

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ  
Σ.Τ.Ε.Φ., ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«Σχεδιασμός Αεροσήραγγας Αυτοκινήτου –  
Μετρήσεις και Τεχνικές Ελέγχου»**

Εισηγητής: Ι. ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

Σπουδαστές: 1) ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΠΑΥΛΟΣ  
2) ΓΑΛΑΝΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ  
3) ΚΑΠΕΡΩΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ



ΠΑΤΡΑ, 2004

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	7072
----------------------	------

# **1<sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.1.1	Εισαγωγή – η ανάγκη για αεροσήραγγα οχημάτων	
1.1.2	Προσομοίωση σε διάφορες όψεις της οδήγησης στο δρόμο	
1.2	Μερικές βασικές αρχές της τεχνικής αεροσηράγγων	
1.2.1	Επιλογή των τεχνικής	9
1.2.2	Εκτιμήσεις διαμόρφωσης	9
1.2.3	Ιδιότητες Των Θεμελιωδών Τμημάτων	
1.2.3.1	Σχεδιάζοντας μια Δοκιμή	11
1.2.3.2	Τμήμα Δοκιμής	12
1.2.3.3	Ακροφύσιο	23
1.2.3.4	Προσδιορισμός Της Ταχύτητας Του Αέρα	28
1.2.3.5	Θάλαμος τμήματος δοκιμής	34
1.2.3.6	Εναλλάκτης θερμότητας και φωτίο ήλιου	35
1.2.3.7	Εξοπλισμός	35
1.3	Περιορισμοί της προσομοίωσης	
1.3.1	Συστηματικά λάθη	36
1.3.2	Αναπαράσταση του δρόμου	37
1.3.3	Διορθώσεις αεροσηράγγων	
1.3.3.1	Στόχοι	60
1.3.3.2	Κλειστό τμήμα δοκιμής	63
1.3.3.3	Ανοιχτό τμήμα δοκιμής	68
1.3.3.4	Αποτελέσματα οριακού στρώματος	71
1.3.3.5	Παρεκκλιμένο της πορείας πρότυπο	71
1.3.3.6	Θερμικές δοκιμές	72
1.4	Δοκιμές με τα πρότυπα μειωμένης-κλίμακας	
1.4.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	72
1.4.2	Λεπτομέρειες της πρότυπης τεχνικής κατασκευής και δοκιμής	74
1.4.3	Αποτελέσματα του αριθμού Reynolds	79
1.5	Υπάρχουσες αεροσήραγγες αυτοκινήτων	
1.5.1	Ταξινόμηση των εγκαταστάσεων δοκιμής	89
1.5.2	Πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγες	93
1.5.3	Αεροσήραγγες για πρότυπα μειωμένης κλίμακας	102
1.5.4	Κλιματολογικές σήραγγες	104
1.5.5	Δυναμόμετρα με ανεμιστήρα	105

### **1.1.1 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.

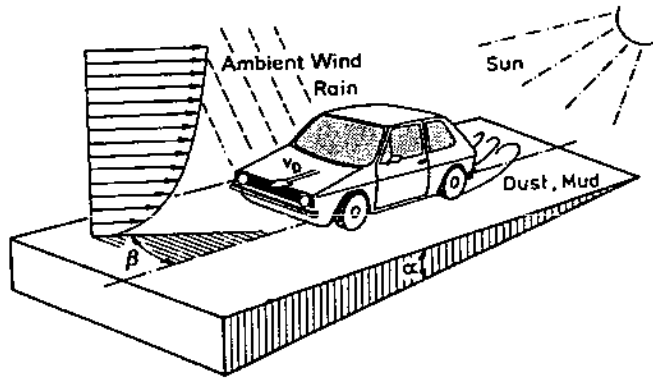
Ωστόσο το σχήμα ενός οχήματος σταθεροποιείται πολύ νωρίς κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του ,έτσι η αεροδυναμική του ,πρέπει να εξετασθεί ακόμα νωρίτερα.

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 δυνατό 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 1.1 ,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 1.1 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 άνεμους (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. Πάραυτα, 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 παροχές πίεσης είναι δύσκολο να προφυλαχτούν από τη σκόνη και το κόστος καθαρισμού τους είναι πολύ υψηλό για μεγάλες αεροσήραγγες.

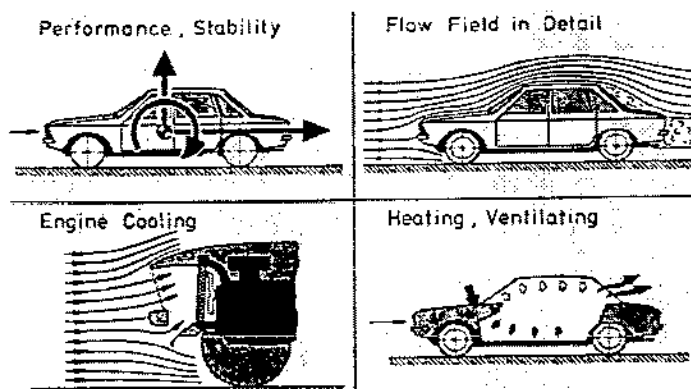
Κατά τη διάρκεια πειραμάτων θερμότητας η μηχανή πρέπει δουλεύει σε στροφές ανάλογες με τις στροφές που θα δούλευε την ανάλογη στιγμή στο δρόμο. Ένα δυναμόμετρο πλαισίου πρέπει να είναι διαθέσιμο όπου να εφαρμόζει σε αυτοκίνητα με εμπρός και με πίσω κίνηση. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του οχήματος 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 κλίμακας 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.

### 1.1.2 Προσομοίωση σε διάφορες όψεις της οδήγησης στο δρόμο

Ανάλογα με το σκοπό της η αεροδυναμική αυτοκίνητου χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Οι ειδικές απαιτήσεις τους έχουν οδηγήσει σε ξεχωριστές συσκευές δόκιμης που όλες μαζί , μάλλον ανακριβές , αποκαλούμε αεροσήραγγα.



Σχήμα. 1.2 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,

$$p \sim u^2$$

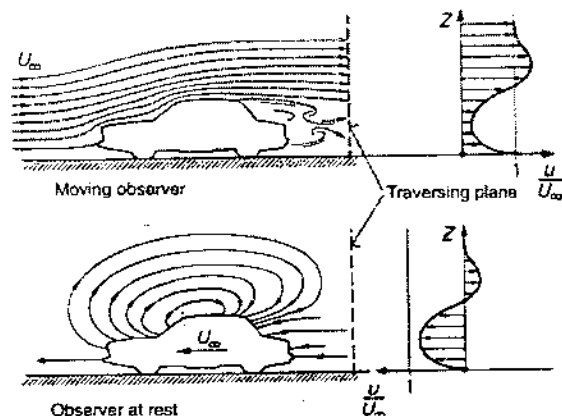
τα λάθη στη διανομή ταχύτητας του πεδίου ροής γύρω από το όχημα έχουν μια σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής. Μέσα στους προαναφερθέντες περιορισμούς ( το ομοιογενές πεδίο ροής ), η ροή του αέρα γύρω από ένα όχημα που οδηγείται στο δρόμο μπορεί να προσομοιωθεί σε μία αεροσήραγγα αρκετά καλά. 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 μετριοούνται 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", οι οποίες μας απασχολούν στο 1.3.3.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 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. Λανθασμένα αποτελέσματα και διάφορες τεχνικές είτε για την αναπαραγωγή είτε για την προσομοίωση της σχετικής κίνησης θα πούμε στο 1.3.3.

Σε ειδικές δόκιμες τα μοντέλα μπορούν να ρυμουλκηθούν μέσα από ήρεμο αέρα ομοίως και για τα μοντέλα πλοίων που ρυμουλκούνται μέσα σε ήρεμο 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 1.3** διαφορά στη σχετική κίνηση μεταξύ της οδικής οδήγησης και της δοκιμής σηράγγων 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 σχέδιο 1.2:

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.

Και οι δύο διαδρομές έχουν ακολουθηθεί και περιγράφονται λεπτομερώς στην παράγραφο 1.5.

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 κλασσική 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 παραμελούνται 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 δοκιμής με το δρόμο πρέπει να πραγματοποιηθούν για να αποκαλύψουν και να προσδιορίσουν τις ανεπάρκειες οποιουδήποτε συγκεκριμένου είδους προσομοίωσης.

## **1.2 Μερικές βασικές αρχές της τεχνικής αεροσηράγγων**

### **1.2.1 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.

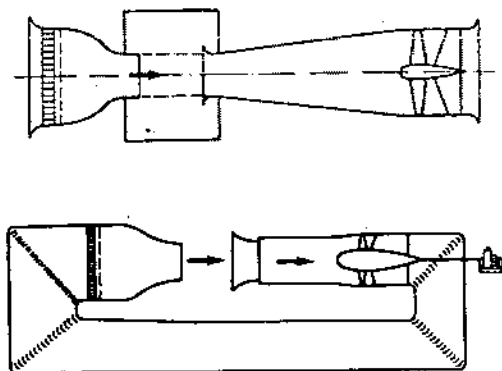
Οι R.C. PANKHURST και D.W.HOLDER μελέτησαν τις έρευνες της τεχνικής αεροσηράγγων μέχρι το 1965, αλλά χωρίς την εκτίμηση για τις απαιτήσεις των αυτοκινήτων. Από τότε έχει σημειωθεί ουσιαστική πρόοδος στην τεχνολογία υποηχητικών αεροσηράγγων. Η τεχνική μετρήσεων - με την εξαίρεση κάποιου "κλασσικού" ελέγχου- έχει βελτιωθεί συνολικά. Το πώς να εκτελούνται οι δοκιμές στην αεροσήραγγα έχουν περιγραφεί από τον W.H. RAY και τον A.POPE, 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 (C.KRAMER). Παρακάτω θα περιγραφούν μόνο εκείνες οι πτυχές της τεχνικής αεροσηράγγων που είναι χαρακτηριστικές για τις εφαρμογές στα αυτοκίνητα..

### **1.2.2 Εκτιμήσεις διαμόρφωσης**

Η αρχή σχεδίου και λειτουργίας μιας αεροσήραγγας προκύπτει από το σχέδιο 1.4. 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 σχεδίου 1.4). Ο G. EIFFEL την ίδια εποχή με τον PRANDTL, προτίμησαν ένα ανοικτό κύκλωμα: ο αέρας λαμβάνεται από το περιβάλλον, απορροφείται 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 καθυσυχασμού. Και τα τρία είδη χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες αεροσήραγγες αυτοκινήτων, τα παραδείγματα θα παρουσιαστούν στην παράγραφο 1.5. Κάθε ένας έχουν

εγγενή πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, και αυτά μπορούν να συγκριθούν ποσοτικά μεταξύ των τριών τύπων μόνο για συγκεκριμένες εφαρμογές.



**Σχήμα 1.4** 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.

### ***1.2.3 Ιδιότητες Των Θεμελιωδών Τμημάτων***

#### ***1.2.3.1 Σχεδιάζοντας μια Δοκιμή***

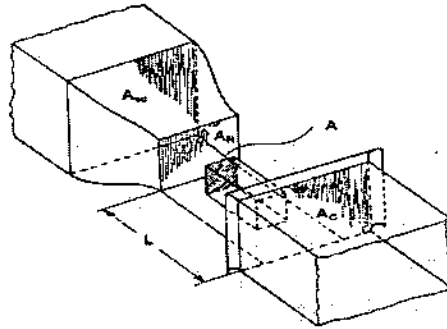
Όταν σχεδιάζουμε μια δοκιμή, ο χρήστης της αεροσήραγγας θα πρέπει να έχει απαντήσεις στις επόμενες 4 ερωτήσεις:

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 1.5. 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 επιλεγεί, ο χρήστης της μένει μόνο με την ερώτηση 2. Η απάντηση σε αυτήν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των επόμενων μερών της αεροσήραγγας (σχ. 1.5).

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 1.5 – 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.

### **1.2.3.2 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. 1.4)
- 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.

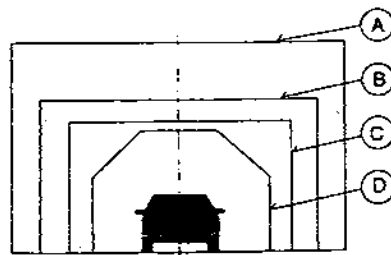
Με open-τζετ τμήματα δοκιμής δύο περαιτέρω παράμετροι είναι σημαντικοί:

- 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  $\phi$ , 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.

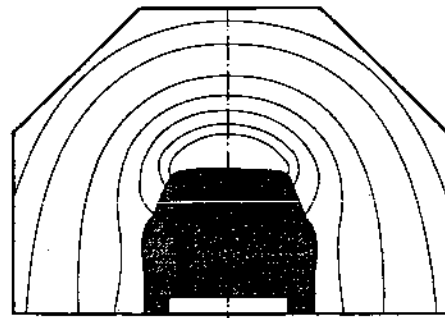
Όταν οι πρώτες αεροσήραγγες οχημάτων πλήρους κλίμακας κατασκευάστηκαν, ο λόγος εμπόδισης μεταφέρθηκε από την αεροναυτική:  $\phi=0.05$ . Με τυπική για αυτοκίνητο πρόσθια επιφάνεια  $A=2\text{m}^2$ , αυτό οδήγησε σε διατομή ακροφυσίου  $A_N=40\text{m}^2$ . Αργότερα, συγκριτικές μετρήσεις και εξετάσεις 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. 1.6. 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. Ο A. MORELLI, όταν σχεδίασε τη σήραγγα του Pininfarina ( $11\text{m}^2$ ), επέλεξε ένα ημικύκλιο με τις κάτω άκρες στρογγυλεμένες. Η διαίσθησή του ήταν να δημιουργήσει μια διατομή που να είναι όμοια με το σχήμα της πρόσθιας όψης ενός αυτοκινήτου. Κόβοντας τις γωνίες από το παραλληλόγραμμο, ο L.J. JANSSEN επέλεξε η διατομή της αεροσήραγγας ακουστικής της BMW ( $10\text{m}^2$ ) να πλησιάσει το σχήμα των ισοβαρών γύρω από το αυτοκίνητο (σχ. 1.7). Για αυτό το λόγο στο 0.7 ο λόγος ύψους προς πλάτος είναι λίγο μεγαλύτερος από το συνηθισμένο 0.66.



Σχήμα 1.6 – Διατομή τμημάτων δοκιμών από διάφορες αεροσήραγγες αυτοκινήτων.

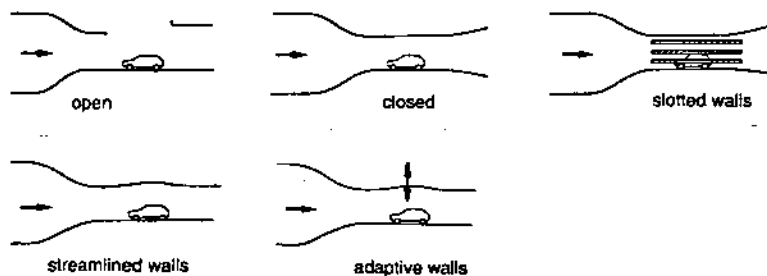




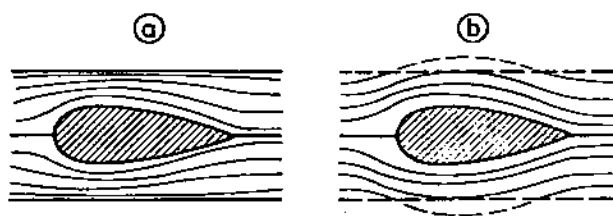
**Σχήμα 1.7 – Ταιριάζοντας τη διατομή του ακροφυσίου με τις ισοβαρείς γύρω από το αυτοκίνητο, L.J. JANNSEN]**

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. 1.8. 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. 1.9. 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 από τον R. KÜNSTER και J. POTHOFF και αναπαρίσταται στο σχ. 1.10.



**Σχήμα 1.8 – Τα διάφορα είδη των ορίων τμημάτων δοκιμής.**



**Σχήμα 1.7 – 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**

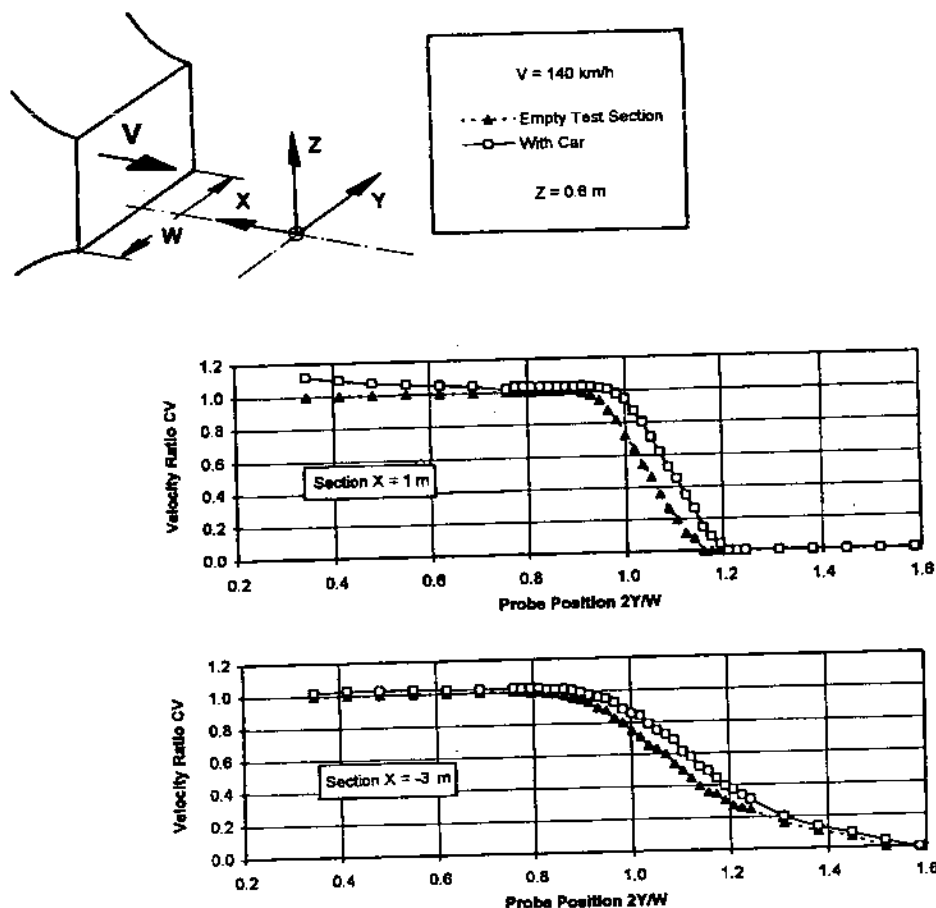
Αντιθέτως, σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής οι γραμμές ροής περιορίζονται από τα τοιχώματα και έτσι η τοπική ταχύτητα κοντά στο όχημα αυξάνεται. Και στις 2 περιπτώσεις (ανοιχτό και κλειστό τμήμα δοκιμών) το αποτέλεσμα του ορίου του τζετ είναι πιο έντονο όσο πιο κοντά είναι στο μοντέλο, δηλαδή όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος εμπόδισης  $\phi$ . Η υποκίνηση για τους διάφορους τύπους ορίου τμημάτων δοκιμών φαίνεται στο σχ. 1.8 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. Οι διορθώσεις για να αντισταθμίσουν τις φυσικές διαφορές συγκρινόμενες με τη ροή του ελεύθερου αέρα περιγράφεται στη παράγραφο 1.3.3.

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 ανοιχτού τζετ σε ένα άδειο τμήμα δοκιμής δεν υπάρχει, όπως φαίνεται στο σχ. 1.11. 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 ειπώθηκε από τους V. SCHULZ, HAUSMANN και J.D.VAGT και φαίνεται και στο σχήμα 1.12(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.



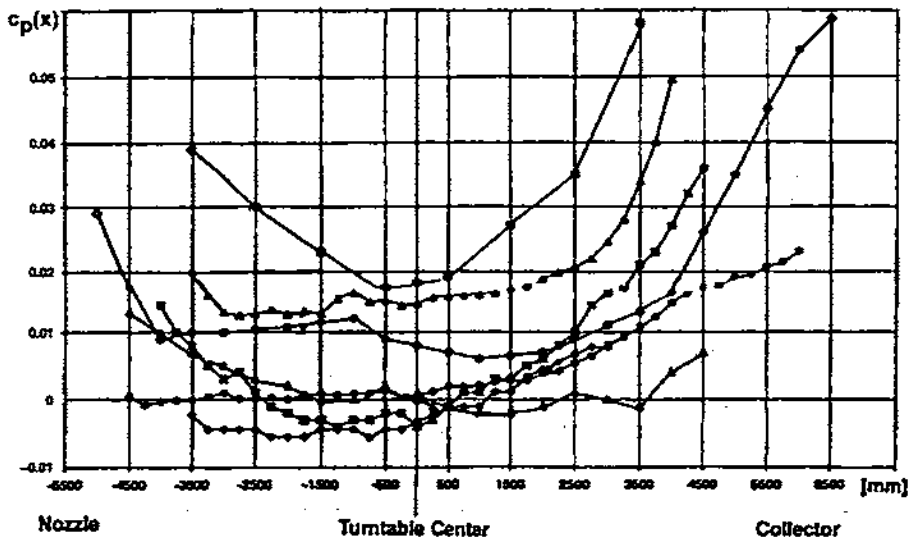
Σχήμα 1.10 Το όριο ενός ελεύθερου τζετ που μετατοπίζεται από ένα πρότυπο

P. KUNSTNER και J. POTHOFF

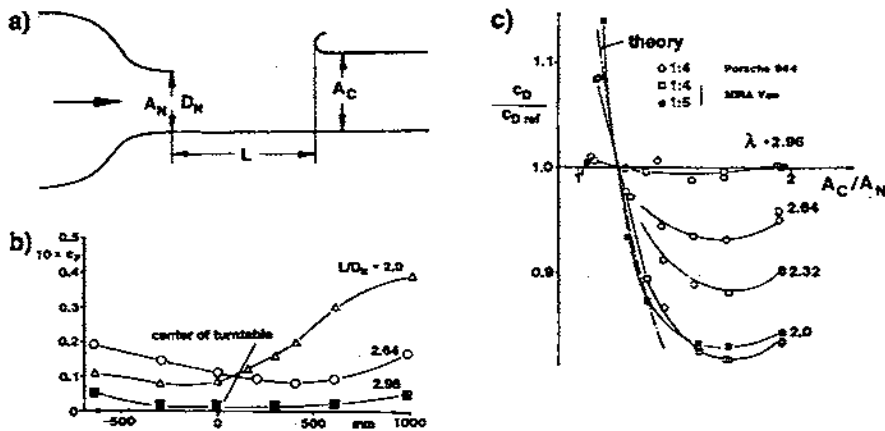
Με μια χαρακτηριστική τιμή  $\lambda = 2,0$  το μη-διαστατικό μήκος τμήματος δοκιμής τους είναι μάλλον μικρά, και μερικά από αυτά παρουσιάζουν θετική καμπύλη πίεσης στη θέση του προτύπου (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής). Συνεπώς, η μετρημένη οπισθέλκουσα είναι πάρα πολύ χαμηλή. Το πόσο σημαντικά επηρεάζεται η μετρημένη οπισθέλκουσα από το μήκος  $L$  του τμήματος δοκιμής και το  $A_C$  της περιοχής της εισόδου του συλλέκτη φαίνονται στο σχέδιο 1.12 ( $\gamma$ ). 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, ο C.KRAMER έχει επιλύσει τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας

της εισόδου που βοηθάνε στην ομαλή ροή εισόδου αλλά και αποτρέπουν τις μικρές συχνότητας αστάθειας της ροής.

Το δεύτερο ιδιαίτερο πλεονέκτημα που αποδόθηκε προηγουμένως στο ανοικτό τμήμα δοκιμής ήταν μια χαμηλότερη απόλυτη αξία της διόρθωσης. Εντούτοις, αυτό το επιχείρημα δεν κρατά 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 1.11 Συντελεστής στατικής πίεσης  $C_p(x)$  κατά μήκος του άξονα διάφορων πραγματικού μεγέθους αυτοκίνητων αεροσηράγγων, E. MERCKER και τον WIEDEMANN.



Σχήμα 1.12 Επίδραση α) του μήκους  $L$  τμημάτων δοκιμής και  $A_c$  περιοχής κολπίσκων συλλεκτών β) στη στατική πίεση κατά μήκος του άξονα σηράγγων και γ) η μετρημένη οπισθέλκουσα  $D$ , από τους F.K.SCHULZ-HAUSMANN και J.D VAGT.

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  $U_{00}$  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. Άλλα 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 κάμπτεται 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. εντούτοις, 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 απορεύματος, 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 σχέδιο 1.1, 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.

Η ιδέα των διαμπερών τοίχων αποδίδεται στους K. WIEGHARDT και F. VANDREY. Οι διαμπερείς τοίχοι 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.

Διάφορες σήραγγες αυτοκινήτων είναι εξοπλισμένες με τους διαμπερείς τοίχους, τα παραδείγματα δίνονται στην παράγραφο 1.5. Σύμφωνα με το C. KRAMER., η εμπειρία είναι όχι πάντα θετική.

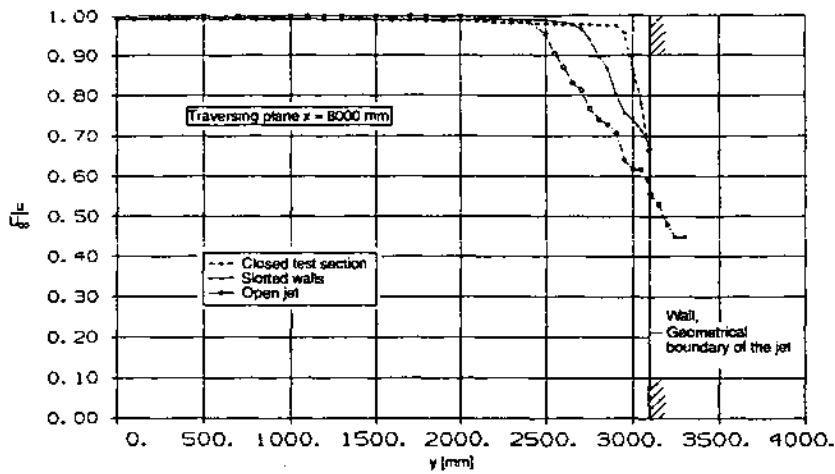
Το (μη διαστατικό) πλάτος των σχισμών, η αποκαλούμενη λόγος ανοικτής περιοχής που ορίζεται ως ανοικτή στη συνολική περιοχή της επιφάνειας, πρέπει να καθοριστεί από τις δοκιμές βαθμολόγησης που παράγουν μια διανομή πίεσης σε ένα πρότυπο αυτοκινήτου που αντιστοιχεί στον ελεύθερο αέρα όσο το δυνατόν περισσότερο.

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. Μια ημιεμπειρική μέθοδος για τις κύριες διαστάσεις ενός τμήματος δοκιμής με διαμπερείς τοίχους έχει παραχθεί από τον L.N. GOENKA.

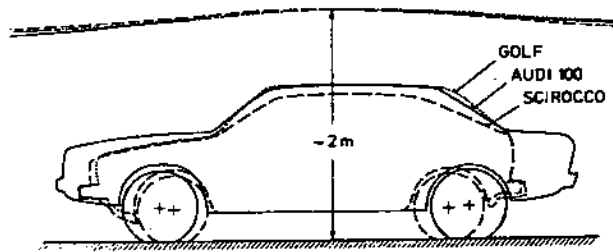
Μία μέθοδος αποφυγής της μεγάλης διόρθωσης, απαραίτητης για τη παρεμπόδιση του απορευμάτος και του στερεού σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής είναι να δοθεί αεροδυναμική μορφή στους τοίχους του. Σε αυτήν την περίπτωση υποτίθεται ότι το σχέδιο ροής σε μια ορισμένη απόσταση από ένα όχημα (και τα απορευματά του), 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 ροϊκές γραμμές σε ένα ύψος 2 μ επάνω από το δάπεδο, που σχεδιάζονται (από τις φωτογραφίες) στο σχέδιο 1.14 για τρία αυτοκίνητα διαφορετικού μεγέθους και μορφής, διαφέρουν ελαφρώς. Ο L.G. STAFFORD έχει καταδείξει (με μια αριθμητική μέθοδο) πόσο αποδοτική μπορεί να είναι η αεροδυναμική σχεδίαση των τοίχων των σηράγγων. Σύμφωνα με αυτόν, 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 1.13 Κατανομή ταχύτητας για τρία διαφορετικά είδη οριακών τμημάτων δοκιμής: ανοικτά, κλειστά και με διαμπερή τοιχώματα.**



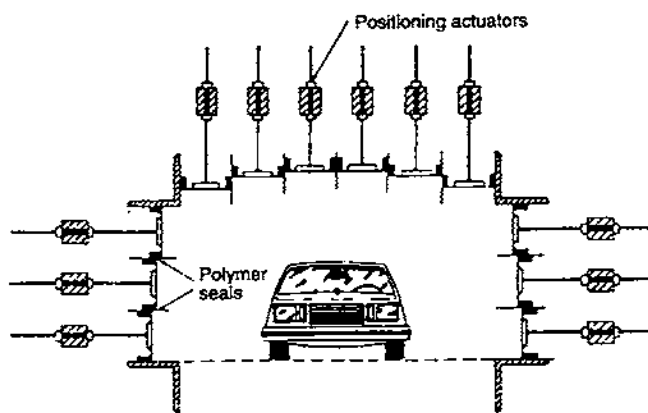
**Σχήμα 1.14 Σύγκριση των πεδίων ροής τριών διαφορετικών επιβατικών αυτοκινήτων, που χρησιμοποιούν επιλεγμένη ροϊκή γραμμή στο διάμηκες. Οι ροϊκές γραμμές σχεδιάσθηκαν μετά από τις εικόνες ιχνών καπνού που ελήφθησαν στη μεγάλη αεροσήραγγα της VOLKSWAGEN.**

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 σχέδιο 1.15. Τα περιγράμματά τους αντιστοιχήθηκαν στο σχήμα των ροϊκών 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 λουρίδες όπως ήταν στον ελεύθερο αέρα. Οι L.N. GOENKA και M.O. VARNER έχουν αναπτύξει έναν αλγόριθμο που απαιτεί μόνο ένα βήμα επανάληψης. Το σχέδιο 1.16 δίνει ένα παράδειγμα των περιγραμμάτων των τοίχων που υπολογίζονται μετά από αυτήν την διαδικασία. Σύμφωνα με τους GOENKA και VARNER καμία διόρθωση παρεμπόδισης δεν ήταν απαραίτητη ακόμη και για ένα λόγο παρεμπόδισης

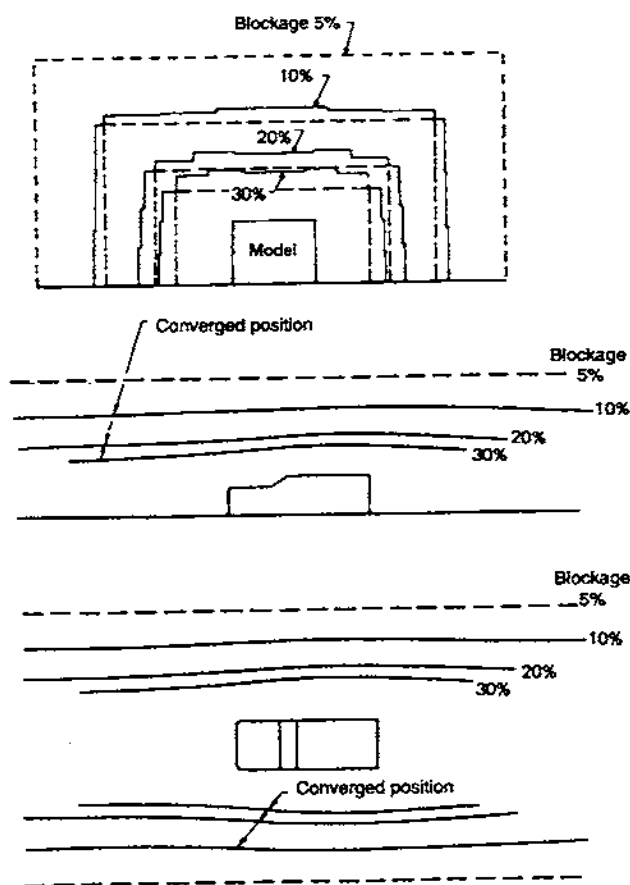


20%. Η ασύμμετρη ροή μπορεί επίσης να αντιμετωπιστεί. Όταν ένα αυτοκίνητο παρεκκλίνει της πορείας του, οδηγούμαστε σε ένα ασύμμετρο τμήμα δοκιμής.

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 1.15 Κλειστό τμήμα δοκιμής με προσαρμοσμένους τοίχους



Σχήμα 1.16 Περιγράμματα των προσαρμοσμένων τοίχων για τις γεωμετρικές αναλογίες παρεμπόδισης 5-30% από τους L.M. GOENKA και ο M.θ. VARNER

### 1.2.3.3 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 1.1, οι απαιτήσεις (προδιαγραφές) για αυτές τις ιδιότητες της ροής δεν ήταν ακόμα διατυπωμένες σε λογική βάση για τις αεροσήραγγες αυτοκινήτων. Εντούτοις, τα ακόλουθα στοιχεία είναι χαρακτηριστικά για τις υπάρχουσες σήραγγες :

Επίπεδο σχεδιάγραμμα ταχύτητας.

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  $\alpha, \beta \leq \pm 0.5\%$ .

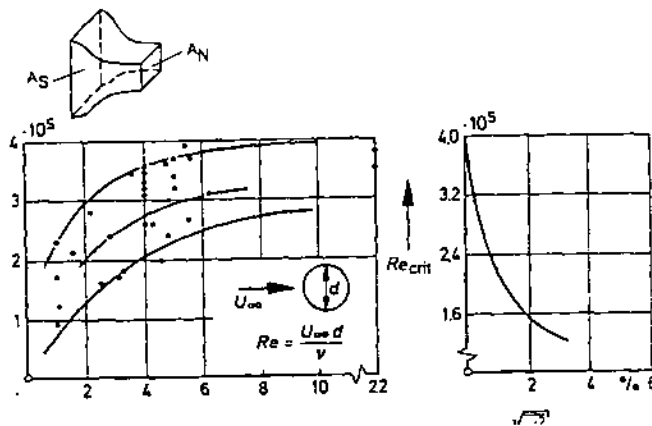
Επίπεδο τύρβης  $Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_{\infty}} \leq \pm 0.5\%$ .

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 σχέδιο 1.17:  $\kappa = A_S / A_N$ ). 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  $\kappa$  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 1.17. Κρίσιμος αριθμός Reynolds και επίπεδο αναταραχής υπαρχόντων σπράγγων αέρα με τις διαφορετικές αναλογίες συστολής ακροφυσίων.**

Εντούτοις, ο λόγος συστολής  $\kappa$  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 (παράγραφος 2.2.3). Η κλασική 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 σχεδίου 1.17, το  $Re_{CRIT}$  είναι μια μοναδική λειτουργία του επιπέδου τύρβης  $Tu$ . Το σχήμα στην αριστερή πλευρά του σχεδίου 1.17 συσχετίζει το  $Re_{CRIT}$  με την λόγο συστολής  $\kappa$ . Η λειτουργία παρουσιάζει χαρακτηριστικό κορεσμού. Τα στοιχεία προέρχονται από έναν μεγάλο αριθμό υπαρχων 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

ακροφύσιου δεν επηρεάζεται από τον ανεμιστήρα, τον διαχύτη, και τις περιστρεφόμενες βαλβίδες κ.λ.π., λέγεται ότι ένας ακόμα μικρότερος λόγος συστολής είναι ικανοποιητικός:  $k = 2-3$ . 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.

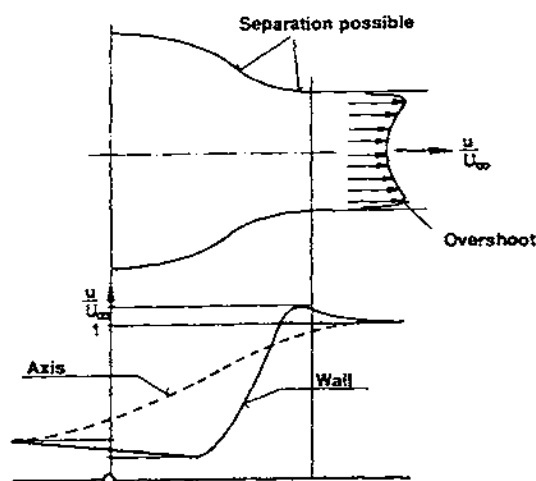
*Κατά το σχεδιασμό ενός ακροφυσίου, δύο στοιχεία πρέπει να εξεταστούν:*

Για να μειωθεί η δευτεροβάθμια ροή στις γωνίες ενός ορθογώνιου ακροφυσίου, η μορφή των διατομών στην είσοδο και στην έξοδό 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 σχέδιο 1.18, 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 έξοδό του θα είναι παχύ (λόγω του χωρισμού και της επανένωσης). Επιπλέον, το σχεδιάγραμμα ταχύτητας μπορεί να παρουσιάσει μια καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχέδιο 1.18. 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 ξεπεράστηκε από μια διαδικασία που αναπτύχθηκε από τον T. MORELL. 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.

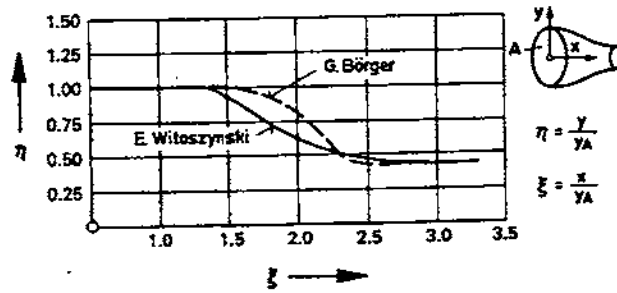


Σχήμα 1.18 Η ταχύτητα μέσα σε ένα ακροφύσιο και στην έξοδό του (σχηματική αναπαράσταση).

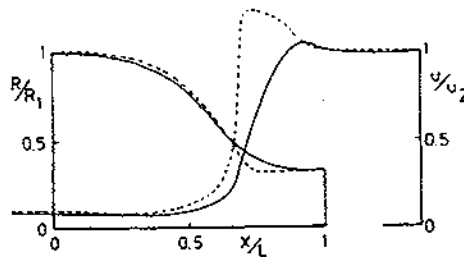
Σήμερα, χρησιμοποιείται η διαδικασία του MORELL για το αρχικό σχεδιάγραμμα ενός ακροφυσίου, αλλά κατά τη διάρκεια του λεπτομερούς σχεδίου συμπληρώνεται με τις πιο προηγμένες μεθόδους όπως περιγράφεται παρακάτω.

Αυτές οι μέθοδοι ακολουθούν τη "κλασική" έννοια δύο ζωνών ροής. Η ροή στον πυρήνα υπολογίζεται από την πιθανή θεωρία. Η τριβή στον τοίχο λαμβάνεται υπόψη από έναν κώδικα οριακού στρώματος. Τα πρώτα αποτελέσματα σύμφωνα με αυτήν την φιλοσοφία δημοσιεύθηκαν από το G. G. BORGER. 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 σχέδιο 1.19). Πραγματικά, τα περιγράμματα BORGER είναι παρόμοια με του MORELL, όπως φαίνεται στο σχέδιο 1.20. Εντούτοις, οι δευτερεύουσες διαφορές στη γεωμετρία οδηγούν στις σημαντικές διαφορές στην ταχύτητα στον τοίχο.



**Σχήμα 1.19 Σύγκριση των περιγραμμάτων ακροφυσίων (με την αξονική συμμετρία) σύμφωνα με WITOSZYNSKI και BORGER.**



**Σχήμα 1.20 Σύγκριση των περιγραμμάτων ακροφυσίων (με την αξονική συμμετρία) και της ταχύτητας στον τοίχο σύμφωνα με τον MORELL και τον G.G. BORGER.**

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 αλλάξουν 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  $\pm 0.1\%$ .

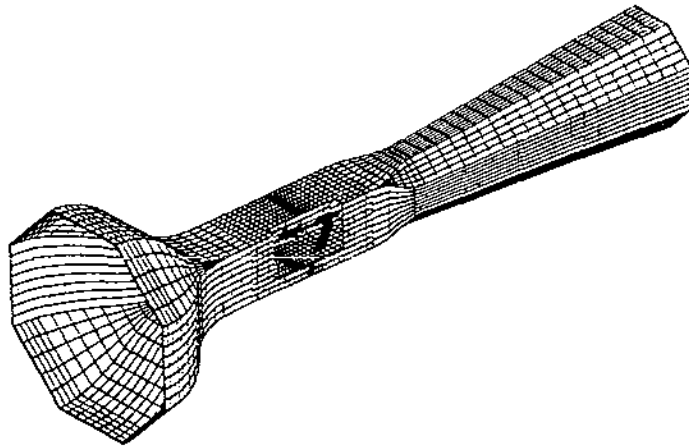
Τα πιο πρόσφατα, τρισδιάστατα ακροφύσια υπολογίστηκαν με την ενίσχυση ενός κώδικα CFD πεπερασμένων στοιχείων από τον W. BRANDSTETTER , και ο S. SCHILAWA επέκτεινε τη μέθοδο των VAN DEN VOOREN και SANDERSE σε τρισδιάστατες διατομές εκτός από ορθογώνιες. Έδειξε ότι οι "αδύνατες ζώνες" ενός ακροφυσίου είναι 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 πρόσοψης 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 σχέδιο 1.21). Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθούν οι διορθώσεις των αεροσηράγγων αλλά, φυσικά, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για το σχεδιασμό ακροφυσίων (βλ 1.3.3).

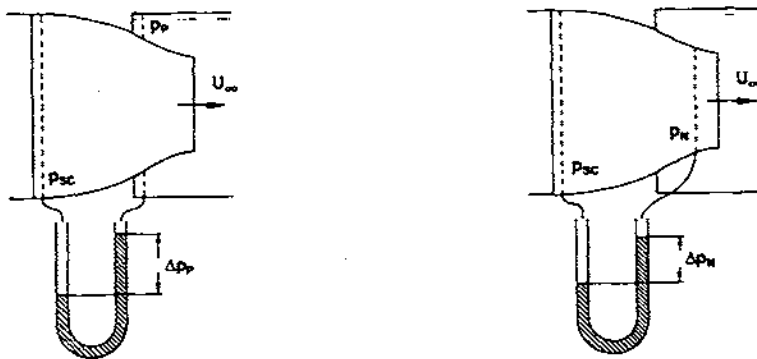
#### 1.2.3.4 Προσδιορισμός της ταχύτητας του αέρα

Η ταχύτητα του αέρα σε ένα τμήμα δοκιμής καθορίζεται με τη μέτρηση της διαφοράς  $\Delta p$  στη στατική πίεση μεταξύ της εισόδου του ακροφυσίου (δηλ., στην αίθουσα καθησυχασμού) και της εξόδου του (βλ. το σχέδιο 1.22). Το δυναμικό ύψος  $q_\infty$  μέσα στο τζετ που αφήνει το ακροφύσιο ισούται με:

$$q_\infty = \frac{\rho}{2} U_\infty^2 = k \Delta p$$



**Σχήμα 1.21 Πλακιδιοποίηση (panelization) του ακροφυσίου, κλειστό τμήμα δοκιμής με μοντελο, και διαχύτη, D. STEINBACH**



**Σχήμα 1.22 Μέτρηση του ταχύτητας  $U_\infty$  του εισερχόμενου αέρα σε ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής από το  $\Delta p_N$  (“μέθοδος ακροφυσίου”) και  $\Delta p_p$  (“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 καθυσυχασμού δεν είναι ακριβώς μηδέν και ως εκ τούτου η τοπική στατική πίεση είναι εκεί λιγότερο από τη συνολική πίεση.



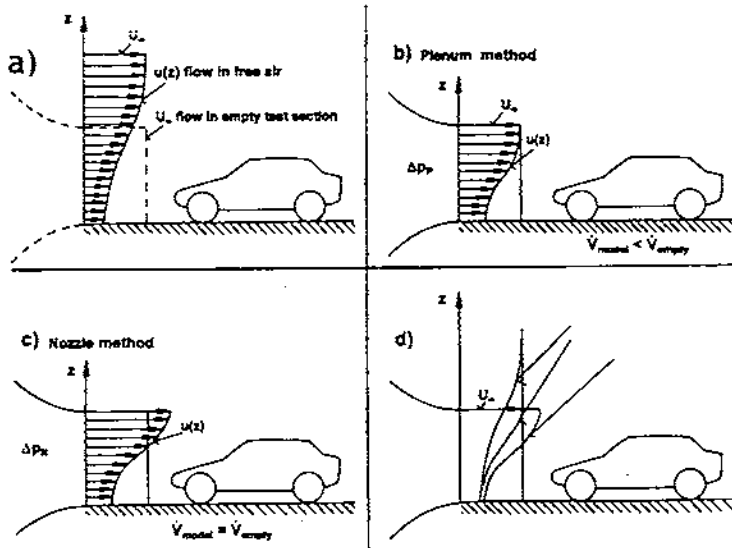
Σε μια αεροσήραγγα με ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις για τη θέση όπου η μετράται η κατάντη πίεση, για τη διαφορά πίεσης  $\Delta p$ , με την εξίσωση (1.3). Ο πρώτος είναι ο ίδιος όπως για ένα κλειστό τμήμα δοκιμής. Η πίεση  $p_N$  σε μια θέση κατάντη στο ακροφύσιο, κοντά στην έξοδο 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  $25 \text{ m}^2$  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 σχέδιο 1.23(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  $U_\infty$ . 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  $U_\infty$  βρίσκεται σε αυτήν την θέση. Στο σχέδιο 1.23(α) προσδιορίζεται από μια διακεκομμένη γραμμή.



**Σχήμα 1.23. Διόρθωση της παρεμπόδισης του ακροφυσίου: α) όχημα στον ελεύθερο αέρα, β) όχημα στο τμήμα δοκιμής, με ταχύτητα αέρα  $U_\infty$  σύμφωνα με τη μέθοδο ανάμειξης  $\Delta p_p$ , γ) όχημα στο τμήμα δοκιμής, με ταχύτητας αέρα  $U_\infty$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ακροφυσίου  $\Delta p_n$ , δ) σύγκριση του σχεδιαγραμμάτων ταχύτητας  $u(z)$  μπροστά από ένα μοντέλο, με σκίτσα από τον E. MERCKER.**

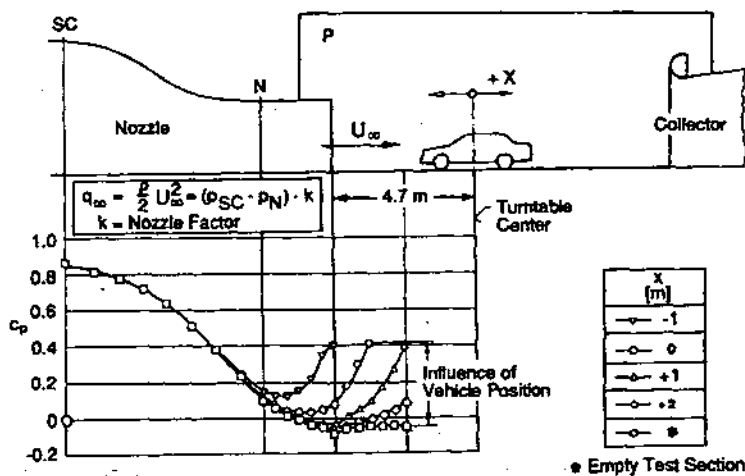
Εάν το όχημα τοποθετείται τώρα σε μια σήραγγα αέρα, στον ίδιο αξονικό σταθμό μπροστά από το όχημα (έξοδος ακροφυσίου) παρατηρείται το σχεδιάγραμμα ταχύτητας  $u(z)$  εντούτοις, δεν είναι ίδιο με ένα στον ελεύθερο αέρα. Ανήκει σε μια ταχύτητα του ομαλού εισερχόμενου αέρα που είναι διαφορετικός από το  $U_\infty$ . Η ερώτηση είναι: Πόσο μεγάλη είναι αυτή η διαφορά; Η απάντηση εξαρτάται από τη μέθοδο με την οποία έχει μετρηθεί το  $\Delta p$ .

Εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάμειξης η κατάσταση είναι όπως φαίνεται στο σχέδιο 1.23 (β). Δεδομένου ότι η πίεση της περιβάλλουσας ανάμειξης είναι παρούσα στο οριακού τζετ, ακολουθεί ότι η ταχύτητα  $U_\infty$  (της μεθόδου ανάμειξης) είναι παρόν σε αυτό το όριο επειδή σύμφωνα με τη σχέση bernoulli αυτό είναι η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μετρημένο  $\Delta p_p$  (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής αυτό το  $\Delta p_p$  παράγει ένα σταθερό  $U_\infty$  πέρα από την ολόκληρη

διατομή). Στον ελεύθερο αέρα, η ταχύτητα στην υποθετική θέση του οριακού τζετ είναι διαφορετική από  $U_{\infty}$  (βλ. το σχέδιο 1.23 (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  $U_{\infty}$  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.,  $V_{model} < V_{empty}$

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. 1.24), ο P. KUNSTNER δείχνει ότι υπάρχει μια τέτοια θέση. Εάν η διαφορά  $\Delta p_N$  πίεσης δεν επηρεάζεται όταν τοποθετείται ένα πρότυπο στο τμήμα δοκιμής το σχεδιάγραμμα ταχύτητας  $u(z)$  στην έξοδο του ακροφυσίου παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.23 (γ). Επίσης, δεδομένου ότι το  $\Delta p_N$  δεν αλλάζει ακολούθως το ποσοστό ροής όγκου μέσω του ακροφυσίου παραμένει σταθερό, δηλ.,  $V_{model} = V_{empty}$ . Λόγω της συνοχής, η συνέπεια αυτού είναι ότι η ταχύτητα στα όρια του τζετ είναι υψηλότερη από το  $U_{\infty}$  της μεθόδου ακροφυσίου στο κενό τμήμα δοκιμής.

Στο σχέδιο 1.23 (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 1.24 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 πρότυπο 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 σχέδιο 1.23 (δ) είναι παρόμοια το ένα με το άλλο, μια διόρθωση μπορεί να υπολογιστεί. Στην περίπτωση της μεθόδου ανάμειξης το  $V_{\infty}$  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. Αυτό, εντούτοις, είναι ένα θέμα "διόρθωσης αεροσηράγγων" και θα αντιμετωπιστεί στην παράγραφο 1.3.3.

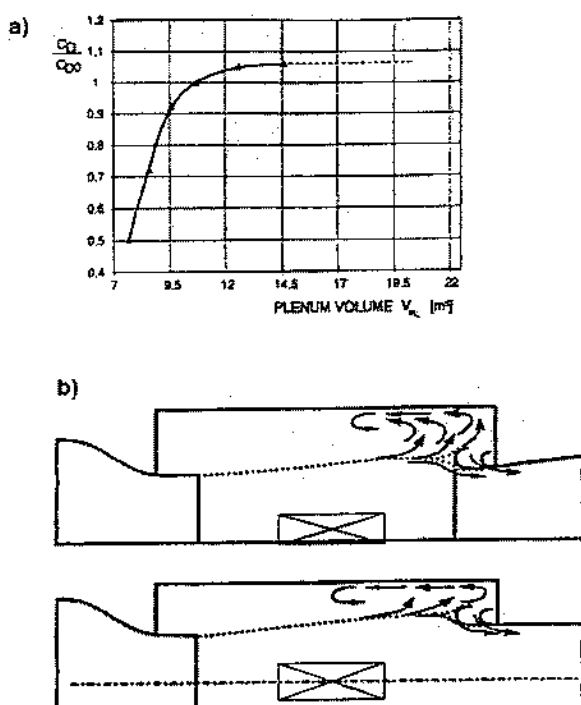
Η ταχύτητα αέρα πρέπει να είναι ελέγξιμη σε όλα τα επίπεδα σε μια αεροσήραγγα. Στην αυτοκινητική εργασία, οι ακριβείς δοκιμές με την πολύ χαμηλή ταχύτητα αέρα είναι σημαντικές. Όταν οδηγείς αργά επάνω σε μία μακριά απότομη κλίση αναπαράγεται ένα από τα κρίσιμα κριτήρια για να διαστασιολογηθεί το θερμαντικό 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.

### 1.2.3.5 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 σχέδιο 1.25 (α)). Με τη βοήθεια της απεικόνισης ροής ο DEUTENBACH 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 σχέδιο 1.25 (β)). Όχι μόνο ο όγκος αλλά και το πλάτος και το ύψος του θαλάμου πρέπει κατάλληλα να αντιστοιχηθούν στη διάσταση του



Σχήμα 1.25 α) Επίδραση του όγκου  $V_{PL}$  ολομέλειας στη μετρημένη έλξη β) Το σχέδιο ροής μέσα στην ολομέλεια και πλησιάζει στο συλλέκτη από τον K.R. Deutenbach

### **1.2.3.6 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  $\pm 1$  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  $1000 \text{ W/m}^2$ . 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

### **1.2.3.6 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. Τα συστήματα μέτρησης και οι βοηθητικές εγκαταστάσεις δοκιμής που χρησιμοποιούνται ευρύτατα συντάσσονται στον πίνακα 1.1.

<b>Συστήματα μέτρησης</b>	
Δυνάμεις και ροπές	Ισορροπία (κάτω από το πάτωμα ή εσωτερικά)
Ταχύτητα	"Κλασικοί" ελεγκτές, θερμό σύρμα, LDV,
Πίεση	"Κλασικά" μανόμετρα (μετρητές), ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς, πολλαπλές βαλβίδες
Ογκομετρική Παροχή	Διαφορά πίεσης, ανεμόμετρα
Απεικόνιση ροής	Καπνός, ατμός πετρελαίου, γεμισμένες με He φούσκες σαπουνιού
Ήχος επιπέδου πίεσης	Μικρόφωνο (ενιαίο, σε σειρά)
Θερμοκρασία	Θερμόμετρο, θερμοηλεκτρικά ζεύγη
<b>Πρόσθετος εξοπλισμός</b>	
Ελκτική δύναμη	Δυναμόμετρο πλαισίων
Ροή θερμότητας	Λέβητας
Ακτινοβολία ήλιων	Βολβοί με το φάσμα πλησίον του ήλιου
Υγρασία	Γεννήτρια ατμού
Βροχή	Σύστημα ψεκασμού ύδατος
Ρύπος	Νερό (απλό ή χρωματισμένο)

### 1.3 Περιορισμοί της προσομοίωσης

#### 1.3.1 Συστηματικά λάθη

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 1.1, 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.

### **1.3.2 Αναπαράσταση του δρόμου**

Τεχνικά, είναι εφικτό να αναπαραχθεί 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.

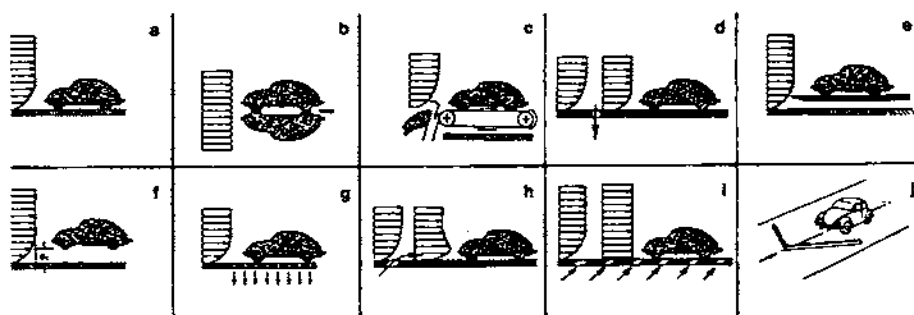
Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο άλλοι τρόποι να αναπαρασταθεί ο δρόμος:

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 *αναπαραγωγή*.



- 2 Ο δεύτερος αποτελείται από διάφορες μεθόδους που, κατά τη διάρκεια των ετών, έχουν αναπτυχθεί για να προσομοιάσουν το δρόμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η περιστροφή των ροδών παραμελείται.

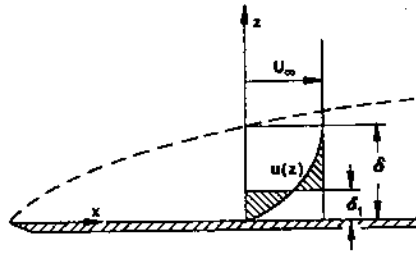
Οι διάφορες τεχνικές για είτε την αναπαραγωγή είτε για την εξομοίωση του δρόμου συντάσσονται στο σχέδιο 1.26



**Σχήμα 1.26** 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 σχέδιο 1.26 (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 σχέδιο 1.26 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  $\delta_1$  πάχος μετατοπίσεως που καθορίζεται στο σχέδιο 1.27. Από το πόσο είναι το  $\delta_1$ , 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 άνοση να αλλάζουν, κανονικά (ελαφρώς) αυξανόμενη. Η επίδραση, που είναι αξιοπρόσεχτη ακόμη και για τις μικρές γωνίες προσβολής α.



$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U_\infty}\right) dz$$

$$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{u}{U_\infty} \left(1 - \frac{u}{U_\infty}\right) dz$$

**Σχήμα.1.27** Ανάπτυξη ενός οριακού στρώματος (σχηματική αναπαράσταση) και των ορισμών του πάχους  $\delta$  του πάχους μετατόπισης και του πάχους απώλειας ορμής.

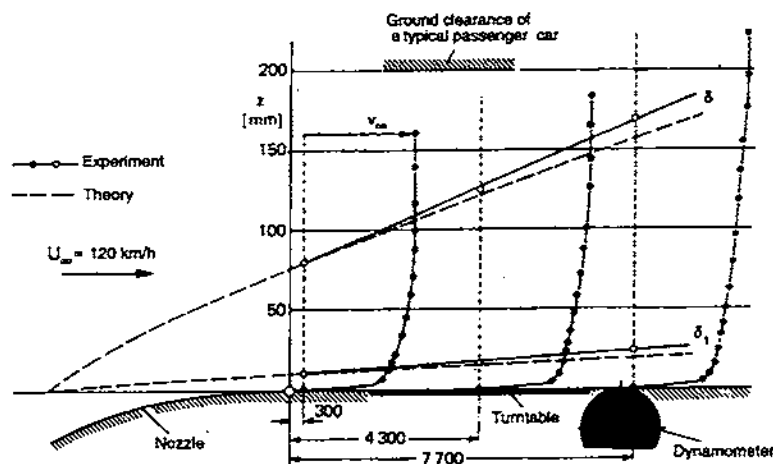
Η επίδραση της μείωσης της ορμής χαρακτηρίζεται από το πάχος  $\delta_2$  ορμή-απώλειας, δεν είναι εύκολο να χαρακτηριστεί. Στην πρώτη ματιά, θα αναμέναμε ότι λόγω του μείωσης της ορμής η δύναμη αντιστάσεως όλων των μερών που είναι βυθισμένα στο οριακό στρώμα -κυρίως οι ρόδες - θα ήταν χαμηλότερη από 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 πατωμάτων 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 σχέδιο 1.28. Τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας ακολουθούν στενά το νόμο 1/7-δύναμης (power - law). Σε ένα κενό τμήμα δοκιμής το πάχος  $\delta$  του οριακού στρώματος στην

θέση του μοντέλου είναι η περισσότερο 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  $\delta_1$  μετρήθηκε σε ένα κενό τμήμα δοκιμής), τη διανομή ταχύτητας κοντά στο έδαφος αλλάζει εντελώς. Ενώ το πάχος  $\delta$  του οριακού στρώματος στο κενό τμήμα δοκιμής ήταν μεταξύ 100 και 150 mm. (ανάλογα με τη θέση), παρουσία του προτύπου μειώθηκε σε 25-50 mm.



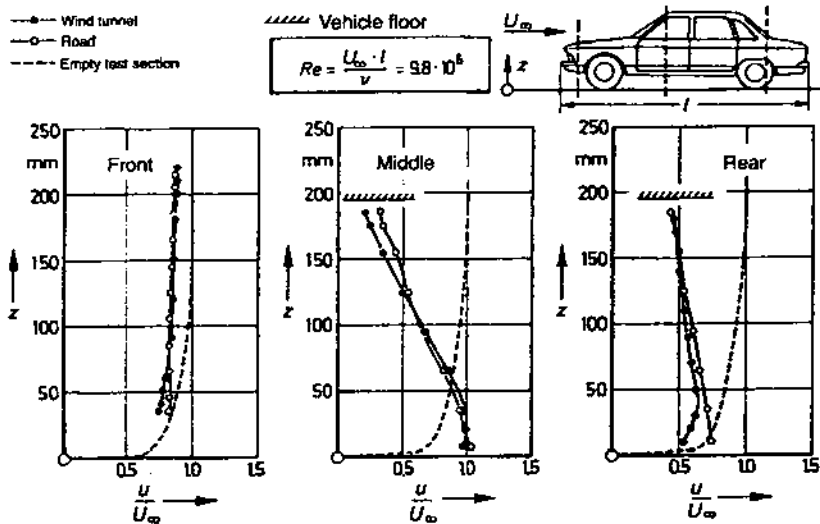
**Σχήμα 1.28** Οριακό στρώμα στο πάτωμα (κενό τμήμα δοκιμής) της κλιματολογικής σήραγγας της VOLKSWAGEN, από τον W.H. HUCHO.

Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώθηκε από τις οδικές μετρήσεις που συγκρίνονται με τα στοιχεία από μια αεροσήραγγα στο σχέδιο 1.29. 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 μετρίεται στο δρόμο και στην αεροσήραγγα σχεδιάζονται στο σχέδιο 1.30 και είναι σε στενή συμφωνία επίσης.

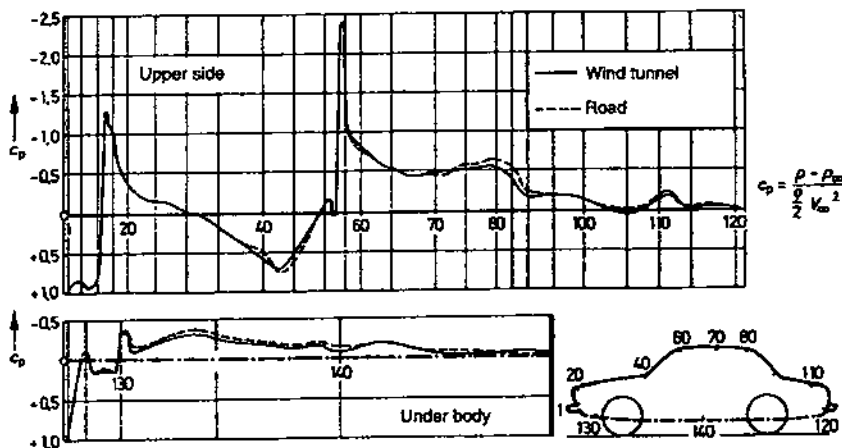
Προφανώς η ροή κάτω από ένα όχημα είναι κυρίως ελεγχόμενη από τη (ανιξώδες) επίδραση μετατοπίσεων ενός οχήματος, το οριακό στρώμα σε ένα σταθερό ισόγειο που έχει επιπτώσεις στον τομέα ροής της πολύ λιγότερο από πιθανή. Συνεπώς, ακόμη και σήμερα πολλές αυτοκινητικές αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται χωρίς 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 άνωση δεν λαμβανόταν υπόψη σε εκείνες τις ημέρες.



Σχήμα 1.29 Σχεδιαγράμματα ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο, σήραγγα αέρα σε σχέση με τον δρόμο, από W.H. HUCHO,.



Σχήμα 1.30 Κατανομή πίεσης κατά μήκος του διαμήκους μέσου επιπέδου ενός επιβατικού αυτοκινήτου, σήραγγα αέρα σε σχέση με το δρόμο, μετά από W.H. HUCHO,

Ο απλούστερος τρόπος να αναπαραχθεί τέλεια ο δρόμος φαίνεται να είναι η τεχνική εικόνας - καθρέφτη (βλ. το σχήμα 1.26 (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

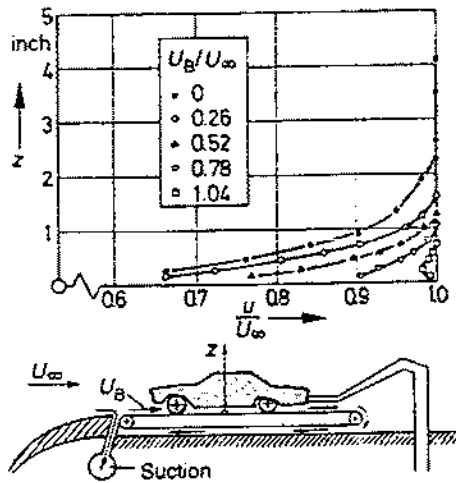
το οπίσθιο τμήμα παράγουν μια "ταλαντευμένη" κίνηση σε αυτήν την φανταστική επιφάνεια. Μια επίπεδη πλάκα πίσω από τα οχήματα (βλ. το σχέδιο 1.26 (β)) μπορεί μόνο εν μέρει να μετριάσει αυτήν την ταλάντωση.

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 αεροσήραγγα 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.

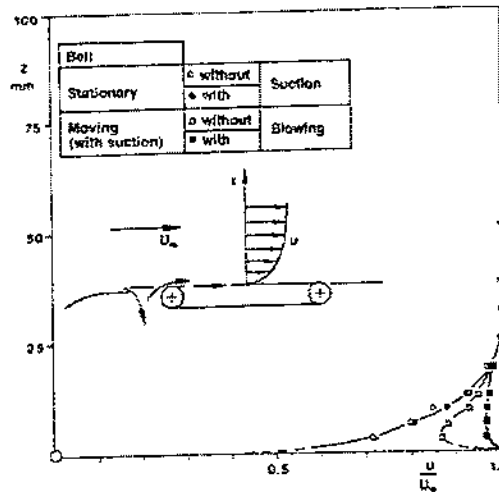
Μια τέλεια αναπαραγωγή του δρόμου είναι, όπως αναφέρεται ήδη, η *κινούμενη ζώνη* (βλ. το σχέδιο 1.26 (γ)). Αυτή η τεχνική δεν είναι καινούργια ο G.A. EIFFEL λέγεται ότι είναι ο πρώτος ο οποίος τη πρότεινε. Ήδη το 1934, μια έκθεση σχετικά με μια κινούμενη ζώνη παρουσιάστηκε από τον A. KLEMIN.. Ο W. KAMM (FKFS) έχει χρησιμοποιήσει μια κινούμενη ζώνη για να μειώσει τα πρότυπα-κλίμακας από τη δεκαετία του '30 (βλ. επίσης την παράγραφο της 1.4.2) 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 σχέδιο 1.32. Η αναρρόφηση ακολουθείται από έγχυση αμέσως μπροστά από τη ζώνη, και η απώλεια ορμής στο ανάντη του οριακού στρώματος αποβάλλεται σχεδόν πλήρως.

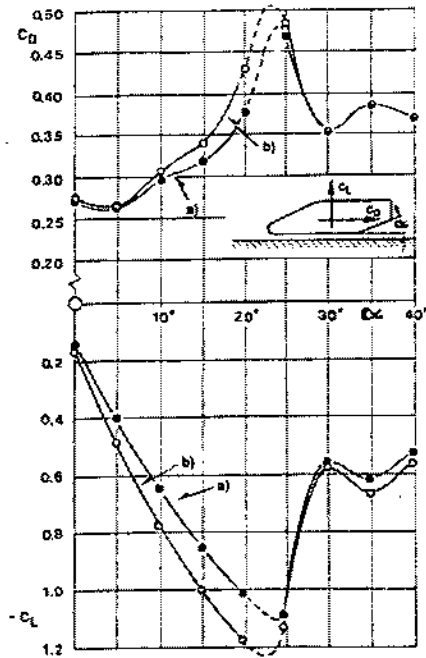
Όπως μπορεί να αναμένεται, οποιαδήποτε έλλειψη πιστότητας στην οδική αναπαραγωγή γίνεται αντιληπτή όταν γίνονται μετρήσεις στο κάτω μέρος ενός οχήματος. Αυτό είναι εμφανές στα αποτελέσματα όπου ο P.W. BEARMAN και λοιποί. έχουν επιτύχει με ένα γενικό σασί (*χωρίς ρόδες*), και που παρουσιάζονται στο σχέδιο 1.33..Ερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας  $\alpha$  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  $\alpha$



Σχήμα 1.31 Σχεδιαγράμματα ταχύτητας επάνω από μια κινούμενη ζώνη (μειωμένη κλίμακα) για τις διάφορες αναλογίες της ταχύτητας  $U_B$  ζωνών στο  $u$  ταχύτητας αέρα, από τον F.N. BEAUVAIS



Σχήμα 1.32 Σχεδιαγράμματα ταχύτητας επάνω από μια κινούμενη ζώνη (μειωμένη κλίμακα) με και χωρίς επηρεασμό του επικείμενου οριακού στρώματος ορίου, από τον CARR



**Σχήμα 1.33 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, από τον BEARMAN**

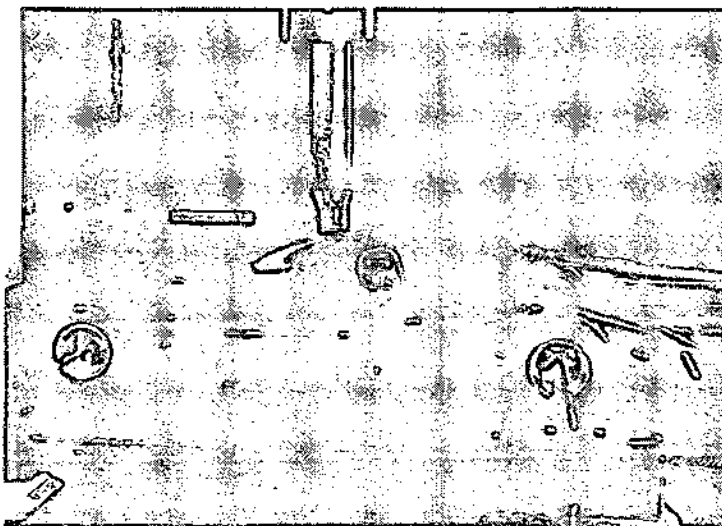
Η κρίσιμη γωνία οι διαφορές τείνουν να εξαφανιστούν. Αυτή η εύρεση έχει επιβεβαιωθεί από τον J.P. Howell που εξέτασε ένα γενικό αμάξωμα παρόμοιο με αυτό του σχεδίου 1.33, αλλάζοντας όχι μόνο τη γωνία του διαχύτη αλλά και τη γωνία της άκρης του ανώτερου οπίσθιου τμήματος.

Οι συγκεκριμένες προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν όταν εξετάζονται τα πρότυπα με τις ρόδες πάνω από μια κινούμενη ζώνη. Ο λογικότερος τρόπος είναι να αφηθούν 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. 1.34 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική δοκιμή με ένα μοντέλο 1:2.5 μιας formula 1 στη αεροσήραγγα FWE 2,45 x 1,75 m<sup>2</sup>. 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.

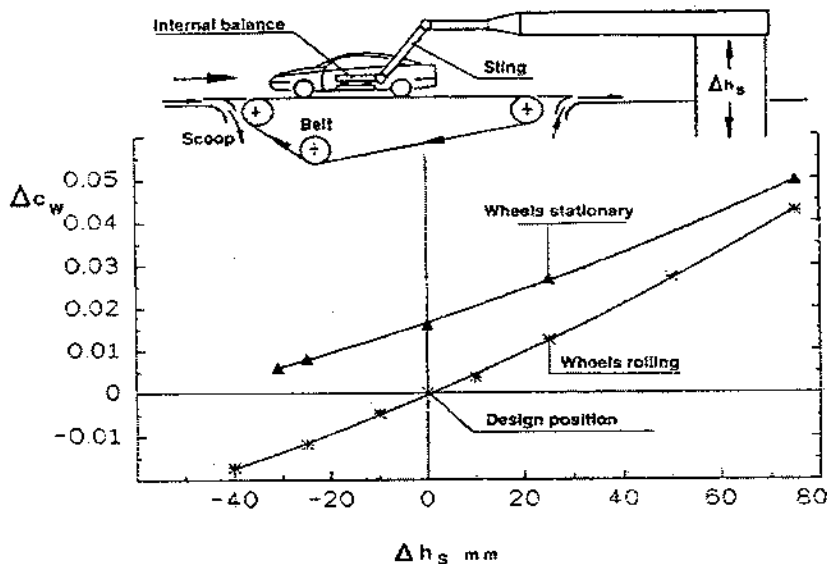


*Σχήμα 1.34 Sauber c- 12 τύπος F-1 (κλίμακα 1:2.5) πάνω από ένα κινούμενο πάτωμα. οι ρόδες είναι αποσυνδεδεμένες από το όχημα και καθοδηγούνται εξωτερικά.*

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 σχέδιο 1.35. 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 σχέδιο 1.35 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 1.35 Επίδραση της επίγειας εκκαθάρισης και της οδικής προσομοίωσης της οπισθέλκουσας, από τον E. MERCKER.**

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:

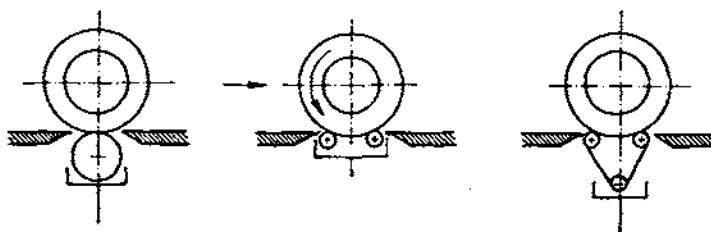
- Γενικά η οπισθέλκουσα ενός σώματος αυξάνεται όταν κινείται το πάτωμα, όπως μπορεί να φανεί στο σχέδιο 1.33.
- Όπως θα παρουσιαστεί κατωτέρω, η οπισθέλκουσα των στάσιμων ροδών αυξάνεται όταν αφαιρείται το οριακό στρώμα του δαπέδου.

- Η οπισθέλκουσα των ροδών μπορεί να μειωθεί όταν περιστρέφονται, όπως καταδεικνύεται στην παράγραφο της 1.4.2. 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 σχέδιο 1.36. 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.

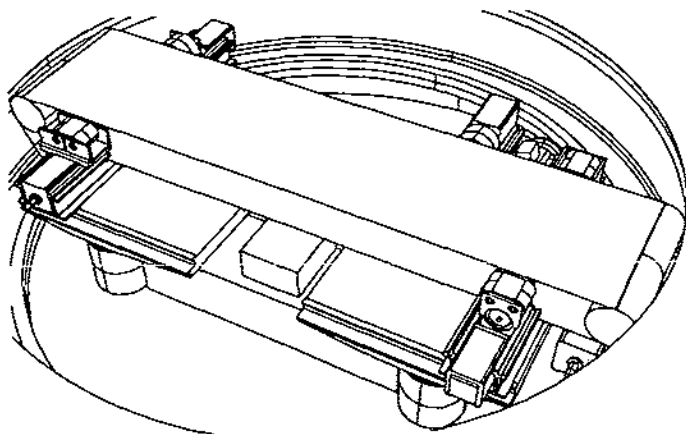


*Σχήμα 1.36 Τρεις δυνατότητες για την περιστροφική κίνηση των ροδών από μέσα από μια ζυγαριά σηράγγων αέρα*

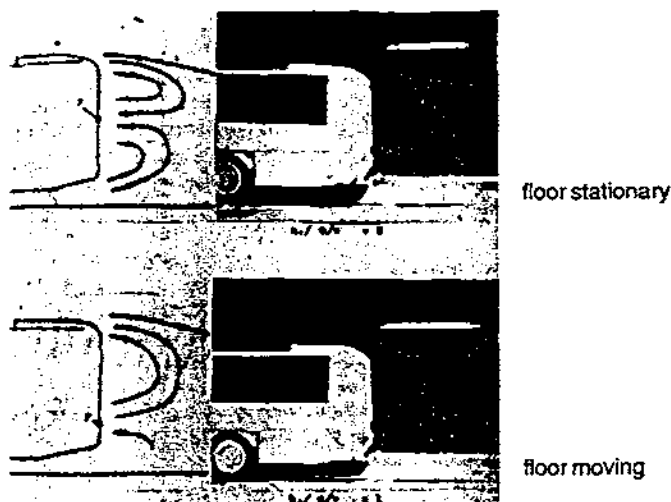
Το όχημα πρέπει να κρατηθεί από να κυλήσει μακριά. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα σύστημα (στηριγμάτων) χαμηλής εσωτερικής τριβής που συνδέονται από κάτω (και που μπορεί, εάν είναι απαραίτητο, να αντέξει εν μέρει το βάρος του αυτοκινήτου). Σχ.1.37 δίνει μια επισκόπηση ενός προτεινόμενου σχεδίου από J. POTTHOFF 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 1.38.



**Σχήμα 1.37 "Στενή ζώνη" (ζώνη μεταξύ των ροδών) και "μικροσκοπικές ζώνες" για την περιστροφή των ροδών, ένα σχέδιο για την πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα IKV, από τους POTTHOFF και FIEDLER.**



**Σχήμα 1.38 Επιρροή της οδικής προσομοίωσης στο σχέδιο ροής πίσω από ένα λεωφορείο, από τους T. LAJOS και I. HEGEL**

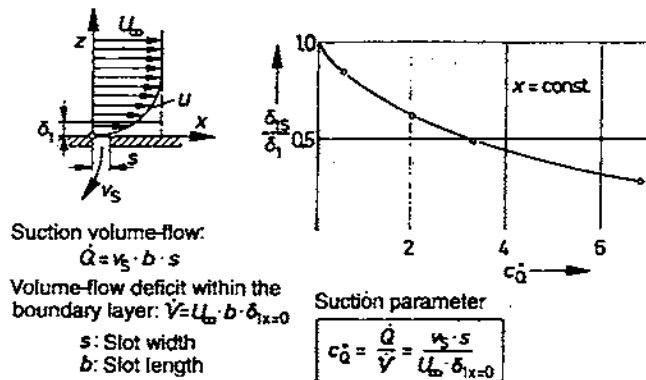
Όλες οι άλλες μέθοδοι επίγειας αντιπροσώπευσης που σκιαγραφούνται στο σχέδιο 1.26 χρησιμοποιούν ένα σταθερό δάπεδο και όλοι προσομοιώνουν το δρόμο, δεν τον αναπαραγάγουν. Η αξία τους είναι η απλότητά τους έναντι μιας κινούμενης ζώνης. Η προτίμηση πρέπει να εξαρτάται από τη σύγκριση με μια κινούμενη ζώνη ή το δρόμο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα στο σχ. 1.28 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.1.39 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  $\delta_1$  στο μισό ,η παράμετρος της αναρρόφησης  $c_Q$

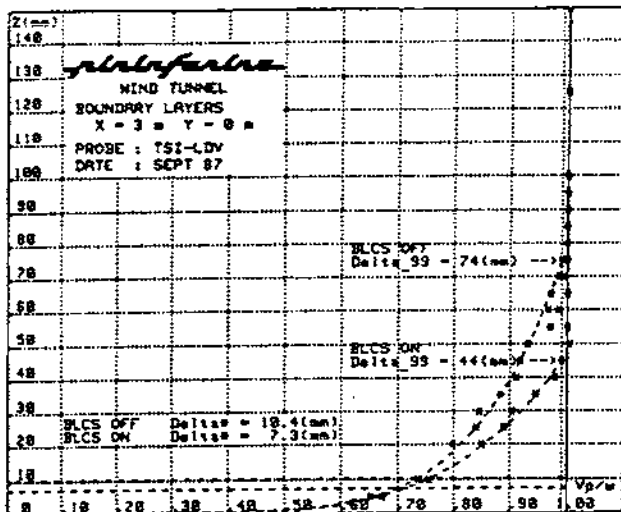
(σχ.1.39) πρέπει να είναι κοντά στο 4.Ο λόγος της ταχύτητας της αναρρόφησης προς τη ταχύτητα του αέρα μπορεί να ελεγχθεί αν διατηρήσουμε το πάχος του στρώματος σταθερό ( $\delta = \text{σταθερό}$ ). Αν η ένταση της ροής της αναρρόφησης είναι μεγάλη ,το πεδίο της πλησίον ροής θα αποκτήσει αρνητική γωνία 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 1.39 Μείωση του πάχους μετατοπίσεων  $\delta_1$  ενός ταραχώδους οριακού στρώματος από την αναρρόφηση αυλακώσεων, μετά από K.O. ARNOLD**

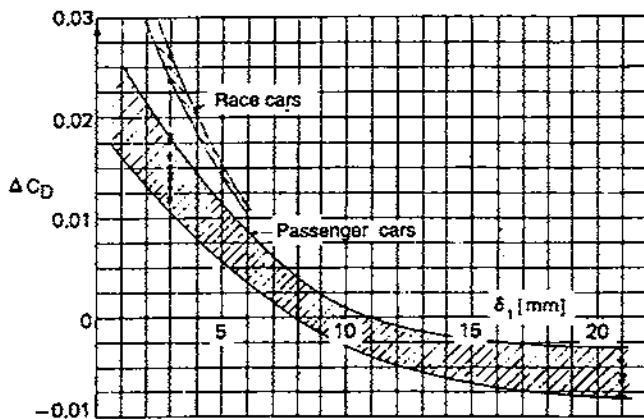
Συχνά η παράμετρος της αναρρόφησης επιλέγεται για να μειώσει το πάχος του οριακού πάχους στο μισό (μετριέται σε ένα άδειο τμήμα δοκιμής)Το σχ 1.40 που απεικονίζει την αεροσήραγγα του Pininfarina είναι ένα συνηθισμένο παράδειγμα ,το πάχος του οριακού στρώματος μειώθηκε από 74mm σε 44mm.Παρόμοιες περιπτώσεις 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 1.40 Κατανομή ταχύτητας επάνω από ένα στάσιμο ισόγειο χωρίς και με αναρρόφηση οριακού στρώματος, LDW μέτρηση, A. COGOTTI.

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 1.41 όπου η οπισθέλκουσα φαίνεται σε σχέση με το πάχος μετατοπίσεως που μετρείται 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 1.41 Επιρροή του πάχους οριακού στρώματος  $\delta_1$  (που μειώνεται από την αναρρόφηση) στο συντελεστή έλξης  $\delta$ , μετά από τον A. BERNDTSSON

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 εφαπτομενική 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. (σχ1.26e).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  $\alpha$  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  $\delta_1$  του οριακού στρώματος (βλ. το σχέδιο 1.26 (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 άνοση. 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*, [σχέδιο 1.26 (ζ)]. Το απαραίτητο σύστημα αναρρόφησης πρέπει να ενσωματωθεί στην περιστροφική πλάκα της ζυγαριάς. Και τα δύο είδη αναρρόφηση-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 σχέδιο 1.29, 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

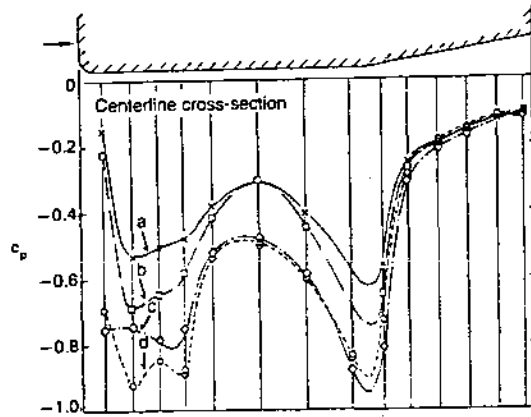


2. Το πεδίο ροής γύρω από ένα μοντέλο αλλάζει τη κατανομή πίεσης στο δάπεδο, δηλ., επάνω από τις τρύπες αναρρόφησης. Αυτό προκαλεί μια (άγνωστη) αλλαγή στο ποσοστό αναρρόφησης, όχι μόνο όσον αφορά το γενικό μέγεθός του αλλά και την τοπική κατανομή του. Κατά συνέπεια, μπορεί και να εμφανιστεί ένα "σύντομο κύκλωμα" δηλ., ο αέρας που απορροφιέται 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 έδαφος 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. σχέδιο 1.42) 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 σχέδιο 1.26 (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.1.43(α) δείχνει πως γίνεται στις DNW-LTF. Το σχεδιάγραμμα της ταχύτητας δείχνει καθαρά στο σχ. 1.43(β)



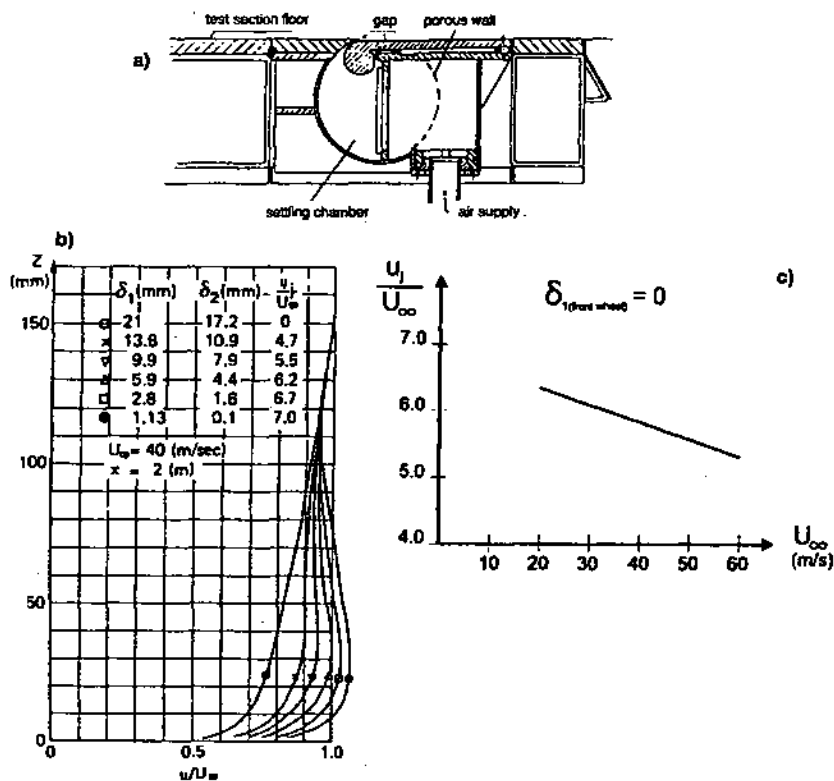
**Σχήμα 1.42 Κατανομή πίεσης κάτω από ένα γενικό μοντέλο για τα διάφορα είδη επίγειας αντιπροσώπευσης: α) Στάσιμος επίγειος πίνακας, β) Φράκτης οριακού στρώματος όπως στο σχέδιο 1.261 γ) κινούμενη ζώνη, δ) διανεμημένη αναρρόφηση, από τον W. CARR**

την αφαίρεση του ελλείμματος της ταχύτητας. Ανάλογα με τη ταχύτητα του αέρα  $U_{\infty}$ , 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 σχέδιο 1.43 (c).

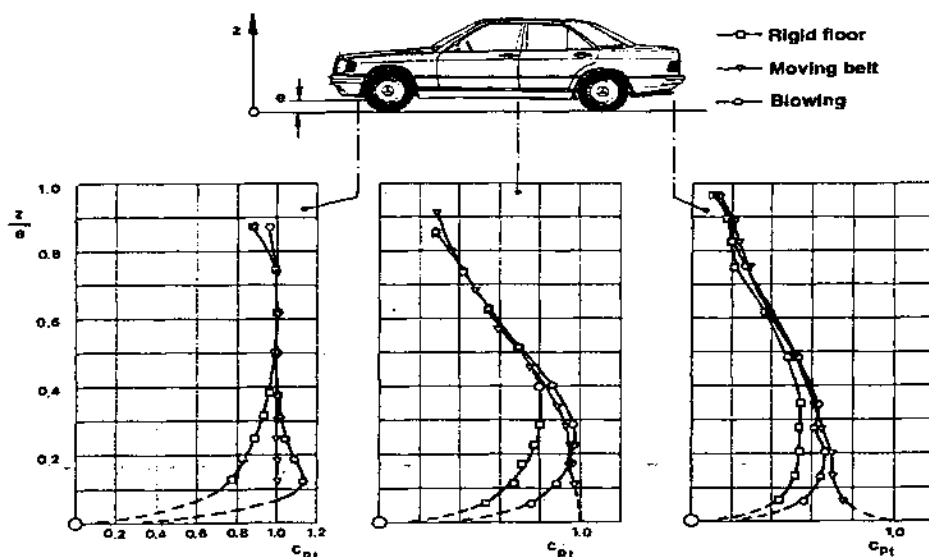
$$(u_j/U_{\infty})_{\delta_1=0} = f(U_{\infty})$$

Τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο όπως μετρήθηκαν από τον E. MERCKER και H.W. KNAPE επιδεικνύονται στο σχέδιο 1.44. Επιδεικνύουν πόσο κοντά στην έγχυση έρχεται σε μια κινούμενη ζώνη εάν το πάχος απώλειας ορμής  $\delta_2$  (στο κενό τμήμα δοκιμής) γίνεται μηδέν στη θέση του μπροστινού άξονα.

Το σχέδιο 1.45 παρουσιάζει την επίδραση του φυσήματος στην οπισθέλκουσα. Και το πάχος οριακού στρώματος  $\delta_1$  και το πάχος απώλειας ορμής  $\delta_2$  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).

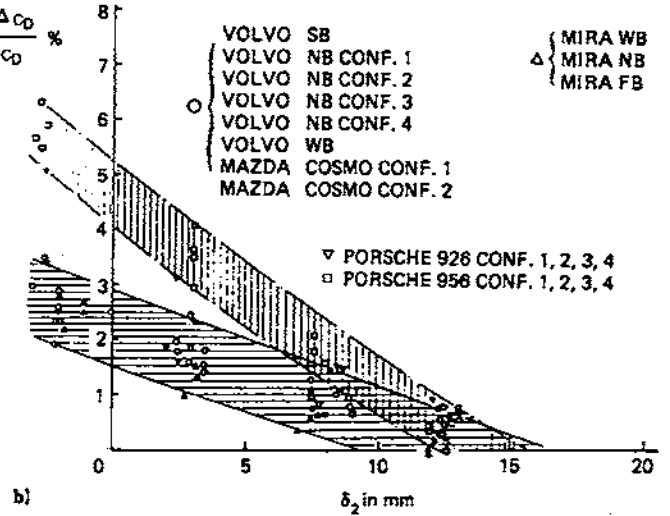
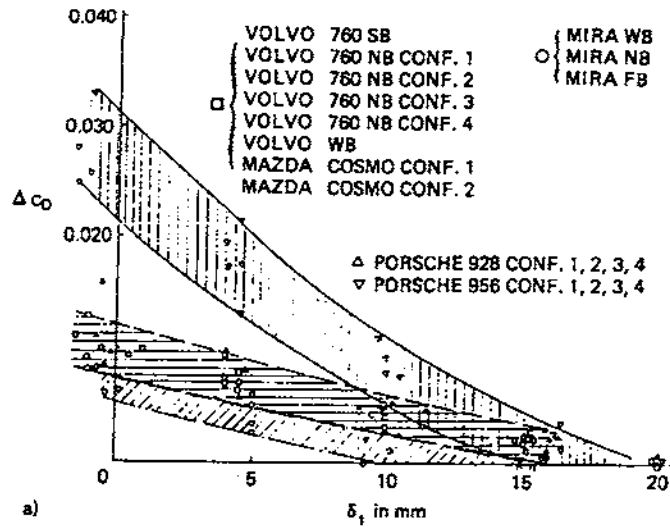


Σχήμα 1.43 Εφαπτομενική έγχυση σε DNW-LTF: α) σχεδιάγραμμα της σχισμής του φουσηματος, β) σχεδιαγράμματα ταχύτητας για τις διάφορες ταχύτητες φουσηματος, γ)  $u_j$  καμπύλη βαθμολόγησης ποσοστού φουσηματος  $u_j/U_{\infty} = f(U_{\infty})$ .



Σχήμα 1.44 Σύγκριση των σχεδιαγραμμάτων ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο: στάσιμο (άκαμπτο) δάπεδο, εφαπτομενική έγχυση, και κινούμενη ζώνη, από τον A. BERNDTSSON

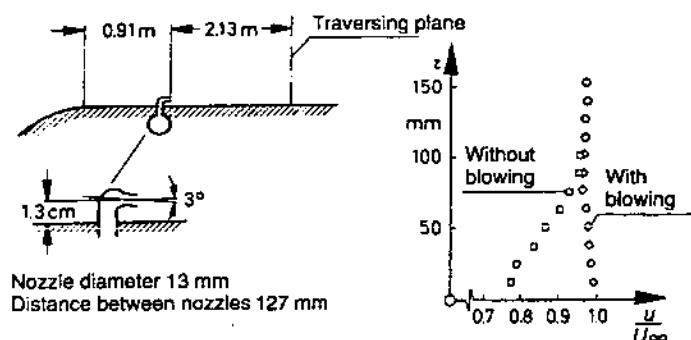
Σύμφωνα με το G.WILLIAMS , αντί του φυσήματος μέσω μιας αυλάκωσης, της έγχυση μέσω *ενιαίων ακροφυσίων* που παρατάσσονται σε μια σειρά είναι επίσης εφικτή. Όπως μπορεί να φανεί από το σχέδιο 1.46, το σχεδιάγραμμα οριακού στρώματος μπορεί να γεμίσει μέχρι μια σχεδόν επίπεδη μορφή. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση έγινε από τον E.A. STALKER ήδη από το 1934; μια διανεμημένη έγχυση (βλ. το σχέδιο 1.26 (i)) που συνδυάζεται με τη διανεμημένη αναρρόφηση. Πώς αυτό θα μπορούσε να γίνει φαίνεται στο σχέδιο 1.47. 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 σχέδιο 1.26 (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 διαμήκεις δίνες που επιρεάζουν τη ροή. Αυτή η συσκευή δεν μπορεί επομένως να συστηθεί για αυτοκίνητα



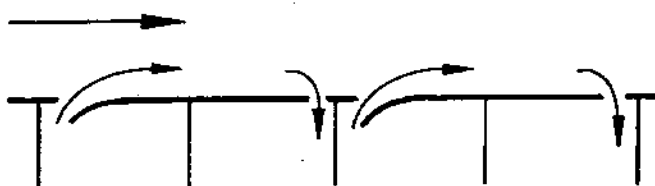
**Σχῆμα 1.45** Επίδραση του επαφτόμενης ἔγχυσης στο συντελεστή ἔλξης: α) επίδραση του πάχους μετατοπίσεως  $\delta_1$ , β) επίδραση του πάχους ἀπώλειας ορμῆς  $\delta_2$  ἀπὸ τον **A. BERNDTSSON**

Μπορεῖ να εκπλήσσει ὅτι τόσες πολλές τεχνικές ἔχουν ἀκολουθηθεῖ για τη προσομοίωση του δρόμου ἀντὶ για την ἀναπαραγωγή του. Ὑπάρχουν δύο κύριοι λόγοι:

1. Η μεγάλη προσπάθεια που ἀπαιτεῖται για μια κινούμενη ζώνη (και τις περιστρεφόμενες ρόδες).
2. Το γεγονός ὅτι κάθε τεχνική προσομοίωσης ἔχει ἀποκλίσεις σε σύγκριση με την πραγματικότητα.



Σχήμα 1.46 Μείωση του πάχους οριακού στρώματος με τη έγχυση μέσω μιας σειράς των ενιαίων ακροφυσίων, από C. WILLIAMS



Σχήμα 1.47 Μείωση του πάχους οριακού στρώματος με είτε από την απορρόφηση είτε από τη έγχυση, από E.A. STALKER

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.

### **1.3.3 Διορθώσεις αεροσηράγγων**

#### **1.3.3.1 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 διαμήκειες πίεςεις 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.

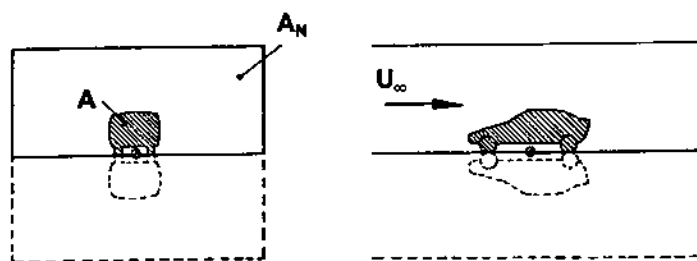
Τα αποτελέσματα αυτών των μεμονωμένων διαταραχών επιβάλλονται πρόσθετα. Αυτή η γραμμική προσέγγιση, εντούτοις, είναι σημαντική μόνο εφ' όσον κάθε μια από τις διαταραχές είναι μικρή και η προκύπτουσα γενική διόρθωση είναι μικρή. Αυτό, φυσικά, ισχύει μόνο εάν μια αεροσήραγγα είναι "λογικού μεγέθους" σε 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 που περιγράφεται στην παράγραφο 1.5.2.

Στο σχέδιο 1.9 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 (σχέδιο 1.48), 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 1.48 Διπλό τμήμα δοκιμής

### 1.3.3.2 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 σιφραγγών περιορίζουν, βελτιώνει τη ροή γύρω από ένα σώμα δοκιμής από το να αποκλείσει τόσο πολύ όσο σε ελεύθερο αέρα (βλ. το σχέδιο 1.9 (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 από ότι στον ελεύθερο αέρα. Στο σχέδιο 1.49 (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.

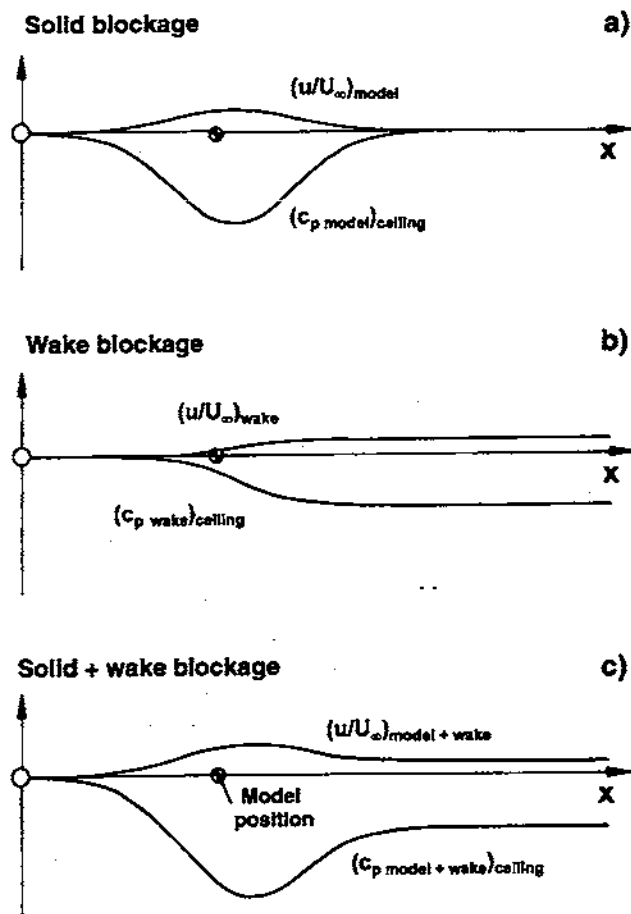
*Παρεμπόδιση ιχνών(WB):* Τα ίχνη ενός πλαισίου δοκιμής δημιουργούν μια ατέλεια στη ταχύτητα στον πυρήνα του ρεύματος αέρος πίσω από το πλαίσιο Αυτή η ατέλεια ταχύτητας αντιπροσωπεύει μια μείωση της αποτελεσματικής διατομής που παραμένει ανοικτή για τη ροή, που προκαλεί μια ταχύτητα παρέμβασης,  $u_{WB}(X)$ . Αυτό διορθώνεται μόνο με την εξέταση της τιμής στο πρότυπο κέντρο. Η  $u_{WB}(X)$  σχεδιάζεται (σχηματικά) στο σχέδιο 1.49 (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  $\Delta c_{DWB}$ .

Η στερεά παρεμπόδιση και η παρεμπόδιση ιχνών φαίνονται στο σχέδιο 1.49 (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 ανιξώδες 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  $\Delta c_{DHB}$  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 σπυράγγων παράγει μια αύξηση στην ταχύτητα για το ανιξώδες 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 1.49 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  $\Delta p$  σύμφωνα με την Eq. (1,3):

$$U_{corr} = U_m + u = U_m + \epsilon U_m = U_m(1 + \epsilon)$$

Αντίστοιχα, η διορθωμένη δυναμική πίεση είναι:

$$q_{corr} = q_m(1 + \epsilon)^2$$

όπου το  $\epsilon$  καλείται συντελεστής παρεμπόδισης, και αποτελείται από τη στερεά παρεμπόδιση  $\epsilon_{SB}$  και τη παρεμπόδιση ιχνών  $\epsilon_{WB}$  δηλ.,

$$\epsilon = \epsilon_{SB} + \epsilon_{WB}$$

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

$$\Delta c_{DB} = \Delta c_{DWB} + \Delta c_{DHB}$$

Χρησιμοποιώντας το Eqs. (1,5), (1,6), και (1,7), ο προκύπτων διορθωμένος συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_{DCORR}$  είναι ο ακόλουθος, όπου το  $c_{Dm}$  είναι ο μετρημένος συντελεστής οπισθέλκουσας.

$$c_{DCORR} = \frac{c_{Dm} + \Delta c_D}{q_{corr}/q_m} = \frac{c_{Dm} + \Delta c_{DB}}{(1 + \epsilon)^2} = \frac{c_{Dm} + \Delta c_{DWB} + \Delta c_{DHB}}{(1 + \epsilon_{SB} + \epsilon_{WB})^2}$$

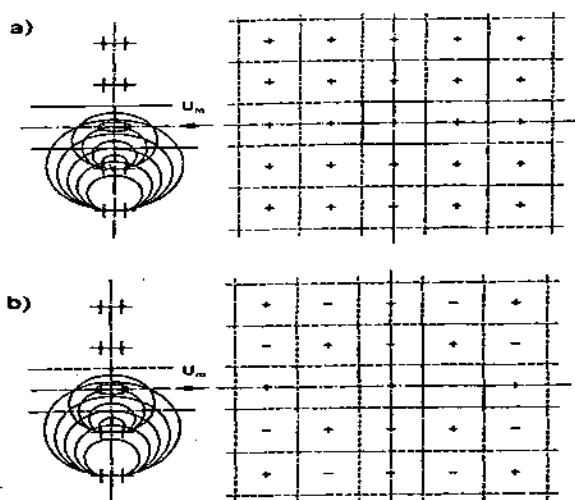
Η εξίσωση είναι τυπική, ο στόχος είναι ο μετρημένος συντελεστής έλξης  $c_{Dm}$ , είναι πραγματικά ο στόχος τα μεμονωμένα αποτελέσματα του  $\epsilon$  στις κύριες γεωμετρικές παραμέτρους του προτύπου και του τμήματος δοκιμής (ο λόγος  $\phi$  παρεμπόδισης και η μορφή του τμήματος προτύπων και δοκιμής) 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 σχέδιο 1.50 (α) Εάν, όπως σε αυτό το παράδειγμα, το αντικείμενο

δοκιμής αντικαθίσταται από ένα σώμα Rankine ωσειδές, 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 ωσειδούς, η δεύτερη μια πολύ μικρότερη ταχύτητα  $u_2$  στην ίδια κατεύθυνση, και ούτω κάθε εξής. Επιπλέον μπορεί να αναγνωρισθεί 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 1.50** 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 σχέδιο 1.21). 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.

### **1.3.3.3 Ανοικτό τμήμα δοκιμής**

Για πολύ ,ήταν κοινή η αντίληψη ότι ένα ανοικτό τμήμα δοκιμής δεν χρειάζονταν οποιοσδήποτε 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 που αφαιρούνται στην παράγραφο 1.6 έθεσαν υπό αμφισβήτηση εάν αυτή η προσέγγιση ήταν αποδεκτή.

Ο Ε. 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  $\epsilon_{JE}$ .
2. Εκτροπή του τζετ  $\epsilon_{JD}$ .
3. Το  $\epsilon_N$  ακροφυσίων.
4. Συλλέκτης  $\epsilon_C$ .
5. Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης  $\Delta p$ .

Συνεπώς, η δυναμική πίεση διορθώνεται:

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

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

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

1. *Εκτόνωση τζετ* (στερεά παρεμπόδιση)  $\epsilon_{JE}$ : Όπως φαίνεται στο σχέδιο 1.51 (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  $\epsilon_{JE}$ .

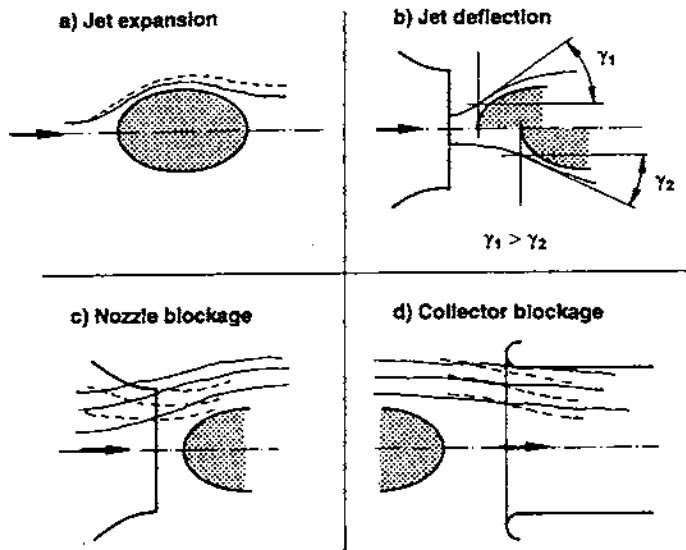
Ο παράγοντας  $\epsilon_{JE}$  εκτόνωσης επέκτασης (στερεά παρεμπόδιση) μπορεί να υπολογιστεί με ένα πρότυπο παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται για τα κλειστά τμήματα δοκιμής. Το αντικείμενο δοκιμής αντικαθίσταται από ένα πρότυπο που γίνεται από



μια διαμόρφωση πηγή-νεροχυτών. Τα όρια του τζετ παράγονται με την απεικόνιση αυτού του προτύπου στα όρια του τζετ (βλ. το σχέδιο 1.50 (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 πρώτης 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*  $\epsilon_{\text{JD}}$ : 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 σχέδιο 1.51 (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  $\phi$  είναι μεγαλύτερη από τη γεωμετρική:  $\phi^* > \phi$
3. *Η παρεμπόδιση  $\epsilon_N$  του ακροφυσίου* περιγράφηκε στην παράγραφο 1.2.3.4.
4. *Παρεμπόδιση των συλλεκτών  $\epsilon_C$* : 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 σχέδιο 1.51 (d)).
5. *Ρυθμός μεταβολής της πίεσης*: Όπως παρουσιάζεται ήδη στο σχέδιο 1.11 (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 1.51 Αποτελέσματα ορίων στα ανοικτά τμήματα δοκιμής από E. MERCKER και J. WIEDEMANN,*

### 1.3.3.4 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 σχεδίου 1.45 αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη. η σχέση  $\Delta c_D = f(\delta_1)$  πρέπει να παρεκτεθεί 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  $\Delta c_D = + 0,01$ .

### 1.3.3.5 Παρεκκλιμένο πρότυπο

Μέχρι τώρα έχει εξεταστεί μόνο η συμμετρική ροή. Όταν ένα πρότυπο παρεκκλίνει της πορείας κατά μια γωνία  $\beta$ , το σχέδιο 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 ροικές γραμμές κατάντη του προτύπου εκτρέπονται περισσότερο απ'ότι 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  $\beta$  από την πορεία του είναι συγκρίσιμο με ένα φτερό μικρού λόγου διάστασης διαγωνίως με γωνία προσβολής  $\alpha$ . Συνεπώς, η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην αεροναυτική δοκιμή για να διορθώσει τη γωνία προσβολής  $\alpha$  θα μπορούσε να μεταφερθεί σε ένα όχημα για να διορθώσει τη γωνία συστροφής  $\beta$ . 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.

### **1.3.3.6 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  $c_{p0} = 1,0$ .

## **1.4 Δοκιμές με τα πρότυπα μειωμένης-κλίμακας**

### **1.4.1 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.

Πρόσφατε, 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 ενίσχυαν 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.

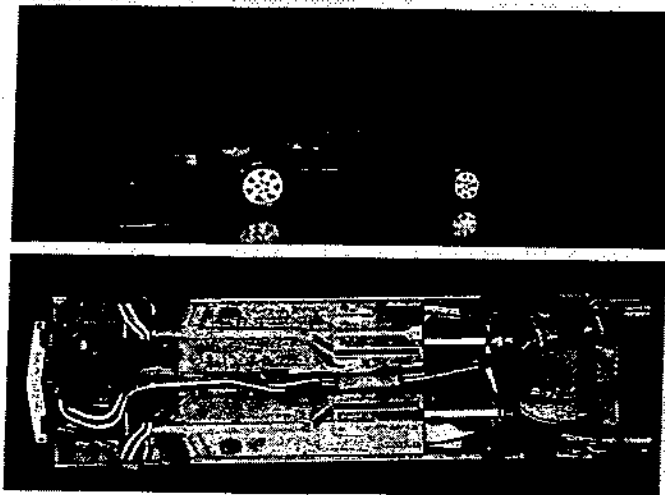
Αυτοί οι κίνδυνοι μπορούν να μειωθούν εάν η κλίμακα αυξηθεί. Πράγματι, μια τάση στις μεγαλύτερες κλίμακες μπορεί να παρατηρηθεί: στις ΗΠΑ από το 3/8 (1:3.75) στο 1:3.33 στην Ευρώπη στο 1:2.5, η οποία είναι μία κλίμακα χαρακτηριστική στην εφαρμοσμένη μηχανική. Η τελευταία κλίμακα είναι επίσης πολύ καλά 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.

#### **1.4.2 Λεπτομέρειες της πρότυπης τεχνικής κατασκευής και δοκιμής**

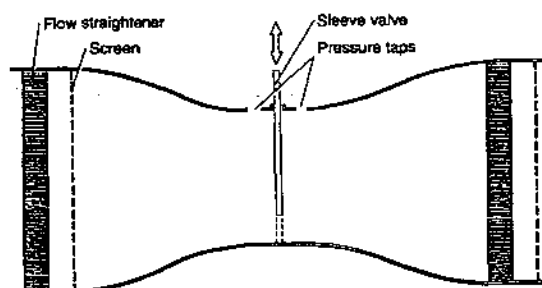
Γενικά, τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας κατασκευάζονται με έναν υψηλό βαθμό ομοιότητας. Το σχέδιο 1.52 δίνει μια εικόνα. Το σώμα εγκαθίσταται με όλα τα μέρη που αποσπώνται, και το κάτω μέρος επιδεικνύει κάθε λεπτομέρεια του συστήματος μετάδοσης και του συστήματος κατεύθυνσης που εκτίθεται στη ροή του αέρα. 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 κοντραπλάκέ. 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 1.53. 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 μετريέται για τις διάφορες θέσεις της βαλβίδας του λαιμού.



*Σχήμα 1.52 πρότυπο μειωμένης κλίμακας (1/5) ενός αυτοκινήτου: α) πρότυπο σε μια αεροσήραγα, β) κάτω μέρος του ίδιου προτύπου.*

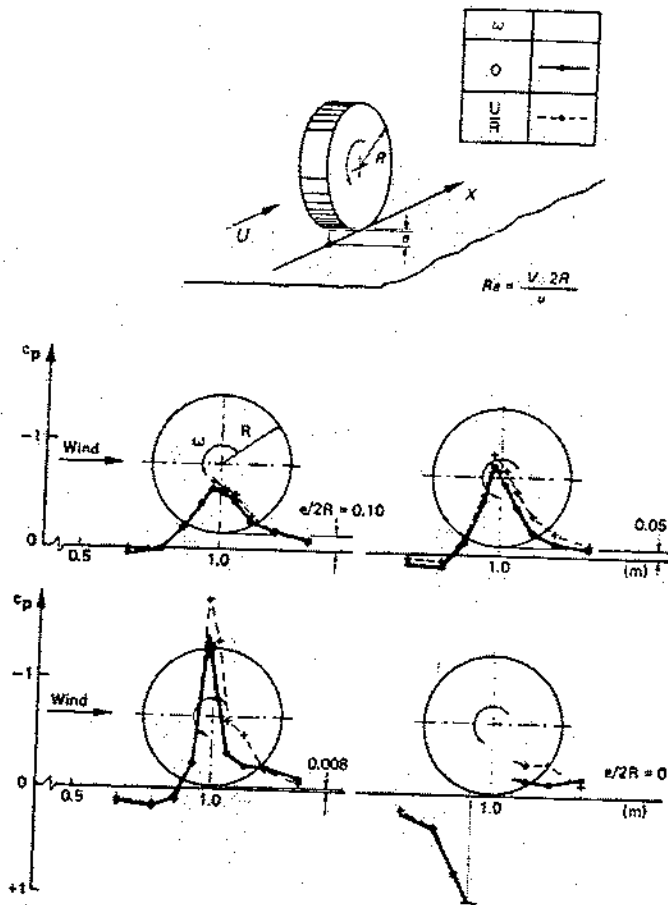


*Σχήμα 1.53 Προσομοιωτής θερμαντικών σωμάτων για τις δοκιμές με πρότυπα.*

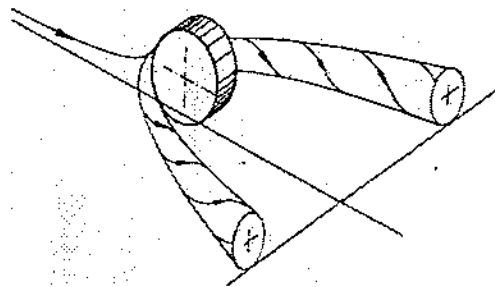
Γενικά στη περίπτωση με τα πραγματικού μεγέθους πρότυπα, η σχετική κίνηση μεταξύ του προτύπου κλίμακας και του δρόμου και η περιστρεφόμενη κίνηση των ροδών συνήθως παραμελούνται. Οι συνέπειες είναι οι ίδιες όπως για τα πραγματικού μεγέθους πρότυπα. Πραγματικά, τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας ήταν τα πρώτα 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. BEVAUS, (βλ. το σχέδιο 1.31). 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 BEVAUS που αντιστάθμισε την επίδραση της κινούμενης ζώνης. Αργότερα αυτό εξηγήθηκε από τον A. COGOTTI, που εκτέλεσε τις μετρήσεις δύναμης στις ελεύθερες-κυλιόμενες ρόδες, πλήρης κλίμακας, σε ένα στάσιμο έδαφος. Όπως φαίνεται από το σχέδιο 1.54 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 σχέδιο 1.55) 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 σχέδιο 1.56, 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

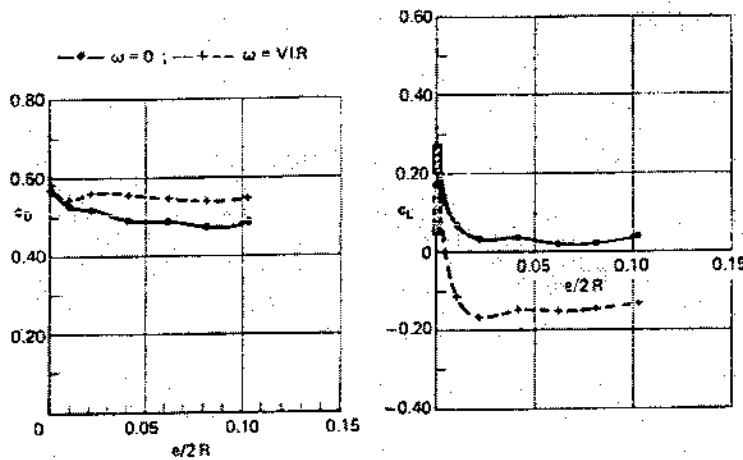


Σχήμα 1.54 Αλλαγή πίεσης κάτω από ένα τροχό για διαφορετικό έδαφος



Σχήμα 1.55 Διαχωρισμός ροής μπροστά από ένα ακίνητο τροχό και το σχήμα της δίνης



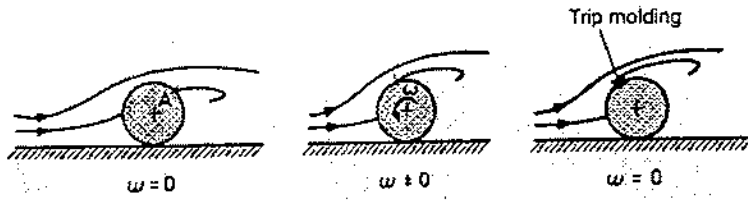


**Σχήμα 1.56** Οπισθέλκουσα και άνωση μιας ελεύθερης ρόδας, στάσιμης και περιστρεφόμενης, για τις διαφορετικές επίγειες εκκαθαρίσεις.

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

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 σχέδιο 1.57. 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 σχέδιο 1.34.



Σχήμα 1.57 Εξομοίωση της περιστροφής του τροχού προσαρμόζοντας μια διαμόρφωση ανατροπής του αέρα

### 1.4.3 Αποτελέσματα του αριθμού Reynolds

Εκτός από την απαίτηση για τη γεωμετρική ομοιότητα, η ροή γύρω από την μειωμένη 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 ασυμπίεστη 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:

$$Re = \frac{U_{\infty} l}{\nu}$$

που το  $U_{\infty}$  είναι η ταχύτητα της ήρεμης επικείμενης ροής, το  $l$  είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος, γενικά το μήκος οχημάτων, και το  $\nu$  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:

$$\frac{U_{\infty 1} l_1}{\nu_1} = \frac{U_{\infty 2} l_2}{\nu_2}$$

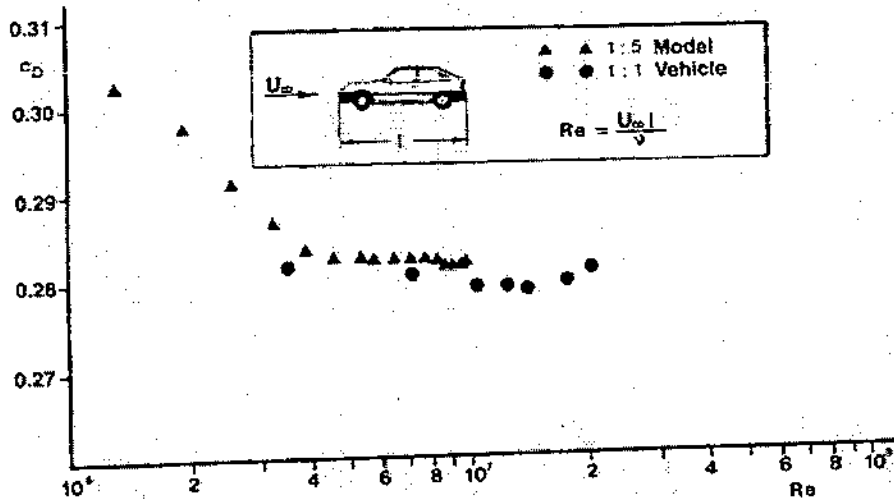
Εάν μια πρότυπη δοκιμή ολοκληρώνεται στο ίδιο μέσο στο οποίο το πραγματικού μεγέθους όχημα λειτουργεί (δηλ., αέρας), η απαίτηση για την κινηματική ομοιότητα είναι ικανοποιητική όταν τα προϊόντα της ταχύτητας και του μήκους στις δύο περιπτώσεις είναι ίσα. Γενικά, με την ευρέως χρησιμοποιημένη μειωμένης 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 σπράγγων 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.

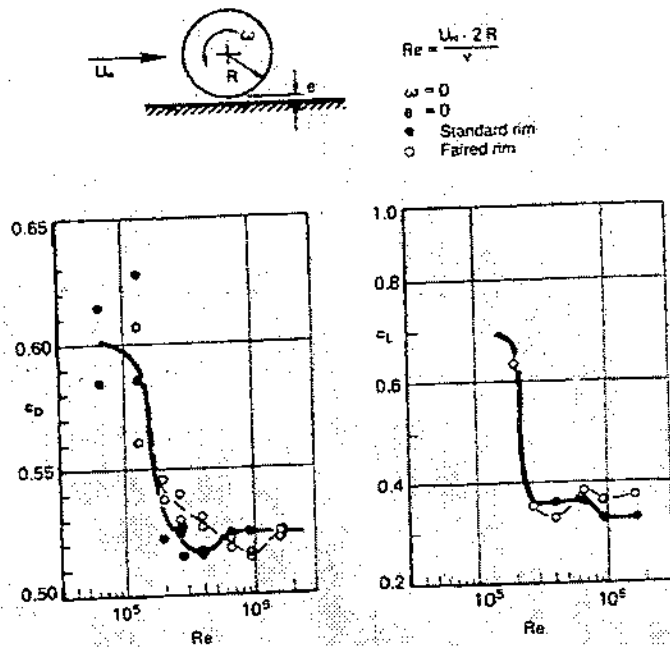
Για να αναγνωριστούν τα αποτελέσματα του αριθμού Reynolds, τα οχήματα εξετάζονται σε μια σειρά αριθμών Reynolds. Για να αποφευχθούν τα λάθη λόγω του ανακριβούς αριθμού Reynolds, τα στοιχεία της μειωμένης κλίμακας παρεκτείνονται έπειτα στα πρότυπα πραγματικού μεγέθους. Ένα παράδειγμα χαρακτηριστικό για τα επιβατικά αυτοκίνητα έχει παρασχεθεί από τον H.-J EMMELMAN (βλ. το σχέδιο 1.58). 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 1.59 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 σχέδιο 1.60. 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.



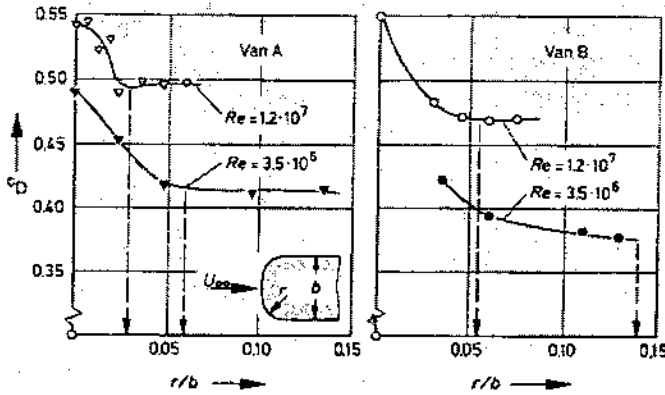
Σχήμα 1.58 Ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_D$  σε σχέση με τον αριθμού Reynolds  $Re$  για ένα πρότυπο 1:5 και ένα πραγματικό αυτοκίνητο, από τον H.J.EMMELMAN



Σχήμα 1.59 Συντελεστές της οπισθέλκουσας  $C_D$  και άνωσης  $C_L$  μιας ελεύθερης ρόδας σε σχέση με τον αριθμού Reynolds  $Re$ .

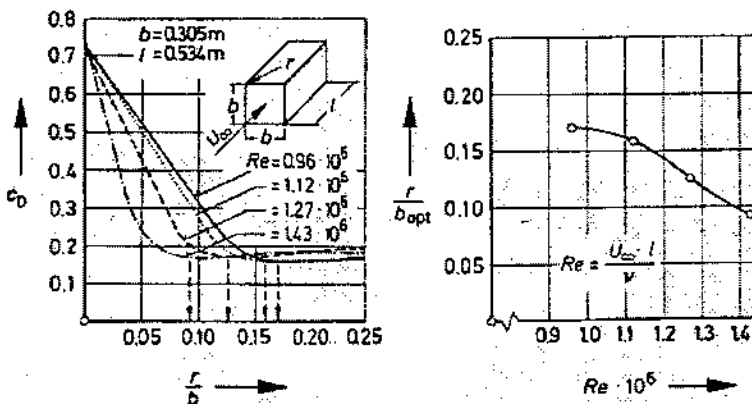
Παραδοσιακά, αυτό το φορτηγό είχε ένα προηγούμενο σχέδιο στο μπροστινό τμήμα πολύ πιο κυκλικό που ήταν αεροδυναμικά απαραίτητο (βλ. το σχέδιο 1.52). Μια

επίδραση του αριθμού Reynolds επομένως "δεν εμφανίστηκε" κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης αυτού του σχήματος. "Ανακαλύφθηκε" πολύ αργότερα τότε που οι δοκιμές τεκμηριώθηκαν στο σχέδιο 1.60 και πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του LT.



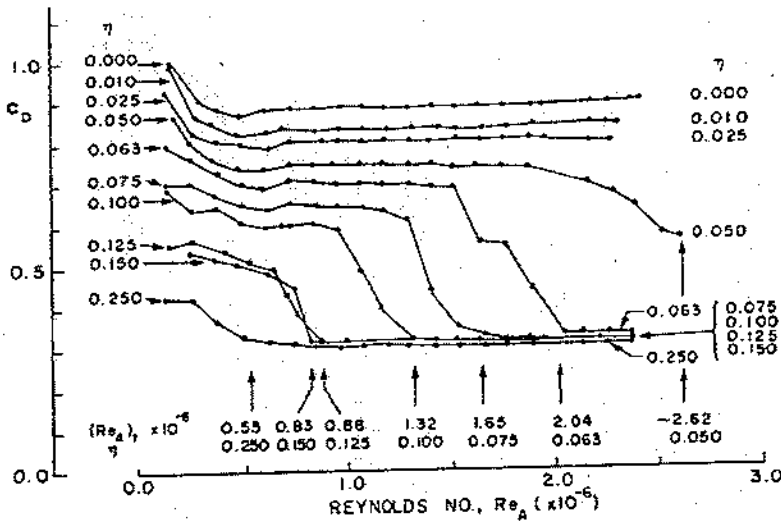
Σχήμα 1.60 Η επιρροή του αριθμού Reynolds στη "βέλτιστη" ακτίνα της μετάβασης από το μπροστινό μέρος στους πλευρικούς τοίχους δύο διαφορετικών φορτηγών, από τον W.-H. HUCHO.

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. RAWLOWKSI που αναπαράγονται στο σχέδιο 1.50, του W-h. HUCHO και άλλων παράχθηκε η σχέση που παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.61. 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 1.61 Επιρροή του αριθμού Reynolds στη "βέλτιστη" ακτίνα ενός κυβοειδούς, από τον W.-h. Huchho,

Ο COOPER ερεύνησε το συντελεστή οπισθέλκουσας  $C_D$  ενός παραλληλεπιπέδου κοντά στο έδαφος του οποίου τα χείλη προσβολής του στρογγυλεύτηκαν, τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο σχέδιο 1.62. 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 1.62 Η επιρροή του αριθμού Reynolds στο συντελεστή οπισθέλκουσας  $C_D$  για τις διάφορες ακτίνες στο χείλος προσβολής ενός κυβοειδούς, από τον K.R. COOPER.**

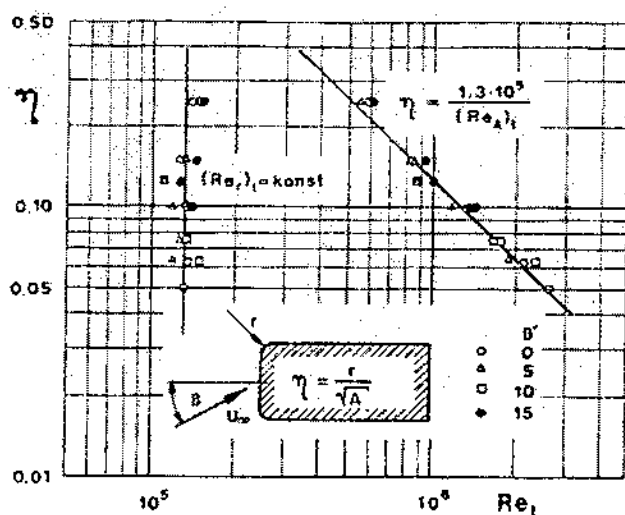
Η εξήγηση για αυτήν την επίδραση είναι ευρέως γνωστή. Για τις μικρές (αδιάστατες) ακτίνες, η ροή χωρίζεται στις μπροστινές άκρες (ανεξάρτητα από τον αριθμό Reynolds) και έτσι η οπισθέλκουσα είναι υψηλή. Για τις μέτριες ακτίνες, η ροή χωρίζεται πάλι στην αρχή αλλά έπειτα προσκολλείται μακρύτερα και κατάντη 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  $\eta_{opt}$  συσχετίζεται με τους σχετικούς "κρίσιμους" αριθμούς Reynolds σύμφωνα με το σχέδιο 1.62, λαμβάνεται μια καθολική σχέση. Στο σχέδιο 1.63 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:

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

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 1.63 Οι "βέλτιστες" ακτίνες της αιχμής σε σχέση του -κρίσιμου αριθμού Reynolds από τον COOPER.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή  $1.3 \times 10^5$  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 παραλληλεπιπέδου ανάντη της στρογγυλής άκρης είναι στρωτό, και ο χωρισμός από στρωτή ροή εμφανίζεται σε  $90^\circ$  (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 φουσαλίδα 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. 1.63 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  $Re_1 = 6 \times 10^6$ . Με ένα μήκος 1 m, που είναι χαρακτηριστικό για την κλίμακα 1/4, αυτό οδηγεί σε μια απαραίτητη ταχύτητα αέρα  $U_{\infty} = 90$  m/s ( $324$  km/h =  $203$  mph). Όπως θα παρουσιαστεί αργότερα, αυτό είναι πάρα πολύ υψηλό επειδή κατόπιν τα αποτελέσματα συμπίεστικότητας γίνονται αξιοπρόσεχτα.

Το σχήμα 1.63 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.

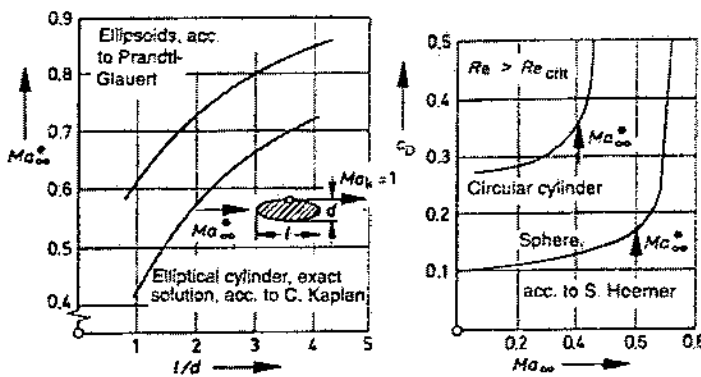
Τα κρίσιμα συμπεράσματα στη δοκιμή μικρής κλίμακας φαίνονται να έρχονται σε αντίθεση με τη δήλωση ότι τα αποτελέσματά του είναι σε συμφωνία με τα πραγματικού μεγέθους στοιχεία. Εντούτοις, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να τεκμηριώσουν αυτό πρέπει να εξεταστούν με προσοχή, ιδιαίτερα όταν γενικεύονται. 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  $w/U_{\infty}$ . Όπως μπορεί να φανεί από τα παραδείγματα στο σχήμα. 1.64, 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  $ma_{\infty}=0,3$  δεν ισχύει για τα αμαξώματα ως εμπόδια ως οχήματα. Το  $ma_{\infty}=0,2$  φαίνεται να είναι ένα λογικότερο

όριο. Συνεπώς, η ταχύτητα αέρα περιορίζεται στο  $U_{\infty} = 70 \text{ m/s}$ . 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



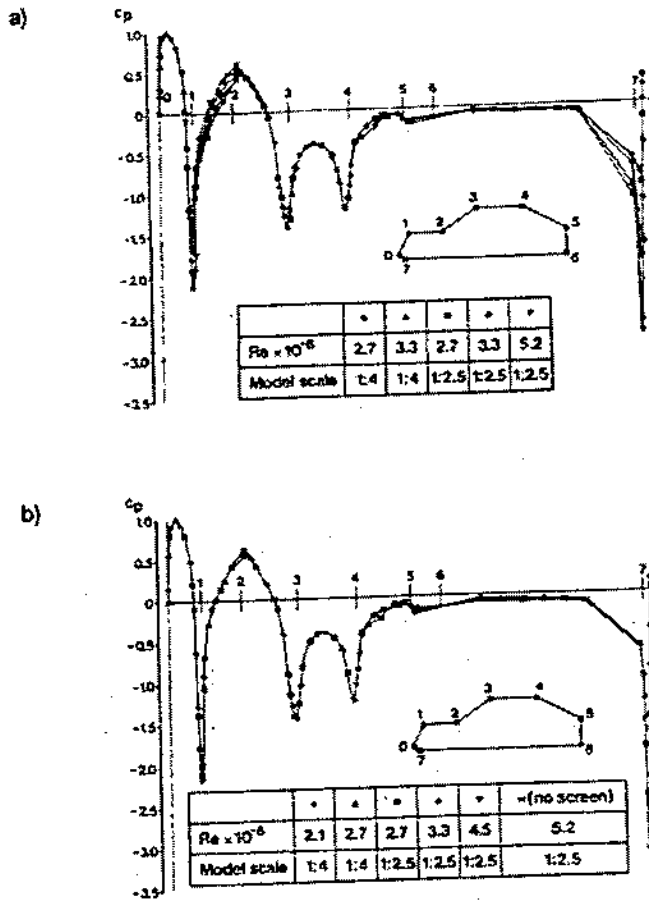
**Σχήμα 1.64** Ο κρίσιμος αριθμός Mach  $M_{\infty}^*$  και συντελεστή οπισθέλκουσας  $c_D$  για δισδιάστατα και τρισδιάστατα σώματα των οποίων η ευθύτητα είναι συγκρίσιμη με αυτήν των επιβατικών αυτοκινήτων, από τον **W. HUCHO**.

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.

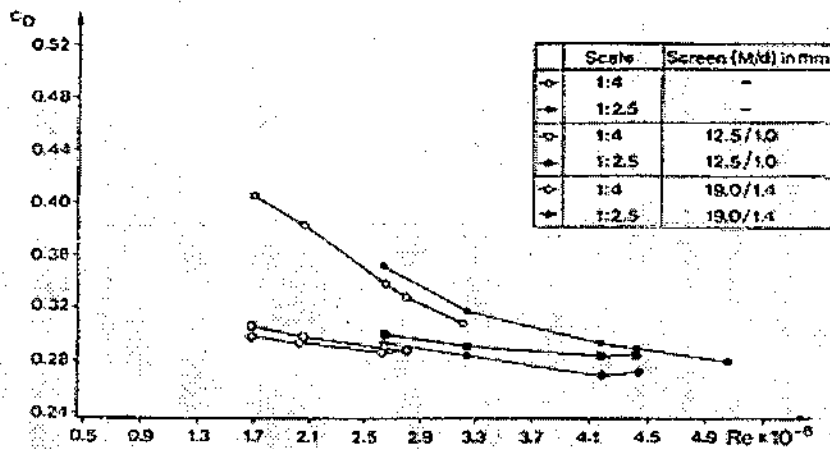
Αντίθετα, η τεχνική για εξομοίωση μεγαλύτερου αριθμό Reynolds γίνεται με την αύξηση του επιπέδου αναταραχής της επικείμενης ροής και έχει διευκρινιστεί αρκετά από τους J.WIEDEMANN και B. EWALD έτσι ώστε ισχύει στις δοκιμές προτύπων. Σαν συμπέρασμα από τα πειράματά τους έχουμε ότι ο αποτελεσματικός αριθμός Reynolds

μπορεί να αυξηθεί από έναν συντελεστή  $z$  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 σχέδιο 1.65 αυτό ήταν επαρκές για να αποβάλει την επιρροή του αριθμού Reynolds στη διανομή πίεσης. Η επίδραση του αριθμού Reynolds στην οπισθέλκουσα (δείτε το σχέδιο 1.66), 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 μ 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 1.65 Επίδραση του  $Re$  αριθμού Reynolds στη διανομή πίεσης σε ένα γενικό πρότυπο αυτοκινήτου: α) φυσική αναταραχή  $TU = 0,8\%$ , β) τεχνητά βελτιωμένο επίπεδο αναταραχής  $TU = 2,8\%$ , από τους WIEDEMANN και B. EWALD.



Σχήμα 1.66 Μείωση της επιρροής του αρ. Reynolds στον συντελεστή της οπισθέλκουσας από τους J. WIEDEMANN και B. EWALD .

## 1.5 Υπάρχουσες αεροσήραγγες αυτοκινήτων

### 1.5.1 Ταξινόμηση των εγκαταστάσεων δοκιμής

Οι περισσότεροι από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν τις εγκαταστάσεις τους για την εκτέλεση των διάφορων ειδών αεροδυναμικών και θερμικών δοκιμών, αλλά επίσης χρησιμοποιούν εξωτερικές εγκαταστάσεις που ενεπλάκησαν στην έρευνα και την αεροναυτική οχημάτων. Ποια δυνατότητα επιλέγεται, εξαρτάται από το σκοπό μιας συγκεκριμένης δοκιμής, της διαθεσιμότητας των σηράγγων και του κόστους.

Ο πίνακας 1.2 περιέχει μια έρευνα για τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις δοκιμής. Οι πραγματικού μεγέθους σήραγγες παρατίθενται στο σύνολο, στο μέτρο που οι πληροφορίες είναι διαθέσιμες. Αντίθετα, η σύνταξη των κλιματολογικών σηράγγων, των κλιματολογικών αιθουσών με αέρα, και των δυναμόμετρων με ανεμιστήρα δεν είναι πλήρης, οι εγκαταστάσεις που απαριθμούνται χρησιμεύουν ακριβώς ως παραδείγματα. Εξετάζονται μόνο εκείνες οι εγκαταστάσεις που επιτρέπουν τις δοκιμές με τα πραγματικού μεγέθους οχήματα και επιπλέον, μόνο εκείνοι των οποίων διατομή είναι μεγαλύτερη από  $2m^2$ . Οι μικρής κλίμακας αεροσήραγγες και τα πολλά δυναμόμετρα πλαισίων με ανεμιστήρα δεν εξετάζονται. Οι αναφορές που προστίθενται στον πίνακα-μόνη για κάθε δυνατότητα- περιέχει τις λεπτομερείς περιγραφές επ'αυτού, συμπεριλαμβανομένου του σχεδίου μέτρησης και εξοπλισμού υπολογιστών. Το σχ.1.67

είναι μια εικονογραφική εντύπωση της σειράς μεγέθους των πραγματικού μεγέθους σηράγγων (που αξιολογούνται από τη διατομή του τμήματος δοκιμής τους). Μην μετρώντας τη μεγάλη δυνατότητα δοκιμής της γερμανό-ολλανδικής αεροσήραγγας (DNW-LTF), επειδή η αρχική χρήση της είναι για την αεροναυτική, η μεγαλύτερη διατομή (GM) είναι 6,6 φορές μεγαλύτερη από η μικρότερη (BMW Technik GmbH).

Ο σημαντικότερος λόγος για τη ποικιλία σε μέγεθος είναι το φάσμα των επιθυμητών δοκιμών. Η μεγάλη αεροσήραγγα της GM αφιερώθηκε σε ολόκληρο πρόγραμμα οχημάτων αυτής της επιχείρησης, που κυμαίνεται από τα μικρά επιβατικά αυτοκίνητα μέχρι τα βαριά φορτηγά και τα λεωφορεία. Αντίθετα, η συγκριτικά μικρή αερο-ακουστική αεροσήραγγα της BMW TECHNIC GMBH αφιερώνεται μόνο στα επιβατικά αυτοκίνητα και τις μοτοσυκλέτες. Ένας άλλος λόγος για τη διαφορά στο μέγεθος των σηράγγων είναι ο τύπος τμήματος δοκιμής. Λόγω του μεγέθους των απαραίτητων διορθώσεων του οι ανάγκες κλειστών τμημάτων δοκιμής έχουν μια μεγαλύτερη διατομή από την ανοικτή.

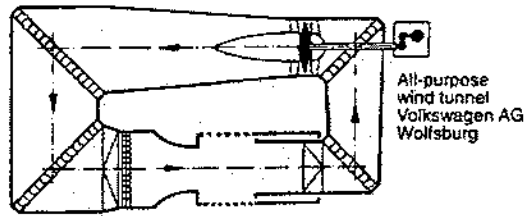
Οι περισσότερες από τις πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγες είτε με ανοικτό τμήμα δοκιμής είτε με αυλακωμένους τοίχους ενσωμάτωσαν στο πρόσφατο παρελθόν μια αεριωθούμενη διατομή εκβολής γύρω στο  $A_N = 25 \text{ m}^2$ . Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα στο σχεδιάγραμμα ακροφυσίων, το μήκος του τμήματος δοκιμής η περιοχή εισαγωγής του συλλέκτη, και ο όγκος ανάμειξης που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.2, και η εφαρμογή των διορθώσεων που ειπώθηκαν στην παράγραφο 1.3.3, μια αεροσήραγγα αυτού του μεγέθους φαίνεται να έχει τη βέλτιστη σχέση κόστους /κέρδους για τα αυτοκίνητα και τα ελαφριά φορτηγά. Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.4.1, μια σήραγγα με  $A_N = 25 \text{ m}^2$  είναι επίσης κατάλληλη για την ανάπτυξη των μεγάλων φορτηγών και των λεωφορείων εάν επιλέγεται μια κλίμακα 1/2.5. Εντούτοις, ο ακριβής καθορισμός των λεπτομερειών και ο τελικός έλεγχος των βαρέων εμπορικών οχημάτων πρέπει να εκτελεστούν με ένα πραγματικού μεγέθους πρωτότυπο σε μια μεγάλη αεροσήραγγα όπως η DNW-LTF.

Table 13.2 Wind Tunnels, Climatic Tunnels, and Dynamometers with Fan, as Applied in Vehicle Aerodynamics

Company	$A_N$ (m <sup>2</sup> )	L (m)	$U_{max}$ (km/h)	Test section	$\kappa$	Type	Fan power (kW)	Reference No.
DNW-LTF	90.25	15.0	220	closed	4.8	G	12700	[13.108]
	48.0	16.0	400		9.0			
General Motors	56.16	21.3	240	closed	5.0	G	2950*	[13.109]
Volkswagen	37.5	10.0	180	open	4.0	G	2600	[13.110]
Lockheed-Georgia	35.1	13.1	406	closed	7.02	G	6700	[13.111]
MIRA	35.0	15.24	133	closed	1.45	E	970	[13.112]
Mercedes-Benz	32.6	10.0	270	open	3.53	G	4000	[13.113]
FIAT	30.0	10.5	200	open	4.0	G	1865	[13.114]
CSTB (Nantes)	28.0	12.0	300	closed	2.2	G	3200	[13.115]
Nissan (low noise)	28.0	12.0	190	open	6.43	G	2200	[13.116]
	15.0		270		12			
Volvo	27.06	15.8	200	slotted-wall	6.0	G	2300	[13.117]
Ford (Cologne)	24.0	10.0	182	open	4.0	G	1650	[13.118]
	8.6		298				1960	
Mazda	24.0	12.0	230	open	6.0	G	1600	[13.119]
				closed				
Mitsubishi	24.0	12.0	215	open		G	2350	[13.119]
				closed				
Ford ("Hurricane Road," climatic)	23.2	9.15	201	closed	3.8	G	1865	[13.120]
IVK (low noise)	22.5	9.5	257	open	4.41	G	2550	[13.90]
Porsche	22.3	12.0	230	slotted-wall	6.06	G	2200	[13.121]
				open				
WAZ (Togliatti)	22.3	12.0	224	slotted-wall	6.06	G	2300	[13.122]
				open				
Nissan	21.0	10.0	119	closed	2.86	E		[13.62]
BMW (AG)	20.0	12.5	160	open	3.66	G	1676	[13.123]
Toyota	17.5	8.0	200	closed	3.66	G	1500	[13.124]
Nippon Soken	17.5	12.5	120	closed	3.66	G	1450	[13.119]
	12.0	8.5	200					
Inst. Aérotech. St. Cyr	15.0	10.0	144	slotted-wall	5.0	E	516	[13.125]
FIAT (2 climatic)	12.0	11.6	160	open	4.0	G	560	[13.114]
JAFI	12.0	10.0	205	closed	4.06	E	1200	[13.126]
Pininfarina	11.75	9.5	150	open	6.2	E	625	[13.7]
Volvo (climatic)	11.2	8.8	75	open	2.45	G	500	[13.127]
	4.3		195		6.6			
Ford (Cologne, climatic)	11.0	9.0	180	closed	6.0	G	1120	[13.89]
Audi (low noise)	11.0	10.0	235	open	5.5	G	2000	[13.128]
BMW (low noise)	10.0	10.0	250	open		E	1900	[13.91]
FKFS (large blowing tunnel)	6.0	15.8	200	open	4.16	G	1000	[13.129]
Volkswagen II (climatic)	6.0	7.2	170	open	6.0	G	460	[13.86]

(continued)

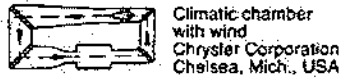
$A_N$  = διατομή του ακροφυσίου L = μήκος του τμήματος δοκιμής  $U_{max}$  = μέγιστη ταχύτητα αέρα  $\kappa$  = αναλογία συστολής P = ηλεκτρική ενέργεια ανεμιστήρων E = σήραγγα του EIFFEL G = "Gottingen" σήραγγα (κλειστή επιστροφή).



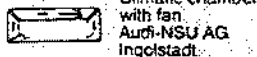
All-purpose  
wind tunnel  
Volkswagen AG  
Wolfsburg



Climatic  
tunnel  
Ford Werke AG  
Köln



Climatic chamber  
with wind  
Chrysler Corporation  
Chelsea, Mich., USA



Climatic chamber  
with fan  
Audi-NSU AG  
Ingolstadt

**Σχήμα 1.67 Σύγκριση μεγέθους διάφορων πεδίων δοκιμών που αφιερώνονται στις διάφορες πτυχές της αεροδυναμικής οχημάτων.**

Οι κλιματολογικές σήραγγες που αφιερώνονται στα επιβατικά αυτοκίνητα και τα ελαφριά φορτηγά πρέπει να έχουν μια διατομή εκβολής  $10-12 \text{ m}^2$ . Εάν οι δοκιμές είναι περιορισμένες στα αυτοκίνητα τότε το  $AN= 6 \text{ m}^2$  είναι ικανοποιητικό. Ο R.BUCHHEIM, καθόρισε ότι το λάθος στην ισορροπία θερμότητας σε σύγκριση με το δρόμο είναι λιγότερο από 5%. Εν πάση περιπτώσει, είναι αρμόζον να αναπτυχθεί μια εμπειρική ρύθμιση ταχύτητας αέρα, είτε σε σύγκριση με μια μεγάλη αεροσήραγγα είτε με το δρόμο. Όπως αναφέρεται ήδη, αυτή η ρύθμιση πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να θέσει τη σωστή ταχύτητα αέρα κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής και όχι για τη διόρθωση των στοιχείων αφότου ολοκληρωθεί. Μια από πριν διόρθωση δεν είναι πρακτική επειδή η ταχύτητα αέρα και η περιφερειακή ταχύτητα των κυλίνδρων του δυναμόμετρου πρέπει να είναι οι ίδιες. Το πώς να εκτελεστεί μια τέτοια ρύθμιση έχει περιγραφεί λεπτομερώς από τους B. HAMSTEN και F.M.CHRISTENSEN

Το ίδιο πράγμα ισχύει επίσης για τους κλιματολογικούς θαλάμους με αέρα. Αυτές οι εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται ευρέως για κλιματολογικές δοκιμές. Εντούτοις, η προσοχή συστήνεται επειδή το πεδίο ροής γύρω από ένα όχημα μπορεί να διαφέρει

σημαντικά από αυτό στο δρόμο (ή σε μια μεγάλη σήραγγα). Με την ενίσχυση από ρυθμιζόμενα πτερύγια -οδηγούς, η ροή του αέρα γύρω από ένα αντικείμενο δοκιμής μπορεί να καθοδηγηθεί έτσι ώστε να έρθει κοντά στο πραγματικό πεδίο ροής.

Οι εγκαταστάσεις δοκιμής με μια διατομή εκβολής μικρότερη από  $4 \text{ m}^2$  αλλά χωρίς τη δυνατότητα να αναπαραχθεί το κλίμα πέρα από ένα ευρύ φάσμα καλούνται δυναμόμετρα με ανεμιστήρα. Για τις δοκιμές ακτινοβολίας, είναι επαρκή ακόμα μικρότερα ρεύματα αέρος  $A_N = 1,5 \text{ m}^2$  που φαίνεται να είναι ικανοποιητικό. Η σύγκριση των διανομών πίεσης στο μπροστινό μέρος ενός αυτοκινήτου που φαίνεται στο σχέδιο 1.68 παρουσιάζει μια ομοιότητα στην πραγματική ροή που είναι αρκετά καλή για τις αρχικές δοκιμές. Εντούτοις, ο τελικός καθαρισμός της ροής κάτω του αμαξώματος απαιτεί πολύ καλή αναπαραγωγή της εξωτερικής ροής.

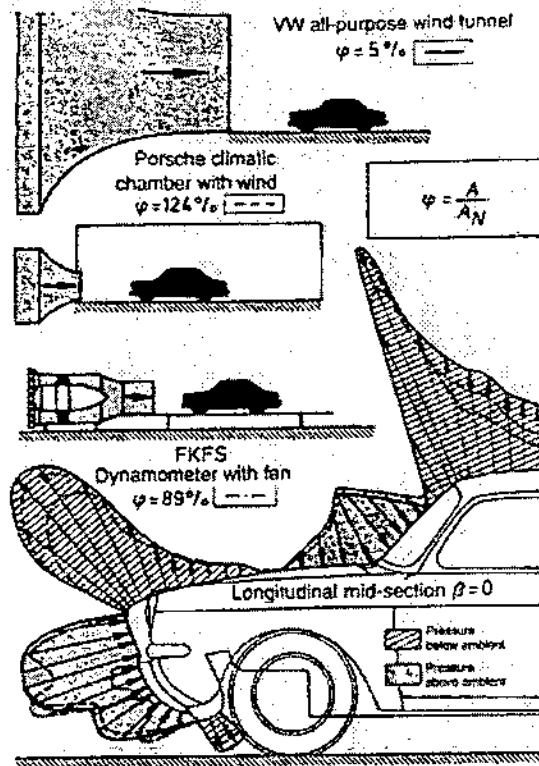
### ***1.5.2 Πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγες***

Η παλαιότερη πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα που αφιερώνεται στην αεροδυναμική οχημάτων βρίσκεται στη Στουτγάρδη και παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.69. Χτίστηκε υπό την καθοδήγηση του W.KAMM και άνοιξε το 1939 ως τμήμα του Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS). Το 1970 η σήραγγα του KAMM αναλήφθηκε από Daimler-Benz AG, και ανασκευάστηκε εντελώς. Αυτή η σήραγγα διακρίνεται από την εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα φυσήματος  $U_{max} = 270 \text{ km/h}$ . Μια τέτοια υψηλή ταχύτητα είναι συμφέρουσα για την ανάπτυξη γρήγορων οχημάτων, παραδείγματος χάριν αγωνίστηκα αυτοκίνητα, ακόμα και όταν δεν αναμένονται πλέον τα αποτελέσματα του αριθμού Reynolds. Επιτρέπει την άμεση εξέταση των αποτελεσμάτων των μεταβαλλόμενων δυνάμεων του αέρα και των ροπών ενός οχήματος. Επιπλέον, η υψηλή μέγιστη ταχύτητα αέρα, μαζί με τη μεγάλη διατομή εκβολής καθιστά τη σήραγγα ικανή για πειράματα με πρότυπα 1/2.5 κλίμακας των βαρέων εμπορικών οχημάτων.

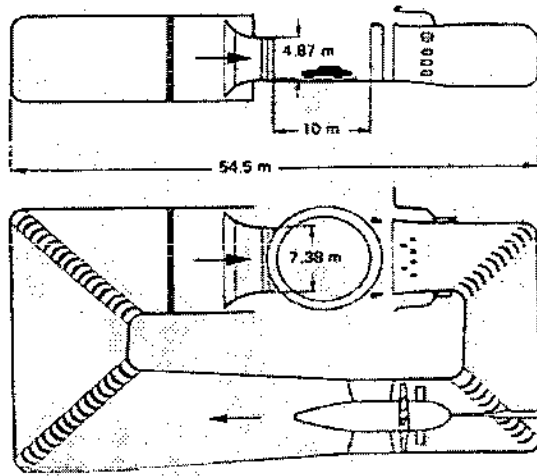
Η μεγαλύτερη αεροσήραγγα αυτοκινήτων που χτίστηκε ποτέ τοποθετήθηκε σε λειτουργία από τη General Motors το 1980 στο Μίσιγκαν. Το σχέδιο της πορείας του αέρα παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.70. Οι διαστάσεις του τμήματος δοκιμής του (διατομή  $A_N = 56,2 \text{ m}^2$  μήκος  $L = 21,3 \text{ m}^2$ ) είναι επαρκής για τη δοκιμή ακόμη και των μεγάλων εμπορικών οχημάτων στην πλήρη κλίμακα. Η μέγιστη ταχύτητα αέρα  $U_{00} = 250 \text{ km/h}$  είναι ικανοποιητική για τις δοκιμές με αγωνιστικά αυτοκίνητα. Οι πλευρικοί τοίχοι του τμήματος δοκιμής έχουν μια μικρή απόκλιση  $0,24^\circ$  για να διατηρούν σταθερή τη στατική πίεση κατά



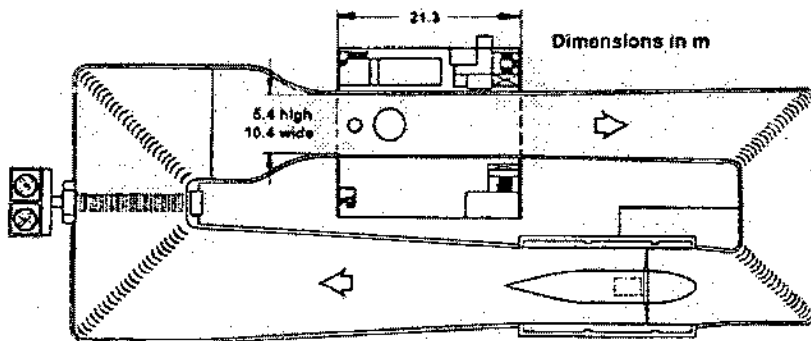
μήκος του άξονα του κενού τμήματος δοκιμής. Η σήραγγα είναι εξοπλισμένη με δύο έξι-συστατικές πλάστιγγες, μια στη μπροστινή θέση για τα μειωμένης κλίμακας πρότυπα, άλλος μακρύτερα και κατάντη για τα πραγματικού μεγέθους οχήματα. Το συγκεκριμένο σχέδιο και των δύο περιστροφικών πλακών, που χρησιμοποιούν τους "κύκλους ρύθμισης" (σχέδιο 1.71) επιτρέπει τη γρήγορη ρύθμιση της διαδρομής και της βάσης του τροχού για τα διαφορετικού μεγέθους πρότυπα. Προκειμένου να μειωθεί το πάχος του οριακού στρώματος στο έδαφος, ο αέρας αφαιρείται μπροστά από τη μικρής κλίμακας περιστροφική πλάκα και ανατροφοδοτείται στο ρεύμα αέρος της σήραγγας στο οπίσθιο τμήμα του τμήματος δοκιμής. Ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας που βρίσκεται μεταξύ της τρίτης και τέταρτης γωνίας του κυκλώματος επιτρέπει τον έλεγχο της θερμοκρασίας του αέρα μεταξύ 16-29°C. Κατά συνέπεια τα πρότυπα αργίλου μπορούν να προστατευθούν από τη μείωση της θερμότητας.



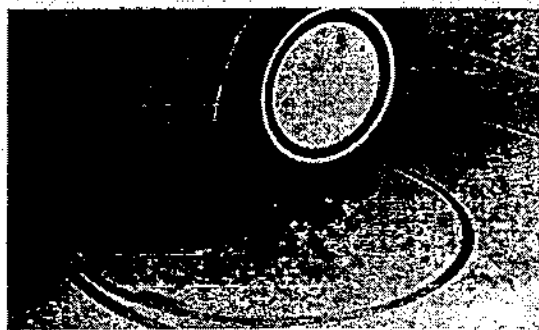
Σχήμα 1.68 Σύγκριση της διανομής πίεσης στο μπροστινό μέρος ενός αυτοκινήτου που μετριέται σε μια μεγάλη σήραγγα,, μια κλιματολογική αίθουσα με αέρα και ένα δυναμόμετρο με ανεμιστήρα, από τον P.UNGER.



Σχήμα 1.69

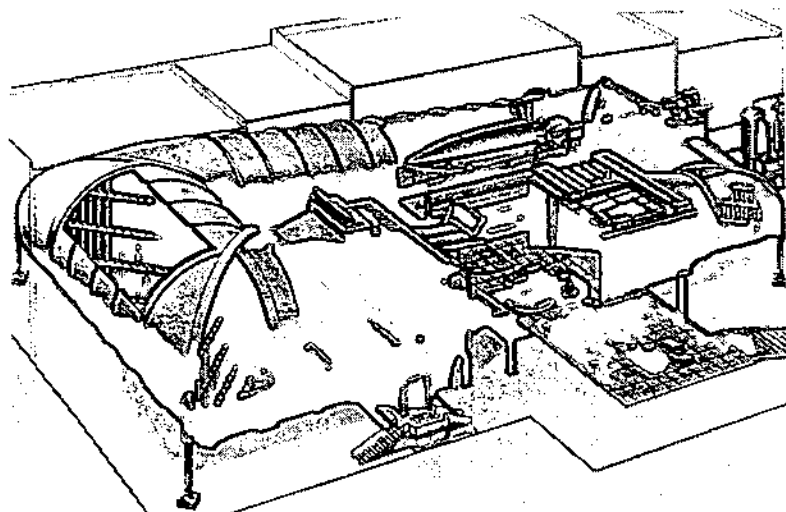


Σχήμα 1.70 Πραγματικού μεγέθους μεγάλη αεροσήραγγα της General Motors (διαστάσεις στους μετρητές): διατομή  $56,2 \text{ m}^2$  τμημάτων δοκιμής μέγιστη ταχύτητα αέρα  $250 \text{ km/h}$  (διάρκεια 15 λεπτών) δύναμη ανεμιστήρων  $2.238 \text{ MW}$  συνεχής,  $2.984 \text{ MW}$  με διαλείψεις. ( General Motors)



Σχήμα 1.71 "Κύκλοι ρύθμισης" για την προσαρμογή της underfloor πλάστιγγας για τη διαδρομή και το wheelbase στη μεγάλη πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα της GM (General Motors)

Σε αντίθεση με αυτές τις δύο καθαρές αεροδυναμικές σήραγγες, το σχέδιο 1.72 παρουσιάζει τη κλιματολογική σήραγγα αέρα της VOLKSWAGEN AG στο Wolfsburg. Είναι μια μεγάλη αεροδυναμική σήραγγα που συνδυάζεται με μια κλιματολογική σήραγγα. Η μέγιστη ταχύτητα αέρα  $U_{\infty} = 180 \text{ km/h}$  είναι ικανοποιητική για τη δοκιμή των επιβατικών αυτοκινήτων, και η διατομή εκβολής  $A_N = 37.5 \text{ m}^2$  είναι ικανή για τα ελαφριά φορτηγά. Η θερμοκρασία μπορεί να καλυφθεί από μια μετακινούμενη αίθουσα όταν η θερμοκρασία του αέρα μέσα στη σήραγγα είναι διαφορετική από αυτή του περιβάλλον. Με εξαίρεση την ακουστική, αυτή η σήραγγα είναι κατάλληλη για όλα τα είδη δοκιμών, είτε αυτές είναι αεροδυναμικές είτε θερμικές, οι οποίες εκτελούνται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης ενός οχήματος.



*Σχήμα 1.72 Πραγματικού μεγέθους κλιματολογική (για κάθε χρήση) αεροσήραγγα της VOLKSWAGEN AG διατομή ακροφυσίων  $37,5 \text{ m}^2$  μέγιστη ταχύτητα αέρα  $175 \text{ km/h}$  δύναμη ανεμιστήρων  $2,6 \text{ MW}$  θερμοκρασίας  $-35^\circ \text{C} + 40^\circ \text{C}$ . (Courtesy VOLKSWAGEN AG)*

Αυτή η σήραγγα της VOLKSWAGEN, που λειτούργησε το 1965, έχει παραμείνει η μοναδική στο το είδος της. Άλλες επιχειρήσεις αυτοκινήτων που δημιούργησαν αργότερα έχουν προτιμήσει μια διαφορετική δομή: ξεχωριστές εγκαταστάσεις για τις αεροδυναμικές και για θερμικές δοκιμές. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο φιλοσοφιών έχουν αναλυθεί από τον W.-H. HUCHO. Παρόμοιες εκτιμήσεις αναλήφθηκαν πριν από την κατασκευή της κλιματολογικής αεροσήραγγας της Ford Werke AG στην Κολωνία. Η δομή πολλών αλλά και εξειδικευμένων εγκαταστάσεων έχει αποδειχθεί σαφώς καλύτερη. Σε μια

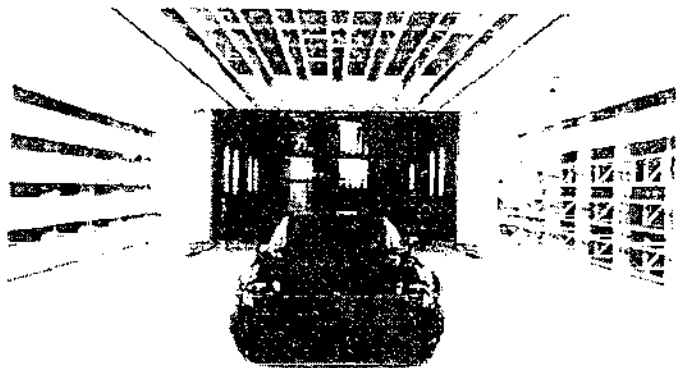
επιχείρηση αυτοκινήτων που έχει μια γραμμή τριών έως τεσσάρων επιβατικών αυτοκινήτων ή ενός ή δύο ελαφριών οχημάτων, η ζήτηση για χρόνο δοκιμής είναι τόσο υψηλή που απαιτούνται περισσότερες από μια εγκαταστάσεις. Άρα σωστό είναι να χτιστούν δύο (ή ακόμα και περισσότερες) εξειδικευμένες εγκαταστάσεις παρά να γίνουν αποδεκτοί οι συμβιβασμοί μιας σήραγγας για κάθε δοκιμή.

Η κατάσταση προόδου του πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγες αυτοκινήτων αντιπροσωπεύεται από τις δύο ακόλουθες εγκαταστάσεις:

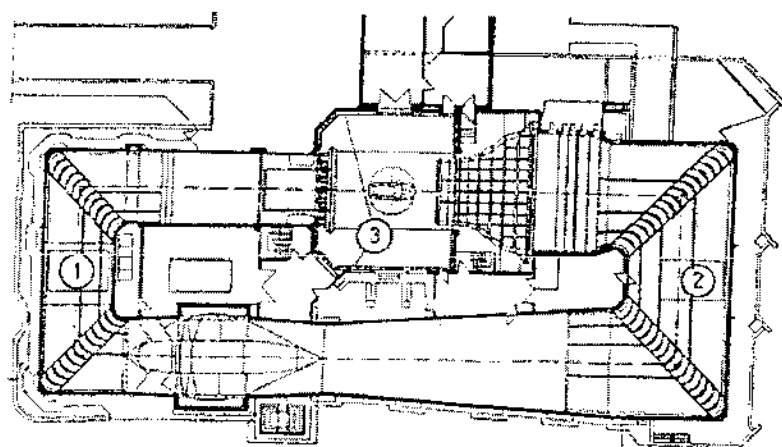
1. Η πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα στο κέντρο Weissach R&D της Porsche AG.
2. Η αέρο-ακουστικής αεροσήραγγας IVK πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης.

Η σήραγγα της Porsche στο Weissach, που είναι ενεργή από το 1986, είναι εξοπλισμένη με ένα αυλακωμένο τμήμα δοκιμής (σχέδιο 1.73), οι αυλακωμένοι τοίχοι μπορούν να αφαιρεθούν. Με  $\kappa=6$ , η αναλογία συστολής του είναι, μεγαλύτερη από ότι είναι απαραίτητο. Ο λόγος για αυτήν την μεγάλη τιμή ήταν να κατασταθεί η σήραγγα εφαρμόσιμη για αεροναυτικούς λόγους επίσης.

Αρχικά, η σήραγγα ολοκληρωμένου κυκλώματος χτίστηκε καθαρά για αεροδυναμική δυνατότητα, και υπό αυτήν τη μορφή μπήκε στην υπηρεσία το 1988 η μέγιστη ταχύτητα αέρα ήταν 270 km/h (= 168 mph). Εντούτοις, μέτρα λήφθηκαν με τις πιο πρόσφατες βελτιώσεις να διευρύνουν το φάσμα δοκιμής της σήραγγας, ώστε να περιλάβουν τις έρευνες θορύβου του αέρα. Αυτή η βελτίωση εκτελέστηκε το 1993 με μια τεχνική κατασιγάσεις που αναπτύχθηκε από το ίδρυμα Fraunhofer Structural Physics. Ο R. KUNSTNER έχει δώσει μια λεπτομερή έκθεση σχετικά με τις εκτιμήσεις του σχεδίου και τα πρώτα αποτελέσματα. Η πορεία αέρα (σχέδιο 1.74) επιδεικνύει πώς ο θόρυβος των ανεμιστήρων "εγκλωβίζεται" από δύο σιγαστήρες σχήματος U. Οι συσκευές για τη μείωση του θορύβου είναι εφαρμόσιμες για δύο φάσματα συχνοτήτων. Στο χαμηλό

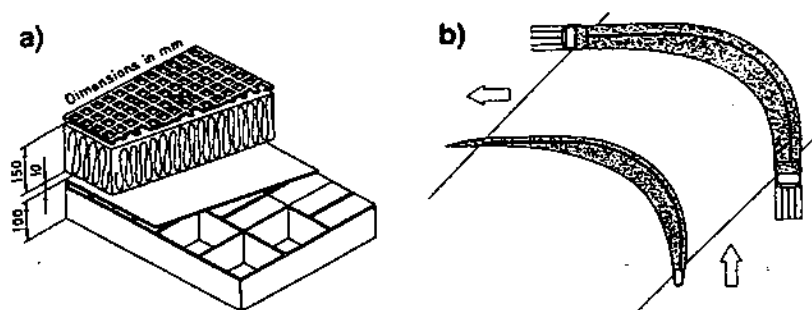


*Σχήμα 1.73 Τμήμα δοκιμής με αυλακωμένους τοίχους στην αεροσήραγγα της Porsche AG. (Courtesy Porsche AG)*

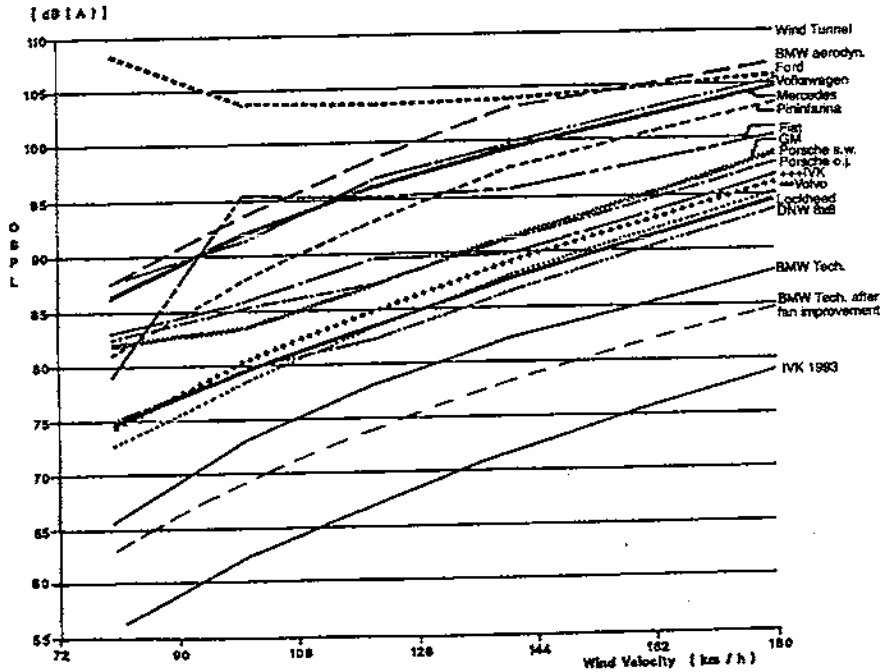


**Σχήμα 1.74** Πραγματικού μεγέθους αερο-ακουστική αεροσήραγγα της IVK, Στουτγάρδη: διατομή ακροφυσίων 22,45m<sup>2</sup> μέγιστη ταχύτητα αέρα 257 km/h, δύναμη ανεμιστήρων 2.25MW, 1) και 2) οι περιστρεφόμενες αντλίες είναι σχεδιασμένες για σύστημα απορρόφησης θορύβου, 3) Ο θάλαμος δοκιμής είναι επενδυμένος με υλικό απορρόφησης ήχου.

φάσμα συχνότητας (80-200 Hz) ο θόρυβος των ανεμιστήρων μετριάζεται από το νέο απορροφητή μεμβρανών που φαίνεται στο σχέδιο 1.75 (α) Στις μέσες και υψηλές συχνότητες μετριάζονται από τον πορώδη πολυεστερικό αφρό (δείτε το σχέδιο 1.75 (β)). Το επίπεδο θορύβου που μετρείται εκτός ροής και που σχεδιάζεται σε σχάση με τη ταχύτητα των σηράγγων (δείτε το σχέδιο 1.76) είναι μια απόδειξη της αποτελεσματικότητας αυτής της δομής



**Σχήμα 1.75** Noise-absorbing στοιχεία στην πραγματικού μεγέθους αερο-ακουστική αεροσήραγγα IVK a) broad-band απορροφητές b)περιστρεφόμενες αντλίες που καλύπτονται με αφρό.



**Σχήμα 1.76** *A-weighted* γενικό επίπεδο υγιούς πίεσης (OSPL) σε σχέση με τη ταχύτητα σηράγγων. Μετρήσεις από E. MERCKER και K PENGEL στοιχεία IVK από J. POTTHOFF, (BMW tech :μετά τη βελτίωση του ανεμιστήρα) ,στοιχεία από τον N. LINDENER

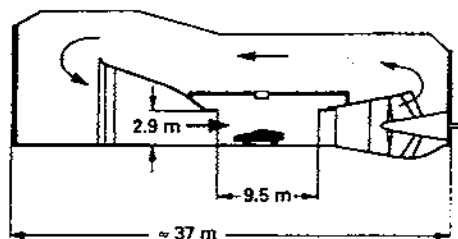
Η αερο-ακουστική σήραγγα αέρα IVK είναι τώρα η πιο ήσυχη πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα που χτίστηκε ποτέ. Η μέγιστη ταχύτητα αέρα της σήραγγας μειώθηκε μόνο 7 km/h από τα μέτρα απόσβεσης.

Εκτός από αυτές τις μεγάλες πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγες με τις διατομές επάνω από  $A_N = 20 \text{ m}^2$  δύο μικρές πραγματικού μεγέθους σήραγγες έχουν χτιστεί και κάποια είναι προς το παρόν υπό κατασκευή με διατομή  $10 \text{ m}^2$ :

- Αεροσήραγγα Pininfarina, Τορίνο, Ιταλία.
- Αερο-ακουστική σήραγγα αέρα της Bmw Technik GmbH, Μόναχο, Γερμανία.
- Αερο-ακουστική σήραγγα αέρα Audi, Ingolstadt, Γερμανία.

Μια διατομή της αεροσήραγγας του Pininfarina παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.77. Σχεδιάστηκε από τον A. MORELLI και άνοιξε το 1972, και χτίστηκε ως σήραγγα Eiffel, περιβάλλεται από ένα κτήριο του οποίου η μορφή επιλέχτηκε για να δώσει χαμηλές απώλειες στην επιστροφή της ροής. Σύμφωνα με την πρόοδο που έγινε κατά την διάρκεια του σχεδίου του, η

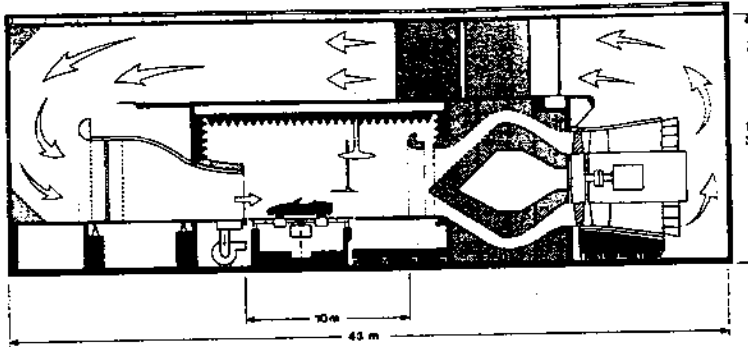
διατομή  $11,75 \text{ m}^2$  αυτής της σήραγγας είναι εξαιρετικά μικρή (η σήραγγα έπρεπε να εγκατασταθεί σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του εδάφους). Εντούτοις, σε συγκριτικές μετρήσεις από τις διάφορες σήραγγες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.6, η σήραγγα έδωσε εκπληκτικά καλά αποτελέσματα. Το 1996 το σύστημα ανεμιστήρα-κίνησης αντικαταστάθηκε. Ειδικότερα, ένας νέος ανεμιστήρας με 29 πτερύγια μείωσε το επίπεδο θορύβου αρκετά, ειδικά στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων.



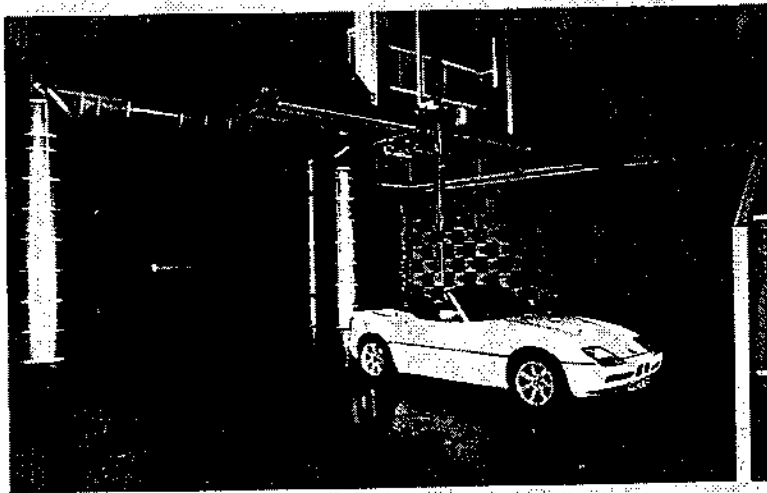
**Σχήμα 1.77 Πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα Pininfarina: διατομή ακροφυσίων  $11,75 \text{ m}^2$ , ημικυκλικός παρά ορθογώνιος, μέγιστη ταχύτητα αέρα  $145 \text{ km/h}$  δύναμη ανεμιστήρων  $625 \text{ kW}$ , κινούμενο δάπεδο. Σχέδιο από τον A. MORELLI.**

Η αερο-ακουστική αεροσήραγγα της BMW Technik GmbH (σχέδιο 1.78). Σχεδιάστηκε από τον L.J. JANSSEN και άνοιξε το 1988. Με μια διατομή μόνο  $10 \text{ m}^2$  είναι η μικρότερη πραγματικού μεγέθους αεροσήραγγα. Αυτή είναι η συνέπεια στο ότι έπρεπε να σχεδιαστεί μέσα σε ένα υπάρχον κτίριο. Για να μειωθεί ο θόρυβος των ανεμιστήρων, εγκαταστάθηκαν δύο διατάξεις απόσβεσης: Ένας νέος (κατοχυρωμένου με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας) στο μικρό τμήμα από την πλευρά της αναρρόφησης του ανεμιστήρα που λόγω της μορφής του, καλείται "απορροφητήρας - μανιτάρι" (δείτε το σχέδιο 1.79), και ένα τυποποιημένο διάφραγμα-σιγαστήρα σαν αυτό που χρησιμοποιείται στα συστήματα κλιματισμού των κτηρίων στο τμήμα της επιστροφής. Όπως μπορεί να συναχθεί από το σχέδιο 1.76, αυτή η σήραγγα είναι πολύ σιωπηλή. Η ποιότητα θορύβου έχει βελτιωθεί περαιτέρω με τη σφράγιση διάφορων κοιλοτήτων στο εξωτερικό άκρο των πτερυγίων των ανεμιστήρων. Μία ρύθμιση γύρω στα  $2 \text{ kHz}$  μειώθηκε από  $30 \text{ dB}$ , και το γενικό επίπεδο θορύβου εκροής μειώθηκε κατά  $3 \text{ dB (A)}$  Το επίπεδο θορύβου της αερο-ακουστικής σήραγγας της BMW είναι τόσο χαμηλό που επιτρέπει την αναγνώριση ομιλίας. Η σήραγγα είναι εξοπλισμένη με μια έξι-συστατική πλατφόρμα. Τα μέτρα για να μειωθεί ο θόρυβος του αέρα σε μια εγκατάσταση μπορούν να αξιολογηθούν όσον αφορά την επιρροή τους στην οπισθέλκουσα. Η περιστροφή των ροδών μπορεί να αναπαραχθεί, και

υπάρχει χώρος στο πλαίσιο της πλάστιγγας για την εγκατάσταση μιας στενής κινούμενης ζώνης.



*Σχήμα 1.78 Αερο-ακουστική σήραγγα αέρα της Bmw Technik GmbH. - διατομή  $10 \text{ m}^2$  ακροφυσίων μέγιστη ταχύτητα αέρα  $250 \text{ km/h}$  δύναμη ανεμιστήρων  $1,9 \text{ MW}$ , - αναπαράγεται περιστροφή των ροδών*



*Σχήμα 1.79 Αερο-ακουστική σήραγγα αέρα της Bmw Technik GmbH,*

Η αερο-ακουστική σήραγγα αέρα της Audi που σχεδιάστηκε από τον J.WIEDEMANN είναι υπό κατασκευή. Θα είναι μια σήραγγα Gottingen ανοικτού τύπου, που θα έχει μια έξοδο -ακροφυσίου  $11 \text{ m}^2$  μια και μέγιστη ταχύτητα περίπου  $210 \text{ km/h}$ . Η σήραγγα σχεδιάζεται για την πραγματικού μεγέθους αεροδυναμική και ακουστική δοκιμή. Το τμήμα δοκιμής θα έχει μήκος  $10 \text{ m}$ , δηλ.,  $3,1$  υδραυλικές διαμέτροι του ακροφυσίου. Η εισαγωγή του συλλέκτη είναι περίπου  $3,7$  φορές μεγαλύτερη από την έξοδο του ακροφυσίου. Η προσομοίωση του δρόμου παρέχεται με τη βοήθεια μιας κινούμενης ζώνης. Η πλάστιγγα θα εξοπλιστεί με ένα σύστημα που παρέχει την περιστροφή ροδών. Ο



θόρυβος ανεμιστήρων "θα εγκλωβιστεί" από δύο περιστρεφόμενες βάνες που σχεδιάζονται ως απορροφητήρες, και θα μειωθεί κάτω από το επίπεδο θορύβου του ανοικτού τζετ. Ο θάλαμος σχεδιάζεται ως ημιηχομονωμένη αίθουσα.

### ***1.5.3 Αεροσήραγγες για πρότυπα μειωμένης κλίμακας***

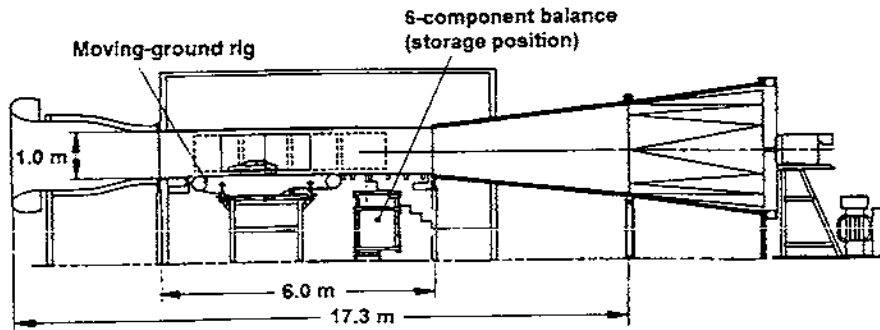
Υπάρχουν πολυάριθμες σήραγγες για τη δοκιμή των προτύπων μειωμένης κλίμακας, πολλές από τους στον ακαδημαϊκό κόσμο όπου μόνο περιστασιακά χρησιμοποιούνται για την αεροδυναμική οχημάτων, και άλλες που αφιερώνονται μόνο στα οχήματα. Τέσσερα χαρακτηριστικά παραδείγματα των τελευταίων είναι:

1. Αεροσήραγγα MIRA κλίμακας 1/4
2. Αεροσήραγγα της Porsche κλίμακας 1/4
3. Αεροσήραγγα IVK μειωμένης κλίμακας (1/4 , 1/5)
4. Αεροσήραγγα της Chrysler κλίμακας 3/8

Οι σήραγγες μειωμένης κλίμακας της Porsche και της Chrysler χτίστηκαν ως πειραματικές σήραγγες για το σχέδιο των πραγματικού μεγέθους σηράγγων και χρησιμοποιούνται τώρα ως εργαλεία ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης οχημάτων στη φάση της μικρής κλίμακας.

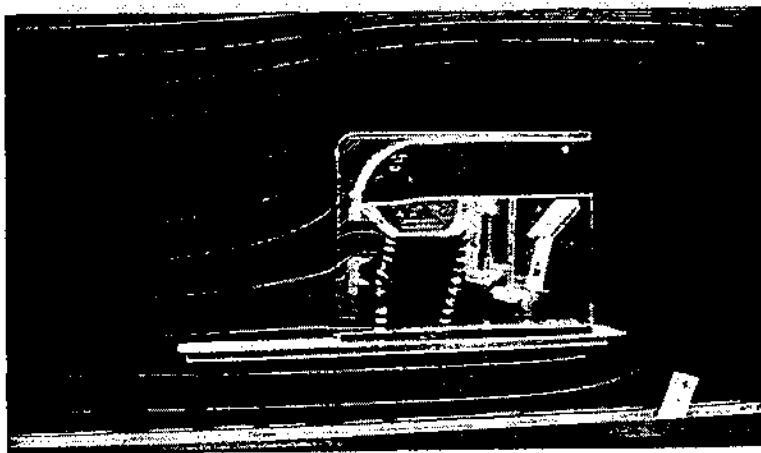
Υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα για μια πειραματική σήραγγα συγκριτικά με μία μεγάλη μεγέθους. Κατ' αρχάς, ο αριθμός Reynolds στην πορεία του αέρα είναι πιο κοντά από αυτόν της πραγματικού μεγέθους σήραγγας κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σοβαρά για το σχέδιο της πραγματικού μεγέθους σήραγγας. Δεύτερον, η πειραματική σήραγγα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή των μικρής κλίμακας προτύπων. Ακόμα, λόγω της ακριβούς γεωμετρικής ομοιότητας μεταξύ της πειραματικής και πραγματικού μεγέθους σήραγγας, τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας μεταφέρονται ευκολότερα στην πραγματικού μεγέθους σήραγγα επειδή οποιεσδήποτε απαραίτητες διορθώσεις δεδομένων είναι ίδιες.

Οι αεροσήραγγες μειωμένης κλίμακας μπορούν να χτιστούν με πολύ χαμηλότερο κόστος, η σήραγγα MIRA 1/4 κλίμακας, που παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.80, είναι ένα τέτοιο παράδειγμα. Επίσης η δαπάνη λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων είναι χαμηλή, και η ευελιξία είναι υψηλή.



*Σχήμα 1.80 Τέταρτης-κλίμακας-πρότυπο στην σήραγγα MIRA: διατομή  $2,12\text{m}^2$  μέγιστη ταχύτητα αέρα  $40\text{ m/s}$  ( $90\text{ mph}$ ), δύναμη ανεμιστήρων  $37\text{ kW}$ , κινούμενη εγκατάσταση δαπέδου*

Οι σήραγγες καπνού χαμηλής-αναταραχής έχουν αναπτυχθεί ειδικά για τις παρατηρήσεις ροής στα οχήματα και τα μέρη τους. Σύμφωνα με τον N.ODA και T. HOSHINO. Η Isuzu λειτουργεί μία σήραγγα  $1\text{m}^2$  καπνού που επιτρέπει την παρατήρηση στα τρισδιάστατα φαινόμενα. Η Nissan χρησιμοποιεί μια σήραγγα καπνού κυρίως για την εξέταση των λεπτομερειών της ροής στους δροσίζοντας αεραγωγούς στα δισδιάστατα πρότυπα. Μια χαρακτηριστική εικόνα καπνού παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.81.



*Σχήμα 1.81 Ροή μέσω των κολπίσκων και του θερμαντικού σώματος ενός δισδιάστατου προτύπου, που γίνεται ορατή με την εισαγωγή των ραβδώσεων καπνού.*

Οι σήραγγες ύδατος είναι ιδιαίτερα καλές για την απεικόνιση της ροής. Η Mercedes-Benz χρησιμοποιεί τη σήραγγα ύδατος του πανεπιστημίου της Στουτγάρδης ( $= 1,16\text{ m}^2$ ) για τη

βελτιστοποίηση της ροής στην πολύ πρόωρη φάση ανάπτυξης προϊόντων χρησιμοποιώντας τα πρότυπα 1/5κλίμακας

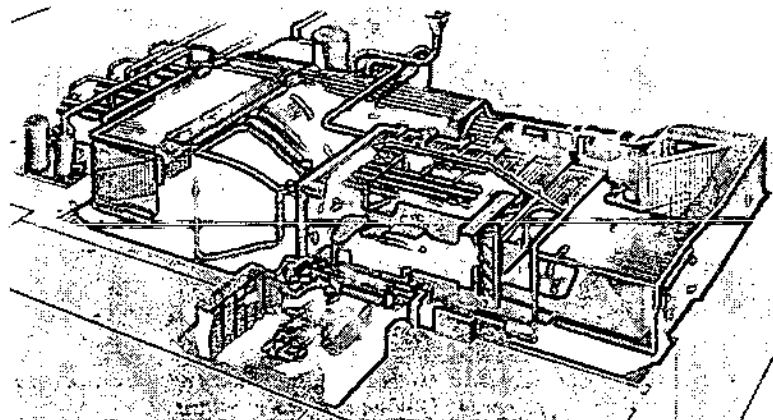
#### **1.5.4 Κλιματολογικές σήραγγες**

Οι κλιματολογικές σήραγγες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες σύμφωνα με το μέγεθός τους, το οποίο χαρακτηρίζεται από τη διατομή του τζετ (με  $A_N = 23,2 \text{ m}^2$ , 'Hurricane road' της FORD στο Dearbom, Μίσιγκαν, είναι εξαιρετικά μεγάλο και μοναδικό). Οι διατομές των τριών ομάδων είναι:

- 10-12  $\text{m}^2$  για τα αυτοκίνητα, τα ελαφριά οχήματα και σε ακραίες περιπτώσεις για τα λεωφορεία.
- 6  $\text{m}^2$  για τα αυτοκίνητα.
- 4  $\text{m}^2$  για τα αυτοκίνητα.

Χαρακτηριστικές της πρώτης κατηγορίας είναι οι δύο κλιματολογικές σήραγγες 12  $\text{m}^2$  της FIAT, στο Τορίνο και τη κλιματολογική σήραγγα της MZ Ford Werke AG στη Κολωνία. Οι πορείες αέρα και των τριών αυτών κλιματολογικών σήραγγων έρχονται πολύ κοντά σε αυτές των αεροδυναμικών αεροσηράγγων. Ο εξοπλισμός και το δυναμόμετρό τους, ελέγχουν την θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία και την ακτινοβολία του ήλιου. Αυτοί είναι κατάλληλοι για όλα τα είδη θερμικών δοκιμών σχετικά με τη θέρμανση, τον εξαερισμό και τον κλιματισμό (και την ψύξη του κινητήρα εάν δεν υπάρχει μικρότερη και φτηνότερη εγκατάσταση διαθέσιμη).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της κατηγορίας των 6  $\text{m}^2$  είναι η κλιματολογική σήραγγα αέρα της VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg, που άνοιξε το 1986, και παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.82. Όπως περιγράφεται από P.BUCHHEIM, σχεδιάστηκε μόνο για τα αυτοκίνητα, τα μεγαλύτερα οχήματα μπορούν να εξεταστούν στη μεγάλη κλιματολογική σήραγγα αέρα I. Η αναλογία συστολής  $k=6$  φαίνεται να είναι υπερβολική. Εντούτοις, η σήραγγα χρησιμοποιείται και για τα πρότυπα μειωμένης κλίμακας (1/2.5) και για αυτόν τον σκοπό η υψηλή ποιότητα ροής είναι απαραίτητη.



*Σχήμα 1.82 Κλιματολογική σήραγγα αέρα II της VOLKSWAGEN A γ: διατομή ακροφυσίου  $6 \text{ m}^2$  μέγιστη ταχύτητα αέρα  $180 \text{ km/h}$  δύναμη ανεμιστήρων  $460 \text{ kW}$ , - θερμοκρασίας  $-40\text{C} + 60\text{C}$ .*

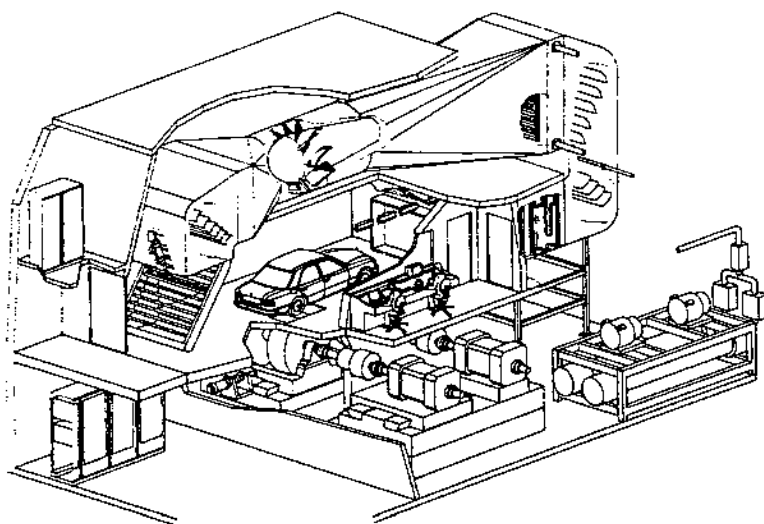
Ο αριθμός θερμικών δοκιμών που απαιτούνται στην ανάπτυξη οχημάτων υπερβαίνει εκείνων που αφιερώνονται στην αεροδυναμική κλασσικού τύπου. Επομένως απαιτείται μια πολύ μεγαλύτερη ικανότητα στις κλιματολογικές σήραγγες έναντι των αεροσηράγγων. Αυτό ανοίγει τη δυνατότητα για περαιτέρω εξειδικεύσει στις κλιματολογικές σήραγγες. Και πράγματι έχουν δημιουργηθεί κλιματολογικές σήραγγες σχεδιασμένες συγκεκριμένα για τη χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία, αποκαλούμενες "κρύες" και "θερμές" σήραγγες. Οι δύο  $12 \text{ m}^2$  κλιματολογικές σήραγγες της FIAT είναι χαρακτηριστικές. Ένα άλλο παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.83, η "θερμή σήραγγα" της Daimler-Benz με μια διατομή  $A_N = 4,3 \text{ m}^2$  που είναι μεγέθους για τα αυτοκίνητα. Η μέγιστη ταχύτητα αέρα της περιορίζεται στα  $100 \text{ km/h}$  ( $62 \text{ mph}$ ). Δεν απαιτείται υψηλότερη ταχύτητα αέρα επειδή ο κλιματισμός είναι κρίσιμος μόνο στις χαμηλές ταχύτητες οδήγησης.

### **1.5.5 Δυναμόμετρα με ανεμιστήρα**

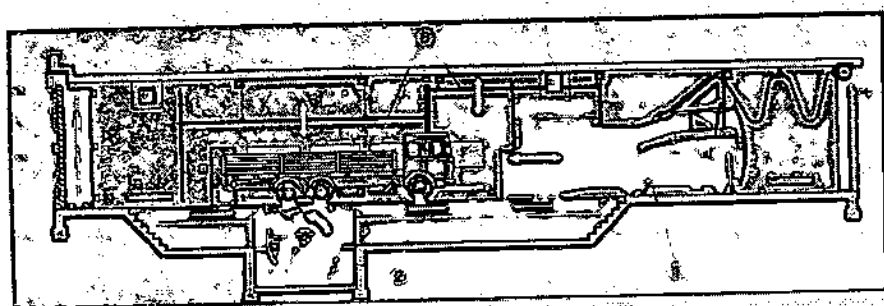
Τα δυναμόμετρα με ανεμιστήρα απαιτούνται για την ανάπτυξη των ψυγείων μηχανής. Όπως έχει παρουσιαστεί με το σχέδιο 1.68, μόνο ο τομέας ροής στο μπροστινό μέρος ενός αυτοκινήτου πρέπει να προσομοιωθεί. Μια διατομή ρεύματος αέρος  $2 \text{ m}^2$  είναι ικανοποιητική για τα αυτοκίνητα ενώ τα φορτηγά χρειάζονται  $4-5 \text{ m}^2$ . Εντούτοις, δεδομένου ότι η τοποθέτηση των στοιχείων μέσα στο χώρο των μηχανών έχει γίνει πολύ πυκνή, απαιτείται αποδοτική καθοδήγηση της ροής κάτω από το καπό για να επιτύχει την κατάλληλη ψύξη της μηχανής και των μερών της. Επομένως η ροή κάτω από ένα αυτοκίνητο πρέπει επίσης να

προσομοιωθεί στις δοκιμές ψυγείων. Συνεπώς, μπορεί να προσδοκηθεί ότι οι μελλοντικές εγκαταστάσεις για την ανάπτυξη των ψυγείων θα έχουν μεγαλύτερες διατομές τζετ και καλύτερη ποιότητα ροής.

Ένα κλασικό δυναμόμετρο με ανεμιστήρα παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.84. Η πορεία αέρα αυτής της σήραγγας είναι σαν του τύπου Eiffel. Είναι διαθέσιμα τρία διαφορετικά ακροφύσια για να ταιριάζουν με τη ροή ανάλογα με το όχημα που δοκιμάζεται. Ο ανεμιστήρας συν το ακροφύσιο μπορεί να κινηθεί αξονικά για να αντιμετωπίσει το μέγεθος ενός οχήματος και το είδος κίνησής του, εμπρός και πίσω κίνηση.



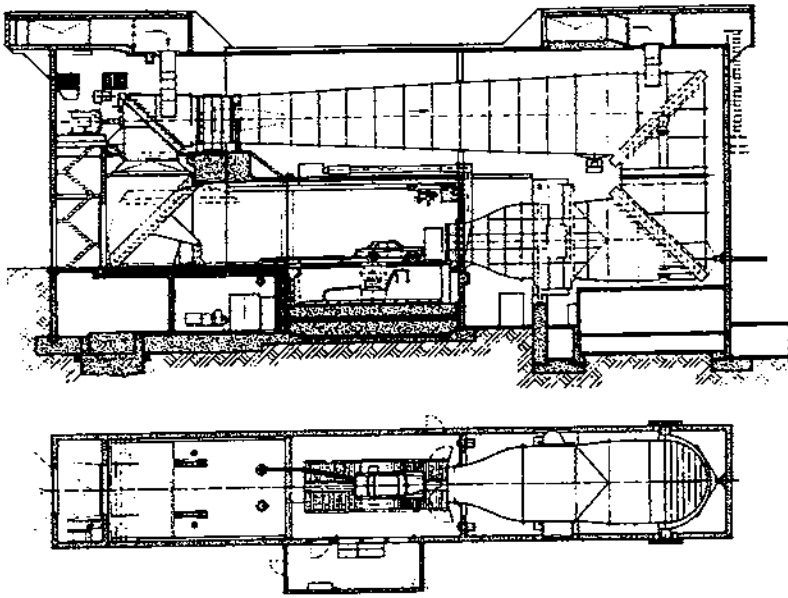
*Σχήμα 1.83 "θερμή σήραγγα" Daimler-Benz AG: διατομή ακροφυσίου  $4 \text{ m}^2$  μέγιστη ταχύτητα αέρα  $100 \text{ km/h}$ : ανεμιστήρας Dower  $340 \text{ kW}$ .*



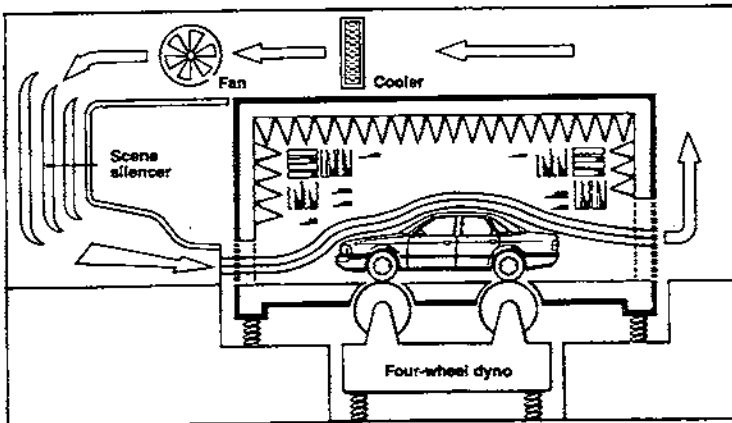
*Σχήμα 1.84 Δυναμόμετρο με  $\nu$  αέρα Suddesche Kuhlerfabrik J.F. Behr: διατομή ακροφυσίου  $2,4 \text{ m}^2$  μέγιστη ταχύτητα αέρα  $80 \text{ km/h}$  δύναμη ανεμιστήρων  $60 \text{ MW}$ .*

Λόγω της εκπομπής θορύβου, τα δυναμόμετρα με τους ανεμιστήρες δεν μπορούν πλέον να χτιστούν με αυτόν τον τρόπο. Οι πιο πρόσφατες εγκαταστάσεις αυτού του τύπου έχουν μια κλειστή επιστροφή της πορείας του αέρα όπως μια αεροσήραγγα ,σχήμα. 1.85.

Η εγκατάσταση που παρουσιάζεται στο σχέδιο 1.86 αφιερώνεται στις ακουστικές έρευνες για τα αυτοκίνητα υψηλής απόδοσης. Προκειμένου να κρατηθεί ο θόρυβος του ανεμιστήρα μακριά από την ακουστική αίθουσα και για να μειωθεί ο θόρυβος του αέρα, ο ανεμιστήρας βρίσκεται έξω από την αίθουσα και η εκροή της καθοδηγείται μέσω ενός σιγαστήρα που συνδυάζεται με τις τελευταίες δύο κάμψεις της πορείας του αέρα.

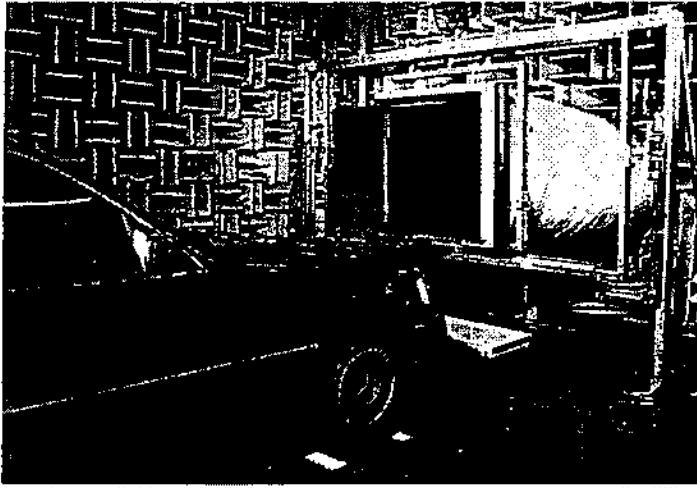


Σχήμα 1.85 "μεγάλη σήραγγα φυσήματος "της FKFS: διατομή ακροφυσίου  $6 \text{ m}^2$  μέγιστη ταχύτητα αέρα  $200 \text{ km/h}$  δύναμη ανεμιστήρων  $1 \text{ MW}$ .



Σχήμα 1.86 Ακουστική αίθουσα Audi AG με τον ανεμιστήρα και το τετράτροχο δυναμόμετρο.

Τέλος, το σχήμα 1.87 παρουσιάζει μια ηχομονωμένη αίθουσα που χρησιμοποιείται για να εντοπίσει την προέλευση του θορύβου από τον αέρα. Αντί της παραγωγής ολόκληρου πεδίου ροής γύρω από ένα αυτοκίνητο, παράγεται ένα τοπικό πεδίο ροής με την κατεύθυνση μιας ροής αέρος περιορισμένων διαστάσεων πάνω σε συγκεκριμένες λεπτομέρειες όπου και ελέγχονται. Προκειμένου να επιτραπεί αυτό, ένα ρυθμιζόμενο ακροφύσιο συνδέεται με την έξοδο του ανεμιστήρα (που βρίσκεται έξω από τη ηχομονωμένη αίθουσα) μέσω μιας εύκαμπτης μάνικας.



*Σχήμα 1.87 Ηχομονωμένη αίθουσα με το ρυθμιζόμενο ακροφύσιο (διατομή  $A_N = 0,5 \times 0,8 \text{ m}^2$ ) για την παραγωγή τοπικής ροής αέρος*

# **2<sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ**



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## Μετρήσεις και τεχνικές δοκιμής

<b>2.1</b>	<b>Πεδίο</b> .....	σελ. 3
<b>2.2</b>	<b>Όργανα μέτρησης και μετατροπείς</b> .....	σελ. 3
2.2.1	<i>Μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών</i> .....	σελ. 3
2.2.1.1	<i>Ισορροπίες σιράγγων αέρα</i> .....	σελ. 4
2.2.1.2	<i>Ανάλυση των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών στις συνιστώσες τους</i> .....	σελ. 5
2.2.1.3	<i>Μέτρηση της προβαλλόμενης μετωπικής περιοχής</i> .....	σελ. 9
2.2.2	<i>Μετρήσεις Πίεσης</i> .....	σελ. 10
2.2.2.1	<i>Μετρητές πίεσης</i> .....	σελ. 10
2.2.2.2	<i>Μετατροπείς πίεσης</i> .....	σελ. 14
2.2.3	<i>Μέτρηση της Ταχύτητας Ροών Αέρος</i> .....	σελ. 17
2.2.3.1	<i>Προσδιορισμός της Ταχύτητας Ροής Αέρα εξωτερικά και εσωτερικά ενός οχήματος</i> .....	σελ. 17
2.2.3.2	<i>Προσδιορισμός της ταχύτητας δοκιμής σε μια αεροσήραγγα</i> .....	σελ. 30
2.2.3.3	<i>Μέτρηση της κατεύθυνσης ροής</i> .....	σελ. 32
2.2.4	<i>Μέτρηση θερμοκρασίας</i> .....	σελ. 33
2.2.4.1	<i>Αισθητήρες θερμοκρασίας</i> .....	σελ. 34
2.2.4.2	<i>Χαρακτηριστικά σφάλματα μέτρησης θερμοκρασίας</i> .....	σελ. 38
2.2.5	<i>Συλλογή και διαχείριση δεδομένων δοκιμής</i> .....	σελ. 41
<b>2.3</b>	<b>Μέθοδοι εξέτασης σιράγγων αέρα</b> .....	σελ. 43
2.3.1	<i>Μέτρηση των αεροδυναμικών συντελεστών</i> .....	σελ. 43
2.3.2	<i>Χειρισμός δοκιμών ροών αέρος</i> .....	σελ. 44
2.3.3	<i>Μέτρηση του ποσοστού ροών αέρος μέσω του χώρου των επιβατών</i> .....	σελ. 45
2.3.3.1	<i>Μέτρηση ρυθμού ροών αέρος με τη βοήθεια των καμπλών εξαγωγής</i> .....	σελ. 45
2.3.3.2	<i>Εναλλακτικές μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας ροής αέρος μέσα στον χώρο των επιβατών</i> .....	σελ. 49
2.3.4	<i>Έλεγχοι θέρμανσης και κλιματισμού της καμπίνας επιβατών</i> .....	σελ. 50
2.3.5	<i>Έλεγχοι Απόψυξης και Ξεθολώματος</i> .....	σελ. 52
2.3.6	<i>Δοκιμές ψύξης μηχανών σε μια σήραγγα αέρα</i> .....	σελ. 54
2.3.7	<i>Τεχνικές απεικόνισης ροής</i> .....	σελ. 57
2.3.8	<i>Μέτρηση Αέρα-θορύβου σε μια σήραγγα αέρα</i> .....	σελ. 59
2.3.9	<i>Λεκάνη ύδατος σε συνάρτηση με την σήραγγα αέρα</i> .....	σελ. 60
<b>2.4</b>	<b>Οδικές εξεταστικές μέθοδοι</b> .....	σελ. 62
2.4.1	<i>Μέτρηση της αεροδυναμικής δύναμης έλξης σε μια δοκιμή με σβησμένη μηχανή</i> .....	σελ. 62
2.4.2	<i>Δοκιμές μετωπικού ανέμου</i> .....	σελ. 66
2.4.3	<i>Οδικές δοκιμές ψύξης μηχανών</i> .....	σελ. 69
2.4.4	<i>Εναποθέσεις λυμάτων στις γυάλινες επιφάνειες και σε περιοχές του οχήματος</i> .....	σελ. 70
2.4.5	<i>Μέτρηση θορύβου αέρα στο δρόμο</i> .....	σελ. 71

## **Μετρήσεις και τεχνικές ελέγχου**

### **2.1. Πεδίο**

Τα όργανα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται στην αεροδυναμική ανάπτυξη των μηχανοκίνητων οχημάτων θα περιγραφούν στο πρώτο τμήμα αυτού του κεφαλαίου. Οι διαδικασίες δοκιμής που υιοθετούνται σε μια αεροσήραγγα και στις οδικές δοκιμές παρουσιάζονται στο δεύτερο.

### **2.2 Όργανα μέτρησης και μετατροπείς**

#### ***2.2.1 Μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών***

Η ακριβής μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων και των ροπών που ενεργούν σε ένα σώμα οχήματος πραγματοποιείται συνήθως σε μια αεροσήραγγα με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής ισορροπίας. Ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων χρησιμοποιείται ως σύστημα συντεταγμένων. Το προσδιοριστικό σημείο βρίσκεται στο κέντρο βάρους των σημείων επαφής των τροχών. Συσχετίζεται με το όχημα και είναι ίδιο με το σύστημα συντεταγμένων που εφαρμόζεται στη δυναμική οχημάτων, π.χ. δείτε SAE J670e, “ Ορολογία δυναμικής οχημάτων ”. Για αυτόν τον λόγο, είναι δυνατό να μεταφερθούν τα στοιχεία από μια αεροσήραγγα με τα σωστά σήματα στις έρευνες δυναμικής οχημάτων για τη μελέτη της επίδρασης των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών στις ιδιότητες οδήγησης. Εντούτοις, αυτό το σύστημα συντεταγμένων διαφέρει από αυτό που χρησιμοποιείται στην αεροναυτική, όπου οι X- και Z - άξονες έχουν την αντίθετη κατεύθυνση.

### **2.2.1.1 Ισορροπίες σηράγγων αέρα**

Ο στόχος μιας ισορροπίας σηράγγων αέρα είναι να μετρηθούν οι προκύπτουσες αεροδυναμικές δυνάμεις και οι ροπές που ενεργούν σε ένα μηχανοκίνητο όχημα και να χωριστούν στις τρεις κατευθύνσεις του συστήματος συντεταγμένων (ισορροπία έξι συνιστωσών). Με τη συμμετρική επικείμενη ροή (γωνία παρεκκλίσεων  $b=0$ ), οι δυνάμεις εμφανίζονται μόνο στους X - και Z - άξονες και μια ροπή γύρω από τον Y- άξονα. Μια απλούστερη κλίμακα (ισορροπία 3 συνιστωσών) είναι ικανοποιητική.

Για να επιτραπεί η ακριβής μέτρηση δυνάμεων και ροπών, οι ισορροπίες σηράγγων αέρα πρέπει να ικανοποιούν διάφορες απαιτήσεις:

Η δομή μιας ισορροπίας δεν πρέπει να αλλάξει τη ροή γύρω από ένα όχημα δοκιμής. Εάν χρησιμοποιείται μια βοηθητική κατασκευή – π.χ., επαφή ενός πρότυπου οχήματος με μια θέση – η επίδρασή της στα αποτελέσματα της δοκιμής πρέπει να καθοριστεί προηγουμένως, προκειμένου να μπορούν να διορθωθούν ανάλογα οι τιμές δοκιμής.

Η θέση του οχήματος δεν πρέπει να αλλάξει ανεξέλεγκτα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Δεδομένου ότι οι αεροδυναμικές δυνάμεις ανύψωσης που μετρούνται είναι μόνο μέρη του συνολικού βάρους του οχήματος, οι φορτίσεις που έχει εκ των προτέρων ο Z - άξονας πρέπει να αντισταθμιστούν από τα αντίστοιχα βάρη απόβαρα για καλύτερη ακρίβεια.

Εάν οι μετρήσεις πρόκειται να εκτελεστούν κάτω από παρέκκλιση, η ισορροπία πρέπει κατά συνέπεια να είναι περιστρέψιμη γύρω από το Z-άξονα.

Η μετάδοση των δυνάμεων μεταξύ του αντικειμένου δοκιμής και δυνάμεων επανάληψης πρέπει να γίνεται χωρίς τριβή και υστέρηση. Για αυτόν τον λόγο, είναι ουσιαστική η χρήση ειδικών στοιχείων ακρίβειας, όπως οι συνδυασμοί κόγχης και εγκοπής, ελαστικές αρθρώσεις, ή υδροστατικά και πνευματικά ρουλεμάν, κ.λ.π.

Αυτήν την περίοδο, χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά οι αυτόματες ισορροπίες. Για πολύ καιρό, οι ισορροπίες κλίμακας - ζυγού ήταν κυρίαρχες. Τα στοιχεία κλίμακάς τους αποτελούνται από ζυγούς ισορροπίας με ηλεκτρικά ρυθμιζόμενα κινούμενα βάρη. Όταν ο ζυγός γέρνει προς τα κάτω, μια μηχανή κίνησης μετατοπίζει αυτόματα το κινούμενο βάρος στην αντίθετη κατεύθυνση έως ότου να ισορροπείται πάλι η ζυγαριά. Η τελική θέση του κινούμενου βάρους θεωρείται ως η τιμή του μεγέθους της δύναμης που μετριέται. Μια γρηγορότερη και αποδοτικότερη μέθοδος για μέτρηση δυνάμεων είναι η χρησιμοποίηση των ηλεκτρικών κυττάρων φόρτισης μεγάλης ακρίβειας. Αυτά χρησιμοποιούνται τώρα

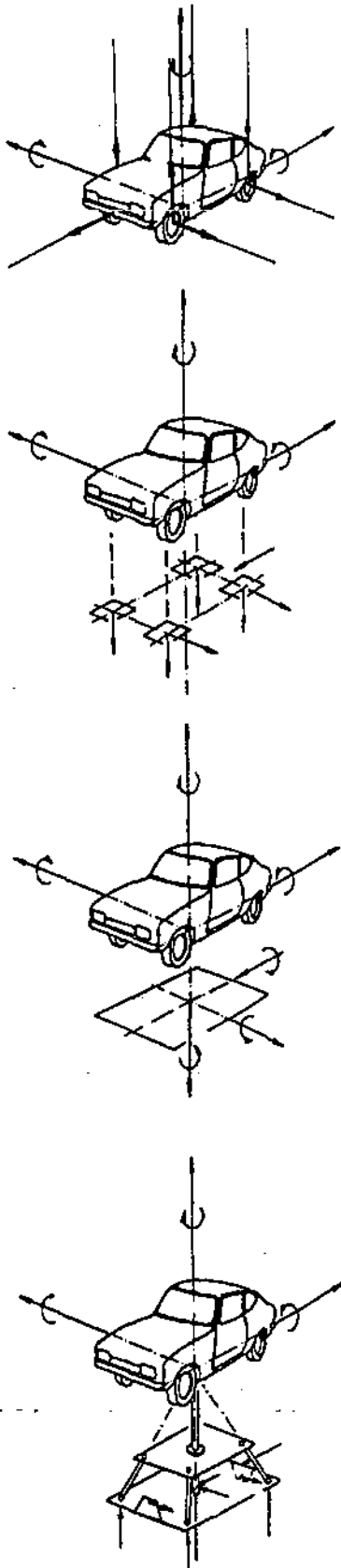
αποκλειστικά στις σύγχρονες αυτοκίνητες ισορροπίες σπράγγων αέρα. Είναι χωρητικοί ή επαγωγικοί τύποι μετατροπέων ή μετρητές πίεσης.

### ***2.2.1.2 Ανάλυση των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών στις συνιστώσες τους***

Προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα να καθοριστούν χωριστά οι ήδη αναφερθείσες τρεις δυνάμεις και ροπές, οι μετρημένες τιμές επιλύονται αναλόγως. Ανάλογα με το σχέδιο μιας ισορροπίας, αυτό εκτελείται με διαφορετικούς τρόπους. Το σχήμα 2.1 απεικονίζει διάφορες εκδόσεις των ισορροπιών έξι συνιστωσών που αναπτύσσονται για τη δοκιμή οχημάτων. Ως παράδειγμα εφαρμογής για μια προοδευτική κατάσταση ισορροπίας, παρουσιάζεται με έναν απλουστευμένο τρόπο στο σχήμα 2.2 μια έκδοση επιπλέοντος πλαισίου. Αντιστοιχεί στην περίπτωση Νο.2 του σχήματος 2.1.

Σε παλαιότερες αεροσπράγγες χρησιμοποιούνται πολύ συχνά κινητοί μοχλοί για τον χωρισμό των δυνάμεων και ροπών στις επιθυμητές συνιστώσες. Δεν είναι πλήρως απαλλαγμένοι από την τριβή και φθείρονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Συνέπεια αυτού είναι ο περιορισμός της ακρίβειας και η ανάγκη για τη συντήρηση. Οι σύγχρονες κατασκευές αεροσπράγγων ισορροπίας, εντούτοις, χρησιμοποιούν εύκαμπτες ράβδους που συνδέονται άμεσα με τους μετατροπείς δύναμης (κύρια κύτταρα φόρτισης), αποκλείοντας κατά συνέπεια οποιαδήποτε τριβή ή φθορά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας (βλ. το σχέδιο 2.6). Έπειτα χωρίζονται τα δεδομένα που μετρήθηκαν και οι αεροδυναμικοί συντελεστές υπολογίζονται με τη βοήθεια ενός υπολογιστή σε απευθείας σύνδεση.

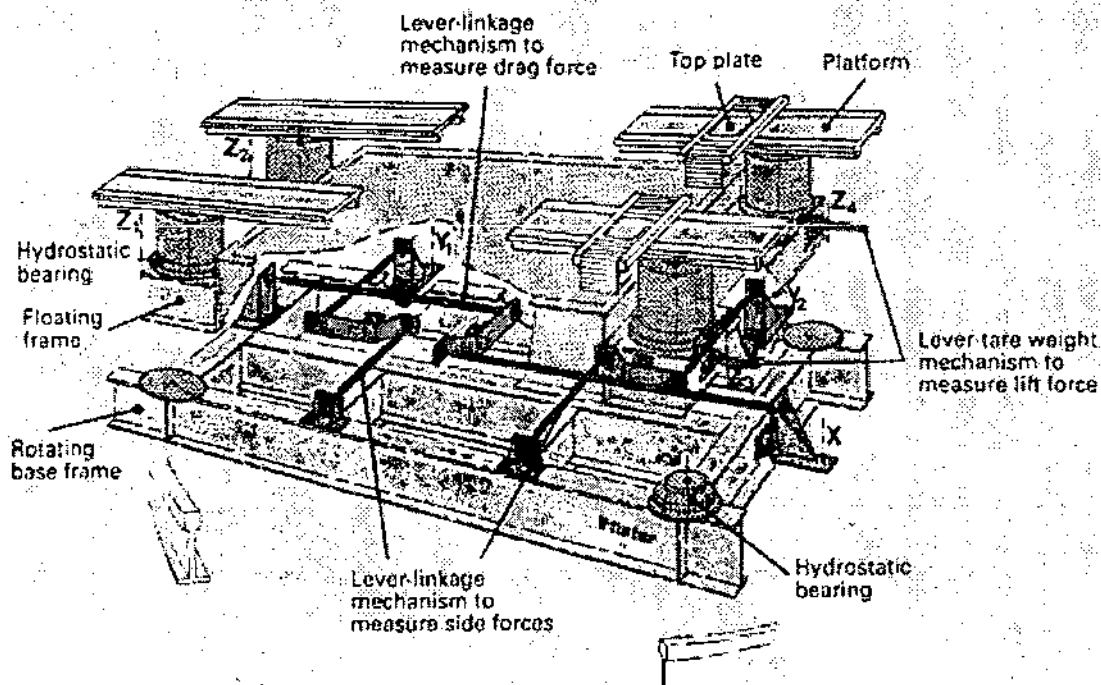
Λόγω της ελαστικότητας τροχών και αναρτήσεων, ένα όχημα αναπτύσσει μια ορισμένη διαμήκη κίνηση στην ισορροπία σύμφωνα με το επίπεδο ταχύτητας αέρα κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής. Αυτό αλλάζει τη θέση του κέντρου βάρους σε σχέση με τα ελαστικά των τροχών, με συνέπεια μια παραποίηση στην ανάγνωση της ροπής. Μια οπτική φωτογραφική μηχανή CCD που ελέγχει και διορθώνει τη θέση του κέντρου βάρους του οχήματος βοηθά στην βελτίωση του επιπέδου εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων.



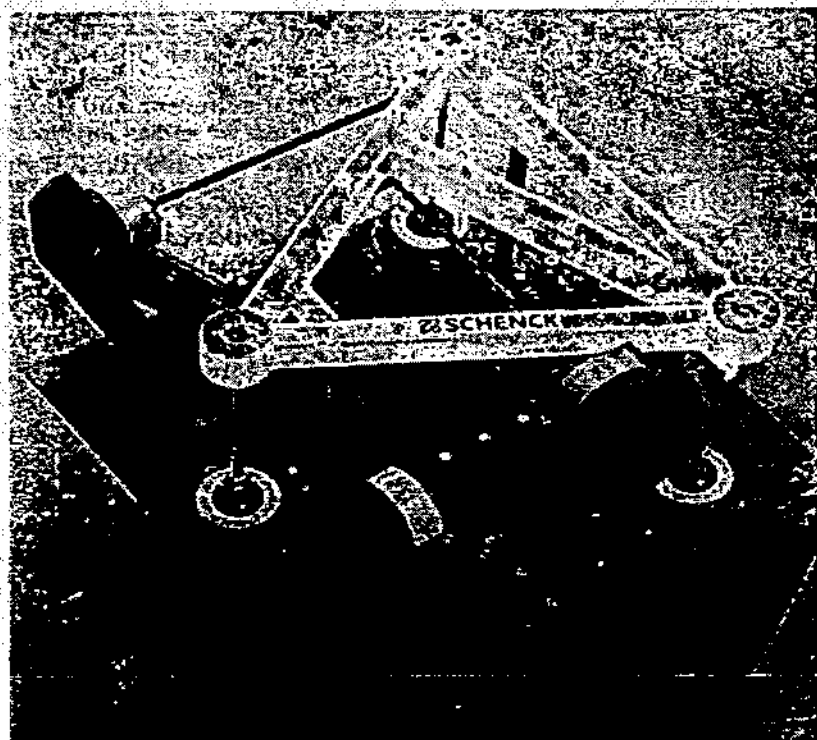
### Περιγραφή

- (1) – Το όχημα αναρτάται από τέσσερα καλώδια και κρατιέται οριζόντια με τρία άλλα καλώδια (μέτρηση 7 συνιστωσών).
  - Παλαιό σχέδιο
  - Σήμερα χρησιμοποιείται μόνο στις μικρής κλίμακας σήραγγες αέρα.
- (2) – Κάθε ρόδα σε μια χωριστή πλατφόρμα (μέτρηση 7 συνιστωσών).
  - Για να μετρηθούν οι οριζόντιες δυνάμεις, οι τέσσερις πλατφόρμες τοποθετούνται σε ένα επιπλέον πλαίσιο (σχήμα 2.2).
  - Μετρήσεις δύναμης μέσω των μηχανισμών μοχλών: π.χ., (οι μικρές) σχετικές μετακινήσεις είναι απαραίτητες, και επομένως, η απώλεια ακρίβειας για μια χρονική περίοδο οφείλεται πιθανώς στην φθορά ή την αυξανόμενη τριβή.
  - Ακριβό, σχετικά ογκώδες σχέδιο.
- (3) – Όχημα σε μια ενιαία πλατφόρμα (μέτρηση 6 συνιστωσών), σχήμα 2.3.
  - Τρεις δυνάμεις και τρεις ροπές – μέσω εύκαμπτων ράβδων - μετρούνται με μεγάλης ακρίβειας μετρητή δύναμης.
  - Η ακρίβεια μέτρησης μπορεί να βελτιωθεί με οπτικό έλεγχο της μετακίνησης του κέντρου βάρους.
  - Καμία σχετική μετακίνηση, επομένως περισσότερη αξιοπιστία και απαίτηση λιγότερης συντήρησης.
  - Συμπαγέστερο.
- (4) – Η ισορροπία πυραμίδας επιτρέπει την άμεση ανάγνωση των δυνάμεων και των ροπών μέσω μιας δύναμης – και ενός πλαισίου ροπής.
  - Καμία υποβάθμιση της ακρίβειας μέτρησης εάν, για λόγους χώρου, η ισορροπία τοποθετείται βαθύτερα κάτω από το πάτωμα του τμήματος δοκιμής

Σχήμα 2.1 Επισκόπηση των διάφορων τύπων ισορροπίας σήραγγων αέρα



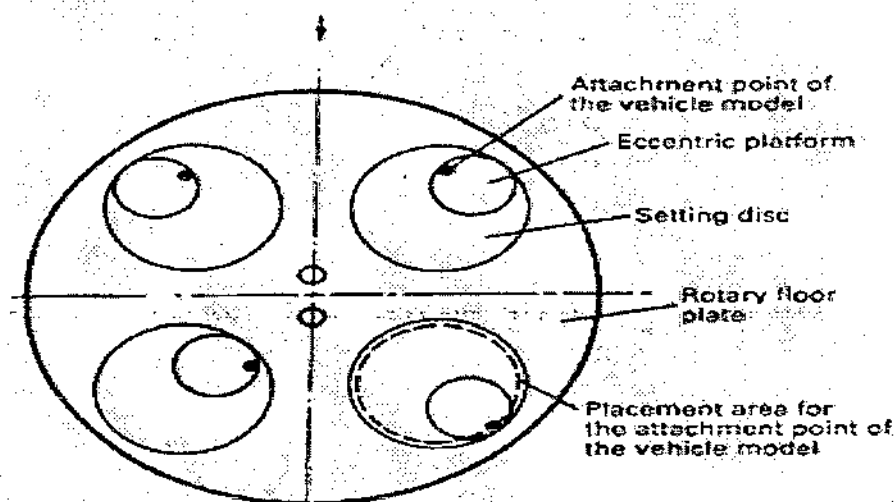
Σχήμα 2.2 Ισορροπία 6 συνιστωσών με τα υδροστατικά ρουλεμάν, πλαίσιο βάσης, και κινούμενο πλαίσιο. Η δύναμη ανύψωσης, ροπές κύλισης και κίνησης στον εγκάρσιο άξονα υπολογίζονται από τις 4 δυνάμεις ανύψωσης  $Z_1, Z_2, Z_3$  and  $Z_4$ . Οι  $Y_1$  and  $Y_2$  επιτρέπουν τον υπολογισμό της δευτερεύουσας δύναμης και της ροπής παρέκκλισης.



Σχήμα 2.3 Ισορροπία αεροσηράγγας έξι συνιστωσών με ελαστικές ράβδους συνδεδεμένες άμεσα με τα κύτταρα φόρτισης. Ο χωρισμός δύναμης και ροπής εκτελείται από έναν σε απευθείας σύνδεση υπολογιστή.

Ο τοπικός τομέας ροής γύρω από τους τροχούς κανονικά προκαλεί μια πτώση στατικής πίεσης στην άνω πλευρά των πλατφόρμων στις οποίες τοποθετούνται οι τροχοί. Μια πρόσθετη συνιστώσα δύναμης, η οποία μετριέται από την ισορροπία, αναπτύσσεται μέσω της διαφοράς στατικής πίεσης μεταξύ των ανώτερων και κατώτερων επιφανειών αυτών των πλατφόρμων, παραποιώντας μέτρηση της δύναμης ανύψωσης. Επομένως, ο τομέας της ανώτερης πλευράς της πλατφόρμας πρέπει να κρατηθεί τόσο μικρός όσο το ελαστικό των τροχών. Εντούτοις, πρέπει επίσης να εγγραφεί η δυνατότητα ρύθμισης της βάσης των τροχών και του μήκους τρόπιδας, έτσι ώστε να μπορούν να μετρηθούν οχήματα δοκιμής διάφορων μεγεθών. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει έναν τρόπο να λυθεί αυτό το πρόβλημα: οι πλάκες πάνω από τις πλατφόρμες μπορούν να μετατοπιστούν μπροστά και πίσω ώστε να επιτρέπεται η ρύθμιση στη βάση των τροχών. Τα υπόλοιπα ανοίγματα στις πλατφόρμες καλύπτονται με κινητές πλάκες, οι οποίες, μαζί με το πάτωμα, εσωκλείουν το τμήμα δοκιμής (που δεν παρουσιάζεται στο σχήμα). Η πλευρική θέση καθεμιάς από αυτές τις πλάκες μπορεί επιπλέον να αλλάξει, και μια ταινία, φτιαγμένη από διάφορα στοιχεία, που βρίσκεται στο δάπεδο του τμήματος δοκιμής, καλύπτει το υπόλοιπο της περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ένα τμήμα δοκιμών με την ελάχιστη επιφάνεια πλακών.

Το σχήμα 2.4 επεξηγεί μια άλλη δυνατότητα για να ληφθούν οι επιθυμητές βάσεις τροχών και ρυθμίσεις πλάτους-μήκους τρόπιδας. Δύο έκκεντροι, στρογγυλοί δίσκοι παρέχονται για κάθε τροχό. Ο μικρότερος δίσκος είναι ο κύριος δίσκος της ισορροπίας. Ο μεγαλύτερος, εξωτερικός δίσκος φέρεται από το επίπεδο δοκιμής της απόστασης των τροχών. Οι κύριοι δίσκοι μπορούν να τοποθετηθούν στην επιθυμητή θέση με περιστροφή. Κατά συνέπεια μπορεί να ρυθμιστεί κάθε συνδυασμός πλάτους-μήκους τρόπιδας / βάσης τροχών.



**Σχήμα 2.4** Δυνατότητα ρύθμισης πλάτους-μήκους τρόπιδας χρησιμοποιώντας έκκεντρα πιάτα

Εάν η επιφάνεια των κύριων δίσκων που παρέχονται για τις ρόδες δεν είναι αρκετά μικρή, είναι αναπόφευκτη μια αεροδυναμική δύναμη ανύψωσης. Η δύναμη ανύψωσης γίνεται απαράδεκτα υψηλή εάν μια ισορροπία αεροσήραγγας χρησιμοποιείται όπως φαίνεται στο σχέδιο 2.1 (γ), όπου το όχημα δοκιμής τοποθετείται σε έναν ενιαίο δίσκο. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, τα δεδομένα μέσης στατικής πίεσης πρέπει να καθοριστούν στην ανώτερη πλευρά κάθε δίσκου. Η διαφορά μεταξύ της στατικής πίεσης που ασκείται στην ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια, πολλαπλασιαζόμενη με την επιφάνεια δίσκων, δίνει τη δύναμη που πρέπει να αφαιρεθεί από την ανάγνωση των δυνάμεων ανύψωσης.

### 2.2.1.3. Μέτρηση της προβαλλόμενης μετωπικής περιοχής

Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές των αεροδυναμικών δυνάμεων και ροπών, πρέπει να είναι γνωστή η προβολή της μετωπικής περιοχής του οχήματος. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρησή της, η μέτρηση σκιάς πιθανώς είναι η παλαιότερη. Το εξωτερικό περίγραμμα του οχήματος καθορίζεται με τη βοήθεια ενός προβολέα. Πρέπει να τοποθετηθεί σε μια ικανοποιητική απόσταση από το όχημα (200m ή περισσότερο) στο επίπεδο συμμετρίας του οχήματος, στο μισό του ύψους του οχήματος. Ένας διαφανής τοίχος εγκαθίσταται πίσω από το όχημα, κάθετος στο επίπεδο συμμετρίας του. Η σκιά του οχήματος θα εμφανιστεί πάνω σε αυτόν. Το σχεδιάγραμμα του οχήματος πρέπει να σχεδιαστεί με το χέρι και να μετρηθεί το εμβαδόν του. Παρά τη μεγάλη απόσταση της πηγής φωτός από το όχημα, το λάθος που προκαλείται από την απόκλιση των ακτίνων φωτός πρέπει να διορθωθεί. Μπορεί με αυτόν τον τρόπο να επιτευχθεί μια ακρίβεια μέτρησης  $\pm 0,5\%$ . Σαν εναλλακτική λύση είναι επίσης δυνατόν να ληφθεί μια φωτογραφία από το όχημα. Χρησιμοποιούνται φακοί με μεγάλα εστιακά μήκη (1000mm ή μεγαλύτεροι). Η δοκιμή ακρίβειας αυτής της μεθόδου είναι συγκρίσιμη με αυτήν της μεθόδου σκιών.

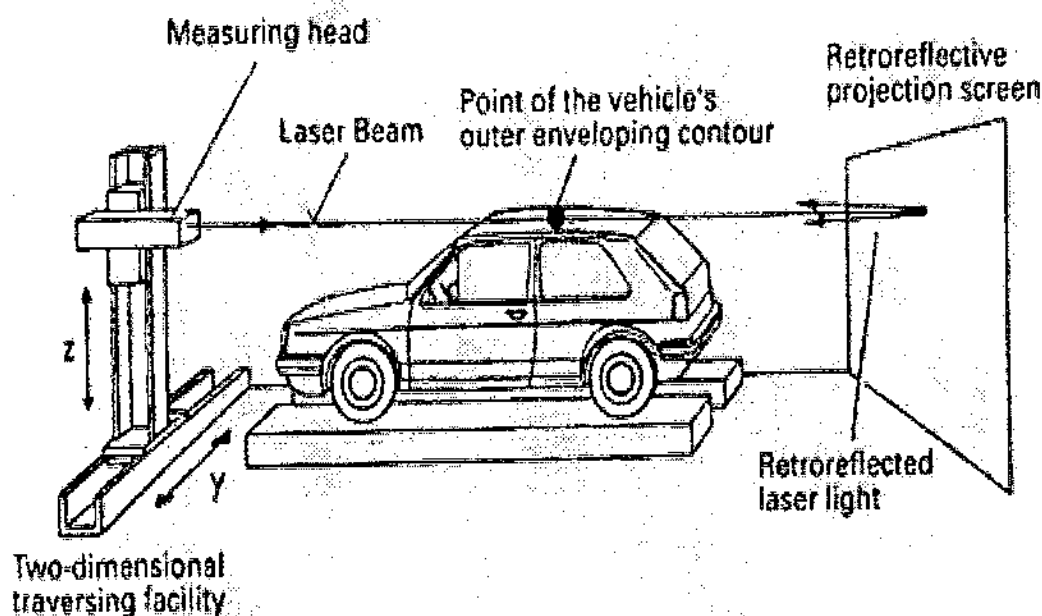
Χρησιμοποιώντας το λέιζερ ως πηγή φωτός, αναπτύχθηκαν μέθοδοι μέτρησης της μετωπικής επιφάνειας που παρέχουν μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα σε μικρά δωμάτια δοκιμής και χωρίς λάθη απόκλισης φωτός. Το όχημα φωτίζεται με ένα λέιζερ (π.χ., ήλιο-νέο) παράλληλο στο επίπεδο συμμετρίας του. Ένα λέιζερ τοποθετείται σε μια εγκάρσια ακτίνα της οποίας το επίπεδο κίνησης είναι κάθετο στο επίπεδο συμμετρίας του οχήματος. Ένας λέιζερ ανιχνευτής φωτός βρίσκεται πίσω από το όχημα, όποιος τοποθετείται επίσης σε μια εγκάρσια ακτίνα και κινείται σε ένα επίπεδο παράλληλο στο επίπεδο του πρώτου. Οι κινήσεις του λέιζερ και του



ανιχνευτή είναι συγχρονισμένες: με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να ανιχνευθεί το εξωτερικό περίγραμμα του οχήματος και να καθοριστεί η προβαλλόμενη μετωπική επιφάνεια.

Εάν, αντί του ανιχνευτή, τοποθετηθεί μια ψηφιακή κάμερα και παρεμβληθεί μια οθόνη Marata μεταξύ του οχήματος και της κάμερας, οι σκιές που σχηματίζονται στην οθόνη Marata μπορούν να ψηφιοποιηθούν και να αποθηκευτούν στον υπολογιστή (ISRA μέθοδος). Η προβαλλόμενη μετωπική περιοχή μπορεί έπειτα να ολοκληρωθεί από αυτά τα δεδομένα δοκιμής.

Σε μια άλλη μέθοδο, αντί του λέιζερ ανιχνευτή φωτός, μια αντανάκλαστική οθόνη τοποθετείται πίσω από το όχημα (βλ. το σχέδιο 2.5). Η συσκευή λέιζερ, στην οπτική της οποίας είναι ταυτόχρονα ενσωματωμένος ο ανιχνευτής, είναι τοποθετημένος σε έναν μηχανισμό ούτως ώστε να μπορεί να μετακινείται οριζόντια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα εξωτερικά περιγράμματα του οχήματος καταγράφονται όταν φθάνουν οι ακτίνες λέιζερ στον τοίχο και απεικονίζεται εκεί.



Σχήμα 2.5 Μέτρηση της μετωπικής περιοχής με τεχνολογία λέιζερ

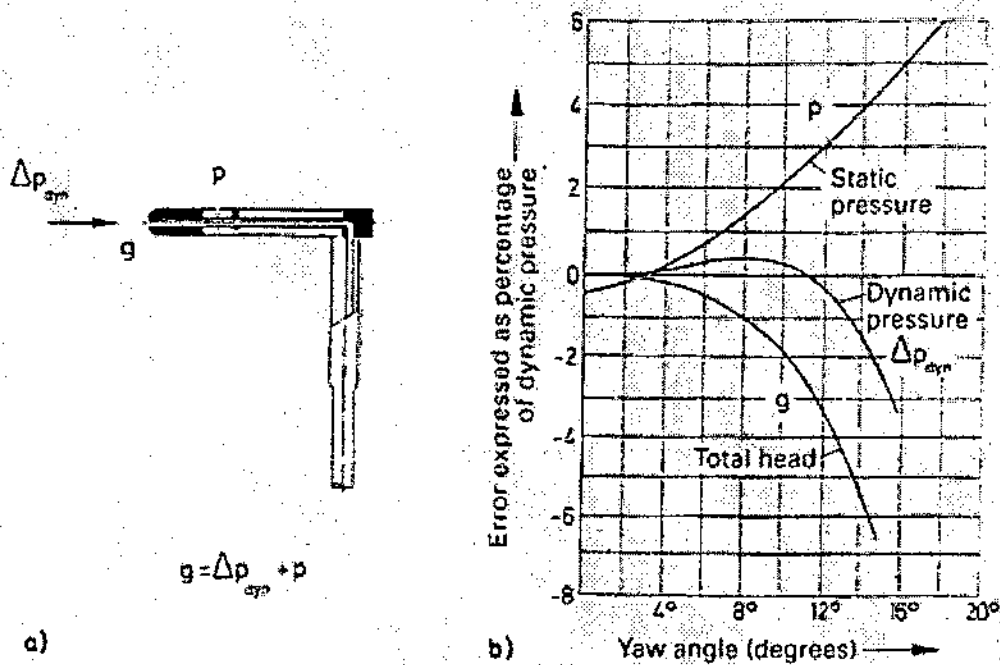
## 2.2.2 Μετρήσεις Πίεσης

### 2.2.2.1 Μετρητές πίεσης

Ο απλούστερος τρόπος να μετρηθεί η δυναμική και στατική πίεση σε ένα ελεύθερο ρεύμα αέρα είναι να χρησιμοποιηθεί στατικός σωλήνας Pitot όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Η

συνολική πίεση  $g$  μετριέται στο άνοιγμα της κεφαλής του σωλήνα και η στατική πίεση  $p$  στις τρύπες ή τις αυλακώσεις μακρύτερα προς τα κάτω στο παράλληλο μέρος του σωλήνα. Η διαφορά πίεσης  $\Delta p_{dyn} = g - p$  αντιστοιχεί στη δυναμική πίεση: η ταχύτητα ροής μπορεί να υπολογιστεί από αυτήν χρησιμοποιώντας την σχέση (2.1). Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι σωλήνων Pitot. Διαφέρουν κυρίως στην μορφή των κεφαλών τους. Χρησιμοποιούνται ημισφαιρικά, ελλειψοειδή και, περιστασιακά, αιχμηρές “μύτης” σχήματα κεφαλών.

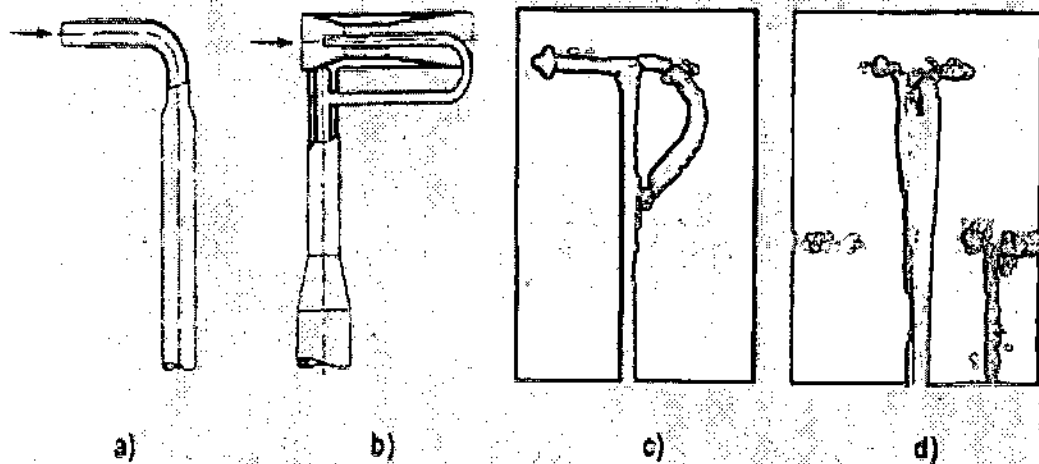
Ο σωλήνας Pitot παρέχει ακριβείς μετρήσεις σε ένα ελεύθερο ρεύμα αέρα. Ο άξονάς του πρέπει να συμπίπτει με την κατεύθυνση της (τοπικής) ροής, διαφορετικά μπορεί να εμφανιστούν σφάλματα. Αυτό το σφάλμα εξαιτίας της γωνίας παρέκκλισης  $\beta$  από την πορεία απεικονίζεται στο σχέδιο 2.6 για μια ημισφαιρική κεφαλή. Μπορεί να φανεί ότι για γωνία παρέκκλισης μέχρι  $12^\circ$  το σφάλμα στη δυναμική πίεση είναι λιγότερο από 1%, το οποίο είναι αποδεκτό για τις περισσότερες μετρήσεις.



**Σχήμα 2.6** Σφάλμα ενός σωλήνα Pitot (ημισφαιρική μορφή κεφαλής) που οφείλεται στην παρέκκλιση (σημειώστε ότι η στατική πίεση σχεδιάζεται με τα αρνητικά σημεία).

Η ευαισθησία του σωλήνα Pitot προς μια πλάγια ροή επηρεάζεται πολύ από τη μορφή της κεφαλής της: ελλειψοειδείς και ημισφαιρικές κεφαλές είναι σχεδόν ισοδύναμες. Ένας τυποποιημένος σωλήνας με μια αιχμηρή μύτη (NPL), εντούτοις, είναι αρκετά πιο ευαίσθητος. Μια σωστή ευθυγράμμιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για αυτόν τον τύπο.

Ένας ειδικός τύπος σωλήνα Pitot είναι ο αποκαλούμενος σωλήνας ολικής κεφαλής που δεν έχει καμία οπή για να μετρήσει τη στατική πίεση (βλ. το σχήμα 2.7 (α)). Με κατάλληλη διαμόρφωση της κεφαλής του, λειτουργεί αξιόπιστα μέχρι μια γωνία παρέκκλισης  $\beta = \pm 30^\circ$ . Ένας σωλήνας Pitot που δεν είναι καθόλου ευαίσθητος στο γωνιώδες σχήμα ροής είναι ο σωλήνας Kiel όπου η κεφαλή τοποθετείται μέσα σε έναν σωλήνα Venturi όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 (β). Μπορεί να μετρήσει και σε πλάγιες ροές παραπάνω από  $\pm 60^\circ$ . Οι σωλήνες Kiel χρησιμοποιούνται συχνά για να μετρήσουν μέσα σε ασταθή πεδία ροής, παραδείγματος χάριν στα απόνερα.



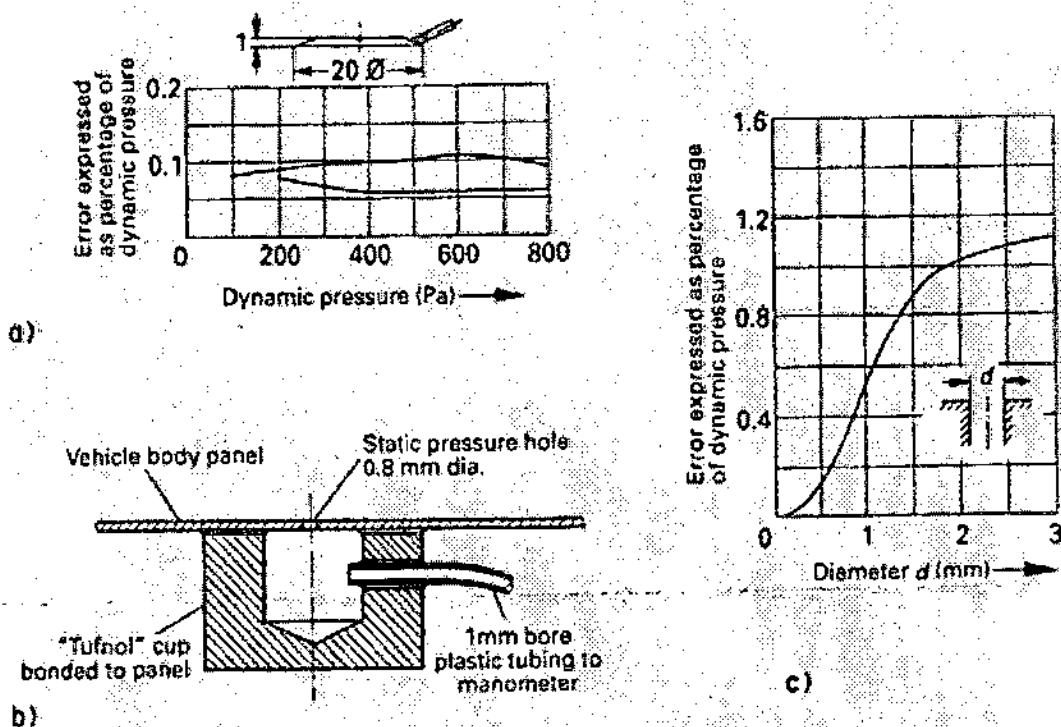
**Σχ. 2.7 Μετρητές ολικής πίεσης: (α) σωλήνας Pitot , (β) σωλήνας Kiel, (γ) σωλήνας 7 τρυπών, (δ) σωλήνας 14 τρυπών (διάμετρος 6mm, 28mm μακριά).**

Μια περαιτέρω ανάπτυξη του σωλήνα ολικής κεφαλής είναι ο "σωλήνας 7 οπών" όποιος αποτελείται από μια δέσμη 7 σωλήνων Pitot (σχήμα 2.7(c)). Τα ενδιάμεσα διαστήματα του σωλήνα γεμίζουν και η κοινή κεφαλή του σωλήνα είναι κωνική . Μετά από τη βαθμολόγηση αυτός ο σωλήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ροές με γωνία παρέκκλισης μέχρι  $\pm 70^\circ$ , αλλά είναι ανακριβής σε ταχύτητες αέρα κάτω από 8 m/s. Ο "σωλήνας 14 οπών" που αναπτύχθηκε από τον A. COGOTTI, αποτελείται από δύο σωλήνες 7 οπών (σχ.2.7(δ)). Οι άξονές τους βρίσκονται σε μια γραμμή, ενώ οι 2 κεφαλές είναι τοποθετημένες με γωνία  $180^\circ$  η μία με την άλλη. Με αυτόν τον τρόπο, η συνολική πίεση καθώς επίσης και η στατική πίεση, και η θέση του διανύσματος ταχύτητας μπορούν να μετρηθούν στον χώρο. Ο σωλήνας λειτουργεί σε γωνία παρέκκλισης  $\pm 180^\circ$ : η βαθμολόγηση απαιτεί πολλή εργασία. Είναι αξιόπιστος κάτω από ένα όριο ταχύτητας 4m/s.

Η κατανομή των στατικών πιέσεων στο σώμα του οχήματος μετριέται γενικά με έναν μικρό, λεπτό, με μορφή δίσκου σωλήνα, ένα σκίτσο του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8 (α).

Μπορεί να τοποθετηθεί στο σώμα του οχήματος με τη βοήθεια μιας διπλής κολλητικής ταινίας. Μια οπή με διάμετρο 0,8mm, που διαπερνά το κέντρο του αισθητήρα, συνδέεται μέσω ακτινωτής οπής σε έναν μικρό σωλήνα σύνδεσης που συγκολλάται στην πλευρά του σωλήνα, και, στη συνέχεια, το τελευταίο συνδέεται με έναν αισθητήρα πίεσης με τη βοήθεια πλαστικού σωλήνα. Το σχήμα 2.8(a) δείχνει ότι το περιθώριο λάθους αυτού του αισθητήρα είναι αμελητέα μικρό όταν εφαρμόζεται σε μια επίπεδη επιφάνεια. Εάν η στατική πίεση μετριέται σε μια ιδιαίτερα κυρτή επιφάνεια, το σφάλμα αυξάνεται. Εάν διάφοροι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα, πρέπει να δοθεί προσοχή στο ότι οι πλαστικοί σωλήνες δεν εξασθενίζουν την τοπική ροή.

Συχνά το σώμα του οχήματος διαπερνιέται άμεσα. Με αυτόν τον τρόπο, έχει αποδειχθεί χρήσιμος ο εξοπλισμός των σημείων μέτρησης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8(β). Μια πλαστική κάψουλα είναι κολλημένη κατευθείαν πίσω από την τρύπα, η οποία παρουσιάζει έναν σχετικά μεγάλο όγκο. Εντούτοις, η λάθος επιλογή της διαμέτρου οπής μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Το σχήμα 2.8(γ) επιδεικνύει πώς το περιθώριο σφάλματος στατικής πίεσης εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής. Οι διαμέτροι μέχρι 1mm θεωρούνται αρκετά ακριβείς για τις περισσότερες μετρήσεις.



Σχ. 2.8 (α) αισθητήρας για την μέτρηση της στατικής πίεσης και η διακύμανση λάθους. (β) Μέτρηση στατικής πίεσης στο πλαίσιο του σώματος χωρίς αλλαγή των σχεδίων τοπικής ροής στο σημείο μέτρησης. (γ) επίδραση της διαμέτρου οπής στο λάθος μέτρησης ενός μετρητή στατικής πίεσης.

### 2.2.2.2 Μετατροπείς πίεσης

Οι μετρητές πίεσης συνδέονται συνήθως με τους μετατροπείς πίεσης με πλαστικούς σωλήνες. Συχνά οι πιέσεις που μετριοούνται είναι χαμηλές, στο διάστημα 10-1000ρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, απαιτείται η μέτρηση των διαφορικών πιέσεων παρά των απόλυτων τιμών τους. Οι πιέσεις που μετριοούνται στη λειτουργία αεροσήραγγας πολύ σπάνια εκθέτουν σταθερές τιμές. Επομένως, η χρησιμοποίηση εξοπλισμού δοκιμής με καλή χαρακτηριστική απόσβεσης κυμάτων είναι συμφέρουσα εάν απαιτείται χρονικός μέσος όρος των δεδομένων πίεσης. Στο παρελθόν, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα υγρά μανόμετρα. Είναι εύκολος ο χειρισμός τους. Ο κίνδυνος ελαττωματικής λειτουργίας είναι χαμηλός, γεγονός που οφείλεται στην απουσία μετατροπής σημάτων και, εξαιτίας της αδράνειας των υγρών στηλών, έχουν καλές χαρακτηριστικές απόσβεσης κυμάτων. Ένα μανόμετρο με σωλήνες υπό κλίση σε συνδυασμό με ένα ρευστό χαμηλής πυκνότητας όπως το οινόπνευμα επιτρέπει τη μέτρηση πολύ χαμηλών πιέσεων.

Το μανόμετρο προβολής από τον A. BETZ είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη του υγρού μανόμετρου. Μια ενισχυμένη εικόνα ενός επιπλέοντος σώματος που ανέρχεται και πέφτει ανάλογα με την διαφορά πίεσης που μετρείται επιτρέπει μετρήσεις υψηλής ευκρίνειας. Χάρη στην καλή αναγνωσιμότητά του, το μανόμετρο BETZ είναι ιδιαίτερα καλό ως όργανο ελέγχου για σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους όπως, παραδείγματος χάριν, οι εγκατεστημένοι θάλαμοι πίεσης σε μια αεροσήραγγα.

Άλλοι μετατροπείς πίεσης είναι μηχανικού ή ηλεκτρικού τύπου. Οι μηχανικοί μετατροπείς λειτουργούν με διάφραγμα ή φουσητήρες για να μετατρέψουν το σήμα πίεσης σε μια γραμμική κίνηση και να το διαβιβάσουν σε έναν μετρητή. Χρησιμοποιούνται πλέον σπανίως στην αεροδυναμική οχημάτων. Οι ηλεκτρικοί μετατροπείς μετατρέπουν τη φυσική μετατόπιση, π.χ., την κάμψη μιας μεμβράνης (διάφραγμα), σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Οι χωρητικές, επαγωγικές, ή πιεζοηλεκτρικές συσκευές καθώς επίσης και οι μετρητές τάσης χρησιμοποιούνται ως μετατροπείς σημάτων. Τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται σπανιότερα. Οι ηλεκτρικοί μετατροπείς επιτρέπουν την συνεχή καταγραφή των στοιχείων από όργανα καταγραφής ή μαγνητική ταινία. Επιπλέον, προσφέρουν το πλεονέκτημα του αυτοματοποιημένου χειρισμού και επεξεργασίας δεδομένων. Έχουν αντικαταστήσει σχεδόν ολοκληρωτικά τον "κλασικό" εξοπλισμό δοκιμής που βασίζεται σε σωλήνα τύπου U.

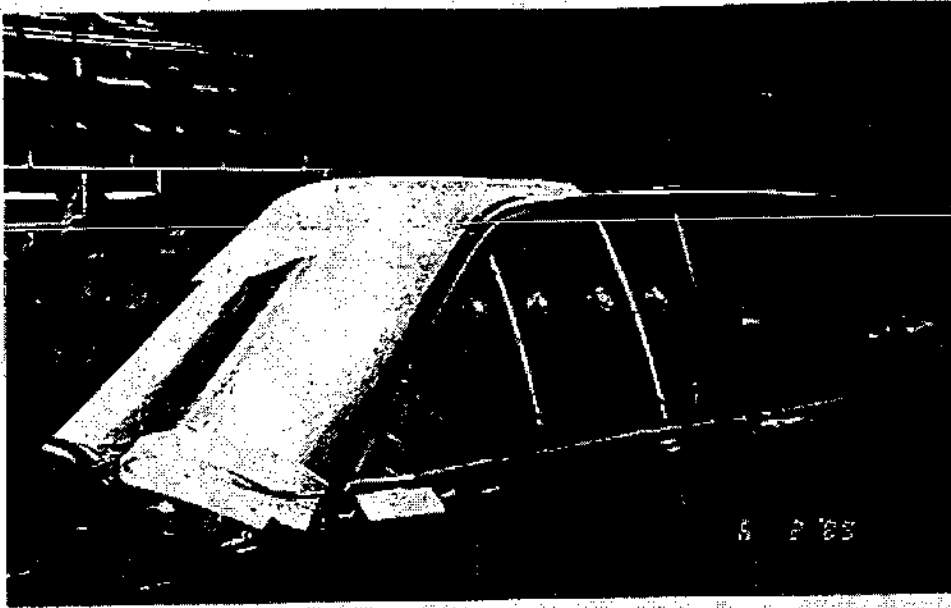
Οι μηχανικοί και ηλεκτρικοί μετατροπείς πίεσης εκθέτουν ένα σαφώς υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων από τα μανόμετρα στηλών υγρού. Για αυτόν τον λόγο, απαιτείται πρόσθετη απόσβεση ταλαντώσεων για τις περισσότερες μετρήσεις αεροσηράγγων για να έχουμε τον

χρονικό μέσο όρο των δεδομένων. Αυτή η απόσβεση των ταλαντώσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στην πνευματική πλευρά, μεταξύ του αισθητήρα πίεσης και της εισαγωγής στον μετατροπέα, ή στην ηλεκτρική πλευρά, μεταξύ της εξαγωγής του μετατροπέα και της καταγραφής στοιχείων.

Για την απόσβεση των ταλαντώσεων πίεσης πριν από τη μετατροπή τους σε ένα ηλεκτρικό σήμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίσταση ή ογκομετρική απόσβεση. Η απόσβεση ταλαντώσεων με αντίσταση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός μακριού πλαστικού σωλήνα με διάμετρο 1mm ή λιγότερο. Το μήκος του μπορεί να αλλάξει για την επίτευξη της επιθυμητής απόσβεσης. Η ογκομετρική απόσβεση επιτυγχάνεται σε τμήματα με μεγάλη διάμετρο που παρεμβάλλονται στη γραμμή σύνδεσης μεταξύ του αισθητήρα και του μετατροπέα. Ένας συνδυασμός των δύο τύπων απόσβεσης είναι συμφέρων για την μέτρηση των πολύ χαμηλών πιέσεων, όπως, παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση της μέτρησης ροής αέρος δια μέσου του χώρου των επιβατών όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.3. Εάν προτιμάται η απόσβεση σημάτων στην ηλεκτρική πλευρά, ένα ενεργό φίλτρο μεταξύ του μετατροπέα και της συσκευής καταγραφής δεδομένων επιτρέπει την επίτευξη της επιθυμητής απόσβεσης.

Εντούτοις, για ορισμένες περιπτώσεις, παραδείγματος χάριν, στην αερο-ακουστική, οι ταλαντώσεις πίεσης πρέπει να επιλυθούν. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόσβεση των σημάτων πίεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η χρήση ενός μικρού, ιδιαίτερα ευαίσθητου μετατροπέα πολύ κοντά στο σημείο μέτρησης χωρίς σωλήνες σύνδεσης αντιπροσωπεύει μια αποτελεσματική εγκατάσταση δοκιμής. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς πίεσης ή μικρόφωνα μέτρησης είναι κατάλληλα για αυτόν τον τύπο μέτρησης (σχ. 2.9).

Εάν οι μετρήσεις πρόκειται να εκτελεσθούν σε πολλές θέσεις, όπως, παραδείγματος χάριν, απαιτείται για την κατανομή πίεσης σε ένα σώμα οχήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας απλός μετατροπέας πίεσης σε συνδυασμό με έναν ανιχνευτή.



**Σχήμα 2.9 Μέτρηση της επίδρασης των τροποποιήσεων των Α-στύλων στο επίπεδο θορύβου στο πλαϊνό παράθυρο χρησιμοποιώντας μικρόφωνα που τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο με την εξωτερική επιφάνεια παραθύρων.**

Κάθε μια από τις πιέσεις που μετριοούνται γυρίζει στον μετατροπέα για μια προεπιλεγμένη περίοδο. Οι πιέσεις που παίρνονται από τις μεμονωμένες οπές πίεσης οδηγούνται στον ανιχνευτή μέσω πλαστικών σωλήνων. Ο ανιχνευτής, στη συνέχεια, επιλέγει και συνδέει μηχανικά κάθε οπή πίεσης με τον μετατροπέα πίεσης. Το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης μιας τέτοιας συσκευής είναι η δυνατότητά της να διαβάζει έναν μεγάλο αριθμό σημάτων πίεσης με μόνο έναν (ακριβό) μετατροπέα. Το μειονέκτημα είναι ότι το μηχανικό μέρος του συστήματος φθείρεται με το χρόνο και με αυτόν τον τρόπο η αξιοπιστία του συστήματος μειώνεται.

Η εναλλακτική λύση είναι να τοποθετηθούν μικροσκοπικοί αισθητήρες πίεσης σε κάθε σημείο μέτρησης και, με ελεγχόμενη από υπολογιστή ανίχνευση αυτών σε πολύ υψηλή συχνότητα (υψηλότερη από 10.000 ανά δευτερόλεπτο), είναι δυνατή μια καταγραφή σε πραγματικό χρόνο της κατανομής πίεσης (χρησιμοποιώντας αρκετές εκατοντάδες σημεία μέτρησης). Αυτός ο τύπος ηλεκτρονικής ανίχνευσης δεν έχει μηχανικά μέρη που υφίστανται φθορά, και στην περίπτωση ενός μεγάλου αριθμού σημείων, μπορεί να είναι πολύ αποδοτικός χρονικά. Εντούτοις, λόγω του μεγάλου αριθμού μετατροπέων, είναι εξαιρετικά ακριβός.

### 2.2.3 Μέτρηση της Ταχύτητας Ροών Αέρος

Οι μετρήσεις ταχύτητας σε μια αεροσήραγγα περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της (γενικής) λειτουργικής ταχύτητας αέρα σε αεροσήραγγες και (των τοπικών) ταχυτήτων αέρα έξω από και μέσα σε ένα όχημα. Επιπλέον η μέτρηση των διακυμάνσεων ταχύτητας, η "αναταραχή", μπορεί επίσης να απαιτείται.

Η ταχύτητα ροών αέρος μπορεί να καθοριστεί με τη βοήθεια ενός στατικού σωλήνα Pitot (σωλήνας-Prandtl). Η ταχύτητα αέρα μπορεί να υπολογιστεί από τη δυναμική πίεση ως εξής:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_{dyn}} \quad (2.1)$$

Όπου  $v$  = η ταχύτητα ροής αέρα (m/s)  
 $\rho$  = η πυκνότητα αέρα (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta p_{dyn}$  = η δυναμική πίεση (Pa)

Η πυκνότητα αέρα αλλάζει με τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, και την υγρασία ως εξής:

$$\rho = \frac{349p - 131p_e}{T} \quad (2.2)$$

Όπου  $T$  = η απόλυτη θερμοκρασία (K)  
 $p$  = η ατμοσφαιρική πίεση (bar)  
 $p_e$  =  $U \times E/100$  είναι η μερική πίεση του υδρατμού στον αέρα (bar)  
 $U$  = η σχετική υγρασία αέρα (τοις εκατό)  
 $E$  = η υπερπλήρωση πίεσης ατμού σε  $T$  (bar)

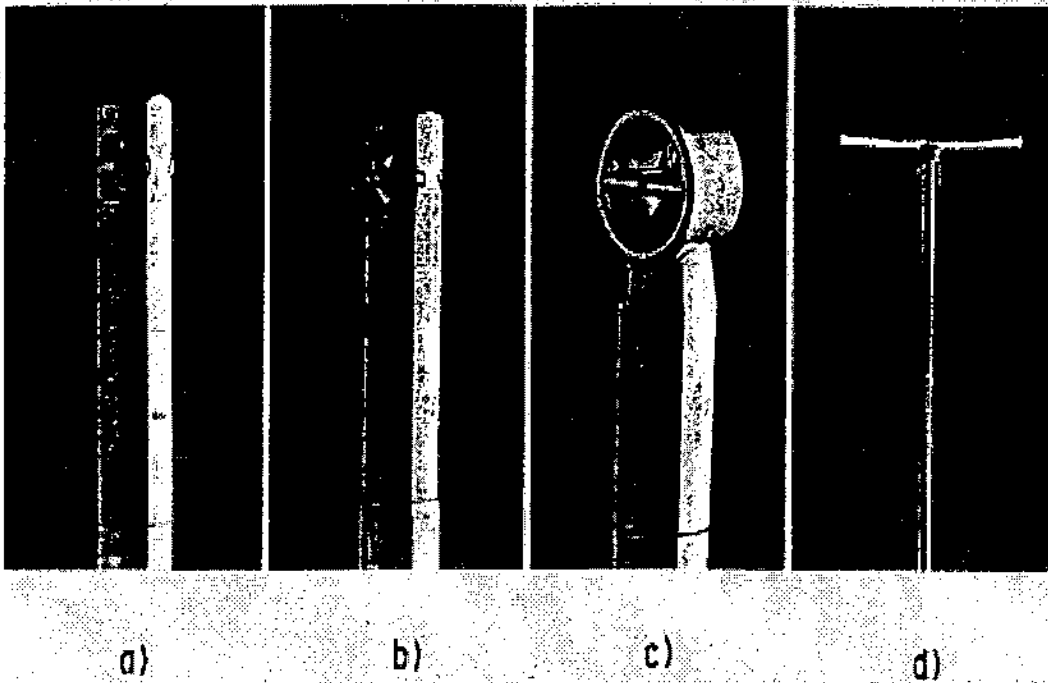
#### 2.2.3.1 Προσδιορισμός της Ταχύτητας Ροής Αέρα εξωτερικά και εσωτερικά ενός οχήματος.

Ο στατικός σωλήνας Pitot μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την ταχύτητα ροής αέρα όταν η ροή είναι σταθερή και η κατεύθυνση της ροής είναι γνωστή. Εντούτοις, η ακρίβεια αυτού του σωλήνα δεν είναι ικανοποιητική σε χαμηλές ταχύτητες αέρα, και πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλοι καταλληλότεροι σωλήνες για ταχύτητες κάτω των 3 m/s. Ένας



χαρακτηριστικός μετρητής που προσφέρει καλή ακρίβεια σε χαμηλές ταχύτητες είναι ένα μικροσκοπικό ανεμόμετρο με πτερύγια.

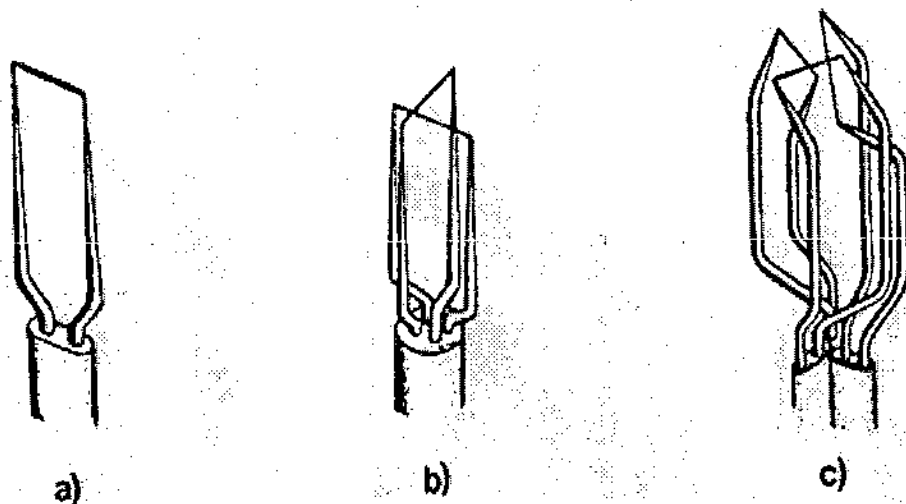
Αυτό το ανεμόμετρο με πτερύγια αποτελείται από μια μικρή πτερυγωτή ρόδα (διαμέτρου 10mm και άνω), η οποία τοποθετείται ομοαξονικά σε μια κυλινδρική υποδοχή (σχ. 2.10). Η περιστροφική ταχύτητα της πτερυγωτής ρόδας είναι ένα μέτρο της ταχύτητας του αέρα. Οι συνθήκες που απαιτούνται για μια σωστή ανάγνωση είναι οι ίδιοι όπως για τον στατικό σωλήνα Pitot: Η ροή αέρος πρέπει να είναι σταθερή και ο άξονας της πτερυγωτής ρόδας πρέπει να συμπίπτει με την διεύθυνση της τοπικής ροής. Η ανεκτή γωνία παρέκκλισης για απώλεια ακρίβειας ως 1% είναι περίπου  $5-7^{\circ}$  για ένα ανεμόμετρο που εφοδιάζεται με κυλινδρική υποδοχή. Εντούτοις, αυτό το όριο ανοχής μπορεί να αυξηθεί μέχρι μια γωνία παρέκκλισης  $15-30^{\circ}$  εάν η υποδοχή του ανεμόμετρου βελτιστοποιηθεί αεροδυναμικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10 (δ)



Σχ. 2.10 Διάφοροι τύποι ανεμόμετρων με πτερύγια: έκδοση (δ) με κεφαλή ανεπηρέαστη σε ροή με γωνία παρέκκλισης.

Αφ' ετέρου, οι μορφές υποδοχής έχουν επίσης αναπτυχθεί λόγω του ότι είναι πολύ ευαίσθητες στην παρέκκλιση. Λόγω του εύκολου χειρισμού τους, τα ανεμόμετρα με πτερύγια είναι πολύ δημοφιλή στην αεροδυναμική οχημάτων.

Η αρχή πίσω από τα ανεμόμετρα με θερμαινόμενα καλώδια βασίζεται στο γεγονός ότι η απώλεια θερμότητας ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου καλωδίου που υποβάλλεται σε μια ροή αέρος αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας του αέρα. Δεδομένου ότι η ηλεκτρική αντίσταση του καλωδίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, η μεταβολή της αντίστασης του καλωδίου που εκτίθεται στη ροή αέρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της ταχύτητα ροής αέρος. Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζονται διάφοροι τύποι ελεγκτήρων με θερμαινόμενα καλώδια. Το καλώδιο κανονικά αποτελείται από βολφράμιο, που καλύπτεται είτε με χρυσό είτε με λευκόχρυσο. Οι χαρακτηριστικές διαμέτροι κυμαίνονται από 5 έως 10 μικρά (0.005-0.01mm)· οι διαμέτροι 1 μικρού (0.001mm) είναι επίσης δυνατές. Το ίδιο το καλώδιο είναι ενωμένο με συγκόλληση σε δύο αιχμηρές απολήξεις ή ηλεκτρόδια που διαμορφώνουν ένα είδος δίχαλου. Μόνο το "ενεργό μήκος" του καλωδίου (το μέρος του καλωδίου μεταξύ των αιχμηρών απολήξεων όπου η θερμότητα μεταφέρεται) επηρεάζεται από τη ροή αέρος: είναι μόνο 0.5-2mm, επιτρέποντας κατά συνέπεια την κατασκευή πολύ μικρών ελεγκτήρων που δύσκολα εξασθενίζουν το πεδίο ροής που διερευνάται. Σαν εναλλακτική λύση υπάρχουν διαθέσιμοι ελεγκτήρες θερμαινόμενων ταινιών. Οι ελεγκτήρες θερμαινόμενων ταινιών είναι παρόμοιου σχεδίου με τους ελεγκτήρες θερμαινόμενων καλωδίων με μόνη διαφορά ότι το καλώδιο μεταξύ των δύο αιχμηρών απολήξεων αντικαθίσταται από μια μικροσκοπική ράβδο φτιαγμένη από χαλαζία με μια χαρακτηριστική διάμετρο περίπου 50 μικρών (0.05mm), χρησιμεύοντας ως φορέας υλικού. Αυτός ο φορέας υλικού είναι ντυμένος με ταινία χρυσού ή λευκόχρυσου πάχους μόνο 0,1 μικρά (0.0001mm) περίπου. Η βαθμολόγηση των ελεγκτήρων θερμαινόμενων καλωδίων και θερμαινόμενων ταινιών γενικά εκτελείται σε μια μικροσκοπική σήραγγα αέρα ειδική γι' αυτήν την χρήση.



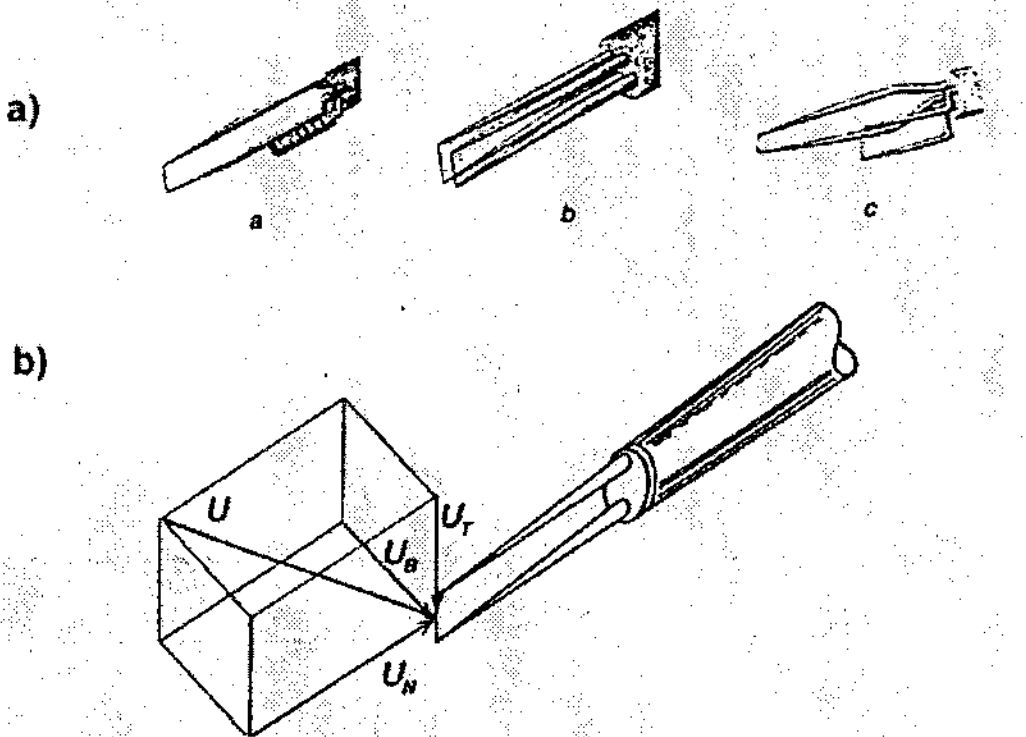
**Σχ. 2.11** Ελεγκτήρες θερμαινόμενων καλωδίων για μετρήσεις ταχύτητας μονοδιάστατης, δισδιάστατης, και τρισδιάστατης ροής.

Μια πιθανή μέθοδος για να καθοριστεί η ταχύτητα του αέρα με ένα μεταλλικό άκρο επαφής κυκλώματος θερμαινόμενων καλωδίων είναι να κρατηθεί το ρεύμα που εφαρμόζεται στο καλώδιο σταθερό (ΑΣΡ = Ανεμόμετρο Σταθερού Ρεύματος). Το θερμαινόμενο καλώδιο διαμορφώνει έναν βραχίονα μιας γέφυρας Wheatstone. Μια ροή αέρος προκαλεί αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης του καλωδίου και οδηγεί σε μια ανισορροπία της γέφυρας. Το ρεύμα που απαιτείται για να επανισορροπήσει τη γέφυρα Wheatstone είναι ένα μέτρο της ταχύτητας αέρα. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια ακριβή μέτρηση των πολύ χαμηλών ταχυτήτων αέρα και των ταλαντώσεών τους μέχρι 10KHz. Η ακρίβεια μέτρησης μειώνεται, εντούτοις, με αύξηση της ταχύτητα ροής.

Σαν εναλλακτική λύση, οι μετρήσεις ταχύτητας αέρα λαμβάνονται σε μια σταθερή θερμοκρασία καλωδίων (ΑΣΘ = Ανεμόμετρο Σταθερής Θερμοκρασίας). Η ανισορροπία της γέφυρας Wheatstone λόγω της αλλαγής αντίστασης του καλωδίου εξαλείφεται αλλάζοντας το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του αισθητήρα με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου (χαμηλότερος κίνδυνος εκρήξεων). Η αλλαγή ρεύματος που απαιτείται για να κρατηθεί σταθερή η θερμοκρασία των καλωδίων χρησιμεύει ως ένα μέτρο της ταχύτητας της ροής του αέρα. Το ΑΣΘ επιτρέπει τις μετρήσεις σε χαρακτηριστικά φάσματα ταχύτητας και συχνότητας σε λειτουργία αεροσηράγγων.

Εάν κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης η θερμοκρασία αέρα ποικίλλει και γίνεται διαφορετική από εκείνη την θερμοκρασία στην οποία ήταν ρυθμισμένος, πρέπει να μετρηθεί η πραγματική θερμοκρασία αέρα και να ληφθεί υπόψη για τις αντίστοιχες μετρήσεις θερμαινόμενων

καλωδίων. Γι' αυτόν τον λόγο υπάρχουν μεταλλικά άκρα επαφής κυκλώματος που είναι εξοπλισμένα είτε με ένα χωριστό καλώδιο ίδιου υλικού και διάστασης με το θερμαινόμενο καλώδιο είτε έχουν μια μικροσκοπική σπείρα που χρησιμεύει για έλεγχο θερμοκρασίας. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12 (α). Το αν η θερμοκρασία αέρα μετριέται από το καλώδιο ή από την σπείρα εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από την ταχύτητα με την οποία αλλάζει η θερμοκρασία του αέρα κατά την διάρκεια μιας δοκιμής. Αν τα σήματα του ΑΣΘ πρέπει να είναι αντισταθμισμένα για γρήγορες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, χρησιμοποιούνται καλώδια ως ευαίσθητα στοιχεία. Λόγω της μικρής μάζας τους αντιδρούν γρήγορα στις γρήγορα μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες αέρα. Όταν η θερμοκρασία αέρα αναμένεται να αλλάξει αργά κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ένας αισθητήρας διαμορφωμένος σε σπείρα θα κάνει την εργασία.



Σχ. 2.12 α) Αισθητήρες για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας: (α) σχηματισμού σπείρας, (b) και (c) αισθητήρας καλωδίων. β) Συνιστώσες ταχύτητας του συνολικού διανύσματος ροής.

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων θερμαινόμενου καλωδίου ή θερμαινόμενων ταινιών καθώς επίσης και η ίδια η μέτρηση χρειάζονται κάποια προσπάθεια και υπολογιστική υποστήριξη, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες πολλών καλωδίων για τον καθορισμό διανύσματος ροής τριών διαστάσεων. Είναι συνηθισμένη πρακτική να χωρίζεται το συνολικό διάνυσμα ροής στις συνιστώσες του  $U_N$ ,  $U_T$ , και  $U_B$  κατά μήκος των αξόνων ενός ορθογώνιου

συστήματος συντεταγμένων, που ευθυγραμμίζονται με τον άξονα των αισθητήρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12(β) για έναν αισθητήρα ενός καλωδίου. Καθώς οι συνιστώσες ταχύτητας  $U_N$ ,  $U_T$ , και  $U_B$  συμβάλλουν με διαφορετικούς τρόπους στο σήμα των θερμαινόμενων καλωδίων- ανάλογα με τις γωνίες που παρουσιάζουν σε σχέση με τον προσανατολισμό καλωδίων – μια "ενεργή ταχύτητα ψύξης"  $U_{eff}$  έχει εισαχθεί από τον F.E. JOERGENSEN, ο οποίος πρότεινε τον ακόλουθο τύπο:

$$U_{eff}^2 = U_N^2 + k_1^2 U_B^2 + k_2^2 U_T^2 \quad (2.3)$$

όπου  $k_1$  and  $k_2$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις διαστάσεις των αισθητήρων όπως η αναλογία μήκος-διαμέτρου του καλωδίου και ως ένα ορισμένο βαθμό από το σύνολο τιμών ταχύτητας, και πρέπει να καθοριστούν πειραματικά. Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, καθορίζεται ένας συσχετισμός μεταξύ της εξαγόμενης τάσης  $E$  του ανεμόμετρου θερμαινόμενων καλωδίων και της αντίστοιχης ενεργής ταχύτητας ψύξης  $U_{eff}$ . Μια σχέση της μορφής

$$E^2 = A + B(U_{eff})^n \quad (2.4)$$

προτάθηκε αρχικά από τον L.V. KING. Εντούτοις, ο τύπος του KING ισχύει μόνο για ένα περιορισμένο σύνολο τιμών της ταχύτητας. Για την βαθμονόμηση αισθητήρων για μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας οι R.G. SIDDAL και T.W. DAVIS εισήγαγαν την τροποποιημένη συνάρτηση

$$E^2 = A + B(U_{eff})^{0.5} + CU_{eff} \quad (2.5)$$

με τις  $A$ ,  $B$ , και  $C$  ως σταθερές. Η σχέση εξετάστηκε από τον H.H. BRUUN για ταχύτητες μέχρι 120m/s με πολύ καλά αποτελέσματα.

Κατά τη χρησιμοποίηση αισθητήρων πολλών καλωδίων, κάθε καλώδιο παρουσιάζει το εξαγόμενο σήμα του  $E$  όπως περιγράφεται ανωτέρω, το οποίο αλλάζει με γωνία ροής που εξαρτάται από την ταχύτητα ροής και τον άξονα του αισθητήρα. Αυτό θα οδηγήσει σε έναν σύνθετο μαθηματικό πίνακα βαθμονόμησης. Οι διαφορετικοί νόμοι της βαθμονόμησης και η εφαρμογή τους στις πρακτικές μετρήσεις θερμαινόμενων καλωδίων αναλύονται λεπτομερέστερα από τους R.I. KARLSSON και L. LOFDAHL.

Η ανεμομετρία σταθερής θερμοκρασίας είναι μια καθιερωμένη και καλά αποδεδειγμένη τεχνική στην εφαρμογή σπράγγων αέρα. Λόγω της υψηλής ευαισθησίας της και της γρήγορης

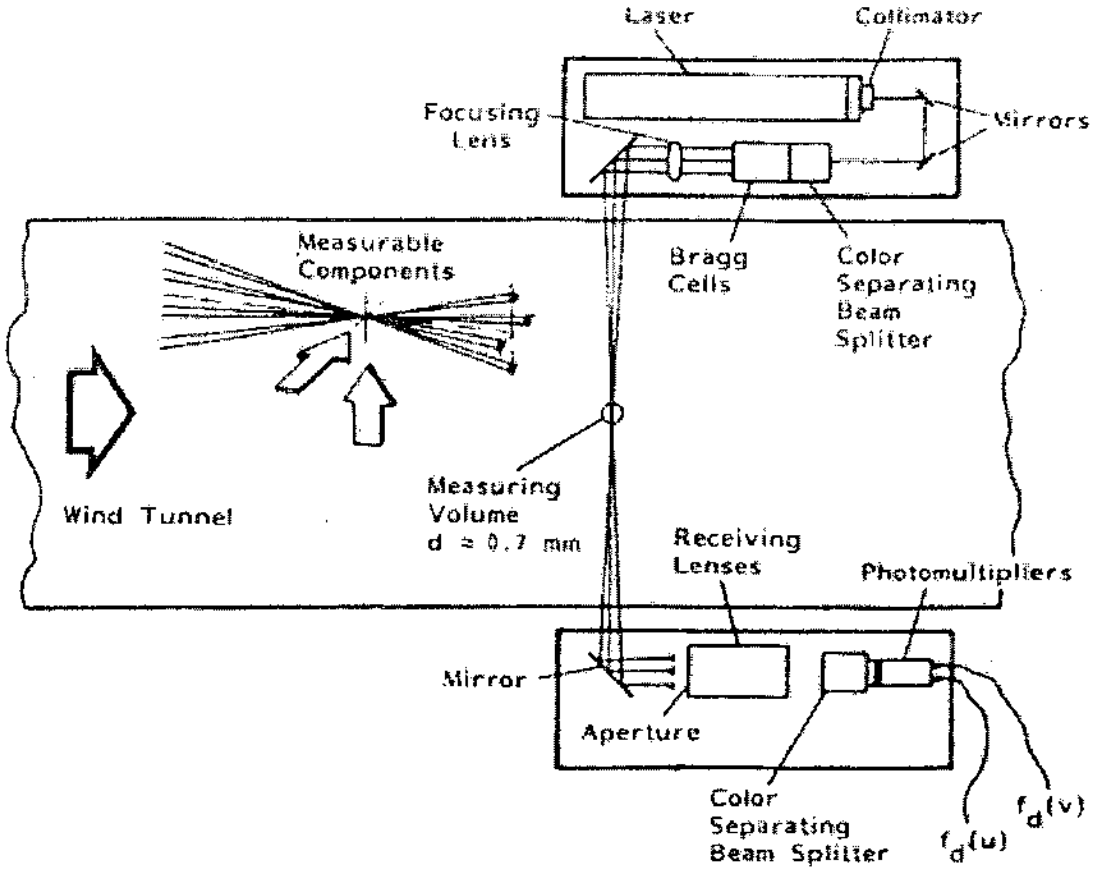
απόκρισής της στις αλλαγές ταχύτητας είναι κατάλληλη για μετρήσεις με δίνες και για ανίχνευση της δομής τους. Για ειδικούς λόγους είναι ήδη διαθέσιμα ή μπορούν να κατασκευαστούν διαφορετικά σχέδια αισθητήρων. Όταν το διάνυσμα ροής υπερβαίνει μια ορισμένη γωνία σε σχέση με τον άξονα του αισθητήρα, οι διχάλες που φέρουν το θερμαινόμενο καλώδιο καθώς επίσης και ο μηχανισμός κίνησης μπορούν να αλλάξουν ή ακόμα και να εξασθενίσουν την ροή που πρέπει να ερευνηθεί.

Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα (δηλ., κατά τη μέτρηση αντίστροφης ροής μέσα στην υπερβολικά παραχώδη περιοχή ιχνών από αυλάκι πίσω από ένα όχημα) ένα σύστημα οπτικής μέτρησης φαίνεται μια κατάλληλη τεχνική ως μια μη παρεισφρητική μέθοδος δοκιμής. Για παράδειγμα, η βασική αρχή λειτουργίας ενός Laser-Doppler ανεμομέτρου (LDA) και η Particle-Image-Velocimetry (PIV) περιγράφεται παρακάτω.

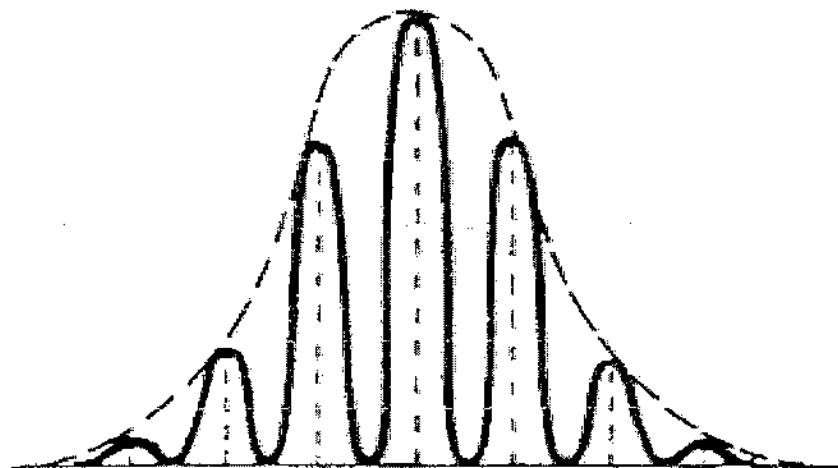
Το σχήμα 2.13 παρουσιάζει σχηματικά μια ρύθμιση ενός συστήματος Laser-Doppler ανεμομέτρου. Ένας διαιρέτης ακτίνων διαιρεί το φως που παράγεται από ένα λέιζερ σε δύο χωριστές ακτίνες. Οι δύο ακτίνες λέιζερ, και οι δύο ίδιας συχνότητας και ως εκ τούτου του ίδιου χρώματος, ευθυγραμμίζονται με τη βοήθεια φακών και των πρισμάτων έτσι ώστε διασταυρώνονται σε μια κοινή εστία. Η εστίαση αντιπροσωπεύει τον πραγματικό "μετρηθέντα όγκο". Το μήκος αυτού του όγκου φθάνει από περίπου 10 μικρά σε μερικά χιλιοστόμετρα, ανάλογα με τη διάμετρο ακτίνων, η γωνία με την οποία τέμνονται οι ακτίνες, και άλλες παράμετροι. Η γενική πρόθεση είναι να κρατηθεί ο όγκος μέτρησης όσο το δυνατόν μικρότερος. Μέσα στον όγκο μέτρησης οι δύο ακτίνες λέιζερ ανακατεύονται η μια με την άλλη και παράγουν ένα σχέδιο εναλλασσόμενων σκοτεινών και φωτεινών λωρίδων, αποκαλούμενο ως "κροσσωτό σχέδιο". Εάν ένα μικρό μόριο φερόμενο μέσα στη ροή διασχίζει τον μετρούμενο όγκο και το σχέδιο με τις κροσσίδες, η ακτίνα λέιζερ διασπάται. Το μόριο που κινείται στις φωτεινές και σκοτεινές ζώνες του σχεδίου δημιουργεί παλμούς διεσπαρμένου φωτός, η αποκαλούμενη "έκρηξη". Το σχήμα 2.14 παρουσιάζει σχηματικά μια τέτοια έκρηξη.

Η συχνότητα αυτών των σφυγμών εξαρτάται από την ταχύτητα του σωματιδίου επί του κροσσωτού σχεδίου. Οι σφυγμοί του διεσπαρμένου φωτός συλλέγονται με τη βοήθεια ενός οπτικού συστήματος με έναν φωτοπολλαπλασιαστή, ή μια ειδική φωτοδίοδος μετασχηματίζει το εισερχόμενο φως (φωτόνια) σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Η συχνότητα με την οποία αλλάζει το ηλεκτρικό σήμα αντιστοιχεί στη συχνότητα των παλμών που διασκορπίζονται από το σωματίδιο και, ως εκ τούτου, στην ταχύτητά της. Δεδομένου ότι οι δύο ακτίνες λέιζερ αποτελούνται από πολωμένο και συμφασικό φως το σχέδιο κροσσίδων που δημιουργούν έχει έναν σαφώς καθορισμένο προσανατολισμό. Κατά συνέπεια, μετριέται μόνο η κάθετη

συνιστώσα ταχύτητας του σωματιδίου στην διχοτόμο της γωνίας μεταξύ των δύο ακτινών και στο επίπεδο που διαμορφώνεται από τις δύο ακτίνες.



Σχ. 2.13 Γενική ρύθμιση των κύριων συστατικών ενός λέιζερ-Doppler ανεμομέτρου για τις μετρήσεις ταχύτητας μιας διάστασης.

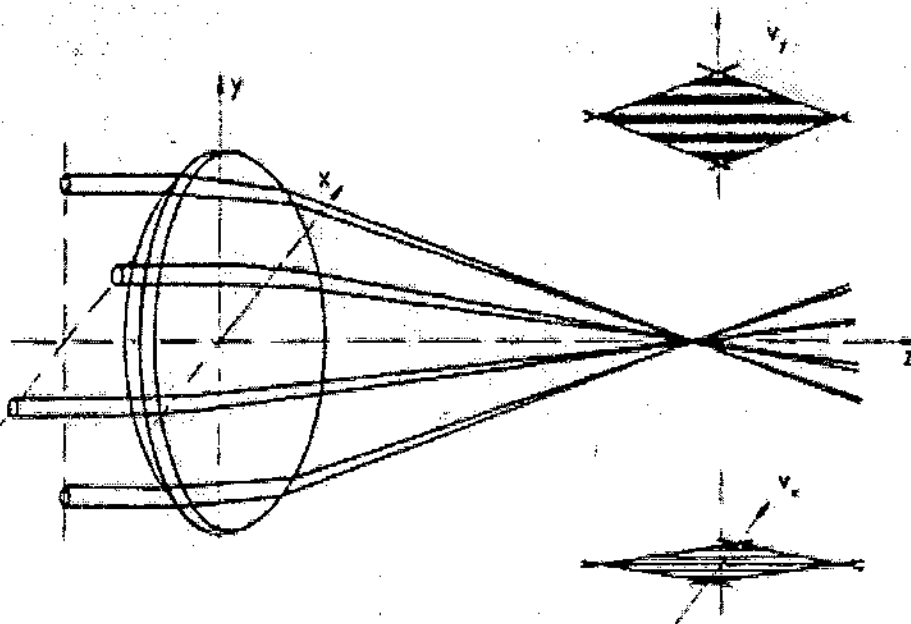


Σχ. 2.14 «Έκρηξη» (σχηματική αναπαράσταση), που παράγεται από το διεσπαρμένο φως από τα μόρια που ταξιδεύουν μέσω του όγκου μέτρησης.

Δυστυχώς δεν είναι δυνατό να ανιχνευθεί εάν ένα μόριο διασχίζει τον όγκο μέτρησης στην κατεύθυνση ροής ή στην αντίστροφη κατεύθυνση. Για να αποφευχθεί αυτό, κάθε ακτίνα λέιζερ είναι "συντονισμένη" με τη βοήθεια των κυττάρων Bragg. Η συχνότητα του φωτός κάθε ακτίνας λέιζερ αλλάζει κατά ένα μικρό, αλλά διαφορετικό ποσό.

Η παρέμβαση αυτών των διαμορφωμένων ακτίνων λέιζερ μέσα στον όγκο μέτρησης αναγκάζει τις κροσσίδες να κινηθούν, π.χ., οι φωτεινές και σκοτεινές λουρίδες φαίνονται να κινούνται είτε στην κατεύθυνση ροής είτε στην αντίστροφη κατεύθυνση με μια γνωστή ταχύτητα, ανάλογα με τη διαφορά στις συχνότητες στις οποίες είναι συντονισμένες οι ακτίνες λέιζερ. Ένα μόριο που ταξιδεύει τώρα μέσω των κινούμενων κροσσίδων θα παράγει μια έκρηξη, η οποία προστίθεται λόγω φαινομένου Doppler στη συχνότητα. Έτσι, όταν το σωματίδιο και οι κροσσίδες κινούνται στην ίδια κατεύθυνση η έκρηξη θα έχει χαμηλότερη συχνότητα από εάν κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις.

Για την ανίχνευση του διανύσματος ροής σε δύο διαστάσεις, το φως που εκπέμπεται από το λέιζερ είναι χωρισμένο σε δύο ζεύγη ακτίνων που έχουν διαφορετικά χρώματα, τυπικά πράσινο και μπλε. Παραδείγματος χάριν, το πράσινο ζεύγος ακτίνων χρησιμοποιείται για την μετρήση της ταχύτητα ροής σε μια οριζόντια κατεύθυνση (όπως περιγράφεται ανωτέρω) ενώ το μπλε ζεύγος ακτίνων έχει κλίση κατά  $90^{\circ}$  σε αντιστοιχία με την κάθετη κατεύθυνση ροής. Και οι τέσσερις ακτίνες εστιάζονται από τον ίδιο φακό δημιουργώντας έναν ενιαίο όγκο μέτρησης που αποτελείται από δύο σχέδια κροσσίδων κινούμενες σε οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση, αντίστοιχα. Το σχήμα 2.15 παρουσιάζει μια τέτοια ρύθμιση.



Σχ. 2.15 Ευθυγράμμιση των ακτίνων λέιζερ και των αντίστοιχων κροσσίδων για μετρήσεις δύο διαστάσεων



Ένα μόριο που αιωρείται μέσα στον όγκο μέτρησης δημιουργεί ταυτόχρονα μια έκρηξη σε πράσινο και μπλε χρώμα, τα οποία μπορούν να φιλτραριστούν και να αξιολογηθούν χωριστά. Η ποσότητα φωτός που διασκορπίζεται από το σωματίδιο εξαρτάται από την ένταση των ακτίνων λέιζερ, το μέγεθος του όγκου μέτρησης, το είδος των χρησιμοποιούμενων σωματιδίων, και την γωνία μεταξύ του φακού εστίασης και των ακτίνων λέιζερ. Υπάρχουν δύο μέθοδοι λήψης του διεσπαρμένου φωτός. Ο ένας αξιολογεί το φως που διασκορπίζεται πίσω στην κατεύθυνση από την οποία εκπέμπονται οι ακτίνες λέιζερ (ανάδρομος διασκορπισμός). Ο άλλος αξιολογεί το φως που διασκορπίζεται στην κατεύθυνση από την οποία οι ακτίνες λέιζερ αναπαράγονται (διασκορπισμός προς τα εμπρός).

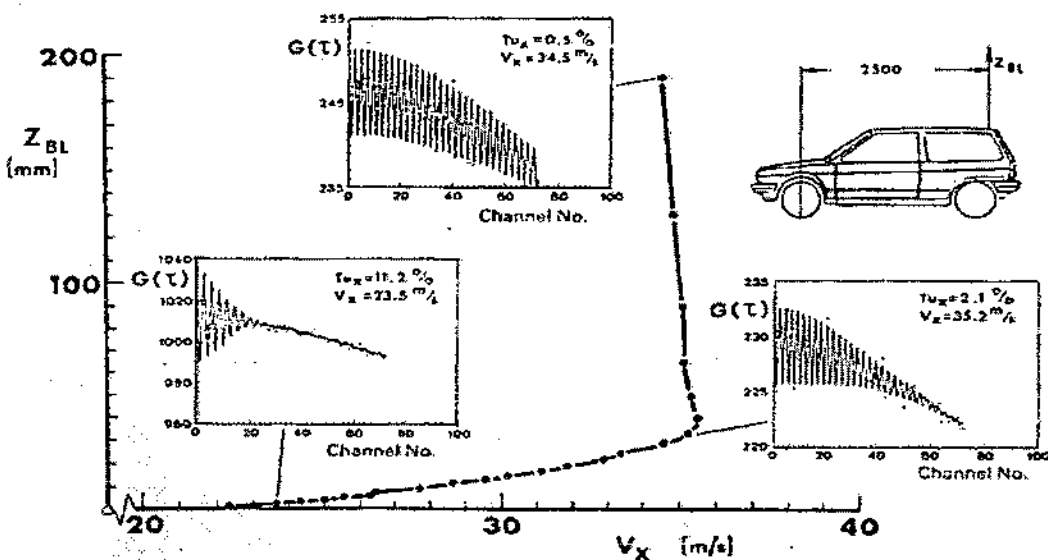
Καθώς τα οπτικά στοιχεία και για την εκπέμπουσα και για τη λαμβάνουσα πορεία του φωτός πρέπει να ρυθμιστούν με μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά τη θέση τους το ένα προς το άλλο, ένα LDA σύστημα που χρησιμοποιεί το αναδρομικά διασκορπισμένο φως παρέχει το πλεονέκτημα ότι όλα τα οπτικά στοιχεία μπορούν να στερεωθούν σε μια ενιαία δύσκαμπτη πλατφόρμα. Κατά την εξέταση ολόκληρου του πεδίου ροής, δηλ., σε ένα επίπεδο επί του ίχνους ενός οχήματος σε μια σήραγγα αέρα, ολόκληρη η πλατφόρμα πρέπει να κινηθεί προκειμένου να μετακινηθεί ο όγκος μέτρησης στην επιθυμητή θέση, το οποίο εξασφαλίζει ότι όλα τα οπτικά στοιχεία παραμένουν ευθυγραμμισμένα στη ρυθμισμένη θέση τους. Εντούτοις, το μειονέκτημα είναι ότι μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της έντασης του φωτός εντός του μετρούμενου όγκου διασκορπίζεται αναδρομικά από τα μόρια, απαιτώντας ακριβές συσκευές λήψης με μεγάλα διαφράγματα φακών και πολύ ευαίσθητους φωτοπολλαπλασιαστές ή φωτοδιόδους για να επιτευχθεί μια αποδεκτή αναλογία σήματος-θορύβου. Η αντίθετη κατάσταση που εφαρμόζεται για τις μετρήσεις LDA βασίζεται στην αξιολόγηση του διασκορπισμένου προς τα εμπρός φωτός. Η ένταση του διασκορπισμένου προς τα εμπρός φωτός είναι πολύ υψηλότερη. Εδώ, το μειονέκτημα εμφανίζεται στον προσδιορισμό της θέσης του όγκου μέτρησης και στην διατήρηση των οπτικών συσκευών εκπομπής και λήψης ευθυγραμμισμένων μεταξύ τους. Ειδικά σε αποστάσεις αρκετών μέτρων μεταξύ των οπτικών συσκευών εκπομπής και λήψης, που εφαρμόζεται για μετρήσεις στις πραγματικού μεγέθους σήραγγες αέρα, είναι απαραίτητο να μετακινούνται οι οπτικές συσκευές λήψης φωτός από ένα δεύτερο χωριστό σύστημα τοποθέτησης. Η ανάγκη να κρατηθούν όλα τα οπτικά συστήματα σε ακριβή ευθυγράμμιση απαιτεί εξαιρετικά ακριβή προσδιορισμό θέσης.

Υπάρχουν διαθέσιμα δισδιάστατα συστήματα LDA όπου ο φακός εκπομπής χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως φακός λήψης φωτός, ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια τον κίνδυνο κακής ευθυγράμμισης. Υπάρχουν επίσης διαθέσιμα πλήρη και σχετικά συμπαγή συστήματα LDA

όπου χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες για να συνδέσουν το λέιζερ με το φακό από την μια πλευρά και το φακό λήψης με τον φωτοπολλαπλασιαστή από την άλλη, παρέχοντας δυνατότητα τοποθέτησης μόνο των φακών εκπομπής και λήψης, ενώ το λέιζερ και τα περισσότερα οπτικά μέρη τοποθετούνται σε μια σταθερή πλατφόρμα. Μερικές φορές τα φυσικά σωματίδια που περιλαμβάνονται στη ροή αέρος δεν είναι τα κατάλληλα για να δημιουργήσουν τις εκρήξεις που θα μπορούσαν να αξιολογηθούν. Αυτή η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί με τεχνητή πρόσθεση κατάλληλων σωματιδίων στη ροή, όποιος καλείται "σπορά".

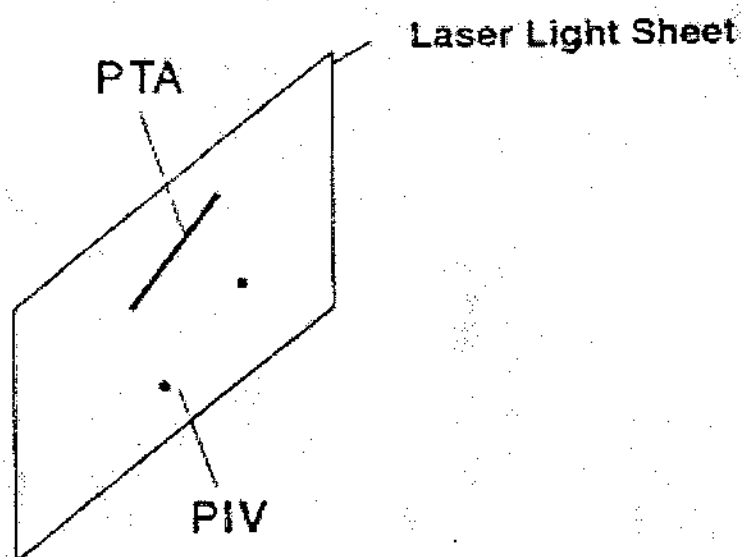
Ο R. BUCHHEIM έχει αποδείξει την εφαρμογή της τεχνικής LDA για τη δοκιμή οχημάτων. Τα διαγράμματα οριακού στρώματος μελετήθηκαν σε διάφορες θέσεις του οχήματος. Το σχήμα 2.16 απεικονίζει, για παράδειγμα, διαγράμματα συσχέτισης καταγραμμένα με τεχνολογία LDA και, τελικά, το διάγραμμα του οριακού στρώματος στην οροφή ενός οχήματος.

Οι περισσότερες από τις τεχνικές μέτρησης ταχύτητας όπως η LDA, Ανεμομετρία Σταθερής Θερμοκρασίας, ή μετρήσεις με στατικό σωλήνα έχουν το μειονέκτημα της συλλογής τιμών σε ένα σημείο ή θέση κάθε φορά. Κατά συνέπεια ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών ταχύτητας και αναταραχής ενός ολόκληρου τομέα ροής αποδεικνύεται μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία. Τεχνικές όπως η Ανεμομετρία Κατανομής Σωματιδίων (Particle Tracking Anemometry (PTA)) ή η Σωματιδιακή Οπτική Ταχομετρία (Particle Image Velocimetry (PIV)) ξεπερνούν αυτό το πρόβλημα. Η PTA χρησιμοποιεί μια επιφάνεια με ακτίνες λέιζερ, ένα "επίπεδο φωτός", μόνο μερικά χιλιοστά παχύ, εγκάρσια στο πεδίο ροής.



Σχ. 2.16 Οριακό στρώμα στην οροφή ενός επιβατικού αυτοκινήτου σύμφωνα με ένα Laser-Doppler-Anemometer (LDA).

Σωματίδια παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για το LDA ανακλούν τις ακτίνες λέιζερ κατά τη διάβαση από το «επίπεδο φωτός». Το ανακλώμενο φως καταγράφεται από μια ψηφιακή κάμερα CCD (ή σε μια φωτογραφία που ψηφιοποιείται αργότερα). Εάν το επίπεδο ακτίνων λέιζερ πάλλεται, δηλ., φωτίζεται μόνο για ένα κλάσμα του δευτερολέπτου, το καταγραμμένο φως, ανακλώμενο από τα σωματίδια, θα παρουσιαστεί σαν ίχνος στο ψηφιακό πλαίσιο (Σχ. 2.17). Αυτά τα ίχνη δείχνουν τη μετακίνηση των σωματιδίων κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που το επίπεδο των ακτίνων λέιζερ παλλόταν. Με αριθμητική αξιολόγηση του μήκους των ιχνών, μπορούν να καθοριστούν οι πραγματικές αποστάσεις που τα μόρια έχουν διανύσει κατά τη διάρκεια του χρόνου που το επίπεδο των ακτίνων λέιζερ παλλόταν. Γνωρίζοντας τις πραγματικές αποστάσεις και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το επίπεδο των ακτίνων λέιζερ ήταν φωτισμένο, μπορούν να υπολογιστούν οι πραγματικές ταχύτητες όλων των σωματιδίων κατά μήκος της επιφάνειας λέιζερ.



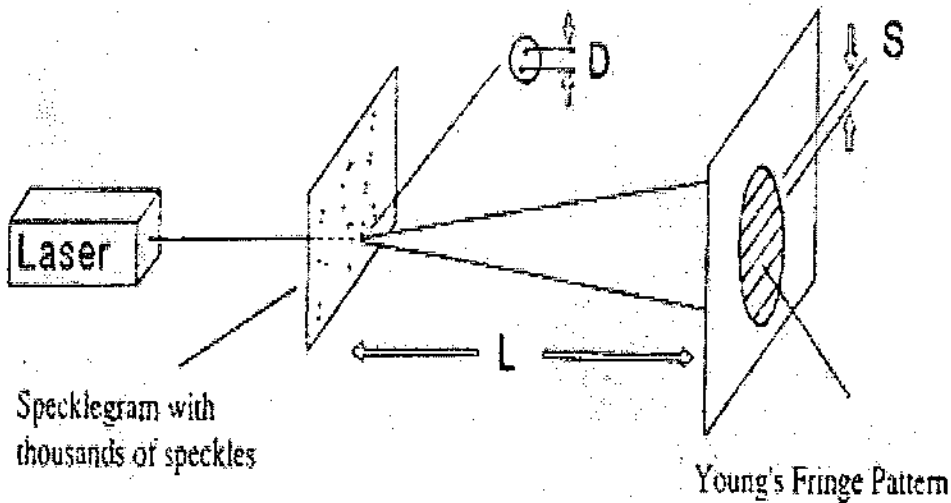
Σχ. 2.17 Διαφορετικοί τύποι ιχνών (σχηματική αναπαράσταση) που παράγονται από το ανακλώμενο φως από τα σωματίδια, δεδομένου ότι μπορούν να καταγραφούν σε μια φωτογραφία κατά τη χρησιμοποίηση (PTA) ή (PIV).

Η (PIV) γενικά χρησιμοποιεί τον ίδιο τρόπο λειτουργίας όπως η PTA. Η διαφορά είναι ότι το επίπεδο ακτίνων λέιζερ πάλλεται δύο φορές. Οι δύο παλμοί χωρίζονται από ένα γνωστό χρονικό διάστημα. Στη φωτογραφία, το φως που ανακλάται από τα σωματίδια εμφανίζει δύο σημεία ή στίγματα για κάθε σωματίδιο, αντιπροσωπεύοντας τις θέσεις που είχαν για την πρώτη και ακόλουθη δεύτερη έκθεση. Φωτίζοντας στη συνέχεια αυτήν την φωτογραφία ή το διάγραμμα με τις χιλιάδες ζεύγη στιγμάτων με φως λέιζερ, προβάλλεται μια εικόνα με παρεμβλλόμενα σχέδια, που αποκαλούνται "Young's Fringes" (σχ. 2.18). Το σχέδιο αξιολογείται έπειτα αριθμητικά εφαρμόζοντας τις μεθόδους γρήγορου μετασχηματισμού

Fourier (FFT) προκειμένου να καθορισθεί το μέγεθος των κροσσοπλεγμάτων και του προσανατολισμού τους. Η απόσταση  $D$  μεταξύ δύο σημείων στη φωτογραφία που αντιπροσωπεύει τη μετακίνηση του αντίστοιχου σωματιδίου κατά τη διάρκεια των δύο φωτεινών παλμών μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον τύπο:

$$D = \frac{\lambda \cdot L}{M \cdot S} \quad (2.6)$$

- Όπου  $D$  = η απόσταση μεταξύ δύο σχετικών στιγμάτων στο specklegram (m)  
 $\lambda$  = το μήκος κύματος του φωτός λέιζερ (m)  
 $L$  = η απόσταση μεταξύ του φωτισμένου specklegram και η επιφάνεια όπου παράγονται τα κροσσοπλέγματα του Young (m)  
 $M$  = ο συντελεστής κλίμακας για το specklegram  
 $S$  = το μέγεθος των κροσσοπλεγμάτων (m)



Σχ. 2.18 Αξιολόγηση ενός specklegram που επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση της τεχνικής PIV (σηματική αναπαράσταση)

Οι τεχνικές PTA και PIV προσφέρουν το πλεονέκτημα της καταγραφής ενός ολόκληρου διδιάστατου πεδίου ροής κατά μήκος μιας επιφάνειας -με λέιζερ- σε σύντομο χρονικό διάστημα με μια συγκριτικά εύκολη εγκατάσταση. Εντούτοις, ψηφιοποίηση των φωτογραφιών και ακολούθως η αριθμητική αξιολόγηση ενός καρρέ χρειάζεται αρκετά λεπτά επεξεργασίας ακόμα και σε έναν υπολογιστή υψηλής απόδοσης.

Μια περαιτέρω προσέγγιση για τον καθορισμό της ταχύτητας ροής είναι να χρησιμοποιηθεί η συχνότητα ιχνών δίνης που προκύπτει πίσω από μια ράβδο τοποθετημένη κάθετα στην διεύθυνση της ροής. Η συχνότητα ιχνών δίνης ανιχνεύεται με εξοπλισμό υπερήχων και η ταχύτητα συνάγεται από τη μετρημένη συχνότητα.

### 2.2.3.2 Προσδιορισμός της ταχύτητας δοκιμής σε μια αεροσήραγγα.

Ένας στατικός σωλήνας Pitot μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της ταχύτητας σε μια σήραγγα αέρα. Εντούτοις, εξαιτίας του γεγονότος ότι το αντικείμενο δοκιμής έχει επιπτώσεις στο πεδίο ροής προς τα ανάντη, η ταχύτητα αέρα που μετριέται στην έξοδο του ακροφυσίου δεν είναι απαραίτητως η ταχύτητα αέρα πολύ μακριά μπροστά από το όχημα – η οποία αντιστοιχεί στην ταχύτητα οδήγησης στον δρόμο. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα δοκιμής σε μια σήραγγα αέρα πρέπει να διαβαθμιστεί. Μια μάλλον *πραγματική* προσέγγιση για να γίνει αυτή η βαθμολόγηση συνίσταται αρχικά στην πραγματοποίηση οδικών δοκιμών με ένα ή περισσότερα οχήματα προκειμένου να μετρηθεί η κατανομή στατικής πίεσης σε διάφορες χαρακτηριστικές περιοχές των οχημάτων. Η ίδια διαδικασία δοκιμής πρέπει έπειτα να επαναληφθεί στη σήραγγα αέρα. Από τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, ο συντελεστής στατικής πίεσης για κάθε σημείο μέτρησης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2\infty} V_\infty^2} \quad (2.7)$$

Οι συντελεστές στατικής πίεσης που υπολογίζονται σε μια αεροσήραγγα σχεδιάζονται γραφικά συναρτήσει των ίδιων δεδομένων από την δοκιμή στον δρόμο. Η γραφική παράσταση πρέπει να είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση  $45^0$  και να περνάει από την αρχή των αξόνων. Αλλά συνήθως δεν συμβαίνει αυτό. Τρία είδη απόκλισης μπορούν να εμφανιστούν:

Τα σχεδιασμένα σημεία είναι διεσπαρμένα γύρω από μια ευθεία γραμμή. Αυτό δείχνει μια ατελή προσομοίωση ροής σε μια σήραγγα αέρα. Μια πρώτου βαθμού πολυωνυμική προσέγγιση πρέπει να εφαρμοστεί στην καμπύλη.

Η κλίση της καμπύλης δεν είναι  $45^0$ . Αυτό προκαλείται από την απόκλιση μεταξύ της ταχύτητας που μετριέται σε μια σήραγγα αέρα με έναν στατικό σωλήνα Pitot και της αντίστοιχης ταχύτητας στο δρόμο. Μπορεί να καθοριστεί ένας συντελεστής διόρθωσης για την ταχύτητα αέρα  $V_\infty$  που μετρήθηκε στη αεροσήραγγα από την κλίση της ευθείας γραμμής

στην γραφική παράσταση και από τον ορισμό του συντελεστή στατικής πίεσης της εξίσωσης (2.7).

Η ευθεία γραμμή δεν περνά από την αρχή των αξόνων. Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό και τη διόρθωση της απόκλισης της στατικής πίεσης αναφοράς  $p_\infty$  στη σήραγγα αέρα από την ατμοσφαιρική πίεση στην οδική δοκιμή.

Η βαθμολόγηση της ταχύτητας δοκιμής μέσω της μεθόδου που περιγράφεται ανωτέρω προσφέρει τη δυνατότητα να λαμβάνονται απόλυτα υπόψη οι διορθώσεις που περιγράφονται λεπτομερέστερα στην παράγραφο 1.3.3. Εντούτοις, αυτή η μέθοδος είναι αδούλευτη και εφαρμόζεται μόνο για τις "σήραγγες αέρα" με πολύ μικρή διατομή, δηλ., κλιματιζόμενα δωμάτια με αέρα ή δυναμόμετρα με ανεμιστήρα.

Η "κλασσική" μέθοδος για τον καθορισμό της ταχύτητας δοκιμής αεροσηράγγων βασίζεται στον υπολογισμό της πτώσης της στατικής πίεσης  $\Delta p$  μεταξύ του ακροφυσίου εισαγωγής και του ακροφυσίου εξαγωγής. Καταρχήν, για να μετρηθεί η μέση στατική πίεση στο ακροφύσιο εισαγωγής ή εξαγωγής, διάφορα σημεία μέτρησης στο τοίχωμα του ακροφυσίου συνδέονται σε δακτυλιοειδή κυκλώματα. Η στατική πίεση στο ακροφύσιο εξαγωγής μπορεί να αλλάξει με σταθερή ταχύτητα δοκιμής όταν βρίσκεται ένα μεγάλο όχημα στο τμήμα δοκιμής. Επομένως, είναι απαραίτητο να καθοριστεί, με τη μέτρηση της καμπύλης στατικής πίεσης κατά μήκος του τοιχώματος του ακροφυσίου, η περιοχή στο ακροφύσιο εξαγωγής που είναι η λιγότερο ευαίσθητη στην "παραμένουσα στασιμότητα" των αντικειμένων στην περιοχή δοκιμής.

Η δυναμική πίεση  $\Delta p_{dyn}$  που παράγεται από την ταχύτητα αέρα  $V_\infty$  στη σήραγγα αέρα μπορεί να μελετηθεί για να είναι ανάλογη της  $\Delta p$  σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση :

$$\Delta p_{dyn} = \frac{\rho}{2} V_\infty^2 = k \Delta p \quad (2.8)$$

Η ταχύτητα δοκιμής σηράγγων αέρα μπορεί να υπολογιστεί όταν μετριέται η  $\Delta p$ . Η σταθερά  $k$  πρέπει να καθοριστεί από βαθμονόμηση στο κενό τμήμα δοκιμής. Αυτή η βαθμονόμηση πρέπει να επεκταθεί σε όλο το φάσμα ταχυτήτων σηράγγων αέρα προκειμένου να ελεγχθεί οποιαδήποτε εξάρτηση από τον αριθμό Reynolds. Συνίσταται η βαθμονόμηση ταχύτητας σηράγγων αέρα να ελέγχεται πρόσθετα συγκρίνοντας την κατανομή στατικής πίεσης σε ένα σώμα οχήματος που μετρήθηκε στο δρόμο και στη σήραγγα αέρα, όπως περιγράφεται ανωτέρω. Η χρήση ενός λέιζερ-Doppler ανεμομέτρου, που επιτρέπει μια πολύ ακριβή

μέτρηση της ταχύτητας ροής, μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια βαθμονόμησης της ταχύτητας λειτουργίας σπράγγων αέρα.

### **2.2.3.3 Μέτρηση της κατεύθυνσης ροής**

Μια σωστή μέτρηση ταχύτητας σε ένα ελεύθερο ρεύμα αέρα απαιτεί ότι η κατεύθυνση ροής στο σημείο μέτρησης είναι γνωστή. Ο απλούστερος τρόπος να τοποθετηθεί σωστά ένας αισθητήρας ταχύτητας στο ρεύμα αέρα είναι να καθοριστεί η κατεύθυνση ροής στην περιοχή για την οποία ενδιαφερόμαστε με τη βοήθεια μιας τούφας μαλλιού που συνδέεται με το τέλος ενός λεπτού ραβδιού.

Εάν μια μέτρηση της κατεύθυνσης ροής γίνεται για να παράσχεθούν αναλυτικές πληροφορίες για ένα διάνυσμα ταχύτητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές συσκευές για αυτόν το λόγο (μετρητές παρεκκλίσεων). Αυτές οι συσκευές διαιρούνται σε δύο κύριες ομάδες: Η πρώτη ομάδα λειτουργεί βάσει της μέτρησης της διαφοράς πίεσης στα συμμετρικά τοποθετημένα σημεία μέτρησης ενός αισθητήρα. Ο δεύτερος τύπος αισθητήρα είναι το ανεμόμετρο θερμαινόμενων καλωδίων με πολυαισθητήρες.

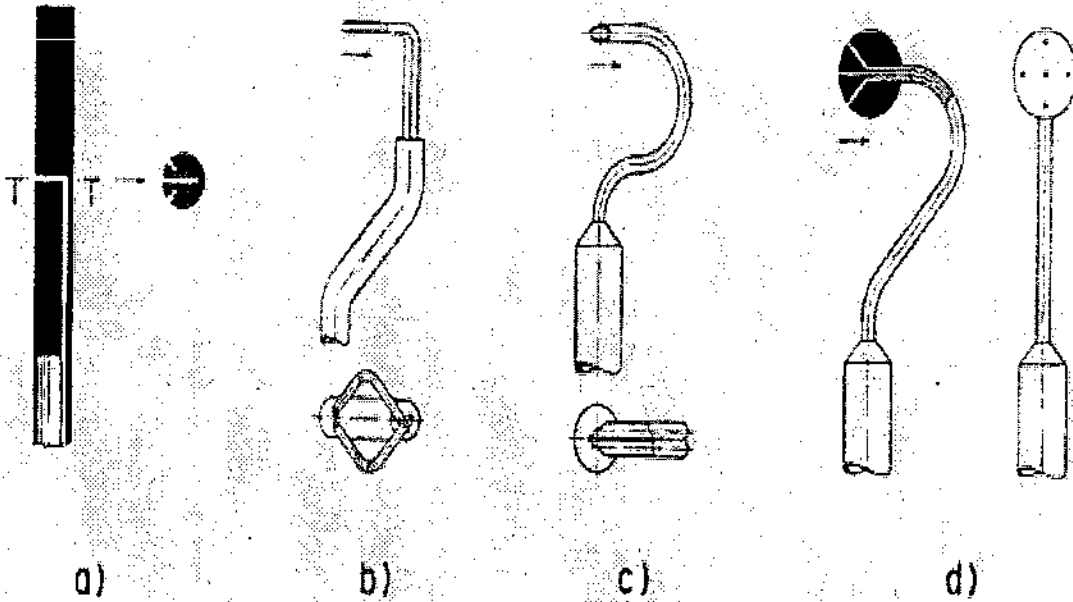
Στη μέθοδο μέτρησης διαφοράς πίεσης, οι πιέσεις μετριοούνται ανά ζεύγη στομίων που είναι τοποθετημένα αξονικά και συμμετρικά σε έναν αισθητήρα. Η διαφορά πίεσής τους είναι μηδέν όταν η κατεύθυνση ροής συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας και των δύο σημείων μέτρησης. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εφαρμόζονται για να καθορίσουν τη γωνία παρεκκλίσεων:

1. Ο αισθητήρας περιστρέφεται γύρω από έναν ή δύο άξονες εφ' όσον η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο στομίων είναι ίση με μηδέν. Η γωνία (εξ) μετρούνται με μια κλίμακα. Αυτή η μέθοδος μηδενισμού είναι πολύ ακριβής αλλά αργή, δεδομένου ότι η ρύθμιση γενικά γίνεται με το χέρι.

2. Η γωνία παρέκκλισης καθορίζεται με τη βοήθεια μιας προκαθορισμένης καμπύλης βαθμονόμησης που παρουσιάζει διαφορά πίεσης συναρτήσει της γωνίας παρέκκλισης.

Δύο στόμια είναι αρκούν για δισδιάστατη ροή. Όταν πρέπει να καθοριστεί η κατεύθυνση ροής σε μια τρισδιάστατη ροή, απαιτούνται τέσσερα στόμια. Πρέπει να τακτοποιηθούν ανά ζεύγη σε δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα. Το σχήμα 2.19 παρέχει μια επισκόπηση των

τωρινών εκδόσεων. Ο αισθητήρας 14 οπών που φαίνεται στο σχήμα 2.7(δ), αντιπροσωπεύει μια περαιτέρω ανάπτυξη.



Σχ. 2.19 Αισθητήρες για τη μέτρηση της διεύθυνσης της ροής αέρα: (a) κυλινδρικός αισθητήρας με τρεις οπές, (b) σωλήνας Pitot αγκιστροειδούς μορφής, (c) διπλός σωλήνας Pitot, (d) σφαιρικός αισθητήρας με 5 οπές.

## 2.2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας στην αεροδυναμική οχημάτων πρέπει να επιτύχουν δύο στόχους:

Τον καθορισμό της απόδοσης των συστημάτων των οχημάτων όπως η ψύξη μηχανών, η θέρμανση και ψύξη του χώρου των επιβατών, καθώς επίσης και το ξεθάμπωμα και ξεπάγωμα του παραθύρου.

Την διερεύνηση του επιπέδου θερμοκρασίας τμημάτων οχημάτων όπως τα φρένα, πλαστικά μέρη που μπορούν να καταστραφούν εάν εκτίθενται στις υψηλές θερμοκρασίες, κ.λπ.

Δύο τύποι ερευνών μπορούν να απαιτηθούν:

Μέτρηση των θερμοκρασιών σε μεμονωμένες θέσεις.

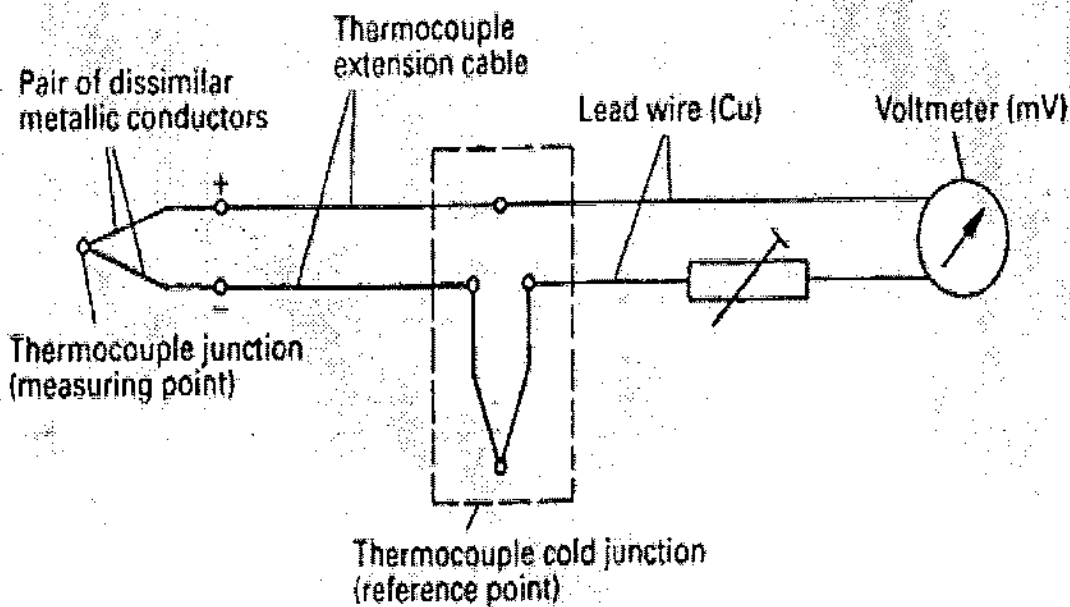
Μέτρηση των διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ δύο θέσεων.



Ο πρώτος τύπος καλύπτει συνήθως τις περισσότερες απαιτήσεις δοκιμής. Εάν, εντούτοις, πρέπει να καθιερωθεί μια ισορροπία θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής απόδοσης, είναι απαραίτητο να μετρηθούν οι διαφορές θερμοκρασίας του αέρα ή του ψυκτικού μέσου με μεγάλη ακρίβεια.

### 2.2.4.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη είναι οι πιο κοινοί αισθητήρες θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή οχημάτων σε μια σήραγγα αέρα. Το σχήμα 2.20 παρουσιάζει μία σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρικού κυκλώματος ενός τυπικού αισθητήρα θερμοηλεκτρικών ζευγών.



Σχήμα 2.20 Αισθητήρας θερμοκρασίας που χρησιμοποιεί ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος

Το θερμοηλεκτρικό ζεύγος αποτελείται από ένα ζευγάρι ηλεκτρικά αγωγίμων καλωδίων φτιαγμένο από ανόμοιους μεταλλικούς αγωγούς, που συγκολλάται με κασσιτεροκόλληση ή εν θερμώ στις δύο άκρες. Όταν οι δύο συνδέσεις εκτίθενται στις διαφορετικές θερμοκρασίες, ένα ηλεκτρικό δυναμικό (ηλεκτρεγερτική δύναμη, ΗΕΔ) δημιουργείται μεταξύ τους το οποίο είναι περίπου ανάλογο με τη διαφορά θερμοκρασίας. Ένα βολτόμετρο στο κύκλωμα μπορεί έτσι να μετρήσει τη διαφορά θερμοκρασίας. Εάν μια από τις συνδέσεις διατηρείται

προσεκτικά σε μια τυποποιημένη θερμοκρασία αναφοράς, δηλ., 0°C, η δεύτερη σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τη θερμοκρασία σε οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο. Η σύνδεση αναφοράς μπορεί επίσης να μιμηθεί ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αντιστάθμισης.

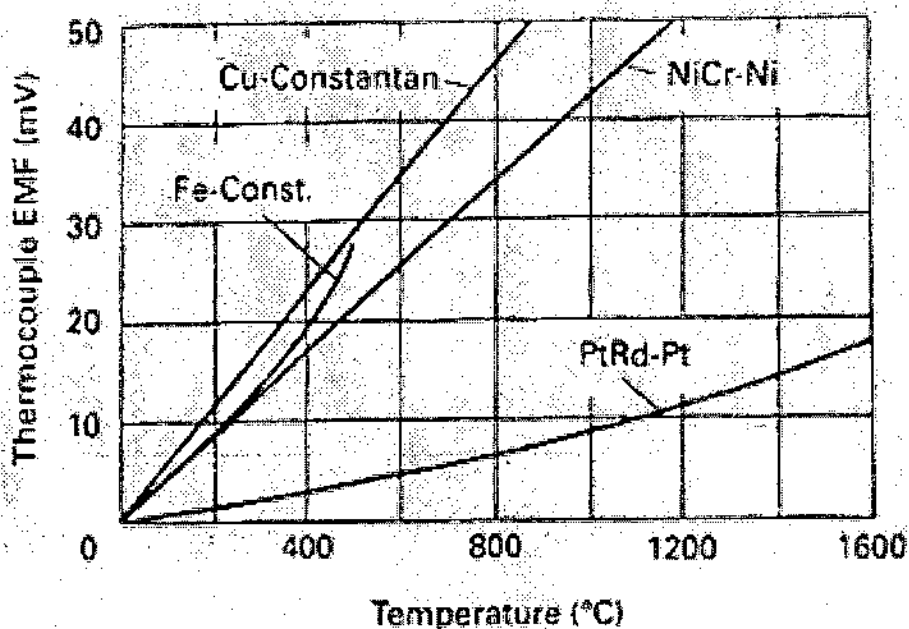
Τα πιο χρησιμοποιούμενα θερμοηλεκτρικά ζεύγη και οι κώδικες προσδιορισμού ISA (Instrument Society of America) είναι:

Θερμοηλεκτρικά ζεύγη βάσης μετάλλων:	<u>ISA code</u>
Κράμα Χαλκού	T
Κράμα Σιδήρου	J
Κράμα Χρωμίου-Αλουμινίου (ισοσθενές με κράμα Νικελιοχρωμίου-Νικελίου)	K
Θερμοηλεκτρικό ζεύγος ευγενών μετάλλων : Λευκόχρυσος -10% ρόδιου λευκόχρυσου	S

Για μια θερμοκρασία αναφοράς 0°C, οι τιμές ΗΕΔ που αναμένονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες είναι τυποποιημένες. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει μερικές από αυτές που καθορίζονται από τρία διαφορετικά εθνικά πρότυπα.

Το σχήμα 2.21 συγκρίνει τα χαρακτηριστικά των διάφορων τύπων θερμοηλεκτρικών ζευγών. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη κραμάτων Χαλκού και Σιδήρου προτιμούνται για τις περιοχές θερμοκρασίας από -200°C ως +500°C και 700°C, αντίστοιχα. Και τα δύο αυτά τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη παράγουν υψηλές ΗΕΔ, αλλά τείνουν να οξειδωθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Το θερμοηλεκτρικό ζεύγος κράματος Χρωμίου-Αλουμινίου (αντιστοιχεί στο κράμα Νικελιοχρωμίου-Νικελίου) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες πάνω από 1000°C. Είναι ανθεκτικά στην οξείδωση, έχει μια σχεδόν γραμμική χαρακτηριστική, και παράγουν υψηλές ΗΕΔ. Επομένως, είναι ιδιαίτερα καλά για εφαρμογή σε σήραγγες αέρα.

Temperature (°C)	EMF (mV)											
	Copper-Constantan			Iron-Constantan			Chromel-Alumel			Platin-10% Rh-Platin		
	DIN 43710	ASTM E 230-72	BS 4937	DIN 43710	ASTM E 230-72	BS 4937	DIN 43710	ASTM E 230-72	BS 4937	DIN 43710	ASTM E 230-72	BS 4937
-100	-3.40	-3.378		-4.75	-4.632							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	4.25	4.277	4.227	5.37	5.268	5.268	4.095	4.095	4.095	0.645	0.645	0.645
500	27.41			27.85	27.388	27.388	20.640	20.640	20.640	4.234	4.234	4.234
1000							41.269	41.269	41.269	9.585	9.585	9.585
1500										15.576	15.576	15.576

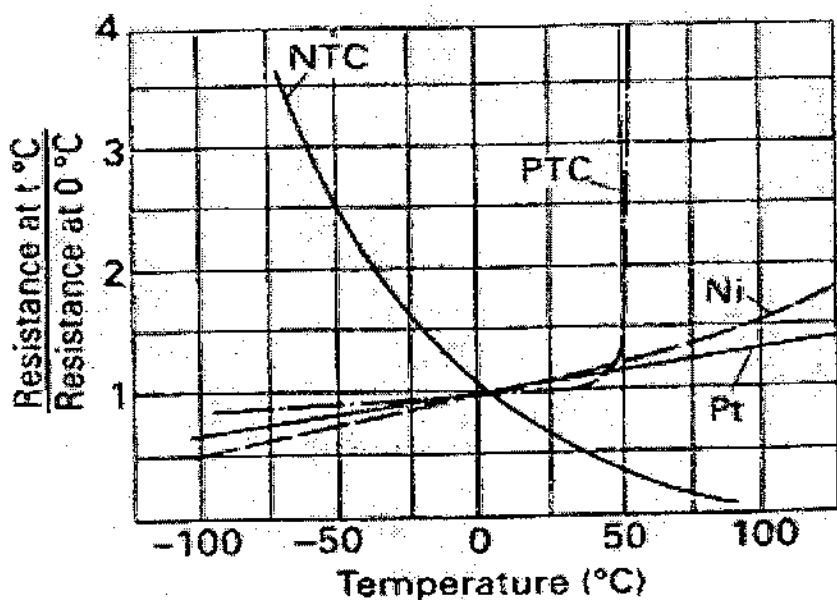


Σχ. 2.21 Χαρακτηριστικές διαφορετικών θερμοηλεκτρικών ζευγών (κρύα σύνδεση που διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία 0°C).

Οι θερμοκοί αισθητήρες αντίστασης χρησιμοποιούνται γενικά στις δοκιμές αεροσηράγγων όταν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτήν που μπορεί να επιτευχθεί με ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος. Η αρχή μέτρησης είναι βασισμένη στην αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων και των ημιαγωγών με τη θερμοκρασία. Η μέτρηση της αλλαγής αντίστασης επομένως θα αντιπροσωπεύει τα επιθυμητά δεδομένα θερμοκρασίας.

Υπάρχει μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της αλλαγής αντίστασης των μετάλλων και της αλλαγής θερμοκρασίας (Σχήμα 2.22). Οι ημιαγωγοί, εντούτοις, επιδεικνύουν συνήθως μια μη γραμμική σχέση · με αυξανόμενη θερμοκρασία, η αντίστασή τους μπορεί να γίνει μεγαλύτερη ή μικρότερη. Για αυτόν τον λόγο, αποκαλούνται NTC - αισθητήρες (αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας) ή θερμικές αντιστάσεις (θερμικά ευαίσθητος αντιστάτης) αν η αντίσταση μειώνεται με την θερμοκρασία, και PTC - αισθητήρες (θετικός συντελεστής θερμοκρασίας) αν η αντίσταση αυξάνεται με την θερμοκρασία.

Το σχήμα 2.22 παρουσιάζει την αλλαγή στην αντίσταση με τη θερμοκρασία για τα δύο πιο χρησιμοποιημένα μέταλλα, τον λευκόχρυσο και το νικέλιο. Πολύ ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας στην περιοχή από  $-200^{\circ}\text{C}$  ως  $+750^{\circ}\text{C}$  γίνονται με τα θερμόμετρα αντίστασης από καθαρό λευκόχρυσο. Στην πράξη, η ονομαστική αντίσταση των αισθητήρων λευκόχρυσου καθορίζεται συνήθως στους  $0^{\circ}\text{C}$ , και αυτή η αντίσταση χρησιμοποιείται συχνά για να τυποποιήσει τον αισθητήρα, π.χ., Pt 100 ή Pt 500 για αισθητήρες με ονομαστική αντίσταση  $100\ \Omega$  ή  $500\ \Omega$  στους  $0^{\circ}\text{C}$ .



Σχ. 2.22 Αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης διάφορων υλικών κατάλληλων για χρήση ως αισθητήρες θερμικής αντίστασης.

Όπως με τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη, τα θερμόμετρα αντίστασης λευκόχρυσου και νικελίου είναι επίσης τυποποιημένα και τα χαρακτηριστικά τους στοιχεία καθιερώνονται στα εθνικά και διεθνή πρότυπα. Τα πρότυπα παρέχουν επίσης στοιχεία σχετικά με τα όρια ανοχής των αισθητήρων. Ο πίνακας 2.2 δίνει ένα απόσπασμα για τα τυποποιημένα χαρακτηριστικά των

αισθητήρων λευκόχρυσου και νικελίου σε διάφορες θερμοκρασίες και συντάσσει τις αναλογίες αντίστασης αισθητήρων στους 100°C στην αντίσταση στους 0°C ( $R_{100}/R_0$ ).

**Πίνακας 2.2 Απόσπασμα των χαρακτηριστικών στοιχείων για τους αισθητήρες θερμοκρασίας αντίστασης που καθορίζονται στα γερμανικά και διεθνή πρότυπα**

Temperature (°C)	Platinum		Nickel
	DIN43760 (Ω)	ISO (Ω)	DIN43760 (Ω)
-100	60.20	59.65	
0	100.00	100.00	100
100	138.50	139.10	142.6
500	280.93	283.80	
1000		438.2	
$R_{100}/R_0$	1.385	1.391	1.617

Η αλλαγή αντίστασης (ως εκ τούτου και της θερμοκρασίας) μετρίεται με τη σύνδεση του αισθητήρα με μια γέφυρα Wheatstone. Το λάθος που προκαλείται από την αυτοθέρμανση του αισθητήρα γενικά είναι αμελητέα μικρό. Η αυτοθέρμανση αποδίδεται στην τρέχουσα ροή εντός του αισθητήρα, που είναι περ. 10 mA.

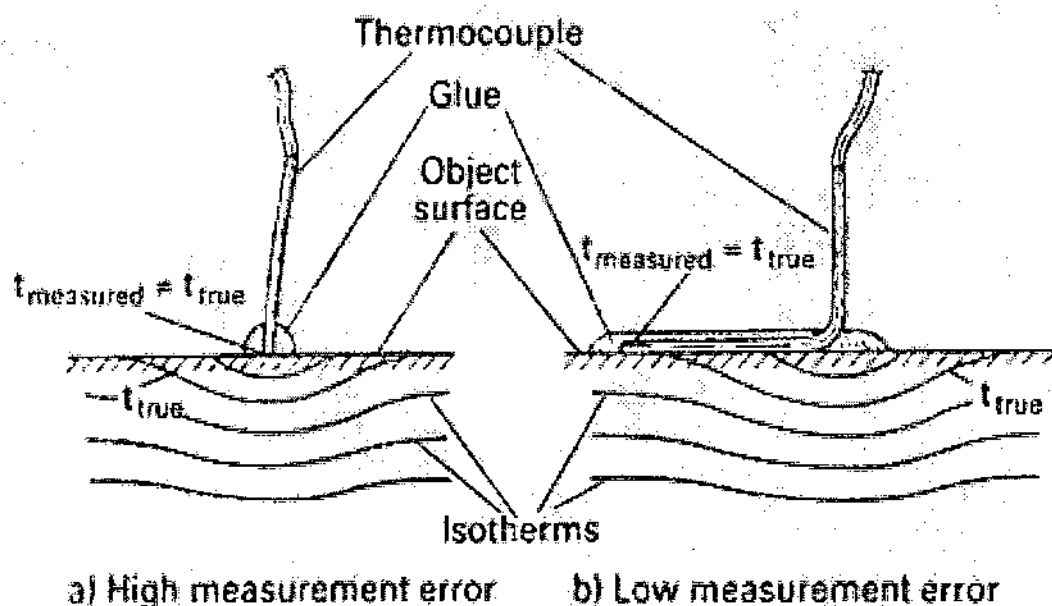
#### 2.2.4.2 Χαρακτηριστικά σφάλματα μέτρησης θερμοκρασίας

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας μπορεί να φαίνονται ότι είναι πολύ απλές. Εντούτοις, εξαιτίας κακού χειρισμού και απροσεξίας, μπορεί να εμφανιστεί σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η θερμότητα γενικά μεταφέρεται μεταξύ του αισθητήρα και του αντικειμένου δοκιμής και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες αναγνώσεις θερμοκρασίας.

Η μεταφορά θερμότητας με μετάδοση εμφανίζεται όταν πρέπει να μετρηθεί η θερμοκρασία στην επιφάνεια ή μέσα σε ένα στερεό σώμα. Σε ένα υγρό ή ένα αέριο, η θερμότητα μεταξύ του μέσου και του αισθητήρα μεταφέρεται με μετάδοση. Εάν ένα υψηλής θερμοκρασίας

συστατικό βρίσκεται αρκετά κοντά στον αισθητήρα, θα εμφανιστεί λάθος μέτρηση λόγω της ακτινοβολίας του θερμού αντικειμένου.

Το σφάλμα λόγω της μετάδοσης ή της μεταφοράς θερμότητας θα είναι μεγάλο εάν υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα και του καλωδίου σύνδεσης. Για παράδειγμα, το σχήμα 2.23(a) παρουσιάζει την μέτρηση θερμοκρασίας επιφάνειας σε ένα στερεό αντικείμενο: Η μετάδοση θερμότητας μέσω του αισθητήρα οδηγεί σε μια αλλαγή των ισόθερων μέσα στο αντικείμενο δοκιμής. Συνεπώς, η θερμοκρασία που ελέγχεται από ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος διαφέρει από την πραγματική θερμοκρασία επιφάνειας.



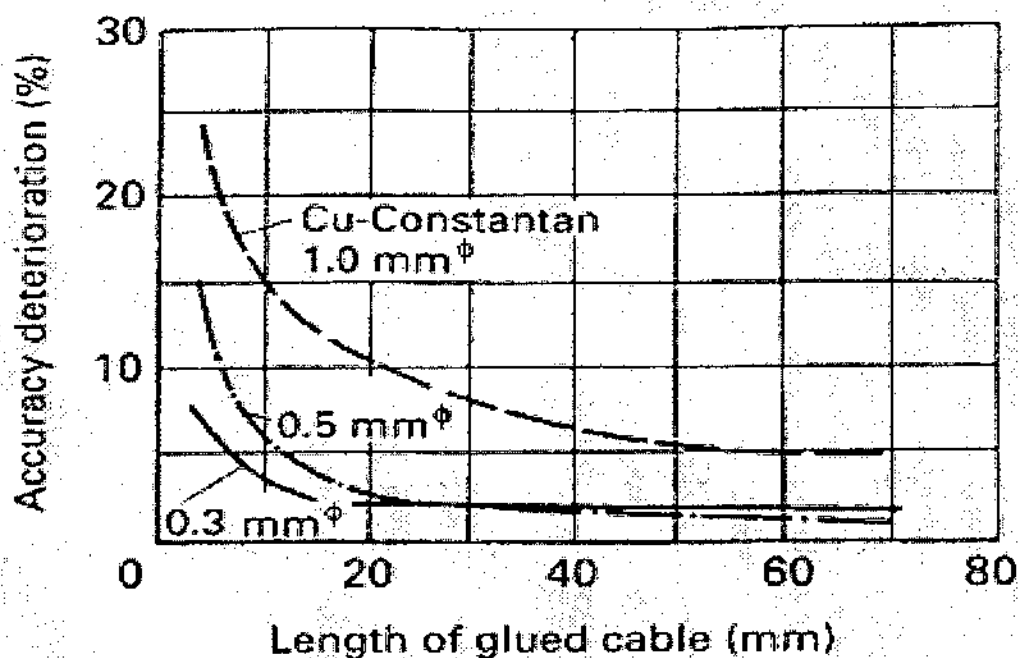
Σχ. 2.23 Σφάλμα λόγω της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του αντικειμένου δοκιμής και του θερμοηλεκτρικού ζεύγους κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης θερμοκρασίας επιφάνειας

Το σφάλμα αυξάνεται με χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του αντικειμένου μέτρησης, υψηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και θερμότητας εκ μεταφοράς (σχετικό με τον αέρα) του αισθητήρα, και κακή επαφή μεταξύ του αισθητήρα και του αντικειμένου δοκιμής. Στη μέτρηση θερμοκρασίας επιφάνειας πλαστικών ή λαστιχένιων συστατικών, κάθε ένας ή όλοι αυτοί οι δυσμενείς όροι πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στο σχήμα 2.23(b) φαίνεται πώς αυτό το λάθος μπορεί να αποτραπεί: Εάν ένα ορισμένο μήκος της κεφαλής του αισθητήρα (ή του καλωδίου) είναι κολλημένο στην επιφάνεια, η σύνδεση θερμοηλεκτρικών στοιχείων που μετρούν τη θερμοκρασία εκτίθενται στην πραγματική θερμοκρασία επιφάνειας. Όσο πιο μακρύ είναι το κολλημένο κομμάτι, τόσο μικρότερο είναι

το σφάλμα. Το σχήμα 2.24 παρουσιάζει, για παράδειγμα, την γραφική παράσταση του σφάλματος συναρτήσεως του μήκους του κολλημένου κομματιού του θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Επίσης παρουσιάζεται πώς η ακρίβεια του αποτελέσματος της δοκιμής μειώνεται αυξανόμενης της διαμέτρου των θερμοηλεκτρικών ζευγών, δεδομένου ότι η μετάδοση θερμότητας του αισθητήρα αυξάνεται με αυξανόμενη διάμετρο.

Εντούτοις, οι θερμικές ιδιότητες του αντικειμένου δοκιμής δεν πρέπει να αλλάξουν εξαιτίας των μεθόδων δοκιμής που παρουσιάζονται για την βελτίωση της ακρίβειας μέτρησης. Εάν, παραδείγματος χάριν, το καλώδιο θερμοηλεκτρικών ζευγών είναι κολλημένο επάνω σε μια επιφάνεια, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του καλωδίου και της κόλλησης πρέπει να έχει την μικρότερη δυνατή απόκλιση από αυτόν του αντικειμένου δοκιμής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό εάν το αντικείμενο που μετριέται είναι μικρό. Όταν πρόκειται να μετρηθούν οι θερμοκρασίες ενός στερεού αντικειμένου, πρέπει να χρησιμοποιηθούν παρόμοια μέσα με εκείνα που περιγράφονται για τις μετρήσεις θερμοκρασίας επιφάνειας για να ελαχιστοποιηθεί οποιαδήποτε αλλαγή των αρχικών ισόθερμων του αντικειμένου δοκιμής. Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας αέρα (π.χ., στους αγωγούς, κ.λπ.) ή της θερμοκρασίας ρευστού (π.χ., ψυκτικό μέσο στους εύκαμπτους σωλήνες, το λάδι μηχανών, κ.λπ.) πρέπει να δοθεί προσοχή στο ότι οι αισθητήρες θερμοκρασίας δεν αγγίζουν τα περιβάλλοντα τοιχώματα.

Εμφανίζονται συχνά μεγάλα σφάλματα με τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία λόγω της χρήσης λανθασμένων θερμοηλεκτρικών ζευγών και καλωδίων επέκτασης ή λόγω λανθασμένης πολικότητας. Οι υλικές ιδιότητες ενός θερμοστοιχείου μπορούν να αλλάξουν λόγω οξείδωσης ή άλλων χημικών επιρροών. Είναι επίσης δυνατή μια πρόσθετη αλλαγή της βαθμονόμησης ενός θερμοστοιχείου λόγω της γήρανσης· εμφανίζονται λίγοι βαθμοί Kelvin τον χρόνο. Τα πιο κοινά σφάλματα στους αισθητήρες θερμικής αντίστασης προκαλούνται από την ελαττωματική μόνωσή τους.



Σχ. 2.24 Μεταβολή της ακρίβειας μέτρησης θερμοκρασίας συναρτήσει του μήκους του καλωδίου που είναι κολλημένο στην επιφάνεια και της διαμέτρου του καλωδίου

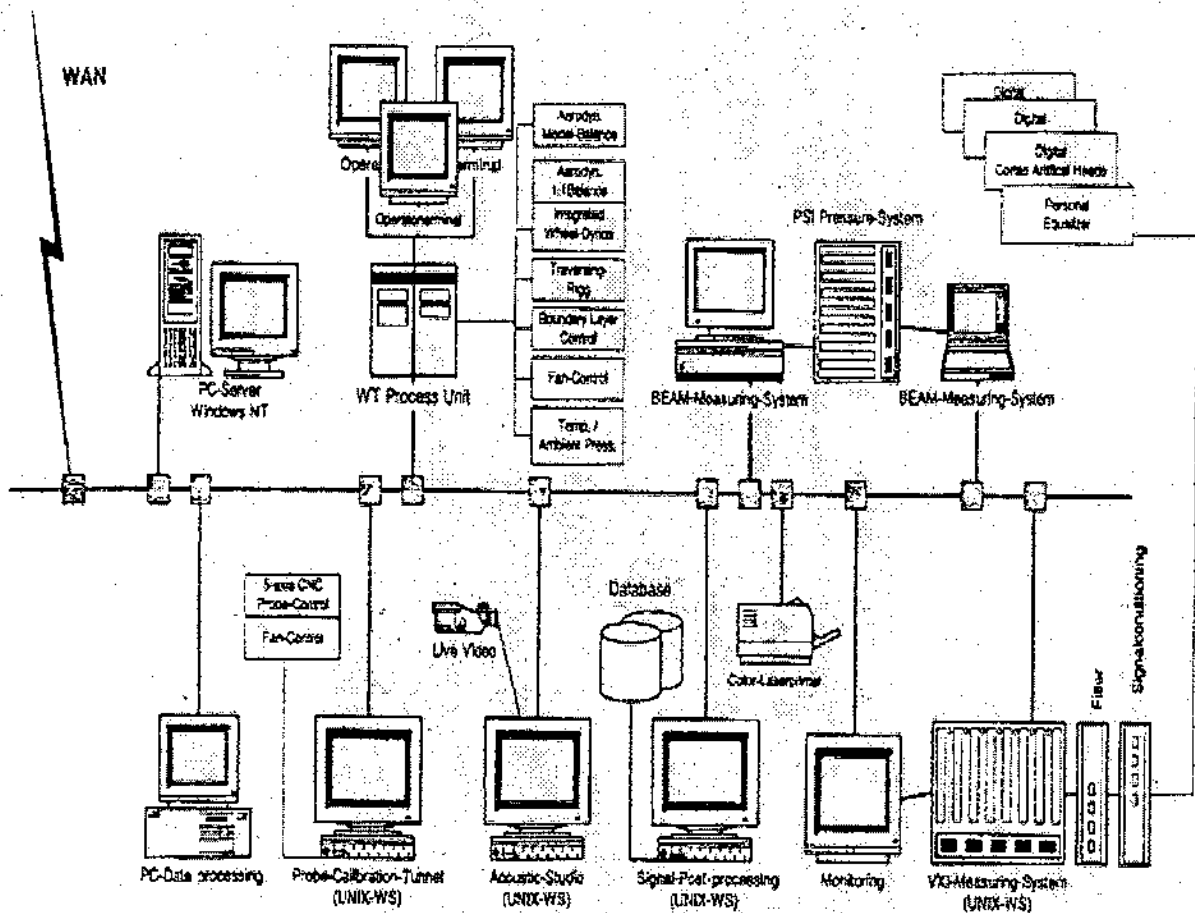
### 2.2.5 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων δοκιμής

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών παρέχουν πολλές διευκολύνσεις στην αξιολόγηση των στοιχείων που αποθηκεύονται σε μαγνητικές ταινίες ή μετριοούνται on-line σε μια σήραγγα αέρα ή κατά τη διάρκεια μιας οδικής δοκιμής. Τα στοιχεία, διαθέσιμα ως αναλογικά σήματα, μπορούν να ψηφιοποιηθούν με τη βοήθεια αναλογικών /ψηφιακών (A/D) μετατροπέων και να διαβαστούν από τους υπολογιστές καταγραφής. Τα απαιτούμενα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν είτε να καταγραφούν ως άμεσες πληροφορίες είτε, στην περίπτωση εκτενούς συλλογής δεδομένων για σύνθετα φαινόμενα, παρουσιάζονται έπειτα από μετα-επεξεργασία σε έναν υπολογιστή. Επιπλέον, οι υπολογιστές για την επεξεργασία δεδομένων και οι υπολογιστές που ελέγχουν μια σήραγγα αέρα και τις περιφερειακές μονάδες, μπορούν να συνδεθούν με έναν κεντρικό υπολογιστή, ο οποίος μπορεί να αναλάβει την περαιτέρω επεξεργασία δεδομένων καθώς επίσης και να αποθηκεύσει τα διαθέσιμα αποτελέσματα μέσα μια βάση δεδομένων. Μια περιγραφή ενός τέτοιου σύγχρονου συστήματος διαχείρισης δεδομένων παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 2.25.

Η γραφική απεικόνιση των μετρημένων στοιχείων με τη βοήθεια αφιερωμένου λογισμικού παρέχει στο αεροδυναμισμό χρήσιμες πληροφορίες για το καθεστώς ροής γύρω από το όχημα: Με τη μέτρηση της κατανομής ταχύτητας ή πίεσης στις περιοχές αποκόλλησης ή στο ίχνος



του αυλακιού, οι σταθερές γραφικές παραστάσεις ταχύτητας ή πίεσης μπορούν να σχεδιαστούν από τον υπολογιστή που περιέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα διερευνούμενα φαινόμενα ροής (σχ. [2.10, 2.12, 2.23]). Οι μετρήσεις μετωπικής περιοχής με τεχνολογία λέιζερ προϋποθέτουν επίσης τη χρήση συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Για να καταγραφούν τα στοιχεία δοκιμής πλησίον του οχήματος, οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετηθούν στις επιθυμητές θέσεις. Ρομπότ και εξοπλισμός ελεγχόμενος από υπολογιστή αναπτύχθηκαν γι' αυτό το λόγο ούτως ώστε τα σημεία μέτρησης μπορούν να προσεγγιστούν γρήγορα και εύκολα (σχ. [2.9, 2.10, 2.16 και 2.26]).



Σχ. 2.25 Σύστημα δεδομένων μιας σήραγγας αέρα, ικανό να συλλέγει και να επεξεργάζεται αεροδυναμικά και αερο-ακουστικά δεδομένα δοκιμής

## **2.3 Μέθοδοι εξέτασης σηράγγων αέρα**

### **2.3.1 Μέτρηση των αεροδυναμικών συντελεστών**

Οι αεροδυναμικές δυνάμεις και ροπές σε μια σήραγγα αέρα μετριοούνται χρησιμοποιώντας μια ισορροπία σήραγγας αέρα όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.1.1. Στην αρχή της δοκιμής, το όχημα τοποθετείται στην ισορροπία και σταθεροποιείται κατά προτίμηση φράζοντας τους τροχούς. Για την επίτευξη πιο αξιόπιστων αεροδυναμικών δεδομένων, πρέπει να τηρηθούν μερικές απλές λεπτομέρειες κατά την δοκιμή για να εξασφαλιστούν σωστά αποτελέσματα.

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι η σωστή φόρτωση του οχήματος. Όχι μόνο πρέπει να ελεγχθεί το συνολικό βάρος, αλλά και η κατανομή βάρους μεταξύ των μπροστινών και οπίσθιων αξόνων. Εάν αυτή η κατανομή διαφέρει από τις τυποποιημένες συνθήκες δοκιμής, το ύψος οδήγησης και η γωνία προσβολής του σώματος του οχήματος θα είναι ανακριβή.

Λόγω της αεροδυναμικής άνωσης και ροπής εξαιτίας της κίνησης στον εγκάρσιο άξονα, τα ύψη οδήγησης στους μπροστινούς και οπίσθιους άξονες αλλάζουν και, στο δρόμο, αυτές οι αλλαγές έχουν ως αποτέλεσμα την μεταβολή του πλάτους του πέλματος του ελαστικού. Αφού οι τροχοί (συνήθως) δεν περιστρέφονται σε μια σήραγγα αέρα, δεν θα μεταβληθούν το πλάτος των ελαστικών και το ύψος οδήγησης. Η απλούστερη μέθοδος για να επιτευχθεί το σωστό ύψος οδήγησης είναι να υπάρχει ένας “οδηγός” που να κινεί το τιμόνι πριν από κάθε ανάγνωση δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζονται κατάλληλα τα ύψη οδήγησης στο πρόσθιο μέρος του οχήματος. Η αντίστοιχη διόρθωση για το οπίσθιο τμήμα δεν είναι τόσο απλή. Εντούτοις, αφού γενικά το λάθος είναι μικρό σε σχέση με το πρόσθιο μέρος του οχήματος, μπορεί να αγνοηθεί.

Το όχημα εκτίθεται σε δονήσεις λόγω της αστάθειας εξαιτίας της αποκόλλησης ροής και διασκορπισμού λόγω δίνης, και συνεπώς τα σήματα δοκιμής δεν είναι σταθερά. Επομένως, πρέπει να γίνουν αρκετές μετρήσεις για να επιτευχθεί μια αντιπροσωπευτική μέση τιμή. Το ελάχιστο χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μέτρηση πρέπει να καθοριστεί πειραματικά. Εξαρτάται επίσης από το σύστημα εύρεσης της φοράς δυνάμεων της ισορροπίας. Εάν το σύστημα μέτρησης περιέχει ζυγούς (παλαιό σχέδιο) αντί των ηλεκτρικά φορτισμένων στοιχείων, ο χρόνος ανάγνωσης θα είναι μεγαλύτερος εξαιτίας της μεγαλύτερης αδράνειας αυτών των συσκευών.

### **2.3.2 Χειρισμός δοκιμών ροών αέρος**

Τα χαρακτηριστικά ροών αέρος μέσω του σώματος του οχήματος πρέπει να βελτιστοποιηθούν για να βελτιώσουν τη θερμική αποδοτικότητα διάφορων συστημάτων. Γι' αυτό το λόγο, τα χαρακτηριστικά ροής σε τέτοιες περιοχές πρέπει να διερευνηθούν.

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση απόρριψης θερμότητας της μηχανής μέσω του ψυγείου του οχήματος, η ταχύτητα ροής αέρος που περνά δια μέσω του κυλίνδρου του ψυγείου πρέπει να φθάσει όσο υψηλότερη τιμή γίνεται. Η μέτρηση της κατανομής ταχύτητας (ταχύτητα προσώπου) επί της μετωπικής περιοχής ενός ψυγείου για να καθοριστεί το ποσοστό ροής μέσα σε ένα ψυγείο είναι, εντούτοις, δύσκολο. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η ροή αέρος υποβάλλεται σε μια στροβιλοειδή κίνηση μεταξύ των γρύλιων και του ψυγείου και η συνεχώς μεταβαλλόμενη κατεύθυνση της ροής μπροστά από το ψυγείο περιορίζει την εφαρμογή των περισσότερων μετρητών ταχύτητας. Εάν η μέτρηση γίνεται πίσω από το ψυγείο του οχήματος, συναντούνται παρόμοιες δυσκολίες λόγω της αναταραχής που παράγεται από τον ανεμιστήρα. Μια δυνατότητα, εντούτοις, είναι να χρησιμοποιηθούν τα ανεμόμετρα θερμών καλωδίων κατάλληλα για μετρήσεις σε τρισδιάστατα πεδία ροής (παράγραφος 2.2.3.1). Αυτοί οι αισθητήρες καθιστούν επίσης πιθανό να καθοριστούν τα διανύσματα των συνιστωσών της ταχύτητας που είναι κάθετες στο ψυγείο. Επιπλέον, χάρη στο μικρό μέγεθός τους, μπορούν να τοποθετηθούν πολύ κοντά στο ψυγείο χωρίς να εμποδίζουν τη ροή. Με την κίνηση του αισθητήρα με την βοήθεια ενός εργαλείου, μπορεί να ληφθεί συνεχής μέτρηση της κατανομής ταχύτητας αέρα επί του πυρήνα του ψυγείου. Παρόμοιες μετρήσεις μπορούν να διεξαχθούν με ένα πτερυγωτό ανεμόμετρο. Για να επιτευχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα, πρέπει να επιλεγεί ένα σχέδιο ανεμόμετρου που δεν είναι ευαίσθητο στις κεκλιμένες ροές ή είναι σε θέση να καταγράψει την συνιστώσα της ταχύτητας του αέρα μόνο στην αξονική κατεύθυνση.

Ένας άλλος στόχος δοκιμών διαχείρισης ροών αέρος είναι η βελτιστοποίηση της ροής αέρος για την ψύξη των φρένων. Η ποιοτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών ροής είναι δυνατή με μια γεννήτρια καπνού. Ένας καθρέφτης που τοποθετείται κάτω από το φρένο καθιστά εύκολη την παρατήρηση των διατάξεων ροής. Η μέτρηση της τοπικής ταχύτητας είναι απαραίτητη για μια ποσοτική αξιολόγηση. Γρηγορότερη αξιολόγησή μπορεί να γίνει όταν μετριέται άμεσα η απόδοση ψύξης φρένων. Για αυτόν το λόγο η σήραγγα αέρα πρέπει να εξοπλιστεί με ένα δυναμόμετρο πλαισίου. Τα φρένα λειτουργούν σε μια ταχύτητα οδήγησης αντίστοιχη των χαρακτηριστικών οδικών συνθηκών λειτουργίας, π.χ., 100km/h, για να θερμανθούν. Μετριούνται οι θερμοκρασίες του υγρού φρένων, του δίσκοφρενου ή του τύμπανου. Όταν επιτευχθεί ένα προεπιλεγμένο επίπεδο θερμοκρασίας, το φρένο

απελευθερώνεται και εκτίθεται στο ρεύμα αέρα έως ότου ψυχτούν όλα τα συστατικά του μέρη. Με βάση το χρόνο που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα συνιστώμενο κατώτερο όριο θερμοκρασίας (π.χ., του ρευστού φρένων), η απόδοση ψύξης του συστήματος φρένων μπορεί να αξιολογηθεί και να συγκριθεί με τις προτάσεις σχεδίου.

### ***2.3.3 Μέτρηση του ποσοστού ροών αέρος μέσω του χώρου των επιβατών***

Η αποδοτικότητα του συστήματος εξαερισμού οχημάτων αξιολογείται με τη μέτρηση της ταχύτητας ροής αέρος μέσω του χώρου των επιβατών. Κανονικά, ο αέρας που διατρέχει το εσωτερικό οχημάτων εισάγεται μέσω των στομιών εισαγωγής που έχουν σχεδιαστεί γι' αυτόν τον σκοπό (στον χώρο μπροστά από τον προφυλακτήρα) και βγαίνει μέσω των θυρών εξόδου και από διαρροή. Η ταχύτητα ροής αέρα είναι μια συνάρτηση της επερχόμενης ταχύτητας αέρα (και της γωνίας παρέκκλισης) καθώς επίσης και των ρυθμίσεων του συστήματος εξαερισμού (ρύθμιση στομιών, ταχύτητα ανεμιστήρων).

#### ***2.3.3.1 Μέτρηση ρυθμού ροών αέρος με τη βοήθεια των καμπυλών εξαγωγής***

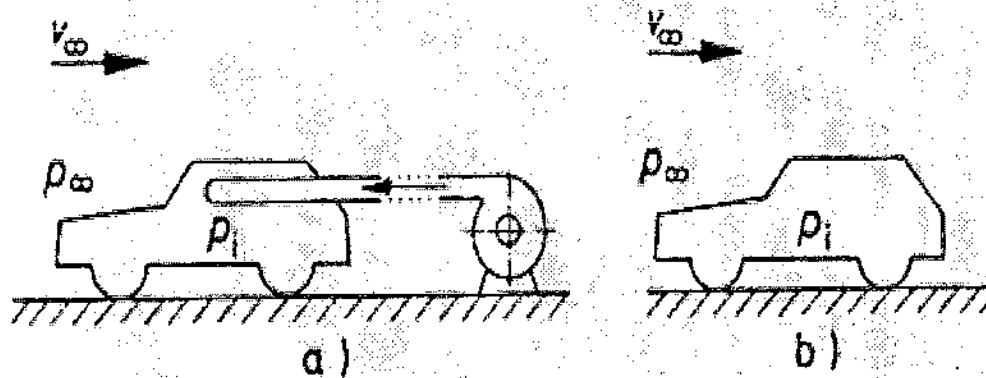
Η μέτρηση εκτελείται σε δύο βήματα:

Εγκατάσταση των "καμπυλών εξαγωγής" (καθορισμένος κατωτέρω)

Προσδιορισμός της ταχύτητας ροής αέρα χρησιμοποιώντας αυτές τις καμπύλες

Για να καθοριστούν οι καμπύλες εξαγωγής, η είσοδος αέρα στο cow1 πρέπει πρώτα να σφραγιστεί (π.χ., με τη χρησιμοποίηση κολλητικής ταινίας). Ο αέρας που ρέει στο χώρο των επιβατών πραγματοποιείται τώρα με τη χρησιμοποίηση ενός εξωτερικού ανεμιστήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26(a). Η έξοδος του ανεμιστήρα συνδέεται με το εσωτερικό αυτοκινήτων με έναν εύκαμπτο σωλήνα. Το ποσοστό ροής της ροής που απελευθερώνεται από τον ανεμιστήρα μπορεί να ποικίλει και μετριέται χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο μετρητή ροής. Ο ευκολότερος τρόπος είναι να φτιαχτεί ένα φύλλο κοντραπλακέ με την περίμετρο ενός παραθύρου και να τοποθετηθεί έπειτα στο αυτοκίνητο και να σφραγιστεί.

Προκειμένου να μην εξασθενίσει η ροή αέρος γύρω από το αυτοκίνητο το οπίσθιο παράθυρο χρησιμοποιείται ως είσοδος αέρα.

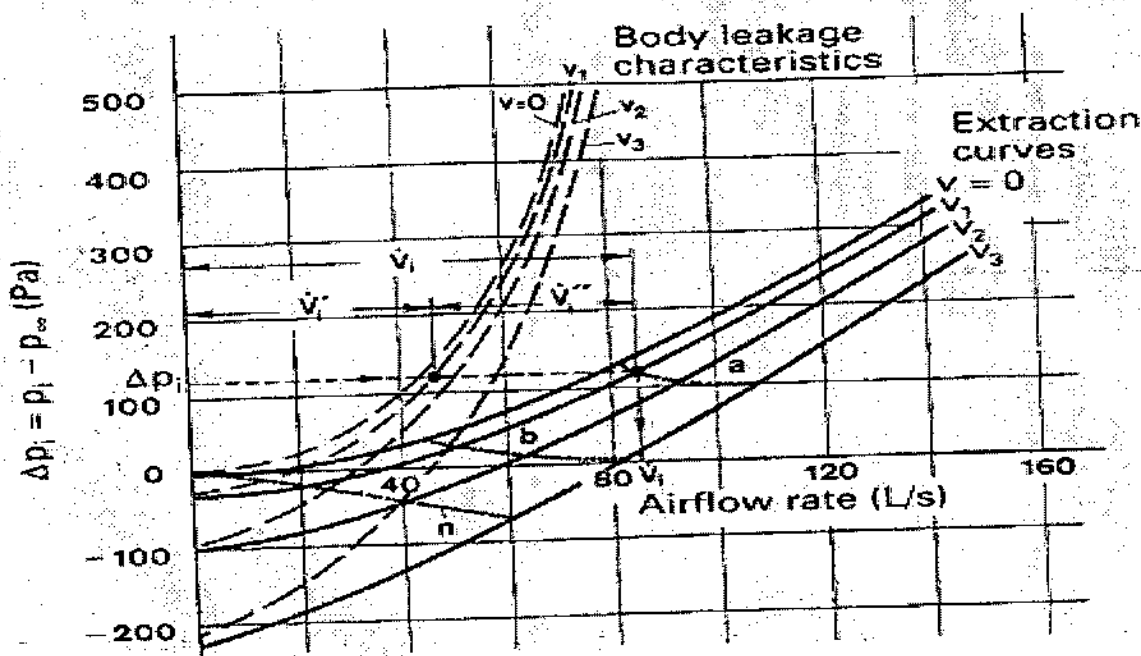


Σχ. 2.26 Δοκιμή σηράγγων αέρα για την μέτρηση της ταχύτητας ροής αέρος μέσω του χώρου των επιβατών:  
(α) Ρύθμιση για την εγκατάσταση των καμπυλών εξαγωγής, (β) έλεγχος ροής αέρος.

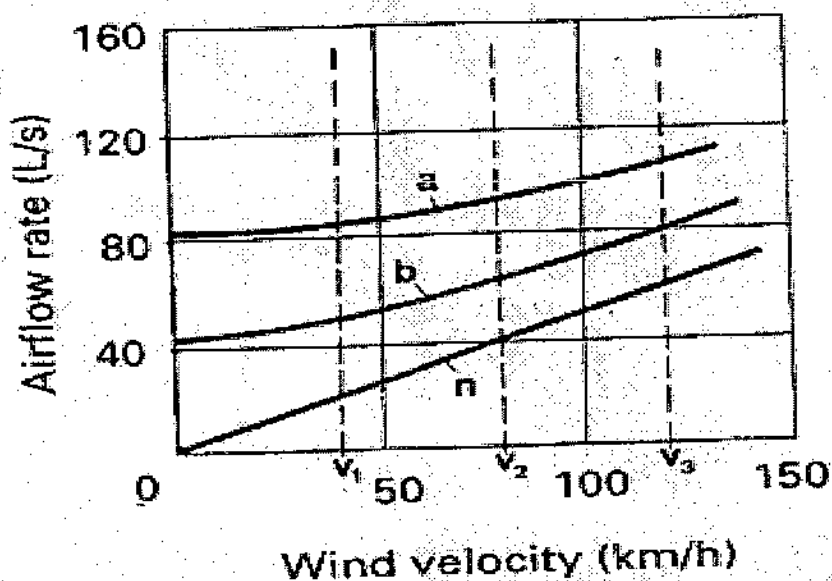
Η ταχύτητα ροής αέρα του ανεμιστήρα αλλάζει, και η ταχύτητα ροής  $V_i$  και η αύξηση ( $\Delta p_i = p_i - p_\infty$ ) της στατικής πίεσης μέσα στο χώρο των επιβατών μετριούνται ταυτόχρονα. Κανονικά, η διαφορά πίεσης που καθορίζεται είναι πολύ μικρή και πρέπει να δοθεί προσοχή για να προστατευθεί το σημείο μέτρησης στο χώρο των επιβατών από τις μετακινήσεις αέρα. Επομένως, ο μετρητής πίεσης τοποθετείται κατά προτίμηση σε ένα διάτρητο, κινούμενο, γεμάτο με fiberglass κιβώτιο.

Αρχικά η δοκιμή εκτελείται χωρίς αέρα και επαναλαμβάνεται έπειτα με διάφορες ταχύτητες αέρα. Όλες οι αποκτηθείσες καμπύλες σχεδιάζονται σε μια γραφική παράσταση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.27. Οι καμπύλες καλούνται "καμπύλες εξαγωγής" του σώματος του οχήματος. Παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ του ρυθμού ροής του αέρα που περνά μέσω του χώρου των επιβατών και της σχετικής αλλαγής πίεσης στο διαμέρισμα. Η μόνη διαφορά από τις συνθήκες που επικρατούν σε πραγματική λειτουργία οδήγησης είναι ότι ένας εξωτερικός ανεμιστήρας αντικαθιστά το σύστημα εισαγωγής-διαβίβασης αέρα του οχήματος. Αυτή η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί για να καθορίσει το ποσό εξαγωγής αέρα που εμφανίζεται μέσω των διαρροών του σώματος του οχήματος. Για αυτόν το λόγο, η δοκιμή με τον εξωτερικό ανεμιστήρα πρέπει να επαναληφθεί. Αυτή τη φορά, εντούτοις, οι σχεδιασμένες δίοδοι εξόδου πρέπει επίσης να σφραγιστούν. Οι υπόλοιπες οπές μέσω των οποίων διαφεύγει αέρα είναι διαρροές (σχ. 2.27).

Μόλις καθοριστούν τα χαρακτηριστικά διαρροής και εξαγωγής, το όχημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, δηλαδή οι δίοδοι εισαγωγών και εξαγωγών αέρα ανοίγονται πάλι και ο εξωτερικός ανεμιστήρας απομακρύνεται (σχ. 2.26(b)). Οι χαρακτηριστικές λειτουργικές ρυθμίσεις του συστήματος θέρμανσης και εξαερισμού μπορούν τώρα να καθοριστούν με τη βοήθεια διάφορων βαλβίδων ρύθμισης και ταχυτήτων ανεμιστήρων. Για κάθε περίπτωση, η εσωτερική πίεση μετριέται με ακριβώς τις ίδιες ταχύτητες αέρα με τις οποίες έχουν καθοριστεί οι καμπύλες εξαγωγής αυτά τα σημεία σχεδιάζονται στις αντίστοιχες καμπύλες εξαγωγής, όπως φαίνεται στο σχ. 2.27. Για κάθε συνδυασμό μέτρησης πίεσης  $\Delta p_i$  και ταχύτητα αέρα  $v$ , η αντίστοιχη ταχύτητα ροής αέρα  $V_i$  μπορεί να διαβαστεί στον άξονα X. Χρησιμοποιώντας αυτά τα στοιχεία, οι ταχύτητες ροής αέρος για τρεις διαφορετικές διατάξεις εξαερισμού, παραδείγματος χάριν, σχεδιάζονται συναρτήσει της ταχύτητας αέρα στο σχ. 2.28. Η καμπύλη  $n$  αντιπροσωπεύει την περίπτωση στην οποία ο ανεμιστήρας του οχήματος είναι κλειστός, ούτως ώστε υπάρχει μόνο ο αέρας συμπίεσης. Όπως αναμενόταν, η ένταση της ροής αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα οχημάτων. Οι καμπύλες  $a$  and  $b$  αντιπροσωπεύουν δύο ρυθμίσεις ανεμιστήρων.



Σχ. 2.27 Προσδιορισμός του της ταχύτητας ροής αέρα από τη μέτρηση της εσωτερικής αύξησης στατικής πίεσης  $\Delta p_i$



Σχ. 2.28 Τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του ελέγχου ροής αέρα που προέρχονται από το σχ. 2.27

Επιπλέον, η γραφική παράσταση που παρουσιάζεται στο σχ. 2.27 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό ποιο μέρος του μετρημένου ποσοστού ροής αέρος ρέει μέσω των θυρών εξαερισμού και ποιο μέρος διαφεύγει μέσω των διαρροών. Παραδείγματος χάριν, η εσωτερική πίεση  $\Delta p_i$  μετριέται σε μια ταχύτητα αέρα  $v_i$  μια οριζόντια γραμμή σχεδιάζεται και τα σημεία διατομής αυτής της γραμμής με τη διαρροή του σώματος και τις καμπύλες εξαγωγής σηματοδοτούνται (σχ. 2.27). Η συνολική τιμή ροής αέρος  $V_i$  διαιρείται σε

συνισταμένες, που ονομάζονται  $V_i'$  and  $V_i''$ , στα τεμνόμενα σημεία με τη γραμμή διαρροής

σωμάτων.  $V_i'$  είναι το μέρος του αέρα που διαφεύγει μέσω των διαρροών και  $V_i''$  είναι το μέρος που βγαίνει από τις θύρες εξαγωγής αέρα.

Η διαρροή του σώματος είναι το αποτέλεσμα πολλών μικρών ανοιγμάτων. Σύμφωνα με τον BECK, μπορεί να καθοριστεί μία "ισοδύναμη διατομή διαρροής"  $A_e$  για να εκφράσει τις διαρροές με μια τιμή για όλες τις περιοχές του σώματος που δεν είναι σφραγισμένες:

$$A_e = \frac{V_i'}{\sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_i}}$$

Η τιμή που καθορίζεται για την  $A_e$  πρέπει να ελεγχθεί για διαφορετικές εσωτερικές πιέσεις οχημάτων  $\Delta p$ . Μια "ισοδύναμη" διατομή μπορεί ομοίως να καθοριστεί για τις (σχεδιασμένες) οπές διεξόδου του αέρα· με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να συγκριθούν ποσοτικά τα διάφορα σχέδια στομίων εξαγωγής του αέρα.

Η μέθοδος που περιγράφεται εδώ είναι εύχρηστη και επομένως εφαρμόζεται ευρέως. Είναι, εντούτοις, περιορισμένης ακρίβειας λόγω της αρχικής υπόθεσης ότι η εισροή αέρα στο εσωτερικό ενός οχήματος εμφανίζεται αποκλειστικά μέσω των αγωγών εισαγωγής αέρα στο cowli και ότι η έξοδος αέρα εμφανίζεται μόνο σε κάθε διαρροή του σώματος. Συνεπώς, εάν εισέλθει αέρας από μερικές διαρροές, η μέθοδος θα δώσει ανακριβή αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί, παραδείγματος χάριν, εάν ο ανεμιστήρας είναι σβησμένος και οι βαλβίδες του συστήματος θέρμανσης και εξαερισμού του οχήματος τοποθετούνται έτσι ώστε να επιτρέπουν σε πολύ λίγο αέρα να ρεύσει στο χώρο των επιβατών, με συνέπεια μια υψηλή υποπίεση στο εσωτερικό του οχήματος. Αυτό μπορεί να εξασθενίσει την απόδοση ενός συστήματος AC.

### ***2.3.3.2 Εναλλακτικές μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας ροής αέρος μέσα στον χώρο των επιβατών***

Η ταχύτητα ροής αέρα μέσω του χώρου των επιβατών μπορεί επίσης να υπολογιστεί από τα αποτελέσματα ενός ελέγχου θέρμανσης, δεδομένου ότι, καθιερώνεται μια ισορροπία θερμότητας. Εντούτοις, για να επιτευχθούν ακριβή αποτελέσματα, πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής απώλεια θερμότητας σε κάθε μέρος του οχήματος και τα στοιχεία θερμοκρασίας πρέπει να μετρηθούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Για αυτόν τον λόγο, αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται στην πρακτικά.

Η χρησιμοποίηση ενός ανιχνευτή αερίου είναι μια άλλη μέθοδος για την μέτρηση της ροής αέρα· το  $CO_2$  είναι εύκολα ανιχνεύσιμο. Το αέριο εισάγεται στο εσωτερικό του οχήματος πριν από τον έλεγχο. Στη συνέχεια, η μείωση της συγκέντρωσης μετριέται συναρτήσει του χρόνου ενώ το όχημα εκτίθεται στο ρεύμα αέρα μιας αεροσήραγγας (σχ. [2.28]). Αντίθετα, η τεχνική χρησιμοποίησης ενός ισοτόπου αερίου (π.χ., κρυπτό 85) ως ανιχνευτή δεν συνίσταται για δοκιμές αεροσηράγγων λόγω των ειδικών μέτρων ασφάλειας που απαιτούνται.

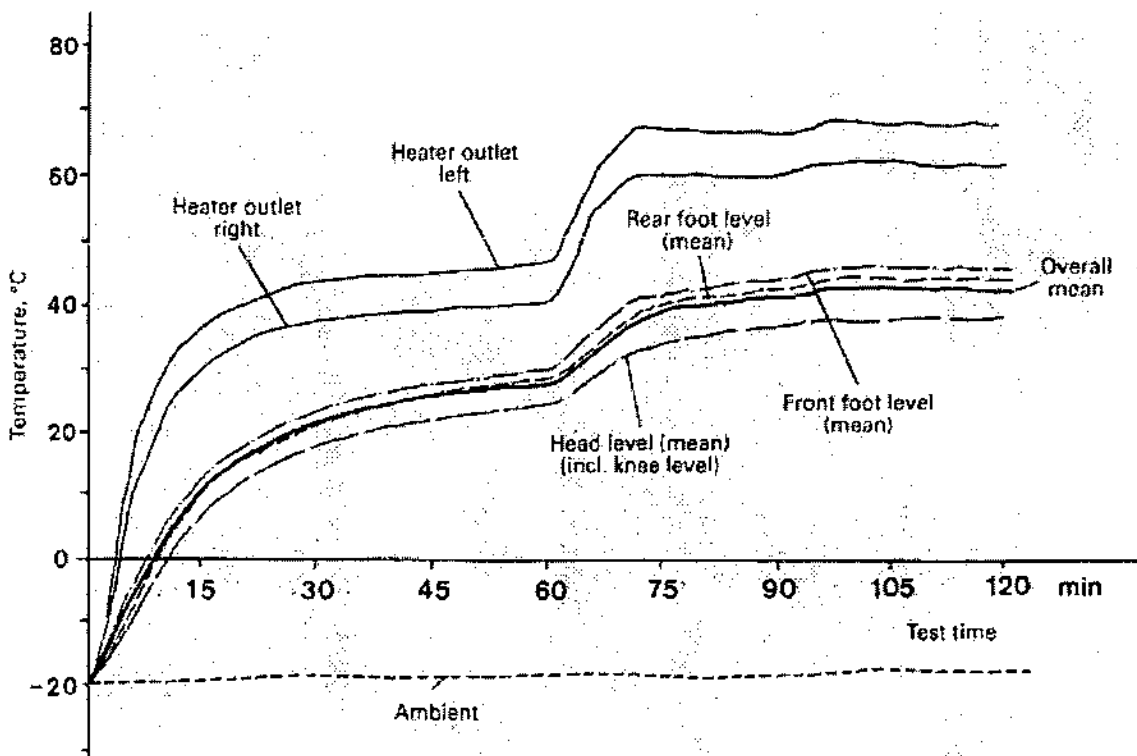
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η μέτρηση της ταχύτητας ροής αέρα σε μια αεροσήραγγα εκτελείται συνήθως με συμμετρική ροή. Κάτω από παρέκκλιση τα αποτελέσματα μπορεί να ποικίλουν αρκετά επειδή οι πιέσεις στις εισόδους και εξόδους αέρα αλλάζουν ανάλογα με τη γωνία παρέκκλισης  $\beta$ .



### **2.3.4 Έλεγχοι θέρμανσης και κλιματισμού της καμπίνας επιβατών**

Μια κλιματιζόμενη σήραγγα (αέρα) που εξοπλίζεται με ένα δυναμόμετρο πλαισίου προσαρμοζόμενο για την κίνηση μπροστινών και οπίσθιων τροχών είναι μια ιδανική ευκολία για την διεξαγωγή των ελέγχων θέρμανσης και κλιματισμού (AC). Δεδομένου ότι οι διαστάσεις των κλιματιζόμενων σηράγγων είναι συνήθως μικρότερες από τις αεροδυναμικές σήραγγες αέρα, η καταλληλότητά τους πρέπει πρώτα να ελεγχθεί με τη βοήθεια ελέγχων συσχέτισης όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.2.3.2. Εάν δεν μπορεί να καθιερωθεί ένας κατάλληλος συσχετισμός επειδή, παραδείγματος χάριν, η περιοχή ακροφυσιών εξόδου είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με το αντικείμενο δοκιμής, μπορεί να γίνει μια διόρθωση δεδομένου ότι η ροή "τακτοποιείται" με κατάλληλη ρύθμιση πλακών εκτροπής στο τμήμα δοκιμής.

Το σχ. 2.29 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική γραφική παράσταση ενός ελέγχου θέρμανσης. Πριν από τη δοκιμή, το όχημα εκτίθεται στη θερμοκρασία δοκιμής έως ότου φθάσουν όλα τα τμήματα της μηχανής και της καμπίνας των επιβατών σε αυτή τη θερμοκρασία. Κατόπιν η δοκιμή αρχίζει. Με τη βοήθεια ενός δυναμόμετρου πλαισίου, η μηχανή μαρσάρει με δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα οδήγησης, που έχει ρυθμιστεί από ένα προεγκατεστημένο πρόγραμμα δοκιμής. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφονται οι θερμοκρασίες αέρα σε διάφορα σημεία του χώρου των επιβατών. Το σχ. 2.29 παρουσιάζει μόνο τις μέσες τιμές θερμοκρασίας για τον χώρο των ποδιών, και των περιοχών κεφαλής και στήθους, όπως και την συνολική μέση τιμή όλων των υπολογισμένων κατά μέσο όρο τιμών. Η τελική κρίση της απόδοσης ενός συστήματος θέρμανσης γίνεται με τη σύγκριση του συνολικού μέσου όρου με τις ελάχιστες απαιτήσεις όποιοι έχουν συνήθως τεθεί σύμφωνα με την πρακτική εμπειρία.



Σχ. 2.29 Χαρακτηριστική καταγραφή ελέγχου εσωτερικής θέρμανσης οχήματος

Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία ενός ελέγχου απόδοσης των μονάδων AC είναι παρόμοια με αυτήν την διαδικασία. Ένα όχημα τίθεται αρχικά σε υψηλή θερμοκρασία αέρα και έπειτα η δοκιμή πραγματοποιείται με διαδοχική αύξηση της ταχύτητας οδήγησης. Εκτός από το υψηλό επίπεδο θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, οι ειδικοί λαμπτήρες προσομοιώνονται με το ηλιακό φορτίο. Επιπλέον, η υγρασία αυξάνεται προκειμένου να εξεταστεί η μονάδα AC υπό τις πιο σκληρές συνθήκες λειτουργίας. Χαρακτηριστικές συνθήκες δοκιμής, παραδείγματος χάριν, είναι θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C και υψηλότερα, 40% υγρασία αέρα, και 1KW/m<sup>2</sup> ηλιακό φορτίο.

Οι ειδικοί λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση με την ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να στείλουν παράλληλες ακτίνες και να έχουν ένα φάσμα φωτός παρόμοιο με το φως του ήλιου, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3. Οι υπέρυθροι λαμπτήρες δεν είναι κατάλληλοι επειδή η απορρόφηση και η αντανάκλαση της ενέργειας ακτινοβολίας πάνω στις βαμμένες ή διαφανείς επιφάνειες γυαλιού δεν είναι οι ίδιες όπως για το πραγματικό φως του ήλιου. Επομένως, η επίδραση θέρμανσης του εσωτερικού του οχήματος θα είναι διαφορετική και η απόκλιση από τα αποτελέσματα της δοκιμής σε φυσικό περιβάλλον δεν μπορεί να αποφευχθεί.

Η αξιολόγηση της απόδοσης των μονάδων AC γίνεται, όπως με τον έλεγχο θέρμανσης, με τη σύγκριση των μέσων τιμών για τις εσωτερικές θερμοκρασίες με τις ελάχιστες απαιτήσεις.

**Πίνακας 2.3 Σύγκριση της φασματικής ανάλυσης της φυσικής ακτινοβολίας του ήλιου με μερικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ηλιακής ακτινοβολίας (σε ποσοστό της συνολικής ακτινοβολίας)**

Radiation	UV-C	UV-B	UV-A	Visible	IR-A	IR-B	IR-C
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	<0.28	0.28-0.315	0.318-0.38	0.38-0.78	0.78-1.4	1.4-3.0	>3.0
Terrest. radiation per SCHULZE (1.12 kW/m <sup>2</sup> )	-	0.4	3.9	51.8	31.2	12.7	-
HMI 4000 W (Osram)	0.1	0.8	6.2	53.3	32.3	7.3	-
Xenon CSX (Philips)	Sum of all UV: 4.8			24.2	32.3	38.7	
Halogen 3400 K (Osram)	-	-	0.4	19.1	47.4	33.1	
Siccatherm 250W (Osram)	-	-	-	4.0	42.5	50.8	2.7

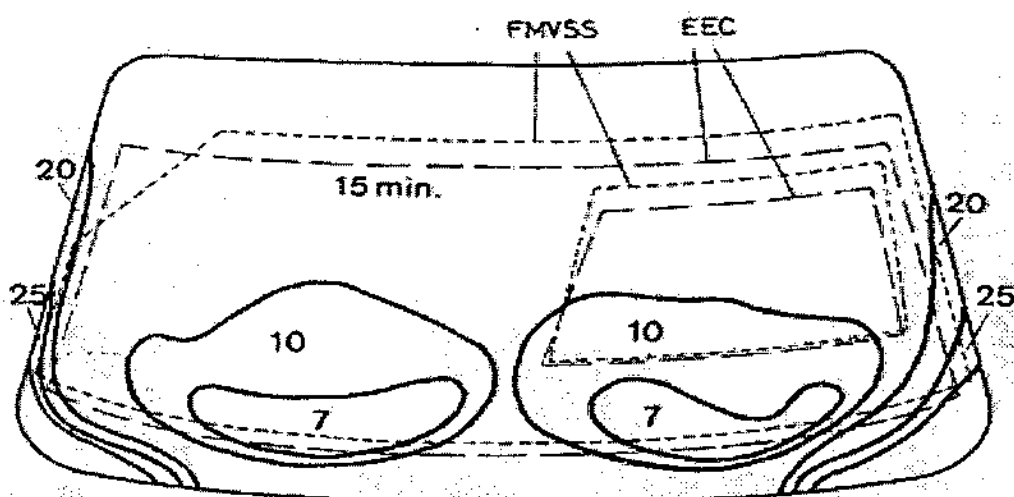
### 2.3.5 Έλεγχοι απόψυξης και εξάλειψης θολώματος

Η απόδοση απόψυξης ενός συστήματος θέρμανσης είναι μια σημαντική προϋπόθεση για τη λειτουργία σε κρύο κλίμα. Μερικές χώρες απαιτούν ένα κατώτατο επίπεδο απόδοσης για την απόψυξη των ανεμοφραχτών. Το FMVSS 103 είναι ένα πρότυπο ελέγχου για τις Η.Π.Α και το 78/317/ees έχει εισαχθεί ως ένα αποδεχτό πρότυπο για τις ευρωπαϊκές χώρες.

Πριν από μια δοκιμή απόψυξης προηγείται μια φάση κατά την διάρκεια της οποίας ψύχονται όλα τα τμήματα του οχήματος στη θερμοκρασία δοκιμής. Οι Τυποποιημένες θερμοκρασίες δοκιμής είναι  $-3^{\circ}\text{C}$  και  $-18^{\circ}\text{C}$ . Η δοκιμή αρχίζει με την εφαρμογή στρώματος πάγου προκαθορισμένου πάχους (π.χ.,  $0.044\text{g/cm}^2$ ) στις επιφάνειες γυαλιού του οχήματος με το ψεκάσμο νερού. Το όχημα παραμένει για 30-40 λεπτά περισσότερο σε αυτή τη θερμοκρασία. Κατόπιν η μηχανή ανάβει και θερμαίνεται, είτε δουλεύοντας στο ρελαντί είτε τρέχοντας το όχημα στο δυναμόμετρο πλαισίου με ένα δεδομένο μερικό φορτίο. Το σύστημα απόψυξης είναι σε χρήση και οι ξεπαγωμένες περιοχές των γυάλινων επιφανειών σημειώνονται στο

εσωτερικό τους ανά διαστήματα πέντε λεπτών. Στο τέλος της δοκιμής, το προκύπτον σχέδιο φωτογραφίζεται ή σχεδιάζεται σε χαρτί. Τα σχέδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν το επίπεδο απόδοσης του συστήματος απόψυξης. Γι' αυτόν τον λόγο, στις αναφερθείσες τυποποιημένες διαδικασίες ελέγχου, οι ειδικές ζώνες καθορίζονται πάνω στον ανεμοφράκτη. Μόνο αυτές εξετάζονται κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής. Το σχ. 2.30 απεικονίζει τα περιγράμματα των ξεπαγωμένων περιοχών στον ανεμοφράκτη· οι διάστικτες γραμμές αντιστοιχούν στις αναφερθείσες ειδικές περιοχές. Η ελάχιστη απόδοση που απαιτείται από ένα σύστημα απόψυξης καθορίζεται σε επίπεδο ποσοστού των ξεπαγωμένων περιοχών σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα για κάθε ζώνη ανεμοφρακτών.

Κατά τη διάρκεια ενός ελέγχου εξάλειψης θόλωσης, η υγρασία που προέρχεται από τους επιβάτες (περ.. 70 g/h ανά κάτοχο) προσομοιώνεται με μια γεννήτρια ατμού που σχεδιάζεται ειδικά για αυτόν το λόγο. Η θερμοκρασία δοκιμής είναι ελαφρώς κάτω από το σημείο ψύξης (π.χ., -3°C). Μετά από μια περίοδο παραμονής στην θερμοκρασία ελέγχου, η γεννήτρια ατμού χρησιμοποιείται για 5 λεπτά στο όχημα προκειμένου να παραχθεί ένα στρώμα υγρασίας στις επιφάνειες γυαλιού. Έπειτα η μηχανή ανάβει και το σύστημα απόψυξης και εξάλειψης ομίχλης λειτουργεί για να αφαιρέσει την υγρασία από τις γυάλινες επιφάνειες. Η γεννήτρια ατμού παραμένει σε λειτουργία έως ότου ολοκληρωθεί η δοκιμή. Τα σχέδια των περιοχών που ξεθόλωσαν καταγράφονται για αξιολόγηση με τον ίδιο τρόπο όπως με τις δοκιμές απόψυξης. Το ελάχιστο επίπεδο απόδοσης εξάλειψης ομίχλης για τις Ευρωπαϊκές χώρες καθορίζεται στον κανονισμό 78/317/EEC.



Σχ. 2.30 Αποτέλεσμα της δοκιμής απόψυξης ανεμοφράκτη. Οι χοντρές γραμμές παρουσιάζουν τις ξεπαγωμένες περιοχές του ανεμοφράκτη σε διαστήματα πέντε λεπτών. Οι διακεκομμένες γραμμές περιγράφουν τις συγκεκριμένες ζώνες ανεμοφρακτών.

Μια υπέρυθρη φωτογραφική μηχανή μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη στη βελτιστοποίηση ενός συστήματος απόψυξης και εξάλειψης ομίχλης . Οι φωτογραφίες κατανομής θερμοκρασίας στον ανεμοφράκτη και τις άλλες επιφάνειες γυαλιού που λαμβάνονται με αυτόν τον εξοπλισμό (thermography) υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας βοηθούν το μηχανικό να αξιοποιήσει τις αντίστοιχες μετρήσεις.

### ***2.3.6 Δοκιμές ψύξης μηχανών σε μια σήραγγα αέρα.***

Η διαδικασία ανάπτυξης ενός συστήματος ψύξης μηχανών εκτελείται γενικά σε ένα δυναμόμετρο πλαισίου με αέρα · μόνο η τελική βελτιστοποίηση εκτελείται σε μια σήραγγα αέρα με έλεγχο θερμοκρασίας (κλιματιζόμενη σήραγγα). Για τον καλό συσχετισμό με τις οδικές δοκιμές είναι ικανοποιητικό εάν η ροή αέρος γύρω από το όχημα προσομοιώνεται μόνο γύρω από το μπροστινό μέρος του οχήματος, όπως παρουσιάζεται στο σχ. 2.68. Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρότερες σήραγγες (εάν όχι οι ανεμιστήρες) που σχεδιάζονται αποκλειστικά για τις δοκιμές ψύξης μηχανών. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει, εντούτοις, να δοθεί στη βαθμονόμηση της λειτουργικής ταχύτητας αέρα · ο καθορισμός της γίνεται δυσκολότερος καθώς η περιοχή ακροφυσίων εξαγωγής γίνεται μικρότερη, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.3.2. Οι δοκιμές διεξάγονται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος για να υποδείξουν τα όρια απόδοσης του συστήματος ψύξης. Μερικές φορές ακόμη και το φορτίο του ήλιου και του ανέμου προσομοιώνονται για να ληφθούν υπόψη οι ακραίες συνθήκες οδήγησης.

Τρεις μέθοδοι δοκιμής χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την απόδοση ψύξης:

Προσομοίωση δοκιμής υψηλής ταχύτητας σε επίπεδο δρόμου.

Προσομοίωση δοκιμής ανάβασης λόφου ρυμουλκώντας ένα τρέιλερ.

Κατά την πραγματοποίηση (1) ή (2), λειτουργία στο ρελαντί ή με σβηστή μηχανή.

Γενικά, μια κλίση 10-12<sup>0</sup> επιλέγεται για την προσομοίωση ανάβασης λόφου. Αυτό αντιστοιχεί σε συνθήκες οδήγησης μέσω ενός περάσματος σε βουνό.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών (1) και (2), οι αντιστάσεις οδήγηση+, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης ανάβασης σε λόφο, προσομοιώνονται με ένα δυναμόμετρο πλαισίου. Με αυτόν τον τρόπο, λόγω της πεπερασμένης διαμέτρου των κυλίνδρων, η αντίσταση των τροχών είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στο δρόμο. Με μια διάμετρο κυλίνδρων 2m, ο συντελεστής είναι περίπου δύο, ούτως ώστε η αντίσταση κύλισης των τροχών χωρίς κίνηση να λαμβάνεται υπόψη. Εάν το επίπεδο προσέγγισης δεν είναι ικανοποιητικό, η υψηλότερη αντίσταση κύλισης των τροχών με κίνηση καθώς επίσης και το ελλείπον μέρος των τροχών χωρίς κίνηση πρέπει να ληφθούν υπόψη χωριστά στην προσομοίωση.

Οι μεμονωμένες συνθήκες οδήγησης της δοκιμής ελέγχονται έως ότου όλες οι θερμοκρασίες να σταθεροποιηθούν. Οι σημαντικότερες θερμοκρασίες που μετριοούνται είναι η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου στον υψηλότερο και χαμηλότερο σωλήνα του θερμαντικών σώματος, η θερμοκρασία του λαδιού της μηχανής, και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Για την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων ψύξης, η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου στον υψηλότερο σωλήνα του θερμαντικού σώματος  $t_r$  και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα  $t_a$  είναι η σημαντικότερη παράμετρος:

$$\Delta t = t_r - t_a \quad (2.10)$$

Η τιμή  $\Delta t$  παραμένει σχεδόν σταθερή στις διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, εφ' όσον το άνοιγμα της βαλβίδας του θερμοστάτη και ο μηχανικός διακόπτης του ανεμιστήρα (ηλεκτρικά καθοδηγούμενος ανεμιστήρας) ή η συμπεριφορά δέσμευσης/αποδέσμευσης (viscofan) παραμένουν αμετάβλητοι.

Η θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος θα μπορούσε να αυξηθεί μέχρι μια οριακή τιμή ( $t_{ATB}$ ) στην οποία το ψυκτικό μέσο στον υψηλότερο σωλήνα του θερμαντικού σώματος αρχίζει να βράζει. Σε αυτήν την περίπτωση, έχουμε:

$$\Delta t = t_r - t_a = t_{cb} - t_{ATB}$$

κατά συνέπεια

$$t_{ATB} = t_{cb} - (t_r - t_a) = (t_{cb} - t_r) + t_a \quad (2.11)$$

$t_{cb}$  είναι η θερμοκρασία βρασμού του ψυκτικού μέσου εξαρτάται από την πίεση σε ένα σύστημα ψύξης, η οποία καθορίζεται από την πίεση ανοίγματος του καλύμματος του θερμαντικού σώματος. Η  $t_{ATB}$  καλείται "θερμοκρασία αέρα-βρασμού" (θερμοκρασία ATB).

Είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία το ψυκτικό μέσο θα άρχιζε να βράζει εάν το όχημα δοκιμής είχε οδηγηθεί στις ίδιες συνθήκες οδήγησης με εκείνους που προσομοιώθηκαν κατά την δοκιμή ψύξης. Η  $t_{ATB}$  χρησιμοποιείται ως πρότυπο αξιολόγησης της απόδοσης ενός συστήματος ψύξης. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία  $t_{ATB}$ , τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του συστήματος ψύξης.

Εάν μπορεί να επιλεγεί οποιαδήποτε θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα, συνιστάται οι δοκιμές να εκτελούνται σε υψηλή θερμοκρασία. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι ο θερμοστάτης ψυκτικού μέσου και ο ανεμιστήρας λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας και σε δυσμενείς συνθήκες. Διαφορετικά, πρέπει να θεωρηθεί ότι η θερμοκρασία  $t_{ATB}$  που καθορίζεται σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία δοκιμής μπορεί να διαφέρει από τη θερμοκρασία  $t_{ATB}$  που καθορίζεται στο δρόμο σε υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτή η δυσκολία μπορεί να παρακαμφθεί όταν ο θερμοστάτης είναι μπλοκαρισμένος σε πλήρως ανοικτή θέση και ο ανεμιστήρας λειτουργεί συνεχώς. Αλλά ακόμα και τότε υπάρχει ακόμα μια μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών θερμοκρασίας  $t_{ATB}$  που καθορίζονται για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτό προκαλείται από την αλλαγή της πυκνότητας του αέρα και συνεπώς την αλλαγή της απόδοσης της μηχανής. Με τη χρησιμοποίηση της εμπειρίας που αποκτάται από την πρακτική εφαρμογή σε πολλές μηχανές, η ακόλουθη εξίσωση διόρθωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μιας θερμοκρασίας  $t_{ATB}$  σε άλλες θερμοκρασίες περιβάλλοντος:

$$t'_{ATB} = t_{ATB} + 0.16(t'_1 - t_1) \quad (2.12)$$

Όπου

$t_{ATB}$  = η μετρημένη θερμοκρασία  $t_{ATB}$  σε μια θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα  $t_1$

$t'_{ATB}$  = η θερμοκρασία που αναμένεται με μια διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος  $t'_1$

Η θερμοκρασία  $t_{ATB}$  ενός συστήματος ψύξης μηχανών που υπολογίστηκε έπειτα από μια δοκιμή υψηλής-ταχύτητας δεν συμπίπτει με τη θερμοκρασία  $t_{ATB}$  που καθορίστηκε μετά από μια δοκιμή ανάβασης λόφου με το ίδιο όχημα. Επομένως, οι τιμές  $t_{ATB}$  μπορούν να συγκριθούν μόνο για τις ίδιες συνθήκες οδήγησης.

Για τη θερμοκρασία  $t_{ATB}$ , τα κριτήρια αποδοχής μπορούν να καθοριστούν για κάθε μια από τις τρεις διαδικασίες δοκιμής. Ο προσδιορισμός αυτών των τιμών βασίζεται στην πρακτική εμπειρία.  $t_{ATB} = 48-55^{\circ}\text{C}$  μπορεί να εφαρμοστεί ως αποδεκτό όριο για τις δοκιμές υψηλής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά, τα αποδεκτά όρια για τη δοκιμή ανάβασης λόφου με  $t_{ATB}$

=28-35°C μπορούν να τεθούν χαμηλότερα, αφού, σε περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο, συνήθως επικρατεί χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα .

### 2.3.7 Τεχνικές απεικόνισης ροής

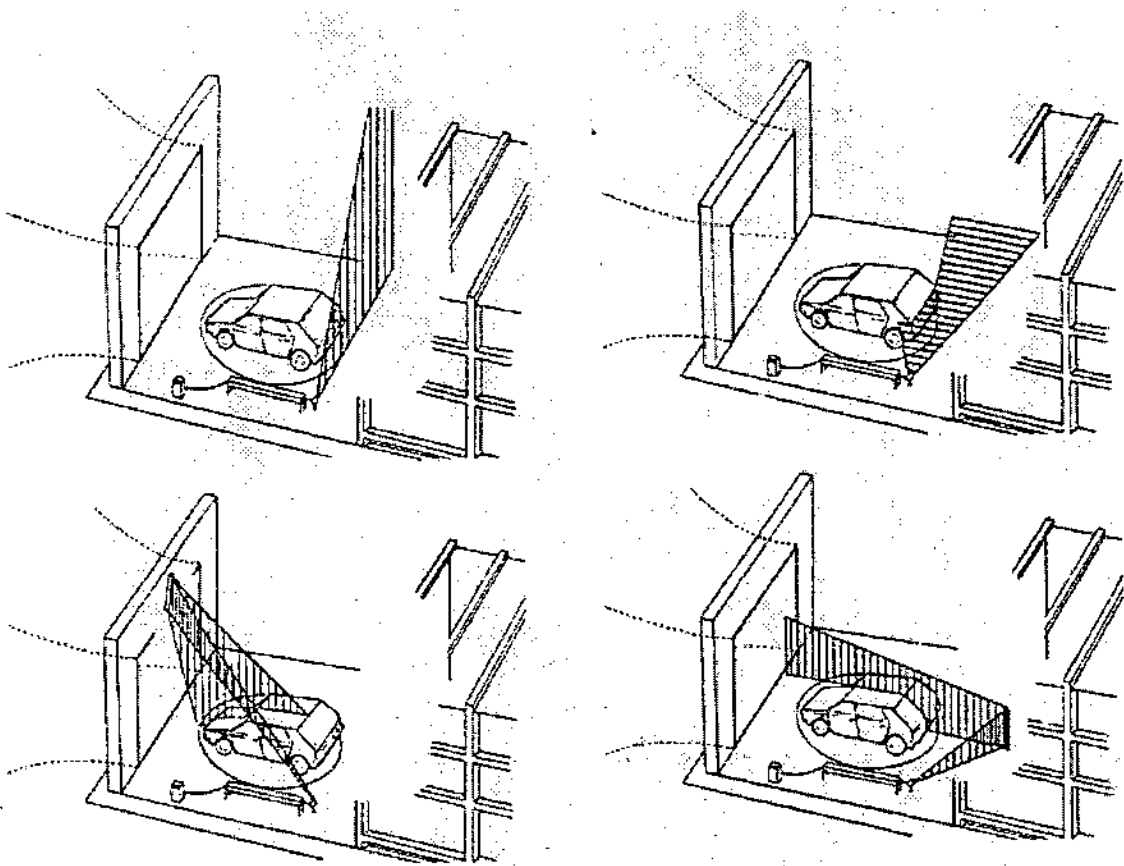
Η απεικόνιση της ροής σε ένα σώμα οχήματος και τα σχέδια ροής αέρα στις καμπίνες επιβατών και μηχανών είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτιστοποίηση αυτών των πεδίων ροής. Το σχέδιο ροής στην επιφάνεια του σώματος του οχήματος μπορεί πολύ εύκολα να απεικονιστεί με τούφες μαλλιού. Οι περιοχές της συνημμένης ή χωρισμένης ροής είναι σαφώς ορατές. Εντούτοις, η εφαρμογή των τούφων μαλλιού στο σώμα ενός οχήματος είναι μάλλον επίμοχθη επομένως αυτή η "κλασσική" τεχνική δεν εφαρμόζεται πλέον. Μια άλλη δυνατότητα απεικόνισης της ροής στην επιφάνεια είναι η εφαρμογή μιας ταινίας λαδιού επιφάνειας που περιέχει χρωματισμένες ή ακτινοβόλες χρωστικές ουσίες. Εντούτοις, τέτοιες χρωματισμένες εικόνες πρέπει να ερμηνευθούν προσεκτικά στα πεδία διαχωρισμού ροής όταν έχει επιπτώσεις η επιρροή της βαρύτητας στις πορείες των σωματιδίων, όπως, παραδείγματος χάριν, στις κάθετες περιοχές του σώματος του οχήματος. Μια συχνά χρησιμοποιημένη συσκευή είναι η γεννήτρια καπνού. Με φύσημα καπνού σε ένα ρεύμα αέρα, η πορεία της ροής αέρος γίνεται ορατή. Στις συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες γεννήτριες καπνού, θερμαίνεται ένα μίγμα αλκοόλ/νερού. Ένας παχύς, μη τοξικός ατμός (λανθασμένα αποκαλούμενος "καπνός") αναπτύσσεται, ο οποίος εγχέεται στο ρεύμα αέρος με έναν μακρύ λεπτό σωλήνα. Υπάρχουν δύο μέθοδοι: είτε ο καπνός εισάγεται στην ελεύθερη ροή μπροστά, που κάνει τις αεροδυναμικές γραμμές ορατές ή ο καπνός εισάγεται στην διαχωρισμένη ροή, όπου γεμίζει το στάσιμο νερό έως το σημείο διαχωρισμού. Ο καλός φωτισμός είναι μια προϋπόθεση για την απεικόνιση ροής. Ο R. BUCHHEIM έχει αναπτύξει γι' αυτόν το λόγο, μια μέθοδο με ακτίνες λέιζερ, που φαίνεται στο σχ. 2.31 σε μερικούς τρόπους εφαρμογής. Ακτίνα ενός υψηλής απόδοσης λέιζερ (5-24W) οδηγείται αρχικά μέσω ενός κυλινδρικού φακού και εκτρέπεται έπειτα με έναν καθρέφτη κατά τέτοιο τρόπο ώστε το όχημα μπορεί να φωτιστεί σε κάθε επιθυμητό τμήμα στο πλήρες πλάτος, το μήκος, ή το ύψος. Το πάχος του επιπέδου λέιζερ μπορεί να τεθεί μεταξύ μερικών χιλιοστών και αρκετών εκατοστών.

Εάν ερευνάται το σχέδιο ροής σε μια περιοχή της διαχωρισμένης ροής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γεννήτρια φυσαλίδων. Οι γεμισμένες με ήλιο φυσαλίδες σαπουνιού εισάγονται στη ροή αέρος και φωτογραφίζονται οι μετακινήσεις τους. Εάν ο χρόνος έκθεσης

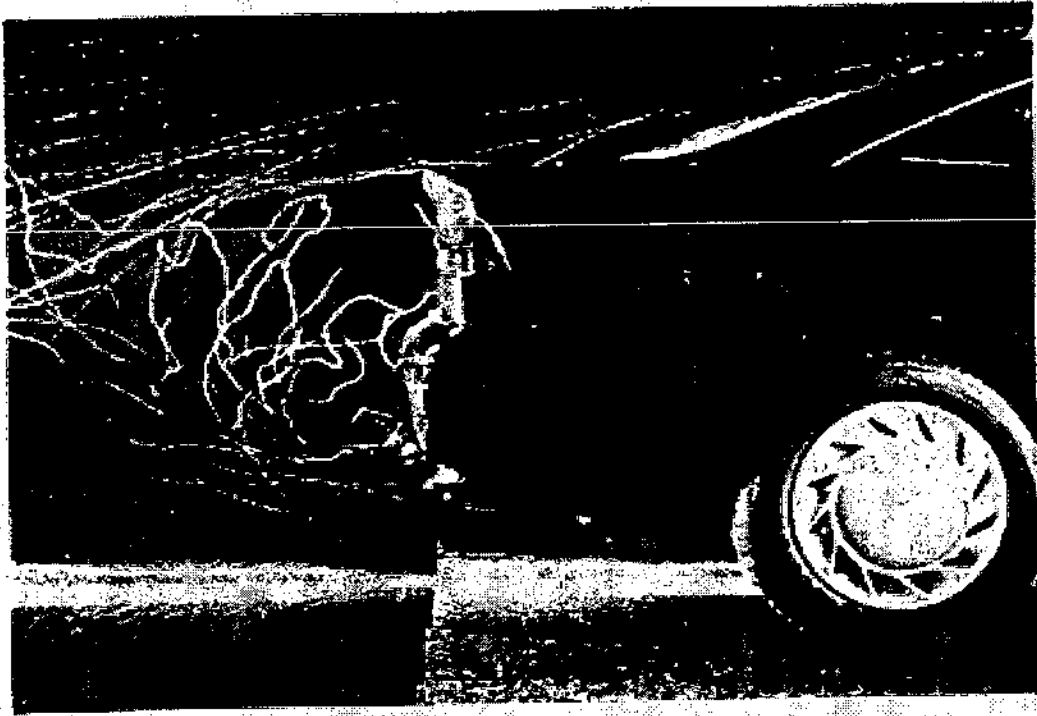


επιλέγεται καλά, τα σχέδια ροής είναι σαφώς ορατά στις φωτογραφίες (σχ. 2.32). Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα καλή για την απεικόνιση ροής που χρησιμοποιεί μικρής κλίμακας μοντέλα οχημάτων (σχ. [2.31]), αλλά περιστασιακά εφαρμόζεται και σε μεγάλα αυτοκίνητα [2.33].

Μια έμμεση μέθοδος για την απεικόνιση της ροής είναι η καταγραφή και μετα-επεξεργασία των δεδομένων ταχύτητας και πίεσης. Διανύσματα ροής, γραμμές ταχύτητας, πίεσης ή στροβιλισμού καθιστούν την ροή ορατή.



**Σχ. 2.31 Τεχνική ακτίνων λέιζερ για την απεικόνιση του σχεδίου ροής γύρω από το όχημα**



*Σχ. 2.32 Η απεικόνιση ροής στα οπίσθια ίχνη που χρησιμοποιούν το φυσαλίδες σαπουνιού γεμισμένες με ήλιο: φωτογραφία από την σήραγγα αέρα Pininfarina*

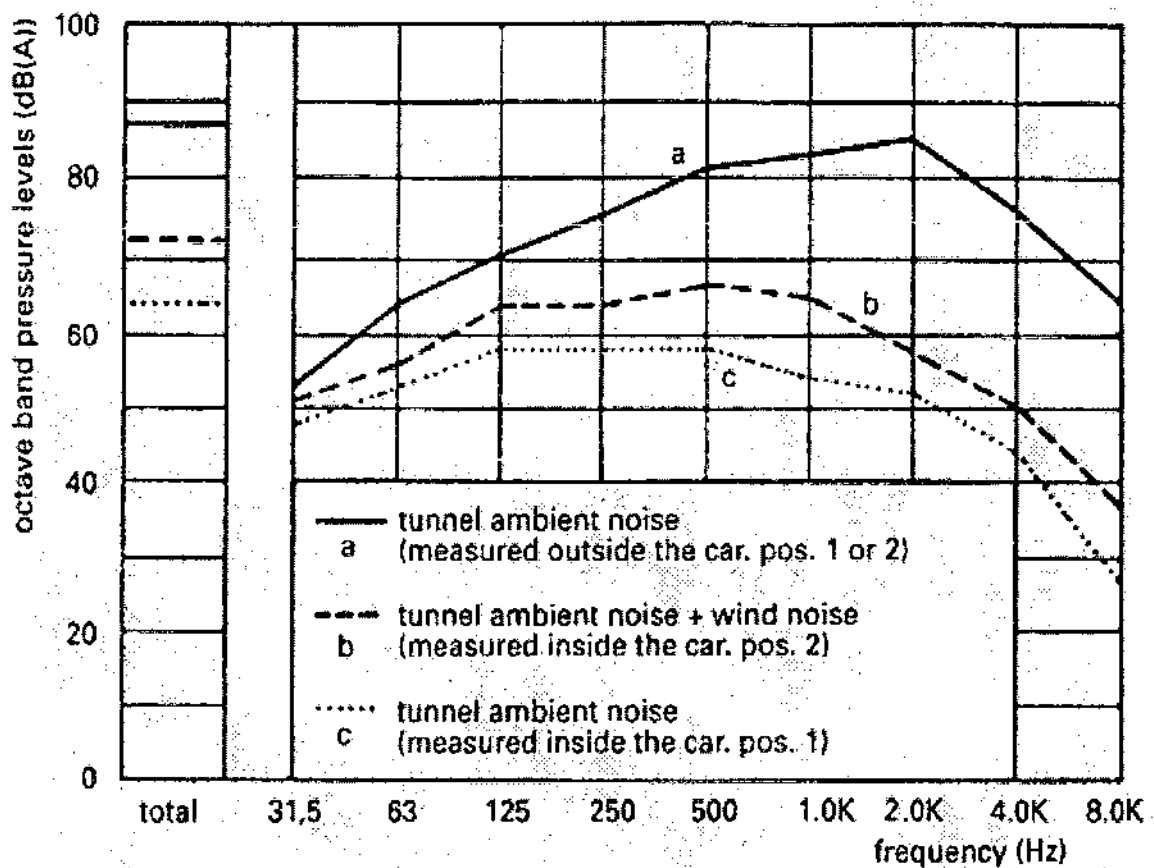
### **2.3.8 Μέτρηση θορύβου αέρα σε μια σήραγγα αέρα**

Ο μηχανικός δοκιμής βρίσκεται αντιμέτωπος με δύο διαφορετικούς στόχους όταν πρέπει να ερευνήσει το θόρυβο αέρα σε μια αεροσήραγγα:

Μέτρηση του θορύβου αέρα μέσα στο όχημα.

Μέτρηση θορύβου ή μέτρηση ταλάντωσης πίεσης στις περιοχές των πιθανών πηγών θορύβου αέρα, π.χ., έξω από το όχημα.

Εφ' όσον οι αερο-ακουστικές σήραγγες αέρα δεν ήταν διαθέσιμες, διάφορες τεχνικές εφαρμόστηκαν για να χωρίσουν το θόρυβο αέρα λόγω της ροής γύρω από το όχημα από τον θόρυβο των γενικά πολύ δυνατών σηράγγων αέρα: το επίπεδο θορύβου στις σημερινές αερο-ακουστικές σήραγγες είναι τόσο χαμηλό, ώστε αυτά τα μέτρα δεν απαιτούνται πλέον. Ακόμη και υποκειμενική αξιολόγηση του θορύβου και δοκιμές σχετικά με την αναγνώριση του ήχου μπορούν να εκτελεσθούν σε αυτές τις σήραγγες.

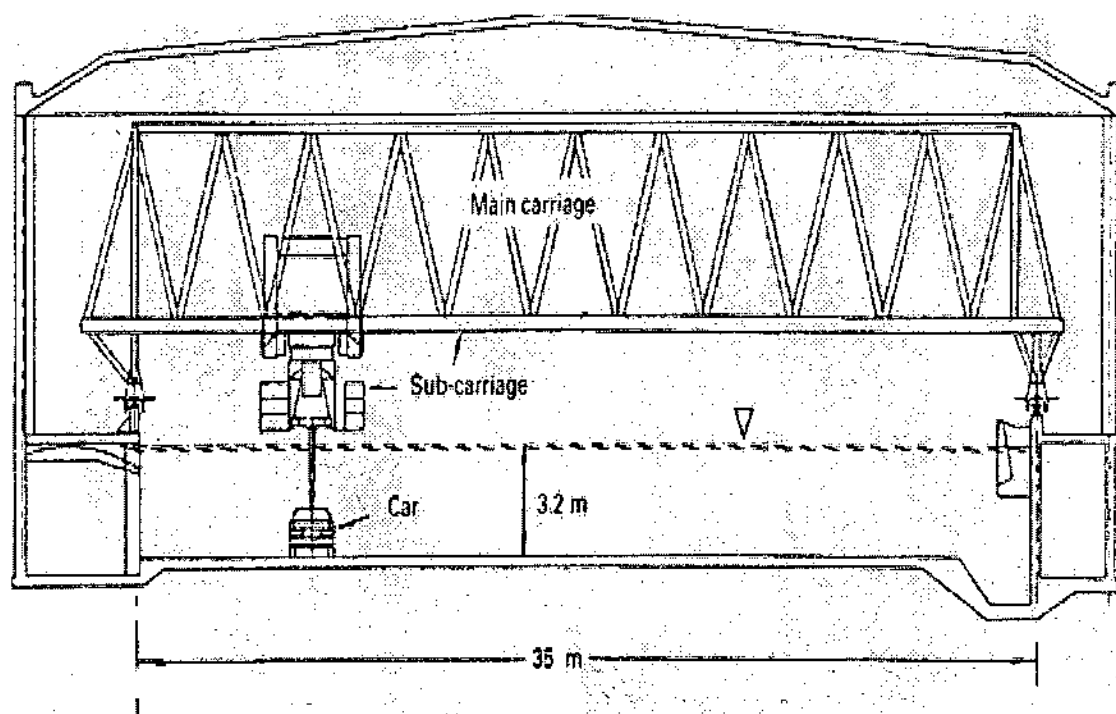


Σχ. 2.33 Μέτρηση θορύβου αέρα στην αεροσήραγγα. Η γραφική παράσταση θορύβου αέρα για το χώρο των επιβατών μπορεί να συναχθεί από την αντι-λογαριθμική αφαίρεση των καμπυλών b και c. (Θέση 1, αυτοκίνητο έξω από τη ροή αέρος. Θέση 2, αυτοκίνητο που υποβάλλεται στη ροή αέρος).

### 2.3.9 Λεκάνη ύδατος σε συνάρτηση με την σήραγγα αέρα

Το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται στο δάπεδο της αεροσήραγγας εξασθενίζει την προσομοίωση της ροής κάτω από το όχημα. Όσο λιγότερο καθαρό είναι το δάπεδο (π.χ., αθλητισμός και αγωνιστικά αυτοκίνητα) τόσο μεγαλύτερες είναι οι αποκλίσεις που αναμένονται σε σύγκριση με το δρόμο. Η σχετική μετακίνηση μεταξύ του οχήματος και του δρόμου μπορεί να προσομοιωθεί με την κίνηση του πατώματος του τμήματος δοκιμής. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια μιας κινούμενης ζώνης. Μια εναλλακτική λύση προσφέρεται με τη ρυμούλκηση του αυτοκινήτου δοκιμής σε μια λεκάνη ύδατος (ρυμουλκούμενη δεξαμενή, η οποία αρχικά σχεδιάστηκε για τη χρήση στη ναυτική αρχιτεκτονική. Το σχ. 2.34- παρουσιάζει μια διατομή της χρησιμοποιούμενης ρυμουλκούμενης δεξαμενής, όπου το όχημα δοκιμής ρυμουλκείται από μια δοκό στέγης συνδεδεμένος με ένα κινούμενο βαγόνι.

Προκειμένου να ληφθεί ο ίδιος αριθμός Reynolds, ένα όχημα στο ύδωρ πρέπει να κινηθεί στο μόνο 1/15 της ταχύτητας που κινείται στο δρόμο ή φυσιέται ενάντια σε μια σήραγγα αέρα. Το σχεδιάγραμμα της ολικής πίεσης μεταξύ του κάτω μέρους του οχήματος και της οδικής επιφάνειας, όπως και τη κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο του δαπέδου, ερευνήθηκε από τον L. LARSSON, σε μια σήραγγα αέρα και σε μια ρυμουλκούμενη δεξαμενή. Το σχ. 2.35 παρουσιάζει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι διαφορές στατικής πίεσης είναι μικρές. Εντούτοις, λόγω της μεγάλης περιοχής του επιπέδου και του οχήματος όπου η στατική πίεση ενεργεί, μετρήθηκε μια διαφορά στην δύναμη ανέλκυσης, όπως αναμενόταν.

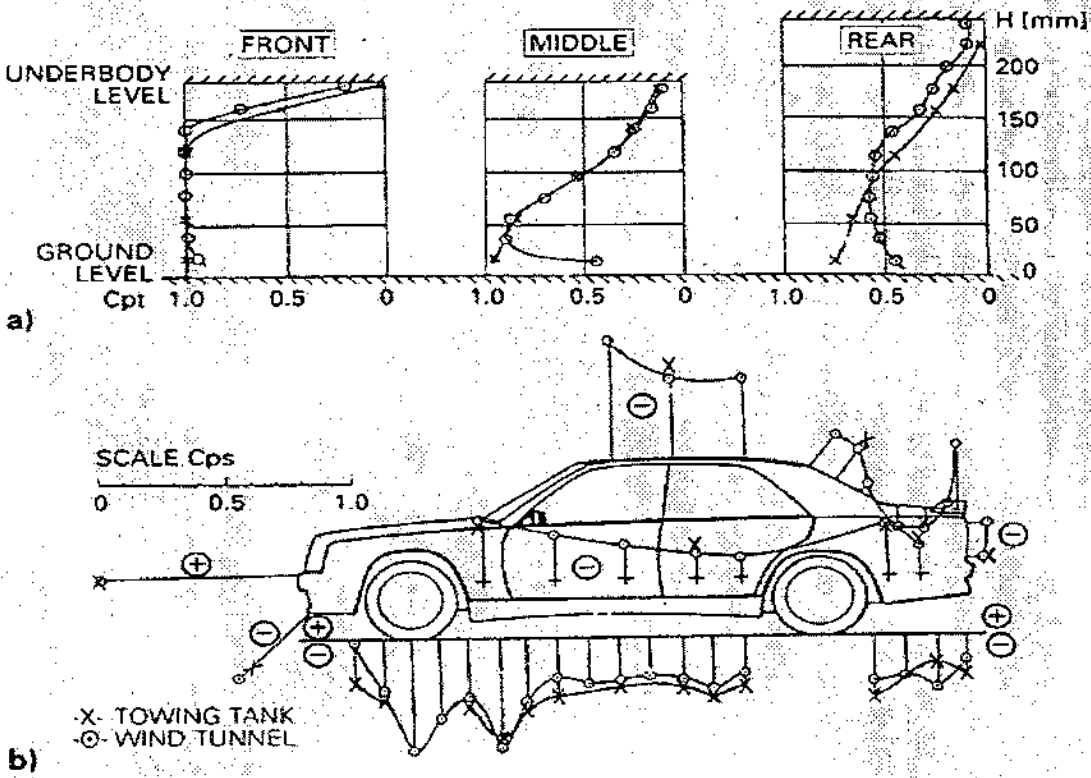


**Σχ. 2.34 Μετρήσεις ροής με ρυμούλκηση του οχήματος μέσα σε μια δεξαμενή.**

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε μια ρυμουλκούμενη δεξαμενή η συνολική δύναμη έλξης καταγράφεται με έναν αισθητήρα φορτίου που τοποθετείται στη ρυμουλκούμενη ράβδο. Η αντίσταση κύλισης των τροχών λαμβάνεται υπόψη δεδομένου ότι η μέτρηση επαναλαμβάνεται με την ίδια ταχύτητα, αλλά στον αέρα. Για τη μέτρηση των δυνάμεων ανέλκυσης, οι αναρτήσεις των τροχών είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες δύναμης αντί των ελατηρίων και των απορροφητών των δονήσεων.

Οι δοκιμές στη ρυμούλκηση των δεξαμενών προσφέρουν πρόσθετα πλεονεκτήματα εάν οι λεπτομέρειες ροής πρόκειται να παρατηρηθούν σε πραγματικά αυτοκίνητα. Παραδείγματος χάριν, οι έρευνες σχεδίων ροής στο τμήμα της μηχανής έχουν διεξαχθεί στο ύδωρ. Η ροή

απεικονίστηκε δι' εγχύσεως ενός χρωματισμένου ανιχνευτή. Εντούτοις, προετοιμάζοντας ένα αυτοκίνητο για δοκιμές στο νερό, και μετά από τη δοκιμή το αυτοκίνητο μπορεί μετά βίας να χρησιμοποιηθεί άλλο. Φυσικά, αυτό δεν ισχύει για τη ρυμούλκηση μειωμένης κλίμακας μοντέλων.



Σχ. 2.35 Αεροσήραγγες συναρτήσεως των δεδομένων της δεξαμενής ρυμούλκησης: (α) σχεδιάγραμμα ολικής πίεσης μεταξύ του επιπέδου και της οδικής επιφάνειας, (β) κατανομή στατικής πίεσης γύρω από το σώμα.

## 2.4 Οδικές εξεταστικές μέθοδοι

### 2.4.1 Μέτρηση της αεροδυναμικής δύναμης έλξης σε μια δοκιμή με σβησμένη μηχανή

Οι μετρήσεις έλξης εκτελούνται γενικά σε μια σήραγγα αέρα. Οι διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί επίσης για να μετρήσουν το  $c_D$  έξω από μια σήραγγα αέρα, δηλ., στο δρόμο. Εντούτοις, λόγω των ανεξέλεγκτων περιβαλλοντικών συνθηκών στο δρόμο, η εμπιστοσύνη

σε αυτές τις μετρήσεις είναι περιορισμένη. Επιπλέον, ένας ακριβής χωρισμός της αεροδυναμικής έλξης και των μηχανικών αντιστάσεων είναι δύσκολος.

Η πιο συνηθισμένη δοκιμή που χρησιμοποιείται είναι η δοκιμή με σβησμένη μηχανή που περιγράφεται στο σχήμα 2.36. Αυτή η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί σε ένα μακρύ, επίπεδο, και σε επίπεδο οδήγησης. Ο W. H. WALSTON έχει περιγράψει πώς η επιρροή του φυσικού αέρα μπορεί να αποβληθεί. Καλύτερα ακόμα, η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί χωρίς καθόλου αέρα.

Το όχημα δοκιμής επιταχύνεται αρχικά με υψηλή ταχύτητα και έπειτα αφήνεται να κυλίσει ελεύθερα με την αποσύνδεση της μηχανής. Η αλλαγή της ταχύτητας του οχήματος καταγράφεται συνεχώς. Η επιβράδυνση εμφανίζεται με τη βοήθεια των αντιστάσεων που ενεργούν στο όχημα, δηλαδή η αεροδυναμική έλξη και οι μηχανικές αντιστάσεις. Λαμβάνεται η ακόλουθη εξίσωση.

$$m(1+f) \frac{dV(t)}{dt} = D_M + D_A \quad (2.13)$$

όπου

$m$  = η μάζα του οχήματος

$f$  = η πραγματική αύξηση της μάζας του οχήματος λαμβάνοντας υπόψη τις περιστρεφόμενες μάζες

$V(t)$  = η ταχύτητα του οχήματος συναρτήσει του χρόνου (m/s)

$D_M$  = η μηχανική αντίσταση (N), που αποτελείται από την αντίσταση κύλισης των τροχών και τις αντιστάσεις της μετάδοσης και των ρουλεμάν

$D_A$  = η αεροδυναμική έλξη (N)

το  $f$  λαμβάνεται από την εξίσωση της κίνησης των συνιστωσών περιστροφής

$$f = \frac{\frac{I_d}{r_d^2} + \frac{I_0}{r_0^2}}{m} \quad (2.14)$$

όπου

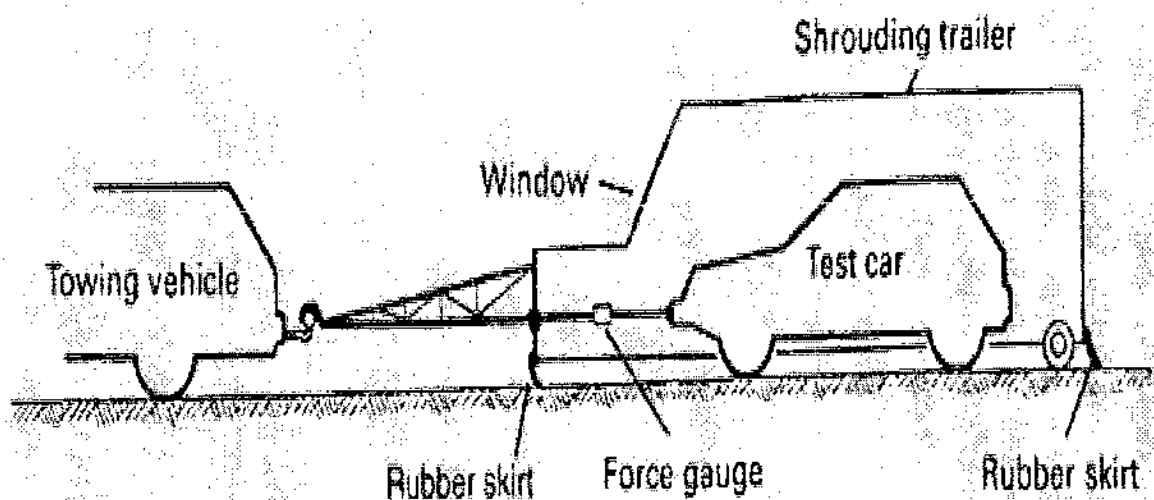
$I_d$  = η ροπή αδράνειας των συνιστωσών περιστροφής της μετάδοσης κίνησης συμπεριλαμβανομένων των τροχών του άξονα οδήγησης ( $Nms^2$ )

$I_0$  = η ίδια τιμή για τον μη οδηγικό άξονα ( $Nms^2$ )

$r_d, r_0$  = οι αεροδυναμικές ακτίνες κύλισης των τροχών στους οδηγικούς και μη-οδηγικούς άξονες, αντίστοιχα (m)

Μια μέθοδος για να καθοριστεί η μηχανική αντίσταση είναι να διεξαχθούν εργαστηριακές δοκιμές. Εντούτοις, η εμπιστοσύνη σε αυτήν την διαδικασία δεν είναι ικανοποιητική. Η κύρια δυσκολία συνίσταται ακριβώς να στην μέτρηση της αντίστασης κύλισης των τροχών. Οι ιδιαίτερες διαφορές βρίσκονται στις μετρήσεις στα τύμπανα (η εξωτερική ή εσωτερική επιφάνεια ενός τυμπάνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί) έναντι του επίπεδου του δρόμου. Επιπλέον, η πρόσθετη αντίσταση κύλισης τροχών που προκαλείται από τη γεωμετρία ανάρτησης του οχήματος (δηλ., κύρτωμα τροχών,) πρέπει επίσης να εξεταστεί.

Σαν εναλλακτική λύση, η μηχανική έλξη μπορεί να καθοριστεί από μια οδική δοκιμή στην οποία η αεροδυναμική έλξη αποβάλλεται τεχνητά. Αυτό γίνεται με τη χρησιμοποίηση ενός ρυμουλκούμενου οχήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.36, που ρυμουλκείται από ένα όχημα και αρκετά μεγάλος να καλύψει και να κρατήσει το όχημα δοκιμής. Έχει τις ρόδες στο οπίσθιο άκρο και συνδέεται με το όχημα που το ρυμουλκεί με ένα άγκιστρο. Η ράβδος σύνδεσης στο όχημα δοκιμής (μέσα στο ρυμουλκούμενο όχημα που το καλύπτει) έχει έναν αισθητήρα για να μετρήσει τη δύναμη ρυμούλκησης. Τα πλευρικά τοιχώματα είναι εξοπλισμένα με λαστιχένιες παρυφές που είναι σε επαφή με την οδική επιφάνεια έτσι ώστε το όχημα δοκιμής να καλύπτεται πλήρως, έτσι ώστε η αεροδυναμική έλξη να είναι ίση με μηδέν. Αυτή η μέθοδος αποβάλλει όλα τα μειονεκτήματα του προηγούμενου, εάν η μέτρηση της μηχανικής αντίστασης εμφανίζεται αμέσως μετά από την δοκιμή με σβησμένη μηχανή. Εντούτοις, ένα μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι ο οδηγός του οχήματος δοκιμής πρέπει να εκτελέσει κάποια διόρθωση οδήγησης προκειμένου να μην παρεκκλίνει από την πορεία του ρυμουλκούμενου οχήματος. Αυτό αυξάνει απαραιτήτως τη μηχανική έλξη. Επιπλέον, για λόγους ασφάλειας, η ταχύτητα δοκιμής πρέπει να περιοριστεί κατά οδήγηση των οχημάτων ανά ζευγάρι. Για να επιτύχει τα αξιόπιστα αποτελέσματα, ολόκληρη δοκιμαστική λειτουργία πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές και τα αποτελέσματα να υπολογιστούν κατά μέσο όρο.



**Σχ. 2.36 Προσδιορισμός της αντίστασης κύλισης χρησιμοποιώντας ένα όχημα που να καλύπτει το όχημα δοκιμής.**

Η συνολική έλξη μπορεί επίσης να μετρηθεί από την ώθηση με μια ράβδο του οχήματος δοκιμής από ένα άλλο όχημα. Η δύναμη ώθησης που μετριέται στην ράβδο είναι ίση με το συνολική έλξη. Ο χωρισμός της αεροδυναμικής έλξης γίνεται όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Εντούτοις, η ράβδος ώθησης πρέπει να είναι αρκετά μακριά για να αποφευχθεί οποιαδήποτε παρέμβαση μεταξύ των δύο οχημάτων. Η απόσταση μεταξύ τους πρέπει να είναι περισσότερη από δύο μήκη οχημάτων. Αυτή η απαίτηση κάνει δύσκολη την χρησιμοποίηση της μεθόδου ώθησης.

Ο B.A.P. REMENDA και ο T.T. BUCKLEY έχουν περιγράψει μια μέθοδο σύμφωνα με την οποία η αεροδυναμική έλξη συναρτήσει της γωνίας παρέκκλισης μπορεί να καθοριστεί σε μια δοκιμή με σβησμένη μηχανή σε έναν δρόμο με μια ορισμένη κλίση και με φυσικό άνεμο. Τα στοιχεία που καταγράφονται κατά τη διάρκεια ελεύθερης κίνησης σε κατηφόρα σε έναν κύκλο 0.5-1.0 δευτερολέπτου, όπως το λεπτό τέντωμα ως χρονική λειτουργία, συνολική πίεση (μετρητής-Κιέλ ή ανεμόμετρο) και γωνία παρέκκλισης, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για τον επαναληπτικό υπολογισμό, ο οποίος παράγει τελικά την αεροδυναμική έλξη που σχεδιάζεται συναρτήσει της γωνίας παρέκκλισης. Ο G. M. LE GOOD έχει εκτελέσει παρόμοιες δοκιμές για να συγκρίνει τους συντελεστές έλξης που κερδίζονται στο δρόμο με εκείνους που μετριοούνται σε μια σήραγγα αέρα.



## 2.4.2 Δοκιμές μετωπικού ανέμου

Η ευαισθησία στην ενός οχήματος στον μετωπικό άνεμο μπορεί να αξιολογηθεί εάν το όχημα υποβάλλεται σε ένα τεχνητά δημιουργημένη ριπή μετωπικού ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ευθείας μπροστά κίνησης στο δρόμο. Το σχ. 2.37 παρουσιάζει μια σχηματική απεικόνιση μιας τέτοιας δοκιμής. Η πλευρική απόκλιση του οχήματος από την αρχική ευθεία κατεύθυνση θεωρείται συνήθως μια χαρακτηριστική παράμετρος.

Οι δοκιμές μετωπικού ανέμου μπορούν να εκτελεσθούν με δύο τρόπους.

Ο οδηγός δεν εφαρμόζει οποιαδήποτε διόρθωση οδήγησης. Κατά τη διάρκεια της ολόκληρης δοκιμής, το τιμόνι κρατιέται είτε στην αρχική θέση του (σταθερός έλεγχος) είτε αυτό παραμένει άθικτο από τον οδηγό (ελεύθερος έλεγχος).

Ο οδηγός προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την πλευρική απόκλιση του οχήματος με διορθώσεις του τιμονιού.

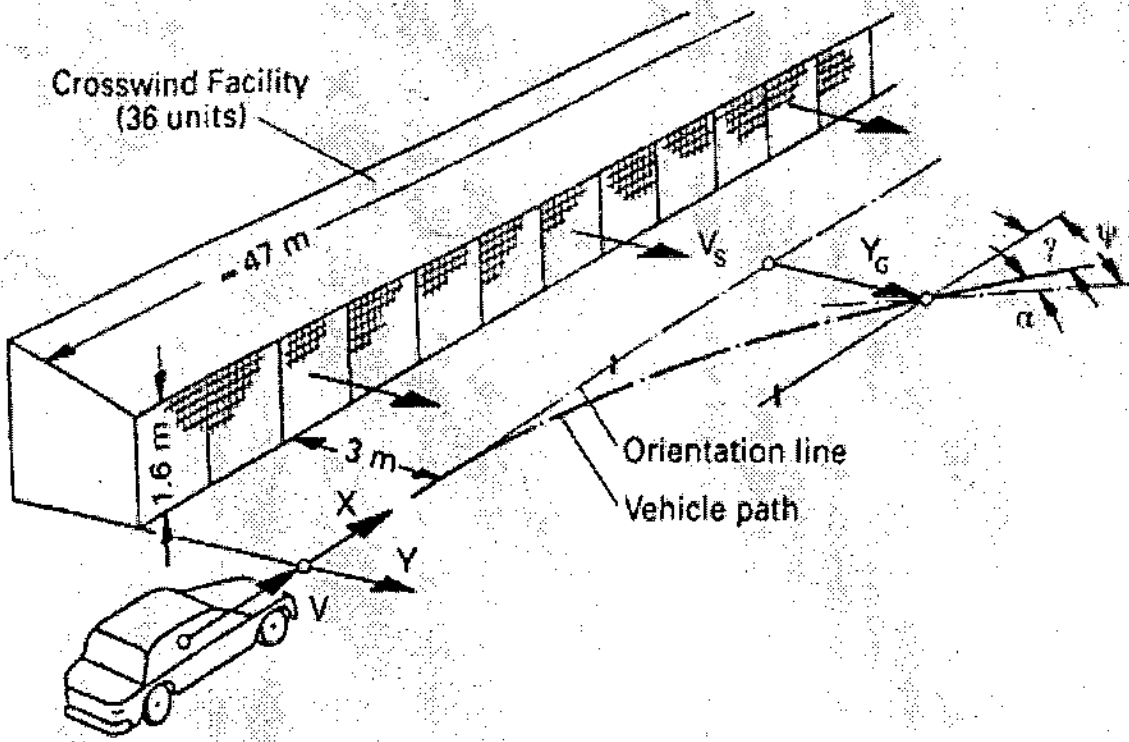
Η πρώτη μέθοδος εξετάζει την αντίδραση του οχήματος μόνου. Επομένως, είναι καλή για συγκριτικές δοκιμές. Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει την αντίδραση του οδηγού. Κατά συνέπεια το αποτέλεσμα της δοκιμής εξαρτάται επίσης από τον οδηγό. Εντούτοις, η δεύτερη διαδικασία έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι το κλειστό κύκλωμα ελέγχου που αποτελείται από τον οδηγό, το όχημα, και το δρόμο αναπαράγεται και είναι πολύ κοντά στην πραγματική κατάσταση.

Η πλευρική απόκλιση οχημάτων μπορεί να μετρηθεί με δύο τρόπους:

Ο οδηγός εισάγει τη διαδρομή δοκιμής σε μια δεδομένη γραμμή προσανατολισμού, παράλληλη στην μπαταρία των γεννητριών του μετωπικού ανέμου (σχ. 2.37). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η θέση του οχήματος σημειώνεται στο δρόμο με ένα όπλο ψεκασμού χρώματος ή λαμβάνεται από τους αισθητήρες που εισάγονται κάτω στο δρόμο. Επίσης, διαδοχικές φωτογραφίες του μετώπου του οχήματος χρησιμοποιούνται για αυτόν το λόγο.

Οι συσκευές μέτρησης που τοποθετούνται στο όχημα καταγράφουν την πορεία του οχήματος πριν και κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την πλευρική μετακίνησή του είναι βασισμένος στην ακριβή μέτρηση της πλευρικής επιτάχυνσης του οχήματος. Η πλευρική απόκλιση του οχήματος βρίσκεται μέσω των δύο διαδοχικών ολοκληρώσεων του σήματος επιτάχυνσης. Προκειμένου να μετρηθεί η πλευρική επιτάχυνση, το επιταχύμετρο τοποθετείται σε μια γυροσκοπικά σταθεροποιημένη πλατφόρμα, δηλ., κατά τη διάρκεια ολόκληρης της δοκιμής διατηρεί την αρχική οριζόντια θέση του σε ένα σύστημα συντεταγμένων σχετικό με την γη. Τέλος, η ταχύτητα του οχήματος πρέπει να

καταγραφεί ακριβώς προκειμένου να καθοριστεί η πλευρική απόκλιση του οχήματος από την αρχική πορεία που ήταν παράλληλη στους ανεμιστήρες.



Σχ. 2.37 Δοκιμή μετωπικού ανέμου

Η μέθοδος (α) είναι γρήγορη, εύκολο να εκτελεσθεί, και δεν χρειάζεται οποιοδήποτε περίπλοκο εξοπλισμό δοκιμής. Εντούτοις, είναι λιγότερο ακριβής από τη δεύτερη μέθοδο. Μια πηγή σφάλματος είναι η δυσκολία να εισαχθεί ο μετωπικός άνεμος με μηδενικές γωνίες παρέκκλισης, λόγω των διορθώσεων οδήγησης του οδηγού εκ των προτέρων. Αυτό το σφάλμα δεν εμφανίζεται κατά χρησιμοποίηση μιας γυροσκοπικά σταθεροποιημένης συσκευής δοκιμής (μέθοδος (β)), εάν η καταγραφή της πλευρικής απόκλισης αρχίζει πριν την είσοδο του οχήματος σε μετωπικό άνεμο.

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η ευαισθησία ενός οχήματος σε μετωπικό άνεμο δεν εξαρτάται μόνο από τις αεροδυναμικές ιδιότητές του. Η συμπεριφορά της, παραδείγματος χάριν, επηρεάζεται με την αλλαγή των πιέσεων καταπόνησης στο μέτωπο και στο οπίσθιο τμήμα σε δύο διαδοχικές δοκιμές. Αν και οι αεροδυναμικοί συντελεστές δεν αλλάζουν, η πλευρική απόκλιση του οχήματος που προκαλείται από την αεροτομή αυξάνεται αρκετά όταν

το όχημα έχει μια μεγαλύτερη τάση να αλλάξει πορεία. Δηλαδή παραδείγματος χάριν, όταν οι πίεςεις των μπροστινών ροδών είναι υψηλότερες και εκείνες των οπίσθιων ροδών χαμηλότερες.

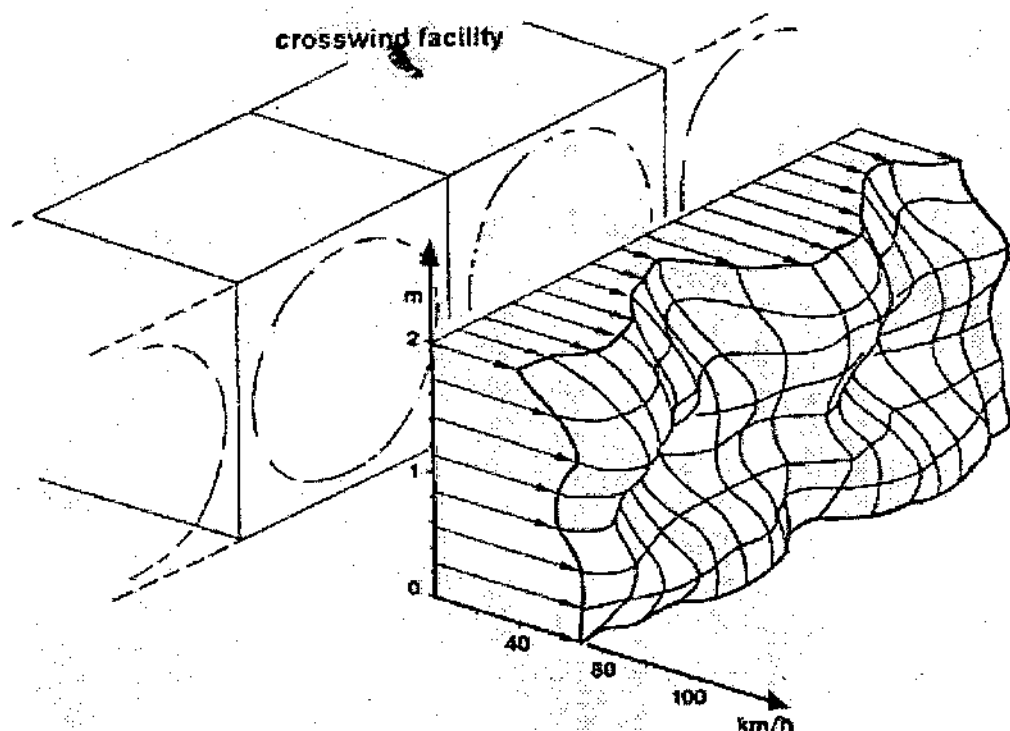
Διάφορες διαφορετικές εγκαταστάσεις μετωπικού ανέμου είναι σε λειτουργία. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία τους συνοψίζονται στον πίνακα 2.4. Η σύγκρισή τους δείχνει μεγάλες διαφορές σχετικά με το μήκος τους και την ταχύτητα του αέρα. Κατά συνέπεια, τα στοιχεία δοκιμής που λαμβάνονται στις διαφορετικές εγκαταστάσεις είναι συγκρίσιμα μόνο με επιφυλάξεις. Επιπλέον, δεδομένου ότι η ταχύτητα αέρα και ο σχεδιασμός αλλάζουν με την απόσταση στη μπαταρία αεροτομής, προσοχή πρέπει να ληφθεί στο ότι το όχημα δοκιμής εισάγεται στην διαδρομή δοκιμής μετωπικού ανέμου σε μια ακριβώς καθορισμένη απόσταση από τις γεννήτριες μετωπικού ανέμου.

**Πίνακας 2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων μετωπικού ανέμου**

Crosswind Facility	Volkswagen (Germany)	Mercedes-Benz (Germany)	MIRA (GB)	Institute for Road Vehicles TNO (Holland)	Toyota (Japan)	Nissan (Japan)	Japan Automobile Research Institute (JARI)	Ford (Germany)
Crosswind gust length	47 m	35 m	36 m	11 m	44 m	12 m	15 m	17 m
Maximum crosswind speed	80 km/h	70 km/h	72 km/h	120 km/h	35 km/h 70 km/h	80 km/h	48 km/h 80 km/h 106 km/h	73 km/h (55° inclined)
Number of fans	36	16	3	5	15	2	5	6
Power	VW Petrol engines 44 kW each	Electric motors 100-125 kW each	Gas turbine aircraft engine (Rolls-Royce Avon, thrust: 45 kN)	Petrol engines each 147 kW	Electric motors 95 kW each	V-8 petrol engines 132 kW each	Electric motors 320 kW each	V-8 Petrol engines 149 kW each

Το προκύπτον διάνυσμα ταχύτητας αέρα που ενεργεί στο όχημα αποτελείται από την οδική ταχύτητα και την συνιστώσα του μετωπικού ανέμου. Ιδιαίτερες αποκλίσεις παρατηρούνται όταν συγκρίνονται τα προκύπτοντα σχεδιαγράμματα αέρα σε μια σήραγγα αέρα, με εγκατάσταση μετωπικού ανέμου, και υπό πραγματικές συνθήκες στο δρόμο. Το προκύπτον σχεδιάγραμμα μετωπικού ανέμου που διευκρινίζεται εκεί είναι πολύ εξιδανικευμένο. Ένα σχεδιάγραμμα αέρα που μετρείται μπροστά από μια διαδρομή με μετωπικό άνεμο φαίνεται στο σχ. 2.38

Ένα λάθος που υφίσταται συχνά στις δοκιμές μετωπικού ανέμου, ειδικά κατά την σύγκριση μέσω της πίεσης, είναι όταν κάποιος οδηγεί σε μια πάρα πολύ μεγάλη γωνία παρέκκλισης, συνήθως  $\beta = 45^\circ$ . Είναι αβέβαιο εάν τέτοιες υψηλές γωνίες παρέκκλισης μπορούν να εμφανιστούν σε υψηλή οδική ταχύτητα – και μόνο με τέτοιες ταχύτητες μπορεί ο μετωπικός άνεμος να είναι επικίνδυνος. Επιπλέον, στις πολύ μεγάλες γωνίες παρέκκλισης από την πορεία η ταξινόμηση των διαφόρων οχημάτων σχετικά με την ροπή παρέκκλισης  $c_N$  και την πλευρική δύναμη  $c_Y$  μπορεί ακόμη και να αντιστραφεί. Οι γωνίες παρέκκλισης  $\beta = 20-30^\circ$  θεωρούνται κατάλληλο φάσμα τιμών για πραγματικές συγκρίσεις ευαισθησίας στον πλαϊνό αέρα μεταξύ των οχημάτων.



Σχ. 2.38 Κατανομή της ταχύτητας του αέρα σε μια εγκατάσταση μετωπικού ανέμου

### 2.4.3 Οδικές δοκιμές ψύξης μηχανών

Λόγω των συνεχώς μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών, οι δοκιμές ψύξης μηχανής σε έναν δρόμο έχουν περιορισμένη αξία. Οι συστηματικές δοκιμές και ο ακριβής καθορισμός της μονάδας που ψύχεται είναι δύσκολοι. Γι' αυτό οι οδικές δοκιμές διεξάγονται γενικά μόνο για να ελέγξουν τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται σε μια σήραγγα αέρα και για να επιβεβαιώσουν την ισχύ τους.

Οι δοκιμές ψύξης με τη μέγιστη ταχύτητα είναι σχετικά εύκολες, υπό τον όρο ότι μια μακριά ισόπεδη επιφάνεια διαδρομή δοκιμής είναι διαθέσιμη. Η δοκιμές διαδρομής με κλίση (ανηφορικές), εντούτοις, δεν είναι εύκολες λόγω της δυσκολίας να βρεθούν, τουλάχιστον στην Ευρώπη, διαδρομές δοκιμής με μια σταθερή κλίση αρκετά μακριές για να επιτευχθούν σταθερές θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου και του πετρελαίου. Εντούτοις, αυτό το πρόβλημα μπορεί να παρακαμφθεί δεδομένου ότι ένα ειδικά σχεδιασμένο ρυμουλκό ρυμουλκείται με το όχημα δοκιμής σε επίπεδο δρόμο. Το ρυμουλκό σχεδιάζεται για να παραγάγει μια αυξανόμενη αντίσταση στην οδήγηση για να προσομοιωθεί με την διαδρομή υπό κλίση (ανηφόρα). Παρόμοια με τις δοκιμές σήραγγων αέρα, τα επιτευχθέντα αποτελέσματα εκφράζονται υπό μορφή θερμοκρασιών ATB.

Η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια ενός προγράμματος δοκιμής και συχνότερα είναι χαμηλότερη από αυτή που χρησιμοποιείται κανονικά σε μια ελεγχόμενης θερμοκρασίας σήραγγα αέρα. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της δοκιμής, η επιρροή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας στην τιμή ATB πρέπει να ληφθεί υπόψη, σύμφωνα με την παράγραφο 2.3.6.

Όχι όλοι οι όροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος ψύξης μηχανών μπορούν να προσομοιωθούν με μια σήραγγα αέρα ή στον επίπεδο δρόμο. Μια σημαντική παράμετρος είναι η επίδραση του ύψους. Ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής πίεσης που μειώνεται με το ύψος – σε 2500m είναι μόνο 0,74 bar – και η προκύπτουσα χαμηλότερη πυκνότητα αέρα, η απόδοση της μηχανής αλλάζει. Η προσομοίωση αυτής της συνθήκης δεν είναι δυνατή σε μια "κανονική" σήραγγα αέρα ή σε έναν δρόμο σε επίπεδο έδαφος.

#### ***2.4.4 Εναποθέσεις λυμάτων στις γυάλινες επιφάνειες και σε περιοχές του οχήματος***

Σε καθημερινή λειτουργία, ακαθαρσίες εναποτίθεται στο σώμα του οχήματος όταν αναδύεται είτε από τις ρόδες του οχήματος είτε από άλλα οχήματα. Για να αξιολογηθεί η επιρροή των αλλαγών σχεδίου λόγω ακαθαρσίας ενός οχήματος, η ακαθαρσία πρέπει να μετρηθεί με ποσοτικές μεθόδους. Τέτοιες μέθοδοι είναι διαθέσιμες για εφαρμογή στο δρόμο καθώς επίσης και σε μια σήραγγα αέρα.

Μια μέθοδος μέτρησης στο δρόμο της κατάθεσης των ακαθαρσιών στο σώμα του οχήματος που στροβιλίζεται επάνω από τις ρόδες περιγράφεται από τον W. H. HUCHO. Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, ένας δρόμος δοκιμής καλύφθηκε αρχικά με ένα καθορισμένο με σαφήνεια στρώμα ρύπου. Μικρές πλάκες τοποθετήθηκαν στο όχημα που εξετάζεται, οι οποίες ήταν

προζυγισμένες. Το όχημα δοκιμής οδηγήθηκε αρκετές φορές στο δρόμο δοκιμής. Κατόπιν τα πιάτα αφαιρέθηκαν και ζυγίστηκαν πάλι. Σε παρόμοια μέθοδο, οι W. HENTSCHEL και R. PIATEK χρησιμοποίησαν ένα καθαρό φύλλο αλουμινίου αντί των πλακών για να μετρήσουν το επίπεδο των ακαθαρσιών. Στο τέλος της δοκιμής, το φύλλο αλουμινίου υποβλήθηκε σε μια οπτική μέτρηση διαφάνειας.

Για να προσομοιωθεί μια εναπόθεση ακαθαρσιών σε μια σήραγγα αέρα, οι ακαθαρσίες του δρόμου που εκτινάσσονται από τους τροχούς μπορούν να αντικατασταθούν από το καθαρό νερό. Εάν δεν προσομοιώνεται η περιστροφή ροδών, το νερό ψεκάζεται στο κάλυμμα των τροχών. Οι μικρές πλάκες που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν το επίπεδο ακαθαρσιών επενδύονται με ένα λεπτό στρώμα ξηρού, υδροαπορροφητικού υλικού.

Μια άλλη μέθοδος προσομοίωσης είναι να τροφοδοτηθεί ταλκ στο ρεύμα αέρα και να εφαρμοστεί μια λεπτή ταινία λαδιού στις περιοχές του σώματος που θα διερευνηθούν. Το ταλκ εγχέεται είτε πίσω από τις ρόδες είτε στο στάσιμο νερό πίσω από το όχημα. Η συγκέντρωση της πούδρας που παρατηρείται στις επιφάνειες του οχήματος παρέχει πληροφορίες για τις εναποθέσεις ακαθαρσιών που αναμένονται υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ ευαίσθητη. Οι W. HENTSCHELL και P. PIATEK χρησιμοποίησαν μια παρόμοια μέθοδο στον ψεκασμό με εγχυτήρα διοξειδίου του τιτανίου (που αιωρείται στο νερό) πίσω από τις οπίσθιες ρόδες. Η συγκέντρωση των εναποθέσεων διοξειδίου του τιτανίου στις γυάλινες επιφάνειες σωμάτων και τις επιφάνειες του οχήματος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση.

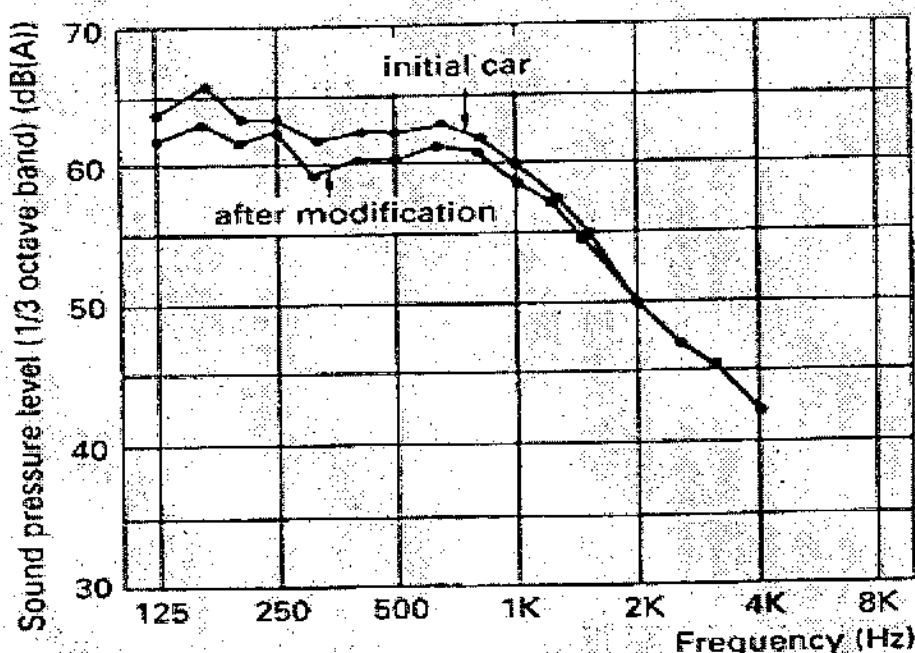
Η μέθοδος με την πούδρα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε μια σήραγγα αέρα. Εντούτοις, έχει το μεγάλο μειονέκτημα να ρυπαίνει την σήραγγα. Ο καθαρισμός μιας μεγάλης σήραγγας είναι πολύ ακριβός. Επιπλέον, ο ρύπος θα μπορούσε επίσης να εξασθενίσει τον ευαίσθητο εξοπλισμό σιφώνων αέρα.

#### ***2.4.5 Μέτρηση θορύβου αέρα στο δρόμο***

Οι μετρήσεις θορύβου αέρα στο δρόμο δεν γίνονται χωρίς προβλήματα επειδή ο θόρυβος από τον κινητήρα και τους τροχούς μπορεί να καλύψει το θόρυβο του αέρα. Επιπλέον, η τυχαία διακύμανση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του φυσικού αέρα εξασθενίζει τη δυνατότητα αναπαραγωγής των δοκιμών. Το σβήσιμο της μηχανής στις υψηλότερες ταχύτητες μπορεί να εξαλείψει τον θόρυβο του κινητήρα. Για να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος

των τροχών, χρησιμοποιούνται μερικές φορές ειδικές ρόδες με ένα αντίστοιχο ελαστικό μίγμα και χωρίς profile .

Η αξιολόγηση του θορύβου αέρα στο δρόμο και ακόμη και οι αντικειμενικές μετρήσεις περιορίζονται γενικά στις συγκρίσεις (σχ. 2.39). Ο θόρυβος καταγράφεται σε μια ταινία. Μετά από τη δοκιμή, η υποκειμενική εκτίμηση εκτελείται σε ένα εργαστήριο. Τα σήματα που καταγράφονται στις διάφορες συνθήκες δοκιμής οχημάτων αναπαράγονται. Μια αξιόπιστη σύγκριση είναι δυνατή μόνο κατά την γρήγορη μεταπήδηση από την μια κατάσταση δοκιμής σε άλλη.



Σχ. 2.39 Τυπικός έλεγχος θορύβου αέρα (διεξαχθείς στο δρόμο)

