμαξώματος, πίσω από τους εμπρόσθιους τροχούς. Ο αέρας για τον ανεμιστήρα της μηχανής, τα πίσω φρένα και το ψυγείο των ταχυτήτων, εισέρχεται μέσω διόδων «NACA», στις άνω επιφάνειες του

οχήματος. Ο χώρος της μηχανής ψύχεται μέσω θυρίδων που τοποθετούνται στον πίσω διαχύτη.

Τα οχήματα επίτευξης μέγιστων επιδόσεων (record cars), τα οποία χρησιμοποιούνται για βραχύχρονους αγώνες και δεν λειτουργούν σε σταθερές θερμοκρασίες, διαθέτουν συστήματα ψύξης τα οποία δεν αυξάνουν την αντίσταση του αέρα. Το σύστημα ψύξης των οχημάτων αυτών, χρησιμοποιεί πάγο έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη ψύξη σε μικρής διάρκειας αγώνες.

3.5: Ειδικά προβλήματα.

3.5.1: Χρόνος γύρου – Εξοικονόμηση καυσίμου.

Ένας εκ των βασικότερων στόχων των αγωνιστικών αυτοκινήτων είναι τρέξουν το γύρο της πίστας σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα. Για δεδομένο σχεδιασμό του αμαξώματος και της μηχανής, ο χρόνος περιστροφής του γύρου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο του συντελεστή άνωσης προς το συντελεστή οπισθέλκουσας (C_L / C_D). Οι μέγιστες ταχύτητες που μπορεί να φτάσει ένα όχημα, μπορούν να αυξηθούν περιορίζοντας τις δυνάμεις οπισθέλκουσας, ρύθμιση η οποία συνήθως συνοδεύεται από μείωση των αρνητικών δυνάμεων άνωσης και επακόλουθα της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας στροφής. Η ακολουθία αυτή, αναδεικνύει τη σπουδαιότητα της «επίδρασης του εδάφους», η οποία μας επιτρέπει να αυξήσουμε σημαντικά τις δυνάμεις αρνητικής άνωσης, χωρίς να επηρεάζεται ο συντελεστής αντίστασης.

Προκειμένου να πετύχουμε τη βέλτιστη ρύθμιση του οχήματος ανάλογα με την πίστα, απαιτούνται συνεχείς υπολογισμοί καθώς επίσης και πολλές δοκιμές πάνω σε αυτή.

Η μέγιστη δυνατή αρνητική άνωση απαιτείται για διαδρομές με πολλές κλειστές στροφές, ενώ σε διαδρομές υψηλών ταχυτήτων με μεγάλες ευθείες, ένας χαμηλός συντελεστής οπισθέλκουσας αποτελεί μεγαλύτερο πλεονέκτημα.

Η υψηλή αρνητική άνωση συνεπάγεται αυξημένο συντελεστή αντίστασης και αυτόματα μεγάλη κατανάλωση καυσίμου, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολλές στάσεις ανεφοδιασμού και να χάνεται πολύτιμος χρόνος. Για το λόγο αυτό, γίνονται υπολογισμοί ακριβείας ως προς το απαιτούμενο μέγεθος της αρνητικής άνωσης το οποίο θα συνεπάγεται ένα δεδομένο όριο κατανάλωσης καυσίμου. Γενικός κανόνας στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου λόγου αρνητικής άνωσης/ αντίστασης (C_L / C_D).

Ορισμένες αγωνιστικές ομάδες έχουν μελετήσει λεπτομερώς το συγκεκριμένο ζήτημα και προχώρησαν στο σχεδιασμό ανάλογων γραφημάτων του συντελεστή αντίστασης, συναρτήσεως του συντελεστή αρνητικής άνωσης για διάφορα αυτοκινητοδρόμια αγώνων.

3.5.2: Ηχητικές ταχύτητες.

Κατά το σχεδιασμό οχημάτων επίτευξης μέγιστων επιδόσεων (record cars), όπου ο τελικός στόχος είναι η επίτευξη ηχητικών ταχυτήτων, η συμπίεστικότητα του αέρα δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί αμελητέα. Το 1970, ένα πυραυλοκίνητο όχημα έφτασε την ταχύτητα των 1001.67 km/h. Σύμφωνα με τις προκαταρκτικές μετρήσεις, μία αύξηση της ταχύτητας από 0.5 Ma σε 1.2 Ma, συνεπάγεται μία αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας της τάξης του 200%. Οπότε δίνεται πολύ μεγάλη προσοχή στο σχεδιασμό ενός αμαξώματος μικρής αεροδυναμικής αντίστασης, όπως είναι ένα λεπτό κυλινδρικό αμάξωμα με ωειδές ρύγχος.

Οι εμπρόσθιοι τροχοί ενσωματώθηκαν στο αμάξωμα με σκοπό να μειωθεί η εμπρόσθια επιφάνεια και κατ' επέκταση η αντίσταση του αέρα. Ο σχεδιασμός ενός λεπτού αμαξώματος, είναι μία από τις βασικές προϋποθέσεις για την

επίτευξη χαμηλών συντελεστών οπισθέλκουσας. Για να εξασφαλίσουμε τον έλεγχο του οχήματος σε ολόκληρο το φάσμα ταχυτήτων, οι θετικές δυνάμεις άνωσης έχουν εξαλειφθεί πλήρως. Ωστόσο, τη στιγμή που το όχημα ξεπερνάει την ταχύτητα του ήχου, υφίσταται ένα νέο φαινόμενο το οποίο δεν πρέπει να θεωρηθεί αμελητέο. Η αρνητική πίεση κάτω από το όχημα μετατρέπεται σε θετική, αναπτύσσοντας έτσι δυνάμεις θετικής άνωσης.

Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός κατά το οποίο, στο υποηχητικό πεδίο ταχυτήτων, ο αέρας κάτω από το ρύγχος επιταχύνεται με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται χαμηλότερη πίεση. Στις υπερηχητικές ταχύτητες όμως, το ρύγχος του οχήματος προκαλεί τη δημιουργία ενός κρουστικού κύματος. Το κρουστικό αυτό κύμα ακολουθείται από μία περιοχή υψηλής πίεσης η οποία συνεπάγεται ανάπτυξη θετικών δυνάμεων άνωσης. Συνεπώς, κατά το πέρασμα από το υποηχητικό στο υπερηχητικό φάσμα ταχυτήτων, η ακόλουθη αντιστροφή των κάθετων δυνάμεων μεταβάλλει τη γωνία προσβολής του οχήματος, γεγονός που μπορεί να έχει ως συνέπεια τον ασταθή χειρισμό του οχήματος.

Καθώς το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε οχήματα με επίπεδο πάτωμα, πλέον τοποθετούνται πατώματα με στρογγυλεμένες ακμές, τα οποία τοποθετούνται στην κορυφή του οχήματος. Επιπλέον, ο διαμήκης άξονας κλίνει κατά -1.5° ενώ και ο ρύγχος παρουσιάζει ταυτόχρονα μία ελαφρά αρνητική κλίση. Το όχημα πολλές φορές εξοπλίζεται με μικρά πτερύγια και στις δύο πλευρές του ρύγχους. Η ευστάθεια κατά μήκος του οχήματος βελτιώνεται περαιτέρω με την τοποθέτηση ενός κάθετου πτερυγίου στο ουραίο τμήμα του.

3.5.3: Ακάλυπτοι τροχοί.

Τα μονοθέσια οχήματα, εφοδιάζονται με ακάλυπτους τροχούς οι οποίοι εκτίθενται στη ροή του αέρα. Λόγω των μεγάλων ως προς το αμάξωμα του οχήματος διαστάσεών τους, οι τροχοί αναμένεται να επηρεάζουν σημαντικά την αεροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος, με την περιστροφική κίνηση που πραγματοποιούν να αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα.

Από δοκιμές σε αεροσήραγγες, προκύπτουν οι εξής πληροφορίες.

1. Ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης ενός περιστρεφόμενου τροχού επιβατηγού οχήματος είναι περίπου $C_D = 0.6$, τιμή η οποία μπορεί να μειωθεί σε $C_D = 0.5$ τοποθετώντας ένα λείο κάλυμμα.
2. Οι περιστρεφόμενοι τροχοί αναπτύσσουν ελάχιστα χαμηλότερο συντελεστή αντίστασης σε σύγκριση με τους τροχούς που παραμένουν ακίνητοι.
3. Οι τροχοί αναπτύσσουν δυνάμεις άνωσης, οι οποίες είναι μεγαλύτερες στους ακίνητους σε σύγκριση με τους περιστρεφόμενους τροχούς.

Οι διερευνήσεις που έχουν γίνει από ορισμένες αγωνιστικές ομάδες πάνω σε μονοθέσια, έχουν δείξει πως η περιστροφή των τροχών επηρεάζει σημαντικά τις δυνάμεις άνωσης. Επίσης, η ροή γύρω από τους τροχούς, επηρεάζει και τη ροή γύρω από ολόκληρο το αμάξωμα. Μία μέθοδος που ακολουθείται για να περιορίσουμε την επιπρόσθετη αντίσταση που αναπτύσσεται λόγω των τροχών, είναι η τοποθέτηση εκτροπών μπροστά από τους εμπρόσθιους τροχούς και ανάμεσα στους δύο άξονες, οι οποίοι οδηγούν τη ροή κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιορίζονται οι δίνες τύρβης.

3.5.4: Περιστρεφόμενοι – Στατικοί τροχοί στα μονοθέσια.

Ανάλογες δοκιμές σε αεροσήραγγες έχουν γίνει με σκοπό να προσδιορίσουν την επίδραση των περιστρεφόμενων και των μη περιστρεφόμενων (στατικών) τροχών στην ποιότητα της αεροδυναμικής του οχήματος. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για να υποστηρίξουν το όχημα αποτρέποντας τους τροχούς από το να έρθουν σε επαφή με το έδαφος. Το πολύ στενό διάκενο ανάμεσα στους τροχούς και το έδαφος έχει σφραγιστεί. Η περιστροφή των τροχών ελέγχεται συναρτήσει της διαμέτρου των εμπρόσθιων και των πίσω τροχών, καθώς επίσης και από την ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα. Το οριακό στρώμα στο πάτωμα της αεροσήραγγας μεταβάλλεται χρησιμοποιώντας κατάλληλα συστήματα αναρρόφησης.

Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο αγωνιστικά οχήματα του πρωταθλήματος C.A.R.T. σε δύο διαφορετικές εκδόσεις. Η μία έκδοση χαρακτηρίζεται ως «δρόμου», η οποία χρησιμοποιείται για στενούς ελικοειδείς δρόμους, και η δεύτερη ως «υψηλών ταχυτήτων» και ενδείκνυται για μεγάλα ωοειδή αυτοκινητοδρόμια όπου αναπτύσσονται πολύ υψηλές ταχύτητες. Οι σημαντικότερες διαφορές ανάμεσα στα δύο μονοθέσια, εντοπίζονται κυρίως στη γεωμετρία των εμπρόσθιων και πίσω πτερύγων, και στη διαμόρφωση της άνω και κάτω επιφάνειας των πλευρικών εισαγωγών αέρα.

3.5.4.1: Έκδοση δρόμου.

Οι διερευνήσεις πραγματοποιούνται σε μοντέλα πλήρους κλίμακας και τα οχήματα σχεδιάζονται για το ίδιο αγωνιστικό γεγονός, . Οι μετρήσεις δείχνουν πως οι περιστρεφόμενοι τροχοί, ενώ επηρεάζουν την κατανομή των δυνάμεων τόσο οπισθέλκουσας όσο και αρνητικής άνωσης, ασκούν πολύ ισχυρότερη

επίδραση στην ολική αρνητική άνωση σε σχέση με την επίδραση των στατικών τροχών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 8.2, οι στατικοί τροχοί αναπτύσσουν πολύ χαμηλότερη αρνητική άνωση σε σχέση με τους περιστρεφόμενους. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σ

3.5.4.2: Έκδοση υψηλών ταχυτήτων.

Στον πίνακα 3.1 αναπαρίστανται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα μονοθέσια «υψηλών ταχυτήτων» με περιστρεφόμενους και στατικούς τροχούς. Σύμφωνα με τον πίνακα, οι δυνάμεις αρνητικής άνωσης του οχήματος της συγκεκριμένης έκδοσης επηρεάζονται πολύ περισσότερο από την περιστροφική κίνηση των τροχών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα μικρότερα εμπρόσθια και πίσω πτερύγια, όπου η παρέκκλιση του αέρα είναι μικρότερη με αποτέλεσμα ένα τμήμα της ροής του αέρα να κινείται γύρω από τους τροχούς. Η επίδραση των περιστρεφόμενων τροχών στην αεροδυναμική του αυτοκινήτου είναι πολύ ισχυρότερη.

Variations	Car A	Car B
Drag	-6%	-2%
Negative lift, front	-73%	-54%
Negative lift, rear	-51%	-33%
Negative lift, overall	-56%	-62%
Variation of negative lift distribution	-9%	-7%

Πίνακας 3.1: Μεταβολή της αντίστασης , της άνωσης και της κατανομής της ανάλογα με τις συνθήκες της δοκιμής στη αεροσήραγγα.

3.5.5. Επίδραση της μεταβολής του οριακού στρώματος στις μετρήσεις.

Η επίδραση του οριακού στρώματος της αεροσήραγγας πάνω στα αγωνιστικά οχήματα και τα οποία απέχουν ελάχιστα από το έδαφος, μελετάται συνεχώς με ανάλογες δοκιμές. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε οχήματα με περιστρεφόμενους τροχούς και με το σύστημα αναρρόφησης του οριακού στρώματος απενεργοποιημένο. Σε σύγκριση με τις δοκιμές που έγιναν σε οχήματα με στατικούς τροχούς και το σύστημα αναρρόφησης του οριακού στρώματος ενεργοποιημένο, βλέπουμε πως οι διαφορές σε σημαντικές αεροδυναμικές ιδιότητες του οχήματος (αντίσταση, αρνητική άνωση), είναι πολύ μεγάλες, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.2.

Από τα παραπάνω λοιπόν συμπεραίνουμε πως δεν είναι εφικτή η εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων, εάν δεν συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς την επίδραση των περιστρεφόμενων τροχών και του οριακού στρώματος.

Drag	-7%
Lift	-70%
Lift distribution	negative lift changes into positive lift

Πίνακας 3.2: Μεταβολή της αντίστασης , της άνωσης και της κατανομής της ανάλογα με τις συνθήκες της δοκιμής στη αεροσήραγγα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΕΣ.

4.1: Γενικά.

4.1.1: *Η ανάγκη για αεροσήραγγα οχημάτων*

Πρέπει να διεξαχθεί αρκετή δουλειά για να δημιουργήσουμε όλα τα αεροδυναμικά και θερμικά χαρακτηριστικά ενός οχήματος. Πολλές από τις επιθυμητές ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν μετατρέποντας το εξωτερικό σχήμα.

Ωστόσο το σχήμα ενός οχήματος σταθεροποιείται πολύ νωρίς κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του ,έτσι η αεροδυναμική του ,πρέπει να εξετασθεί ακόμα νωρίτερα.

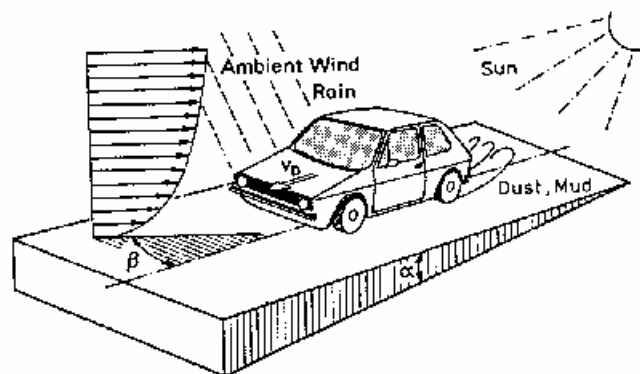
Καλές αεροδυναμικές ιδιότητες πρέπει να σχεδιαστούν πάνω στο πρωταρχικό σχήμα ενός νέου οχήματος, χρησιμοποιώντας είτε προηγούμενη εμπειρία είτε την υπολογιστική ρευστομηχανική. Ωστόσο στο μέλλον προβλέπεται η πειραματική διαδικασία να έχει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του σχήματος. Αυτή η εργασία θα πρέπει να οργανωθεί ώστε να ακολουθεί την συνεχώς αυξανόμενη αναπτυξιακή διαδικασία.

Με μια πιο απλή ματιά η αεροδυναμική ανάπτυξη πραγματοποιείται σε τέσσερις φάσεις: Αρχίζει με ένα μοντέλο είτε υπό κλίμακα είτε σε πραγματικό μέγεθος ,με το δεύτερο να είναι ένα σκληρό μοντέλο. Συνεχίζεται με ένα πρωτότυπο που είναι έτοιμο για οδήγηση και ακολουθεί το προ-παραγωγής όχημα και ολοκληρώνεται με δείγματα παρμένα από τη γραμμή παραγωγής πριν τη παραγωγή ποσότητας.

Στη πρώτη φάση η περισσότερη δουλειά γίνεται στην αεροσήραγγα.. Ωστόσο πειράματα μπορούν να γίνουν και μέσα στο νερό ,είτε σε σήραγγα νερού είτε σε δεξαμενή συμπίεσης. Συγκεκριμένα προβλήματα όπως η αντίσταση του αέρα σε όχημα μέσα σε τούνελ ή η αντίδραση τους κατά

δυνατού ανέμου και στα κύματα αέρα από τα διερχόμενα οχήματα, εξετάζονται σε μοντέλα κινούμενα μέσα σε σταθερό αέρα και με προσομοίωση πλευρικού άνεμου κατά διαστήματα. Στη δεύτερη και στη τρίτη φάση της ανάπτυξης ,όταν τα πρωτότυπα είναι έτοιμα για οδήγηση, η δοκιμές στις αεροσήραγγες συμπληρώνονται με τις δοκιμές στο δρόμο. Εκεί πρέπει τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής βελτίωσης να αποδειχθούν σωστά και όχι στις αεροσήραγγες. Βέβαια η παραγωγή οχημάτων με σεβασμό στην αεροδυναμική πραγματοποιείται μόνο στην αεροσήραγγα.

Μια αεροσήραγγα απλώς προσομοιώνει τις συνθήκες του δρόμου αλλά δεν της αναπαράγει ακριβώς. Όπως σε όλες τις προσομοιώσεις υπάρχει διαφορά από την πραγματικότητα. Ακόμα και σήμερα είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε όλα τα λάθη στην προσομοίωση, άλλα αναλύοντας την οδήγηση στο δρόμο μπορούμε καταρχάς να τα επισημάνουμε. Αυτό συμβαίνει λαμβάνοντας υπόψη μας την εικόνα 4.1 ,όπου αποδίδονται κάθε είδους παράγοντας που επηρεάζει τη ροή γύρω από το όχημα αλλά και το θερμικό φορτίο: ταχύτητα οχήματος ,δυνατούς ανέμους ,ηλιακή ακτινοβολία , σκόνη δρόμου και τη κλίση του δρόμου.



Σχήμα 4.1: όχημα στο πραγματικό περιβάλλον.

Το πεδίο ροής αποτελείται από δυο παράγοντες. Τη ροή του αέρα που δημιουργείται κατά τη κίνηση του οχήματος μπροστά και από τους φυσικούς ανέμους (θυελλώδης).Ο δεύτερος δημιουργεί ένα τυρβώδες οριακό στρώμα

πάνω από το έδαφος και το μέγεθος των στροβιλισμών είναι όσο και το μήκος του οχήματος. Σαν συμπέρασμα έχουμε ότι το αποτέλεσμα της ροής κοντά στο όχημα απέχει στο να είναι ομοιόμορφη. Ακριβώς αντίθετα η ταχύτητα του προφίλ στρεβλώνει. Το μέγεθος και η διεύθυνση της ταχύτητας μεταβάλλεται τυχαία με το χρόνο. Επιπρόσθετα ο στροβιλισμός μπορεί να αυξηθεί πάνω από ασταθές πεδίο ροής που προέρχεται από τη κίνηση του οχήματος μέσα από τον αέρα από διερχόμενα οχήματα ή από διάφορα εμπόδια όπως δέντρα , γέφυρες , σπίτια κ.α.

Ακόμα και το πεδίο θερμοκρασίας πάνω από το δρόμο δεν είναι πάντα ομογενές . Έντονη ηλιοφάνεια θα θερμάνει την επιφάνεια του δρόμου περισσότερο από τον αέρα, δημιουργώντας ένα οριακό στρώμα θερμοκρασίας πάνω από το δρόμο.

Γενικά , και τα δυο πεδία κοντά στο όχημα ,της ροής του αέρα και της θερμοκρασίας, είναι πολύ ανομοιογενές και ασταθείς. Ο φυσικός αέρας μπορεί να περιγραφεί μόνο με τη μέθοδο της στατιστικής και είναι πολύ περίπλοκο ώστε να αναπαραχθεί μέσα σε μια αεροσήραγγα. Αλλά ούτε και το πεδίο θερμοκρασίας που σχηματίζεται πάνω από το δρόμο μπορεί να αναπαραχθεί.

Ο τρόπος ο οποίος αναπαριστάνεται σε μια αεροσήραγγα για αυτοκίνητα είναι πολύ απλοποιημένος. Αντίθετα με τη πραγματικότητα, η εισερχόμενη ροή γίνεται όσο ομοιόμορφη μπορεί να γίνει και το επίπεδο στροβιλισμού χαμηλό. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν την αρχή τους στην ιστορία.. Για πολύ καιρό οι δόκιμες για τα αυτοκίνητα γινόντουσαν σε αεροσήραγγες όπου χρησιμοποιούταν για αεροναυτικούς σκοπούς. Έτσι αυτές οι σήραγγες είχαν κατασκευασθεί πάνω στις ανάγκες αυτών των σκοπών. Αργότερα ,όταν σχεδιάστηκαν αεροσήραγγες ειδικά για οχήματα αυτά τα χαρακτηριστικά μεταφέρθηκαν χωρίς περαιτέρω σκέψη. Αυτό έκανε τα αποτελέσματα από διάφορες σήραγγες να είναι παρεμφερή κάτι που δικαιολογεί αυτή τη τακτική. Παρ' όλα αυτά , η προσομοίωση των πραγματικών περιβαλλοντικών συνθηκών

που υπάρχουν στο δρόμο – που δεν μπορούν να παραχθούν ακριβώς, σε καμία περίπτωση – δεν ικανοποιεί τα έξοδα που περιλαμβάνει.

Ένα χαρακτηριστικό της φύσης που μια αεροσήραγγα δεν μπορεί να αναπαράγει είναι η ησυχία. Γενικά οι σήραγγες είναι πολύ θορυβώδεις. Σε ένα μεγάλο μέρος το επίπεδο θορύβου εξαρτάται από τον ανεμιστήρα. Το πεδίο θορύβου της σήραγγας συγκαλύπτει το πεδίο θορύβου που αναπτύσσεται από τη ροή γύρω από το όχημα ,το λεγόμενο ‘wind noise’.Μόνο σε ειδικά διαμορφωμένες αερο-ακουστικές αεροσήραγγες αυτό το πρόβλημα έχει λυθεί όπου επιτρέπεται όχι μόνο η *αντικειμενική* διάκριση του θορύβου του άνεμου από τον θόρυβο της σήραγγας αλλά και επιτρέπει την *υποκειμενική* εκτίμηση του φάσματος του ήχου του αέρα.

Το κλίμα μέσα στο θάλαμο του αυτοκινήτου δεν εξαρτάται μόνο από τον περιβάλλον του αέρα αλλά και από την απευθείας ακτινοβολία του ήλιου ακόμα και από την ακανόνιστη ακτινοβολία που δέχεται από το περιβάλλον. Η ακτινοβολία του ήλιου (ένταση ,φάσμα ,διεύθυνση) μπορεί να προσομοιωθεί με επαρκής ακρίβεια, η ακανόνιστη ακτινοβολία είναι συνήθως αμελητέα. ακόμα η άνεση των επιβατών εξαρτάται και από την υγρασία ,συνεπώς θα πρέπει να αναπαραχθεί και αυτή η ιδιότητα του αέρα.

Η υγρασία με τη σειρά της αλληλεπιδρά με τα μέρη του κλιματισμού. Άρα η ομίχλη και ο πάγος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τους όταν σχεδιάζεται ο εξατμιστήρας και το περίβλημα του.

Σε κακοκαιρία το όχημα εκτίθεται σε νερό που προέρχεται από διάφορες διευθύνσεις: φυσική βροχή, βρώμικα νερά από το ίδιο το όχημα αλλά και από τα διερχόμενα. Η προσομοίωση βροχής μέσα στην αεροσήραγγα είναι σχετικά εύκολη. Μια συγκεκριμένη ποσότητα ροής νερού εκτοξεύεται σε μορφή spray σε ομοιόμορφο ρεύμα αέρος μπροστά από το όχημα. Πειράματα επικαθήσεων πρέπει να γίνονται μέσα στις αεροσήραγγες μόνο σε μικρές ποσότητες γιατί οι εγκατεστημένοι αισθητήρες και οι παροχής πίεσης είναι δύσκολο να

προφυλαχτούν από τη σκόνη και το κόστος καθαρισμού τους είναι πολύ υψηλό για μεγάλες αεροσήραγγες.

Κατά τη διάρκεια πειραμάτων θερμότητας η μηχανή πρέπει δουλεύει σε στροφές ανάλογες με τις στροφές που θα δούλευε την ανάλογη στιγμή στο δρόμο. Ένα δυναμόμετρο πλαισίου πρέπει να είναι διαθέσιμο όπου να εφαρμόζει σε αυτοκίνητα με εμπρός και με πίσω κίνηση. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του οχήματος όταν βρισκόμαστε στη φάση του μοντέλου η θερμότητα της μηχανής μπορεί να εξομοιωθεί με τη βοήθεια ενός εξωτερικού βραστήρα.

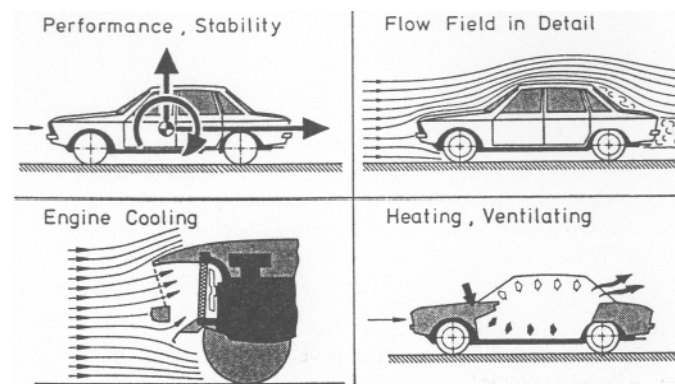
Η περισσότερη δουλειά κατά τη διάρκεια της φάσης του μοντέλου πρέπει να γίνεται μέσα στην αεροσήραγγα. Οι σήραγγες νερού ενδείκνυνται μόνο για ειδικές περιπτώσεις. Είναι κατάλληλες για οπτικοποίηση της ροής. Η ερώτηση, τι κλίμακα μοντέλο να διαλέξεις (είτε σε αεροσήραγγα είτε σε νερού) πρέπει να απαντηθεί πολύ προσεκτικά και πάντα σε συνεργασία με την ομάδα σχεδίασης. Τα πλεονεκτήματα ενός μικρού σε κλίμακα μοντέλου (το μικρό κόστος για μοντέλο και σήραγγα αλλά και η ευκολία χειρισμού του) πρέπει να συγκριθούν με το ρίσκο του λάθους λόγω της ανεπαρκούς πιστότητας του μοντέλου και τη λάθος τιμή του αριθμού Reynolds.

Όταν το πρωτότυπο είναι έτοιμο για οδήγηση θα πρέπει να επιλέξουμε που θα γίνουν οι ατομικές δοκιμές, δηλαδή στο δρόμο ή στη σήραγγα. Οι δοκιμές στο δρόμο έχουν το πλεονέκτημα του ρεαλισμού στις συνθήκες αλλά αυτό έχει και την άλλη όψη αφού σπάνια επαναλαμβάνονται οι συνθήκες δοκιμής , δύσκολα εξασφαλίζεται η μυστικότητα και τέλος οι μετρήσεις γίνονται με δυσκολία. Τα πλεονεκτήματα της αεροσήραγγας είναι εμφανή: γρηγορότερες και πιο ακριβείς τρόποι μετρήσεων, η πιθανότητα να ξεχωρίζει διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά το θόρυβο από τα μηχανικά μέρη, τα λάστιχα και τον αέρα. Επειδή δεν μπορούμε συνέχεια να δίνουμε μεγάλη προσοχή, οι περιορισμοί στην αεροσήραγγα δεν πρέπει να παραβλέπονται.

Μειονεκτήματα στην προσομοίωση είναι το μεγάλο κόστος και η διαθεσιμότητα.

4.1.2: Προσομοίωση σε διάφορες όψεις της οδήγησης στο δρόμο.

Ανάλογα με το σκοπό της η αεροδυναμική αυτοκίνητου χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Οι ειδικές απαιτήσεις τους έχουν οδηγήσει σε ξεχωριστές συσκευές δοκιμής που όλες μαζί, μάλλον ανακριβές, αποκαλούμε αεροσήραγγα.



Σχήμα 4.2: Οι κύριοι στόχοι της αεροδυναμικής οχημάτων

Για να μετρήσεις τις δυνάμεις και τις ροπές που καθορίζουν την απόδοση της οδήγησης και τη σταθερότητα της κατεύθυνσης είναι σημαντικό να αναπαράγουμε την ροή του αέρα γύρω από το όχημα όσο πιο κοντά σε αυτό γίνεται. Εφόσον η πίεση p σε κάθε σημείο είναι παράγωγο του τετραγώνου της ταχύτητας u της τοπικής ροής,

$$P \sim u^2$$

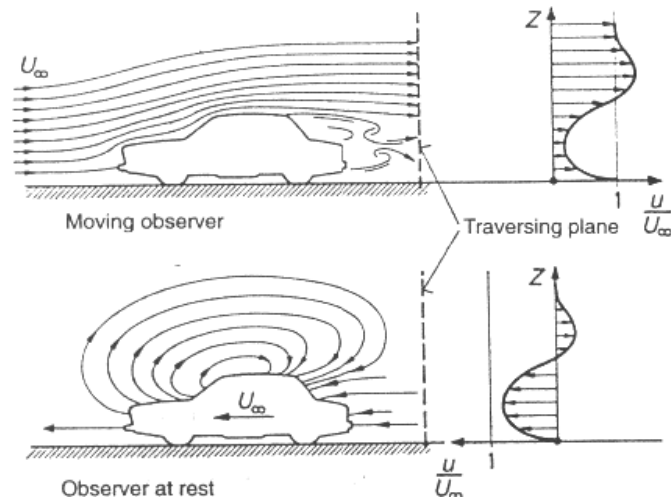
τα λάθη στη διανομή ταχύτητας του πεδίου ροής γύρω από το όχημα έχουν μια σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής. Μέσα στους προαναφερθέντες περιορισμούς (το ομοιογενές πεδίο ροής), η ροή του αέρα γύρω από ένα όχημα που οδηγείται στο δρόμο μπορεί να προσομοιωθεί σε μία

αεροσήραγγα αρκετά καλά. Εντούτοις, η συχνά-απαιτούμενη καλή συμφωνία με τις μετρήσεις για το δρόμο πρέπει να αξιολογηθεί σοβαρά. Γενικά, οι δυνάμεις στο δρόμο και οι ροπές δεν μετριούνται άμεσα. Παραδείγματος χάριν, η οπισθέλκουσα καθορίζεται από τις δοκιμές δρόμου ή από τη μετρημένη μέγιστη ταχύτητα. Ωστόσο οι πρόσθετοι φυσικοί παράγοντες περιλαμβάνονται (π.χ., αντίσταση κύλισης τροχών, θυελλώδης ή φυσικός αέρας, δύναμη μηχανών, κ.λ.π.) οι όποιοι είναι γνωστοί με περιορισμένη βεβαιότητα. Ενώ οι πληροφορίες της αεροσήραγγας είναι ακριβείς αλλά με τις ελλείψεις που έχει κάθε προσομοίωση, τα οδικά στοιχεία είναι απαλλαγμένα από αυτές τις ελλείψεις αλλά δεν καθορίζονται με ακρίβεια..

Η προσαρμογή των πληροφοριών της αεροσήραγγας λόγω των περιορισμών στη δόκιμη (ελλείψεις προσομοίωσης) και των οριακών συνθηκών (επιπτώσεις παρεμβολής) γίνονται με "διορθώσεις".

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 στην αεροσήραγγα η σχετική κίνηση είναι αντίστροφη :το όχημα είναι ακινητοποιημένο και ενεργεί πάνω του κινούμενος αέρας. Λογικά ,πρέπει να αναπαράγεται και η σχετική κίνηση μεταξύ του οχήματος και του δρόμου, δηλαδή θα έπρεπε να κινείται και το έδαφος της αεροσήραγγας. Επειδή αυτό είναι δύσκολο να το αντιληφθούμε έχει παραμεληθεί για πολύ καιρό ενώ γίνεται συχνά ακόμα και σήμερα.

Σε ειδικές δόκιμες τα μοντέλα μπορούν να ρυμουλκηθούν μέσα από ήρεμο αέρα ομοίως και για τα μοντέλα πλοίων που ρυμουλκούνται μέσα σε ήρεμα νερά σε ειδικές δεξαμενές. Έτσι βασικά εξετάζονται κάποιοι ασταθείς παράγοντες. Όπως να περνάς ή να συναντάς αλλά οχήματα, να οδηγάς μέσα σε τούνελ η ακόμα να οδηγάς με θυελλώδη άνεμο. Ακόμα η δεξαμενή ρυμούλκησης χρησιμοποιείται για να αποκαλύψει τις διαφορές της ροής κάτω από το σασί ενός σταθερού και ενός κινούμενου εδάφους .Οι δοκιμές ρυμούλκησης επιτρέπουν το πεδίο ροής γύρω από το όχημα να αναπαράγεται με μεγάλη ακρίβεια (όταν γίνεται με αέρα) και όχι απαραίτητα με τη δαπάνη μεγαλύτερης προσπάθειας.



Σχήμα 4.3: διαφορά στη σχετική κίνηση μεταξύ της οδικής οδήγησης και της δοκιμής σιηράγγων αέρα

Οι ίδιες απαιτήσεις όσον αφορά τις δυνάμεις και τις ροπές πρέπει να παρθούν και στη ποιότητα της ροής γύρω από το όχημα όταν θα εξετάζουμε τις λεπτομέρειες της ροής. Εάν ελέγχεται ο θόρυβος του αέρα, πρέπει να ικανοποιηθούν οι πρόσθετες απαιτήσεις σχετικά με το επίπεδο θορύβου της σήραγγας. Η διαφορά του σήματος προς τον θόρυβο πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 DB. Όταν η ακαθαρσία είναι υπό εξέταση, η σχετική κίνηση μεταξύ του οχήματος και του δρόμου και η περιστρεφόμενη κίνηση των ροδών πρέπει να αναπαραχθούν.

Οι λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις τοποθετούνται στην ποιότητα της ροής αέρος για την ανάπτυξη στα συστήματα ψύξης. Μόνο η ροή γύρω από το μπροστινό τέλος ενός αυτοκινήτου πρέπει να προσομοιωθεί, αλλά η θερμοκρασία του αέρα και το φορτίο της μηχανής πρέπει να αναπαραχθούν ακριβώς. Με την αυξανόμενη ζήτηση στο σύστημα ψύξης, τα αποτελέσματα του οριακού στρώματος της επιφάνειας του εδάφους και της περιστροφής των ροδών πρέπει να εξηγηθούν.

Για τις δοκιμές της θέρμανσης, του εξαερισμού, και του κλιματισμού, οι απαιτήσεις προσομοίωσης είναι μεταξύ εκείνων για τις καθαρώς αεροδυναμικές δοκιμές και εκείνων για την ψύξη μηχανών. Οι αρχικές κλιματολογικές παράμετροι, δηλ., η θερμοκρασία αέρα, η υγρασία, και η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς επίσης και το φορτίο στη μηχανή, πρέπει να εξομοιωθούν ακριβώς. Η ισορροπία θερμότητας του οχήματος εξαρτάται ιδιαίτερα από τη ροή του αέρα μέσα και γύρω από αυτό συνεπώς η ροή εκ μεταφοράς θερμότητας, που είναι άμεσα ανάλογη προς την ποσότητα αέρα που διατρέχει τον χώρο των επιβατών, πρέπει επίσης να προσομοιωθεί ακριβώς. Η ροή θερμότητας Q_c λόγω της αγωγιμότητας και η μεταφορά θερμότητας προς τις εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες -που είναι μικρό σε σύγκριση με την εκ μεταφοράς θερμότητα ροή-είναι:

$$Q_c \sim u^{0.5} \text{ έως } u^{0.8}$$

Η επίδραση ενός λάθους στην τοπική ταχύτητα του προσομοιούμενου πεδίου ροής είναι επομένως μικρότερη από ανάλογη. Κατά συνέπεια, η δαπάνη για την προσομοίωση της ροής αέρος μπορεί να είναι αρκετά λιγότερη από τι είναι απαραίτητη για τις αεροδυναμικές δοκιμές.

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις για την αντιπροσώπευση των όρων δοκιμής για τα τέσσερα είδη δοκιμών που περιγράφονται ανωτέρω και που συντάσσονται στο σχήμα 4.2:

1. Όλες οι παράμετροι που έχουν μια επιρροή εξομοιώνονται στην ίδια δυνατότητα αυτό οδηγεί σε μια μεγάλη κλιματολογική σήραγγα αέρα.
2. Μόνο εκείνες οι παράμετροι που είναι αρχικής επιρροής αναπαράγονται ακριβώς, όλες οι άλλες αναπαράγονται με τη λιγότερη ακρίβεια και αυτό απαιτεί διάφορα εξειδικευμένα πεδία δοκιμής.

Γενικά, εκείνες οι εγκαταστάσεις που ειδικεύονται για τις συγκεκριμένες παραμέτρους καλούνται αεροσήραγγες. Εντούτοις, ο προσδιορισμός "αεροσήραγγα" πρέπει να διατηρηθεί για τις εγκαταστάσεις που αφιερώνονται στην αεροδυναμική υπό την κλασική έννοια. Εκείνες οι εγκαταστάσεις που

σχεδιάζονται για τις κλιματολογικές δοκιμές θα καλούνται κλιματολογικές σήραγγες. Εντούτοις, εάν η διατομή του επικείμενου ρεύματος αέρος είναι μικρή, για παράδειγμα λιγότερο από τη μετωπική περιοχή ενός οχήματος, «κλιματολογική αίθουσα με αέρα» είναι ένα καλύτερο όνομα. Οι εγκαταστάσεις με ένα ρεύμα αέρος μικρής διατομής που παρέχουν μόνο την κατάλληλη ψύξη, θα καλούνται δυναμόμετρα με εξαεριστήρα (ή ανεμιστήρα).

Όσο περισσότεροι παράμετροι αμελούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, τόσο μεγαλύτερη προσπάθεια απαιτείται για να εξασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα από ένα πεδίο δοκιμής μπορούν να μεταφερθούν στο δρόμο. Οι συγκριτικές μετρήσεις μεταξύ των διάφορων εγκαταστάσεων δοκιμή με το δρόμο πρέπει να πραγματοποιηθούν για να αποκαλύψουν και να προσδιορίσουν τις ανεπάρκειες οποιουδήποτε συγκεκριμένου είδους προσομοίωσης.

4.2: Μερικές βασικές αρχές της τεχνικής αεροσηράγγων.

4.2.1: Επιλογή τεχνικής

Ποικίλες τυποποιημένες εργασίες αφιερώνονται στην τεχνική αεροσηράγγων. Δύο είδη αναφορών μπορούν να διακριθούν: Σε μια κατηγορία δίνεται έμφαση στο σχεδιασμό των αεροσηράγγων, και στην άλλη στη λειτουργία τους. Μόνο ένα παράδειγμα για το καθένα θα δοθεί εδώ.

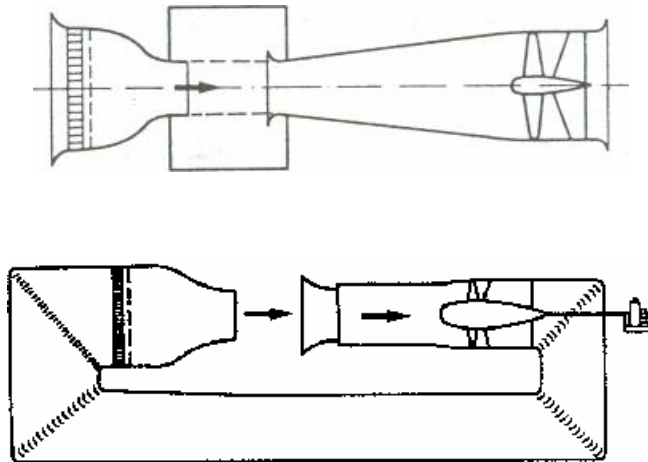
Κατά καιρούς έχουν μελετηθεί οι έρευνες της τεχνικής αεροσηράγγων μέχρι το 1965, αλλά χωρίς την εκτίμηση για τις απαιτήσεις των αυτοκινήτων. Από τότε έχει σημειωθεί ουσιαστική πρόοδος στην τεχνολογία υποχητικών αεροσηράγγων. Η τεχνική μετρήσεων - με την εξαίρεση κάποιου "κλασσικού" ελέγχου έχει βελτιωθεί συνολικά. Το πώς να εκτελούνται οι δοκιμές στην αεροσηράγγα έχουν καθιερωθεί, εντούτοις, χωρίς μελέτη σε βάθος τέτοιων

ουσιαστικών θεμάτων όπως η οδική προσομοίωση ή η διόρθωση αεροσηράγγων για μεγάλη (γεωμετρική) παρεμπόδιση.

Οι λεπτομέρειες των εφαρμογών στη αεροσήραγγα ειδικά για τα αυτοκίνητα έχουν συνταχθεί εξ ονόματος της SAE. Οι χρήσιμες πληροφορίες βρίσκονται επίσης στις δημοσιεύσεις για τη βιομηχανική αεροδυναμική. Παρακάτω θα περιγραφούν μόνο εκείνες οι πτυχές της τεχνικής αεροσηράγγων που είναι χαρακτηριστικές για τις εφαρμογές στα αυτοκίνητα..

4.2.2: Εκτιμήσεις διαμόρφωσης.

Η αρχή σχεδίου και λειτουργίας μιας αεροσήραγγας προκύπτει από το σχήμα 4.4. Όσον αφορά το είδος ροής αέρος, δύο τύποι πρόκειται να διακριθούν. Στη σήραγγα τύπου Cottingen, ο ανεμιστήρας οδηγεί τον αέρα μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα (το κατώτατο σημείο του σχήματος 4.4). Ο G. EIFFEL την ίδια εποχή με τον PRANDTL, προτίμησαν ένα ανοικτό κύκλωμα: ο αέρας λαμβάνεται από το περιβάλλον, απορροφάται μέσω του τμήματος δοκιμής, και αποβάλλεται στο περιβάλλον πάλι. Εκτός από αυτά τα δύο υπάρχει ένας τρίτος τύπος, με μια "ανοικτή επιστροφή" (μερικές φορές αποκαλούμενος "μερικώς ανοικτή επιστροφή") και γενικά καλούμενη ως σήραγγα του EIFFEL. Αυτό αποτελείται από μια ανοικτή σήραγγα που χτίζεται σε ένα συγκριτικά μικρό κτήριο που, σε μερικές περιπτώσεις, σχεδιάζεται ακόμη και για να καθοδηγεί την ροή επιστροφής. Ο αέρας που αφήνει τον διαχύτη επιστρέφει στον θάλαμο καθησυχασμού. Κάθε ένας έχουν εγγενή πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, και αυτά μπορούν να συγκριθούν ποσοτικά μεταξύ των τριών τύπων μόνο για συγκεκριμένες εφαρμογές.



Σχήμα 4.4: Αεροσήραγγα με κλειστή επιστροφή (Gottingen) και με ανοικτή επιστροφή (Eiffel)

Το κύριο πλεονέκτημα της σήραγγας τύπου Gottingen είναι η χαμηλή απαίτηση ενέργειας. Το κέρδος απ' αυτό είναι τριπλάσιο: κατ' αρχάς, το κόστος της κινούμενης μονάδας (κινητήρας και ανεμιστήρας) είναι συγκριτικά χαμηλό, δεύτερον οι λειτουργικές δαπάνες είναι χαμηλές και τέλος οι δαπάνες σύνδεσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρές.

Τα τελευταία είναι ανάλογα προς την ηλεκτρική ενέργεια εγκατεστημένη, και είναι ένα σημαντικό μέρος των σταθερών δαπανών στον ετήσιο προϋπολογισμό των μεγάλων αεροσηράγγων. Εντούτοις, η σήραγγα Gottingen έχει και μειονεκτήματα. Λόγω του μήκους του και λόγω της μεγάλης αίθουσας που εγκαθίσταται οι δαπάνη για τον αγωγό της σήραγγας είναι υψηλή. Επειδή πολλά αυτοκινητικά πρότυπα γίνονται από πλαστικό (που είναι ευαίσθητο στις υψηλές θερμοκρασίες), η σήραγγα πρέπει να εξοπλιστεί με ένα σύστημα ψύξης. Για να υπερνικήσει την απώλεια πίεσης λόγω του ψύκτη απαιτείται πρόσθετη δύναμη ανεμιστήρων, ως εκ τούτου μερικά από τα αποθέματα της χαμηλότερης δύναμης της κίνησης χάνονται. Οι σήραγγες με έλεγχο αέρα-θερμοκρασίας πρέπει να έχουν ένα κλειστό κύκλωμα σε ένα μονωμένο κτήριο, το οποίο θα μπορούσε να είναι ανοικτής επιστροφής.

Μια σήραγγα Eiffel που εγκαθίσταται στην ύπαιθρο είναι φτηνή. Εντούτοις, έχει το ιδιαίτερο μειονέκτημα ότι οι συνθήκες λειτουργίας εξαρτώνται από τον καιρό. Για αυτόν τον λόγο είναι πρακτικό μόνο στις χώρες με μέτριο κλίμα. Επιπλέον, όταν απορροφείται ο αέρας μέσα από το περιβάλλον, βρίσκονται ιδιαίτερες δυσκολίες στην διατήρηση της ποιότητας ροής στο τμήμα δοκιμής απαλλαγμένο από τα αποτελέσματα του αέρα. Από μια μεγάλη σήραγγα του Eiffel που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία αυτοκινήτου είναι γνωστό ότι, κατά μέσον όρο, μια ημέρα δοκιμής την εβδομάδα χάνεται λόγω των δυσμενών συνθήκες του αέρα.. Το πλέγμα μπροστά από το ακροφύσιο εισαγωγής αποτρέπει την εισαγωγή φύλλων, πουλιών, κλπ. Στο κύριο σώμα της αεροσήραγγας.

4.2.3: Ιδιότητες Των Θεμελιωδών Τμημάτων.

4.2.3.1: Σχεδιάζοντας μια Δοκιμή.

Όταν σχεδιάζουμε μια δοκιμή, ο χρήστης της αεροσήραγγας θα πρέπει να έχει απαντήσεις στις επόμενες 4 ερωτήσεις:

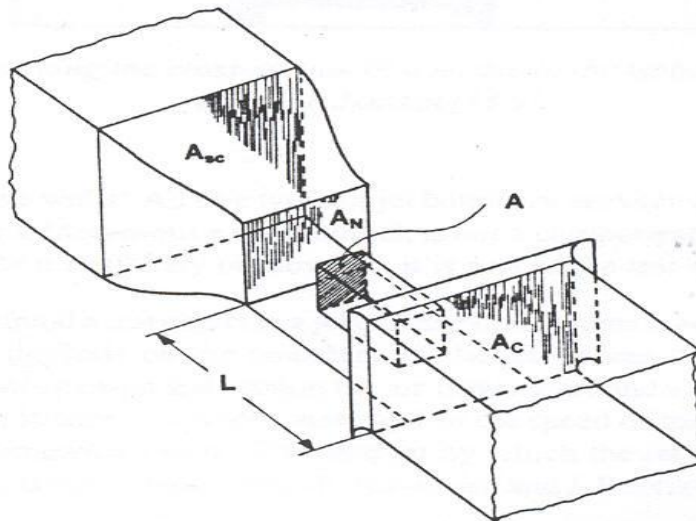
1. Τι είδους σήραγγα χρειάζεται (τύπος αεροσήραγγας, εξοπλισμός κτλ.);
2. Πώς τα αποτελέσματα από μια συγκεκριμένη αεροσήραγγα συσχετίζονται με το δρόμο;
3. Πόσες ώρες στην αεροσήραγγα χρειάζονται;
4. Ποιο θα είναι το κόστος της δοκιμής;

Η απάντηση στη πρώτη ερώτηση βρίσκεται στο τμήμα 4.5. Τα κυρίως οικονομικά ερωτήματα 3 και 4 σχετίζονται πολύ και θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη μαζί. Καμία γενική απάντηση δεν δίνεται εδώ. Ωστόσο, το κόστος που ενδιαφέρει είναι το κόστος ανά πληροφορία που αποκτάται, και όχι το κόστος ώρας απασχόλησης της αεροσήραγγας. Μια ακριβή ωριαία τιμή μπορεί να

αντισταθμιστεί με γρήγορες τεχνικές δοκιμών, συλλογή πληροφοριών και αποτίμηση.

Εφόσον μια συγκεκριμένη αεροσήραγγα έχει επιλεγθεί, ο χρήστης της μένει μόνο με την ερώτηση 2. Η απάντηση σε αυτήν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των επόμενων μερών της αεροσήραγγας (σχ. 4.5).

1. Τμήμα δοκιμής (μέγεθος, ανοιχτή ή κλειστή, εξομοίωσης είδους δρόμου).
2. Ακροφύσιο (συμπεριλαμβανομένου του θαλάμου καθησυχασμού).
3. Συλλέκτης (για αεροσήραγγες με τμήμα ανοιχτών δοκιμών).
4. Θάλαμος που περιβάλλει το τμήμα ανοιχτών δοκιμών (γνωστός και ως ανάμειξης).
5. Θερμικός εναλλάκτης και φορτίο ηλίου (σε σήραγγες εξομοίωσης κλιματικών φαινομένων).



Σχήμα 4.5: Τμήμα δοκιμής αεροσήραγγας και οι κύριοι γεωμετρικοί της παράμετροι.

Μόνο αυτά τα τμήματα θα αναλυθούν αργότερα. Όλες οι άλλες τεχνικές απόψεις, για παράδειγμα η διάταξη των διαχυτών τα κυρτά ελάσματα (turning vanes) στις καμπές, και το πώς ο έλικας τροφοδοτείται και ελέγχεται ενδιαφέρουν μόνο το σχεδιαστή και τον χειριστή της αεροσήραγγας. Σε αεροσήραγγες για επιβατικά οχήματα αυτές οι λεπτομέρειες δε διαφέρουν από αυτές για την αεροναυτική.

4.2.3.2: Τμήμα Δοκιμής.

Το τμήμα δοκιμής χαρακτηρίζεται από 2 ιδιότητες: το μέγεθός του και το είδος ροής αέρα πλευρικού ορίου (air stream lateral boundary). Το μέγεθος του τμήματος δοκιμής χαρακτηρίζεται από την διατομή A_N του ακροφυσίου και το μήκος L ανάμεσα στην έξοδο του ακροφυσίου και την είσοδο του συλλέκτη. Και το A_N και το L χρησιμοποιούνται σε μη διαστατική μορφή όπως παρακάτω:

- Ο λόγος παρεμπόδισης (blockage ratio) $\phi=A/A_N$, όπου A είναι η πρόσθια επιφάνεια του οχήματος (σχ. 4.4)
- Το σχετικό μήκος $\lambda=L/D_N$, όπου D_N είναι η ισοδύναμη (υδραυλική) διάμετρος του ακροφυσίου. $D_N=4A_N/C$, όπου C είναι η περιφέρεια του ακροφυσίου.

Με open-τζετ τμήματα δοκιμής δύο περαιτέρω παράμετροι είναι σημαντικοί:

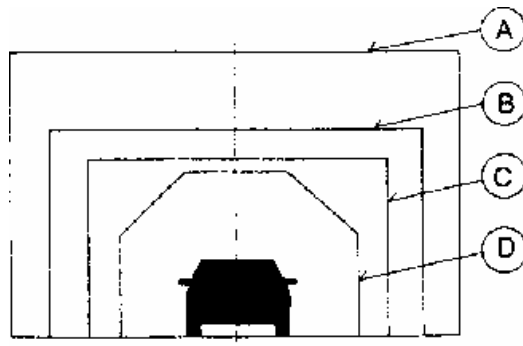
- Ο λόγος των διατομών του συλλέκτη και του ακροφυσίου, A_C/A_N .
- Ο όγκος της ανάμειξης (και ειδικά το ύψος και το μήκος του).

Για να έχουμε κινηματική ομοιότητα της ροής σε αεροσήραγγα με αυτήν στο δρόμο, ο λόγος εμπόδισης ϕ , που στο δρόμο είναι 0, πρέπει να είναι το δυνατόν μικρός. Ωστόσο, εξ αιτίας του κόστους της σήραγγας (κατασκευή και λειτουργία), απαιτείται ο λόγος εμπόδισης να είναι όσο πιο μεγάλος είναι 'εφικτό'. Όμως, το τι είναι εφικτό σε αυτό το περιβάλλον είναι ακόμα θέμα υπό συζήτηση.

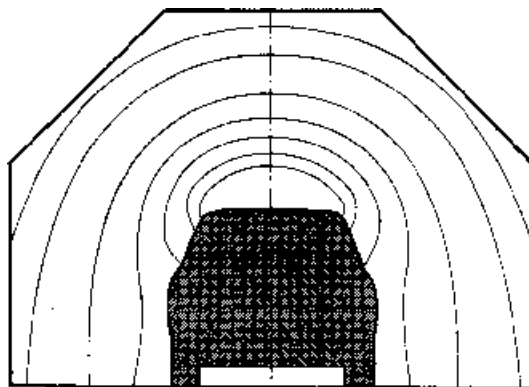
Όταν οι πρώτες αεροσήραγγες οχημάτων πλήρους κλίμακας κατασκευάστηκαν, ο λόγος εμπόδισης μεταφέρθηκε από την αεροναυτική: $\phi=0.05$. Με τυπική για αυτοκίνητο πρόσθια επιφάνεια $A=2\text{m}^2$, αυτό οδήγησε σε διατομή ακροφυσίου $A_N=40\text{m}^2$. Αργότερα, συγκριτικές μετρήσεις και εξετάσεις σε διαστάσεις και διορθώσεις τμημάτων δοκιμών έδειξαν ότι ένας μεγαλύτερος λόγος εμπόδισης θα ήταν ανεκτός. Το $\phi=0.10$ είναι λογικό όριο για αυτοκίνητα. Αρκετές αεροσήραγγες έχουν σχεδιαστεί με αυτή την τιμή, έχοντας μια διατομή $A\approx 20\text{m}^2$. Ωστόσο, και $\phi=0.20$ χρησιμοποιείται. Η μικρότερη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας έχει μόνο $A_N=10\text{m}^2$.

Παράλληλα με την επιφάνεια A_N , το σχήμα της διατομής του ακροφυσίου έχει αλλάξει. Μερικές τυπικές διατομές δείχνονται στο σχ. 4.6. Συχνά το σχήμα μιας διατομής open-τζετ είναι παραλληλόγραμμο. Ο λόγος ύψους H με το μήκος B είναι περίπου 0.66. Μερικές φορές οι γωνίες στρογγυλεύονται. Μικρές,

πλήρους κλίμακας αεροσήραγγες που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για αυτοκίνητα έχουν διατομές διαφορετικές από παραλληλόγραμμο. Όταν σχεδιάστηκε η σήραγγα του Pininfarina (11m^2), επελέγη ένα ημικύκλιο με τις κάτω άκρες στρογγυλεμένες. Σκοπός ήταν να δημιουργηθεί μια διατομή που να είναι όμοια με το σχήμα της πρόσθιας όψης ενός αυτοκινήτου. Κόβοντας τις γωνίες από το παραλληλόγραμμο, οι μηχανικοί επέλεξαν η διατομή της αεροσήραγγας ακουστικής της BMW (10m^2) να πλησιάσει το σχήμα των ισοβαρών γύρω από το αυτοκίνητο (σχ. 4.7). Για αυτό το λόγο στο 0.7 ο λόγος ύψους προς πλάτος είναι λίγο μεγαλύτερος από το συνηθισμένο 0.66.



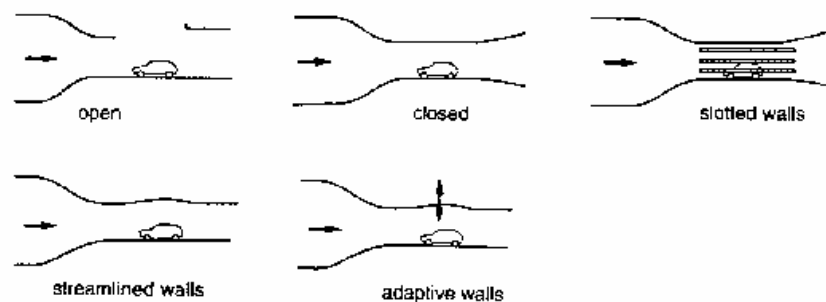
Σχήμα 4.6: Διατομή τμημάτων δοκιμών από διάφορες αεροσήραγγες αυτοκινήτων.



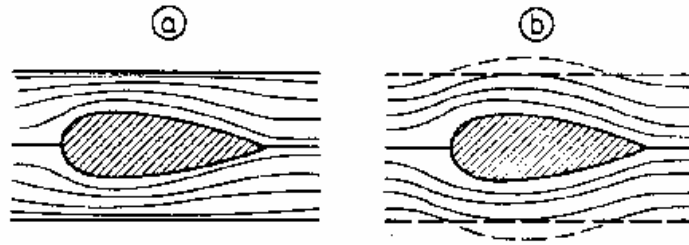
Σχήμα 4.7: Ταιριάζοντας τη διατομή του ακροφυσίου με τις ισοβαρείς γύρω από το αυτοκίνητο.

Ανάλογα με τον τύπο του ορίου του τζετ, μπορούμε να διακρίνουμε 3 είδη τμημάτων δοκιμών: ανοιχτά, κλειστά και τοιχωμάτων με σχισμές. Το κλειστό τμήμα δοκιμών έχει περαιτέρω αναπτυχθεί σε συγκεκριμένες διαμορφώσεις, για παράδειγμα προσαρμοσμένης ροής και προσαρμοσμένων τοιχωμάτων. Και οι 5 τύποι του τζετ ορίου δείχνονται στο σχ. 4.8. Το πάτωμα, όντας τυπικό για αεροσήραγγα οχημάτων, δεν είναι τμήμα του τμήματος δοκιμής, αν και είναι υλικά προσαρτημένο σε αυτό. Σταθερό ή κινητό, είναι μέρος του στησίματος της δοκιμής, αναπαριστώντας το δρόμο.

Κινηματικά, η ροή γύρω από το αντικείμενο της δοκιμής σε μια δέσμη ρευστού πεπερασμένων διαστάσεων δεν είναι ίδια όπως στον ελεύθερο αέρα.. Η φύση της διαφοράς εξαρτάται από το όριο της δέσμης του ρευστού, όπως φαίνεται από τις γραμμές ροής στο σχ. 4.9. Σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής ο αέρας που ρέει γύρω από το όχημα μπορεί να αποκλίνει. Σε σύγκριση με τον ελεύθερο αέρα οι γραμμές ροής ανοίγουν πιο πολύ και άρα η ταχύτητα του αέρα σε οποιοδήποτε σημείο κοντά στο όχημα είναι λίγο χαμηλότερη. Το ποσό της απόκλισης του ορίου τζετ σε ένα μοντέλο στο τμήμα δοκιμής έχει μετρηθεί και αναπαρίσταται στο σχ. 4.10.



Σχήμα 4.8: Τα διάφορα είδη των ορίων τμημάτων δοκιμής.



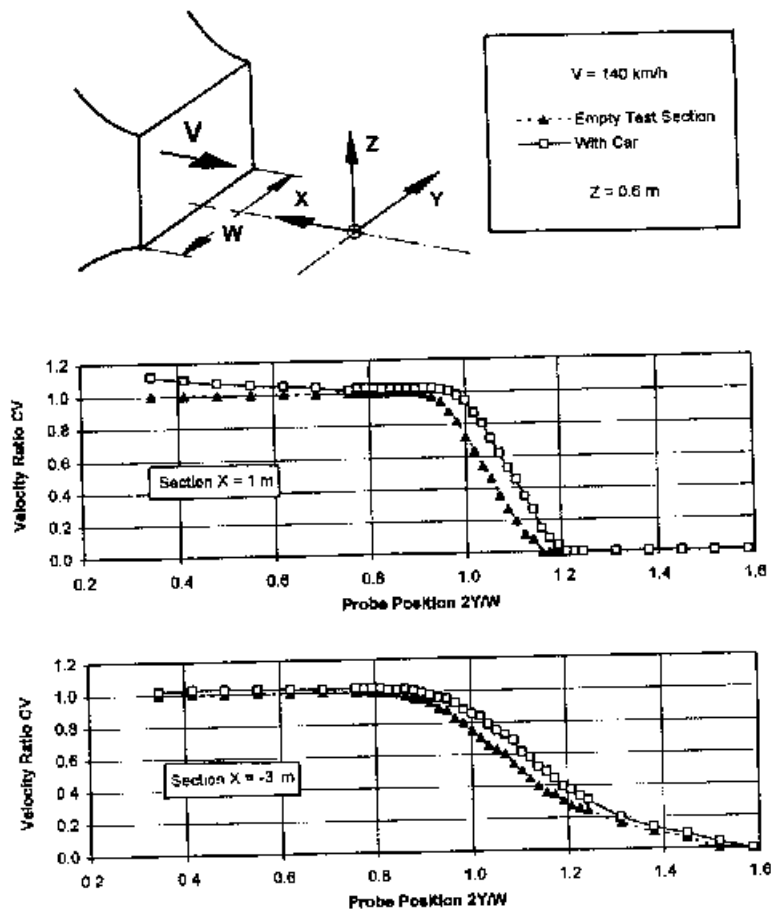
Σχήμα 4.9 : Το αποτέλεσμα του πλευρικού ορίου στο πεδίο ροής μέσα σε ένα τμήμα δοκιμής: α) συστολή σε ένα κλειστό τμήμα, β) διαστολή σε ένα ανοιχτό τμήμα.

Αντιθέτως, σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής οι γραμμές ροής περιορίζονται από τα τοιχώματα και έτσι η τοπική ταχύτητα κοντά στο όχημα αυξάνεται. Και στις 2 περιπτώσεις (ανοιχτό και κλειστό τμήμα δοκιμών) το αποτέλεσμα του ορίου του τζετ είναι πιο έντονο όσο πιο κοντά είναι στο μοντέλο, δηλαδή όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος εμπόδισης ϕ . Η υποκίνηση για τους διάφορους τύπους ορίου τμημάτων δοκιμών φαίνεται στο σχ. 4.8 είναι να ελαχιστοποιήσει το αποτέλεσμα του περιορισμένου μεγέθους της αεροσήραγγας, έτσι ώστε να επιτρέψει ένα μεγαλύτερο λόγο εμπόδισης.

Και τα δύο είδη του ορίου τζετ – ανοιχτό και κλειστό – έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του σε σχέση με τις φυσικές ιδιότητες της αεροσήραγγας και τις ιδιαιτερότητες της καθημερινής εργασίας. Αυτά θα συζητηθούν παρακάτω. Συχνά η ροή σε ένα άδειο ανοιχτό τμήμα δοκιμών λέγεται ότι είναι συγκρίσιμη με μια ελεύθερη δέσμη ιδανικού ρευστού. Η περιβάλλουσα (και άρα συνεχής) πίεση εξασκείται όχι μόνο στο όριο αλλά και σε ολόκληρο το πεδίο ροής. Ένα βασικό πλεονέκτημα που προσδιορίζει το τμήμα δοκιμής ανοιχτού τζετ είναι μια συνεχής στατική πίεση στον άξονά του. Αυτή η ιδιότητα θα πλεονεκτεί και συγκεκριμένα σε πειράματα με ψεύτικα σώματα διότι, όταν μετράται η αντίσταση μακριών σωμάτων σε μεγάλες κάθετες επιφάνειες μπροστά και πίσω, ακόμα και μια μικρή μεταβολή πίεσης

στον άξονα οδηγεί σε σημαντικό λάθος. Όμως, η συνεχής πίεση κατά μήκος ενός ανοικτού τζετ σε ένα άδειο τμήμα δοκιμής δεν υπάρχει, όπως φαίνεται στο σχ. 4.11. Γενικώς, στην κατεύθυνση της ροής στην έξοδο του ακροφυσίου η μεταβολή της πίεσης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας είναι αρνητική. Πιο μετά γίνεται θετική, και γίνεται πιο απότομη μπροστά στο συλλέκτη.

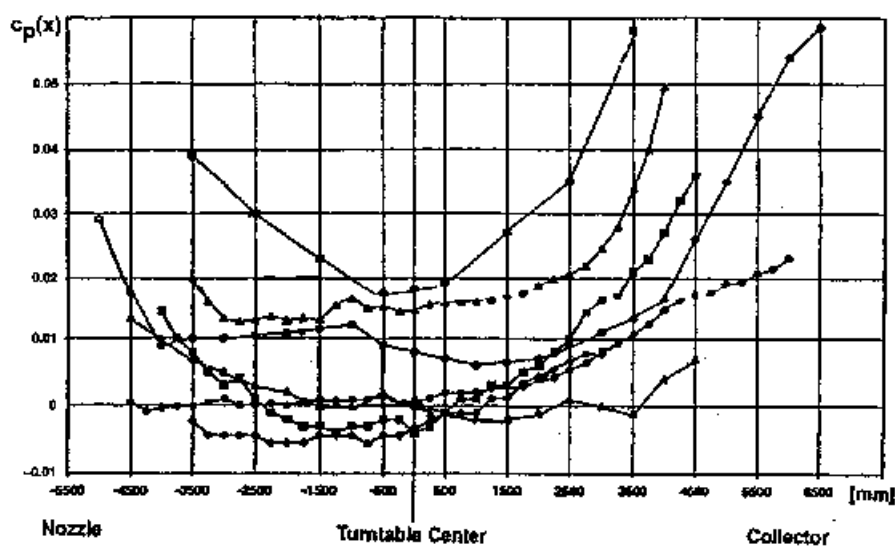
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.12(β) η μηδενική καμπύλη πίεσεως εξαπλώνεται σε όλο το μήκος ενός ανοικτού τζετ εάν το μη-διαστατικό μήκος $\lambda=L/D_N$ ενός τμήματος δοκιμής είναι αρκετά μεγάλο. Δυστυχώς, για πολλές υπάρχουσες αεροσήραγγες δεν ισχύει.



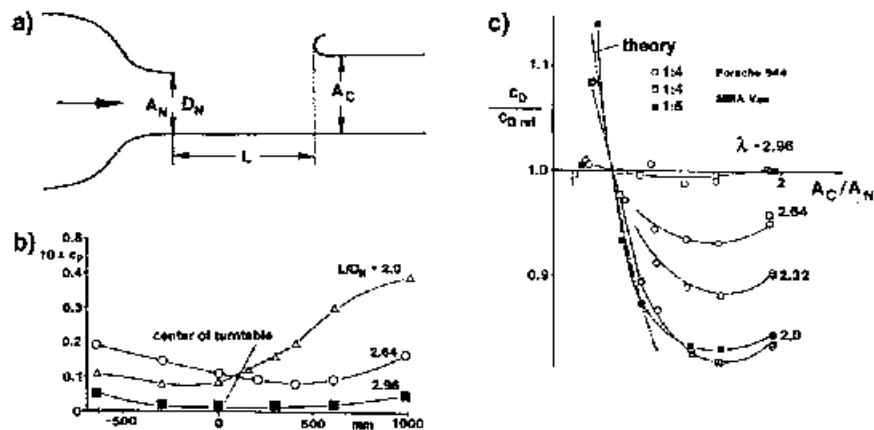
Σχήμα 4.10: Το όριο ενός ελεύθερου τζετ που μετατοπίζεται από ένα πρότυπο.

Με μια χαρακτηριστική τιμή $\lambda = 2,0$ το μη-διαστατικό μήκος τμήματος δοκιμής τους είναι μάλλον μικρά, και μερικά από αυτά παρουσιάζουν θετική καμπύλη πίεσης στη θέση του προτύπου (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής). Συνεπώς, η μετρημένη οπισθέλκουσα είναι πάρα πολύ χαμηλή. Το πόσο σημαντικά επηρεάζεται η μετρημένη οπισθέλκουσα από το μήκος L του τμήματος δοκιμής και το A_C της περιοχής της εισόδου του συλλέκτη φαίνονται στο σχήμα 4.12 (γ). Με το αυξανόμενο μήκος L του τμήματος δοκιμής, το λάθος στη μετρημένη οπισθέλκουσα είναι μικρότερο και η επιρροή του A_C της περιοχής της εισόδου του συλλέκτη μειώνεται. Συνεπώς, ένα σχετικό μήκος τμήματος δοκιμής $\lambda = 3$ φαίνεται να είναι ιδανικό, με μια επίδραση του A_C πολύ μικρή. Εντούτοις, δεν πρέπει να εξεταστεί μόνο το μέγεθος του A_C της περιοχής εισόδου του συλλέκτη.

Το δεύτερο ιδιαίτερο πλεονέκτημα που αποδόθηκε προηγουμένως στο ανοικτό τμήμα δοκιμής ήταν μια χαμηλότερη απόλυτη αξία της διόρθωσης. Εντούτοις, αυτό το επιχείρημα δεν ισχύει πλέον. Για πολύ, η μόνη διόρθωση ήταν της παρεμπόδισης και αυτή είναι μικρή για ανοικτό τζετ. Εντούτοις η παρεμπόδιση είναι μόνο ένα μέρος από μια σειρά αποτελεσμάτων παρεμβολής και δεν πρέπει να αντιμετωπισθεί μεμονωμένα.



Σχήμα 4.11: Συντελεστής στατικής πίεσης $C_p(x)$ κατά μήκος του άξονα διάφορων πραγματικού μεγέθους αυτοκίνητων αεροσηράγγων.



Σχήμα 4.12: Επίδραση α) του μήκους L τμημάτων δοκιμής και A_C περιοχής κολπίσκων συλλεκτών β) στη στατική πίεση κατά μήκος του άξονα σηράγγων κα c) η μετρημένη οπισθέλκουσα D .

Τέλος, το τρίτο πλεονέκτημα του ανοικτού τμήματος δοκιμής είναι η εύκολη δυνατότητα πρόσβασής του, η οποία διευκολύνει την πρότυπη εγκατάσταση και την τοποθέτηση των ελέγχων, επιτρέπει στις εκτός ροής ακουστικές μετρήσεις, και επιτρέπει την εύκολη φωτογραφία της ροής.

Το μέγιστο μειονέκτημα του ανοικτού τμήματος δοκιμής είναι το περιορισμένο χρησιμοποιήσιμο μήκος του. Το τζετ που βγαίνει από το ακροφύσιο αναμιγνύεται με τον ήρεμο αέρα. Το πλάτος του πυρήνα του τζετ (στον οποίο το επιθυμητό U_{∞} ταχύτητας αέρα υπάρχει) μειώνεται γρήγορα.

Επιπλέον, η ταραχώδης διαδικασία μίξης στο οριακό του τζετ είναι εντονότερη από ότι σε ένα ταραχώδες οριακό στρώμα δίπλα σε έναν τοίχο, και αυτή η μίξη προκαλεί τις υψηλότερες απώλειες από την τριβή σε έναν τοίχο. Επομένως η απαίτηση δύναμης ενός ανοικτού τμήματος δοκιμής είναι υψηλότερη από ότι για ένα κλειστό.

Αλλα μειονεκτήματα του ανοικτού τζετ είναι η ευαισθησία του στις χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεις (κύμα) και η αβίαστη ηχητική ακτινοβολία

του, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως ενόχληση από το προσωπικό των αεροσηράγγων. Τέλος, για τις κλιματολογικές σήραγγες η ανάμειξη πρέπει να περιληφθεί μέσα στην κλιματιζόμενη περιοχή ως εκ τούτου οι μεγάλες επιφάνειες τοίχων πρέπει να μονωθούν.

Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να προκύψει κατά δοκιμή των αγωνιστικών αυτοκινήτων σε ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής. Τα οπίσθια φτερά τους παράγουν μια υψηλή άντωση (αρνητική άνωση). Το σχετικό upwash μπορεί να είναι τόσο ισχυρό που κάμπει τη ροή αέρος πίσω από ένα αυτοκίνητο προς τα πάνω και πέρα από το συλλέκτη της σήραγγας. Ο αέρας πίσω από το αυτοκίνητο προέρχεται έπειτα μέσα από τις πλευρές και αυτό μπορεί να αλλάξει σημαντικά το σχέδιο ροής στο οπίσθιο άκρο του αυτοκινήτου.

Οι αρνητικές ιδιότητες του ανοικτού τμήματος δοκιμής είναι τα αντίστοιχα των θετικών ιδιοτήτων του κλειστού. Συμφέρον για την *κλειστή* δοκιμή το τμήμα είναι το μεγάλο χρησιμοποιήσιμο μήκος του. Εντούτοις, η αύξηση του οριακού στρώματος κατά μήκος των τοίχων μειώνει την αποτελεσματική περιοχή δοκιμής, με συνέπεια μια αυξανόμενη ταχύτητα και μια αντίστοιχη μειωμένη πίεση κατά μήκος του άξονα του ρεύματος αέρος.

Η σχετική αρνητική καμπύλη πίεσης μπορεί να αντισταθμιστεί με ελαφρώς αυξήσει της διατομής των σηράγγων στην κατεύθυνση ροής. εν τούτοις, αυτή η διόρθωση μπορεί να είναι σωστή μόνο για μια συγκεκριμένη διαμόρφωση, δηλαδή για το κενό τμήμα δοκιμής. Με ένα πρότυπο εγκατεστημένο είναι μόνο μια προσέγγιση. Ένα περαιτέρω πλεονέκτημα του κλειστού τμήματος δοκιμής είναι η σταθερότητα της ροής του, δηλ., το πρόβλημα εκκένωσης δεν υπάρχει.

Ένα μειονέκτημα του κλειστού τμήματος δοκιμής είναι η ευαισθησία του στην παρεμπόδιση του απορρεύματος, η διόρθωση παρεμπόδισης είναι περίπου δύο φορές ενός ελεύθερου τζετ. Επιπλέον, σε μια υψηλή γωνία συστροφής, η πλευρική εκτροπή του ρεύματος αέρος μπορεί να είναι τόσο

ισχυρή που οι σχετικές δυσμενείς καμπύλες πίεσης στους παρακείμενους πλευρικούς τοίχους του τμήματος δοκιμής μπορούν να οδηγήσουν στο χωρισμό οριακού στρώματος. Σε αυτή την περίπτωση, η διόρθωση στη γωνία συστροφής δεν είναι πλέον δυνατή.

Το τμήμα δοκιμής με σχισμές είναι μια προσπάθεια να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα των ανοικτών και κλειστών τμημάτων δοκιμής και συγχρόνως, να εξαλείψουν τα μειονεκτήματα και στα δύο. Οι σχισμές στους τοίχους δίνουν την πρόσβαση της πίεσης του περιβάλλοντος στη ροή μέσα στο τμήμα δοκιμής, κατά συνέπεια η πίεση κατά μήκος του άξονα είναι (σχεδόν) σταθερή. Το στερεό μέρος των τοίχων αποτρέπει το τζετ από τη μίξη με τον περιβαλλοντικό αέρα ο πυρήνας του τζετ επομένως παραμένει χρησιμοποιήσιμος για ένα μεγαλύτερο μήκος. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1, εκτελέστηκαν από τον J.-D. VAGT αποδεικνύουν την αρχή των τοίχων με σχισμές, το εγκάρσιο σχεδιάγραμμα ταχύτητας με τους τοίχους με σχισμές είναι μεταξύ αυτού του ελεύθερου τζετ και αυτού του κλειστού τμήματος δοκιμής.

Όσον αφορά τους διαμπερείς τοίχους, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στις σήραγγες ύδατος και τις αεροσήραγγες στη θαλάσσια υδροδυναμική για να επιτρέψουν την έρευνα για τους ιδιαίτερα μακριά σώματα στους αρκετά μεγάλους αριθμούς Reynolds.

Το (μη διαστατικό) πλάτος των σχισμών, η αποκαλούμενη λόγος ανοικτής περιοχής που ορίζεται ως ανοικτή στη συνολική περιοχή της επιφάνειας, πρέπει να καθοριστεί από τις δοκιμές βαθμολόγησης που παράγουν μια διανομή πίεσης σε ένα πρότυπο αυτοκινήτου που αντιστοιχεί στον ελεύθερο αέρα όσο το δυνατόν περισσότερο.

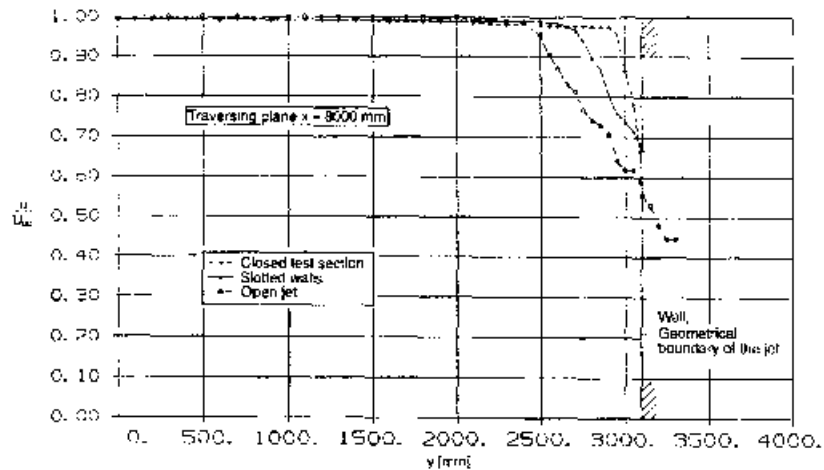
Μια ανοικτή περιοχή του 30% έχει αποδειχθεί ιδανική για τα επιβατικά αυτοκίνητα. Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι αυτή η τιμή ισχύει για την οπισθέλκουσα αλλά όχι απαραίτητα για τα άλλα συστατικά της δύναμης του αέρα, όπως παραδείγματος χάριν, η άνωση.

Μία μέθοδος αποφυγής της μεγάλης διόρθωσης, απαραίτητης για τη παρεμπόδιση του απορρέυματος και του στερεού σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής είναι να δοθεί αεροδυναμική μορφή στους τοίχους του. Σε αυτήν την περίπτωση υποτίθεται ότι το σχέδιο ροής σε μια ορισμένη απόσταση από ένα όχημα (και τα απορρευματά του), το αποκαλούμενο μακρινό πεδίο, εξαρτάται ελάχιστα από τις μεμονωμένες λεπτομέρειες της μορφής του. Το μακρινό πεδίο καθορίζεται κυρίως από τις γενικές παραμέτρους του αντικειμένου δοκιμής: το μήκος, το ύψος, και το πλάτος. Εάν οι τοίχοι των σηράγγων διαμορφώνονται σύμφωνα με το σχέδιο ελευθέρως ροής αέρα ενός μέσου μεγέθους αυτοκίνητου, η ροή γύρω από τα μικρότερα και μεγαλύτερα οχήματα θα διαστρεβλωθεί ελαφρώς, σε κάθε περίπτωση πολύ λιγότερο απ' ό,τι στους παράλληλους τοίχους.

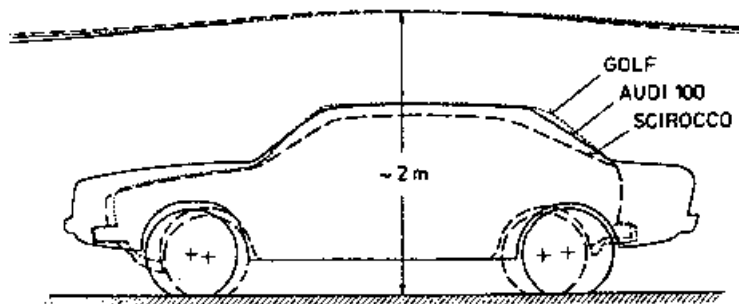
Αυτό επιβεβαιώνεται με τη σύγκριση των ιχνών καπνού που φωτογραφίζονται στη μεγάλη αεροσήραγγα της VOLKSWAGEN. Οι ρευματικές γραμμές σε ένα ύψος 2 μ επάνω από το δάπεδο, που σχεδιάζονται (από τις φωτογραφίες) στο σχήμα 4.14 για τρία αυτοκίνητα διαφορετικού μεγέθους και μορφής, διαφέρουν ελαφρώς. Με τη χρήση κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων έχει προσδιοριστεί το πόσο αποδοτική μπορεί να είναι η αεροδυναμική σχεδίαση των τοίχων των σηράγγων. Σύμφωνα με τις μεθόδους αυτές, η παρεμπόδιση μπορεί να είναι μέχρι 20% και να παραγάγει ακόμα τα ίδια αποτελέσματα με τη παρεμπόδιση 5% σε ένα τμήμα δοκιμής με παράλληλους τοίχους. Παρά αυτού του πλεονεκτήματος, που ανοίγει τη δυνατότητα στις αεροσήραγγες κλειστών τμημάτων δοκιμής που είναι πολύ μικρές, η σχεδίαση αεροδυναμικών τοίχων δεν έχει εφαρμοστεί ποτέ στις πραγματικού μεγέθους σήραγγες αυτοκινήτων.

Το μειονέκτημα ενός τμήματος δοκιμής με αεροδυναμικούς αλλά *σταθερούς τοίχους* είναι ότι το περίγραμμά του δεν εφαρμόζεται στα οχήματα των οποίων οι κύριες διαστάσεις διαφέρουν σημαντικά από αυτήν που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα περιγράμματα των τοίχων. Αυτό,

παραδείγματος χάριν, θα συμβεί εάν ένα ελαφρύ φορτηγό τίθεται σε ένα τμήμα δοκιμής που έχει διαμορφωθεί για τα επιβατικά αυτοκίνητα. Μια δυνατότητα προσπέλασης αυτού του προβλήματος προσφέρεται από τους προσαρμοσμένους τοίχους.



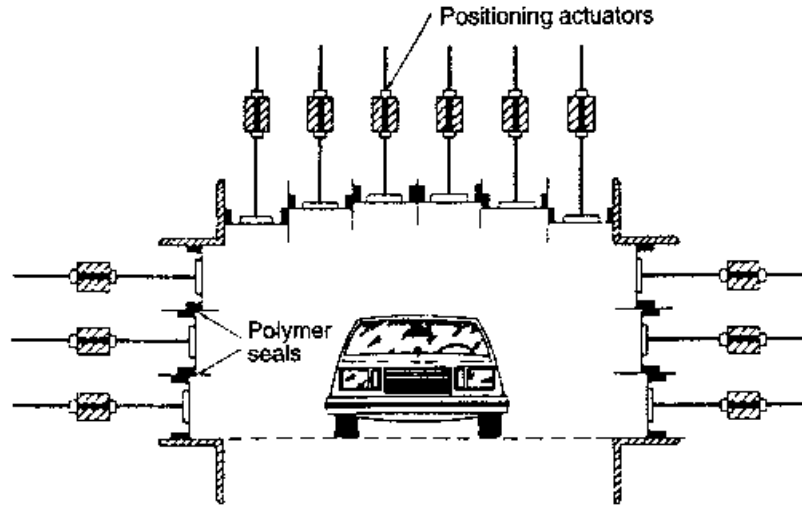
Σχήμα 4.13: Κατανομή ταχύτητας για τρία διαφορετικά είδη οριακών τμημάτων δοκιμής: ανοικτά, κλειστά και με διαμπερή τοιχώματα.



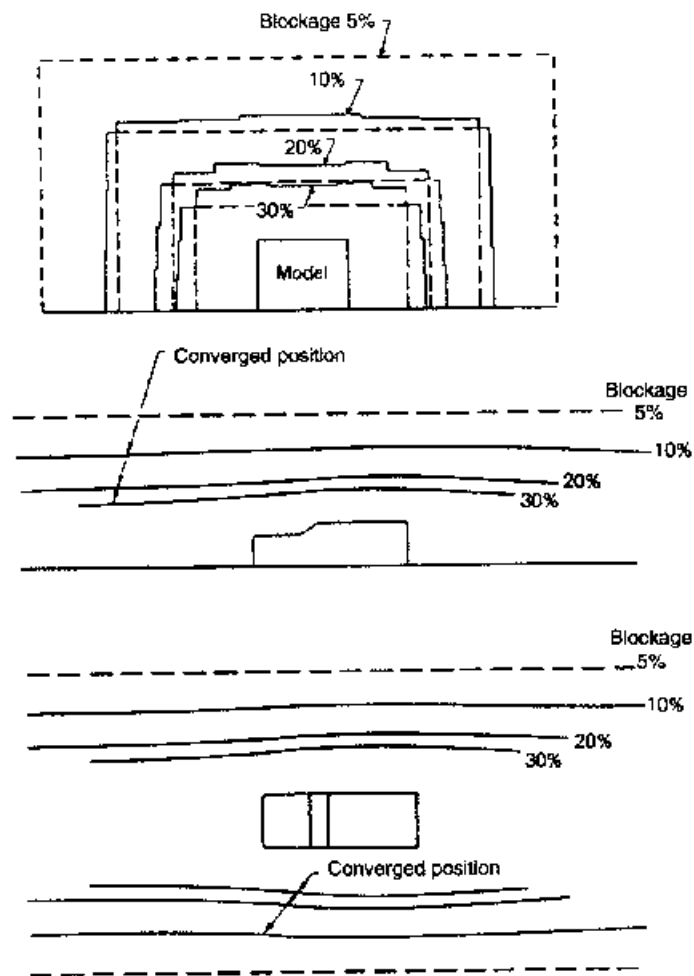
Σχήμα 4.14: Σύγκριση των πεδίων ροής τριών διαφορετικών επιβατικών αυτοκινήτων, που χρησιμοποιούν επιλεγμένη ροϊκή γραμμή στο διάμηκες. Οι ροϊκές γραμμές σχεδιάσθηκαν μετά από τις εικόνες ιχνών καπνού που ελήφθησαν στη μεγάλη αεροσήραγγα της VOLKSWAGEN.

Μια σχετική έννοια έχει αναπτυχθεί από τον J.D. WHITFIELD και έχει εξεταστεί σε μια αεροσήραγγα κλίμακας. Οι τοίχοι του τμήματος δοκιμής αποτελούνταν από διάφορες λουρίδες, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15. Τα περιγράμματά τους αντιστοιχήθηκαν στο σχήμα των ροικών γραμμών. Αυτό έγινε κατά τρόπο επαναληπτικό, χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο πιθανής ροής. Υπολογίσθηκαν οι διανομές πίεσης στις θέσεις των λουρίδων του τοίχου (μακρινό πεδίο), αλλά σε ένα πεδίο ροής απροσδιόριστων διαστάσεων (ελεύθερος αέρας). Κατόπιν τα περιγράμματα των λουρίδων ρυθμίστηκαν έτσι ώστε οι ίδιες τοπικές πιέσεις να μετρηθούν σχετικά με τις λωρίδες όπως ήταν στον ελεύθερο αέρα. Ταυτόχρονα έχει αναπτυχθεί και ένας αλγόριθμος που απαιτεί μόνο ένα βήμα επανάληψης. Το σχήμα 4.16 δίνει ένα παράδειγμα των περιγραμμάτων των τοίχων που υπολογίζονται μετά από αυτήν την διαδικασία. Πρέπει να αναφέρουμε ότι καμία διόρθωση παρεμπόδισης δεν ήταν απαραίτητη ακόμη και για ένα λόγο παρεμπόδισης 20%. Η ασύμμετρη ροή μπορεί επίσης να αντιμετωπιστεί. Όταν ένα αυτοκίνητο παρεκκλίνει της πορείας του, οδηγούμαστε σε ένα ασύμμετρο τμήμα δοκιμής.

Η έννοια των προσαρμοστικών τοίχων έχει εφαρμοστεί για τις ηχητικές αεροσήραγγες ,η 1x1 ηχητική σήραγγα της DLR στο Gottingen είναι ένα παράδειγμα Εντούτοις, οι προσαρμοστικοί τοίχοι δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμα σε μια αεροσήραγγα αυτοκινήτων.



Σχήμα 4.15: Κλειστό τμήμα δοκιμής με προσαρμοσμένους τοίχους.



Σχήμα 4.16: Περιγράμματα των προσαρμοσμένων τοίχων για τις γεωμετρικές αναλογίες παρεμπόδισης 5-30%.

4.2.3.3: Ακροφύσιο.

Η λειτουργία του ακροφυσίου είναι τετραπλή :

1. Επιταχύνει τη ροή.
2. Καθιστά τη κατανομή της ταχύτητας πέρα από τη διατομή της ροής πιο ομοιόμορφη.
3. Μειώνει την ένταση της αναταραχής στο ρεύμα.
4. Χρησιμεύει στη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στο τμήμα δοκιμής.

Η ποιότητα της ροής στο τμήμα δοκιμής καθορίζεται πρώτιστα από το σχέδιο του ακροφυσίου. "Η ποιότητα της ροής" σε αυτό το πλαίσιο αναφέρεται στο γενικό σχεδιάγραμμα ταχύτητας, τις τοπικές αποκλίσεις ταχύτητας από το μέσο όρο (ομοιομορφία), το γωνιώδες της ροής, και το επίπεδο τύρβης. Ο όρος "σχέδιο" αντιπροσωπεύει τις γεωμετρικές ιδιότητες του ακροφυσίου, δηλαδή την αναλογία συστολής του, το μήκος του, και τη μορφή του (περιγράμματα των τοίχων του). Η αναλογία συστολής είναι πρωτίστως αρμόδια για τη μείωση των τοπικών αποκλίσεων ταχύτητας από το μέσο όρο, τις διακυμάνσεις της ταχύτητας σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή το επίπεδο τύρβης. Το μήκος και τα διαγράμματα των τοιχωμάτων καθορίζουν τη συνολική μορφή του σχεδιαγράμματος της ταχύτητας στην έξοδο.

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.1, οι απαιτήσεις (προδιαγραφές) για αυτές τις ιδιότητες της ροής δεν ήταν ακόμα διατυπωμένες σε λογική βάση για τις αεροσήραγγες αυτοκινήτων.

Τοπικές αποκλίσεις από το μέσο όρο της ταχύτητας του αέρα
 $\Delta u / U_\infty = (u - U_\infty) / U_\infty \leq \pm 0.5\%$.

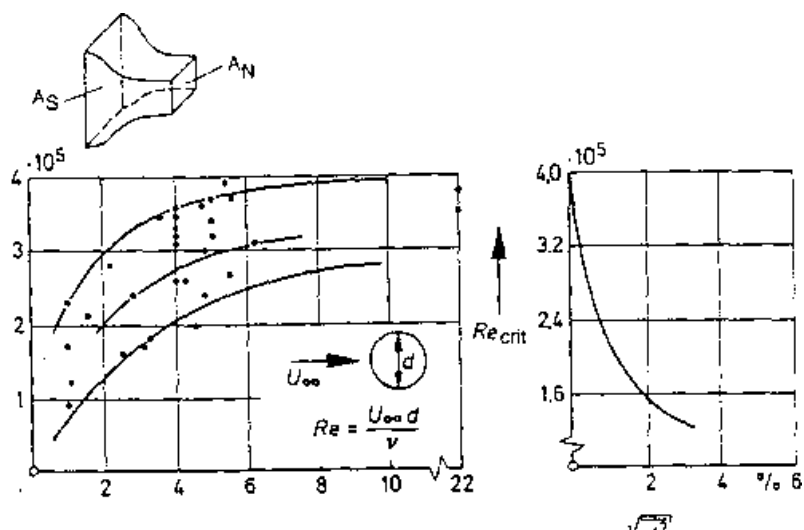
Γωνιώδες στην ανύψωση και την απόκλιση $\alpha, \beta \leq \pm 0.5\%$.

Επίπεδο τύρβης $Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_\infty} \leq \pm 0.5\%$.

Ο λόγος συστολής κ ορίζεται ως η σχέση μεταξύ δύο διατομών, στην είσοδο του ακροφυσίου και στην έξοδό του (βλ. το σκίτσο πιο πάνω από το σχήμα 4.17: $\kappa = A_S / A_N$). Το A_S είναι η διατομή του θαλάμου καθησυχασμού, η οποία είναι ίδια με αυτήν στην είσοδο του ακροφυσίου. Στην έξοδο, η διατομή των ακροφυσίων A_N είναι ίδια με αυτήν του τμήματος δοκιμής. Όπως είναι ευρέως γνωστό, μια μεγάλη αναλογία συστολής κ είναι προϋπόθεση για την ομοιόμορφη διανομή ταχύτητας και το χαμηλό επίπεδο τύρβης.

$$\frac{\Delta u}{U_\infty} \sim \frac{1}{\kappa}, \quad Tu_x \sim \frac{1}{\kappa}$$

Λόγος συστολής $\kappa = A_S / A_N$



Σχήμα 4.17: Κρίσιμος αριθμός Reynolds και επίπεδο αναταραχής υπαρχόντων σηράγγων αέρα με τις διαφορετικές αναλογίες συστολής ακροφυσίων.

Εντούτοις, ο λόγος συστολής κ καθορίζει όχι μόνο την ποιότητα της ροής, αλλά επίσης και το μέγεθος, και έτσι καθορίζει και το κόστος μιας αεροσήραγγας, που δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από όσο είναι απαραίτητο. Σήμερα το (τοπικό) επίπεδο τύρβης μετριέται με ένα ανεμόμετρο θερμού σύρματος. Η κλασσική μέθοδος για το (γενικό) επίπεδο τύρβης μιας αεροσήραγγας ήταν να μετρηθεί ο κρίσιμος αριθμός Reynolds Re_{CRIT} μιας σφαίρας, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο ο συντελεστής οπισθέλκουσας μειώνεται απότομα. Όπως μπορεί να φανεί στο δεξί διάγραμμα του σχήματος 4.17, το Re_{CRIT} είναι μια μοναδική λειτουργία του επιπέδου τύρβης Tu .

Το σχήμα στην αριστερή πλευρά του σχήματος 4.17 συσχετίζει το Re_{CRIT} με την λόγο συστολής κ . Η λειτουργία παρουσιάζει χαρακτηριστικό κορεσμού. Τα στοιχεία προέρχονται από έναν μεγάλο αριθμό υπάρχων αεροσηράγγων. Σύμφωνα με αυτά, ένα επίπεδο τύρβης 0,5% επιτυγχάνεται με μια λόγο συστολής $\kappa = 4$, μια τιμή που είχε προταθεί ήδη από τον L. PRANDTL. Το $\kappa = 4$ μπορεί να ληφθεί ως λογικό για τις σήραγγες αέρα αυτοκινήτων με ένα κύκλωμα Gottingen. Για τις σήραγγες τύπου Eiffel, όπου ανάντη του ακροφυσίου δεν επηρεάζεται από τον ανεμιστήρα, τον διαχύτη, και τις περιστρεφόμενες βαλβίδες κ.λ.π., λέγεται ότι ένας ακόμα μικρότερος λόγος συστολής είναι ικανοποιητικός: $\kappa = 2-3$. Εντούτοις, αυτό ισχύει μόνο εάν ο αέρας αναρροφάται ανάντη από μια πολύ μεγάλη περιοχή. Αυτό δεν ισχύει για όλες τις σήραγγες τύπου Eiffel που χρησιμοποιούν ένα περιβάλλον κτίριο για να οδηγήσουν την επιστρέφουσα ροή.

Η μορφή ενός ακροφυσίου (μήκος και περίγραμμα) πρέπει να επιλέγεται ώστε να παρέχει ένα επίπεδο σχεδιάγραμμα ταχύτητας στην έξοδό του. Επιπλέον η γωνία μεταξύ του τζετ και του γεωμετρικού άξονα του τμήματος

δοκιμής πρέπει να είναι μικρή, επειδή η ροή γύρω από τα εμπόδια κοντά στο έδαφος είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές στη γωνία προσβολής (ή ανύψωσης - pitch). Επομένως μια ανοχή $a \leq \pm 0.5^\circ$, φαίνεται μεγάλη, ενώ ένα $a \leq \pm 0.3^\circ$ είναι πιο ρεαλιστικό. Η ευαισθησία των οχημάτων σε μικρές αποκλίσεις στην συστροφή κοντά στο $\beta = 0$ είναι λιγότερο έντονη.

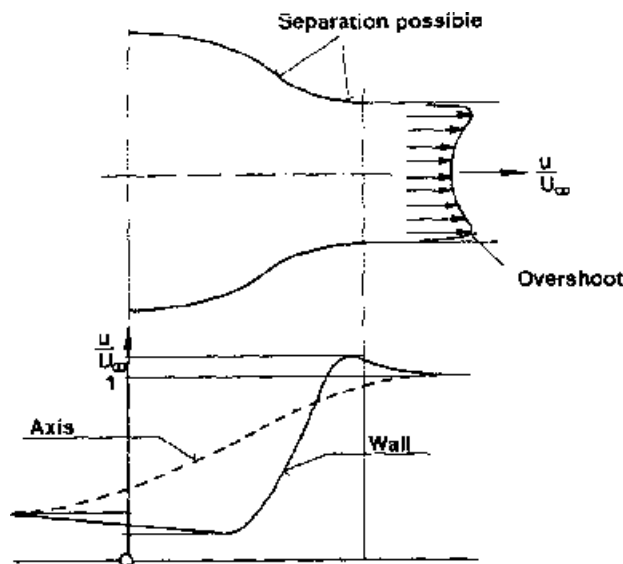
Κατά το σχεδιασμό ενός ακροφυσίου, δύο στοιχεία πρέπει να εξεταστούν:

Για να μειωθεί η δευτεροβάθμια ροή στις γωνίες ενός ορθογώνιου ακροφυσίου, η μορφή των διατομών στην είσοδο και στην έξοδο του πρέπει να είναι παρόμοιες (δηλαδή, για μια ορθογώνια διατομή πρέπει να έχει την ίδια αναλογία ύψους-πλάτους στην είσοδο και στην έξοδο).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18, η αύξηση στην ταχύτητα κατά μήκος του άξονα διαφέρει από αυτήν κατά μήκος των τοίχων. Ενώ είναι ομαλή κατά μήκος του άξονα, η ταχύτητα κατά μήκος των τοίχων δεν αυξάνεται ομαλά. Περνά από ένα τοπικό ελάχιστο μετά από την είσοδο και από ένα τοπικό μέγιστο μπροστά από την έξοδο. Συνεπώς, υπάρχουν δύο περιοχές αντίθετης καμπύλης πίεσης, που κάνει τη ροή των τοιχωμάτων να τείνει να διαχωριστεί. Αυτοί οι διαχωρισμοί πρέπει να αποφευχθούν επειδή, πρώτα, μετά από την επανένωση το οριακό στρώμα είναι παχύτερο απ' ό,τι χωρίς διαχωρισμό και, δεύτερον, ένας μεγάλης κλίμακας διαχωρισμός μπορεί να προκαλέσει τις διακυμάνσεις στη ροή.

Εάν το ακροφύσιο είναι πάρα πολύ κοντό το οριακό στρώμα στην έξοδο του θα είναι παχύ (λόγω του χωρισμού και της επανένωσης). Επιπλέον, το σχεδιάγραμμα ταχύτητας μπορεί να παρουσιάσει μια καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18. Αφ' ετέρου, εάν το ακροφύσιο είναι πάρα πολύ μακρύ το οριακό στρώμα θα είναι επίσης παχύ επειδή θα αυξηθεί κατά μήκος των μακρύτερων τοίχων. Αλλά προ πάντων, ένα μακρύ ακροφύσιο θα αυξήσει το κόστος κατασκευής όλης της σήραγγας.

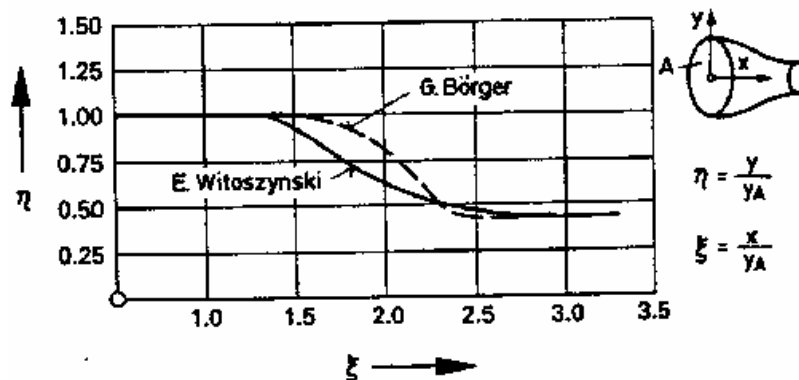
Για πολύ καιρό, τα ακροφύσια αεροσηράγγων σχεδιάζονταν σύμφωνα με το (μονοδιάστατο) τύπο του E. WITOSZYNSKI. Εντούτοις, η αναλυτική εξίσωσή του ισχύει μόνο για τη ανιζώδη αξονοσυμμετρική ροή, και δεν παρέχει καμία οδηγία σχετικά με την επιλογή του μήκους. Αυτό το μειονέκτημα στη συνέχεια ξεπεράστηκε. Είναι ακόμα βασισμένο στην ανιζώδη ροή αλλά λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι ο διαχωρισμός μπορεί να εμφανιστεί εάν οι τοπικές περιοχές της αντίθετης καμπύλης πίεσης κοντά στην είσοδο και στην έξοδο των ακροφυσίων υπερβαίνουν μια κρίσιμη τιμή. Ο MORELL δημιούργησε μια οικογένεια (κυκλική διατομή) των περιγραμμάτων των τοίχων με σκοπό να ενώσει ομαλά δύο κύβους. Το αξονικό σημείο όπου ενώνονται χρησιμοποιείται ως παράμετρος. Πληροφορίες για αποδεκτές καμπύλες πίεσεως απαιτούνται για να υπολογιστεί το μήκος και η μορφή του ακροφυσίου.



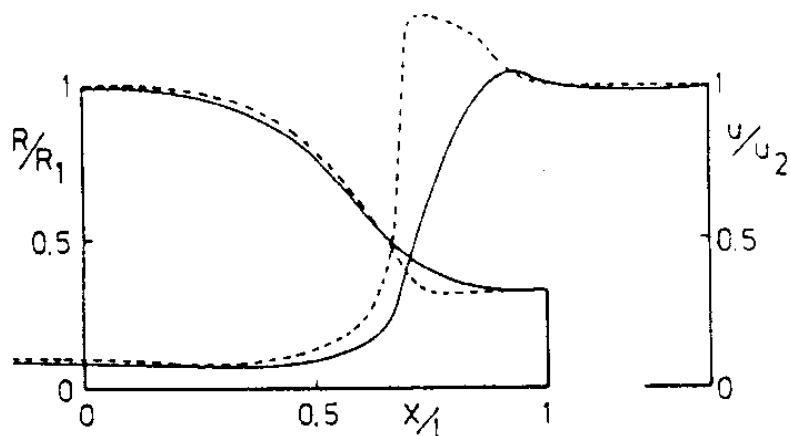
Σχήμα 4.18 Η ταχύτητα μέσα σε ένα ακροφύσιο και στην έξοδό του (σηματική αναπαράσταση).

Σήμερα, χρησιμοποιείται η διαδικασία του MORELL για το αρχικό σχεδιάγραμμα ενός ακροφυσίου, αλλά κατά τη διάρκεια του λεπτομερούς σχεδίου συμπληρώνεται με τις πιο προηγμένες μεθόδους όπως περιγράφεται παρακάτω.

Αυτές οι μέθοδοι ακολουθούν τη "κλαστική" έννοια δύο ζωνών ροής. Η ροή στον πυρήνα υπολογίζεται από την πιθανή θεωρία. Η τριβή στον τοίχο λαμβάνεται υπόψη από έναν κώδικα οριακού στρώματος. Το μοντέλο του περιορίστηκε στις δύο διατάσεις ή σε αξονοσυμμετρικές ροές. Αργότερα αντικαταστάθηκε από τους τρισδιάστατους κώδικες, αλλά η στρατηγική BORGER του σχεδιασμού του ακροφυσίου ισχύει ακόμα: Στο πρώτο μέρος του ακροφυσίου, όπου το οριακό στρώμα στον τοίχο είναι επιρρεπές σε διαχωρισμό, υπάρχει μόνο μια μάλλον μέτρια συστολή. Στο δεύτερο μέρος του ακροφυσίου, κατάντη του σημείου όπου οι τοίχοι αλλάζουν κυρτότητα και όπου ο διαχωρισμός είναι λιγότερο πιθανός, η συστολή μπορεί να είναι μάλλον ισχυρή (βλ. το σχήμα 4.19). Πραγματικά, τα περιγράμματα BORGER είναι παρόμοια με του MORELL, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.20. Εντούτοις, οι δευτερεύουσες διαφορές στη γεωμετρία οδηγούν στις σημαντικές διαφορές στην ταχύτητα στον τοίχο.



Σχήμα 4.19: Σύγκριση των περιγραμμάτων ακροφυσίων (με την αξονική συμμετρία).



Σχήμα 4.20: Σύγκριση των περιγραμμάτων ακροφυσίων (με την αξονική συμμετρία) και της ταχύτητας στον τοίχο.

Τα τρισδιάστατα περιγράμματα των προσαρμοσμένων ακροφυσίων της σήραγγας DNW-LTF σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας έναν πεπερασμένης διαφοράς κώδικα χαλάρωσης (relaxation) που αναπτύχθηκε από το J. VAN DEN VOOREN και τον A. SANDERSE. Ακολουθώντας τη στρατηγική του BORGER, αυτός ο κώδικας χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με μια μέθοδο πρόβλεψης διαχωρισμού του οριακού στρώματος. Ο στόχος ήταν αποτελούσε πρόκληση επειδή η DNW-LTF είναι εξοπλισμένη με τρία προσαρμοζόμενα κλειστά τμήματα δοκιμής. Συνεπώς, τρία διαφορετικά ακροφύσια απαιτούνται. Η συστολή χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος (που ακολουθεί την αίθουσα καθησυχασμού) είναι το ίδιο και για τα τρία ακροφύσια. Τα διαφορετικά διαγράμματα που απαιτούνται για τους τρεις διαφορετικούς λόγους συστολής πραγματοποιούνται με να αλλάζουν μόνο το μέρος κατάντη του σημείου κάμψης. Οι προβλεφθείσες διανομές πίεσης μέσα στα ακροφύσια συγκρίνονται πολύ καλά με τα πειραματικά αποτελέσματα, και η μη-ομοιομορφία ταχύτητας πέρα από το τμήμα δοκιμής ήταν, όπως προβλέπεται, λιγότερο από $\pm 0.1\%$.

Τα πιο πρόσφατα, τρισδιάστατα ακροφύσια υπολογίστηκαν με την ενίσχυση ενός κώδικα CFD πεπερασμένων στοιχείων από τον W.

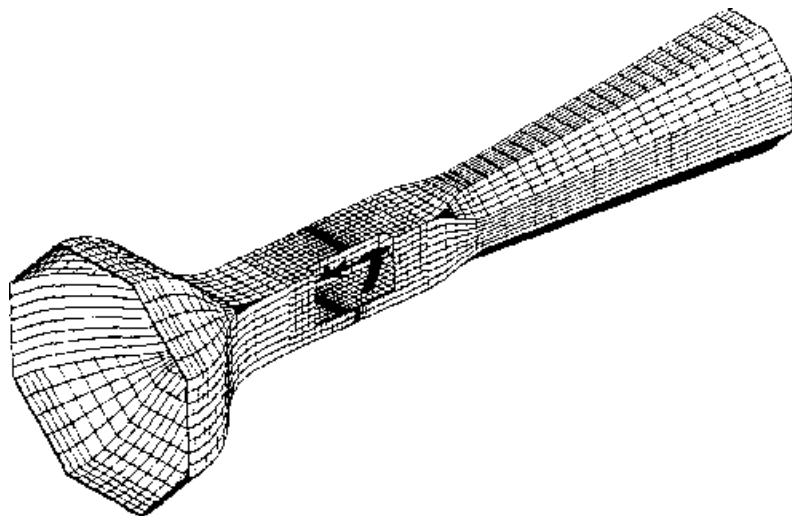
BRANDSTETTER , και ο S. SCHILAWA επέκτεινε τη μέθοδο των VAN DEN VOOREN και SANDERSE σε τρισδιάστατες διατομές εκτός από ορθογώνιες. Έδειξε ότι οι "αδύνατες ζώνες" ενός ακροφυσίου είναι οι γωνίες του. Με τη διαδικασία βελτιστοποίησής του έδειξε ότι για οποιαδήποτε απαραίτητη ομοιομορφία της διανομής ταχύτητας στην έξοδο ακροφυσίων, μια τρισδιάστατη διατομή οδηγεί σε μακρύτερα ακροφύσια από ένα κυκλικό. Παραδείγματος χάριν, ένα τετραγωνικό ακροφύσιο πρέπει να είναι 20% μακρύτερο από έναν κυκλικό. Όσο περισσότερο η αναλογία πρόσφυσης της διατομής παρεκκλίνει από την ένωση, τόσο μακρύτερο πρέπει να είναι το ακροφύσιο.

Τέλος, ο D. STEINBACH ανέπτυξε έναν κώδικα βασισμένο στη μέθοδο πλακιδίων (**panel**). Η ροή διαμορφώνεται μέσω των τριών βασικών στοιχείων μιας αεροσήραγγας: ακροφύσιο, (κλειστό) τμήμα δοκιμής, και διαχύτης (βλ. το σχήμα 4.21). Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθούν οι διορθώσεις των αεροσηράγγων αλλά, φυσικά, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για το σχεδιασμό ακροφυσίων .

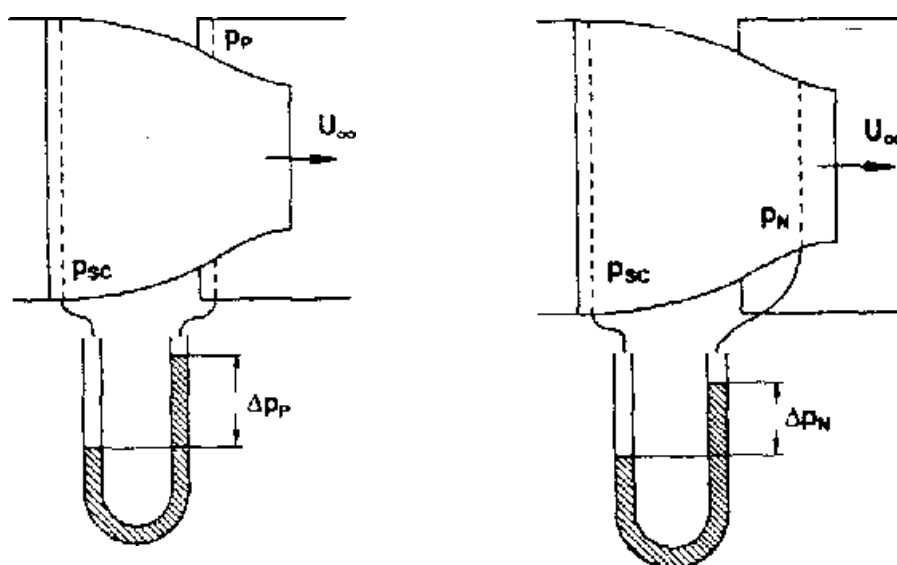
4.2.3.4: Προσδιορισμός της ταχύτητας του αέρα.

Η ταχύτητα του αέρα σε ένα τμήμα δοκιμής καθορίζεται με τη μέτρηση της διαφοράς Δp στη στατική πίεση μεταξύ της εισόδου του ακροφυσίου (δηλ., στην αίθουσα καθυσυχασμού) και της εξόδου του (βλ. το σχήμα 4.22). Το δυναμικό ύψος q_∞ μέσα στο τζετ που αφήνει το ακροφύσιο ισούται με:

$$q_\infty = \frac{\rho}{2} U_\infty^2 = k * \Delta p \quad (27)$$



Σχήμα. 4.21: Πλακιδιοποίηση (panelization) του ακροφυσίου, κλειστό τμήμα δοκιμής με μοντελο, και διαχύτη.



Σχήμα 4.22: Μέτρηση του ταχύτητας U_∞ του εισερχόμενου αέρα σε ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής από το Δp_N (“μέθοδος ακροφυσίου”) και Δp_p (“μέθοδος ανάμειξης”).

Όπου το k είναι ένας παράγοντας του ακροφυσίου που καθορίζεται με τη μέτρηση (και τον υπολογισμό του μέσου όρου πέρα από τη διατομή του τζετ, αποκλείοντας τη ζώνη μίξης στα όριά του) του δυναμικού ύψους σε ένα κενό τμήμα δοκιμής. Γενικά, η αριθμητική τιμή του παράγοντα k του ακροφυσίου είναι μεγαλύτερη από το ένα, επειδή η ταχύτητα αέρα στην αίθουσα καθησυχασμού δεν είναι ακριβώς μηδέν και ως εκ τούτου η τοπική στατική πίεση είναι εκεί λιγότερο από τη συνολική πίεση.

Σε μια αεροσήραγγα με ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις για τη θέση όπου η μετράται η κατάντη πίεση, για τη διαφορά πίεσης Δp , με την εξίσωση (1.3). Ο πρώτος είναι ο ίδιος όπως για ένα κλειστό τμήμα δοκιμής. Η πίεση p_N σε μια θέση κατάντη στο ακροφύσιο, κοντά στην έξοδό του, χρησιμοποιείται ως η κατάντη πίεση. Αυτή η μέθοδος καλείται “μέθοδος ακροφυσίου”, και αναλόγως η μετρημένη διαφορά πίεσης δίνεται από

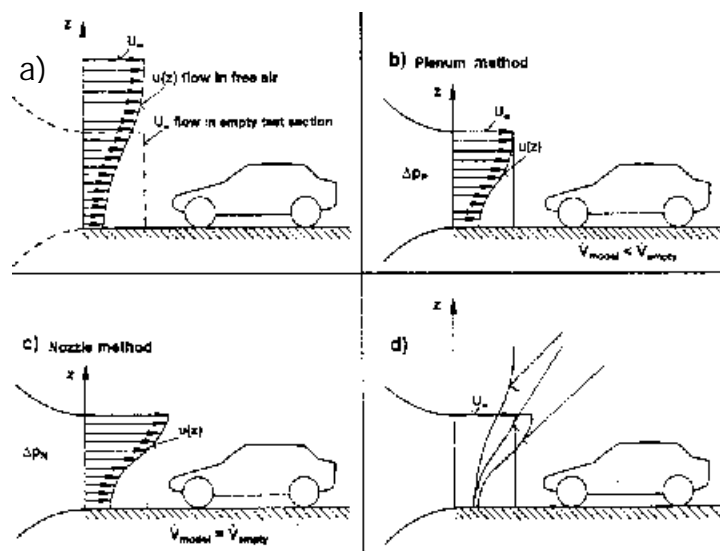
το $\Delta p_N = p_{SC} - p_N$. Μια εναλλακτική λύση της μεθόδου ακροφυσίου είναι η "μέθοδος ανάμειξης". Η πίεση p_p στην ανάμειξη που περιβάλλει το ανοικτό τζετ χρησιμοποιείται ως η κατάντη πίεση, και αυτό είναι ίσο με την ατμοσφαιρική πίεση εάν η ανάμειξη αερίζεται επαρκώς. Αυτή η διαφορά πίεσης δίνεται από το $\Delta p_p = p_{SC} - p_p$. Ο παράγοντας k του ακροφυσίου δεν είναι ο ίδιος για αυτές τις δύο μεθόδους.

Για ένα κενό τμήμα δοκιμής ή για τη χαμηλή παρεμπόδιση και οι δύο μέθοδοι είναι ισοδύναμες για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα u και εξάγουν ισοδύναμα αποτελέσματα. Εντούτοις, είναι ένα θέμα το ποια μέθοδος πρέπει να προτιμηθεί όταν ένα μοντέλο μεγάλης παρεμπόδισης βρίσκεται στο τμήμα δοκιμής. Ενώ, παραδείγματος χάριν, ο R. KUNSTER υποστηρίζει τη μέθοδο του ακροφυσίου, ο A. KUHN υποστηρίζει τη μέθοδο της ανάμειξης. Παραδοσιακά, σε αεροσήραγγες με ανοικτό τμήμα δοκιμής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανάμειξης. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται ακόμα στις πολύ μεγάλες αεροσήραγγες αυτοκινήτων με μια μεγαλύτερη διατομή του τζετ, για παράδειγμα, $A_N = 30 \text{ m}^2$, και μια μεγάλη ανάμειξη. Στις αεροσήραγγες με A_N μικρότερο από 25 m^2 προτιμάται γενικά η μέθοδος του ακροφυσίου.

Εάν εφαρμοστούν κατάλληλα, και οι δύο μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας u του αέρα οδηγούν στο σωστό αποτέλεσμα. Εντούτοις, αν η παρεμπόδιση είναι μεγάλη και εάν ένα μοντέλο τοποθετηθεί κοντά στην έξοδο του ακροφυσίου, η αντίθετη καμπύλη πίεσης μπροστά από το πρότυπο επηρεάζει τη ροή μέσα στο ακροφύσιο. Αυτή η επίδραση αποκαλείται "παρεμπόδιση του ακροφυσίου" και καθιστά απαραίτητο το να εφαρμόσει μια διόρθωση στην ενδεδειγμένη ταχύτητα του αέρα. Η φύση της παρεμπόδισης του ακροφυσίου έχει περιγραφεί από τον E. MERCKER και μπορεί να εξηγηθεί ως εξής.

Κατ' αρχάς εξετάζουμε ένα όχημα στον ελεύθερο αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.23(α). Λόγω της ομαλής ροής μπροστά από το όχημα, το σχεδιάγραμμα ταχύτητας $u(z)$ παράγεται στον άξονα μπροστά από το όχημα

όπου αργότερα βρίσκεται η έξοδος του ακροφυσίου σε μια αεροσήραγγα. Είναι αυτό (και μόνο αυτό) το σχεδιάγραμμα ταχύτητας που ανήκει στη ταχύτητα του ομαλού αέρα U_∞ . Στην περίπτωση ενός κενού τμήματος δοκιμής (για το οποίο ο παράγοντας k του ακροφυσίου καθορίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (1.3)), το ορθογώνιο σχεδιαγράμματος ταχύτητας U_∞ βρίσκεται σε αυτήν την θέση. Στο σχήμα 4.23(α) προσδιορίζεται από μια διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.23: Διόρθωση της παρεμπόδισης του ακροφυσίου: α) όχημα στον ελεύθερο αέρα, β) όχημα στο τμήμα δοκιμής, με ταχύτητα αέρα U_∞ σύμφωνα με τη μέθοδο ανάμειξης Δp_p , γ) όχημα στο τμήμα δοκιμής, με ταχύτητας αέρα U_∞ σύμφωνα με τη μέθοδο του ακροφυσίου Δp_N , δ) σύγκριση του σχεδιαγραμμάτων ταχύτητας $u(z)$ μπροστά από ένα μοντέλο..

Εάν το όχημα τοποθετείται τώρα σε μια σήραγγα αέρα, στον ίδιο αξονικό σταθμό μπροστά από το όχημα (έξοδος ακροφυσίου) παρατηρείται το σχεδιάγραμμα ταχύτητας $u(z)$ εντούτοις, δεν είναι ίδιο με ένα στον ελεύθερο

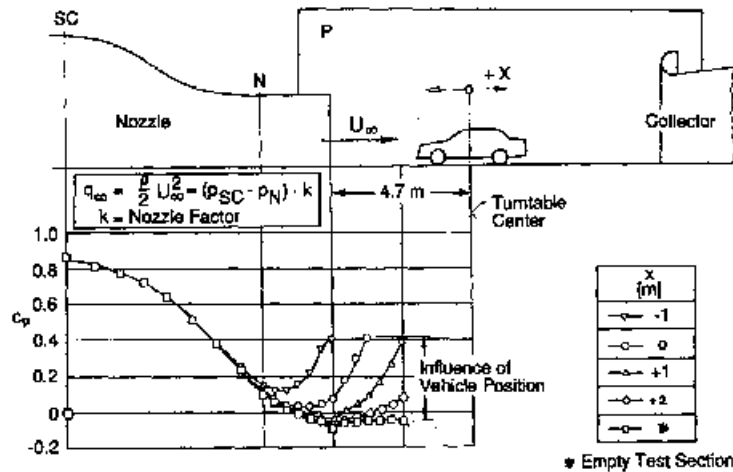
αέρα. Ανήκει σε μια ταχύτητα του ομαλού εισερχόμενου αέρα που είναι διαφορετικός από το U_{∞} . Η ερώτηση είναι: Πόσο μεγάλη είναι αυτή η διαφορά; Η απάντηση εξαρτάται από τη μέθοδο με την οποία έχει μετρηθεί το Δp .

Εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάμειξης η κατάσταση είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 4.23 (β). Δεδομένου ότι η πίεση της περιβάλλουσας ανάμειξης είναι παρούσα στο οριακού τζετ, ακολουθεί ότι η ταχύτητα U_{∞} (της μεθόδου ανάμειξης) είναι παρόν σε αυτό το όριο επειδή σύμφωνα με τη σχέση bernoulli αυτό είναι η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μετρημένο Δp_p (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής αυτό το Δp_p παράγει ένα σταθερό U_{∞} πέρα από την ολόκληρη διατομή). Στον ελεύθερο αέρα, η ταχύτητα στην υποθετική θέση του οριακού τζετ είναι διαφορετική από U_{∞} (βλ. το σχήμα 4.23 (α)). Το μέγεθος της διαφοράς εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαμορφώσεις του προτύπου και του ακροφυσίου, καταρχήν η ταχύτητα στον ελεύθερο αέρα είναι μικρότερη από το U_{∞} της μεθόδου ανάμειξης. Πρέπει επίσης να προστεθεί ότι το ποσοστό του όγκου ροής μέσω του ακροφυσίου μειώνεται όταν τοποθετείται ένα μοντέλο στο τμήμα δοκιμής, δηλ., $V_{\text{model}} < V_{\text{empty}}$

Εάν η ταχύτητα του αέρα καθορίζεται με τη μέθοδο ακροφυσίου που οι βαλβίδες όπου η πίεση p_N μετριέται πρέπει να είναι αρκετά μακριά και προς τα πάνω του προτύπου ώστε να μην επηρεάζεται από το πρότυπο (σχήμα. 4.24), ο P. KUNSTNER δείχνει ότι υπάρχει μια τέτοια θέση. Εάν η διαφορά Δp_N πίεσης δεν επηρεάζεται όταν τοποθετείται ένα πρότυπο στο τμήμα δοκιμής το σχεδιάγραμμα ταχύτητας $u(z)$ στην έξοδο του ακροφυσίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.23 (γ). Επίσης, δεδομένου ότι το Δp_N δεν αλλάζει ακολούθως το ποσοστό ροής όγκου μέσω του ακροφυσίου παραμένει σταθερό, δηλ., $V_{\text{model}} = V_{\text{empty}}$. Λόγω της συνοχής, η συνέπεια αυτού είναι ότι η ταχύτητα στα όρια του τζετ είναι υψηλότερη από το U_{∞} της μεθόδου ακροφυσίου στο κενό τμήμα δοκιμής.

Στο σχήμα 4.23 (δ) συγκρίνονται τα τρία διαφορετικά σχεδιαγράμματα ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου: $u(z)$ στην περίπτωση του ελεύθερου

αέρα, $u(z)$ όταν καθορίζεται η ταχύτητα του αέρα με τη μέθοδο ανάμειξης, και το $u(z)$ σύμφωνα με τη μέθοδο του ακροφυσίου.



Σχήμα 4.2: Επίδραση της πρότυπης θέσης στη κατανομή πίεσης μέσα σε ένα ακροφύσιο από τον P. KUNSTNER.

Χρησιμοποιώντας μια δυναμική ροή, ο E.MERCKER, παρήγαγε μια μέθοδο προσδιορισμού της παρεμπόδισης του ακροφυσίου. Είναι ικανοποιητικό να εφαρμόσουμε ένα ανιζώδες προτύπου ροής επειδή το παρόν πρόβλημα είναι καθαρά τύπου μετατοπίσεως και τα αποτελέσματα της τριβής είναι αμελητέα. Στο αριθμητικό πρότυπο το αυτοκίνητο αντιπροσωπεύεται από μια διαμόρφωση πηγής, και η ροή του ακροφυσίου διαμορφώνεται από ένα δακτύλιο στροβίλου (έτσι με συνέπεια την περιστροφική συμμετρία). Στην περίπτωση του ελεύθερου αέρα, η διανομή ταχύτητας μπροστά από ένα αυτοκίνητο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια διαμόρφωση πηγής.

Στη περίπτωση που τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας συγκρίνονται στο σχήμα 4.23 (δ) είναι παρόμοια το ένα με το άλλο, μια διόρθωση μπορεί να υπολογιστεί. Στην περίπτωση της μεθόδου ανάμειξης το V_{∞} στην άκρη του ακροφυσίου ισχύει ενώ στην περίπτωση της μεθόδου του ακροφυσίου το V είναι σταθερό.

Κατά τη σύγκριση των δύο μεθόδων για την ταχύτητα αέρα σε μια ανοικτού-τζετ αεροσήραγγα, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στη (παραδοσιακή) μέθοδο ανάμειξης, κυρίως για δύο λόγους:

1. Ο κίνδυνος ότι ένα πρότυπο μπορεί επηρεάσει την πίεση κατάντη του ακροφυσίου δεν υπάρχει επειδή αυτή η πίεση είναι P_p και αυτή είναι ατμοσφαιρική.
2. Σύμφωνα με το E. MERCKER, το μέγεθος της διόρθωσης για την παρεμπόδιση του ακροφυσίου είναι μικρότερο για τη μέθοδο ανάμειξης από ότι για τη μέθοδο των ακροφυσίων.

Τέλος, αυτή η διόρθωση για την παρεμπόδιση του ακροφυσίου αποτελεί την επίδραση ενός μοντέλου στη ροή μέσα σε ένα ακροφύσιο. Φυσικά, το ίδιο το ακροφύσιο -ακριβέστερα το στερεό όριο- έχει επιπτώσεις στη ροή γύρω από το μοντέλο.

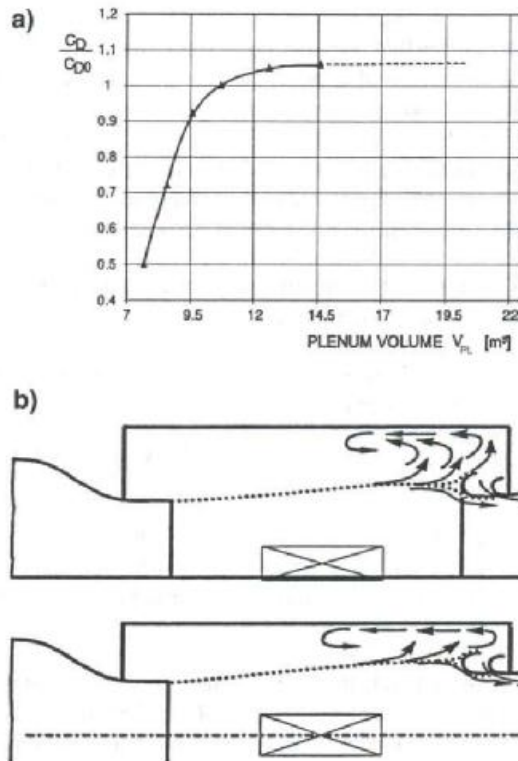
Η ταχύτητα αέρα πρέπει να είναι ελέγξιμη σε όλα τα επίπεδα σε μια αεροσήραγγα. Στην αυτοκινητική εργασία, οι ακριβείς δοκιμές με την πολύ χαμηλή ταχύτητα αέρα είναι σημαντικές. , Όταν οδηγείς αργά επάνω σε μία μακριά απότομη κλίση_αναπαράγεται ένα από τα κρίσιμα κριτήρια για να διαστασιολογηθεί το θερμαντικό σώμα και ο ανεμιστήρας (το άλλο είναι η ύπαρξη μέγιστης ταχύτητας). Ο αέρας από την μπροστινή κίνηση του οχήματος καθώς επίσης και του ανεμιστήρα του θερμαντικού σώματος συμβάλλει στην επίδραση της ψύξης. Επομένως ο ακριβής έλεγχος της (χαμηλής) ταχύτητας του αέρα είναι σημαντικός.

Τεχνικά, δύο λύσεις είναι διαθέσιμες για τη ρύθμιση της ταχύτητας του αέρα. Πρώτα με μεταβλητής κλίσης πτερύγια στο σταθερό ανεμιστήρα και μεταβλητής ταχύτητας ανεμιστήρες με σταθερά πτερύγια. Σήμερα, το τελευταίο χρησιμοποιείται ευρύτερα. Η μεταβλητή κλίση επιτρέπει μια πολύ γρήγορη αλλαγή της ταχύτητας αέρα. Εντούτοις, αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από ένα υψηλό επίπεδο θορύβου σε όλες τις ταχύτητες αέρα ακόμα και όταν δεν

κινείται. Για τους μηχανικούς και τους τεχνίτες που πρέπει να εργαστούν σε ένα μοντέλο σε μια σήραγγα ενώ ο ανεμιστήρας ηρεμεί, αυτό είναι απαράδεκτο.

4.2.3.5: Θάλαμος τμήματος δοκιμής.

Για μια ανοικτού τζετ αεροσήραγγα οι διαστάσεις της αίθουσας που περιβάλλει το τμήμα δοκιμής έχουν μια σημαντική επιρροή στο σχέδιο ροής μέσα στην ολομέλεια και μέσα στο τζετ, και έτσι στα αποτελέσματα της δοκιμής από τη αεροσήραγγα. Σύμφωνα με τον K. P. DEUTENBACH , η οπισθέλκουσα είναι εάν ο όγκος της ολομέλειας είναι λιγότερο από μια συγκεκριμένη ελάχιστη τιμή (βλ. το σχήμα 4.25 (α)). Με τη βοήθεια της απεικόνισης ροής ο DEUTENHACH έχει καταδείξει ότι το ελεύθερο τζετ διευρύνεται εάν οι τοίχοι της ολομέλειας είναι επίσης κοντά στο τζετ, δηλ., εάν ο όγκος της ολομέλειας είναι πάρα πολύ μικρός (βλ. το σχήμα 4.25 (β)). Όχι μόνο ο όγκος αλλά και το πλάτος και το ύψος του θαλάμου πρέπει κατάλληλα να αντιστοιχηθούν στη διάσταση του.



Σχήμα 4.25: α) Επίδραση του όγκου V_{PL} ολομέλειας στη μετρημένη έλξη β) Το σχέδιο ροής μέσα στην ολομέλεια και πλησιάζει στο συλλέκτη.

4.2.3.6: Ενάλλακτης θερμότητας και φορτίο ήλιου.

Στις κλιματολογικές αεροσήραγγες η βασική παράμετρος είναι η *θερμοκρασία αέρα*. Η ομοιομορφία της πέρα από ένα τμήμα δοκιμής πρέπει να είναι ± 1 K. Λόγω της φύσης των διατομών του εναλλάκτη θερμότητας της σήραγγας αυτή η προδιαγραφή δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί. Ο εναλλάκτης θερμότητας πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε μία "κορεσμένη" κατάσταση, δηλ., η ροή όγκου του ψυκτικού πρέπει να είναι πολύ υψηλή. Είναι δύσκολο να παρθεί χρόνος στις σήραγγες αλλά είναι και ακριβός, επομένως η απόδοση του ψύκτη πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία γρήγορα. Προκειμένου να κρατηθεί η απώλεια πίεσης της ροής αέρος μέσω του ψύκτη όσο το δυνατόν μικρότερη, ο ψύκτης

τοποθετείται σε μια θέση όπου η διατομή του αγωγού της σήραγγας είναι μεγάλη. Μια θέση στο τέλος του μεγάλου διαχύτη μετά από τον ανεμιστήρα εμφανίζεται να είναι η καταλληλότερη από μια θέση μέσα στην αίθουσα δόκιμης. Οι διαταραχές στη ροή αέρος που προκαλούνται από τον ψύκτη (ίχνη από τους σωλήνες και τις δοκούς στέγης του) έπειτα έχουν μια μακρύτερη πορεία ροής ακόμα και έξω.

Για να προσομοιωθεί ένα φορτίο ήλιου η ένταση της ακτινοβολίας πρέπει να είναι 1000 W/m^2 . Μια απόκλιση $\pm 10\%$ είναι ικανοποιητική. Πηγές φωτός με ένα φάσμα κοντά του ήλιου είναι διαθέσιμες. Η εγκατάσταση στην οποία οι πηγές φωτός εγκαθίστανται, πρέπει να επιτρέπει να γυρίζει ώστε να εκτεθεί ένα αντικείμενο δοκιμής στην ακτινοβολία από πλάγια γωνία

4.2.3.7: Εξοπλισμός.

Μια αεροσήραγγα αυτοκίνητων μπορεί να εξοπλιστεί με πρόσθετες εγκαταστάσεις δοκιμής και συστημάτων μέτρησης. Όπου είναι δυνατόν, πρέπει όλα να ελέγχονται από έναν κλειστό βρόχο από έναν υπολογιστή ελέγχου διαδικασίας. Όλα τα σημαντικά αποτελέσματα της δοκιμής πρέπει να αξιολογηθούν μέσω αυτού και να επιδειχθούν με οπτική μορφή προκειμένου να επιτρέψουν τις γρήγορες αποφάσεις σχετικά με το πώς να συνεχίσει το τρέχον πείραμα.

4.3: Περιορισμοί της προσομοίωσης.

4.3.1: Συστηματικά λάθη.

Όταν προσομοιώνεται η οδήγηση στο δρόμο σε μια δοκιμή (είτε πρόκειται για μια αεροσήραγγα ή ένα παράγωγο επ' αυτού όπως μια κλιματολογική σήραγγα ή ένα δυναμόμετρο με αέρα) οι συνθήκες του δρόμου προσεγγίζονται από τις εξιδανικεύσεις ,αυτοί είναι ομοιόμορφη διανομή της ταχύτητας και θερμοκρασίας, εξαιρετικά χαμηλή αναταραχή, χαμηλός θόρυβος. Εντούτοις, αυτό το είδος εξιδανίκευσης είναι δύσκολο να επιτευχθεί, κυρίως για τρεις λόγους:

1. Στο δρόμο ένα όχημα κινείται μέσω ενός διαστήματος άπειρων διαστάσεων ("ελεύθερος αέρας") αντίθετα, οι διαστάσεις του τμήματος δοκιμής μιας αεροσήραγγας είναι περιορισμένες και συγκριτικά μικρές.
2. Αντί της ύπαρξης ηρεμίας , μια αέρα σήραγγα είναι εξαιρετικά θορυβώδης εάν δεν λαμβάνεται καμία συγκεκριμένη προφύλαξη κατά τη διάρκεια του σχεδίου της.
3. Γενικά, η σχετική κίνηση μεταξύ του οχήματος και του δρόμου δεν αναπαράγονται, το ίδιο πράγμα ισχύει και για την περιστροφή των ροδών.

Και τα τρία είδη ατελειών παράγουν συστηματικά λάθη, και αυτά πρέπει να προσδιοριστούν ποσοτικά:

- Κατά τη διάρκεια του σχεδίου μιας αεροσήραγγας προκειμένου να αποφασιστεί ποιο από αυτά μπορεί να αποφευχθεί από πριν από ένα κατάλληλο σχεδιάγραμμα, και ποια μπορούν να παραμείνουν επειδή τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να διορθωθούν μετά.
- Προκειμένου να επιλεγεί ένα κατάλληλο πεδίο δοκιμής με σεβασμό στην ποιότητα και το κόστος του.

Οι ανωτέρω ατέλειες είναι διαφορετικές στο χαρακτήρα. Η αναπαράσταση του κινούμενου δρόμου και ο θόρυβος είναι ατέλειες στην προσομοίωση, οι περιορισμένες διαστάσεις του ρεύματος αέρα οδηγούν σε αποτελέσματα παρεμβολής. Αυτά θα εξεταστούν χωριστά κατωτέρω.

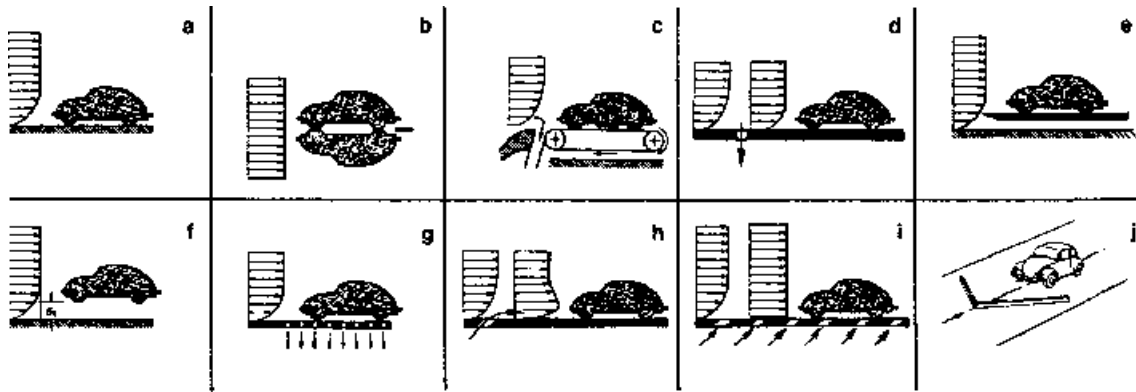
4.3.2: Αναπαράσταση του δρόμου.

Τεχνικά, είναι εφικτό να αναπαρασταθεί η σχετική κίνηση μεταξύ του οχήματος και του δρόμου και η περιστροφή των ροδών σε μια αεροσήραγγα. Το κατάλληλο μέσο είναι μια κινούμενη ζώνη που εκτείνεται στο πλάτος του τμήματος δοκιμής, και στην οποία οι ρόδες του οχήματος κυλούν. Εντούτοις, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, η σχετική προσπάθεια είναι μεγάλη. Συνεπώς, απλούστερες τεχνικές για την προσομοίωση και των δύο κινήσεων έχουν ήδη αναπτυχθεί, ή είναι ακόμα υπό ανάπτυξη.

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο άλλοι τρόποι να αναπαρασταθεί ο δρόμος:

1. Ο πρώτος πρόκειται να αποσυνδέσει μηχανικά τη γραμμική (οριζόντια) κίνηση του δρόμου από την περιστροφική κίνηση των ροδών, αλλά να αναπαράγει και τις δύο. Αυτό χρησιμοποιεί μια "στενή" ζώνη για τον κινούμενο δρόμο, και ένα ξεχωριστό σύστημα για την περιστροφή στις ρόδες. Αν και έχει τους περιορισμούς (όσον αφορά τις συνθήκες ροής κοντά στις ρόδες) αυτό μπορεί να λέγεται αναπαράσταση.
- 1 Ο δεύτερος αποτελείται από διάφορες μεθόδους που, κατά τη διάρκεια των ετών, έχουν αναπτυχθεί για να προσομοιώσουν το δρόμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η περιστροφή των ροδών παραμελείται.

Οι διάφορες τεχνικές για είτε την αναπαραγωγή είτε για την εξομοίωση του δρόμου συντάσσονται στο σχήμα 4.26

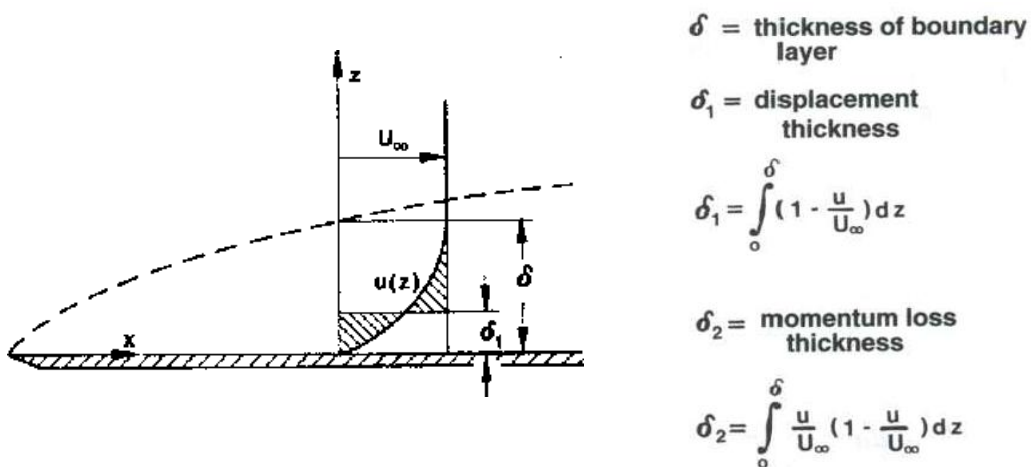


Σχήμα 4.26: Διάφορες δυνατότητες προσομοίωσης του δρόμου σε μια αεροσήραγγα.

Είναι ο ευκολότερος , και επομένως ο πιο χαρακτηριστικός τρόπος , να αναπαρασταθεί απλά ο δρόμος με στάσιμο πάτωμα του τμήματος δοκιμής μιας αεροσήραγγας (βλ. το σχήμα 4.26 (α)). Εντούτοις, το πρωταρχικό και γνωστό μειονέκτημα αυτού ,είναι ότι αναπτύσσεται ένα οριακό στρώμα στο πάτωμα, και αυτό το οριακό στρώμα τροποποιεί τον πεδίο ροής γύρω από ένα όχημα. Όλες οι παραλλαγές της οδικής προσομοίωσης που σκιαγραφούνται στο σχήμα 4.26 στοχεύουν στο να ελαχιστοποιήσουν την επιζήμια επίδραση αυτού του οριακού στρώματος. Το άλλο μειονέκτημα ενός στάσιμου επίγειου πίνακα είναι ότι γενικά οι ρόδες είναι στάσιμες. Εντούτοις, αυτός ο περιορισμός δεν είναι έμφυτος οι ρόδες μπορούν να περιστραφούν με τα κατάλληλα μέσα, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Σε ένα κενό τμήμα δοκιμής το οριακό στρώμα του δαπέδου αναπτύσσεται με τον ίδιο τρόπο με μία επίπεδη πλάκα. Οι ροές μάζας και ορμής μέσα στο

οριακό στρώμα έχουν μειωθεί Η μείωση της μάζας χαρακτηρίζεται από το αποκαλούμενο δ_1 πάχος μετατοπίσεως που καθορίζεται στο σχήμα 4.27. Από το πόσο είναι το δ_1 , το όριο μετατοπίζει το (σχεδόν) μη κολλημένο πεδίο ροής μακριά από το πάτωμα. Συνεπώς, το πεδίο ροής αποκτά μια (μικρή) θετική γωνία προσβολής σχετικά με ένα όχημα, με τη συνέπεια η αντίσταση και η άνωση να αλλάζουν, κανονικά (ελαφρώς) αυξανόμενη. Η επίδραση, που είναι αξιοπρόσεχτη ακόμη και για τις μικρές γωνίες προσβολής α.



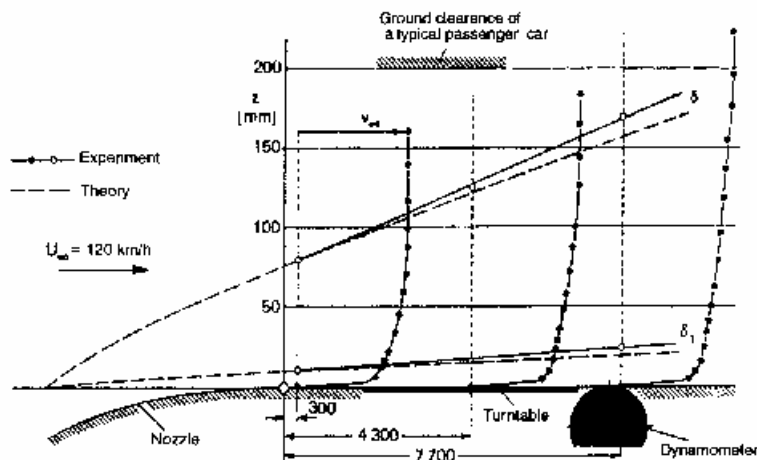
Σχήμα.4.27: Ανάπτυξη ενός οριακού στρώματος (σχηματική αναπαράσταση) και των ορισμών του πάχους δ του πάχους μετατόπισης και του πάχους απόλειας ορμής.

Η επίδραση της μείωσης της ορμής χαρακτηρίζεται από το πάχος δ_2 ορμή-απόλειας, δεν είναι εύκολο να χαρακτηριστεί. Στην πρώτη ματιά, θα αναμέναμε ότι λόγω του μείωσης της ορμής η δύναμη αντιστάσεως όλων των μερών που είναι βυθισμένα στο οριακό στρώμα -κυρίως οι ρόδες - θα ήταν χαμηλότερη από ότι στο δρόμο. Εντούτοις, όπως ο J. WIEDEMANN έχει παρουσιάσει, το αντίθετο μπορεί να συμβεί επειδή η γωνία παρεκκλίσεων με την οποία οι μπροστινές ρόδες προσεγγίζονται είναι μεγαλύτερη με το οριακό στρώμα από ότι χωρίς.

Επιπλέον, το στρώμα ορίου πατώματων μπορεί να χωρίσει οπουδήποτε υποβάλλεται για να μουσκέψει επίσης μια δυσμενή κλίση πίεσης. Αυτό συμβαίνει μπροστά από τις ρόδες. Ο χωρισμός μπορεί επίσης να εμφανιστεί κάτω από ένα όχημα. Εάν, παραδείγματος χάριν, το οπίσθιο μέρος κάτω ενός οχήματος διαμορφώνεται όπως ένας διαχύτης και η κάτω από το σασί ροή χωρίζεται από το έδαφος, μπορεί να κάνει τον διαχύτη αναποτελεσματικό όταν εξετάζεται σε μια αεροσήραγγα.

Τέλος, το οριακό στρώμα του εδάφους καθιστά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί το θεώρημα ορμής για να προσδιορίσει ποσοτικά τις μετρήσεις πεδίων ροής που γίνονται πίσω από ένα αυτοκίνητο. Εάν η επιφάνεια ελέγχου προς τα κάτω του οχήματος επεκτείνεται κάτω στο έδαφος, η αντίσταση τριβής του πατώματος συμπεριλαμβάνεται στην απώλεια ορμής. Συνεπώς, η δύναμη αντίδρασης ενός αυτοκινήτου θα εμφανιστεί να είναι υψηλότερη από αυτό το ποσό ,από την αξία που λαμβάνεται με την ισορροπία.

Η αύξηση του οριακού στρώματος στο τμήμα δοκιμής μιας μεγάλης αεροσήραγγας απεικονίζεται στο σχήμα 4.28. Τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας ακολουθούν στενά το νόμο $1/7$ -δύναμης (power – law). Σε ένα κενό τμήμα δοκιμής το πάχος δ του οριακού στρώματος στην θέση του μοντέλου είναι η περισσότερη από μισή απόσταση από το έδαφος e ενός χαρακτηριστικού επιβατικού αυτοκινήτου, ή σχεδόν η ολόκληρη απόσταση από το έδαφος ενός αθλητικού αυτοκινήτου. Εντούτοις, με παρόν ένα αντικείμενο δοκιμής (και ένα σχετικό πάχος μετατοπίσεως οριακού στρώματος $\delta_1/e = 0,1$, όπου δ_1 μετρήθηκε σε ένα κενό τμήμα δοκιμής), τη διανομή ταχύτητας κοντά στο έδαφος αλλάζει εντελώς. Ενώ το πάχος δ του οριακού στρώματος στο κενό τμήμα δοκιμής ήταν μεταξύ 100 και 150 mm. (ανάλογα με η θέση), παρουσία του προτύπου μειώθηκε σε 25-50 mm.

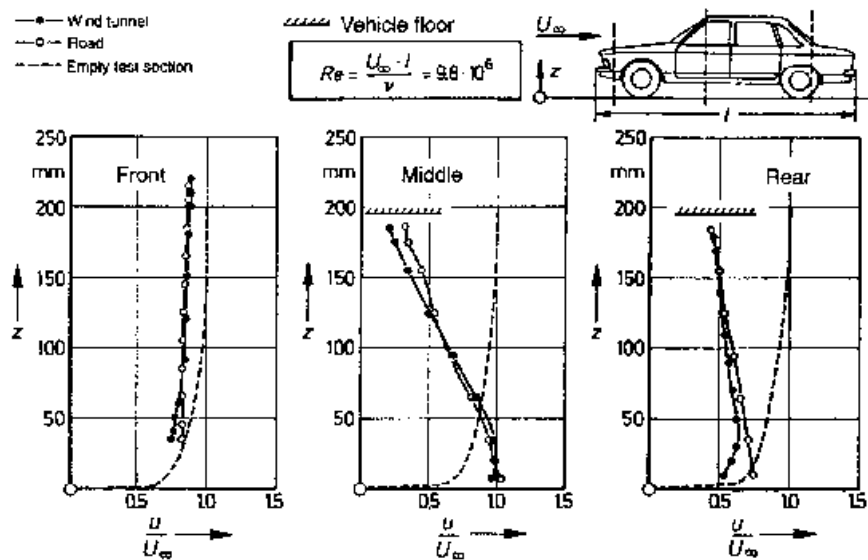


Σχήμα 4.28: Οριακό στρώμα στο πάτωμα (κενό τμήμα δοκιμής) της κλιματολογικής σήραγγας της VOLKSWAGEN .

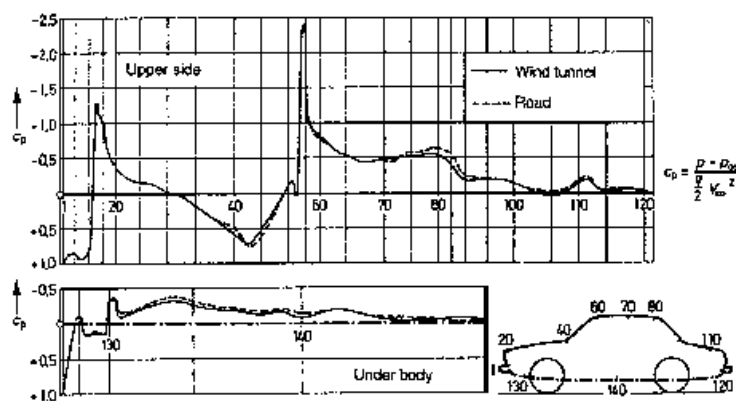
Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώθηκε από τις οδικές μετρήσεις που συγκρίνονται με τα στοιχεία από μια αεροσήραγγα στο σχήμα 4.29. Τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας κάτω από ένα επιβατικό αυτοκίνητο μέσου-μεγέθους ήταν σχεδόν ίδια με εκείνους από μια αεροσήραγγα, με τη μόνη εξαίρεση που είναι πολύ πλησίον στο δρόμο ή το επίπεδο. Το ίδιο πράγμα ίσχυσε ακόμη και για ένα σπορ αυτοκίνητο με ένα πολύ μεγαλύτερο σχετικό πάχος μετατοπίσεως ($\delta_1/e = 0.15$). Οι διανομές πίεσης κατά μήκος του διαμήκους μεσαίου επιπέδου που μετρείται στο δρόμο και στην αεροσήραγγα σχεδιάζονται στο σχήμα 4.30 και είναι σε στενή συμφωνία επίσης.

Προφανώς η ροή κάτω από ένα όχημα είναι κυρίως ελεγχόμενη από τη (ανιζώδης) επίδραση μετατοπίσεων ενός οχήματος, το οριακό στρώμα σε ένα σταθερό ισόγειο που έχει επιπτώσεις στον τομέα ροής της πολύ λιγότερο από πιθανή. Συνεπώς, ακόμη και σήμερα πολλές αυτοκινητικές αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται χωρίς έλεγχο οριακού στρώματος. Εντούτοις, στην αξιολόγηση των ανωτέρω συμπερασμάτων, υπάρχουν δύο γεγονότα που δεν πρέπει να αγνοηθούν:

1. Ο συντελεστής αντίστασης των χαρακτηριστικών αυτοκινήτων της δεκαετίας του '70 (όταν έγιναν αυτές οι μετρήσεις) ήταν υψηλός έναντι των σημερινών τιμών (0,45 έναντι 0,30 και λιγότερο).
2. Η άνοση δεν λαμβανόταν υπόψη σε εκείνες τις ημέρες.



Σχήμα 4.29: Σχεδιαγράμματα ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο, σήραγγα αέρα σε σχέση με τον δρόμο.



Σχήμα 4.30: Κατανομή πίεσης κατά μήκος του διαμήκους μέσου επιπέδου ενός επιβατικού αυτοκινήτου, σήραγγα αέρα σε σχέση με το δρόμο.

Ο απλούστερος τρόπος να αναπαραχθεί τέλεια ο δρόμος φαίνεται να είναι η τεχνική *εικόνας - καθρέφτη* (βλ. το σχήμα 4.26 (β)). Πράγματι, στην αριθμητική ρευστοδυναμική αυτή η τεχνική εφαρμόζεται ευρέως. Σε μια *ανιζώδη* ροή η ροική γραμμή μεταξύ ενός προτύπου και την εικόνα του είναι μια ευθεία γραμμή και μπορεί να ερμηνευθεί ως τοίχος. Εντούτοις, στην *ιζώδη* ροή οι δίνες διαμόρφωσαν πίσω από τις ρόδες, κάτω από το αυτοκίνητο, και πίσω από το οπίσθιο τμήμα παράγουν μια "ταλαντευμένη" κίνηση σε αυτήν την φανταστική επιφάνεια. Μια επίπεδη πλάκα πίσω από τα οχήματα (βλ. το σχήμα 4.26 (β)) μπορεί μόνο εν μέρει να μετριάσει αυτήν την ταλάντωση.

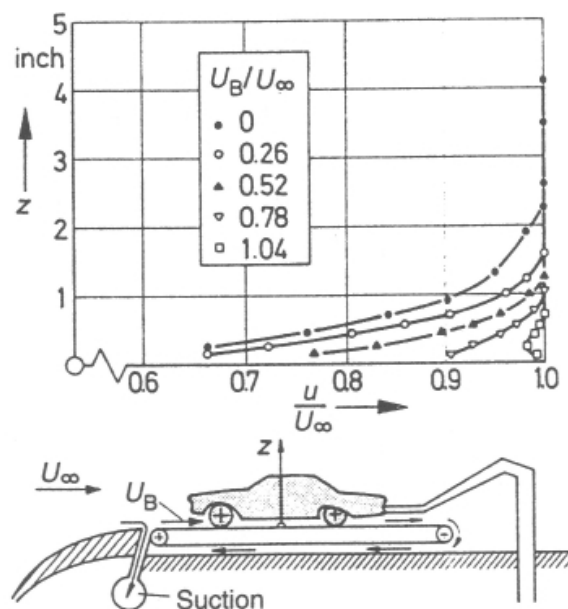
Τις πρώτες ημέρες της αεροδυναμικής οχημάτων η τεχνική χρησιμοποιήθηκε αρκετά συχνά στο μοντέλο κλίμακας -για τα τραίνα καθώς επίσης και τα αυτοκίνητα, οι λεπτομέρειες έχουν αναφερθεί από τον G. SCHMID. Σήμερα, αυτή η πειραματική τεχνική χρησιμοποιείται σπάνια. Εκτός από το ήδη-αναφερθέν πρόβλημά της, έχει δύο πρακτικά μειονεκτήματα: Κατ' αρχάς, απαιτούνται *δύο* πρότυπα, *δεύτερον*, η αεροσήραγα πρέπει να είναι *δύο φορές πιο μεγάλη* για οποιαδήποτε δεδομένο (γεωμετρικό) λόγο παρεμπόδισης φ. Είναι προφανές ότι η τεχνική είναι μη πρακτική για τα πραγματικού μεγέθους οδικά οχήματα.

Μια τέλεια αναπαραγωγή του δρόμου είναι, όπως αναφέρεται ήδη, η *κινούμενη ζώνη* (βλ. το σχήμα 4.26 (γ)). Αυτή η τεχνική δεν είναι καινούργια ο G.A. EIFFEL λέγεται ότι είναι ο πρώτος ο οποίος τη πρότεινε. Ήδη το 1934, μια έκθεση σχετικά με μια κινούμενη ζώνη παρουσιάστηκε από τον A. KLEMIN.. Ο W. KAMM (FKFS) έχει χρησιμοποιήσει μια κινούμενη ζώνη για να μειώσει τα πρότυπα-κλίμακας από τη δεκαετία του '30 ο G. SCHMID έχει υποβάλει έκθεση σχετικά με αυτό.

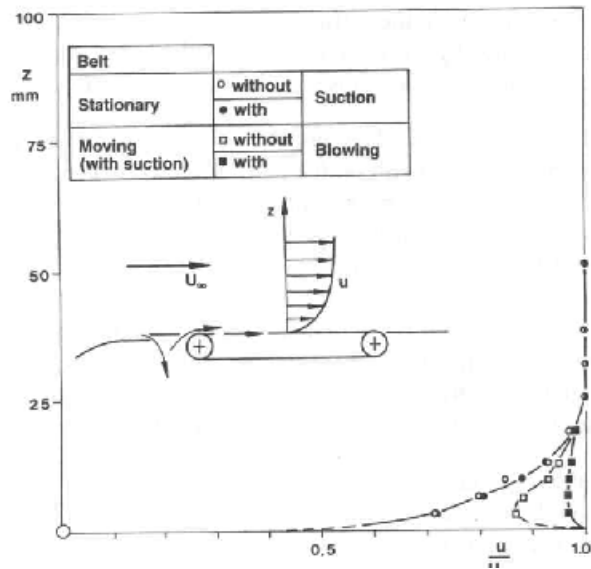
Εάν το επικείμενο οριακό στρώμα μπροστά από τη ζώνη αφαιρείται είτε με την αναρρόφηση είτε με μια "κοιλότητα" το σχεδιάγραμμα ταχύτητας στη θέση ενός προτύπου (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής) είναι σχεδόν επίπεδο. Αυτό έχει καταδειχθεί επανειλημμένα.

Ένα περαιτέρω βήμα έχει προταθεί από τον G.W. CARR και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.32. Η αναρρόφηση ακολουθείται από έγχυση αμέσως μπροστά από τη ζώνη, και η απώλεια ορμής στο ανάντη του οριακού στρώματος αποβάλλεται σχεδόν πλήρως.

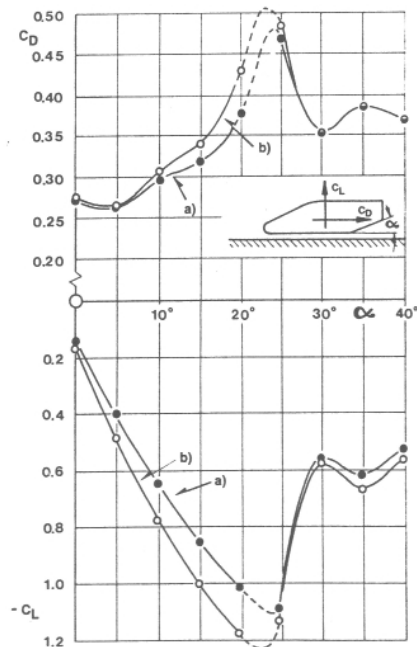
Όπως μπορεί να αναμένεται, οποιαδήποτε έλλειψη πιστότητας στην οδική αναπαραγωγή γίνεται αντιληπτή όταν γίνονται μετρήσεις στο κάτω μέρος ενός οχήματος. Αυτό είναι εμφανές στα αποτελέσματα όπου ο P.W. BEARMAN και λοιποί. έχουν επιτύχει με ένα γενικό σασί (χωρίς ρόδες), και που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.33..Ερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας α ενός οπίσθιου διαχύτη. Με ένα σταθερό δάπεδο η οπισθέλκουσα και η κάτω δύναμη είναι χαμηλότερες από ότι σε μια κινούμενη ζώνη, οι διαφορές που αυξάνονται όσο αυξάνεται η γωνία διαχυτών. Πέρα από το α



Σχήμα 4.31: Σχεδιαγράμματα ταχύτητας επάνω από μια κινούμενη ζώνη (μειωμένη κλίμακα) για τις διάφορες αναλογίες της ταχύτητας U_B ζωνών στο u ταχύτητας αέρα.



Σχήμα 4.32: Σχεδιαγράμματα ταχύτητας επάνω από μια κινούμενη ζώνη (μειωμένη κλίμακα) με και χωρίς επηρεασμό του επικείμενου οριακού στρώματος ορίου.



Σχήμα 4.33: Επίδραση του τύπου οδικής προσομοίωσης στη μετρημένη έλξη και τον ανελκυστήρα που επηρεάζονται από τα μέτρα σχετικά με το κάτω μέρος ενός προτύπου (κλίμακας): α) πάτωμα ακίνητο, β) κινούμενο πάτωμα.

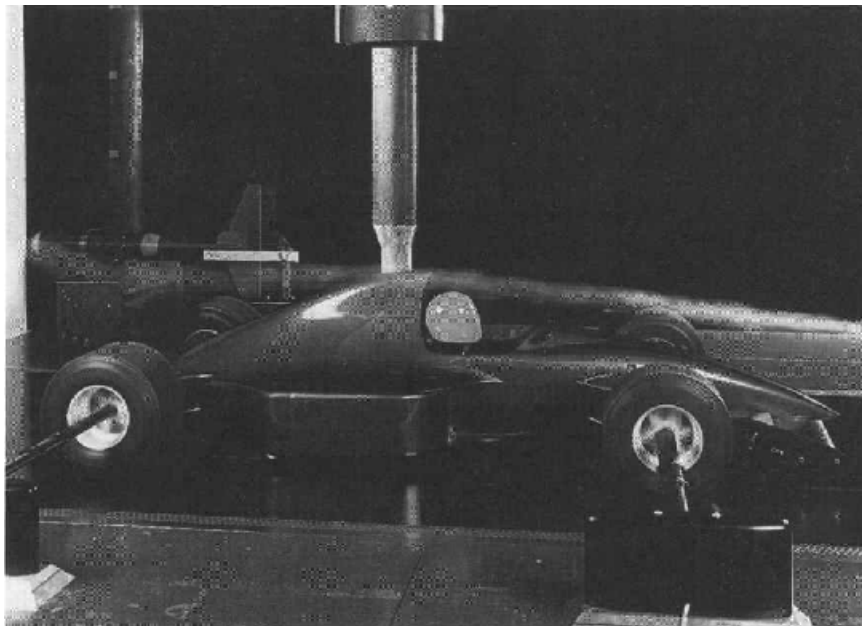
Η κρίσιμη γωνία οι διαφορές τείνουν να εξαφανιστούν. Αυτή η εύρεση έχει επιβεβαιωθεί από τον J.P. Howell που εξέτασε ένα γενικό αμάξωμα παρόμοιο με αυτό του σχήματος 4.33, αλλάζοντας όχι μόνο τη γωνία του διαχύτη αλλά και τη γωνία της άκρης του ανώτερου οπίσθιου τμήματος.

Οι συγκεκριμένες προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν όταν εξετάζονται τα πρότυπα με τις ρόδες πάνω από μια κινούμενη ζώνη. Ο λογικότερος τρόπος είναι να αφεθούν οι ρόδες να κυλήσουν στη ζώνη. Τα ελαφριά πρότυπα μειωμένης-κλίμακας επιτρέπουν αυτήν την απλή δομή. Σε γενικές γραμμές, η οπισθέλκουσα μπορεί να μετρηθεί σταθεροποιώντας το πρότυπο με ένα καλώδιο από μπροστά, όλες οι άλλες συνιστώσες της δύναμης απαιτούν ένα εσωτερικό αντίβαρο, μαζί με έναν φορέα. Η αντίσταση κυλίσματος πρέπει να μετρηθεί χωρίς τον αέρα στη σήραγγα και να αφαιρεθεί από τη συνολική οπισθέλκουσα για να πάρουμε την αεροδυναμική αντίσταση. Εντούτοις, μια κινούμενη ζώνη δεν μπορεί να αντέξει ένα πραγματικού μεγέθους πρότυπο ή ένα αυτοκίνητο. Μια δυνατότητα είναι να κρατηθεί το πρότυπο με ένα φορέα από πάνω ή το οπίσθιο τμήμα. Το πρότυπο πρέπει έπειτα να εξοπλιστεί με ένα εσωτερικό αντίβαρο. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται στις DNW-LTF. Άλλος τρόπος είναι να κρατηθεί και από τις δύο πλευρές με ράβδους εξωτερικά της κινούμενης ζώνης, οι οποίοι συνδέονται με τα στοιχεία του αντίβαρου κάτω από το πάτωμα. Αυτή η δομή χρησιμοποιείται στη FIAT.

Οι κυλιόμενες ρόδες σε μια κινούμενη ζώνη έχουν χρησιμοποιηθεί για πολύ, όταν εξετάστηκαν τα πρότυπα μικρής-κλίμακας των αγωνιστικών αυτοκινήτων με τις free-standing ρόδες. Το σχήμα 4.34 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική δοκιμή με ένα μοντέλο 1:2.5 μιας formula 1 στη αεροσήραγγα FWE $2,45 \times 1,75 \text{ m}^2$. Το αμάξωμα του οχήματος υποστηρίζεται από μια δοκό που στεγάζει ένα εσωτερικό έξι-συστατικό αντίβαρο. Στην περίπτωση που παρουσιάζεται, χρησιμοποιείται μια κεντρική δοκός. Εάν η ρύθμιση των οπίσθιων φτερών πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, συστήνεται ένας (λεπτός) φορέας από το οπίσθιο τμήμα. Οι ρόδες, που

κυλούν στη ζώνη, είναι αποσυνδεδεμένες από το όχημα και κατέχουν εξωτερικές υποστηρίξεις, κάθε μια με ένα δισυστατικό αντίβαρο. Η οπισθέλκουσα και η άνωση των ροδών μετριούνται χωριστά και προστίθενται στις σχετικές δυνάμεις που ενεργούν στο αμάξωμα.

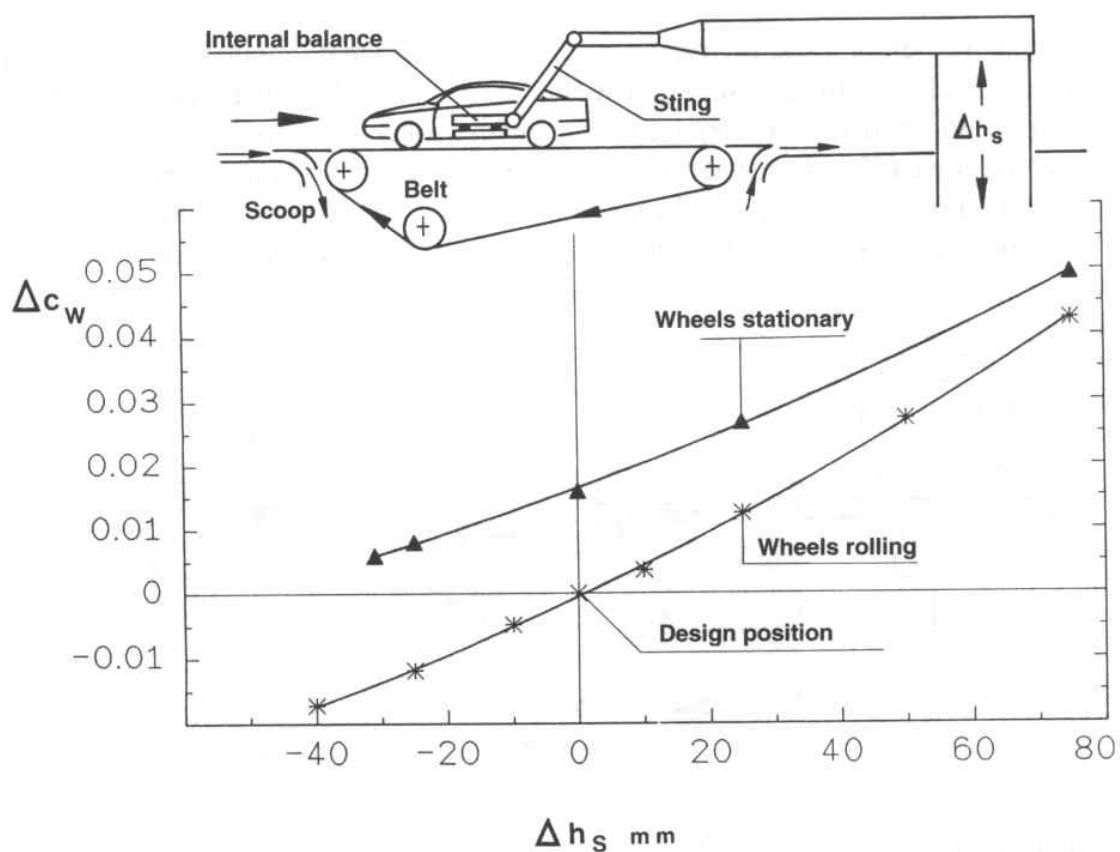
Τα επιβατικά αυτοκίνητα εξετάζονται με έναν διαφορετικό τρόπο ο E. MERCKER ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε μια εγκατάσταση κατάλληλη για τα πραγματικού μεγέθους οχήματα στα οποία οι ρόδες κυλούν σε μια κινούμενη ζώνη.



Σχήμα 4.34: Sauber c- 12 τύπος F-1 (κλίμακα 1:2.5) πάνω από ένα κινούμενο πάτωμα οι ρόδες είναι αποσυνδεδεμένες από το όχημα και καθοδηγούνται εξωτερικά.

Προκειμένου να ξεφορτωθεί η ζώνη το πλήρες φορτίο ανά τροχό ενός αυτοκινήτου, ανέπτυξαν μια αναστολή ροδών που επιτρέπει στο φορτίο ανά τροχό να μειωθεί και να ελεγχθεί ακριβώς. Η λειτουργία της DNW-LTF παρουσιάζεται στο σχήμα 4.35. Η αντίσταση κυλίσματος των ροδών μετριέται κατά τη διάρκεια περιστροφής τους με το ίδιο φορτίο ανά τροχό αλλά χωρίς αέρα. Ένα μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι η

αεροδυναμική αντίσταση λόγω του αερισμού των ροδών (ακόμα στον αέρα), που είναι μέρος της αεροδυναμικής αντίστασης, συμπεριλαμβάνεται στην αντίσταση κυλίσματος. Ο K. Zwtetcia πρότεινε πώς να απομονώσει σωστά αυτό το τμήμα αντίστασης(στον κινούμενο αέρα). Το διάγραμμα στο σχήμα 4.35 δείχνει ότι η οπισθέλκουσα είναι χαμηλότερη με μια κινούμενη ζώνη και κυλώντας τις ρόδες από ότι με ένα στάσιμο δάπεδο και στάσιμες ρόδες, και η επίδραση μικραίνει με την αύξηση της απόστασης από το έδαφος



Σχήμα 4.35: Επίδραση της επίγειας εκκαθάρισης και της οδικής προσομοίωσης της οπισθέλκουσας.

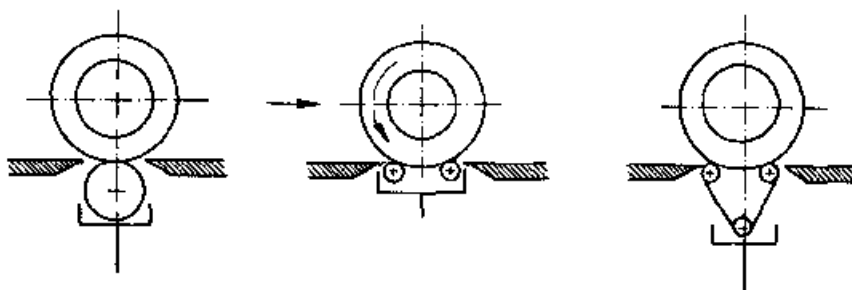
Εντούτοις, αυτό το αποτέλεσμα δεν πρέπει να γενικευτεί, η αλλαγή της οπισθέλκουσας -σε αυτό το παράδειγμα μείωση α-είναι το αποτέλεσμα τριών ευδιάκριτων και των εν μέρει αντιτιθέμενων αποτελεσμάτων:

- Γενικά η οπισθέλκουσα ενός σώματος αυξάνεται όταν κινείται το πάτωμα, όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα 4.33.
- Όπως θα παρουσιαστεί κατωτέρω, η οπισθέλκουσα των στάσιμων ροδών αυξάνεται όταν αφαιρείται το οριακό στρώμα του δαπέδου.
- Η οπισθέλκουσα των ροδών μπορεί να μειωθεί όταν περιστρέφονται. Αυτό, εντούτοις, όπως επισημαίνεται από τον. WIEDEMANN , ισχύει μόνο εάν η γωνία κάτω από την οποία η τοπική πλευρική ροή πλησιάζει τις ρόδες είναι μικρή ($< 11^\circ$).

Αυτά τα τρία αποτελέσματα μπορούν να προσθέσουν μέχρι μια *αύξηση* οπισθέλκουσας όταν κινείται το πάτωμα

Κατά γενική ομολογία, η αρχική οργάνωση δοκιμής DNW-LTF απαιτεί μια μάλλον μεγάλη προσπάθεια στο όχημα και στην εγκατάσταση. Το όχημα δοκιμής πρέπει να τοποθετηθεί σε ένα φορέα (που παρεμποδίζει τη κίνηση του πρότυπου), και συνδέεται με μια εσωτερική ζυγαριά, και την αναστολή του οχήματος που αντικαθίσταται από έναν πνευματικό έλεγχο φορτίων της ρόδας. Ήδη το 1968, μια καταλληλότερη κινούμενη ζώνη προτάθηκε από τον J. POTTHOFF. Αντί της χρησιμοποίησης μιας ευρείας ζώνης που εκτείνεται σε όλο το αυτοκίνητο (ή περισσότερο), μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια "στενή" ζώνη που κινείται μόνο μεταξύ των ροδών. Στην περίπτωση των μη-περιστρεφόμενων ροδών το όχημα μπορεί να στηριχτεί σε τέσσερα μαξιλάρια που συνδέονται με την πλάστιγγα από κάτω, όπως είναι η κοινή πρακτική με έναν στάσιμο επίγειο δάπεδο. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις δοκιμές με πρότυπα μειωμένης κλίμακας, μετά από την αναθεώρηση στις υπάρχουσες μεθόδους προσομοίωσης του δρόμου, για τα πραγματικού μεγέθους αυτοκίνητα χρησιμοποιείται μια στενή ζώνη όπως στην αεροσήραγγα Pininfarina.

Στην περίπτωση της στενής ζώνης ή ενός στάσιμου δαπέδου, οι ρόδες μπορούν να περιστραφούν από τις συσκευές που εγκαθίστανται στην πλάστιγγα, μια σε κάθε στοιχείο. Οι τρεις τεχνικές λύσεις που προτείνονται για αυτόν τον σκοπό παρουσιάζονται στο σχήμα 4.36. Αντί της οδήγησης κάθε ρόδας με έναν κύλινδρο, συγκριτικά μεγάλης διαμέτρου, η περιστροφική κίνηση ροδών μπορεί να παραχθεί από ένα ζευγάρι μικρών κυλίνδρων ή μιας μικροσκοπικής ζώνης σε κάθε ρόδα. Και στις τρεις περιπτώσεις η αντίσταση είναι *εσωτερική* δύναμη του συστήματος όχημα-πλάστιγγας και δεν μετριέται. Φυσικά το ίδιο πράγμα ισχύει για την αντίσταση ρόδα-αερισμού, όπως αναφέρεται παραπάνω.

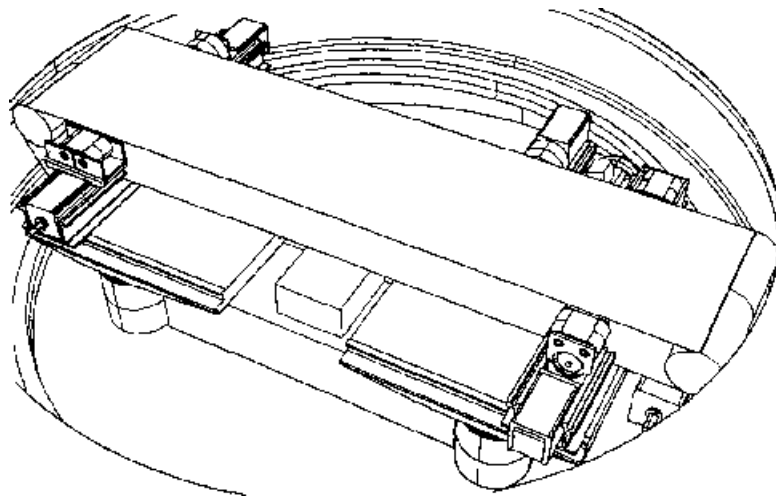


Σχήμα 4.36: Τρεις δυνατότητες για την περιστροφική κίνηση των τροχών από μέσα από μια ζυγαριά σηράγγων αέρα.

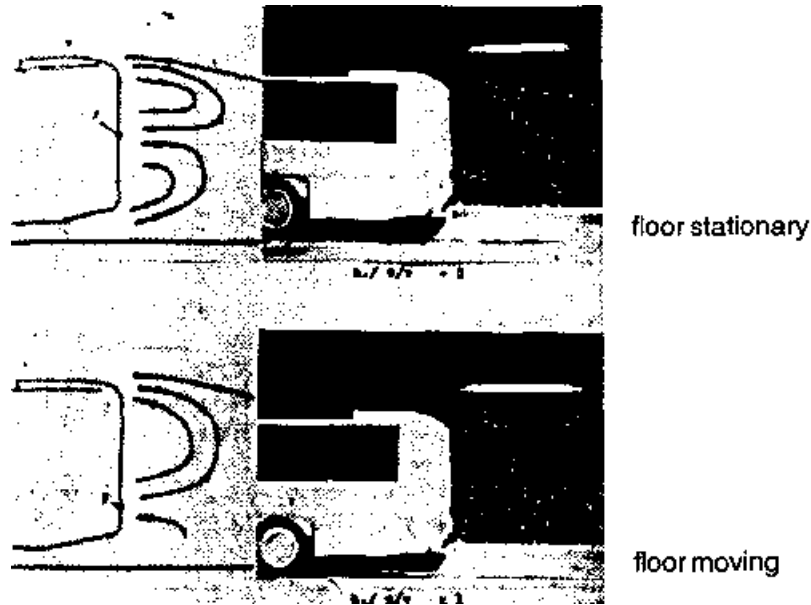
Το όχημα πρέπει να κρατηθεί από να κυλήσει μακριά. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα σύστημα (στηριγμάτων) χαμηλής εσωτερικής τριβής που συνδέονται από κάτω (και που μπορεί, εάν είναι απαραίτητο, να αντέξει εν μέρει το βάρος του αυτοκινήτου). Σχ.4.37 δίνει μια επισκόπηση ενός προτεινόμενου σχεδίου από J. POTTHOFF και R.-G.FIEDLER η στενή ζώνη τρέχει μεταξύ των ροδών, και τέσσερις μικρές ζώνες κινούν τις ρόδες. Το μεγάλο πλεονέκτημα των οργανώσεων δοκιμής που χρησιμοποιούν στενή ζώνη είναι ότι ένα αυτοκίνητο μπορεί να τεθεί στη αεροσήραγγα όπως είναι. Η μόνη απαραίτητη τροποποίηση είναι η αποσύνδεση του κεντροφόρου άξονα.

Οι προηγούμενες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τον H.-J.EMMELMANN με μια στενή ζώνη (πραγματικού μεγέθους αυτοκίνητο, ρόδες στάσιμες) οδήγησαν συμφωνία με μια πλήρης έκτασης ζώνη. Αργότερα αυτά τα συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν από τον E. MERCKER με ένα πραγματικού μεγέθους αγωνιστικό αυτοκίνητο (που χρησιμοποιεί τη κίνηση στους τέσσερις τροχούς του για να τροφοδοτήσει τις περιστρεφόμενες ρόδες μέσα από το αυτοκίνητο).

Η σωστή οδική προσομοίωση μπορεί να γίνει απαραίτητη για τα εμπορικά οχήματα επίσης. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των πειραμάτων με ένα κλίμακα-πρότυπο λεωφορείο που πραγματοποιείται από τον LAJOS και τον I. HEGEL. Τα λεωφορεία συγκρίνονται λίγο πολύ με τα αυτοκίνητα. Συνεπώς, το οριακό στρώμα σε έναν στάσιμο δάπεδο είναι αρκετά παχύ στο οπίσθιο τμήμα ενός λεωφορείου, και αναγκάζει τη ροή από κάτω να τη διαδώσει έξω στις πλευρές. Τη ροή στα κοντινά μέρη και έτσι η απόθεση του ρύπου και η επανακυκλοφορία του αερίου εξάτμισης ,αλλάζουν σημαντικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.38.



Σχήμα 4.37: "Στενή ζώνη" (ζώνη μεταξύ των ροδών) και "μικροσκοπικές ζώνες" για την περιστροφή των ροδών, ένα σχέδιο για την πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα IKV.



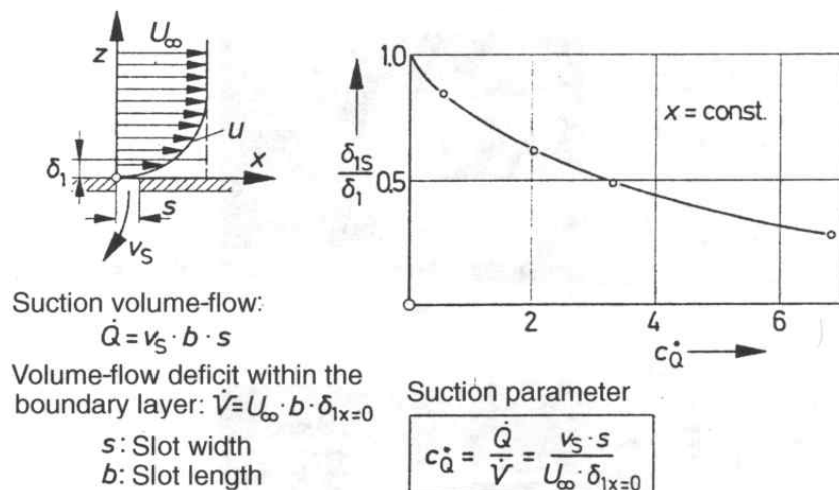
Σχήμα 4.38: Επιρροή της οδικής προσομοίωσης στο σχέδιο ροής πίσω από ένα λεωφορείο.

Όλες οι άλλες μέθοδοι επίγειας αντιπροσώπευσης που σκιαγραφούνται στο σχήμα 4.26 χρησιμοποιούν ένα σταθερό δάπεδο και όλοι προσομοιώνουν το δρόμο, δεν τον αναπαραγάγουν. Η αξία τους είναι η απλότητά τους έναντι μιας κινούμενης ζώνης. Η προτίμηση πρέπει να εξαρτάται από τη σύγκριση με μια κινούμενη ζώνη ή το δρόμο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα στο σχ. 4.28 η πιο ενοχλητική συνεπεία του ότι λείπει η σχετική κίνηση του εδάφους είναι ότι το οριακό στρώμα που σχηματίζεται γύρω από την αεροσήραγγα παρουσιάζεται και στο σταθερό έδαφος. Βασικά υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι να μειωθεί η ένταση του φαινομένου του οριακού στρώματος. Είτε να βουλιάξουμε αυτό το στρώμα είτε να συμπληρώσουμε τον όγκο που λείπει φυσώντας αέρα μέσα σε αυτό. Και οι δύο τρόποι εφαρμόζονται επιτυχώς ,ο πρώτος με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις: με αναρρόφηση μπροστά από το μοντέλο μέσω μιας σχισμής ή μια λωρίδα από πορώδες υλικό (και τα δύο ονομάζονται βασική αναρρόφηση) και με μία κατανεμημένη αναρρόφηση μέσω ενός πορώδους δαπέδου κάτω από

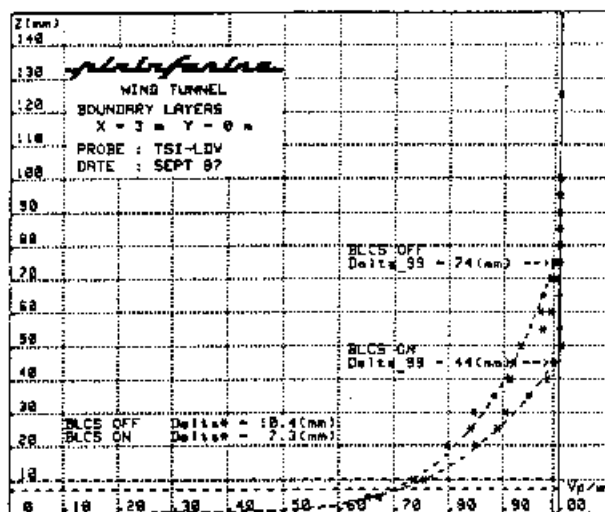
το όχημα. Η έγχυση γίνεται είτε μέσω σχισμής είτε μέσω μιας σειράς από μικρά ακροφύσια..

Το να αναρροφήσεις το οριακό στρώμα μπροστά από ένα μοντέλο είτε μέσω μίας σχισμής ή λωρίδας πορώδους υλικού είναι τεχνικά απλό. Ο αέρας μετακινείται από έναν ανεμιστήρα και επιστρέφει στην αεροσήραγγα κατάντη του τμήματος δοκιμής. Η ποσότητα του αέρα που αναρροφάται μπορεί να προσδιοριστεί από το σχ.4.39 που βασίζεται στα πειράματα του K.O. ARNOLD που έγιναν πάνω σε ένα οριακό στρώμα μπροστά από το φτερό μιας αεροτομής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ,για να μειωθεί το πάχος μετατόπισης δ_1 στο μισό ,η παράμετρος της αναρρόφησης $c_{\dot{q}}$ (σχ.4.39) πρέπει να είναι κοντά στο 4.Ο λόγος της ταχύτητας της αναρρόφησης προς τη ταχύτητα του αέρα μπορεί να ελεγχθεί αν διατηρήσουμε το πάχος του στρώματος σταθερό ($\delta = \text{σταθερό}$). Αν η ένταση της ροής της αναρρόφησης είναι μεγάλη ,το πεδίο της πλησίον ροής θα αποκτήσει αρνητική γωνία προσβολής. Αυτό ειπώθηκε από τους E.MERCKER και J.WIEDEMANN που μελέτησαν την ανάπτυξη του οριακού στρώματος στο δρόμο και στην αεροσήραγγα, το δεύτερο με διαφορετικά είδη προσομοίωσης του εδάφους (βασική και κατανεμημένη αναρρόφηση ,έγχυση και κινούμενη ζώνη).



Σχήμα 4.39: Μείωση του πάχους μετατοπίσεων δ_1 ενός παραχώδους οριακού στρώματος από την αναρρόφηση αυλακώσεων.

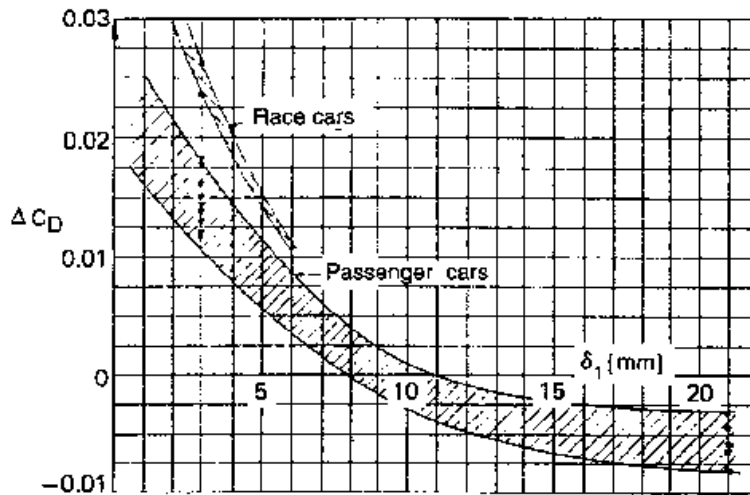
Συχνά η παράμετρος της αναρρόφησης επιλέγεται για να μειώσει το πάχος του οριακού πάχους στο μισό (μετριέται σε ένα άδειο τμήμα δοκιμής) Το σχ 4.40 που απεικονίζει την αεροσήραγγα του Pininfarina είναι ένα συνηθισμένο παράδειγμα ,το πάχος του οριακού στρώματος μειώθηκε από 74mm σε 44mm. Παρόμοιες περιπτώσεις προφίλ ταχύτητας εκδόθηκαν από τον G.ANTONUCCI για την αεροσήραγγα της FIAT και από τον K.B.KELLY για τη μεγάλη αεροσήραγγα της GM. Όμως κατά τη διάρκεια συγκριτικών μετρήσεων στις μεγάλες αεροσήραγγες της Ευρώπης που έγιναν από τον R.BUCHHEIM έγινε φανερό ότι το να μειωθεί το πάχος του στρώματος στο μισό δεν είχε καμία επίδραση στην οπισθέλκουσα, τουλάχιστον για συντελεστή αντίστασης $c_D > 0,30$.



Σχήμα 4.40: Κατανομή ταχύτητας επάνω από ένα στάσιμο ισόγειο χωρίς και με αναρρόφηση οριακού στρώματος, LDW μέτρηση.

Τα επιβατικά αυτοκίνητα ,τα σπορ και τα αγωνιστικά χρησιμοποιήθηκαν σαν αντικείμενα δοκιμής ,καλύπτοντας μεγάλο φάσμα συντελεστή αντίστασης. Τα αποτελέσματα της βασικής αναρρόφησης απεικονίζονται στο σχήμα 4.41 όπου η οπισθέλκουσα φαίνεται σε σχέση με το πάχος μετατοπίσεως που μετριέται σε ένα άδειο πεδίο δοκιμής στην αεροσήραγγα της PORSCHE στα

2,6 μέτρα ανάντη της περιστρεφόμενης πλάστιγγας. Το πάχος μετατοπίσεως του φυσικού οριακού στρώματος σε αυτή τη θέση είναι $\delta_1 \approx 10\text{mm}$.



Σχήμα 4.41: Επιρροή του πάχους οριακού στρώματος δ_1 (που μειώνεται από την αναρρόφηση) στο συντελεστή έλξης δ .

Το αποτέλεσμα της μείωσης του πάχους μετατοπίσεως του οριακού στρώματος γίνεται αισθητό όταν $\delta_1 > 10\text{mm}$, δεν είναι γραμμικό και γίνεται $\Delta C_D \approx 0.02$ όταν το οριακό στρώμα γίνεται πολύ λεπτό ($\delta_1 \rightarrow 0$). Αυτή η αύξηση της οπισθέλκουσας, όπως θα φανεί παρακάτω, είναι σχεδόν διπλάσιο για εραπτομενική έγχυση.

Τα μειονεκτήματα της βασικής αναρρόφησης του οριακού στρώματος είναι τρία:

1. Για να είναι αποτελεσματική η ποσότητα του αέρα που αναρροφάται πρέπει να είναι τόσο μεγάλη που εφαρμόζεται μόνο για αρνητικές γωνίες προσβολής (φαινόμενο βύθισης) κάτι που δεν γίνεται.

2. Κατάντη της σχισμής της αναρρόφησης (ή πορώδη λωρίδα) αναπτύσσεται ένα νέο οριακό στρώμα με τις ίδιες ιδιότητες το οποίο ξεκινάει με το πάχος που είχε το πλησίον στρώμα.
3. Η επιβραδυνόμενη ροή μπροστά από ένα αυτοκίνητο προκαλεί μία πίεση κατά μήκος της περιοχής της βασικής αναρρόφησης. Συνεπώς ο όγκος ροής που αναρροφάται δεν είναι πάνω από το πλάτος του δοκιμαστικού τομέα. Έτσι το οριακό στρώμα που βρίσκεται στο δάπεδο μπροστά από το αυτοκίνητο γίνεται τρισδιάστατο.

Ένας άλλος τρόπος να προστατευθεί το μοντέλο από το παχύ οριακό στρώμα του δαπέδου της αεροσήραγγας είναι να προστεθεί ένα δεύτερο πάτωμα. (σχ4.26e). Το μοντέλο και το δάπεδο (που παριστάνει το δρόμο) ανυψώνονται αρκετά έτσι ώστε να επιτρέψουν στο οριακό στρώμα να περάσει από κάτω. Φυσικά στη μπροστά άκρη του ανυψωμένου δαπέδου δημιουργείται ένα νέο οριακό στρώμα αλλά με μηδενικό πάχος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο λεπτό στρώμα στη περιοχή του μοντέλου.

Όμως αυτό το πλεονέκτημα εν μέρει αναιρείται γιατί το δάπεδο πρέπει να εκτείνεται αρκετά μακριά από το μοντέλο ώστε να αιχμαλωτίζει το μεγαλύτερο μέρος του ανάντη πεδίου ροής του. Η άλλη κατάσταση είναι ότι η διαχωριστική γραμμή που διαχωρίζει την πάνω από τη κάτω ροή πρέπει να εφάπτεται στο δάπεδο σε μηδενική γωνία προσβολής. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει οι αντιστάσεις της ροής στο χαμηλότερο και ψηλότερο μονοπάτι να είναι ίσες. Ένα μέτρο για να συμβεί αυτό είναι να τοποθετήσουμε ένα περιστρεφόμενο πτερύγιο στην άκρη του δαπέδου. Αυτό το πτερύγιο μπορεί να αλλάζει κατεύθυνση έτσι ώστε να εξισορροπούν οι αντιστάσεις και στις δύο μεριές. Οι βαλβίδες πίεσης γύρω από την άκρη του δαπέδου πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν η γωνία προσβολής α στην άκρη γίνεται μηδέν. Αν $\alpha \neq 0$ τότε το πεδίο ροής στην άκρη

μπορεί να επηρεάσει το πεδίο ροής μπροστά από το μοντέλο ,ειδικά αν η ροή χωρίζεται στο πάνω μέρος της άκρης.

Ένα ανυψωμένο δάπεδο χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλες αεροσήραγγες που γίνονται μικρής κλίμακας δοκιμές. Η .Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στο DNW-LTF για να αφαιρέσει το επικείμενο οριακό στρώμα μπροστά από την εγκατάσταση της κινούμενης ζώνης.

Η παλαιότερη πρόταση του K. OHTANI, , δηλαδή ανυψώνοντας ένα μοντέλο επάνω από ένα πάτωμα σήραγγας κατά το ποσό του πάχους μετατοπίσεως δ_1 του οριακού στρώματος (βλ. το σχήμα 4.26 (F)) δεν συστήνεται επειδή περιέχει δύο συστηματικά λάθη. Κατ' αρχάς, το χάσμα της ροή μεταξύ των ροδών και του εδάφους έχει επιπτώσεις στην οπισθέλκουσα και, ακόμα περισσότερο, στην άνωση. Αυτό βρέθηκε ήδη από τον F.N. BEAUVAIS, κατά τη διάρκεια των ερευνών του με ένα κινούμενο πάτωμα. Εντούτοις, το χάσμα μπορεί να καλυφθεί από τις λουρίδες του πορώδους υλικού που εμποδίζουν τη ροή κάτω από τις ρόδες χωρίς μεταφορά μιας αξονικής δύναμης. Δεύτερον, και πολύ χειρότερο, δημιουργείται ένα λάθος από την ανακριβή απόσταση του σασί από το έδαφος, που ίσως είναι σημαντικό.

Η ανάπτυξη ενός νέου οριακού στρώματος πίσω από την αυλάκωση αναρρόφησης (ή την πορώδη λουρίδα) μπορεί να αποτραπεί (ή να μειωθεί τουλάχιστον) με την αναρρόφηση όλης της περιοχής κάτω από το μοντέλο. Αυτή η τεχνική, αποκαλείται *διανεμημένη αναρρόφηση*, [σχήμα 4.26 (ζ)]. Το απαραίτητο σύστημα αναρρόφησης πρέπει να ενσωματωθεί στην περιστροφική πλάκα της ζυγαριάς. Και τα δύο είδη αναρρόφησης-βασικής αναρρόφησης μπροστά από ένα μοντέλο και διανεμημένη αναρρόφηση κάτω από το αυτό- συνδυάζονται, όπως στην περίπτωση της αεροσήραγγας της Porsche στο Weissach.

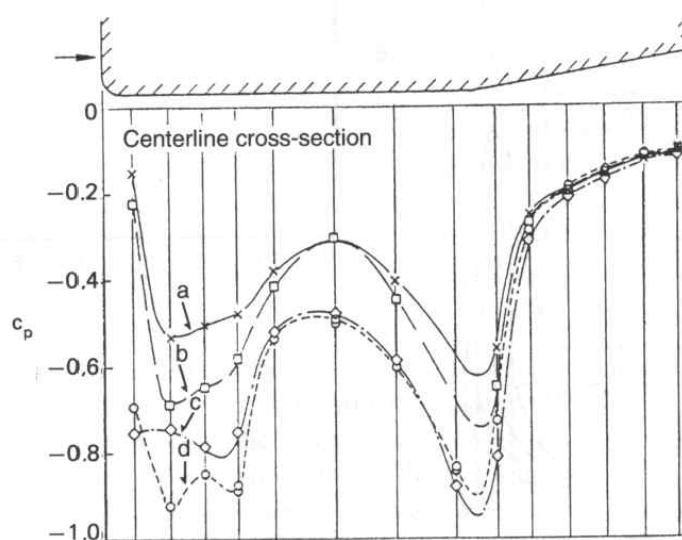
Η διανεμημένη αναρρόφηση είναι αμφισβητούμενη επειδή ο προσδιορισμός του "σωστού" ποσοστού αναρρόφησης είναι ένα πρόβλημα. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό:

1. Το ποσοστό αναρρόφησης καθορίζεται ώστε να παραχθεί ένα συγκεκριμένο πάχος μετατοπίσεως στη θέση του μοντέλου σε ένα κενό τμήμα δοκιμής. Αλλά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.29, το σχεδιάγραμμα ταχύτητας στο οριακό στρώμα επάνω από το δάπεδο αλλάζει εντελώς όταν τίθεται ένα μοντέλο στο τμήμα δοκιμής επίσης, το πάχος του μειώνεται σημαντικά. Συνεπώς, εάν το ποσοστό αναρρόφησης επιλέγεται για ένα κενό τμήμα δοκιμής, θα είναι πάρα πολύ μεγάλο όταν τοποθετηθεί ένα μοντέλο
2. Το πεδίο ροής γύρω από ένα μοντέλο αλλάζει τη κατανομή πίεσης στο δάπεδο, δηλ., επάνω από τις τρύπες αναρρόφησης. Αυτό προκαλεί μια (άγνωστη) αλλαγή στο ποσοστό αναρρόφησης, όχι μόνο όσον αφορά το γενικό μέγεθος του αλλά και την τοπική κατανομή του. Κατά συνέπεια, μπορεί και να εμφανιστεί ένα "σύντομο κύκλωμα" δηλ., ο αέρας που απορροφείται στη μέση ενός προτύπου μπορεί να ρεύσει προς τα εμπρός και μέσα στην θάλαμο αναρρόφησης και να εκραγεί σε ένα σημείο όπου το πεδίο ροής γύρω από το μοντέλο προκαλεί αρνητική πίεση στο επίπεδο έδαφός που συμβαίνει γενικά για το μπροστινό μέρος του προτύπου.

Προκειμένου να αποτραπεί το τελευταίο μειονέκτημα, W.T. MASON και το G. SOVRAN χρησιμοποίησαν μια εξαιρετικά κρίσιμη αναλογία πίεσης, αναρροφώντας κατά συνέπεια από το οριακό στρώμα με την πνιγμένη ροή. Αυτό, εντούτοις, δεν θα έλυne το πρώτο πρόβλημα. Επιπλέον θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να ποικίλει το ποσοστό αναρρόφησης προκειμένου να προσαρμοστεί στις διαφορετικές ταχύτητες αέρα. Θα απαιτούνταν μια περιοχή αναρρόφησης που είναι μεταβλητή.

Παρά αυτά τα αυστηρά επιχειρήματα ενάντια στη διανεμημένη αναρρόφηση, τα εκπληκτικά καλά αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί με αυτή. Μια σύγκριση που πραγματοποιείται από τον CARR χρησιμεύει ως ένα παράδειγμα. Η διανομή πίεσης κάτω από ένα γενικού προτύπου αυτοκινήτου (βλ. σχήμα 4.42) είναι το ίδιο όπως με μια κινούμενη ζώνη. Συνεπώς, η μικρής κλίμακας αεροσήραγγα MIRA και η πραγματικού μεγέθους σήραγγα της Porsche είναι εξοπλισμένες με τη διανεμημένη αναρρόφηση.

Αντί της αφαίρεσης του αέρα που καθυστερήθηκε μέσα στο οριακό στρώμα, είναι δυνατό να επιταχυνθεί με τη *έγχυση* (βλ. το σχήμα 4.26 (η)), μειώνοντας κατά συνέπεια το πάχος του στρώματος στο πάτωμα των σηράγγων. Το έλλειμμα της μάζας και της ορμής μπορεί να αποβληθεί μέσω του αέρα που εκτινάσσεται μέσω μιας στενής αυλάκωσης κοντά στο πάτωμα. Για παράδειγμα, το σχ.4.43(α) δείχνει πως γίνεται στις DNW-LTF. Το σχεδιάγραμμα της ταχύτητας δείχνει καθαρά στο σχ. 4.43(β)



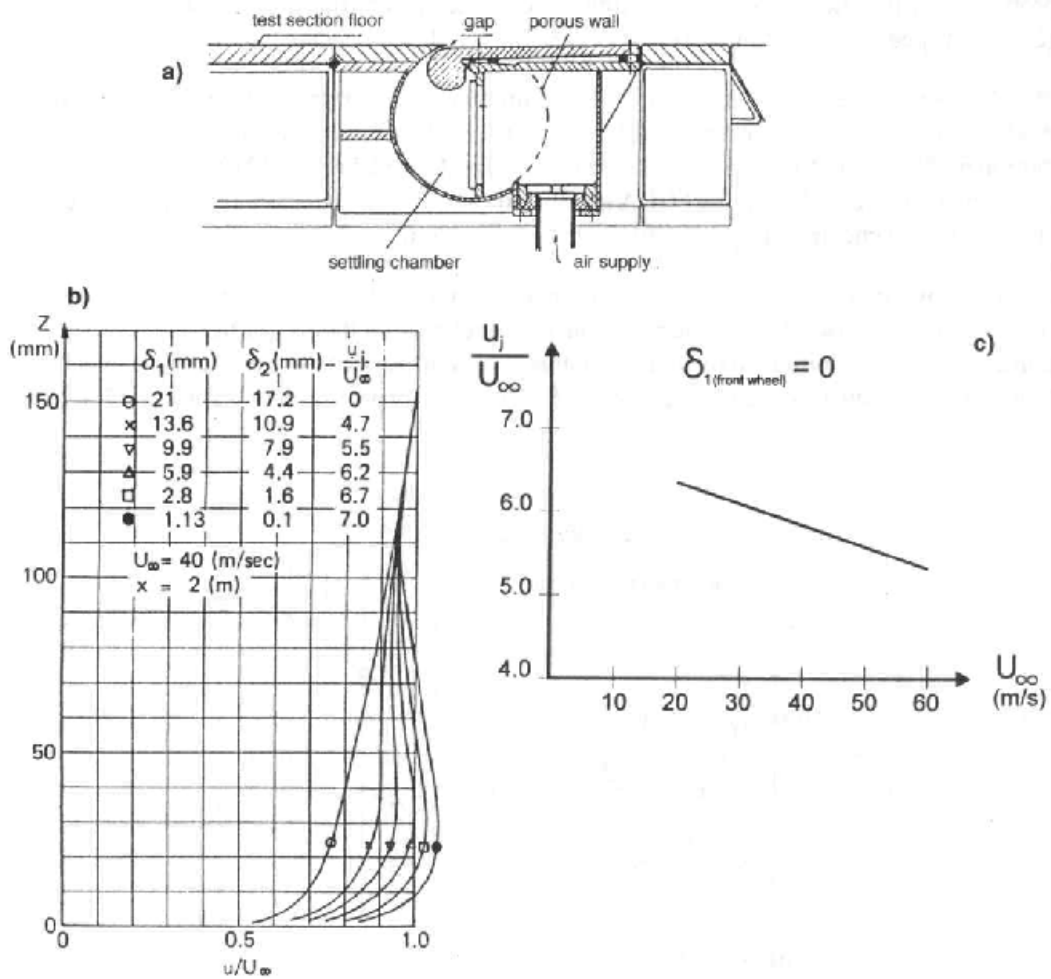
Σχήμα 4.42: Κατανομή πίεσης κάτω από ένα γενικό μοντέλο για τα διάφορα είδη επίγειας αντιπροσώπευσης: α) Στάσιμος επίγειος πίνακας, β) Φράκτης οριακού στρώματος όπως στο σχήμα 4.261 γ) κινούμενη ζώνη, δ) διανεμημένη αναρρόφηση .

την αφαίρεση του ελλείμματος της ταχύτητας. Ανάλογα με τη ταχύτητα του αέρα U_{∞} , απαιτείται μια συγκεκριμένη αεριοθούμενη ταχύτητα u_j για να φθάσει σε μηδέν πάχος μετατοπίσεως $\delta_1=0$ σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση η σχετική καμπύλη βαθμολόγησης όπου για αεροσήραγγα DNW-LTF δίνεται στο σχήμα 4.43 (c).

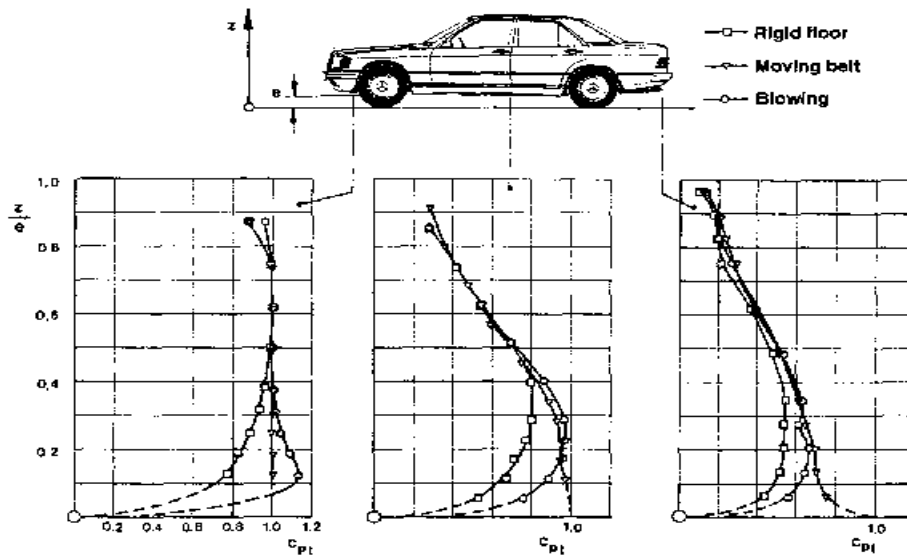
$$(u_j/U_{\infty})_{\delta_1=0} = f(U_{\infty})$$

Τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο όπως μετρήθηκαν από τον E. MERCKER και H.W. KNAPE επιδεικνύονται στο σχήμα 4.44. Επιδεικνύουν πόσο κοντά στην έγχυση έρχεται σε μια κινούμενη ζώνη εάν το πάχος απώλειας ορμής δ_2 (στο κενό τμήμα δοκιμής) γίνεται μηδέν στη θέση του μπροστινού άξονα.

Το σχήμα 4.45 παρουσιάζει την επίδραση του φυσήματος στην οπισθέλκουσα. Και το πάχος οριακού στρώματος δ_1 και το πάχος απώλειας ορμής δ_2 μετρήθηκαν σε ένα κενό τμήμα δοκιμής. Παρόμοια με την αναρρόφηση, η αύξηση στην οπισθέλκουσα με τις μειωμένους παραμέτρους οριακού στρώματος πολύ περισσότερο προφέρεται για τα αγωνιστικά αυτοκίνητα (μικρή απόσταση από το έδαφος) από ότι για τα επιβατικά αυτοκίνητα (μεγαλύτερη απόσταση). Έναντι ενός "φυσικού" οριακού στρώματος, η αύξηση οπισθέλκουσας είναι 4-5% για τα αγωνιστικά αυτοκίνητα και 2-3% για τα επιβατικά αυτοκίνητα όταν $\delta_2=0$ στη θέση του μπροστινού άξονα (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής).



Σχήμα 4.43: Εφαπτομενική έγχυση σε DNW-LTF: α) σχεδιάγραμμα της σχισμής του φουσήματος, β) σχεδιαγράμματα ταχύτητας για τις διάφορες ταχύτητες φουσήματος, γ) u_j καμπύλη βαθμολόγησης ποσοστού φουσήματος $u_j/U_{\infty} = f(U_{\infty})$.

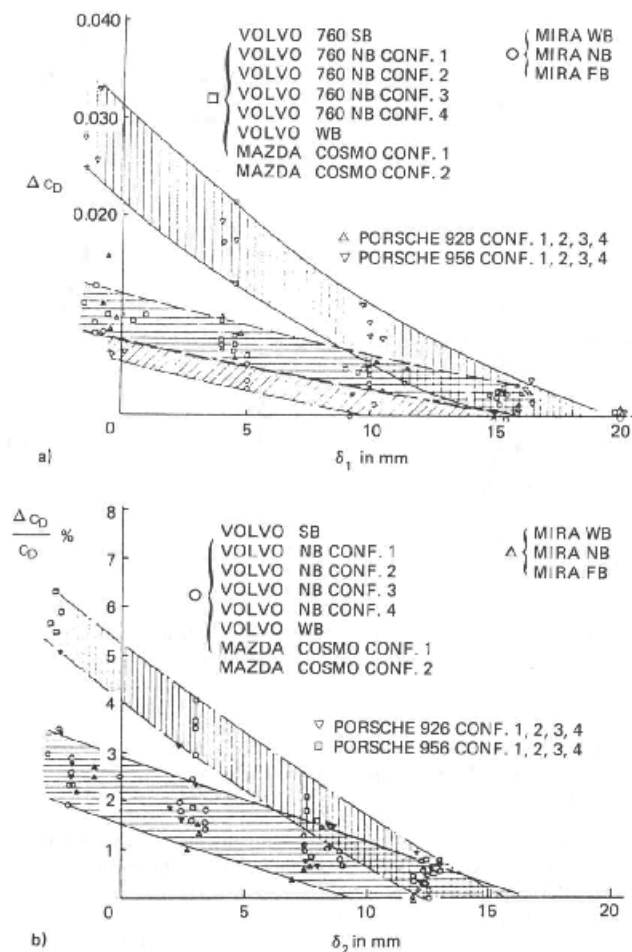


Σχήμα 4.44: Σύγκριση των σχεδιαγραμμάτων ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο: στάσιμο (άκαμπτο) δάπεδο, εφαπτομενική έγχυση, και κινούμενη ζώνη.

Σύμφωνα με το G.WILIAMS , αντί του φυσήματος μέσω μιας αυλάκωσης, της έγχυση μέσω ενιαίων ακροφυσίων που παρατάσσονται σε μια σειρά είναι επίσης εφικτή. Όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα 4.46, το σχεδιάγραμμα οριακού στρώματος μπορεί να γεμίσει μέχρι μια σχεδόν επίπεδη μορφή. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση έγινε από τον E.A. STALKER ήδη από το 1934: μια διανεμημένη έγχυση (βλ. το σχήμα 4.26 (i)) που συνδυάζεται με τη διανεμημένη αναρρόφηση. Πώς αυτό θα μπορούσε να γίνει φαίνεται στο σχήμα 4.47. Εν γνώση του συντάκτη η δεν έχει εφαρμοστεί ποτέ. Εντούτοις, ο A. COGOTTI χρησιμοποιεί ένα μέρος από το σύστημα του STALKER μπροστά από την κινούμενη ζώνη στη αεροσήραγγα Pininfarina.

Τέλος, το σχήμα 4.26 (i) παρουσιάζει πολύ απλή συσκευή για το πάχος οριακού στρώματος από ένα μισό (ένα ποσό που, όπως συζητείται ανωτέρω, έχει τη δευτερεύουσα επιρροή στην οπισθέλκουσα των αυτοκινήτων). R.W.F. GOULD χρησιμοποίησε έναν φράκτη οριακού στρώματος κατά τη διάρκεια της έρευνας των σκαφών. Το ύψος του ν-σχήματος φράκτη του ήταν ίσο με το

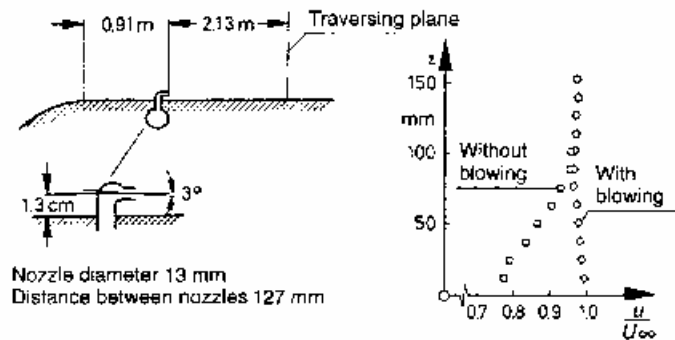
πάχος του επικείμενου οριακού στρώματος. Αργότερα αυτή η συσκευή εγκαταστάθηκε στη MIRA πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα από τους G.W CARR και T.P. HASSELL. Διαπίστωσαν ότι ο αέρας που ρέει πέρα από τον πλάγιο φράκτη κυλά επάνω στις ισχυρές διαμήκειες δίνες που επηρεάζουν τη ροή. Αυτή η συσκευή δεν μπορεί επομένως να συστηθεί για αυτοκίνητα



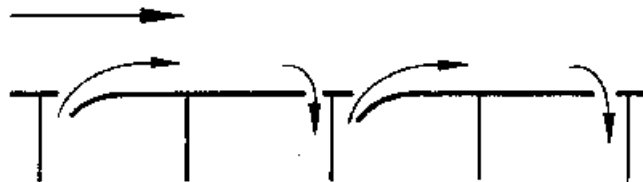
Σχήμα 4.45: Επίδραση του επαπτόμενης έγχυσης στο συντελεστή έλξης: α) επίδραση του πάχους μετατοπίσεως δ_1 , β) επίδραση του πάχους απώλειας ορμής δ_2 .

Μπορεί να εκπλήσσει ότι τόσες πολλές τεχνικές έχουν ακολουθηθεί για τη προσομοίωση του δρόμου αντί για την αναπαραγωγή του. Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι:

1. Η μεγάλη προσπάθεια που απαιτείται για μια κινούμενη ζώνη (και τις περιστρεφόμενες ρόδες).
2. Το γεγονός ότι κάθε τεχνική προσομοίωσης έχει αποκλίσεις σε σύγκριση με την πραγματικότητα.



Σχήμα 4.46: Μείωση του πάχους οριακού στρώματος με τη έγχυση μέσω μιας σειράς των ενιαίων ακροφυσίων.



Σχήμα 4.47: Μείωση του πάχους οριακού στρώματος με είτε από την απορρόφηση είτε από τη έγχυση.

Η ερώτηση που απομένει είναι, σε πιο τύπο προσομοίωσης πρέπει να δοθεί προτεραιότητα. Συγκρίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όλων των παραλλαγών που συζητούνται ανωτέρω και εξετάζοντας τις πολλές διενεργηθείσες έρευνες μέχρι τώρα η εφαπτομενική έγχυση έρχεται πιο κοντά στην κινούμενη ζώνη (και έτσι στην πραγματικότητα), δεν εισάγει τα

πρόσθετα ανεπιθύμητα αποτελέσματα (όπως μια επίδραση βύθισης), είναι φτηνή, είναι εύχρηστη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της δοκιμής.

Εντούτοις, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η *προσομοίωση* είναι ανεπαρκής, και η οδική *αναπαραγωγή* συμπεριλαμβανομένης της περιστροφής των ροδών :

- Οχήματα με εξαιρετικά χαμηλή απόσταση από το έδαφος. Αυτό ισχύει για τα αγωνιστικά αυτοκίνητα (στις διάφορες κατηγορίες τους), και για διάφορα σπορ αυτοκίνητα επίσης.
- Οχήματα με πολύ χαμηλό συντελεστή αντίστασης, για παράδειγμα $C_d < 0,25$ και άνωση κοντά στο μηδέν. Αυτό αντιπροσωπεύει τα αυτοκίνητα όπου οι μετρήσεις σχετικά με το κάτω μέρος του αυτοκινήτου (περισσότερο από ακριβώς επίπεδες επιτροπές) συμβάλλουν αρκετά στη χαμηλή οπισθέλκουσα και την άνωση. Εντούτοις, μια στενή ζώνη είναι ικανοποιητική, υπό τον όρο ότι αναπαράγεται η περιστροφή των ροδών.
- Εξαιρετικά μακριά οχήματα (απόσταση μικρή έναντι του μήκους). Αυτό συμβαίνει για τα λεωφορεία, τα οποία, φυσικά, μπορούν να εξεταστούν μόνο σε μικρής κλίμακας με μια κινούμενη ζώνη.

4.3.3: Διορθώσεις αεροσηράγγων.

4.3.3.1: Στόχοι.

Όταν οδηγείται σε έναν δρόμο ένα όχημα κινείται μέσω του διαστήματος που είναι απεριόριστο σε όλες τις κατευθύνσεις (ελεύθερος αέρας), ο δρόμος από κάτω είναι η μόνη περιοριστική επιφάνεια. Οι διαστάσεις ενός τμήματος δοκιμής αεροσηράγγων, εντούτοις, είναι πεπερασμένες. Η διατομή της και το χρησιμοποιήσιμο μήκος του ρεύματος αέρος της είναι περιορισμένα. Η εγγύτητα των ορίων του ρεύματος σε ένα όχημα τροποποιεί τη ροή γύρω από το όχημα όπως σε ένα απεριόριστο διάστημα. Το γωνιώδες της ροής, η κατανομή της ταχύτητας και της πίεσης γύρω από ένα όχημα και τουλάχιστον σε γενικές γραμμές, οι διαμήκεις πιέσεις στην επιφάνειά του όλες τροποποιούνται και συνεπώς, είναι οι δυνάμεις και οι ροπές που ενεργούν στο όχημα. Όσο μικρότερη είναι μια αεροσήραγγα σχετικά με ένα όχημα, τόσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι αποκλίσεις.

Εφ' όσον ο μόνος στόχος μιας συγκεκριμένης έρευνας είναι να διαμορφωθεί η επίδραση των τροποποιήσεων της μορφής στη ροή γύρω από ένα όχημα, και συγκεκριμένα η οπισθέλκουσα του, αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να είναι ανεκτές, υπό τον όρο ότι η σήραγγα έχει ένα "λογικό" μέγεθος. Εντούτοις, οι "σχετικές" μετρήσεις δεν είναι πλέον ικανοποιητικές εάν οποιοδήποτε δεδομένο όχημα πρέπει να εξεταστεί σε διαφορετικές αεροσήραγγες. Συνολικά, τα σχετικά αποτελέσματα είναι ανεπαρκή όταν απαιτούνται *απόλυτοι* αριθμοί, είτε για την εφαρμογή στη δυναμική των οχημάτων ή για λόγους σύγκρισης μεταξύ των ανταγωνιστικών κατασκευαστών.

Με την ενίσχυση των διορθώσεων (μερικοί προτιμούν τον όρο "ρυθμίσεις") μέριμνα λαμβάνεται για αυτές τις αποκλίσεις. Αρχικά, οι μέθοδοι μεταφέρθηκαν από την αεροναυτική. Κατά τη διάρκεια του χρόνου, εντούτοις, οι αμφιβολίες προέκυψαν ως προς το εάν αυτές οι διορθώσεις ίσχυαν στα

αυτοκίνητα ,των οποίων οι τομείς ροής είναι τόσο πολύ διαφορετικοί(με διαχωρισμούς) από εκείνους των αεροτομών και των ατράκτων. (με τη προσκολλημένη ροή).

Υπό την αιγίδα της SAE, έχουν διαμορφωθεί οι διαδικασίες διορθώσεων που ταιριάζουν συγκεκριμένα για τα αυτοκίνητα. Δύο επιτροπές διαμορφώθηκαν, μια που αφιερώθηκε στο κλειστό τμήμα δοκιμής και άλλη στον ανοικτό. Ο στόχος τους ήταν (και είναι ακόμα) ένα πόρισμα για τη συμμετρική ροή, δηλ., για ένα μη παρεκκλίνον όχημα οι διορθώσεις παρέκκλισης, εντούτοις, μπορούν να αναληφθούν από την αεροναυτική, όπως θα υποδειχθεί κατωτέρω. Για το κλειστό τμήμα δοκιμής, η εργασία έχει προχωρήσει στο σημείο όπου τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο SAE SP-1176. Λόγω των σύνθετων οριακών της, η εργασία για το ανοικτό τμήμα δοκιμής αποδείχθηκε δυσκολότερη. Για το ανοικτό τμήμα δοκιμής, ο E. MERCKER και ο J. WIEDEMANN ήταν σε θέση να χωρίσουν τις σημαντικότερες διαταραχές λόγω των διάφορων οριακών του και να υπολογίσουν τα αποτελέσματά τους χρησιμοποιώντας τα στοιχειώδη μοντέλα ροής.

Η ανάπτυξη των διορθώσεων στις αεροσήραγγες εκτελείται σε δύο βήματα. Στο πρώτο, οι διαταραχές του πεδίου ροής που προκαλείται από τα διάφορα είδη οριακών προσδιορίζονται και αναλύονται. Μετά από τη "κλασσική" πορεία, οι μεμονωμένες διαταραχές μελετώνται και έπειτα χωριστά ενώ υποτίθεται ότι δεν αλληλεπιδρούν η μια με την άλλη (γραμμική προσέγγιση). Στο δεύτερο βήμα, κάθε επίδραση οριακού διαμορφώνεται και υπολογίζεται.

Η βασική προϋπόθεση όλων των διορθώσεων αεροσηράγγων είναι ότι το σχέδιο ροής δεν αλλάζει. Αυτό σημαίνει ότι τα μονοπάτια των ροικών γραμμών ,το σχήμα διανομής της πίεσης, οι θέσεις και τα είδη διαχωρισμού είναι όλα τα ίδια όπως στον ελεύθερο αέρα. Με άλλα λόγια, η μορφή του πεδίου ροής υποτίθεται ότι είναι "σταθερή κάτω από τους περιορισμούς." Οι σύγχρονες μέθοδοι CFD επιτρέπουν σε αυτήν την προϋπόθεση να είναι πιο χαλαρή. Μερικές

συνοπτικές παρατηρήσεις σε αυτό θα γίνουν μετά από την παράγραφο στο κλειστό τμήμα δοκιμής.

Οι διαταραχές των διαφόρων οριακών οδηγούν σε μόνο δύο αποτελέσματα:

1. Την αλλαγή της ταχύτητα της (ομαλής) επικείμενης ροής.
2. Μια αξονική κλίση πίεσης επιβάλλεται στο πεδίο ροής.

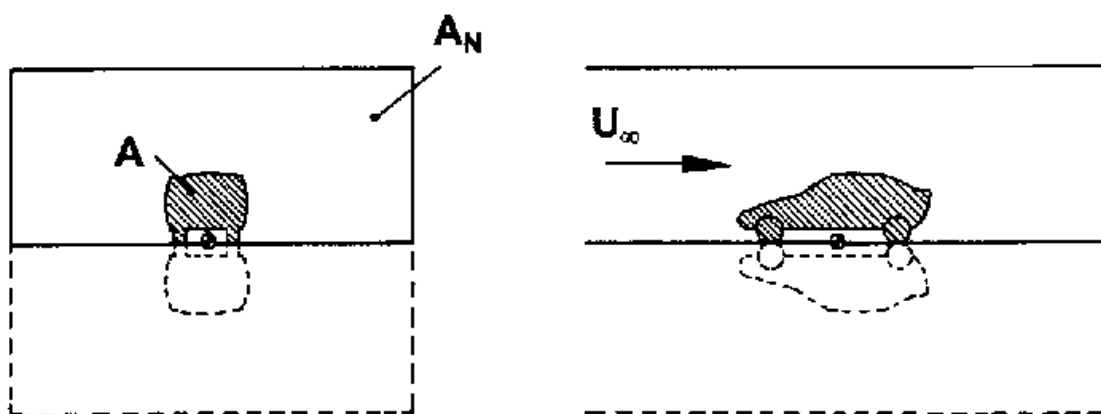
Τα αποτελέσματα αυτών των μεμονωμένων διαταραχών επιβάλλονται πρόσθετα. Αυτή η γραμμική προσέγγιση, εντούτοις, είναι σημαντική μόνο εφ' όσον κάθε μια από τις διαταραχές είναι μικρή και η προκύπτουσα γενική διόρθωση είναι μικρή. Αυτό, φυσικά, ισχύει μόνο εάν μια αεροσήραγγα είναι "λογικού μεγέθους " σε σύγκριση με το αντικείμενο δοκιμής.

Όπως είναι χαρακτηριστικό για τις γραμμικές προσεγγίσεις, δεν είναι δυνατό να αναφερθούν τα ακριβή όρια της ισχύος για αυτές τις "κλασσικές διορθώσεις " ή να καθοριστεί τι είναι "λογικό" όσον αφορά το μέγεθος ενός προτύπου σχετικά με μια αεροσήραγγα. Για το τελευταία θεσπίστηκε ένα μέτρο που είναι ο λόγος της μετωπικής περιοχής A ενός προτύπου προς τη διατομή του τζετ της αεροσήραγγας, ο αποκαλούμενος (γεωμετρικός) λόγος παρεμπόδισης $\phi = A/A_N$. Για πολύ καιρό το $\phi = 0,05$ (η χαρακτηριστική τιμή στην αεροναυτική) χρησιμοποιήθηκε και για την αεροδυναμική οχημάτων. Σήμερα, διάφορες αεροσήραγγες αυτοκινήτων χρησιμοποιούν $\phi = 0,10$, Εντούτοις, υπάρχουν αεροσήραγγες αυτοκινήτων που χρησιμοποιούνται με $\phi = 0,20$, Αυτές οι συγκριτικά μικρές σήραγγες έχουν από κοινού ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής. Σύμφωνα με τον E. MERCKER και τον J. WIEDEMANN ,τα ανοικτά τμήματα δοκιμής μπορούν να σχεδιαστούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα μεμονωμένα αποτελέσματα διαταραχής (σχεδόν) αντισταθμίζουν το ένα το άλλο. Αυτό, φυσικά, ισχύει μόνο στα όρια μιας γραμμικής προσέγγισης για τις διορθώσεις. Η πρώτη αεροσήραγγα με ένα τμήμα δοκιμής που σχεδιάζεται αναλόγως είναι η αερο-ακουστική σήραγγα αέρα της Audi.

Στο σχήμα 4.9 υποδείχθηκε ότι η επίδραση του οριακού στρώματος ενός τμήματος δοκιμής στο πεδίο ροής γύρω από ένα όχημα είναι αντίθετη για τα

ανοικτά από τα κλειστά τμήματα δοκιμής. Στο πρώτο βελτιώνει τη γύρω από ένα αυτοκίνητο ροή και διευρύνει επάνω περισσότερο απ' ό,τι στον ελεύθερο αέρα, ενώ στο δεύτερο είναι συμπιεσμένα από κοινού. Εάν η παραμόρφωση λόγω των οριακών του τζετ ήταν η μόνη επίδραση, οι διορθώσεις και για τα δύο είδη τμημάτων δοκιμής θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν ταυτόχρονα. Εντούτοις, υπάρχουν διάφορες άλλες διαταραχές που εξαρτώνται από τον τύπο του τμήματος δοκιμής. Επομένως φαίνεται ενδεδειγμένο να αντιμετωπιστούν οι διορθώσεις για κάθε τύπο χωριστά.

Η γενική διαμόρφωση ενός αυτοκινήτου σε μια αεροσήραγγα είναι ασύμμετρη όσον αφορά το πάτωμα των σηράγγων. Αυτό το πάτωμα (δάπεδο) προσομοιώνει το δρόμο και επομένως πρέπει να ερμηνευθεί ως τμήμα της δοκιμής και όχι της σήραγγας. Όταν ένα πρότυπο και το δάπεδο αντικατοπτρίζονται ως προς το δάπεδο (σχήμα 4.48), η επακόλουθη διαμόρφωση μπορεί να αντιμετωπισθεί ως μία αίθουσα δοκιμής διπλής διατομής με ένα κεντρικά τοποθετημένο αντικείμενο δοκιμής φτιαγμένο επάνω στο πρότυπο και στην εικόνα καθρέφτη του, συμπεριλαμβανομένου του δρόμου. Το πλεονέκτημα αυτού του αποκαλούμενου "διπλού τμήματος δοκιμής με το διπλό αντικείμενο δοκιμής" είναι μια ευκολότερη διατύπωση των αριθμητικών προτύπων από τα οποία τα αποτελέσματα διαταραχής μπορούν να υπολογιστούν.



Σχήμα 4.48: Διπλό τμήμα δοκιμής.

4.3.3.2: Κλειστό τμήμα δοκιμής.

Τρεις τύποι διαταραχών ορίου μπορούν να διακριθούν:

1. Φράξιμο στερεού.
2. Φράξιμο απορρεύματος.
3. Οριζόντια buoyancy.

Σε γενικές γραμμές, κάθε μια από αυτές τις διαταραχές έχει δύο αποτελέσματα: η αποτελεσματική ταχύτητα στο τμήμα δοκιμής αλλάζει (παρεμπόδιση), παράγονται και οι αξονικές κλίσεις πίεσης παράγονται (οριζόντια πλευστότητα).

Στερεά παρεμπόδιση (SB): Με μια πεπερασμένη αναλογία παρεμπόδισης που οι στερεοί τοίχοι σήραγγων περιορίζουν, βελτιώνει τη ροή γύρω από ένα σώμα δοκιμής από το να αποκλείσει τόσο πολύ όσο σε ελεύθερο αέρα (βλ. το σχήμα 4.9 (α)). Συνεπώς, οι τοπικές ταχύτητες των πεδίων ροής κοντά στο σώμα είναι μεγαλύτερες (σχετικά με την ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα) από αυτόν που θα ήταν στον ελεύθερο αέρα, που οδηγεί σε μια υψηλότερη οπισθέλκουσα απ'ότι στον ελεύθερο αέρα. Στο σχήμα 4.49 (α) η εναλλαγή της υπερβολικής ταχύτητας u_s κατά μήκος του άξονα μιας διπλής σήραγγας παρουσιάζεται σχηματικά, μαζί με την πίεση cp_{SB} στην οροφή της σήραγγας, και τα δύο με μη διαστατική μορφή. Η αλλαγή ταχύτητας δεν είναι σταθερή κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, δηλ., αυτό είναι $u_{SB}(x)$. Η πίεση παρέμβασης είναι επίσης μεταβλητή κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, δηλ., αυτό είναι $cp_{SB}(x)$, αλλά είναι συμμετρική όσον αφορά τη μεγαλύτερη διατομή του προτύπου. Συνεπώς δεν οδηγεί σε μια (αξονική) δύναμη παρέμβασης.

Παρεμπόδιση ιχνών(WB): Τα ίχνη ενός πλαισίου δοκιμής δημιουργούν μια ατέλεια στη ταχύτητα στον πυρήνα του ρεύματος αέρος πίσω από το πλαίσιο. Αυτή η ατέλεια ταχύτητας αντιπροσωπεύει μια μείωση της αποτελεσματικής διατομής που παραμένει ανοικτή για τη ροή, που προκαλεί μια ταχύτητα παρέμβασης, $u_{WB}(X)$. Αυτό διορθώνεται μόνο με την εξέταση της τιμής στο πρότυπο κέντρο. Η $u_{WB}(X)$ σχεδιάζεται (σχηματικά) στο σχήμα 4.49 (β), μαζί με την αντίστοιχη αλλαγή στην πίεση c_{pWB} (πάλι στην οροφή), η οποία δεν είναι συμμετρική. Ο ολικός λόγος μεταβολής της πίεσης $\Delta c_{pWB}/\Delta x$ προκαλεί μια οριζόντια δύναμη αποκαλούμενη *πλευστότητα ιχνών*, και ο σχετικός συντελεστής είναι Δc_{DWB} .

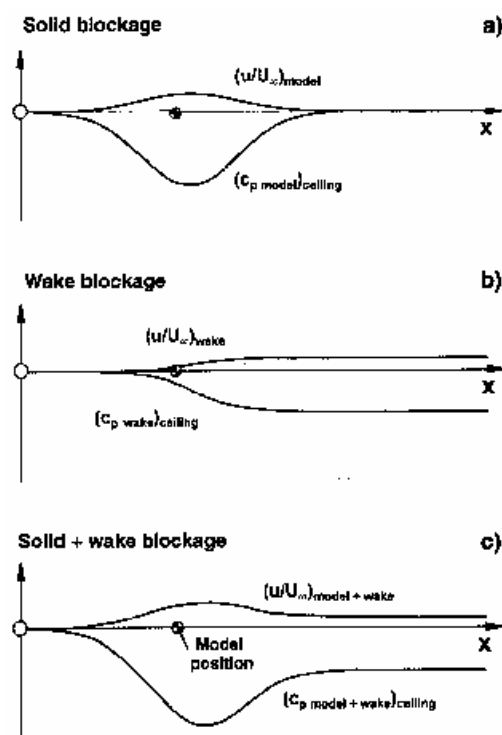
Η στερεά παρεμπόδιση και η παρεμπόδιση ιχνών φαίνονται στο σχήμα 4.49 (γ)

Οριζόντια πλευστότητα (HB): Το πάχος του οριακού στρώματος στους στερεούς τοίχους αυξάνεται από την είσοδο του τμήματος δοκιμής έως στην έξοδο, αναγκάζει την ταχύτητα του ανιζώδες πυρήνα για να αυξηθεί κατά μήκος του άξονα του τμήματος δοκιμής, και παράγει έτσι μια μείωση στη στατική πίεση. Η μείωση στην πίεση από τη μύτη στην ουρά $\Delta c_{pHB}/\Delta x$ παράγει μια δύναμη πίεσης τύπου οπισθέλκουσας Δc_{DHB} στο σώμα δοκιμής κάτι που δεν συμβαίνει στον ελεύθερο αέρα. Σε πολλές αεροσήραγγες (αλλά όχι σε όλες) η οριζόντια δύναμη πλευστότητας είναι αμελητέα επειδή ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης σε ένα κενό τμήμα δοκιμής αντισταθμίζεται με ελαφρώς αυξήσει της διατομής του τμήματος δοκιμής κατά μήκος του άξονά του. Η επίδραση μετατοπίσεων του οριακού στρώματος στους τοίχους των σηράγγων παράγει μια αύξηση στην ταχύτητα για το ανιζώδες πυρήνα του τμήματος δοκιμής. Αυτό, εντούτοις, δεν πρέπει να διορθωθεί επειδή λαμβάνεται υπόψη όταν βαθμολογείται η σήραγγα

Ο βασικός μηχανισμός της αυξανόμενης οπισθέλκουσας και λόγω της πλευστότητας (WB) ιχνών και της οριζόντιας πλευστότητας (HB) είναι ο ίδιος.

Η ανομοιόμορφη ταχύτητα πέρα από το ρεύμα αέρος της σήραγγας μειώνει την αποτελεσματική περιοχή ροής του αγωγού. Και στις δύο περιπτώσεις η μείωση της αποτελεσματικής περιοχής είναι μεγαλύτερη κατάντη ενός σώματος δοκιμής από ανάντη αυτού, που κάνει την κατάντη πίεση μικρότερη από την ανάντη τιμή και έτσι παράγει έτσι μια ξένη δύναμη πίεσης τύπου οπισθέλκουσας στο σώμα που δεν εμφανίζεται στον ελεύθερο αέρα.

Εν περίληψη, υπάρχουν δύο είδη διόρθωσης που πραγματοποιούνται: μια διόρθωση για την πρόσθετη ταχύτητα ροής στο πρότυπο, και άλλη για μεταβολή της πίεσης από τη μύτη στην ουρά του αντικειμένου δοκιμής.



Σχήμα 4.49: Αποτελέσματα οριακού στρώματος, κλειστού τμήματος δοκιμής.

Μετά από αυτήν την λογική, το αυξανόμενη τοπική ταχύτητα u στην αξονική ροή ερμηνεύεται ως οφειλόμενο σε μια επικείμενη ταχύτητα U_{corr} . Αυτή

είναι μεγαλύτερη από τη ταχύτητα του αέρα στη σήραγγα U_m κατά ποσό ίσο με u . Όπου η U_m μετρήθηκε από τη διαφορά πίεσης Δp σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_{\text{corr}} = U_m + u = U_m + \varepsilon U_m = U_m(1 + \varepsilon) \quad (28)$$

Αντίστοιχα, η διορθωμένη δυναμική πίεση είναι:

$$q_{\text{corr}} = q_m(1 + \varepsilon)^2 \quad (29)$$

όπου το ε καλείται συντελεστής παρεμπόδισης, και αποτελείται από τη στερεά παρεμπόδιση ε_{SB} και τη παρεμπόδιση ιχνών ε_{WB} δηλ.,

$$\varepsilon = \varepsilon_{SB} + \varepsilon_{WB} \quad (30)$$

Μια μεταβολή της πίεσης κατά μήκος του τμήματος δοκιμής προκαλεί μια αύξηση Δc_{DB} οπισθέλκουσας που αποτελείται από την πλευστότητα ιχνών Δc_{DWB} , και την οριζόντια πλευστότητα Δc_{DHB} , δηλ.,

$$\Delta c_{DB} = \Delta c_{DWB} + \Delta c_{DHB} \quad (31)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις, ο προκύπτων διορθωμένος συντελεστής οπισθέλκουσας C_{DCORR} είναι ο ακόλουθος, όπου το c_{Dm} είναι ο μετρημένος συντελεστής οπισθέλκουσας.

$$c_{D\text{corr}} = \frac{c_{Dm} + \Delta c_D}{q_{\text{corr}}/q_m} = \frac{c_{Dm} + \Delta c_{DB}}{(1 + \varepsilon)^2} = \frac{c_{Dm} + \Delta c_{DWB} + \Delta c_{DHB}}{(1 + \varepsilon_{SB} + \varepsilon_{WB})^2} \quad (32)$$

Η εξίσωση είναι τυπική, ο στόχος είναι ο μετρημένος συντελεστής έλξης c_{Dm} , είναι πραγματικά ο στόχος τα μεμονωμένα αποτελέσματα του ε στις κύριες γεωμετρικές παραμέτρους του προτύπου και του τμήματος δοκιμής (ο λόγος ϕ

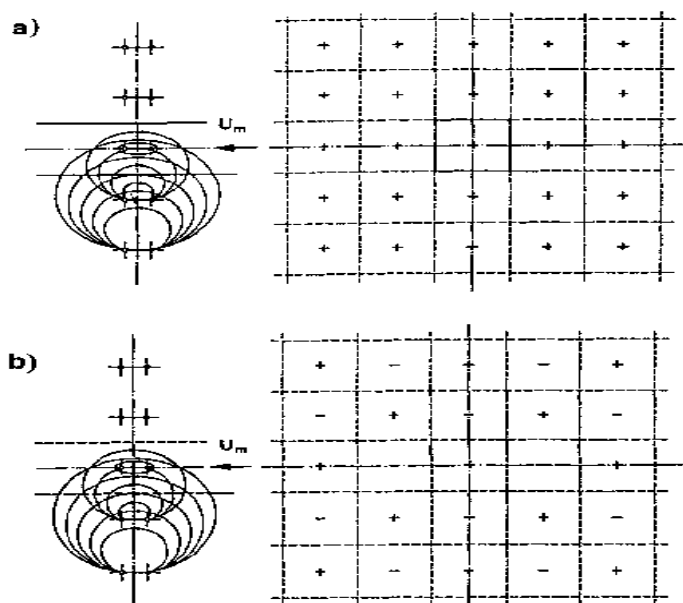
παρεμπόδισης και η μορφή του τμήματος προτύπων και δοκιμής) και στο ρυθμό μεταβολής της πίεσης από τα ίχνη και στο κενό τμήμα δοκιμής.

Ο αριθμητής της εξίσωσης τίθεται μαζί από ένα πρότυπο ίχνος-πλευστότητας που διατυπώνονται από τον J.E. HACKETT και μια έκφραση για την οριζόντια πλευστότητα που παράγεται από τον MERCKER και τον WIEDEMANN.

Για να υπολογιστεί η υπερβολική ταχύτητα (παρονομαστής εξίσωσης (1,8)), πρέπει να εγκατασταθεί ένα πρότυπο (αναλυτικό ή αριθμητικό) της φυσικής διαμόρφωσης "αντικείμενο δοκιμής συν το τμήμα δοκιμής. Το πρότυπο για το πρώτο, το αντικείμενο δοκιμής, μπορεί να είναι αρκετά απλό επειδή μόνο τα απομακρυσμένα αποτελέσματα είναι ενδιαφέροντα. Το διάνυσμα της ταχύτητας που προκαλείται από ένα αντικείμενο δοκιμής στους τοίχους ενός τμήματος δοκιμής εξαρτάται μόνο από τις γενικές διαστάσεις του αντικειμένου δοκιμής, παραδείγματος χάριν ευθύτητά του d/l (όπου το d είναι η "αποτελεσματική" διάμετρος και l το μήκος του), αλλά όχι από τις ιδιαιτερότητες της μορφής του. Το πρότυπο για το δεύτερο, οι τοίχοι του δοκιμή-τμήματος, παράγεται με την απεικόνιση του προτύπου του αντικειμένου δοκιμής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.50 (α) Εάν, όπως σε αυτό το παράδειγμα, το αντικείμενο δοκιμής αντικαθίσταται από ένα σώμα Rankine ωοειδές, η παραγωγή του πρόσθετης ταχύτητας u στον άξονα του προτύπου μπορεί εύκολα να μετρηθεί. Η πρώτη εικόνα καθρέφτης προκαλεί μια ταχύτητα u_1 στον άξονα του ωοειδούς, η δεύτερη μια πολύ μικρότερη ταχύτητα u_2 στην ίδια κατεύθυνση, και ούτω κάθε εξής. Επιπλέον μπορεί να αναγνωριστεί ότι το u δεν είναι σταθερό κατά μήκος του άξονα του προτύπου. Εντούτοις, αυτό θα παραμεληθεί στις περαιτέρω εκτιμήσεις.

Ο επόμενος στόχος είναι να συναχθούν οι κατάλληλες διαστάσεις (μέγεθος και μορφή) για το πρότυπο που αντικαθιστά το αντικείμενο δοκιμής και τα ίχνη του. Μόλις είναι γνωστό αυτό, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ταχύτητα u που προκαλείται στον άξονα του αντικειμένου δοκιμής από όλες τις εικόνες καθρεφτών. Από τις πολλές διαδικασίες που έχουν προταθεί, τρεις

έχουν αποδειχθεί οι πιο κατάλληλες μέθοδοι. Του E. MERCKER, η μέθοδος ταχύτητα-αναλογία του HENSEL, και η μέθοδος πίεση-υπογραφή του HACKETT και WILSDEN. Και οι τρεις μέθοδοι ισχύουν επίσης για διαφορετικές συνθήκες.



Σχήμα 4.50: Που αναπαράγει τους στερεούς τοίχους ενός κλειστού τμήματος δοκιμής (α) και του ελεύθερου ορίου ανοικτό τμήμα δοκιμής (β) από την τεχνική καθρέφτης-εικόνας. Η ροή προέρχεται από το δικαίωμα. Πλήρης κύκλος: πηγή κοίλος κύκλος.

Στη μέθοδο MERCKER το αντικείμενο δοκιμής αντικαθίσταται από μια σφαίρα (doublet). Η ακτίνα της ,καθορίζεται από τις κύριες διαστάσεις του οχήματος. Επειδή είναι δύσκολο να περιγραφεί το ρευστό και τα ίχνη με τον ίδιο τρόπο ως αντικείμενο δοκιμής, και τα δύο χαρακτηρίζονται από την εξωτερική επίδρασή τους, δηλαδή η μετρημένη οπισθέλκουσα του αντικειμένου δοκιμής. Δύο εμπειρικές σταθερές χρησιμοποιούνται. Το θετικό της μεθόδου MERCKER βρίσκεται στο γεγονός ότι καμία πρόσθετη μέτρηση (όπως στις υπόλοιπες δύο μεθόδους) δεν πρέπει να ληφθεί.

Η μέθοδος αναλογία-ταχύτητας του HENSEL χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό πηγής - κατάθλιψης ως αντικατάσταση για το αντικείμενο δοκιμής και τα ίχνη του. Η δύναμη της πηγής και της κατάθλιψης καθορίζεται με τη μέτρηση δύο πιέσεων στην οροφή του τμήματος δοκιμής, μία παραπλεύρως του πρότυπο και μια μακρύτερα και κατάντη του.

Η μέθοδος πίεση-υπογραφή των HACKETT και WILDSEN είναι μια γενίκευση της μεθόδου του HENSEL δεδομένου ότι η πίεση στους τοίχους μετριέται σε διάφορες θέσεις σε μια γραμμή κατά μήκος της οροφής επάνω από το πρότυπο αντί σε μόνο δύο σημεία.

Τα υπόλοιπα πέντε συστατικά της επακόλουθων δύναμης του αέρα και της ροπής αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως η οπισθέλκουσα , αλλά χωρίς μια (οριζόντια) επίδραση πλευστότητας.

Και οι τρεις μέθοδοι ακολουθούν τη "κλασσική" έννοια δεδομένου ότι το αντικείμενο δοκιμής και τα ίχνη του αντικαθίστανται από ένα εξαιρετικά απλό πρότυπο, και η επίδραση των τοίχων του τμήματος δοκιμής αποτελείται από την τεχνική καθρέφτης-εικόνα

Οι σύγχρονες μέθοδοι CFD επιτρέπουν τη διαμόρφωση του αντικειμένου δοκιμής, των ιχνών του, και του περιβάλλοντος τμήματος δοκιμής με σχεδόν οποιοσδήποτε λεπτομέρειες. Ο D. STEMBACH έχει καθιερώσει ένα τέτοιο πρότυπο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επιτροπής (βλ. το σχήμα 4.21). Καμία πρόσθετη μέτρηση δεν απαιτείται. Έναντι των μεθόδων που περιγράφονται ανωτέρω, η μέθοδος STEINBACH διακρίνεται από το γεγονός ότι αποτελεί επίσης τις τοπικές διορθώσεις στο πεδίο ροής.

4.3.3.3: Ανοικτό τμήμα δοκιμής.

Για πολύ ,ήταν κοινή η αντίληψη ότι ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής δεν χρειάζονταν οποιεσδήποτε διορθώσεις. Μια διόρθωση στερεούς-παρεμπόδισης (όπως υπολογίζεται με τους κανόνες που δανείζονται από την αεροναυτική) ήταν τόσο μικρή που παραμελήθηκε γενικά. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι μια διόρθωση πλευστότητας ήταν περιττή επειδή υποτίθεται ότι το ρεύμα αέρος ενός ανοικτού τμήματος δοκιμής δεν έχει καμία αξονική μεταβολή πίεσης, δεδομένου ότι αυτό είναι έμφυτο για ένα *ιδανικό* ελεύθερο τζετ. Μόνο οι συγκριτικές μετρήσεις έθεσαν υπό αμφισβήτηση εάν αυτή η προσέγγιση ήταν αποδεκτή.

Ο E. MERCKER και ο J WIEDEMANN ανέλυσαν τη ροή σε ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής λεπτομερώς. Ήταν σε θέση να προσδιορίσουν πέντε σημαντικές διαταραχές και να υπολογίσουν τα αποτελέσματά τους στη ροή χρησιμοποιώντας τα στοιχειώδη πρότυπα ροής. Η θεμελιώδης προϋπόθεσή τους είναι η ίδια όπως για το κλειστό τμήμα δοκιμής: Η επίδραση κάθε μιας διαταραχής ,με την εξαίρεση του αξονικού ρυθμού μεταβολής της πίεσης του τζετ ,είναι να αλλαχτεί η ταχύτητα του επικείμενου αέρα σύμφωνα με Eq. (1,4). Αυτές οι πέντε διαταραχές είναι:

1. Εκτόνωση του τζετ ϵ_{JE} .
2. Εκτροπή του τζετ ϵ_{JD} .
3. Το ϵ_N ακροφυσίων.
4. Συλλέκτης ϵ_C .
5. Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης Δp .

Συνεπώς, η δυναμική πίεση διορθώνεται:

$$q_{corr}/q_m = (1 + \epsilon_{JE} + \epsilon_{JD} + \epsilon_N + \epsilon_C)^2 \quad (33)$$

Εάν η παρεμπόδιση ακροφυσίων έχει διορθωθεί εκ των προτέρων το ε_N πρέπει να παραλειφθεί από την εξίσωση (1,9).

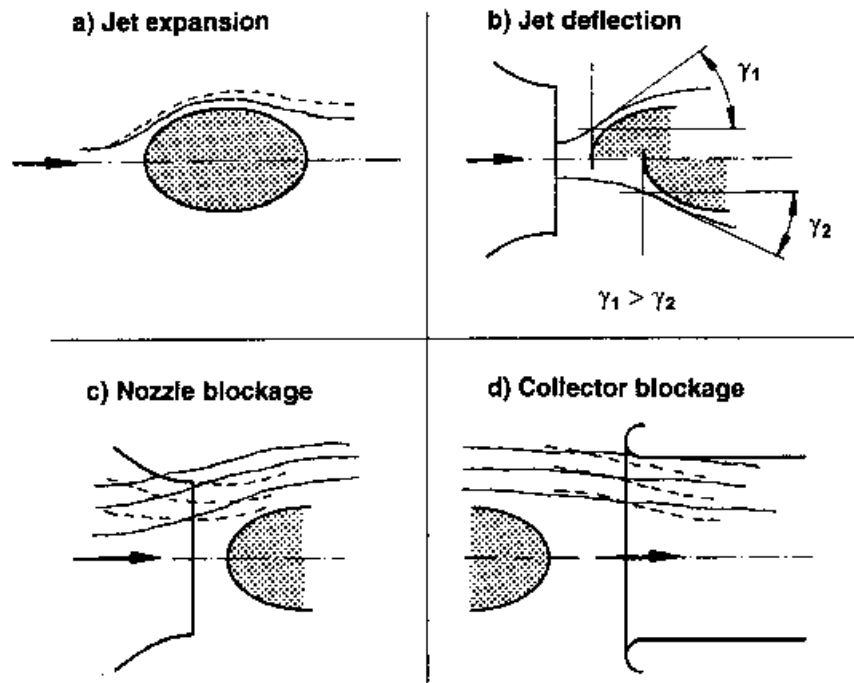
Στον ακόλουθο το φυσικό υπόβαθρο κάθε μεμονωμένου παράγοντα ε θα εξηγηθεί εν συντομία. Τα αριθμητικά πρότυπα για τον υπολογισμό τους περιγράφονται :

1. Εκτόνωση τζετ (στερεά παρεμπόδιση) ε_{jE} : Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.51 (α) , σε ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής τα ελεύθερα όρια του τζετ επιτρέπει ότι βελτιώνει γύρω από ένα πρότυπο που διευρύνει περισσότερο απ' ό,τι στον ελεύθερο αέρα. Με μια μεγαλύτερη περιοχή ροής μεταξύ ενός προτύπου και του τζετ ορίου η τοπική ταχύτητα αέρα είναι χαμηλότερη. Συνεπώς οι δυνάμεις που ενεργούν στο πρότυπο είναι μικρότερες. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως ταχύτητα της επικείμενης ροής από ένα ποσό που αντιστοιχεί του χαμηλώματος σε ε_{jE} . Ο παράγοντας ε_{iE} εκτόνωσης επέκτασης (στερεά παρεμπόδιση) μπορεί να υπολογιστεί με ένα πρότυπο παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται για τα κλειστά τμήματα δοκιμής. Το αντικείμενο δοκιμής αντικαθίσταται από ένα πρότυπο που γίνεται από μια διαμόρφωση πηγή-νεροχυτών. Τα όρια του τζετ παράγονται με την απεικόνιση αυτού του προτύπου στα όρια του τζετ (βλ. το σχήμα 4.50 (β)). Εντούτοις, οι όροι του ορίου είναι διαφορετικοί από το κλειστό τμήμα δοκιμής. Τώρα, στη θέση των ελεύθερων ορίων του τζετ (η ταχύτητα και η πίεση πρέπει να είναι οι ίδιες όπως χωρίς το πρότυπο). Αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή του σημαδιού της ρύθμισης της πηγής κατάθλιψης για κάθε νέα απεικονισμένη εικόνα. Κατά συνέπεια την ταχύτητα στον άξονα του αρχικού (κεντρικού) προτύπου από την πρώτη τάξης εικόνα, που αυξάνεται χαμηλώνει λίγο από το δεύτερο, χαμηλωμένος από ένα ακόμα μικρότερο ποσό από το τρίτο, και τα λοιπά. Η εναλλασσόμενη επίδραση αυτών των εικόνων καθρεφτών είναι η

εξήγηση γιατί σε ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής η επίδραση της στερεάς παρεμπόδισης είναι μικρή έναντι ενός κλειστού τμήματος δοκιμής.

2. Εκτροπή του τζετ ϵ_{JD} : Λόγω του σύντομου χρησιμοποιήσιμου μήκους του ρεύματος αέρος σε ένα ανοικτό τζετ ένα πρότυπο πρέπει να τοποθετηθεί σχετικά κοντά στην έξοδο του ακροφυσίου. Αυτό οδηγεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.51 (β), σε μια εκτροπή του τζετ που μπορεί να ερμηνευθεί ως μια άλλη εκτόνωση, και προκαλεί μια περαιτέρω μείωση στην ταχύτητα της επικείμενης ροής. Οι E. MERCKER και J. WIEDEMANN συνδέουν αυτήν την εκτόνωση του τζετ με μια αποτελεσματική διατομή ακροφυσίων που είναι μικρότερη από το γεωμετρικό A_v . Κατά συνέπεια η αποτελεσματική αναλογία παρεμπόδισης ϕ είναι μεγαλύτερη από τη γεωμετρική: $\phi^* > \phi$
3. Η παρεμπόδιση ϵ_N του ακροφυσίου
4. Παρεμπόδιση των συλλεκτών ϵ_C : Οι τοίχοι του συλλέκτη ολοκληρώνουν την πλευρική διάδοση της ροής που προκαλείται από ένα πρότυπο και τα ίχνη του. Η ροή στο συλλέκτη επιταχύνεται, και αυτό έχει μια επίδραση στην ταχύτητα της επικείμενης ροής όπου αυξάνεται (βλ. το σχήμα 4.51 (d)).
5. Ρυθμός μεταβολής της πίεσης: Όπως παρουσιάζεται ήδη στο σχήμα 4.11 (β) η στατική πίεση σε ένα ανοικτό (κενό) τμήμα δοκιμής δεν είναι ακριβώς σταθερή. Στο πρώτο μέρος του τμήματος δοκιμής ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης είναι αρνητικός, στη μέση μπορεί να είναι μηδέν, και γίνεται θετικός μακρύτερα και κατάντη. Οι E. MERCKER και J. WIEDEMANN έχουν δείξει ότι η προκύπτουσα μεταβολή της πίεσης κατά μήκος του τμήματος δοκιμής ενεργεί σε ένα πρότυπο που είναι 1,75 φορές μεγαλύτερο από τον πραγματικό

όγκο του, και παράγει μια οριζόντια δύναμη πλευστότητας τύπου οπισθέλκουσας.



Σχήμα 4.51: Αποτελέσματα ορίου στα ανοικτά τμήματα δοκιμής.

4.3.3.4: Αποτελέσματα οριακού στρώματος.

Όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με ένα στάσιμο δάπεδο, όπως είναι η τυποποιημένη πρακτική, η οπισθέλκουσα πρέπει να διορθωθεί για μια επίδραση οριακού στρώματος. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ρόδες ενός οχήματος βυθίζονται εν μέρει σε ένα οριακού στρώμα η μετρημένη οπισθέλκουσα των ροδών είναι πάρα πολύ χαμηλή. Βάση του σχήματος 4.45 αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη. η σχέση $\Delta c_D = f(\delta_1)$ πρέπει να παρεκτειθεί με $\delta_1 = 0$ δίνοντας $\Delta c_{D\delta_1=0}$. Για τα αυτοκίνητα, ως μέσο όρο, αυτό θα παρήγε μια διόρθωση στην οπισθέλκουσα της τάξης του $\Delta c_D = + 0,01$.

4.3.3.5: Παρεκκλιμένο πρότυπο.

Μέχρι τώρα έχει εξεταστεί μόνο η συμμετρική ροή. Όταν ένα πρότυπο παρεκκλίνει της πορείας κατά μια γωνία β , το ροής χάνει τη συμμετρία του όσον αφορά το μέσο του τμήματος δοκιμής. Το ρεύμα αέρος κοντά στο πρότυπο εκτρέπεται προς τα όρια του τζετ. Ανάλογα με τον τύπο του τμήματος δοκιμής (ανοικτού ή κλειστού), οι διαφορετικές αποκλίσεις εμφανίζονται έναντι του ελεύθερου αέρα. Στο ανοικτό τμήμα δοκιμής οι ροϊκές γραμμές κατάντη του προτύπου εκτρέπονται περισσότερο απ' ό,τι στον ελεύθερο αέρα. Αυτή η ισχυρότερη εκτροπή "γίνεται αισθητή" ανάντη του προτύπου, και ως εκ τούτου η αποτελεσματική γωνία συστροφής είναι μικρότερη από τη γεωμετρική αξία. Το αντίθετο ισχύει για ένα κλειστό τμήμα δοκιμής.

Ένα αυτοκίνητο κάτω από μια γωνία συστροφής β από την πορεία του είναι συγκρίσιμο με ένα φτερό μικρού λόγου διάστασης διαγωνίως με γωνία προσβολής α . Συνεπώς, η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην αεροναυτική δοκιμή για να διορθώσει τη γωνία προσβολής α θα μπορούσε να μεταφερθεί σε ένα όχημα για να διορθώσει τη γωνία συστροφής β . Εντούτοις, αυτή η διόρθωση γίνεται σπάνια στην πράξη. Ο λόγος είναι ότι : Σε μια αεροσήραγγα ο φυσικός πλευρικός αέρας εξομοιώνεται με έναν εξαιρετικά εξιδανικευμένο τρόπο. Η απόκλιση από την πραγματικότητα δεν μπορεί να μετρηθεί καλά ,επειδή η πραγματικότητα είναι γνωστή μόνο στατιστικώς, αυτό εισάγει μια αβεβαιότητα του άγνωστου μεγέθους. Ως εκ τούτου είναι δικαιολογημένο να παραμεληθεί ένα λάθος στη γωνία συστροφής που μετριέται σε μια σήραγγα.

4.3.3.6: Θερμικές δοκιμές.

Όταν εκτελούνται οι θερμικές δοκιμές γίνεται μια εκ των προτέρων διόρθωση της ταχύτητας του αέρα που δεν είναι πλέον σημαντική επειδή κατά τη διάρκεια της δοκιμής η αποτελεσματική ταχύτητα του αέρα πρέπει να είναι η ίδια με την περιφερειακή ταχύτητα του δυναμόμετρου. Ένας απλός τρόπος είναι να μετρηθεί η πίεση στο σημείο στασιμότητας του αντικειμένου δοκιμής και να ληφθεί η ταχύτητα θέτουμε $c_{p0} = 1,0$.

4.4: Δοκιμές με τα πρότυπα μειωμένης-κλίμακας.

4.4.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η στάση των αεροδυναμιστών οχημάτων απέναντι στη μικρής κλίμακας δοκιμή έχει υποβληθεί σε διάφορες αλλαγές, που πηγάζουν από πολύ θετικό απολύτως σε αρνητικό, και ανάποδα (συγκρατημένα) στο θετικό. Η πρόωρη αεροδυναμική οχημάτων άρχισε με τα πρότυπα μειωμένης-κλίμακας. Εκείνη την περίοδο μόνο οι μικρές σήραγγες που χτίστηκαν για αεροναυτικούς λόγους ήταν διαθέσιμες. Ως εκ τούτου μόνο τα πολύ μικρά πρότυπα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν όπως η 1/10 κλίμακα. Η μεταφορά των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν με αυτά τα μικροσκοπικά πρότυπα στα πραγματικού μεγέθους αυτοκίνητα φορτώθηκε με κίνδυνο, για δύο λόγους:

1. Έλλειψη γεωμετρικής ομοιότητας. Λόγω των μικρών διαστάσεων, πολλές πρότυπες λεπτομέρειες δεν θα μπορούσαν να αναπαραχθούν. Για παράδειγμα το κάτω μέρος του προτύπου ήταν επίπεδο και η ροή του αέρα για την ψύξη παραμελήθηκε.
2. Έλλειψη κινηματικής ομοιότητας. Οι αριθμοί Reynolds ήταν πάρα πολύ μικροί, και η οδική αναπαραγωγή ήταν ανεπαρκής.

Πρόσφατες, μεγαλύτερες κλίμακες προτύπων μπήκαν σε χρήση: 1:5 και 1:4 στην Ευρώπη και 3/8 (1:3.75) στις ΗΠΑ. Εντούτοις, συχνά αυτά τα μεγαλύτερα πρότυπα δεν ήταν ακόμα γεωμετρικά παρόμοια με αυτά του πραγματικού μεγέθους εκδόσεις τους (και το τελικό αυτοκίνητο). Στα τέλη του 1960 κατά τη λειτουργία στη μειωμένη κλίμακα, οι στιλίστες και οι μοντελιστές τείνουν ασυναίσθητα να δώσουν υπερβολική έμφαση στις λεπτομέρειες της μορφής όπως οι εγκοπές, οι κυρτότητες, οι ακτίνες, οι κοιλότητες παραθύρων, τα ελαστικά, και οι μπορντούρες. Αργότερα, όταν γυρίζουν στο πραγματικού μεγέθους πρότυπο, δεν κάνουν αυτές τις υπερβολές, αλλά καλούν το αρχικό μικρής κλίμακας πρότυπο και αυτό του πραγματικού μεγέθους παραγόμενο από το πρότυπο αυτό, ως παρόμοιο. Εντούτοις, υπό την ακριβή έννοια με την οποία η λέξη "παρόμοια" χρησιμοποιείται στους μηχανικούς των μοντέλων, δεν είναι το ότι το αξίωμα της γεωμετρικής ομοιότητας παραβιάζεται. Φυσικά, αυτό δεν είναι το θέμα εάν τα μειωμένης-κλίμακας και τα πραγματικού μεγέθους πρότυπα χτίζονται σύμφωνα με ένα ίδιο σύνολο στοιχείων (σχέδια), διαφορετικό μόνο ως προς την κλίμακα.

Τα αποτελέσματα του αριθμού Reynolds κατέστησαν αβέβαιο εάν οι τροποποιήσεις μορφής που αναπτύσσονται με ένα πρότυπο μειωμένης κλίμακας θα λειτουργούσαν στην πλήρη κλίμακα. Οι μικρές παραλλαγές μορφής που έκαναν κατά τη διάρκεια της "βελτιστοποίησης της λεπτομέρειας" αποδείχθηκαν πολύ ευαίσθητες στον αριθμό Reynolds. Συνεπώς, η μικρής κλίμακας δοκιμή περιήλθε στην ανυποληψία. Για μια χρονική περίοδο, τα μικρής κλίμακας πρότυπα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στην πολύ πρόωρη φάση ανάπτυξης, και στην έρευνα.

Όταν οι μεγάλες πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγες διατέθηκαν, οι αεροδυναμιστές εκμεταλλεύθηκαν την ευκαιρία να εργαστούν άμεσα με τα πραγματικού μεγέθους πρότυπα. Προκειμένου να παραληφθούν τα πρότυπα με την πιστότητα που απαιτήθηκε, παρείχαν τα κατάλληλα συστήματα στο τμήμα σχεδιασμού στο οποίο οι μοντελιστές ενίσχυσαν τα πρότυπα με αργίλιο.

Εντούτοις, κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης ενός νέου αυτοκινήτου, διάφορες εκδόσεις παράγονται συχνά από τα διαφορετικά στούντιο σχεδιασμού. Η βελτιστοποίηση των μορφών τους στην πλήρη κλίμακα είναι μια μακροχρόνια διαδικασία, και πολύ ακριβή. Επομένως, σήμερα ερευνώνται μόνο τα πρότυπο στην πλήρη κλίμακα (γενικά όχι περισσότερο από δύο) που έχουν την καλύτερη πιθανότητα στην τελική απόφαση. Πριν από την επιλογή των υποψηφίων για την τελική απόφαση (μπορούν να είναι πέντε έως δέκα εκδόσεις) η εργασία στις αεροσήραγγες με μικρής κλίμακας πρότυπα.

Αυτό έχει διάφορα πλεονεκτήματα. Τα μικρά πρότυπα είναι γρήγορα για να φτιαχτούν και ακόμα γρηγορότερα για να τροποποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Με ένα πρότυπο κλίμακας 1/4, μόνο το 1/64 του όγκου του αργίλου πρέπει να αφαιρεθεί (ή προστεθεί) όποτε γίνεται αλλαγή μορφής. Τα μικρά πρότυπα είναι εύκολο να μεταφερθούν, αυξάνοντας κατά συνέπεια την ευελιξία όσον αφορά την επιλογή της σήραγγας. Δεδομένου ότι ο χρόνος ανάπτυξης έχει γίνει σημαντικός αυτά τα πλεονεκτήματα αναγνωρίζονται περισσότερο απ' ό,τι παλιότερα, ακόμα κι αν υπάρχουν κίνδυνοι σχετικά με τη μεταφορά των αποτελεσμάτων στην πλήρη κλίμακα.

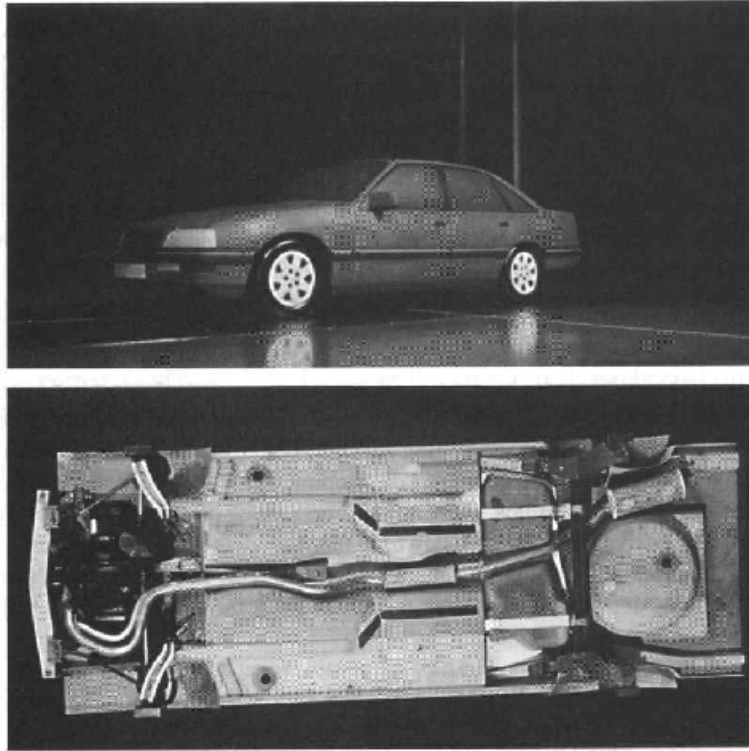
Αυτοί οι κίνδυνοι μπορούν να μειωθούν εάν η κλίμακα αυξηθεί. Πράγματι, μια τάση στις μεγαλύτερες κλίμακες μπορεί να παρατηρηθεί: στις ΗΠΑ από το 3/8 (1:3.75) στο 1:3.33 στην Ευρώπη στο 1:2.5, η οποία είναι μία κλίμακα χαρακτηριστική στην εφαρμοσμένη μηχανική. Η τελευταία κλίμακα είναι επίσης πολύ καλά ταιριαγμένη για τα βαριά εμπορικά οχήματα. Στις αεροσήραγγες που χτίζονται για τα πειράματα με τα πραγματικού μεγέθους αυτοκίνητα η μέγιστη ταχύτητα αέρα είναι αρκετά υψηλή να εξετάσει τα πρότυπα 1/2.5 των φορτηγών και των λεωφορείων στο σωστό αριθμό Reynolds τους και, με $C_{DA} = 0,7 \text{ m}^2$, ο συντελεστής οπισθέλκουσας στη μετωπικής περιοχή είναι μόνο ελαφρώς επάνω από την τιμή για ένα επιβατικό αυτοκίνητο (με αυτόν τον τρόπο μην απαιτώντας τις διορθώσεις του μεγαλύτερου

μεγέθους). Φυσικά, τα πλεονεκτήματα μικρής κλίμακας που περιγράφονται ανωτέρω χάνονται όσο η κλίμακα αυξάνεται.

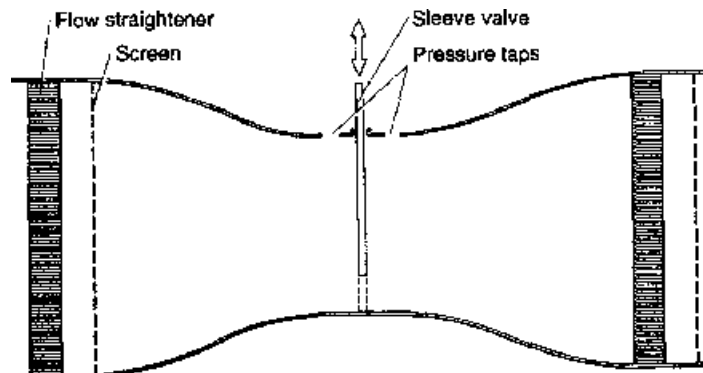
4.4.2: Λεπτομέρειες της πρότυπης τεχνικής κατασκευής και δοκιμής.

Γενικά, τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας κατασκευάζονται με έναν υψηλό βαθμό ομοιότητας. Το σχήμα 4.52 δίνει μια εικόνα. Το σώμα εγκαθίσταται με όλα τα μέρη που αποσπώνται, και το κάτω μέρος επιδεικνύει κάθε λεπτομέρεια του συστήματος μετάδοσης και του συστήματος κατεύθυνσης που εκτίθεται στη ροή του αέρα. Οι θόλοι των ροδών είναι κοίλοι, και αναπαράγονται όλες οι μεγάλες κοιλότητες του κάτω μέρους. Προκειμένου να περιοριστεί το βάρος του προτύπου ο άργιλος εφαρμόζεται σε ένα κοίλο κιβώτιο κοντραπλακέ. Σε όλες τις θέσεις όπου αναμένονται τροποποιήσεις μορφής, ο άργιλος είναι σε ένα παχύτερο στρώμα. Όλες αυτές οι λεπτομέρειες σχετικές για την κατασκευή του μοντέλου έχουν περιγραφεί από τον WATTS χρησιμοποιώντας για παράδειγμα την ανάπτυξη ενός ελαφριού φορτηγού.

Μια ακριβής μέθοδος για την αναπαραγωγή της ροής του αέρα ψύξης έχει διαμορφωθεί από τον J. WIEDEMANN και έχει οδηγήσει στην εφεύρεση ενός προσομοιωτή θερμαντικών σωμάτων. Ένας αεραγωγός ψύξης αναπαράγεται από το κανάλι του venturi που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.53. Και άλλες μορφές καναλιών εκτός από του venturi είναι επίσης κατάλληλες. Η βαλβίδα του λαιμού μπορεί να παράγει οποιασδήποτε επιθυμητή απώλεια πίεσης. Ο σωλήνας ρυθμίζεται μόνο μία φορά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε μοντέλο, η ένταση της ροής και η απώλεια πίεσης μετριέται για τις διάφορες θέσεις της βαλβίδας του λαιμού.



Σχήμα 4.52: Πρότυπο μειωμένης κλίμακας (1/5) ενός αυτοκινήτου: α) πρότυπο σε μια αεροσήραγγα, β) κάτω μέρος του ίδιου προτύπου.



Σχήμα 4.53: Προσομοιωτής θερμαντικών σωμάτων για τις δοκιμές με πρότυπα.

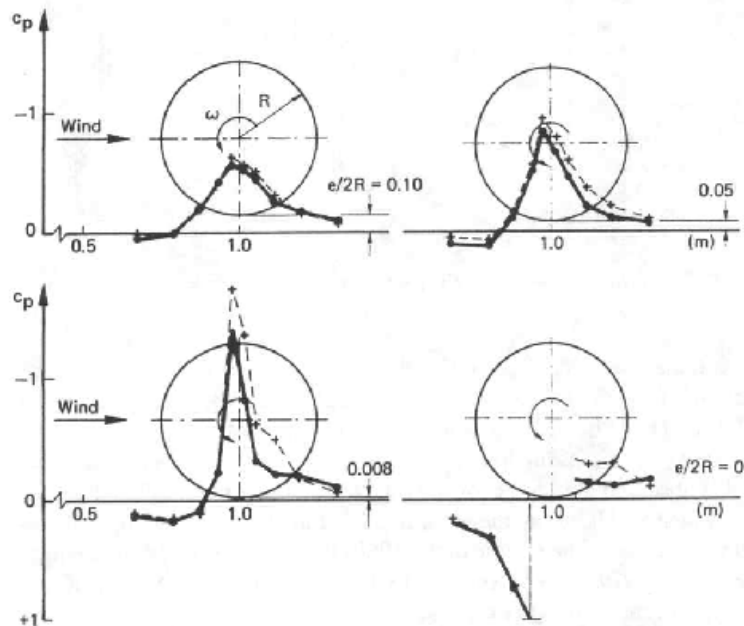
Γενικά στη περίπτωση με τα πραγματικού μεγέθους πρότυπα, η σχετική κίνηση μεταξύ του προτύπου κλίμακας και του δρόμου και η περιστρεφόμενη κίνηση των ροδών συνήθως παραμελούνται. Οι συνέπειες είναι οι ίδιες όπως

για τα πραγματικού μεγέθους πρότυπα. Πραγματικά, τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας ήταν τα πρώτα που εξετάστηκαν πέρα από μια κινούμενη ζώνη, και με τις περιστρεφόμενες ρόδες. Αυτό ήταν από την δεκαετία του '30 όταν ο G. SCHMID για να είναι χαμηλότερη η οπισθέλκουσα όταν κινούταν η ζώνη, θεώρησε ότι η περιστροφή των ροδών δεν είχε καμία επιρροή. Εντούτοις, το μοντάρισμα ενός προτύπου πέρα από μια κινούμενη ζώνη ήταν πάρα πολύ σύνθετο για τις στερεότυπες δοκιμές. Στο μέσο της δεκαετίας του '60 αυτή η προεργασία με μια κινούμενη ζώνη λήφθηκε πάλι από τον F.N. BEAUAUS, (βλ. το σχήμα 4.31). Οι ρόδες κρατήθηκαν στάσιμες λόγω της αμελητέας επιρροής της περιστροφής.

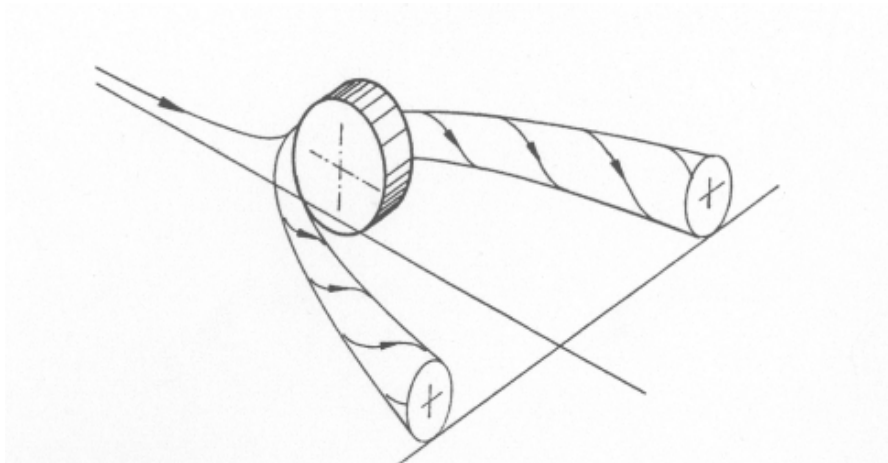
Μια κινούμενη ζώνη απαιτεί ένα χάσμα μεταξύ της ζώνης και των στάσιμων ροδών. Το επόμενο λάθος στην οπισθέλκουσα και, ακόμα περισσότερο, στην άντωση, ήταν τόσο σημαντικό στις δοκιμές του BEAUAUS που αντιστάθμισε την επίδραση της κινούμενης ζώνης. Αργότερα αυτό εξηγήθηκε από τον A. COGOTTI, που εκτέλεσε τις μετρήσεις δύναμης στις ελεύθερες-κυλιόμενες ρόδες, πλήρους κλίμακας, σε ένα στάσιμο έδαφος. Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.54 η πίεση κάτω από μια ρόδα είναι αλλαγμένη περισσότερο όταν το χάσμα μεταξύ της ρόδας και του δαπέδου μειώνεται. Εφ' όσον το χάσμα δεν είναι μηδέν, η αυξανόμενη αναρρόφηση παράγεται με το μειωμένο χάσμα. Εντούτοις, όταν αγγίζει μια ρόδα το έδαφος η κατάσταση αλλάζει δραστικά η υψηλή θετική πίεση παράγεται μπροστά από τη ρόδα λόγω της λιμνάζοντας ροής. Η ροή χωρίζει μπροστά από τη ρόδα διαμορφώνοντας μια πεταλοειδή δίνη (βλ. το σχήμα 4.55) στο παρελθόν η αρνητική άνωση μετατρέπεται σε θετική. Πάλι η επίδραση της περιστροφής ροδών βρέθηκε να είναι πολύ μικρή.

Όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα 4.56, η οπισθέλκουσα επηρεάζεται ελαφρώς μόνο από το χάσμα μεταξύ μιας ρόδας και ενός σταθερού δαπέδου, αλλά η επίδραση στην άνωση είναι επίσης σημαντική, η επιρροή της περιστροφής είναι αξιοπρόσεκτη. Επιπλέον, από τις έρευνες του COGOTTI

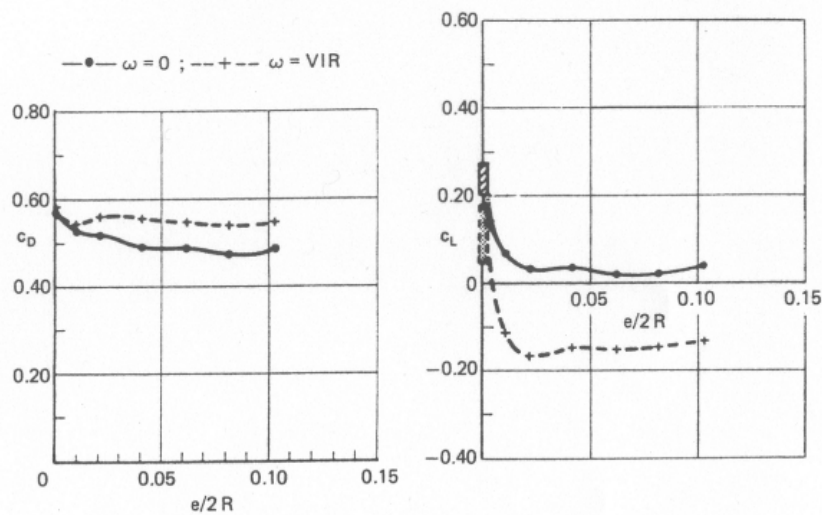
μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι όσο καλύτερη είναι η ροή γύρω από μια ρόδα τόσο μεγαλύτερη η επίδραση της περιστροφής ροδών στην οπισθέλκουσα. Εάν (στο συγκεκριμένο πείραμά του) η στάσιμη ρόδα ήταν



Σχήμα 4.54: Αλλαγή πίεσης κάτω από ένα τροχό για διαφορετικό έδαφος.



Σχήμα 4.55: Διαχωρισμός ροής μπροστά από ένα ακίνητο τροχό και το σχήμα της δίνης.



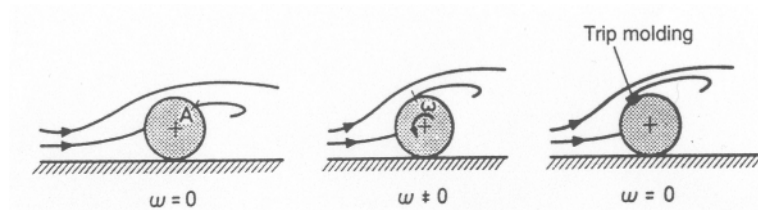
Σχήμα 4.56: Οπισθέλκουσα και άνωση μιας ελεύθερης ρόδας, στάσιμης και περιστρεφόμενης, για τις διαφορετικές επίγειες εκκαθαρίσεις.

καλυμμένος από μια ρόδα-ΚΑΠ, ο συντελεστής έλξης μειώθηκε από $4C_p = 0.049$. Όταν η ρόδα περιστρεφόταν, το κέρδος διπλασιάστηκε σχεδόν: $AKE = 0,091$.

Στην αναλογία στα πραγματικού μεγέθους οχήματα μπορεί ακόλουθος να ολοκληρωθεί και για τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας. Όσο καλύτερη είναι η ροή γύρω από ένα όχημα τόσο αυστηρότερες είναι οι απαιτήσεις της προσομοίωσης στην αεροσήραγγα. Όπως δηλώνεται στην παράγραφο 4.7, για την περαιτέρω μείωση της οπισθέλκουσας από τις σημερινές τιμές η ροή στο κάτω μέρος των οχημάτων και γύρω από τις ρόδες πρέπει να βελτιωθεί. Συνεπώς, η τεχνική των αεροσηράγγων πρέπει επίσης να βελτιωθεί: Η σχετική κίνηση μεταξύ του οχήματος και του δρόμου και η περιστρεφόμενη κίνηση των ροδών πρέπει να αναπαραχθούν για τις δοκιμές με τα μικρής κλίμακας πρότυπα.

Οι πρότυπες δοκιμές με τα αυτοκίνητα αγωνιστικού τύπου είναι ένα ειδικό παράδειγμα. Πριν από τη χρησιμοποίηση μιας κινούμενης ζώνης και την περιστροφή των ροδών, η κίνηση των ροδών αναπαράχθηκε όπως φαίνεται στο

σχήμα 4.57. Σύμφωνα με το C WILLIAMS η μπροστινή μετακίνηση του σημείου του χωρισμού που προκαλείται από την περιστροφή ροδών μπορεί να αναπαραχθεί με μια διαμόρφωση ανατροπής του αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Εντούτοις, σήμερα στη βελτιστοποίηση των αυτοκινήτων τύπου φόρμουλα ένα αυτό το απλό τέχνασμα δεν είναι πλέον επαρκές. Μια κινούμενη ζώνη και περιστρεφόμενες ρόδες χρησιμοποιούνται συνήθως για τις πρότυπες δοκιμές με τα αγωνιστικά αυτοκίνητα, όπως παρουσιάστηκε ήδη στο σχήμα 4.34.



Σχήμα 4.57: Εξομοίωση της περιστροφής του τροχού προσαρμόζοντας μια διαμόρφωση ανατροπής του αέρα.

4.4.3: Αποτελέσματα του αριθμού Reynolds.

Εκτός από την απαίτηση για τη γεωμετρική ομοιότητα, η ροή γύρω από την μειωμένης κλίμακας και του πραγματικού μεγέθους πρότυπα πρέπει να είναι κινηματικά παρόμοιες. Αυτός ο όρος τηρείται όταν είναι όλες οι δυνάμεις που καθορίζουν έναν τομέα ροής στην ίδια σχέση η μια με την άλλη και στις δύο περιπτώσεις. Για την ασυμπιεστή ροή μόνο οι δυνάμεις από την αδράνεια και την τριβή πρέπει να εξεταστούν. Όπως φαίνεται στα εγχειρίδια της ρευστομηχανικής η αναλογία των δυνάμεων αδράνειας στα

αποτελέσματα δυνάμεων τριβής σε έναν χωρίς διαστάσεις αριθμό γνωστό ως αριθμός Reynolds, ο οποίος καθορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{U_{\infty} l}{\nu} \quad (34)$$

που το U_{∞} είναι η ταχύτητα της ήρεμης επικείμενης ροής, το l είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος, γενικά το μήκος οχημάτων, και το ν είναι το κινηματικό ιξώδες του μέσου, στις περισσότερες περιπτώσεις του αέρα αλλά σε μερικές περιπτώσεις του νερού. Δύο τομείς ροής είναι κινηματικά παρόμοιοι εάν ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{U_{\infty 1} l_1}{\nu_1} = \frac{U_{\infty 2} l_2}{\nu_2} \quad (35)$$

Εάν μια πρότυπη δοκιμή ολοκληρώνεται στο ίδιο μέσο στο οποίο το πραγματικού μεγέθους όχημα λειτουργεί (δηλ., αέρας), η απαίτηση για την κινηματική ομοιότητα είναι ικανοποιητική όταν τα προϊόντα της ταχύτητας και του μήκους στις δύο περιπτώσεις είναι ίσα. Γενικά, με την ευρέως χρησιμοποιημένη μειωμένης κλίμακας πρότυπα 1:4 αυτός ο όρος δεν μπορεί να ικανοποιηθεί. Με τα πρότυπα στην ακόμα μικρότερη κλίμακα, στην παραδείγματος χάριν 1/5, ο κανόνας παραβιάζεται. Πολύ συχνά, ο αριθμός Reynolds κατά τη διάρκεια της πρότυπης δοκιμής είναι ο μισός του πραγματικού μεγέθους αξία. Υπάρχουν δύο λόγοι για τους οποίους είναι δύσκολο να διατηρηθεί ο αληθινός αριθμός Reynolds όταν η πρότυπη κλίμακα είναι μικρή. Κατ' αρχάς, η κορυφαία ταχύτητα των σφαιρών είναι περιορισμένη δεύτερον, όπως θα παρουσιαστεί αργότερα, με αμαξώματα τύπου Bluff_τα αποτελέσματα του αριθμού Mach γίνονται αξιοπρόσεκτα ακόμη και με σχετικά χαμηλή ταχύτητα αέρα.

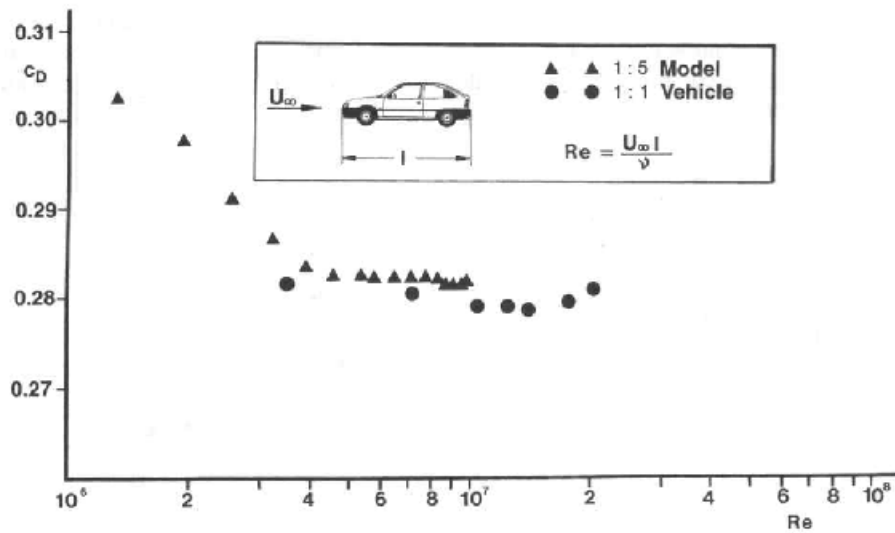
Για να αναγνωριστούν τα αποτελέσματα του αριθμού Reynolds, τα οχήματα εξετάζονται σε μια σειρά αριθμών Reynolds. Για να αποφευχθούν τα λάθη λόγω του ανακριβούς αριθμού Reynolds, τα στοιχεία της μειωμένης κλίμακας παρεκτείνονται έπειτα στα πρότυπα πραγματικού μεγέθους. Ένα παράδειγμα χαρακτηριστικό για τα επιβατικά αυτοκίνητα έχει παρασχεθεί από τον H.-J EMMELMAN (βλ. το σχήμα 4.58).

Για τους υψηλούς αριθμούς Reynolds ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι σχεδόν σταθερός, και οι τιμές για το πραγματικού μεγέθους όχημα είναι ελαφρώς κάτω από εκείνους για ένα πρότυπο κλίμακας 1/5. Εντούτοις, για $Re < 4 \times 10^6$ μια επιρροή του αριθμού Reynolds είναι ευδιάκριτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις τιμές τα επιμέρους συστατικά του προτύπου, ως παραδείγματος χάριν οι ρόδες, περνούν από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

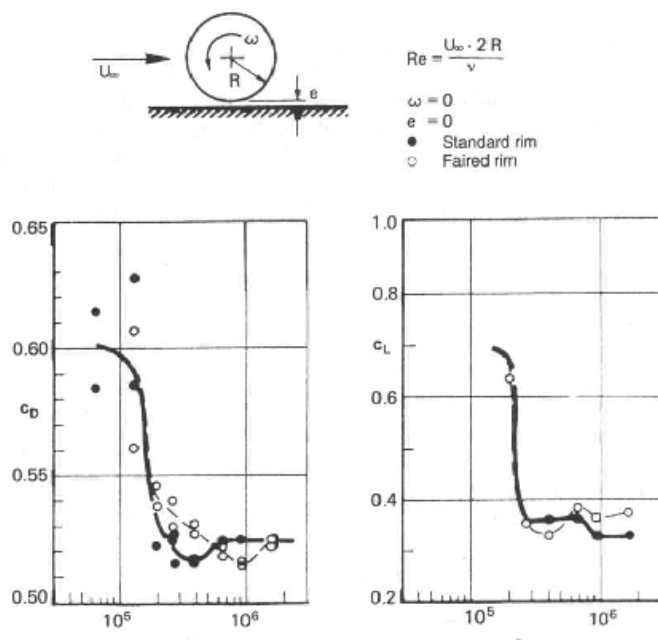
Όπως το σχήμα 4.59 σαφώς καταδεικνύει, η άνωση και ο συντελεστής οπισθέλκουσας μιας ρόδας μειώνεται δραματικά όταν $Re_d = 2 \times 10^5$, όπου το Re_d είναι ο αριθμός Reynolds που διαμορφώνεται με τη διάμετρο d της ρόδας. Επειδή η διάμετρος d των ροδών είναι μικρότερη από το μήκος του αυτοκινήτου, αυτό αντιστοιχεί σε έναν αριθμό Reynolds $Re_l = 2 \times 10^6$ (όπου l το μήκος του αυτοκινήτου), ο οποίος είναι ίδιος με το σημείο όπου η αύξηση της οπισθέλκουσας του προτύπου μειωμένης κλίμακας γίνεται σημαντική.

Η παραβίαση του νόμου της ομοιότητας του Reynolds μπορεί να προκαλέσει σημαντικό λάθος. Αυτό εμφανίζεται στα δύο εντυπωσιακά παραδείγματα που απεικονίζονται στο σχήμα 4.60. Και στις δύο περιπτώσεις ένα φορτηγό τύπου box ήταν το αντικείμενο δοκιμής όπου ερευνήθηκε λεπτομερώς η ακτίνα μεταξύ των μπροστινών και πλευρικών τοίχων. Στη "βέλτιστη" ακτίνα του φορτηγού B (μια πρόωρη έκδοση του light-duty φορτηγού της VOLKSWAGEN) τα αποτελέσματα στην εξέταση προτύπων κλίμακας 1/4 ήταν τόσο μεγάλη που η ακτίνα απορρίφθηκε με τον

προσδιορισμό ως μη αποδεκτή. Εντούτοις, η βέλτιστη ακτίνα που προέκυψε αργότερα από τις δοκιμές σε ένα πραγματικού μεγέθους όχημα ήταν πολύ μικρότερη, και εγκρίθηκε. Ένα συγκρίσιμο αποτέλεσμα επιτεύχθηκε με βαν τύπου A , η δεύτερη γενιά του φορτηγού παράδοσης της VOLKSWAGEN.

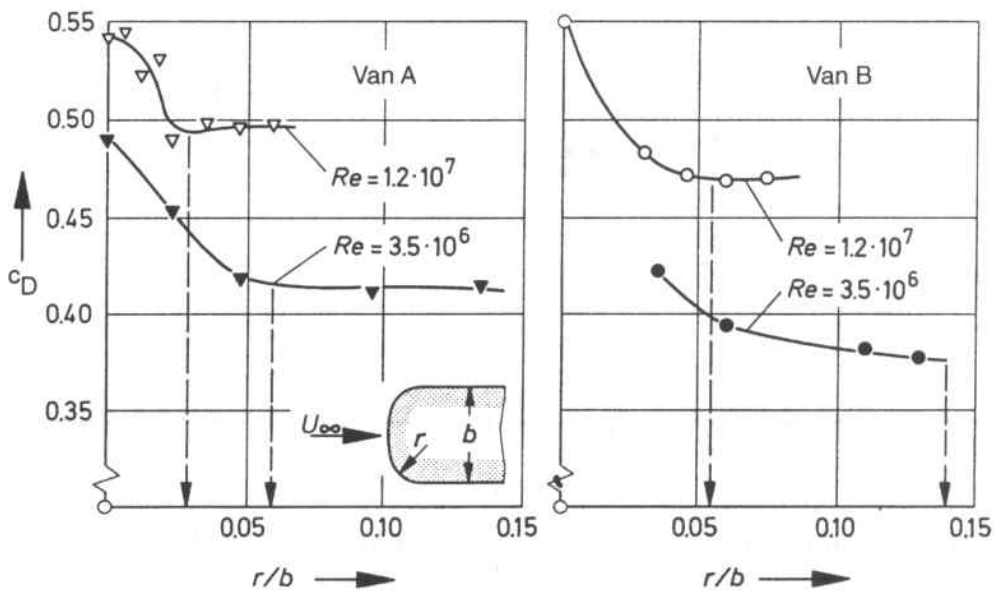


Σχήμα 4.58: Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D σε σχέση με τον αριθμό Reynolds Re για ένα πρότυπο 1:5 και ένα πραγματικό αυτοκίνητο.



Σχήμα 4.59: Συντελεστές της οπισθέλκουσας C_P και άνωσης C_L μιας ελεύθερης ρόδας σε σχέση με τον αριθμό Reynolds Re .

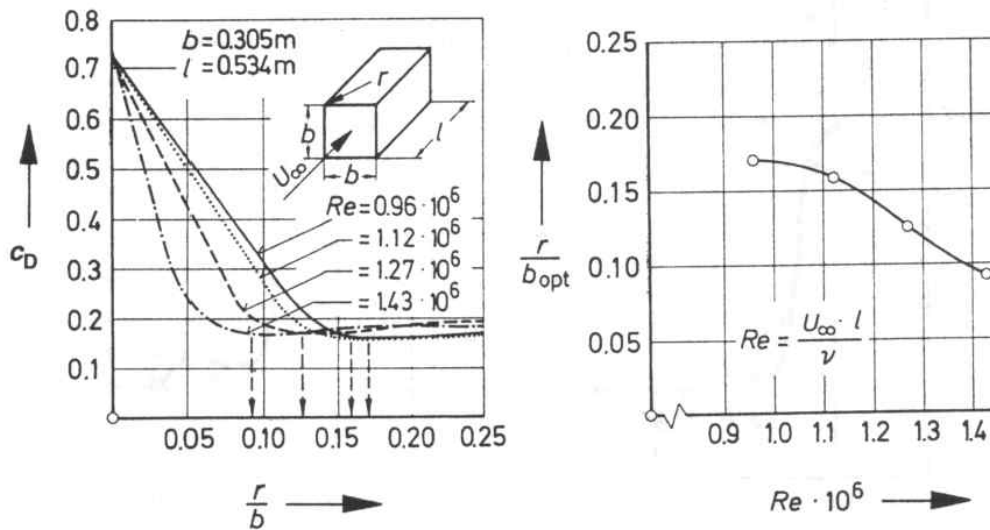
Παραδοσιακά, αυτό το φορτηγό είχε ένα προηγούμενο σχέδιο στο μπροστινό τμήμα πολύ πιο κυκλικό που ήταν αεροδυναμικά απαραίτητο (βλ. το σχήμα 4.52). Μια επίδραση του αριθμού Reynolds επομένως "δεν εμφανίστηκε" κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης αυτού του οχήματος. "Ανακαλύφθηκε" πολύ αργότερα τότε που οι δοκιμές τεκμηριώθηκαν στο σχήμα 4.60 και πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του LT.



Σχήμα 4.60: Η επιρροή του αριθμού Reynolds στη "βέλτιστη" ακτίνα της μετάβασης από το μπροστινό μέρος στους πλευρικούς τοίχους δύο διαφορετικών φορτηγών.

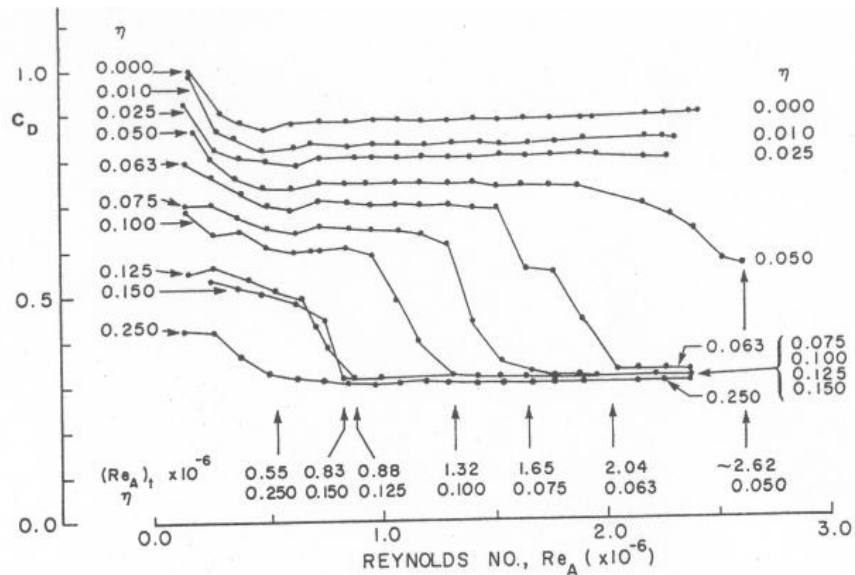
Η επιρροή του αριθμού Reynolds στη βέλτιστη ακτίνα στις "άκρες" των ορθογώνιων κιβωτίων ήταν γνωστή για πολύ καιρό αλλά απλά αγνοήθηκε. Από τις μετρήσεις του F.W. PAWLOWKSI που αναπαράγονται στο σχήμα 4.50, του W-h. HUCHO και άλλων παράχθηκε η σχέση που

παρουσιάζεται στο σχήμα 4.61. Σαφώς, η βέλτιστη ακτίνα στο χείλος προσβολής, στον αδιάστατο αριθμό r/b , μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Αργότερα, αυτή η απλή σχέση γενικεύτηκε περαιτέρω από τον K.R. COOPER.



Σχήμα 4.61: Επιρροή του αριθμού Reynolds στη "βέλτιστη" ακτίνα ενός κυβοειδούς.

Ο COOPER ερεύνησε το συντελεστή οπισθέλκουσας C_D ενός παραλληλεπίπεδου κοντά στο έδαφος του οποίου τα χείλη προσβολής του στρογγυλεύτηκαν, τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο σχήμα 4.62. Η παράμετρος των μεμονωμένων καμπυλών είναι η αδιάστατη ακτίνα $\eta = r/\sqrt{A}$, όπου το A είναι η μετωπική περιοχή του σώματος. Οι καμπύλες είναι παρόμοιες με τη γνωστή σχέση της οπισθέλκουσας με του αριθμού Reynolds για έναν κύλινδρο (και μια σφαίρα).



Σχήμα 4.62: Η επιρροή του αριθμού Reynolds στο συντελεστή οπισθέλκουσας C_D για τις διάφορες ακτίνες στο χείλος προσβολής ενός κυβοειδούς.

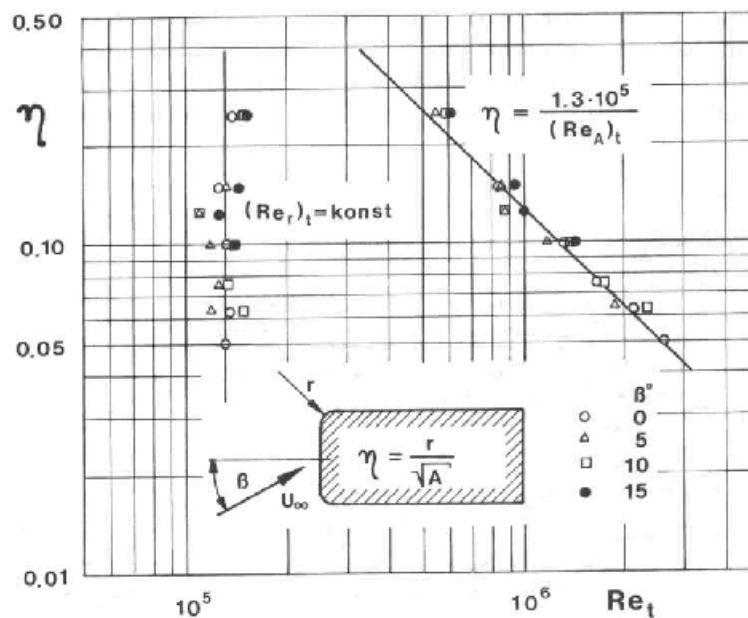
Η εξήγηση για αυτήν την επίδραση είναι ευρέως γνωστή. Για τις μικρές (αδιάστατες) ακτίνες, η ροή χωρίζεται στις μπροστινές άκρες (ανεξάρτητα από τον αριθμό Reynolds) και έτσι η οπισθέλκουσα είναι υψηλή. Για τις μέτριες ακτίνες, η ροή χωρίζεται πάλι στην αρχή αλλά έπειτα προσκολλείται μακρύτερα και κατάντη και η οπισθέλκουσα αρχίζει να μειώνεται. Με τον αυξανόμενο αριθμό Reynolds η θέση της προσκόλλησης κινείται ανάντη και ο χωρισμός της ροής τελικά σταματάει. Αυτή είναι η αποκαλούμενη "βέλτιστη" ακτίνα για τον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds. Εάν η ακτίνα αυξάνεται περαιτέρω σε αυτόν τον αριθμό Reynolds η οπισθέλκουσα δεν μειώνεται άλλο.

Εάν οι βέλτιστη ακτίνα n_{opt} συσχετίζεται με τους σχετικούς "κρίσιμους" αριθμούς Reynolds σύμφωνα με το σχήμα 4.62, λαμβάνεται μια καθολική σχέση. Στο σχήμα 4.63 σχεδιάζεται με δύο τρόπους. Εάν η τετραγωνική ρίζα της μετωπικής περιοχής χρησιμοποιείται για να

διαμορφώσει τον αριθμό Reynolds, συντεταγμένες του διαγράμματος σε λογαριθμικό χαρτί είναι η ευθεία κεκλιμένη γραμμή στο δεξί μισό του διαγράμματος. Εάν η ίδια η βέλτιστη ακτίνα χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστικό μήκος με διαμόρφωση του αριθμού Reynolds, παράγεται η ακόλουθη σταθερά:

$$Re_{(r/b)_{opt}} = \frac{U_{\infty} \cdot r_{opt}}{\nu} = 1.3 \times 10^5 \quad (36)$$

Τα περαιτέρω αποτελέσματα που αναφέρονται από τον K.R. COOPER επιβεβαιώνουν αυτό, άλλα σχετικά στοιχεία από τη βιβλιογραφία, συμπεριλαμβανομένων των πειραμάτων με τα πραγματικά οχήματα, οδηγούν στην ίδια σταθερά.



Σχήμα 4.63: Οι "βέλτιστες" ακτίνες της αιχμής σε σχέση του -κρίσιμου αριθμού Reynolds.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή 1.3×10^5 είναι μόνο ελαφρώς λιγότερος από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για τις σφαίρες και τους κυκλικούς κυλίνδρους όταν διαμορφώνεται ο αριθμός Reynolds με την ακτίνα τους, παρά με τη διάμετρο που είναι κοινή πρακτική στη.

Επομένως μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός του χωρισμού και η επίδραση του αριθμού Reynolds είναι οι ίδιοι για ένα παραλληλεπίπεδο με στρογγυλεμένη αιχμή όπως με έναν κυκλικό κύλινδρο (και μια σφαίρα): Στο χαμηλό αριθμό Reynolds, το οριακό στρώμα στο πρόσωπο του παραλληλεπίπεδου ανάντη της στρογγυλής άκρης είναι στρωτό, και ο χωρισμός από στρωτή ροή εμφανίζεται σε 90° (ή ακόμα και πριν) στην άκρη. Υπό τον όρο ότι το παραλληλεπίπεδο είναι αρκετά μακρύ, η ροή προσκολλάται στις πλευρικές επιφάνειες αφού έχει αλλάξει σε ταραχώδη μετά από μια φυσαλίδα χωρισμού. Με την αύξηση του αριθμού Reynolds η γραμμή προσκόλλησης κινείται ανάντη.

Για έναν αρκετά μεγάλο αριθμό Reynolds η μετάβαση από στρωτή σε ταραχώδη πραγματοποιείται προτού να φθάσει η ροή στην άκρη του προσώπου, και από την άκρη περνά μια ροή με ένα τυρβώδες οριακό στρώμα και χωρίς διαχωρισμό. Για το παραλληλεπίπεδο υπάρχει ένα μονοπάτι ροής στο πρόσωπό του μεταξύ του σημείου στασιμότητας και της αρχής της αιχμής, ενώ για τον αντίστοιχο κύλινδρο ακτίνας ίσης με την ακτίνα της άκρης δεν υπάρχει. Επομένως ο αριθμός Reynolds -που διαμορφώνεται με την ακτίνα στην άκρη- όπου έχουμε τη μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδεις σε ένα παραλληλεπίπεδο είναι μικρότερη από την τιμή για έναν κύλινδρο.

Από το σχήμα. 4.63 μπορεί επίσης να συναχθεί ότι για τη βελτιστοποίηση της μειωμένης κλίμακας διαμορφώνει τον αριθμό Reynolds Re_A (που διαμορφώνεται με την τετραγωνική ρίζα της μετωπικής περιοχής) πρέπει να είναι τουλάχιστον $Re_A = 2 \times 10^6$. Αυτό ακολουθεί επειδή οι αδιάστατες ακτίνες σε αναλογία $r/b = 0,05$ είναι σχετικές για τα πραγματικά οχήματα. Ο ελάχιστος αριθμός Reynolds $Re = 0,7 \times 10^6$ από SAE J1252

είναι πάρα πολύ χαμηλός για μια διαδικασία βελτιστοποίησης. Αφ' ετέρου, δεδομένου ότι το μήκος ενός αυτοκινήτου είναι κατά προσέγγιση τρεις φορές η τετραγωνική ρίζα της μετωπικής περιοχής του, ένας $Re_A = 2 \times 10^6$ σημαίνει $Re_l = 6 \times 10^6$. Με ένα μήκος 1 m, που είναι χαρακτηριστικό για την κλίμακα 1/4, αυτό οδηγεί σε μια απαραίτητη ταχύτητα αέρα $U_{oo} = 90$ m/s (324 km/h = 203 mph). Όπως θα παρουσιαστεί αργότερα, αυτό είναι πάρα πολύ υψηλό επειδή κατόπιν τα αποτελέσματα συμπίεστότητας γίνονται αξιοπρόσεχτα.

Το σχήμα 4.63 ισχύει και στα πραγματικού μεγέθους οχήματα. Με αυτό, η επίδραση του αριθμού Reynolds στις βέλτιστες ακτίνες της αιχμής του μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι καμπίνες φορτηγών και τα λεωφορεία χρησιμεύουν ως παραδείγματα. Οι σχεδιαστές προτιμούν την αιχμή τους για να είναι όσο "αιχμηρή" γίνεται. Για τα βαριά εμπορικά οχήματα η αεροδυναμική οπισθέλκουσα σε σύγκριση με την αντίσταση κίνησης γίνεται εμφανείς μόνο επάνω από μια δεδομένη ταχύτητα, για παράδειγμα 50 km/h (31 mph). Επομένως, μόνο για τις ταχύτητες υψηλότερες από αυτή πρέπει η ακτίνα να είναι βέλτιστη. Ο χωρισμός ροής σε χαμηλότερη ταχύτητα-και έτσι υψηλότερο συντελεστή οπισθέλκουσας- δεν είναι επιβλαβής επειδή η αεροδυναμική οπισθέλκουσα είναι χαμηλή. Αφ' ετέρου, οι όροι παρέκκλισης από την πορεία απαιτούν μια κάπως μεγαλύτερη βέλτιστη ακτίνα

Η κωνικότητα ενός σώματος στο οπίσθιο τμήμα, και ειδικότερα την ουραίο τμήμα, είναι πολύ ευαίσθητη στον αριθμό Reynolds επειδή ο χωρισμός της ροής είναι ευαίσθητος σε αυτήν. Στους υψηλότερους αριθμούς Reynolds σε μία κωνική περιοχή μια ροή μπορεί να αντισταθεί ισχυρότερα και χωρίς να χωριστεί επειδή τα τυρβώδη οριακά στρώματα είναι σε θέση να αντισταθούν σε μεγαλύτερες και δυσμενείς μεταβολές πίεσης με μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds.

Τα κρίσιμα συμπεράσματα στη δοκιμή μικρής κλίμακας φαίνονται να έρχονται σε αντίθεση με τη δήλωση ότι τα αποτελέσματά του είναι σε συμφωνία με τα πραγματικού μεγέθους στοιχεία. Εντούτοις, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να τεκμηριώσουν αυτό πρέπει να εξεταστούν με προσοχή, ιδιαίτερα όταν γενικεύονται.

Η ανάπτυξη οπίσθιας αεροτομής μπορεί να θίξει το θέμα. Ο G.M. LEGOOD ερεύνησε την επίδραση αυτού του εξαρτήματος στην οπισθέλκουσα ενός αυτοκινήτου. Τα στοιχεία κλίμακας 1/4 αποδείχθηκαν σε συμφωνία με την πλήρη κλίμακα, έτσι συνήγαγε το συμπέρασμα ότι αυτή η ιδιαίτερη συσκευή μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε μικρή κλίμακα. Αυτό είναι σε συμφωνία με την εμπειρία η οποία δείχνει ότι οι αιχμηρές άκρες δεν είναι ευαίσθητες στον αριθμό Reynolds.

Τα πλεονεκτήματα με τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας έχουν σημασία μόνο εάν τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται μπορούν με επιτυχία να μεταφερθούν στην πλήρη κλίμακα. Υπάρχουν δύο πορείες που οδηγούν σε αυτόν τον στόχο. Ο πρώτος εμφανίζεται να είναι τετριμμένος: Ο νόμος του Reynolds πρέπει να παρατηρηθεί αυστηρά. Ο δεύτερος είναι πιο σύνθετος: Με τη χρησιμοποίηση άλλων αποτελεσμάτων, ένας μεγαλύτερος αριθμός Reynolds μπορεί "να αναπαραχθεί."

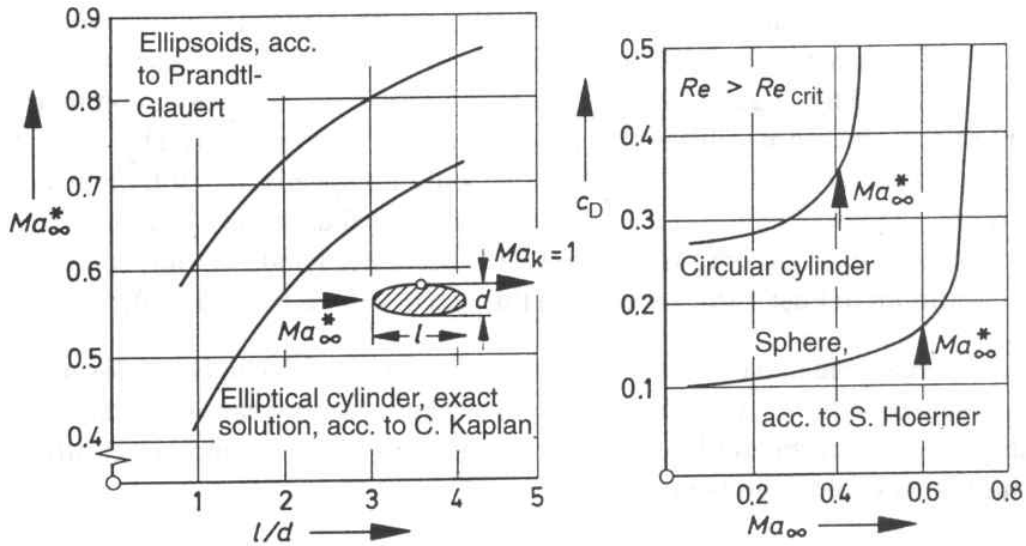
Γνωρίζουμε ότι οι αριθμοί Reynolds στα μειωμένης κλίμακας πρότυπα ίσοι (ή τουλάχιστον συγκρίσιμοι) με την πλήρη κλίμακα μπορούν να επιτευχθούν είτε με αρκετά μεγάλα μοντέλα είτε με την αρκετά υψηλή ταχύτητα αέρα. Όπως αναφέρεται ανωτέρω, όσο μεγαλώνουν τα πρότυπα τόσο λιγότερο εύχρηστα γίνονται. Εντούτοις και η εναλλακτική λύση της αύξησης της ταχύτητας αέρα έχει και αυτή τα όριά της. Λόγω της κλίσης των αμαξωμάτων και λόγω των ισχυρών κυρτοτήτων τους, εμφανίζονται υψηλές τοπικές τιμές του u/U_{∞} .

Όπως μπορεί να φανεί από τα παραδείγματα στο σχήμα. 4.64, τα αμαξώματα διαμορφωμένα σαν σφαίρες και σαν κυκλικοί κύλινδροι

παρουσιάζουν αύξηση της οπισθέλκουσα ,στους μάλλον χαμηλούς αριθμούς mach. Όπως είναι ευρέως γνωστό, αυτή η αύξηση οπισθέλκουσας οφείλεται στη συμπίεστικότητα του αέρα. Ο κρίσιμος αριθμός Mach, δηλ., ο Mach αριθμός της στρωτής επικείμενης ροής στην οποία η ταχύτητα του ήχου επιτυγχάνεται αρχικά τοπικά στη περίμετρο ενός σώματος, μειώνεται στις χαμηλότερες τιμές ,όταν αυξάνεται η κλίση.Η εμπειροτεχνική μέθοδος σύμφωνα με την οποία τα αποτελέσματα της συμπίεστικότητας μπορούν να παραμεληθούν μέχρι ο αριθμός mach να γίνει $ma_{oo}=0,3$ δεν ισχύει για τα αμαξώματα ως εμπόδια ως οχήματα. Το $ma_{oo}= 0,2$ φαίνεται να είναι ένα λογικότερο όριο. Συνεπώς, η ταχύτητα αέρα περιορίζεται στο $U_{oo} = 70$ m/s. Εάν τότε έχουμε $Re_1=6 \times 10^6$, η κλίμακα των προτύπων επιβατικών αυτοκινήτων δεν πρέπει να είναι μικρότερη του **1/3**.

Ένας μεγαλύτερος αριθμός Reynolds μπορεί να αναπαραχθεί με δύο τρόπους. Και οι δύο έχουν την ίδια επίδραση ,της μετατόπισης του σημείου της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδεις ροή ενός οριακού στρώματος στους μικρότερους αριθμούς Reynolds. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σύρμα παγιδεύσεως ή μια λουρίδα χαρτιού και ο άλλος αυξάνει το επίπεδο αναταραχής της επικείμενης ροής του αέρα. Και τα δύο "τεχνάσματα" εφαρμόζονται στις αεροναυτικές δοκιμές και συνήθως προτιμούν τα πρώτα.

Αν και η πειραματική αεροδυναμική οχημάτων τους χρησιμοποιεί σπάνια, αξίζουν μερικές από τις ιδιαιτερότητές τους

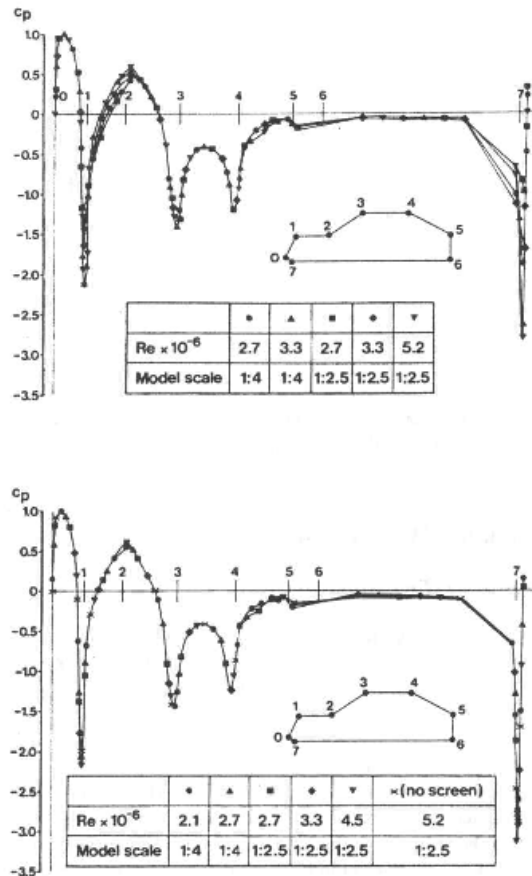


Σχήμα 4.64^α: Ο κρίσιμος αριθμός Mach M_{∞}^* και συντελεστή οπισθέλκουσας c_D για δισδιάστατα και τρισδιάστατα σώματα των οποίων η ευθύτητα είναι συγκρίσιμη με αυτήν των επιβατικών αυτοκινήτων.

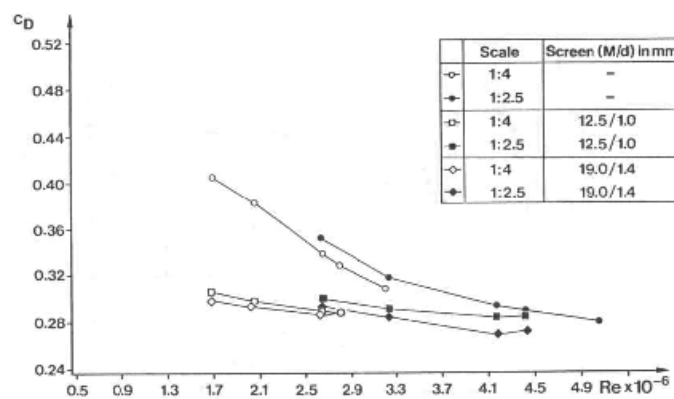
Το σύρμα παγιδεύσεως έχει χρησιμοποιηθεί στα εξαιρετικά μικρά πρότυπα κλίμακας 1:24 (παιχνίδια) από τους L.D. METZ και K. SENSENBRENNER. Ο K.R.COOPER χρησιμοποίησε γυαλόχαρτο σε παραλληλεπίπεδα, και ο αριθμός Reynolds της μετάβασης μειώθηκε. Εντούτοις, για να εφαρμοστεί αυτή τη τεχνική σε πειράματα ρουτίνας αιτούνται ορισμένες πληροφορίες: Ποια είναι η κατάλληλη τραχύτητα του sandpaper και που να τοποθετηθεί, κ.λ.π.

Αντίθετα, η τεχνική για εξομοίωση μεγαλύτερου αριθμό Reynolds γίνεται με την αύξηση του επιπέδου αναταραχής της επικείμενης ροής και έχει διευκρινιστεί αρκετά από τους J.WIEDEMANN και B. EWALD έτσι ώστε ισχύει στις δοκιμές προτύπων. Σαν συμπέρασμα από τα πειράματά τους έχουμε ότι ο αποτελεσματικός αριθμός Reynolds μπορεί να αυξηθεί από έναν συντελεστή λ με την τεχνητά αυξανόμενη ισοτροπική αναταραχή μιας καθορισμένης δομής.

Το φυσικό επίπεδο αναταραχής της αεροσήραγγας τους ($TU = 0.8\%$) ήταν περισσότερο από τριπλάσιο (2.8%) από ένα σύνολο διαφραγμάτων που βρίσκονταν στην έξοδο του ακροφυσίου. Όπως βλέπουμε από το σχήμα 4.65 αυτό ήταν επαρκές για να αποβάλει την επιρροή του αριθμού Reynolds στη διανομή πίεσης. Η επίδραση του αριθμού Reynolds στην οπισθέλκουσα (σχήμα 4.66), που είναι σημαντικό για τη χαμηλή αναταραχή, εξαφανίστηκε σχεδόν με την υψηλότερη αναταραχή. Εντούτοις, αυτή η τεχνική πρέπει να εφαρμοστεί με προσοχή. Η τεχνητά αυξανόμενη αναταραχή μειώνεται κατά μήκος της πορείας ροής. Στο παρόν παράδειγμα, πέρα από μια απόσταση $1,7 \mu$ το επίπεδο τύρβης μειώνεται από $2,8\%$ σε 1% (που είναι σχεδόν η φυσική τιμή για αυτήν την ιδιαίτερη αεροσήραγγα). Επομένως πρέπει να διατηρηθεί αυστηρά ,μια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ του μετώπου ενός προτύπου και των διαφραγμάτων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 4.65: Επίδραση του αριθμού Reynolds στη διανομή πίεσης σε ένα γενικό πρότυπο αυτοκινήτου: α) φυσική αναταραχή $TU = 0,8\%$, β) τεχνητά βελτιωμένο επίπεδο αναταραχής $TU = 2,8\%$.



Σχήμα 4.66: Μείωση της επιρροής του αρ. Reynolds στον συντελεστή της οπισθέλκουσας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Υπολογιστική Ρευστομηχανική

5.1: Εισαγωγή:

Το εργαλείο FLUENT είναι ένα πακέτο λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), και χρησιμοποιείται για την επίλυση εξομοιώσεων ροής ρευστών. Το λογισμικό χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων που κυριαρχούν κατά τη μελέτη της ροής των ρευστών, όπως είναι οι εξισώσεις Navier Stokes και παρέχει το κατάλληλο μέσο για την επεξεργασία μεγάλου αριθμού μοντέλων. Οι επιλογές είναι αρκετές όπως η συμπίεστικότητα, ιξώδες, τύρβη κ.α. Η γεωμετρία και η κατασκευή του πλέγματος γίνεται μέσω του συμπληρωματικού πακέτου Gambit.

Συνεχώς τα τελευταία χρόνια γίνονται συνεχείς βελτιώσεις στα οχήματα, με απώτερο σκοπό την επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων και την οικονομία καυσίμου.

Έχει αποδειχτεί ότι η αντίσταση που οφείλεται στο αμάξωμα του οχήματος αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό τουλάχιστον 50% της συνολικής αντίστασης που αναπτύσσεται. Το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί πολύ περισσότερο ανάλογα με την κατηγορία του οχήματος.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της αντίστασης και άλλων αεροδυναμικών φαινομένων, συνιστά την εξομοίωση της ροής είτε στην αεροσήραγγα είτε στον υπολογιστή. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται βασική θεωρία της ρευστομηχανικής η οποία εμπεριέχει εξισώσεις, πολλές φορές δύσκολες στην επίλυση τους και για το λόγο αυτό κάνουμε πολλές παραδοχές ούτως ώστε να υπάρχει κάποια προσεγγιστική τουλάχιστον λύση. Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια H/Y διαδόθηκε πολύ τα τελευταία χρόνια.

Και οι αεροσήραγγες αποτελούν πολύ καλές μεθόδους εξομοίωσης. Ωστόσο, το υψηλό κόστος των συσκευών και η κατασκευή των μοντέλων

αποτελούν ένα εμπόδιο που δύσκολα μπορεί να ξεπεραστεί. Οι αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται κυρίως για να μειώσουν τα επίπεδα κατανάλωσης καυσίμου και να αυξήσουν τις επιδόσεις των οχημάτων.

Η μέθοδος της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο το οποίο αποτελεί την πλέον οικονομική λύση δεδομένου ότι μπορεί και αναλύει τη ροή του ρευστού στις πλέον πολύπλοκες γεωμετρίες. Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά αποτελείται από προγράμματα τα οποία μπορούν και επιλύουν τις κυρίαρχες εξισώσεις της ρευστοδυναμικής.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εξομοιώσεις συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Συνήθως οι διαφορές μεταξύ τους είναι ελάχιστες με τη μέθοδο CFD να υστερεί πάντα έναντι της πειραματικής μελέτης στην αεροσήραγγα εξαιτίας διαφόρων παραγόντων όπως είναι η πολυπλοκότητα των εξισώσεων, η ακρίβεια κατασκευής του πλέγματος, το μοντέλο της τυρβώδους ροής και τις παραδοχές που κάνουμε.

5.2: Μοντελοποίηση της αεροτομής.

Στη συνέχεια θα δούμε ποια είναι η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να γίνει η μοντελοποίηση και η εξομοίωση της εξωτερικής ροής του αέρα σε μία αεροτομή.

Τα βήματα που θα ακολουθήσουμε είναι τα εξής:

A) Μοντελοποίηση:

1. Εισαγωγή του μοντέλου της αεροτομής από πρόγραμμα σχεδίασης CAD υπό τη μορφή αρχείου ACIS.
2. Δημιουργία ενός τριγωνικού πλέγματος στην επιφάνεια της αεροτομής.

3. Δημιουργία στοιχείου όγκου και τετράεδρου πλέγματος επί αυτού.
4. Προετοιμασία του πλέγματος ώστε να αναγνωστεί από το λογισμικό FLUENT 5/6.

Οι παραπάνω ενέργειες αφορούσαν τη διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου προκειμένου να εισαχθεί στο λογισμικό FLUENT. Όσον αφορά τη διαδικασία εξομοίωσης, ακολουθούνται τα εξής βήματα.

B) Εξομοίωση:

1. Ορισμός οριακών συνθηκών που αφορούν εξωτερική αεροδυναμική.
2. Χρήση του μοντέλου τύρβης “Sapart Allmaras”.
3. Υπολογισμός της λύσης του προβλήματος χρησιμοποιώντας τον εξομοιωτή “Coupled – Implicit”.
4. Χρήση ενδείκτων δύναμης και επιφάνειας για τον έλεγχο της σύγκλισης της λύσης.
5. Έλεγχος του πλέγματος αναπαριστώντας γραφικά την κατανομή της y^+ .

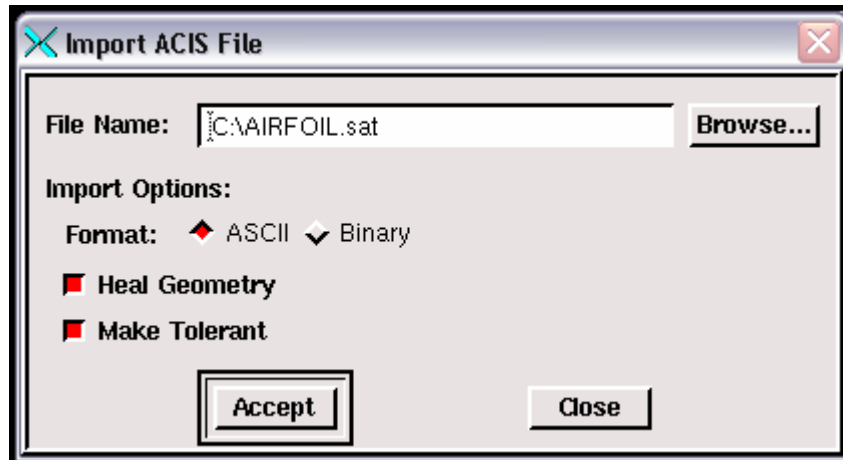
Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τις διαδικασίες αυτές αναλυτικά:

5.2.1: Προετοιμασία του πλέγματος.

A1: Επιλογή εξομοιωτή.

Από τη μπάρα των βασικών επιλογών ορίζουμε εξομοιωτή, και επιλέγουμε τον FLUENT 5/6.

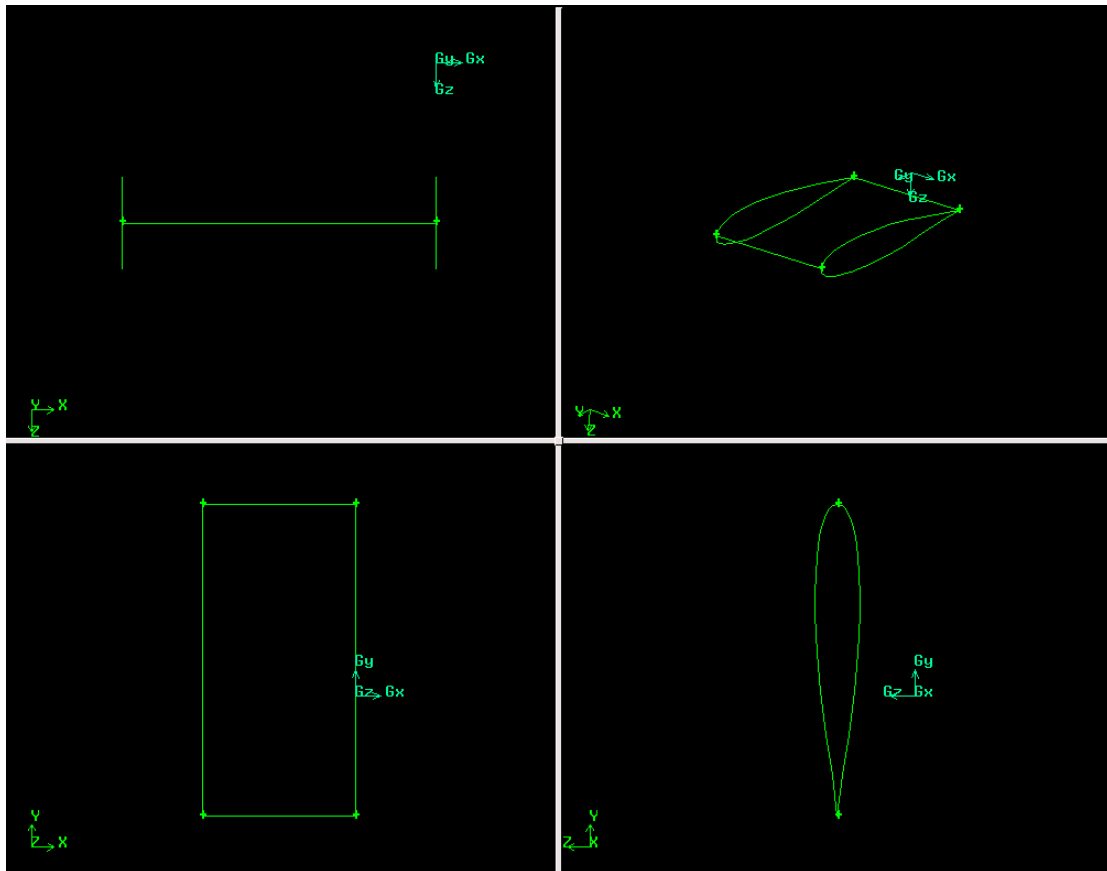
A2: Εισαγωγή και επιδιόρθωση αρχείου ACIS.





Σχήμα 5.1: Παράθυρο διαλόγου κατά την εισαγωγή αρχείου ACIS.

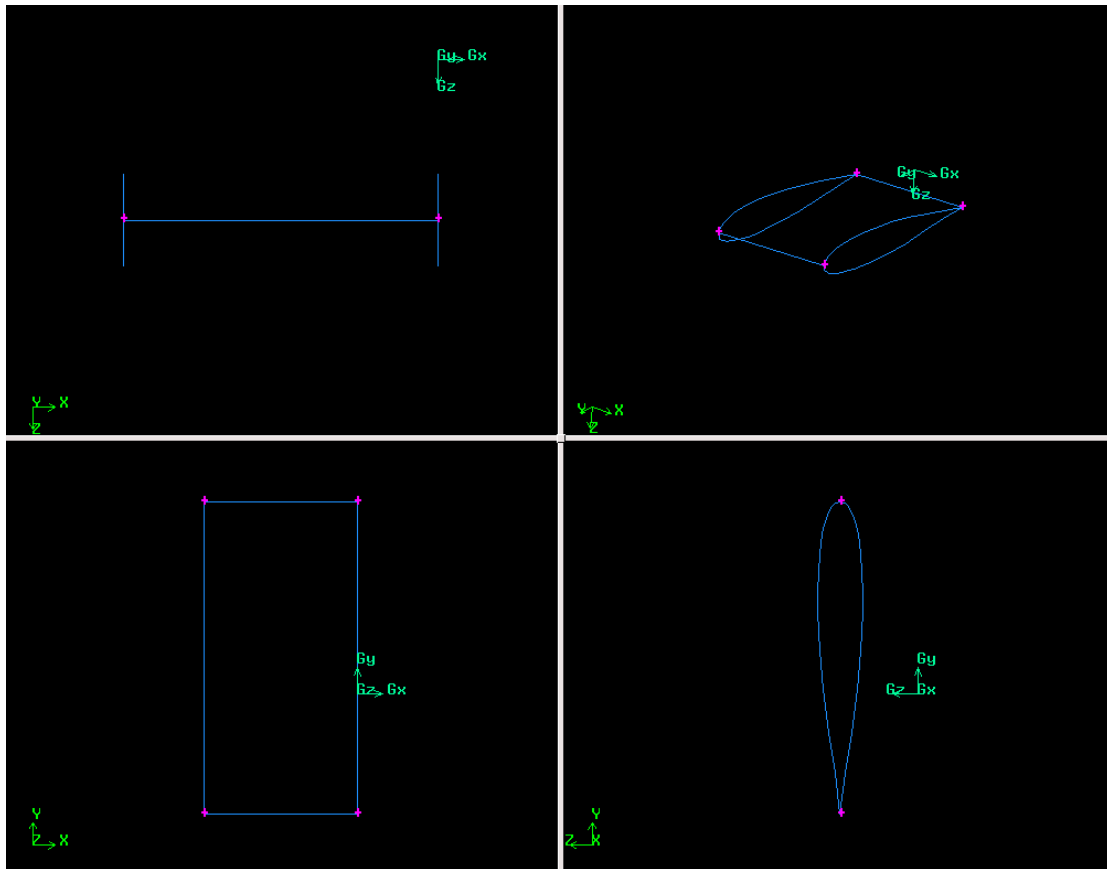
Από το μενού FILE, και στη συνέχεια την εντολή import, εισήγαμε το αρχείο σε μορφή ACIS. Πρέπει να τονίσουμε πως η σχεδίαση της αεροτομής έγινε σε διαφορετικό τύπο αρχείου, 3dm, ο οποίος δεν υποστηρίζεται από το λογισμικό Gambit. Για το λόγο αυτό το αρχείο αποθηκεύτηκε στη συγκεκριμένη μορφή, ώστε δηλαδή να μπορεί να αναγνωριστεί και από το Gambit.

Κατά τη μετατροπή του αρχείου από τη μία μορφή στην άλλη, (.3dm à .sat) παρατηρούνται πάντοτε ανεπιθύμητες αλλοιώσεις στη πρότυπη γεωμετρία, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή πολλές φορές η κατασκευή πλέγματος στη συγκεκριμένη γεωμετρία. Για το λόγο αυτό, στις επιλογές που μας δίνει το πρόγραμμα, επιλέγουμε να επιδιορθώσει τη γεωμετρία (Heal Geometry) καθώς και να βελτιώσει την ακρίβεια στις ενώσεις (Make Tolerant). Το μοντέλο θα έχει τη μορφή που περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.



Σήμα 5.2: Η μορφή της αεροτομής κατά την εισαγωγή στο Gambit.

Στη συνέχεια επιλέγουμε την εντολή καθορισμού χρωματισμού (Specify Color Mode ) από το μενού βασικού ελέγχου του προγράμματος. Μόλις επιλέξουμε την εντολή αυτή το εικονίδιο λαμβάνει την παρακάτω μορφή , γεγονός που σημαίνει ότι το χρώμα του μοντέλου βασίζεται πλέον στη συνδεσιμότητα των ακμών και των επιφανειών του μοντέλου. Εάν η συνδεσιμότητα αυτή είναι η απαιτούμενη, δηλαδή αν δεν υπάρχουν κενά μεγαλύτερα της προκαθορισμένης ακρίβειας, τότε οι ακμές του μοντέλου είναι μπλε. Σε όποια ακμή παρατηρείται κάποιο κενό, ή άλλη ανωμαλία, όπως είναι το να υπάρχουν διπλές ακμές σε μία επιφάνεια, τότε το χρώμα των συγκεκριμένων ακμών είναι προτοκαλί.

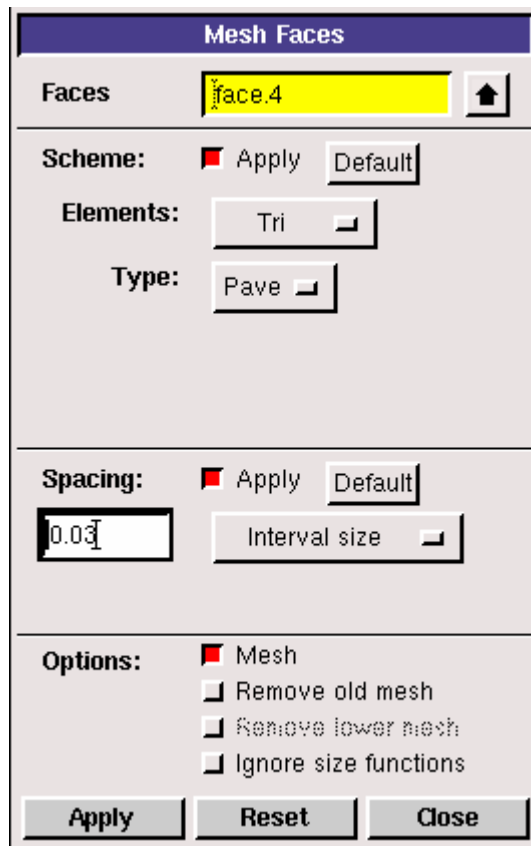


Σχήμα 5.3: Έλεγχος ποιότητας μοντέλου.

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα, το μοντέλο είναι πλήρως επιδιορθωμένο και έτοιμο για να γίνει πάνω στην επιφάνειά του η κατασκευή του πλέγματος. Αυτό έγινε επειδή κατά την εισαγωγή του, είχαμε επιλέξει να γίνει αυτόματα η επιδιόρθωση της γεωμετρίας.

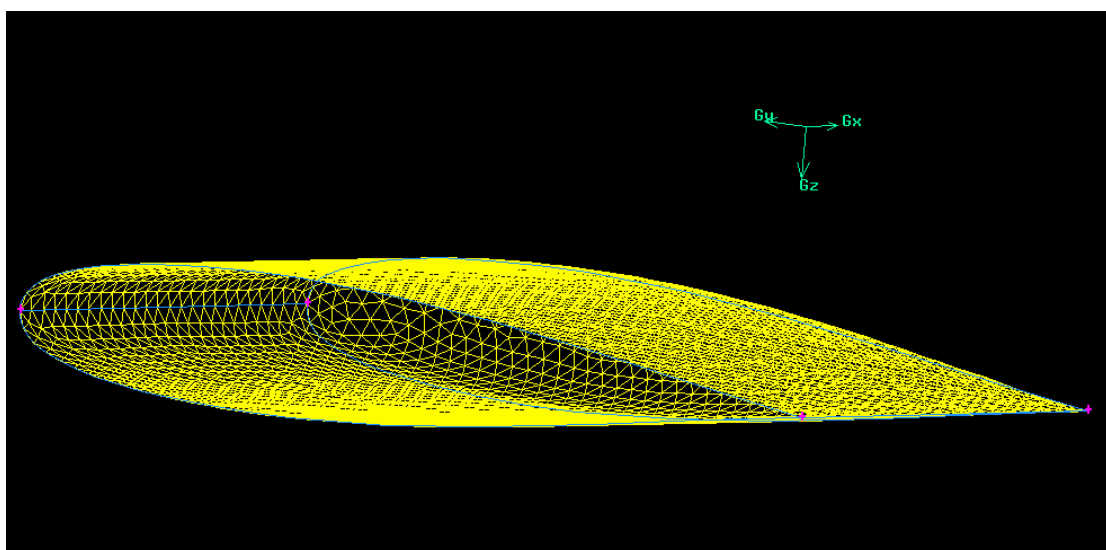
A3: Δημιουργία πλέγματος στην επιφάνεια της αεροτομής.

Δημιουργούμε πλέγμα στην επιφάνεια του οχήματος. Από τις επιλογές που μας δίνει το κουτί διαλόγου της εντολής, επιλέγεται το πλέγμα να είναι τριγωνικό με διάκενο 0,03.



Σχήμα 5.4: Παράθυρο διαλόγου της εντολής δημιουργίας πλέγματος επιφάνειας.

Η αεροτομή με το πλέγμα στην επιφάνειά της έχει την παρακάτω μορφή.

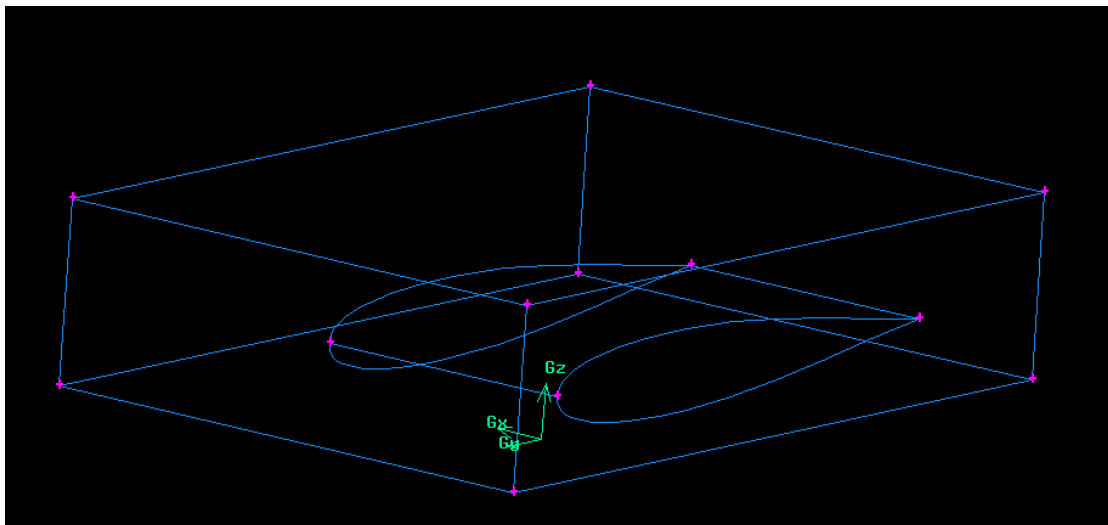


Σχήμα 5.5: Πλέγμα επιφάνειας της αεροτομής.

Στη συνέχεια θα αποκρύψουμε το πλέγμα από την επιφάνεια προκειμένου να διευκολυνθούμε στην κατασκευή του στοιχείου όγκου.

A4: Κατασκευή στοιχείου όγκου γύρω από την επιφάνεια της αεροτομής.

Πέρα από την αεροτομή, πρέπει να ορίσουμε και τον περιβάλλοντα χώρο εντός του οποίου υποτίθεται ότι κινείται. Διαφορετικά αν υποθέταμε ότι η αεροτομή μελετάται εντός αεροδυναμικής σήραγγας, πρέπει να ορίσουμε το χώρο της σήραγγας. Για το λόγο αυτό, κατασκευάζουμε ένα στοιχείο όγκου, εντός του οποίου θα δεχτούμε στη συνέχεια ότι κινείται ο προσκρουόμενος στην αεροτομή αέρας.



Σχήμα 5.6: Κατασκευή στοιχείου όγκου γύρω από την αεροτομή.

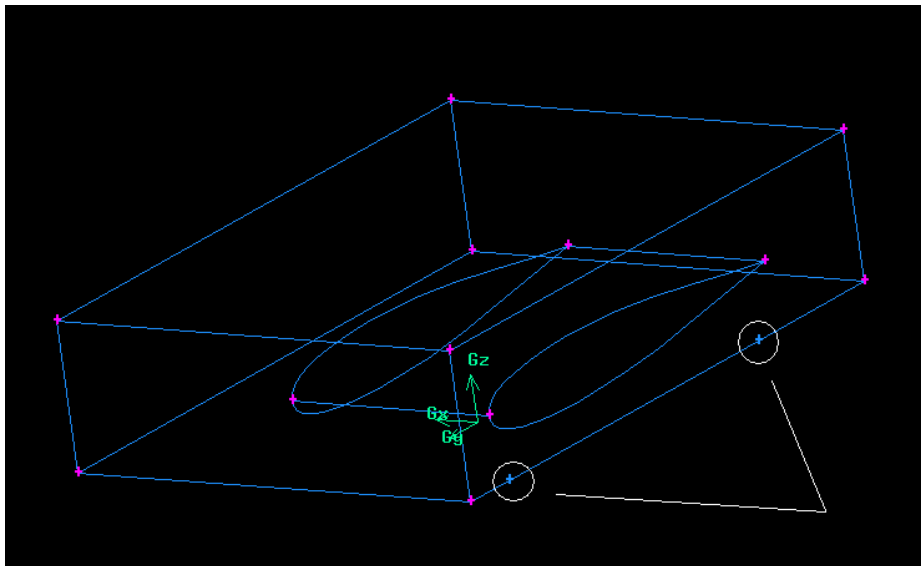
A5: Απομάκρυνση της ανεπιθύμητης γεωμετρίας.

Στη συνέχεια αφαιρείται η γεωμετρία της αεροτομής από το στοιχείο όγκου, προκειμένου να καθοριστεί η σφαίρα δραστηριότητας της ροής του αέρα. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, αφαιρούμε το στοιχείο όγκου, αφήνοντας άθικτες όμως τις επιφάνειες οι οποίες το συνθέτουν. Από την εντολή Αφαίρεσης Όγκου (Remove Volumes) δεν επιλέγουμε την παράμετρο Lower

Geometry, με αποτέλεσμα να αφαιρεθεί το στοιχείο όγκου και να παραμείνουν οι επιφάνειες που το συνθέτουν.

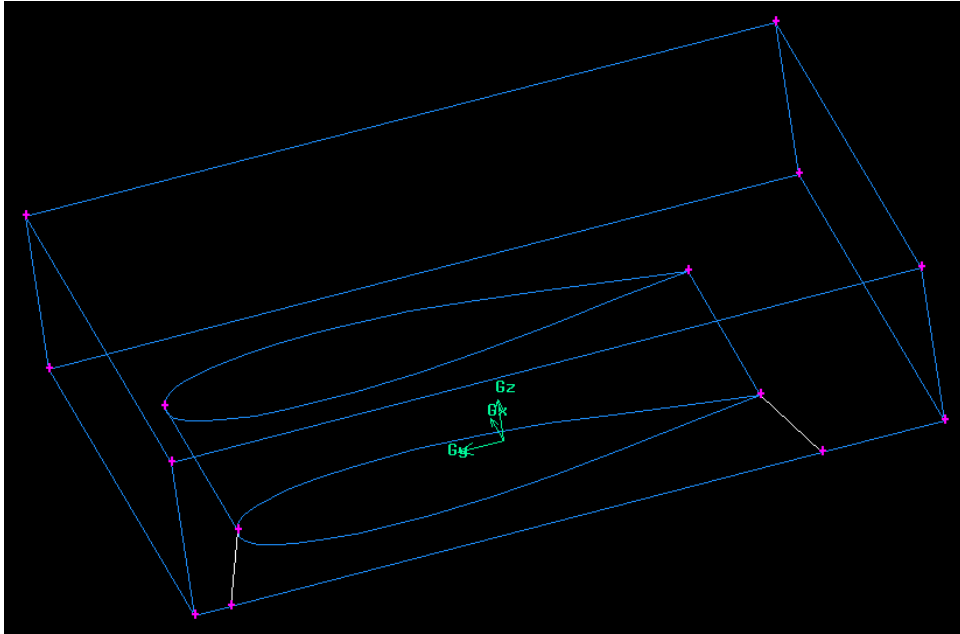
A6: Δημιουργία ευθειών ακμών στο επίπεδο συμμετρίας.

Δημιουργούμε ευθείες ακμές οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την κατασκευή επιφανειών στο επίπεδο συμμετρίας. Επιλέγοντας την εντολή Split / Merge Edges, χωρίζουμε το επίπεδο συμμετρίας σε τρεις τομείς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.7: Δημιουργία σημείων στο επίπεδο συμμετρίας.

Στη συνέχεια δημιουργούμε τις ακμές που θα ενώσουν το επίπεδο συμμετρίας με την αεροτομή. Με χρήση της εντολής “Create Edge” ενώνονται τα δύο σημεία τομής του επιπέδου συμμετρίας με τα αντίστοιχα . Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται στη συγκεκριμένη εντολή, πρέπει να επιλεγεί η παράμετρος “Virtual” δεδομένου ότι τα σημεία ένωσης που βρίσκονται επάνω στην αεροτομή είναι εικονικά. Έτσι προκύπτει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.8: Δημιουργία ευθειών ακμών στο επίπεδο συμμετρίας.

Α6: Δημιουργία επιφανειών στο επίπεδο συμμετρίας.

Ακολουθεί η δημιουργία επιφανειών στο επίπεδο συμμετρίας ενώνοντας τις ακμές μαζί. Για τη συγκεκριμένη ενέργεια χρησιμοποιούμε το επίπεδο συμμετρίας ως αποδέκτη. Δημιουργώντας τις συγκεκριμένες επιφάνειες θα μπορέσουμε στη συνέχεια να δημιουργήσουμε από αυτές ένα νέο στοιχείο όγκου. Με χρήση της εντολής “Create Face From Wireframe” δημιουργούμε τρεις επιφάνειες από τις ακμές των εξής στοιχείων.

- 1) Η ακμή στο κέντρο του επιπέδου συμμετρίας σε συνδυασμό με τις δύο τελευταίες ακμές, συν την κατώτερη ακμή της αεροτομής που βρίσκεται επί του επιπέδου συμμετρίας.
- 2) Οι ακμές που αποτελούν την αεροτομή και βρίσκονται επάνω στο επίπεδο συμμετρίας.
- 3) Οι κάθετες ακμές του κέντρου συμμετρίας, συν την άνω ακμή της αεροτομής συν τις δύο νέες ακμές που βρίσκονται επάνω στο επίπεδο συμμετρίας.

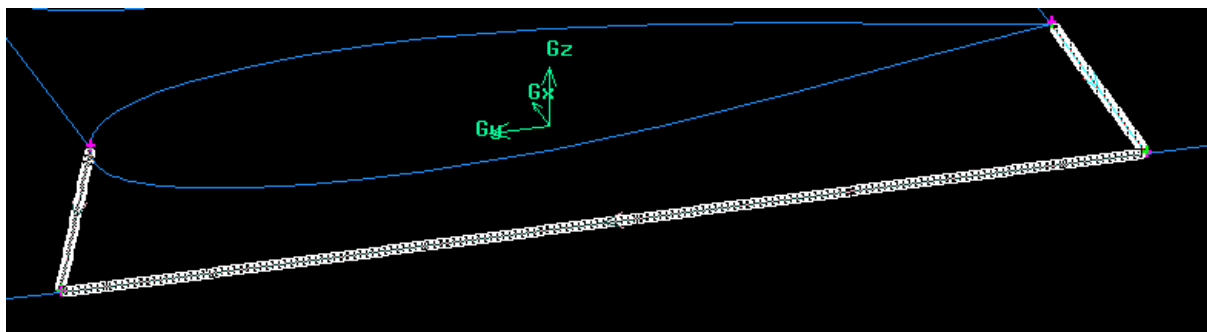
A7: Δημιουργία στοιχείων όγκου.

Με χρήση της εντολής “Form Volume” ορίζονται οι επιφάνειες που συντεθήκαν στο παραπάνω βήμα για τη δημιουργία στοιχείων όγκου.

A8: Πλεγματοποίηση των ακμών.

Σε προηγούμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η δημιουργία πλέγματος στην επιφάνεια της αεροτομής. Όσον αφορά το στοιχείο όγκου, το πλέγμα που θα δημιουργηθεί δεν απαιτείται να είναι τόσο λεπτομερές, αντίθετα λόγω της απλότητας της γεωμετρίας του συγκεκριμένου στοιχείου, το πλέγμα μπορεί να είναι πιο χονδροειδές. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο το Gambit να μεταβάλλει την πυκνότητα ανάμεσα στο λεπτομερές και το χονδροειδές πλέγμα. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει να καθοριστεί η κατανομή των κόμβων σε ορισμένες ακμές της γεωμετρίας.

Συνεπώς στη συνέχεια καθορίζεται η πυκνότητα τριών ακμών της γεωμετρίας κάτω από την αεροτομή και πάνω στο επίπεδο συμμετρίας. Η εντολή που χρησιμοποιείται για την περίπτωση είναι η “Mesh Edges”. Στο παράθυρο διαλόγου επιλέγονται οι δύο τελευταίες ακμές που δημιουργήθηκαν συν την ακμή στο κέντρο του επιπέδου συμμετρίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

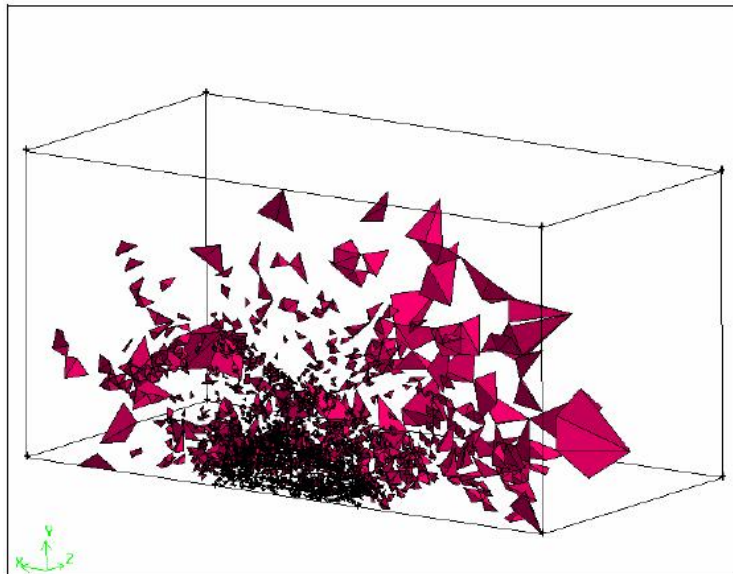


Σχήμα 5.9: Δημιουργία κόμβων σε ακμές του επιπέδου συμμετρίας.

A9: Πλεγματοποίηση και έλεγχος του πλέγματος του στοιχείου όγκου.

Κατασκευάζεται ένα πλέγμα για το στοιχείο όγκου, το οποίο είναι λιγότερο λεπτομερές σε σχέση με το αντίστοιχο της επιφάνειας της αεροτομής. Το συγκεκριμένο πλέγμα είναι τετράεδρο υβριδικό και η μορφή του αναπαρίσταται από το παρακάτω σχήμα.

Στη συνέχεια εξετάζεται η ποιότητα του πλέγματος μέσω της εντολής “Examine Mesh”. Στην παρακάτω εικόνα αναπαρίσταται το πλέγμα του στοιχείου όγκου για ένα συγκεκριμένο εύρος ποιότητας και πιο συγκεκριμένα, κελιά με τιμή διαστρέβλωσης από 0.7 έως 0.8. Το πλέγμα που χαρακτηρίζεται από αυτές τις τιμές είναι γενικά αποδεκτό.



Σχήμα 5.10: Έλεγχος φάσματος του πλέγματος όγκου.

A10: Ορισμός οριακών συνθηκών.

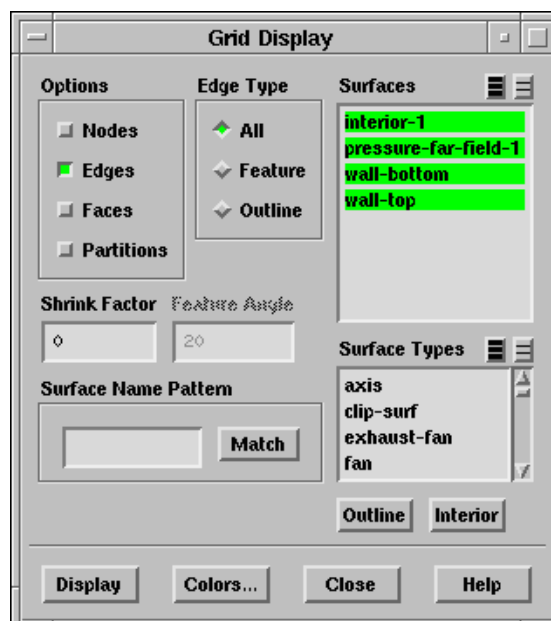
Ορίζουμε τις οριακές συνθήκες της εξομοίωσης μέσω της εντολής “Set Boundary Types”. Από τη λίστα επιλέγονται οι “Pressure_inlet.1”, “Pressure_outlet.2” και “Symmetry”.

Η προετοιμασία του πλέγματος ολοκληρώνεται με την εξαγωγή του πλέγματος προς εξομοίωση.

5.2.2: Προετοιμασία και εξομοίωση του μοντέλου με το λογισμικό FLUENT.

B1: Πλέγμα.

Αρχικά εισάγεται το πλέγμα στο λογισμικό FLUENT και στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του πλέγματος δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή ώστε στα αποτελέσματα του ελέγχου στον όγκο που αναφέρεται ως ο ελάχιστος. Ο αριθμός που αντιστοιχεί σε αυτόν πρέπει να είναι θετικός. Εμφανίζουμε το πλέγμα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις.



Σχήμα 5.11: Εμφάνιση πλέγματος.

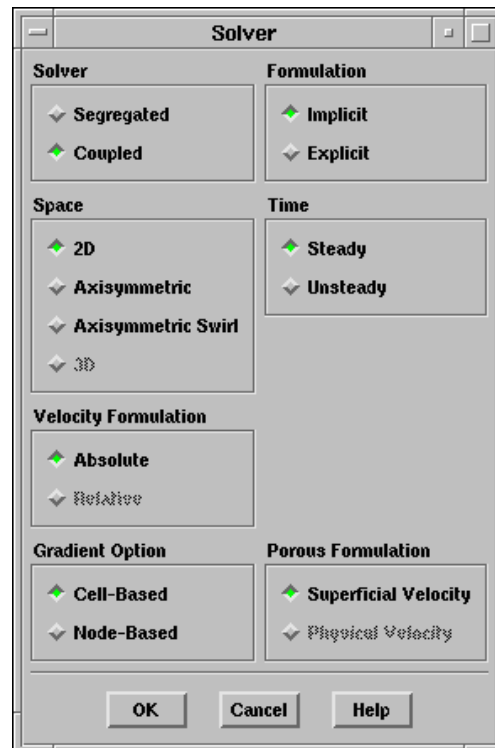
Για τη μοντελοποίηση της αεροτομής χρησιμοποιήθηκε τετράεδρο πλέγμα το οποίο μπορεί εύκολα να επεκταθεί ώστε να ερμηνεύσει διάφορα

μεγέθη μεταβολής της ροής σε ανάλογες κατευθύνσεις. Στην παρούσα περίπτωση, οι μεταβολές της ροής με κάθετη κατεύθυνση προς το τοίχωμα της αεροτομής είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που πραγματοποιούνται σε εφαπτόμενη διεύθυνση με εξαίρεση όσες λαμβάνουν χώρα στην εμπρός και πίσω ακμή της αεροτομής καθώς επίσης και κοντά στην περιοχή κτύπων στην επάνω επιφάνεια της αεροτομής. Συνεπώς τα κελιά που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια παρουσιάζουν μεγαλύτερο λόγο προβολής. Στην περίπτωση που η επιφάνεια προς μοντελοποίηση ήταν περίπλοκη συνηθίζεται η κατασκευή υβριδικού πλέγματος, δηλαδή πλέγματος που αποτελείται τόσο από τετράεδρα όσο και από τρίεδρα κελιά.

Η διαδικασία συνεχίζεται με την ανακατανομή του πλέγματος με σκοπό να περιοριστεί το εύρος φάσματος του αριθμού των γειτονικών κελιών, προκειμένου έτσι να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμών. Η τακτική αυτή ενδείκνυται για περιπτώσεις μεγάλων αντικειμένων προς μοντελοποίηση, δηλαδή εκείνων που το πλέγμα τους περιέχει περισσότερα από 1 εκατομμύριο κελιά.

B2: Μοντέλα.

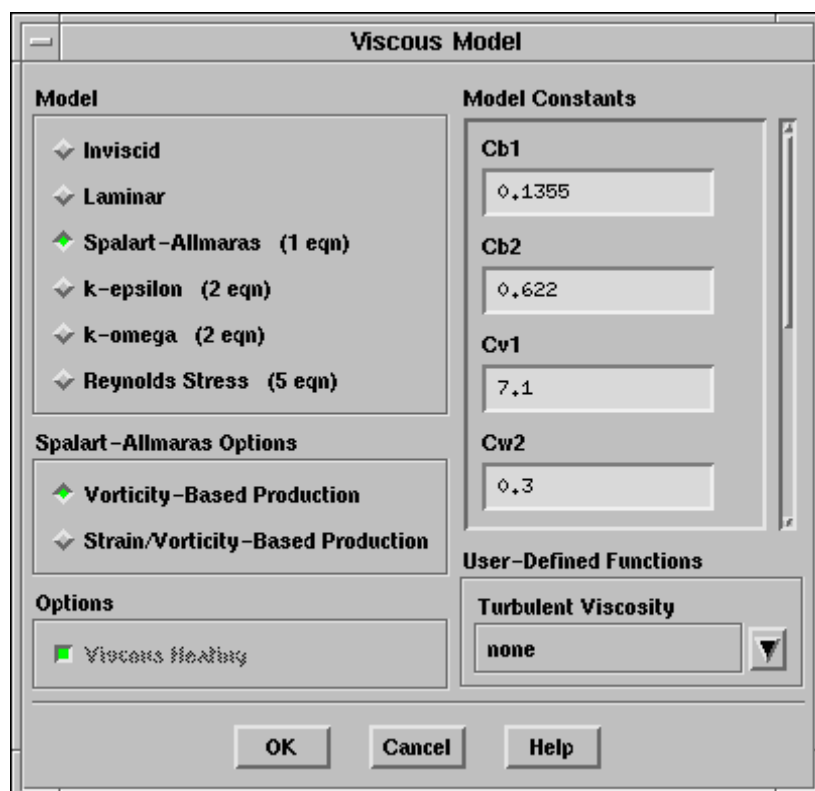
Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται στην επιλογή του εξομοιωτή, επιλέγουμε τις παραμέτρους “Coupled” και “implicit”, σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.12: Παράμετροι των μοντέλων.

Η παράμετρος “Coupled” ενδείκνυται όταν οι εφαρμογές που θέλουμε να εξομοιώσουμε, αφορούν εφαρμογές αεροδυναμικής που εμπλέκουν υψηλές ταχύτητες ροής του αέρα συνοδευόμενες από κρουστικά κύματα. Η παράμετρος “Implicit” επιλέγεται διότι με τη συγκεκριμένη παράμετρο το πρόβλημα θα συγκλίνει ταχύτερα σε σχέση με την παράμετρο “Explicit”, καταναλώνοντας όμως πολύ περισσότερη μνήμη. Για μία εφαρμογή ροής δύο διαστάσεων όμως, η κατανάλωση της μνήμης δεν αποτελεί πρόβλημα.

Κατά τον καθορισμό του μοντέλου ιξώδους επιλέγεται το μοντέλο “Spalart – Allmaras” διατηρώντας στο ανάλογο παράθυρο διαλόγου τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις.

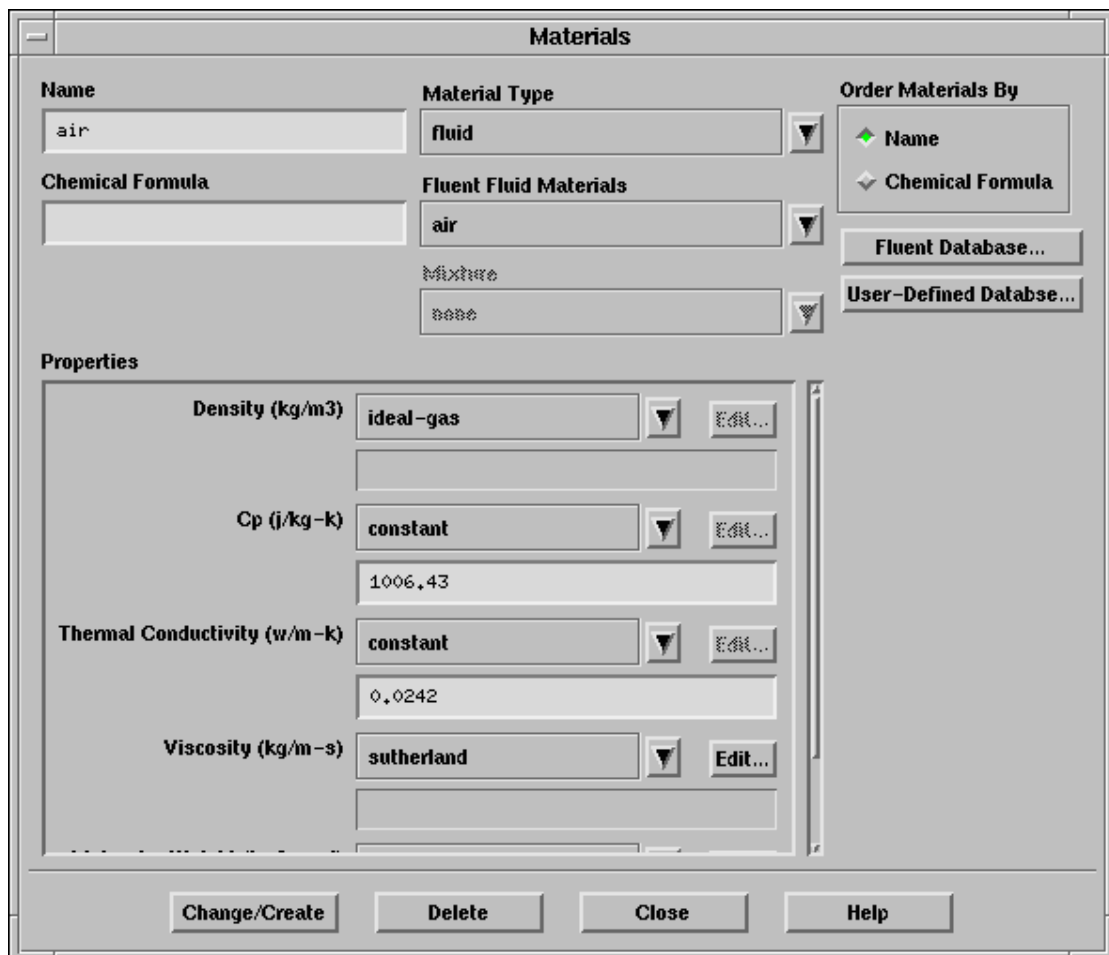


Σχήμα 5.13: Επιλογή μοντέλου “Spalart – Allmaras”.

Η επιλογή ήταν αυτή διότι το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ένα σχετικά απλό μοντέλο μονής εξίσωσης το οποίο επιλύει μία μοντελοποιημένη εξίσωση μεταφοράς για το κινηματικό τυρβώδες ιξώδες. Κάτι τέτοιο ενσωματώνει μία νέα τάξη μοντέλων μονής εξίσωσης στα οποία δεν κρίνεται αναγκαίο να γίνουν υπολογισμοί μεγάλης κλίμακας σχετικά με το πάχος του στρώματος των τοπικών διατμητικών τάσεων. Το μοντέλο “Spalart – Allmaras” σχεδιάστηκε αποκλειστικά για εφαρμογές αεροδιαστημικής εμπλέκοντας ροές εντός αγωγών και έχει δώσει θετικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις οριακών στρωμάτων που υπόκεινται σε αντίστροφες μεταβολές πίεσης.

B3: Υλικά.

Κατά την επιλογή υλικών, στο παράθυρο διαλόγου της εντολής διατηρούμε το προκαθορισμένο λειτουργούν μέσο για την εφαρμογή αυτή, που είναι ο αέρας.



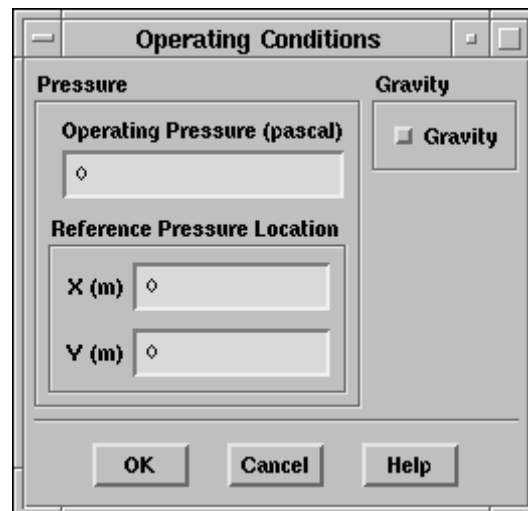
Σχήμα 5.13: Επιλογή υλικών.

Στη λίστα των επιλογών που αφορούν τη συχνότητα και το ιζώδες, επιλέγουμε “Ideal Gas” και “Sutherland” αντίστοιχα. Η δεύτερη επιλογή παραπέμπει σε δεύτερο παράθυρο διαλόγου στο οποίο διατηρούμε τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις.

Πρέπει να τονιστεί ότι ενώ η πυκνότητα και το ιζώδες, επελέγησαν να είναι εξαρτώμενα από τη θερμοκρασία, ο συντελεστής ειδικής θερμότητας C_p

και η θερμική αγωγιμότητα παρέμειναν σταθεροί. Σε γενικές γραμμές, όταν πρόκειται για περιπτώσεις συμπιεστής ροής υψηλών ταχυτήτων, η εξάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων από τη θερμοκρασία, ενδείκνυται.

B4: Συνθήκες λειτουργίας.



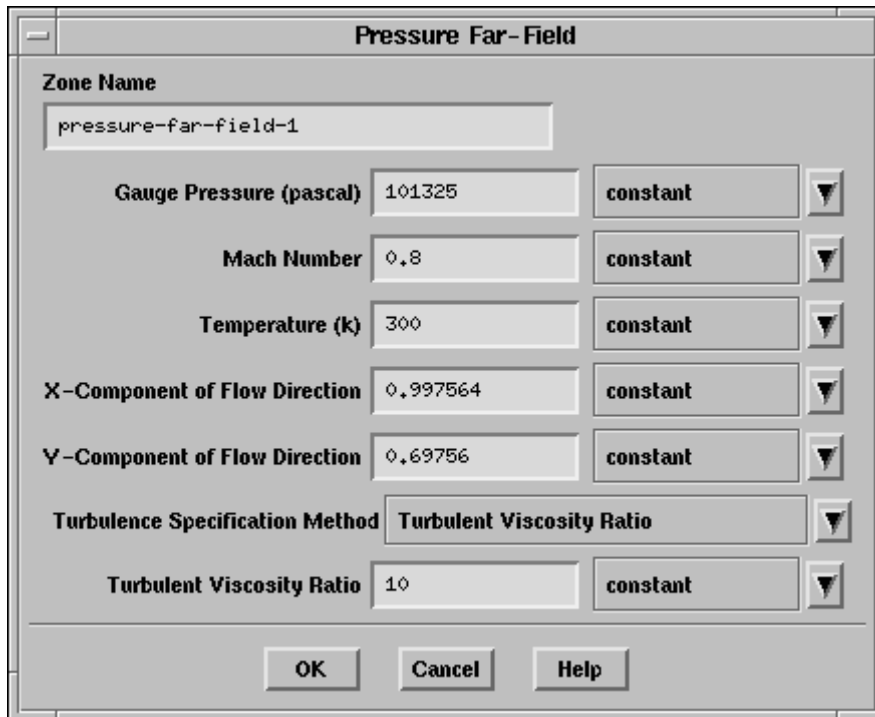
Σχήμα 5.14: Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας.

Ορίζουμε τις συνθήκες λειτουργίας της εξομοίωσης θέτοντας τη λειτουργούσα πίεση στην τιμή των 0 Pa διότι στις παραμέτρους επιλογής εξομοιωτή επιλέξαμε την παράμετρο “Coupled”. Σε μία τέτοια περίπτωση και για αριθμούς Mach μεγαλύτερους από 0.1, συνίσταται η λειτουργούσα πίεση να έχει μηδενική τιμή.

B5: Οριακές συνθήκες.

Στον καθορισμό των οριακών συνθηκών οι επιλογές γίνονται για όνομα περιοχής “Pressure – Far – Field – 1”, ενώ για εξωτερική ροή ο λόγος ιξώδους πρέπει να κυμαίνεται από 1 έως 10. Επίσης, οι συνιστώσες της κατεύθυνσης της ροής στον άξονα X και Y τίθενται ίσες με 0.997564 και 0.069756 αντίστοιχα, διότι η γωνία προσβολής είναι ίση με 4°.

$\text{συν}4^\circ = 0.997564$ και $\eta\mu4^\circ = 0.069756$

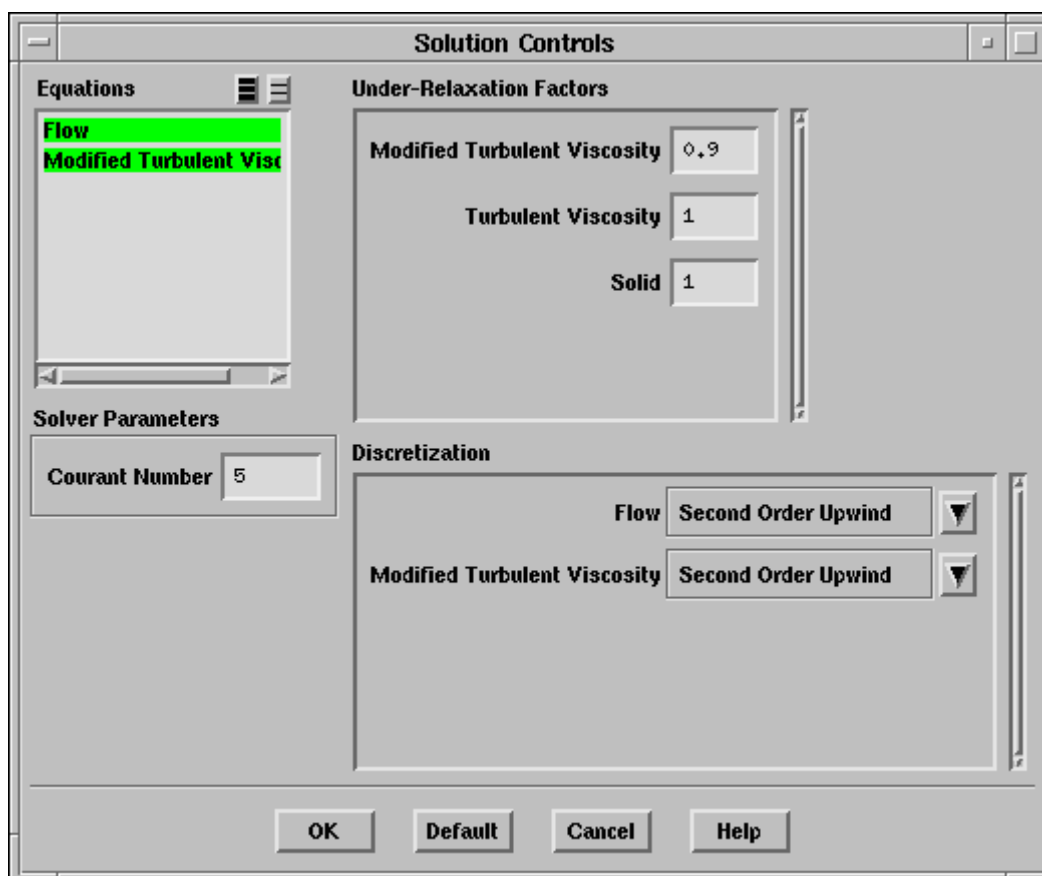


Σχήμα 5.15: Καθορισμός οριακών συνθηκών.

B6: Επίλυση.

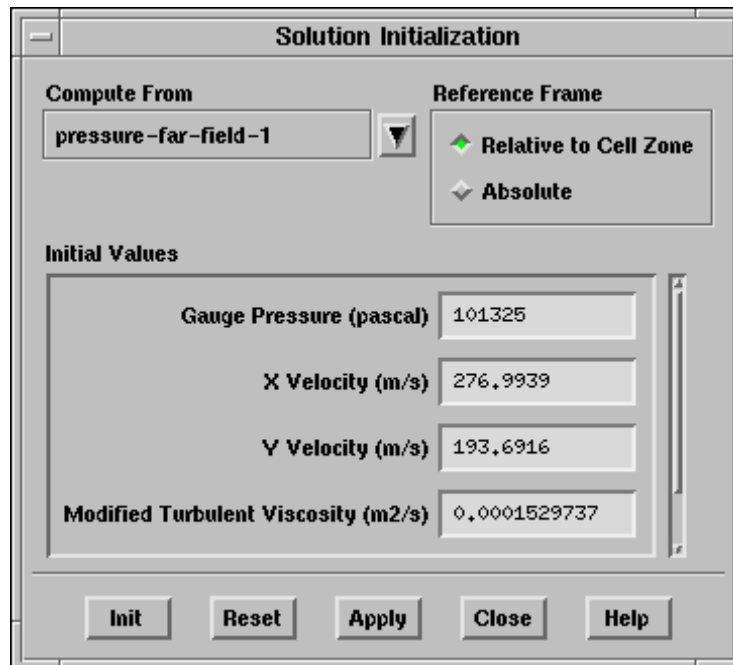
Κατά τον ορισμό των ελεγκτών επίλυσης έγιναν οι εξής επιλογές.

- 1) Ο Συντελεστής Χαλάρωσης για Τροποποιημένο Ιξώδες Τύρβης, τέθηκε ίσος με 0.9 και αυτό διότι οι μεγαλύτερες τιμές, όσες δηλαδή πλησιάζουν το 1, για το Συντελεστή Χαλάρωσης, γενικά συγκλίνουν πιο γρήγορα στη λύση του προβλήματος. Ωστόσο μία τέτοια τακτική μπορεί να συνεπάγεται αστάθεια κατά τη λύση η οποία για να αποφευχθεί πρέπει να μειωθεί πάλι η τιμή του Συντελεστή Χαλάρωσης.
- 2) Ο αριθμός Courant τίθεται ίσος με 5.
- 3) Στις λίστες επιλογής της ασυνέχειας, επιλέγουμε “Second order Upwind”, προκειμένου να προσδοθεί μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση της εξομοίωσης.



Σχήμα 5.16: Παράθυρο διαλόγου ενδείκτων λύσης.

Στη συνέχεια ενεργοποιείται η λειτουργία απομένουσας γραφικής αναπαράστασης κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, και στη συνέχεια ξεκινά η επίλυση.



Σχήμα 5.17: Παράθυρο διαλόγου εντολής εκκίνησης της λύσης.

Για την παρακολούθηση της σύγκλισης της επίλυσης, ενεργοποιείται η γραφική αναπαράσταση των συντελεστών Αντίστασης C_D , Άνωσης C_L και Ροπής C_M . Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρις ότου όλες οι δυνάμεις που αναφέραμε να συγκλίνουν προκειμένου να είναι σίγουρο ότι η λύση εν τέλει θα συγκλίνει.

Στις πρώτες επαναλήψεις του υπολογισμού, όταν η λύση είναι μεταβαλλόμενη, οι τιμές των συντελεστών αυτών δεν είναι σταθερές. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται το ότι η κλίμακα στον άξονα Y της γραφικής παράστασης θα είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα οι μεταβολές των τιμών να μην είναι τόσο εμφανείς.

Δεδομένου ότι οι συντελεστές Αντίστασης C_D , Άνωσης C_L και Ροπής C_M , είναι καθολικές μεταβλητές αποτελώντας ένδειξη κάποιων συνολικών καταστάσεων, μπορούν να συγκλίνουν τη στιγμή που ορισμένες καταστάσεις μπορεί να μεταβάλλονται σε συγκεκριμένα σημεία από επανάληψη σε επανάληψη.

Για τον έλεγχο αυτού του φαινομένου, απαιτείται η δημιουργία ενός σημείου παρακολούθησης ακριβώς εκεί που υφίσταται κάποια σημαντική

μεταβολή, ακριβώς στην αντίθετη κατεύθυνση του κρουστικού κύματος, για να παρακολουθείται ο συντελεστής επιφανειακής τριβής. Το ακριβές σημείο ανάπτυξης του κρουστικού κύματος, δύναται να προσδιοριστεί μετά την ολοκλήρωση λίγων επαναλήψεων.

Η επίλυση συνεχίζεται ορίζοντας ως αριθμό επαναλήψεων τις 100 επαναλήψεις, οι οποίες είναι αρκετές για την εύρεση του σημείου ανάπτυξης του κρουστικού κύματος και τη σημαντική ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων της λύσης.

Στη συνέχεια αυξάνεται ο αριθμός Courant ο οποίος λαμβάνει πλέον την τιμή 20. Η λύση συγκλίνει ταχύτερα για μεγαλύτερους αριθμούς Courant με εξαίρεση την περίπτωση όπου η φάση ολοκλήρωσης γίνεται ασταθής. Από τη στιγμή που έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες επαναλήψεις και η λύση είναι σταθερή, αυξάνουμε τον αριθμό Courant προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία επίλυσης.

Ενεργοποιούνται οι ενδείκτες για τους συντελεστές Αντίστασης C_D , Άνωσης C_L και Ροπής C_M . Οι επιλογές που γίνονται στη διαδικασία φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα.

Στη λίστα των συντελεστών ορίζουμε το συντελεστή αντίστασης, ενώ στις επιλογές περιοχής τοιχωμάτων ορίζουμε άνω και κάτω τοιχώματα. Το διάνυσμα της δύναμης στον X και Y άξονα αντίστοιχα είναι 0,9976 και 0,06976 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές διασφαλίζουν ότι οι συντελεστές Αντίστασης και Άνωσης υπολογίζονται κάθετα και παράλληλα προς την κατεύθυνση της ροής, η οποία αποκλίνει κατά 4° από τις καθολικές συντεταγμένες.

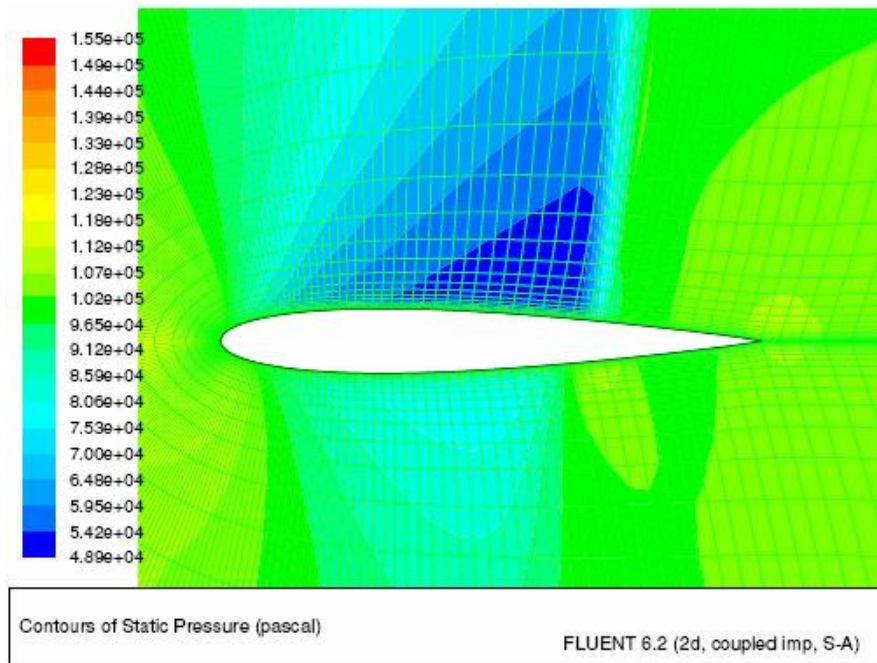


Σχήμα 5.18: Ενδείκτες δυνάμεων.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τους συντελεστές Άνωσης και Ροπής.

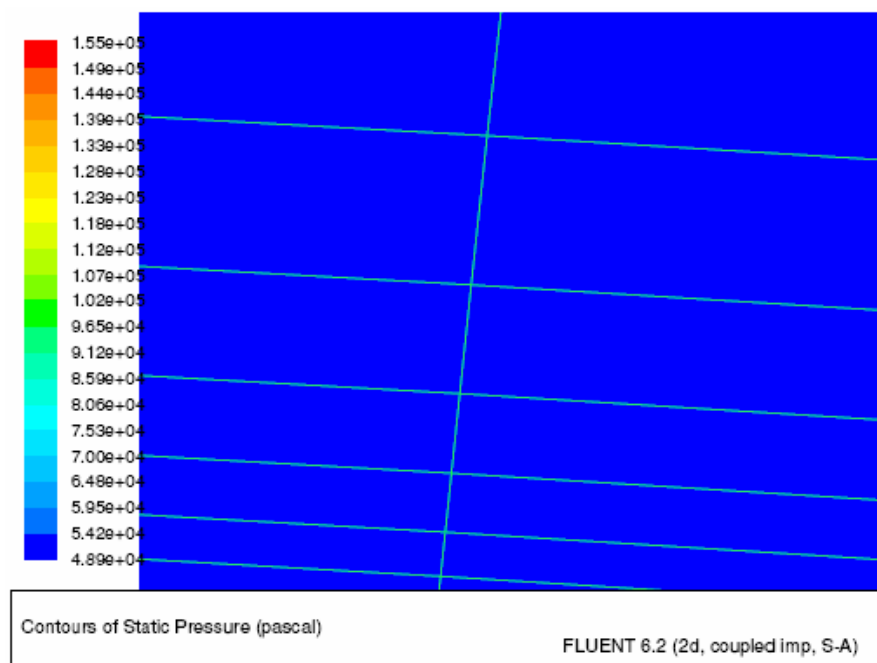
Έπειτα ορίζουμε τις τιμές αναφοράς που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουμε τους συντελεστές Αντίστασης C_D , Άνωσης C_L και Ροπής C_M . Οι τιμές αναφοράς χρησιμοποιούνται προκειμένου να μη διαστασιοποιούνται οι δυνάμεις και οι ροπές που δρουν στην επιφάνεια της αεροτομής. Έτσι προκύπτουν οι ανάλογοι συντελεστές.

Ακολουθεί ο ορισμός ενός ενδείκτη για την παρακολούθηση της εξέλιξης της τιμής του συντελεστή επιφανειακής τριβής ακριβώς αντίθετα στην κατεύθυνση του κρουστικού κύματος. Το κρουστικό κύμα είναι εμφανές όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου η πίεση στην άνω επιφάνεια της αεροτομής όπου η πίεση μεταβάλλεται απότομα.



Σχήμα 5.19: Γράφημα κατανομής πίεσης – εμφάνιση κρουστικού κύματος.

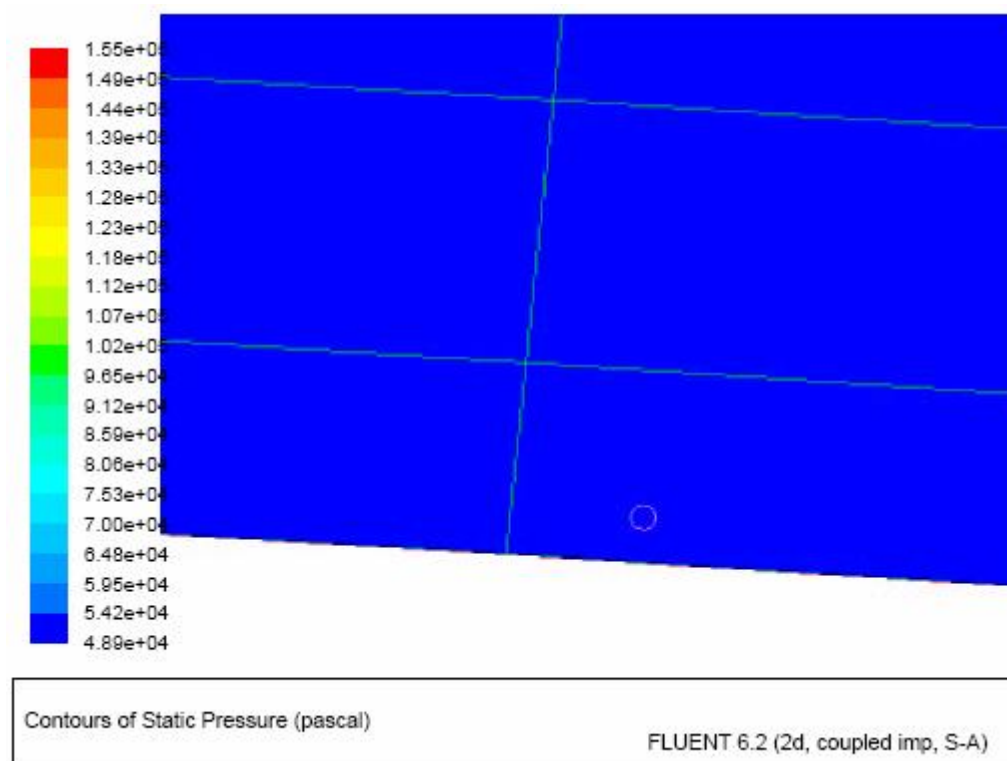
Εστιάζουμε στην περιοχή του κρουστικού κύματος έως ότου εμφανιστούν τα μεμονωμένα κελιά που εφάπτονται στην άνω επιφάνεια.



Σχήμα 5.20: Κελιά πλέγματος στην περιοχή ανάπτυξης του κρουστικού κύματος.

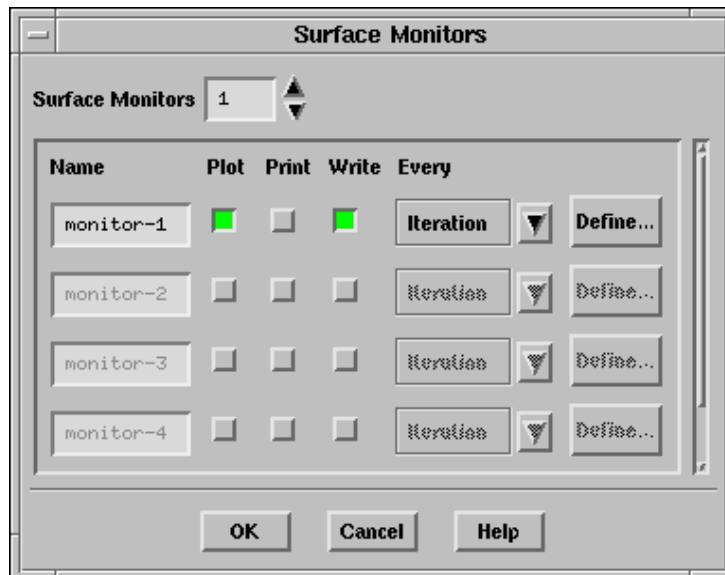
Στη συνέχεια δημιουργείται μία σημειακή επιφάνεια σε ένα κελί που εφάπτεται στην επιφάνεια, η οποία θα χρησιμεύσει στην παρακολούθηση του συντελεστή επιφανειακής τριβής.

Στο παράθυρο διαλόγου της εντολής “Point Surface”, ορίζουμε τις συντεταγμένες 0,53 για x_0 και 0,051 για y_0 , ενώ ονομάζουμε τη σημειακή επιφάνεια “point – 4”.



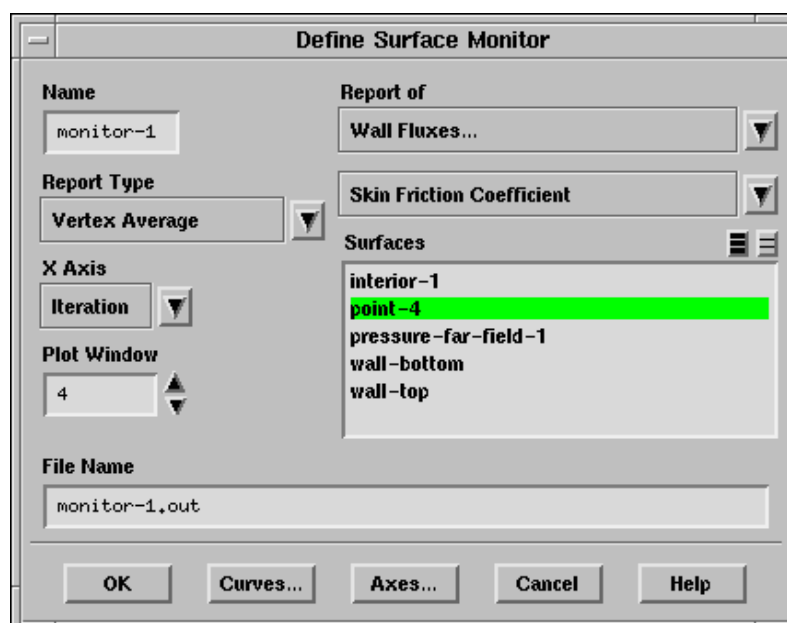
Σχήμα 5.21: Δημιουργία σημειακής επιφάνειας.

Ακολουθεί η δημιουργία ενδείκτη επιφάνειας. Αυξάνουμε το πλήθος των ενδείκτων από 0 σε 1 και στη συνέχεια ενεργοποιούμε τις επιλογές “Plot” και “Write”.



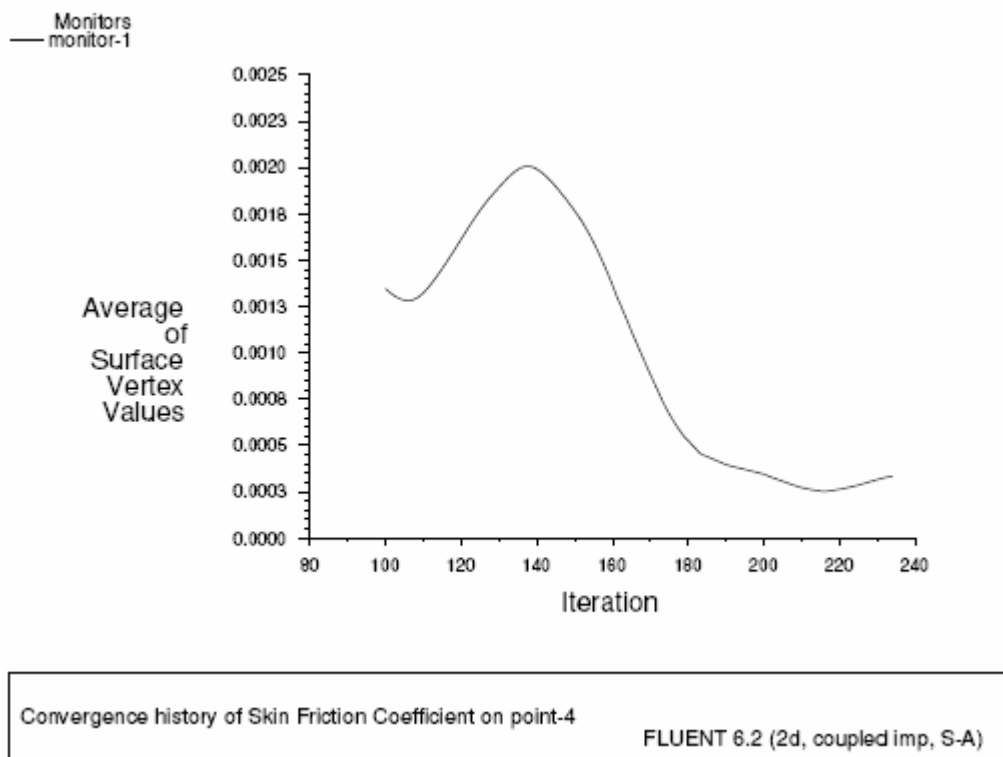
Σχήμα 5.22: Διαθέσιμοι ενδείκτες επιφάνειας.

Στη συνέχεια θα καθοριστεί ο ενδείκτης επιφάνειας. Στις επιλογές αναφοράς τίθεται “ Wall Fluxes” και “skin Friction Coefficient”. Στη λίστα επιφανειών επιλέγεται η επιφάνεια που δημιουργήθηκε νωρίτερα με την ονομασία “point - 4”. Επίσης στη λίστα του τύπου αναφοράς επιλέγεται “Vertex Average” και η τιμή στην επιλογή “Plot Window” αυξάνεται σε 4. Τέλος ορίζεται ο ενδείκτης της επιφάνειας.



Σχήμα 5.23: Καθορισμός ενδείκτων επιφάνειας.

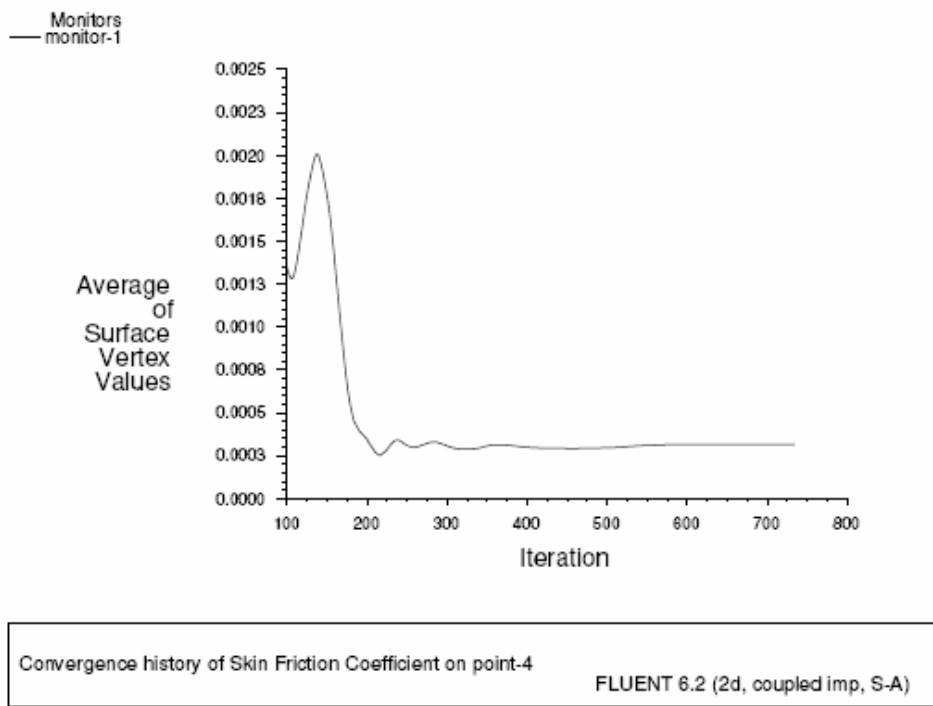
Οι υπολογισμοί συνεχίζονται ορίζοντας πλέον οι επαναλήψεις να είναι 200. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι μετά από 100 περίπου επαναλήψεις, τα εναπομείναντα κριτήρια είναι ικανοποιητικά και το πρόγραμμα διακόπτει τις επαναλήψεις αυτόματα. Ο ενδείκτης της επιφανειακής τριβής δείχνει ότι ο συντελεστής επιφανειακής τριβής στη σημειακή επιφάνεια “point – 4” δεν έχει συγκλίνει όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



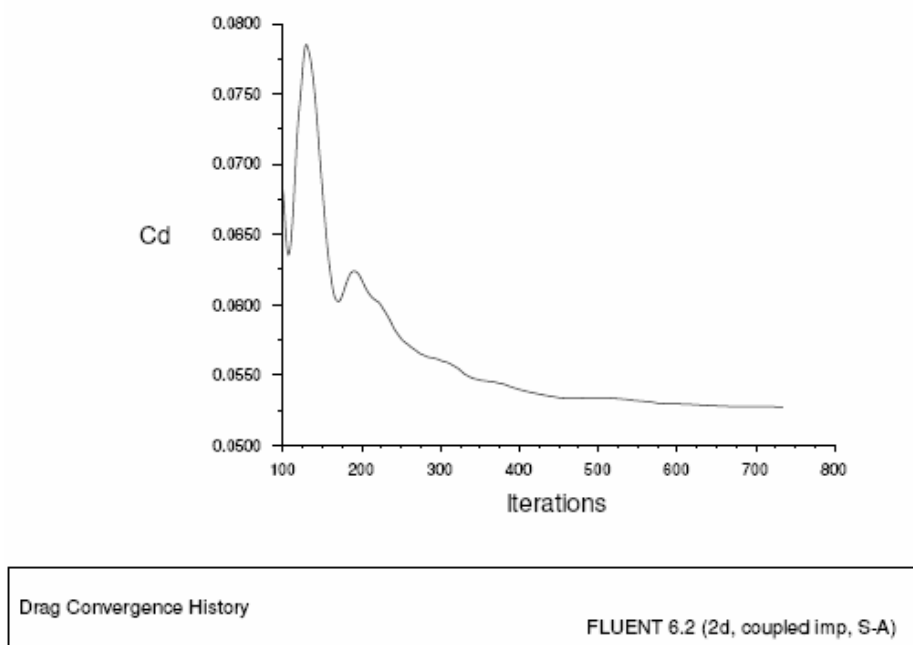
Σχήμα 5.24: Αδυναμία σύγκλισης της λύσης του συντελεστή επιφανειακής τριβής.

Στην περίπτωση αυτή, τα κριτήρια σύγκλισης για το *Τροποποιημένο Ιξώδες Τύρβης* μειώνονται και έπειτα συνεχίζονται οι υπολογισμοί.

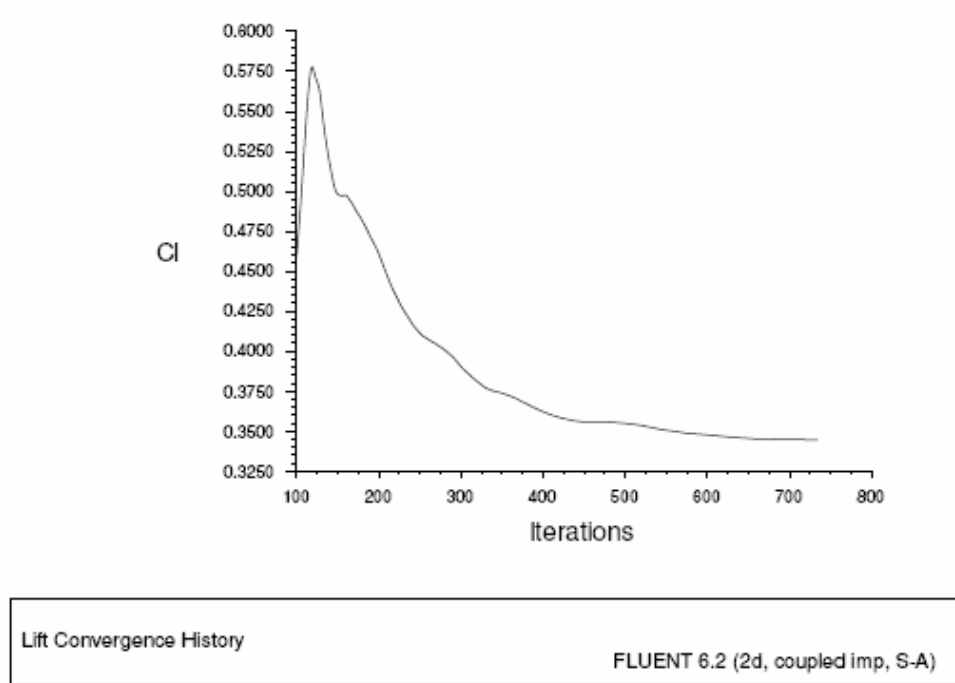
Τα κριτήρια σύγκλισης μειώνονται για το *Τροποποιημένο Ιξώδες Τύρβης* στην τιμή $1e - 7$ και οι υπολογισμοί συνεχίζονται, ορίζοντας αυτή τη φορά οι επαναλήψεις να είναι 500.



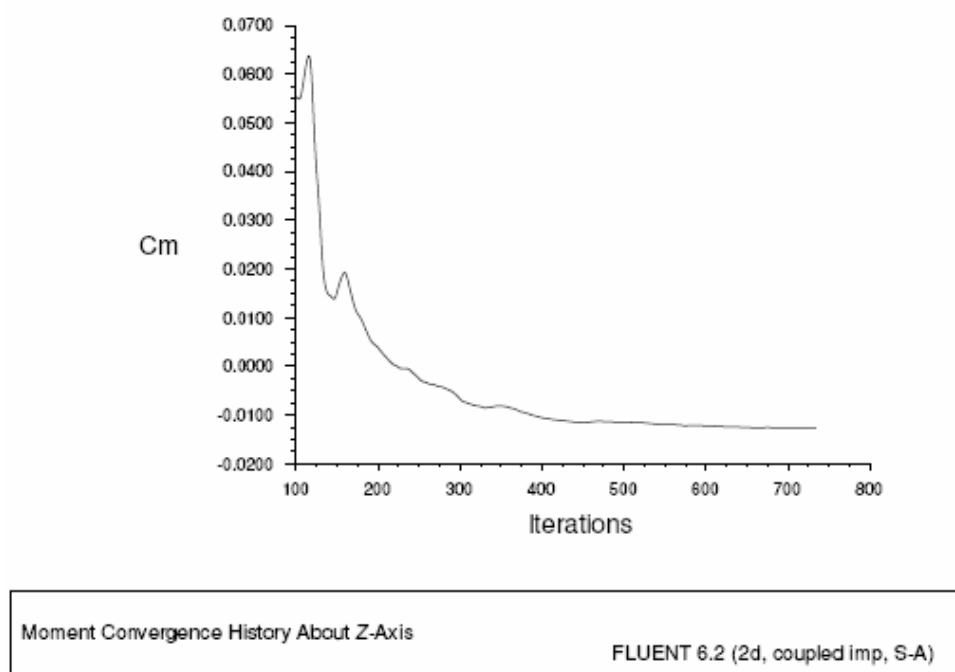
Σχήμα 5.25: Σύγκλιση της λύσης του συντελεστή επιφανειακής τριβής.



Σχήμα 5.26: Σύγκλιση της λύσης των δυνάμεων αντίστασης.



Σχήμα 5.27: Σύγκλιση της λύσης των δυνάμεων άνωσης.



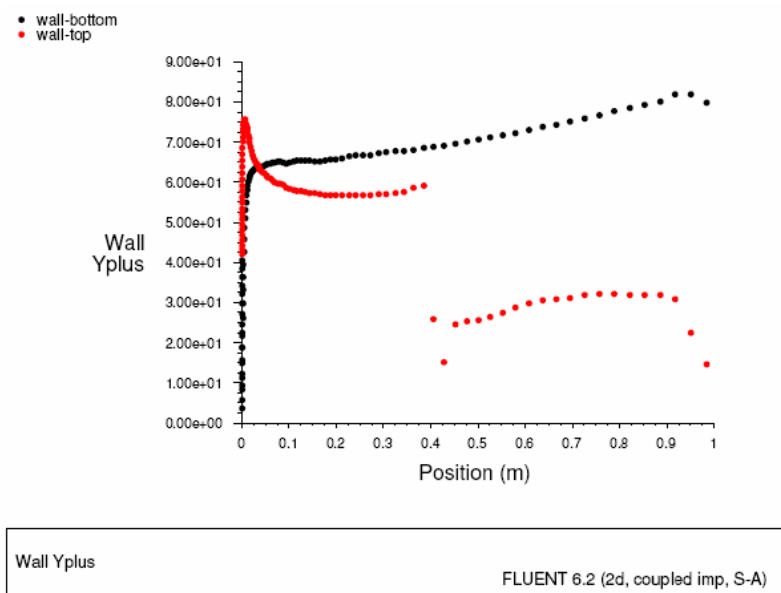
Σχήμα 5.28: Σύγκλιση της λύσης του συντελεστή ροπής.

Βήμα 7ο: Μετεπεξεργασία.

Στη συνέχεια γίνεται γραφική αναπαράσταση της κατανομής y^+ στην αεροτομή. Στο παράθυρο διαλόγου της εντολής “Solution XY Plot”, επιλέγουμε για τη συνάρτηση στον άξονα Y τις παραμέτρους “Turbulence” και “Wall Yups” και στη λίστα των επιφανειών “Wall Bottom” και “Wall Top”. Δεν επιλέγουμε την παράμετρο αρίθμησης των κόμβων.

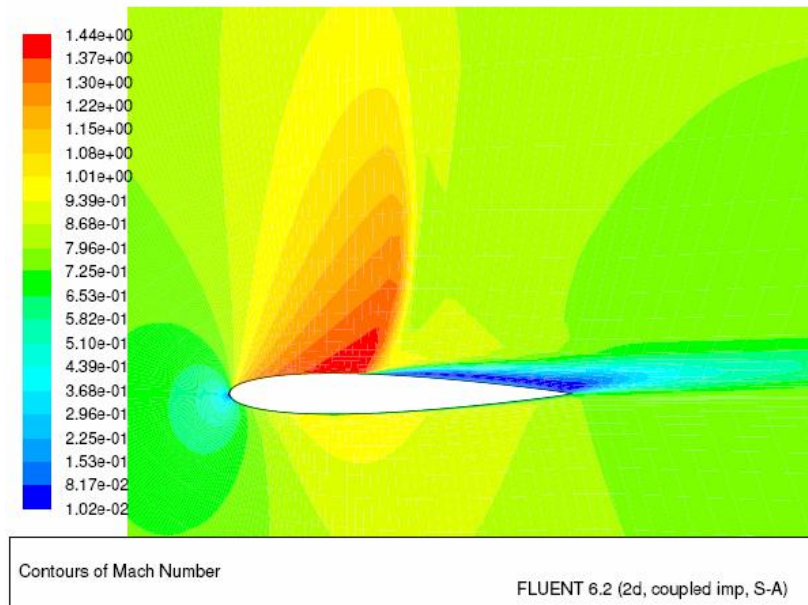
Οι τιμές της y^+ εξαρτώνται από την ανάλυση του πλέγματος και τον αριθμό Reynolds της ροής, και έχουν πολύ μεγάλη σημασία μόνο όσον αφορά τα οριακά στρώματα. Οι τιμές της y^+ στα κελιά που εφάπτονται στα τοιχώματα αναδεικνύουν το γεγονός ότι η διατμητική τάση στο τοίχωμα έχει υπολογιστεί. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο “Spalart – Allmaras” παρατηρείται ότι η y^+ στα κελιά που εφάπτονται στα τοιχώματα είναι είτε πολύ μικρή είτε πολύ μεγάλη, περίπου 30, ίσως και μεγαλύτερη.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει πως με εξαίρεση λίγες μικρές περιοχές οι τιμές της y^+ είναι μεγαλύτερες από 30, και για τις περισσότερες από αυτές τις περιοχές δεν πέφτουν πολύ κάτω από τις τιμές αυτές. Συνεπώς συμπεραίνεται πως η ανάλυση του πλέγματος είναι αποδεκτή.



Σχήμα 5.29: Γραφική παράσταση της y^+ - αποδοχή του πλέγματος.

Στη συνέχεια γίνεται η αναπαράσταση των καμπύλων του αριθμού Mach. Επιλέγεται η ταχύτητα και ο αριθμός Mach και απενεργοποιείται η εντολή “Draw Grid”. Η γραφική αναπαράσταση που προκύπτει είναι η παρακάτω, στην οποία παρατηρείται μία ασυνέχεια που στην προκειμένη περίπτωση είναι κρουστικό κύμα.



Σχήμα 5.30: Αναπαράσταση των περιγραμμάτων του αριθμού Mach.