



## 1.1 Πεδίο δράσης

### 1.1.1 Απαιτήσεις για μια αεροσήραγγα οχήματος

Πρέπει να εκτελεστούν πολλές εργασίες ανάπτυξης για να αναπαραχθούν όλα τα αεροδυναμικά και θερμαντικά χαρακτηριστικά ενός οχήματος. Πολλές από τις επιθυμητές ιδιότητες- πέρα από τη χαμηλή αντίσταση- μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με την τροποποίηση του εξωτερικού σχήματος. Ωστόσο, το σχήμα ενός οχήματος ‘παγώνει’ πολύ νωρίς κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, γι’ αυτό η αεροδυναμική εργασία θα πρέπει να ξεκινήσει ακόμη νωρίτερα. Οι καλές αεροδυναμικές ιδιότητες πρέπει να δουλευτούν πάνω στον πρώτο σχεδιασμό ενός νέου οχήματος, κάνοντας χρήση είτε παλιάς εμπειρίας (και διαίσθησης) είτε υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Όμως, για το προβλεπόμενο μέλλον το πείραμα θα παίζει το ρόλο κλειδί στην ανάπτυξη του σχήματος. Αυτή η δουλειά θα πρέπει να οργανωθεί έτσι ώστε να συμβαδίζει με την όλο και επιταχυνόμενη διαδικασία ανάπτυξης.

Από μία απλοποιημένη άποψη, η αεροδυναμική ανάπτυξη (που είναι ακόμη κυρίως πειραματική) παρουσιάζεται σε τέσσερα στάδια: Αρχίζει με ένα μοντέλο, μικρής ή πλήρους κλίμακας, με το δεύτερο να είναι συνήθως σκληρό μοντέλο. Συνεχίζεται με ένα πρωτότυπο που είναι έτοιμο για οδήγηση, συνοδεύεται από προπαραγωγή οχημάτων, και ολοκληρώνεται με δείγματα που λαμβάνονται απ’ τη γραμμή παραγωγής.

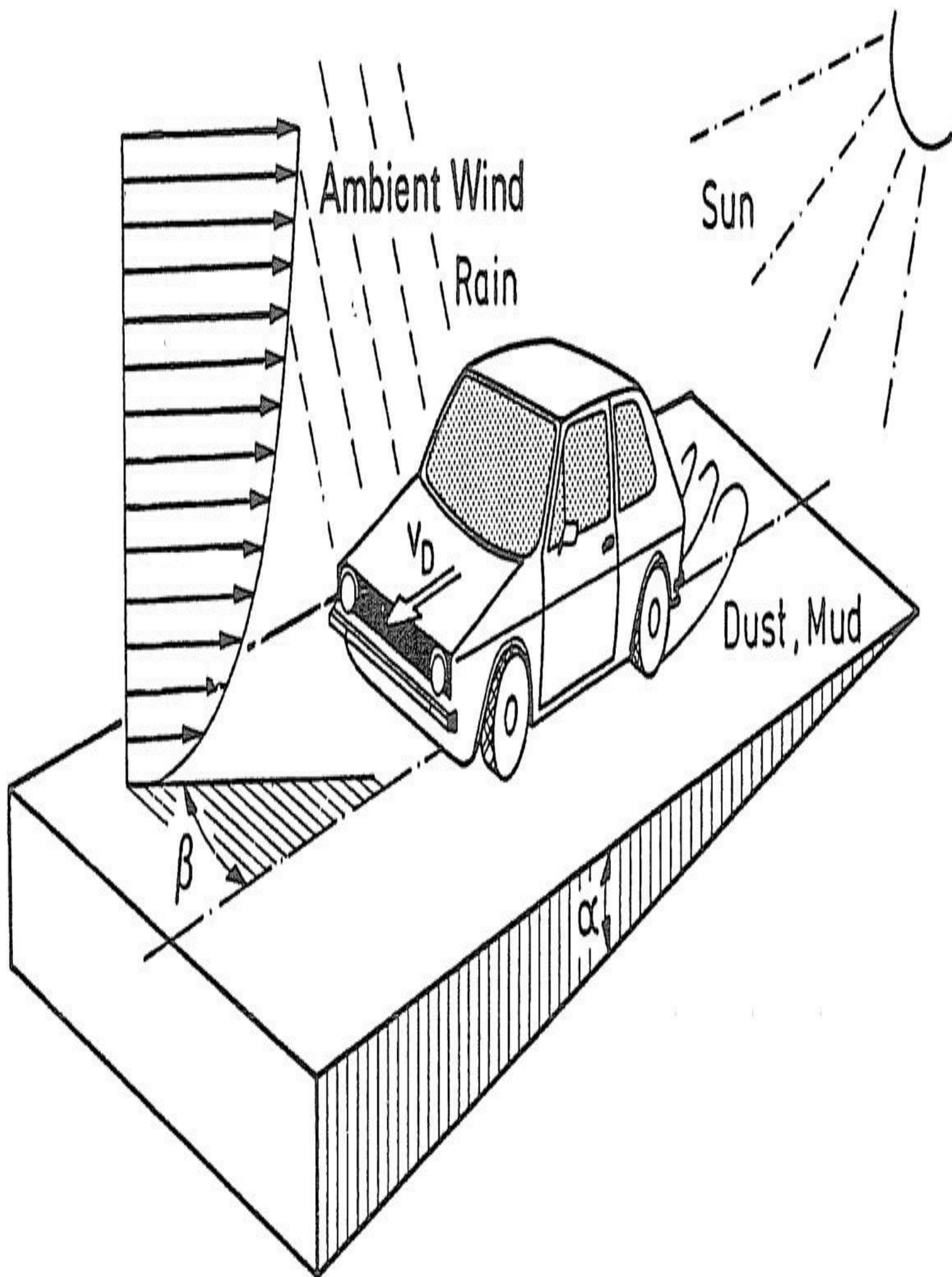
Στη πρώτη φάση η μεγαλύτερη δουλειά γίνεται στην αεροσήραγγα. Ωστόσο, τα πειράματα μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν στο νερό, είτε σε σήραγγα νερού είτε σε δεξαμενή ρυμούλκησης. Συγκεκριμένα προβλήματα, όπως η αντίσταση ενός οχήματος καθώς περνάει μέσα από ένα τούνελ ή η αναταπόκρισή του σε μπουρίνια και στα απόνερα περαστικών οχημάτων, εξετάζονται πάνω σε μοντέλα που περνούν

μέσα από ήρεμο αέρα και προσομοιωμένο πλευρικό αέρα αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης και τρίτης φάσης της ανάπτυξης, όταν υπάρχουν διαθέσιμα πρωτότυπα που είναι έτοιμα για οδήγηση, οι δοκιμές αεροσήραγγας συμπληρώνονται από δοκιμές σε δρόμο. Τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής βελτιστοποίησης θα φανούν στο δρόμο και όχι στην αεροσήραγγα. Βέβαια, η παρακολούθηση παραγωγής οχημάτων σε σχέση με την αεροδυναμική παρουσιάζεται μόνο στην αεροσήραγγα.

Μια αεροσήραγγα απλώς προσομοιώνει τις συνθήκες ενός δρόμου- δεν τις αναπαράγει επακριβώς. Όπως είναι χαρακτηριστικό στις προσομοιώσεις, υπάρχουν παρεκκλίσεις απ' την πραγματικότητα- θα αναλυθούν με περισσότερες λεπτομέρειες στο μέρος 1.3. Ακόμα και σήμερα είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε όλα τα λάθη που προέρχονται από εκεί. Ωστόσο, αναλύοντας την οδήγηση πάνω στο δρόμο, μπορούν τουλάχιστον να εξακριβωθούν. Αυτό γίνεται βλέποντας την εικόνα 1.1, που συλλέγει όλες τις μεταβλητές που επηρεάζουν τη ροή γύρω από ένα όχημα και το θερμικό του φορτίο: ταχύτητα οχήματος, θυελλώδεις άνεμοι, βροχή, ήλιος, σκόνη του δρόμου, και κλίση του εδάφους.







### Εικ.1.1 Ένα όχημα στο πραγματικό του περιβάλλον

Ένα πεδίο ροής αποτελείται από δύο συστατικά μέρη: Το ένα είναι η ισοδύναμη ροή αέρα ενός οχήματος σε μπροστινή κίνηση, και το άλλο προέρχεται από (θυελλώδεις) φυσικούς ανέμους. Το δεύτερο δημιουργεί ένα ταραχώδες οριακό στρώμα πάνω από το (φυσιολογικά τραχύ) έδαφος. Το μέγεθος των θυελλωδών στροβίλων έχει σχέση με το μήκος του οχήματος. Ως αποτέλεσμα, η ερχόμενη ροή σε ένα όχημα δεν είναι ομοιόμορφη. Αντιθέτως, το προφίλ της ταχύτητας είναι λοξό, γενικά, η κατεύθυνση της ταχύτητας ποικίλλει. Επιπροσθέτως, ο στροβιλισμός μπορεί να αυξηθεί λόγω υπερτιθέμενου ασταθούς πεδίου ροής που προέρχεται από την κίνηση ενός οχήματος μέσα από απόνερα άλλων οχημάτων, ή από τριγύρω εμπόδια όπως δέντρα, γέφυρες, σπίτια, κλπ.

Το πεδίο θερμοκρασίας πάνω στο δρόμο δεν είναι πάντα ομοιογενές. Το έντονο φώς του ήλιου θα θερμάνει την επιφάνεια του δρόμου περισσότερο απ' τον αέρα τριγύρω, δημιουργώντας ένα οριακό στρώμα θερμοκρασίας πάνω απ' το δρόμο.

Όλα μαζί, και τα πεδία που πλησιάζουν ένα όχημα, η ροή αέρα και η θερμοκρασία, είναι άκρως ανομοιογενή και ασταθή. Ο φυσικός άνεμος μπορεί να περιγραφεί μόνο μέσα από στατιστική, και είναι πολύ πιο περίπλοκο να αναπαραχθεί μέσα σε μία αεροσήραγγα- η διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας πάνω στο δρόμο δεν αναπαράγεται εξίσου.

Ο τρόπος με τον οποίο η ροή παρουσιάζεται σε μια αεροσήραγγα αυτοκινήτου είναι άκρως απλουστευμένη. Σε αντίθεση με την πραγματικότητα, η ερχόμενη ροή γίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο ενιαία, και το επίπεδο στροβιλισμού χαμηλό. Αυτές οι αυστηρές προδιαγραφές προέρχονται απ' την ιστορία. Για πολύ καιρό, οι δοκιμές οχημάτων που παρουσιάζονταν σε αεροσήραγγες, χρησιμοποιούνταν για αεροναυπηγικούς σκοπούς. Επομένως οι σήραγγες αυτές είχαν χτιστεί σύμφωνα με

τις ανάγκες εκείνης της αρχής. Αργότερα, όταν σχεδιάστηκαν συγκεκριμένες σήραγγες αυτοκινήτου οι προδιαγραφές αυτές μεταφέρθηκαν λίγο πολύ χωρίς σκέψη. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί, γιατί σχεδιάστηκαν για τη δημιουργία συγκριτικών αποτελεσμάτων από διαφορετικές αεροσήραγγες. Ωστόσο, η προσομοίωση των πραγματικών περιβαλλοντικών συνθηκών που υπάρχουν στο δρόμο- που δεν μπορεί έτσι κι αλλιώς να παρουσιαστεί με ακρίβεια- δε δικαιολογεί το κόστος που εμπεριέχεται.

Ένα χαρακτηριστικό της φύσης που μια αεροσήραγγα δεν μπορεί να αναπαράγει είναι η σιωπή της. Γενικά, οι αεροσήραγγες είναι πολύ θορυβώδεις. Κατα ένα μεγάλο μέρος, το επίπεδο θορύβου εξαρτάται απ' το βεντιλατέρ. Το πεδίο ήχου της σήραγγας καλύπτει το πεδίο ήχου που παράγεται από τη ροή γύρω απ' το όχημα, ο λεγόμενος « θόρυβος αέρα». Αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε μόνο με το σχεδιασμό των αεροακουστικών αεροσηράγγων, που όχι μόνο επέτρεψε την *αντικειμενική* διάκριση του θορύβου αέρα από το θόρυβο της σήραγγας αλλά και την *υποκειμενική* εκτίμηση του φάσματος του θορύβου αέρα (βλ μέρος 1.5.2).

Το κλίμα σε μια καμπίνα επιβατών δεν εξαρτάται μόνο απ' τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα αλλά και απ' την άμεση ακτινοβολία του ήλιου και τη διάχυτη ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Η ακτινοβολία του ηλιακού φωτός – ένταση, φάσμα, κατεύθυνση – μπορεί να προσομοιωθεί με μεγάλη ακρίβεια – η διάχυτη ακτινοβολία συνήθως αγνοείται. Επίσης, η άνεση των επιβατών εξαρτάται απ' την υγρασία.

Επομένως, πρέπει να αναπαραχθεί και αυτή η ιδιότητα του αέρα. Η υγρασία, αντιδρά με τα μέρη του συστήματος κλιματισμού. Άρα, κατά τη διάρκεια σχεδιασμού της εξάτμισης και του περιβλήματος, πρέπει να ληφθούν υπόψιν η πάχνη και ο πάγος.

Στην κακοκαιρία ένα όχημα εκτίθεται σε νερό που προέρχεται από πολλές κατευθύνσεις: φυσική βροχή, και βρώμικο νερό ανακυκλωμένο απ' τις δικές του ρόδες ή ρόδες άλλων οχημάτων. Η προσομοίωση της βροχής σε μια αεροσήραγγα είναι συγκριτικά εύκολη. Ψεκάζεται μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού στην ανενόχλητη ροή αέρα μπροστά απ' το όχημα. Πειράματα στο χώμα –πραγματικό ή προσομοιωμένο- πρέπει να πραγματοποιηθούν και στις αεροσήραγγες όμως με εξαιρετικά μικρές ποσότητες «βρωμιάς», διότι οι εγκατεστημένοι ανιχνευτές και οι αντλίες πίεσης είναι δύσκολο να προστατευθούν απ' τη βρωμιά και τα έξοδα

καθαρισμού είναι πολλά για μια μεγάλη αεροσήραγγα.

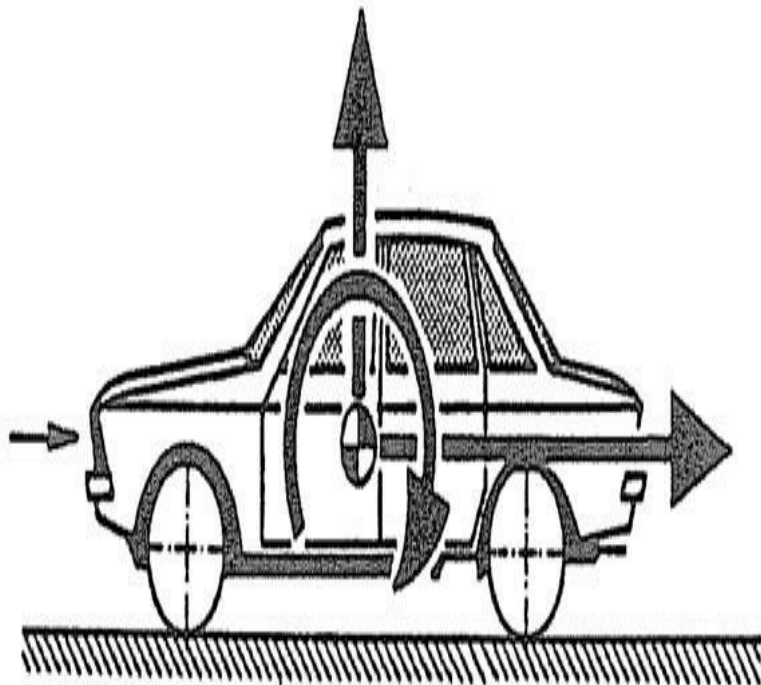
Κατά τη διάρκεια θερμικών δοκιμών ο κινητήρας πρέπει να είναι φορτωμένος ανάλογα με το οδικό φορτίο το οποίο πρόκειται να αναπαραχθεί. Πρέπει να είναι διαθέσιμο ένα δυναμομετρικό σασί, το οποίο να ταιριάζει στον μπροστινό ή πίσω τροχό οδήγησης. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του οχήματος, στο στάδιο του μοντέλου, η ροή θερμότητας του κινητήρα μπορεί να προσομοιωθεί από έναν εξωτερικό λέβητα.

Η περισσότερη δουλειά στο στάδιο του μοντέλου πρέπει να γίνει σε μια αεροσήραγγα. Οι σήραγγες νερού, είναι μόνο ένα συμπλήρωμα για ειδικούς σκοπούς. Είναι πολύ χρήσιμες στην απεικόνιση της ροής. Η επιλογή κλίμακας μοντέλου (είτε για αεροσήραγγα είτε για σήραγγα νερού) πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν (βλ. μέρος 1.4), και σε συνεργασία με το προσωπικό σχεδιασμού. Τα πλεονεκτήματα της μικρής κλίμακας –χαμηλό κόστος και για το μοντέλο και για την αεροσήραγγα, και εύκολο στη διαχείριση- πρέπει να ζυγιστούν ενάντια στον κίνδυνο για λάθη εξαιτίας ανεπαρκούς αξιοπιστίας στο μοντέλο και σε λάθος αριθμό Reynolds.

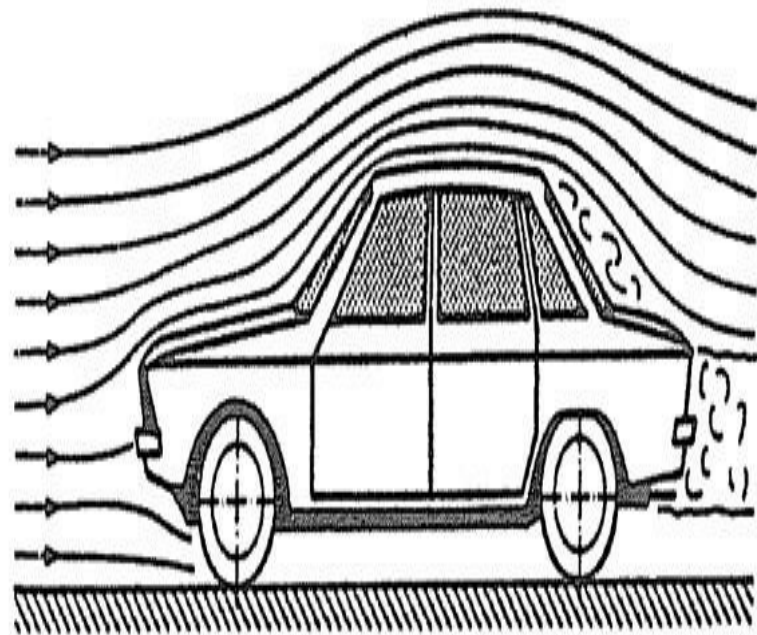
Απ' τη στιγμή που ένα πρωτότυπο είναι έτοιμο για οδήγηση θα πρέπει να αποφασιστεί εάν οι μεμονωμένες δοκιμές θα λάβουν μέρος στο δρόμο ή σε αεροσήραγγα. Οι δοκιμές στο δρόμο έχουν το πλεονέκτημα των ρεαλιστικών συνθηκών- ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα: οι συνθήκες δοκιμής επαναλαμβάνονται σπάνια, η εμπιστοσύνη και η εκτέλεση μετρήσεων είναι δύσκολο να εξασφαλιστούν. Τα πλεονεκτήματα μιας αεροσήραγγας είναι προφανή- γρηγορότερες και πιο ακριβείς τεχνικές μετρήσεων, και η δυνατότητα διαχωρισμού διαφόρων επιδράσεων, όπως για παράδειγμα θόρυβος απο τρένο, λάστιχα και αέρα. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλεφθούν οι περιορισμοί της αεροσήραγγας: η έλλειψη στην προσομοίωση, το υψηλό κόστος, και η περιορισμένη διαθεσιμότητα.



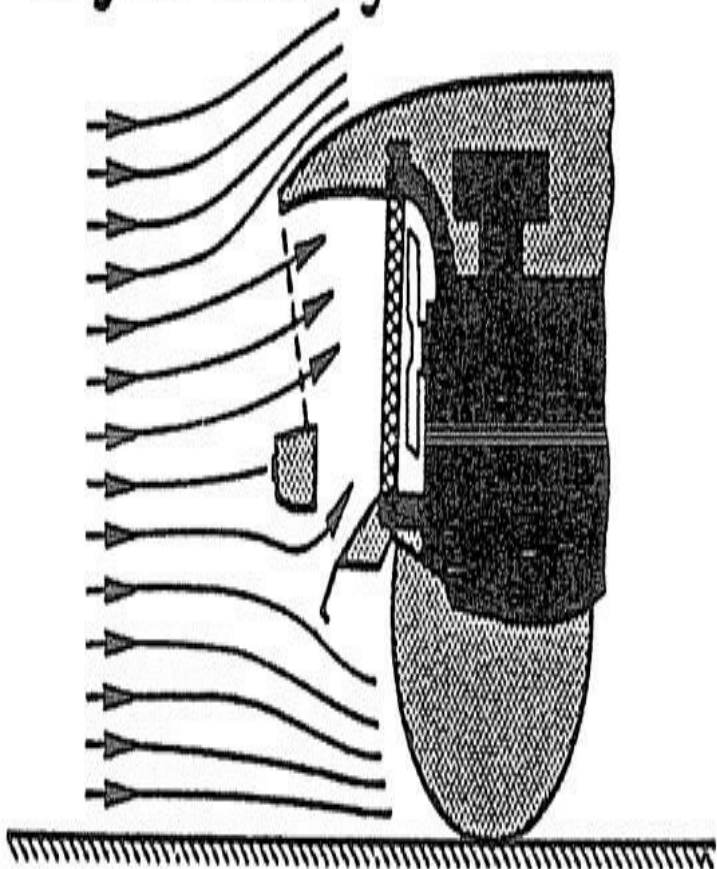
Performance , Stability



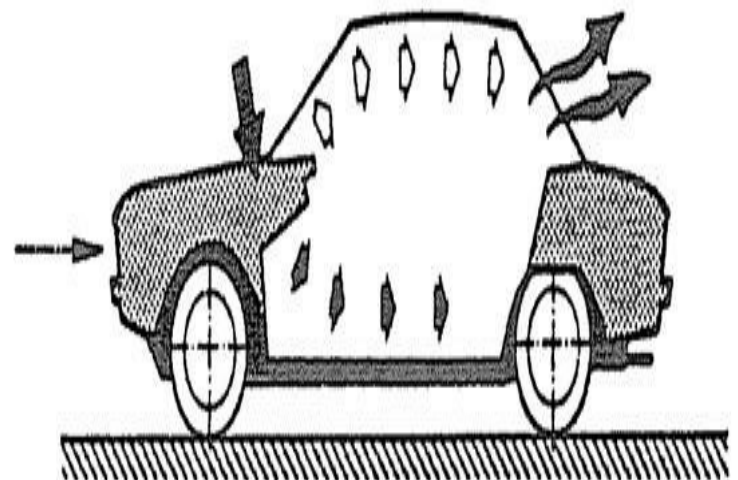
Flow Field in Detail



Engine Cooling



Heating , Ventilating





### 1.1.2 Προσομοίωση των διαφορών όψεων της οδήγησης πάνω στο δρόμο

Η αεροδυναμική οχημάτων μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τους σκοπούς της, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2. Οι μεμονωμένες της απαιτήσεις για προσομοίωση οδήγησαν σε ειδικά σχεδιασμένα κρεβάτια δοκιμών τα οποία συλλογικά ονομάζονται αεροσήραγγες.

Είναι σημαντικό να αναπαραχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο, η πραγματική ροή αέρα γύρω από ένα όχημα, έτσι ώστε να μετρηθούν οι δυνάμεις και οι ροπές που καθορίζουν την παρουσίαση οδήγησης και την σταθερότητα κατεύθυνσης.

*Εικ. 1.2 Ο κύριος σκοπός της αεροδυναμικής οχημάτων.*

Αν η πίεση  $p$  είναι ίδια σε κάθε σημείο (και επομένως όλες οι δυνάμεις και οι ροπές) τότε είναι ανάλογη του τετραγώνου της τοπικής ταχύτητας ροής  $u$ ,

$$p = u^2 \quad (1.1)$$

τα λάθη στο πεδίο ροής σχετικά με τη διανομή της ταχύτητας γύρω από ένα όχημα, έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα δοκιμών. Ανάμεσα στους περιορισμούς που αναφέρθηκαν πιο πάνω (ομοιογενές πεδίο ροής), η ροή αέρα γύρω από ένα όχημα που οδηγείται στο δρόμο μπορεί να προσομοιωθεί σχετικά καλά σε μια αεροσήραγγα.

Παρ'όλα αυτά, η συχνά θεωρούμενη καλή συμφωνία με τις μετρήσεις στο δρόμο

πρέπει να εκτιμήθει σοβαρά. Γενικά, οι δυνάμεις και ροπές πάνω στο δρόμο δεν

μετρώνται άμεσα. Για παράδειγμα, η αντίσταση καθορίζεται από δοκιμές σταδιακής

επιβράδυνσης ή από μέτρηση μέγιστης ταχύτητας. Ωστόσο, εμπεριέχονται και

επιπρόσθετοι φυσικοί παράγοντες (λ.χ., η αντίσταση κύλισης των ελαστικών,

θυελλώδης φυσικός άνεμος, δύναμη του κινητήρα, κλπ). Καθώς τα δεδομένα της

αεροσήραγγας είναι ακριβή αλλά επιβεβαρυμένα με ελλείμματα στην προσομοίωση,

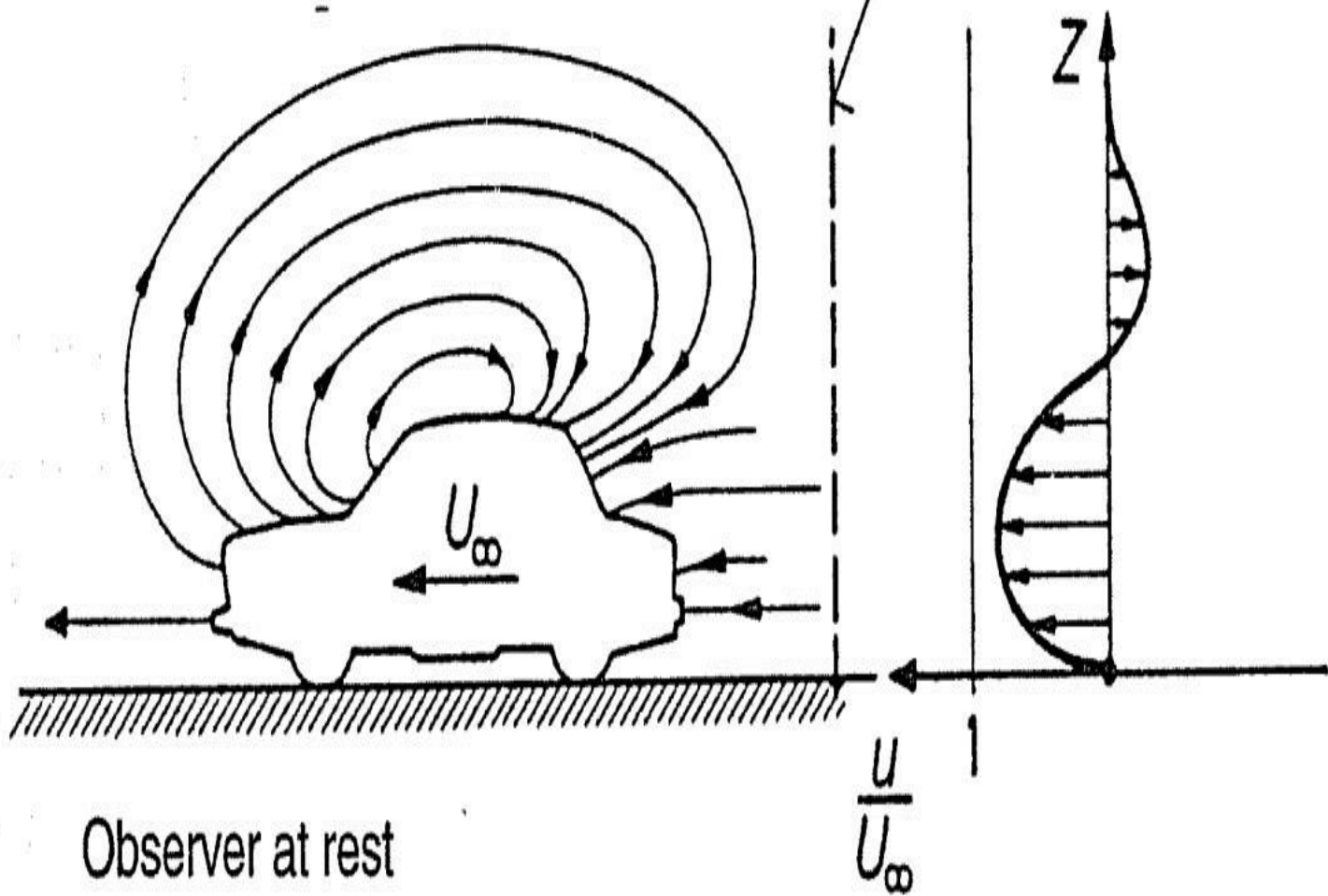
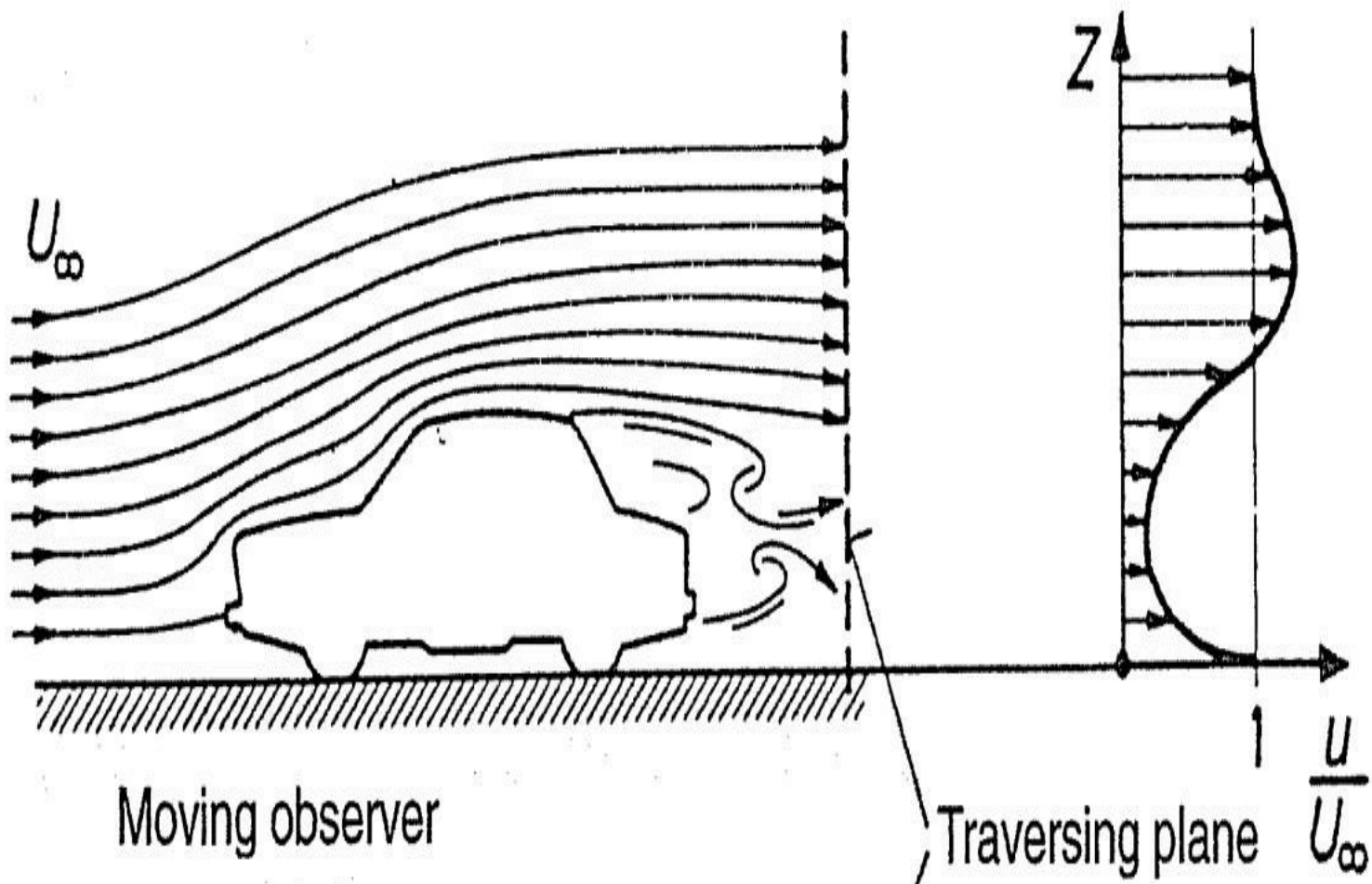
τα δεδομένα του δρόμου είναι ελεύθερα απ'αυτά τα ελλείμματα όχι όμως

καθορισμένα με τόση ακρίβεια.

Έγιναν «διορθώσεις» στα δεδομένα της αεροσήραγγας για παρεκκλίσεις εξαιτίας περιορισμών σε ρυθμίσεις δοκιμών (έλλειψη προσομοίωσης) και οριακών συνθηκών (παρεμβολές) που αναλυθούν παρακάτω.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3, σε μια αεροσήραγγα η σχετική κίνηση αντιστρέφεται: το όχημα βρίσκεται σε θέση ηρεμίας και υποβάλλεται στον κινούμενο αέρα. Λογικά, η σχετική κίνηση ανάμεσα στο όχημα και στο δρόμο πρέπει επίσης να αναπαραχθεί: το δάπεδο της αεροσήραγγας πρέπει να κινηθεί με τον αέρα. Ωστόσο,





επειδή αυτό δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί, έχει παραμεληθεί για πολύ καιρό, μέχρι και σήμερα. Λάθη που προέρχονται από εκεί και διάφορες τεχνικές σχετικά με την αναπαραγωγή ή την προσομοίωση αυτής της συγγενούς κίνησης αναλύονται στο μέρος 1.3.2.

Σε συγκεκριμένες δοκιμές, τα μοντέλα μπορούν να ρυμουλκθούν μέσω ήρεμου αέρα, σε σύγκριση με τα μοντέλα πλοίων όπου η ρυμούλκηση γίνεται μέσω ήρεμου νερού σε δεξαμενή ρυμούλκησης. Οι παράγοντες που εξετάζονται μ' αυτόν τον τρόπο είναι κυρίως ασταθείς: περνώντας ή συναντώντας άλλα οχήματα, οδηγώντας μέσα σε σήραγγα, και μέσα από θυελλώδεις ανέμους. Επίσης, μια δεξαμενή ρυμούλκησης έχει χρησιμοποιηθεί για να αποκαλύψει τις διαφορές στη ροή ανάμεσα σε ένα σταθερό και ένα κινούμενο έδαφος. Οι δοκιμές ρυμούλκησης επιτρέπουν το πεδίο ροής γύρω από ένα αυτοκίνητο να αναπαραχθεί με μεγάλη ακρίβεια, το οποίο εμφανίζεται στον αέρα, όχι απαραίτητα με μεγάλη προσπάθεια.

*Εικ. 1.3 Διαφορά στη σχετική κίνηση ανάμεσα στην οδήγηση του δρόμου και στη δοκιμή αεροσήραγγας.*

Οι ίδιες απαιτήσεις σχετικά με τις δυνάμεις και τις ροπές πρέπει να ληφθούν υπόψιν και σε σχέση με την ποιότητα ροής γύρω από ένα όχημα όταν εξετάζονται οι λεπτομέρειες ροής. Πρέπει να αντιμετωπιστούν και επιπρόσθετες απαιτήσεις σχετικά με το επίπεδο του θορύβου της σήραγγας αν ληφθεί υπόψιν και ο *θόρυβος αέρα*. Το σήμα για τη διαφορά του θορύβου πρέπει να είναι λιγότερο από 10dB.

Οι απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα της ροής αέρα είναι λιγότερο αυστηρές για την ανάπτυξη εργασίας πάνω στα συστήματα ψύξης. Πρέπει προσομοιωθεί μόνο η ροή γύρω απ' το μπροστινό άκρο ενός αυτοκινήτου, όμως πρέπει να αναπαραχθούν επακριβώς, η θερμοκρασία του αέρα και το φορτίο του κινητήρα. Με τις αυξανόμενες απαιτήσεις στο σύστημα ψύξης, πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι επιδράσεις του

οριακού στρώματος του εδάφους-δαπέδου και η περιστροφή των τροχών.

Σχετικά με τις δοκιμές στη *θέρμανση, εξαερισμό, και κλιματισμό*, οι απαιτήσεις προσομοίωσης χώρίζονται ανάμεσα σε καθαρά αεροδυναμικές δοκιμές και στη ψύξη

του κινητήρα. Οι βασικές κλιματικές παράμετροι, λ.χ., θερμοκρασία αέρα, υγρασία, και ηλιακή ακτινοβολία, πρέπει να προσομοιωθούν με ακρίβεια. Η θερμική ισορροπία ενός οχήματος εξαρτάται κατά πολύ απ’τη ροή αέρα μέσα και γύρω απ’αυτό, επομένως πρέπει εξίσου να προσομοιωθεί και η μεταφορά ρευστότητας της θερμοκρασίας, η οποία είναι ανάλογη της ποσότητας ροής αέρα στην καμπίνα επιβατών. Η ρευστότητα θερμότητας  $Q_c$  εξαιτίας της μεταβίβασής της μέσα από διάφορα μέρη ενός οχήματος και η μεταφορά θερμότητας στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειές του- η οποία είναι μικρή σε σχέση με την μεταφορά ρευστότητας της θερμότητας- είναι

$$Q_c \sim u^{0.5} \text{ σε } u^{0.8} \quad (1.2)$$

Η επίδραση ενός λάθους στην τοπική ταχύτητα του προσομοιωμένου πεδίου ροής είναι επομένως λιγότερο από αναλογική. Έτσι, το κόστος για την προσομοίωση του πεδίου ροής είναι πολύ λιγότερο απ’αυτό που θα χρειαστεί για αεροδυναμικές δοκιμές.

Βασικά υπάρχουν δύο εναλλακτικές για την αναπαράσταση των συνθηκών δοκιμής για τα τέσσερα είδη δοκιμών που περιγράφονται πιο πάνω και καταρτίζονται στην εικόνα 1.2:

1. Όλες οι παράμετροι που έχουν μια επιρροή προσομοιώνονται στην ίδια εγκατάσταση- αυτό οδηγεί σε μια μεγάλη κλιματική αεροσήραγγα.
2. Μόνο εκείνες οι παράμετροι που έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή αναπαράγονται με ακρίβεια, όλες οι υπόλοιπες αναπαράγονται με μικρότερη ακρίβεια- αυτό απαιτεί πολλά εξειδικευμένα κρεβάτια δοκιμών.

Οι εγκαταστάσεις που είναι εξειδικευμένες σε συγκεκριμένες παραμέτρους ονομάζονται επίσης *αεροσήραγγες*. Ωστόσο, ο ορισμός “αεροσήραγγα” θα πρέπει να

διατηρηθεί για τις εγκαταστάσεις που είναι αφιερωμένες στην αεροδυναμική με την κλασική έννοια. Οι εγκαταστάσεις εκείνες που είναι σχεδιασμένες για κλιματικές δοκιμές θα ονομαστούν *κλιματικές σήραγγες*. Παρ' όλα αυτά, αν η διατομή της ερχόμενης ροής αέρα είναι μικρή, ας πούμε λιγότερο απ' την μπροστινή περιοχή του οχήματος, τότε ο όρος *κλιματικός αεροθάλαμος*, είναι καλύτερος. Εγκαταστάσεις με ροή αέρα μικρής διατομής που παρέχουν μόνο κατάλληλη ψύξη θα ονομαστούν *δυναμόμετρο με φουσητήρα (ή ανεμιστήρα)*.

Όσες περισσότερες παράμετροι παραβλέπονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, τόσο μεγαλύτερη προσπάθεια χρειάζεται για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα από τα κρεβάτια δοκιμών μπορούν να μεταφερθούν στο δρόμο. Πρέπει να πραγματοποιηθούν συγκριτικές μετρήσεις ανάμεσα σε πολλές εγκαταστάσεις δοκιμών και στο δρόμο για να υπολογιστούν όλες οι ελλείψεις σε κάθε είδος προσομοίωσης.

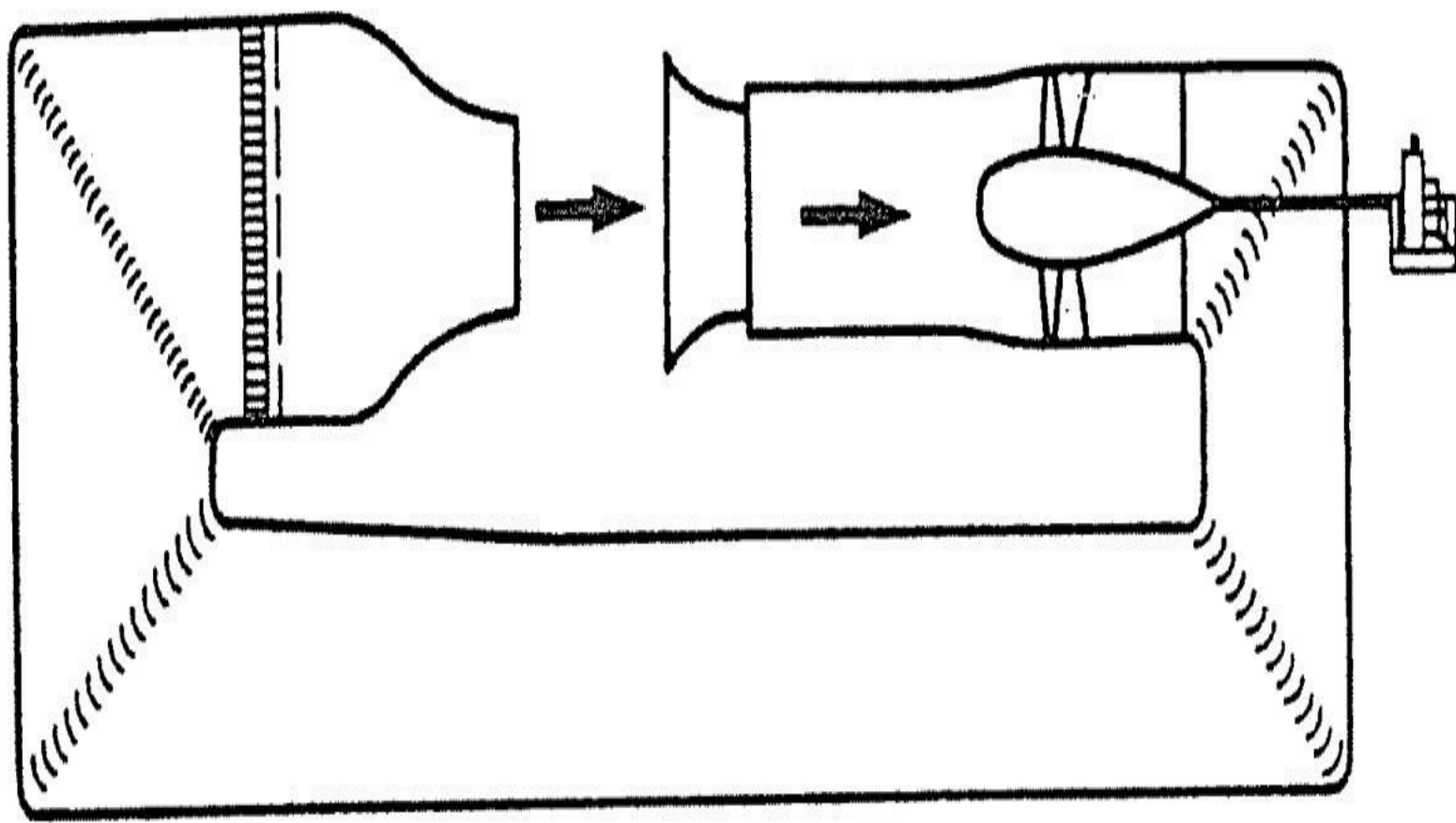
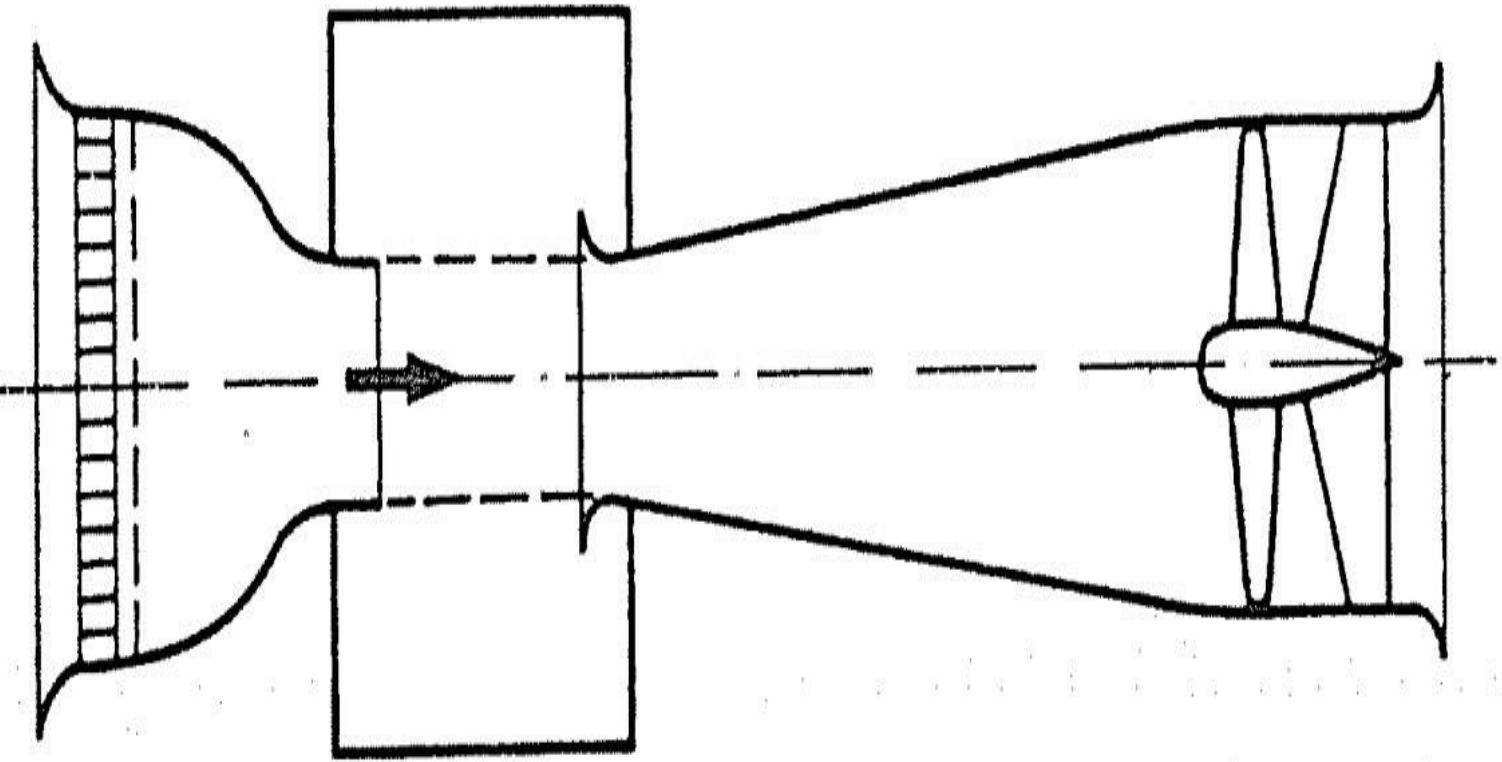
## **1.2 Κάποιες Βασικές Αρχές σχετικά με τις Τεχνικές Αεροσήραγγας**

### **1.2.1 Επιλογή αναφορών**

Μια ποικιλία από εργασίες έχει αφιερωθεί στην τεχνική αεροσήραγγας. Δύο είδη αναφορών μπορούν να διακριθούν: Στη μία κατηγορία τονίζεται το *σχέδιο* της αεροσήραγγας και στην άλλη η *εφαρμογή* της. Θα δοθεί μόνο ένα παράδειγμα για το καθένα.

Ο R.C. PANKHURST και ο D.W. HOLDER είχαν εντρυφήσει στην τεχνική της αεροσήραγγας απ' το 1965, αλλά χωρίς να λάβουν υπόψιν τις απαιτήσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας. Απ' τη στιγμή που αργότερα υπήρξε ουσιαστική πρόοδος στην τεχνολογία αεροσήραγγας χαμηλής ταχύτητας, η τεχνική μέτρησης- με την εξαίρεση κάποιων “κλασικών” ανιχνευτών- ανανεώθηκε εξ' ολοκλήρου. Οι σχετικές λεπτομέρειες διαδόθηκαν σε πολλά χαρτιά. Οι W.H. RAY και A. POPE έκαναν





αναφορά στις δοκιμές αεροσήραγγας, χωρίς όμως να αναλύσουν εις βάθος ουσιώδη θέματα όπως τη προσομοίωση του δρόμου ή τη διόρθωση αεροσήραγγας για μεγάλο (γεωμετρικό) αποκλεισμό.

Οι λεπτομέρειες για τις εφαρμογές αεροσήραγγας σε αυτοκίνητα συγκεντρώθηκαν απ' το SAE. Χρήσιμες πληροφορίες βρίσκονται σε δημοσιεύσεις σχετικά με βιομηχανική αεροδυναμική (βλ. D.C. BAIN και C. KRAMER). Στη συνέχεια θα περιγραφθούν μόνο εκείνοι οι παράγοντες τεχνικής αεροσήραγγας που είναι τυπικοί στις εφαρμογές αυτοκινήτων.

### **13.2.2 Διαμόρφωση εκτιμήσεων**

Στην εικόνα 1.4 ακολουθούν ο σχεδιασμός και οι βασικές αρχές εργασίας μιας αεροσήραγγας. Διακρίνονται δύο κατηγορίες σχετικά με το είδος της ροής αέρα. Στον Gottingen τύπο σήραγγας, πηγαίνοντας πίσω στον L. PRANDTL, ο ανεμιστήρας οδηγεί τον αέρα μέσα σ' ένα κλειστό κύκλωμα (στο πάνω μέρος της εικόνας 1.4). Ο G. EIFFEL, σύγχρονος του PRANDTL, προτίμησε ανοιχτό κύκλωμα: ο αέρας λαμβάνεται απ' το γύρω περιβάλλον, αναρροφάται από ένα τμήμα δοκιμής και αποβάλλεται ξανά έξω. Μαζί με αυτούς τους δύο τύπους υπάρχει και ένας τρίτος, με “ανοιχτή επιστροφή” (κάποιες φορές ονομάζεται “ημι-ανοιχτή επιστροφή”) και γενικά λέγεται αεροσήραγγα Eiffel. Αποτελείται από ένα ανοιχτό-κύκλωμα σήραγγας χτισμένο σε ένα συγκριτικά μικρό κτίριο το οποίο, σε κάποιες περιπτώσεις, είναι σχεδιασμένο για να καθοδηγεί τη ροή αέρα. Ο αέρας που αφήνει το διαχύτη εξόδου επιστρέφει στην είσοδο του εγκατεστημένου θαλάμου. Και τα τρία είδη σχεδίου χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες, παραδείγματα θα παρουσιαστούν στο Μέρος 1.5. Το καθένα έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία μπορούν να συγκριθούν ποσοτικά μεταξύ των τριών τύπων μόνο για συγκεκριμένες εφαρμογές.

*Εικ. 1.4 Αεροσήραγγα με κλειστή επιστροφή (τύπου *Göttingen*) και με ανοιχτή επιστροφή (τύπου *Eiffel*), μετά τον *W.WUEST*.*

Το κύριο πλεονέκτημα του *Göttingen*-τύπου σήραγγας είναι η χαμηλή απαίτηση ισχύος. Το κέρδος επομένως είναι τριπλό: αρχικά, το κόστος κίνησης (κινητήρας και ανεμιστήρας) είναι συγκριτικά χαμηλό: δεύτερον, τα έξοδα λειτουργίας είναι λίγα,

όπως και τα έξοδα της ηλεκτρικής σύνδεσης. Τα τελευταία είναι ανάλογα της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος, και αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του σταθερού κόστους ενός ετήσιου προϋπολογισμού για μεγάλες αεροσήραγγες.

Ωστόσο, η Gottingen σήραγγα έχει και μειονεκτήματα. Εξαιτίας του μήκους της και του μεγάλου θαλάμου καθίζησης, το κόστος για τον αγωγό διοχέτευσης είναι υψηλό.

Επειδή πολλά μοντέλα αυτοκινήτου είναι φτιαγμένα από πλαστική ύλη (η οποία είναι επιρρεπής σε υψηλές θερμοκρασίες), η σήραγγα θα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με ψυγείο. Για να ξεπεραστεί η απώλεια πίεσης μέσα απ' το ψυγείο απαιτείται

επιπρόσθετη τροφοδοσία ανεμιστήρα: επίσης, χάνονται και κάποιες οικονομίες

απ' την κάτω μονάδα ισχύος. Σήραγγες με έλεγχο της θερμοκρασίας αέρα πρέπει να

έχουν ένα κλειστό κύκλωμα, το οποίο, σ' ένα απομονωμένο κτίριο, θα μπορεί να είναι ανοικτής επιστροφής.

Μια σήραγγα Eiffel που έχει συσταθεί για εξωτερικούς χώρους είναι φθηνή. Έχει

όμως το σημαντικό μειονέκτημα, ότι οι λειτουργικές συνθήκες εξαρτώνται απ' τον

καιρό. Γ' αυτόν το λόγο είναι πρακτική μόνο σε χώρες με ήπιο κλίμα. Επίσης, όταν ο

αέρας αναρροφάται από εξωτερικούς χώρους, παρατηρούνται συγκεκριμένες

δυσκολίες κατα τη διάρκεια της δοκιμής: το να διατηρηθεί η ποιότητας ροής

ελεύθερη από επιδράσεις ανέμων. Από μία μεγάλη σήραγγα Eiffel που λειτούργησε

σε αυτοκινητοβιομηχανία έχει γίνει γνωστό ότι, κατά μέσο όρο, μια μέρα δοκιμής την

εβδομάδα χάνεται λόγω ανεπιθύμητων ανέμων. Οθόνες μπροστά απ' το στόμιο

αναρρόφησης, που επίσης εμποδίζουν φύλλα, πουλιά κλπ απ' το να αναρροφηθούν,

εξαλείφουν την επίδραση του αέρα μόνο αν είναι αρκετά πυκνές. Η υψηλή απώλεια

πίεσης που προκύπτει πρέπει να ξεπεραστεί από επιπρόσθετη ισχύ του ανεμιστήρα.

Ένα ακόμα ουσιαστικό μειονέκτημα μιας αεροσήραγγας Eiffel είναι ότι ενοχλεί τη

γειτονιά με το θόρυβό της. Επομένως δε σχεδιάζονται πλέον μεγάλες αεροσήραγγες

Eiffel για αυτοκινητιστικούς σκοπούς. Πολλές σήραγγες Eiffel έχουν χτιστεί μέσα σε κτίρια, είτε σε (μεγάλα) ήδη υπάρχοντα είτε σε ειδικά σχεδιασμένα γι' αυτόν το σκοπό και συνήθως λειτουργούν ικανοποιητικά.

### **1.2.3 Ιδιότητες των Βασικών Εξαρτημάτων**

#### **1.2.3.1 Σχεδιάζοντας μια δοκιμή**

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού μιας δοκιμής, ο *χρήστης* μιας αεροσήραγγας θα πρέπει να έχει απαντήσεις στις ακόλουθες τέσσερις ερωτήσεις:

1. Τι είδος αεροσήραγγας χρειάζεται (τύπος σήραγγας, εξοπλισμός, κλπ) ;
2. Κατα πόσο τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν σε μια συγκεκριμένη σήραγγα συσχετίζονται με το δρόμο;
3. Πόσες ώρες χρειάζονται για την αεροσήραγγα;
4. Πόσο κοστίζει η καμπάνια δοκιμής;

Η απάντηση στην πρώτη ερώτηση βρίσκεται στο μέρος 1.5. Τα κύρια οικονομικά στοιχεία No.3 και No.4 συσχετίζονται πολύ και πρέπει να εξετάζονται

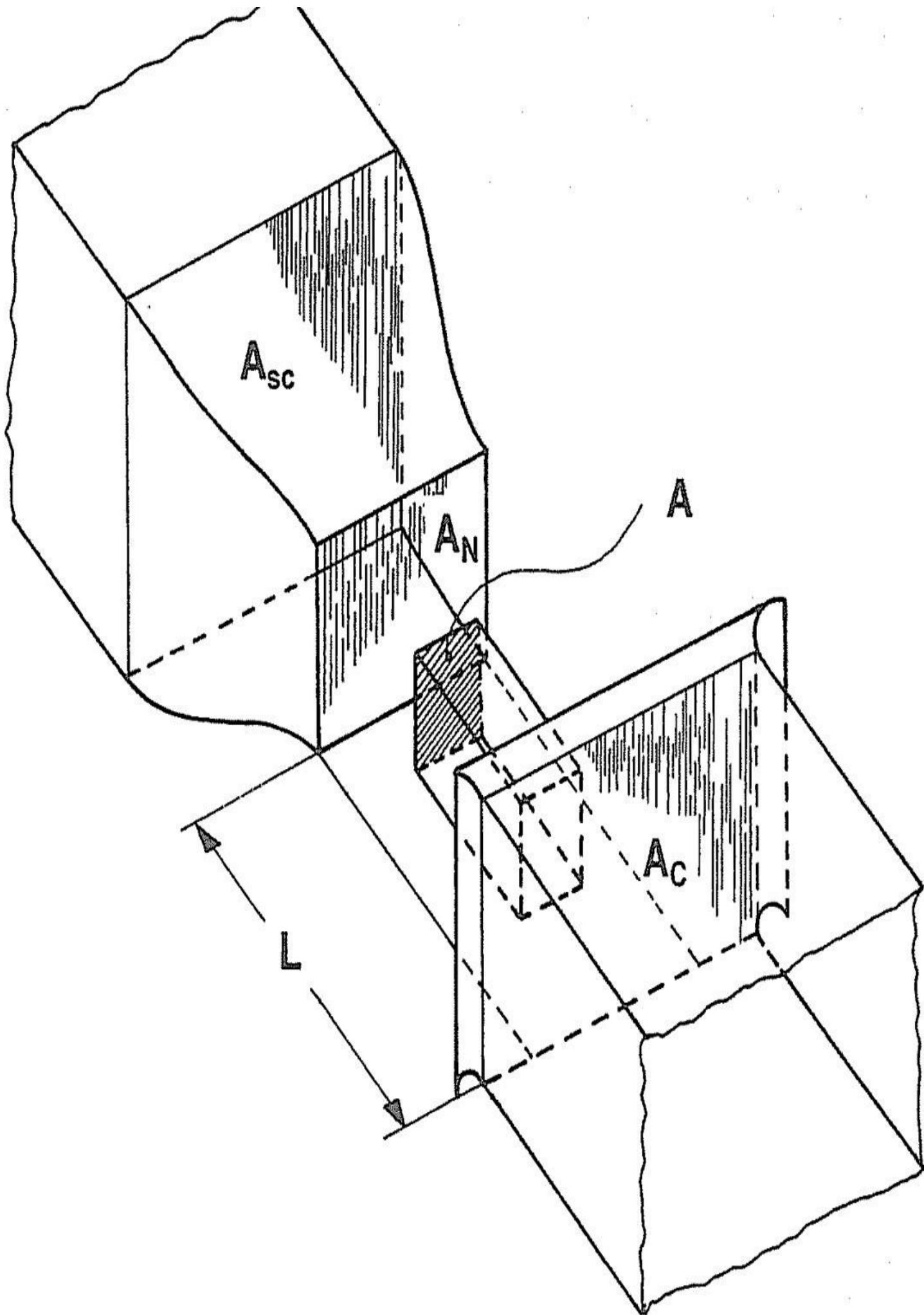
ταυτόχρονα. Δεν μπορούν να δοθούν γενικές απαντήσεις εδώ. Ωστόσο, το κόστος που πρέπει να κοιτάξει κανείς είναι το κόστος που αποκτήθηκε ανά σημείο δεδομένων και όχι το κόστος ανά μονάδα χρόνου κατάληψης της αεροσήραγγας.

Μια υψηλή ωριαία τιμή μπορεί να αποζημιωθεί με το παραπάνω μέσω γρήγορων τεχνικών δοκιμής, απόκτησης δεδομένων και εκτίμησης.

Απ' τη στιγμή που έχει επιλεχθεί μια συγκεκριμένη αεροσήραγγα, ο χρήστης μένει με την ερώτηση No.2. Η απάντηση σ' αυτό εξαρτάται απ' τα χαρακτηριστικά των ακόλουθων εξαρτημάτων της σήραγγας (βλ. εικόνα 1.5) :

1. Τμήμα δοκιμών (μέγεθος, ανοιχτό ή κλειστό, είδος της προσομοίωσης του δρόμου).





2. Ακροφύσιο (συμπεριλαμβανομένου του θαλάμου καθίζησης)
3. Συλλέκτης ( για σήραγγες με ανοιχτό τμήμα δοκιμών)
4. Θάλαμος γύρω από ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμών (γνωστός ως το διάκενο).
5. Εναλλάκτης θερμότητας και φορτίο ήλιου (σε κλιματικές σήραγγες).

*Εικ. 1.5 Τμήμα δοκιμών αεροσήραγγας και οι βασικές του γεωμετρικές παράμετροι.*

Μόνο τα συγκεκριμένα εξαρτήματα θα συζητηθούν σε αυτά που ακολουθούν.

Όλοι οι υπόλοιποι τεχνικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα η διάταξη των διαχυτών, οι στροφές των πτερυγίων, και το πως τροφοδοτείται και ελέγχεται ο ανεμιστήρας, είναι δουλειά του *σχεδιαστή* και του *διαχειριστή* της αεροσήραγγας. Στις αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες οι λεπτομέρειες αυτές δε διαφέρουν απ' τις αεροναυπηγικές.

### **1.2.3.2 Τμήμα Δοκιμών**

Το τμήμα δοκιμών χαρακτηρίζεται από δύο ιδιότητες: το μέγεθός του και το είδος ροής αέρα του πλευρικού ορίου. Το μέγεθος του τμήματος δοκιμών αποτελείται από μια διατομή  $AN$  του ακροφύσιου και το μήκος  $L$  ανάμεσα στην έξοδο του ακροφύσιου και στην είσοδο του συλλέκτη. Και τα δύο  $AN$  και  $L$  χρησιμοποιούνται σε αδιάστατη μορφή όπως ακολουθεί:

- Η αναλογία στένωσης  $\varphi = A/AN$ , όπου  $A$  είναι η μπροστινή περιοχή του οχήματος.



- Το σχετικό μήκος  $\lambda = L/DN$ , όπου  $DN$  είναι η ισοδύναμη (υδραυλική) διάμετρος του ακροφύσιου:  $DN = 4AN/C$ , όπου  $C$  είναι η περιφέρεια ακροφύσιου.

Σε τμήματα δοκιμών ανοιχτού πίδακα δύο ακόμα παράμετροι είναι σημαντικές:

- Η αναλογία των διατομών του συλλέκτη και του ακροφύσιου,  $AC/AN$ .
- Ο όγκος του διάκενου (και συγκεκριμένα το ύψος του και το πλάτος του).

Για να υπάρξει κινηματική ομοιότητα της ροής σε μία σήραγγα και της ροής στο δρόμο, η αναλογία στένωσης  $\phi$ , η οποία είναι μηδενική στο δρόμο, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

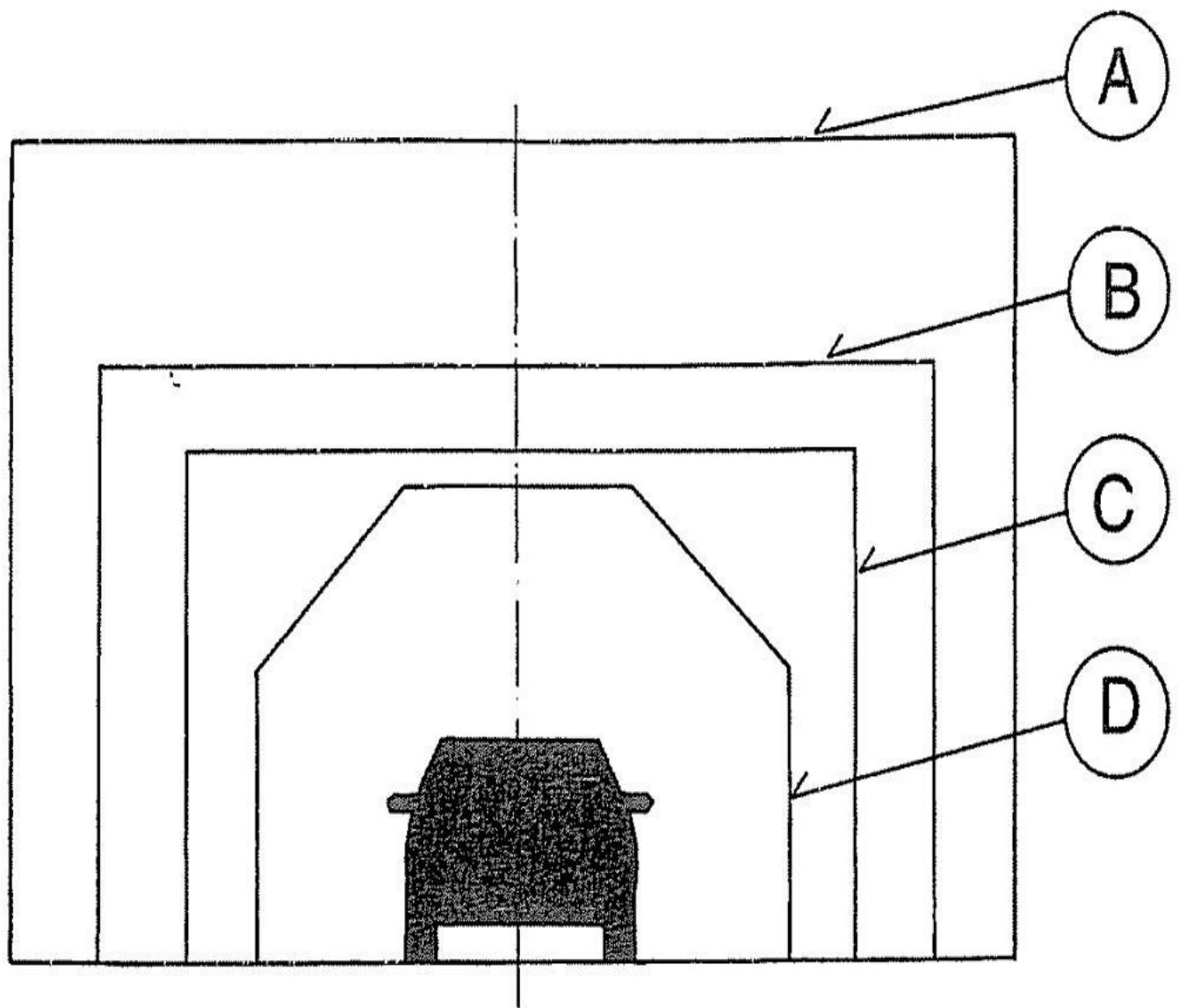
Όταν χτίστηκαν οι πρώτες αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας, η αναλογία στένωσης μεταφέρθηκε απ' την αεροναυπηγική:  $\phi = 0.05$ . Με προστινή περιοχή  $A = 2m^2$  τυπικό για αυτοκίνητα, προέκυψε μια διατομή του ακροφύσιου  $AN = 40 m^2$ . Αργότερα, συγκριτικές μετρήσεις και έρευνες σε διαστάσεις και διορθώσεις του τμήματος δοκιμών έκαναν ξεκάθαρο ότι θα μπορούσε να είναι ανεκτή και μια μεγαλύτερη αναλογία στένωσης: το  $\phi = 0.10$  φαίνεται να είναι ένα λογικό όριο για αυτοκίνητα. Πολλές αεροσήραγγες σχεδιάστηκαν με αυτήν τη λογική, έχοντας μια διατομή  $AN = 20m^2$ . Ωστόσο, χρησιμοποιείται ακόμα και το  $\phi = 0.2$ : η μικρότερη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας έχει μόνο  $AN = 10 m^2$ .

Εκτός απ' την περιοχή  $AN$ , το σχήμα της διατομής του ακροφύσιου ποικίλλει. Κάποιες τυπικές διατομές φαίνονται στην Εικόνα 1.6. Πιο συχνά το σχήμα μιας διατομής ανοιχτού πίδακα είναι ορθογώνιο. Η αναλογία του ύψους  $A$  με το πλάτος  $B$  είναι περίπου 0.66. Κάποιες φορές οι γωνίες στρογγυλοποιούνται ή λοξοτομούνται. Οι

μικρές αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για αυτοκίνητα δεν έχουν ορθογώνιες διατομές. Ο A. MORELLI, όταν σχεδίασε την 11m<sup>2</sup> αεροσήραγγα της Pininfarina, επέλεξε ένα ημικύκλιο με στρογγυλοποιημένα τα κάτω άκρα. Ήθελε να δημιουργήσει μια διατομή παρόμοια με το σχήμα της μπροστινής περιοχής ενός αυτοκινήτου. Αποκόβοντας τις γωνίες ενός ορθογώνιου, ο L.J. JANSSEN επέλεξε τη διατομή της 10m<sup>2</sup> ακουστικής αεροσήραγγας BMW για να προσεγγίσει το σχήμα των ισόβαρων γύρω από ένα αυτοκίνητο (βλ Εικόνα 1.7). Επίσης, η αναλογία ύψους-πλάτους στο 0.7 είναι κάπως μεγαλύτερη, απ' το συνηθισμένο 0.6.

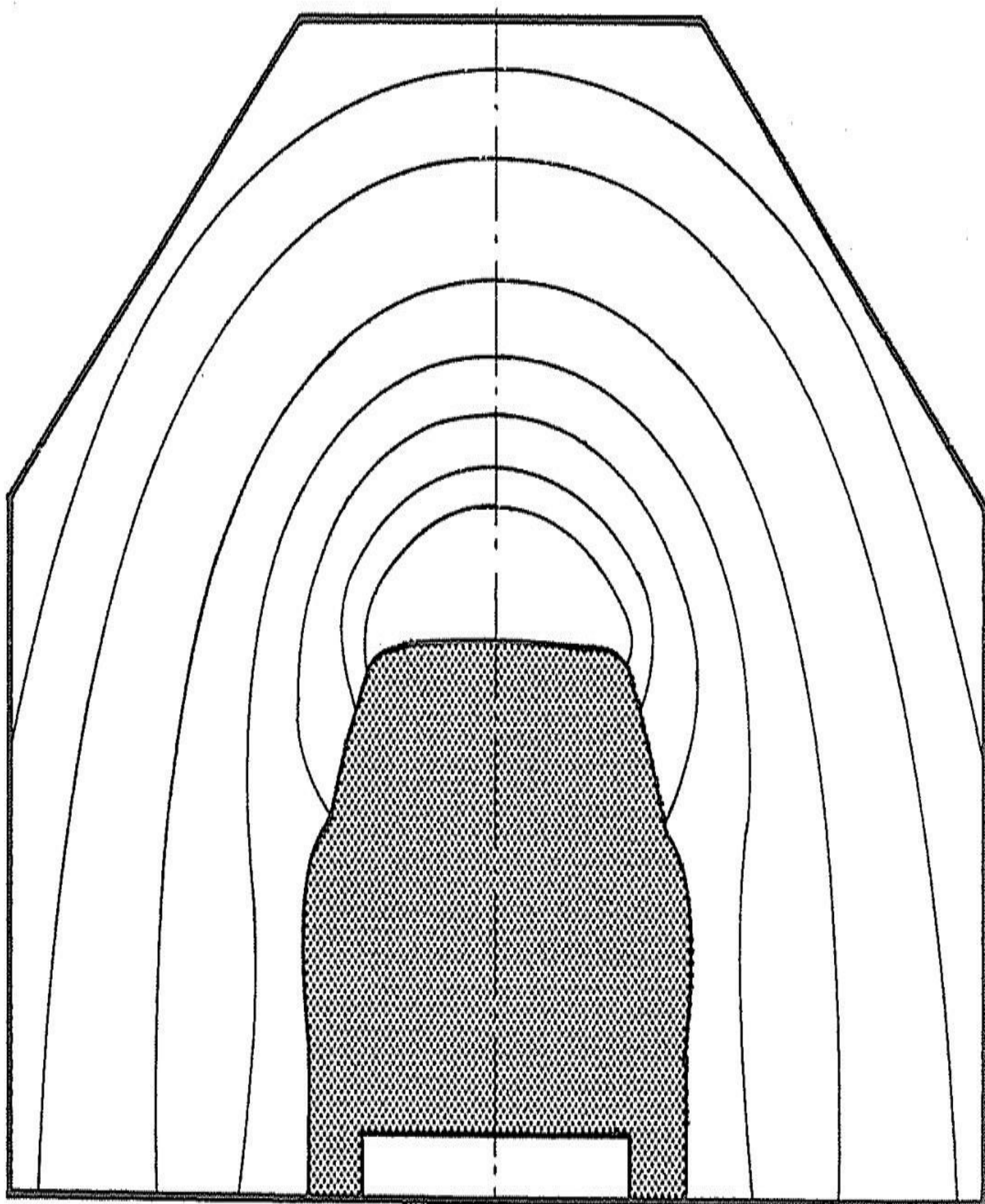
Μπορούν να διακριθούν τρία είδη διατομής ανάλογα με τον τύπο του οριακού πίδακα: ανοιχτά, κλειστά και με διαμηκή τοιχώματα. Το κλειστό τμήμα δοκιμής έχει αναπτυχθεί με συγκεκριμένες διαμορφώσεις όπως αεροδυναμικά και προσαρμοζόμενα τοιχώματα. Και τα πέντε είδη οριακού πίδακα είναι σχεδιασμένα στην Εικόνα 1.8. Το έδαφος, που είναι τυπικό στις αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες, δεν αποτελεί μέρος του τμήματος δοκιμών, αν και δεσμεύεται απ' αυτό. Σταθερό ή κινητό, είναι μέρος των δοκιμών σχετικά με την προσομοίωση του δρόμου.

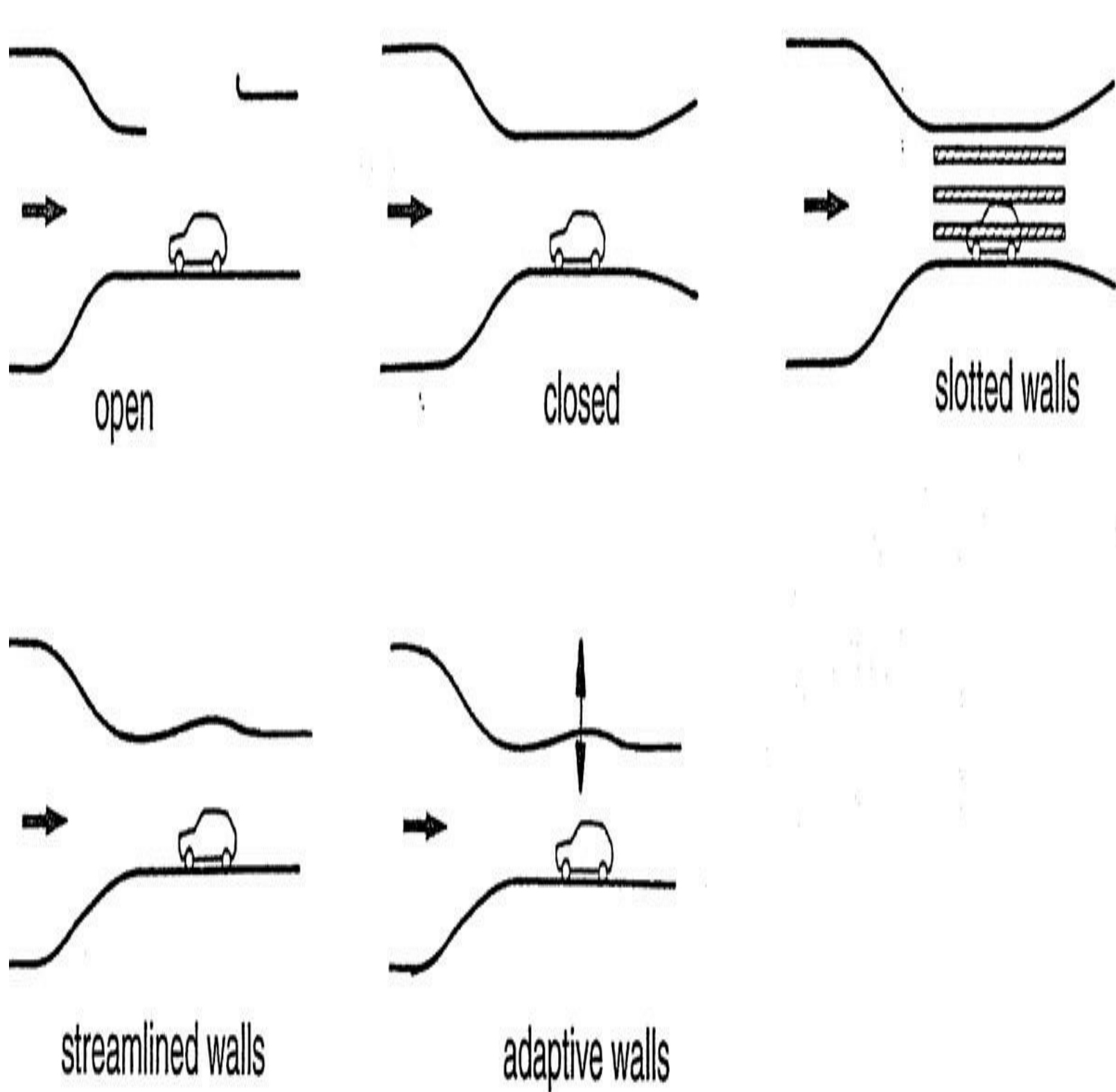




- (A) VW  $37.5 \text{ m}^2$
- (B) PORSCHE  $22.3 \text{ m}^2$
- (C) NISSAN  $15 \text{ m}^2$
- (D) BMW TECHNIK  $10 \text{ m}^2$

*Εικ. 1.6 Διατομή των τμημάτων δοκιμής σε πολλές αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες,  
μετά τον L.J. JANSSEN.*





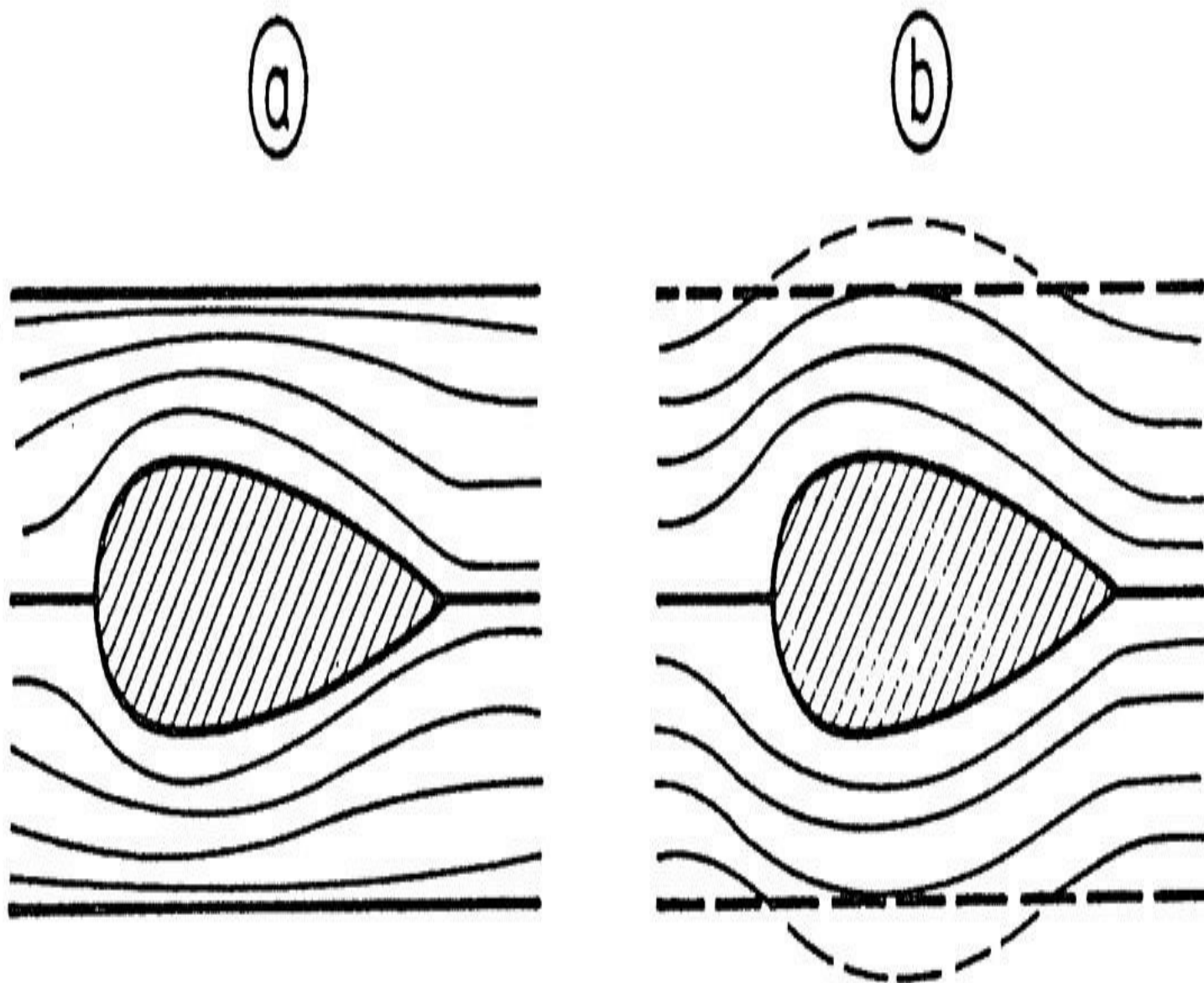
Εικ. 1.7 Αντιστοιχία της διατομής του ακροφύσιου με τα ισόβαρα γύρω από ένα αυτοκίνητο, μετά τον L.J. JANSSE.

Κινηματικά, η ροή γύρω από ένα αντικείμενο δοκιμής σε έναν πίδακα περιορισμένων διαστάσεων δεν είναι η ίδια όπως στον ελεύθερο αέρα. Η φύση της διαφοράς εξαρτάται απ' το όριο του πίδακα όπως φαίνεται στην εικόνα 1.9. Σ' ένα τμήμα δοκιμών ανοιχτού πίδακα η ροή αέρα γύρω από ένα όχημα μπορεί να αποκλίνει. Σε

σύγκριση με τον ελεύθερο αέρα, οι αεροδυνάμεις πλαταίνουν περισσότερο και έτσι η ταχύτητα του αέρα σε κάθε σημείο δίπλα από ένα οχήμα είναι κάπως χαμηλή. Η ποσότητα, απ' την οποία ένα όριο πίδακα πλαταίνει όταν ένα μοντέλο βρίσκεται στο τμήμα δοκιμών, έχει μετρηθεί απ' τον R. KUNSTNER και τον J. POTTHOFF και παρουσιάζεται στην εικόνα 1.10.

*Εικ. 1.8 Διάφορα είδη ορίων τμήματος δοκιμής.*





Εικ. 1.9 Επίδραση του πλευρικού ορίου στο πεδίο ροής μέσα σε ένα τμήμα δοκιμής: α) συστολή σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής, β) επέκταση σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής, μετά τον W.WUEST.

Αντιθέτως, σ' ένα κλειστό τμήμα δοκιμών οι αεροδυναμικές περιορίζονται από τα τοιχώματα, και έτσι η τοπική ταχύτητα γύρω από ένα οχήμα αυξάνεται. Και στις δύο περιπτώσεις (ανοιχτά και κλειστά τμήματα δοκιμών) η επίδραση του ορίου του πίδακα είναι πιο έντονη όσο πιο κοντά βρίσκεται στο μοντέλο, δηλαδή, όσο πιο μεγάλη είναι η αναλογία στένωσης  $\phi$ . Το κίνητρο για τους διάφορους τύπους οριακού

τμήματος δοκιμών που φαίνονται στην εικόνα 1.8 είναι να μειωθεί η επίδραση του περιορισμένου μεγέθους σήραγγας και επομένως να επιτρέψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αναλογία στένωσης.

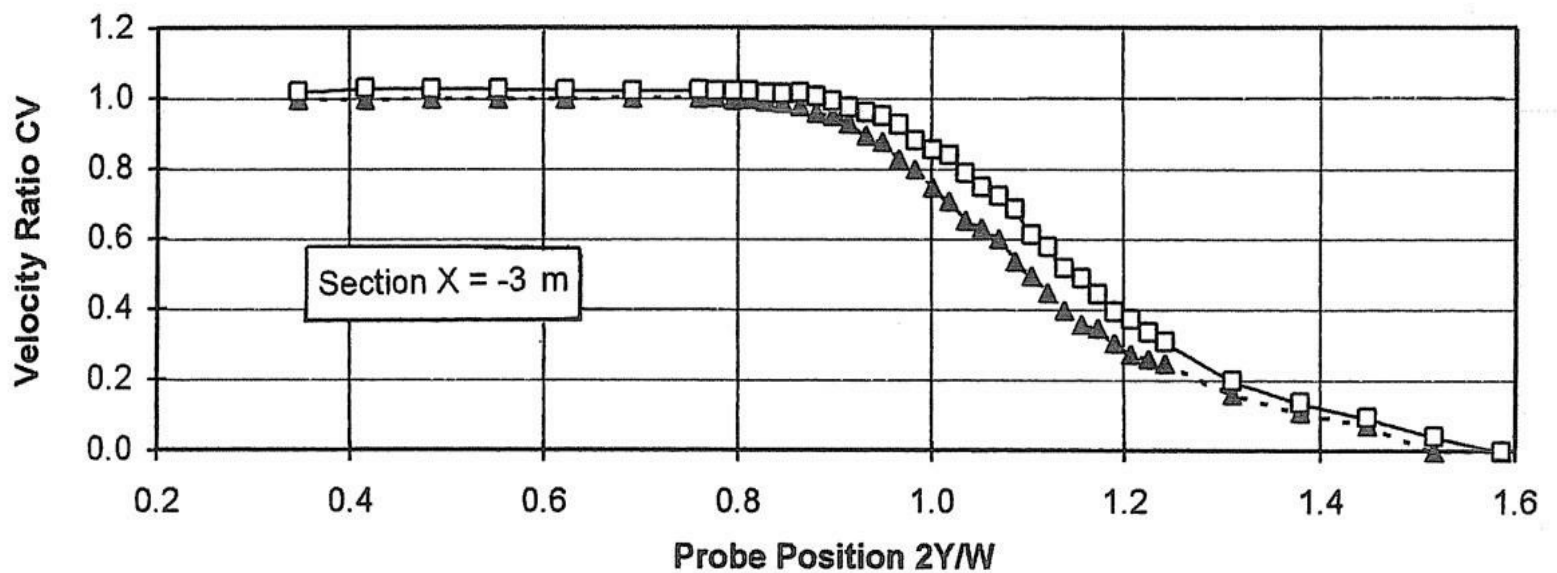
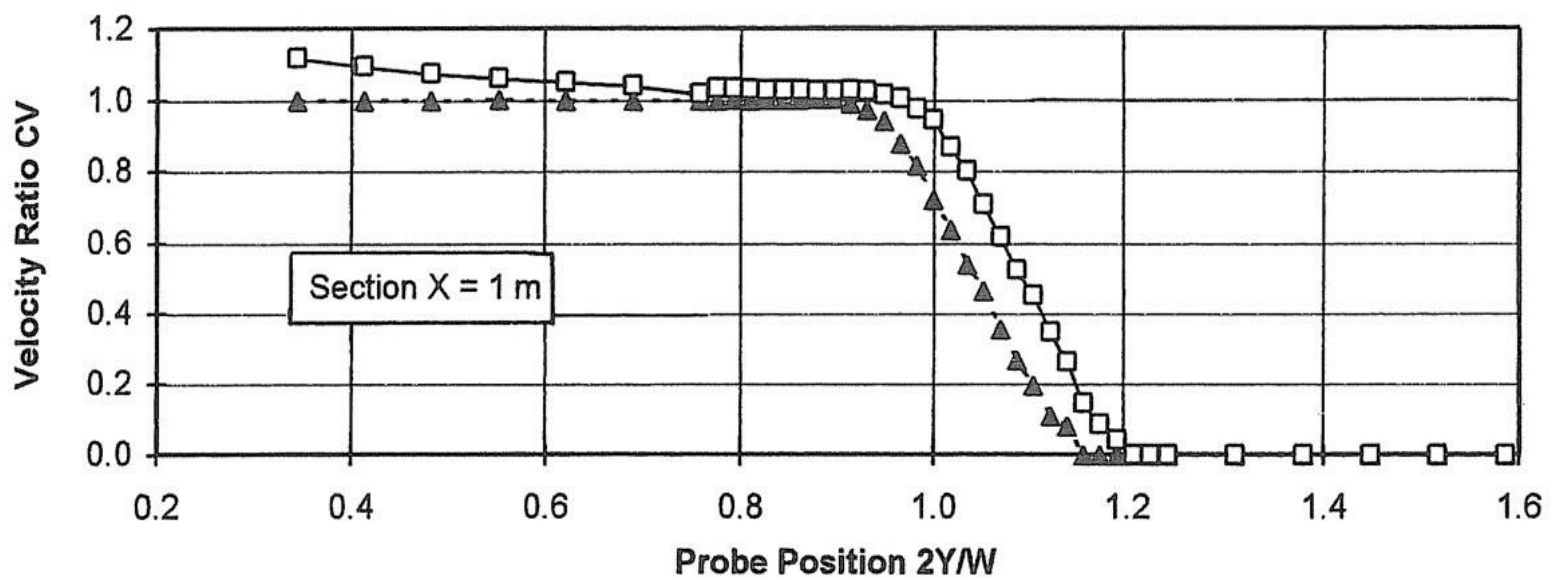
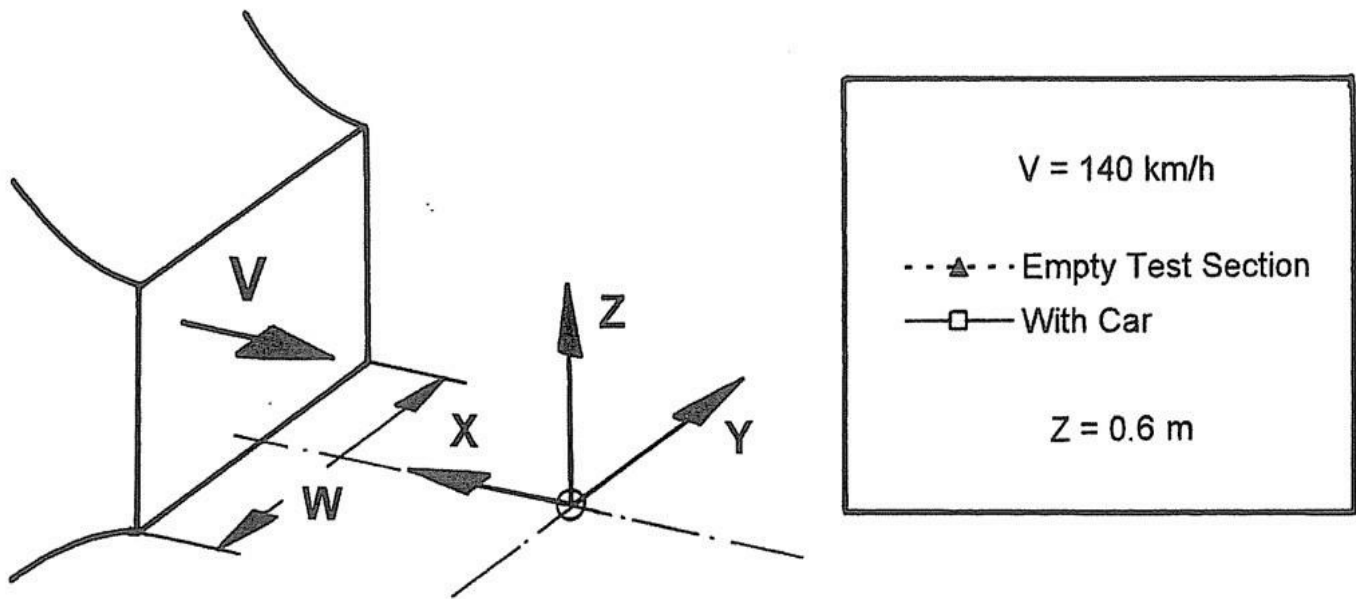
Και τα δύο είδη οριακού πίδακα –κλειστός ή ανοιχτός- έχουν τα προτερήματα και τα μειονεκτήματά τους σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες της αεροσήραγγας και τις ιδιορρυθμίες της καθημερινής εργασίας: θα συζητηθούν παρακάτω. Οι διορθώσεις που αποζημιώνουν για τις φυσικές διαφορές συγκριτικά με τη ροή στον ελεύθερο αέρα υπογραμμίζονται στο μέρος 1.3.3.

Συχνά, η ροή σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμών θεωρείται ως ο ιδανικός “ελεύθερος πίδακας” : η περιβάλλουσα (και επομένως συχνή) πίεση αποτυπώνεται όχι μόνο στο όριό του αλλά σε ολόκληρο το πεδίο ροής. Ένα πρωταρχικό πλεονέκτημα που έχει ανατεθεί στο τμήμα δοκιμών ανοιχτού πίδακα είναι η συχνή στατική πίεση κατά μήκος του άξονά του. Αυτή η ιδιότητα θα μπορούσε να έχει πλεονεκτήματα σε πειράματα με μη αεροδυναμικά σώματα γιατί, κατά τη μέτρηση αντίστασης σωμάτων με μεγάλες κάθετες επιφάνειες στο μπροστινό και πίσω μέρος, ακόμα και μια μικρή αξονική πίεση που έχει κλίση στο τμήμα δοκιμών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη. Ωστόσο, δεν υπάρχει σταθερή πίεση κατά μήκος ενός ανοιχτού πίδακα σε ένα κενό τμήμα δοκιμών, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.11. Γενικά, στην εξόδο του ακροφύσιου, η πίεση που έχει κλίση κατά μήκος του άξονα της σήραγγας είναι αρνητική. Κοντά στη μέση του τμήματος δοκιμών η κλίση πίεσης είναι μηδενική. Η επιπλέον καθοδική ροή είναι θετική, καθώς μετατρέπεται σε ανοδική μπροστά απ’ το συλλέκτη.

Όπως υπογραμμίζεται απ’ τον F.K. V. SCHULZ και τον J. –D. VAGT και όπως φαίνεται στην εικόνα 1.12(β), η μηδενική κλίση πίεσης σε όλο το μήκος ενός ανοιχτού πίδακα επιτυγχάνεται μόνο αν το αδιάστατο μήκος  $\lambda = L/DN$  του τμήματος

δοκιμών είναι αρκετά μεγάλο. Δυστυχώς, για πολλές ήδη υπάρχουσες αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες το θέμα δεν είναι αυτό.

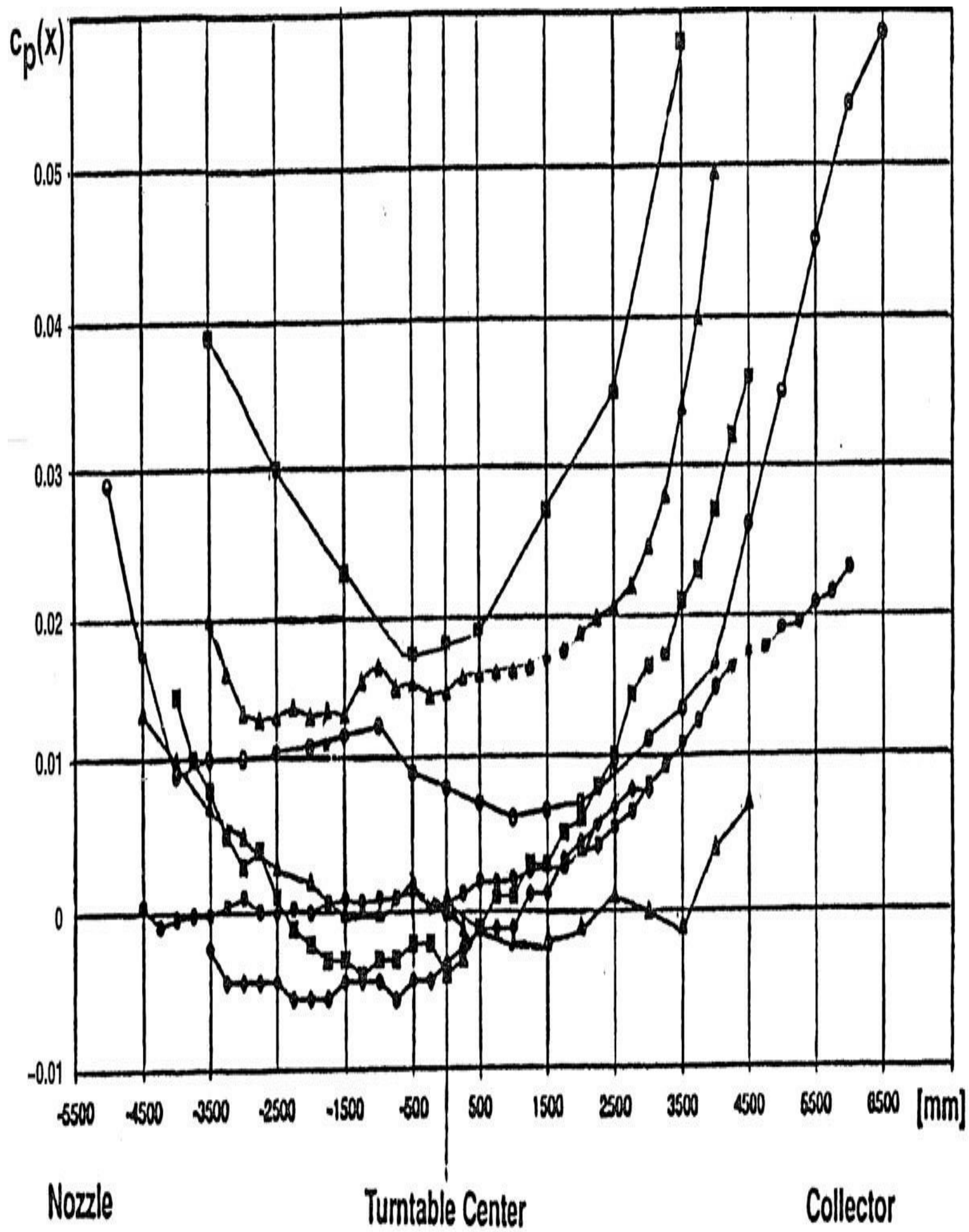




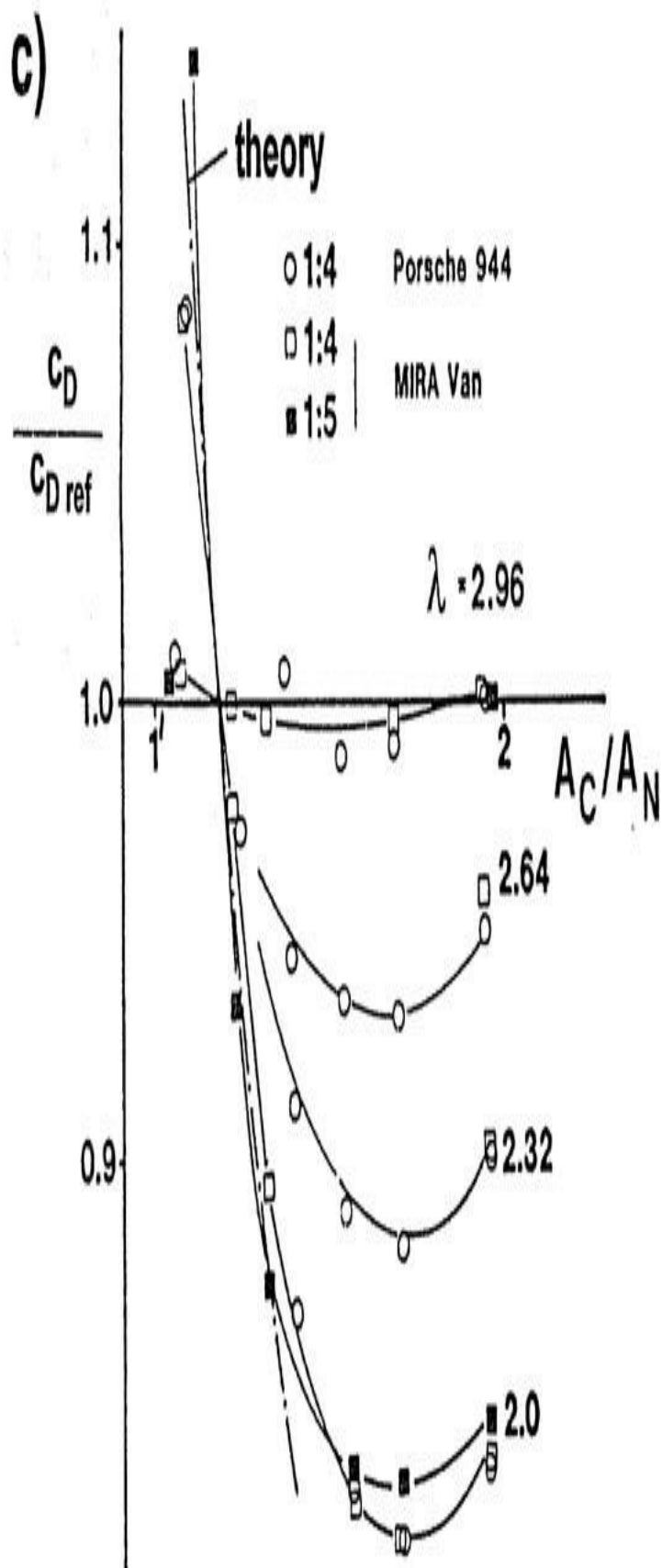
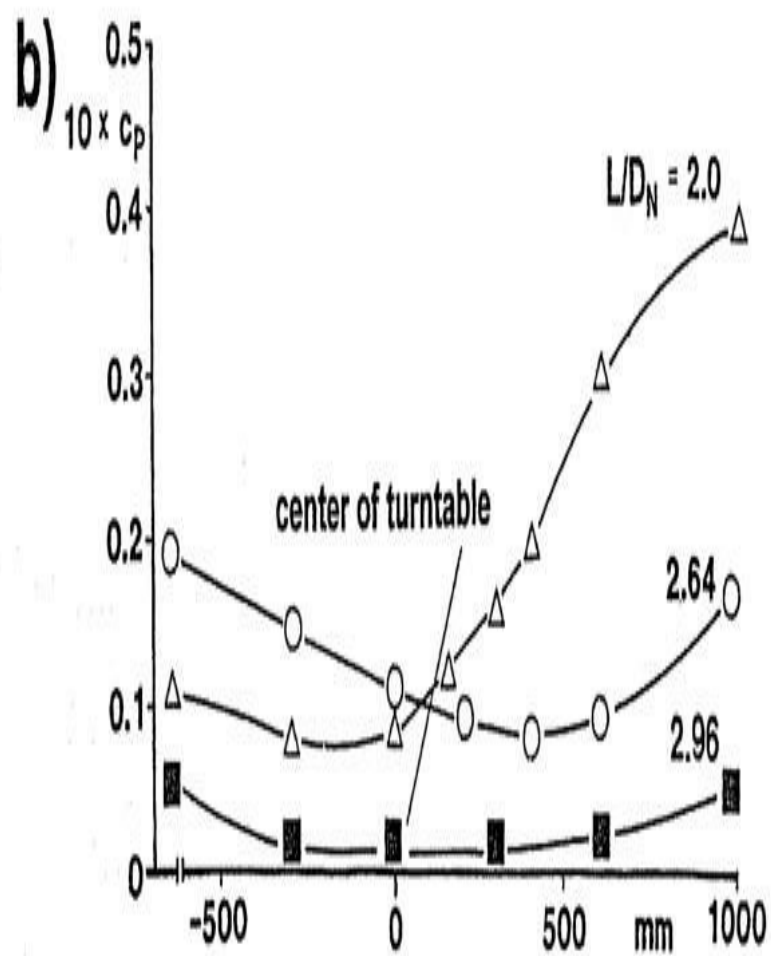
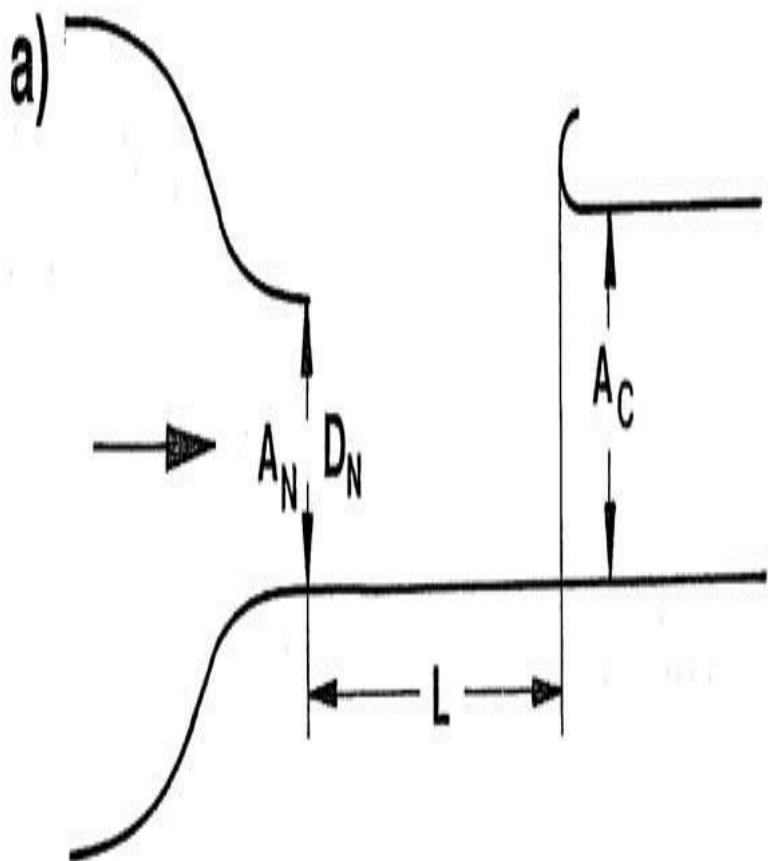
*Εικ. 1.10 Το όριο ενός ελεύθερου πίδακα που έχει μετατοπιστεί από ένα μοντέλο, μέτρηση των R. KUNSTNER και J. POTTHOFF.*

Με μια τυπική τιμή του  $\lambda = 2.0$  το αδιάστατο μήκος του τμήματος δοκιμών είναι αρκετά μικρό, και μόνο κάποιες απ' τις αεροσήραγγες παρουσιάζουν μια θετική κλίση πίεσης στην τοποθεσία του μοντέλου (σε ένα κενό τμήμα δοκιμών). Επομένως, η μετρημένη αντίσταση είναι πολύ χαμηλή. Στην εικόνα 1.12 υπάρχει ένα παράδειγμα, όπου η υπολογισμένη αντίσταση ήταν χαμηλή,  $\Delta cD = 0.03$ . Το πως επηρεάζεται απ' το μήκος του τμήματος δοκιμής και απ' την περιοχή εισόδου του συλλέκτη AC φαίνεται στην εικόνα 1.12(γ). Με το αυξανόμενο μήκος L του τμήματος δοκιμής, τα λάθη στη μέτρηση αντίστασης είναι λιγότερα και η επιρροή της περιοχής εισόδου AC του συλλέκτη μειώνεται. Σύμφωνα με αυτό, ένα σχετικό μήκος  $\lambda = 3$  του τμήματος δοκιμής φαίνεται να είναι καλό, με μια πολύ μικρή επίδραση της περιοχής εισόδου AC του συλλέκτη. Ωστόσο, δεν πρέπει να ληφθεί υπόψιν μόνο η σπουδαιότητα της









περιοχής εισόδου AC του συλλέκτη. Ο C. KRAMER, κ.α. επεξεργάστηκε τις λεπτομέρειες γεωμετρικής εισόδου του συλλέκτη που είναι ευνοϊκές για ομαλή εισροή και που βοηθούν στο να αποφύγει κανείς τη χαμηλή συχνότητα αστάθειας («άντληση») της ροής.

*Εικ.1.11 Συντελεστής στατικής πίεσης  $cp(x)$  κατά μήκος του άξονα πολλών αυτοκινητιστικών αεροσηράγγων πλήρους κλίμακας, μετά τους E. MERCKER και J. WIEDEMANN.*

*Εικ. 1.12 Επίδραση του α) μήκους  $L$  του τμήματος δοκιμής και του συλλέκτη της εσωτερικής περιοχής AC β) της στατικής πίεσης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας και γ) της υπολογισμένης αντίστασης  $D$ , μετά τους F.K. v. SCHULZ-HAUSMANN και J.-D. VAGT.*

Το δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα που προηγουμένως συνείσφερε στο ανοιχτό τμήμα δοκιμών ήταν η χαμηλή απόλυτη τιμή διόρθωσης. Αυτό το επιχείρημα όμως δεν ισχύει πλέον. Για πολύ καιρό, η μόνη διόρθωση που λαμβάνονταν υπόψιν ήταν η “διόρθωση στένωσης” που στην πραγματικότητα είναι μικρή για έναν ανοιχτό πίδακα. Όμως, όπως θα παρουσιαστεί στο μέρος 1.3.3, η στένωση (συγκεκριμένα, η

συμπαγής στένωση) είναι μόνο ένας παράγοντας απ' τη σειρά παρεμβάσεων που θα πρέπει να εξεταστούν, οπότε δε γίνεται να εξεταστεί μεμονωμένα.

Τέλος, το τρίτο πλεονέκτημα του ανοιχτού τμήματος δοκιμών είναι η εύκολη προσβασιμότητά του, που διευκολύνει την εγκατάσταση του μοντέλου και την τοποθέτηση ανιχνευτών, επιτρέπει τις εκτός-ροής ακουστικές μετρήσεις όπως και την εύκολη απεικόνιση της ροής.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του ανοιχτού τμήματος δοκιμών είναι το περιορισμένο χρησιμοποιήσιμο μήκος του. Ο πίδακας που βγαίνει απ' το ακροφύσιο αναμειγνύεται με το σταθερό αέρα στο γύρω διάκενο. Το πλάτος του πυρήνα του πίδακα (όπου η επιθυμητή ταχύτητα ανέμου  $U$  υπάρχει) μειώνεται ταχύτατα. Επιπλέον, η ταραχώδης διαδικασία ανάμιξης στο όριο του πίδακα είναι πιο έντονη απ' αυτήν που βρίσκεται σ' ένα ταραχώδες οριακό στρώμα προσκείμενο σε έναν τοίχο, και αυτή η ανάμειξη προκαλεί μεγάλες απώλειες. Επομένως, η απαίτηση ισχύος ενός ανοιχτού τμήματος δοκιμών είναι υψηλότερη από ένα κλειστό. Άλλα μειονεκτήματα ενός ανοιχτού πίδακα είναι η επιρρέπεια σε χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεις (μεγάλο κύμα) και η αβίαστη ηχητική του ραδιενέργεια, η οποία μπορεί να θεωρηθεί μελές από το προσωπικό της αεροσήραγγας. Τέλος, για τις κλιματικές αεροσήραγγες, το διάκενο πρέπει να βρίσκεται μέσα σε μια κλιματιζόμενη περιοχή: επίσης, οι μεγάλοι επιτοίχιοι πίνακες πρέπει να απομονωθούν.

Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να προκύψει κατά τη δοκιμή αγωνιστικού αυτοκινήτου σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμών. Τα πίσω φτερά παράγουν μια υψηλή καθοδική δύναμη (αρνητική άνωση). Η σχετική άντωση μπορεί να είναι τόσο δυνατή που λυγίζει τη ροή αέρα πίσω απ' το αυτοκίνητο και πάνω απ' το συλλέκτη της σήραγγας. Ο αέρας πίσω απ' το αυτοκίνητο μπάζει απ' τα πλάγια και αυτό μπορεί να

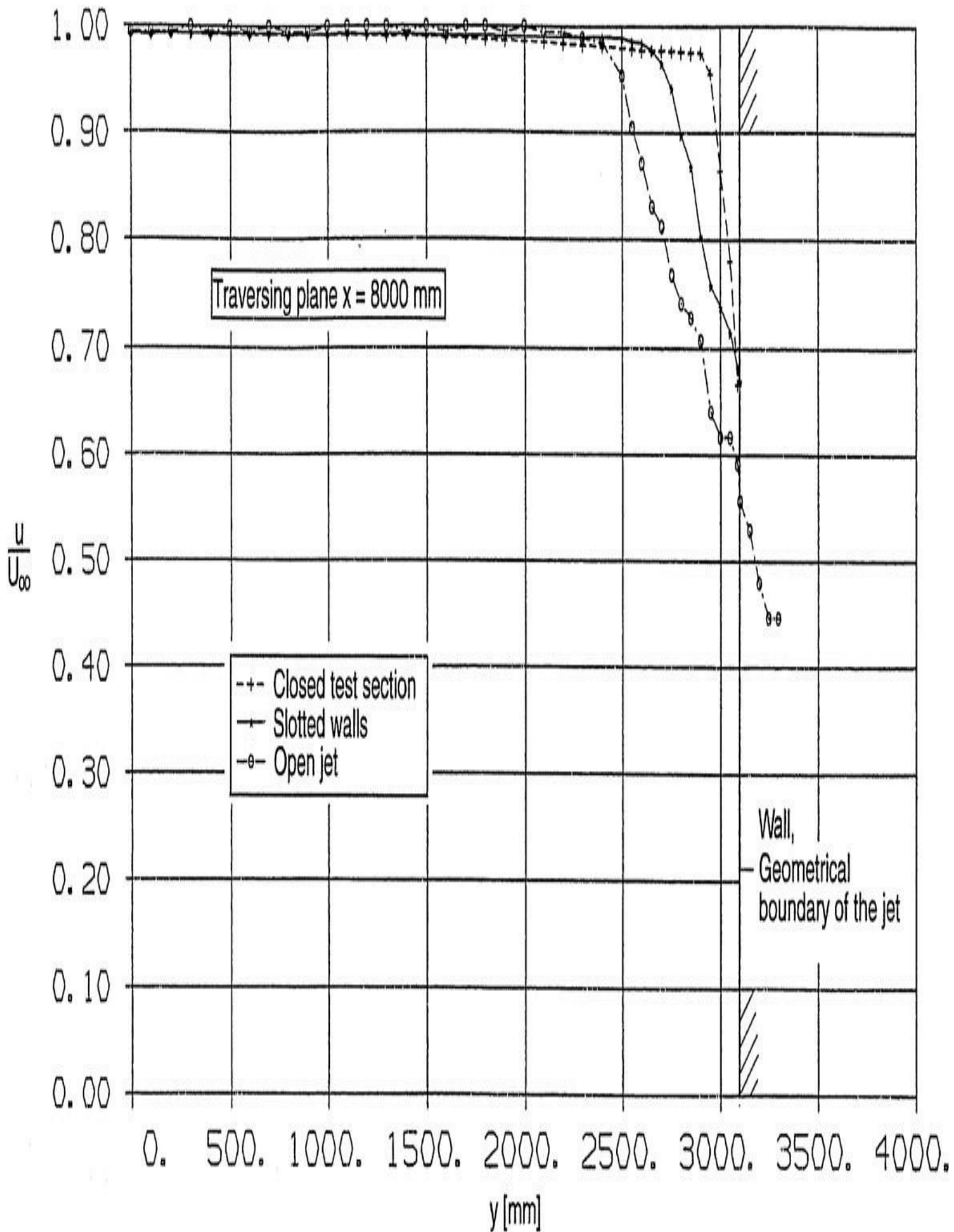
αλλάζει σημαντικά τη ροή στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου.

Οι αρνητικές ιδιότητες ενός ανοιχτού τμήματος δοκιμών είναι οι αντίστοιχες θετικές ενός κλειστού. Το πλεονέκτημα ενός κλειστού τμήματος δοκιμών είναι το μεγάλο χρησιμοποιήσιμο μήκος του. Ωστόσο, η ανάπτυξη του οριακού στρώματος κατά μήκος των τοιχωμάτων μειώνει την αποτελεσματική περιοχή δοκιμών, και καταλήγει σε μια αυξανόμενη ταχύτητα και μια αντίστοιχη μείωση πίεσης κατά μήκος του άξονα της ροής αέρα. Η σχετική αρνητική κλίση πίεσης μπορεί να αποζημιωθεί αυξάνοντας τη διατομή της σήραγγας στη κατεύθυνση της ροής. Όμως, αυτή η αποζημίωση είναι σωστή μόνο για συγκεκριμένες διαμορφώσεις, συγκεκριμένα για το κενό τμήμα δοκιμών. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του κλειστού τμήματος δοκιμών είναι η σταθερότητα της ροής του, δηλαδή, δεν υπάρχει το πρόβλημα της άντλησης.

Ένα μειονέκτημα του κλειστού τμήματος δοκιμών είναι η ευαισθησία του στη στερεή και ρευστή στένωση. Επίσης, σε μια μεγάλη γωνία εκτροπής, η πλευρική απόκλιση της ροής αέρα μπορεί να είναι τόσο δυνατή που η σχετική δυσμενής κλίση πίεσης στα προσκείμενα πλευρικά τοιχώματα του τμήματος δοκιμών θα οδηγήσει σε διαχωρισμό του οριακού στρώματος. Σ' αυτήν την περίπτωση, δεν είναι πλέον δυνατή η διόρθωση στη γωνία εκτροπής.

Το σχισμοειδές τοίχωμα του τμήματος δοκιμών αποτελεί μια προσπάθεια για να συνδυάσει κανείς τα πλεονεκτήματα του ανοιχτού και κλειστού τμήματος, και ταυτόχρονα να ελαττώσει τα μειονεκτήματα και των δύο. Οι σχισμές στα τοιχώματα επιτρέπουν την πρόσβαση της γύρω πίεσης, στη ροή μέσα στο τμήμα δοκιμών. Έτσι η πίεση κατά μήκος του άξονα είναι (σχεδόν) σταθερή. Το στερεό μέρος των τοιχωμάτων εμποδίζει τον πίδακα απ' το να αναμιχθεί με το γύρω αέρα: επομένως, ο πυρήνας του πίδακα παραμένει χρησιμοποιήσιμος για μεγαλύτερο μήκος. Οι μετρήσεις που φαίνονται στην εικόνα 1.13, οι οποίες παρουσιάστηκαν απ' τον J. –D.





VAGT για τον σκοπό του βιβλίου του, αναδεικνύουν τις βασικές αρχές των

σχισμοειδών τοιχωμάτων: το προφίλ της σταυρωτής ταχύτητας τους βρίσκεται

ανάμεσα σ' αυτό του ελεύθερου πίδακα και στου κλειστού τμήματος δοκιμών. Η ιδέα

των σχισμοειδών τοιχωμάτων αποδίδεται στους K. WIEGHARDT και F. VANDREY.

Τα σχισμοειδή τοιχώματα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στις σήραγγες νερού και σε

αεροσήραγγες ναυτικής υδροδυναμικής για να επιτρέψουν την έρευνα πάνω σε

μεγάλα σώματα με Reynolds αριθμούς.

Πολλές αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες είναι εξοπλισμένες με σχισμοειδή τοιχώματα:

παραδείγματα δίνονται στο μέρος 1.5. Σύμφωνα με τον C. KRAMER, η εμπειρία δεν

ήταν πάντα θετική. Το (αδιάστατο) πλάτος των σχισμών, η λεγόμενη αναλογία

ανοιχτής περιοχής, πρέπει να καθοριστεί από δοκιμές βαθμονόμησης οι οποίες

παράγουν μια διανομή πίεσης στο μοντέλο του αυτοκινήτου που αντιστοιχεί σ' αυτό

του ελεύθερου αέρα.

*Εικ. 1.13 Διανομή ταχύτητας για τρία διαφορετικά είδη ορίου του τμήματος δοκιμής:*

*ανοιχτό, κλειστό, και με διαμηκή τοιχώματα, μετά τον J.-D. VAGT.*

Μια ανοιχτή περιοχή του 30% αποδείχτηκε ότι είναι καλύτερη για επιβατικά

αυτοκίνητα (βλ. R.G.J. FLAY κ.α. και P.M. WAUDBY-SMITH και W.J. RAINBIRD.

Είναι αξιοσημείωτο να αναφέρει κανείς ότι αυτή η τιμή είναι έγκυρη για την

αντίσταση αλλά όχι απαραίτητα για τα υπόλοιπα συστατικά της αεροδύναμης που

προκύπτει, όπως για παράδειγμα, η άνωση. Μια ημι-εμπειρική μέθοδος για τον

υπολογισμό των κύριων διαστάσεων ενός τμήματος δοκιμών με σχισμοειδή

τοιχώματα προέκυψε απ' τον L.N. GOENKA.

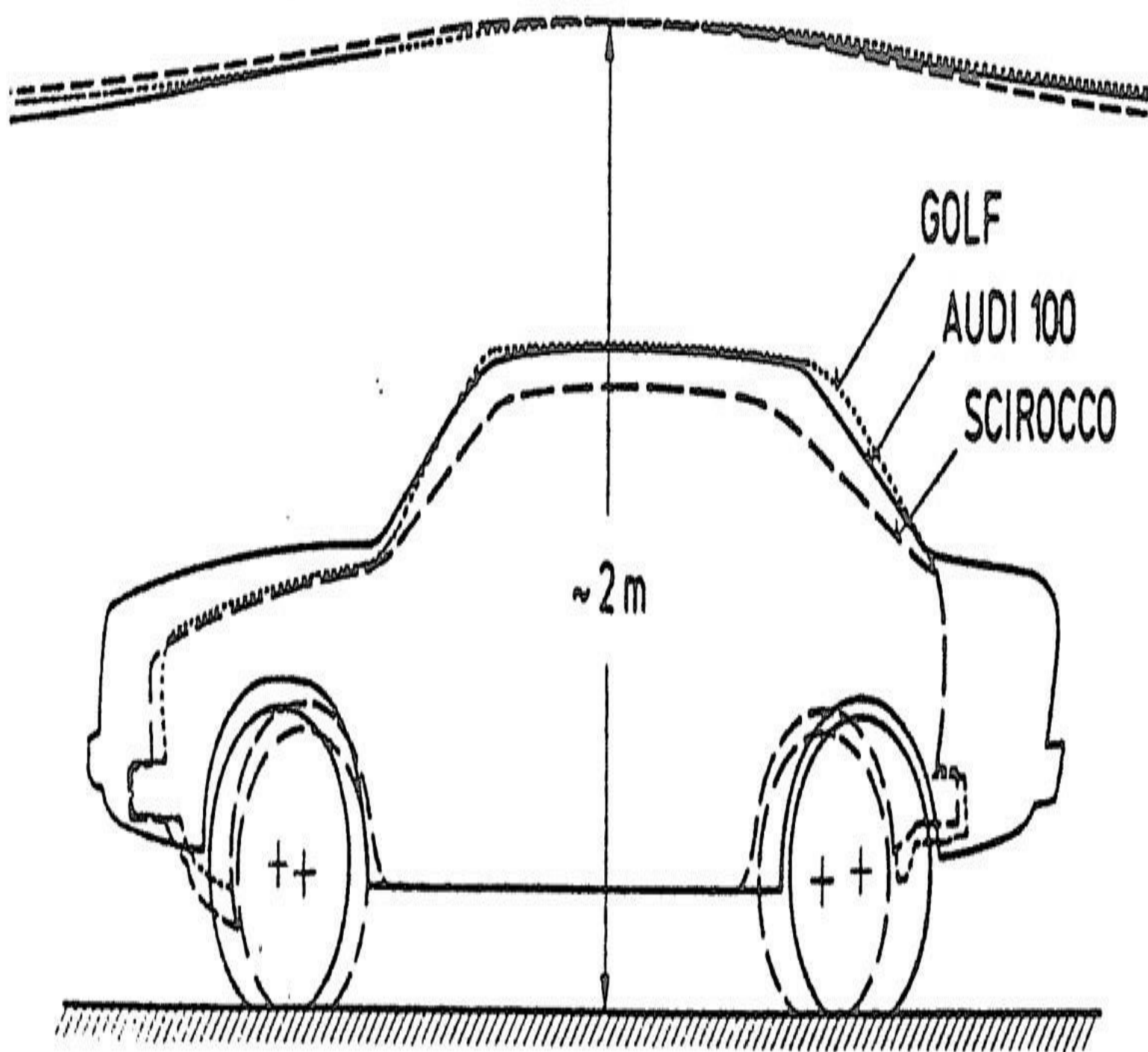
Ένα μέσο για την αποφυγή μεγάλης διόρθωσης, απαραίτητη για τη στερεή και ρευστή

στένωση σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμών, είναι η βελτιστοποίηση των τοιχωμάτων.

Σ' αυτήν την περίπτωση εικάζεται ότι η μορφή ροής σε μια συγκεκριμένη απόσταση

απ' το όχημα, το λεγόμενο μακρινό πεδίο, είναι ελαφρώς εξαρτώμενη απ' τις μεμονωμένες λεπτομέρειες του σχήματός του. Το μακρινό πεδίο καθορίζεται απ' τις ολικές παραμέτρους του αντικειμένου δοκιμής: το μήκος του, το ύψος, και το πλάτος (και επομένως ένα είδος ίσης αναλογίας που προκύπτει απ' αυτά). Αν τα τοιχώματα της σήραγγας είναι σχεδιασμένα σύμφωνα με την μορφή ελεύθερης ροής αέρα ενός αυτοκινήτου μεσαίου μεγέθους, η ροή γύρω από μικρότερα και μεγαλύτερα





αυτοκίνητα θα είναι ελαφρώς διαστρεβλωμένη, σε κάθε περίπτωση πολύ λιγότερη από παράλληλα τοιχώματα. Αυτό επιβεβαιώνεται με το να συγκρίνει κανείς τα ίχνη καπνού που αποτυπώθηκαν στην μεγάλη Volkswagen αεροσήραγγα. Οι αεροδυναμικές που αποτυπώνονται (από φωτογραφίες) στην εικόνα 1.14, διαφέρουν ελαφρώς σε ένα ύψος 2m πάνω απ' το έδαφος. Ο L.G. STAFFORD παρουσίασε (με μια αριθμητική μέθοδο) πόσο αποτελεσματικές μπορούν να γίνουν οι αεροδυναμικές των τοιχωμάτων.

Σύμφωνα μ' αυτόν, η στένωση μπορεί να είναι πάνω από 20% και ακόμα να αποφέρει τα ίδια αποτελέσματα όπως η στένωση 5% σε ένα τμήμα δοκιμής με παράλληλα τοιχώματα. Πέρα από αυτό το πλεονέκτημα, που αυξάνει τις πιθανότητες για το χτίσιμο αρκετά μικρής αεροσήραγγας με κλειστό τμήμα δοκιμών, η βελτιστοποίηση των τοιχωμάτων δεν είχε εφαρμοστεί ποτέ σε αυτοκινητιστικές σήραγγες πλήρους κλίμακας.

Το μειονέκτημα ενός τμήματος δοκιμών με βελτιστοποιημένα αλλά σταθερά τοιχώματα είναι ότι η περιφέρεια του δεν ταιριάζει σε ένα όχημα που οι βασικές διαστάσεις διαφέρουν σημαντικά απ' το όχημα που χρησιμοποιήθηκε για να ορίσει αυτήν την περιφέρεια. Για παράδειγμα, θα είναι πρόβλημα αν ένα φορτηγό τοποθετηθεί σε ένα τμήμα δοκιμών διαμορφωμένο για επιβατικά αυτοκίνητα. Μια πιθανότητα για να ξεπεραστεί το πρόβλημα προσφέρεται από τα *προσαρμοζόμενα τοιχώματα*, έστω και με μεγάλη προσπάθεια. Μια σχετική ιδέα αναπτύχθηκε απ' τον J. D. WHITFIELD και δοκιμάστηκε σε ένα πλήρες μοντέλο αεροσήραγγας.

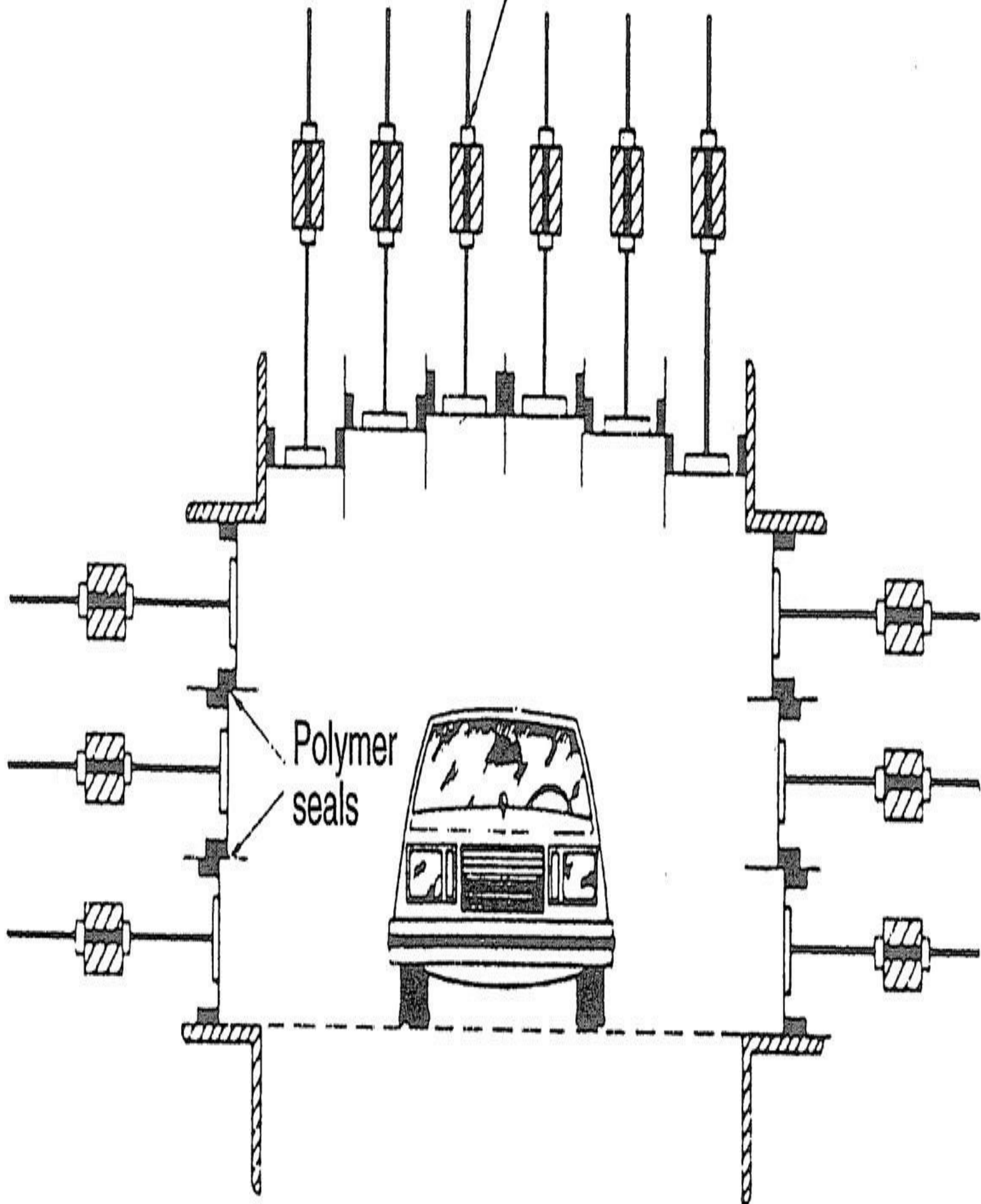
*Εικ. 1.14 Σύγκριση των μακρινών πεδίων ροής τριών διαφορετικών επιβατικών αυτοκινήτων, που χρησιμοποιούν μια επιλεγμένη αεροδύναμη στη διαμηκή ενδιάμεση πλακέτα.*

Τα τοιχώματα του τμήματος δοκιμής αποτελούνταν από πολλές λωρίδες, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.15. Οι περιφέρειές τους αντιστοιχούσαν στη μορφή βελτιστοποίησης που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό έγινε με έναν επαναληπτικό τρόπο, χρησιμοποιώντας ένα ενδεικτικό μοντέλο ροής. Υπολογίστηκαν οι διανομές πίεσης στις λωρίδες των τοιχωμάτων (μακρινό πεδίο), αλλά και σε ένα πεδίο ροής άπειρων διαστάσεων (ελεύθερος αέρας). Μετά οι περιφέρειες των τοιχωμάτων προσαρμόστηκαν έτσι όπως οι τοπικές πιέσεις ήταν μετρημένες στις ίδιες περιοχές του ελεύθερου αέρα. Ο L. N. GOENKA και ο M. O. VARNER ανέπτυξαν έναν

αλγόριθμο που απαιτούσε μόνο ένα βήμα επανάληψης. Η εικόνα 1.16 δίνει ένα παράδειγμα με περιφέρειες τοιχωμάτων που υπολογίστηκαν ακολουθώντας αυτήν τη διαδικασία. Σύμφωνα με τον GOENKA και τον VARNER, δεν ήταν απαραίτητη καμία διόρθωση στένωσης ακόμα και με αναλογία στένωσης 20%. Η ασύμμετρη ροή μπορεί επίσης να υποστεί επεξεργασία. Όταν ένα αυτοκίνητο εκτρέπεται, προκύπτει ένα ασύμμετρο τμήμα δοκιμών.



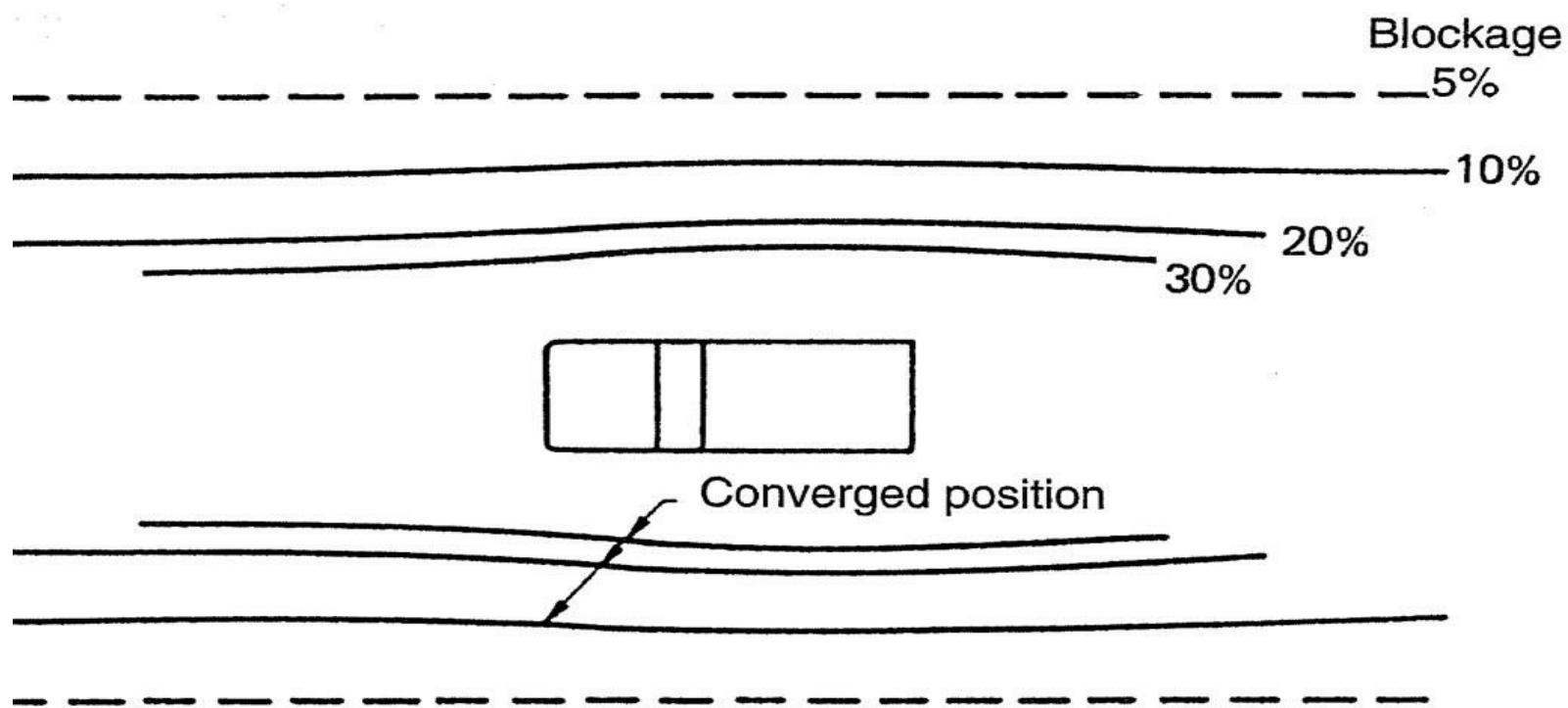
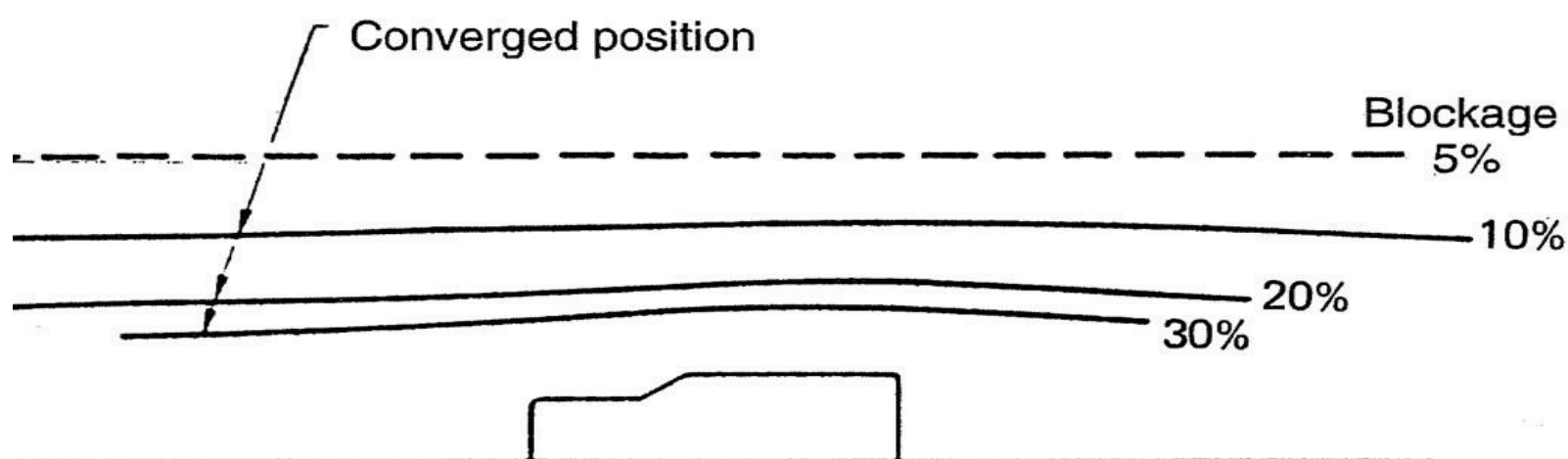
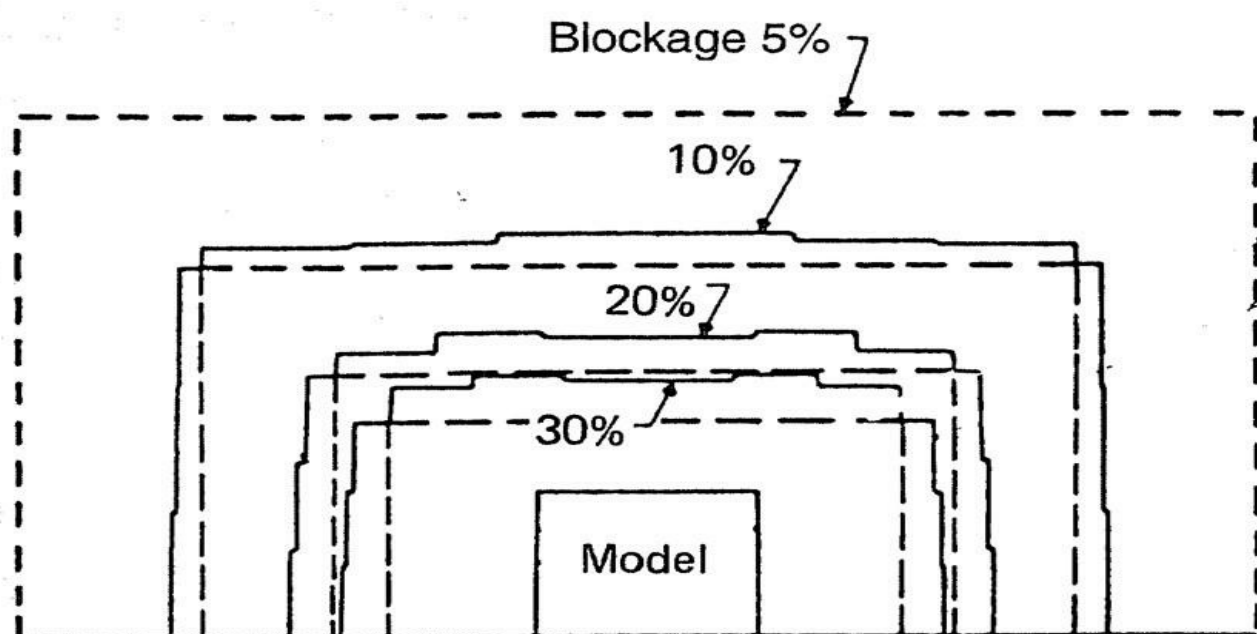
Positioning actuators



Η ιδέα προσαρμοστικών τοιχωμάτων εφαρμόστηκε στις διαχητικές αεροσήραγγες: η 1 x 1m διαχητική σήραγγα του DLR στο Gottingen είναι ένα παράδειγμα (βλ. H. HOLST). Ωστόσο, τα προσαρμοστικά τοιχώματα δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμα σε μια αυτοκινητιστική αεροσήραγγα.

*Εικ. 1.15 Κλειστό τμήμα δοκιμής με προσαρμοζόμενα τοιχώματα, μετά τον J.D. WHITFIELD.*







*Εικ. 1.16 Περιγράμματα προσαρμοζόμενων τοιχωμάτων για αναλογίες γεωμετρικής στένωσης 5-30%, μετά τους L.M. GOENKA και M.O. VARNER.*

### **13.2.3.3 Ακροφύσιο**

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

Η λειτουργία του ακροφύσιου είναι τετραπλή:

1. Επιταχύνει τη ροή.
2. Κάνει πιο ενιαία τη διανομή ταχύτητας πάνω από τη διατομή της ροής.
3. Μειώνει την ένταση της ροής.
4. Εξυπηρετεί τη μέτρηση ταχύτητας του αέρα στο τμήμα δοκιμών.

Η ποιότητα της ροής στο τμήμα δοκιμών καθορίζεται απ' το σχέδιο του ακροφύσιου.

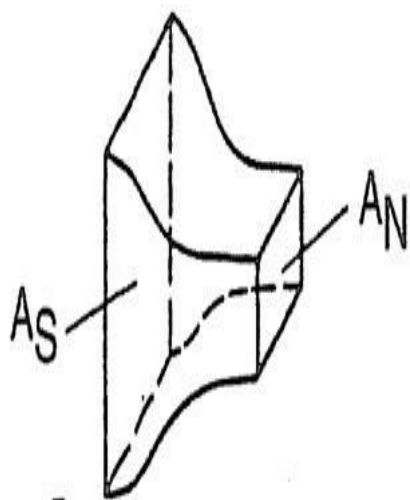
Η “ποιότητα ροής” σ’ αυτό το πλαίσιο αναφέρεται στο ολικό προφίλ ταχύτητας, στις παρεκκλίσεις της τοπικής ταχύτητας απ’ το μέσο όρο (ομοιομορφία), γωνίωση της ροής και επίπεδο στροβιλισμού. Ο όρος “σχεδιασμός” αντιπροσωπεύει τις γεωμετρικές ιδιότητες του ακροφύσιου, δηλαδή την αναλογία συστολής, το μήκος και το σχήμα του (περιφέρειες των τοιχωμάτων του). Η αναλογία συστολής είναι υπεύθυνη κυρίως για τη μείωση των παρεκκλίσεων της τοπικής ταχύτητας από το μέσο όρο, και για τις διακυμάνσεις ταχύτητας, δηλαδή, το επίπεδο στροβιλισμού. Όπως υπογραμμίστηκε στο μέρος 1.1, οι απαιτήσεις (προσδιορισμοί) γι’ αυτές τις ιδιότητες ροής δεν έχουν ακόμα διαμορφωθεί σε μια λογική βάση για τις αυτοκινηστικές αεροσήραγγες. Ωστόσο, τα ακόλουθα δεδομένα είναι τυπικά για τις υπάρχουσες σήραγγες (βλ. [1.3]):

- Επίπεδο του προφίλ ταχύτητας.
- Τοπικές παρεκκλίσεις απ’ το μέσο όρο ταχύτητας ανέμου  $\Delta U/U_\infty = (u=U_\infty)/U_\infty \leq \pm 0.5\%$ .
- Γωνίωση σε κλίση και εκτροπή  $\alpha, \beta \leq \pm 0.5^\circ$ .
- Επίπεδο στροβιλισμού  $Tu = \leq 0.5\%$ .

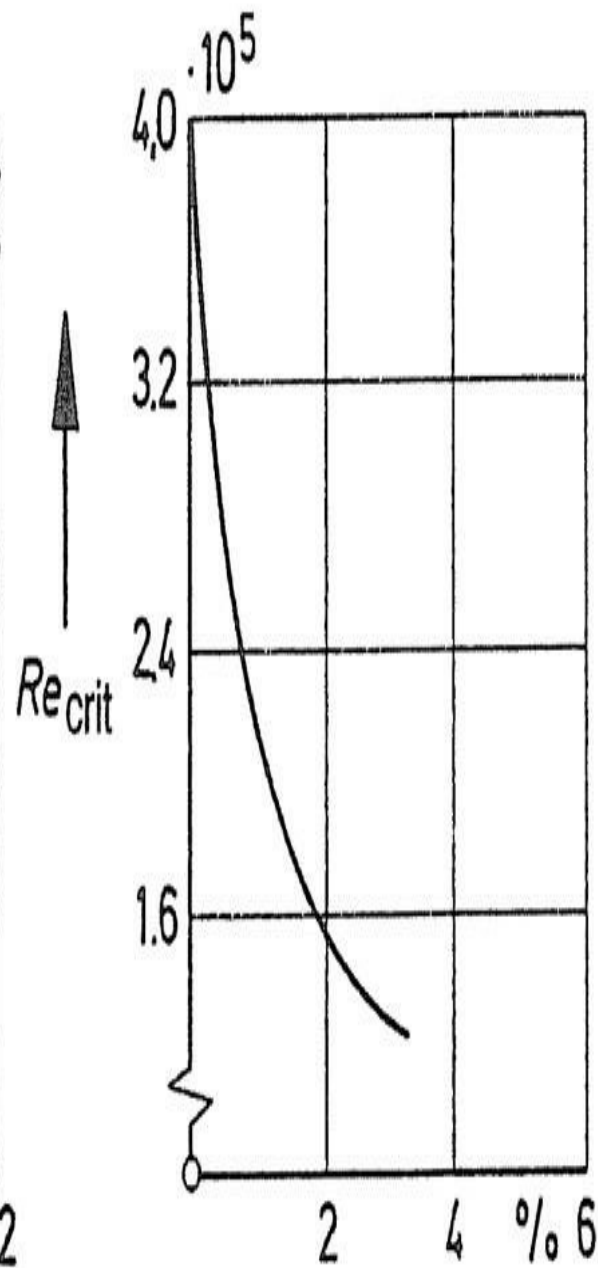
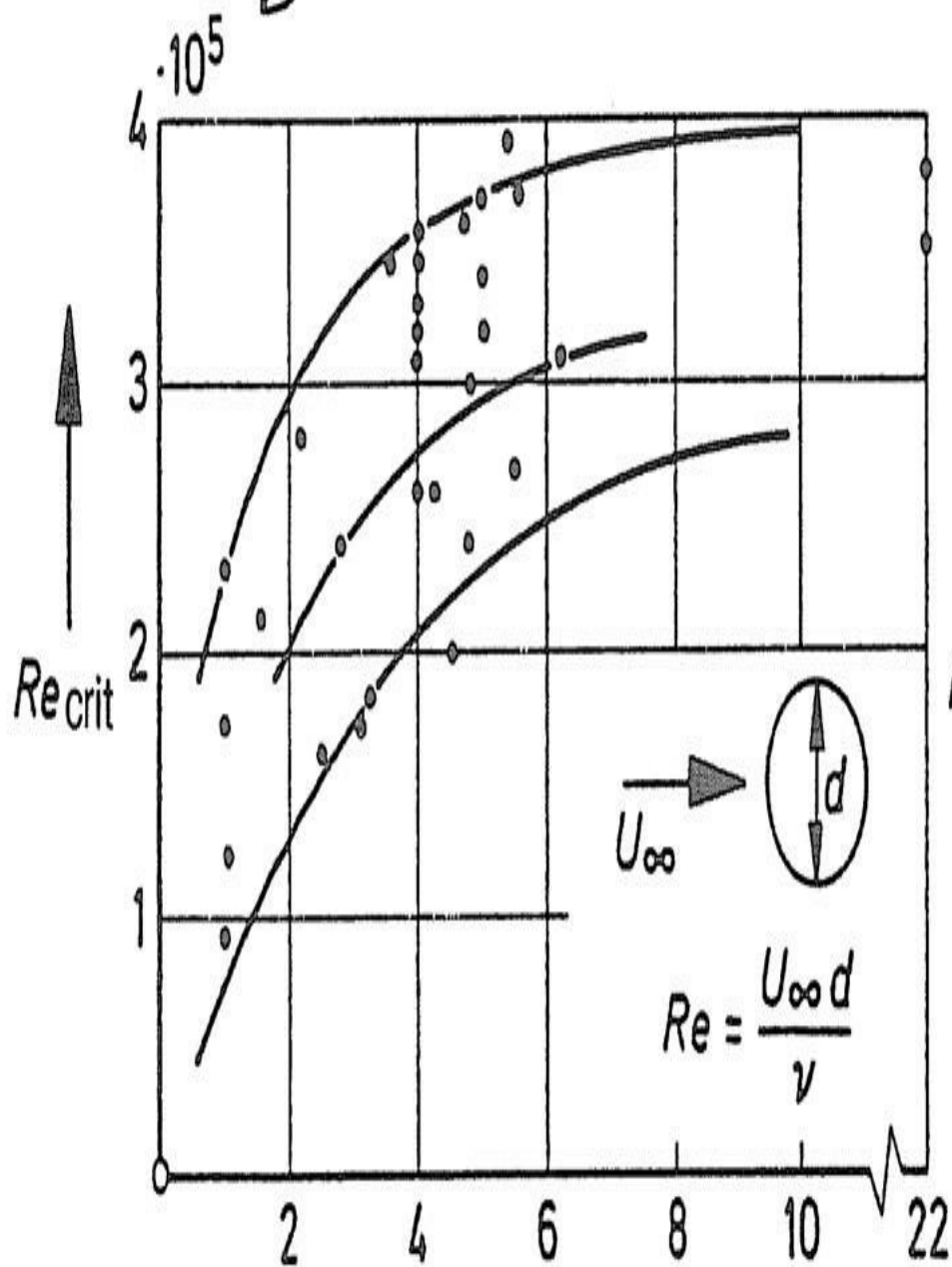
Η αναλογία συστολής  $\kappa$  ορίζεται ως τη σχέση ανάμεσα σε δύο διατομές, της εισόδου

και της εξόδου του ακροφύσιου (βλ. Σχέδιο στην κορυφή της εικόνας 1.17:  $\kappa = AS/AN$ ). Το AS είναι η διατομή του θαλάμου καθίζησης, που είναι ίδια με την είσοδο του ακροφύσιου: στην έξοδο η διατομή AN του ακροφύσιου είναι ίδια με αυτή του τμήματος δοκιμών. Όπως είναι γνωστό, μια μεγάλη αναλογία συστολής  $\kappa$  είναι προαπαιτούμενη για ενιαία διανομή ταχύτητας και χαμηλό επίπεδο στροβιλισμού. Σύμφωνα με τον P. BRADSHAW και τον R. C. PANKHURST [1.25] το ακόλουθο είναι έγκυρο:





Contraction ratio  $\kappa = \frac{A_S}{A_N}$



Contraction ratio  $\kappa' \longrightarrow$

$Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_{\infty}} \cdot 100 \longrightarrow$

Εικ. 1.17 Κρίσιμος αριθμός *Reynolds* και επίπεδο στροβιλισμού στις υπάρχουσες αεροσήραγγες με διαφορετικές αναλογίες συστολής του ακροφύσιου.

Ωστόσο, η αναλογία συστολής  $\kappa$  δεν καθορίζει μόνο την ποιότητα ροής αλλά και το μέγεθος και επομένως το κόστος. Άρα δε θα πρέπει να είναι πιο μεγάλη απ'το αναγκαίο.

Σήμερα το (τοπικό) επίπεδο στροβιλισμού υπολογίζεται με ένα θερμό σύρμα ανεμόμετρου. Η κλασική μέθοδος για να καθοριστεί το (ολικό) επίπεδο στροβιλισμού μιας αεροσήραγγας ήταν η μέτρηση του κρίσιμου *Reynolds* αριθμού  $Re_{CRIT}$  μιας σφαίρας, δηλαδή, ο *Reynolds* αριθμός κατά τον οποίο ο συντελεστής αντίστασης μειώνεται απότομα. Όπως φαίνεται στο δεξί διάγραμμα της εικόνας 1.17, ο  $Re_{CRIT}$  είναι μια μοναδική λειτουργία του επιπέδου στροβιλισμού  $Tu$ . Το γράφημα στην αριστερή πλευρά της ίδιας εικόνας συσχετίζει τον  $Re_{CRIT}$  με την αναλογία συστολής  $\kappa$ : η λειτουργία δείχνει ένα χαρακτηριστικό κορεσμού. Σύμφωνα με αυτό, ένα επίπεδο στροβιλισμού 0.5% επιτυγχάνεται με μια αναλογία συστολής  $\kappa = 4$ , μια τιμή που έχει ήδη προταθεί απ'τον L. PRANDTL. Η τιμή  $\kappa = 4$  μπορεί να θεωρηθεί λογική για αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες με κύκλωμα Gottingen. Για τις σήραγγες Eiffel, όπου η ανοδική ροή του ακροφύσιου δε διανέμεται από ανεμιστήρα, διαχύτη, περιστρεφόμενα πτερύγια, κλπ, ακόμα και μια μικρότερη αναλογία συστολής είναι αρκετή:  $\kappa = 2-3$ . Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο όταν ο αέρας αναρροφάται από ένα μεγάλο χώρο.

Το σχήμα του ακροφύσιου (μήκος και περιφέρεια) πρέπει να επιλεγθεί έτσι, ώστε να παρέχει ένα προφίλ ταχύτητας στην έξοδό του. Επίσης, η γωνία ανάμεσα στον πίδακα και το γεωμετρικό άξονα του τμήματος δοκιμών πρέπει να είναι μικρή, γιατί η ροή γύρω από τα μη αεροδυναμικά σώματα κοντά στο έδαφος είναι πολύ ευαίσθητη σε

διαφορές που έχουν σχέση με τη γωνία προσβολής (ή κλίση). Επομένως το  $\alpha \leq \pm 0.5^\circ$ , όπως προτάθηκε παραπάνω [1.3], είναι αρκετά γεναιόδωρο: όμως το  $\alpha \leq \pm 0.3^\circ$  φαίνεται να είναι πιο ρεαλιστικό. Η ευαισθησία των οχημάτων εκφράζεται λιγότερο στις μικρές παρεκκλίσεις κατά την εκτροπή όπου  $\beta = 0$ .

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενός ακροφύσιου, δύο επιδράσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη:

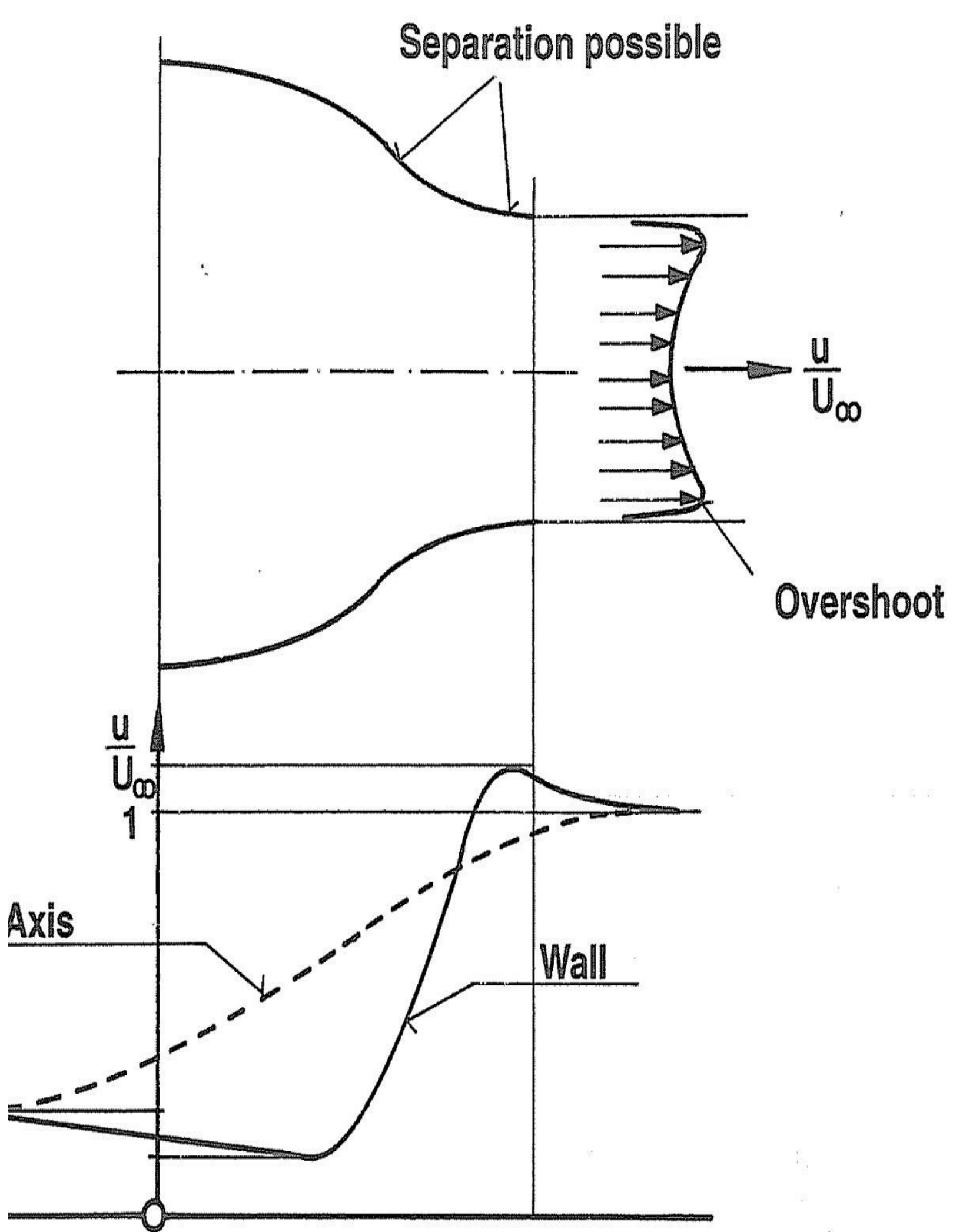
1. Για να μειώσει κανείς τη δευτερεύουσα ροή στις γωνίες ενός ορθογώνιου ακροφύσιου, το σχήμα των διατομών στην είσοδο και την έξοδο του πρέπει να είναι παρόμοιο (δηλαδή, σε μια ορθογώνια διατομή θα πρέπει να υπάρχει η ίδια αναλογία ύψους –πλάτους και στην είσοδο και στην έξοδο).
2. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.18, η αύξηση στην ταχύτητα κατά μήκος του άξονα διαφέρει από αυτήν κατά μήκος των τοιχωμάτων. Στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται μονοτονικά, ενώ στη δεύτερη όχι. Έτσι, υπάρχουν δύο περιοχές κλίσης πίεσης, κάνοντας τη ροή των τοιχωμάτων να τείνει προς διαχωρισμό. Αυτοί οι διαχωρισμοί πρέπει να αποφευχθούν γιατί, πρώτον, μετά την επανασύνδεση το οριακό στρώμα είναι πιο πυκνό και δεύτερον, ο διαχωρισμός μεγάλης κλίμακας μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις στη ροή. Αν το ακροφύσιο είναι πολύ κοντό, το οριακό στρώμα στην έξοδο του θα είναι πυκνό (λόγω διαχωρισμού και επανασύνδεσης): επίσης, το προφίλ ταχύτητας μπορεί να παρουσιάσει μια υπέρβαση, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.18. Αντιθέτως, αν το ακροφύσιο είναι πολύ μακρύ το οριακό στρώμα θα είναι επίσης πυκνό γιατί θα αναπτυχθεί κατά μήκος μακρύτερων τοιχωμάτων. Παρ'όλα αυτά, ένα μακρύ ακροφύσιο θα αυξήσει το κόστος κατασκευής ολόκληρης της σήραγγας.

Για πολύ καιρό, τα ακροφύσια της αεροσήραγγας σχεδιάζονταν σύμφωνα με τη

(μονοδιάστατη) φόρμουλα του E. WITOSZYNSKI. Ωστόσο, η αναλυτική του εξίσωση είναι έγκυρη μόνο για μη-ιξώδη αξονοσυμμετρική ροή, και δεν παρέχει καμία καθοδήγηση στην επιλογή του μήκους. Το μειονέκτημα αυτό, ξεπεράστηκε μέσω μιας διαδικασίας που ανέπτυξε ο T. MOREL. Βασίζεται ακόμη σε ιξώδη ροή αλλά λαμβάνει υπόψιν το γεγονός ότι μπορεί να υπάρξει διαχωρισμός αν οι τοπικές περιοχές της κλίσης πίεσης υπερβαίνουν την κρίσιμη τιμή κοντά στην είσοδο και έξοδο του ακροφύσιου. Ο MOREL δημιούργησε μια οικογένεια (κυκλικής διατομής) περιφερειών τοιχώματος ενώνοντας ομαλά δύο κυβικά: το αξονικό σημείο όπου συναντιούνται χρησιμοποιείται ως παράμετρος. Χρειάζονται πληροφορίες πάνω στις αποδεκτές κλίσεις πίεσης για να υπολογιστεί το μήκος και το σχήμα του ακροφύσιου. Σήμερα, η διαδικασία του MOREL χρησιμοποιείται για το αρχικό σχέδιο ενός ακροφύσιου, αλλά κατά τη διάρκεια λεπτομερειακού σχεδιασμού συμπληρώνεται από πολύ πιο προχωρημένες μεθόδους όπως περιγράφεται παρακάτω.

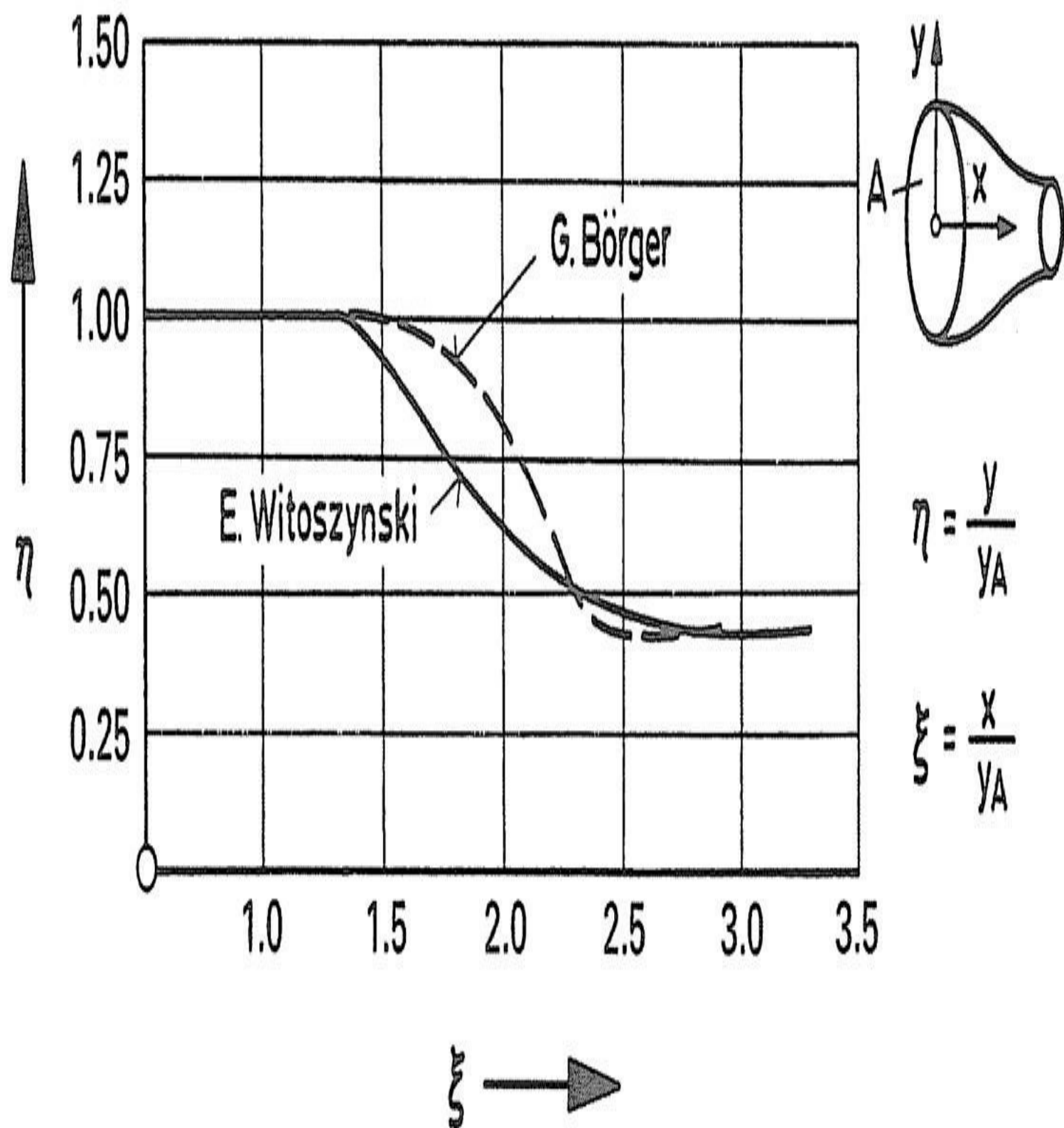


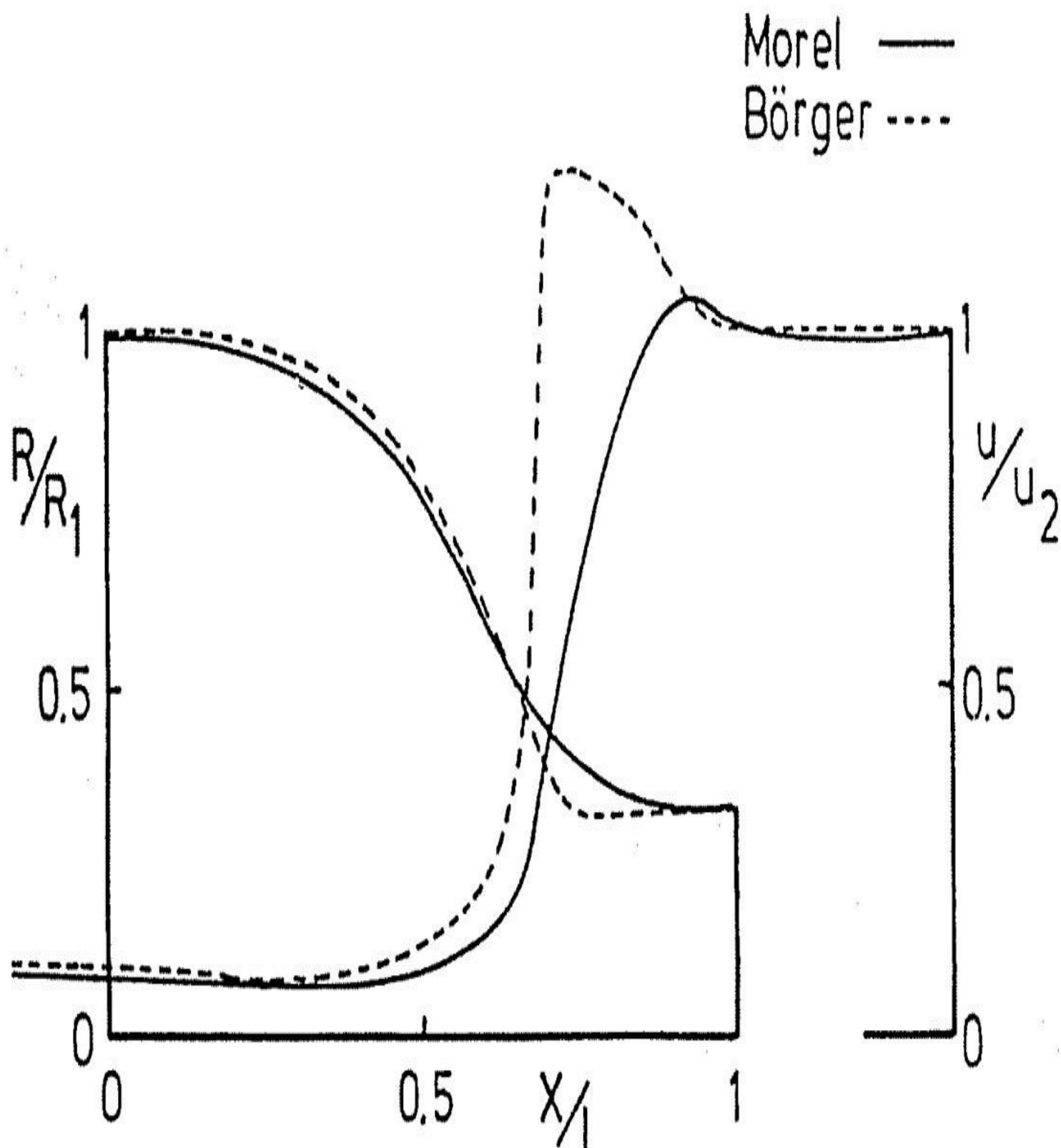




*Εικ. 1.18 Ταχύτητα μέσα σε ένα ακροφύσιο και στην έξοδό του.*

Αυτές οι μέθοδοι ακολουθούν την “κλασική” ιδέα των δύο ζώνων ροής. Η ροή στον πυρήνα υπολογίζεται από μια ενδεχόμενη θεωρία: η τριβή στο τοίχωμα λαμβάνεται υπόψιν από έναν κώδικα οριακού στρώματος. Τα πρώτα αποτελέσματα σύμφωνα μ’ αυτήν τη φιλοσοφία δημοσιεύθηκαν απ’ τον G.-G. BORGER. Το μοντέλο του περιορίστηκε σε δυσδιάστατες ή αξονοσυμμετρικές ροές. Αργότερα, αντικαταστάθηκε από τρισδιάστατους κώδικες, αλλά η *στρατηγική* του BORGER για το σχεδιασμό ακροφύσιου είναι ακόμα έγκυρη: Στο πρώτο μέρος του ακροφύσιου, όπου το οριακό στρώμα στο τοίχωμα τείνει προς διαχωρισμό, υπάρχει μόνο μια μέτρια σύσπαση. Στο δεύτερο μέρος του ακροφύσιου, η σύσπαση μπορεί να είναι δυνατή στη καθοδική ροή, εκεί όπου η κύρτωση του τοιχώματος αλλάζει και υπάρχουν λιγότερες πιθανότητες για διαχωρισμό (βλ. Εικόνα 1.19). Στην πραγματικότητα, οι περιφέρειες του BORGER είναι παρόμοιες με του MOREL, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.20. Ωστόσο, οι μικρές διαφορές στη γεωμετρία οδήγησαν σε σημαντικές διαφορές στην ταχύτητα του τοιχώματος.





Εικ. 1.19 Σύγκριση των περιγραμμάτων του ακροφύσιου (με αξονική συμμετρία)

σύμφωνα με τον WITOSZYNSKI και τον BORGER, μετά τον G.-G. BORGER.

Εικ. 1.20 Σύγκριση των περιγραμμάτων του ακροφύσιου (με αξονική συμμετρία) και

ταχύτητα στα τοιχώματα σύμφωνα με τους G.-G. BORGER και T. MOREL, μετά τον C.

KRAMMER.

Οι τρισδιάστατες περιφέρειες των εναλλασσόμενων ακροφυσίων της σήραγγας DNW-LTF σχεδιάστηκαν με τη χρήση ενός κώδικα αποκατάστασης που αναπτύχθηκε από τους J. VAN DER DOOREN και τον A. SANDERSE. Ακολουθώντας τη στρατηγική του BORGER, ο κώδικας αυτός χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τη μέθοδο πρόβλεψης διαχωρισμού ενός οριακού στρώματος. Το έργο ήταν αρκετά προκλητικό γιατί η DNW-LTF ήταν εξοπλισμένη με τρία εναλλασσόμενα κλειστά τμήματα δοκιμών. Ως αποτέλεσμα, χρειαζόνταν τρία ακροφύσια. Η συστολή χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος (ακολουθώντας το θάλαμο καθίζησης) είναι

$$q_m = \frac{\rho}{2} U_m^2 = k \Delta p$$

το ίδιο και για τα τρία τμήματα. Οι διαφορετικές περιφέρειες που χρειάζονται για τις τρεις διαφορετικές αναλογίες συστολής πραγματοποιούνται αλλάζοντας μόνο το μέρος της καθοδικής πορείας του σημείου κλίσης. Οι προβλεπόμενες διανομές πίεσης μέσα στα ακροφύσια συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα, και η ανομοιομορφία της ταχύτητας δια μέσου του τμήματος δοκιμών ήταν λιγότερη από  $\pm 0.1\%$ .

Αργότερα, τα τρισδιάστατα ακροφύσια υπολογίστηκαν με τη βοήθεια ενός κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) απ' τον W. BRANDSTETTE, και τον S. SCHILAWA που επέκτειναν τη μέθοδο των VAN DER DOOREN και SANDRESE από ορθογώνιες διατομές σε τρισδιάστατες. Δήλωσαν ότι οι “αδύναμες ζώνες” ενός ακροφύσιου είναι οι γωνίες του. Επίσης δήλωσαν, ότι για να υπάρξει η απαιτούμενη ομοιομορφία της διανομής ταχύτητας στην έξοδο του ακροφύσιου, χρειάζεται μια τρισδιάστατη παρά μια κυκλική διατομή. Για παράδειγμα, ένα ορθογώνιο ακροφύσιο πρέπει να είναι 20% μακρύτερο από ένα κυκλικό. Όσο περισσότερο η αναλογία διαστάσεων της διατομής παρεκκλίνει απ' την ομοιομορφία, τόσο πιο μακρύ πρέπει να είναι το ακροφύσιο.

Τέλος, ο D. STEINBACH ανέπτυξε έναν κώδικα που βασίζοταν στη μέθοδο του πίνακα: η ροή διαμορφώνεται μέσα από τα τρία στοιχεία-κλειδί της αεροσήραγγας: ακροφύσιο, (κλειστό) τμήμα δοκιμής, και διαχύτης (βλ. εικόνα 1.21). Ο σκοπός αυτής της δουλειάς ήταν η επεξεργασία των διορθώσεων αεροσήραγγας και φυσικά ο σχεδιασμός ακροφυσίων (βλ. μέρος 1.3.3).

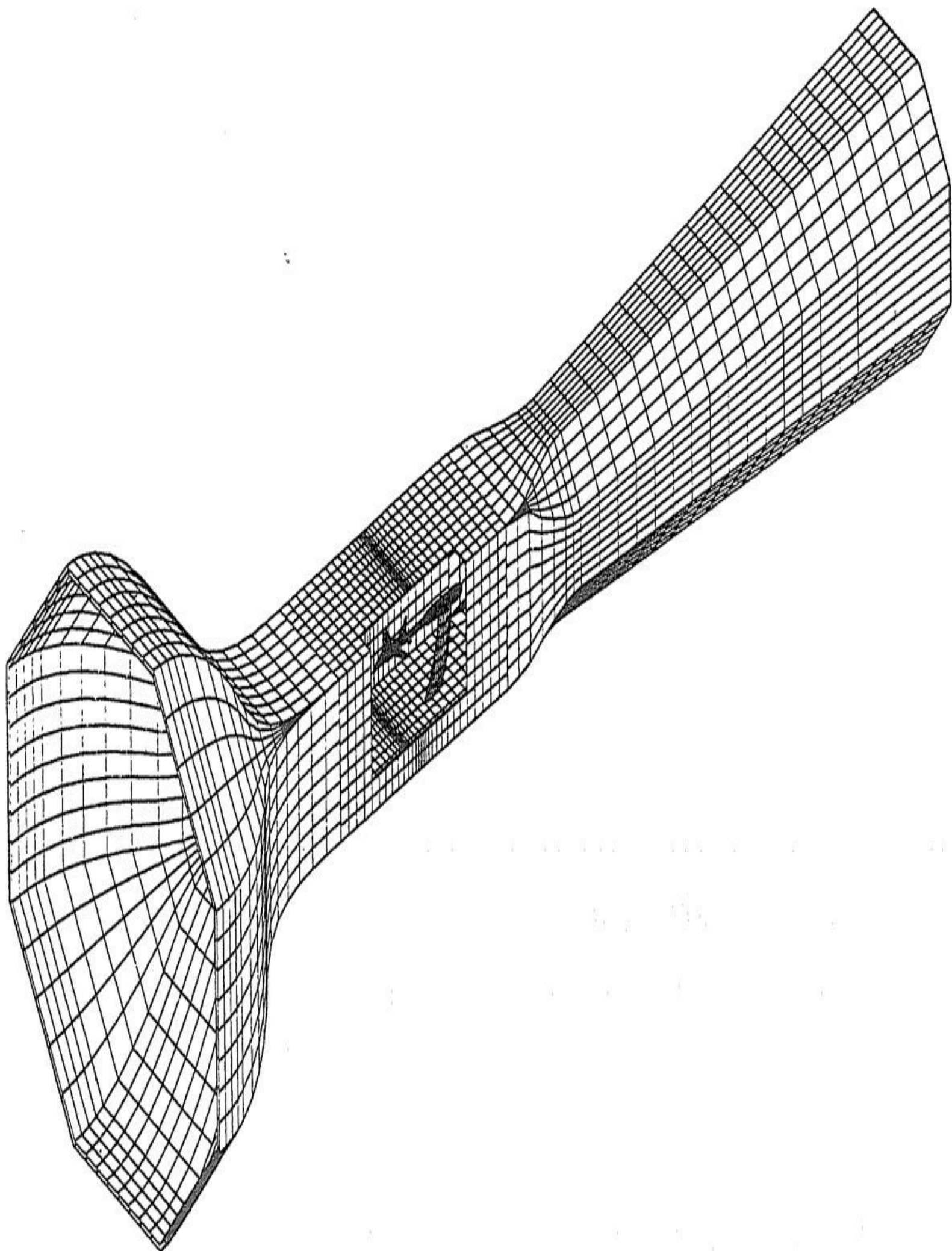
#### 1.2.3.4 Προσδιορισμός της Ταχύτητας Αέρα

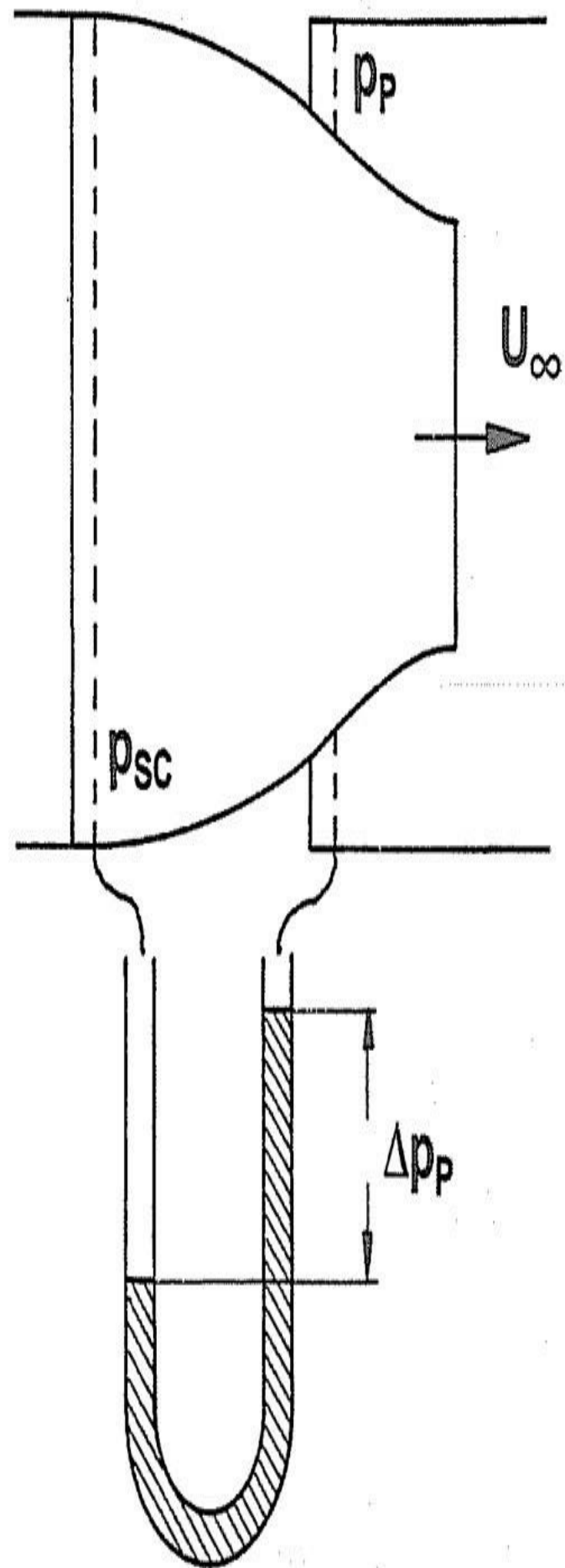
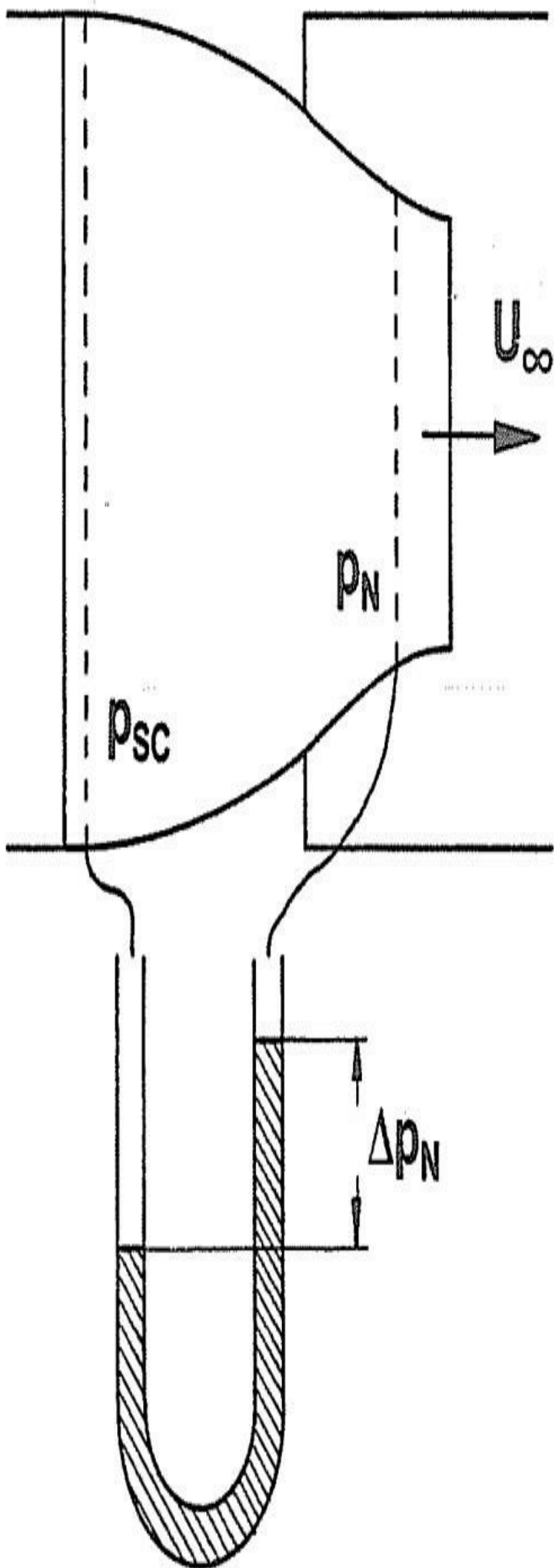
Η ταχύτητα αέρα σε ένα τμήμα δοκιμής προσδιορίζεται με τη μέτρηση διαφοράς  $\Delta p$

στη στατική πίεση ανάμεσα στην είσοδο του ακροφύσιου (δηλαδή, στο θάλαμο καθίζησης) και στη έξοδό του (βλ. Εικόνα 1.22). Η δυναμική κεφαλή  $q_\infty$  με τον πίδακα να αφήνει το ακροφύσιο, είναι









Εικ. 1.21. Απεικόνιση του ακροφύσιου, του κλειστού τμήματος δοκιμής με μοντέλο, και του διαχύτη, μετά τον D.STEINBACH.

Εικ. 1.22 Μέτρηση της ταχύτητας  $U_{\infty}$  του ερχόμενου αέρα σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής απ' την  $\Delta PN$  («μέθοδος ακροφύσιου») και  $\Delta PP$  («μέθοδος διάκενου»).

όπου  $k$  είναι ένας συντελεστής του ακροφύσιου που προσδιορίζεται απ' τη μέτρηση της δυναμικής κεφαλής σε ένα κενό τμήμα δοκιμής. Γενικά, η αριθμητική τιμή του συντελεστή του ακροφύσιου  $k$  είναι μεγαλύτερη από 1, γιατί η ταχύτητα του αέρα στο θάλαμο καθίζησης δεν είναι ακριβώς μηδενική και επιπλέον, η τοπική στατική πίεση εκεί είναι μικρότερη απ' την ολική.

Σε μια αεροσήραγγα με ανοιχτό τμήμα δοκιμής υπάρχουν εναλλακτικές σχετικά με τη θέση όπου θα μετρηθεί η καθοδική πίεση και η διαφορά πίεσης  $\Delta p$  στην εξίσωση (1.3). Η πρώτη είναι η ίδια όπως σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής. Η πίεση  $p_N$  σε μια θέση καθοδικής ροής στο ακροφύσιο, κοντά στην έξοδό του, ορίζεται ως η καθοδική ροή πίεσης. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται “μέθοδος του ακροφύσιου”, και επομένως η υπολογισμένη διαφορά πίεσης έχει οριστεί ως  $\Delta P_N = P_{SC} - P_N$ . Μια εναλλακτική στη μέθοδο του ακροφύσιου είναι η “μέθοδος του διάκενου”. Η πίεση  $P_P$  στο διάκενο που περιβάλλει τον ανοιχτό πίδακα, ορίζεται ως την καθοδική ροή πίεσης, και αυτό ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση, αν το διάκενο είναι καλά αεριζόμενο. Αυτή η διαφορά πίεσης ορίζεται ως  $\Delta P_P = P_{SC} - P_P$ . Ο συντελεστής  $k$  του ακροφύσιου δεν είναι ο ίδιος σ' αυτές τις δύο μεθόδους.

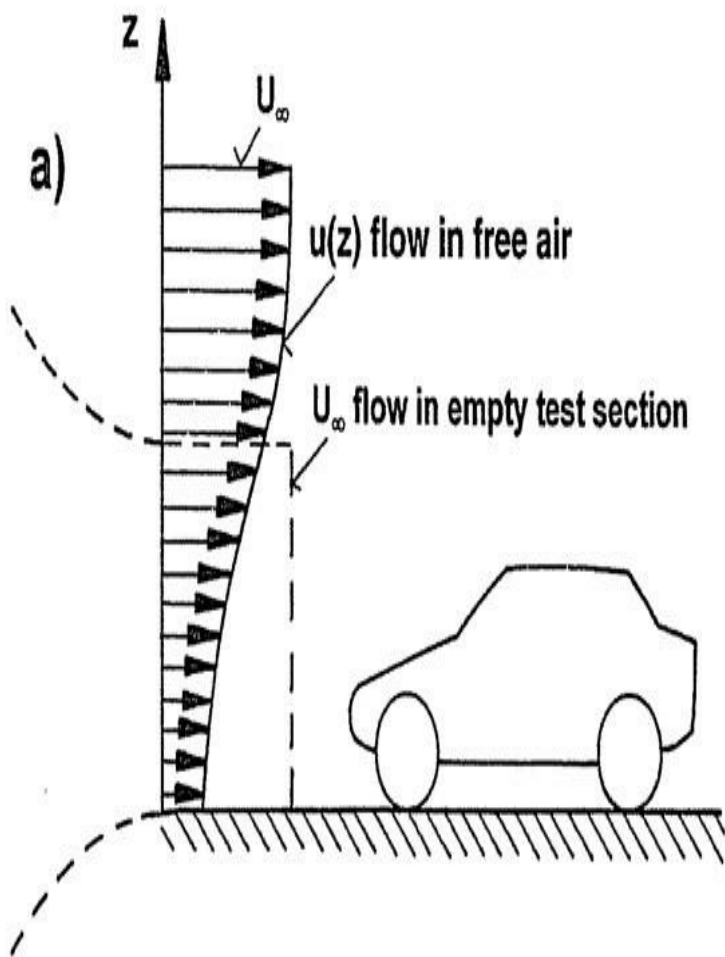
Για ένα κενό τμήμα δοκιμής ή για χαμηλή στένωση και οι δύο μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας  $U_\infty$  είναι ισοδύναμες και έχουν ίδια αποτελέσματα. Ωστόσο, απαιτείται συζήτηση για το ποια μέθοδος πρέπει να προτιμηθεί όταν τοποθετείται ένα μοντέλο μεγάλης στένωσης σε ένα τμήμα δοκιμής. Καθώς, για παράδειγμα, ο R. KUNSTER, συνηγορεί για τη μέθοδο του ακροφύσιου, ο A. KUHN υποστηρίζει τη μέθοδο του διάκενου. Κατά την παράδοση, σε αεροσήραγγες με ανοιχτό τμήμα δοκιμής χρησιμοποιούνταν η μέθοδος του διάκενου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ακόμα σε μεγάλες αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες με μια διατομή πίδακα,  $A_N = 30\text{m}^2$ , και ένα

μεγάλο διάκενο. Στις παρακάτω αεροσήραγγες, ας πούμε, με  $AN = 25m^2$ , γενικά προτιμάται η μέθοδος του ακροφύσιου.

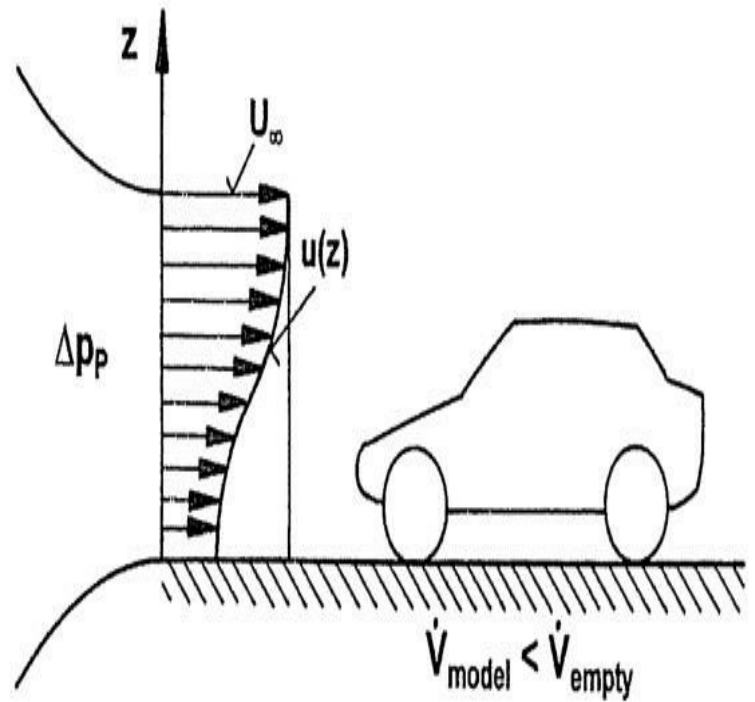
Η διαμάχη που αναφέρθηκε παραπάνω είναι μια μάταιη ερώτηση. Αν εφαρμοστούν κατάλληλα, και οι δύο μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας  $U_\infty$  οδηγούν σε σωστά αποτελέσματα. Ωστόσο, το ακόλουθο είναι έγκυρο. Αν η στένωση είναι μεγάλη και αν το μοντέλο είναι τοποθετημένο κοντά στην έξοδο του ακροφύσιου, η αντίστροφη κλίση πίεσης μπροστά απ' το μοντέλο επηρεάζει τη ροή μέσα στο ακροφύσιο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “στένωση του ακροφύσιου” και κάνει απαραίτητη την εφαρμογή μιας διόρθωσης στην υποδεδειγμένη ταχύτητα ανέμου. Η στένωση του ακροφύσιου περιγράφηκε απ' τον E. MERCKER και μπορεί να επεξηγηθεί με τον ακόλουθο τρόπο.

Αρχικά, νοείται ένα όχημα σε ελεύθερο αέρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.23(α). Εξαιτίας της αδρανούς ροής μπροστά απ' το όχημα, το προφίλ της ταχύτητας  $u(z)$  ενεργοποιείται εκεί όπου αργότερα, τοποθετείται η έξοδος του ακροφύσιου, σε μια αεροσήραγγα. Αυτό το προφίλ ταχύτητας ανήκει στην ανενόχλητη ταχύτητα αέρα  $U_\infty$ . Στην περίπτωση ενός κενού τμήματος δοκιμής [όπου ο συντελεστής του ακροφύσιου  $k$  προσδιορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (1.3)], εμφανίζεται ένα

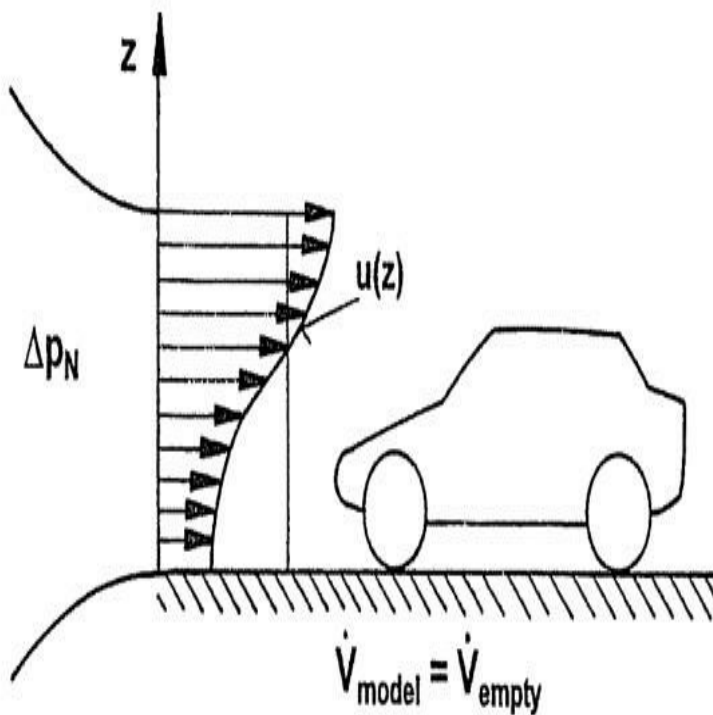




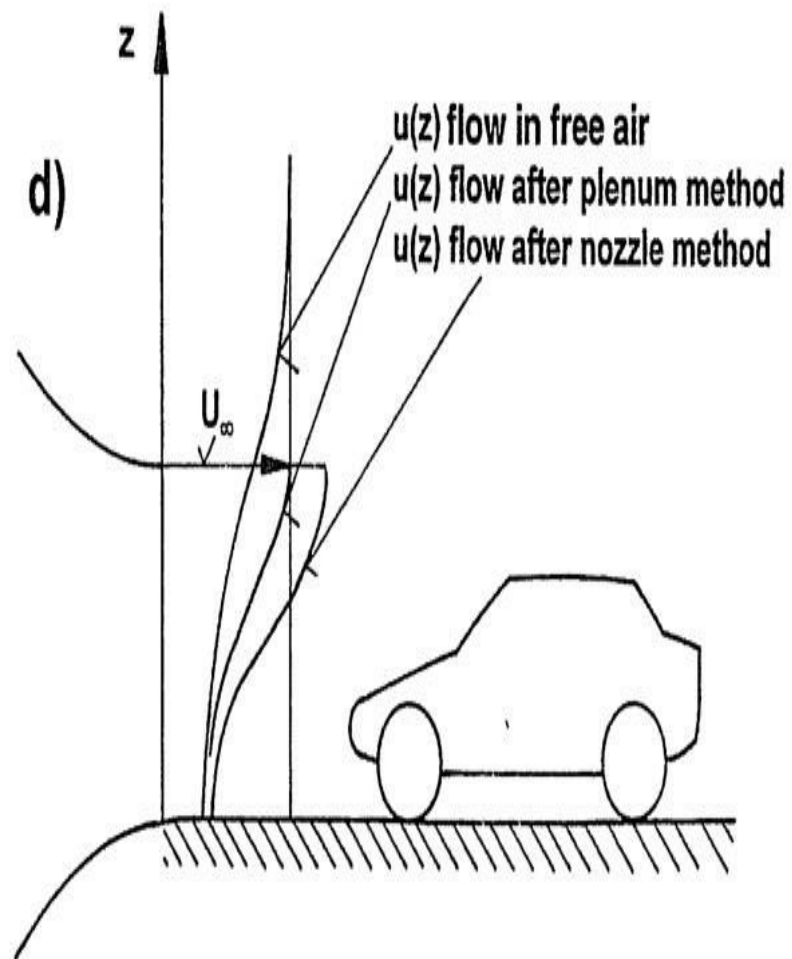
b) Plenum method



c) Nozzle method



d)





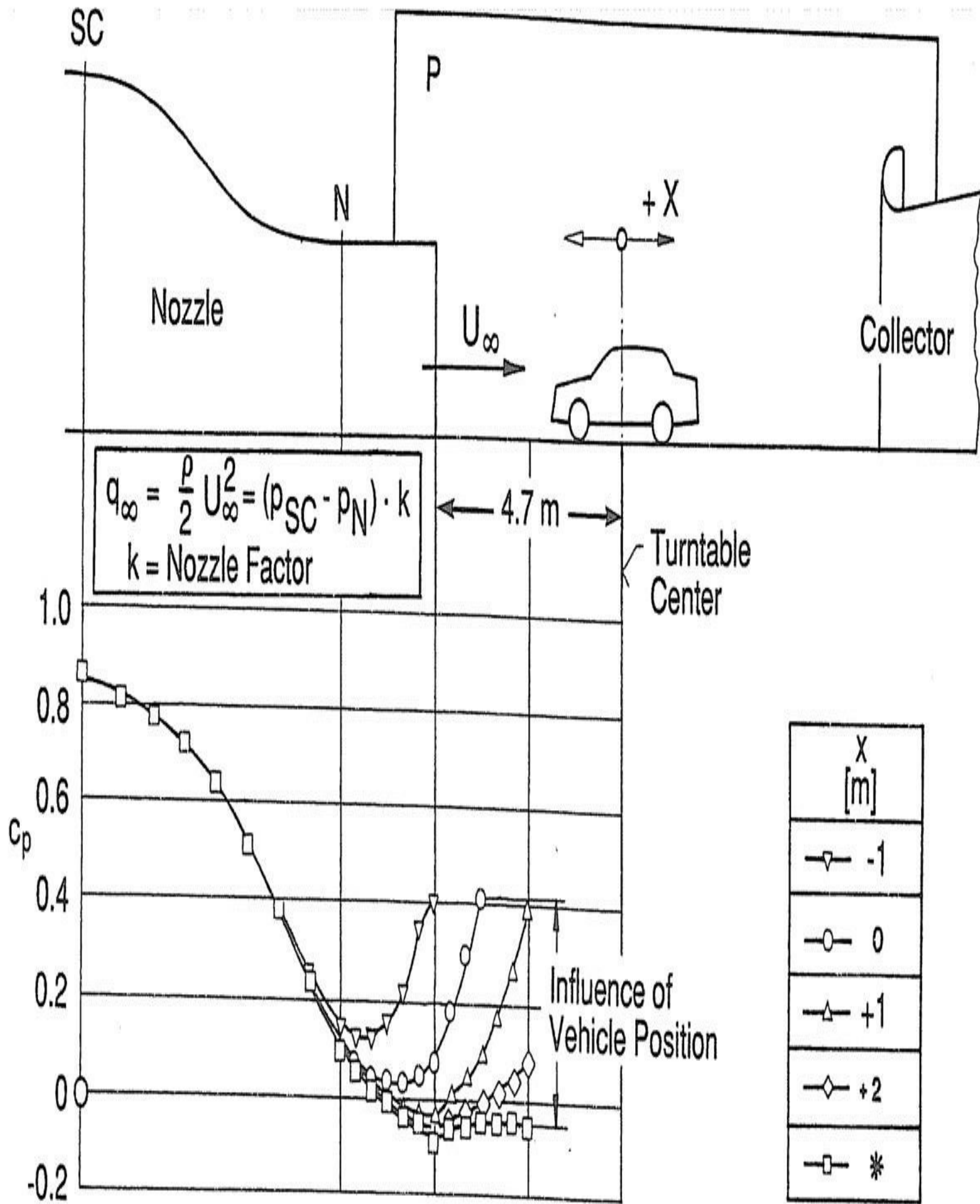
ορθογώνιο προφίλ ταχύτητας  $U_\infty$  σ' αυτήν τη θέση: στην εικόνα 1.23(α), διακρίνεται από μια σπασμένη γραμμή.

*Εικ. 1.23 Διόρθωση της στένωσης του ακροφύσιου: α) όχημα σε ελεύθερο αέρα, β) όχημα σε τμήμα δοκιμής, με ταχύτητα αέρα  $U_\infty$  σύμφωνα με τη μέθοδο του διάκενου  $\Delta PP$ , γ) όχημα σε τμήμα δοκιμής, με ταχύτητα αέρα  $U_\infty$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ακροφύσιου  $\Delta PN$ , δ) σύγκριση των προφίλ ταχύτητας  $u(z)$  μπροστά από ένα μοντέλο, μετά τα σχέδια του E. MERCKER.*

Αν το όχημα τώρα τοποθετηθεί σε μια αεροσήραγγα, στην ίδια αξονική θέση μπροστά απ' το όχημα (την έξοδο του ακροφύσιου) παρατηρείται ένα προφίλ ταχύτητας  $u(z)$ : ωστόσο, δεν είναι το ίδιο με αυτό που υπάρχει στο ελεύθερο αέρα. Ανήκει σε μια ταχύτητα του ανενόχλητου ερχόμενου αέρα που είναι διαφορετικό απ' το  $U_\infty$ . Η ερώτηση είναι: Πόσο μεγάλη είναι αυτή η διαφορά; Η απάντηση εξαρτάται από τη μέθοδο με την οποία μετρήθηκε το  $\Delta p$ .

Αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του διάκενου η κατάσταση είναι όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.23(β). Απ' τη στιγμή που η πίεση του διάκενου είναι παρούσα στο όριο του πίδακα, προκύπτει ότι και η ταχύτητα  $U_\infty$  (της μεθόδου του ακροφύσιου) είναι παρούσα σ' αυτό το όριο, γιατί σύμφωνα με θεωρία του Bernoulli αυτή είναι η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο υπολογισμένο  $\Delta p_P$  (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής το  $\Delta p_P$  παράγει μια συχνή  $U_\infty$  σε ολόκληρη τη διατομή). Στον ελεύθερο αέρα, η ταχύτητα στη νοητή τοποθεσία του ορίου του πίδακα είναι διαφορετική απ' την  $U_\infty$ . Πρέπει επίσης να προστεθεί ότι η τιμή του όγκου ροής μειώνεται μέσα στο ακροφύσιο όταν το μοντέλο τοποθετείται σε ένα τμήμα δοκιμής, δηλαδή,  $V_{\text{μοντέλο}} = V_{\text{κενό}}$ .





\* Empty Test Section

Αν η ταχύτητα του αέρα προσδιορίζεται με τη μέθοδο του ακροφύσιου οι αντλίες απ' όπου μετριέται η πίεση PN πρέπει να βρίσκονται αρκετά μακριά απ' την ανοδική ροή του μοντέλου έτσι ώστε να μην επηρεαστούν. Αν η διαφορά πίεσης  $\Delta P_N$  παραμένει ανεπηρέαστη όταν ένα μοντέλο τοποθετείται σε ένα τμήμα δοκιμής προκύπτει ένα προφίλ ταχύτητας  $u(z)$  στην έξοδο του ακροφύσιου, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 1.23(γ). Επίσης, απ' τη στιγμή που το  $\Delta P_N$  δεν αλλάζει, προκύπτει ότι η τιμή του όγκου ροής παραμένει σταθερή, δηλαδή,  $V_{\text{μοντέλο}} = V_{\text{κενό}}$ . Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι η ταχύτητα στο όριο του πίδακα είναι υψηλότερη στη μέθοδο του ακροφύσιου σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής.

Στη εικόνα 1.23(δ) συγκρίνονται τα τρία διαφορετικά προφίλ ταχύτητας στην έξοδο του ακροφύσιου:  $u(z)$  στην περίπτωση ελεύθερου αέρα,  $u(z)$  όταν η ταχύτητα ανέμου προσδιορίζεται απ' τη μέθοδο του διάκενου, και  $u(z)$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ακροφύσιου.

*Εικ. 1.24 Επίδραση της θέσης του μοντέλου στη διανομή πίεσης μέσα σε ένα ακροφύσιο, μετά τον R. KUNSTNER.*

Χρησιμοποιώντας μια ενδεχόμενη ροή, ο E. MERCKER παρήγαγε μια μέθοδο μέτρησης της στένωσης του ακροφύσιου. Στο αριθμητικό μοντέλο το αυτοκίνητο παρουσιάζεται με μια μορφή αποδέκτη, και η ροή του ακροφύσιου διαμορφώνεται από ένα δακτύλιο στροβίλου (έτσι έχει ως αποτέλεσμα μια περιστροφική συμμετρία).

Στην περίπτωση του ελεύθερου αέρα, η διανομή ταχύτητας μπροστά από το αυτοκίνητο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη μορφή αποδέκτη.

Υποθέτοντας ότι τα προφίλ ταχύτητας που συγκρίνονται στην εικόνα 1.23(δ) είναι παρόμοια μεταξύ τους, μπορεί να υπολογιστεί μια διόρθωση. Στην περίπτωση της

μεθόδου του διάκενου η κατάσταση  $U^\infty$  στην άκρη του ακροφύσιου είναι έγκυρη:

στη μέθοδο του ακροφύσιου, η κατάσταση,  $V =$  σταθερή, είναι επίσης έγκυρη.

Όταν συγκρίνει κανείς τις δύο μεθόδους για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του αέρα σε μια αεροσήραγγα ανοιχτού πίδακα, πρέπει να προτιμηθεί η (παραδοσιακή) μέθοδος του διάκενου, κυρίως για δύο λόγους:

1. Δεν υπάρχει ο κίνδυνος ότι ένα μοντέλο μπορεί να επηρεάσει τη μέτρηση της καθοδικής ροής πίεσης του ακροφύσιου, γιατί αυτή η καθοδική ροή πίεσης είναι  $PP$  και είναι ατμοσφαιρική.
2. Σύμφωνα με τον E. MERCKER, η σπουδαιότητα της διόρθωσης στένωσης του ακροφύσιου είναι μικρότερη στη μέθοδο του διάκενου από τη μέθοδο του ακροφύσιου.

Τέλος, για να γίνει ξεκάθαρο, η διόρθωση της στένωσης του ακροφύσιου έχει σημασία στην επίδραση της ροής μέσα στο ακροφύσιο. Φυσικά, το ακροφύσιο από μόνο του –πιο συγκεκριμένα το στερεό του όριο- επίσης επηρεάζει τη ροή γύρω από το μοντέλο. Αυτό, ωστόσο, είναι θέμα της “διόρθωσης αεροσήραγγας” που θα συζητηθεί στο μέρος 1.3.3.

Η ταχύτητα του αέρα πρέπει να είναι ελεγχόμενη σε όλα τα επίπεδα της αεροσήραγγας. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι σημαντικές οι ακριβείς δοκιμές στην πολύ χαμηλή ταχύτητα αέρα. Η αργή οδήγηση πάνω σε μια απότομη κλίση εδάφους, αντιπροσωπεύει ένα από τα κρίσιμα κριτήρια για τη διαστασιολόγηση του ψυγείου και τη ψύξη του ανεμιστήρα (το άλλο είναι η μέγιστη ταχύτητα). Ο αέρας από την μπροστινή κίνηση του οχήματος όπως και από τον ανεμιστήρα του ψυγείου συνεισφέρει στο αποτέλεσμα της ψύξης: επομένως, είναι σημαντικός ο ακριβής έλεγχος της (χαμηλής) ταχύτητας αέρα.

Τεχνικά, δύο είναι οι διαθέσιμες λύσεις για την προσαρμογή της ταχύτητας του αέρα: μεταβλητή κλίση πτερυγίων κατά τη σταθερή ταχύτητα του ανεμιστήρα, και συνεχή μεταβλητή ταχύτητα του ανεμιστήρα με σταθερά πτερύγια. Σήμερα, το τελευταίο χρησιμοποιείται ευρέως. Η μεταβλητή κλίση επιτρέπει την πολύ γρήγορη αλλαγή ταχύτητας αέρα. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτό καταργείται λόγω του υψηλού επιπέδου θορύβου σε όλες τις ταχύτητες αέρα, ακόμα και της πιο αργής. Αυτό είναι απαράδεκτο για τους μηχανικούς δοκιμών και τους τεχνίτες που πρέπει να δουλέψουν πάνω σε ένα μοντέλο μέσα σε μια σήραγγα.

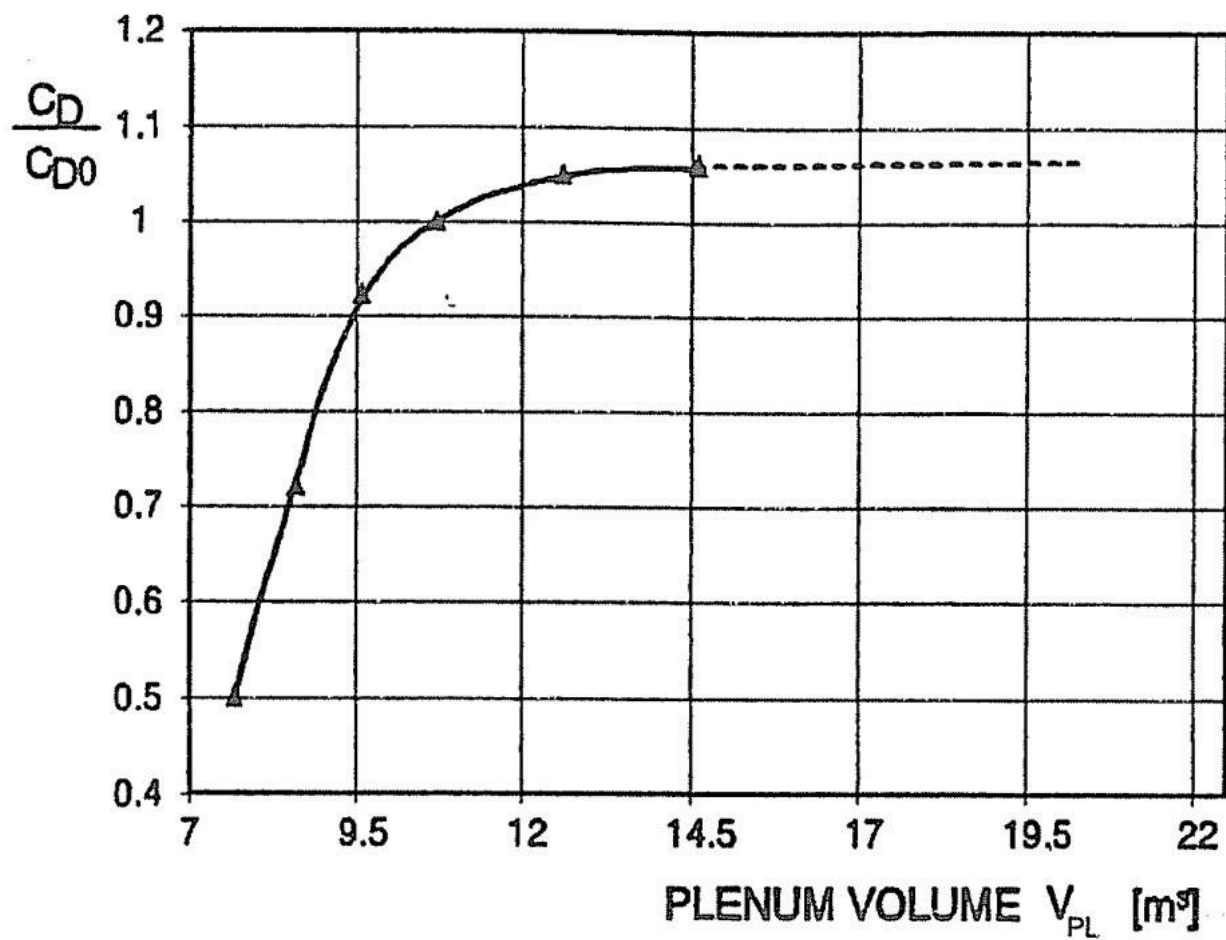
#### **1.2.3.5 Διάκενο**

Για μια αεροσήραγγα ανοιχτού πίδακα οι διαστάσεις του διάκενου γύρω από το τμήμα δοκιμής έχουν σημαντική επιρροή στη μορφή ροής μέσα στο διάκενο και τον πίδακα, και επομένως επηρεάζουν τα αποτελέσματα δοκιμών της αεροσήραγγας.

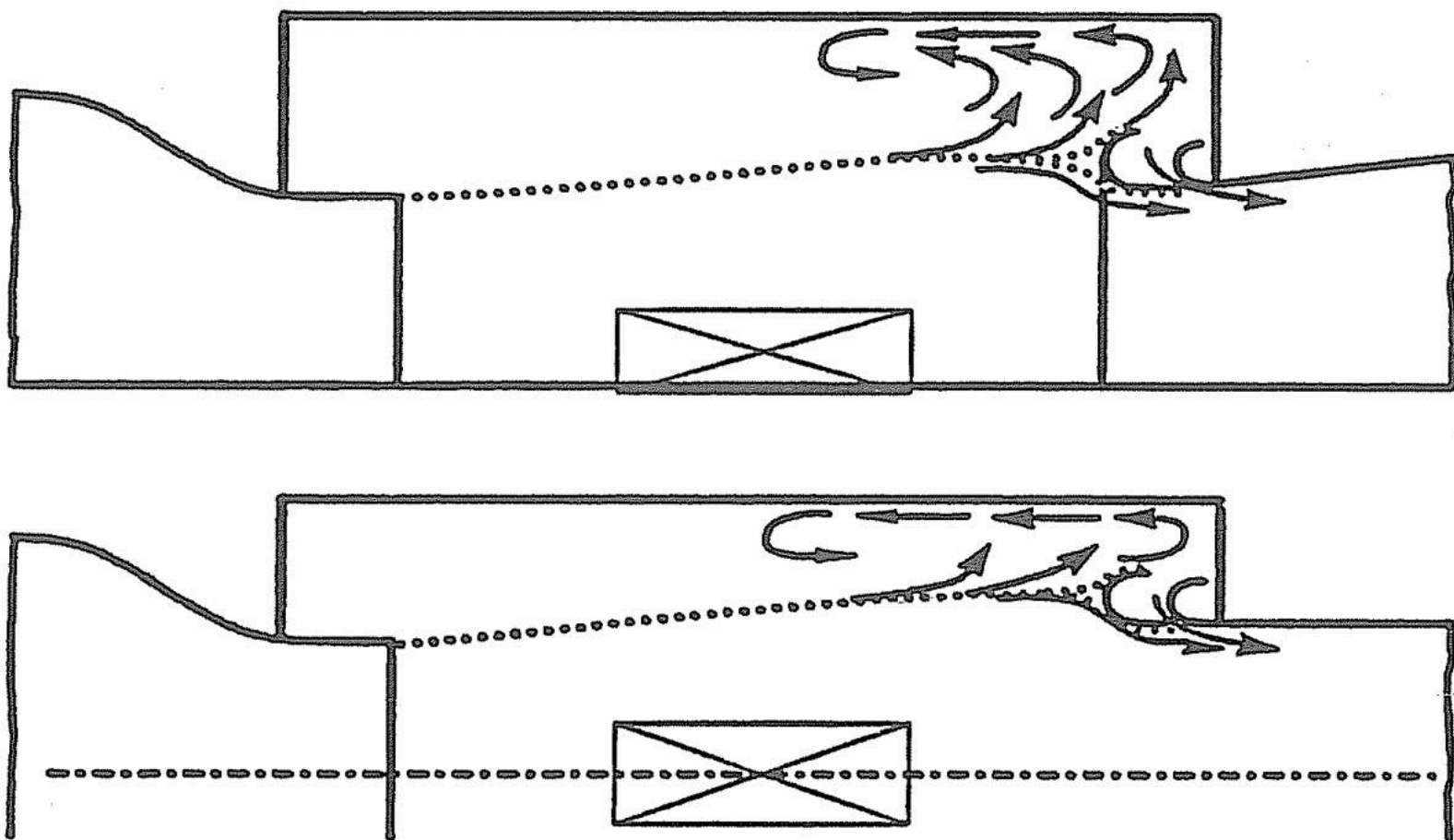
Σύμφωνα με τον K.-R. DEUTENBACH, η αντίσταση είναι απρόβλεπτη αν ο όγκος του διάκενου είναι μικρότερος από μια συγκεκριμένη ελάχιστη τιμή [βλ. Εικόνα 1.25(α)]. Μέσω της απεικόνισης της ροής ο DEUTENBACH δήλωσε ότι ο



a)



b)





ελεύθερος πίδακας διευρύνεται αν τα τοιχώματα του διάκενου είναι πολύ κοντά στον πίδακα, δηλαδή, αν ο όγκος του διάκενου είναι πολύ μικρός [βλ. εικόνα 1.25(β)]. Όχι μόνο ο όγκος αλλά και το πλάτος και το ύψος πρέπει να ταιριάζουν κατάλληλα στις διαστάσεις του πίδακα.

*Εικ. 1.25 α) Επίδραση του όγκου του διάκενου VPL στην υπολογισμένη αντίσταση: β)*

*Μορφή ροής μέσα στο διάκενο και κοντά στο συλλέκτη: μετά τον K.-R.*

*DEUTENBACH.*

### 1.2.3.6 Εναλλάκτης θερμότητας και θερμικό φορτίο

Στις κλιματικές αεροσήραγγες η παράμετρος-κλειδί είναι η *θερμοκρασία αέρα*. Η ομοιομορφία της μέσω ενός τμήματος δοκιμής πρέπει να είναι  $\pm 1$  K. Δεν είναι εύκολο να αντιμετωπίσει κανείς τη φύση της εφαιπτόμενης ροής του εναλλάκτη θερμότητας της σήραγγας. Ο εναλλάκτης θερμότητας θα πρέπει να λειτουργεί σε μια “κορεσμένη” κατάσταση, δηλαδή, ο όγκος ροής ψυκτικού υγρού θα πρέπει να είναι πολύ υψηλός. Κοστίζει και είναι δύσκολο να αφιερώσει κανείς πολύ χρόνο στη σήραγγα: έτσι η εμφάνιση του ψύκτη θα πρέπει να επιτρέπει τη γρήγορη προσέγγιση της επιθυμητής θερμοκρασίας. Για να διατηρηθεί όσο το δυνατόν μικρότερη η απώλεια πίεσης της ροής αέρα μέσα από το ψύκτη, θα πρέπει να τοποθετηθεί εκεί όπου είναι μεγάλη η διατομή του αγωγού της σήραγγας. Μια θέση στο τέλος του μεγάλου διαχύτη που ακολουθεί τον ανεμιστήρα, φαίνεται καταλληλότερη από μια τοποθέτηση στο εσωτερικό του θαλάμου καθίζησης. Διαταράξεις στη ροή αέρα που προκλήθηκαν απ’ το ψύκτη (απόνερα απ’ τους σωλήνες και τις ράβδους του) ακολουθούν μια μεγαλύτερη διαδρομή για να βγουν έξω.

Για την προσομοίωση ενός *θερμικού φορτίου* η ένταση της ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι  $1000 \text{ W/m}^2$ . Ομοιογενεία της κλίμακας του  $\pm 10\%$  κρίνεται επαρκής. Πηγές φωτός με φάσμα κοντά στο φάσμα του ήλιου είναι εμπορικώς διαθέσιμες. Ο πίνακας, όπου εγκαθίστανται οι πηγές φωτός, πρέπει να επιτρέπει την περιστροφή στα πλάγια έτσι ώστε να εκτεθεί στην ακτινοβολία ένα αντικείμενο δοκιμής από μια λοξή γωνία.

### 13.2.4 Εξοπλισμός

Μια αυτοκινητιστική αεροσήραγγα μπορεί να είναι εξοπλισμένη με επιπρόσθετες

παροχές δοκιμής και συστήματα μέτρησης. Όποτε είναι δυνατό, πρέπει να ελέγχονται όλες μέσα μια κλειστή φάση λειτουργίας με μια διαδικασία ελέγχου του υπολογιστή. Όλα τα σημαντικά αποτελέσματα δοκιμών θα πρέπει να εκτιμούνται on-line και να εμφανίζονται σε οπτική μορφή έτσι ώστε να αφήνουν περιθώρια για γρήγορες αποφάσεις σχετικά με την εξέλιξη του πειράματος. Τα συστήματα μετρήσεων και οι βοηθητικές εγκαταστάσεις δοκιμής που έχουν ευρεία χρήση καταρτίζονται στον πίνακα 1.1.



Measuring systems	
forces and moments	balance (underfloor or internal)
velocity	"classic" probes, hot wire, LDV, traversing gear
pressure	"classic" manometers (gauges), electromechanic transducers, multiple valves
volume flow rate	pressure difference, hot film, anemometers
flow visualization	smoke, oil vapor, wool tufts, liquid suspensions, He-filled soap bubbles
sound pressure field	microphone (single, array)
temperature	thermometer, thermocouples
Additional equipment	
tractive force	chassis dynamometer
heat flux	boiler
sun radiation	bulbs with spectrum close to the sun's
humidity	steam generator
rain	water spray system
dirt	water (plain or colored)

## 1.3 Περιορισμοί στην προσομοίωση

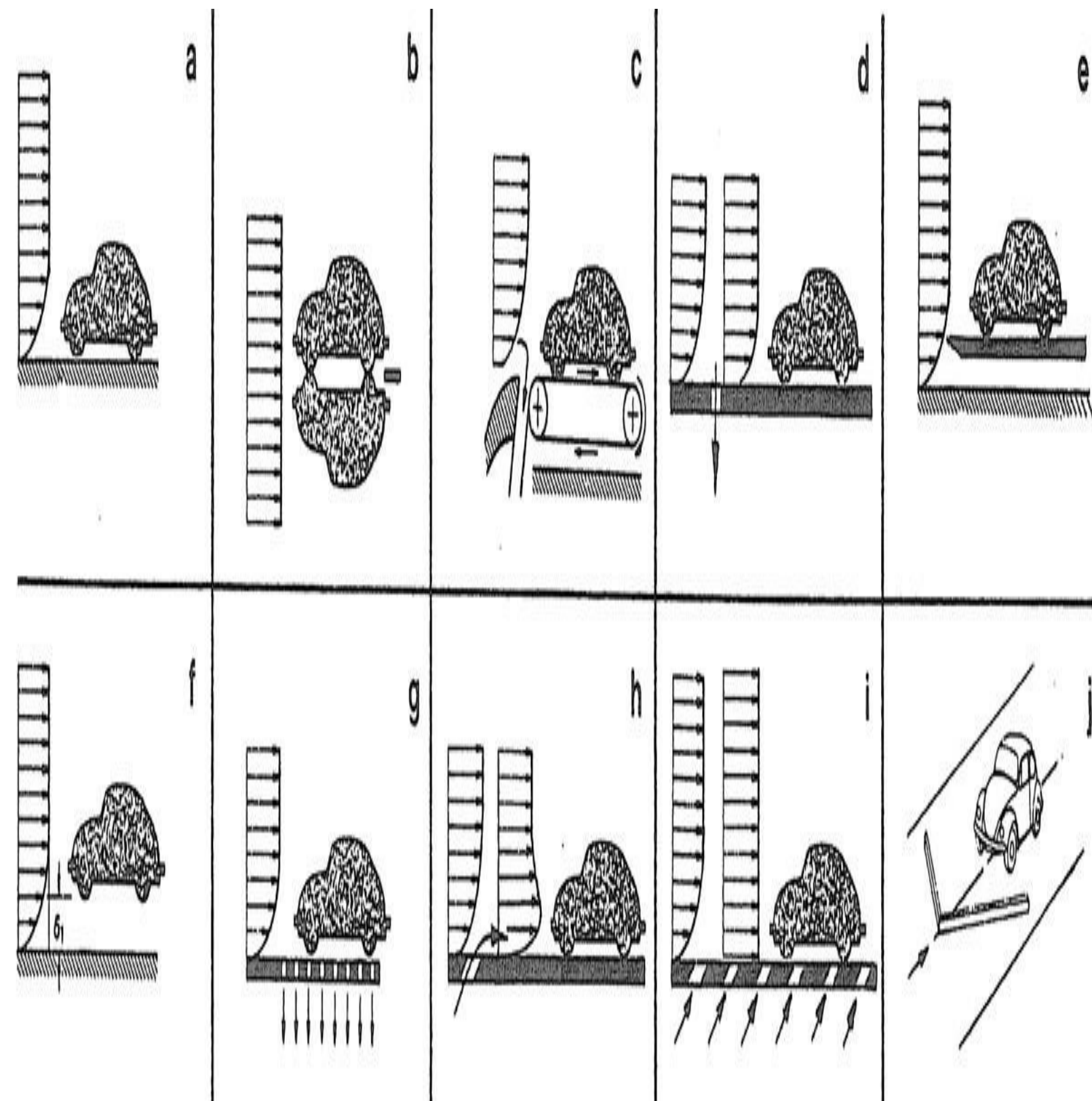
### 1.3.1 Συστηματικά λάθη

Όπως περιγράφηκε στο μέρος 1.1, όταν προσομοιώνεται μια διαδρομή του δρόμου σε μια εγκατάσταση δοκιμών (ας είναι μια αεροσήραγγα ή ένα παράγωγό της όπως η κλιματική σήραγγα ή το δυναμόμετρο) οι πραγματικές συνθήκες του δρόμου προσδιορίζονται από εξιδανικεύσεις: αυτές είναι η διανομή ομοιομορφίας στην ταχύτητα και τη θερμοκρασία, ακραίος χαμηλός στροβιλισμός, και χαμηλός θόρυβος. Ωστόσο, είναι δύσκολο να επιτυγχανθεί το είδος της εξιδανίκευσης, για τρεις λόγους κυρίως:

1. Πάνω στο δρόμο ένα όχημα κινείται μέσα σε ένα χώρο άπειρων διαστάσεων («ελεύθερος αέρας»): αντιθέτως, οι διαστάσεις ενός τμήματος δοκιμής της αεροσήραγγας είναι περιορισμένες και συγκριτικά μικρές.
2. Μια αεροσήραγγα μπορεί να είναι πολύ θορυβώδης αν δεν παρθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις κατά το σχεδιασμό της.
3. Γενικά, δεν αναπαράγεται η σχετική κίνηση μεταξύ ενός οχήματος και του δρόμου: το ίδιο ισχύει και για την περιστροφή των τροχών.

Και τα τρία είδη ατέλειας παράγουν συστηματικά λάθη που πρέπει να γίνουν γνωστά:

- Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού της αεροσήραγγας προκειμένου να αποφασίσει κανείς ποια από αυτά μπορούν να αποφευχθούν *από πριν*, με το κατάλληλο σχέδιο, και ποια μπορούν να είναι ανεκτά, αφού τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι δυνατόν να διορθωθούν *αργότερα*.



- Προκειμένου να διαλέξει κανείς ένα κατάλληλο κρεβάτι δοκιμής σε σχέση με την ποιότητα και το κόστος του.

Οι παραπάνω ατέλειες έχουν διαφορετικό χαρακτήρα. Η αναπαράσταση της κίνησης του δρόμου και ο θόρυβος είναι ατέλειες στην προσομοίωση: οι

περιορισμένες διαστάσεις της ροής αέρα οδηγούν σε παρεμβολές, για τις οποίες θα γίνει λόγος στη συνέχεια.

### 1.3.3 Αναπαράσταση του Δρόμου

Τεχνικά, είναι εφικτό να αναπαραχθούν και η σχετική κίνηση οχήματος-δρόμου και η περιστροφή των τροχών σε μια αεροσήραγγα. Η κατάλληλη μέτρηση γίνεται με έναν κινούμενο ιμάντα που συνδέει το πλάτος του τμήματος δοκιμής, πάνω στο οποίο κυλάνε οι ρόδες του οχήματος. Ωστόσο, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, η σχετική προσπάθεια είναι μεγάλη. Επομένως, έχουν αναπτυχθεί πιο απλές τεχνικές για την προσομοίωση και των δύο κινήσεων, ή βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη.

Βασικά υπάρχουν δύο άλλοι τρόποι για την αναπαράσταση του δρόμου:

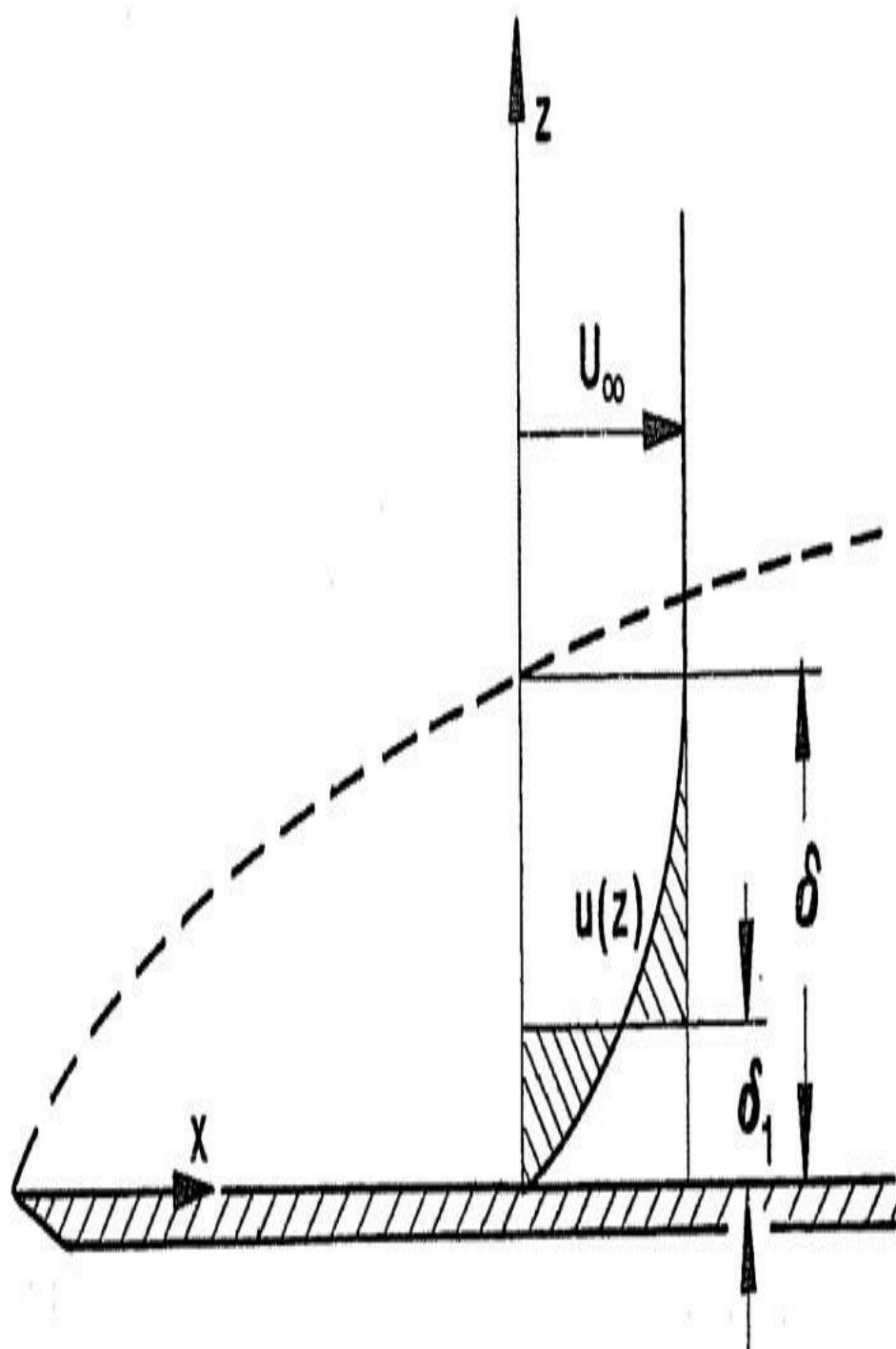
1. Ο πρώτος είναι η μηχανική αποσύνδεση της γραμμικής (οριζόντιας) κίνησης του δρόμου και την περιστροφική κίνηση των τροχών, αλλά παράλληλα η αναπαραγωγή και των δύο. Αυτό χρησιμοποιεί έναν στενό ιμάντα για τον κινούμενο δρόμο, και ένα ξεχωριστό σύστημα για να περιστρέφονται οι ρόδες. Αν και υπάρχουν περιορισμοί (σχετικά με τις συνθήκες ροής κοντά στους τροχούς) μπορεί ακόμα να θεωρηθεί αναπαραγωγή.

2. Ο δεύτερος αποτελείται από πολλές μεθόδους, οι οποίες αναπτύχθηκαν με το πέρασμα των χρόνων, για να προσομοιώσουν το δρόμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η περιστροφή των τροχών παραμελείται.

Οι διάφορες τεχνικές είτε για αναπαραγωγή είτε για προσομοίωση του δρόμου καταρτίζονται στην εικόνα 1.26.

*Εικ. 1.26 Διάφορες πιθανότητες για την αναπαραγωγή ή την προσομοίωση του δρόμου σε μια αεροσήραγγα (το οριακό στρώμα στρώμα του εδάφους δεν απεικονίζεται στην κλίμακα).*





$\delta$  = thickness of boundary layer

$\delta_1$  = displacement thickness

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

$\delta_2$  = momentum loss thickness

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

Είναι πιο βολικό, και πιο τυπικό, το να αναπαραστήσει κανείς το δρόμο με το

σταθερό δάπεδο του τμήματος δοκιμών μιας αεροσήραγγας [βλ. εικόνα 1.26 (α)].

Ωστόσο, το βασικό και γνωστό μειονέκτημα είναι ότι στο δάπεδο αναπτύσσεται ένα οριακό στρώμα, και αυτό το οριακό στρώμα μετατρέπει το πεδίο ροής γύρω από ένα όχημα. Όλες οι παραλλαγές της προσομοίωσης του δρόμου που απεικονίζονται στην εικόνα 1.26 βοηθούν στο να μειωθεί η επιβλαβής επίδραση αυτού του οριακού στρώματος. Ένα άλλο μειονέκτημα μιας σταθερής πλακέτας γείωσης είναι ότι οι τροχοί μένουν ακίνητοι. Ο περιορισμός αυτός όμως, δεν είναι έμφυτος: οι τροχοί μπορούν να περιστρέφονται με τα κατάλληλα μέσα, όπως φαίνεται παρακάτω.

Σε ένα άδειο τμήμα δοκιμής το οριακό στρώμα του δαπέδου αναπτύσσεται με τον ίδιο τρόπο όπως σε μια επίπεδη πλάκα. Η μάζα και η ορμή ροής μέσα στο οριακό στρώμα έχουν ένα έλλειμμα. Το έλλειμμα της μάζας χαρακτηρίζεται από τη λεγόμενη μετατόπιση πυκνότητας  $\delta 1$  που προσδιορίζεται στην εικόνα 1.27. Από την ποσότητα του  $\delta 1$ , το οριακό στρώμα μετατοπίζει το (σχεδόν) μη παχύρρευστο πεδίο ροής μακριά απ' το δάπεδο. Επομένως, το πεδίο ροής αποκτά μια (μικρή) θετική γωνία προσβολής σχετική με το όχημα, με την επίπτωση ότι η αντίσταση και η άνωση αλλάζουν, (ελαφρώς) αυξάνονται. Η επίδραση, είναι ευδιάκριτη ακόμα και για μικρές γωνίες προσβολής  $\alpha$ .

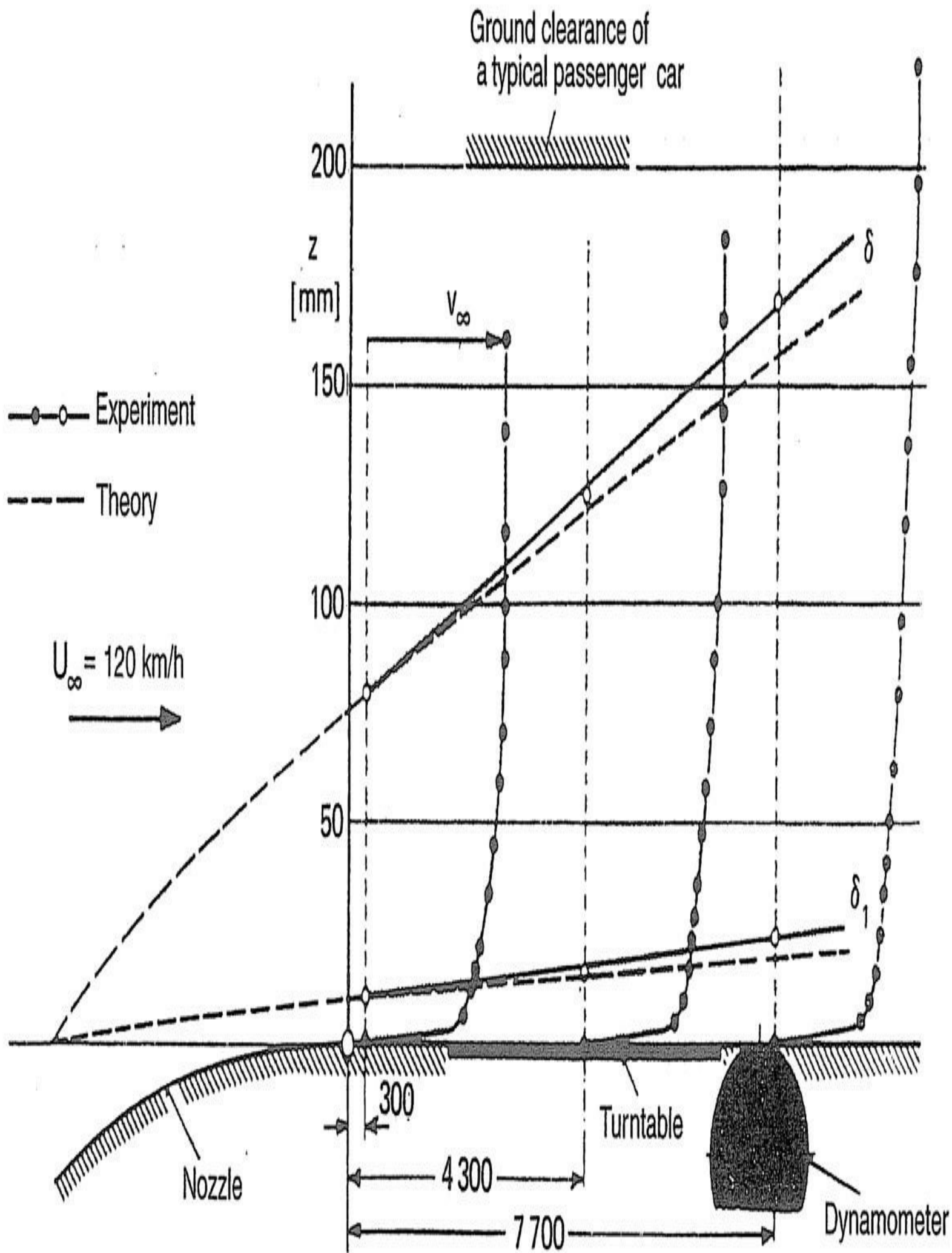
*Εικ. 1.27 Ανάπτυξη του οριακού στρώματος και ορισμοί των παραμέτρων πυκνότητας  $\delta$ , μετατόπισης πυκνότητας  $\delta 1$ , και απώλειας πυκνότητας ορμής  $\delta 2$*

Η επίδραση της έλλειψης ορμής, που χαρακτηρίζεται από την απώλεια ορμής της πυκνότητας  $\delta 2$ , δεν είναι εύκολο να χαρακτηριστεί. Με την πρώτη ματιά, θα περιμέναμε ότι εξαιτίας του ελλείμματος ορμής, η αντίσταση που βρίσκεται βυθισμένη μέσα στο οριακό στρώμα – κυρίως η αντίσταση στους τροχούς- θα ήταν χαμηλότερη απ' την αντίσταση στο δρόμο. Ωστόσο, όπως έχει δείξει ο

J.WIEDEMANN, γίνεται το αντίθετο γιατί η κλίση γωνίας με την οποία

προσεγγίζονται οι μπροστινοί τροχοί είναι μεγαλύτερη με το οριακό στρώμα παρά χωρίς αυτό.





Ακόμα, το οριακό στρώμα μπορεί να διαχωριστεί όποτε τεθεί σε πολύ απότομη αντίστροφη κλίση πίεσης. Ο διαχωρισμός μπορεί να συμβεί και κάτω απ' το όχημα. Αν, για παράδειγμα, το πίσω μέρος απ' την κάτω πλευρά ενός οχήματος είναι διαμορφωμένο στο σχήμα του 4 διαχύτη και η ροή διαχωρίζεται απ' το δάπεδο, μπορεί να κάνει το διαχύτη αναποτελεσματικό όταν δοκιμάσεται σε μια αεροσήραγγα.

Τέλος, το οριακό στρώμα του δαπέδου κάνει δύσκολη τη χρήση του θεωρήματος της ορμής, έτσι ώστε να εκτιμήσει κανείς ποσοτικά τις μετρήσεις του πεδίου ροής που έγιναν πίσω από ένα αυτοκίνητο. Αν ο έλεγχος της επιφάνειας της καθοδικής ροής ενός οχήματος επεκταθεί στο δάπεδο, η αντίσταση εμπεριέχεται στην απώλεια ορμής.

Η ανάπτυξη του οριακού στρώματος στο τμήμα δοκιμής μιας μεγάλης αεροσήραγγας, απεικονίζεται στην εικόνα 1.28. Τα προφίλ ταχύτητας ακολουθούν το νόμο ισχύος του  $1/7$ . Σ' ένα κενό τμήμα δοκιμής η πυκνότητα  $\delta$  του οριακού στρώματος στη θέση του μοντέλου είναι πάνω απ' τη μισή απόσταση εδάφους  $e$  ενός τυπικού επιβατικού αυτοκινήτου ή σχεδόν ολόκληρη η απόσταση εδάφους ενός αγωνιστικού αυτοκινήτου. Ωστόσο, με ένα υπάρχον αντικείμενο δοκιμής (και μια σχετική μετατόπιση της πυκνότητας του οριακού στρώματος  $\delta_{1/e} \approx 0.1$ , όπου το  $\delta_1$  μετρήθηκε σε ένα κενό τμήμα δοκιμής), η διανομή ταχύτητας κοντά στο έδαφος είναι εντελώς αλλαγμένη. Καθώς η πυκνότητα  $\delta$  ενός οριακού στρώματος σε ένα κενό τμήμα δοκιμής ήταν ανάμεσα στα 100 και 150mm (ανάλογα την τοποθεσία της ροής), με την παρουσία του μοντέλου μειώθηκε στα 25-50mm.

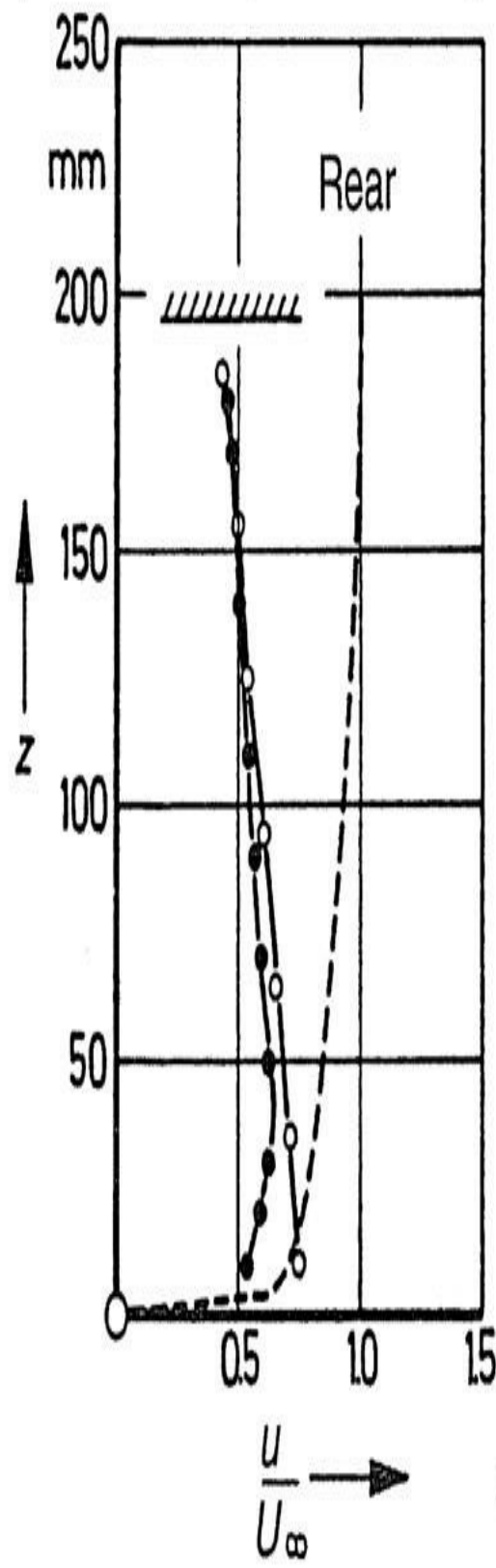
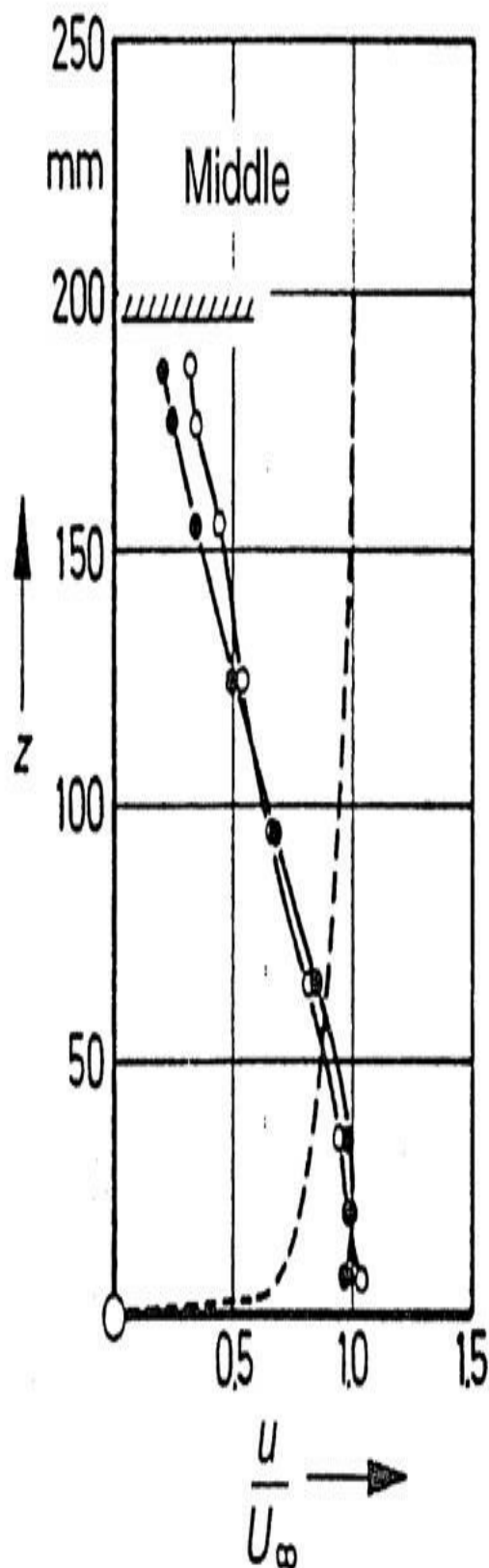
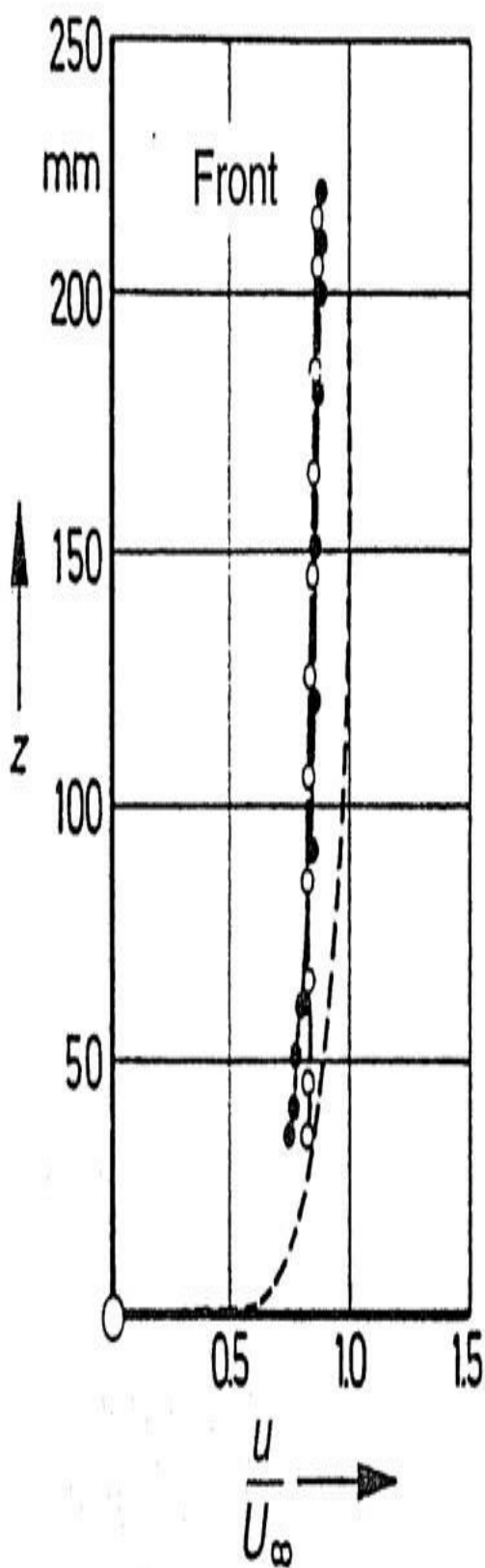
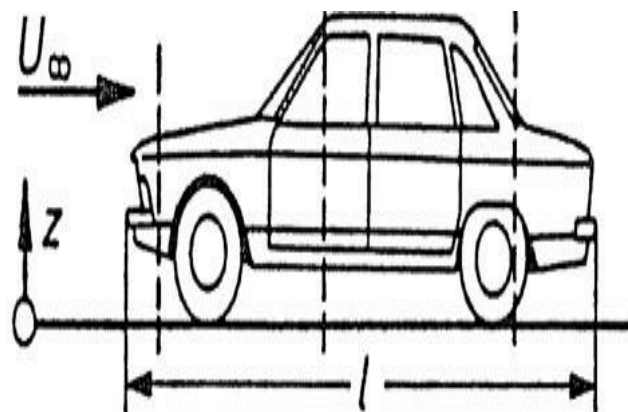
*Εικ. 1.28 Οριακό στρώμα του εδάφους (κενό τμήμα δοκιμής) της κλιματικής αεροσήραγγας 1 της Volkswagen AG, μετά τον W.-H. HUCHO.*



- Wind tunnel
- Road
- Empty test section

Vehicle floor

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot l}{\nu} = 9.8 \cdot 10^6$$





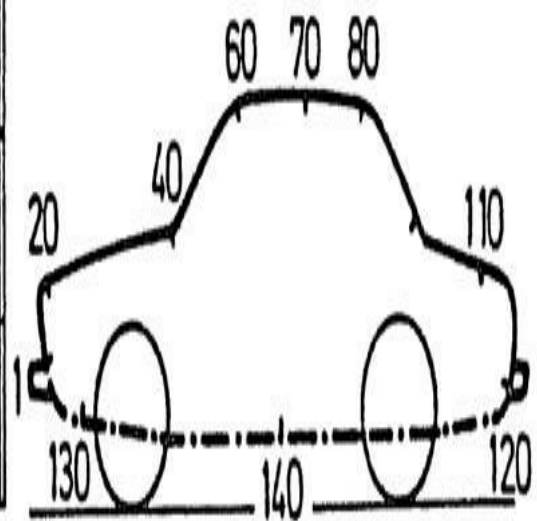
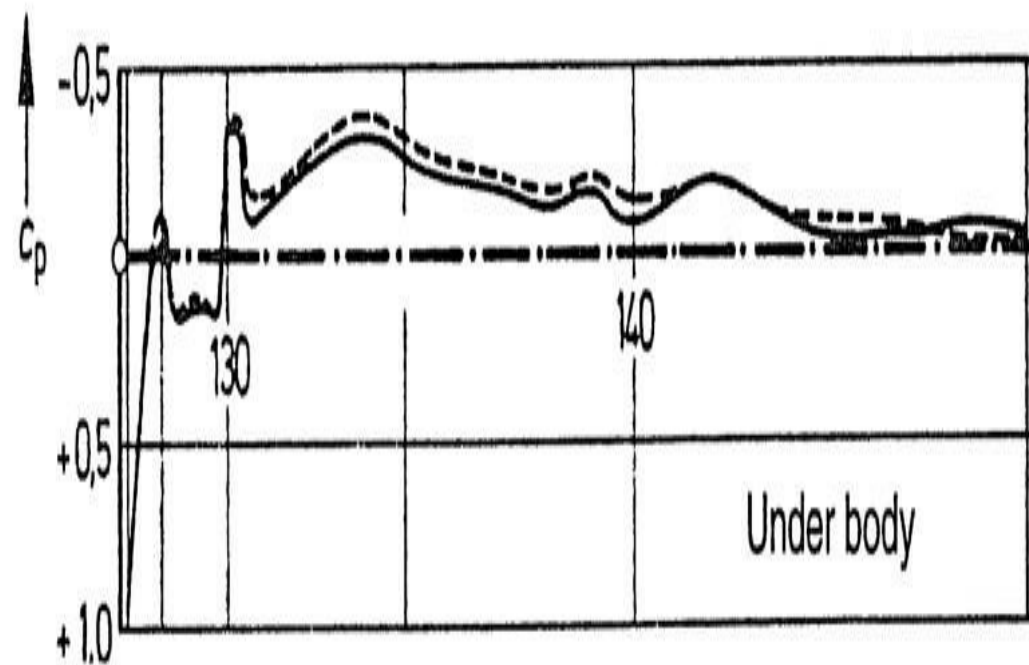
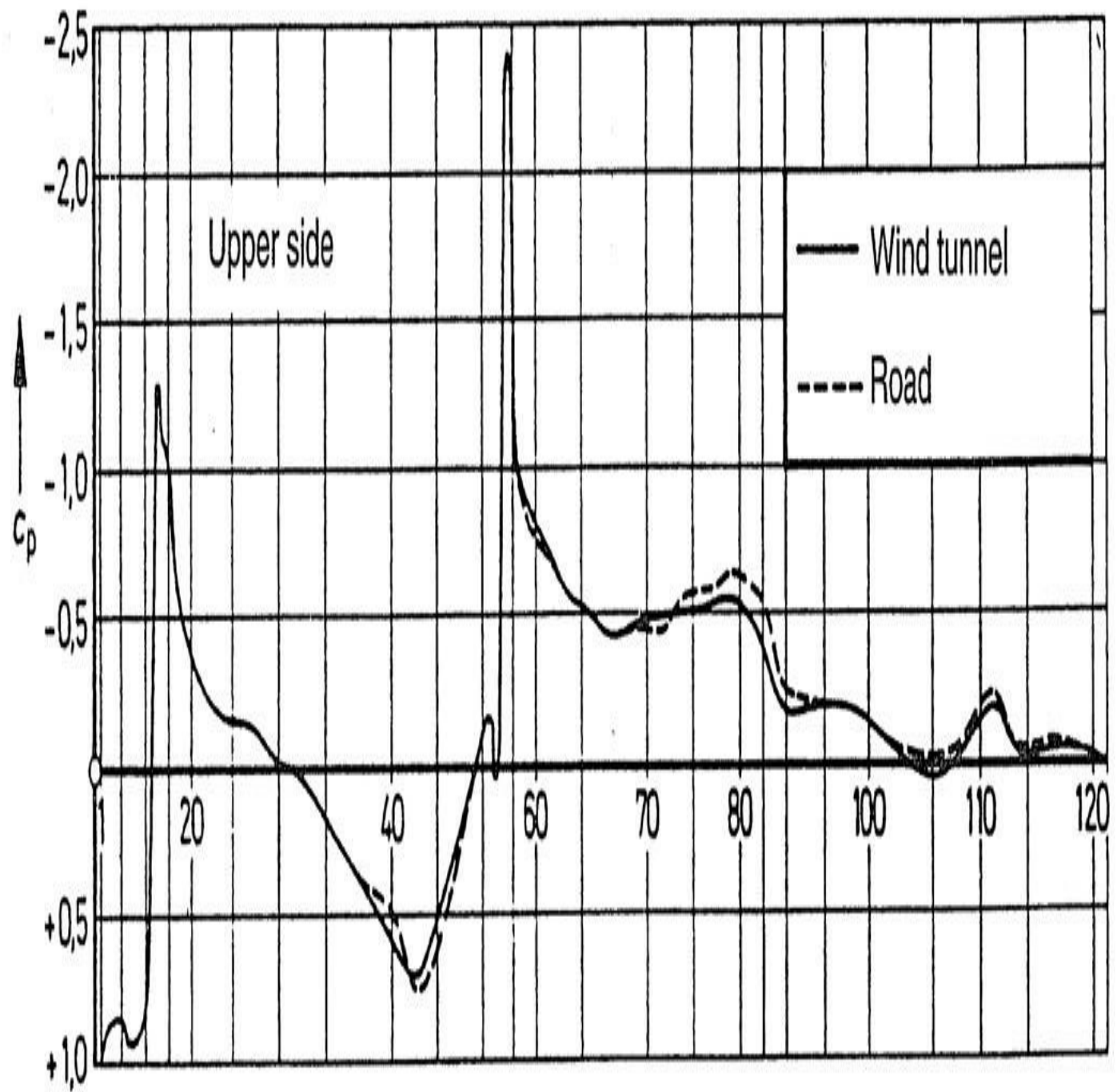
Το εύρημα αυτό επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις στο δρόμο οι οποίες συγκρίθηκαν με τα δεδομένα μιας αεροσήραγγας, εικόνα 1.29. Τα προφίλ ταχύτητας ενός επιβατικού αυτοκινήτου μεσαίου μεγέθους ήταν σχεδόν ίδια με τα προφίλ ταχύτητας μιας αεροσήραγγας, με την εξαίρεση ότι βρίσκονταν πολύ κοντά στο δρόμο ή στο επίπεδο γείωσης. Το ίδιο συνέβη ακόμα και με ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο με πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση της πυκνότητας ( $\delta 1/e = 0.15$ ). Οι διανομές πίεσης κατα μήκος του διαμηκούς μεσαίου τμήματος που μετρήθηκε στο δρόμο και στην αεροσήραγγα φαίνονται στην εικόνα 1.30.

Προφανώς η ροή μέσα σε ένα όχημα ελέγχεται κυρίως απ' το αποτέλεσμα μετατόπισης ενός οχήματος. Το οριακό στρώμα σε ένα σταθερό έδαφος επηρεάζει το πεδίο ροής του πολύ λιγότερο απ' όσο θεωρείται. Επομένως, ακόμα και σήμερα πολλές αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες λειτουργούν χωρίς έλεγχο του οριακού στρώματος. Ωστόσο, για την εκτίμηση των παραπάνω ευρημάτων, υπάρχουν δύο στοιχεία που δεν πρέπει να παραβλεφθούν:

1. Ο συντελεστής αντίστασης τυπικών αυτοκινήτων της δεκαετίας του '70 (όταν έγιναν αυτές οι μετρήσεις) ήταν υψηλός σε σχέση με τις σημερινές τιμές (0.45 έναντι 0.30 και λιγότερο).
2. Η άνωση δεν λαμβάνοταν υπόψιν εκείνες τις εποχές.

*Εικ. 1.29 Προφίλ ταχύτητας σε ένα αυτοκίνητο, αεροσήραγγα vs δρόμος, μετά τον W.-H. HUCHO.*





Εικ. 1.30 Διανομή ταχύτητας κατά μήκος της διαμηκούς ενδιάμεσης πλακέτας ενός επιβατικού αυτοκινήτου, αεροσήραγγα vs δρόμος, μετά τον W.-H. HUCHO.

Ο καλύτερος τρόπος για την ιδανική αναπαραγωγή του δρόμου φαίνεται να είναι η τεχνική της εικόνας του καθρέφτη [βλ. εικ. 1.26(β)]. Στην αριθμητική ρευστοδυναμική η τεχνική αυτή εφαρμόζοταν ευρέως. Σε μια μη παχύρρευστη ροή η απόδοση ανάμεσα σε ένα μοντέλο και στην εικόνα του καθρέφτη είναι μια ευθεία γραμμή που μπορεί να ερμηνευτεί και ως τοίχωμα (δηλ, μια πλακέτα γείωσης). Ωστόσο, σε μια παχύρρευστη ροή οι στρόβιλοι που δημιουργούνται πίσω απ'τους τροχούς, μέσα στο αυτοκίνητο και στο πίσω μέρος, αναπαράγουν μια κίνηση “ταλάντωσης” σ'αυτήν τη νοητή επιφάνεια. Μια επίπεδη πλάκα πίσω απ'τα οχήματα [βλ. εικ. 1.26(β)] μπορεί να υγράνει μερικώς αυτήν την ταλάντωση.

Στις πρώτες εποχές της αεροδυναμικής οχημάτων η τεχνική της εικόνας του καθρέφτη χρησιμοποιόταν συχνά σε δοκιμές κλίμακας-μοντέλου, για τρένα και αυτοκίνητα: λεπτομέρειες καταγράφηκαν απ'τον C. SCHMID. Σήμερα, αυτή η πειραματική τεχνική χρησιμοποιείται σπάνια. Εκτός απ'το πρόβλημα που αναφέρθηκε ήδη, υπάρχουν και δύο πρακτικά μειονεκτήματα: Πρώτον, χρειάζονται δύο μοντέλα: δεύτερον, μια αεροσήραγγα πρέπει να είναι δύο φορές πιο μεγάλη από κάθε (γεωμετρική) αναλογία στένωσης  $\phi$ . Είναι προφανές ότι η τεχνική της εικόνας του καθρέφτη δεν είναι πρακτική για οχήματα πλήρους κλίμακας.

Μια τέλεια αναπαραγωγή του δρόμου είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, ο *κινούμενος ιμάντας* [βλ. εικ. 1.26(γ)]. Η τεχνική αυτή δεν είναι καινούρια: Ο G.A. EIFFEL λέγεται ότι είναι ο πρώτος που το πρότεινε. Ήδη απ'το 1934, παρουσιάστηκε μια αναφορά για τον κινούμενο ιμάντα απ'τον A. KLEMIN. Το σχολείο του W.

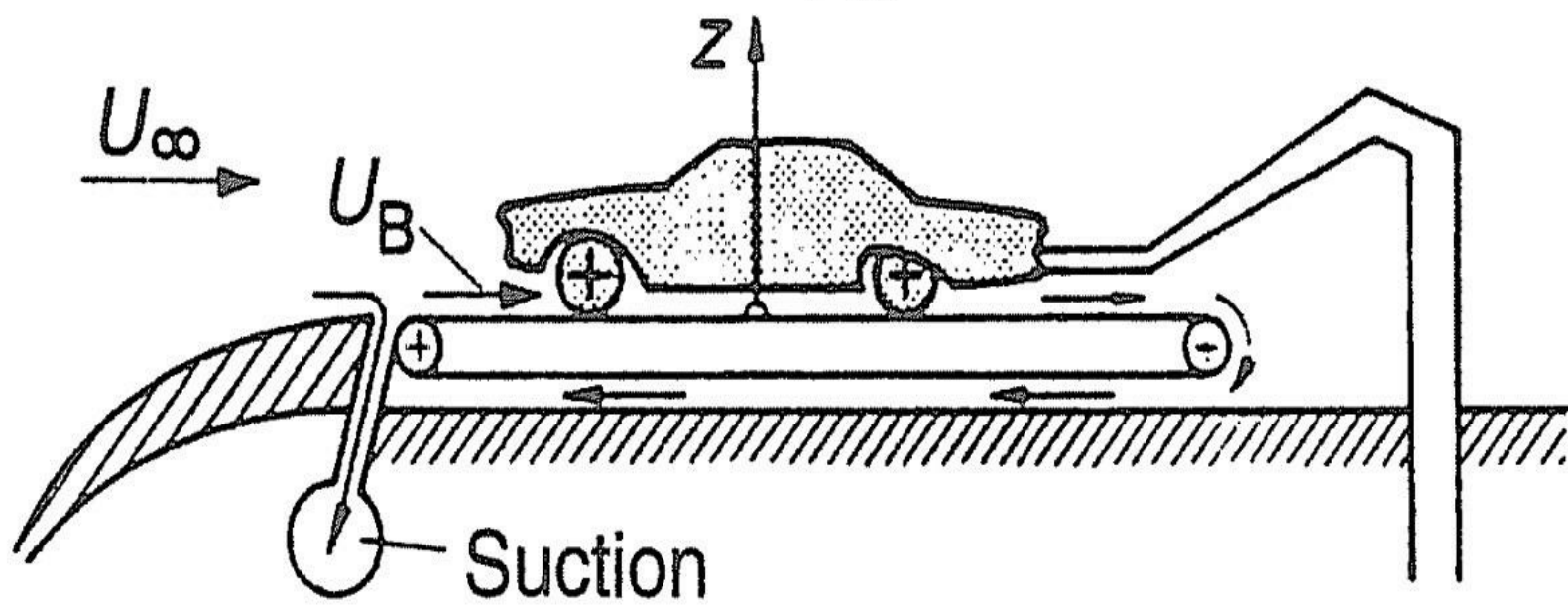
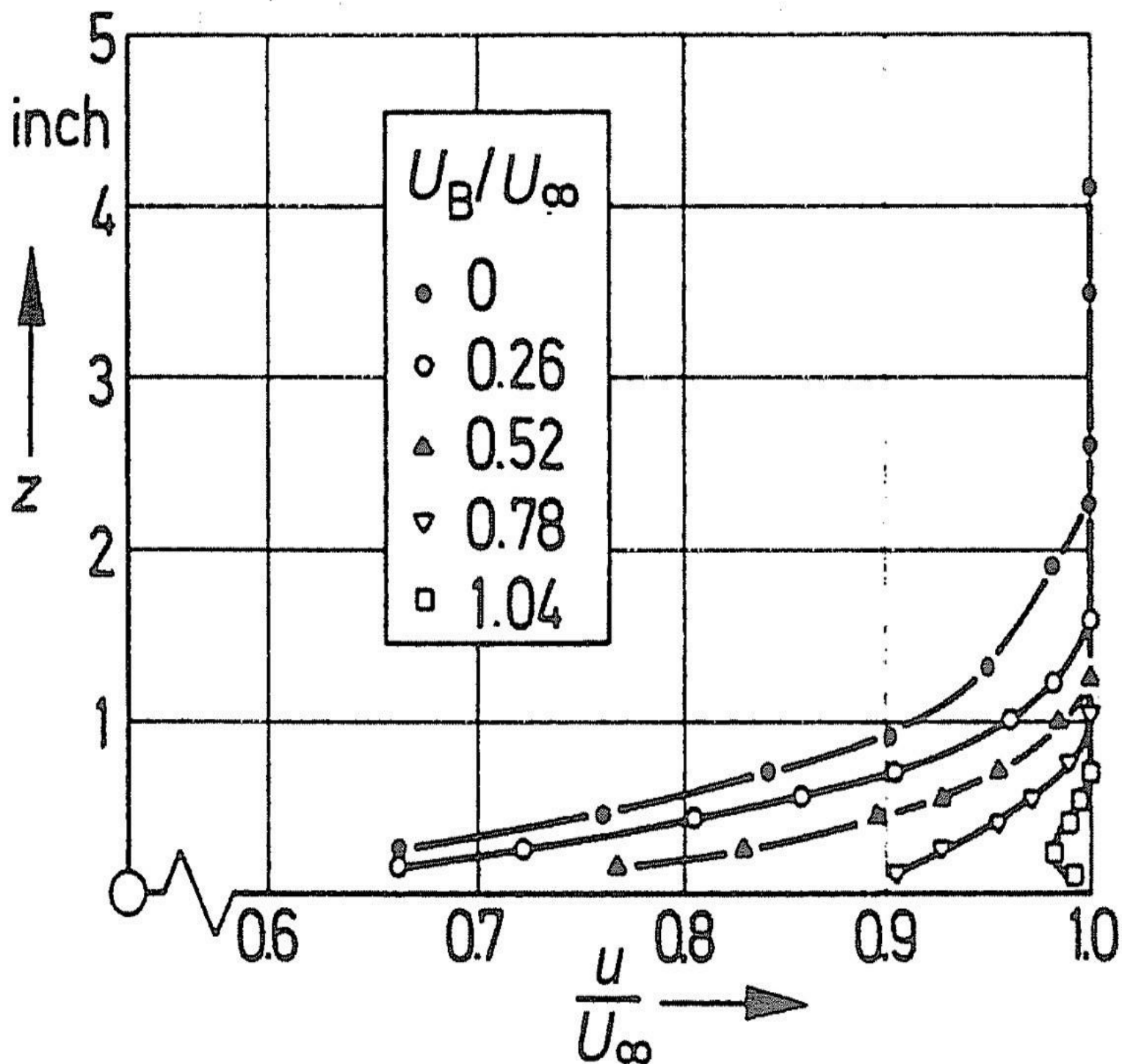
KAMM (FKFS) χρησιμοποίησε έναν κινούμενο ψάντα για μοντέλα μειωμένης

κλίμακας απ' τη δεκαετία του '30 (βλ. μέρος 1.4.2): Ο C. SCHMID έκανε αναφορά πάνω σ' αυτό.

Αν το ερχόμενο οριακό στρώμα μετακινηθεί μπροστά απ' τον ιμάντα –είτε με αναρρόφηση είτε με “σέσουλα”- το προφίλ ταχύτητας στην τοποθεσία ενός μοντέλου (σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής) είναι σχεδόν επίπεδο. Αυτό έχει παρουσιαστεί επαναληπτικά: η εικόνα 1.31 λειτουργεί ως παράδειγμα. Ένα βήμα παραπέρα προτάθηκε απ' τον G.W. CARR και φαίνεται στην εικόνα 1.32. Η αναρρόφηση συνοδεύεται από βουητό ακριβώς μπροστά απ' τον ιμάντα, και η απώλεια ορμής της ανοδικής ροής του οριακού στρώματος έχει σχεδόν καταργηθεί.

Όπως είναι αναμενόμενο, κάθε έλλειψη αξιοπιστίας, σχετικά με την αναπαράσταση του δρόμου, είναι αισθητή όταν γίνονται μετρήσεις στο κάτω μέρος του οχήματος. Αυτό αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα που επιτυγχάθηκαν απ' τον P.W. BEARMAN κ.α. με ένα γενικό σώμα, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 1.33. Εξετάστηκε η επίδραση της γωνίας  $\alpha$  ενός πίσω διαχύτη. Η αντίσταση και η καθοδική δύναμη είναι χαμηλότερη με ένα σταθερό έδαφος παρά με έναν κινούμενο ιμάντα: οι διαφορές αυξάνονται καθώς αυξάνεται και η γωνία του διαχύτη. Πέρα από μια οριακή γωνία  $\alpha$  (όπου πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο διαχωρισμός στο διαχύτη) οι διαφορές τείνουν να εξαφανιστούν. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώθηκε απ' τον J.P. HOWELL, ο οποίος δοκίμασε ένα γενικό σώμα παρόμοιο με αυτό της εικόνας 1.33, διαφοροποιώντας όχι μόνο τη γωνία του διαχύτη αλλά και τη γωνία κλίσης του πίσω μέρους.

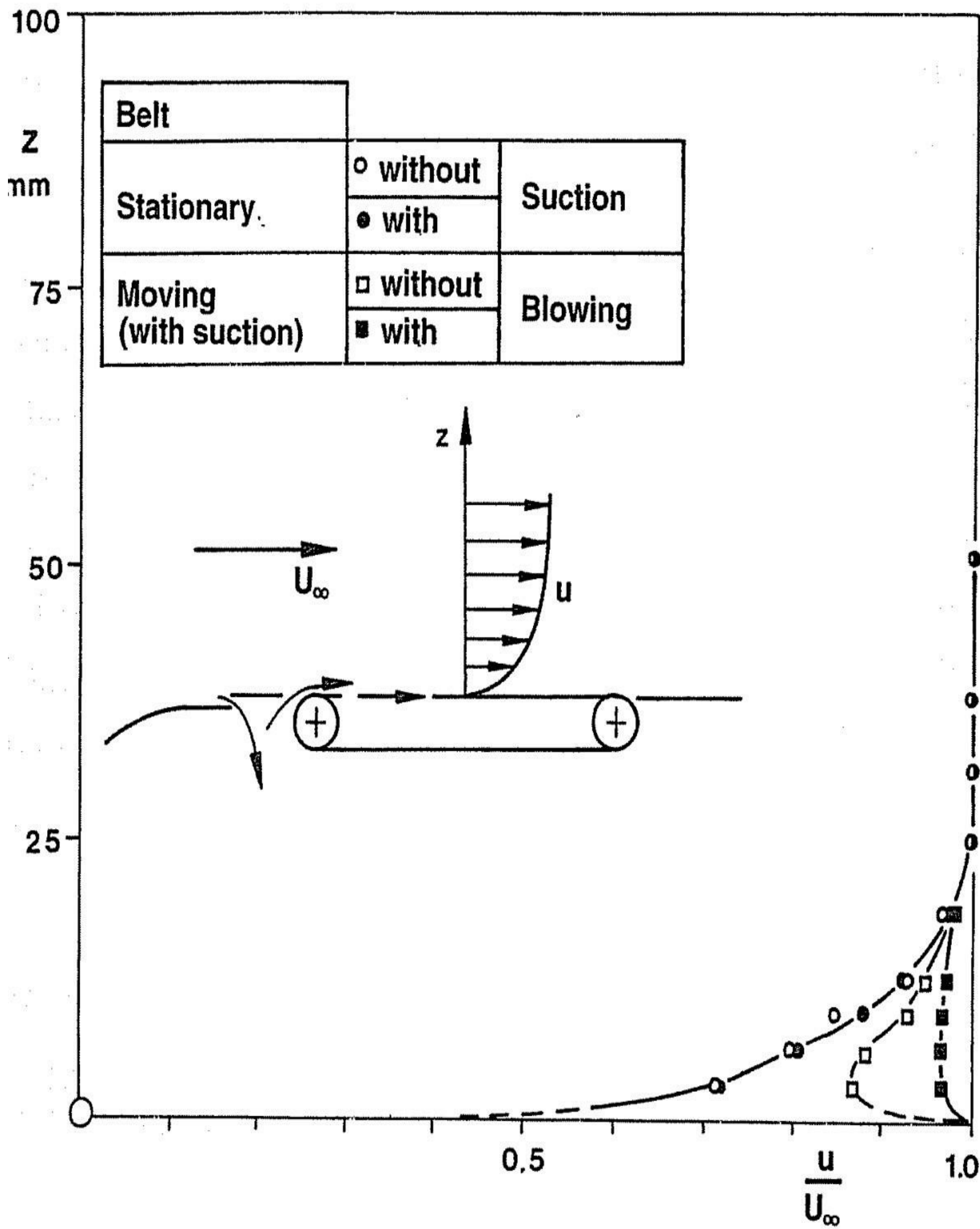






Εικ. 1.31 Προφίλ ταχύτητας πάνω απ'τον κινούμενο ιμάντα (μειωμένης κλίμακας)  
για διάφορες αναλογίες της ταχύτητας ιμάντα  $UB$  προς την ταχύτητα αέρα  $U_\infty$ , μετά  
τον  $F.N.$  BEUAVAIS.

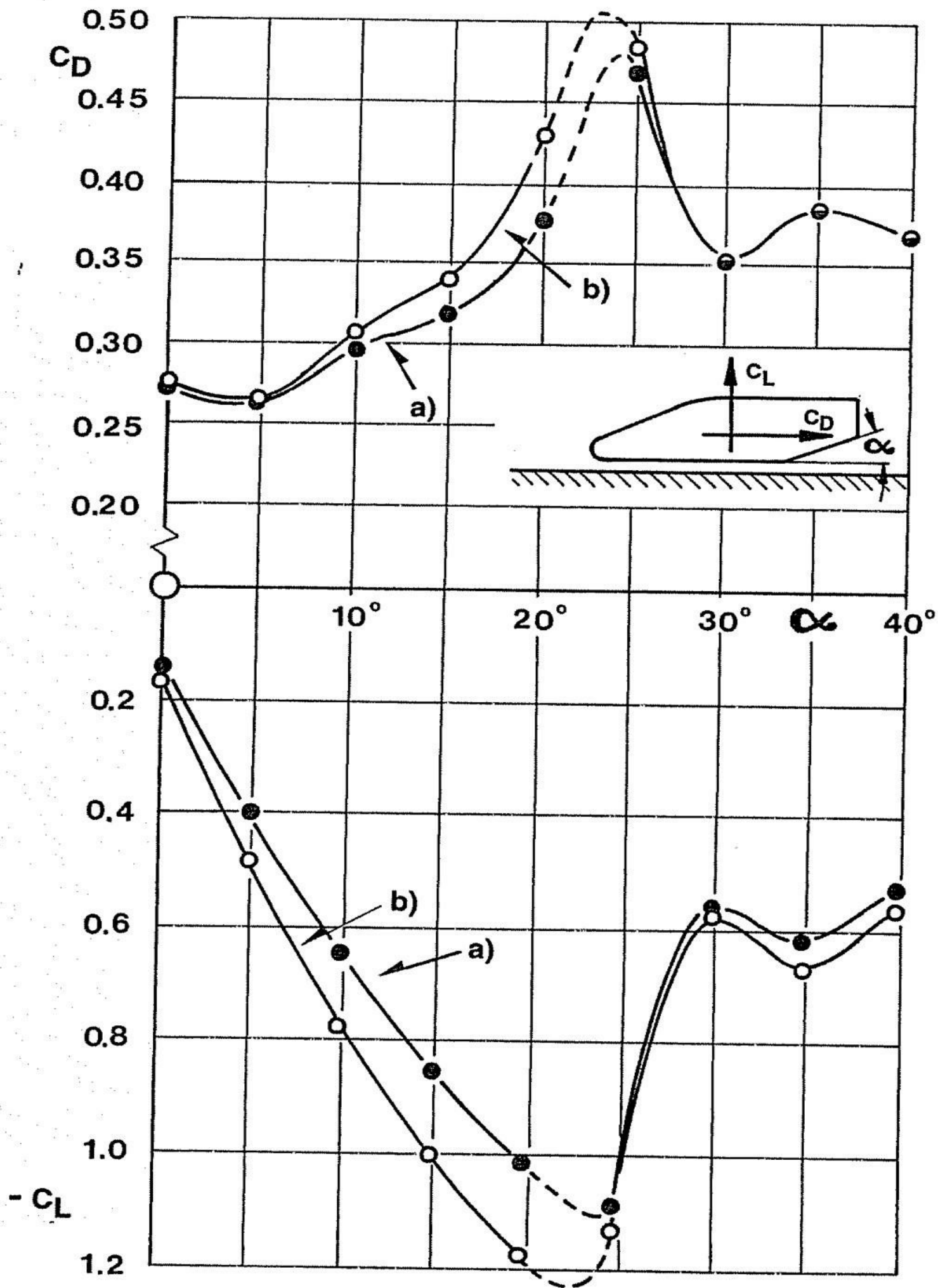




*Εικ. 1.32 Προφίλ ταχύτητας πάνω απ'τον κινούμενο ιμάντα (μειωμένης κλίμακας)*

*με ή χωρίς επιρροή στο ερχόμενο οριακό στρώμα, μετά τον G.W. CARR.*





Εικ. 13.33 Επίδραση ενός τύπου της προσομοίωσης του δρόμου στην υπολογισμένη αντίσταση και άνωση οι οποίες επηρεάζονται από μετρήσεις στην κάτω πλευρά ενός μοντέλου: α) ακίνητο έδαφος, β) κινούμενο έδαφος, μετά τον P.W. BEARMANN.

Πρέπει να παρθούν συγκεκριμένες προφυλάξεις όταν δοκιμάζονται τα μοντέλα με τροχούς πάνω σε έναν κινούμενο ιμάντα. Ο πιο λογικός τρόπος είναι να αφήσει κανείς τους τροχούς να κυλήσουν στον ιμάντα. Τα ελαφρυά μοντέλα μειωμένης κλίμακας επιτρέπουν αυτήν την απλή ρύθμιση. Βασικά, η αντίσταση μπορεί να μετρηθεί δευσμεύοντας το μοντέλο με ένα σύρμα από μπροστά. Όλα τα άλλα συστατικά δύναμης απαιτούν μια εσωτερική ισορροπία. Η αντίσταση περιστροφής πρέπει να μετρηθεί χωρίς αέρα στη σήραγγα και να αφαιρεθεί η ολική αντίσταση έτσι ώστε να υπάρξει μόνο αεροδυναμική. Ωστόσο, ένας κινούμενος ιμάντας δεν μπορεί να αντέξει ένα μοντέλο ή αυτοκίνητο πλήρους-κλίμακας. Έτσι, η στερέωση του μοντέλου δεν είναι απλή. Ένας τρόπος είναι να κρατήσει κανείς το μοντέλο με ένα κεντρί από μπροστά ή από πίσω: γι' αυτό το μοντέλο θα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με μια εσωτερική ισορροπία. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σε γερμανικές και ολλανδικές αεροσήραγγες (DNW-LTF). Ο άλλος τρόπος είναι να το κρατήσει και απ' τις δυο πλευρές με ράβδους οι οποίες συνδέονται, κάτω απ' το δάπεδο και έξω απ' τον κινούμενο ιμάντα, με στοιχεία της δύναμης της ισορροπίας. Η ρύθμιση αυτή χρησιμοποιείται στο σχέδιο πτήσης ενισχυόμενου εντοπισμού (FLAT).

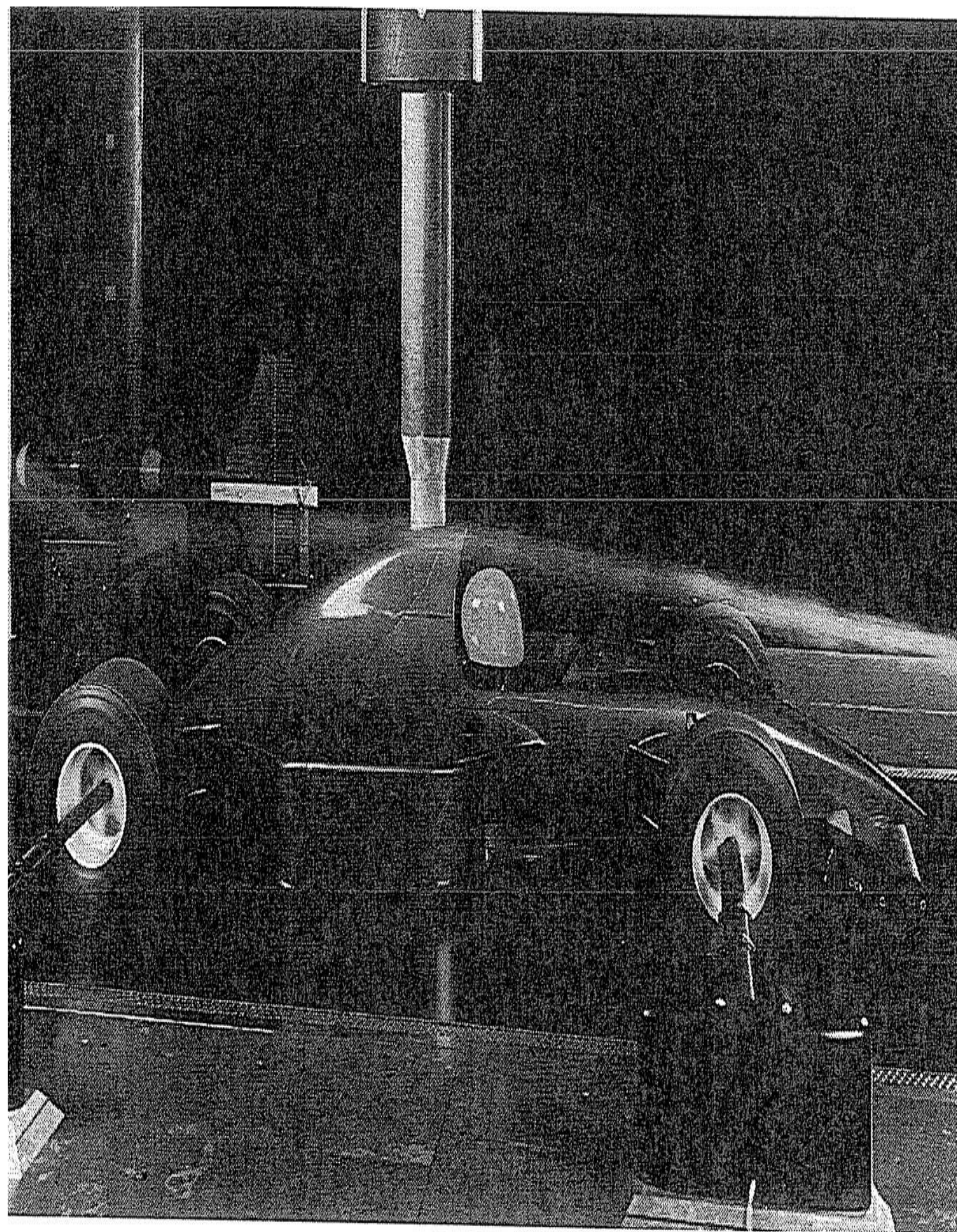
Οι περιστρεφόμενοι τροχοί πάνω σε έναν κινούμενο ιμάντα χρησιμοποιούνταν για πολύ καιρό, όταν ερευνήθηκαν μοντέλα αγωνιστικών αυτοκινήτων μειωμένης κλίμακας μονοκόμματης κατασκευής, με ελεύθερους τροχούς. Η εικόνα 1.34 απεικονίζει μια τυπική ρύθμιση δοκιμής με ένα 1:2.5 μοντέλο της Formula 1 στην  $2.45 \times 1.75 \text{ m}^2$  αεροσήραγγα εστιασμένου κύματος κινητήρα (FWE). Το σώμα του οχήματος στηρίζεται από ένα αντιστήριγμα το οποίο στεγάζει μια εσωτερική ισορροπία έξι εξαρτημάτων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα



κεντρικό αντιστήριγμα. Εάν η ρύθμιση των πίσω φτερών πρόκειται να βελτιωθεί, προτείνεται ένα (λεπτό) κεντρί. Οι τροχοί, που κυλούν στο ιμάντα, αποσυνδέονται απ' το όχημα και βοηθούνται από εξωτερικά στηρίγματα, το καθένα με μια ακέραιη ισορροπία δύο εξαρτημάτων. Η αντίσταση και η άνωση των τροχών μετριοούνται ξεχωριστά και προστίθενται στις κεντρικές δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σώμα.

Τα επιβατικά αυτοκίνητα δοκιμάζονται με διαφορετικό τρόπο: Ο Ε. MERCKER, κ.α. [13.46] ήταν ο πρώτος που δημιούργησε μια εξέδρα κατάλληλη για οχήματα πλήρους κλίμακας όπου οι τροχοί κυλάνε πάνω σε έναν κινούμενο ιμάντα.

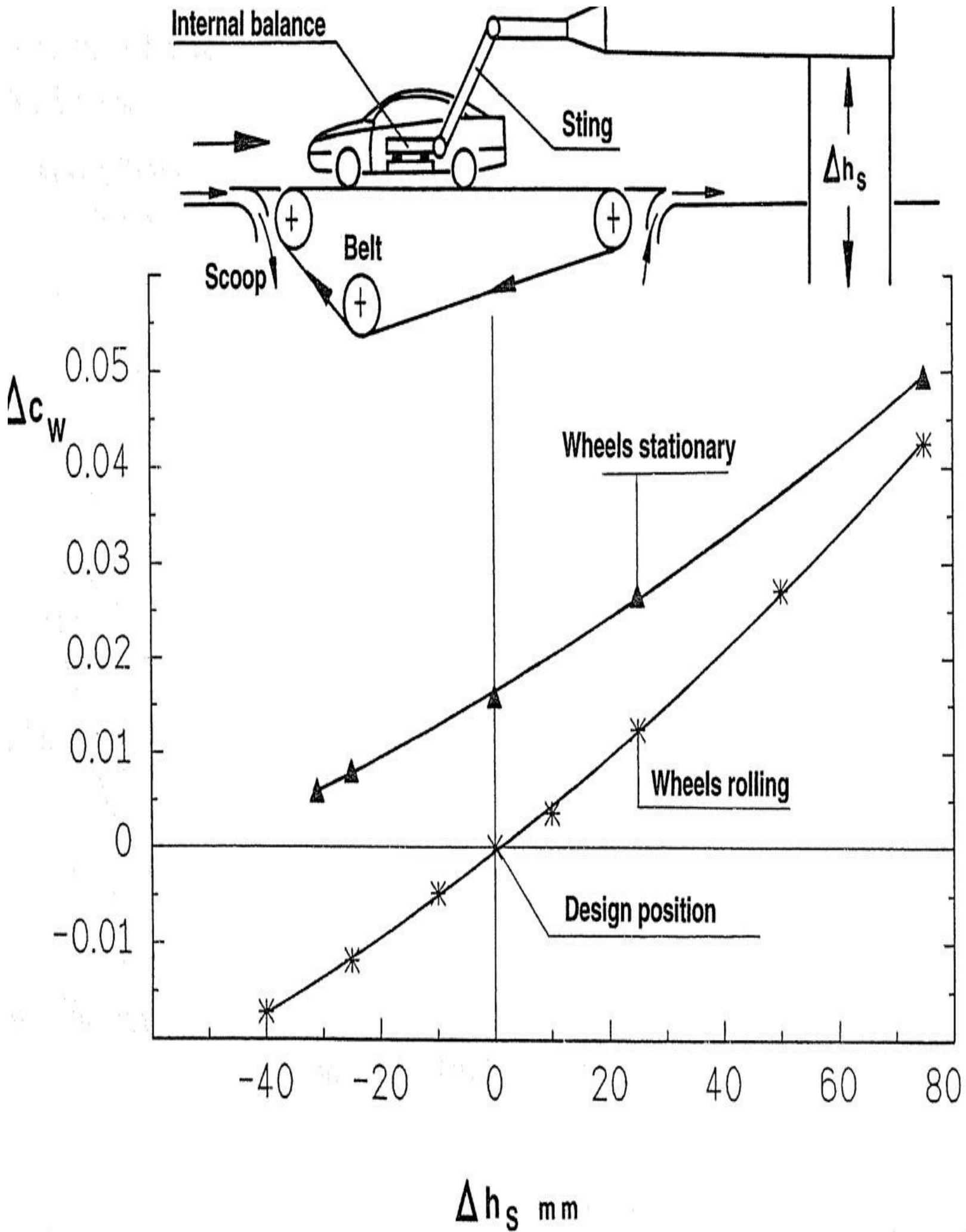




Εικ. 1.34 Αγωνιστικό αυτοκίνητο Sauber C-12 Formula 1 (κλίμακα 1:2.5) πάνω από ένα κινούμενο έδαφος, μετά τον J. WILDI. Οι τροχοί είναι αποσυνδεδεμένοι απ'το όχημα (Courtesy Eidgenossische Flugzeugwerke (FWE), Emmen, Switzerland).

Προκειμένου να ξεφορτώσουν τον ιμάντα απ'το πλήρες φορτίο τροχού ενός αυτοκινήτου, δημιούργησαν έναν τροχό αναστολής που επιτρέπει την μείωση και τον ακριβή έλεγχο του φορτίου τροχού. Η αντίσταση περιστροφής των τροχών υπολογίζεται πριν το τρέξιμο με το ίδιο φορτίο τροχού αλλά χωρίς αέρα. Ένα μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι η αεροδυναμική αντίσταση συμπεριλαμβάνεται στην περιστροφική αντίσταση εξαιτίας του εξαερισμού των τροχών (σε σταθερό αέρα). Ο K. ZWICKER εξέτασε το πως μπορεί να απομονώνει κανείς σωστά το συγκεκριμένο συστατικό της αντίστασης (σε κινούμενο αέρα). Το διάγραμμα στην εικόνα 1.35 υποδηλώνει ότι η αντίσταση είναι χαμηλότερη με έναν κινούμενο ιμάντα και περιστρεφόμενους τροχούς παρά με ένα σταθερό δάπεδο και σταθερούς τροχούς, και η επίδραση μειώνεται με αυξανόμενη απόσταση απ'το έδαφος.





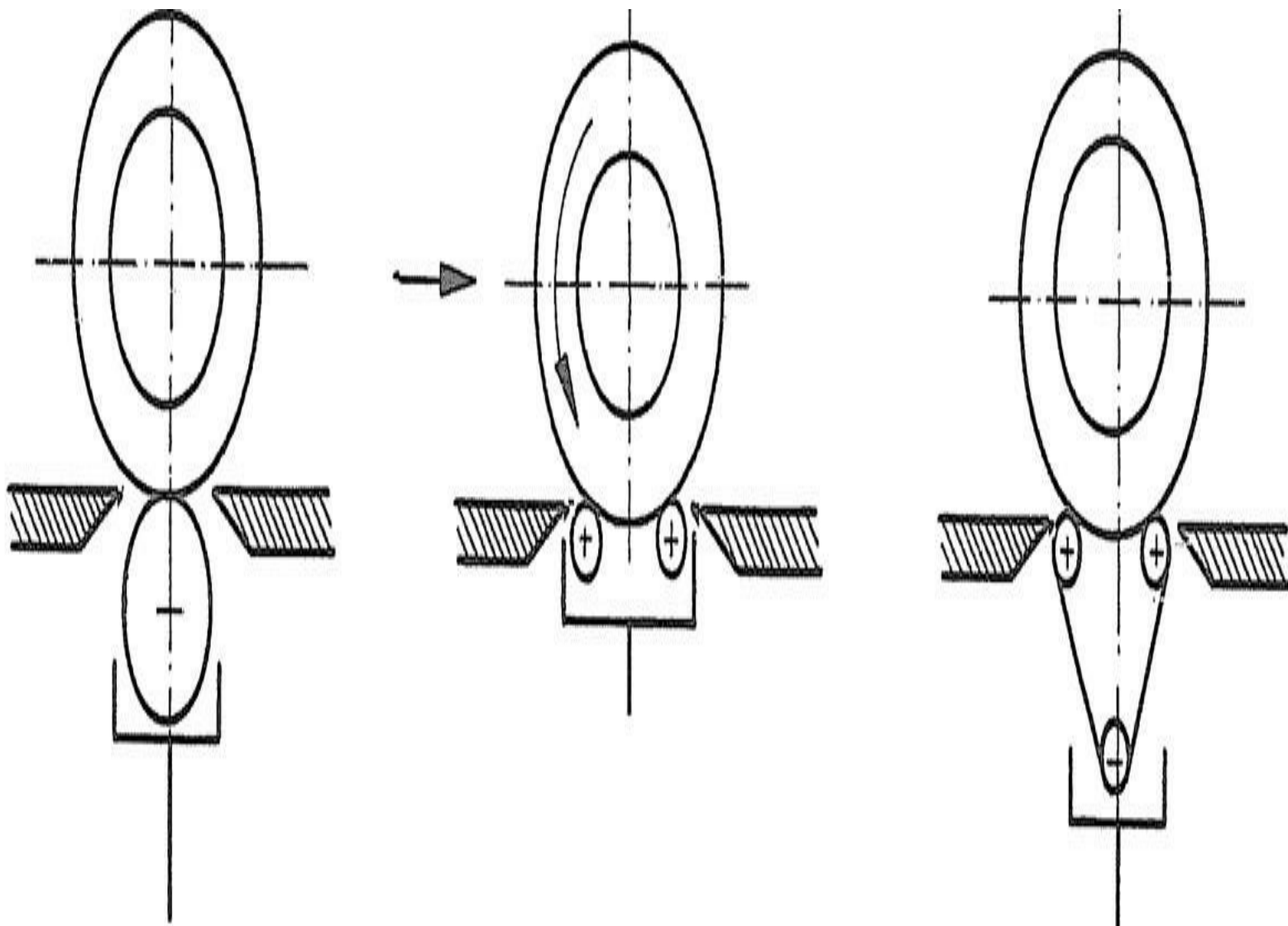
Εικ. 1.35 Επίδραση της απόστασης εδάφους και αναπαράστασης του δρόμου στην αντίσταση, μετά τον E. MERCKER.

Ωστόσο, το αποτέλεσμα αυτό δεν πρέπει να γενικευτεί: η αλλαγή αντίστασης –στο παράδειγμα της μείωσης- είναι το αποτέλεσμα τριών διακριτών και εν μέρη αντίθετων επιδράσεων:

- Γενικά η αντίσταση ενός σώματος αυξάνεται καθώς το δάπεδο κινείται, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.33.
- Η αντίσταση στατικών τροχών αυξάνεται όταν μετακινείται το οριακό στρώμα του δαπέδου (από έναν ιμάντα, για παράδειγμα).
- Η αντίσταση των τροχών μπορεί να μειωθεί όταν περιστρέφονται, όπως παρουσιάζεται στο μέρος 1.4.2. Αυτό, ωστόσο, όπως υπογραμμίζει και ο J. WIEDEMANN, συμβαίνει μόνο όταν η γωνία, κάτω απ' την οποία η τοπική πλευρική ροή πλησιάζει τους τροχούς, είναι μικρή ( $<11^\circ$ ).

Αυτές οι τρεις επιδράσεις μπορούν να προστεθούν στην *αύξηση* της αντίστασης όταν το δάπεδο κινείται.

Ομολογουμένως, η αυθεντική DNW-LTF ρύθμιση δοκιμής απαιτεί μια μεγάλη προσπάθεια εγκατάστασης του οχήματος. Το όχημα δοκιμής πρέπει να είναι τοποθετημένο πάνω σε έναν ιμάντα, συνδεδεμένο με μια εσωτερική ισορροπία, και η ανάρτηση του οχήματος να αντικατασταθεί από ένα φορτίο τροχού με



συμπιεσμένο αέρα. Ήδη απ' το 1968, προτάθηκε μια πιο βολική ρύθμιση του κινούμενου ιμάντα απ' τον J. ROTTHOFF. Εκτός απ' τη χρήση ενός ευρύ ιμάντα που εκτείνεται στο αυτοκίνητο (ή και περισσότερο), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας “στενός” ιμάντας που κινείται μόνο ανάμεσα στους τροχούς. Στην περίπτωση των μη-περιστρεφόμενων τροχών το όχημα μπορεί να στηρίζεται σε τέσσερα μαξιλάρια συνδεδεμένα με την εσωτερική ισορροπία, όπως γίνεται σε δοκιμές με στατική πλακέτα γείωσης. Η ρύθμιση αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτα για δοκιμές με μοντέλα μειωμένης κλίμακας. Ο A. COGOTTI, αφού επανεξέτασε τις υπάρχουσες μεθόδους για την προσομοίωση του εδάφους, χρησιμοποιεί έναν πολύ στενό ιμάντα για αυτοκίνητα πλήρους κλίμακας στην αεροσήραγγα Pininfarina.



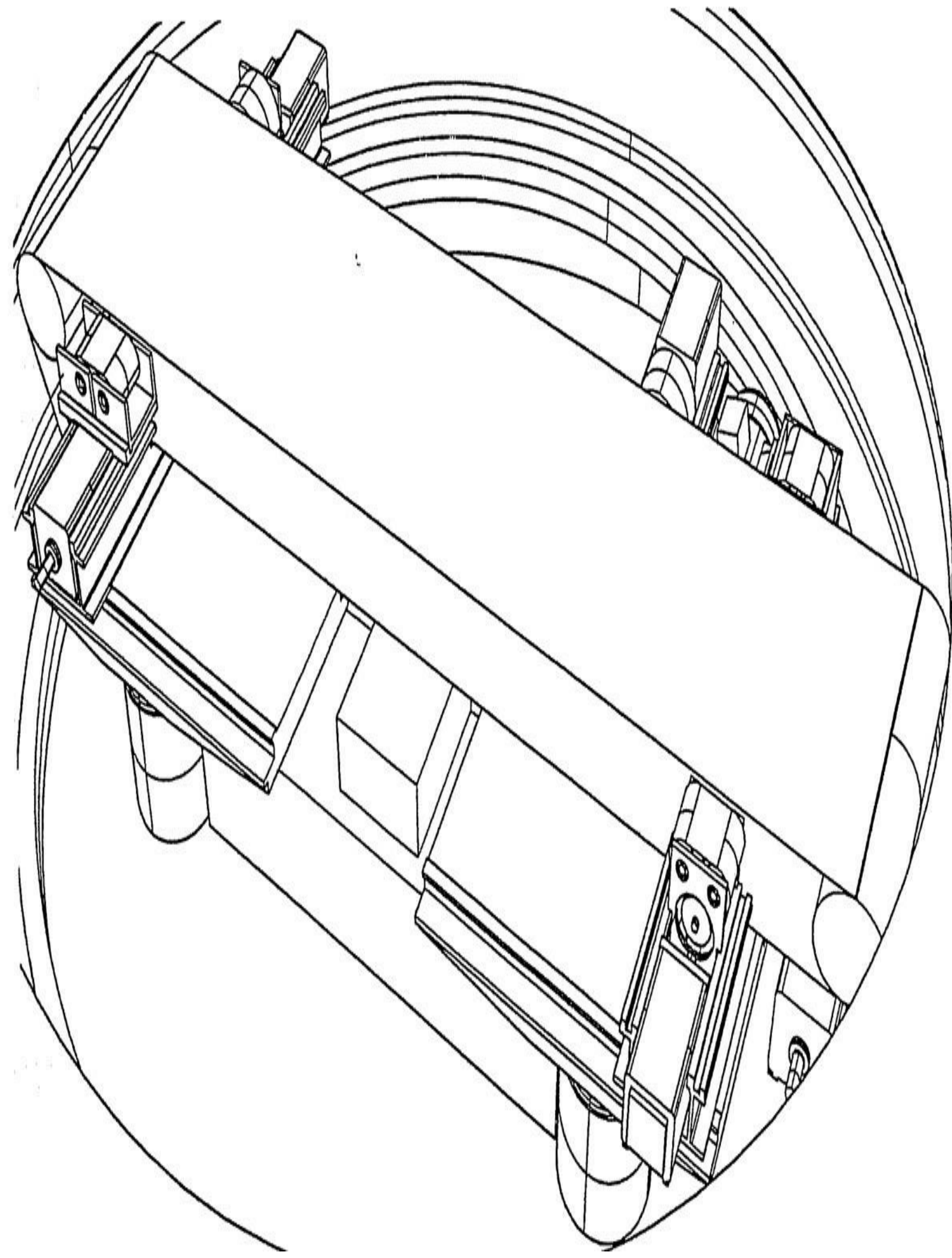
Στην περίπτωση ενός στενού ιμάντα ή ενός στατικού δαπέδου, οι τροχοί μπορούν να περιστραφούν. Οι τρεις τεχνικές λύσεις που προτάθηκαν γι' αυτόν το σκοπό παρουσιάζονται στην εικόνα 1.36. Αντί για την κίνηση κάθε τροχού με έναν κύλινδρο με συγκριτικά μεγάλη διάμετρο, η περιστρεφόμενη κίνηση τροχού μπορεί να παραχθεί από ένα ζευγάρι μικρών κυλίνδρων ή ενός ιμάντα μινιατούρα σε κάθε τροχό. Και στις τρεις περιπτώσεις η αντίσταση περιστροφής αποτελεί μια εσωτερική δύναμη του συστήματος «όχημα συν ισορροπία» και δεν υπολογίζεται. Το ίδιο ισχύει και για την αντίσταση του εξαερισμού τροχών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

*Εικ. 1.36 Τρεις πιθανότητες αναπαραγωγής της περιστροφικής κίνησης των τροχών μέσα απ' την ισορροπία της αεροσήραγγας.*

Σε κάθε περίπτωση το όχημα πρέπει να διατηρείται μακριά απ' τους τροχούς. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα σύστημα στηρίγματος χαμηλής εσωτερικής τριβής, που συνδέεται στην κάτω πλευρά (και που μπορεί, αν είναι απαραίτητο, να αντέξει εν μέρη το βάρος του αυτοκινήτου). Η εικόνα 1.37 κάνει μια επισκόπηση ενός προτεινόμενου σχεδίου των J. POTTHOFF και R. -G. FIEDLER: ο σταθερός ιμάντας κινείται ανάμεσα στους τροχούς, και τέσσερις μινι ιμάντες τους οδηγούν. Το μεγάλο πλεονέκτημα των ρυθμίσεων δοκιμής με στενό ιμάντα είναι ότι το αυτοκίνητο μπορεί να μπει στην αεροσήραγγα όπως είναι. Η μόνη απαραίτητη τροποποίηση είναι η αποσύνδεση του ημιαξονίου.

Παλαιότερες δοκιμές που έγιναν απ' τον H. -J. EMMELMANN με στενό ιμάντα (αυτοκίνητο πλήρους κλίμακας, στατικοί τροχοί) είχαν ως αποτέλεσμα μια καλή συμφωνία με ιμάντα πλήρους ανοίγματος. Αργότερα, τα ευρήματα αυτά



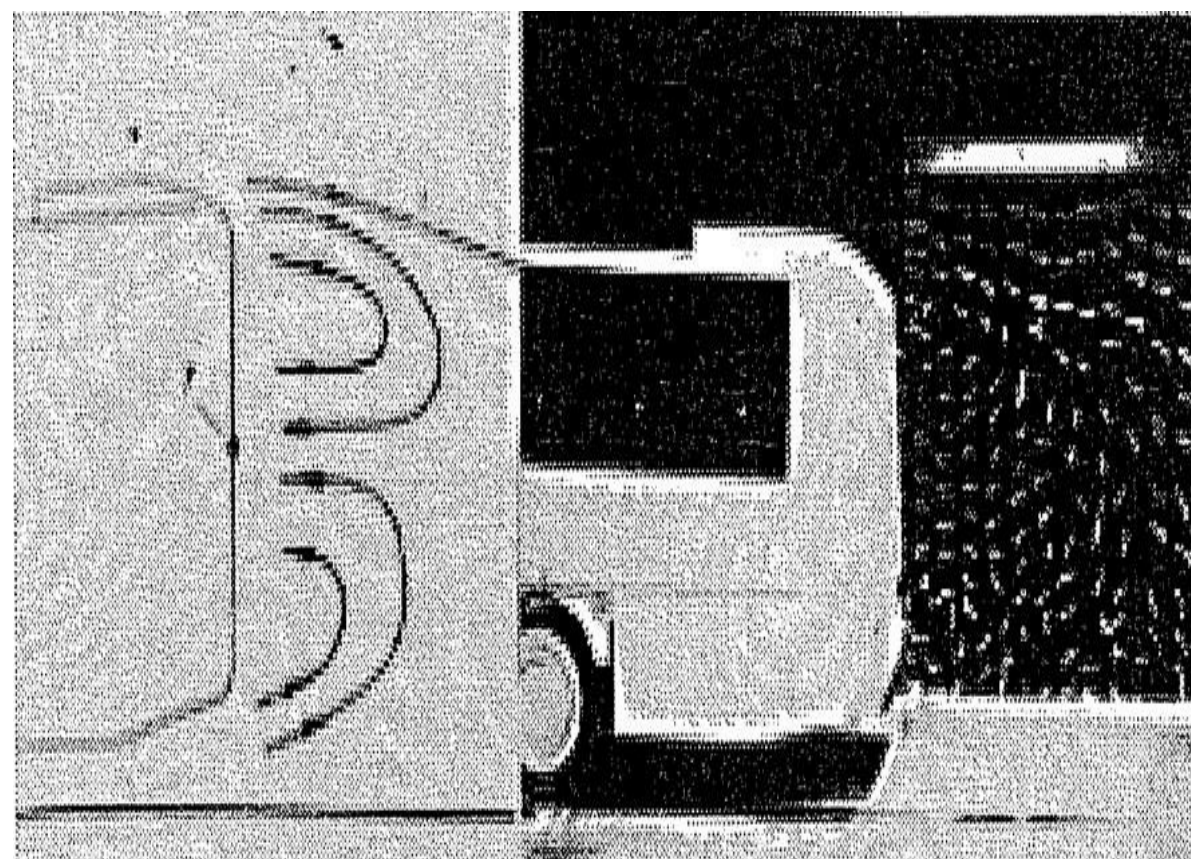


επιβεβαιώθηκαν απ' τον E. MERCKER, με ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο πλήρους κλίμακας (κάνοντας χρήση του συστήματος τεσσάρων τροχών για να ενδυναμώσει την περιστροφή των τροχών μέσα στο αυτοκίνητο).

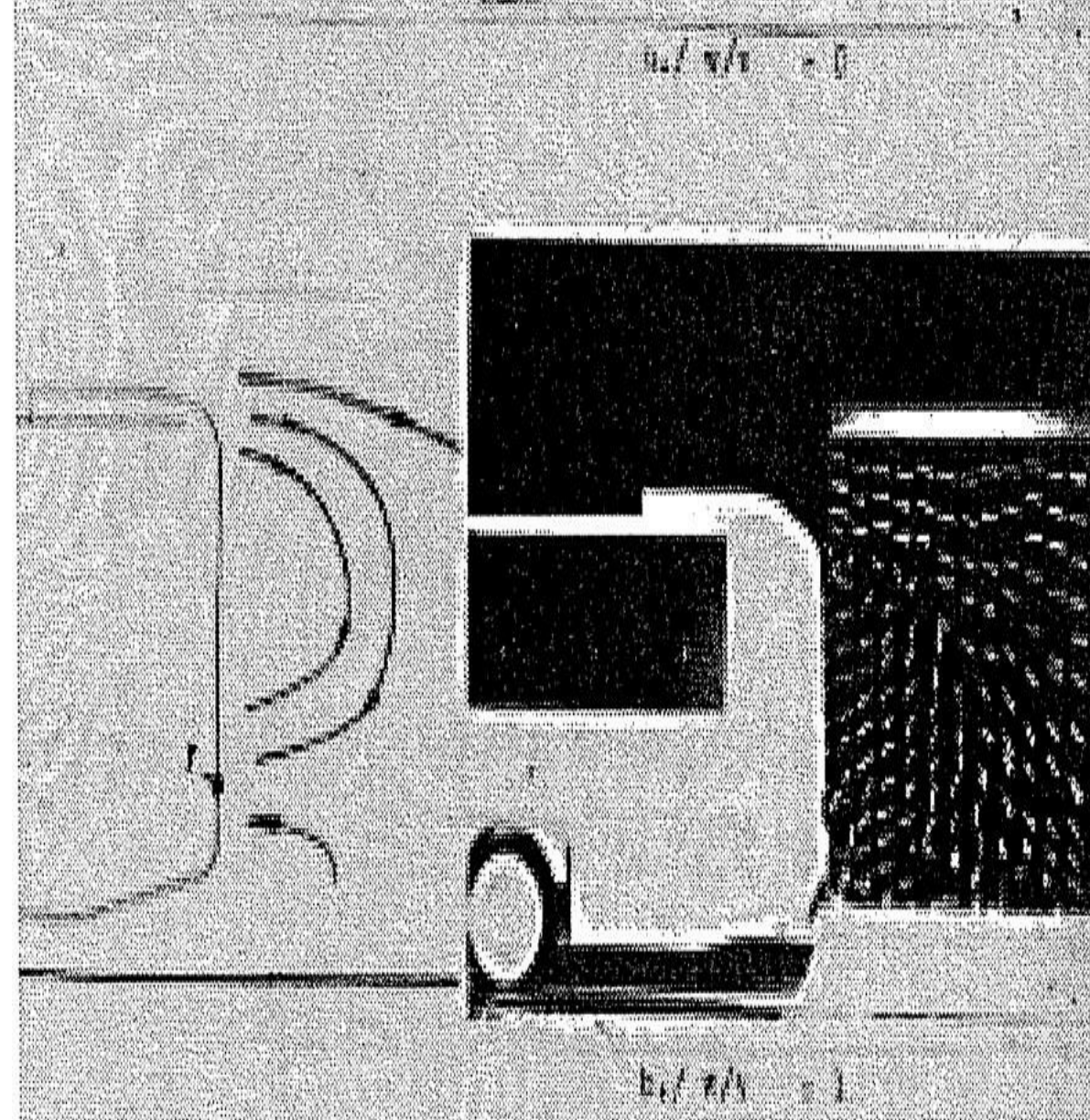
Η σωστή προσομοίωση του δρόμου είναι απαραίτητη και για επαγγελματικά οχήματα. Αυτό είναι αποτέλεσμα πειραμάτων με μοντέλο λεωφορείου πλήρους κλίμακας που έγιναν απ' τον T. LAJOS και τον I. HEGEL. Τα λεωφορεία είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αυτοκίνητα. Έτσι, το οριακό στρώμα σε ένα στατικό έδαφος είναι αρκετά πυκνό στο πίσω μέρος του λεωφορείου, προκαλώντας την επέκταση της ροής απ' το κάτω μέρος προς στα πλάγια. Η ροή στα κοντινά απόνερα και επομένως στην εναπόθεση ακαθαρσιών όπως επίσης και στην ανακύκλωση του καυσαερίου αλλάζει σημαντικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.38.

*Εικ. 1.37 «Στενός ιμάντας» (ιμάντας ανάμεσα στους τροχούς) και «ιμάντες μινιατούρα» για την περιστροφή των τροχών, ένα σχέδιο για την αεροσήραγγα IKV πλήρους κλίμακας, μετά τους J. POTTHOFF και R.-G. FIELDER.*





floor stationary



floor moving

Εικ. 1.38 Επιρροή της προσομοίωσης του δρόμου στη μορφή ροής πίσω από ένα λεωφορείο, μετά τους T. LAJOS και I. HEGEL.

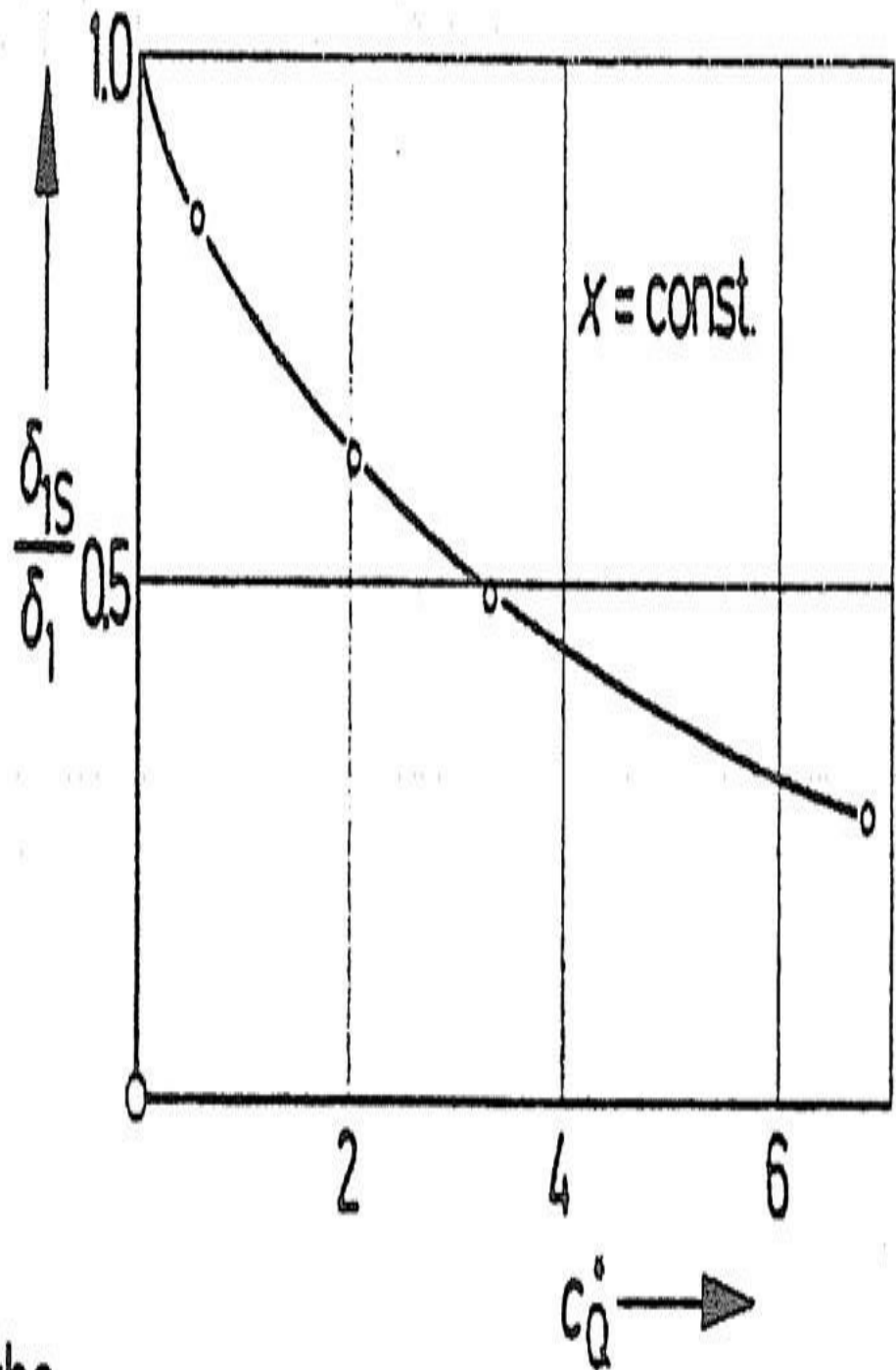
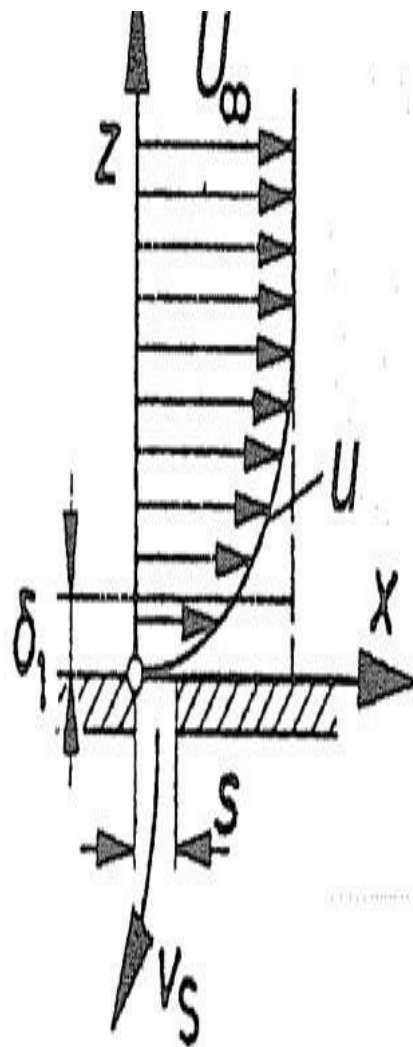
Όλες οι άλλες μέθοδοι αναπαράστασης του δρόμου που βρίσκονται στην εικόνα 1.26 χρησιμοποιούν ένα σταθερό έδαφος: οι οποίες προσομοιώνουν το δρόμο, άλλα δεν τον αναπαράγουν. Το προτέρημά τους είναι η απλότητα σε σχέση με έναν κινούμενο ιμάντα. Ποια από αυτές θα προτιμηθεί εξαρτάται απ' τη σύγκριση του κινούμενου ιμάντα ή του δρόμου. Στο τέλος αυτού του μέρους θα δοθεί μια σύσταση.

Όπως παρουσιάστηκε και στην εικόνα 1.38, η πιο προβληματική επίπτωση της ελλειπούς σχετικής κίνησης του εδάφους είναι ότι το οριακό στρώμα που χτίζεται γύρω απ' την αεροσήραγγα, τελικά είναι παρόν στο σταθερό έδαφος. Βασικά, υπάρχουν δύο εναλλακτικές για τη μείωση της μετατόπισης του οριακού στρώματος: η αναρρόφηση του, ή το γέμισμα του όγκου του με εμφύσηση αέρα. Και οι δύο έχουν πρακτική εφαρμογή, το πρώτο με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις: αναρρόφηση μπροστά απ' το μοντέλο είτε μέσω σχισμής είτε ταινίας από πορώδες υλικό (και οι δύο ονομάζονται “βασική αναρρόφηση”), και μέσω διανεμημένης αναρρόφησης με πορώδες έδαφος στην κάτω πλευρά του αυτοκινήτου. Η εμφύσηση εφαρμόστηκε είτε με μια σχισμή είτε με μια σειρά από μεμονωμένα ακροφύσια.

Ο αέρας μετακινείται με τον ανεμιστήρα και τροφοδοτείται πίσω στην αεροσήραγγα στην καθοδική ροή του τμήματος δοκιμής. Η ποσότητα αέρα που







Suction volume-flow:

$$\dot{Q} = v_s \cdot b \cdot s$$

Volume-flow deficit within the boundary layer:  $\dot{V} = U_\infty \cdot b \cdot \delta_{1x=0}$

$s$ : Slot width

$b$ : Slot length

Suction parameter

$$c_Q^* = \frac{\dot{Q}}{\dot{V}} = \frac{v_s \cdot s}{U_\infty \cdot \delta_{1x=0}}$$

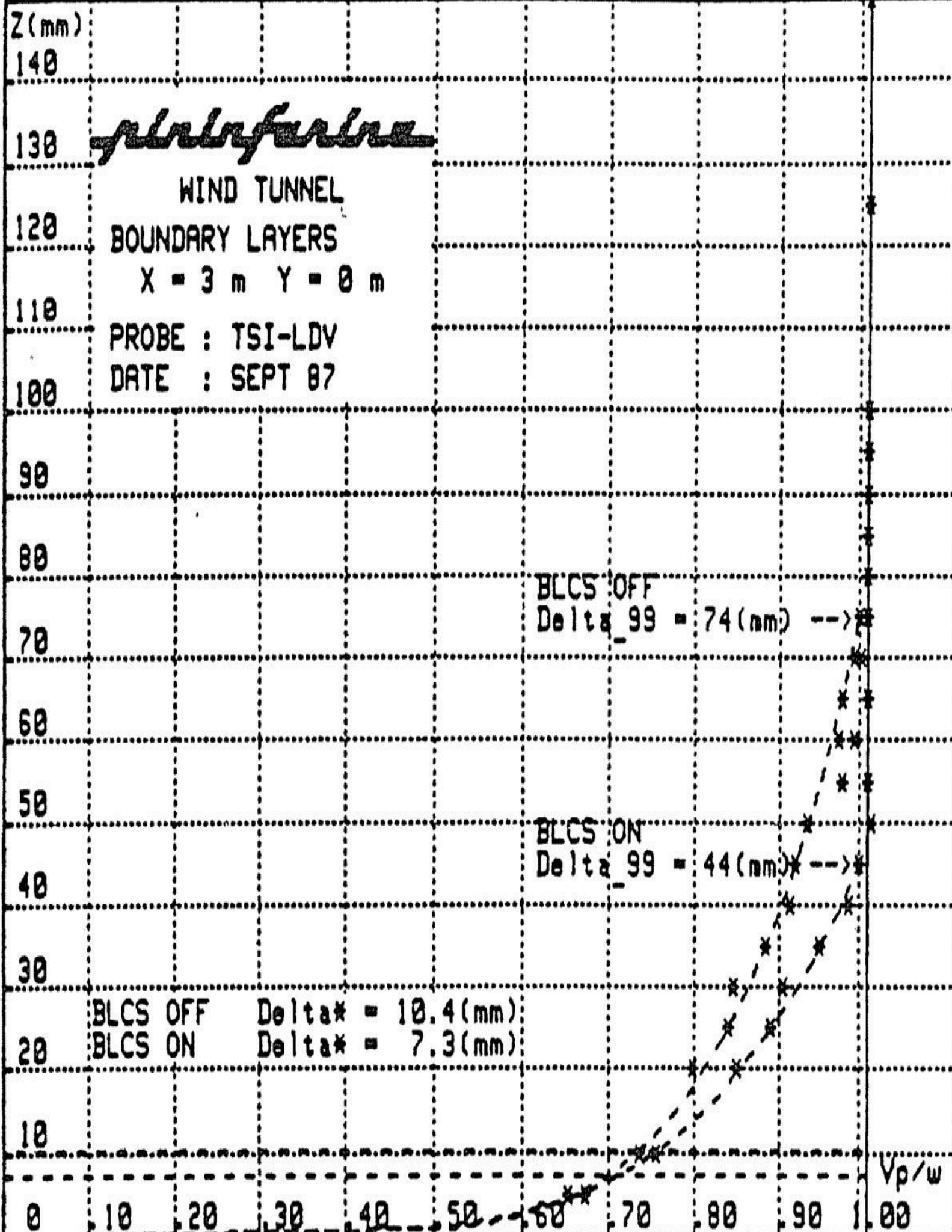
αναρροφήθηκε μπορεί να καθοριστεί απ' την εικόνα 1.39, η οποία βασίζεται σε έρευνες του K.O. ARNOLD σχετικά με την αναρρόφηση του οριακού στρώματος μπροστά απ' το πτερύγιο μιας αεροτομής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά του, για να μειώσει κανείς την πυκνότητα μετατόπισης  $\delta 1$  στο μισό, η παράμετρος αναρρόφησης  $c^*Q$  πρέπει να είναι κοντά στο 4. Η αναλογία της ταχύτητας αναρρόφησης προς την ταχύτητα αέρα μπορεί να ελεγχθεί έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πυκνότητα του οριακού στρώματος ( $\delta$ =σταθ.). Αν ο όγκος της ροής της αναρρόφησης είναι πολύ μεγάλος, το πεδίο της ερχόμενης ροής θα αποκτήσει μια αρνητική γωνία προσβολής. Αυτό επισημάνθηκε απ' τους E. MERCKER και J. WIEDEMANN που ερεύνησαν την ανάπτυξη του οριακού στρώματος στο δρόμο και στην αεροσήραγγα, το δεύτερο μαζί με διαφορετικά είδη προσομοίωσης του δρόμου. (δηλ. Βασική και διανεμημένη αναρρόφηση, εμφύσηση, και κινούμενος ιμάντας).

*Εικ. 1.39 Μείωση της μετατόπισης πυκνότητας  $\delta 1$  ενός ταραχώδους οριακού στρώματος απ' την υποδοχή αναρρόφησης, μετά τον K.O. ARNOLD .*

Συχνά, η παράμετρος αναρρόφησης επιλέγεται για να μειωθεί η πυκνότητα του οριακού στρώματος (μετρημένη σε ένα κενό τμήμα δοκιμής) στο μισό, στο κέντρο της περιστροφικής πλάκας. Η εικόνα 1.40, που είναι μια αυθεντική καταγραφή της αεροσήραγγας Pininfarina, παρουσιάζει ένα τυπικό παράδειγμα: η πυκνότητα του οριακού στρώματος έχει μειωθεί από 74 σε 44mm. Παρόμοια προφίλ ταχύτητας εκδόθηκαν και απ' τον G. ANTONUCCI, για την αεροσήραγγα FLAT, και απ' τον K.B. KELLY για την μεγάλη αεροσήραγγα GM. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια συγκριτικών μετρήσεων ανάμεσα στις μεγάλες Ευρωπαϊκές αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες που παρουσιάστηκαν απ' τον R. BUCHHEIM έγινε φανερό ότι η μείωση της πυκνότητας του οριακού στρώματος στο μισό, δεν έχει σχεδόν καμία

επίδραση στην αντίσταση, τουλάχιστον για συντελεστές αντίστασης  $cD > 0.30$ .





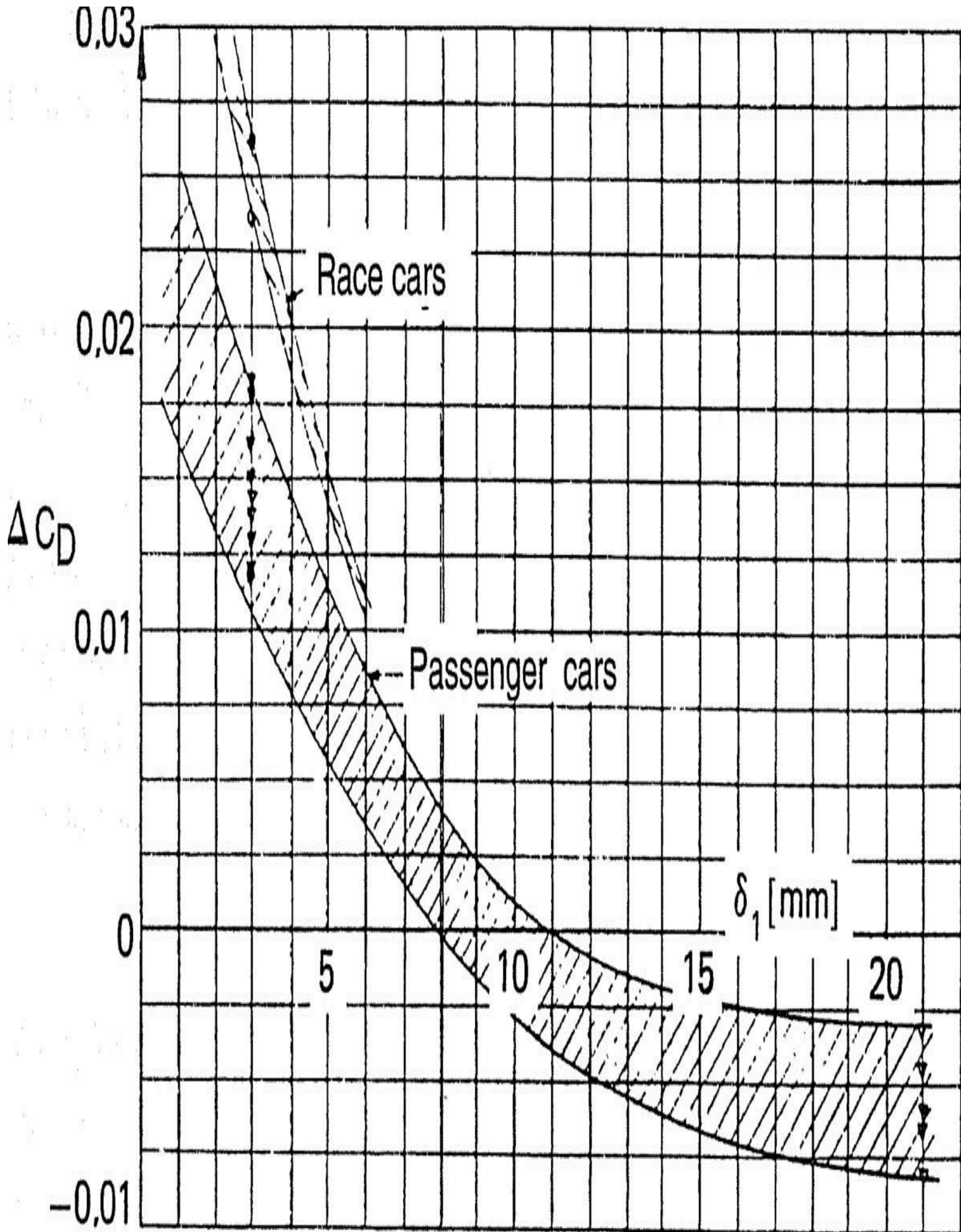
Εικ. 1.40 Διανομή ταχύτητας πάνω από ένα στατικό έδαφος με ή χωρίς αναρρόφηση οριακού στρώματος, μέτρηση LDV, μετά τον A. GOGOTTI.

Η επιρροή του οριακού στρώματος ερευνήθηκε εις βάθος απ' τον A.

BERNDTSSON. Επιβατικά αυτοκίνητα, σπορ και αγωνιστικά, χρησιμοποιήθηκαν ως αντικείμενα δοκιμής, καλύπτοντας μια ευρεία γκάμα συντελεστών αντίστασης.

Τα αποτελέσματα της βασικής αναρρόφησης αναρτίζονται στην εικόνα 1.41, όπου η αντίσταση αποτυπώνεται κατά της μετατόπισης πυκνότητας  $\delta 1$ . Η τελευταία, έχει υπολογιστεί σε ένα κενό τμήμα δοκιμής της αεροσήραγγας PORSCHE στα 2.6m πάνω απ' το κέντρο της περιστροφικής πλάκας. Η μετατόπιση της πυκνότητας του φυσικού οριακού στρώματος σε αυτήν την τοποθεσία είναι  $\delta 1 \approx 10\text{mm}$ . Η επίδραση της μείωσης της μετατόπισης πυκνότητας του οριακού στρώματος γίνεται διακριτή για  $\delta 1 < 10\text{mm}$ , όταν το οριακό στρώμα είναι πολύ λεπτό ( $\delta 1 \rightarrow 0$ ), δεν είναι γραμμική και ανέρχεται σε  $\Delta c_D \approx 0.02$ . Η αύξηση αντίστασης, όπως θα φανεί παρακάτω, είναι περίπου δυο φορές η τιμή της εφαπτόμενης εμφύσησης.







Εικ. 1.41 Επιρροή της πυκνότητας  $\delta 1$  του οριακού στρώματος (μειωμένο απ' την αναρρόφηση) στο συντελεστή αντίστασης  $cD$ , μετά τον A. BERNDTSSON.

Τα μειονεκτήματα της αναρρόφησης του βασικού οριακού στρώματος (δηλ, αναρρόφηση κατά μια θέση μπροστά απ' το μοντέλο) είναι τριπλή:

1. Για να είναι αποτελεσματική, η ποσότητα του αέρα που αναρροφάται πρέπει να είναι τόσο μεγάλη έτσι ώστε να καταλήγει σε μια αρνητική γωνία προσβολής που δεν μπορεί να γίνει ανεκτή.
2. Κάτω απ' τη σχισμή αναρρόφησης (ή της ταινίας από πορώδες υλικό) αναπτύσσεται ένα καινούριο οριακό στρώμα με το ίδιο προφίλ χαμηλής ισχύος όπως πριν, ξεκινώντας με την πυκνότητα του ερχόμενου στρώματος μετά την αναρρόφηση.
3. Η καθυστερημένη ροή μπροστά απ' το αυτοκίνητο αναπαράγει μια λοξή κλίση πίεσης στη θέση της βασικής αναρρόφησης. Επομένως, ο όγκος της ροής που αναρροφήθηκε δεν είναι στατικός σε όλο το πλάτος του τμήματος δοκιμής. Ως αποτέλεσμα, το οριακό στρώμα εδάφους μπροστά από ένα αυτοκίνητο γίνεται τρισδιάστατο.

Ένα άλλος τρόπος για να προστατέψει κανείς το μοντέλο απ' το πυκνό οριακό στρώμα του δαπέδου είναι ένα δεύτερο δάπεδο [βλ. εικ. 1.26(ε)]. Το μοντέλο και η πλακέτα γείωσης (που προσομοιώνει το δρόμο) ανυψώνονται αρκετά έτσι ώστε να αφήσουν το οριακό στρώμα να περάσει από κάτω. Φυσικά, στην κορυφή της ανυψωμένης πλακέτας γείωσης αρχίζει να αναπτύσσεται ένα καινούριο οριακό στρώμα, όμως με μηδενική πυκνότητα, και έτσι καταλήγει σε ένα πιο λεπτό οριακό στρώμα στη θέση του μοντέλου. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτό

ακυρώνεται εν μέρη γιατί η πλακέτα γείωσης θα πρέπει να εκτείνεται μακριά απ' την ανοδική πορεία του μοντέλου έτσι ώστε να αποτυπωθεί το κύριο μέρος του πεδίου ροής. Ένα άλλο θέμα είναι ότι η αεροδύναμη που διαχωρίζει την πάνω με την κάτω ροή πρέπει να μειώσει σε μηδέν την γωνία προσβολής της πλακέτας γείωσης. Για να συμβεί αυτό, οι αντιστάσεις ροής στα πάνω και στα κάτω μονοπάτια πρέπει να είναι ίδιες. Ένα μέτρο για να το πετύχει αυτό κανείς είναι με ένα αρθρωτό πτερύγιο στο πίσω άκρο της πλακέτας γείωσης. Το πτερύγιο αυτό εκτρέπεται έτσι ώστε να ισορροπήσει τις αντιστάσεις και στα δύο μονοπάτια. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι διακλαδώσεις πίεσης γύρω από μια πλακέτα γείωσης για να καθορίσουν πότε η γωνία προσβολής  $\alpha$  θα είναι μηδενική. Αν  $\alpha \neq 0$ , το πεδίο ροής στην κορυφή μπορεί να μολύνει το πεδίο ροής μπροστα από ένα μοντέλο, ειδικά αν υπάρχει διαχωρισμός της ροής στο πάνω μέρος της κορυφής. Μια ανυψωμένη πλακέτα γείωσης εφαρμόζεται συχνά, κυρίως όταν χρησιμοποιείται μια μεγάλη αεροσήραγγα για πειράματα μικρής κλίμακας. Η σέσουλα, όπως φαίνεται στην εικόνα 13.35, μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική έκδοση. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στις σήραγγες DNW-LTF για να μετακινήσει το ερχόμενο οριακό στρώμα στην εξέδρα του κινούμενου ιμάντα. Η παλαιότερη πρόταση του K.OHTANI, δηλαδή η *ανύψωση* ενός μοντέλου απ' το δάπεδο της σήραγγας με μετατόπιση πυκνότητας  $\delta 1$  του οριακού στρώματος [βλ. εικόνα 1.26(ζ)], δεν συνιστάται γιατί περιέχει δύο συστηματικά λάθη. Πρώτον, το κενό ροής που επιτρέπεται ανάμεσα στους τροχούς και το έδαφος επηρεάζει την αντίσταση, και πόσο μάλλον, την άνωση. Αυτό έχει ήδη ανακαλυφθεί απ' τον F.N. BEAUVAIS κατά τη διάρκεια ερευνών πάνω σε ένα κινούμενο δάπεδο. Ωστόσο, το κενό μπορεί να καλυφθεί μέσω ταινίας από πορώδες υλικό που εμποδίζει τη

ροή κάτω απ' τους τροχούς χωρίς τη μεταφορά αξονικής δύναμης. Δεύτερο, και πολύ χειρότερο, το λάθος μπορεί να γίνει μέσω μιας εσφαλμένης απόστασης απ' το έδαφος.

Η ανάπτυξη του νέου οριακού στρώματος πίσω απ' τη σχισμή αναρρόφησης (ή της ταινίας από πορώδες υλικό) μπορεί να εμποδιστεί (ή τουλάχιστον να μειωθεί) με την αναρρόφηση ολόκληρης της περιοχής κάτω απ' το μοντέλο. Η τεχνική αυτή, που ονομάζεται *διανομή αναρρόφησης*, παρουσιάζεται στην εικόνα 1.26(g). Το απαιτούμενο σύστημα αναρρόφησης πρέπει να ενσωματωθεί στην περιστροφική πλακέτα ισορροπίας. Και τα δύο είδη αναρρόφησης- βασική αναρρόφηση μπροστά απ' το μοντέλο και διανεμημένη αναρρόφηση κάτω από αυτό- μπορούν να συνδυαστούν, όπως στην περίπτωση της αεροσήραγγας PORSCHE στο Wiessach.

Η διανεμημένη αναρρόφηση είναι αμφιλεγόμενη, γιατί ο καθορισμός της “σωστής” αναλογίας αναρρόφησης είναι ένα πρόβλημα.

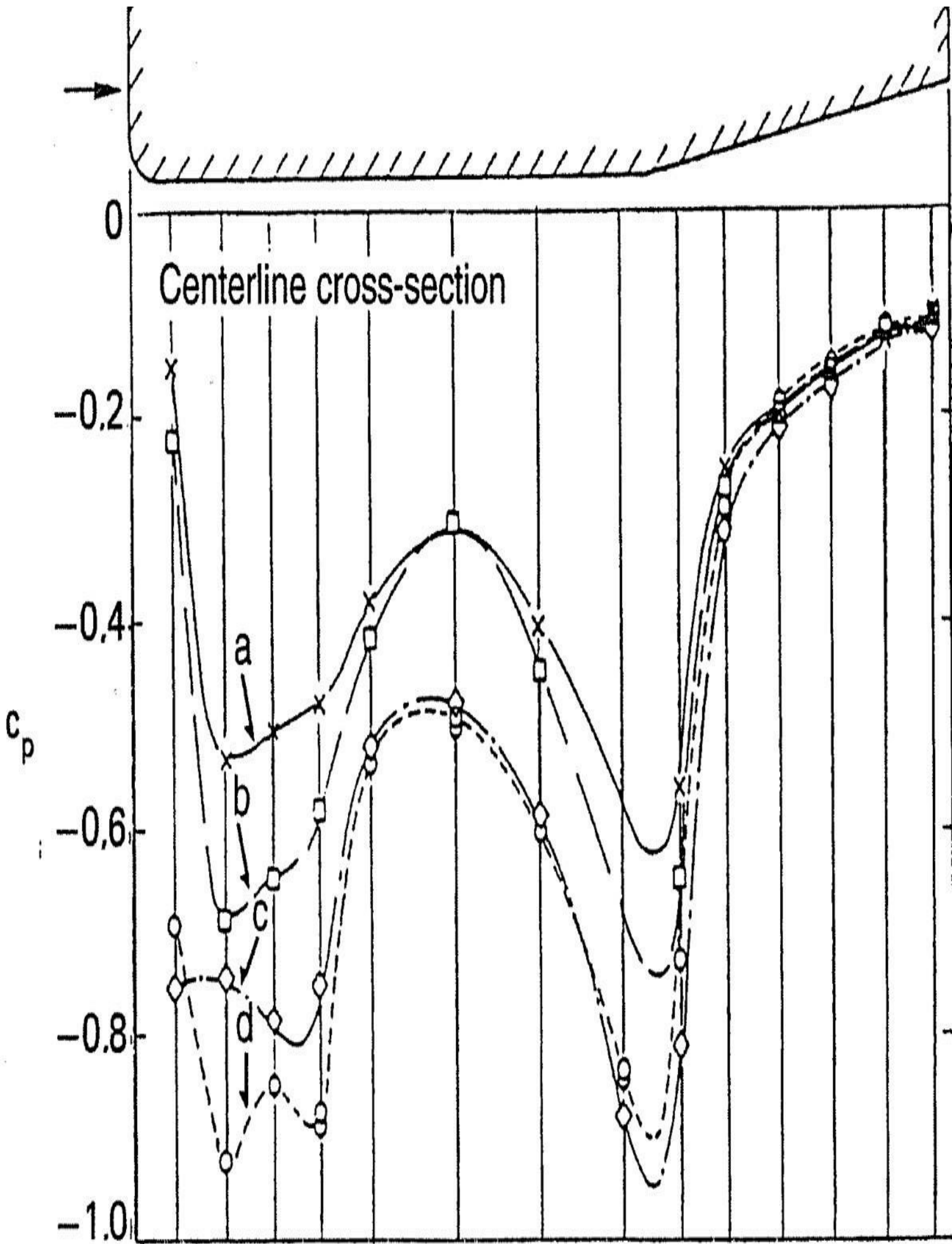
Υπάρχουν δύο λόγοι γι' αυτό:

1. Η αναλογία αναρρόφησης καθορίζεται έτσι ώστε να παραχθεί μια συγκεκριμένη μετατόπιση πυκνότητας στη θέση του μοντέλου σε ένα κενό τμήμα δοκιμής. Όμως, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.29, το προφίλ ταχύτητας του οριακού στρώματος πάνω απ' το δάπεδο αλλάζει εντελώς όταν ένα μοντέλο τοποθετείται σε ένα τμήμα δοκιμής: επίσης, η πυκνότητά του μειώνεται σημαντικά. Επομένως, εάν έχει επιλεχθεί η αναλογία αναρρόφησης για ένα κλειστό τμήμα δοκιμής, σημαίνει ότι θα είναι πολύ μεγάλη όταν τοποθετηθεί ένα μοντέλο.
  2. Το πεδίο ροής γύρω από ένα μοντέλο αλλάζει τη διανομή πίεσης σε ένα δάπεδο, δηλ., πάνω απ' τις εσοχές αναρρόφησης. Αυτό προκαλεί μια (άγνωστη) αλλαγή στην αναλογία αναρρόφησης, όχι μόνο σε σχέση με το συνολικό μέγεθος αλλά και με την τοπική διανομή. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να υπάρξει ένα “κλειστό κύκλωμα”, δηλ, ο αέρας που έχει αναρροφηθεί στο κέντρο του μοντέλου να ρέει δια μέσω του θαλάμου αναρρόφησης και να εκφυσηθεί σε σημείο όπου το πεδίο ροής γύρω από ένα μοντέλο επιφέρει αρνητική πίεση στο επίπεδο γείωσης.
- Προκειμένου να εμποδιστεί το δεύτερο μειονέκτημα, ο W.T. MASON και ο G.SOVAN χρησιμοποίησαν μια υπερκρίσιμη αναλογία πίεσης, αναρροφώντας τη βρώμικη ροή απ' το οριακό στρώμα. Αυτό, βέβαια, δε θα λύσει το πρώτο πρόβλημα. Επίσης, είναι πολύ δύσκολο να διαφοροποιήσει κανείς την αναλογία αναρρόφησης προκειμένου να προσαρμόζεται στις διάφορες ταχύτητες αέρα. Θα χρειαστεί μια περιοχή αναρρόφησης που να ποικίλλει.
- Εκτός από αυτά τα αυστηρά επιχειρήματα σχετικά με τη διανομή αναρρόφησης, υπήρξαν και καλά αποτελέσματα. Μια σύγκριση που έγινε απ' τον G. W. CARR

αποτελεί ένα παράδειγμα. Η διανομή πίεσης στην κάτω πλευρά ενός μοντέλου αυτοκινήτου (βλ. εικ. 1.42) είναι σχεδόν η ίδια με την πίεση του κινούμενου υμάντα. Επομένως, η αεροσήραγγα μικρής κλίμακας MIRA, και όπως ήδη αναφέρθηκε, η σήραγγα πλήρους κλίμακας της PORSCHE είναι εξοπλισμένες με διανεμημένη αναρρόφηση.

Ο καθυστερημένος αέρας μέσα στο οριακό στρώμα, είναι δυνατόν να επιταγχυνθεί με *εμφύσηση* [βλ. εικ. 1.26(h)], και έτσι μειώνεται και η πυκνότητα του στρώματος στο δάπεδο της σήραγγας. Ο συντελεστής της μάζας και της ορμής μπορεί να μειωθεί με εξαγωγή αέρα μέσω μια στενής σχισμής κοντά στο δάπεδο. Για παράδειγμα, η εικόνα 1.43(α) δείχνει πως γίνεται αυτό σε μια αεροσήραγγα DNW-LTF. Τα προφίλ ταχύτητας που αναρτίζονται στην Εικόνα 1.43(β) παρουσιάζουν ξεκάθαρα τη μετακίνηση του συντελεστή ταχύτητας.





Εικ. 1.42 Διανομή ταχύτητας κάτω από ένα γενικό μοντέλο για διάφορα είδη αναπαράστασης του εδάφους: α) στατικό έδαφος, β) φράχτης οριακού στρώματος όπως στην Εικ. 1.26(i), γ) κινούμενος ιμάντας, δ) διανεμημένη αναρρόφηση, μετά τον G.W. CARR.

Με εξάρτηση απ' την ταχύτητα ανέμου  $U_\infty$ , χρειάζεται ένας συγκεκριμένος πίδακας ταχύτητας  $u_j$  για να υπάρξει μηδενική μετατόπιση πυκνότητας  $\delta_1 = 0$  σε κάθε δοσμένη θέση: η σχετική καμπύλη βαθμονόμησης

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

που είναι έγκυρη για σήραγγες DNW-LTF παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.43(c).

Τα προφίλ ταχύτητας κάτω από ένα αυτοκίνητο, όπως μετρήθηκαν απ' τον E.

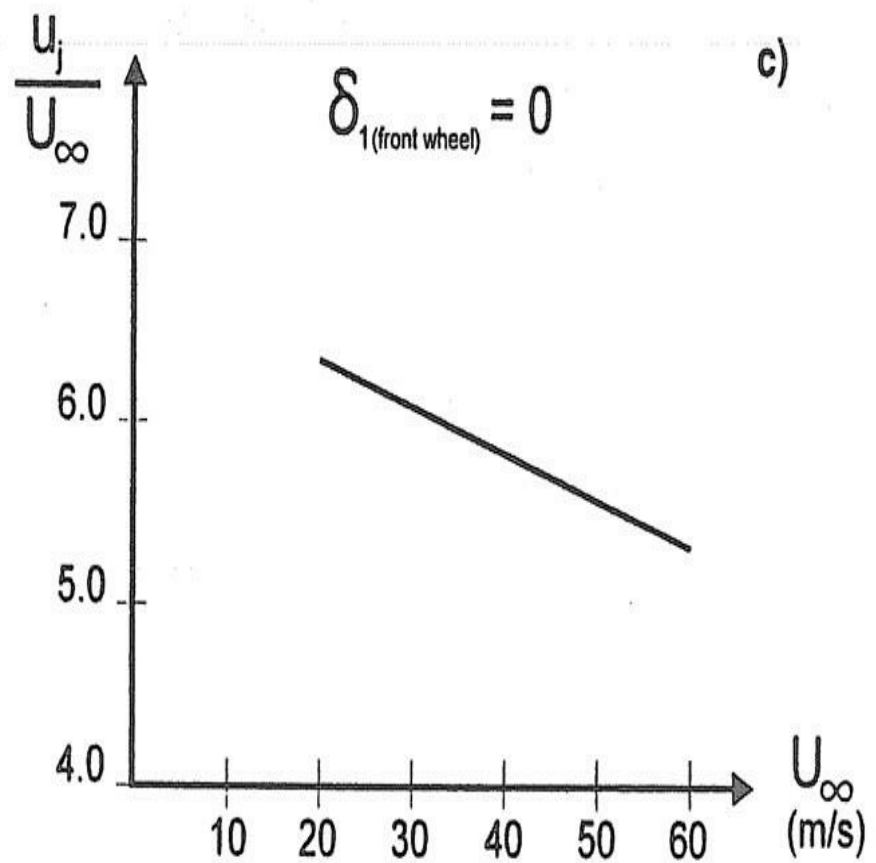
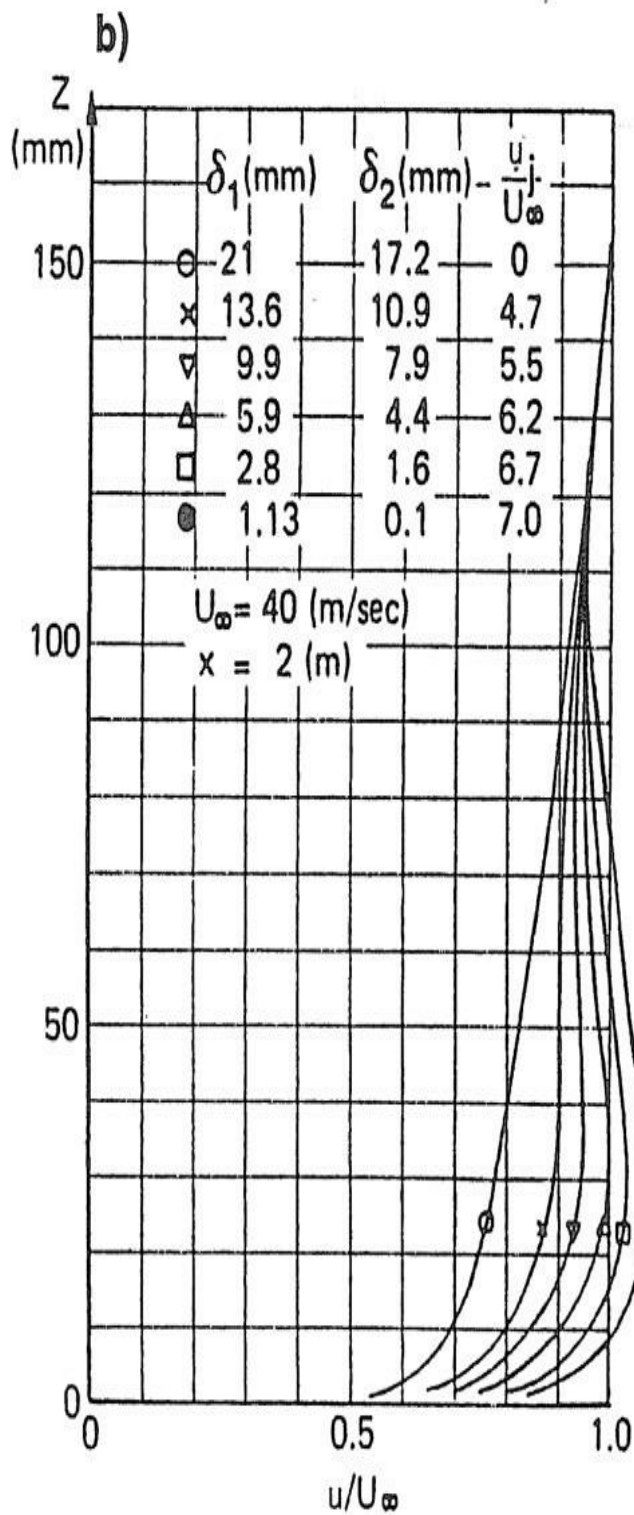
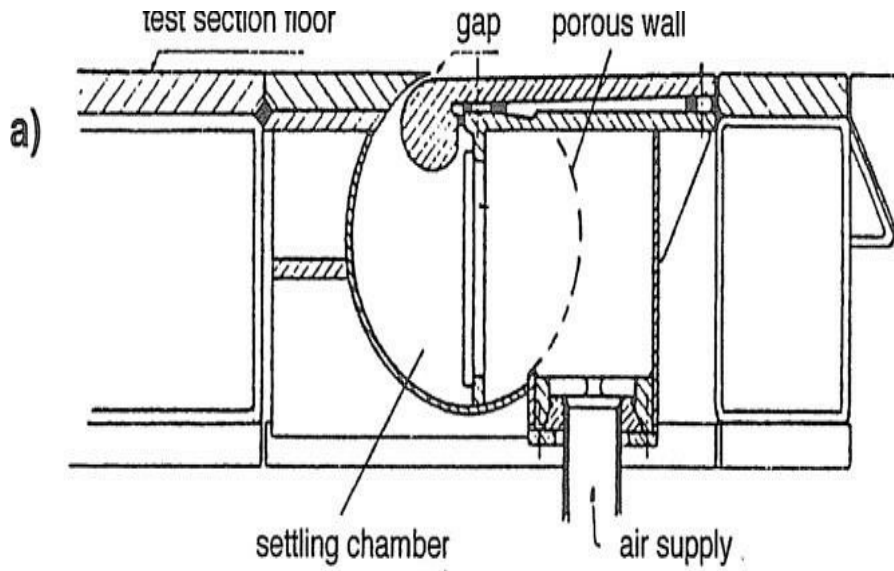
MERCKER και τον H.W. KNAPE καταρτίζονται στην Εικόνα 1.44. Δείχνουν

πόσο κοντά έρχεται η εμφύσηση σε έναν κινούμενο ιμάντα αν η πυκνότητα

απώλειας της ορμής  $\delta_2$  (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής) γίνει μηδενική στη θέση ενός μπροστινού άξονα.



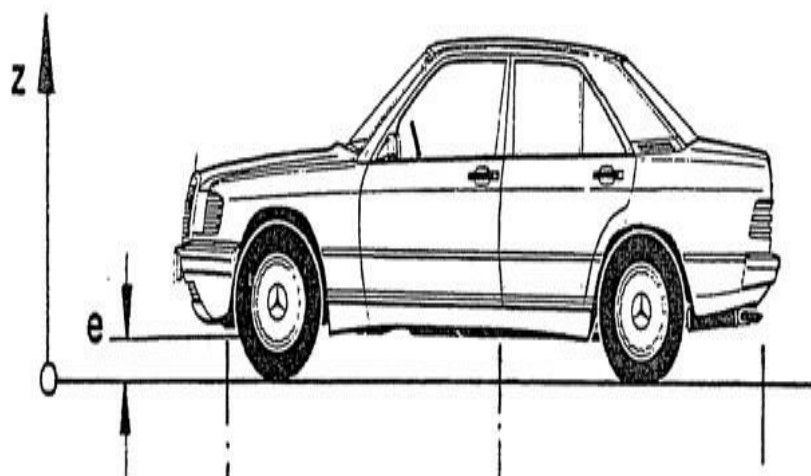




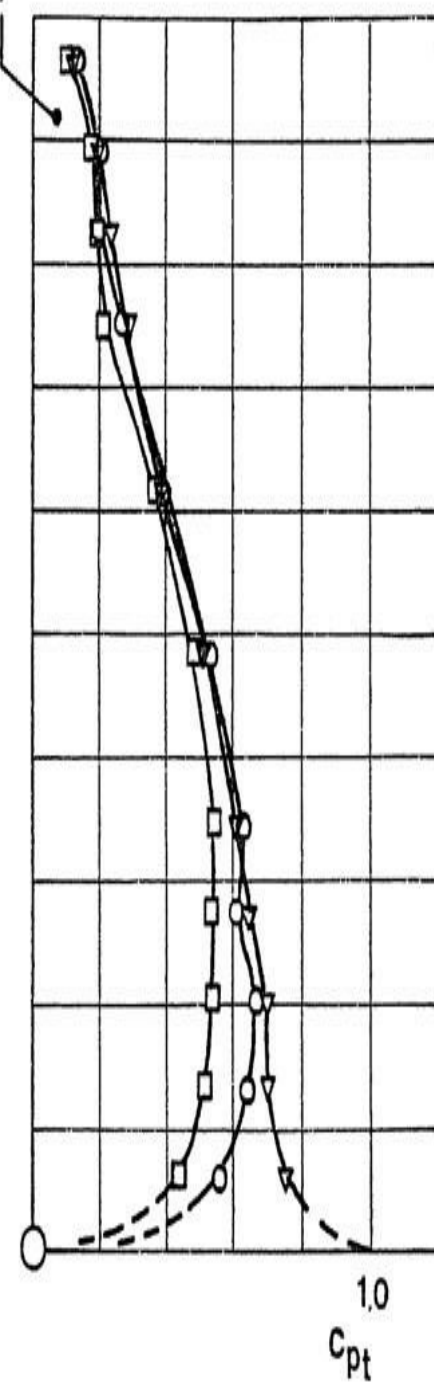
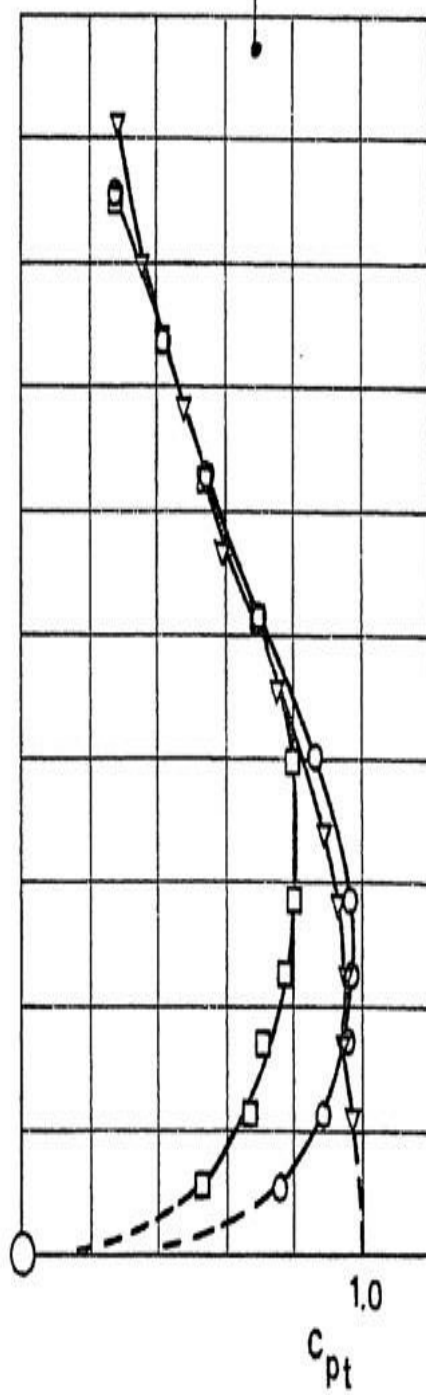
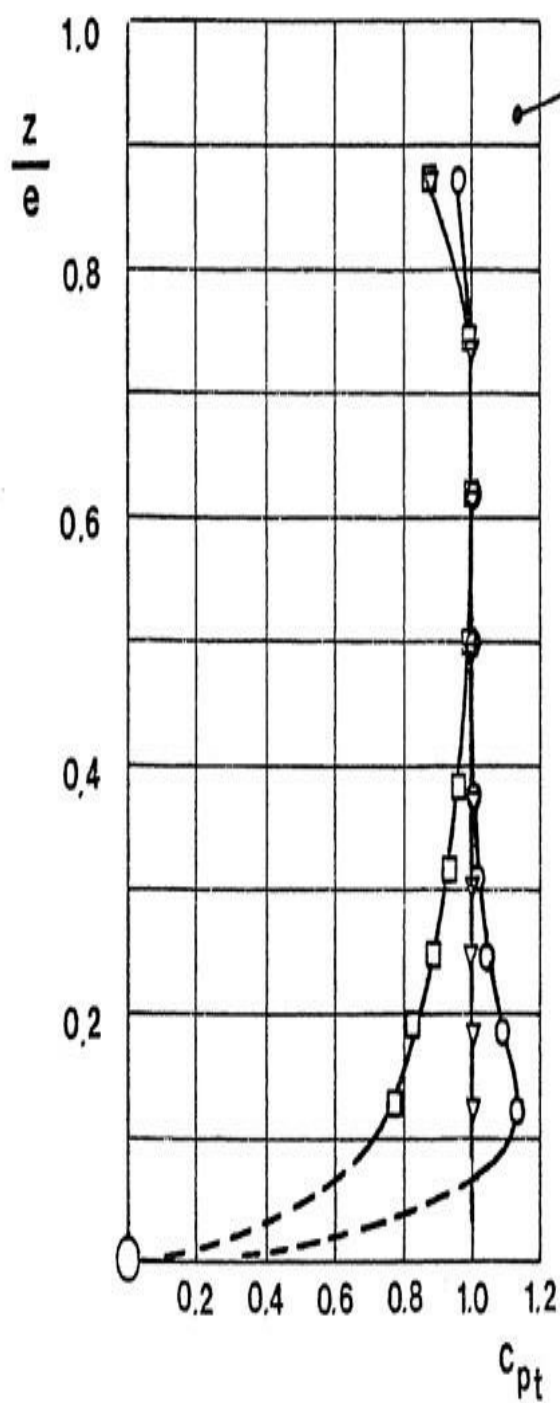
Η Εικόνα 1.45 παρουσιάζει την επίδραση εμφύσησης στην αντίσταση. Και η πυκνότητα του οριακού στρώματος  $\delta_1$  και η πυκνότητα απώλειας ορμής  $\delta_2$  μετρήθηκαν σε ένα κενό τμήμα δοκιμής. Παρόμοια με την αναρρόφηση, η αύξηση της αντίστασης με μειωμένες παραμέτρους οριακού στρώματος χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο σε αγωνιστικά αυτοκίνητα (μικρή απόσταση εδάφους)

*Εικ. 1.43 Εφαπτόμενη εμφύσηση στην DNW-LTF: α) σχλεδιο της υποδοχής εμφύσησης, β) προφίλ ταχύτητας για διάφορες ταχύτητες εμφύσησης, γ) αναλογία εμφύσησης της διαμέτρησης κοιλότητας  $u_1/U_\infty = f(U_\infty)$ , μετά τον A. BERNDTSSON.*





- Rigid floor
- ▽— Moving belt
- Blowing



Εικ. 1.44 Σύγκριση των προφίλ ταχύτητας μέσα σε ένα αυτοκίνητο: στατικό

έδαφος, εφαπτόμενη εμφύσηση, και κινούμενος ιμάντας, μετά τον A.

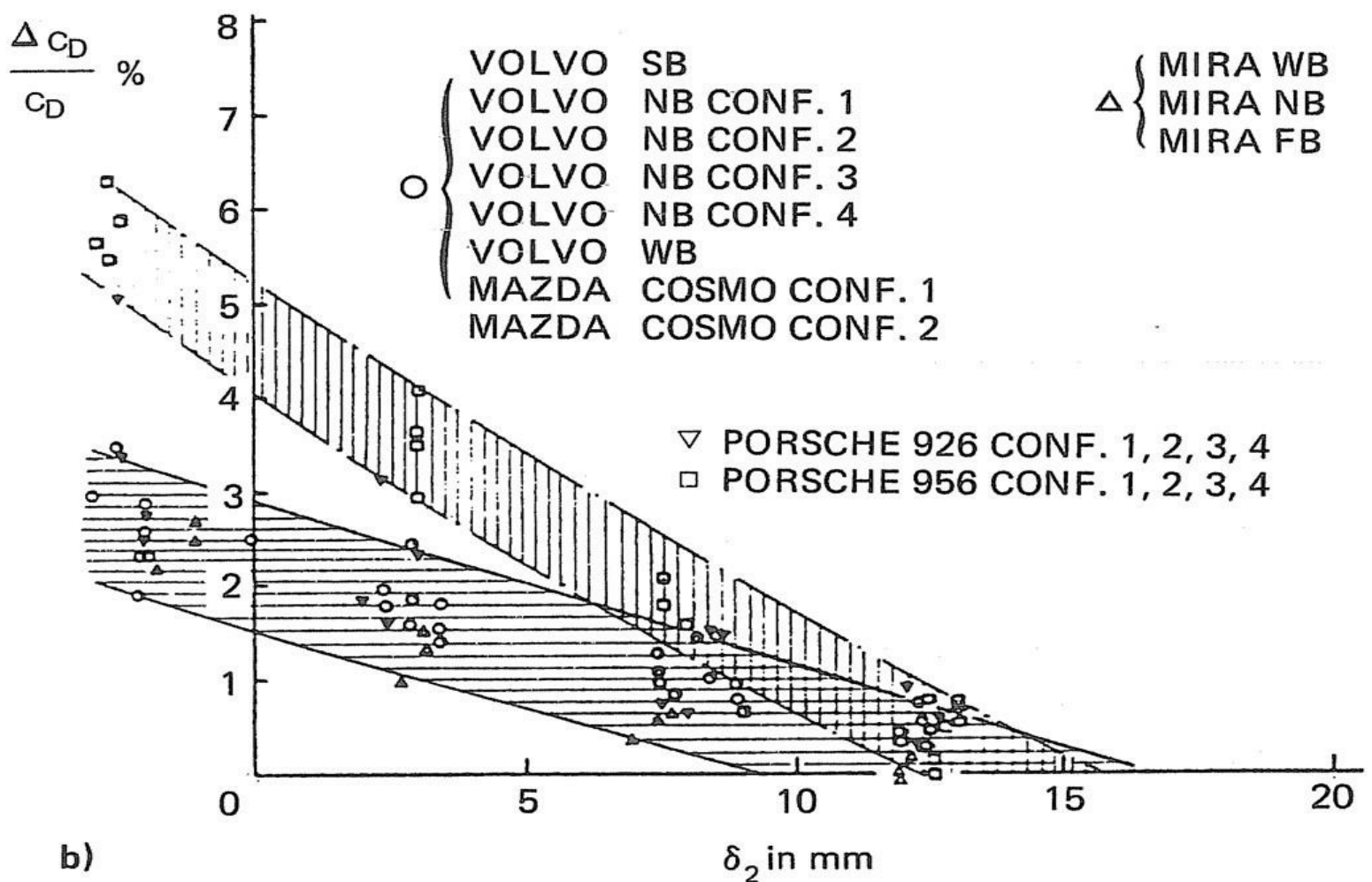
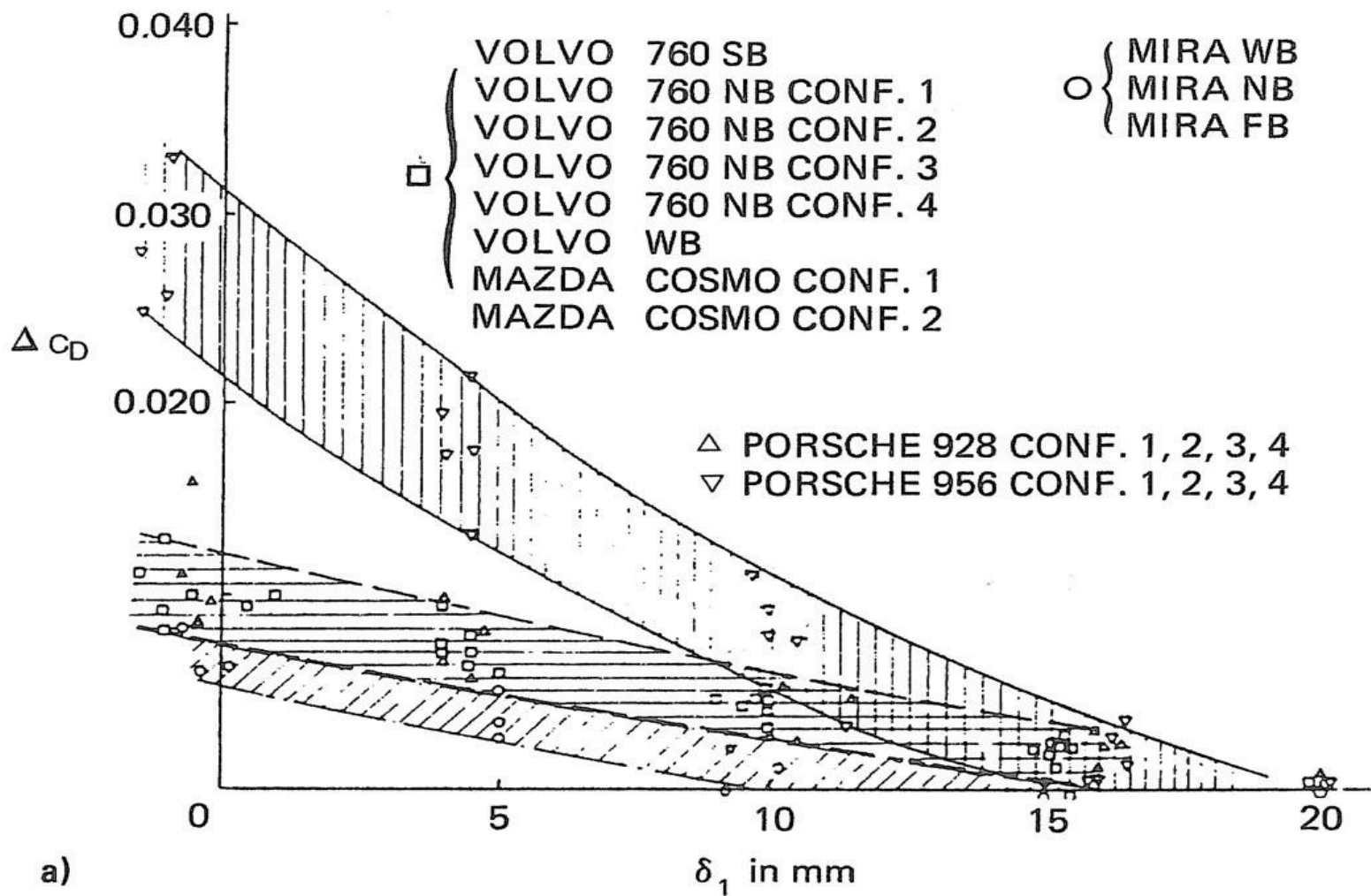
BERNDTSSON.

παρά σε επιβατικά αυτοκίνητα (μεγαλύτερη απόσταση εδάφους). Σε σύγκριση με ένα “φυσικό” οριακό στρώμα, η αύξηση αντίστασης είναι 4-5% για αγωνιστικά αυτοκίνητα και 2-3% για επιβατικά αυτοκίνητα όταν  $\delta_2 = 0$  στη θέση του μπροστινού άξονα (σε ένα κενό τμήμα δοκιμής).

Σύμφωνα με τον C. WILLIAMS, αντί για την εμφύσηση μέσω μιας σχισμής, η εμφύσηση μέσω μεμονωμένων ακροφυσίων παραταγμένα σε μια σειρά, είναι επίσης εφικτή. Ήδη απ’ το 1934, έγινε μια ενδιαφέρουσα πρόταση απ’ τον E.A. STALKER: διανεμημένη εμφύσηση [βλ. εικ. 1.26(i)] σε συνδυασμό με διανεμημένη αναρρόφηση. Πως γίνεται αυτό, παρουσιάζεται στην εικόνα 1.47. Αν και η ιδέα αυτή δεν ολοκληρώθηκε ποτέ, ο A. COGOTTI χρησιμοποιεί ένα στοιχείο απ’ το σύστημα του STALKER μπροστά από έναν κινούμενο ιμάντα στη σήραγγα της Pininfarina.

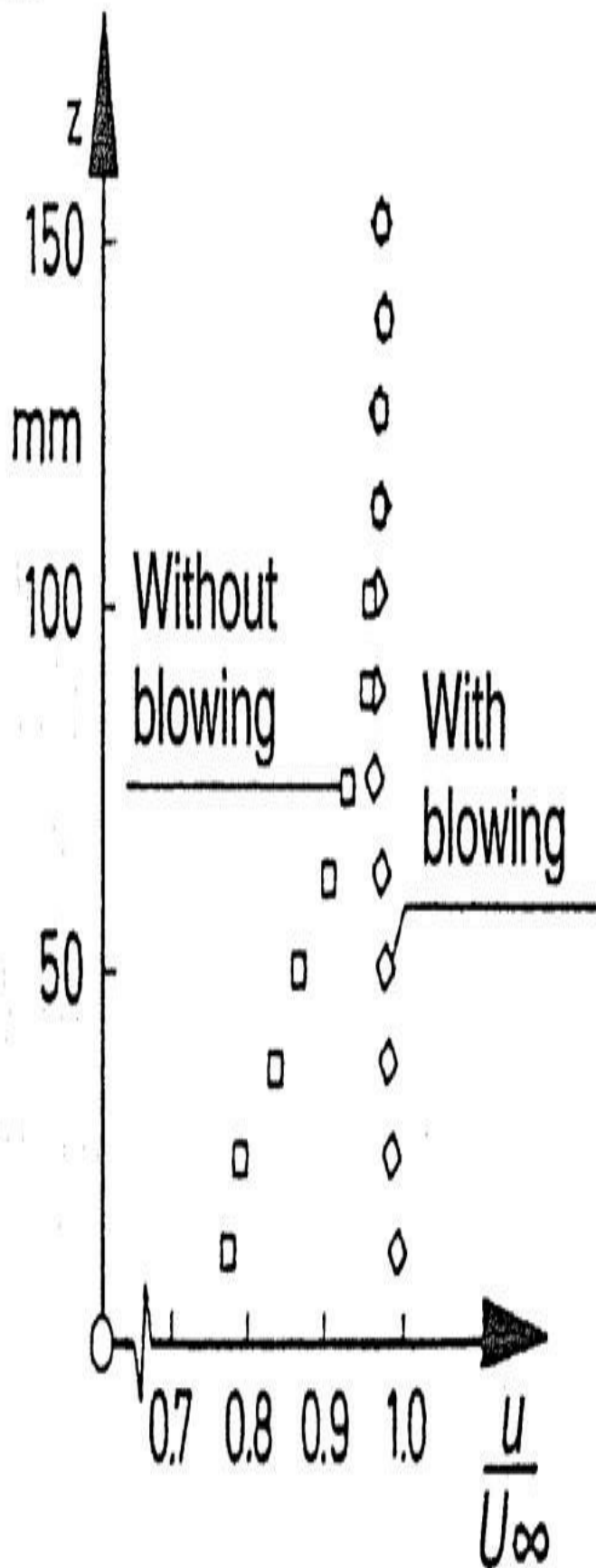
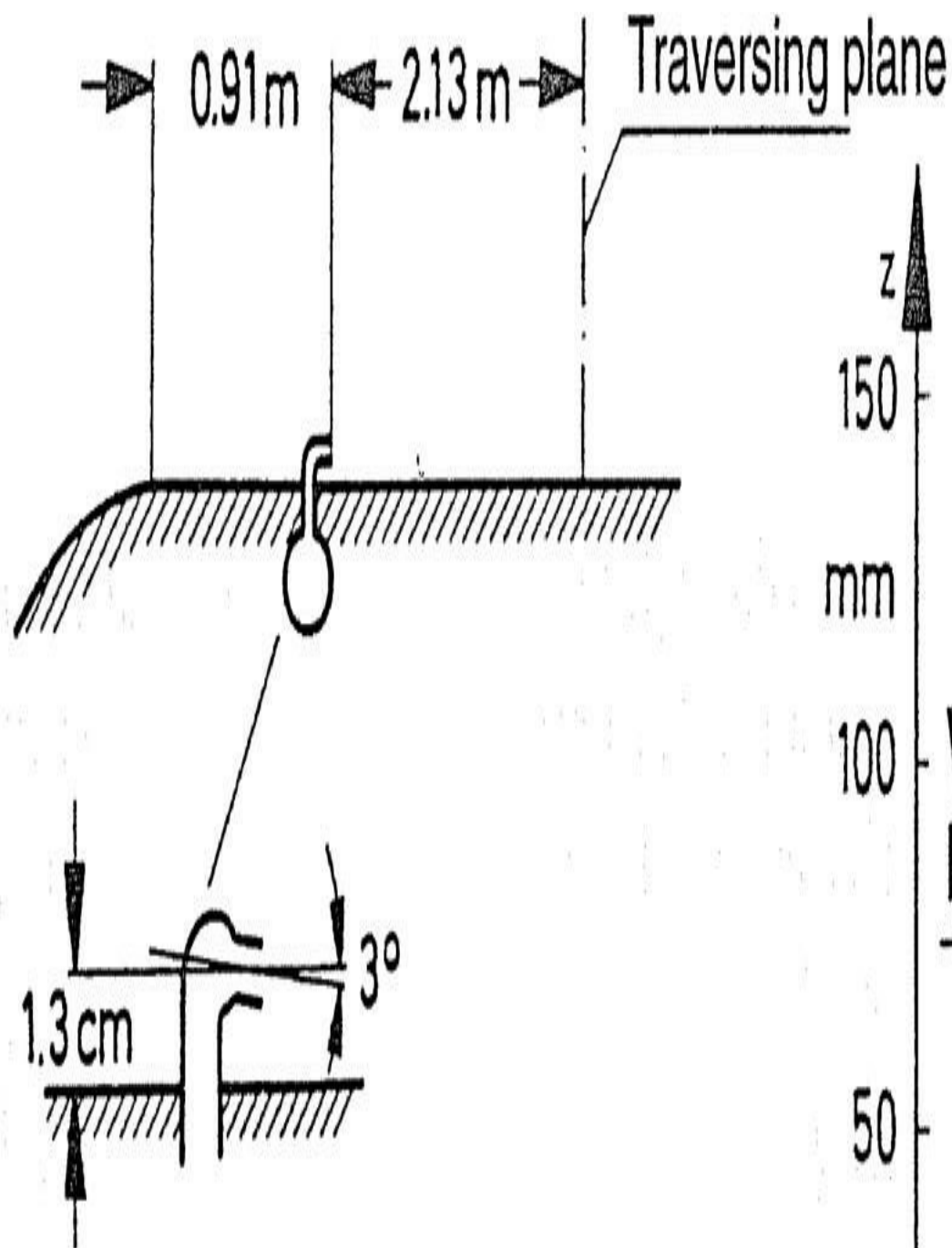
Τέλος, η εικόνα 1.26( j) παρουσιάζει μια απλή συσκευή μείωσης της πυκνότητας του οριακού στρώματος στο μισό (μια ποσότητα, που όπως συζητήθηκε προηγουμένως, έχει μικρή επιρροή στην αντίσταση των αυτοκινήτων). Ο R.W.GOULD χρησιμοποιεί ένα φράχτη οριακού στρώματος κατά τη διάρκεια έρευνας του επικοδομήματος των πλοίων. Το ύψος του σχήματος V του φράχτη ισούται με την πυκνότητα του ερχόμενου οριακού στρώματος. Αργότερα, η συσκευή αυτή εγκαταστάθηκε στην αυτοκινητιστική αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας MIRA απ’ τον G.W. CARR και τον T.P. HASSEL. Ανακάλυψαν ότι ο

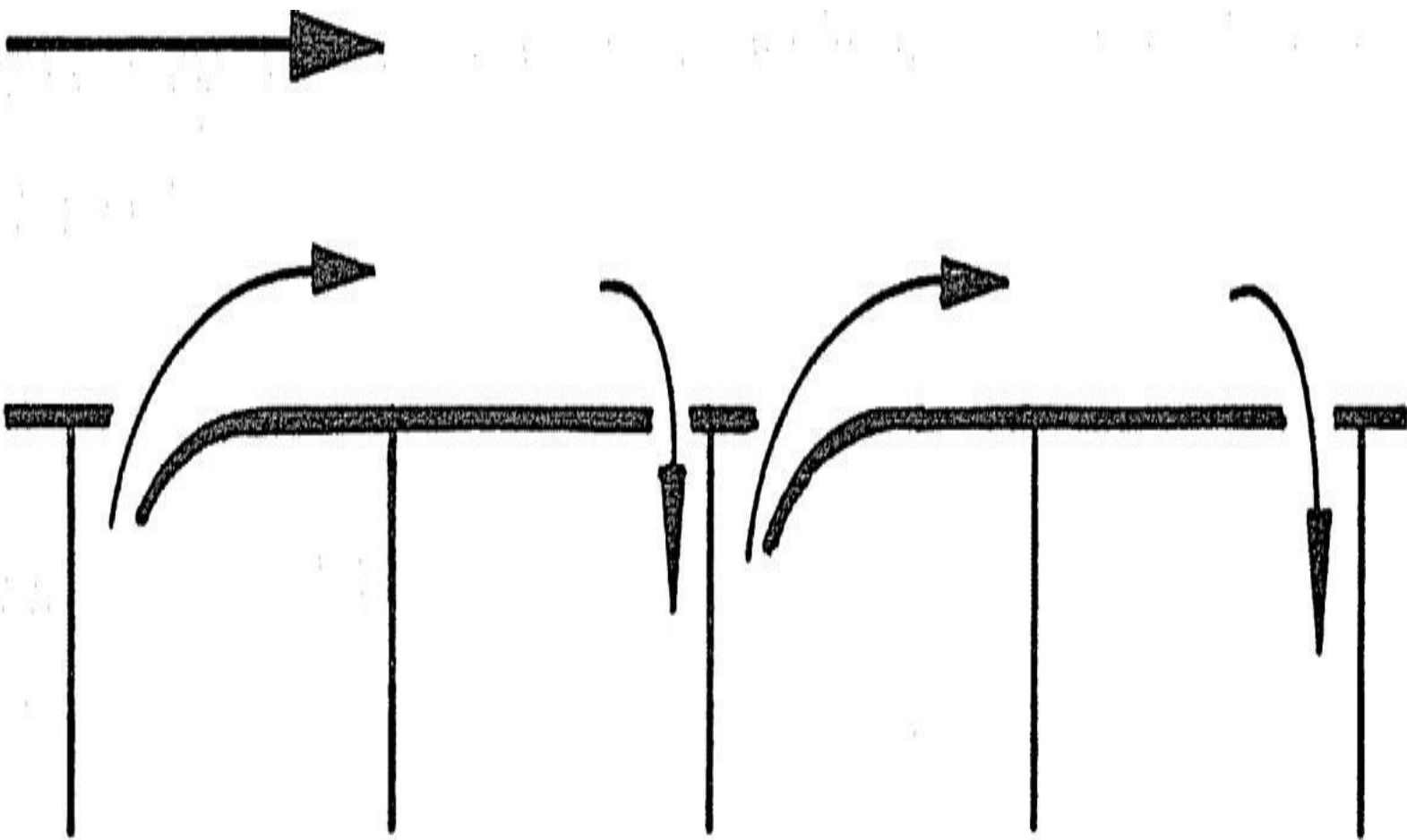






αέρας που ρέει πάνω απ' το λοξό φράχτη κυλάει με δυνατούς διαμηκείς  
στροβίλους οι οποίοι διακόπτουν τη ροή. Έτσι, η συσκευή αυτή δεν συνιστάται  
για αυτικινητιστικούς σκοπούς.





Εικ. 1.45 Επίδραση της επαπτόμενης εμφύσησης στο συντελεστή αντίστασης: α) επίδραση της μετατόπισης πυκνότητας  $\delta 1$ , β) επίδραση της απώλειας πυκνότητας ορμής  $\delta 2$ , μετά τον A.BERNDTSSON.

Είναι περίεργο το ότι επιδιώχθηκαν τόσες πολλές τεχνικές για την προσομοίωση του δρόμου παρά για την αναπαραγωγή του. Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι:

1. Η μεγάλη προσπάθεια που απαιτείται για έναν κινούμενο ιμάντα (και περιστροφής των τροχών).
2. Το γεγονός ότι κάθε τεχνική προσομοίωσης έχει (όπως είναι τυπικό στις προσομοιώσεις) διαφορές σε σύγκριση με την πραγματικότητα.

Εικ. 1.46 Μείωση της πυκνότητας του οριακού στρώματος με την εμφύσηση μέσω μιας σειράς μεμονωμένων ακροφυσίων, μετά τον C. WILLIAMS [13.66].

Εικ. 1.47 Μείωση της πυκνότητας του οριακού στρώματος είτε με αναρρόφηση είτε

με εμφύσηση, μετά τον *E.A. STALKER*.

Η ερώτηση που απομένει είναι, ποιός τύπος προσομοίωσης θα προτιμηθεί;

Συγκρίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όλων των παραλλαγών

που συζητήθηκαν παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψιν τις έρευνες που

παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής, η φωνή του συγγραφέα τείνει προς την επαπτόμενη εμφύσηση. Είναι πιο κοντά στον κινούμενο ιμάντα (άρα και στην πραγματικότητα), δεν εισάγει επιπρόσθετες ανεπιθύμητες επιδράσεις, είναι φθηνή και εύκολη στη χρήση κατά τη διάρκεια δοκιμών ρουτίνας.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η προσομοίωση είναι ανεπαρκής, και απαιτείται η αναπαραγωγή του δρόμου συμπεριλαμβανομένης της περιστροφής τροχών: αυτές είναι:

- Οχήματα με εξαιρετικά χαμηλή απόσταση εδάφους. Αυτό ισχύει για αγωνιστικά όπως και για πολλά σπορ αυτοκίνητα.
- Οχήματα με πολύ χαμηλό συντελεστή αντίστασης, ως πούμε  $cd < 0.25$ , και άνωση κοντά στο μηδέν. Αυτό αντιπροσωπεύει αυτοκίνητα όπου οι μετρήσεις της κάτω πλευράς συνεισφέρουν σημαντικά στη χαμηλή αντίσταση και άνωση. Ωστόσο, είναι επαρκής και ένας στενός ιμάντας, με την προϋπόθεση ότι αναπαράγεται η περιστροφή τροχών.
- Υπερβολικά μακρυνά οχήματα (μικρή απόσταση εδάφους σε σύγκριση με το μήκος). Δηλαδή, στην περίπτωση λεωφορείων, τα οποία φυσικά, μπορούν να δοκιμαστούν μόνο σε μικρή κλίμακα με κινούμενο ιμάντα.

### 1.3.3 Διορθώσεις αεροσήραγγας

#### 1.3.3.1 Σκοπός

Όταν ένα όχημα οδηγείται στο δρόμο κινείται σε έναν απεριόριστο χώρο προς όλες τις κατευθύνσεις (ελεύθερος αέρας). Ο δρόμος είναι η μόνη επιφάνεια περιορισμού. Οι διαστάσεις ενός τμήματος δοκιμής αεροσήραγγας όμως, είναι περιορισμένες. Το ίδιο και η διατομή του και το χρησιμοποιήσιμο μήκος της ροής αέρα. Το γωνιώδες σχήμα της ροής, η διανομή της ταχύτητας, η πίεση γύρω από

ένα όχημα και οι δυνάμεις διάτμησης στην επιφάνειά του, τροποποιούνται και επομένως οι δυνάμεις και οι ροπές είναι αυτές που επιδρούν σε ένα όχημα. Όσο μικρότερη είναι μια αεροσήραγγα σε σχέση με το όχημα, τόσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι διαφορές.

Αφού ο μόνος σκοπός μιας συγκεκριμένης έρευνας είναι να επεξεργαστεί την επίδραση των *τροποποιήσεων* του σχήματος στη ροή γύρω από ένα όχημα, και συγκεκριμένα την αντίστασή του, οι διαφορές αυτές μπορούν να γίνουν υποφερτές, εάν η αεροσήραγγα έχει ένα “λογικό” μέγεθος. Ωστόσο, οι “σχετικές” μετρήσεις δεν είναι πλέον αρκετές αν ένα όχημα θα πρέπει να δοκιμαστεί σε διαφορετικές αεροσήραγγες. Συγκεκριμένα, μικρές μεμονωμένες επιδράσεις πρέπει να καλυφθούν από οριακές επιδράσεις, αν όχι το αντίθετο. Τα *σχετικά* αποτελέσματα είναι ασαφή όταν χρειάζονται *απόλυτοι* αριθμοί για την εφαρμογή τους στη δυναμική ενός οχήματος ή για σύγκριση ανάμεσα σε ανταγωνιζόμενους κατασκευαστές.

Με τη βοήθεια των διορθώσεων (κάποιοι προτιμούν τον όρο “προσαρμογή”) γίνονται παραχωρήσεις γι’ αυτές τις περεκκλίσεις. Αυτές οι μέθοδοι προέρχονται απ’ την αεροναυπηγική. Με το πέρασμα του χρόνου, ωστόσο, γεννήθηκαν αμφιβολίες σχετικά με το πότε οι διορθώσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτοκίνητα των οποίων τα πεδία ροής είναι τόσο διαφορετικά από εκείνα των αεροτομών και των σκελετών αεροπλάνου.

Υπό την εποπτεία της SAE, επεξεργάστηκαν διαδικασίες διόρθωσης που να ταιριάζουν σε αυτοκινητοβιομηχανίες. Δημιουργήθηκαν δύο επιτροπές, η μία αφιερωμένη στο κλειστό τμήμα δοκιμής και η άλλη στο ανοιχτό. Ο σκοπός τους ήταν (και είναι) ένα ψήφισμα για *συμμετρική ροή*, δηλ, για ένα μη εκτρεπόμενο όχημα: οι διορθώσεις εκτροπής, ωστόσο, προέρχονται απ’ την αεροναυπηγική, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Για το κλειστό τμήμα δοκιμής, η εργασία εξελίχθηκε σε σημείο όπου τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο SAE SP-1176 . Εξαιτίας των περίπλοκων ορίων του, η εργασία στο ανοιχτό τμήμα δοκιμής κατέληξε να είναι πιο δύσκολη αλλά και αυτή βρίσκεται στα τελειώματα. Για το ανοιχτό τμήμα δοκιμής, ο E. MERCKER και ο J. WIEDEMANN διαχώρησαν τις κύριες διαταράξεις εξαιτίας των διαφόρων ορίων και υπολόγισαν επίσης τις επιδράσεις τους χρησιμοποιώντας στοιχειώδη μοντέλα ροής.

Η ανάπτυξη των διορθώσεων μιας αεροσήραγγας παρουσιάζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο, αναγνωρίζονται και αναλύονται οι διαταράξεις του πεδίου ροής. Ακολουθώντας το “κλασικό” μονοπάτι, οι μεμονωμένες διαταράξεις εξετάζονται ξεχωριστά και εικάζεται ότι δεν αλληλοεπιδρούν (μια γραμμική προσέγγιση). Στο δεύτερο στάδιο, η κάθε επίδραση ορίου διαμορφώνεται και υπολογίζεται.

Η βασική προϋπόθεση όλων των διορθώσεων αεροσήραγγας είναι ότι η *μορφή*

της ροής δεν αλλάζει. Αυτό σημαίνει ότι τα μονοπάτια των αεροδυναμικών, το σχήμα της διανομής πίεσης, οι θέσεις και τα είδη διαχωρισμού είναι όλα ίδια όπως στο ελεύθερο αέρα. Με άλλα λόγια, το σχήμα του πεδίου ροής θεωρείται ότι “δεν ποικίλλει υπό περιορισμούς”. Μοντέρνες μέθοδοι CFD επιτρέπουν αυτήν την προϋπόθεση να χαλαρώσει. Θα γίνουν κάποιες σύντομες παρατηρήσεις στην παράγραφο σχετικά με το κλειστό τμήμα δοκιμής.

Διαταραχές σε διάφορα οριακά στρώματα καταλήγουν σε δύο επιδράσεις:

1. Η ταχύτητα της (ανενόχλητης) ερχόμενης ροής αλλάζει.
2. Μια αξονική κλίση πίεσης υπερεκτείνεται στο πεδίο ροής.

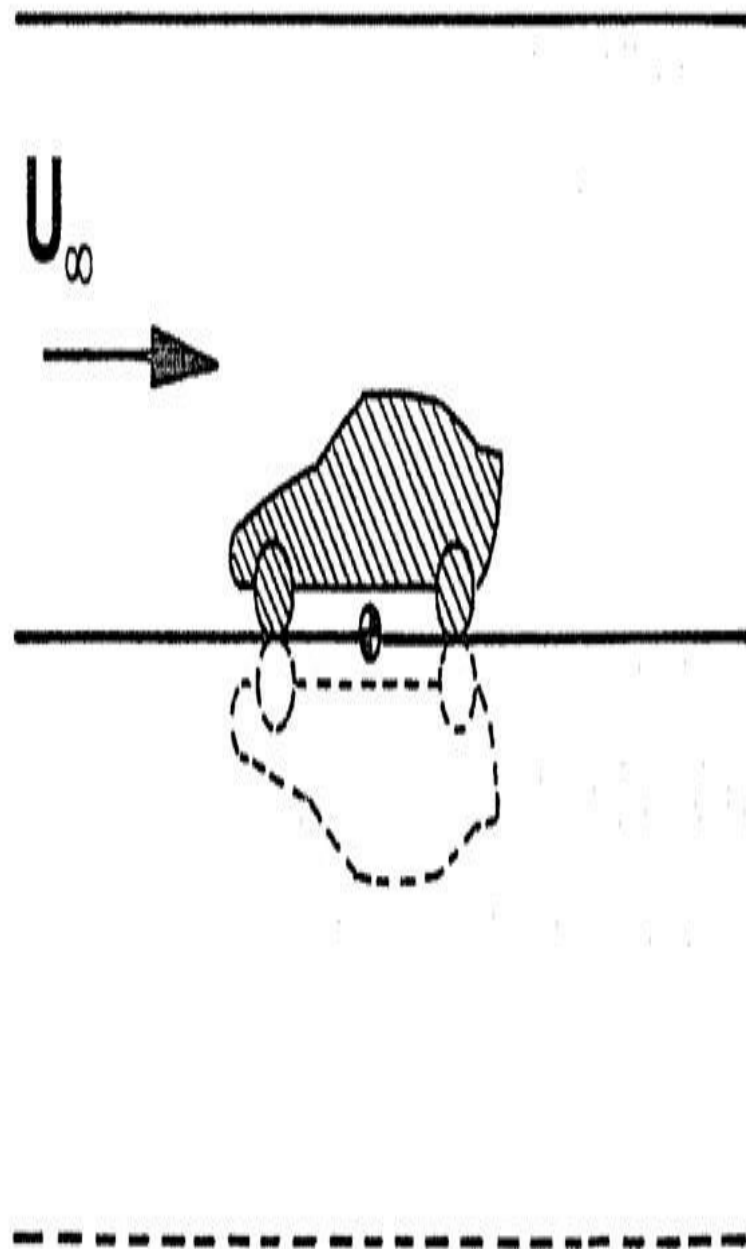
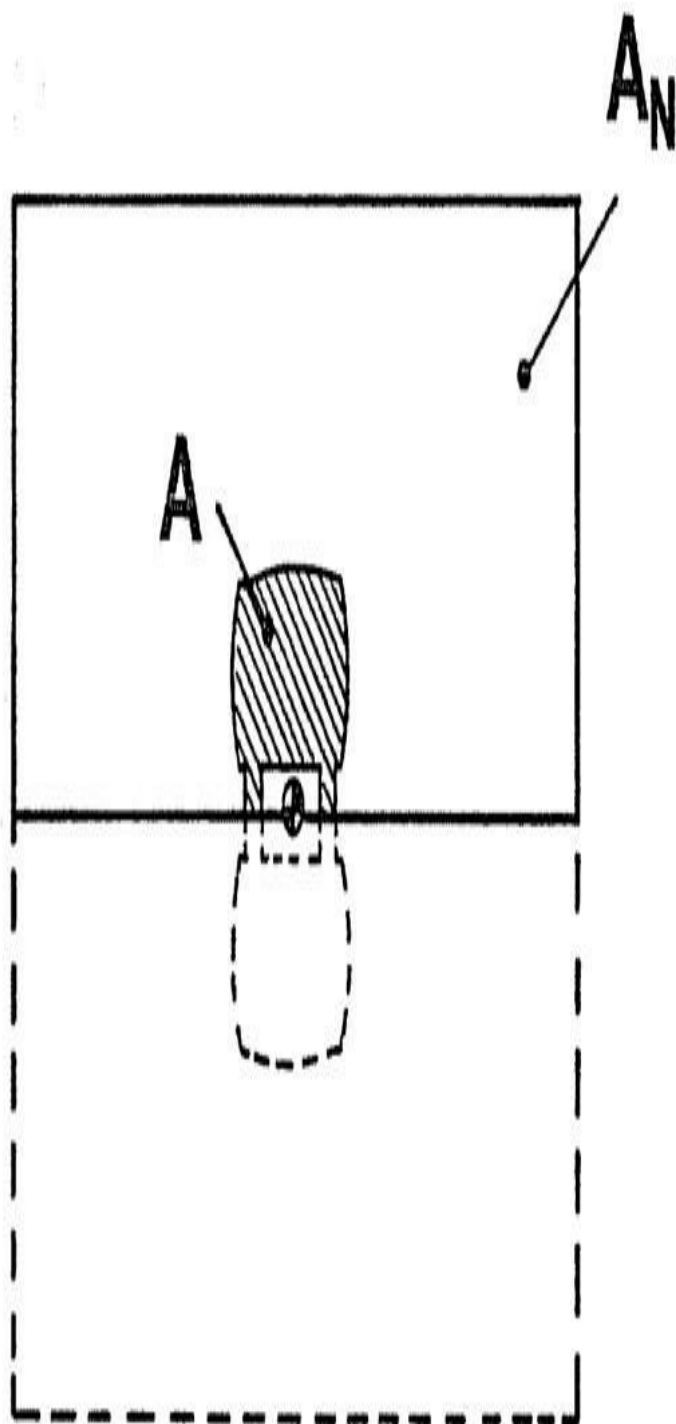
Οι επιδράσεις αυτών των μεμονωμένων διαταραχών υπερεκτείνονται επιπρόσθετα. Η γραμμική προσέγγιση, ωστόσο, είναι κατανοητή μόνο αν κάθε διαταραχή είναι μικρή όπως και η ολική διόρθωση. Αυτό φυσικά, θα συμβεί μόνο όταν μια αεροσήραγγα είναι “λογικού μεγέθους” σε σύγκριση με το αντικείμενο δοκιμής.



Όπως είναι τυπικό για τις γραμμικές προσεγγίσεις, δεν είναι δυνατό να παραθέσει κανείς τα ακριβή όρια εγκυρότητας γι' αυτές τις “κλασικές διορθώσεις” ή να οριοθετήσει τί είναι “λογικό” σχετικά με το μέγεθος του μοντέλου και της αεροσήραγγας. Για το δεύτερο, καθιερώθηκε ένα μέτρο, στο μέρος 1.2.3: είναι η αναλογία μιας μπροστινής περιοχής  $A$  του μοντέλου προς τη διατομή  $A_N$  του πίδακα της αεροσήραγγας, η λεγόμενη (γεωμετρική) αναλογία στένωσης  $\varphi = A/A_N$ . Για πολύ καιρό το  $\varphi = 0.05$ , η τυπική τιμή στην αεροναυπηγική, χρησιμοποιούνταν στην αεροδυναμική οχημάτων. Σήμερα, πολλές αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες χρησιμοποιούν το  $\varphi = 0.20$ . Αυτές οι συγκριτικά μικρές σήραγγες έχουν ως κοινό σημείο το ανοιχτό τμήμα δοκιμής. Σύμφωνα με τους E. MERCKER και J. WIEDEMANN, τα ανοιχτά τμήματα δοκιμής καθορίζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι μεμονωμένες επιδράσεις διαταραχών (σχεδόν) αποζημιώνονται η μια για την άλλη. Αυτό βέβαια, ισχύει μόνο μέσα στα όρια μιας γραμμικής προσέγγισης για διορθώσεις. Η πρώτη αεροσήραγγα που σχεδιάστηκε σύμφωνα με αυτό, είναι η αεροακουστική αεροσήραγγα Audi που περιγράφεται στο μέρος 1.5.2.

Στην εικόνα 1.9 αναγνωρίστηκε ότι η επίδραση ενός ορίου του τμήματος δοκιμής στην μορφή ροής γύρω από ένα όχημα είναι αντίθετη για ανοιχτά και κλειστά τμήματα δοκιμής. Στο πρώτο, οι αεροδυνάμεις γύρω από ένα αυτοκίνητο διευρύνονται περισσότερο απ'ότι στον ελεύθερο αέρα, ενώ στο δεύτερο είναι πιο συμπιεσμένες. Αν η παραμόρφωση των αεροδυνάμεων εξαιτίας των ορίων του πίδακα ήταν η μόνη επίδραση, οι διορθώσεις και για τα δύο είδη τμήματος δοκιμής θα γίνονταν ταυτόχρονα. Ωστόσο, υπάρχει και ένας αριθμός “άλλων” διαταραχών για κάθε τύπο ξεχωριστά.

Η ολική διαμόρφωση ενός αυτοκινήτου σε μια αεροσήραγγα είναι ασύμμετρη σε σχέση με το δάπεδο της σήραγγας. Το δάπεδο αυτό (επίπεδο γείωσης) προσομοιώνει το δρόμο και επομένως πρέπει να ερμηνευτεί ως τμήμα της ρύθμισης δοκιμής και όχι της σήραγγας. Όταν ένα μοντέλο και το επίπεδο γείωσης αντικατοπτρίζονται σχετικά με το επίπεδο γείωσης, όπως φαίνεται στην εικ. 1.48, η επακόλουθη διαμόρφωση μπορεί να θεωρηθεί ως θάλαμος δοκιμών μιας διπλής διατομής με ένα κεντρικά τοποθετημένο αντικείμενο δοκιμής, το οποίο έχει δημιουργηθεί απ' το μοντέλο και την εικόνα του στον καθρέφτη, συμπεριλαμβανομένου του δρόμου. Το πλεονέκτημα του λεγόμενου «διπλού τμήματος δοκιμής με διπλό αντικείμενο δοκιμής» είναι μια ευκολότερη διαμόρφωση των αριθμητικών μοντέλων μέσω των οποίων καταμετρούνται οι επιδράσεις διαταραχής.



Εικ. 1.48 Διπλό τμήμα δοκιμής.

### 1.3.3.2 Κλειστό Τμήμα Δοκιμής

Τρεις τύποι διατάραξης ορίου μπορούν να διακριθούν:

1. Στερεή στένωση.
2. Ρευστή στένωση.
3. Οριζόντια πλευστότητα.

Κατά βάση, καθεμία από αυτές τις διαταράξεις έχει δύο επιδράσεις: η αποτελεσματική ταχύτητα στο τμήμα δοκιμής αλλάζει (στένωση), και αναπαράγονται κλίσεις αξονικής πίεσης (οριζόντια πλευστότητα). Οι διαταράξεις περιγράφονται ως εξής.

**Στερεή στένωση:** Με μια περιορισμένη αναλογία στένωσης τα στερεά τοιχώματα της σήραγγας αναγκάζουν τις αεροδυνάμεις γύρω από ένα σώμα δοκιμής να απομακρυνθούν όσο θα απομακρύνονταν και στον ελεύθερο αέρα [βλ. εικ. 1.9(α)]. Επομένως, οι τοπικές ταχύτητες του πεδίου ροής κοντά σε ένα σώμα είναι μεγαλύτερες (σχετικά με την ταχύτητα του ερχόμενου αέρα) απ' ότι θα ήταν στον ελεύθερο αέρα, καταλήγοντας σε μια υψηλότερη δύναμη αντίστασης. Στην εικόνα 1.49(α) παρουσιάζεται παραστατικά η παραλλαγή υπέρβασης της ταχύτητας  $u_s$  κατά μήκος του άξονα της διπλής σήραγγας, με τις παρεμβολές πίεσης  $cp_{SB}$  στην οροφή της σήραγγας, και οι δύο σε μη διαστατική μορφή. Η αλλαγή ταχύτητας δεν είναι στατική κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, δηλαδή, είναι  $u_{SB}(x)$ . Η διόρθωση της ταχύτητας αέρα θα αναφέρεται στην τιμή στο κέντρο του μοντέλου. Η παρεμβολή πίεσης ποικίλλει επίσης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, δηλαδή, είναι  $cp_{SB}(x)$ , αλλά είναι συμμετρική σε σχέση με τη μεγαλύτερη διατομή του μοντέλου. Επομένως, δεν καταλήγει σε μια (αξονική) παρεμβολή ισχύος.

**Ρευστή στένωση:** Τα απόνερα ενός σώματος δοκιμής προκαλούν ένα έλλειμα ταχύτητας στον πυρήνα της ροής αέρα πίσω απ' το σώμα. Αυτό το έλλειμα ταχύτητας αντιπροσωπεύει τη μείωση της διατομής που απομένει ανοιχτή για τη ροή, συμπεριλαμβάνοντας μια παρεμβολή ταχύτητας,  $u_{WB}(x)$ . Αυτό διορθώνεται

μόνο αν ληφθεί υπόψιν η τιμή του στο κέντρο του μοντέλου. Η  $u_{WB}(x)$  αναπαριστάται στην εικ. 1.49(β), μαζί με την αντίστοιχη αλλαγή στην πίεση  $cp_{WB}$  (πάλι στην οροφή), η οποία δεν είναι συμμετρική. Η ολική κλίση πίεσης  $\Delta cp_{WB} / \Delta x$  προκαλεί μια οριζόντια ισχύ που ονομάζεται *ρευστή πλευστότητα*, και ο σχετικός συντελεστής είναι  $\Delta c_{DWB}$ .

Η στερεή και ρευστή στένωση υπερεκτείνονται στην Εικόνα 1.49(γ).

*Οριζόντια πλευστότητα:* Η πυκνότητα του οριακού στρώματος στα στερεά

τοιχώματα αναπτύσσεται στο τμήμα δοκιμής από μέσα προς τα έξω,

προκαλώντας την αύξηση ταχύτητας του μη παχύρευστου πυρήνα κατά μήκος

του άξονα του τμήματος δοκιμής, και επομένως τη μείωση της στατικής πίεσης.

Η μείωση στην πίεση  $\Delta cp_{HB} / \Delta x$  αναπαράγει μια δύναμη πίεσης  $\Delta c_{DHB}$  σε μορφή

αντίστασης πάνω στο σώμα δοκιμής η οποία δεν υπάρχει στον ελεύθερο αέρα. Σε

πολλές αεροσήραγγες (αλλά όχι σε όλες) η δύναμη οριζόντιας πλευστότητας είναι

μικρή γιατί η κλίση πίεσης αποζημιώνεται σε ένα κενό τμήμα δοκιμής μέσω μιας

μικρής αύξησης της διατομής του τμήματος δοκιμής κατά μήκος του άξονά του.

Η μετατόπιση επίδρασης του οριακού στρώματος στα τοιχώματα της σήραγγας

αναπαράγει μια αύξηση στην ταχύτητα για το μη παχύρευστο πυρήνα του

τμήματος δοκιμών. Αυτό, ωστόσο, δεν πρέπει να διορθωθεί γιατί λαμβάνεται

υπόψιν όταν υπολογίζεται η διάμετρος της σήραγγας.

Ο βασικός μηχανισμός της αυξανόμενης αντίστασης εξαιτίας της ρευστής και

οριζόντιας πλευστότητας είναι ο ίδιος. Η ανομοιομορφία της ταχύτητας μέσω της

ροής αέρα της σήραγγας μειώνει την ενεργή περιοχή ροής του αγωγού. Και στις

δύο περιπτώσεις η μείωση της ενεργής περιοχής είναι μεγαλύτερη στην καθοδική

πορεία ενός σώματος δοκιμής παρά στην ανοδική. Έτσι, η πίεση της καθοδικής

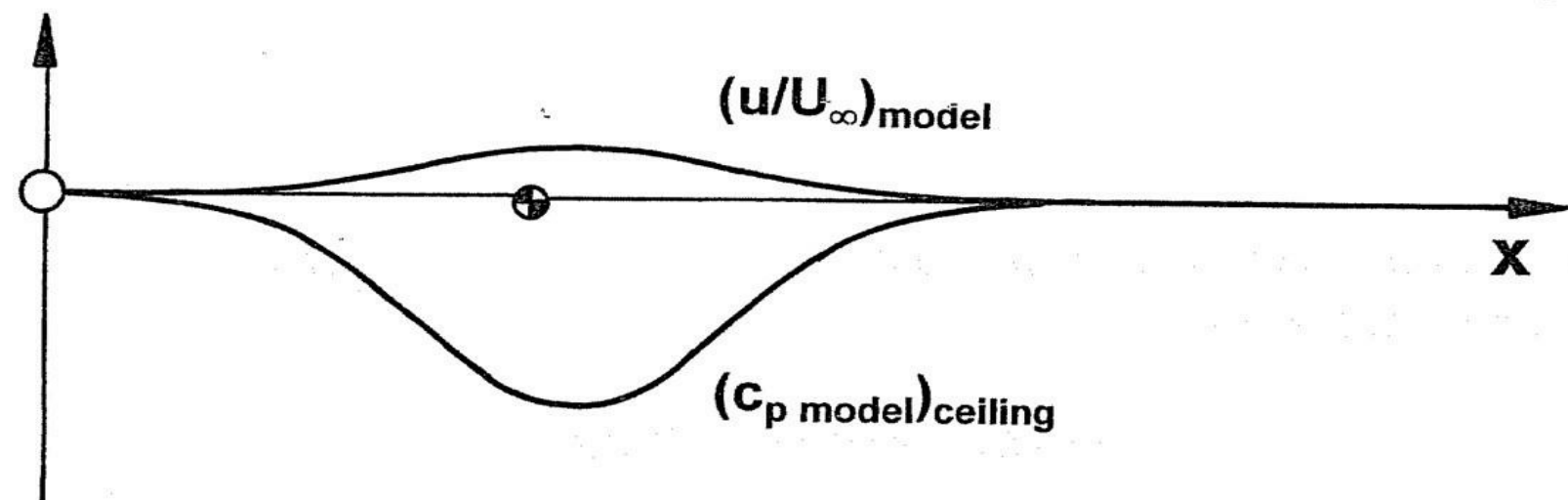
πορείας είναι μικρότερη απ' την τιμή της ανοδικής και αναπαράγει μια εξωτερική δύναμη πίεσης πάνω στο σώμα, σε μορφή αντίστασης, η οποία δεν υπάρχει στον ελεύθερο αέρα.

Συνοψίζοντας, υπάρχουν δύο είδη διόρθωσης: μια διόρθωση για επιπρόσθετη ταχύτητα ροής στο μοντέλο, και άλλη μια για κλίση πίεσης στο αντικείμενο δοκιμής.



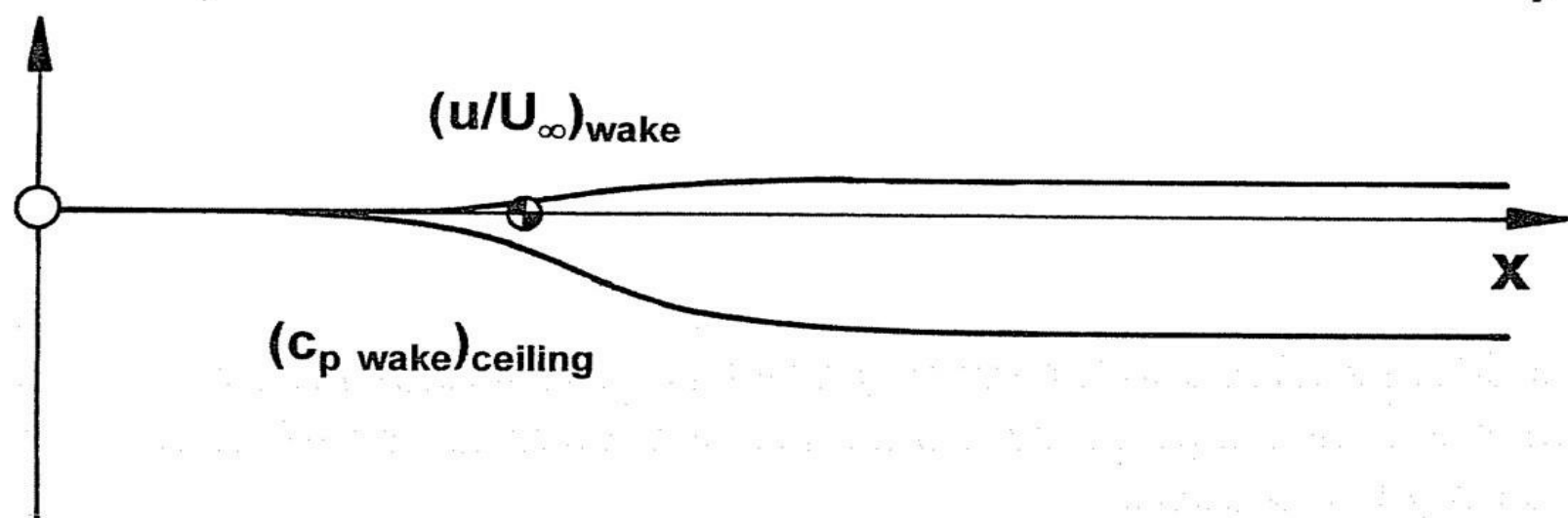
### Solid blockage

a)



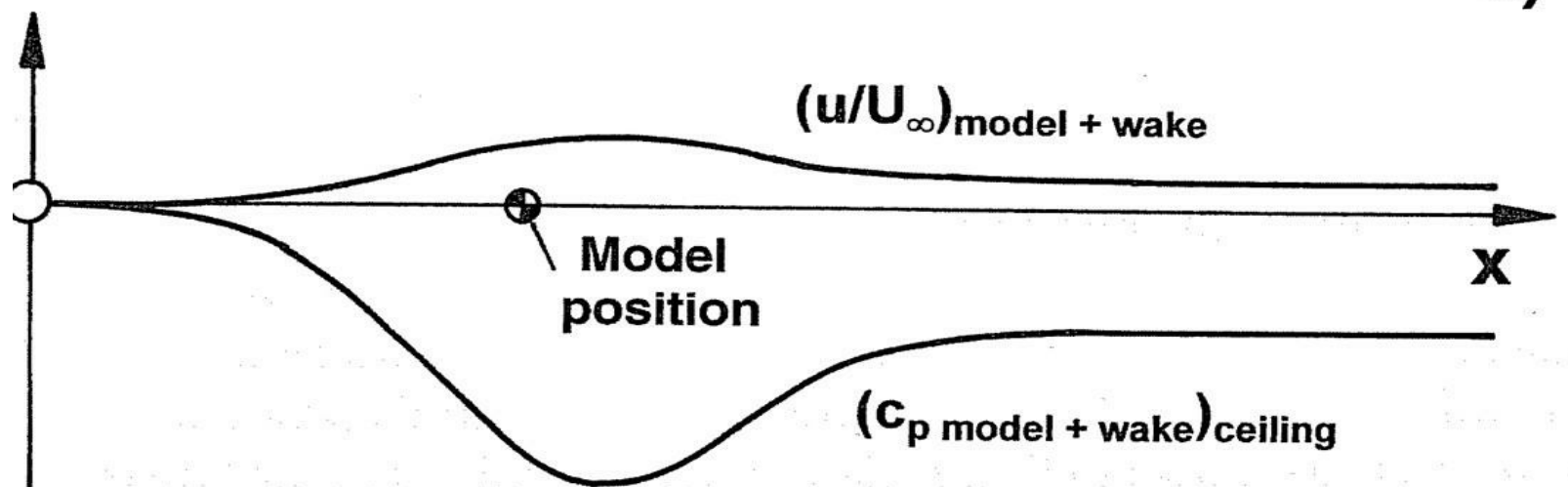
### Wake blockage

b)



### Solid + wake blockage

c)





Εικ. 1.49 Επιδράσεις ορίων, κλειστό τμήμα δοκιμής.

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

Ακολουθώντας αυτήν τη λογική, η αυξημένη τοπική ταχύτητα ροής  $u$  του άξονα οφείλεται σε μια ερχόμενη ταχύτητα  $U_{corr}$ . Η ταχύτητα αυτή είναι υψηλότερη από μια ποσότητα  $u$  της ταχύτητα αέρα  $U_m$ , η οποία υπολογίστηκε απ' τη διαφορά πίεσης  $\Delta p$  σύμφωνα με την Εξίσωση (1.3):

$$U_{corr} = U_m + u = U_m + \varepsilon U_m = U_m (1 + \varepsilon) \quad (1.14)$$

Αντίστοιχα, η διορθωμένη δυναμική πίεση είναι:

$$q_{corr} = q_m (1 + \varepsilon)^2 \quad (1.15)$$

όπου  $\varepsilon$  ονομάζεται ο συντελεστής στένωσης, ο οποίος δημιουργήθηκε από στερεή στένωση  $\varepsilon_{SB}$  και ρευστή στένωση  $\varepsilon_{WB}$ , δηλαδή,

$$\varepsilon = \varepsilon_{SB} + \varepsilon_{WB} \quad (1.16)$$

Μια κλίση πίεσης κατά μήκος του τμήματος δοκιμής προκαλεί μια αύξηση αντίστασης  $\Delta c_{DB}$ , η οποία δημιουργήθηκε από ρευστή πλευστότητα  $\Delta c_{DWB}$ , και οριζόντια πλευστότητα  $\Delta c_{DHB}$ , δηλαδή,

$$\Delta c_{DB} = \Delta c_{DWB} + \Delta c_{DHB} \quad (1.17)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1.5), (1.6) και (1.7), ο συντελεστής της διορθωμένης αντίστασης  $c_{Dcorr}$  είναι ως εξής, όπου  $c_{Dm}$  είναι ο μετρημένος συντελεστής αντίστασης.

$$(1.18)$$

Η εξίσωση (1.18) είναι αυστηρά επίσημη: η διαδικασία διόρθωσης του υπολογισμένου συντελεστή αντίστασης  $c_{Dm}$  αποτελεί στην πραγματικότητα τη διαδικασία συσχέτισης των μεμονωμένων επιδράσεων  $\epsilon$  στις κύριες γεωμετρικές παραμέτρους του μοντέλου και του τμήματος δοκιμής (η αναλογία στένωσης  $\phi$  και το σχήμα του μοντέλου και του τμήματος δοκιμής), και στις κλίσεις πίεσης στο ρευστό και κενό τμήμα δοκιμής.

Για τον υπολογισμό της αύξησης ταχύτητας (παράνομαστής της εξίσωσης 1.8), πρέπει να δημιουργηθεί ένα μοντέλο (αναλυτικό ή αριθμητικό) της φυσικής διαμόρφωσης «αντικείμενο δοκιμής συν τμήμα δοκιμής». Το μοντέλο για το πρώτο, το αντικείμενο δοκιμής, μπορεί να είναι πολύ απλό γιατί μόνο οι επιδράσεις μακρινού πεδίου είναι ενδιαφέρουσες. Το διάνυσμα ταχύτητας εξαρτάται μόνο από τις ολικές διαστάσεις του αντικειμένου δοκιμής, όπως για παράδειγμα η άμβλυνσή του  $d/1$  (όπου  $d$  είναι η «ενεργή» διάμετρος και 1 το μήκος του), αλλά δεν εξαρτάται από τις ιδιορρυθμίες του σχήματος του. Το

μοντέλο για το δεύτερο, τα τοιχώματα του τμήματος δοκιμής, αναπαράγεται απ' την αντανάκλαση του μοντέλου του τμήματος δοκιμής, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.50(α). Αν, όπως σ' αυτό το πράδειγμα, το αντικείμενο δοκιμής αντικατασταθεί από ένα ωειδές σώμα Rankine, η αναπαραγωγή μιας επιπρόσθετης ταχύτητας  $u$  στον άξονα του μοντέλου μπορεί να συλληφθεί εύκολα. Η πρώτη εικόνα του καθρέφτη παράγει μια ταχύτητα  $u_1$  στον άξονα του ωειδούς σώματος, και αυτό μια πολύ μικρότερη ταχύτητα  $u_2$  στην ίδια κατεύθυνση, και ούτω καθ' εξής. Επίσης, μπορεί να αναγνωριστεί ότι η ταχύτητα  $u$  δεν είναι στατική κατά μήκος του άξονα του μοντέλου. Ωστόσο, αυτό θα αγνοηθεί σε περαιτέρω μελέτες.

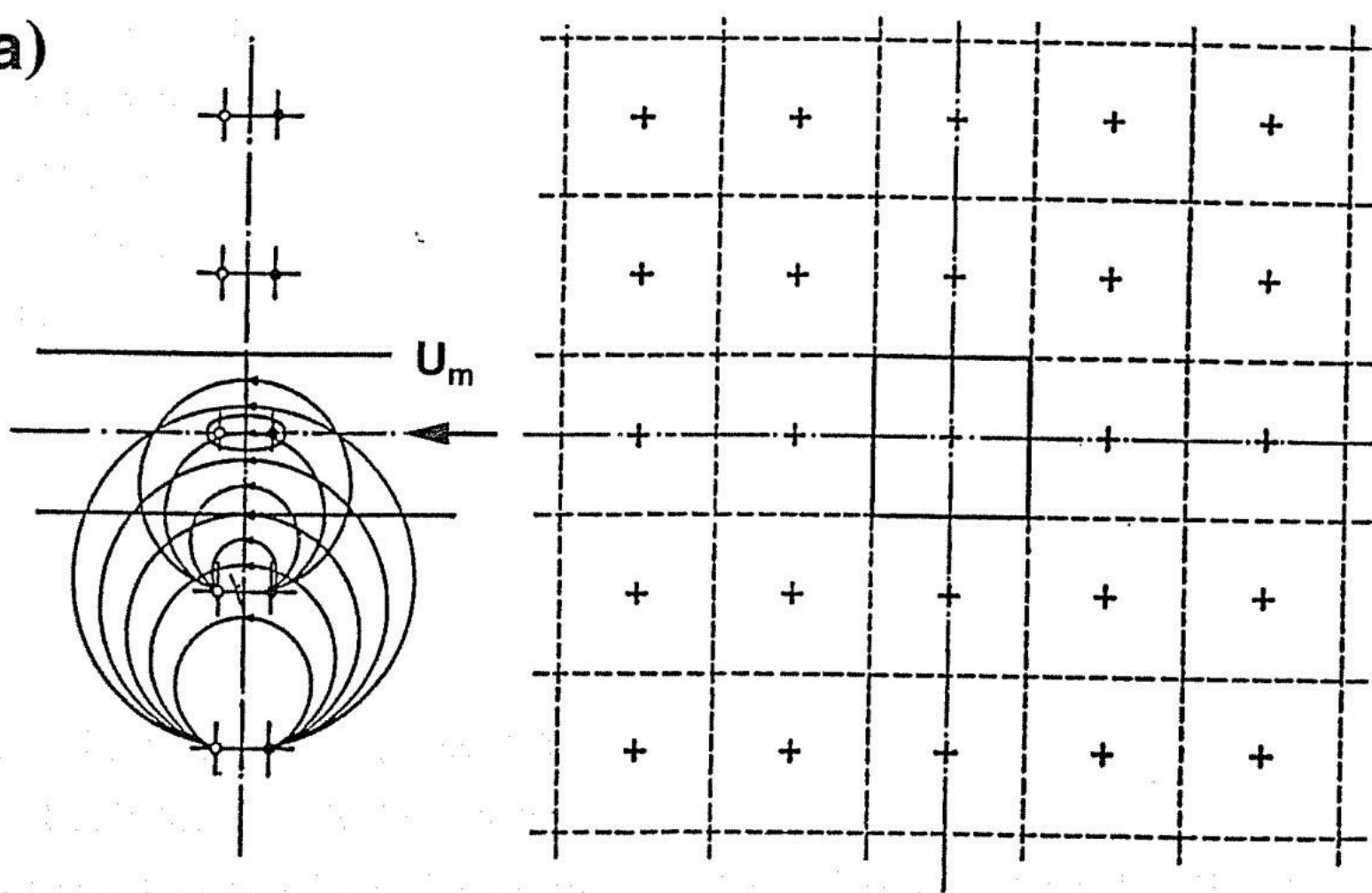
Η διαδικασία που απομένει είναι να διεξαχθούν οι κατάλληλες διαστάσεις (μέγεθος και σχήμα) για το μοντέλο που αντικαθιστά το αντικείμενο δοκιμής. Απ' τη στιγμή που θα γίνει αυτό γνωστό, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ταχύτητα  $u$  που παράγεται στον άξονα του αντικειμένου δοκιμής απ' όλες τις εικόνες του καθρέφτη. Μέσα από πολλές διαδικασίες που προτάθηκαν, τρεις αποδείχτηκαν να είναι οι πιο κατάλληλες: η μέθοδος του E. MERCKER, η μέθοδος αναλογίας-ταχύτητας του R. W. HENSEL, και η μέθοδος υπογραφής-πίεσης των J.E. HACKETT και D. J. WILDSEN. Επίσης, συνοψίζονται μόνο οι τυπικές ιδιορρυθμίες κάθε μεθόδου. Και οι τρεις μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε συνθήκες εκτροπής.

Στη μέθοδο του MERCKER το αντικείμενο δοκιμής αντικαθιστάται από μια σφαίρα (διπολική). Η ακτίνα της καθορίζεται απ' τις βασικές διαστάσεις ενός οχήματος. Επειδή είναι δύσκολο να περιγράψει κανείς το νεκρό νερό και τον απόηχο με τους ίδιους τρόπους όπως το αντικείμενο δοκιμής, και τα δύο

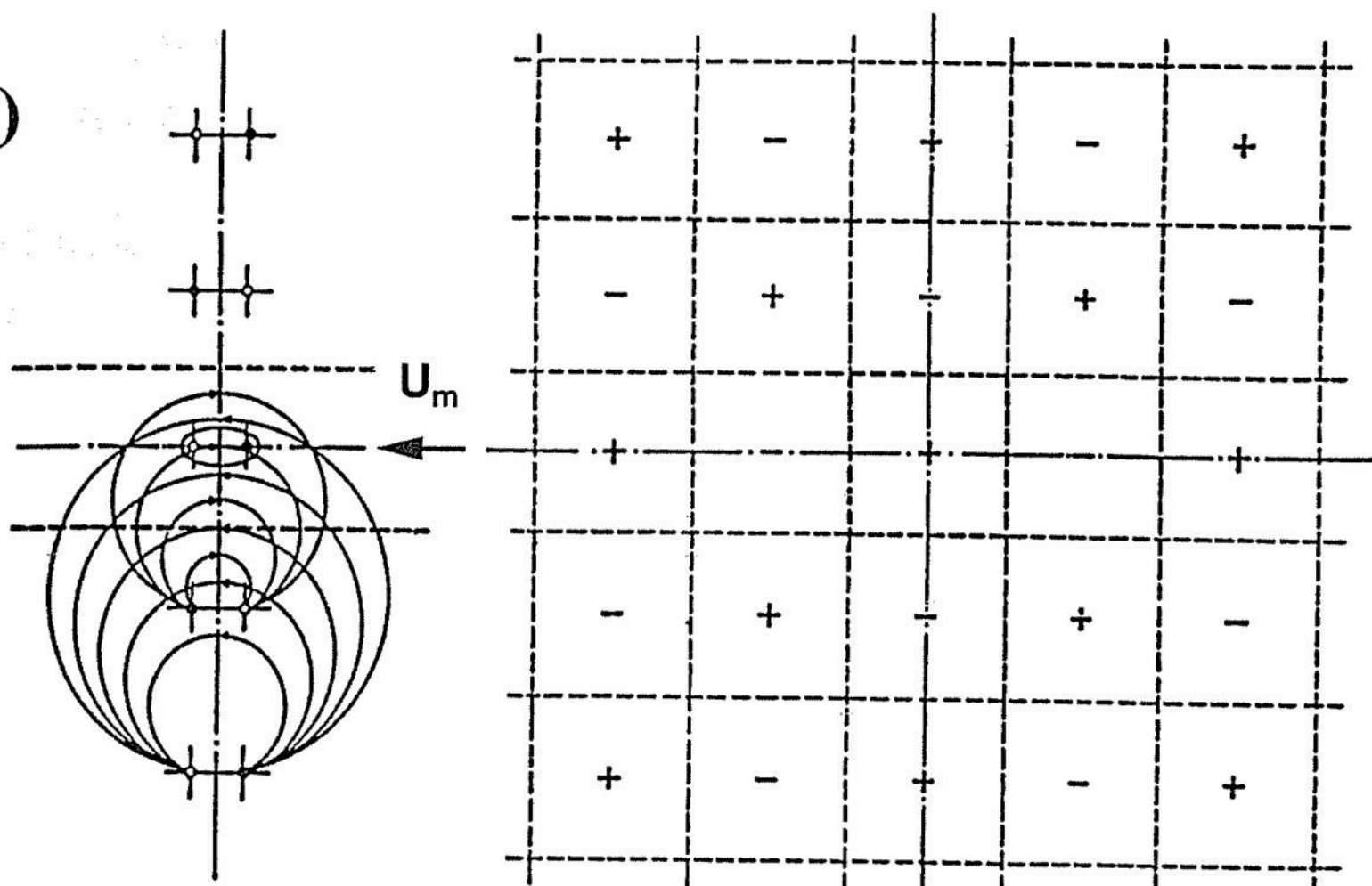
χαρακτηρίζονται απ' την εξωτερική της επίδραση, συγκεκριμένα την υπολογισμένη αντίσταση του αντικειμένου δοκιμής. Χρησιμοποιούνται δύο εμπειρικές σταθερές. Η ελκυστικότητα της μεθόδου του MERCKER οφείλεται στο γεγονός ότι δε χρειάζονται επιπρόσθετες μετρήσεις (όπως στις άλλες δύο μεθόδους).



a)



b)



Εικ. 1.50 Αναπαραγωγή των στερεών τοιχωμάτων ενός κλειστού τμήματος δοκιμής (α) και του ελεύθερου ορίου ενός ανοιχτού τμήματος δοκιμής (β) μέσω της τεχνικής εικόνας - καθρέφτη. Η ροή έρχεται απ' τα δεξιά. Ολόκληρος κύκλος: πηγή: κενός κύκλος, μετά τον C. WIESELBERGER.

Η μέθοδος αναλογίας ταχύτητας του HENSEL χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό πηγής-καταβόθρας ως την αντικατάσταση του αντικειμένου δοκιμής και του απόηχού του. Η δύναμη της πηγής και της καταβόθρας καθορίζεται απ' τη μέτρηση δύο πιέσεων στην οροφή του τμήματος δοκιμής, η μια μέσα στο μοντέλο και η άλλη προς την καθοδική ροή.



Η μέθοδος της υπογραφής-ταχύτητας των HACKET και WILSEN είναι μια γενίκευση της μεθόδου του HENSEL, στο ότι η πίεση των τοιχωμάτων υπολογίζεται με έναν αριθμό θέσεων σε μια γραμμή κατά μήκος της οροφής του μοντέλου.

Τα πέντε εναπομείναντα συστατικά της δύναμης και ροπής αέρα που προκύπτουν, αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως η αντίσταση, αλλά χωρίς την επίδραση της (οριζόντιας) πλευστότητας.

Και οι τρεις μέθοδοι ακολουθούν την “κλασική” ιδέα όπου το αντικείμενο δοκιμής και ο απόηχός του αντικαθίστανται από ένα απλό μοντέλο. Επίσης, λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση των τοιχωμάτων του τμήματος δοκιμής με την τεχνική της εικόνας του καθρέφτη. Όπως ήδη αναφέρθηκε στο μέρος 1.2.3, εξελιγμένες μέθοδοι υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) επιτρέπουν το σχεδιασμό του αντικειμένου δοκιμής, του απόηχού του, και του γύρω τμήματος δοκιμής με κάθε λεπτομέρεια. Ο D. STEINBACH δημιούργησε ένα τέτοιο μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του πίνακα (βλ. εικόνα 1.21). Σε σύγκριση με τις παραπάνω μεθόδους, η μέθοδος του STEINBACH διακρίνεται απ’ το γεγονός ότι σχετίζεται και με *τοπικές* διορθώσεις του πεδίου ροής.

### 1.3.3.3 Ανοιχτό Τμήμα Δοκιμής

Για πολύ καιρό υπήρχε η αντίληψη ότι ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής δε χρειάζεται διορθώσεις. Μια διόρθωση στερεής-στένωσης (όπως υπολογίστηκε με κανόνες της αεροναυπηγικής) ήταν τόσο μικρή που αγνοήθηκε. Επίσης, θεωρούσαν ότι δεν ήταν απαραίτητη ούτε η διόρθωση πλευστότητας γιατί εικάζοταν ότι η ροή αέρα ενός ανοιχτού τμήματος δοκιμής δεν έχει αξονική κλίση πίεσης, αφού αυτό είναι έμφυτο για έναν ιδανικό ελεύθερο πίδακα.

Οι E. MERCKER και J. WIEDEMANN ανέλυσαν λεπτομερειακά τη ροή σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής. Μπορούσαν να αναγνωρίσουν τις πέντε βασικές διαταράξεις και να υπολογίσουν την επίδρασή τους στη ροή χρησιμοποιώντας στοιχειώδη μοντέλα ροής. Η βασική τους προϋπόθεση είναι η ίδια όπως και στο κλειστό τμήμα δοκιμής: Η επίδραση κάθε διαταραχής- με την εξαίρεση της αξονικής κλίσης πίεσης του πίδακα- έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή ταχύτητας του ερχόμενου αέρα σύμφωνα με την εξίσωση (1.4). Οι πέντε αυτές διαταραχές είναι:

1. Διαστολή του πίδακα  $eJ$ .
2. Εκτροπή του πίδακα  $eJD$ .
3. Ακροφύσιο  $eN$ .
4. Συλλέκτης  $eC$ .
5. Κλίση πίεσης  $\Delta p$ .

Επομένως η κλίση πίεσης διορθώνεται ως εξής:

$$q_{corr}/q_m = (1 + \varepsilon_{JE} + \varepsilon_{JD} + \varepsilon_N + \varepsilon_c)^2 \quad (1.9)$$

Αν η στένωση του ακροφύσιου διορθωθεί προκαταβολικά (βλ. Μέρος 1.2.3.4), το  $\varepsilon_N$  πρέπει να παραβλεφθεί στην εξίσωση (1.9).

Στο ακόλουθο, το φυσικό φόντο του κάθε μεμονωμένου συντελεστή  $\varepsilon$  θα επεξηγηθεί συντόμως:

1. Διαστολή του πίδακα (στερεή στένωση)  $\varepsilon_{JE}$ : Όπως φαίνεται στην εικόνα

1.51(α), σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμών τα ελεύθερα όρια του πίδακα

επιτρέπουν τις αεροδυνάμεις γύρω από ένα μοντέλο να διευρυνθούν

περισσότερο απ'ότι στον ελεύθερο αέρα. Με μια μεγαλύτερη περιοχή

ροής ανάμεσα σε ένα μοντέλο και σε ένα όριο πίδακα η τοπική ταχύτητα

αέρα είναι χαμηλή. Επομένως οι δυνάμεις που ασκούνται στο μοντέλο

είναι μικρότερες. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως την ταχύτητα της

ερχόμενης ροής που ελαττώνεται από μια ποσότητα αντίστοιχη στο  $\varepsilon_{JE}$ .

Ο συντελεστής της διαστολής πίδακα  $\varepsilon_{JE}$  (στερεή στένωση) μπορεί να

υπολογιστεί με ένα μοντέλο παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιόταν για

κλειστά τμήματα δοκιμής. Το αντικείμενο δοκιμής αντικαθιστάται από ένα

μοντέλο με διαμόρφωση πηγής-καταβόθρας. Τα όρια του πίδακα

παράγονται απ'την αντανάκλαση αυτού του μοντέλου στα όρια του [βλ.

εικόνα 1.50(β)]. Ωστόσο, οι συνθήκες των ορίων είναι διαφορετικές από

ένα κλειστό τμήμα δοκιμής. Τώρα, στη θέση των ορίων του (ελεύθερου)

πίδακα η ταχύτητα και η πίεση πρέπει να είναι η ίδια όπως θα ήταν χωρίς

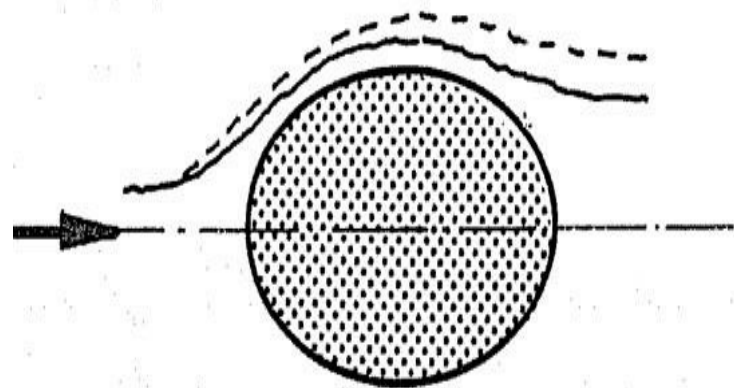
το μοντέλο. Αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή του κανονισμού πηγής-

καταβόθρας για κάθε νέα εικόνα που αντανακλάται. Έτσι, η ταχύτητα

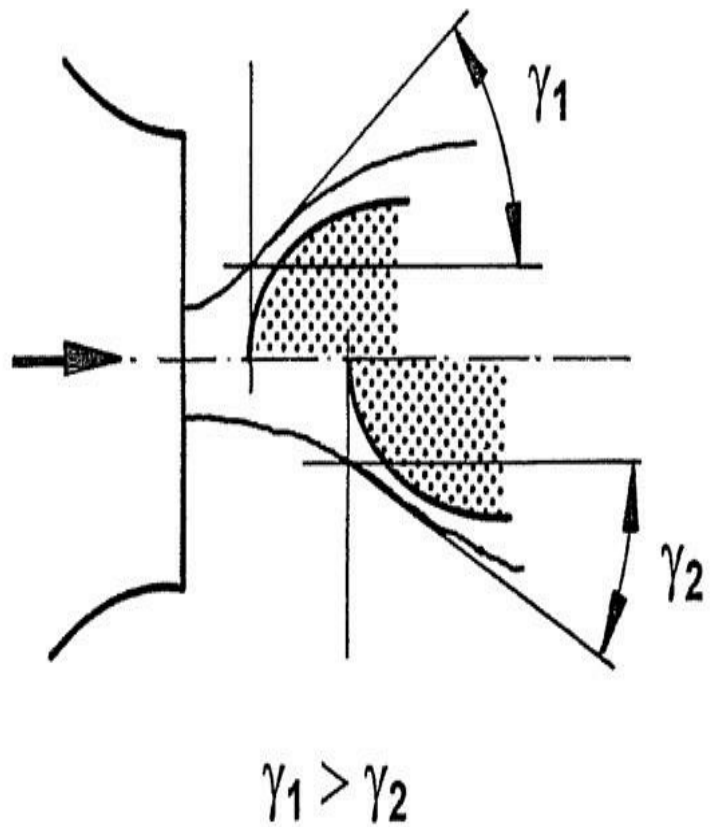
στον άξονα του αυθεντικού (κεντρικού) μοντέλου ελαττώνεται απ' την εικόνα πρώτης τάξεως, αυξάνεται λίγο απ' την δεύτερη, ελαττώνεται κατά μια μικρή ποσότητα απ' την τρίτη και ούτω καθ' εξής. Οι εναλλασόμενες επιδράσεις από αυτές τις εικόνες του καθρέφτη είναι η εξήγηση του γιατί σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής η επίδραση της στερεής στένωσης είναι μικρή σε σύγκριση με ένα κλειστό τμήμα δοκιμών.



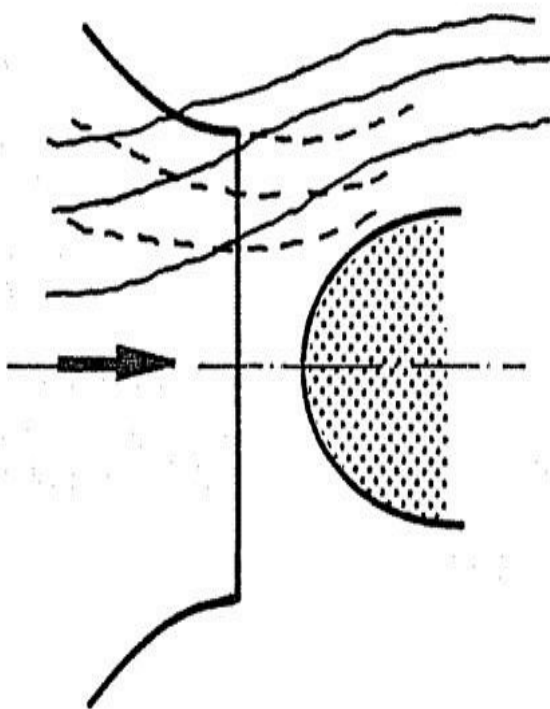
**a) Jet expansion**



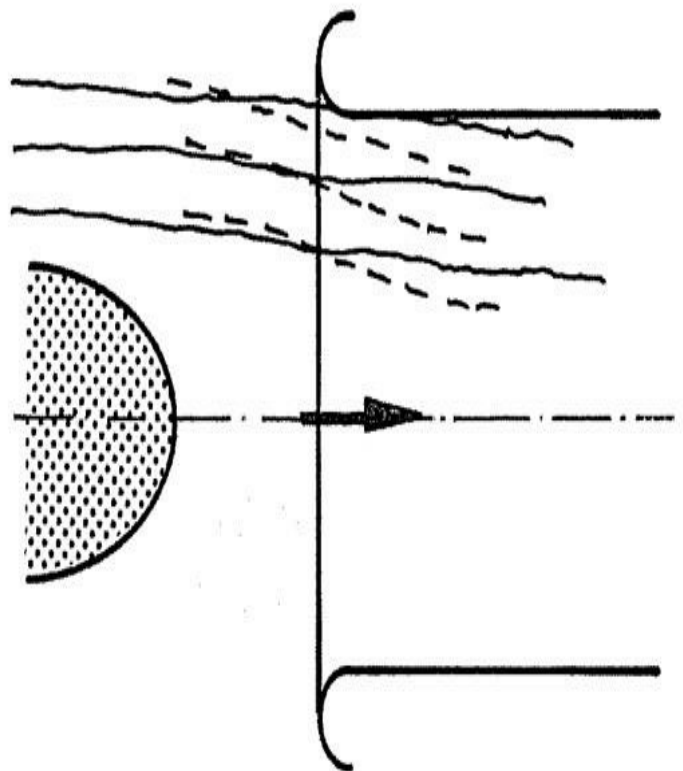
**b) Jet deflection**



**c) Nozzle blockage**



**d) Collector blockage**



Εικ. 1.51 Επιδράσεις ορίων σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής, μετά τους

E.MERCKER και J.WIEDEMANN.

2. Εκτροπή του πίδακα εJD: Εξαιτίας του μικρού χρησιμοποιήσιμου μήκους

της ροής αέρα σε έναν ανοιχτό πίδακα, το μοντέλο μπορεί να τοποθετηθεί

σχετικά κοντά στην έξοδο του ακροφύσιου. Αυτό οδηγεί, όπως φαίνεται

στην εικόνα 1.51(β), σε μια εκτροπή του πίδακα που μπορεί να

μεταφραστεί ως ακόμα μια διαστολή, και προκαλεί μια περαιτέρω μείωση

στην ταχύτητα της ερχόμενης ροής. Οι E. MERCKER και J.

WIEDEMANN συνδέουν αυτήν την εκτροπή του πίδακα με μια ενεργή

διατομή του ακροφύσιου  $A^*N$  η οποία είναι μικρότερη απ' το γεωμετρικό

$AN$ . Έτσι η ενεργή αναλογία στένωσης  $\phi^*$  είναι μεγαλύτερη απ' την

γεωμετρική  $\phi^* > \phi$ .

3. Η στένωση του ακροφύσιου εN περιγράφεται στο μέρος 1.2.3.4.

4. Στένωση του συλλέκτη εC: Τα τοιχώματα του συλλέκτη τερματίζουν την

πλευρική εξάπλωση της ροής που προκλήθηκε από ένα μοντέλο και τον

απόηχό του. Η ροή στο συλλέκτη επιταχύνεται και αυτό επιδρά σαν να

αυξάνοταν η ταχύτητα της ερχόμενης ροής. [βλ. Εικόνα 1.51(δ)].

5. Κλίση πίεσης: Όπως ήδη παρουσιάστηκε την εικόνα 1.11(β) η στατική

πίεση σε ένα ανοιχτό (κενό) τμήμα δοκιμής δεν είναι ακριβώς σταθερή.

Στο πρώτο μέρος του τμήματος δοκιμής η κλίση πίεσης είναι αρνητική, στα μισά μπορεί να είναι μηδέν, και γίνεται θετική κατά τη διάρκεια της καθοδικής ροής. Οι E. MERCKER και J. WIEDEMANN έδειξαν ότι η απόκλιση πίεσης που προκύπτει κατά μήκος του τμήματος δοκιμής επιδρά στον όγκο ενός ενεργού μοντέλου που είναι 1.75 φορές μεγαλύτερος απ'τον πραγματικό του όγκο, και παράγει ισχύ οριζόντιας πλευστότητας με μορφή αντίστασης.

#### 1.3.3.4 Επιδράσεις του Οριακού Στρώματος

Όταν γίνονται μετρήσεις σε ένα σταθερό έδαφος, η αντίσταση πρέπει να διορθωθεί με την επίδραση του οριακού στρώματος. Επειδή οι τροχοί ενός οχήματος εμβυθίζονται εν μέρη σε ένα οριακό στρώμα η υπολογισμένη αντίσταση τροχών είναι πολύ χαμηλή. Με τη βοήθεια της εικόνας 1.45 μπορεί να ληφθεί αυτό υπόψιν: η σχέση  $\Delta cD = f(\delta_1)$  πρέπει να παρεκταθεί σε  $\delta_1 = 0$ , υποχωρώντας σε  $\Delta cD_{\delta_1=0}$ . Στα αυτοκίνητα, ως μέσο όρο, αυτό θα παρήγαγε μια διόρθωση αντίστασης της κλίμακας  $\Delta cD = +0.01$ .

#### 1.3.3.5 Μοντέλο Εκτροπής

Μέχρι στιγμής λήφθηκε υπόψιν μόνο η συμμετρική ροή. Όταν ένα μοντέλο εκτρέπεται από μια γωνία  $\beta$ , η μορφή ροής χάνει τη συμμετρία της σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο του τμήματος δοκιμής. Η ροή αέρα σε σχέση με το μοντέλο εκτρέπεται προς τα όρια του πίδακα. Ανάλογα με τον τύπο του τμήματος δοκιμής (κλειστό ή ανοιχτό), υπάρχουν διαφορετικές παρεκκλίσεις σε σχέση με τον ελεύθερο αέρα. Σε ένα ανοιχτό τμήμα δοκιμής οι αεροδυνάμεις της καθοδικής πορείας του μοντέλου εκτρέπονται περισσότερο απ'ότι στον ελεύθερο αέρα. Αυτή η πιο δυνατή εκτροπή γίνεται αισθητή στην ανοδική πορεία του μοντέλου και



επιπλέον η ενεργή γωνία εκτροπής είναι μικρότερη απ' τη γεωμετρική τιμή της.

Το αντίθετο συμβαίνει σε ένα κλειστό τμήμα δοκιμής.

Ένα αυτοκίνητο με μια γωνία εκτροπής  $\beta$  συγκρίνεται με το φτερό μιας μικρής αναλογίας σε μια γωνία προσβολής  $\alpha$ . Επομένως, η μέθοδος που εφαρμόστηκε σε αεροναυπηγικές δοκιμές για να διορθωθεί η γωνία προσβολής  $\alpha$  μπορεί να μεταφερθεί και στη διόρθωση της γωνίας εκτροπής  $\beta$ . Ωστόσο, η διόρθωση αυτή εφαρμόζεται σπάνια. Σε μια αεροσήραγγα ο φυσικός πλευρικός άνεμος προσομοιώνεται με έναν αρκετά ιδανικό τρόπο. Η παρέκκλιση απ' την πραγματικότητα δεν μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς γιατί η πραγματικότητα είναι γνωστή μόνο με στατιστικά στοιχεία. Επίσης, είναι δικαιολογημένο το να αγνοήσει κανείς ένα λάθος στη γωνία εκτροπής που υπολογίστηκε σε μια αεροσήραγγα.

### 1.3.3.6 Θερμικές Δοκιμές

#### 1.4.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η στάση των αεροδυναμιστών οχημάτων προς μια δοκιμή μικρής κλίμακας πέρασε από πολλές αλλαγές, αρχίζοντας από μια θετική στάση, περνώντας σε μια εντελώς αρνητική, και καταλήγωντας σε μια (σχεδόν) θετική. Η αεροδυναμική οχημάτων ξεκίνησε με μοντέλα μειωμένης κλίμακας. Εκείνη την εποχή ήταν διαθέσιμες μόνο μικρές αεροσήραγγες οι οποίες χτίστηκαν για αεροναυπηγικούς σκοπούς. Επίσης μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο πολύ μικρά μοντέλα: η κλίμακα 1:10 ήταν η πιο συνηθισμένη. Η μεταφορά των αποτελεσμάτων από τα μοντέλα μινιατούρες σε αυτοκίνητα πλήρους κλίμακας έγινε με μεγάλο ρίσκο, για δυο λόγους:

1. Έλλειψη γεωμετρικής ομοιότητας. Εξαιτίας των μικρών διαστάσεων, πολλές λεπτομέριες του μοντέλου δεν μπορούσαν να αναπαραχθούν: γενικά η κάτω πλευρά του μοντέλου ήταν μια επίπεδη πλάκα, και η ψύξη της ροής αέρα παραμελήθηκε.
2. Έλλειψη κινηματικής ομοιότητας. Οι αριθμοί Reynolds ήταν πολύ μικροί και η αναπαράσταση του δρόμου ανεπαρκής.

Αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν μεγαλύτερες κλίμακες μοντέλου: 1:5 και 1:4 στην Ευρώπη: 3/8 (1:3.75) στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ωστόσο, συχνά αυτά τα μεγαλύτερα μοντέλα δεν ήταν ακόμα γεωμετρικά όμοια με τις μεταγενέστερες εκδοχές πλήρους κλίμακας (και το τελικό αυτοκίνητο). Κατά τη διάρκεια εργασίας σε μειωμένη κλίμακα, οι σχεδιαστές τείνουν να υπερτονίζουν τις λεπτομέρειες του σχήματος, όπως αυλάκωση, κυρτότητα, ακτίνα, εσοχές, λάστιχα. Αργότερα, όταν στράφηκαν σε μοντέλο πλήρους κλίμακας, δεν έκαναν

αυτές τις υπερβολές αλλά ακόμα αποκαλούσαν “όμοια” τα αυθεντικά μοντέλα μικρής κλίμακας και τα μοντέλα πλήρους κλίμακας. Όμως όχι με την ακριβή έννοια του όρου “όμοιος” στη μηχανική μοντέλων: έτσι, παραβιάζεται το αξίωμα της γεωμετρικής ομοιότητας. Φυσικά, δεν είναι αυτό το θέμα αν τα μοντέλα μειωμένης και πλήρους κλίμακας χτιστούν σύμφωνα με ένα πανομοιότυπο σύνολο δεδομένων, που διαφέρει μόνο στην κλίμακα.

Οι επιδράσεις του αριθμού Reynolds έκαναν αβέβαιο το αν οι τροποποιήσεις στο σχήμα, που έγιναν σε ένα μοντέλο μειωμένης κλίμακας μπορούν να δουλέψουν σε μια πλήρη κλίμακα. Μικρές παραλλαγές του σχήματος έγιναν κατά τη διάρκεια «βελτιστοποίησης των λεπτομερειών» οι οποίες αποδείχτηκαν ευαίσθητες στον αριθμό Reynolds. Επομένως, η δοκιμή μικρής κλίμακας βρέθηκε σε ανυποληψία. Για μια περίοδο, τα μοντέλα μικρής κλίμακας χρησιμοποιούνταν μόνο στην αρχική φάση της εξέλιξης και της έρευνας.

Αυτό είχε πολλά πλεονεκτήματα. Τα μικρά μοντέλα χτίζονται εύκολα και τροποποιούνται ακόμη ευκολότερα κατά τη διάρκεια μιας καμπάνιας. Με μια κλίμακα μοντέλου 1:4, μόνο το 1/64 του όγκου του άργιλου πρέπει να αφαιρεθεί (ή να προστεθεί) όταν γίνεται μια αλλαγή στο σχήμα. Τα μικρά μοντέλα

μετακινούνται εύκολα, έτσι αυξάνεται η ελαστικότητα σχετικά με την επιλογή αεροσήραγγας. Αφού ο χρόνος εξέλιξης είναι σημαντικός, τα πλεονεκτήματα αυτά αναγνωρίζονται πολύ περισσότερο από πριν, αν και υπάρχουν κίνδυνοι όσον αφορά στη μεταφορά σε πλήρη κλίμακα.

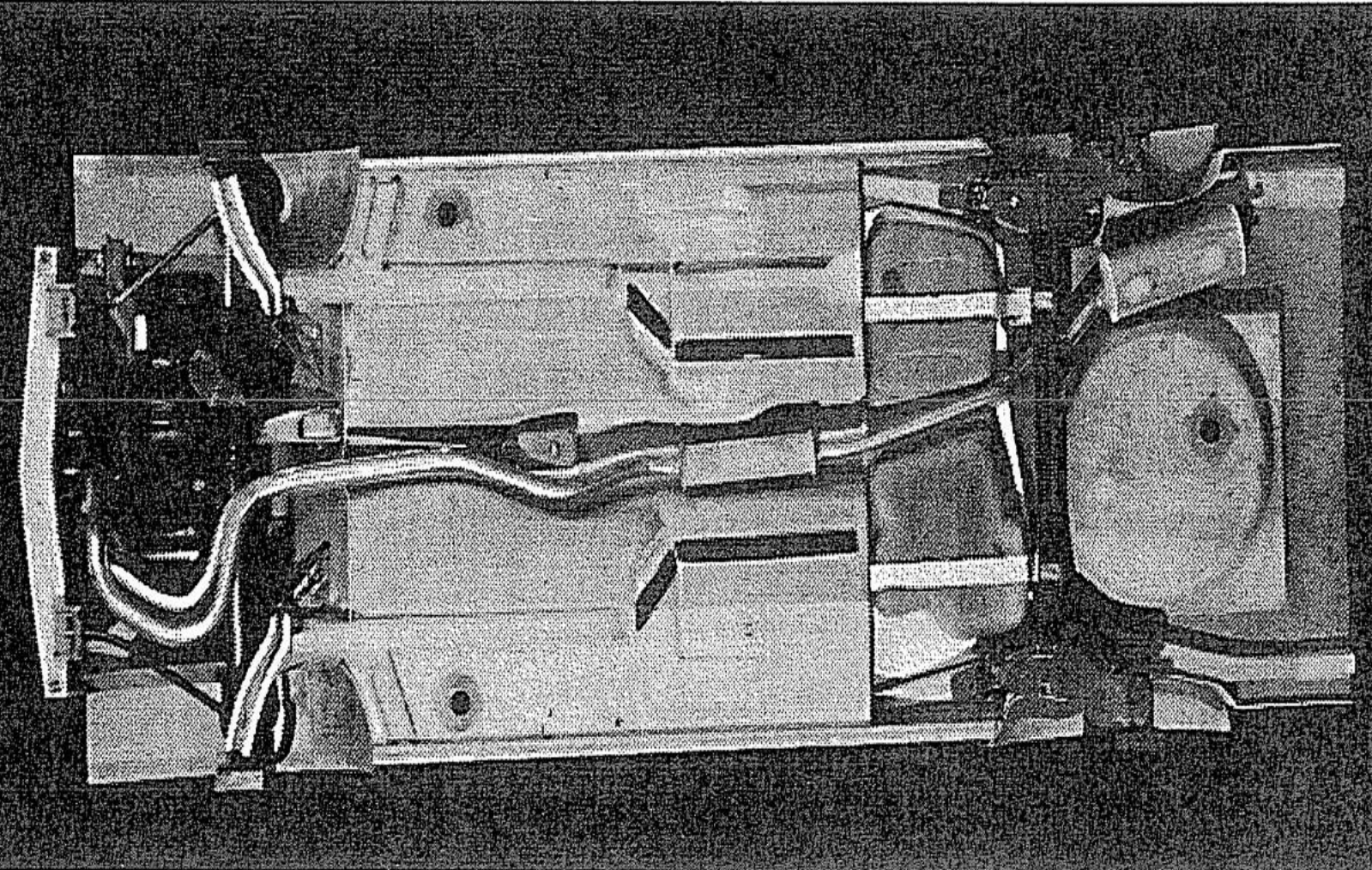
Οι κίνδυνοι αυτοί μπορούν να μειωθούν αν αυξηθεί η κλίμακα. Παρατηρείται μια προτίμηση σε μεγαλύτερες κλίμακες: στις Ηνωμένες Πολιτείες από 3/8 (1:3.75) σε 1:3.33: στην Ευρώπη σε 1:2.5, μια τυπική τιμή στη μηχανολογία. Η δεύτερη κλίμακα ταιριάζει και σε μεγάλα εμπορικά οχήματα. Σε αεροσήραγγες χτισμένες για πειράματα με αυτοκίνητα πλήρους κλίμακας η μέγιστη ταχύτητα αέρα είναι αρκετή για να δοκιμαστούν φορτηγά και λεωφορεία με κλίμακα 1:2.5, με το σωστό αριθμό Reynolds. Επίσης, με  $c_D \cdot A = 0.7 \text{ m}^2$ , το προϊόν του συντελεστή αντίστασης στην μπροστινή περιοχή είναι ελαφρώς πιο υψηλό απ' την τιμή για ένα επιβατικό αυτοκίνητο (έτσι δεν απαιτούνται διορθώσεις μεγαλύτερης σπουδαιότητας). Φυσικά, τα πλεονεκτήματα μικρής κλίμακας που περιγράφονται παραπάνω, χάνονται καθώς μεγαλώνει η κλίμακα του μοντέλου.

#### **1.4.2 Λεπτομέρειες Κατασκευής Μοντέλου και Τεχνικές Δοκιμών**

Γενικά, τα μοντέλα με μειωμένη κλίμακα κατασκευάζονται με μεγάλο βαθμό πιστότητας: Η εικόνα 1.52 μας δίνει ένα παράδειγμα. Το σώμα ταιριάζει με όλα τα μέρη επένδυσης και το κάτω μέρος δείχνει όλες τις λεπτομέρειες του τμήματος προσγείωσης που εκτίθεται στη ροή αέρα. Τα καλλύματα των τροχών είναι κούφια και έτσι αναπαράγονται όλες οι μεγαλύτερες κοιλότητες της κάτω πλευράς. Προκειμένου να περιοριστεί το βάρος του μοντέλου, ο άργιλος εφαρμόζεται σε ένα κούφιο κιβώτιο από κόντρα πλακέ. Σ' όλες τις τοποθεσίες όπου αναμένονται τροποποιήσεις στο σχήμα, ο άργιλος βρίσκεται σε ένα πυκνό

στρώμα. Όλες αυτές οι λεπτομέρειες σχετικά με την κατασκευή του μοντέλου περιγράφονται απ' τον N. WATTS, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα την εξέλιξη ενός ελαφρύ φορτηγού.



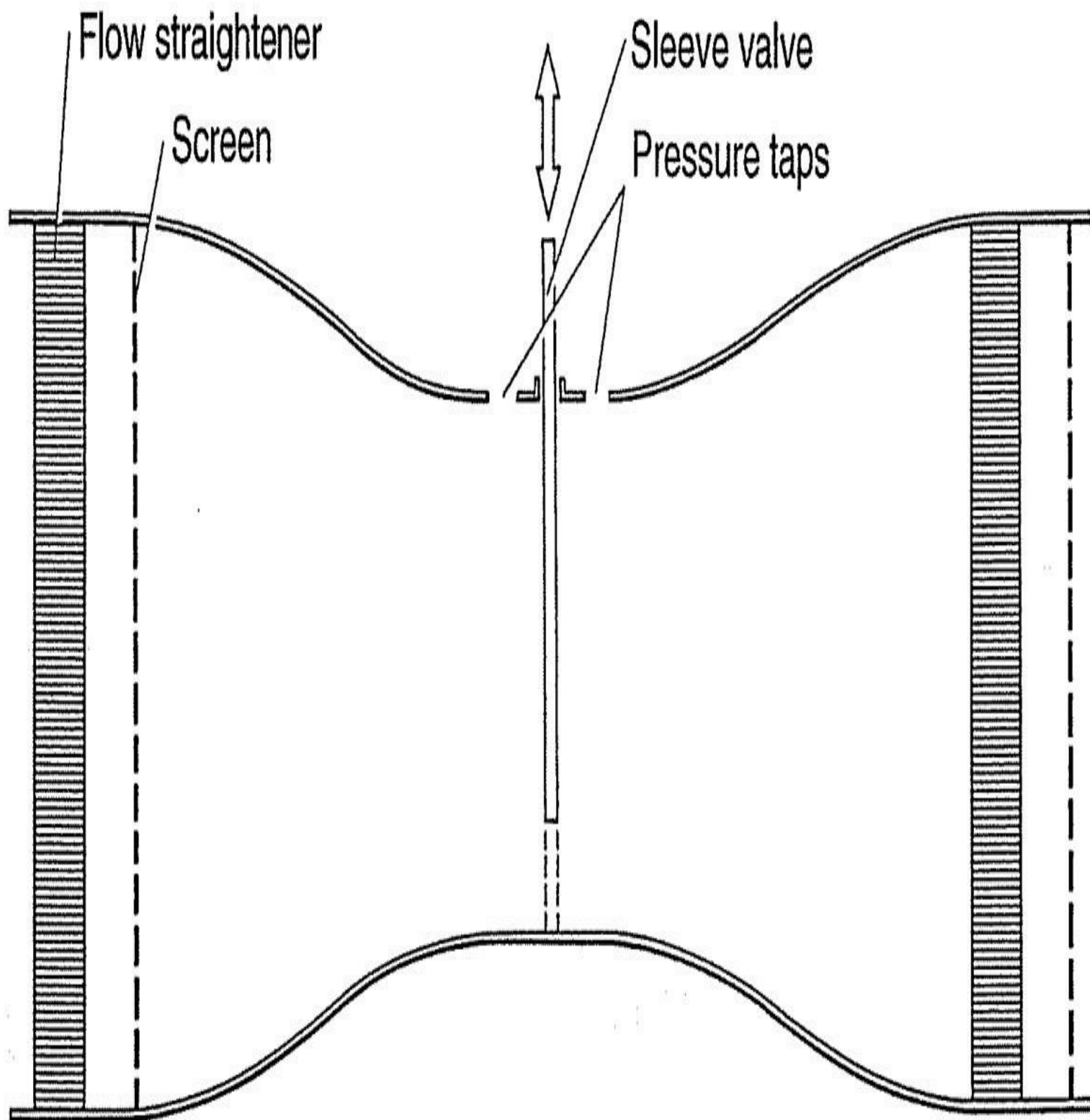


Εικ. 1.52 Μοντέλο αυτοκινήτου μειωμένης κλίμακας (1:5): α) μοντέλο σε μια αεροσήραγγα, β) η κάτω πλευρά του ίδιου μοντέλου. (Courtesy Adam Opel AG).

Για μια ακριβή εκτίμηση της αντίστασης εξαιτίας της ψύξης της ροής αέρα, ο όγκος ροής του αέρα ψύξης πρέπει να είναι καλά προσομοιωμένος. Δύο μέθοδοι είναι διαθέσιμες, η μία δίνει μια χονδρική εκτίμηση και η άλλη ένα ακριβές αποτέλεσμα.

Τα ανοίγματα μέσα από τα οποία μπαίνει ο αέρα ψύξης στο όχημα αναπαράγονται επακριβώς. Η απώλεια του συντελεστή ζ ολόκληρου του αγωγού, συγκεντρώνεται σε μια διατομή του αγωγού. Προκειμένου να αποφύγει κανείς τις επιδράσεις του αριθμού Reynolds στην απώλεια του, η απώλεια παράγεται από αιχμηρές ακμές μέσα στον αγωγό αντί στις οθόνες. Βασικά, η αντίσταση του οχήματος που προκλήθηκε από τη ψύξη της ροής αέρα αποτελείται από δύο μέρη, ένα εξαιτίας της μαγνητικής ροής και το άλλο εξαιτίας της παρεμβολής μιας εξωτερικής ροής γύρω απ' το όχημα.





Μια ακριβής μέθοδος για την αναπαραγωγή της ψύξης της ροής αέρα ερευνήθηκε απ' τον J. WIEDEMANN και οδήγησε στην εφεύρεση του «προσομοιωτή ψυγείου». Ένας αγωγός ψύξης αέρα αναπαράγεται απ' το κανάλι Venturi και παρουσιάζεται στην εικόνα 1.53. Ταιριάζουν και άλλα σχήματα καναλιού εκτός

απ' το Venturi. Έχουν χτιστεί συμπαγείς μονάδες χρησιμοποιώντας δίσκους με διάτρητους κορμούς όπως τις συσκευές αναπαραγωγής της απώλειας. Το περίβλημα της βαλβίδας (βλ. Εικόνα 1.53) επιτρέπει την αναπαραγωγή κάθε επιθυμητής απώλειας πίεσης. Ο σωλήνας είναι βαθμονομημένος μόνο μια φορά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε μοντέλο: ο όγκος ροής και η απώλεια πίεσης υπολογίζονται για διάφορες θέσεις στο περίβλημα της βαλβίδας.

*Εικ. 1.53 Προσομοίωση του ψυγείου για δοκιμές μοντέλων, μετά τον*

*J. WIEDEMANN.*


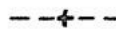
Αφού γενικά αυτό είναι ακόμα θέμα με τα μοντέλα πλήρους κλίμακας, παραβλέπεται η σχετική κίνηση ανάμεσα στη κλίμακα μοντέλου-δρόμου και στην περιστροφική κίνηση των τροχών. Οι επιπτώσεις με τα μοντέλα πλήρους κλίμακας είναι οι ίδιες και αναλύονται στο μέρος 1.3.2. Πράγματι, τα μοντέλα μειωμένης κλίμακας ήταν τα πρώτα που δοκιμάστηκαν πάνω σε έναν κινούμενο ιμάντα, και με περιστρεφόμενους τροχούς. Αυτό συνέβη στη δεκαετία του 30'. Ο C. SCHMID παρατήρησε την αντίσταση να είναι χαμηλότερη όταν ο ιμάντας βρισκόταν σε κίνηση αλλά, σύμφωνα μ' αυτόν, η περιστροφή των τροχών δεν είχε καμία επιρροή. Ωστόσο, η τοποθέτηση ενός μοντέλου σε έναν κινούμενο ιμάντα εξετάστηκε ξανά απ' τον F.N. BEUVAIS (βλ. εικόνα 1.31). Οι τροχοί διατηρήθηκαν σταθεροί λόγω της αμελητέας επιρροής της περιστροφής που ανέφερε ο C. SCHMID.

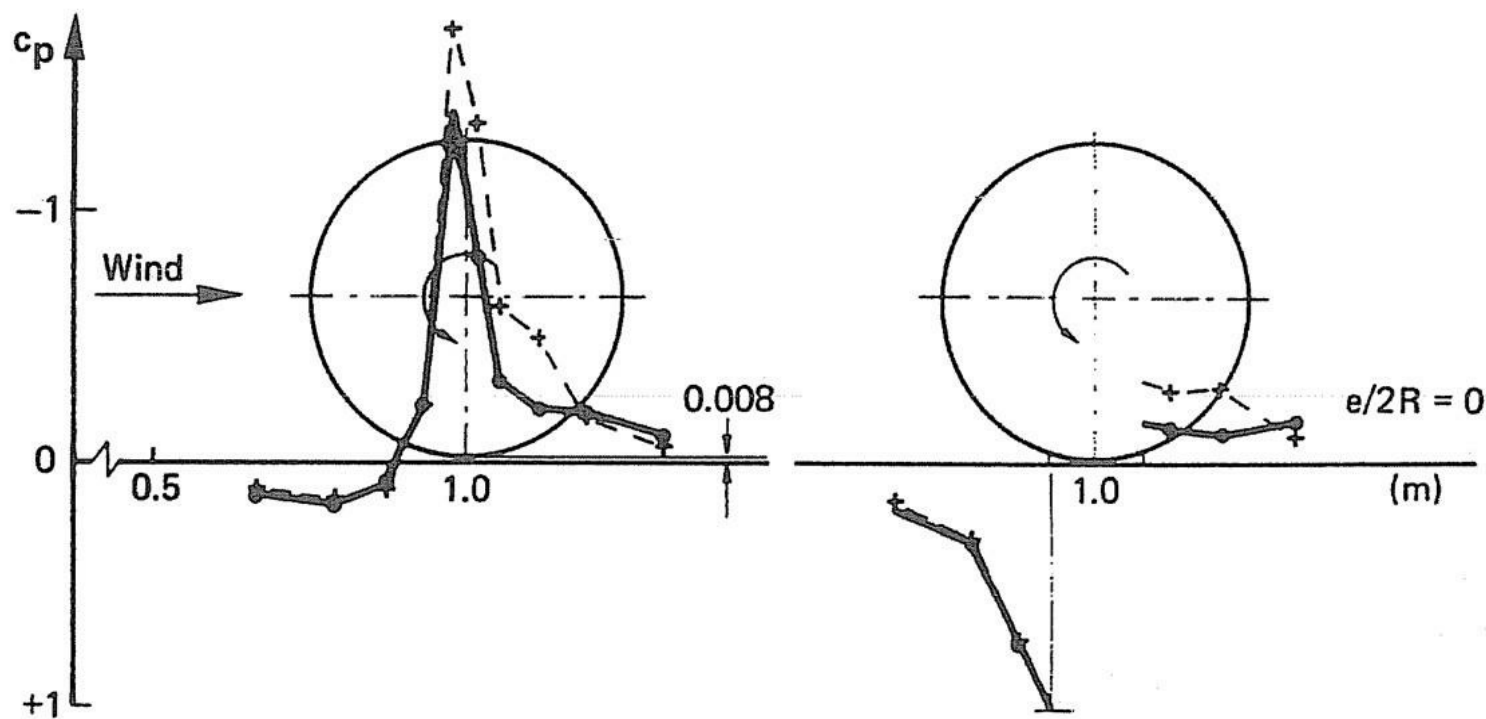
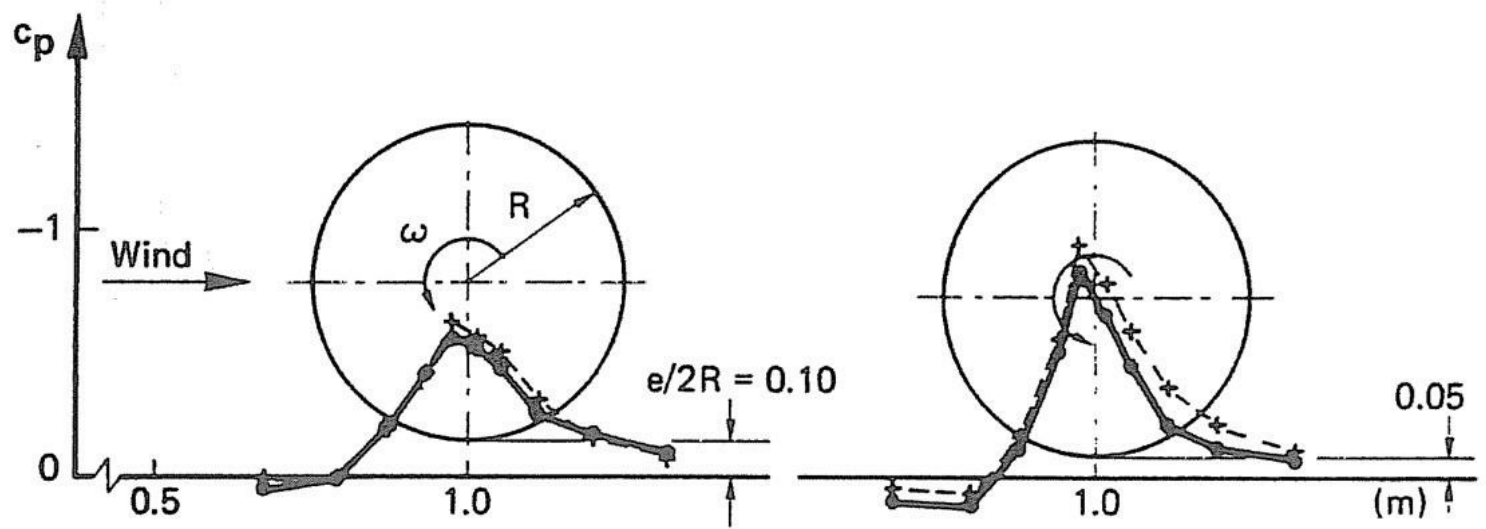
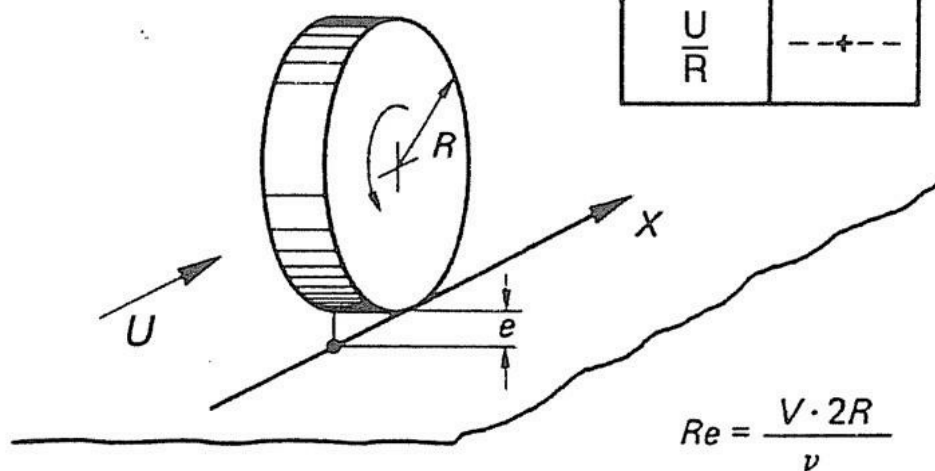
Ένας κινούμενος ιμάντας απαιτεί ένα κενό ανάμεσα στον ιμάντα και τους σταθερούς τροχούς. Το ακόλουθο λάθος στην αντίσταση και πόσο μάλλον, στην άνωση, ήταν τόσο σημαντικό στις δοκιμές του BEUVAIS που αντιστάθμισε την

επίδραση του κινούμενου ιμάντα. Αργότερα, αυτό επεξηγήθηκε απ' τον Α. GOGOTTI, ο οποίος παρουσίασε μετρήσεις δύναμης σε τροχούς ελεύθερης κύλισης, πλήρους κλίμακας, σε σταθερό έδαφος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.54 η πίεση κάτω απ' τον τροχό αλλάζει όσο περισσότερο μειώνεται το κενό ανάμεσα στον τροχό και την πλακέτα γείωσης. Απ' τη στιγμή που το κενό δεν είναι μηδέν, η αυξημένη αναρρόφηση αναπαράγεται με μειωμένο κενό. Ωστόσο, όταν ένας τροχός αγγίζει το έδαφος η κατάσταση αλλάζει δραστικά: αναπαράγεται υψηλή θετική πίεση μπροστά απ' τους τροχούς εξαιτίας της στασιμότητας της ροής. Η ροή χωρίζεται μπροστά απ' τους τροχούς και δημιουργείται ένας στρόβιλος (παρόμοιος με αυτόν ενός κτιρίου στο έδαφος) (βλ. εικόνα 1.55): η αρχική αρνητική άνωση μετατρέπεται σε θετική. Πάλι, η επίδραση της περιστροφής των τροχών ήταν πολύ μικρή (βλ. Α GOGOTTI).

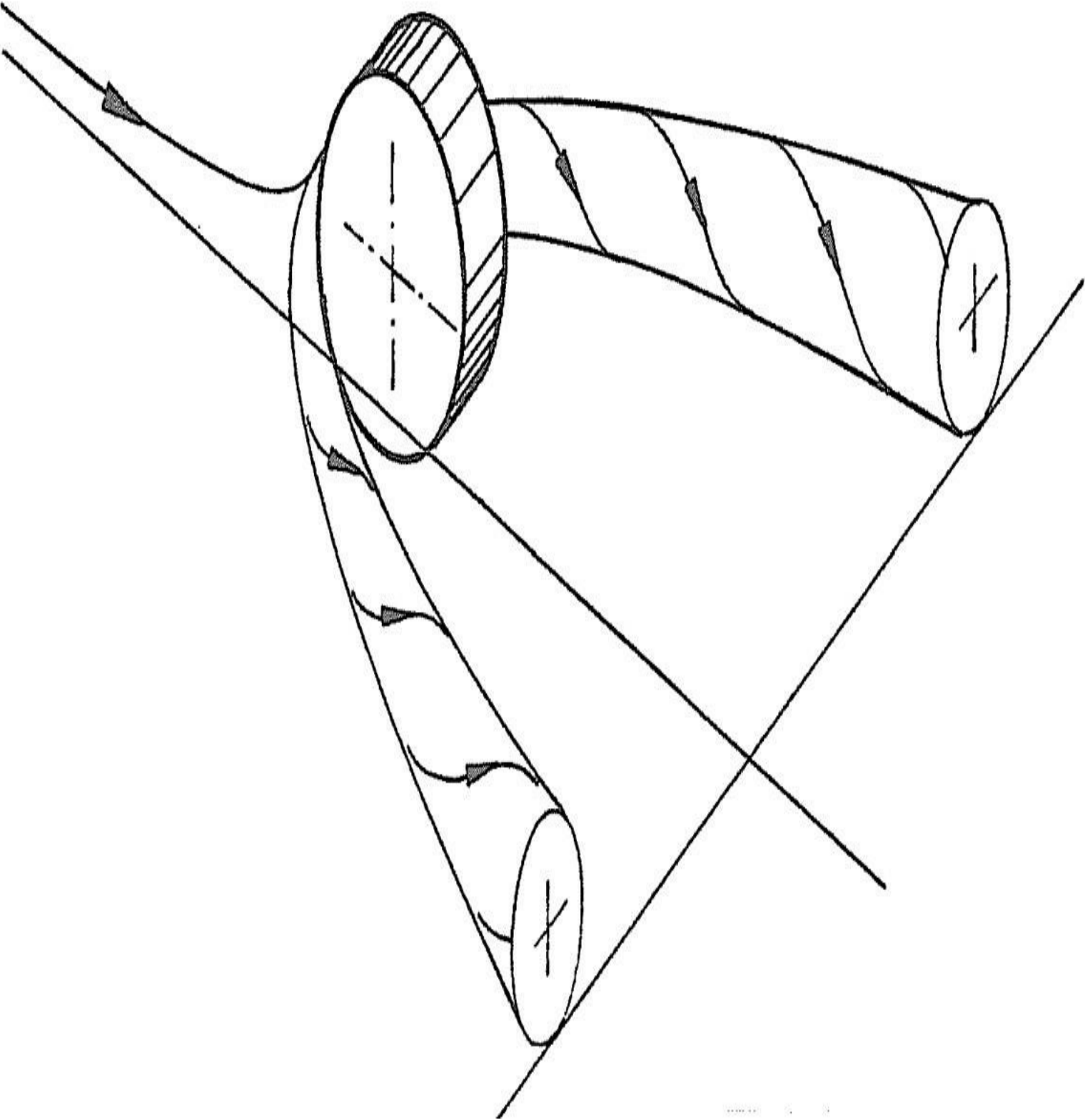
Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.56, η αντίσταση επηρεάζεται ελαφρώς απ' το κενό ανάμεσα στον τροχό και ενός σταθερού εδάφους, αλλά η επίδραση στην άνωση είναι σημαντική: όπως επίσης και η επιρροή στην περιστροφή. Ακόμα, μπορεί να συμπεράνει κανείς, μέσα απ' τις έρευνες του GOGOTTI, ότι όσο πιο καλή είναι η ροή γύρω από έναν τροχό τόσο πιο μεγάλη είναι η επίδραση της περιστροφής των τροχών στην αντίσταση. Αν (σ' αυτό το συγκεκριμένο πείραμα) πάνω απ' το σταθερό τροχό υπήρχε ένα επικάλυμμα, ο συντελεστής αντίστασης θα μειώνονταν στο  $\Delta cD = 0.049$ . Όταν ο τροχός περιστρέφονταν το κέρδος σχεδόν θα διπλασιάζονταν:  $\Delta cD = 0.091$ .

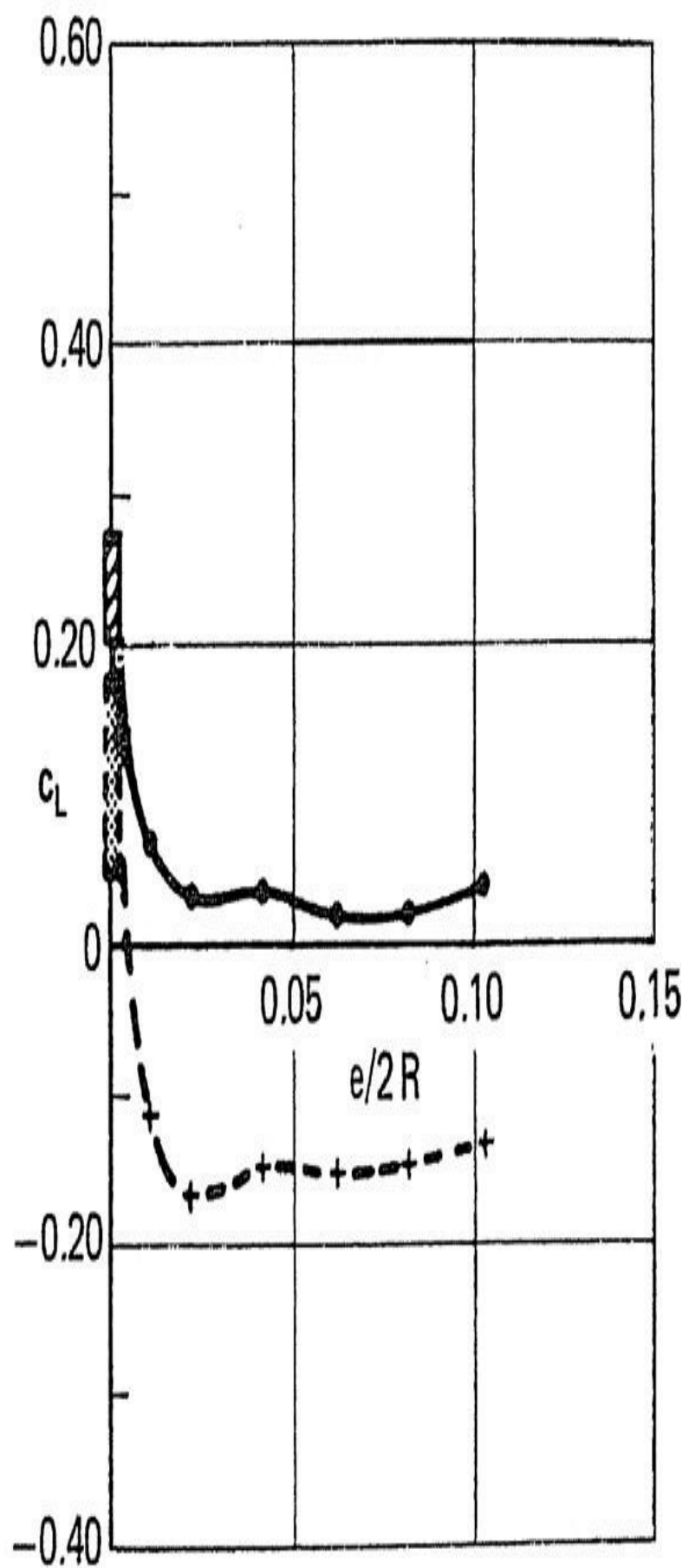
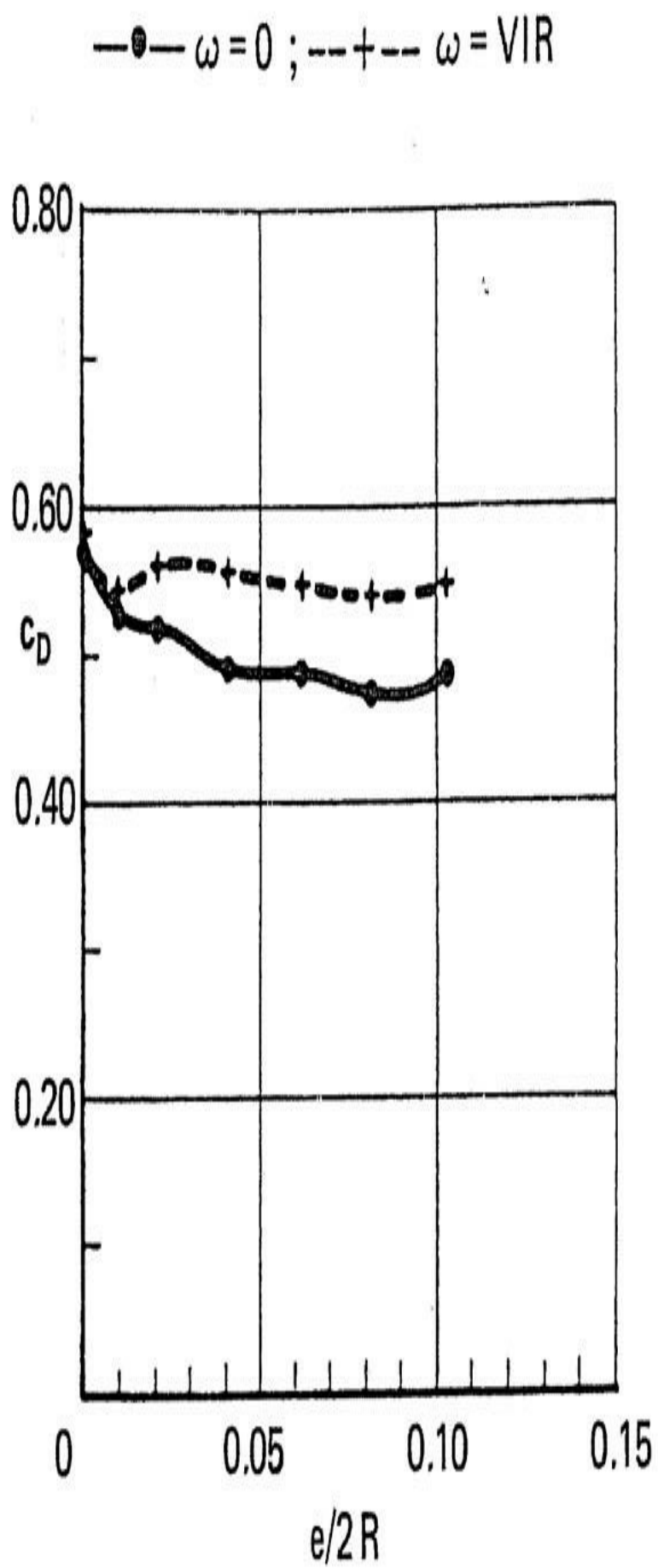


$\omega$	
0	
$\frac{U}{R}$	



*Εικ. 1.54 Διανομή πίεσης στο έδαφος κάτω απ' τον τροχό για διαφορετικές αποστάσεις εδάφους, μετά τον Α. GOGOTTI.*



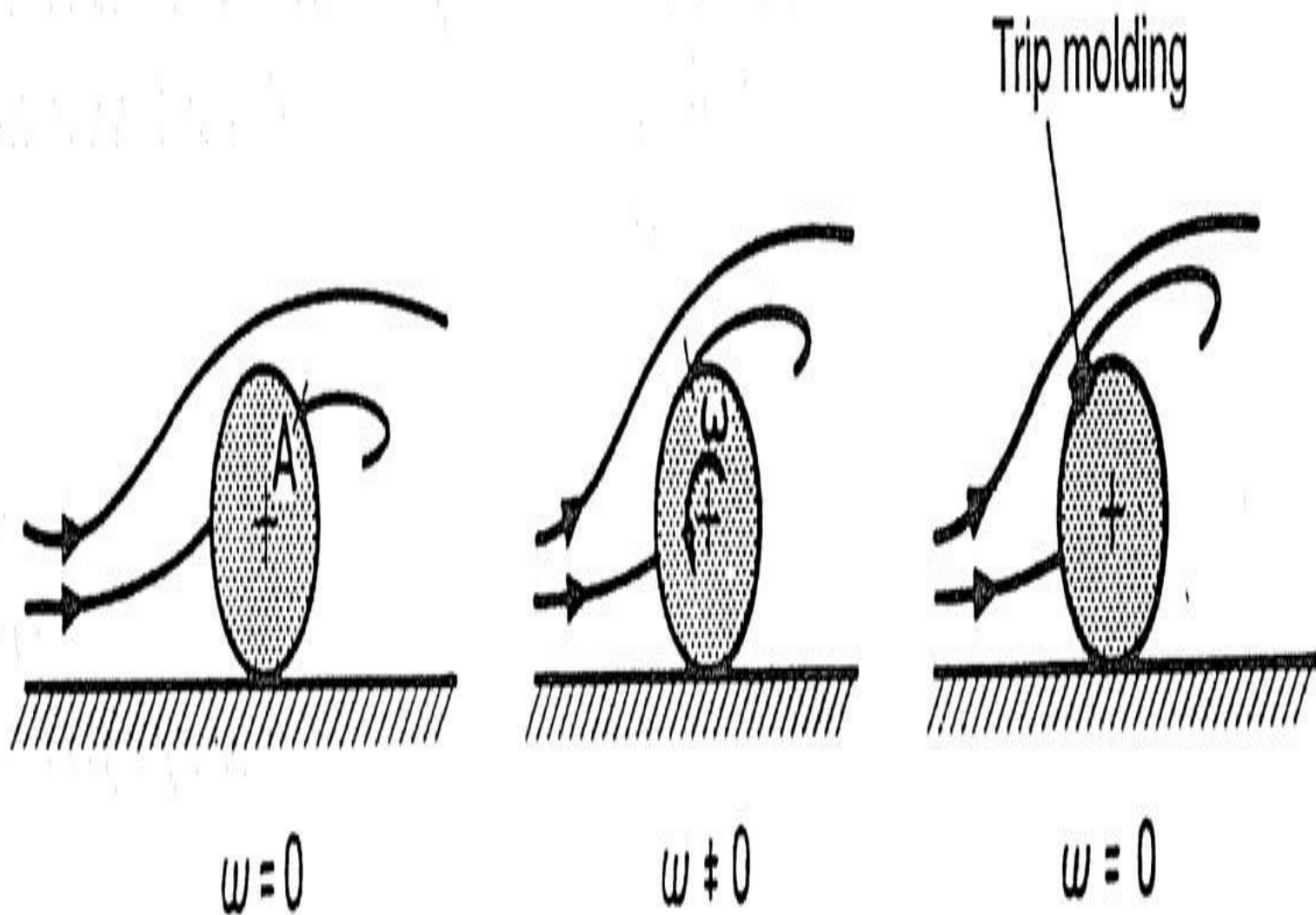




*Εικ.1.55 Διαχωρισμός ροής μπροστά από έναν στατικό τροχό,και διαμόρφωση στροβίλου σε σχήμα πετάλου.*

*Εικ. 1.56 Αντίσταση και άνωση ενός ελεύθερου τροχού, στατικού και περιστρεφόμενου, για διαφορετικές αποστάσεις εδάφους, μετά τον A.GOGOTTI.*

Αναλογικά με οχήματα πλήρους κλίμακας μπορεί να διεξαχθεί το εξής συμπέρασμα για μοντέλα μειωμένης κλίμακας. Όσο πιο καλή είναι η ροή γύρω από ένα όχημα τόσο πιο αυστηρές είναι οι απαιτήσεις προσομοίωσης στην αεροσήραγγα. Για περαιτέρω μείωση της αντίστασης απ' τις σημερινές τιμές,



πρέπει να βελτιωθεί η ροή στην κάτω πλευρά των οχημάτων και γύρω απ' τους τροχούς. Επομένως, πρέπει να βελτιωθεί και η τεχνική της αεροσήραγγας: με την αναπαραγωγή της σχετικής κίνησης ανάμεσα στο όχημα και το δρόμο και την περιστροφική κίνηση των τροχών σε δοκιμές μοντέλων μικρής κλίμακας.

Οι δοκιμές μοντέλων με αγωνιστικά αυτοκίνητα της Formula είναι ένα καλό παράδειγμα. Πριν από τη χρήση του κινούμενου ιμάντα και την περιστροφή των τροχών, προσομοιώθηκε η κίνηση των τροχών όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.57.

Σύμφωνα με τον C. WILLIAMS η μπροστινή κίνηση στο σημείο διαχωρισμού που προκλήθηκε απ' την περιστροφή των τροχών μπορεί να προσομοιωθεί από

ένα καλούπωμα όπως φαίνεται στην εικόνα 1.34.

Εικ. 1.57 Προσομοίωση της περιστροφής τροχών με την επικόλληση ενός καλουπώματος, μετά τον C. WILLIAMS.

### 1.4.3 Επιδράσεις του Αριθμού Reynolds

Σε συνδυασμό με την απαίτηση γεωμετρικής ομοιότητας, η ροή γύρω από μοντέλα μειωμένης και πλήρους κλίμακας πρέπει να είναι κινηματικά όμοια. Αυτό πραγματοποιείται όταν όλες οι δυνάμεις που καθορίζουν ένα πεδίο ροής έχουν την ίδια σχέση μεταξύ τους και στις δύο περιπτώσεις. Για την ασυμπίεστη ροή πρέπει να ληφθούν υπόψιν μόνο οι δυνάμεις αδράνειας και τριβής. Σύμφωνα με βιβλία για τη μηχανική ρευστών η αναλογία των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής καταλήγει σε έναν αδιάστατο αριθμό γνωστός ως αριθμός Reynolds, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$U \propto l$$

$$\text{Re} =$$

$$\nu$$

$$(1.10)$$

όπου  $U_{\infty}$  είναι η ταχύτητα της μη διανεμημένης ερχόμενης ροής, το  $l$  είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος, γενικά το μήκος του οχήματος, και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του μεσαίου αέρα και σε κάποιες περιπτώσεις του νερού. Δύο πεδία ροής είναι κινηματικά όμοια εάν η παρακάτω υπόθεση είναι έγκυρη:

$$U_{\infty 1} l_1 = U_{\infty 2} l_2$$

$$\nu_1 = \nu_2$$

$$\nu_1$$

$$=$$

$$\nu_2$$

(1.11)

Αν μια δοκιμή μοντέλου επιτυγχάνεται στο ίδιο μεσαίο επίπεδο με το οποίο λειτουργεί ένα όχημα πλήρους κλίμακας (δηλ, αέρας), η απαίτηση για κινηματική

ομοιότητα ικανοποιείται όταν τα προϊόντα ταχύτητας και μήκους είναι ίσα και στις δύο περιπτώσεις. Γενικά, η ευρέως χρησιμοποιημένη κλίμακα 1:4 δεν μπορεί να ικανοποιήσει την κατάσταση αυτή. Με μοντέλα ακόμα μικρότερης κλίμακας, όπως για παράδειγμα 1:5, ο κανόνας παραβιάζεται. Πολύ συχνά, ο αριθμός Reynolds είναι μισός απ' την τιμή της πλήρους κλίμακας κατά τη διάρκεια δοκιμής ενός μοντέλου.

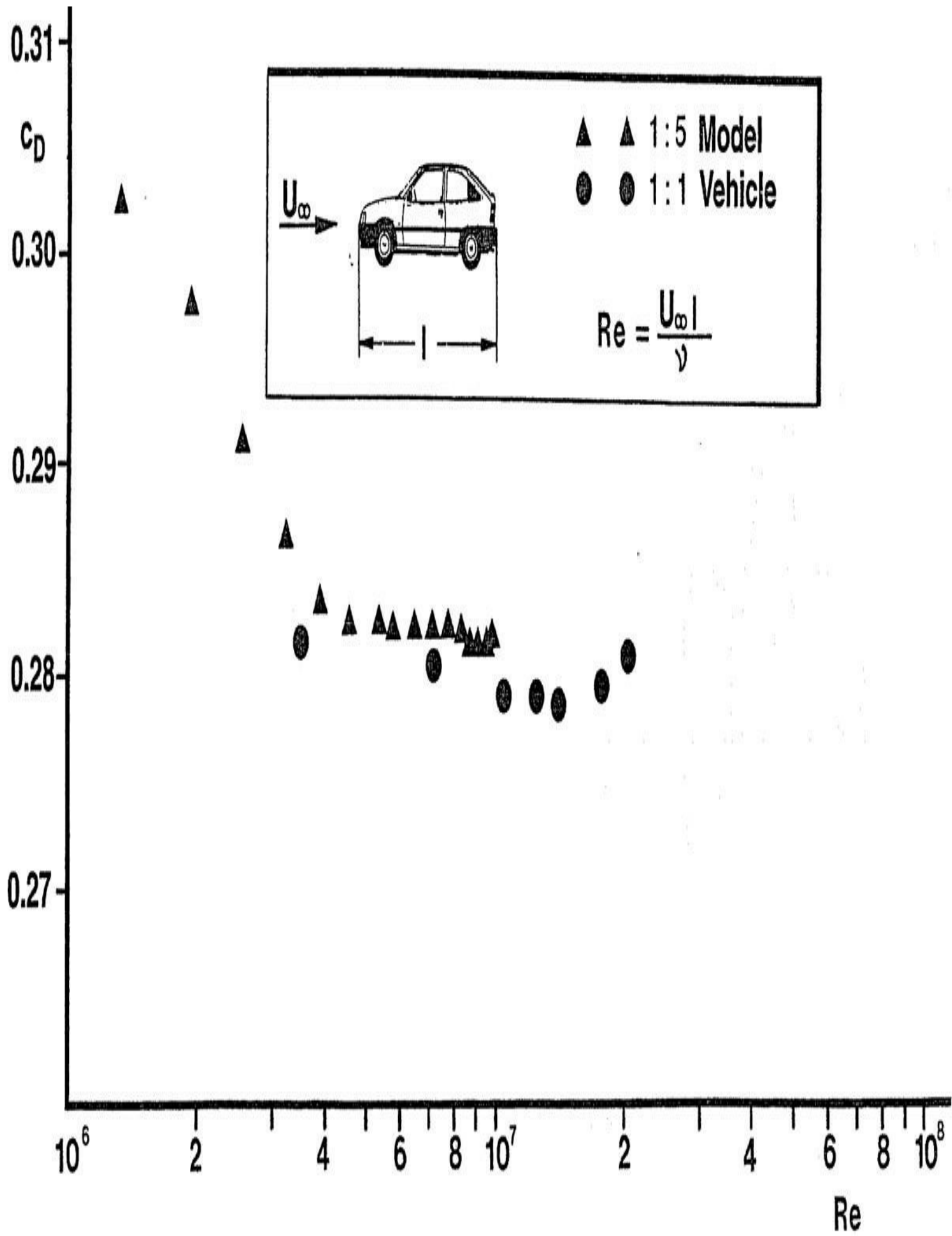
Υπάρχουν δυο λόγοι για τους οποίους είναι δύσκολο να διατηρήσει κανείς τον πραγματικό αριθμό Reynolds όταν μια κλίμακα μοντέλου είναι μικρή. Αρχικά, η μέγιστη ταχύτητα αεροσήραγγας είναι περιορισμένη: δεύτερον, με μη αεροδυναμικά σώματα παρατηρούνται οι επιδράσεις του αριθμού Mach ακόμα και σε χαμηλή ταχύτητα αέρα.

Για να αναγνωρίσει κανείς τις επιδράσεις του αριθμού Reynolds, τα οχήματα δοκιμάζονται πάνω σε μια σειρά αριθμών Reynolds. Για να αποφευχθούν τα λάθη εξαιτίας λανθασμένων αριθμών, τα δεδομένα μειωμένης κλίμακας μεταφέρονται στον αριθμό Reynolds πλήρους κλίμακας. Ένα τυπικό παράδειγμα επιβατικών αυτοκινήτων εφαρμόζεται απ' τον H. –J. EMMELMANN (βλ. εικόνα 1.58). Για υψηλούς αριθμούς Reynolds ο συντελεστής αντίστασης είναι σχεδόν σταθερός, και οι τιμές για το όχημα πλήρους κλίμακας είναι ελαφρώς πιο χαμηλές από ένα μοντέλο με κλίμακα 1:5. Ωστόσο, στο  $Re < 4 \times 10^6$  παρατηρείται μια εμφανή επιρροή του αριθμού Reynolds. Αυτό συμβαίνει γιατί τα μεμονωμένα συστατικά ενός μοντέλου, όπως για παράδειγμα οι τροχοί, περνάν μέσα απ' τον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.59, και η άνωση και ο συντελεστής αντίστασης του τροχού αυξάνεται δραστικά στο  $Re_d = 2 \times 10^5$ , όπου ο αριθμός Reynolds  $Re_d$ , διαμορφώνεται με διάμετρο τροχού  $d$ . Επειδή η διάμετρος του τροχού  $d$  είναι μικρότερη απ' το μήκος του αυτοκινήτου σύμφωνα με μια σειρά προτεραιότητας,

αυτό αντιστοιχεί σε ένα αριθμό Reynolds  $Re_1$  διαμορφωμένος με ένα μήκος αυτοκινήτου 1 από  $2 \times 10^6$ , το οποίο βρίσκεται ακριβώς στη σειρά όπου η αύξηση της μειωμένης κλίμακας του μοντέλου γίνεται σημαντική.

Η παραβίαση του νόμου ομοιότητας του αριθμού Reynolds μπορεί να προκαλέσει σημαντικά λάθη. Αυτό απεικονίζεται στα δύο παραδείγματα της εικόνας 1.60. Και στις δύο περιπτώσεις ένα βαν σε σχήμα κιβωτίου ήταν το αντικείμενο δοκιμής και η λεπτομέρεια που ανακαλύφθηκε ήταν η ακτίνα ανάμεσα στα μπροστινά και τα πλευρικά τοιχώματα. Η «βέλτιστη» ακτίνα του βαν B (μια αρχική εκδοχή του φορτηγού LT της Volkswagen) ήταν τόσο μεγάλη που κρίθηκε μη αποδεκτή απ'τον Styling. Ωστόσο, η βέλτιστη ακτίνα που αργότερα προέκυψε από δοκιμές με οχήματα πλήρους κλίμακας ήταν πολύ μικρότερη, και έγινε αποδεκτή απ'τη Styling. Ένα συγκριτικό αποτέλεσμα επιτυγχάνθηκε με ένα βαν A, η δεύτερη γενιά βαν της Volkswagen.

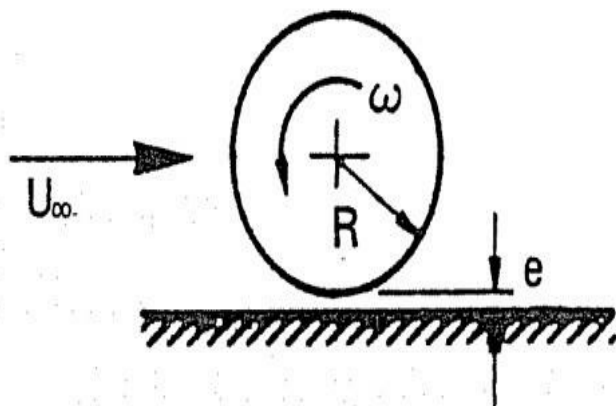






Εικ. 1.58 Συντελεστής αντίστασης  $c_D$  vs αριθμού *Reynolds* για ένα μοντέλο κλίμακας 1:5 και ένα πραγματικό αυτοκίνητο, μετά τον H.-J. EMMELMANN.





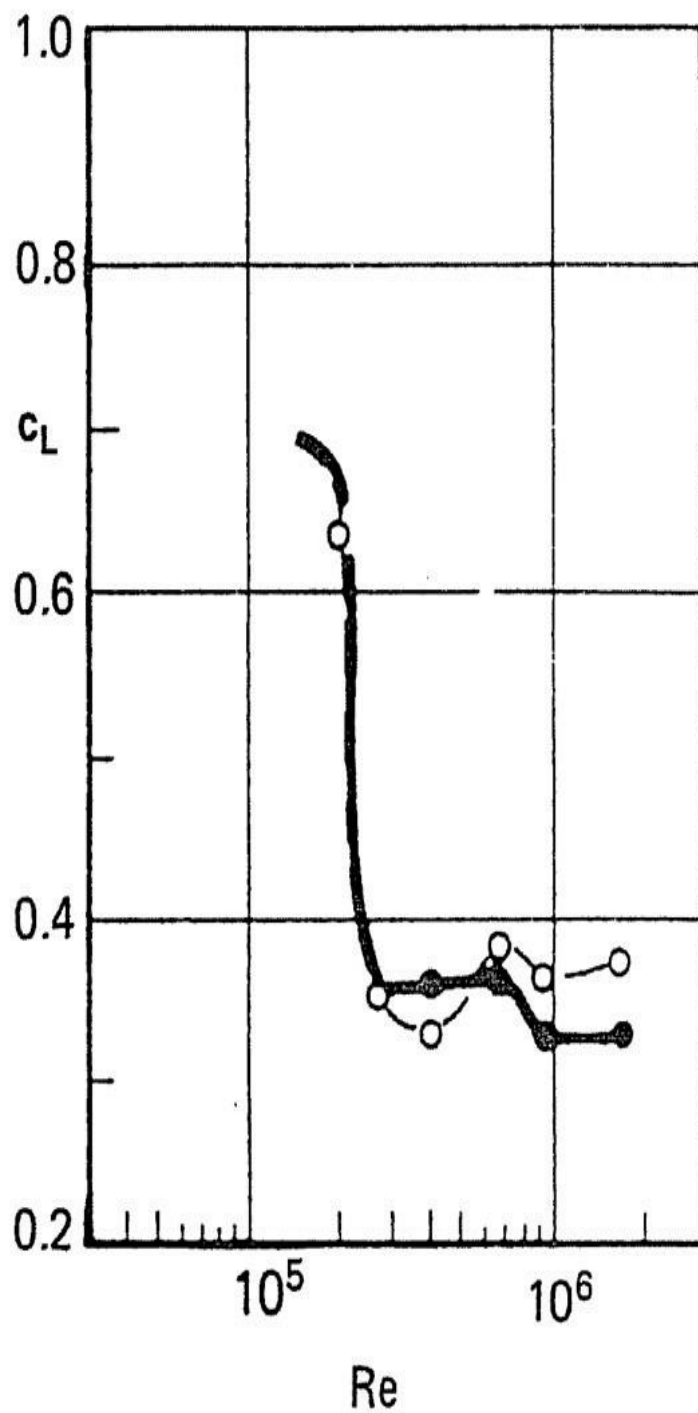
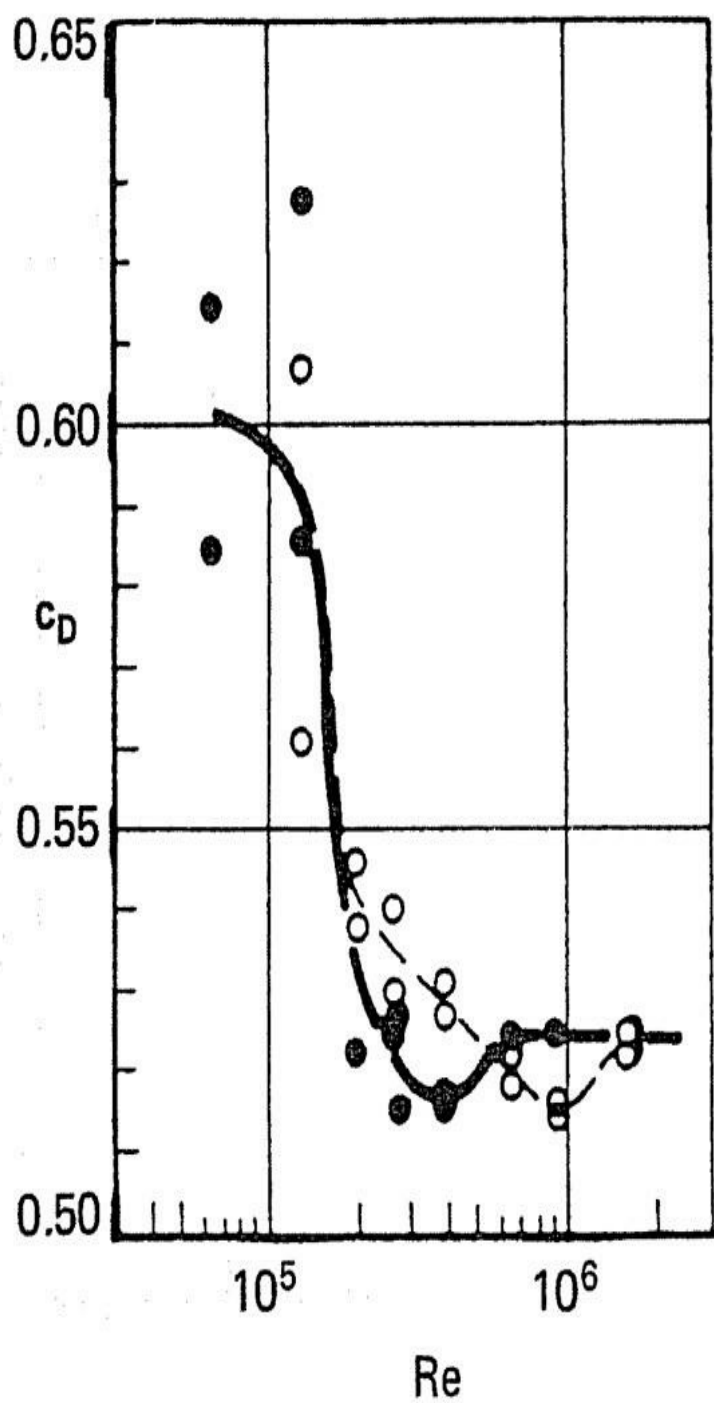
$$Re = \frac{U_\infty \cdot 2R}{\nu}$$

$$\omega = 0$$

$$e = 0$$

● Standard rim

○ Faired rim



Εικ. 1.59 Συντελεστές αντίστασης  $c_D$  και άνωσης  $c_L$  ενός ελεύθερου τροχού VS αιθμού

*Reynolds Re*, μετά τον A. GOGOTTI.

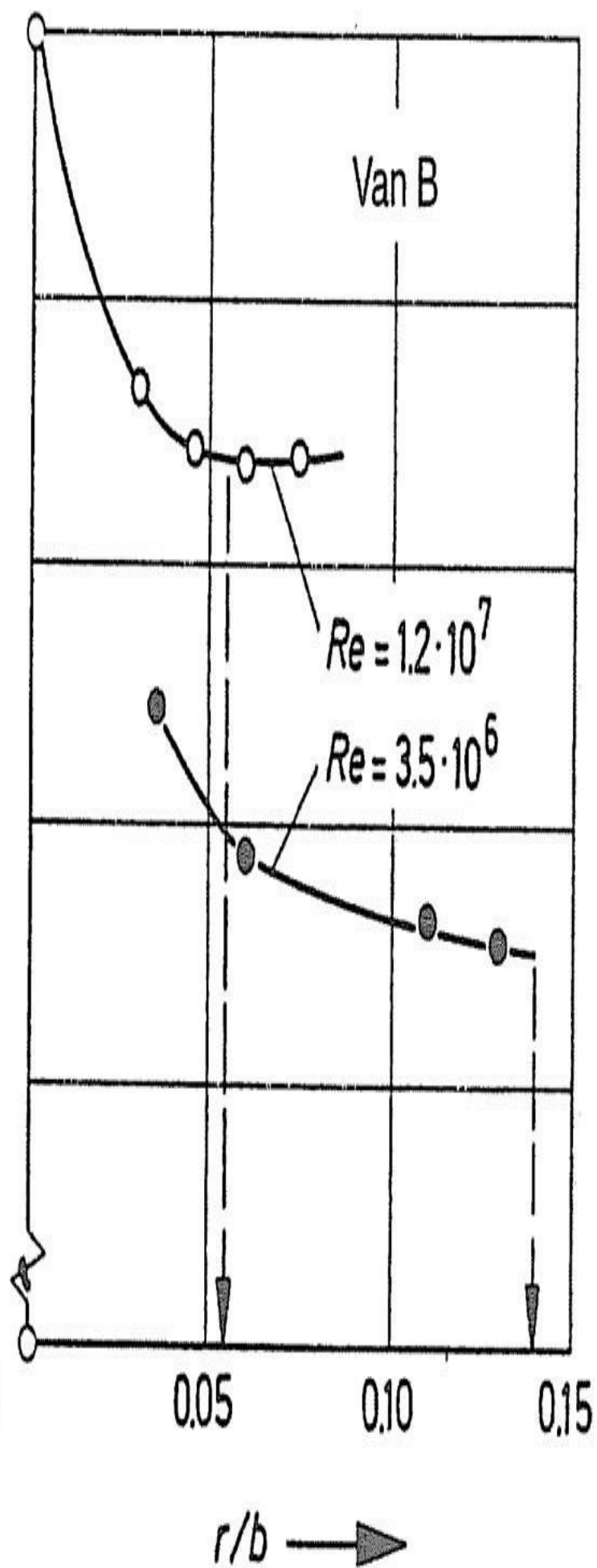
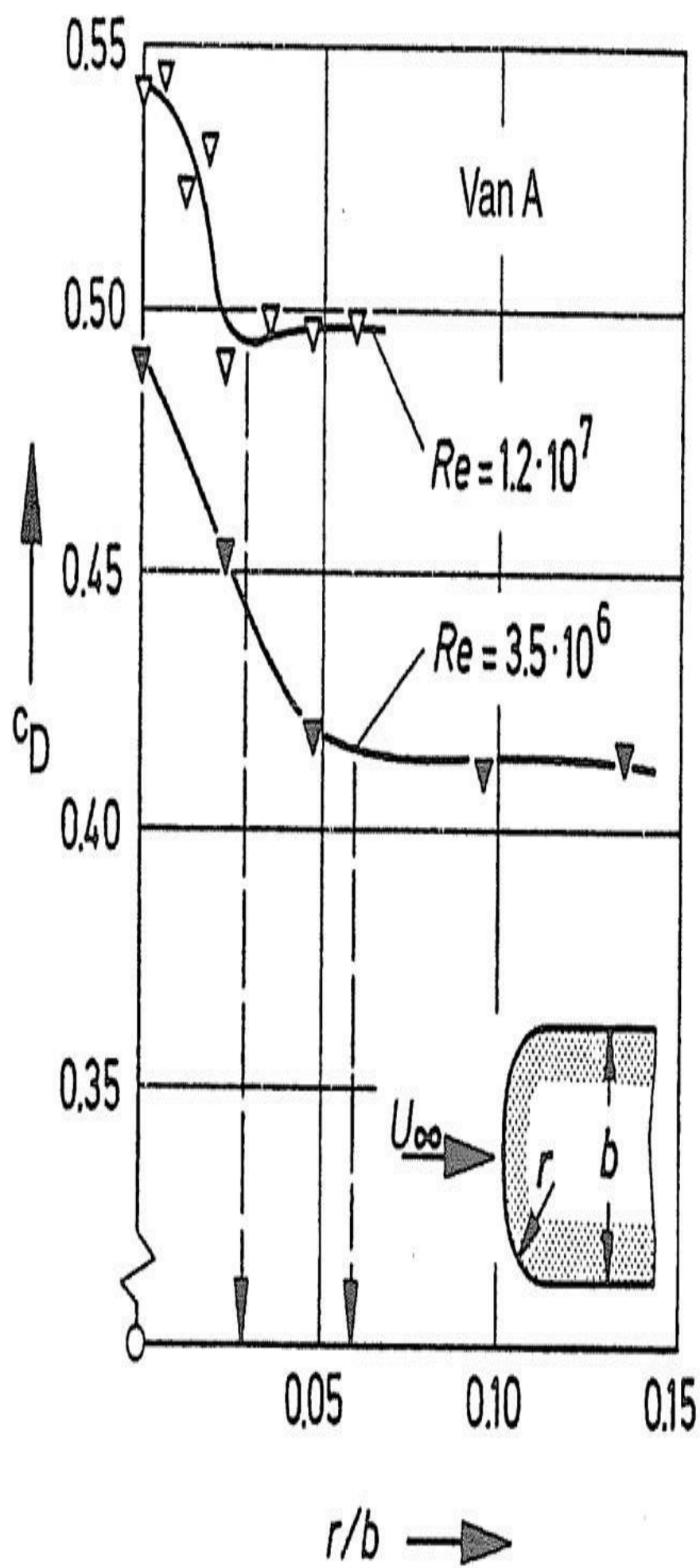
Κατά παράδοση, το σχέδιο της μπροστινής και πίσω πλευράς ήταν στρόγγυλο.

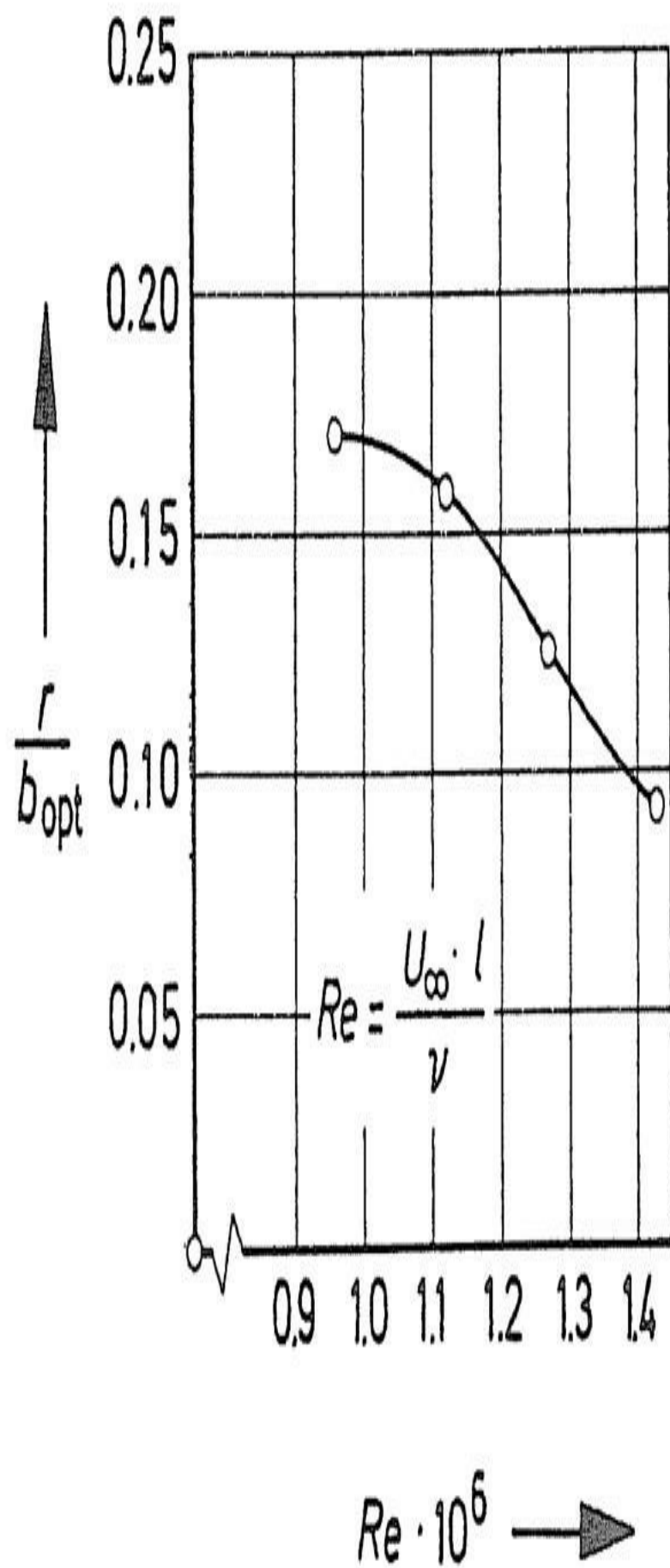
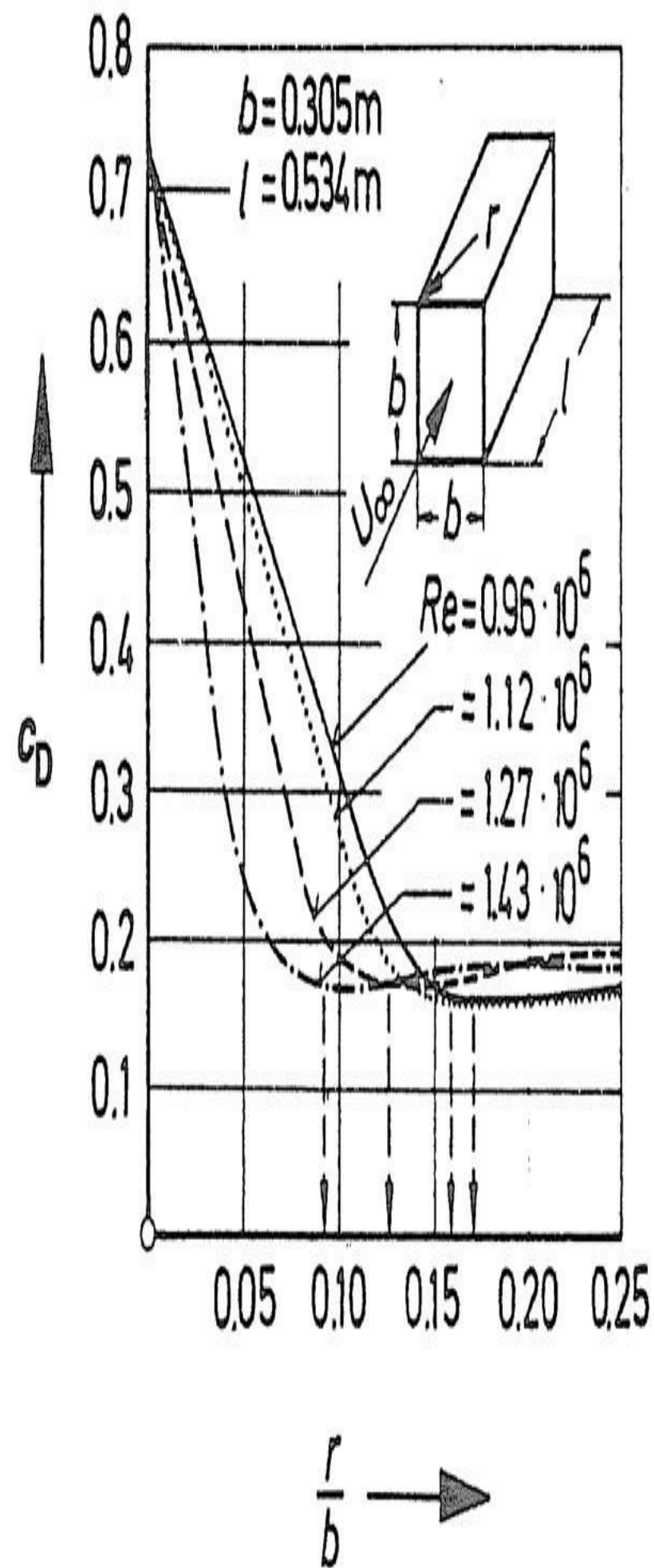
Επομένως, δεν υπήρξε επίδραση αριθμού Reynolds κατά τη διάρκεια της εξέλιξης

αυτού του οχήματος. Αυτό “ανακαλύφθηκε” πολύ αργότερα όταν οι δοκιμές της

Εικόνας 13.60 πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εξέλιξης του LT.





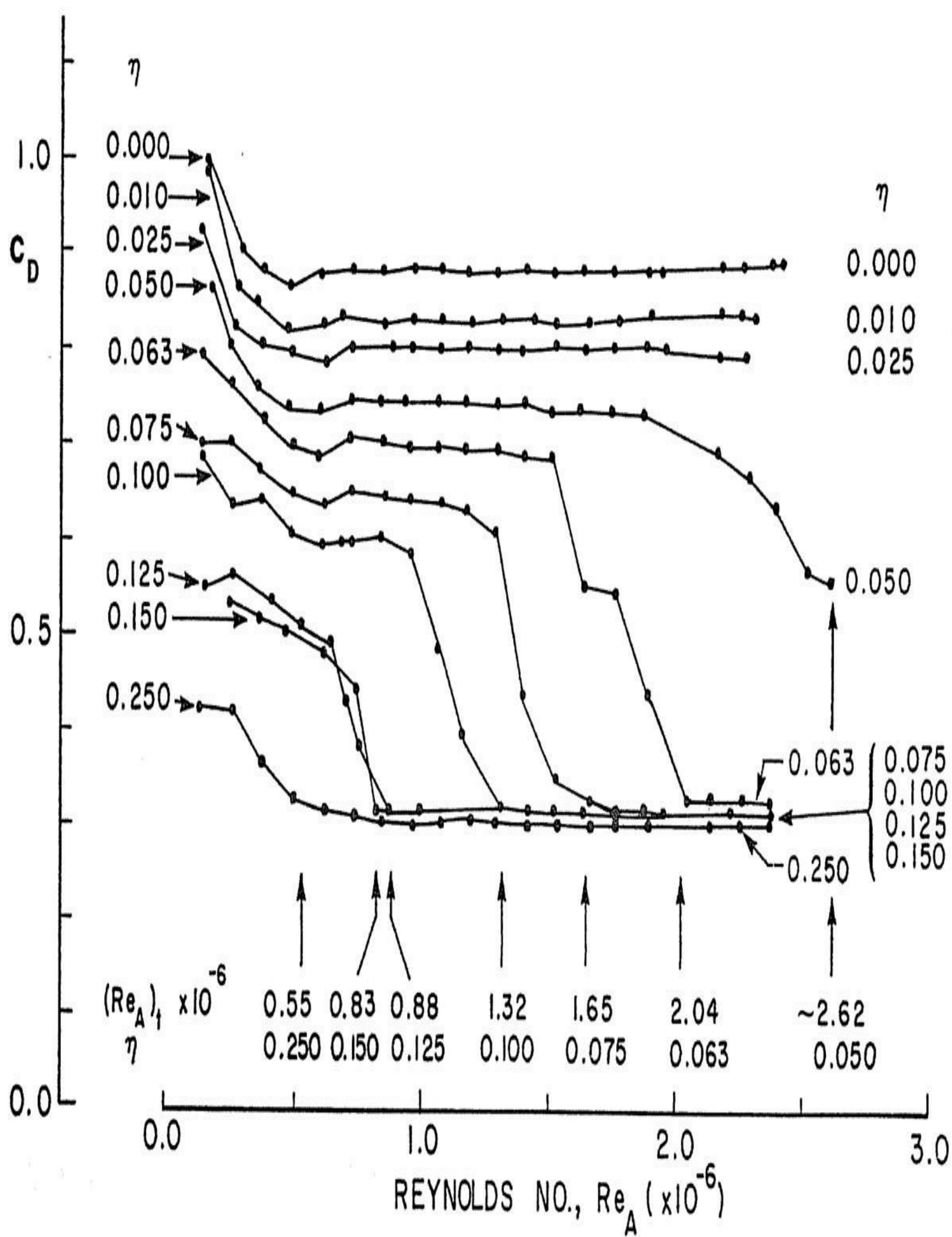


Εικ. 1.60 Επιρροή του αριθμού Reynolds στη «βέλτιστη» ακτίνα της μεταφοράς απ' την μπροστινή πλευρά προς τα πλευρικά τοιχώματα δύο διαφορετικών βαν, μετά τον W.-H. HUCHO.

Η επιρροή του αριθμού Reynolds στη βέλτιστη ακτίνα, σχετικά με τις “αιχμές” των ορθογώνιων κιβωτίων, ήταν γνωστή για πολύ καιρό αλλά απλώς παραβλέπονταν. Από μετρήσεις του F. W. PAWLOWSKI, προέκυψε η σχέση που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.61. Πιο ξεκάθαρα, η βέλτιστη ακτίνα μιας αιχμής, στην αδιάστατη μορφή  $r/b$ , μειώνεται σχεδόν γραμμικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds. Αργότερα, αυτή η απλή σχέση γενικεύθηκε περαιτέρω απ' τον K.R. COOPER. Τα ευρήματα του COOPER ήταν πολύ χρήσιμα και σχετικά με το σχέδιο της μπροστινής και πίσω πλευράς οχημάτων σε σχήμα κιβωτίου και στο σχεδιασμό πειραμάτων για μοντέλα μειωμένης κλίμακας.







*Εικ. 1.61 Επιρροή του αριθμού Reynolds στη «βέλτιστη» ακτίνα της μπροστινής πλευράς ενός κύβου, μετά τον , μετά τον W.-H. HUCHO.*

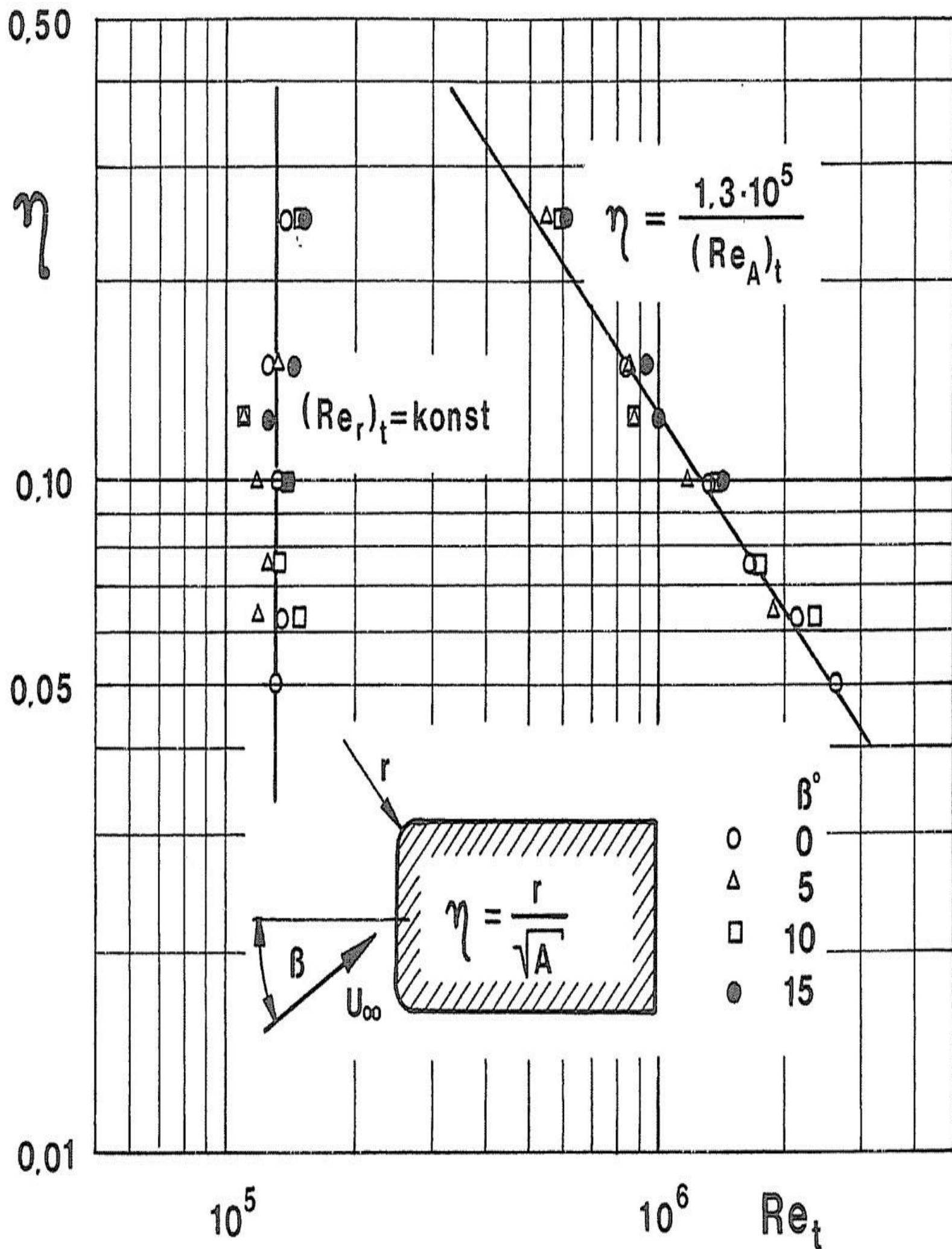
Ο COOPER ερεύνησε το συντελεστή αντίστασης  $c_D$  ενός παραλληλεπιπέδου κοντά στο έδαφος των οποίων οι αιχμές έχουν στρογγυλοποιηθεί με προσαιξήσεις: τα αποτελέσματά του φαίνονται στην εικόνα 1.62. Η παράμετρος των μεμονωμένων καμπύλων είναι η αδιάστατη ακτίνα  $\eta = r/\sqrt{A}$ , όπου  $A$  είναι η μπροστινή περιοχή του σώματος. Οι καμπύλες είναι όμοιες με τη γνωστή σχέση της αντίστασης  $vs$  του αριθμού Reynolds για έναν κύλινδρο (και μια σφαίρα).

*Εικ. 1.62 Επιρροή του αριθμού Reynolds στο συντελεστή αντίστασης  $c_D$  για διάφορες ακτίνες στα άκρα του κύβου, μετά τον K.R. COOPER .*

Η εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι γνωστή. Για μικρές (αδιάστατες) ακτίνες, η ροή διαχωρίζεται στις μπροστινές αιχμές (ανεξαρτήτως του αριθμού Reynolds) και έτσι η αντίσταση είναι υψηλή. Για μέτριες ακτίνες, η ροή ακόμα διαχωρίζεται στις αιχμές αλλά επανασυνάπτεται κατά τη διάρκεια της καθοδικής ροής: η αντίσταση αρχίζει να αυξάνεται. Με τον αυξανόμενο αριθμό Reynolds η θέση της επανασύναψης κινείται ανοδικά, και τελικά ο διαχωρισμός της ροής μειώνεται. Αυτή η ακτίνα ονομάζεται “βέλτιστη” για το συγκεκριμένο αριθμό Reynolds . Αν η ακτίνα αυξηθεί περαιτέρω σ’ αυτόν τον αριθμό Reynolds τότε η αντίσταση δε συνεχίζει να μειώνεται.

Αν οι βέλτιστες ακτίνες  $\eta_{opt}$  συσχετιστούν με τους συγγενείς “κρίσιμους” αριθμούς Reynolds, σύμφωνα με την εικόνα 1.62, τότε παρατηρείται μια καθολική σχέση. Στην εικόνα 1.63 καταρτίζεται με δύο τρόπους. Αν η τετραγωνική ρίζα της μπροστινής





περιοχής χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τον αριθμό Reynolds, οι λογαριθμικές συντεταγμένες απεικονίζονται από τη κεκλιμένη γραμμή που βρίσκεται στο δεξί μισό του διαγράμματος. Αν η ίδια η βέλτιστη ακτίνα χρησιμοποιηθεί ως το χαρακτηριστικό μήκος για τη διαμόρφωση του αριθμού Reynolds, η ακόλουθη σταθερή έχει ως αποτέλεσμα:

$$U_{\infty} \cdot r_{opt}$$

$$\text{Re}(r/b)_{opt} =$$

$$\nu$$

$$= 1.3 \times 10^5$$

Περαιτέρω αποτελέσματα απ' τον COOPER [1.81] επιβεβαιώνουν αυτό: άλλα σχετικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, που συμπεριλαμβάνουν πειράματα με πραγματικά οχήματα, καταλήγουν στην ίδια σταθερή. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή  $1.3 \times 10^5$  είναι ελαφρώς μικρότερη απ' τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για σφαίρες και κυλίνδρους όταν ο Reynolds αριθμός τους διαμορφώνεται με την ακτίνα, παρά με τη διάμετρο.

*Εικ. 1.63 «Βέλτιστη» ακτίνα των άκρων VS του κρίσιμου αριθμού Reynolds  $Re$ , μετά τον K.R. COOPER.*

Έτσι, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο μηχανισμός διαχωρισμού και η επίδραση του αριθμού Reynolds είναι τα ίδια όπως για ένα παραλληλεπίπεδο με στρογγυλοποιημένες αιχμές. Σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds, το οριακό στρώμα, κατά τη διάρκεια της ανοδικής πορείας της στρογγυλοποιημένης αιχμής, είναι

γραμμικό, και ένας γραμμικός διαχωρισμός εμφανίζεται κατα 90% πάνω στην αιχμή.

Έχοντας υπόψιν ότι το παραλληλεπίπεδο δεν είναι αρκετά μακρύ, η ροή

επανακολλάται στις πλευρικές επιφάνειες αφού έχει γίνει ταραχώδης πάνω σε μια

φυσαλίδα διαχωρισμού. Με τον αυξανόμενο αριθμό Reynolds η γραμμή της

επανακόλλησης κινείται ανοδικά. Για ένα μεγάλο αριθμό Reynolds η μεταφορά από

πλευρικό σε ταραχώδες λαμβάνει χώρα *πριν* απ' το να φτάσει η ροή στις αιχμές.

Έπειτα περνάει μέσα από τις αιχμές μια ροή με ταραχώδες οριακό στρώμα και χωρίς

διαχωρισμό. Για το παραλληλεπίπεδο υπάρχει ένα μονοπάτι ροής ανάμεσα στο

σημείο στασιμότητας και στην αρχή της αιχμής, ενώ αυτό δεν υπάρχει στην

αντίστοιχη ακτίνα του κυλίνδρου που είναι ίση με την ακτίνα αιχμής. Επομένως ο

αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από την τιμή για έναν κύλινδρο.

Από την εικόνα 1.63 μπορεί επίσης να βγει το συμπέρασμα ότι για τη βελτιστοποίηση

των μοντέλων μειωμένης κλίμακας ο αριθμός Reynolds  $Re_A$  (διαμορφωμένος με μια τετραγωνική ρίζα της μπροστινής περιοχής) πρέπει να είναι το λιγότερο  $Re_A = 2 \times 10^6$ .

Και αυτό γιατί οι αδιάστατες ακτίνες στη σειρά του  $r/b = 0.05$  είναι σχετικές για

πραγματικά οχήματα. Ο ελάχιστος αριθμός Reynolds  $Re_A = 0.7 \times 10^6$  που προτείνεται

στην SAE J1252 είναι πολύ χαμηλός για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Απ' την

άλλη πλευρά, αφού το μήκος του αυτοκινήτου είναι τρεις φορές η τετραγωνική ρίζα

της μπροστινής του περιοχής,  $Re_A = 2 \times 10^6$  σημαίνει  $Re_A = 6 \times 10^6$ . Με μήκος 1m, το

οποίο είναι τυπικό για μοντέλα κλίμακας ενός τετάρτου, αυτό καταλήγει σε μια

απαιτούμενη ταχύτητα ανέμου  $U_\infty = 90 \text{ m/s}$  ( $\equiv 324 \text{ km/h} \approx 203 \text{ mph}$ ). Όπως θα

παρουσιαστεί αργότερα, αυτό είναι πολύ υψηλό γιατί έπειτα παρατηρούνται

επιδράσεις συμπίεσης.

Η εικόνα 1.63 εφαρμόζεται άμεσα σε οχήματα πλήρους κλίμακας. Με αυτό, η

επίδραση του αριθμού Reynolds στη βέλτιστη ακτίνα των αιχμών μπορεί να αξιοποιηθεί. Τα φορτηγά και τα λεωφορεία είναι ένα παράδειγμα. Οι σχεδιαστές προτιμούν τις αιχμές να είναι όσο το δυνατό περισσότερο “κοφτερές”. Για τα βαρυά εμπορικά οχήματα η αεροδυναμική αντίστασης σε σύγκριση με την αντίσταση κύλισης γίνεται σχετική μόνο πάνω απ’ τη δοσμένη ταχύτητα οδήγησης, ας πούμε 50km/h (31mph) . Επομένως, μόνο για ταχύτητες υψηλότερες από αυτό πρέπει μια ακτίνα να είναι βέλτιστη. Ο διαχωρισμός της ροής σε χαμηλές ταχύτητες- οπότε και σε υψηλό συντελεστή αντίστασης- δεν είναι επιβλαβής γιατί έτσι, η αντίσταση αεροδυναμικής είναι χαμηλή. Από την άλλη πλευρά, οι συνθήκες εκτροπής απαιτούν μια μεγαλύτερη βέλτιστη ακτίνα.

Η κωνικότητα ενός σώματος στην πίσω πλευρά είναι πολύ ευαίσθητη στον αριθμό Reynolds γιατί είναι ευαίσθητος και ο διαχωρισμός ροής. Σε υψηλότερους αριθμούς Reynolds η ροή μπορεί να αντέξει δυνατότερους κώνους χωρίς διαχωρισμό γιατί τα ταραχώδη οριακά στρώματα μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες δυσμενείς κλίσεις πίεσης με υψηλότερους αριθμούς Reynolds.

Τα παραπάνω σχόλια σχετικά με δοκιμές μικρής κλίμακας φαίνεται να διαψεύδουν τη δήλωση ότι τα αποτελέσματά τους συμφωνούν με τα δεδομένα πλήρους κλίμακας.



Ωστόσο, η απόδειξη που το τεκμηριώνει πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά. Η ανάπτυξη της πίσω αεροτομής είναι το βασικό σημείο. Ο G. M. LE GOOD ερεύνησε την επίδραση αυτής της συσκευής στην αντίσταση ενός αυτοκινήτου. Τα δεδομένα κλίμακας ενός τετάρτου κατέληξαν σε συμφωνία με την πλήρη κλίμακα, και έτσι έφτασε στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη συσκευή μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε μικρή κλίμακα. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με την εμπειρία που παραθέτει ότι οι λεπτομέρειες των κοφτερών αιχμών δεν είναι ευαίσθητες στις επιδράσεις του αριθμού Reynolds. Ωστόσο, είναι ακατάλληλο να επεκτείνει κανείς την απόδειξη αυτή σε μια γενικευμένη δήλωση μιας “καλής συμφωνίας” - την οποία δεν έκανε ο LE GOOD, αλλά την έκαναν άλλοι ερευνητές.

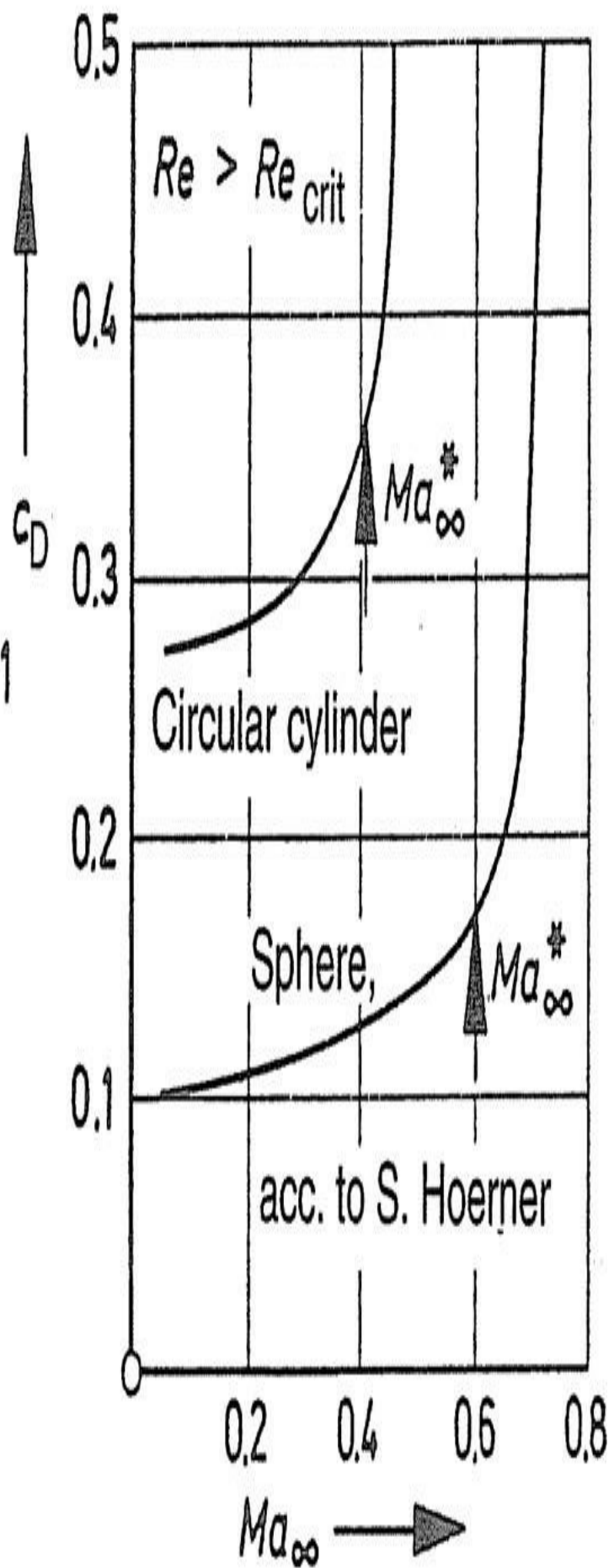
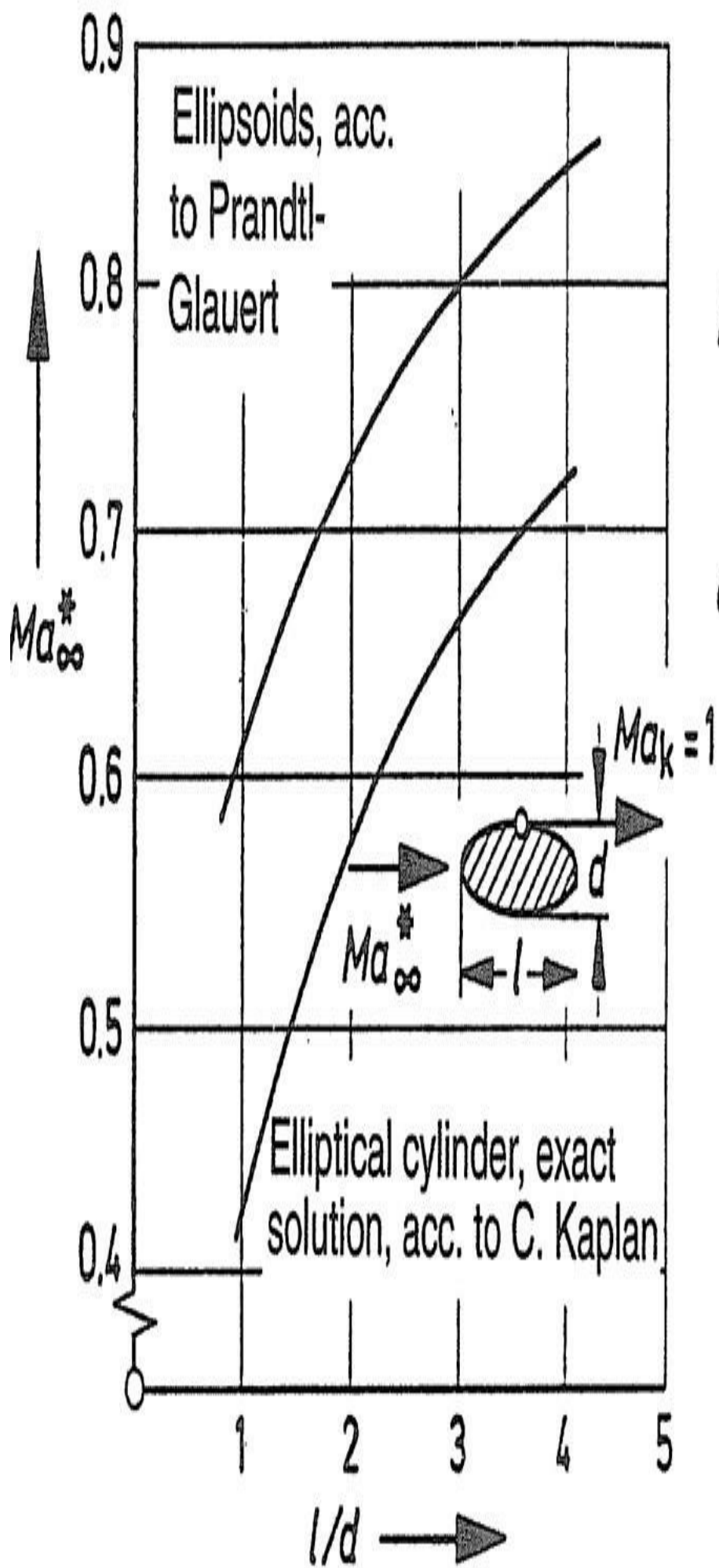
Τα πλεονεκτήματα της εργασίας με μοντέλα μειωμένης κλίμακας γίνονται αισθητά μόνο αν τα αποτελέσματα που θα επιτυγχανθούν με αυτά μπορούν να μεταφερθούν σε πλήρη κλίμακα. Υπάρχουν δύο μονοπάτια που οδηγούν σ’ αυτόν το στόχο. Το πρώτο φαίνεται να είναι απλό: πρέπει να δοθεί σημασία στο νόμο του Reynolds. Το δεύτερο είναι πιο περίπλοκο: Με τη χρήση “άλλων” επιδράσεων, μπορεί να “προσομοιωθεί” ένας υψηλότερος αριθμός Reynolds.

Απ’ την εξίσωση (1.11) ακολουθεί ότι η μειωμένη κλίμακα των αριθμών Reynolds (ή τουλάχιστον συγκρίσιμη) η οποία ισούται με την πλήρη κλίμακα μπορεί να επιτυγχανθεί είτε με αρκετά μεγάλα μοντέλα είτε με αρκετά υψηλή ταχύτητα αέρα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όσο πιο πολύ μεγαλώνει ένα μοντέλο, τόσο το λιγότερο ελκυστικό γίνεται. Ωστόσο, η εναλλακτική για την αύξηση της ταχύτητας αέρα έχει και αυτή τους περιορισμούς της. Εξαιτίας της άμβλυνσης των οχημάτων και των δυνατών κοιλοτήτων τους, δημιουργούνται υψηλές τοπικές τιμές  $u/U_\infty$ . Όπως φαίνεται από τα παραδείγματα που καταρτίζονται στην εικόνα 1.64, τόσο τα μη

αεροδυναμικά σώματα όσο οι σφαίρες και οι κύλινδροι παρουσιάζουν την ήδη αυξανόμενη αντίστασή τους σε χαμηλούς αριθμούς Mach. Όπως είναι γνωστό, αυτή η αύξηση ταχύτητας γίνεται εξαιτίας της συμπίεσης του αέρα. Ο κρίσιμος αριθμός Mach, δηλαδή, ο αριθμός Mach της μη διανεμημένης ερχόμενης ροής, μειώνεται σε χαμηλότερες τιμές όταν αυξάνεται η άμβλυνση. Ο κανόνας της εμπειρικής μεθόδου, σύμφωνα με τον οποίο οι επιδράσεις συμπίεσης μπορούν να αγνοηθούν μέχρι τον αριθμό Mach,  $Ma_{\infty} = 0.3$ , δεν είναι έγκυρος για μη αεροδυναμικά σώματα. Το  $Ma_{\infty} = 0.2$  φαίνεται να είναι ένα πιο λογικό όριο. Επομένως, η ταχύτητα αέρα περιορίζεται στο  $U_{\infty} = 70 \text{ m/s}$ . Αν πρέπει να πληρείται, όπως συμπεραίνεται παραπάνω, το  $Re_1 = 6 \times 10^6$ , τότε η κλίμακα για μοντέλα επιβατικών αυτοκινήτων πρέπει να είναι μικρότερη από 1:3.

Ένα υψηλότερος αριθμός Reynolds μπορεί να προσομοιωθεί με δύο τρόπους. Και οι δύο έχουν την ίδια επίδραση αλλαγής του οριακού στρώματος από ελασματώδες σε ταραχώδες σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σύρμα ή μια ταινία από γυαλόχαρτο: η άλλη αυξάνει το επίπεδο διαταραχής της ερχόμενης ροής. Και τα δύο «κόλπα» εφαρμόζονται σε αεροναυπηγικές δοκιμές: οι ναυπηγοί προτιμούν το πρώτο. Αν και σπάνια χρησιμοποιούνται στην πειραματική αεροδυναμική οχημάτων, αξίζει να σημειωθούν κάποιες απ' τις ιδιορρυθμίες τους.





Εικ. 1.64 Κρίσιμος αριθμός  $Mach$   $Ma^*_{\infty}$  και συντελεστής αντίστασης  $c_D$  για

δυσδιάστατα και τρισδιάστατα σώματα των οποίων η άμβλυνση συγκρίνεται με αυτή των επιβατικών αυτοκινήτων, μετά τον W.-H. HUCHO.

Τα σύρματα χρησιμοποιήθηκαν σε πολύ μικρά μοντέλα της κλίμακας 1:24 απ' τον L.D. METZ και τον K. SENSENBRENNER. Ο K.R. COOPER, χρησιμοποίησε ταινίες γυαλόχαρτου σε παραλληλεπίπεδα, και φυσικά ο αριθμός Reynolds μειώθηκε.

Ωστόσο, για να εφαρμόσει κανείς αυτήν την τεχνική σε πειράματα ρουτίνας χρειάζονται συγκεκριμένες πληροφορίες: Ποια είναι η κατάλληλη τραχύτητα του γυαλόχαρτου, που πρέπει να τοποθετηθεί, κλπ;

Αντιθέτως, η τεχνική προσομοίωσης ενός υψηλότερου αριθμού Reynolds αυξάνοντας το επίπεδο στροβιλισμού της ερχόμενης ροής διευκρινίστηκε απ' τους

J.WIEDEMANN και B. EWALD έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε δοκιμές μοντέλων. Όπως συμπεραίνεται απ' τα πειράματά τους, ο ενεργός αριθμός Reynolds μπορεί να αυξηθεί από ένα συντελεστή δύο αριθμών με αυξανόμενο ισοτροπικό στροβιλισμό μιας καθορισμένης δομής.

Το φυσικό επίπεδο στροβιλισμού της αεροσήραγγας ( $Tu = 0.8\%$ ) ήταν παραπάνω από τριπλό (μέχρι  $2.8\%$ ) από οθόνες που τοποθετήθηκαν στην έξοδο του ακροφύσιου.

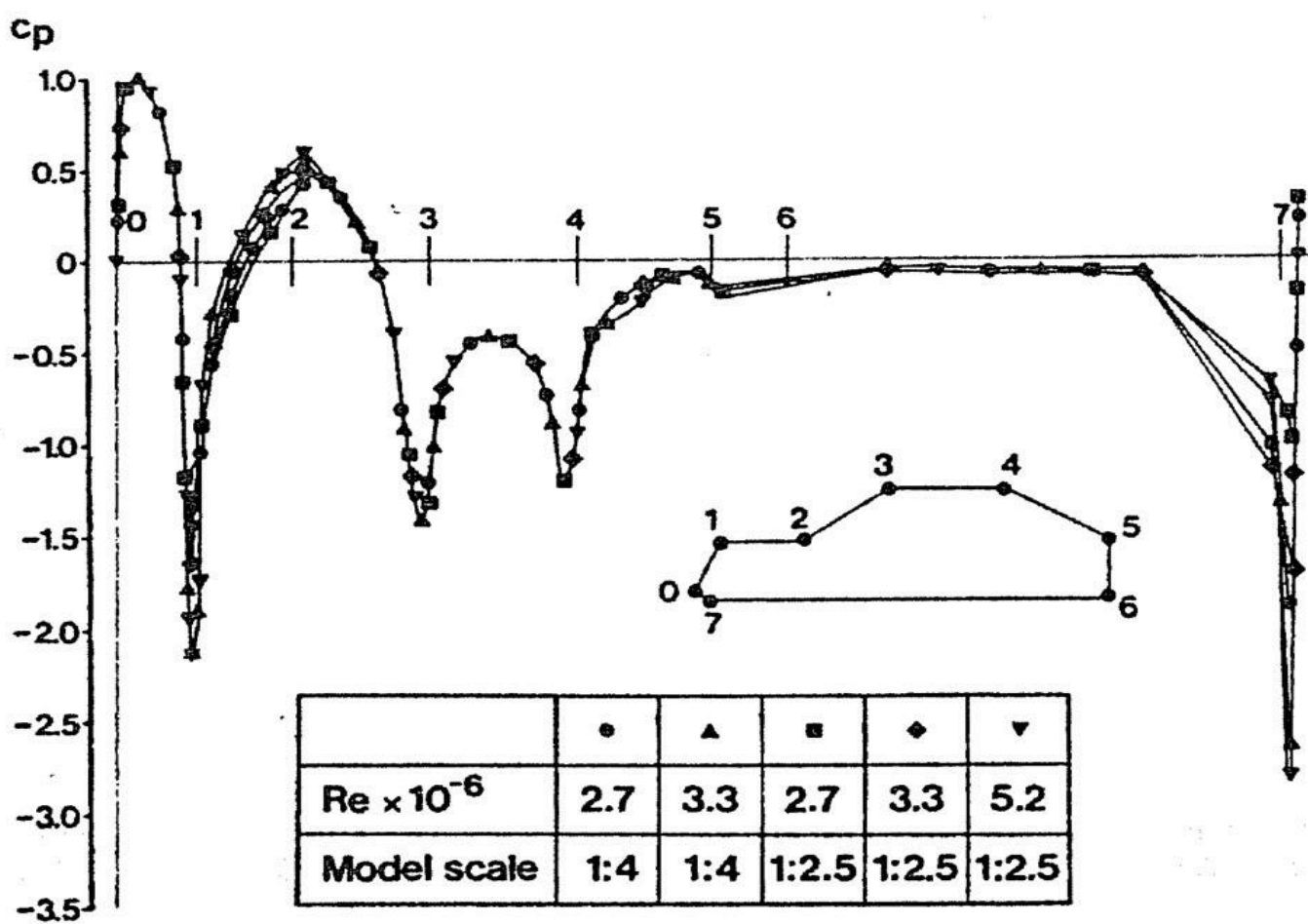
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.65 αυτό ήταν αρκετό για να μειωθεί η επιρροή του αριθμού Reynolds στην διανομή πίεσης. Η επίδραση του αριθμού Reynolds στην αντίσταση, η οποία είναι σημαντική για χαμηλό στροβιλισμό, σχεδόν εξαφανίστηκε με μεγαλύτερο επίπεδο στροβίλου. Ωστόσο, αυτή η τεχνική πρέπει να εφαρμοστεί με προσοχή. Ο τεχνητός στροβιλισμός φθείρεται καθώς περνάει απ' το μονοπάτι ροής.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το επίπεδο στροβιλισμού μειώνεται από  $2.8\%$  σε  $1\%$  πάνω από μια απόσταση  $1.7m$  (που είναι σχεδόν η φυσική τιμή για τη συγκεκριμένη αεροσήραγγα). Επομένως, πρέπει να επεκταθεί μια συγκεκριμένη απόσταση ανάμεσα

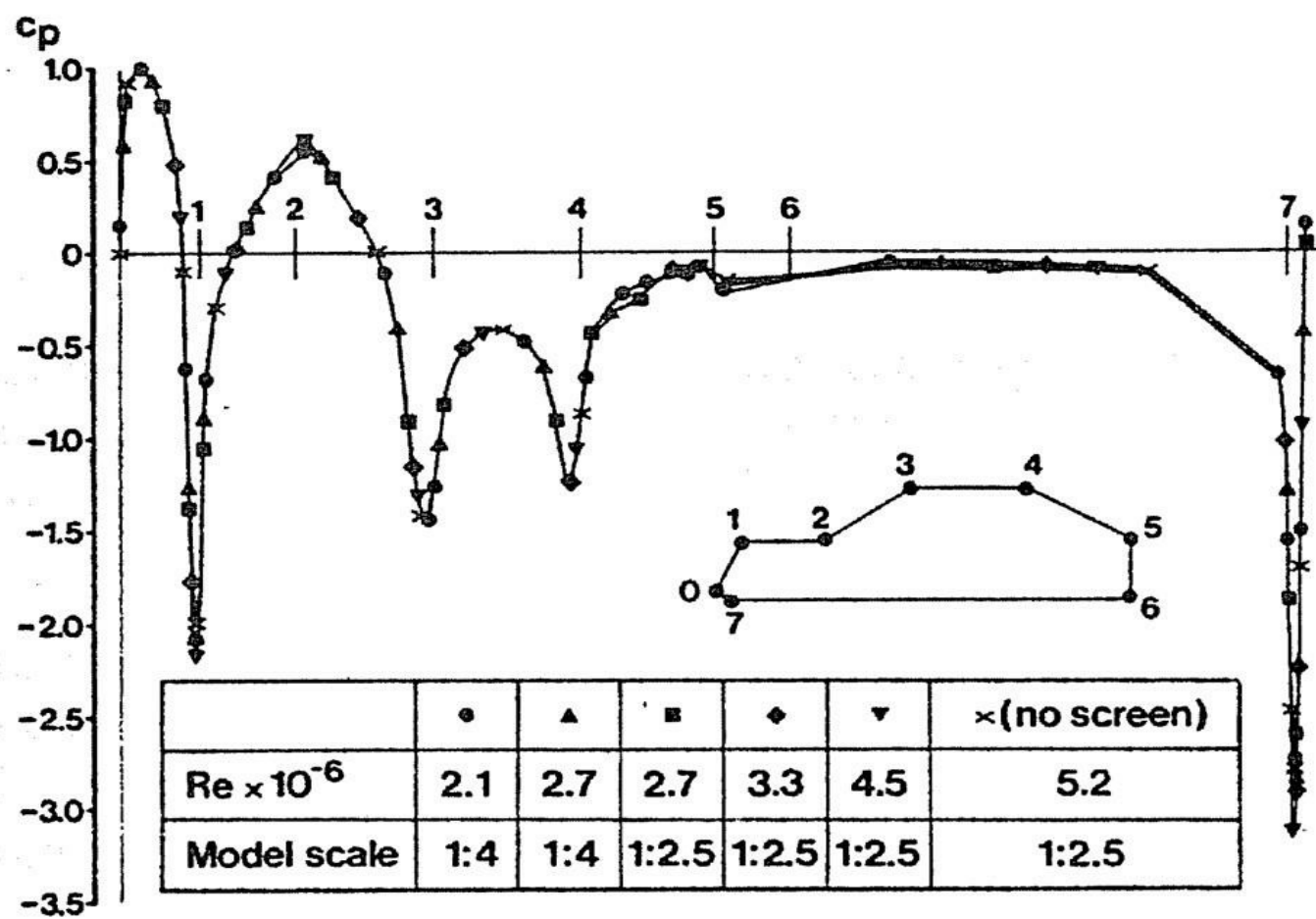
στο μπροστινό μέρος του μοντέλου και στις οθόνες κατά τη διάρκεια πειραμάτων.



a)



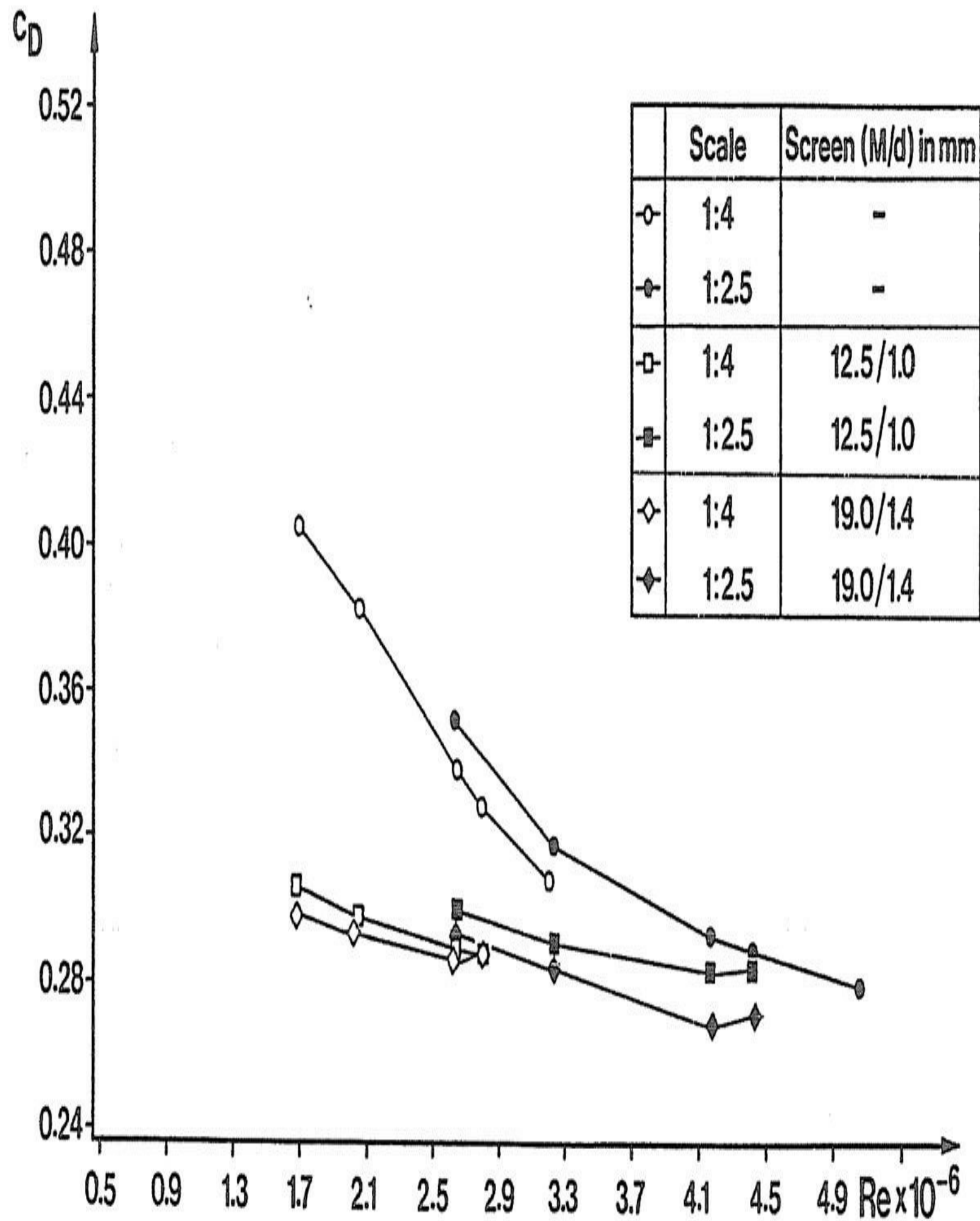
b)





Εικ. 1.65 Επίδραση του αριθμού Reynolds  $Re$  στη διανομή πίεσης ενός γενικού μοντέλου αυτοκινήτου: α) φυσικός στροβιλισμός  $Tu = 0.8\%$  b) τεχνητά υψωμένο επίπεδο στροβιλισμού  $Tu = 2.8\%$ , μετά τους J. WIEDEMANN και B. EWALD .





Εικ. 13.66 Μείωση της επίδρασης του αριθμού *Reynolds* στην αντίσταση του μοντέλου στην εικ. 13.62, μετά τους J. WIEDEMANN και B. EWALD [13.85].

## **1.5 Υπάρχουσες Αυτοκινητιστικές Αεροσήραγγες**

### **1.5.1 Ταξινόμηση των Εγκαταστάσεων Δοκιμών**

Οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν τις δικές τους εγκαταστάσεις για να παρουσιάσουν τα διάφορα είδη αεροδυναμικών και θερμικών δοκιμών, αλλά χρησιμοποιούν επίσης εγκαταστάσεις σε εξωτερικούς οργανισμούς σχετικά με την έρευνα οχημάτων και την αεροναυπηγική. Το ποια εγκατάσταση θα επιλεγεί εξαρτάται από το σκοπό της κάθε δοκιμής, τη διαθεσιμότητα σήραγγας, και το κόστος.

Ο πίνακας 1.2 περιέχει μια ποικιλία από υπάρχουσες εγκαταστάσεις δοκιμών. Οι αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας καταρτίζονται εξ ολοκλήρου, όσο υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες. Αντιθέτως, η συλλογή κλιματικών σήραγγων, κλιματικών θαλάμων με αέρα, και δυναμόμετρων με ανεμιστήρα δεν είναι ολοκληρωμένη: οι εγκαταστάσεις που παραθέτονται χρησιμεύουν ως παραδείγματα. Μόνο οι εγκαταστάσεις εκείνες που επιτρέπουν τις δοκιμές με οχήματα πλήρους κλίμακας λαμβάνονται υπόψιν, και επιπλέον, μόνο εκείνων των οποίων η διατομή τους είναι μεγαλύτερη από  $AN = 2m^2$ . Αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας και πολλά δυναμόμετρα με ανεμιστήρα δεν λαμβάνονται υπόψιν. Οι αναφορές που προστέθηκαν στον πίνακα –μια μόνο για κάθε εγκατάσταση– περιέχουν λεπτομερείς περιγραφές, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων και του εξοπλισμού του υπολογιστή.

Η εικόνα 1.67 δίνει μια εικονογραφημένη εντύπωση του εύρους μεγέθους αεροσήραγγας πλήρους κλίμακας. Χωρίς τη μέτρηση της Μεγάλης Εγκατάστασης Δοκιμών της Γερμανικής-Ολλανδικής αεροσήραγγας (DNW-LTF), γιατί η αρχική του χρήση ήταν για αεροναυπηγική. Η μεγαλύτερη διατομή (GM) είναι 6.6 φορές μεγαλύτερη απ' την μικρότερη (BMW Technik GmbH).

Ο κυριότερος λόγος για την ποικιλία του μεγέθους είναι το φάσμα των επιθυμητών δοκιμών. Η μεγάλη αεροσήραγγα της GM αφιερώθηκε σε ένα ολόκληρο πρόγραμμα οχήματος αυτής της εταιρίας, με το εύρος μεγέθους να αρχίζει από μικρά επιβατικά αυτοκίνητα μέχρι φορτηγά και λεωφορεία. Αντιθέτως, οι συγκριτικά μικρές αεροακουστικές αεροσήραγγες της BMW Technik GmbH αφιερώθηκαν μόνο για επιβατικά αυτοκίνητα και μηχανές. Ένας άλλος λόγος για τη διαφορά μεγέθους στην αεροσήραγγα είναι ο τύπος του τμήματος δοκιμής. Εξαιτίας της σπουδαιότητας των απαιτούμενων διορθώσεων (βλ. μέρος 1.3.3) το κλειστό τμήμα δοκιμής χρειάζεται μεγαλύτερη διατομή από ένα ανοιχτό.

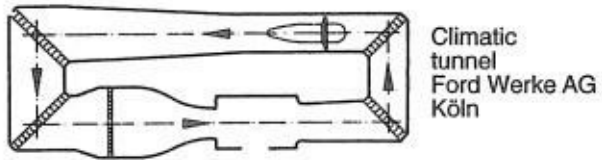
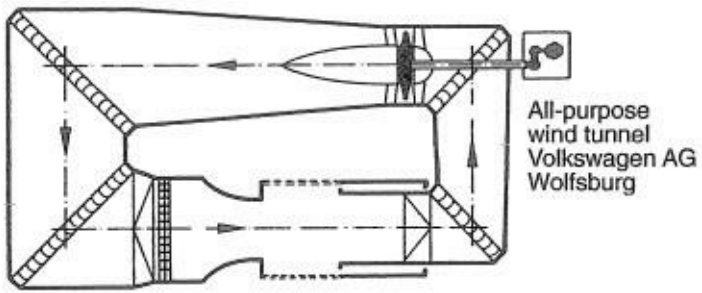
Οι περισσότερες απ' τις αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας είτε με ανοιχτό τμήμα δοκιμής ή με διαμηκή τοιχώματα που χτίστηκαν στο πρόσφατο παρελθόν, έχουν μια διατομή πίδακα γύρω στο  $AN = 25m^2$ .

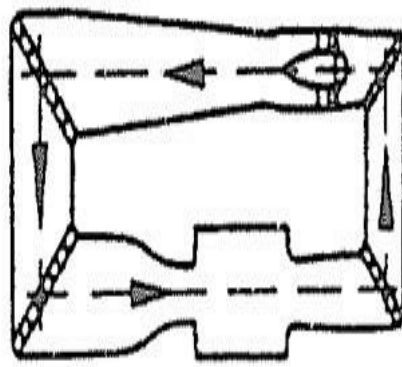


Company	$A_N$ (m <sup>2</sup> )	L (m)	$U_{max}$ (km/h)	Test section	$\kappa$	Type	Fan power (kW)	Reference No.
DNW-LTF	90.25 48.0	15.0 16.0	220 400	closed	4.8 9.0	G	12700	[13.108]
General Motors	56.16	21.3	240	closed	5.0	G	2950*	[13.109]
Volkswagen	37.5	10.0	180	open	4.0	G	2600	[13.110]
Lockheed-Georgia	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 15.0	12.0	190 270	open	6.43 12	G	2200	[13.116]
Volvo	27.06	15.8	200	slotted-wall	6.0	G	2300	[13.117]
Ford (Cologne)	24.0 8.6	10.0	182 298	open	4.0	G	1650 1960	[13.118]
Mazda	24.0	12.0	230	open closed	6.0	G	1600	[13.119]
Mitsubishi	24.0	12.0	216	open closed		G	2350	[13.119]
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 open	6.06	G	2200	[13.121]
WAZ (Togliatti)	22.3	12.0	224	slotted-wall open	6.06	G	2300	[13.122]
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 12.0	12.5 8.5	120 200	closed	3.66	G	1450	[13.119]
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]
JARI	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 4.3	8.6	75 195	open	2.45 6.6	G	500	[13.127]
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]

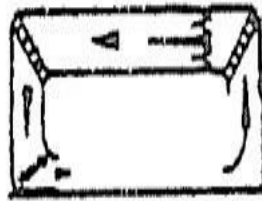
Company	$A_N$ ( $m^2$ )	L (m)	$U_{max}$ (km/h)	Test section	$\kappa$	Type	Fan power (kW)	Reference No.
Chrysler (climatic)	4.74	8.6	120	open	5.56	G	560	[13.130]
Opel (climatic)	4.30		120	closed		G	460	[13.131]
Mercedes-Benz (warm tunnel)	4.0	8	100	closed	2.56	G	340	[13.132]
MIRA (climatic)	4.0		150	open	6.3	G	400	[13.133]
	2.5		200		10.0			
Audi (climatic)	3.01	7.5	250	open	8.97	G	970	[13.134]
Audi (low noise)	2.0		230	open				[13.101]







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



Climatic chamber  
with fan  
Audi-NSU AG  
Ingolstadt

Εικ. 1.67 Σύγκριση μεγέθους πολλών βάσεων δοκιμής αφιερωμένες σε πολλούς τομείς αεροδυναμικής οχημάτων.

Σχετικά με τα εύρηματα του στρώματος του ακροφύσιου, το μήκος του τμήματος δοκιμής, η εσωτερική περιοχή του συλλέκτη, και ο όγκος του διάκενου που υπογραμμίζεται στο μέρος 1.2, μαζί με τις διορθώσεις που περιγράφονται στο Μέρος 1.3.3, μια αεροσήραγγα αυτού του μεγέθους φαίνεται να έχει τη βέλτιστη αναλογία

κόστους για αυτοκίνητα και ελαφριά φορτηγά. Όπως αναφέρθηκε στο μέρος 1.4.1, μια αεροσήραγγα με  $AN = 25m^2$  είναι επίσης κατάλληλη για την ανάπτυξη μεγάλων φορτηγών και λεωφορείων αν επιλεγθεί ένα μοντέλο κλίμακας 1:2.5. Ωστόσο, οι μικρορυθμίσεις των λεπτομερειών και ο τελικός έλεγχος μεγάλων εμπορικών οχημάτων πρέπει να παρουσιαστεί με ένα πρωτότυπο πλήρους κλίμακας σε μια μεγάλη αεροσήραγγα όπως την DNW-LTF.

Οι κλιματικές σήραγγες αφιερωμένες σε επιβατικά αυτοκίνητα και μικρά φορτηγά πρέπει να έχουν μια διατομή πίδακα 10-12m<sup>2</sup>. Αν στις δοκιμές που περιορίζονται σε αυτοκίνητα, το  $AN \approx 6m^2$  είναι σαφές. Ο R. BUCHHEIM, καθόρισε ότι το λάθος στην ισορροπία θέρμανσης σε σχέση με το δρόμο είναι λιγότερο από 5%. Σε κάθε περίπτωση, είναι κατάλληλο να αναπτύξει κανείς μια εμπειρική προσαρμογή ταχύτητας αέρα, είτε σε σύγκριση με μια μεγάλη αεροσήραγγα είτε με το δρόμο.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η προσαρμογή αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να ρυθμίσει τη σωστή ταχύτητα αέρα κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής, όχι για τη διόρθωση δεδομένων μετά την ολοκλήρωση της. Μια μετέπειτα διόρθωση δεν είναι πρακτική, γιατί η ταχύτητα αέρα και η περιμετρική ταχύτητα των κυλίνδρων του δυναμόμετρου πρέπει να είναι η ίδια. Το πως να παρουσιάσει κανείς αυτή τη βαθμονόμηση περιγράφεται με λεπτομέρειες απ' τον B. HAMSTEN και τον F.M. CHRISTENSEN.

Το ίδιο ισχύει και για τους κλιματικούς θαλάμους με αέρα. Οι εγκαταστάσεις αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως για κλιματικές δοκιμές. Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή γιατί η διαμόρφωση ροής γύρω από ένα όχημα μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτή του δρόμου (ή μιας μεγάλης αεροσήραγγας). Με τη βοήθεια ρυθμιζόμενων πτερυγίων

καθοδήγησης, η ροή αέρα γύρω από ένα αντικείμενο δοκιμής μπορεί να καθοδηγηθεί για να έρθει όσο το δυνατόν πιο κοντά στο πραγματικό πεδίο ροής.

Οι εγκαταστάσεις δοκιμών με διατομή πίδακα μικρότερη από  $4\text{m}^2$  αλλά χωρίς τη δυνατότητα αναπαραγωγής του κλίματος σε μια ευρεία γκάμα ονομάζονται *δυναμόμετρα με ανεμιστήρα* (ενίοτε, ονομάζονται και σήραγγες “εμφύσησης”). Για τις δοκιμές ψυγείου, είναι επαρκείς και ακόμα μικρότερες αεροδυνάμεις: το  $AN = 1.5\text{m}^2$  φαίνεται να είναι αρκετό. Η σύγκριση των διανομών πίεσης γύρω απ’ το μπροστινό μέρος του αυτοκινήτου της Εικόνας 1.68 παρουσιάζει μια ομοιότητα με την πραγματική ροή που είναι αρκετά καλή για αρχικές δοκιμές.

### 1.5.2 Αεροσήραγγες Πλήρους Κλίμακας

Οι παλιότερη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας αφιερωμένη σε οχήματα αεροδυναμικής βρίσκεται στη Στουτγκάρδη και παρουσιάζεται στην εικόνα 1.69. Χτίστηκε υπό την κατεύθυνση του W.KAMM, και άνοιξε το 1939 ως μέρος του Ινστιτούτου Ερευνών για Κινητήρες και Μηχανικής Αυτοκινήτων (FKFS). Το 1970 η σήραγγα του KAMM βρέθηκε υπό τη διαχείριση της Daimler-Benz AG, και αναμορφώθηκε ολοκληρωτικά. Η αεροσήραγγα διακρίνεται από μια εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα εμφύσησης  $U_{\max} = 270\text{ km/h}$  ( $=168\text{ mph}$ ). Μια τόσο υψηλή ταχύτητα είναι πλεονεκτική για την ανάπτυξη γρήγορων οχημάτων, για παράδειγμα αγωνιστικά αυτοκίνητα, ακόμα και όταν οι επιδράσεις του αριθμού Reynolds δεν αναμένονται. Επιτρέπει την άμεση εξέταση των επιδράσεων των εναλλασσόμενων δυνάμεων και ροπών αέρα σε ένα όχημα. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα αέρα μαζί με τη μεγάλη διατομή πίδακα κάνει μια αεροσήραγγα να ταιριάζει σε πειράματα με κλίμακες μοντέλου 1:2.5, μεγάλων εμπορικών οχημάτων.

Η μεγαλύτερη αυτοκινητιστική αεροσήραγγα που χτίστηκε ποτέ μπήκε σε λειτουργία

απ' την General Motors στο Warren του Michigan. Το πλάνο της διαδρομής του αέρα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.70. Οι διαστάσεις του τμήματος δοκιμής (κλειστό, με ατμοσφαιρικό αερισμό: διατομή  $AN = 56.2\text{m}^2$ , μήκος  $L = 21.3\text{m}$ ) είναι επαρκείς ακόμα και σε δοκιμές μεγάλων εμπορικών οχημάτων πλήρους κλίμακας. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου  $U_\infty = 250\text{km/h}$  (155 mph) είναι αρκετή για δοκιμές με αγωνιστικά αυτοκίνητα. Τα πλευρικά τοιχώματα του τμήματος δοκιμής έχουν μια ελαφρυά απόκλιση της κλίμακας 0.24 για να επεκταθεί η στατική πίεση κατά μήκος του άξονα του κενού τμήματος δοκιμής. Η σήραγγα είναι εξοπλισμένη με δύο εξάδες εξαρτημάτων ισορροπίας, η μια στην μπροστινή θέση για μοντέλα μειωμένης κλίμακας, και η άλλη στην καθοδική πορεία για οχήματα πλήρους κλίμακας.



VW all-purpose wind tunnel

$$\varphi = 5\% \quad \text{—}$$

Porsche climatic chamber with wind

$$\varphi = 124\% \quad \text{---}$$

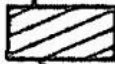
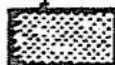
$$\varphi = \frac{A}{A_N}$$

FKFS

Dynamometer with fan

$$\varphi = 89\% \quad \text{---}$$

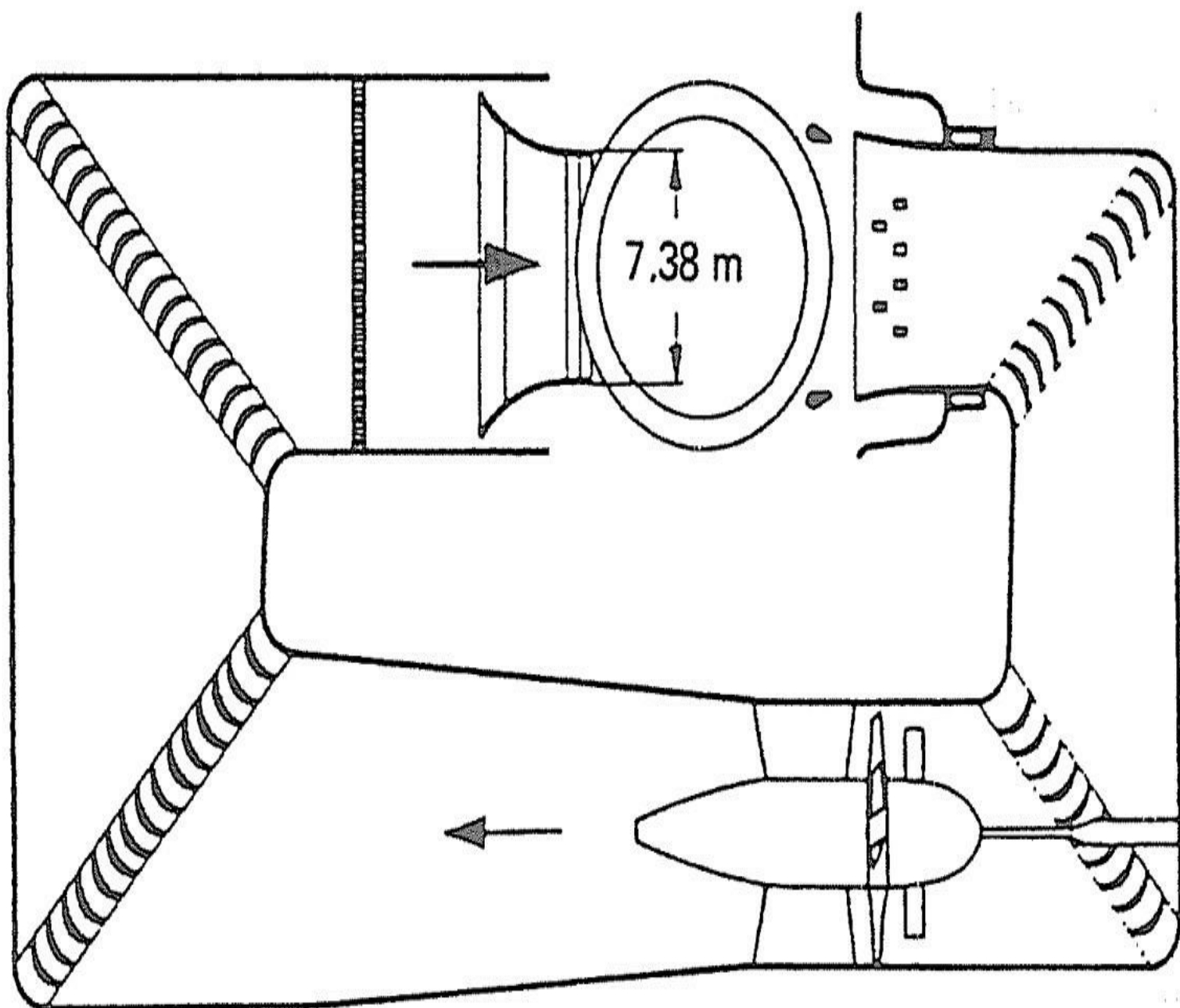
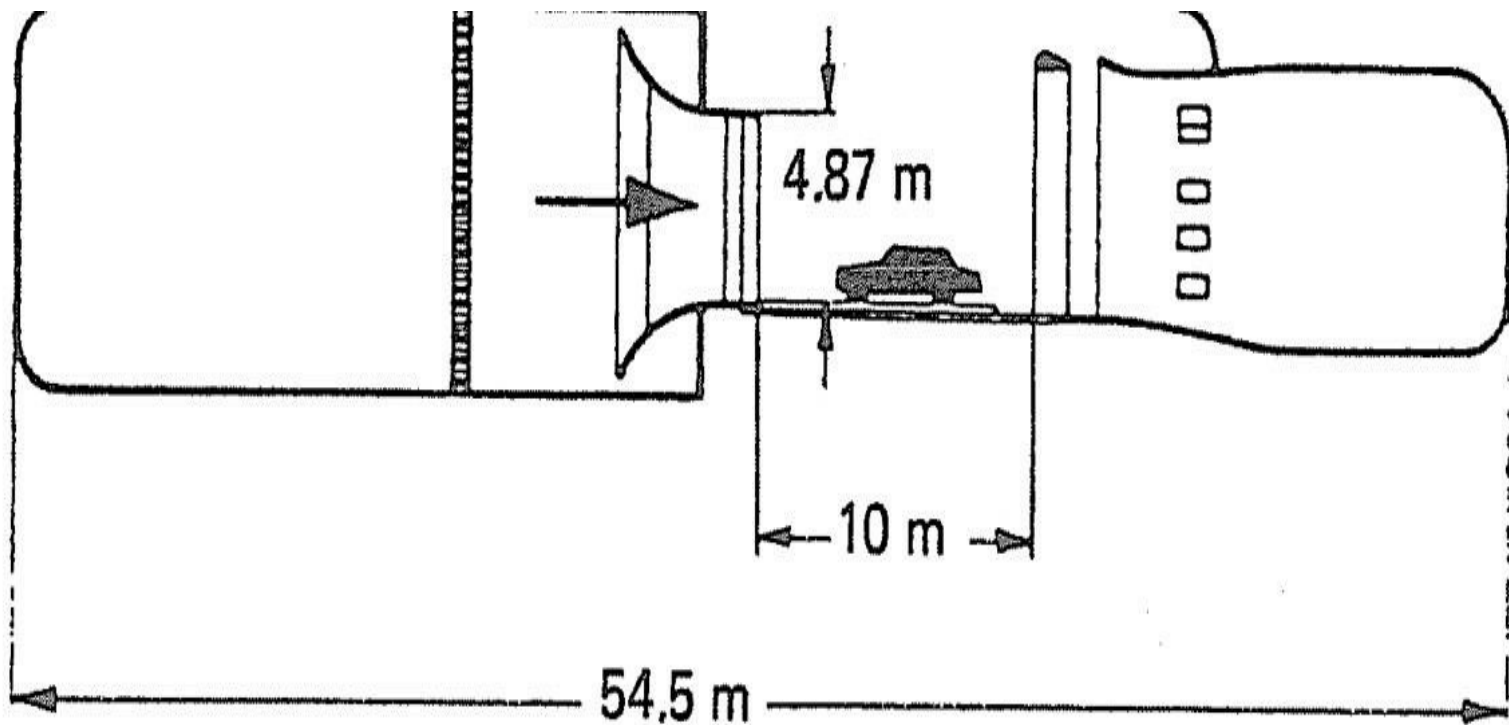
Longitudinal mid-section  $\beta = 0$

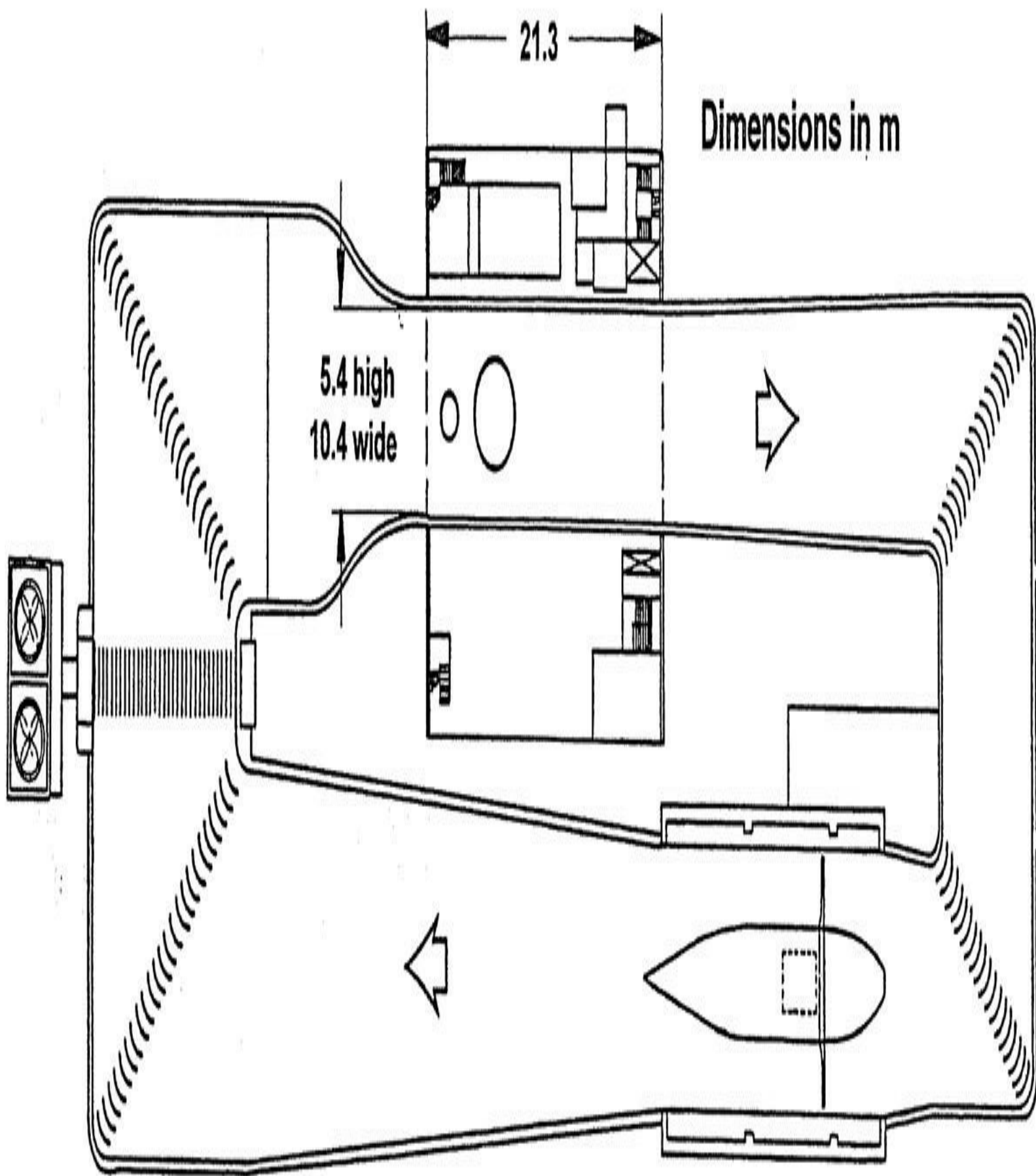
-  Pressure below ambient
-  Pressure above ambient

Εικ. 1.68 Σύγκριση της διανομής πίεσης γύρω απ'το μπροστινό μέρος ενός αυτοκινήτου που έχει υπολογιστεί σε μια μεγάλη αεροσήραγγα, ένας κλιματικός θάλαμος με αέρα, και δυναμόμετρο με ανεμιστήρα, μετά τον R. UNGER .





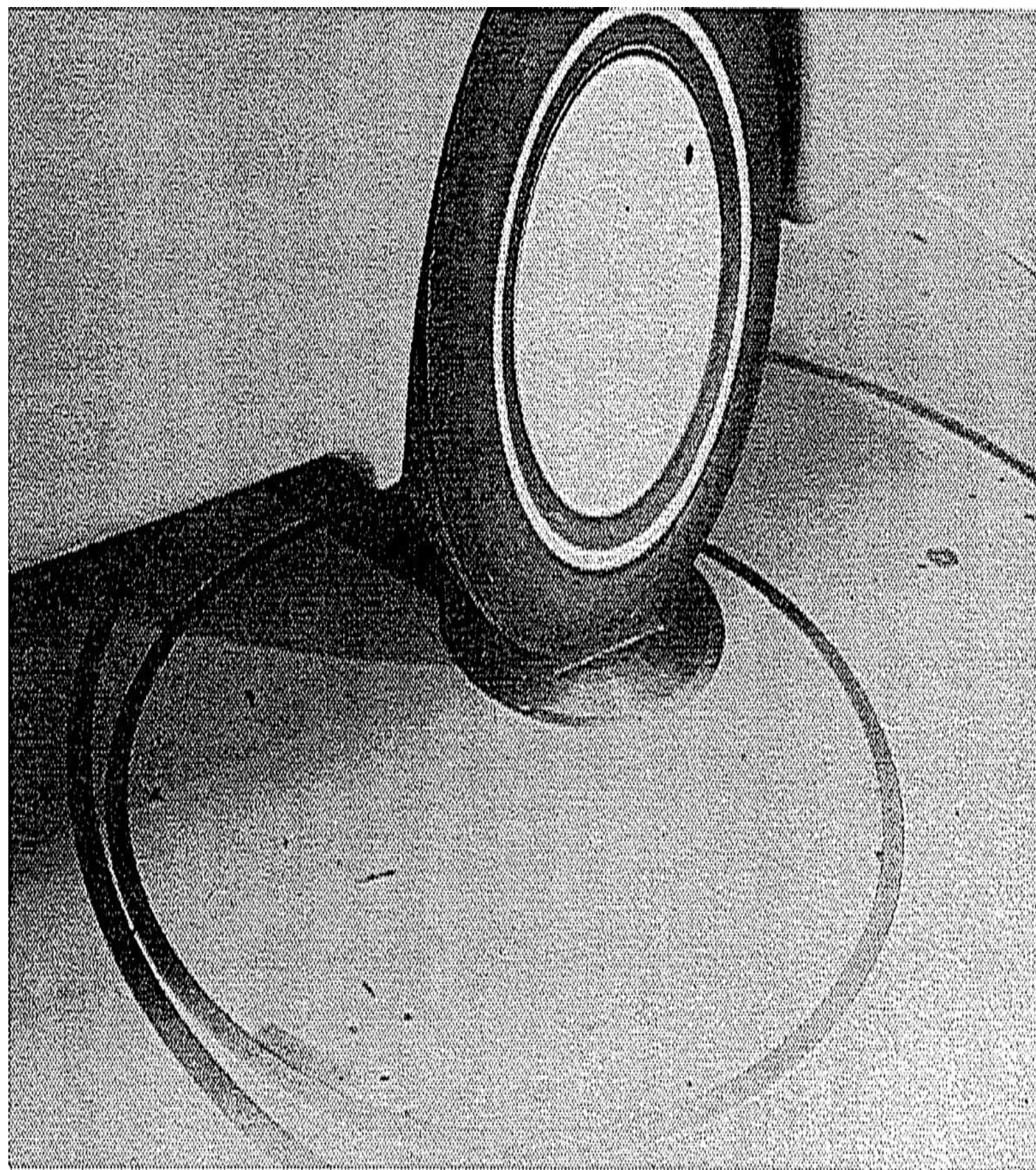




Εικ. 1.69 Μεγάλη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας της Daimler-Benz AG: διατομή

ακροφύσιου  $36.2 \text{ m}^2$ , μέγιστη ταχύτητα αέρα  $270 \text{ km/h}$ : ισχύς ανεμιστήρα  $4 \text{ MW}$ : μετά τον A. KUHN .

Εικ. 1.70 Μεγάλη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας της General Motors: διατομή τμήματος δοκιμής  $56.2 \text{ m}^2$ : μέγιστη ταχύτητα αέρα  $250 \text{ km/h}$  (διάρκεια 15 λεπτά): ισχύς ανεμιστήρα  $2.238 \text{ MW}$  συνεχόμενα,  $2.984 \text{ MW}$  με διακοπές. (Courtesy General Motors)



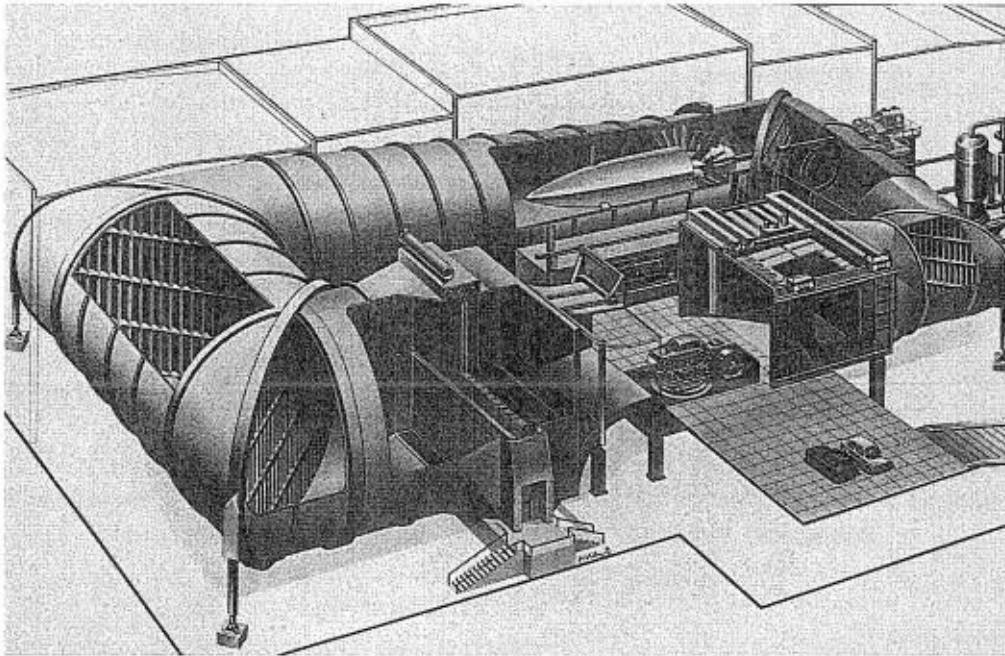
Το συγκεκριμένο σχέδιο των περιστροφικών πλακών, που χρησιμοποιούν

“ρυθμιζόμενους κυλίνδρους” και παρουσιάζονται στην εικόνα 1.71, επιτρέπουν τη γρήγορη προσαρμογή της τροχιάς και του μεταξονίου για διαφορετικά μεγέθη μοντέλου. Προκειμένου να μειώσει κανείς την πυκνότητα του οριακού στρώματος του εδάφους, ο αέρας μεταφέρεται μπροστά απ’ την περιστροφική πλάκα μικρής κλίμακας και τροφοδοτείται απ’ τη ροή αέρα της σήραγγας στο πίσω μέρος του τμήματος δοκιμής. Ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας που τοποθετείται ανάμεσα στη τρίτη και τέταρτη γωνία του κυκλώματος επιτρέπει τον έλεγχο της θερμοκρασίας αέρα πάνω απο 16-29°C. Έτσι τα μοντέλα άργιλου μπορούν να προστατευθούν απ’ τη θερμική υποβάθμιση.

*Εικ. 1.71 «Προσαρμοζόμενοι δίσκοι» για την προσαρμογή της ισορροπίας της κάτω πλευράς του οχήματος στην αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας της GM. (Courtesy General Motors)*

Σε αντίθεση με αυτές τις δυο αεροδυναμικές σήραγγες, η εικόνα 1.72 παρουσιάζει την κλιματική αεροσήραγγα I της Volkswagen, AG στη Wolfsburg της Γερμανίας. Είναι μια μεγάλη αεροδυναμική σήραγγα συνδυασμένη με μια κλιματική σήραγγα. Η μέγιστη ταχύτητα αέρα  $U_{\infty} = 180 \text{ km/h}$  ( =112 mph) είναι επαρκής για δοκιμές επιβατικών αυτοκινήτων, όπως και η διατομή πίδακα  $AN = 37.5 \text{ m}^2$  για ελαφρυά φορτηγά. Η θερμοκρασία αέρα μπορεί να ρυθμιστεί από -30°C μέχρι +40°C: η σχετική υγρασία μπορεί να ελεγχθεί μέχρι 95%. Το ανοιχτό τμήμα δοκιμής





Εικ. 1.72 Μεγάλη κλιματική αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας 1 της Volkswagen AG:  
διατομή ακροφύσιου 37.5m<sup>2</sup>: μέγιστη ταχύτητα αέρα 175km/h: ισχύς ανεμιστήρα  
2.6MW: εύρος θερμοκρασίας -35 °C μέχρι +40 °C .

καλύπτεται από ένα μεταθέσιμο διάκενο όταν η θερμοκρασία αέρα μέσα στη σήραγγα είναι διαφορετική απ' τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εξαιρούνται οι ακουστικές σήραγγες, οι οποίες ταιριάζουν σε όλα τα είδη δοκιμών, είτε είναι αεροδυναμικά είτε θερμικά, και παρουσιάζονται στη διαδικασία ανάπτυξης ενός οχήματος.

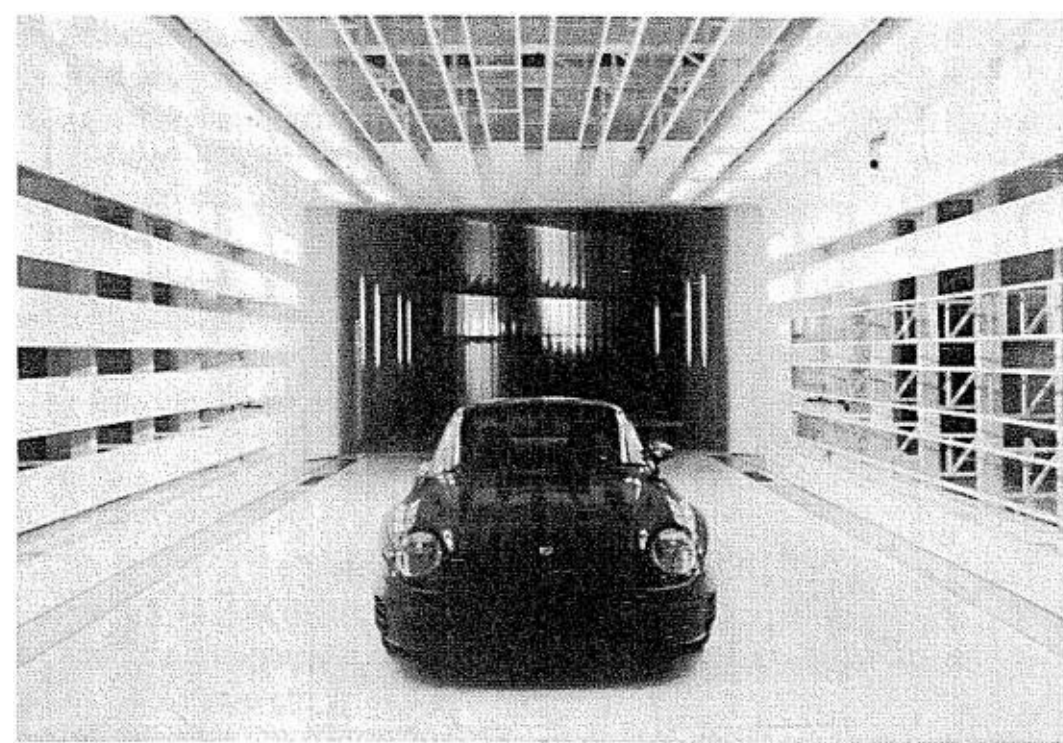
Αυτή η σήραγγα Volkswagen απέμεινε η μοναδική στο είδος της. Άλλες αυτοκινητιστικές εταιρείες που χτίστηκαν αργότερα προτίμησαν μια διαφορετική ιδέα: ξεχωριστές εγκαταστάσεις για αεροδυναμικές και θερμικές δοκιμές, η κάθε μια εξειδικευμένη στο σκοπό της. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και των δύο φιλοσοφιών αναλύονται απ' τον W.-H. HUCHO . Παρόμοιες σκέψεις έγιναν και πριν την κατασκευή της κλιματικής αεροσήραγγας της Ford Werke AG, στην Κολωνία της Γερμανίας. Η ιδέα των πολλών αλλά εξειδικευμένων εγκαταστάσεων αποδείχθηκε καλύτερη. Σε μια εταιρεία αυτοκινήτων που έχει μια γραμμή τριών ή τεσσάρων

επιβατικών αυτοκινήτων και ένα ή δύο ελαφρυά φορτηγά, η απαίτηση για δοκιμές ήταν τόσο μεγάλη που χρειαζόταν παραπάνω από μια εγκαταστάσεις. Έτσι είναι λογικό να χτιστούν δύο (ή παραπάνω) εξειδικευμένες εγκαταστάσεις αντί να γίνουν αποδεκτοί οι συμβιβασμοί για σήραγγες για *κάθε σκοπό*.

Η τέχνη αυτοκινητιστικής αεροσήραγγας πλήρους κλίμακας αναπαριστάται στις δύο ακόλουθες εγκαταστάσεις:

1. Η αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας στη Weissach R&D κεντρικό της Porsche AG.





2. Η αεροακουστική σήραγγα στο IVK, Πανεπιστήμιο της Στουτγκάρδης.

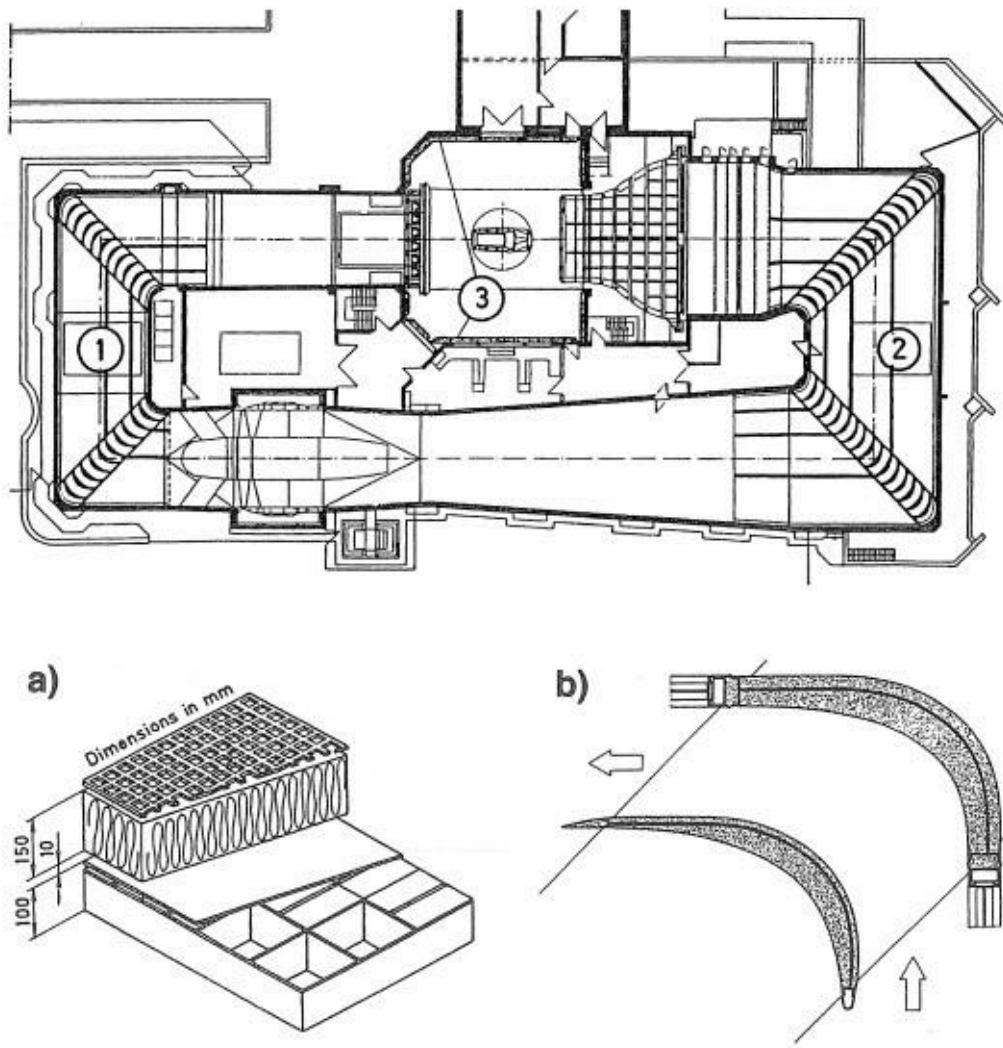
Η αεροσήραγγα της Porsche στη Weissach, που λειτουργεί απ' το 1986, είναι εξοπλισμένη με διαμηκή τοιχώματα στο τμήμα δοκιμής (βλ. δικ. 1.73): τα διαμηκή τοιχώματα μπορούν και να μετακινηθούν. Με  $\kappa = 6$ , η αναλογία συστολής είναι μεγαλύτερη απ' το αναγκαίο. Ο λόγος γι' αυτήν τη μεγάλη τιμή είναι για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σήραγγα και για αεροναυπηγικούς σκοπούς.

*Εικ. 1.73 Τμήμα δοκιμής με διαμηκή τοιχώματα στην αεροσήραγγα της Porsche AG.*

Βασικά, η σήραγγα IVK χτίστηκε ως μια καθαρά αεροδυναμική εγκατάσταση, και έτσι λειτούργησε το 1988: η μέγιστη ταχύτητα αέρα ήταν 270 km/h (=168 mph).

Ωστόσο, υπήρξε πρόβλεψη για μετέπειτα βελτιώσεις έτσι ώστε να διευρυνθεί το φάσμα της σήραγγας και να περιέχει έρευνες για το θόρυβο αέρα. Η ιδέα αυτή παρουσιάστηκε απ' το Ινστιτούτο Δομικής Φυσικής του Fraunhofer (IBP): Ο R. KUNSTER, έκανε μια λεπτομερή αναφορά σχετικά με θεωρίες σχεδιασμού και τα πρώτα αποτελέσματα. Η διαδρομή του αέρα (βλ. εικ. 1.74) παρουσιάζει πως είναι “κλειδωμένος” ο θόρυβος του ανεμιστήρα ανάμεσα σε δυο σιγαστήρες U-bend. Οι

συσκευές για την εξασθένιση του ήχου ορίζονται από δύο εύρη συχνότητας.

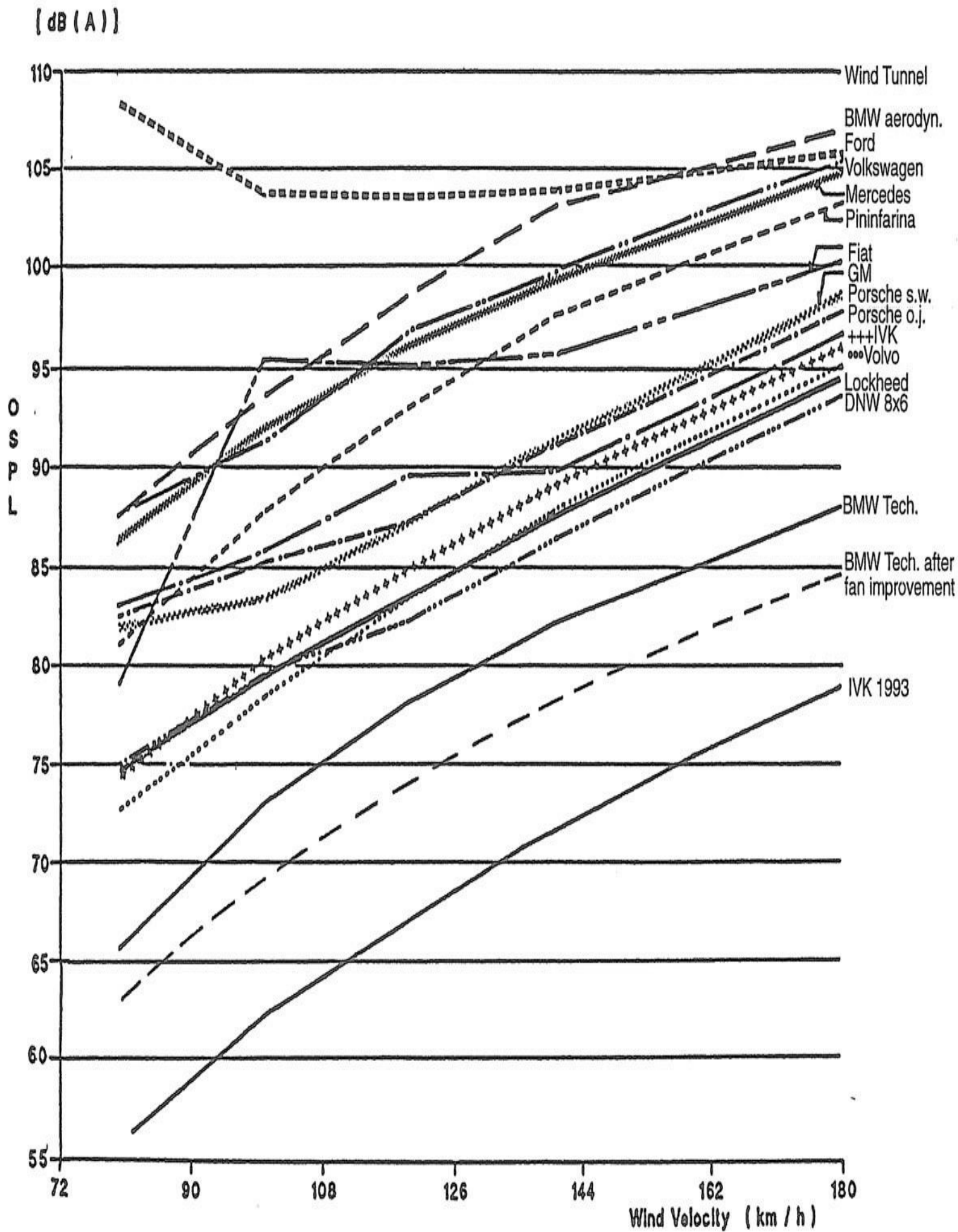


Εικ. 1.74 Αεροακουστική αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας της IVK, Στουτγκάρδη: διατομή ακροφύσιου  $22.45\text{m}^2$ , μέγιστη ταχύτητα αέρα  $257\text{km/h}$ , ισχύς ανεμιστήρα  $2.25\text{MW}$ , περιστρεφόμενα πτερύγια 1) και 2) είναι σχεδιασμένα όπως τα συστήματα απορρόφησης θορύβου 3) καλύπτεται από υλικό απορρόφησης θορύβου, μετά τον R. KUNSTNER.

Στο χαμηλό εύρος συχνότητας (80-200 Hz) ο θόρυβος του ανεμιστήρα εξαλείφεται απ' την νέα μεμβράνη απορρόφησης που βρίσκεται στην εικ. 1.75(α). Οι μεσαίες κ υψηλές συχνότητες εξαλείφονται από ένα πορώδη αφρό πολυεστέρα [βλ. εικ. 1.75(β)]. Το σταθμισμένο επίπεδο θορύβου A υπολογίζεται εκτός ροής και η διαμηκής ταχύτητα vs της ταχύτητας της σήραγγας (βλ. εικ. 1.76) είναι μια απόδειξη της αποτελεσματικότητας αυτής της ιδέας.

Εικ. 1.75 Στοιχεία απορρόφησης θορύβου στην αεροακουστική αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας της IKV: α) ευρυζωνικός απορροφητήρας, β) περιστροφικές πλάκες καλυμμένες με αφρό, μετά τον R. KUNSTNER.





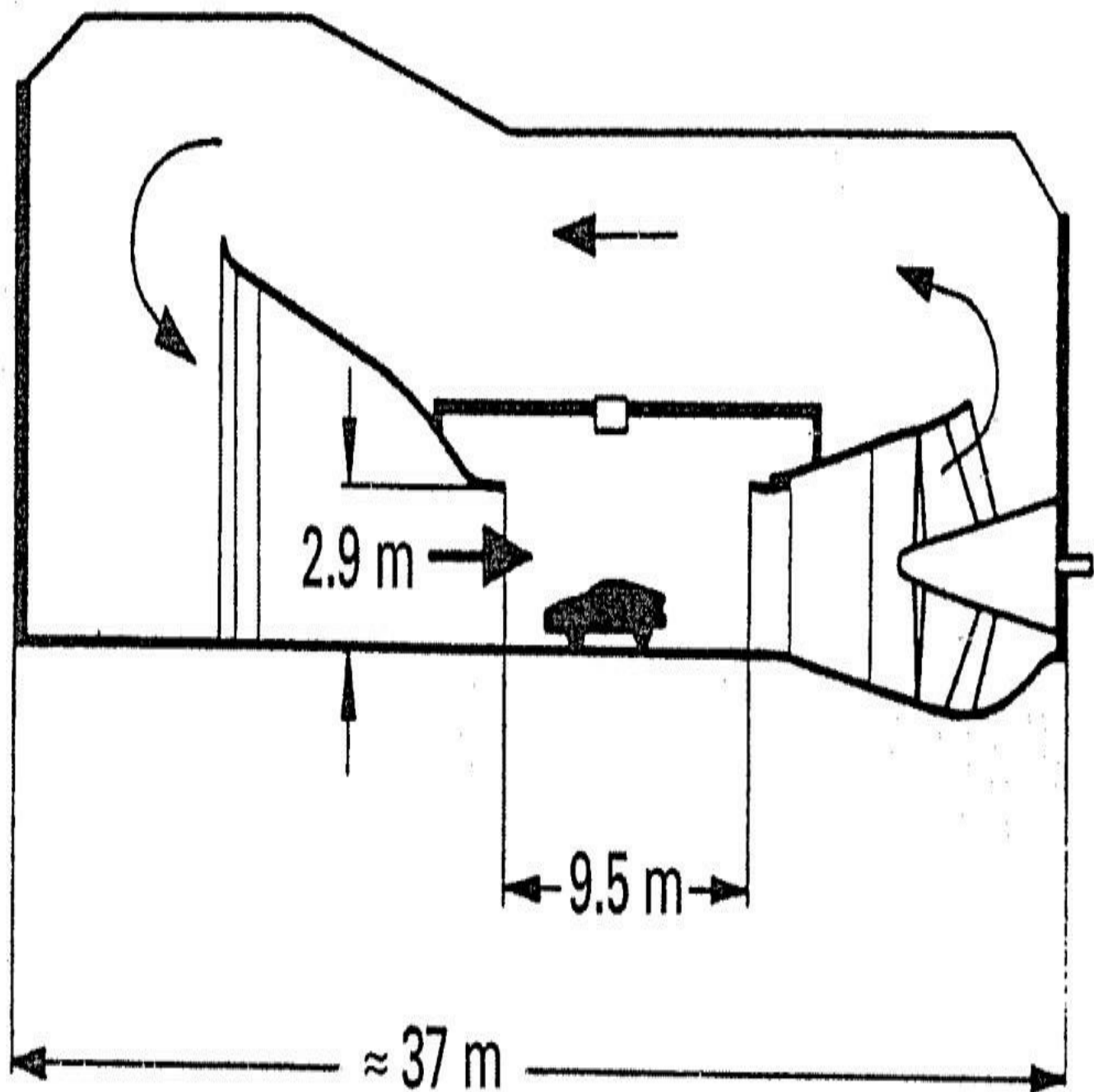
Εικ. 1.76 Σταθμισμένο επίπεδο ολικής πίεσης ήχου  $A$  (OSPL) VS ταχύτητα σήραγγας, υπολογισμός εσωτερικής ροής, μετά τους E. MERCKER και K. PENGEL , δεδομένα IVK μετά τον J. POTTHOFF .

Η αεροακουστική σήραγγα IVK είναι η πιο ήσυχη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας που έχει χτιστεί. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου της σήραγγας μειώθηκε μόνο 7km/h απ' τις μετρήσεις εξασθένισης.

Εκτός απ' αυτές τις αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας με διατομή πάνω από  $AN = 20m^2$ , χτίστηκαν δύο μικρές αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας και η μια είναι υπό κατασκευή με διατομή της τάξεως του  $10m^2$ :

- Η αεροσήραγγα Pininfarina, στο Τορίνο της Ιταλίας.
- Η αεροακουστική σήραγγα της BMW Technik, στο Μόναχο της Γερμανίας.
- Η αεροακουστική αεροσήραγγα στο Ίνγκολσταντ της Γερμανίας.

Μια διατομή της αεροσήραγγας Pininfarina παρουσιάζεται στην εικ. 1.77. Σχεδιάστηκε απ' τον A. MORELLI και άνοιξε το 1972. Χτισμένη ως μια σήραγγα Eiffel, περιτριγυρίζεται από ένα κτίριο του οποίου το σχήμα επιλέχθηκε για να προσδώσει χαμηλές απώλειες στην επιστροφή ροής. Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού της, αποδείχθηκε ότι η διατομή  $11.75m^2$  αυτής της σήραγγας είναι αρκετά μικρή (η



σήραγγα έπρεπε να ταιριάζει σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι γης). Ωστόσο, σε μια καμπάνια συγκριτικών μετρήσεων από διαφορετικές σήραγγες, η σήραγγα είχε εκπληκτικά αποτελέσματα. Το 1996 αντικαταστάθηκε το σύστημα μετάδοσης κίνησης του ανεμιστήρα. Συγκεκριμένα, ένας νέος ανεμιστήρας με 29 πτερύγια μείωσε σημαντικά το επίπεδο θορύβου, ειδικά στη σειρά των χαμηλών συχνοτήτων.

Εικ. 1.77 Αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας της Pininfarina: διατομή ακροφύσιου



11.75m<sup>2</sup>, ημικύκλιο παρά ορθογώνιο: μέγιστη ταχύτητα αέρα 145km/h: ισχύς

ανεμιστήρα 625 kW: σχέδιο A. MORELLI.

Η αεροακουστική αεροσήραγγα της BMW Technik GmbH φαίνεται στην εικ. 1.78.

Σχεδιάστηκε απ' τον L.J. JANSSEN και λειτούργησε το 1998. Με διατομή μόνο 10m<sup>2</sup>,

είναι η μικρότερη αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας. Αυτή είναι η επίπτωση του να

πρέπει να σχεδιαστεί μέσα σε ένα ήδη υπάρχον κτίριο. Για να εξαλείψει κανείς το

θόρυβο του ανεμιστήρα, εγκαταστάθηκαν δύο αποσβεστήρες: ο ένας που είναι

τοποθετημένος στο κοντό τμήμα στην πλευρά αναρρόφησης του ανεμιστήρα, και

εξαιτίας του σχήματός του, ονομάζεται «αποσβέστης-μανιτάρι» (βλ. εικ. 1.79), και ο

άλλος σε ένα διάφραγμα σιγαστήρα που χρησιμοποιόταν στα συστήματα κλιματισμού

των κτιρίων. Όπως φαίνεται και απ' την εικόνα 1.76, η σήραγγα αυτή είναι πολύ

σιωπηλή. Η ποιότητα θορύβου επαυξάνεται από επικυρωμένο αριθμό κοιλοτήτων στο

εξωτερικό άκρο των πτερυγίων του ανεμιστήρα. Ένας τόνος γύρω στα 2kHz

μειώθηκε από 30dB, και το επίπεδο θορύβου της εξωτερικής ροής μειώθηκε από 3dB

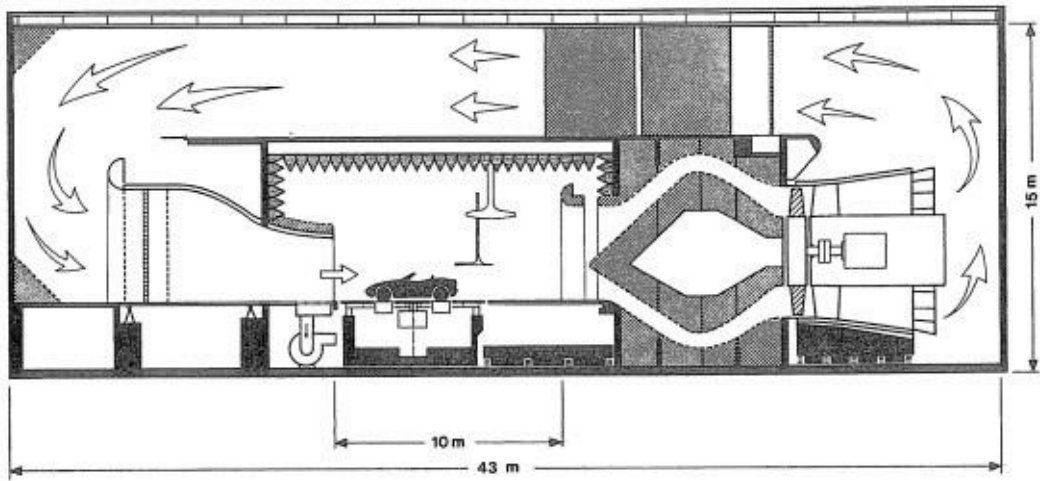
(A) (βλ. W. v. HEESEN ). Η σήραγγα είναι εξοπλισμένη με ισορροπία έξι

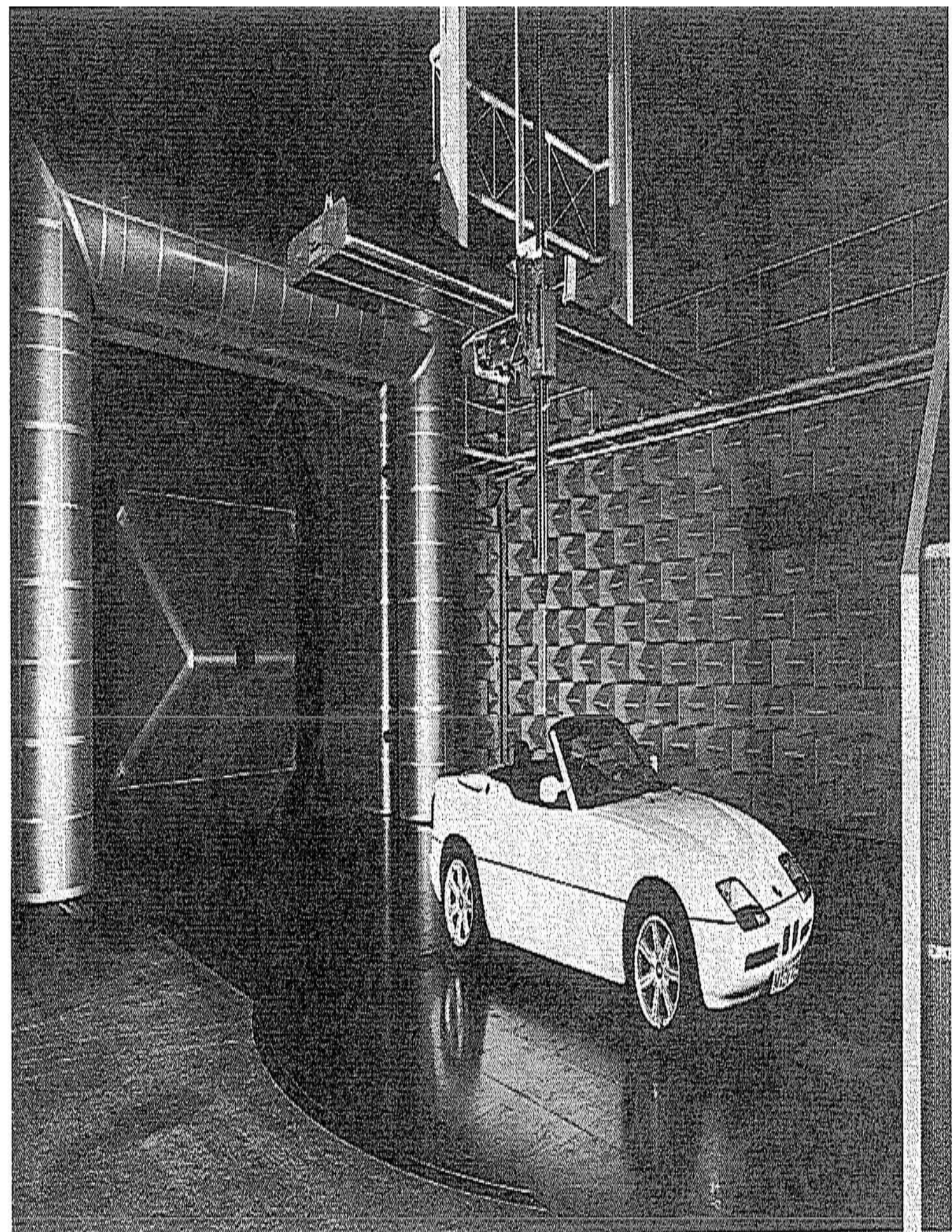
εξαρτημάτων. Οι μετρήσεις για τη μείωση του θορύβου του αέρα μπορούν να

εκτιμηθούν σε σχέση με την επιρροή τους στην αντίσταση σε μια μεμονωμένη

εγκατάσταση. Η περιστροφή των τροχών μπορεί να αναπαραχθεί, και υπάρχει χώρος

στο πλαίσιο της ισορροπίας για την εγκατάσταση ενός “στενού” κινούμενου ιμάντα.





*Εικ. 1.78 Αεροακουστική αεροσήραγγα της BMW Technik GmbH: διατομή ακροφύσιου 10m<sup>2</sup>: μέγιστη ταχύτητα αέρα 250km/h: ισχύς ανεμιστήρα 1.9MW: αναπαραγμένη περιστροφή τροχών: σχέδιο L.J. JANSSEN.*

*Εικ. 1.79 Αεροακουστική αεροσήραγγα της BMW Technik GmbH, όψη του «αποσβέστη θορύβου τύπου μανιτάρι» (Courtesy BMW Technik GmbH)*

Η αεροακουστική αεροσήραγγα που σχεδιάστηκε απ'τον J. WIEDEMANN βρίσκεται υπό κατασκευή. Θα είναι μια εγκατάσταση ανοιχτού πίδακα, τύπου Gottingen, με την περιοχή εξόδου του ακροφύσιου να είναι 11m<sup>2</sup> και μέγιστη ταχύτητα περίπου 210km/h (131 mph). Η σήραγγα σχεδιάστηκε για αεροδυναμικές και ακουστικές

δοκιμές πλήρους κλίμακας. Το τμήμα δοκιμής θα είναι 10m μακρύ, δηλ, 3.1 υδραυλικές διαμέτροι του ακροφύσιου. Η εσωτερική περιοχή του συλλέκτη είναι περίπου 3.7 φορές μεγαλύτερη απ' την έξοδο του ακροφύσιου. Η προσομοίωση εδάφους παρέχεται μέσω ενός κινούμενου ιμάντα. Η ισορροπία του κάτω εδάφους θα είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα που παρέχει περιστροφή τροχών. Ο θόρυβος του ανεμιστήρα θα είναι “κλειδωμένος” από δυο ζευγάρια περιστρεφόμενων πλακών σχεδιασμένες σαν αποσβέστες, και θα εξαλείφεται κάτω απ' το επίπεδο θορύβου του ανοιχτού πίδακα. Το διάκενο είναι σχεδιασμένο σαν έναν ημι-ανηχοϊκό θάλαμο.

### 1.5.3 Αεροσήραγγες για Μοντέλα Μειωμένης Κλίμακας

Υπάρχουν πολλές αεροσήραγγες για τη δοκιμή μοντέλων μειωμένης κλίμακας, πολλές απ' αυτές στον ακαδημαϊκό κόσμο όπου χρησιμοποιούνται ενίοτε για την αεροδυναμική οχημάτων, και άλλες είναι ειδικά αφιερωμένες στα οχήματα.

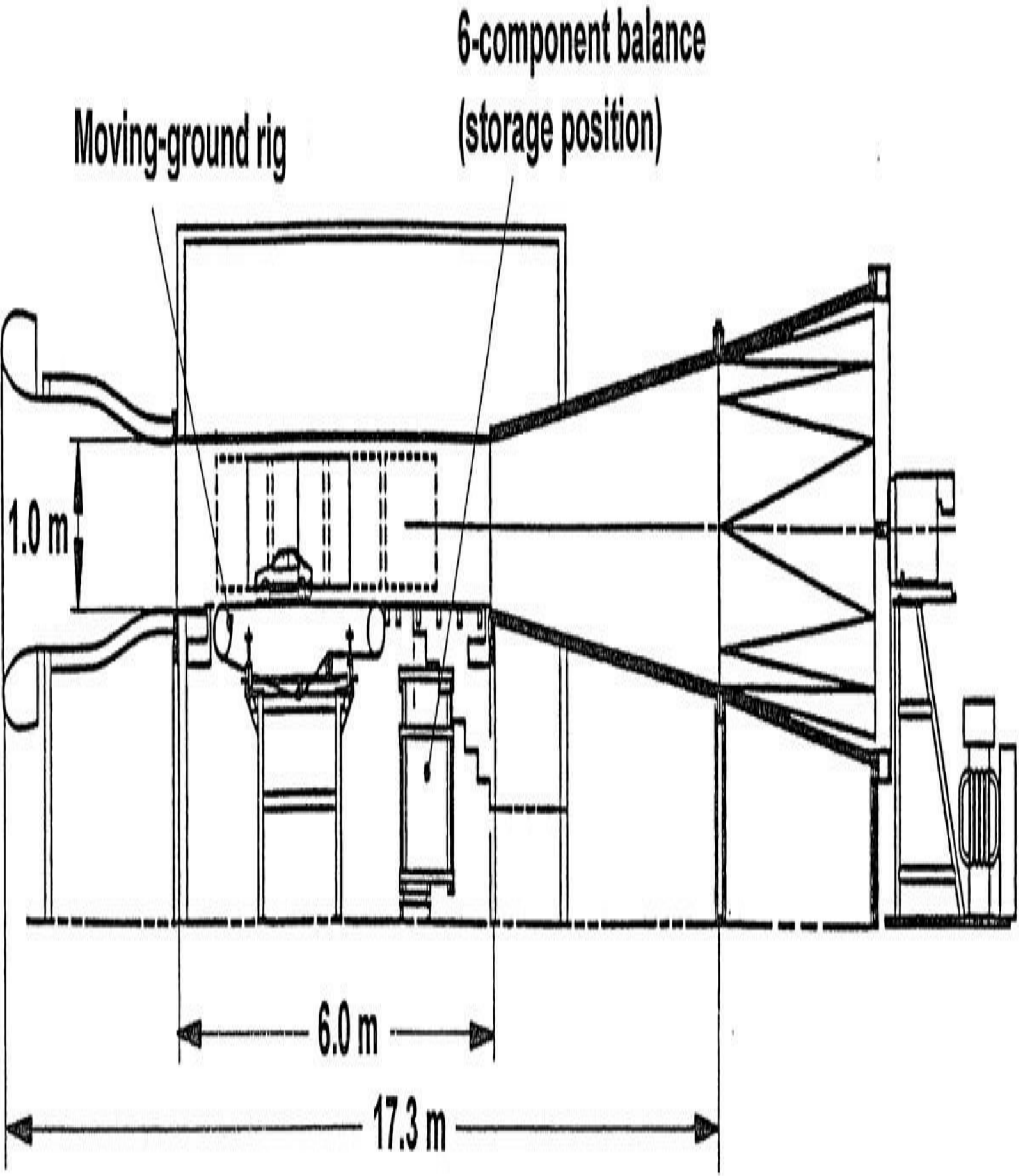
Υπάρχουν τέσσερα τυπικά παραδείγματα για το τελευταίο:

1. Η αεροσήραγγα MIRA κλίμακας ενός τετάρτου (βλ. G.W. CARR ).
2. Η αεροσήραγγα της Porsche και αυτή με κλίμακα ενός τετάρτου (βλ. J.-D. VAGT και B.WOLFF ).
3. Η αεροσήραγγα IVK μειωμένης κλίμακας (1:4,1:5) (βλ. J. POTHOFF).
4. Η αεροσήραγγα Chrysler με κλίμακα 3/8 (βλ. G.F. ROMBERG).

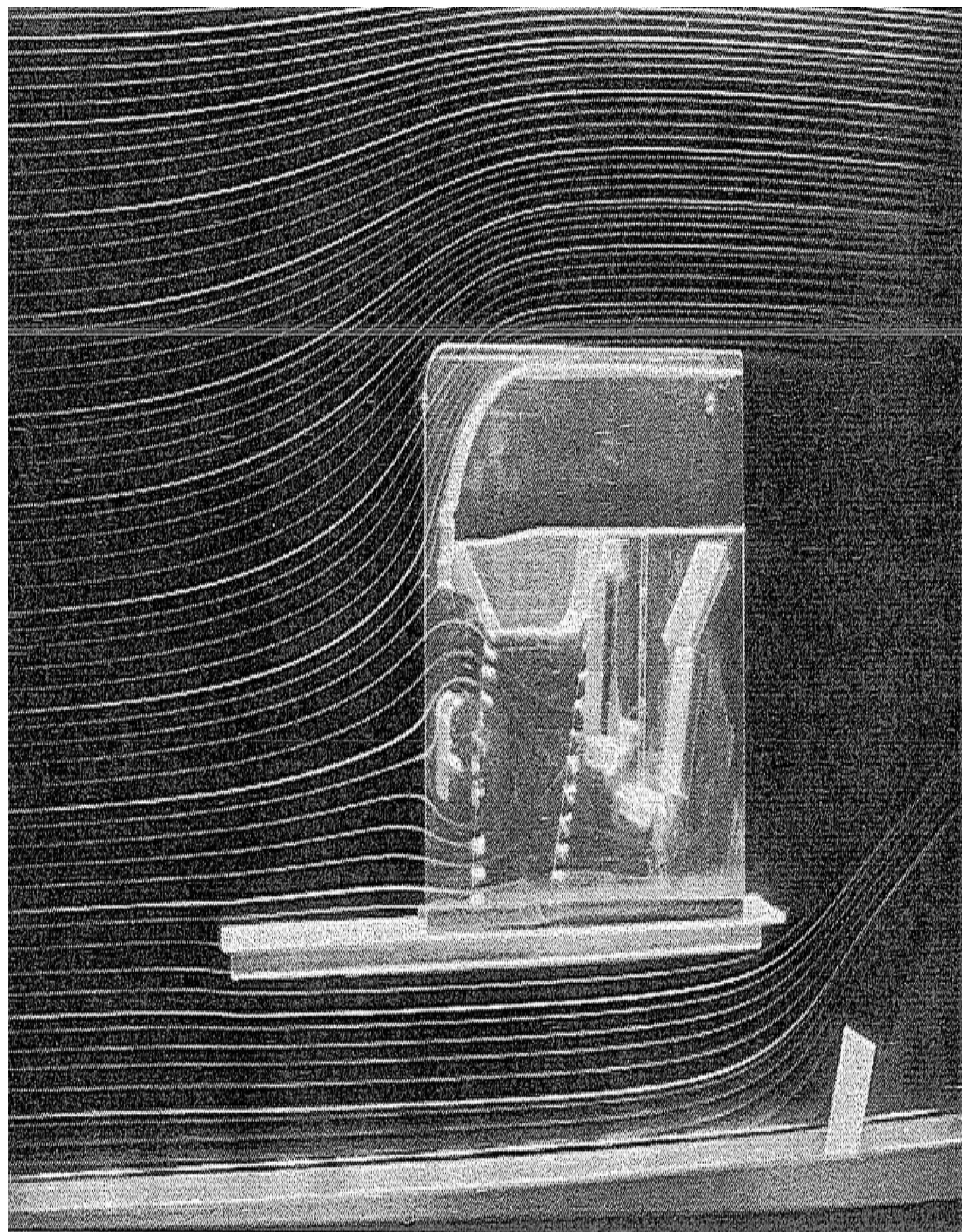
Οι αεροσήραγγες μειωμένης κλίμακας Porsche και Chrysler χτίστηκαν ως σήραγγες πιλότου για το σχέδιο σήραγγας πλήρους κλίμακας και τώρα χρησιμοποιούνται ως εργαλεία κατά τη φάση ανάπτυξης οχημάτων μικρής κλίμακας.

Υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα για το χτίσιμο μιας σήραγγας πιλότου σε ένα συγκριτικά μεγάλο μέγεθος. Πρώτον, ο αριθμός Reynolds στη διαδρομή του αέρα είναι πιο κοντά στις σήραγγες πλήρους κλίμακας: έτσι, τα αποτελέσματα μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό μιας σήραγγας πλήρους κλίμακας. Δεύτερον, η πιλοτική σήραγγα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές μοντέλων μικρής κλίμακας. Πέρα απ' το πλεονέκτημα ότι η σήραγγα αυτή είναι διαθέσιμη, είναι και ελκυστική. Αυτό γιατί υπάρχει ακριβής γεωμετρική ομοιότητα ανάμεσα στην πιλοτική και τη σήραγγα πλήρους κλίμακας. Έτσι, τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν με τα μοντέλα μειωμένης κλίμακας μεταφέρονται ευκολότερα στις σήραγγες πλήρους κλίμακας αφού όλα τα απαιτούμενα δεδομένα διόρθωσης είναι πανομοιότυπα. Οι αεροσήραγγες μειωμένης κλίμακας *μπορούν* να χτιστούν με πολύ χαμηλό κόστος: ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σήραγγα MIRA κλίμακας ενός τετάρτου, που φαίνεται στην εικ. 1.80 (βλ. G.W. CARR και W. ECKERT ). Επίσης το κόστος λειτουργίας αυτών των εγκαταστάσεων είναι χαμηλό και η ευκαμψία υψηλή. Και τα δύο επιχειρήματα είναι κύριοι λόγοι για την αναγέννηση των δοκιμών μικρής κλίμακας.









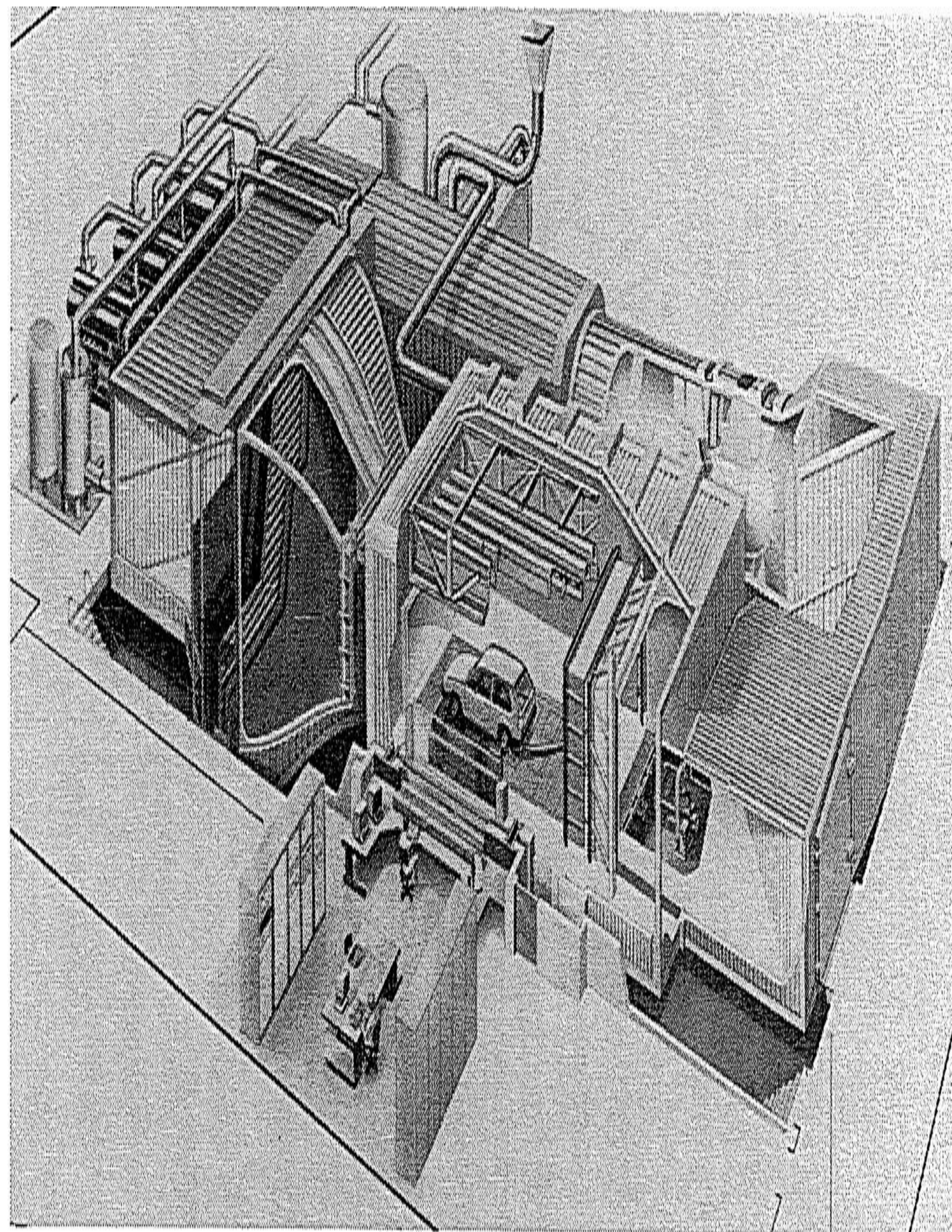
*Εικ. 1.80 μοντέλο αεροσήραγγας κλίμακας ενός τετάρτου στην MIRA: διατομή τμήματος δοκιμής 2.12m<sup>2</sup>: μέγιστη ταχύτητα αέρα 40m/s (90 mph): ισχύς ανεμιστήρα 37 kW: μετά τον G.W. CARR.*

Οι σήραγγες χαμηλού στροβιλισμού καπνού αναπτύχθηκαν για παρατηρήσεις της ροής στα οχήματα και τα εξαρτήματά τους. Σύμφωνα με τους N. ODA και T. HOSHINO, στην Isuzu λειτουργεί μια σήραγγα καπνού 1m<sup>2</sup> που επιτρέπει την παρατήρηση τρισδιάστατων φαινομένων. Η Nissan χρησιμοποιεί μια σήραγγα καπνού κυρίως για την εξέταση λεπτομερειών της ροής των αγωγών ψύξης αέρα σε δυσδιάστατα μοντέλα. Μια τυπική εικόνα καπνού παρουσιάζεται στην Εικ. 1.81.

*Εικ. 1.81 Η ροή μέσα απ'το εσωτερικό στόμιο και το ψυγείο ενός δυσδιάστατου μοντέλου, γίνεται ορατή μέσα από λωρίδες καπνού.*

Οι σήραγγες νερού χρησιμεύουν στην απεικόνιση της ροής. Η Mercedes-Benz χρησιμοποιεί τη σήραγγα νερού του Πανεπιστημίου Στουτγκάρδης (AN =1.16m<sup>2</sup>) για την απεικόνιση της ροής στην αρχική φάση της ανάπτυξης του προϊόντος χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας 1:5.





### 1.5.4 Κλιματικές Σήραγγες

Οι κλιματικές σήραγγες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, το οποίο χαρακτηρίζεται απ' τη διατομή του πίδακα (με  $AN = 23.2 \text{ m}^2$ , η "Hurricane Road" της Ford, στο Dearborn του Michigan, είναι εξαιρετικά μεγάλη και μοναδική). Οι διατομές  $AN$  των τριών ομάδων είναι:

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

Τυπικό για την πρώτη κατηγορία είναι οι δύο κλιματικές σήραγγες  $12 \text{ m}^2$  στη FLAT, Τορίνο, και η κλιματική σήραγγα  $11 \text{ m}^2$  στη Ford Werke AG, στην Κολωνία. Οι διαδρομές αέρα και των τριών σήραγγων είναι όμοιες με τις τυπικές αεροσήραγγες αεροδυναμικής. Ο εξοπλισμός τους- δυναμόμετρο, έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας, φορτίο ήλιου- τις κάνει κατάλληλες για όλα τα είδη θερμικών ερευνών σχετικές με τη θερμότητα, τον εξαερισμό και το σύστημα κλιματισμού ( και η ψύξη του κινητήρα, αν δεν υπάρχει διαθέσιμη μικρότερη ή φθηνότερη εγκατάσταση).

Ένα τυπικό παράδειγμα της τάξης του  $6 \text{ m}^2$  είναι η κλιματική αεροσήραγγα II της Volkswagen AG, στη Βόλφσμπουργκ της Γερμανίας, η οποία λειτούργησε το 1986, και παρουσιάζεται στην εικ. 1.82. Όπως περιγράφεται απ' τον R. BUCHHEIM σχεδιάστηκε μόνο για αυτοκίνητα: τα μεγαλύτερα οχήματα μπορούν να δοκιμαστούν στη μεγάλη κλιματική αεροσήραγγα I. Η αναλογία συστολής  $\kappa = 6$  φαίνεται να είναι υπέρμετρη: ωστόσο, η σήραγγα χρησιμοποιείται και για μοντέλα μειωμένης κλίμακας (1:2.5), και για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη και η καλή ποιότητα ροής.

*Εικ. 1.82 Κλιματική αεροσήραγγα II της Volkswagen AG: διατομή ακροφύσιου 6m<sup>2</sup>: μέγιστη ταχύτητα αέρα 180km/h: ισχύς ανεμιστήρα 460kW: εύρος θερμοκρασίας από -40 °C μέχρι +60 °C . (Courtesy Volkswagen AG).*

Ο αριθμός των θερμικών δοκιμών που απαιτείται στην ανάπτυξη οχημάτων ξεπερνάει αυτές που είναι απαραίτητες για την αεροδυναμική κλασικού τύπου.

Επομένως, χρειάζεται μια περαιτέρω ικανότητα στις κλιματικές σήραγγες σε σύγκριση με τις αεροσήραγγες. Το γεγονός αυτό αφήνει περιθώρια για περαιτέρω εξειδίκευση στις κλιματικές σήραγγες. Και φυσικά, οι κλιματικές σήραγγες είναι ειδικά σχεδιασμένες για χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία, οι λεγόμενες «ψυχρές» και «θερμές» σήραγγες. Οι δύο κλιματικές σήραγγες 12m<sup>2</sup> FLAT είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα γι' αυτήν την ιδέα. Ένα άλλο παράδειγμα παρουσιάζεται στην εικ. 1.83, η «θερμή» σήραγγα της Daimler Benz: με διατομή  $A_N = 4.3\text{m}^2$ , υπολογισμένη για αυτοκίνητα. Η μέγιστη ταχύτητα περιορίζεται στα 100km/h (62 mph). Η υψηλότερη ταχύτητα αέρα δε χρειάζεται γιατί το σύστημα κλιματισμού είναι κρίσιμο μόνο σε χαμηλές ταχύτητες του δρόμου.

### 1.5.5 Δυναμόμετρα με Ανεμιστήρα

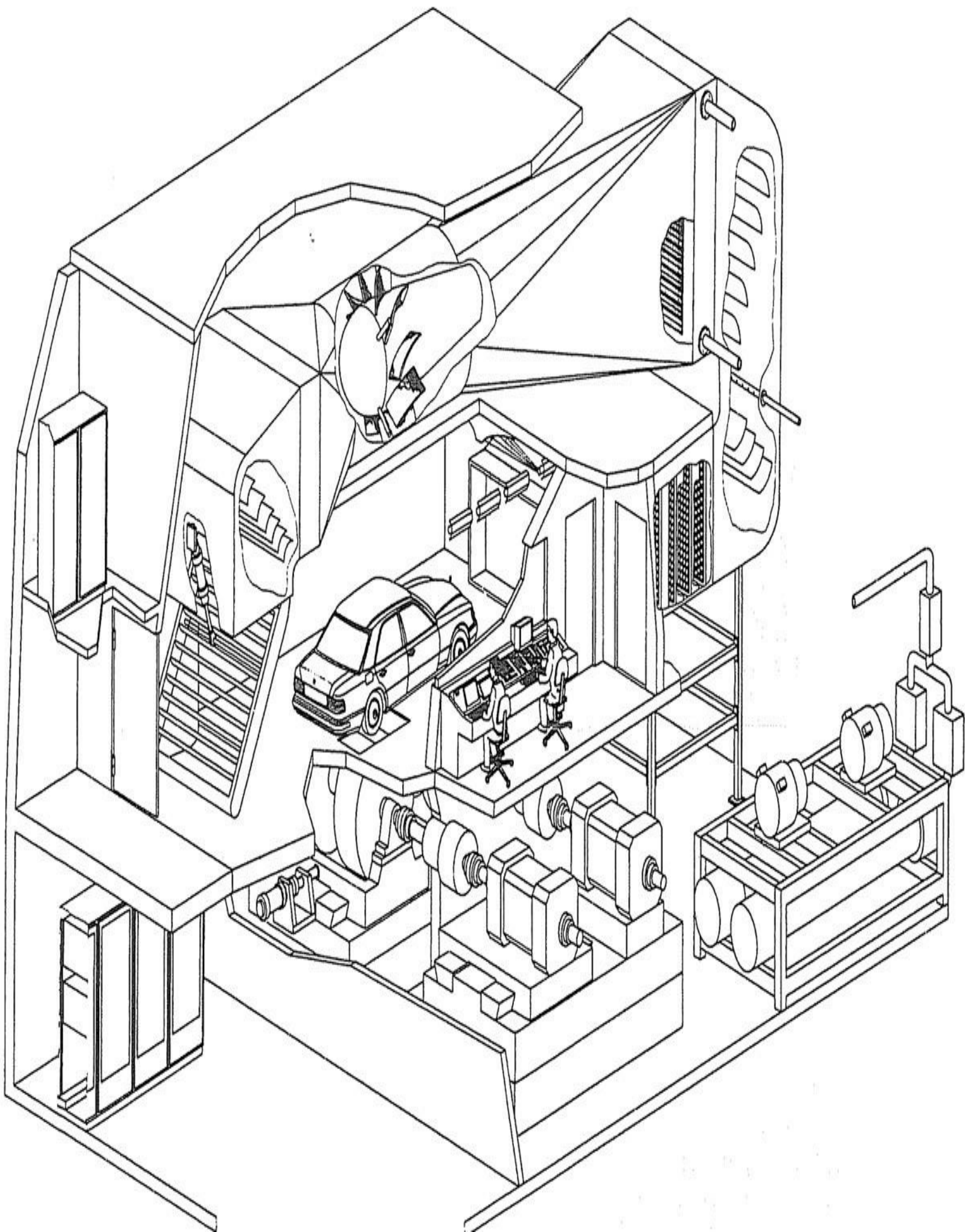
Τα δυναμόμετρα με ανεμιστήρα είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη του συστήματος ψυγείου. Όπως φαίνεται στην Εικ. 1.68, πρέπει να προσομοιωθεί μόνο το πεδίο ροής γύρω απ' τη μπροστινή πλευρά ενός αυτοκινήτου. Μια διατομή ροής αέρα 2 m<sup>2</sup> αρκεί για αυτοκίνητα: τα φορτηγά χρειάζονται 4-5 m<sup>2</sup>. Ωστόσο, απ' τη στιγμή που η συσκευασία μέσα σ' ένα χώρο κινητήρα έχει γίνει πολύ πυκνή, είναι απαραίτητη η καθοδήγηση ροής κάτω απ' το καπό έτσι ώστε να επιτυγχανθεί η κατάλληλη ψύξη του κινητήρα και του βοηθητικού εξοπλισμού. Έτσι η ροή μέσα σε ένα αυτοκίνητο πρέπει επίσης να προσομοιωθεί σε δοκιμές ψυγείου. Ως αποτέλεσμα, αναμένεται ότι

οι μελλοντικές εγκαταστάσεις για την ανάπτυξη του ψυγείου θα έχουν μια μεγαλύτερη διατομή πίδακα και καλύτερη ποιότητα ροής.

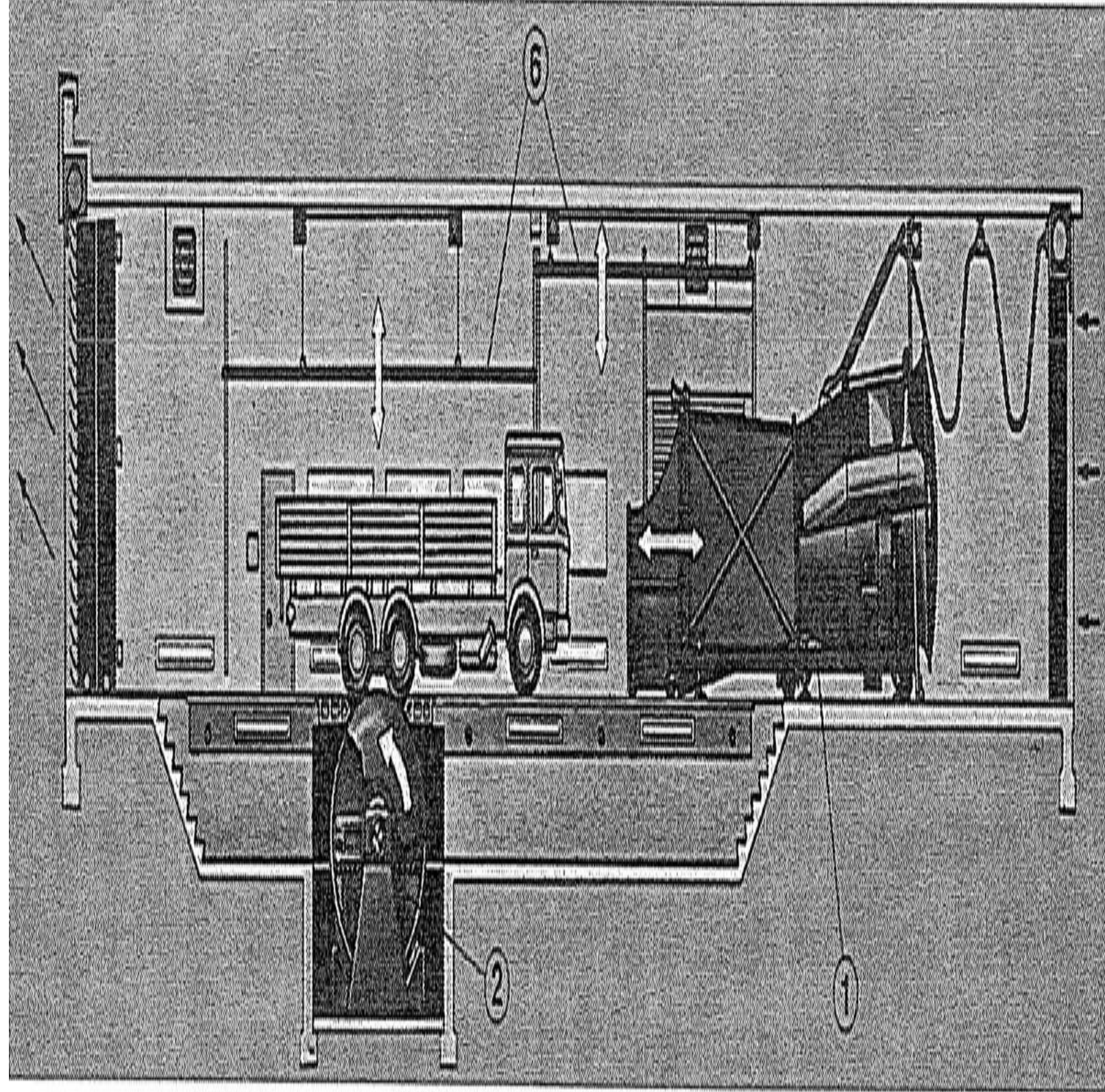
Ένα “κλασικό” δυναμόμετρο με ανεμιστήρα παρουσιάζεται στην εικ. 1.84. Η διαδρομή του αέρα είναι ίδια με μιας σήραγγας Eiffel. Είναι διαθέσιμα τρία διαφορετικά ακροφύσια που ταιριάζουν στη ροή του δοκιμαζόμενου οχήματος. Ο ανεμιστήρας μαζί με το ακροφύσιο μπορούν να κινηθούν αξονικά για να αντιμετωπίσουν το μέγεθος του οχήματος και το είδος οδήγησης, μπροστινός ή πίσω τροχός.









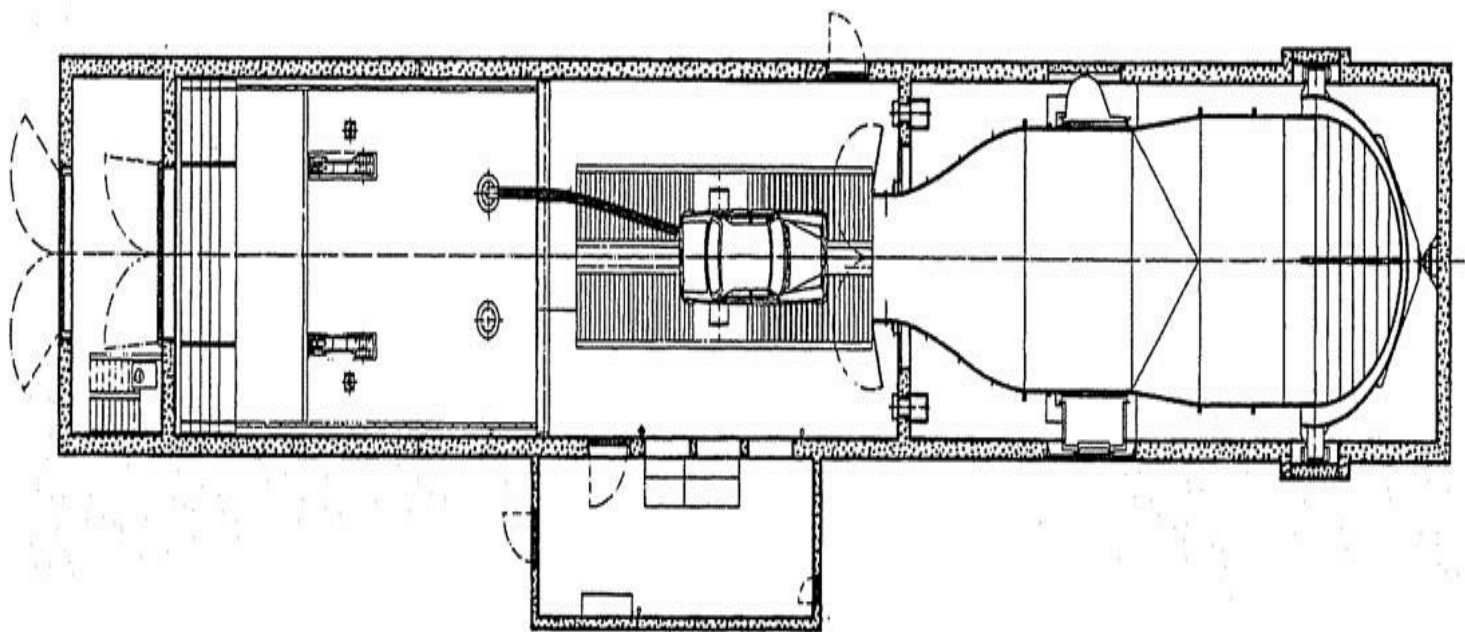
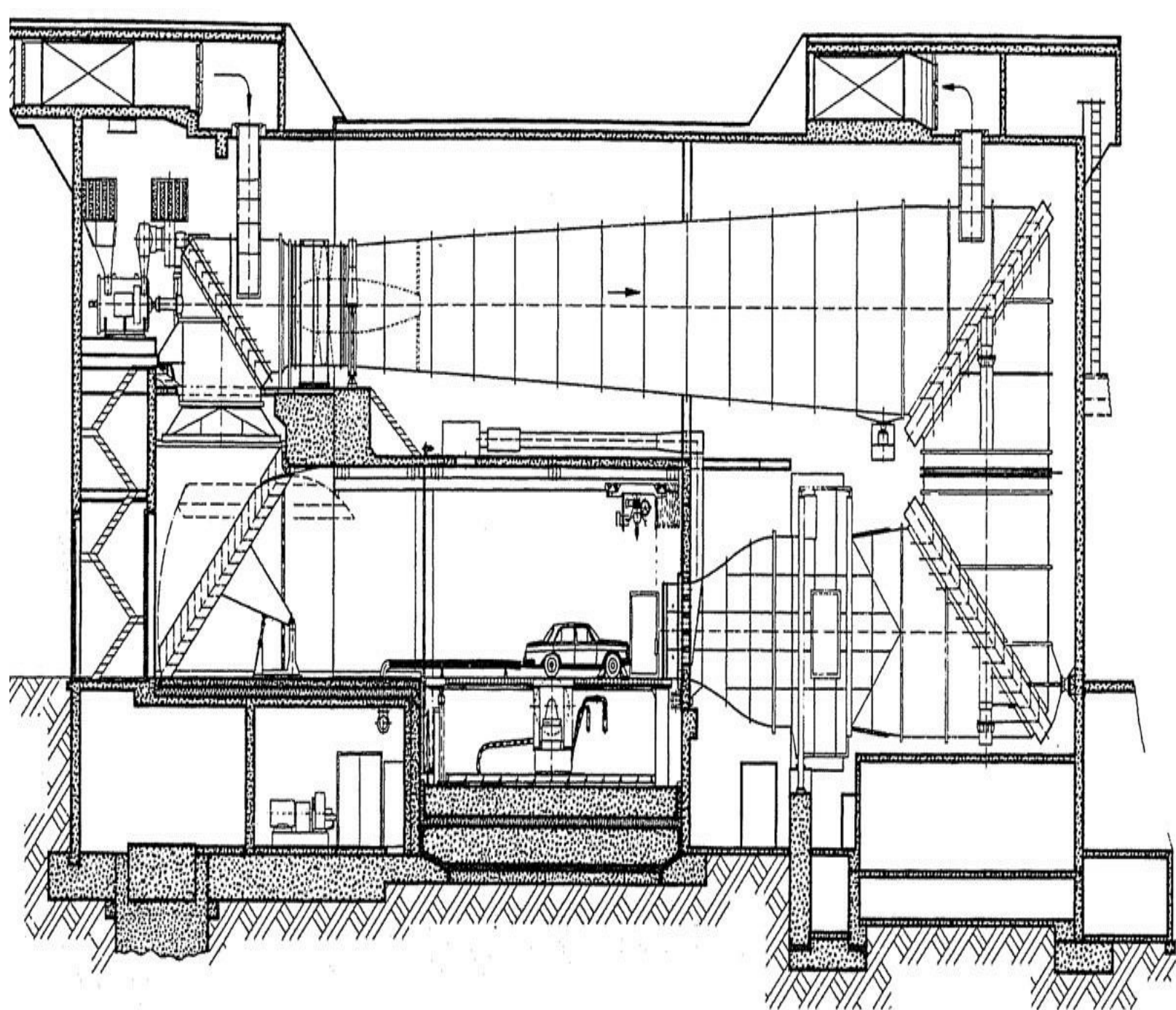


Εικ. 1.83 «Θερμή σήραγγα» της Daimler-Benz AG: διατομή ακροφύσιου  $4\text{m}^2$ : μέγιστη ταχύτητα αέρα  $100\text{km/h}$ : ισχύς ανεμιστήρα  $340\text{kW}$ . (Courtesy Daimler-Benz AG).

Εικ. 1.84 Δυναμόμετρο με αέρα της Suddeutsche Kuehlerfabrik J.F. Behr: διατομή ακροφύσιου  $2.4\text{m}^2$ : μέγιστη ταχύτητα αέρα  $80\text{km/h}$ : ισχύς ανεμιστήρα  $60\text{kW}$  (Courtesy J.F. Behr).

Εξαιτίας της αποστολής θορύβου στο γύρω περιβάλλον, τα δυναμόμετρα με ανεμιστήρα δεν μπορούν να χτίζονται πλέον μ ‘αυτόν τον τρόπο. Πιο πρόσφατες εγκαταστάσεις αυτού του τύπου έχουν μια κλειστή επιστροφή διαδρομής του αέρα όπως σε μια αεροσήραγγα: η εικ. 1.85 παρουσιάζει ένα παράδειγμα.

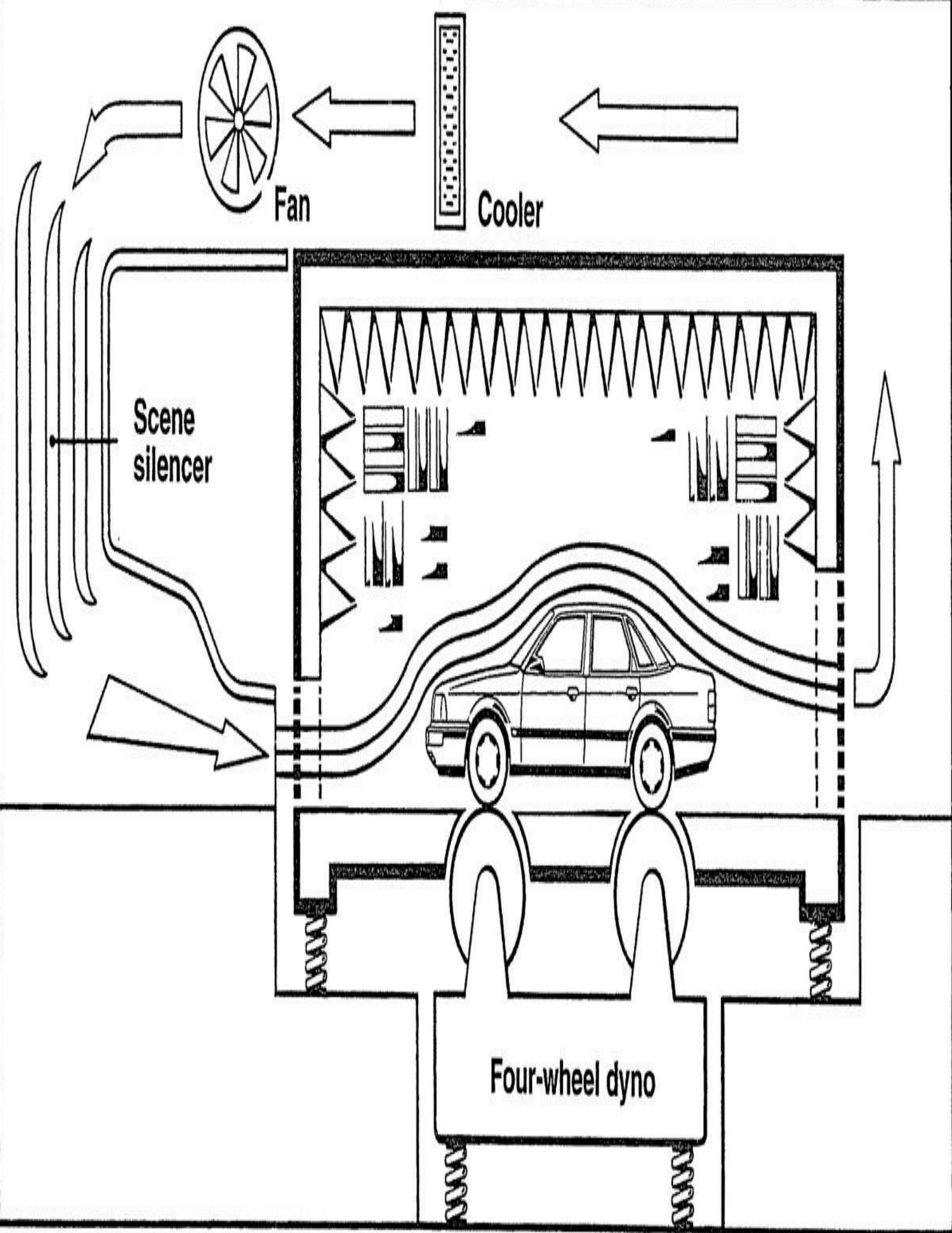




Τα δυναμόμετρα με ανεμιστήρα βρίσκονται επίσης υπό εξειδίκευση. Η εγκατάσταση που παρουσιάζεται στην εικ. 1.86 είναι αφιερωμένη σε ακουστικές έρευνες της μετάδοσης κίνησης αυτοκινήτων με υψηλή παρουσίαση. Προκειμένου ο θόρυβος του ανεμιστήρα να διατηρηθεί μακριά απ' τον ακουστικό θάλαμο και να μειώσει το θόρυβο αέρα, ο ανεμιστήρας τοποθετείται έξω απ' το θάλαμο. Η αποφόρτιση του θορύβου καθοδηγείται μέσω ενός διαφράγματος σιγαστήρα που συνδυάζεται με τις δύο τελευταίες στροφές της διαδρομής του αέρα.

*Εικ. 1.85 «Μεγάλη σήραγγα εμφύσησης» της FKFS: διατομή ακροφύσιου 6m<sup>2</sup>: μέγιστη ταχύτητα αέρα 200km/h: ισχύς ανεμιστήρα 1MW: μετά τους U.ESSERS και W.THIEL.*











*Εικ.1.86 Ακουστικός θάλαμος της Audi AG με ανεμιστήρα και δυναμόμετρο τεσσάρων τροχών (Courtesy Audi AG).*

Τέλος, η εικ. 1.87 δείχνει έναν αηχοϊκό θάλαμο που χρησιμοποιείται για να τοποθετεί την προέλευση του θορύβου αέρα. Αντί για την αναπαραγωγή ολόκληρου του πεδίου ροής γύρω από ένα αυτοκίνητο, το τοπικό πεδίο ροής παράγεται με την καθοδήγηση μιας ροής αέρα με περιορισμένες διαστάσεις. Προκειμένου να γίνει αυτό, συνδέεται ένα ρυθμιζόμενο ακροφύσιο στην έξοδο του ανεμιστήρα (το οποίο τοποθετείται έξω απ' το θάλαμο σίγασης) μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα.

*Εικ. 1.87 Ανηχοϊκός θάλαμος με προσαρμοζόμενο ακροφύσιο (διατομή  $AN = 0.5 \times 0.8m^2$ ) για την αναπαραγωγή της τοπικής ροής αέρα. (Courtesy Daimler-Benz AG)*

## 1.6 Συγκριτικές Μετρήσεις

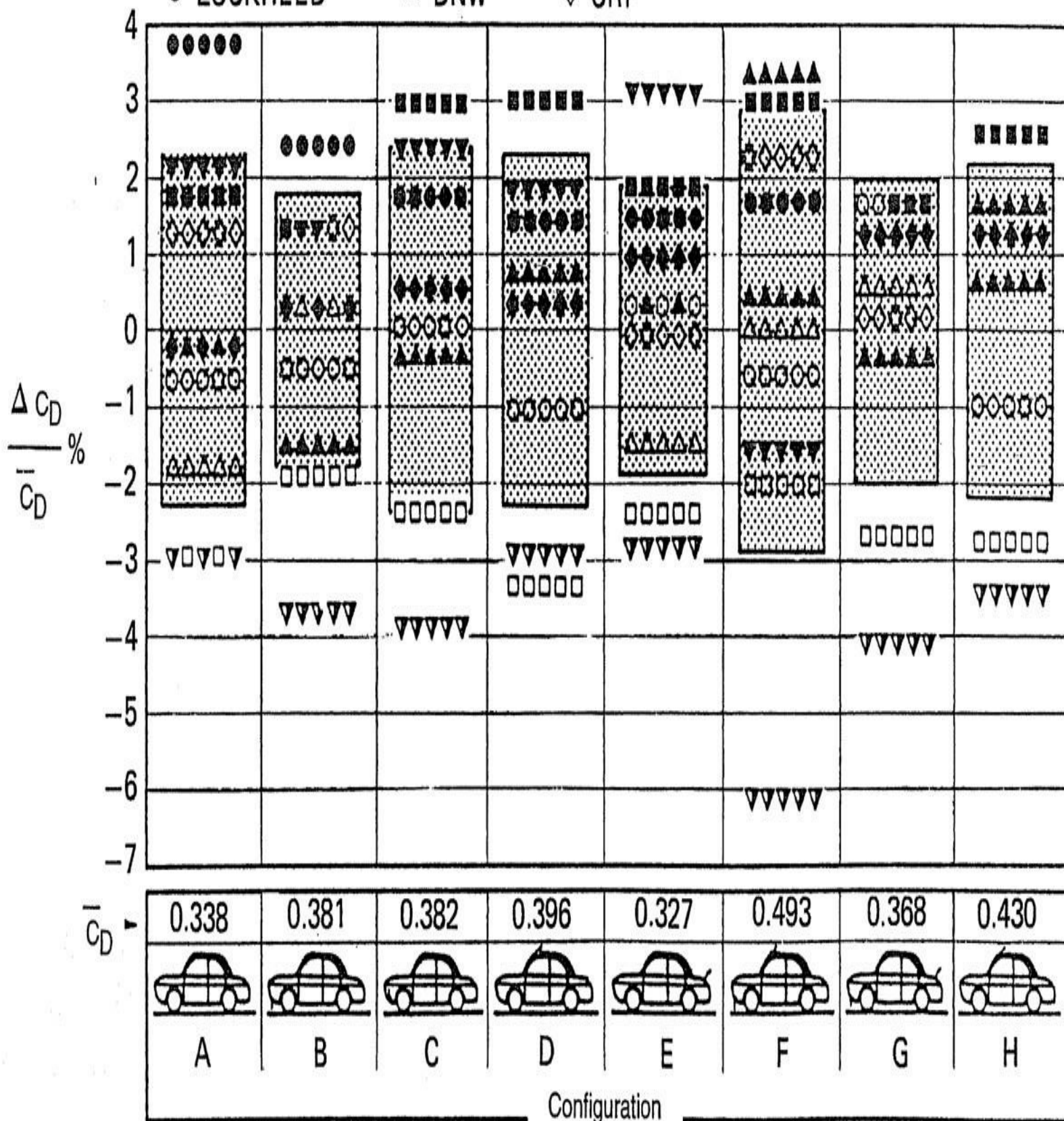
Όσο περισσότερη η αεροδυναμική μετατρέπεται σε ένα καθιερωμένο συστατικό της τεχνολογίας οχημάτων, τόσο πιο υψηλές ήταν οι απαιτήσεις σχετικά με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αεροσήραγγας. Γενικά, οι προτάσεις των αεροδυναμιστών για τη διαδικασία ανάπτυξης ενός νέου οχήματος αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό μικρών κατηγοριών. Κάθε μια από αυτές πρέπει να εκτιμηθεί ανάλογα με τη λειτουργία της, την επίδρασή της στο στυλ, τη σκοπιμότητά της και το κόστος της. Για τη διαδικασία αυτή, είναι σημαντικά τα «σχετικά» δεδομένα από τα πειράματα αεροσήραγγας. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει όταν πρέπει να επιτυγχανθούν συγκεκριμένοι στόχοι. Συνεισφορές όπως εξοικονόμηση καυσίμων, παρουσίαση οχήματος, θερμική άνεση, κλπ, είναι σημαντικές για τη θέση ενός οχήματος στην αγορά, οι οποίες θα πρέπει να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Επίσης, τα δεδομένα αεροδυναμικής –περισσότερο απ’ όλα ο συντελεστής αντίστασης- ενίοτε χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν τις τεχνικές προδιαγραφές ενός αυτοκινήτου. Οι θεωρίες ότι ο χαμηλότερος συντελεστής αντίστασης είναι ο καλύτερος, είναι απόλυτες δηλώσεις και θα πρέπει να περάσουν μέσα από μια κριτική εκτίμηση. Προκειμένου να εκτιμηθεί η συγκρισιμότητα των δεδομένων δοκιμής από διαφορετικές πηγές, οι χρήστες και διαχειριστές των μεγάλων αυτοκινητιστικών αεροσηράγγων στην Ευρώπη, στις Ηνωμένες Πολιτείες και στον Καναδά πραγματοποίησαν ένα εντατικό πρόγραμμα συσχέτισης δοκιμών. Συμπεριλήφθηκαν και τα τρία είδη του τμήματος δοκιμής: ανοιχτό, κλειστό και με διαμηκή τοιχώματα. Τα αποτελέσματα καταρτίστηκαν απ’ το SAE. Αργότερα η σύγκριση επεκτάθηκε σε

τεχνικές προσομοίωσης του δρόμου και ακουστικές ιδιότητες. Ακόμα, οι Ευρωπαίοι χρήστες μεγάλων αυτοκινητιστικών αεροσηράγγων συμφώνησαν στην ανταλλαγή δεδομένων αυτοκινήτων με παραγωγή όγκου. Αυτή η ανταλλαγή δεδομένων διεξάγεται στην «Ανταλλαγή Ευρωπαϊκών Δεδομένων Αεροδυναμικής», (ΕΑΔΕ), ένας ανεπίσημος οργανισμός.

Ο σκοπός των μελετών συσχέτισης ήταν να διευκρινιστούν τα λάθη και να διεξαχθούν αξιόπιστες τεχνικές διόρθωσης αεροσήραγγας. Το μοντέλο που κυκλοφόρησε στις σήραγγες ήταν ένα Volkswagen του 1600, ένα πραγματικό αυτοκίνητο αλλά με ομαλή κάτω πλευρά, και αφαιρεμένους προφυλακτήρες. Αναπαράχθηκαν διαφορετικοί συντελεστές αντίστασης  $c_D$  με μια ποικιλία από επιπρόσθετα μέρη: αεροτομές στην οροφή, στο πορτ μπαγκάζ, στα μποστινά φτερά, και όλα αυτά σε συνδυασμό. Ένα αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικ. 1.88. Η τυπική απόκλιση των δεδομένων αντίστασης από τις αεροσήραγγες ήταν  $\pm 2.2\%$ , αντίστοιχη στο  $\Delta c_D = \pm 0.009$ . Στην όψη των μεγάλων τεχνικών διαφορών ανάμεσα στις αεροσήραγγες, αυτό ονομάστηκε καλή συμφωνία (η συμφωνία στην άνωση δεν ήταν τόσο καλή). Από την άλλη πλευρά, τα μεμονωμένα δεδομένα δείχνουν μεγαλύτερες αποκλίσεις.



△ PININFARINA    ■ NRC    ○ VW    ▼ I.A.T. S4  
 ▼ MIRA    ◆ GM-ESAL    □ DAIMLER BENZ  
 ● LOCKHEED    ▲ DNW    ◇ CRF



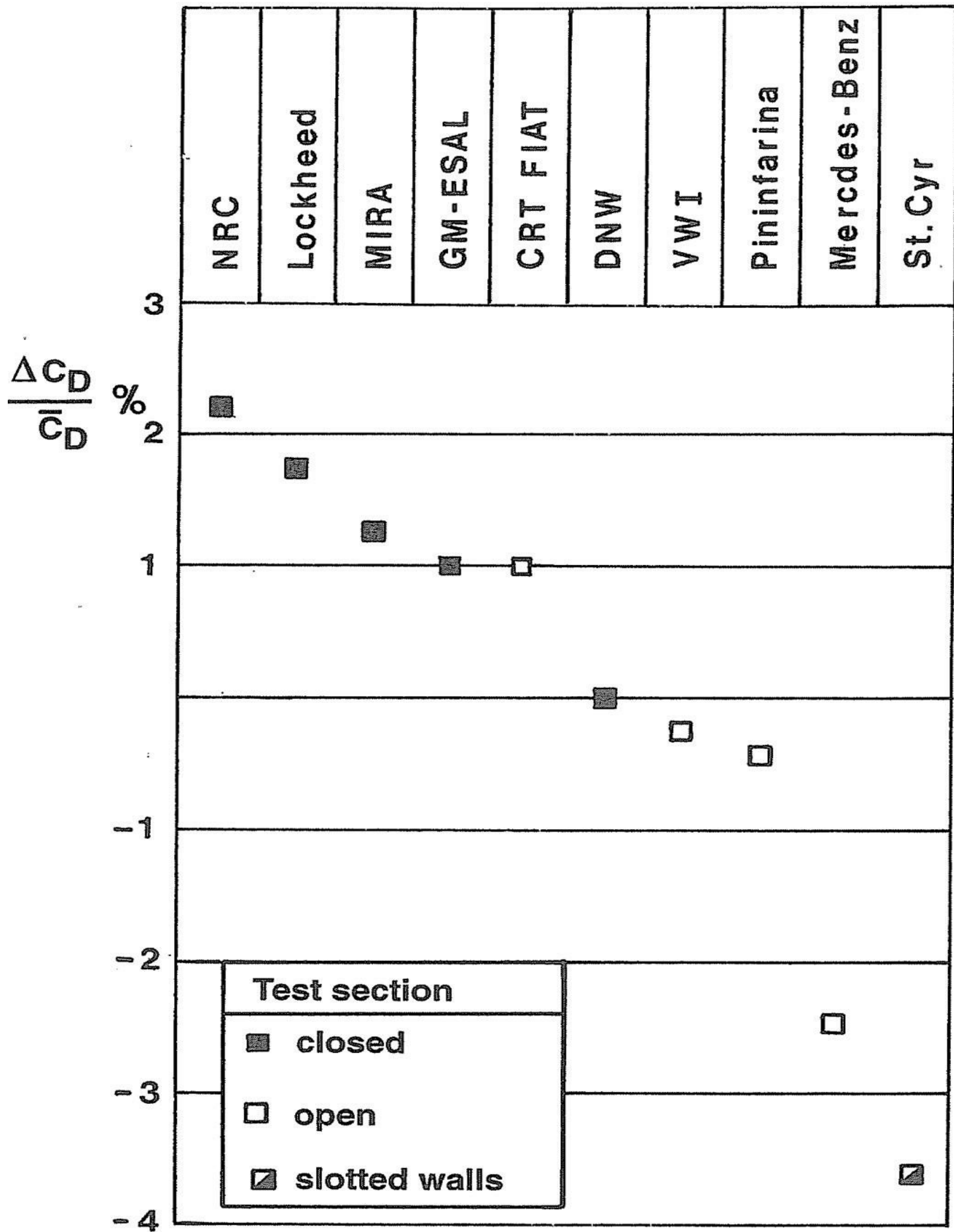
$\bar{C}_D$  = Average from 10 (8) wind tunnels

Standard deviation from average

*Εικ. 1.88 Σύγκριση των μετρήσεων αντίστασης σε δέκα αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες στις Η.Π.Α., Καναδάς και στην Ευρώπη, μετά τον R. BUCHHEIM.*

Ο F.K. v. SCHULZ-HAUSMANN και ο J.-D. VAGT επανεξέτασαν τα παραπάνω δεδομένα. Στην εικ. 1.89 συνδύασαν τις αποκλίσεις απ' το μέσο όρο του συντελεστή αντίστασης (χωρίς να παίρνουν το μέσο όρο ως την πραγματική τιμή) για όλες τις αεροσήραγγες που λαμβάνονται υπόψιν. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι συντελεστές αντίστασης από αεροσήραγγες με κλειστό τμήμα δοκιμής είναι αρκετά υψηλότεροι από εκείνους των ανοιχτών τμημάτων δοκιμής (με μοναδική εξαίρεση την αεροσήραγγα της FLAT). Όλα τα δεδομένα κλειστών τμημάτων δοκιμής διορθώθηκαν για τη στένωση και την πλευστότητα αφού είναι σημαντικές σε αυτές τις σήραγγες: τα δεδομένα από σήραγγες με ανοιχτό τμήμα δοκιμής δε διορθώθηκαν.







Εικ. 1.89 Σύγκριση των συντελεστών αντίστασης όπως στην εικ. 1.88, μια εκτίμηση, μετά τους F.K. v. SCHULZ-HAUSMANN και J.-D. VAGT .

Το μήνυμα της εικ. 1.89 είναι ότι η ολική διαφορά στην αντίσταση για το ίδιο αυτοκίνητο μπορεί να φτάσει μέχρι 5% -αν εξαιρεθούν τα δεδομένα της St. Cyr λόγω του ασυνήθιστου σχεδιασμού αυτής της αεροσήραγγας. Ωστόσο, δεν είναι μόνο η διαφορά στην απόλυτη τιμή, μη ικανοποιητική. Ακόμα και τα σχετικά αποτελέσματα, που συγκρίνονται στην εικ. 1.90, δείχνουν διαφορές που μπορεί να είναι σχετικές στη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια ανάπτυξης οχημάτων. Για παράδειγμα, η προσθήκη μιας πίσω αεροτομής (τροποποίηση από B σε G) οδήγησε σε μείωση της αντίστασης σε 1.3%, αλλά και σε 5.1% σε άλλη περίπτωση. Στην πρώτη περίπτωση αυτό πιθανόν να οδηγούσε στην απόρριψη της αεροτομής, σε αντίθεση με τη δεύτερη περίπτωση όπου η προσθήκη αεροτομής θα γινόταν αποδεκτή.

Μια σύγκριση των ακουστικών ιδιοτήτων που πραγματοποιήθηκε απ'τους E. MERCKER και K. PENGEL παρουσιάστηκε με ένα μοντέλο Volkswagen Passant Variant CL. Συμπεριλήφθηκαν έντεκα Ευρωπαϊκές και δύο Αμερικάνικες αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικ. 1.76.

Σύμφωνα με τους MERCKER και PENGEL ο θόρυβος της αεροσήραγγας καταμετρείται καλύτερα με ένα μικρόφωνο «στη ροή» και τοποθετείται σε ένα κενό τμήμα δοκιμής στη θέση του μοντέλου. Το βάρος A ωστόσο, αποτελεί ένα ερώτημα γιατί το φάσμα του θορύβου του αέρα μέσα σε ένα αυτοκίνητο έχει το βασικό περιεχόμενό του στο εύρος συχνότητας από 150 μέχρι 500Hz –ένα εύρος που υποτιμάται στο βάρος A. Και για τα δύο μακρινά πεδία και τις μετρήσεις του εσωτερικού ήχου, η αναλογία σήματος-θορύβου πρέπει να είναι τουλάχιστον 10dB.

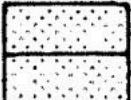
Μόνο λίγες απ'τις σήραγγες που συμπεριλαμβάνονται στην εικ. 1.76 ικανοποιούν αυτήν την απαίτηση.

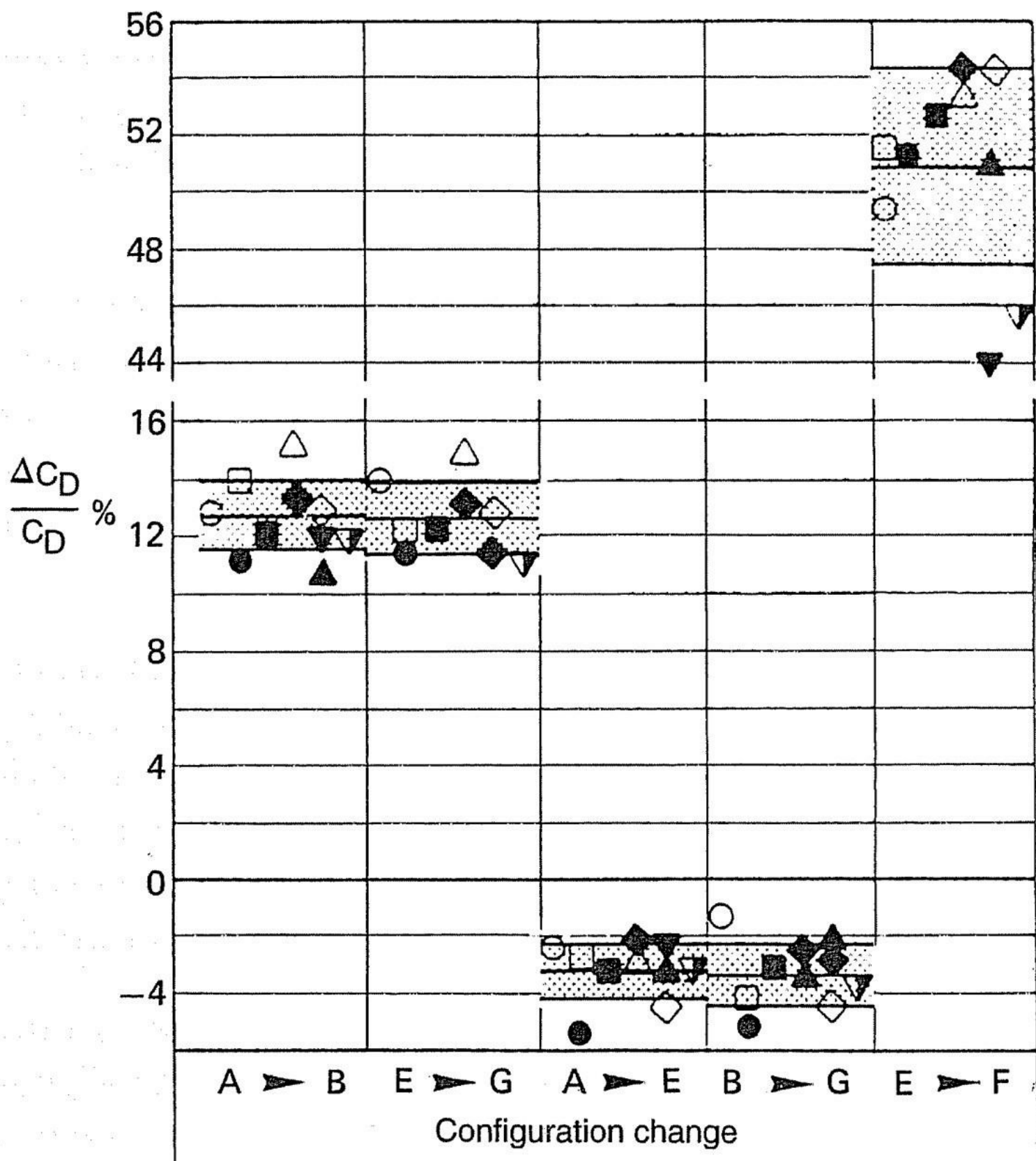


○ VW  
 □ DB  
 ◇ CRF  
 △ PINNINFARINA

● LOCKHEED  
 ■ NRC  
 ◆ GM ESAL  
 ▲ DNW

▼ MIRA  
 ▽ I.A.T. S4

 Standard deviation from average



*Εικ. 1.90 Σύγκριση των βαθμονομήσεων αντίστασης για αλλαγές που έγιναν διαδοχικά σε ένα αυτοκίνητο, υπολογισμένο στις ίδιες δέκα σήραγγες της εικ. 1.88, μετά τον R. BUCHHEIM.*

### **1.7 Τελευταία Σχόλια και Μελλοντικές Προοπτικές**

Σήμερα, σχεδόν όλοι οι μεγάλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν τις δικές τους αεροσήραγγες πλήρους κλίμακας (ή έχουν μόνιμη πρόσβαση), πολλές κλιματικές σήραγγες και πολλά δυναμόμετρα με ανεμιστήρα. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η επένδυση για μια αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας μπορεί να είναι μέχρι 30 εκατομμύρια δολλάρια (και περισσότερα), και ότι η λειτουργία της είναι ακριβή, η

μεγαλύτερη προτεραιότητα της αεροδυναμικής στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη αυτοκινήτων είναι εμφανής.

Κυρίως είναι η πολλαπλότητα των σχεδίων και των μεγέθων τέτοιων εγκαταστάσεων. Υπάρχουν τρεις κύριοι λόγοι γι' αυτό:

1. Οι στόχοι είναι διαφορετικοί. Αν, για παράδειγμα, μια σήραγγα έχει να κάνει με μια γραμμή μοντέλου που εκτείνεται από επιβατικά μέχρι αγωνιστικά αυτοκίνητα, το σχέδιο απ' τη μια σήραγγα στην άλλη, θα διαφέρει.

2. Με το πέρασμα του χρόνου αποκτήθηκε μεγάλη εμπειρία πάνω στις αυτοκινητιστικές αεροσήραγγες (το επιχείρημα αυτό συχνά παραβλέπεται).

Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην κατασκευή της πρώτης αυτοκινητιστικής αεροσήραγγας πλήρους κλίμακας το 1939 (απ' τον W. KAMM στη Στουτγκάρδη) και της νεότερης σήραγγας πλήρους κλίμακας που λειτούργησε το 1990 (απ' την IVK, επίσης στη Στουτγκάρδη) καλύπτει μισό αιώνα. Μέσα σ' αυτά τα χρόνια καθιερώθηκαν πολλοί κανόνες σχεδίου σχετικά με τις αεροσήραγγες: ο πιο σημαντικός είναι ότι μια διατομή ανοιχτού πίδακα  $AN = 20-25m^2$  είναι επαρκής για τη δοκιμή επιβατικών αυτοκινήτων και μικρών φορτηγών.

3. Αναπτύχθηκε ένα ποσοτικό επιχείρημα: Η ποσότητα των δοκιμών (αεροδυναμική και θερμική) εξελίχθηκε τόσο που δεν αρκούσε μόνο ένα είδος εγκατάστασης για όλους τους τύπους δοκιμών. Η ανάγκη για τη λειτουργία πάνω από μιας εγκατάστασης είχε ως αποτέλεσμα την εξειδίκευσή τους.

Παρά την πολλαπλότητα των αριθμών τους, οι αεροσήραγγες και τα παράγωγά τους παραμένουν ένα κώλυμα για την ανάπτυξη νέων οχημάτων. Ωστόσο, υπάρχει

βοήθεια από δύο τάσεις: πρώτον, η αυξανόμενη ποσότητα δοκιμών με μοντέλα μειωμένης κλίμακας; δεύτερον, η εκτεταμένη χρήση αριθμητικής ρευστοδυναμικής.

Ένας λογικός στόχος θα είναι η χρήση μοντέλων μόνο με μειωμένη κλίμακα και αριθμητικές μέθοδοι για την ανάπτυξη εναλλακτικών σχεδίων. Έτσι, η αεροσήραγγα πλήρους κλίμακας μπορεί να διατηρηθεί για επικύρωση και την τελική εκτίμηση.

Ένα στόχος-κλειδί για τη τεχνική της αυτοκινητιστικής αεροσήραγγας είναι η βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων δοκιμής. Άνθρωποι έξω απ' την κοινωνία της αεροδυναμικής (και κάποιες φορές μέσα απ' αυτήν) έκαναν συχνά την ερώτηση: Το έργο ενός αεροδυναμιστή αυτοκινήτων είναι να αναπτύξει τεχνικές για τη προσομοίωση του εδάφους, για την περιστροφή των τροχών, και για τη διαδικασία διόρθωσης των αποτελεσμάτων της αεροσήραγγας; Δε θα ήταν καλύτερο να αφιερώσει το χρόνο του στη δημιουργία νέων σχεδίων με καλύτερες αεροδυναμικές ιδιότητες; Η απάντηση και στις δύο ερωτήσεις είναι ξεκάθαρη.

Η υψηλή ακρίβεια είναι αναγκαία γιατί οι βελτιώσεις στις ιδιότητες αεροδυναμικής επιτυγχάνονται με μια σειρά βημάτων. Καθένα από αυτά μπορεί να είναι πολύ μικρό, αλλά συνεισφέρει στο κόστος του προϊόντος ή απαιτεί συμβιβασμό στο φορμάρισμα. Επομένως θα πρέπει να υπάρχει βεβαιότητα για το αν θα «λειτουργήσουν».

Οι τεχνικές προσομοίωσης και διόρθωσης που απαιτούνται σε δοκιμές αυτοκινήτων και σε αεροσήραγγες έχουν συγκεκριμένα προβλήματα. Ποιός άλλος θα τα λύσει αν όχι ο αεροδυναμιστής οχημάτων; Ωστόσο, δε θα πρέπει να διστάσει να χρησιμοποιήσει τεχνικές της αεροναυπηγικής. Ούτως ή άλλως, με αυτόν τον τρόπο σημειώθηκε πρόοδος στην τεχνική αυτοκινητιστικής αεροσήραγγας.

## 1.8 Σημειογραφία

A μπροστινή περιοχή οχήματος, Εικ. 1.4

AC διατομή της εισόδου του συλλέκτη, Εικ. 1.5

AN διατομή της εξόδου του ακροφύσιου, Εικ. 1.5

ASC διατομή του θαλάμου καθίζησης, Εικ. 1.5

C περίμετρος του ακροφύσιου

D μέτρηση αντίστασης

Dhyd υδραυλική διάμετρος του ακροφύσιου

DN υδραυλική διάμετρος του ακροφύσιου, Εικ. 1.12

L μήκος του τμήματος δοκιμής, Εικ. 1.12

Lp επίπεδο πίεσης του ήχου

Ma αριθμός Mach

Ma\* $\infty$  κρίσιμος αριθμός Mach, Εικ. 1.64

R Ακτίνα, Εικόνες 1.54, 1.59

Re Αριθμός Reynolds, Εξ. (1.10)

ReA Αριθμός Reynolds βασισμένος στη τετραγωνική ρίζα της μπροστινής περιοχής A

QC Ροή θερμότητας, Εξ. (1.2)

Tu επίπεδο στροβιλισμού, Εικ. 1.17

U ροή ταχύτητας



$U_B$  ταχύτητα του ιμάντα

$U_\infty$  ερχόμενη ταχύτητα ροής

$V$  όγκος αναρρόφησης, Εικ. 1.39

$V_P$  όγκος του διάκενου, Εικ. 1.24

$c_D$  συντελεστής αντίστασης, Εξ. (1.2), (2.27)

$c_L$  συντελεστής άνωσης, Εξ. (2.27)

$c_p$  συντελεστής πίεσης, Εξ (2.9)

$c_Q$  παράμετρος αναρρόφησης, Εικ. 1.39

$b$  μήκος εγκοπής, Εικ. 1.39

$b$  πλάτος οχήματος, Εικ. 1.60, 1.61

$d$  διάμετρος τροχού

$e$  απόσταση εδάφους, Εικ. 1.44

$h_8$  απόσταση εδάφους, Εικ. 1.35

$k$  συντελεστής ακροφύσιου, Εξ. (1.3)

$l$  μήκος του οχήματος, Εικ. 1.29, 1.58, 1.64

$P$  στατική πίεση

$P_N$  στατική πίεση μέσα στο ακροφύσιο, Εικ. 1.22

$P_P$  στατική πίεση μέσα στο διάκενο, Εικ. 1.22

$P_{SC}$  στατική πίεση μέσα στο θάλαμο καθίζησης

$q_\infty$  στασιμότητα πίεσης της ερχόμενης ροής, Εξ. (1.3)

$r$  τοπική ακτίνα, Εικ. 1.60, 1.61, 1.63

$s$  πλάτος εγκοπής, Εικ. 1.39

$u, v, w$  συστατικά ταχύτητας στην κατεύθυνση  $x, y, z$

$UB$  μέσο όρο ταχύτητας στην έξοδο του ακροφύσιου (εκτός του οριακού στρώματος)

$x, y, z$  ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων

$\alpha$  γωνία κλίσης

$\beta$  γωνία εκτροπής

$\delta$  πυκνότητα του οριακού στρώματος, Εικ. 1.27

$\epsilon$  συντελεστής στένωσης, Εξ (1.6)

ζ συντελεστής απώλειας

η ακτίνα

κ αναλογία συστολής

$\lambda$  σχετικό μήκος =  $L/DN$

$\nu$  κινηματικό ιξώδες

$\phi$  αναλογία στένωσης,  $A/AN$

## Υπογεγραμμένες

corr διορθωμένος

crit κρίσιμος

m υπολογισμένος

opt βελτιστοποιημένος

