



Αεροδυναμική Μελέτη Βαρέων- Εμπορικών Οχημάτων

Φοιτητές:

Κολωνιάρης Γεώργιος

Δαπέργολας Αλέξανδρος

Επόπτης Καθηγητής: Δεληπορανίδης Γεώργιος

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	4
2. Μελέτη των αντιστάσεων και της κατανάλωσης στο όχημα.....	5
2.1. Ελκτική αντίσταση και κατανάλωση καυσίμου.....	5
2.2. Μείωση της αντίστασης και της κατανάλωσης του καυσίμου.....	7
2.3. Οι συντελεστές της αεροδυναμικής αντίστασης σε διάφορα εμπορικά οχήματα.....	9
2.3.1. Λειτουργία σε νηνεμία.....	10
2.3.2. Η αντίσταση ως λειτουργία της γωνίας αποσταθεροποίησης (yaw angle).....	11
2.3.3. Επίδραση του ανέμου – Ορισμός της γωνίας αποσταθεροποίησης.....	12
2.3.4 Χαρακτηρισμός της αντίστασης του αέρα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.....	13
2.4. Μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης.....	15
2.4.1. Φάσμα για αεροδυναμικές αλλαγές στα εμπορικά οχήματα.....	15
2.4.2. Βελτίωση στο τούνελ του αέρα – προβλήματα με μοντέλα μειωμένης κλίμακας.....	16
3. Κατηγορίες Οχημάτων.....	17
3.1. Ελαχιστοποίηση αντίστασης σε φορτηγά.....	17
3.1.1. Καταστάσεις χαρακτηριστικής ροής και πίεσης.....	17
3.1.2. Μερική αντίσταση – πρόβλημα παρεμβολής.....	19
3.1.3. Σχήμα καμπίνας οδηγού.....	21
3.2.1. Όχημα με δύο σώματα (διπλή νταλικά).....	25
3.2.2. Σύγχρονος σχεδιασμός φορτηγού – ρυμουλκούμενου.....	27
3.3.1. Ελαχιστοποίηση της αντίστασης σε λεωφορεία και κλειστά φορτηγά παραδόσεων.....	30
3.3.1.1. Οριακές Συνθήκες.....	30
3.3.1.2. Χαρακτηριστικές συνθήκες ροής σε απλά γεωμετρικά σώματα.....	30
3.4. Λεωφορεία.....	34
3.4.1 Βελτιστοποίηση του μπροστινού άκρου.....	34
3.4.2 Βελτιστοποίηση του πίσω άκρου.....	40
4. Αποκτώντας πλεονέκτημα των επιδράσεων των αεροδυναμικών παρεμβολών.....	42
4.1. Οδήγηση σε φάλαγγα.....	42

4.2. Οδήγηση μέσω σηράγγων.....	43
5. Πρόσθετα εξαρτήματα.....	48
5.1. Αναλυτική παρουσίαση των εξαρτημάτων.....	51
5.1.1. Αεροδυναμικοί καθρέπτες.....	51
5.1.2. Ανεμοθραύστης.....	52
5.1.3. Αεροδυναμικοί λασπωτήρες.....	52
5.1.4. Πλευρικά πάνελ.....	53
5.1.5. Αεροδυναμικά καλύμματα ζαντών	53
5.1. 6. Εξωτερικό αλεξήλιο.....	54
5.1.7. Μάσκα οροφής ή εκτροπής.....	54
5.1. 8. Κολάρο με φέρινγκ οροφής.....	55
5.1.9. Πλευρικά πτερύγια.....	56
5.1.10. Πτερύγια στο πίσω μέρος του ρυμουλκούμενο.....	57
5.1.11. Σύστημα μείωση της οπισθέλκουσας.....	60
5.1.12. Ενεργητικός έλεγχος ροής.....	61
6. Μελλοντικός Σχεδιασμός.....	62
Βιβλιογραφία.....	67

1. Εισαγωγή

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της αεροδυναμικής των βαρέων εμπορικών οχημάτων. Η αεροδυναμική διαμόρφωση εμπλέκει την προσαρμογή του σχήματος του οχήματος με σκοπό τη μείωση της αντίστασης που δημιουργείται καθώς αυτό κινείται μέσα από τον αέρα. Αυτή η αντίσταση ονομάζεται αεροδυναμική αντίσταση και εξαρτάται από το σχήμα του οχήματος και από την ταχύτητα του.

Η αύξηση των τιμών των καυσίμων και η ανάγκη για κερδοσκοπική λειτουργία ενθαρρύνουν τον κατασκευαστή του εμπορικού οχήματος να αξιοποιήσει όλες τις ευκαιρίες για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου. Μια τέτοια ευκαιρία είναι η αεροδυναμική απόδοση.

Προφανώς, η αεροδυναμική δεν έχει καμία σημασία για το εργοτάξιο και για τα γεωργικά οχήματα, κλπ., αλλά για γρήγορη, μακρινή μεταφορά καθώς και μεταφορά από πόλη σε πόλη είναι αρκετά σημαντική. Μακρύσωμα επαγγελματικά οχήματα, τουριστικά λεωφορεία, φορτηγά για παράδοση εμπορευμάτων, είναι οι στόχοι για εξελιγμένο αεροδυναμικό σχεδιασμό με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης.

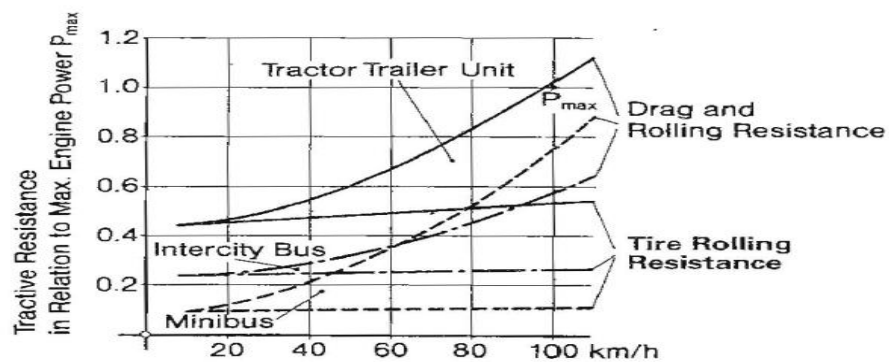
Η αεροδυναμική ανάπτυξη των εμπορικών οχημάτων έχει εξελιχτεί με το πέρασμα των χρόνων. Εξήντα πέντε χρόνια πριν η Labatt Brewing Company σχεδίασε ένα αεροδυναμικό όχημα για διαφημιστικούς σκοπούς έτσι ώστε να παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα εμπορεύματος με υψηλότερη ταχύτητα κίνησης. Η επιτυχία αυτής της προσπάθειας αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ενώ όλα τα φορτηγά της εποχής κινούνταν περίπου με 55 km/h το συγκεκριμένο κινούταν με 80 km/h και με 50% περισσότερο φορτίο.



2. Μελέτη των αντιστάσεων και της κατανάλωσης στο όχημα

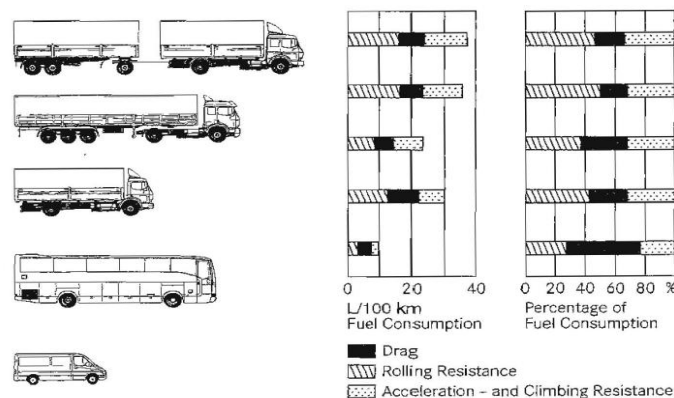
2.1. Ελκτική αντίσταση και κατανάλωση καυσίμου

Η εξοικονόμηση καυσίμου μέσω της αεροδυναμικής λεπτότητας πρέπει να εξεταστεί στο πλαίσιο της ενέργειας, αυτό είναι απαραίτητο για να ξεπεραστεί κάθε στοιχείο αντίστασης, όπως η αντίσταση κύλισης, η αντίσταση του αέρα, και η αναρριχητική αντίσταση. Σε σταθερή ταχύτητα σε έναν επίπεδο δρόμο, η αντίσταση κύλισης συνήθως ξεπερνάει την αντίσταση του αέρα.



Τα στοιχεία της ελκτικής αντίστασης

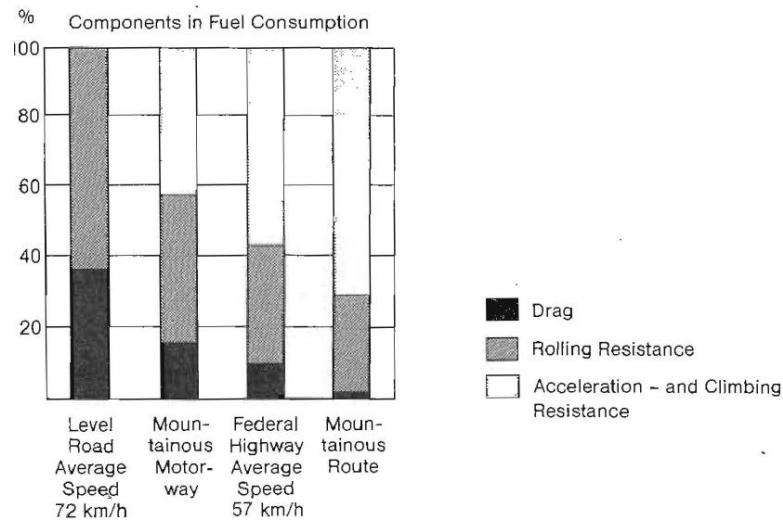
Ακόμη και σε μέτρια ταχύτητα, η αντίσταση του αέρα υπερβαίνει την αντίσταση κύλισης μόνο στην περίπτωση των ελαφρών φορτηγών και ημιφορτηγών, και σε συνδυασμούς βαρέων φορτηγών, μόνο πάνω από 100 km/h. Παρ' όλα αυτά, η αντίσταση του αέρα δεν πρέπει να αγνοηθεί, ακόμη και για βαριές μονάδες, αν σκεφτούμε ότι η δύναμη που χρειάζεται ένα φορτηγό-τρένο 40 τόνων για να κάμψει την αντίσταση του αέρα είναι 18 kW σε 60 km/h και 40 kW στα 80 km/h.



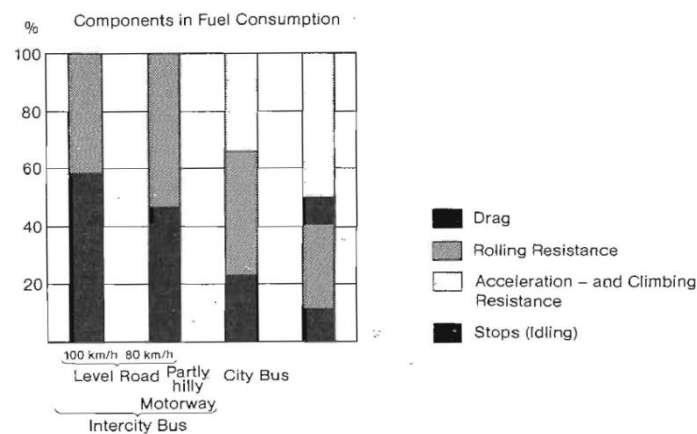
Ποσότητα επί τοις εκατό της κατανάλωσης καυσίμου σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων με βάση τα στοιχεία της ελκτικής αντίστασης.

Στην πράξη, η αναρρίχηση και η επιτάχυνση τροποποιούν την ιδανική σταθερή ταχύτητα, τη σχέση του επίπεδου δρόμου για τις κύριες κατηγορίες των οχημάτων γενικής χρήσεως. Η αεροδυναμική αντίσταση, ωστόσο, εξακολουθεί να είναι σημαντική.

Παρακάτω φαίνεται πως η συμβολή της αεροδυναμικής αντίστασης κυμαίνεται από 2,5% έως 35%, με το είδος του δρόμου και την ταχύτητα, για ένα συνδυασμό φορτηγού – ημιρυμουλκού 40 τόνων. Επίσης, παρουσιάζονται παρόμοια στοιχεία αντίστασης για ένα λεωφορείο. Δοκιμές που έχουν γίνει με μέχρι 100 km/h δείχνουν ότι η αντίσταση του αέρα κυριαρχεί σε επίπεδο δρόμο. Στις χαμηλότερες μέσες ταχύτητες, στην κίνηση της πόλης, κυριαρχεί το στοιχείο της επιτάχυνσης.



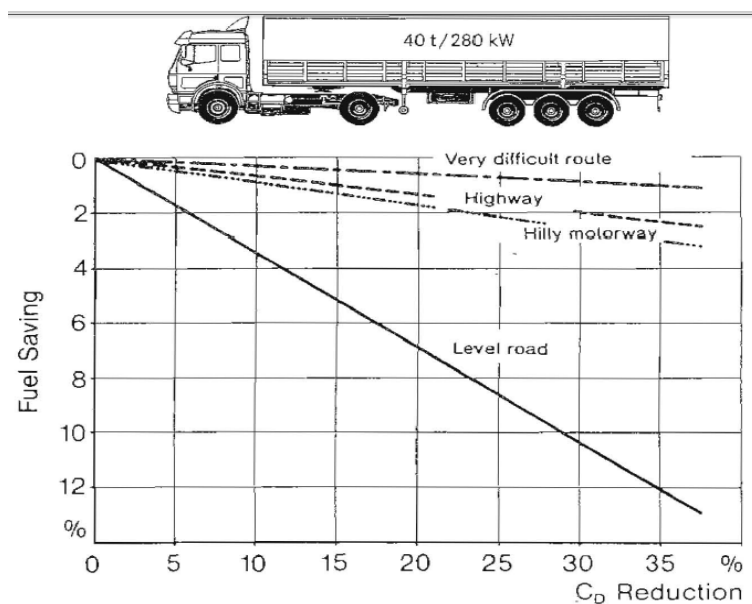
Η κατανάλωση καυσίμου ενός 40-τονου φορτηγού – ημιρυμουλκού στην προσπάθεια να υπερνικήσει τα στοιχεία της ελκτικής αντίστασης για διαφορετικά είδη διαδρομών.



Η κατανάλωση καυσίμου για αστικά και περιαστικά λεωφορεία στην προσπάθειά τους να υπερνικήσουν την ελκτική αντίσταση.

2.2. Μείωση της αντίστασης και κατανάλωση καυσίμου

Η επίδραση της μείωσης της αντίστασης στην κατανάλωση καυσίμου σε πραγματική λειτουργία μπορεί να φανεί καλύτερα με τυπικά οχήματα σε τυπικές συνθήκες οδήγησης, όπως φαίνεται στην εικόνα. Εδώ, η εξοικονόμηση καυσίμων με βάση τη συνολική κατανάλωση σε πραγματικές συνθήκες, όπως μία "πολύ δύσκολη διαδρομή" ή στην "εθνική οδό," έρχεται σε αντίθεση με την ιδανική, σε επίπεδο δρόμο, με σταθερή ταχύτητα, οδήγηση.



Η επίδραση της μείωσης της αντίστασης (μείωση c_D) στην κατανάλωση καυσίμου ενός φορτηγού – ημιρυμουλκού 40 τόνων.

Η μείωση της κατανάλωσης του λεωφορείου είναι μέτρια στην κίνηση της πόλης, αν και μια ξεχωριστή λωρίδα λεωφορείων παρέχει σαφή πλεονεκτήματα οικονομίας καυσίμου. Ελαφρά φορτηγά ή φορτηγά εξαρτώνται λιγότερο από καθιερωμένες διαδρομές.

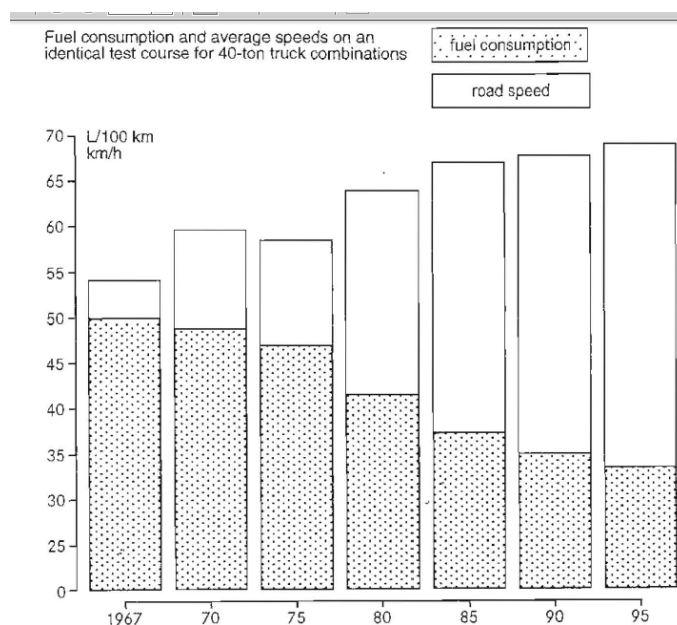
Έτσι, οι μειώσεις στην αντίσταση είναι χρήσιμες για τα βαρέα φορτηγά και τα λεωφορεία σε αυτοκινητοδρόμους, καθώς και για τα ελαφρά φορτηγά, τα μίνι λεωφορεία, τα φορτηγά, ακόμη και στις πιο "επίπονες" διαδρομές.

Σύμφωνα με το φυλλάδιο του IAA FORUM, η οικολογική συνείδηση παίζει όλο και σημαντικότερο ρόλο στις δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα του σχεδιασμού των αυτοκινητοβιομηχανιών. Τα εμπορικά οχήματα είναι τώρα πιο ήσυχα, πιο οικονομικά και πιο ασφαλή. Τα λεωφορεία τώρα καταναλώνουν 20% λιγότερα καύσιμα σε σχέση με τα αντίστοιχα μέρη τους πριν από 20 χρόνια: Στην περίπτωση των φορτηγών 40 τόνων, το ποσοστό εξοικονόμησης καυσίμου φτάνουν έως και 30%, πράγμα που φαίνεται καθαρά στο παρακάτω σχήμα.

Ως εναλλακτική λύση για την αύξηση των επιδόσεων, είναι δυνατό να εφαρμοστεί το πλεόνασμα ενέργειας που παράγεται από τις μειώσεις στην αεροδυναμική αντίσταση για να

εξοικονομήσει επιπλέον καύσιμα, καθορίζοντας τις κατάλληλες προσαρμογές στην απεικόνιση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης.

Τα εμπειρικά δεδομένα που προκύπτουν μπορούν να εφαρμοστούν σε προγράμματα επίδοσης κινητήρων σχεδιασμένων με σκοπό να παράγουν ικανές αλλαγές ταχυτήτων σε προγραμματισμένες ζώνες προσφέροντας υψηλότερα επίπεδα οικονομίας. Το πιο αποτελεσματικό μέσο για την επίτευξη της απαιτούμενης μείωσης της ταχύτητας του κινητήρα καθορίζοντας μια διαφορετική αναλογία τελικής – οδήγησης. Οι οικονομικές θεωρήσεις υπαγορεύουν ότι αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την επιλογή της πλέον κατάλληλης αναλογίας μετατροπής από το διαθέσιμο εύρος, ενώ οι βέλτιστες αναλογίες μπορούν να καθοριστούν στη συνέχεια, όταν οι άλλες αλλαγές σχεδιασμού υλοποιούνται. Τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν, οι διακυμάνσεις στις συνθήκες λειτουργίας συνυπολογίζονται στις εκτιμήσεις, καθιστώντας δυνατή την επίτευξη του βέλτιστου συμβιβασμού μεταξύ βελτιωμένης απόδοσης του οχήματος και μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου.

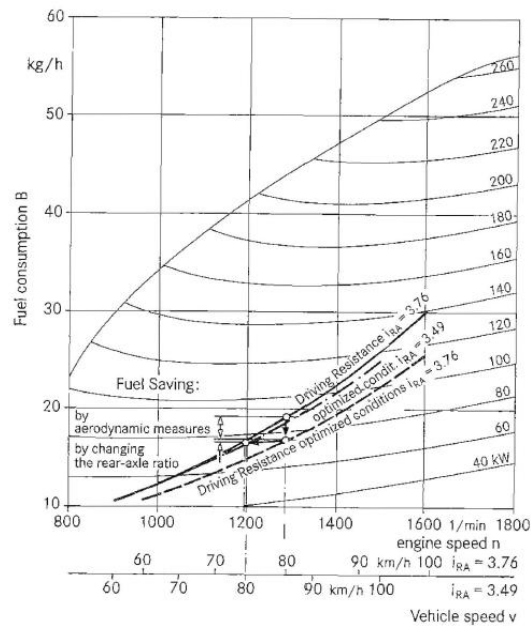


Η οικονομική οδήγηση ενός εμπορικού οχήματος.

Για να αναφέρουμε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα, για ταχύτητα $V = 80 \text{ km/h}$ η αύξηση της οικονομίας καυσίμου που απορρέει από τις αεροδυναμικές βελτιώσεις ανέρχεται σε περίπου $2,4 \text{ kg/h}$. Οι αεροδυναμικές καμπύλες αντίστασης στην παρακάτω εικόνα απεικονίζουν την επιρροή μιας συμπληρωματικής μείωσης της ταχύτητας του κινητήρα στην κατανάλωση καυσίμου ενός οχήματος 40 τόνων.

Η εξοικονόμηση καυσίμου που παρέχεται από την μείωση της ταχύτητας του κινητήρα είναι της τάξεως των $0,4 \text{ kg/h}$ για $V = 80 \text{ km/h}$. Η τροποποίησης του συστήματος μετάδοσης της κίνησης απαιτείται για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα με ένα σταθερό πλεόνασμα

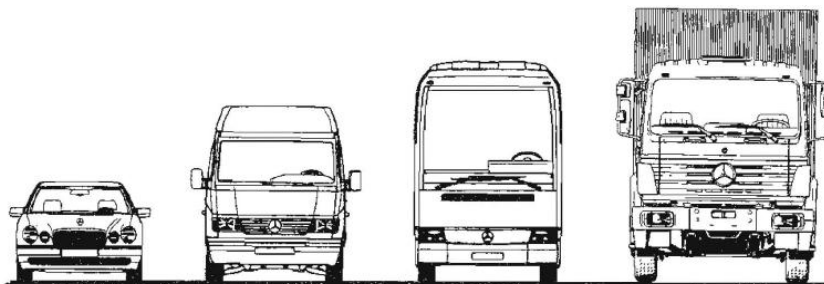
ενέργειας, για παράδειγμα, χωρίς περαιτέρω αεροδυναμικές βελτιώσεις, είναι μια αλλαγή στην αναλογία μετατροπής της τελικής οδήγησης από $i_{RA} = 3,76$ σε 3,49.



Επιρροή της μείωσης της αντίστασης στην κατανάλωση καυσίμου μέσα από την απόδοση των χαρακτηριστικών που περιλαμβάνουν την μείωση των στροφών ανά λεπτό αλλάζοντας την αναλογία του πίσω άξονα σε ένα φορτηγό 40 τόνων.

2.3. Οι συντελεστές της αεροδυναμικής αντίστασης σε διάφορα εμπορικά οχήματα

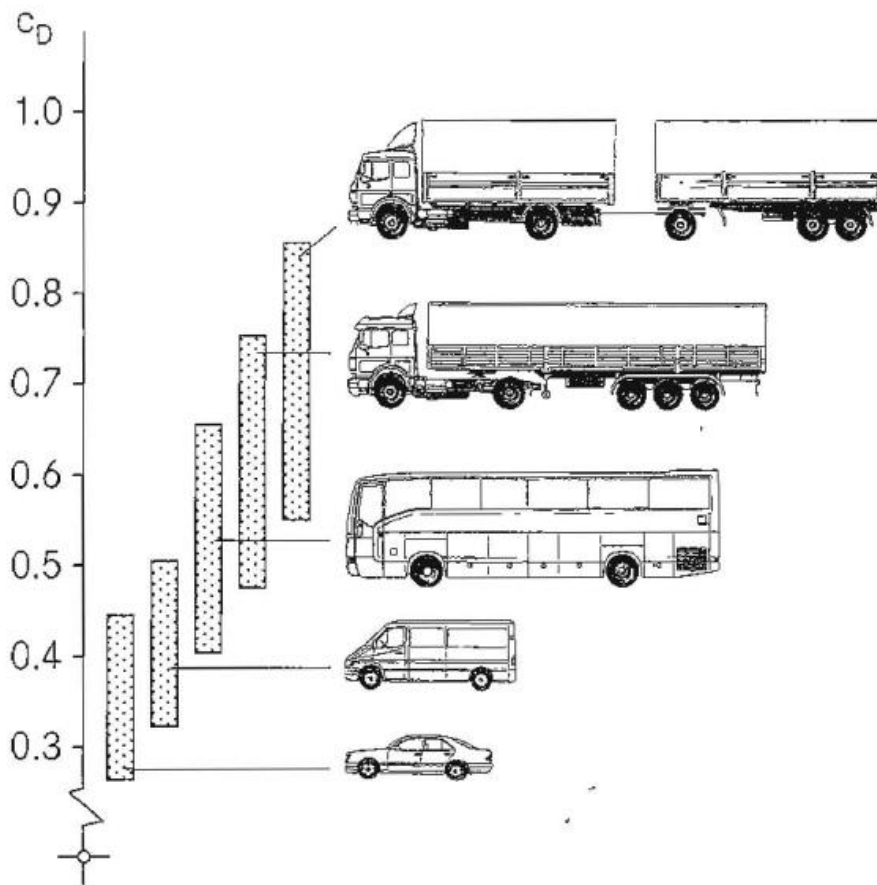
Δεν είναι μόνο η αισθητά μεγαλύτερη μετωπική επιφάνεια σε σύγκριση με το αυτοκίνητο που είναι υπεύθυνο για τις υψηλές αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν στο εμπορικό όχημα. Οι πρόσθιες περιοχές ενός υψηλόσωμου φορτηγού, λεωφορείου, ελαφρού φορτηγού και του αυτοκίνητου είναι περίπου σε αναλογία 9:7:4:2. Αποφασιστικής επιρροής είναι η αεροδυναμική ποιότητα του σχήματος του αυτοκινήτου, ο συντελεστής αντίστασης c_D .



Το μπροστινό μέρος διαφορετικών τύπων οχημάτων.

2.3.1. Λειτουργία σε νηνεμία

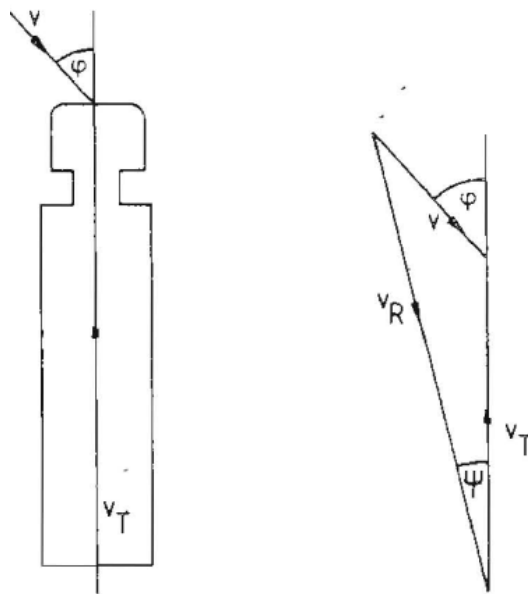
Με τα πολλά διαφορετικά σχήματα και μεγέθη τους, τα επαγγελματικά οχήματα έχουν ένα ευρύτερο φάσμα των συντελεστών αντίστασης από τα αυτοκίνητα. Τα λεωφορεία έχουν συντελεστές C_D μιάμιση φορές περισσότερο από τα αυτοκίνητα: και οι μονάδες των φορτηγών – ημιρυμουλκών, και των φορτηγών και οι ρυμουλκούμενες μονάδες περίπου διπλάσιους. Μόνο τα ελαφρά φορτηγά, τα οποία προσφέρονται πιο εύκολα στην αεροδυναμική βελτίωση, έχουν στοιχεία αντίστασης παραπλήσια με αυτά των αυτοκινήτων.



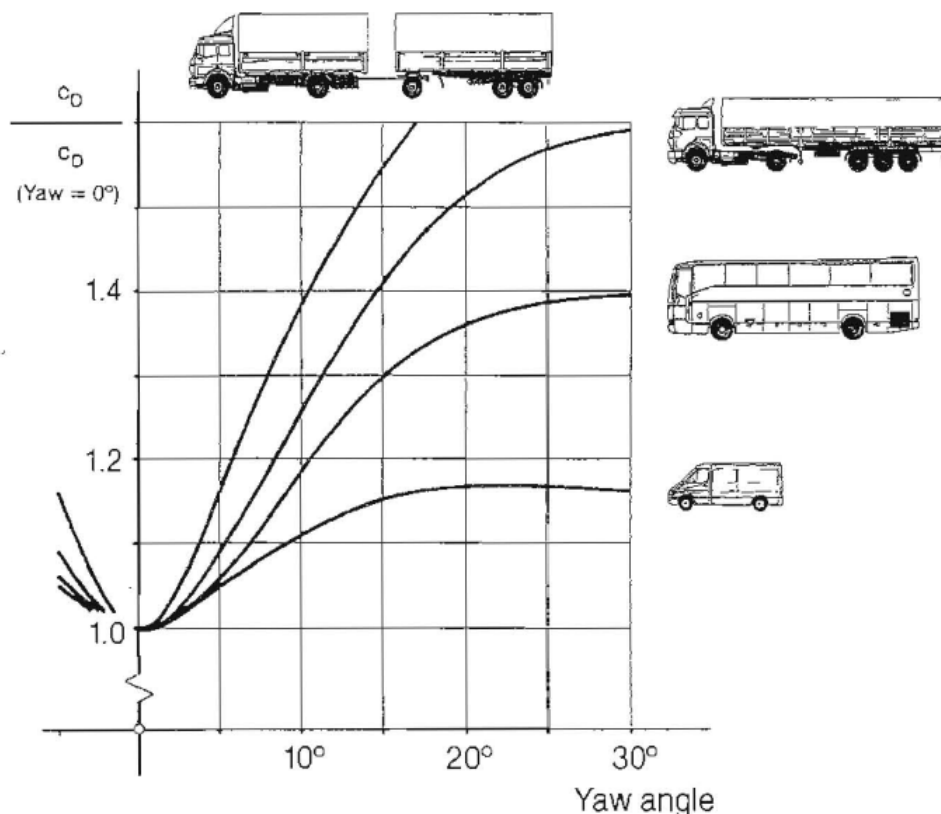
Οι συντελεστές αντίστασης σε διαφορετικά εμπορικά οχήματα.

2.3.2. Η αντίσταση ως λειτουργία της γωνίας αποσταθεροποίησης (yaw angle)

Όταν το όχημα δεν κινείται σε νηνεμία, υπάρχει η λεγόμενη αποσταθεροποίηση του οχήματος, λόγω πλευρικών ανέμων. Αυτό το γεγονός συντελεί στην περαιτέρω αύξηση του c_D και η γωνία πρόσπτωσης του αέρα στο όχημα δημιουργεί την γωνία αποσταθεροποίησης Ψ , πράγμα που εξηγείται σχηματικά παρακάτω (σχήμα 2.3.2.1). Ο συντελεστής αντίστασης σε μηδενική γωνία αποσταθεροποίησης (που ισοδυναμεί με την οδήγηση σε νηνεμία) δίνει ανεπαρκή ένδειξη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών σε πραγματική λειτουργία, όπου ο συντελεστής της επαπτόμενης δύναμης c_T (λόγω αποσταθεροποίησης) πρέπει να ληφθεί υπόψη. Όλοι οι τύποι οχημάτων, με εξαίρεση το ελαφρύ φορτηγό, δείχνουν μια σημαντική αύξηση στο c_T με αυξανόμενη γωνία αποσταθεροποίησης (σχήμα 2.3.2.2).



2.3.2.1 Διάγραμμα σχετικού διανύσματος αέρα

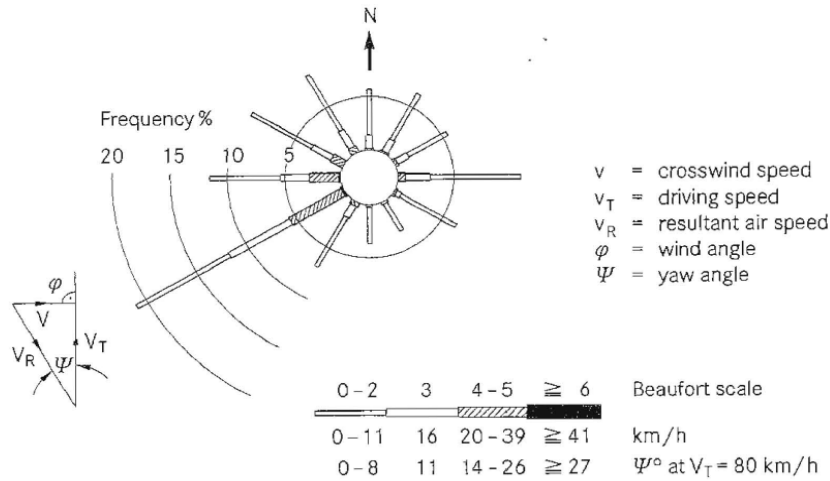


2.3.2.2 Η αντίσταση σε σχέση με την αποσταθεροποίηση σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων.

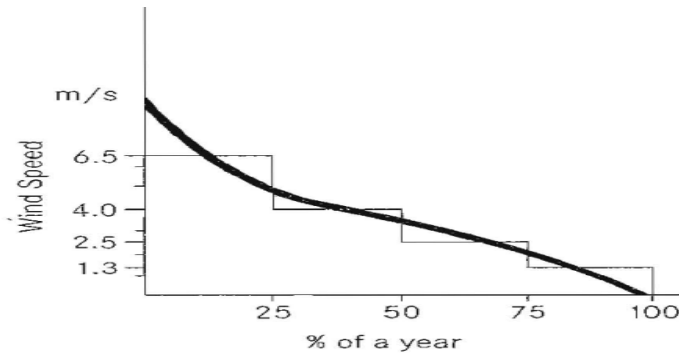
2.3.3. Επίδραση του ανέμου – Ορισμός της γωνίας αποσταθεροποίησης

Το μέγεθος της γωνίας αποσταθεροποίησης σχετίζεται με τις οδικές συνθήκες του ανέμου. Ωστόσο, το μεγάλο εύρος της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σημαίνει ότι πρέπει να αρκεστούμε σε μια πρόχειρη εκτίμηση.

Αν βασίζουμε την εκτίμησή μας για τις συνθήκες ανέμου σε διεθνή αεροδρόμια, που παρουσιάζονται ως «κάρτες πυξίδας», βρίσκουμε ότι οι δυνάμεις του ανέμου Beaufort 4-5 (20-39 km/h) και άνω συμβαίνουν μόνο περίπου 20% του χρόνου κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση, οι ελαφρύτεροι άνεμοι κυριαρχούν. Τα τεστ αεροδυναμικής αντίστασης σε μέγιστες επιτρεπτές ταχύτητες των βαρέων επαγγελματικών οχημάτων καλύπτονται επαρκώς από μία γωνία αποσταθεροποίησης $\Psi < 14^\circ$. Οι ταχύτητες ανέμου που μετρήθηκαν από τον L. Gardell στη Σουηδία σε ύψος 2 μ. πάνω από την επιφάνεια του δρόμου οδήγησε στην $\Psi = 13^\circ$, σχεδόν την ίδια τιμή. Αυτά τα στοιχεία βασίζονται σε μια ταχύτητα οχήματος 80 km/h και πλευρικό άνεμο των 5 m/s που επηρεάζουν το όχημα σε μία κάθετη γωνία προς τη διεύθυνση του ταξιδιού (με συντελεστή συχνότητας = 20%).



«Κάρτες πυξίδας», που παρουσιάζουν τη συχνότητα και τη διεύθυνση ανέμων διαφορετικής δύναμης



Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε ποσοστό επί τοις εκατό από τον L. GARDELL.

2.3.4. Χαρακτηρισμός της αντίστασης του αέρα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση των πλευρικών ανέμων διάφοροι τύποι έχουν προταθεί ώστε να αντιπροσωπεύσουν έναν συντελεστή αντίστασης c_D με μέσο άνεμο. Σύμφωνα με τον K.C. INGRAM ο συντελεστής αντίστασης με μέσο άνεμο, c_D , παριστάνεται ως:

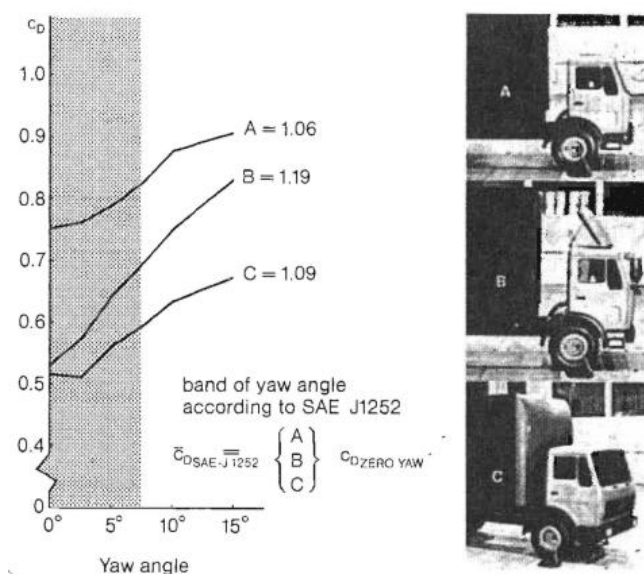
$$\bar{c}_D = \int_0^{V_{\max}} \int_0^{2\pi} c_D(\psi) \left\{ 1 + (V/V_T)^2 + 2(V/V_T) \cos \phi \right\} p(V, \phi) d\phi dV \quad (9.1)$$

όπου $p(V, \phi)$ είναι η πιθανότητα ότι η ταχύτητα του ανέμου V πηγαίνει προς μία γωνία ϕ σχετική με το όχημα. Αυτή η μέση διαδικασία λαμβάνει υπόψη ότι η ταχύτητα του αέρος που σχετίζεται με το όχημα (από το οποίο εξαρτάται η αεροδυναμική αντίσταση) είναι διαφορετική από την ταχύτητα του αυτοκινήτου στο δρόμο.

Η εξίσωση μπορεί να αξιολογηθεί από ένα πρόγραμμα υπολογιστή που ενσωματώνει μία αριθμητική ολοκλήρωση, χρησιμοποιώντας μετρημένα δεδομένα της c_T για ένα εύρος τιμών της φ και δεδομένα σχετικά με την κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου. Η διανομή του φ αξιολογείται από τα δεδομένα της κατεύθυνσης του ανέμου και από δεδομένα σχετικά με τη χρήση από βαρέα φορτηγά μεταφοράς αγαθών των αυτοκινητοδρόμων, προσανατολισμένα σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

Σε συγκριτικά συμπαγείς σκελετούς η μέση αντίσταση του αέρα c_D στα 30 m/s είναι λιγότερο από 10 τοις εκατό μεγαλύτερη από την αντίσταση σε μηδενική αποσταθεροποίηση, αλλά για πιο σύνθετα σχήματα η αύξηση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη σύμφωνα με τον A. NAYSMITH. Μια οδική ταχύτητα $V_T = 89$ km/h και μια τυπική ταχύτητα ανέμου $V = 11$ km/h χρησιμοποιούνται σαν βάση για αξιολογήσεις στις Ηνωμένες Πολιτείες. (SAE J1252).

Χαρακτηριστικά c_T γραφήματα που απεικονίζουν διαμορφώσεις σκελετών, παρουσιάζονται παρακάτω. Σύμφωνα με το SAE J1252 βρίσκουμε απεικονίσεις με τη μέση αντίσταση του αέρα c_D 6 έως 19 τοις εκατό υψηλότερες από εκείνες στη μηδενική αποσταθεροποίηση.

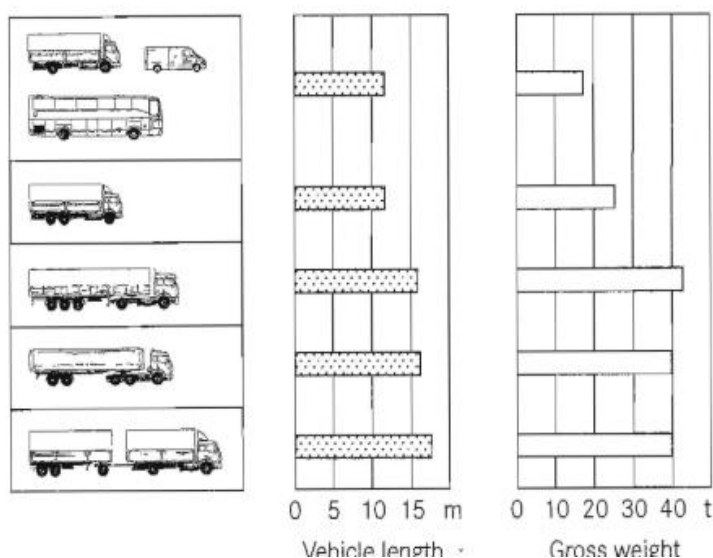


Συντελεστής μέσης αντίστασης του αέρα c_D διαφορετικών αεροδυναμικών φορτηγών – ρυμουλκών μηχανημάτων σύμφωνα με την διαδικασία SAE J1252.

2.4. Μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης

2.4.1. Φάσμα για αεροδυναμικές αλλαγές στα εμπορικά οχήματα

Διαφορετικά από το αυτοκίνητο, το σχήμα του εμπορικού οχήματος καθορίζεται κυρίως από το χώρο φορτίου, κυβοειδή με μυτερές άκρες οχήματα κυριαρχούν. Νομοθετημένα όρια μεγέθους επιβάλλουν περιορισμούς σε αυτή την απαίτηση. Πολύ λίγο πεδίο αλλαγής παραμένει σε αυτόν που ασχολείται με την αεροδυναμική για να μεταβάλλει το σχήμα του τμήματος του οχήματος που μεταφέρει το φορτίο. Ωστόσο, υπάρχει κάποια ελευθερία στο σχεδιασμό του μπροστινού μέρους του οχήματος και στην ανάπτυξη πρόσθετων εξαρτημάτων που μειώνουν την αντίσταση.

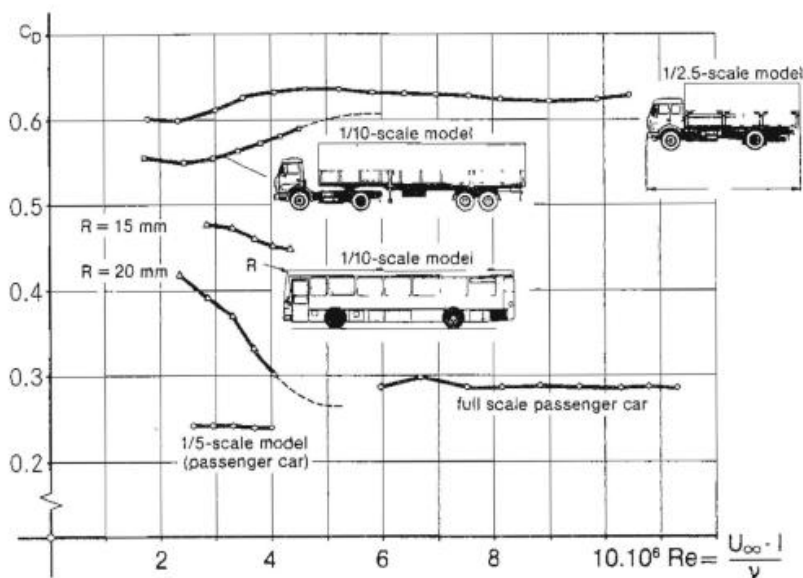


Επιτρεπτά μεγέθη οχημάτων και μεικτά βάρη (έγκυρα για την Ευρώπη).

2.4.2. Βελτίωση στο τούνελ του αέρα – προβλήματα με μοντέλα μειωμένης κλίμακας

Το τούνελ του αέρα είναι η ιδανική τοποθεσία για συστηματική δουλειά ανάπτυξης. Ωστόσο, οι διαστάσεις του τούνελ για τα εμπορικά οχήματα είναι προβληματικές. Ακριβείς αεροδυναμικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν σε μικρά φορτηγά πλήρους μεγέθους και λεωφορεία στα μεγαλύτερα τούνελ του αέρα που είναι διαθέσιμα σήμερα. Τα μεγαλύτερα οχήματα δημιουργούν εμπόδιο στο τμήμα ελέγχου και από το μήκος τους και από τον όγκο τους (μπλοκάρισμα). Άρα, πρέπει να μελετηθούν σε μειωμένη κλίμακα. Αλλά μπορούν με ασφάλεια τα αποτελέσματα σε μοντέλα μικρής κλίμακας να εφαρμοστούν σε αυθεντικά οχήματα (αυθεντικού μεγέθους). Η προϋπόθεση για αυτό είναι η ομοιότητα στη γεωμετρία και στη δυναμική ροής, δηλαδή ακριβή και λεπτομερή αντίγραφα των αρχικών και πανομοιότυπων αριθμών Reynolds για μοντέλα πλήρους μεγέθους.

Μια απώλεια της λεπτομερούς επιφάνειας είναι αναπόφευκτη σε μικρά μοντέλα (Κλίμακα 1:10). Επιπλέον, παρά τις μεγάλες ταχύτητες (250 km/h) μερικών τούνελ αέρος για τα αυτοκίνητα, οι αριθμοί Reynolds είναι ακόμη χαμηλότεροι από τα αντίστοιχα οχήματα που ταξιδεύουν στο δρόμο με ταχύτητα περίπου 80 km/h. Άρα, πρέπει να δείξουμε επιείκεια για τις διαφορές στη ροή του αέρα ανάμεσα στα μοντέλα και στα οχήματα σε πλήρη κλίμακα, τα οποία δηλώνονται ολοφάνερα σε μια διαφορετική τοποθεσία από την μετάβαση από το ελασματικό οριακό επίπεδο στο βίαιο οριακό επίπεδο και στα σημεία διαχωρισμού της ροής. Έτσι, σε μετρήσεις μοντέλων σε κλίμακα 1:10 φορτηγού – ημιρυμουλκούμενου η εξάρτηση από τους αριθμούς Reynolds είναι ολοφάνερη.



Η επιρροή των αριθμών Reynolds στην αντίσταση.

Μόνο σε ταχύτητες ρεύματος αέρα περίπου 300 km/h, στις οποίες τα αποτελέσματα της συμπίεσης δεν είναι πια αμελητέα εκεί ο συντελεστής της αντίστασης προσεγγίζει την τιμή για τον κατάλληλο αριθμό Reynolds (διακεκομμένη γραμμή). Στα εμπορικά οχήματα, διαφορετικά από τα αυτοκίνητα, αυτή η συμπεριφορά εξαρτάται βασικά από το σχήμα του μπροστινού μέρους του οχήματος. Σε ένα λεωφορείο με σημαντικές μπροστινές ακτίνες προκύπτουν διαφορετικές καμπύλες που εξαρτώνται από την ακτίνα. Οι μελέτες από τους F.W. PAWLOWSKI, W. – H. HUCHO, και K.R. COOPER, οδήγησαν σε παρόμοια αποτελέσματα.

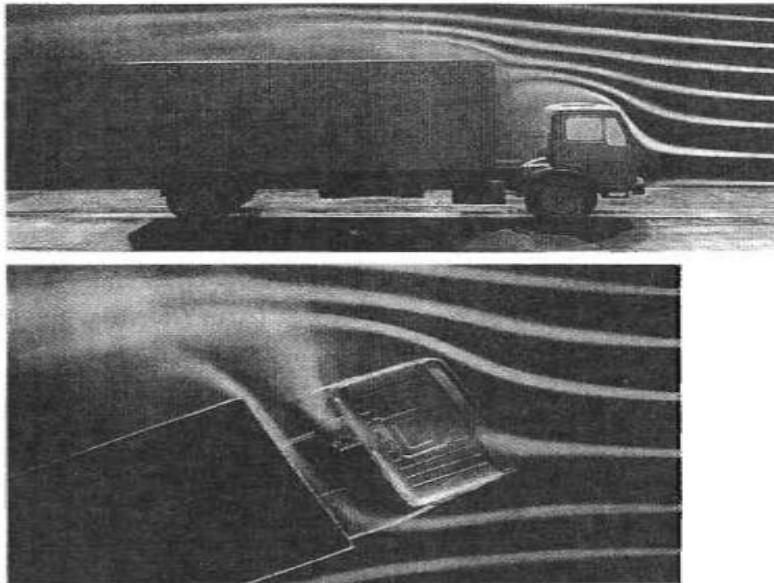
Οι μετρήσεις σε μοντέλα μικρότερης κλίμακας, εκτός από εκείνα με σύνθετες διορθώσεις στο οριακό στρώμα μπορούν μόνο κατά προσέγγιση να αναπαραστήσουν πραγματικές καταστάσεις. Σε πολλές περιπτώσεις επομένως χρησιμοποιούνται μόνο για ποιοτικές πρωταρχικές μελέτες. Μπορούμε να πετύχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο με μοντέλα κλίμακας 1:2:5. Αυτή η κλίμακα είναι αρκετά μεγάλη για να αναπαραστήσει όλες τις βασικές γεωμετρικές λεπτομέρειες συμπεριλαμβάνοντας το τμήμα ψυγείου και μηχανής και ο αριθμός Reynolds του πλήρους μεγέθους του οχήματος μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να ανατρέξουμε στα προβλήματα αριθμών Mach. Οι αεροδυναμικοί συντελεστές που αναπτύσσονται σε αυτά τα μοντέλα συμφωνούν απόλυτα με αυτούς που μετρούνται σε οχήματα πλήρους μεγέθους. Η προσομοίωση εδάφους μπορεί να εκτελεστεί με αυτά αξιοσημείωτα καλά.

3. Κατηγορίες Οχημάτων.

3.1. Ελαχιστοποίηση αντίστασης σε φορτηγά

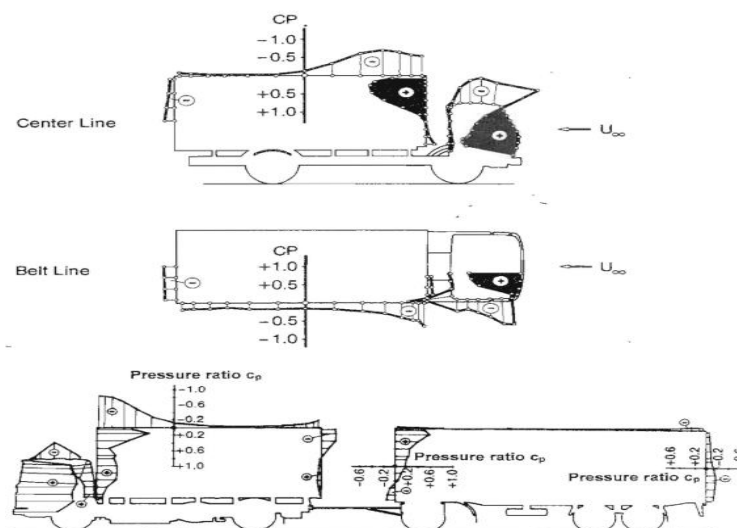
3.1.1. Καταστάσεις χαρακτηριστικής ροής και πίεσης

Εάν κοιτάξουμε στο πεδίο ροής της πιο συνηθισμένης ομάδας μεγάλων φορτηγών και ρυμουλκών οι φωτογραφίες της ροής που χρησιμοποιεί καπνό (Εικ. 9.20) δείχνουν δυνατή αλληλεπίδραση ανάμεσα στο χώρισμα του οδηγού και στο σώμα του οχήματος. Το πλάτος του κενού s , μετρημένο από το πίσω μέρος της θέσης του οδηγού έως το μπροστινό άκρο του οχήματος και το αντίστοιχο ύψος του οχήματος h , μετρημένο από την οροφή του χωρίσματος του οδηγού είναι βασικοί παράμετροι σε αυτή τη σχέση.



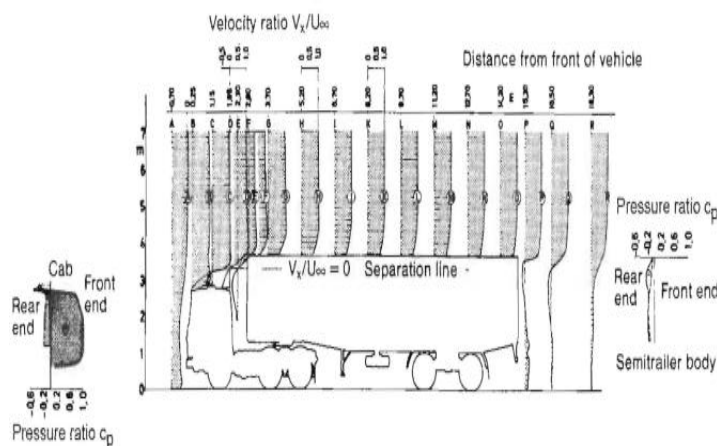
Χαρακτηριστική ροή αέρα γύρω από ένα φορτηγό. Πάνω εικόνα: μηδενική γωνία αποσταθεροποίησης. Κάτω εικόνα: 30 μοίρες γωνία αποσταθεροποίησης.

Η κατανομή της πίεσης πάνω από το όχημα, με υψηλές θετικές ζώνες πίεσης στο μπροστινό μέρος του χωρίσματος οδηγού και του υπόλοιπου οχήματος και με αρνητική πίεση στο πίσω μέρος του οχήματος εξαιτίας του διαχωρισμού της ροής είναι χαρακτηριστικό μεγάλων οχημάτων που είναι μυτερά και απότομα στις άκρες και έχουν υψηλή αεροδυναμική αντίσταση.



Συντελεστής πίεσης c_p στην καμπίνα οδηγού και στα ρυμουλκούμενα, στο κεντρικό τμήμα, μηδενική γωνία αποσταθεροποίησης για το φορτηγό και για το όχημα με τα δύο ρυμουλκούμενα.

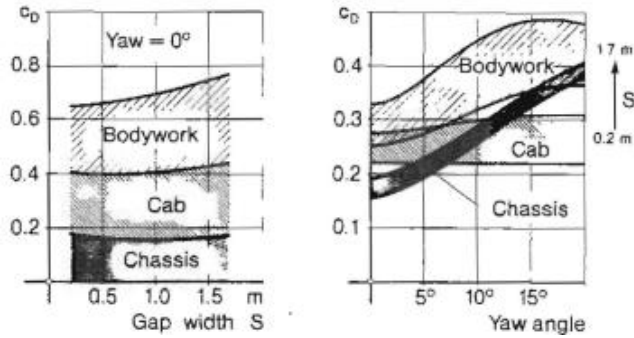
Επιπλέον πληροφορίες για την ποιότητα του σχήματος του οχήματος παρέχονται από την κατανομή της ταχύτητας. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το στοιχείο της οριζόντιας ταχύτητας V_x που σχετίζεται με την ταχύτητα U_∞ του συνεχόμενου ελεύθερου ρεύματος αέρα κατά μήκος του κεντρικού χωρίσματος του οχήματος. Στην κορυφή της οροφής του μυτερού οχήματος τμήματα αντίστροφης ροής είναι ορατά (παρουσιάζονται με τα μη σκιασμένα τμήματα), τα οποία χαρακτηρίζουν την ζώνη αναταραχής με τη ροή της επανακυκλοφορίας στη φούσκα του διαχωρισμού. Στην κορυφή του ρυμουλκούμενου ένα σχεδόν παχύ οριακό στρώμα αναπτύσσεται. Στο πίσω μέρος το χαρακτηριστικό μεγάλο τμήμα νεκρού νερού σχηματίζεται.



Αναλογίες ταχύτητας της ροής σχετικά με το όχημα και συντελεστής πίεσης στο κεντρικό τμήμα για συμμετρική ροή σε ένα ημιρυμουλκούμενο που έχει κύριο όγκο στο σχήμα κουτιού (Ύψος: 3,67 μ).

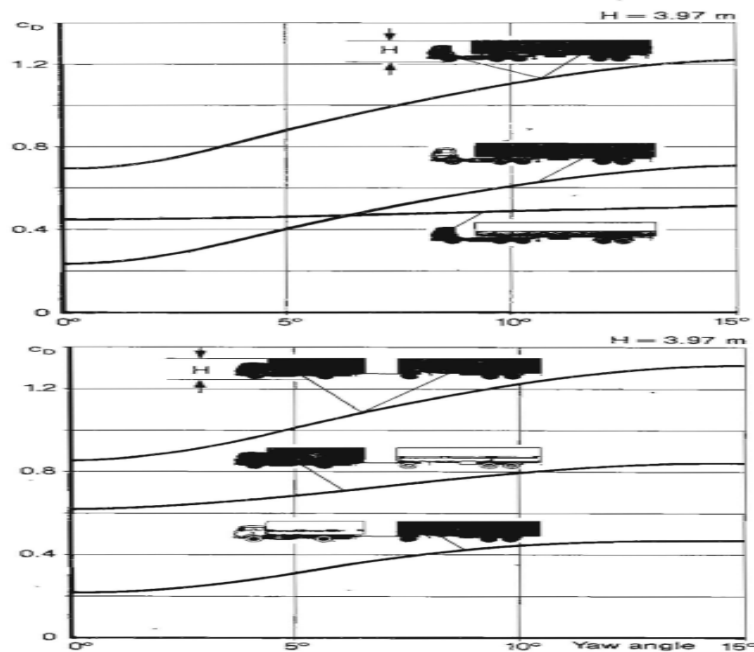
3.1.2. Μερική αντίσταση – πρόβλημα παρεμβολής

Από μια αεροδυναμική άποψη τα διπλά ρυμουλκά, τα φορτηγά και τα ρυμουλκούμενα σε ρεύμα αέρα είναι «σχηματισμοί», που αποτελούνται από αρκετά ατομικά σώματα, που αλληλεπιδρούν. Για να αποκτήσουμε μια καλύτερη κατανόηση από τα ατομικά αεροδυναμικά μέτρα οι δυνάμεις στα υποσώματα (ρυμουλκούμενα) πρέπει να εξεταστούν χωριστά. Η εικόνα 3.1.2.1 δείχνει ένα παράδειγμα μιας τέτοιας κατάρρευσης αντίστασης. Η συνολική αντίσταση από μια ημιρυμουλκούμενη μονάδα έχει διαχωριστεί στην μερική αντίσταση της καμπίνας οδηγού, του αμαξώματος και της ρυμουλκούμενης μονάδας. Με σχετικό αέρα από ευθεία μπροστά η μερική αντίσταση της ρυμουλκούμενης μονάδας της καμπίνας οδηγού και του αμαξώματος είναι στην αναλογία περίπου 4:3:2. Με το αυξανόμενο κενό s παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση στην αντίσταση. Με σχετικό αέρα από μια αυξανόμενη μηδενική γωνία ο συντελεστής αντίστασης ρυμουλκούμενης μονάδας και αμαξώματος αυξάνεται ευδιάκριτα. Αυτό προκύπτει από τον υπήνεμο διαχωρισμό της ροής και την ροή του αέρα σε σχέση με τη ρωγμή του αμαξώματος. Αντίθετα, ο συντελεστής αντίστασης της καμπίνας οδηγού σε αποσταθεροποίηση δεν αυξάνεται σχεδόν καθόλου από τον πλευρικό άνεμο.



3.1.2.1 Στοιχεία μερικής αντίστασης εξαρτημάτων για φορτηγό με ένα όχημα ρυμουλκούμενο δ ποδιών.

Με έναν παρόμοιο τρόπο ο συντελεστής αντίστασης ενός ρυμουλκούμενου οχήματος μπορεί να χωριστεί στα συστατικά μέρη του οχήματος και του ρυμουλκούμενου σύμφωνα με την εικόνα 3.1.2.2. Στην ταξινόμηση των μηδενικών γωνιών, που είναι σχετική για τα φορτηγά η αντίσταση του οχήματος είναι σχεδόν συνεχόμενη με την αποσταθεροποίηση. Η αύξηση της συνολικής αντίστασης με την αποσταθεροποίηση προκαλείται αποκλειστικά από το μοναδικό ρυμουλκούμενο όχημα. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι η παράλληλη ροή του αέρα μέσα από το κενό της καμπίνας του οδηγού με τον επακόλουθο διαχωρισμό ροής στην υπήνεμη πλευρά. Αυτό αυξάνει την αντίσταση του μπροστινού μέρους του ρυμουλκούμενου. Άλλοι λόγοι είναι η αλλαγή της ροής στο τελευταίο οπίσθιο σημείο του ρυμουλκούμενου (συγκρινόμενο σε συμμετρικές καταστάσεις) με μεγέθυνση του νεκρού νερού (μεγαλύτερη βάση αντίστασης ρυμουλκούμενων), καθώς επίσης και η αυξανόμενη ροή αέρα μέσα στην ακάλυπτη πλευρά του αμαξώματος.



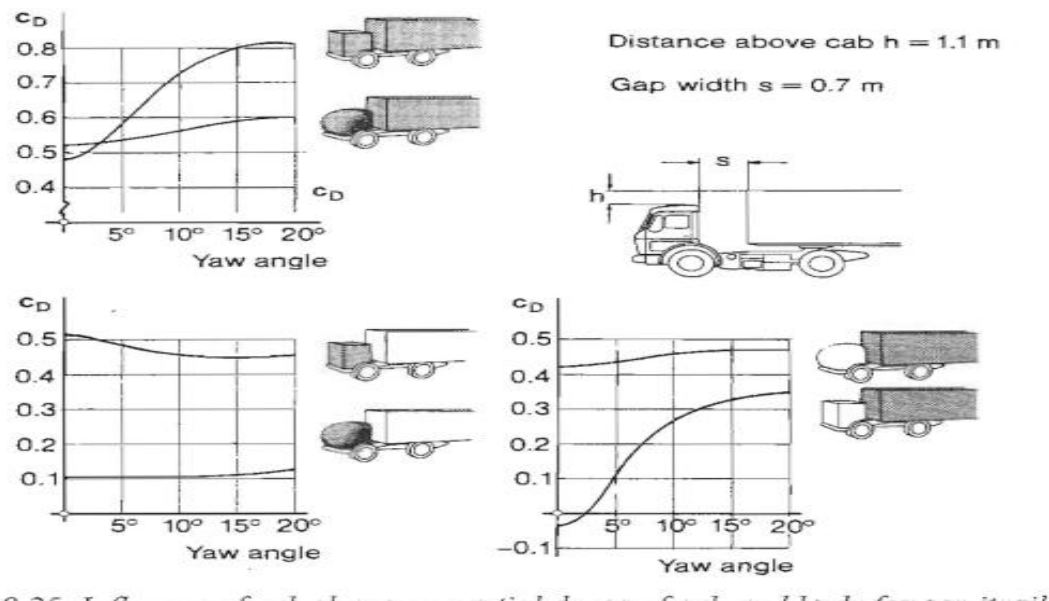
Συντελεστές μερικής αντίστασης ρυμουλκούμενων οχημάτων και φορτηγών με δύο ρυμουλκούμενα.

Ο συντελεστής της μερικής αντίστασης της καμπίνας οδηγού και των ρυμουλκούμενων ταξινομούνται με την αναλογία 70:30. Και οι δύο συντελεστές αντίστασης αυξάνονται περίπου στην ίδια αναλογία με την αυξανόμενη γωνία αποσταθεροποίησης, έτσι ώστε το φορτηγό και το ρυμουλκούμενο συνεισφέρουν κατά προσέγγιση ίσα μέρη στην εκτιμώμενη αύξηση του συντελεστή συνολικής αντίστασης στην απεικόνιση του διπλού ρυμουλκού. Οι αιτίες είναι ο υπήνεμος διαχωρισμός της ροής στο μπροστινό μέρος του οχήματος και η άμεση ροή ενάντια στο φορτηγό με μεγεθυμένη μπροστινή αντίσταση του ίδιου. Η ροή του αέρα από την πλευρά ανάμεσα στα κενά, ανάμεσα στην καμπίνα οδηγού, στο σώμα του φορτηγού και στο ρυμουλκούμενο αυξάνει με την αυξανόμενη γωνία αποσταθεροποίησης προκαλώντας πρόσθετο υπήνεμο διαχωρισμό ροής. Καθώς λοιπόν στο μοναδικό ρυμουλκούμενο η αλλαγμένη ροή (συγκρινόμενη με τον επερχόμενο άμεσο αέρα) από το πίσω τελευταίο μέρος του ρυμουλκούμενου, με μεγεθυμένο νεκρό νερό συνεισφέρει στην αύξηση του συντελεστή της συνολικής αντίστασης του διπλού ρυμουλκού, καθώς το ίδιο κάνει η αυξανόμενη ροή αέρα μέσα στο κενό και στην ακάλυπτη πλευρά του αμαξώματος.

3.1.3. Σχήμα καμπίνας οδηγού

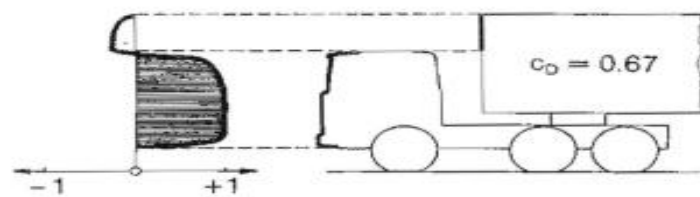
Στην παρακάτω εικόνα σχεδόν οι ίδιοι συντελεστές αντίστασης παρατηρούνται για ένα φορτηγό με ένα ρυμουλκούμενο, που έχει καμπίνα οδηγού με μυτερές άκρες και για μια καμπίνα οδηγού, που είναι αεροδυναμική, και οι δύο με πανομοιότυπες εξωτερικές διαστάσεις και πανομοιότυπο σώμα και αμαξώμα. Αυτό ίσως μας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι το σχήμα της καμπίνας οδηγού έχει ελάχιστη επίδραση στην αντίσταση του αέρα. Αλλά κοιτάζοντας στη μερική

αντίσταση του σώματος και της καμπίνας οδηγού για συμμετρική ροή γίνεται ολοφάνερο ότι η καμπίνα οδηγού με τις μυτερές άκρες παίρνει την πλήρη αντίσταση του αέρα και εντελώς καλύπτει το σώμα πίσω της εξαιτίας του ευδιάκριτου διαχωρισμού της ροής, έτσι ώστε το σώμα να έχει μηδενική ή ακόμη και αρνητική μερική αντίσταση. Αυτή η «ανακατανομή της αντίστασης» είναι επίσης φανερή από την καταμετρημένη κατανομή πίεσης στο κεντρικό τμήμα του μπροστινού μέρους του οχήματος. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει την σημαντική επίδραση της ομαδοποίησης της καμπίνας οδηγού και του ρυμουλκούμενου.

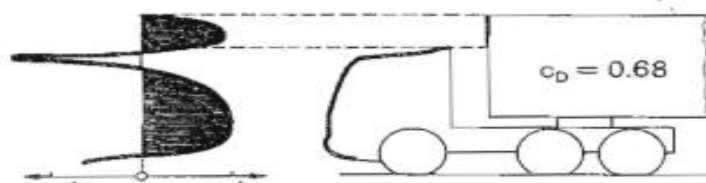


Επίδραση του σχήματος της καμπίνας οδηγού στις μερικές αντιστάσεις της καμπίνας οδηγού και του κορίου σώματος για τα φορτηγά με ένα ρυμουλκούμενο όχημα.

cs of some vehicles



Pressure distribution CP



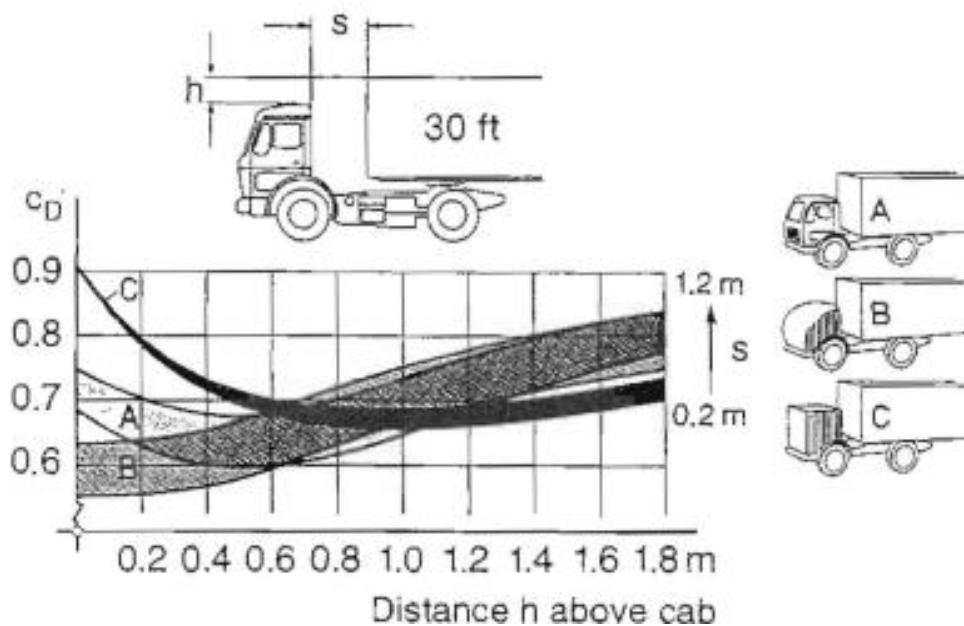
Παρέμβαση ροής: καμπίνα οδηγού – πρόσθιο μέρος.

Παραλλάσσοντας το πλάτος του κενού s και προβάλλοντας το ύψος του ρυμουλκούμενου για τρεις καμπίνες οδηγού με διαφορετικά σχήματα αλλά πανομοιότυπες εξωτερικές διαστάσεις ο Η. GÖTZ κατόρθωσε να πετύχει τα αποτελέσματα που απεικονίζονται πιο κάτω. Τα αποτελέσματα για την καμπίνα οδηγού με μυτερές άκρες C δείχνουν:

- Μια πολύ μικρή επίδραση στο πλάτος του κενού s
- Μια μηδαμινή αντίσταση με ένα προβαλλόμενο ύψος ρυμουλκούμενου 1.0 m (h).
- Μικρότεροι συντελεστές αντίστασης από τις αεροδυναμικές καμπίνες οδηγού με προβαλλόμενο ύψος ρυμουλκούμενου $h > 1.0$ m.

Για την αεροδυναμική καμπίνα B:

- Μια διεύρυνση της σειράς των συντελεστών αντίστασης με αυξανόμενο πλάτος κενού s , ενώ η ίδια η ταινία επίσης αυξάνεται με αυξανόμενο προβαλλόμενο ύψος ρυμουλκούμενου h .
- Χαμηλότερη αντίσταση συγκρινόμενη με τις καμπίνες οδηγού με μυτερές άκρες για προβαλλόμενα ύψη ρυμουλκούμενων $h < 1.0$ m.



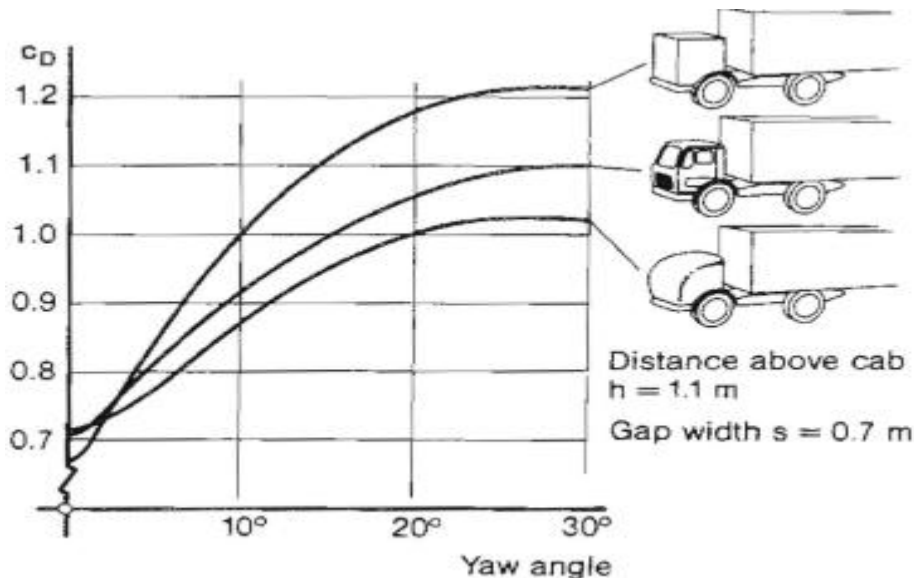
Επίδραση του σχήματος της καμπίνας οδηγού στο συντελεστή της αεροδυναμικής αντίστασης λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά ύψη ρυμουλκούμενων (h) και πλάτος κενού (s) σύμφωνα με τον Η. GÖTZ.

Για την καμπίνα οδηγού παραγωγής A:

- Μια καλοσχεδιασμένη καμπίνα οδηγού είναι πολύ κοντά σε μια ιδανική αεροδυναμική καμπίνα οδηγού.
- Το A έχει υψηλότερη αντίσταση από τις αεροδυναμικές καμπίνες οδηγού με μικρό προβαλλόμενο ύψος ρυμουλκούμενου $h > 0.6$ m, που προκύπτει από το συμβιβασμό με τον εσωτερικό χώρο ο οποίος είναι φτιαγμένος όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, με τον οποίο μικρότερες εξωτερικές ακτίνες κάμψης και άκρες και βήματα απαιτούνται από την διαδικασία παραγωγής.

Αυτές οι μελέτες δείχνουν ότι τουλάχιστον σε συμμετρική ροή οι επιθυμητοί συντελεστές αντίστασης αποκτιούνται ακόμα και με τις καμπίνες με μυτερές άκρες με ένα συγκεκριμένο ύψος ρυμουλκούμενου h . Βασικά, οι συνθήκες είναι καλές όταν η διαχωριστική γραμμή ροής από την καμπίνα οδηγού (χωρίζει την διαχωριστική περιοχή και την εξωτερική ροή) προσαρμόζεται ομαλά στα παρακάτω, γενικά στο ρυμουλκούμενο με μυτερές άκρες.

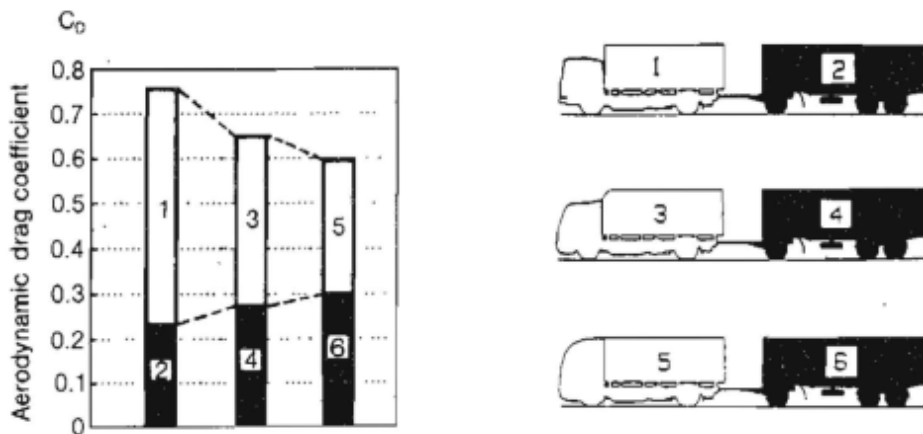
Αυτή η κατάσταση αλλάζει όταν η αποσταθεροποίηση λαμβάνεται υπόψη. Όπως μπορούμε να δούμε η αντίσταση της καμπίνας οδηγού με μυτερές άκρες αυξάνεται δραματικά με την αποσταθεροποίηση. Το σώμα, το οποίο καλύπτεται από την καμπίνα οδηγού κάτω από μηδενική αποσταθεροποίηση εκτίθεται τώρα στην επερχόμενη ροή. Σε αντίθεση, τα φορτηγά με αεροδυναμικές καμπίνες οδηγών υποφέρουν μόνο από ελαφριά αύξηση αντίστασης εξαιτίας της αποσταθεροποίησης.



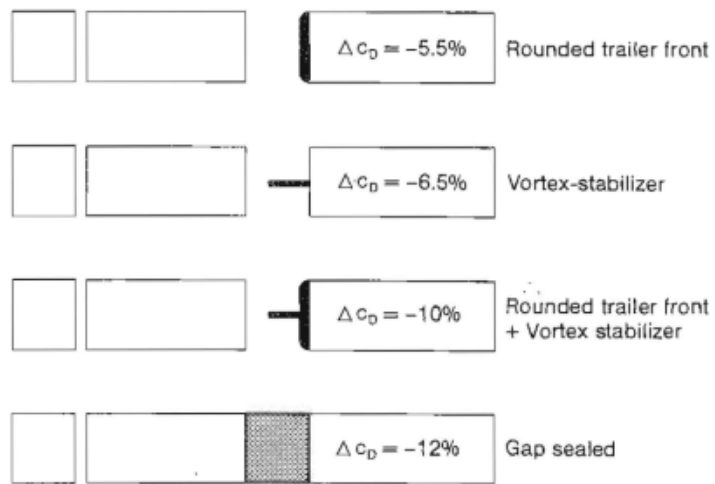
Επίδραση του σχήματος της καμπίνας οδηγού ενάντια στην αποσταθεροποίηση για φορτηγά με μία ρυμουλκούμενη μονάδα.

3.2.1. Οχήμα με δύο σώματα (διπλή νταλίκα)

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο κομμάτι που βρίσκεται η μηχανή και στα δύο σώματα ενός διπλού οχήματος είναι ως κάποιο σημείο παρόμοια με την παρεμβολή του οχήματος με ένα ρυμουλκούμενο, που αναφέρθηκε πιο πάνω. Αρκετά μέτρα έχουν αναπτυχθεί για να βελτιώσουν το σχήμα ροής ανάμεσα στα δύο σώματα. Σύμφωνα με τον A. GILHAUS και E. HAU, μια καμπίνα οδηγού με χαμηλή αντίσταση προκαλεί και μείωση της συνολικής αντίστασης και ανακατανομή της αντίστασης ανάμεσα στο φορτηγό και το ρυμουλκούμενο καθώς αυτό γίνεται ολοφάνερο από την κατάρρευση της αντίστασης. Επομένως το κενό ανάμεσα σε αυτά τα δύο γίνεται όλο και πιο σημαντικό από μια αεροδυναμική άποψη. Η ανάπτυξη των εξαρτημάτων, που θα μειώσουν την αντίσταση, που έχει σχέση με το κενό ακολουθεί τις ίδιες γραμμές όπως και η αλληλεπίδραση στο φορτηγό με ένα ρυμουλκούμενο. Ένας τρόπος για να προσεγγίσουμε την ιδανική αντίσταση φαίνεται παρακάτω (απεικόνιση χωρίς κενά). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αντίσταση ενός φορτηγού μειώνεται περισσότερο από όλα με τον σταθεροποιητή στροβίλου ενώ οι στρογγυλεμένες άκρες στο μπροστινό μέρος του ρυμουλκούμενου κυρίως μειώνουν την αντίσταση του ίδιου του ρυμουλκούμενου. Η ολοφάνερη πορεία είναι να συνδυαστούν τα δύο γνωρίσματα και έτσι να καταλήξουμε σε μια μείωση σχεδόν ισότιμη με το ποσό των ατομικών τους αποτελεσμάτων. Μια επιπλέον μείωση του συντελεστή αντίστασης περίπου του 10% μπορεί να επιτευχθεί χαμηλώνοντας το ύψος του ρυμουλκούμενου.



Μείωση και ανακατανομή της αντίστασης που προκαλείται από βελτιώσεις στο μπροστινό μέρος του οχήματος με διπλό ρυμουλκούμενο.



Μείωση της αντίστασης του φορτηγού και του ρυμουλκούμενου με πρόσθετα εξαρτήματα στο ρυμουλκούμενο.

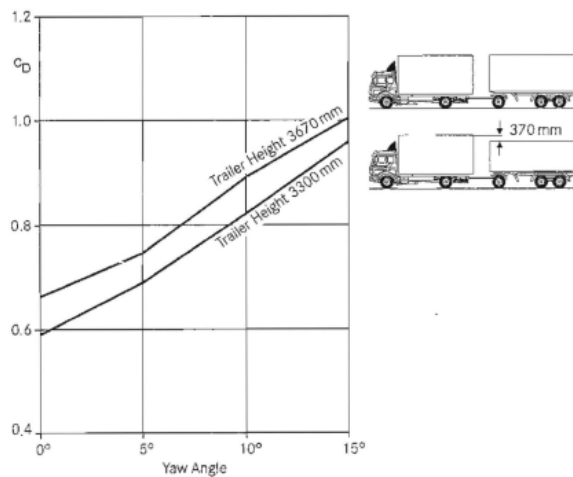
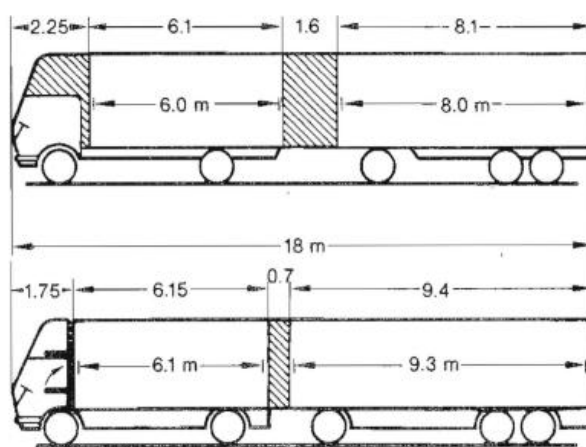


Fig. 0.41 Drag reduction by lowering trailer height

Μείωση της αντίστασης χαμηλώνοντας το ύψος του ρυμουλκούμενου.

3.2.2. Σύγχρονος σχεδιασμός φορτηγού – ρυμουλκούμενου

Η ταυτόχρονη απαίτηση για περισσότερο χώρο φορτίου και βελτιωμένη αεροδυναμική έχει οδηγήσει σε αυτό που αποκαλούμε όχημα με διπλό ρυμουλκό υψηλά κυβικά σχεδιασμένο. Ο χώρος του φορτίου έχει μεγεθυνθεί περίπου κατά 10% τοποθετώντας τον χώρο του ύπνου πάνω από την καμπίνα οδηγού και μειώνοντας στο μισό το κενό ανάμεσα στο φορτηγό και στο ρυμουλκούμενο με μια καινούρια κατευθυντήρια γεωμετρία από τον μπροστινό άξονα τροχού του ρυμουλκούμενου. Ένα όχημα με διπλό ρυμουλκούμενο σε μαζική παραγωγή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχεδιασμός φορτηγού με διπλό ρυμουλκούμενο, σχεδιασμένο κυβικά.

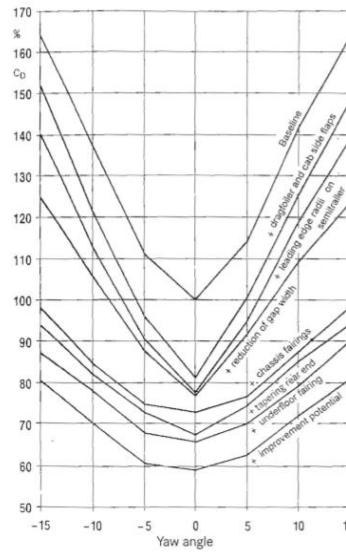


Η τοποθέτηση του χώρου ύπνου στο επάνω μέρος της καμπίνας οδηγού μειώνει την τιμή του συντελεστή αντίστασης έως 17% (πάνω φωτογραφία). Στενότερη προσέγγιση του ρυμουλκούμενου μειώνει τον συντελεστή αντίστασης και το καθιστά κατάλληλο για μεγαλύτερους όγκους φορτίου.

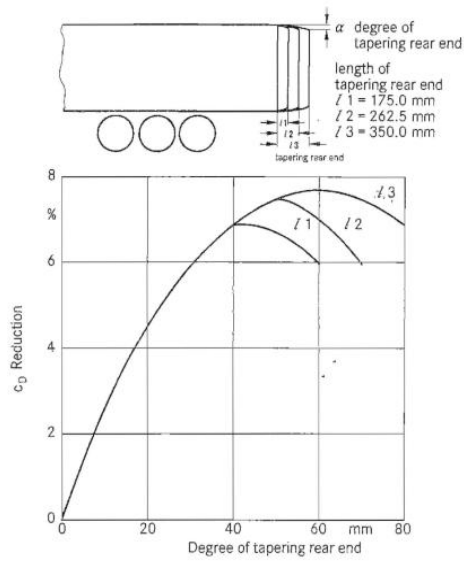
Η αεροδυναμική γνώση από τις πολλαπλές ατομικές μελέτες έχει ενσωματωθεί στην ιδέα ενός σώματος μεγάλου οχήματος για ένα όχημα με διπλό ρυμουλκούμενο, σχεδιασμένο για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς εμπορευμάτων. Ο στόχος ήταν να αποκτήσουμε παρόμοιες βελτιώσεις στην αντίσταση και για τους μετωπικούς και για τους πλάγιους ανέμους. Από την ακολουθία των βελτιώσεων στη παραπάνω εικόνα το έλασμα της αντίστασης και τα πλάγια περύγια καμπυλότητας της καμπίνας οδηγού, το μπροστινό φράγμα αέρα, οι κύριες ακτίνες γωνίας στο ημιρυμουλκούμενο, η μείωση του πλάτους του κενού, το αμάξωμα για το φορτηγό και το ρυμουλκούμενο, το κωνοειδές πίσω τελείωμα και τα στρώματα του πατώματος – ο συντελεστής αντίστασης μειώθηκε σε ένα ποσοστό ανάμεσα στο 30% και στο 40% και στις γωνίες αποσταθεροποίησης μέχρι 15 μοίρες. Οι αεροδυναμικές βελτιώσεις που αναφέρθηκαν εμπλουτίστηκαν με πρόσθετη βασική έρευνα, που είχε σκοπό να δώσει μια ένδειξη του υπόλοιπου δυναμικού για τις μειώσεις αντίστασης.



Ημιρυμουλκούμενη μονάδα με ολοκληρωμένα αεροδυναμικά καλύμματα.



Επίδραση των αεροδυναμικών βελτιώσεων σε μια ημιρυμουλκούμενη μονάδα 15 μέτρων

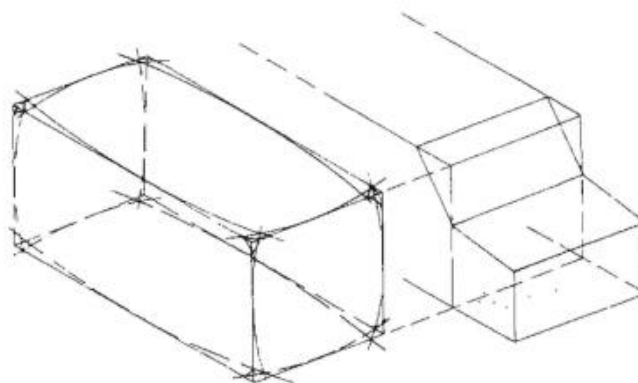


Επίδραση του μήκους και του βαθμού της οπίσθιας κλίσεως ενός συνδυασμού φορτηγού με ημιρυμουλκούμενο.

3.3.1. Ελαχιστοποίηση της αντίστασης σε λεωφορεία και κλειστά φορτηγά παραδόσεων

3.3.1.1. Οριακές Συνθήκες

Οι περιορισμοί όσον αφορά τη βέλτιστη σχεδίαση των σχημάτων των εμπορικών οχημάτων είναι γενικά πιο σοβαρή από ότι για τα αυτοκίνητα. Εκτός από τις πτυχές του σχεδιασμού και της κατασκευής, κυριαρχούν οι λειτουργικές απαιτήσεις με αποτέλεσμα οι σχεδιαστές να πρέπει να αποκλίνουν όσο το δυνατό λιγότερο από το βασικό κυβοειδές σχήμα. Το πεδίο για το σχεδιασμό υποδεικνύεται στην εικόνα 3.3.1.1.1. Ορισμένη ελευθερία υπάρχει για τη διαμόρφωση του σχήματος του εμπρόσθιου μέρους του οχήματος. Η κωνικότητα των πλευρικών πλαισίων είναι πολύ ευνοϊκή για την ομαλή ροή του αέρα, έχει όμως μειονεκτήματα για την παραγωγή (τα εξαρτήματα για αριστερή και δεξιά πλευρά δεν είναι ταυτόσημα) και μειώνει το χώρο του φορτίου. Η κωνικότητα πρέπει, συνεπώς, να περιορίζεται σε μικρά τμήματα, στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του οχήματος. Το παρμπρίζ και η οροφή του πρόσθιου άκρου στα τουριστικά λεωφορεία, για παράδειγμα, επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού.

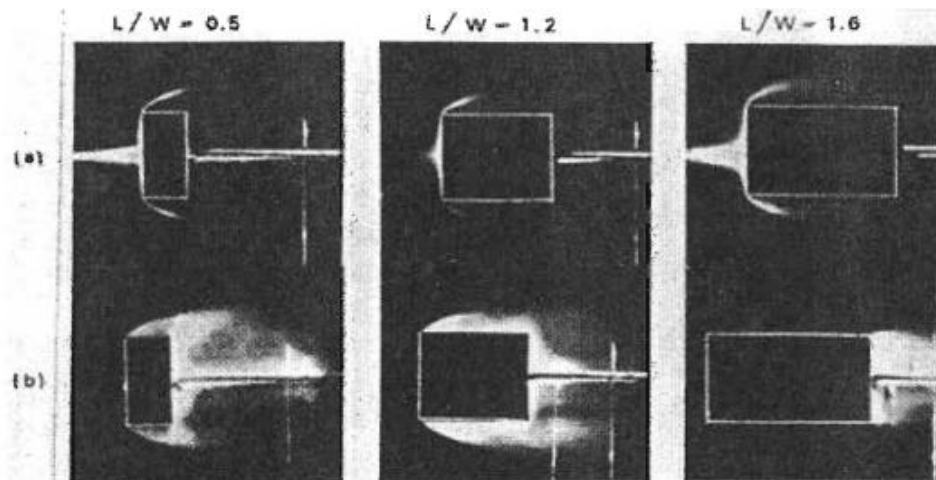


3.3.1.1.1 Το περιθώριο για ανάπτυξη του σχήματος του φορτηγού παραδόσεων.

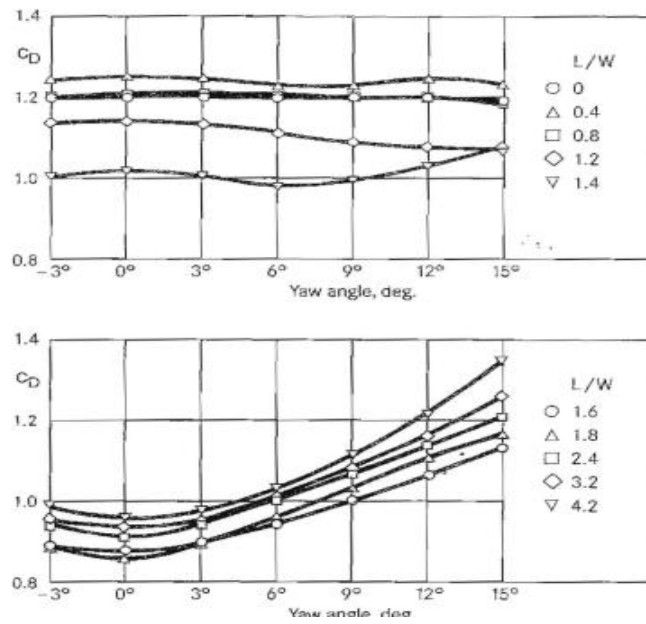
3.3.1.2. Χαρακτηριστικές συνθήκες ροής σε απλά γεωμετρικά σώματα

Φωτογραφικές μελέτες ροής με καπνό σε κυβοειδή σώματα δείχνουν ισχυρό διαχωρισμό της ροής στο πρόσθιο άκρο, αυτές ενισχύθηκαν με αντίστροφη ροή (πίσω προς τα εμπρός) κοντά στην επιφάνεια του σώματος, στην περίπτωση σωμάτων με μικρές αναλογίες μήκους / πλάτους $L/W < 1,6$. Όταν ένα συγκεκριμένο σχετικό μήκος L/W εξέρχεται ($L/W = 1.6 - 1.8$), η διαχωρισμένη ροή αποδίδεται εκ νέου στο πίσω μέρος των πλαισίων πάνελ. Υπάρχει μια ξεχωριστή ελάχιστη οπισθέλκουσα για το σχετικό μήκος, που υπάρχει επίσης για σώματα χωρίς διαχωρισμό στο μπροστινό μέρος.

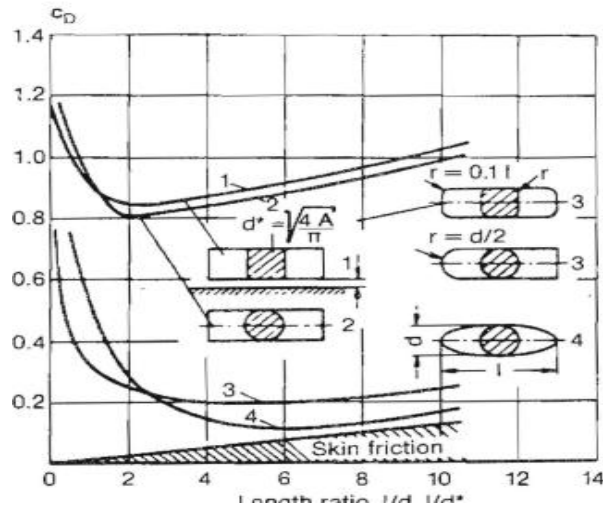
Παρόμοια αλλά προγενέστερα αποτελέσματα από τον R. BARTH φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Υπάρχει μια σαφής συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή οπισθέλκουσας c_D και του σχήματος του σώματος και του σχετικού μήκους l/w . Η σημαντική μείωση της αντίστασης από τη στρογγυλοποίηση των πρόσθιων και διαμηκών άκρων είναι ιδιαίτερα αισθητή. Μετρημένες κατανομές πίεσης καθώς και λεπτομερή απεικόνιση της ροής δείχνουν σαφώς πόσο σημαντικό είναι ένα καλά σχεδιασμένο μπροστινό τμήμα για χαμηλή αντίσταση. Τα βασικά ευρήματα που παρουσιάστηκαν για τα λεωφορεία μπορούν από εδώ και στο εξής να εφαρμοστούν κατευθείαν στα φορτηγά παραδόσεων.



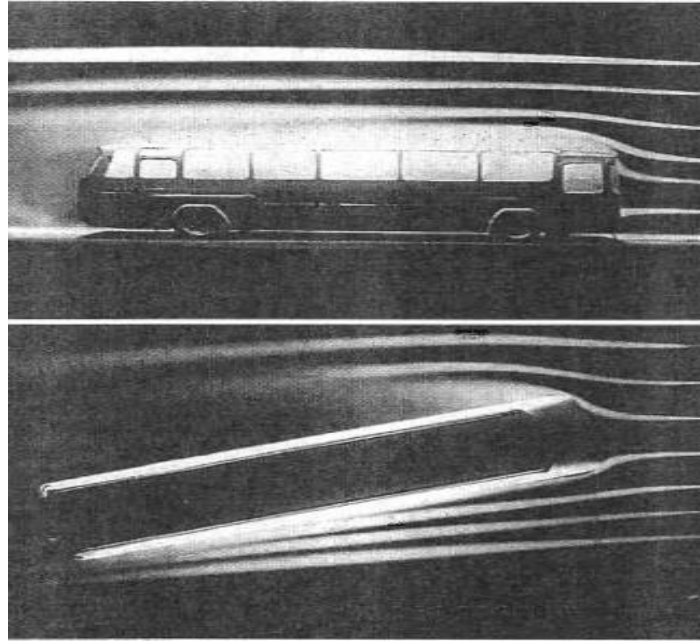
Διαχωρισμός της ροής για κυβοειδή σώματα με διαφορετικές αναλογίες μήκους / πλάτους L / W . Πάνω φωτογραφία: καπνός από το μπροστινό μέρος του οχήματος. Κάτω φωτογραφία: καπνός από το πίσω μέρος του οχήματος, από τον H. NAKAGUCHI



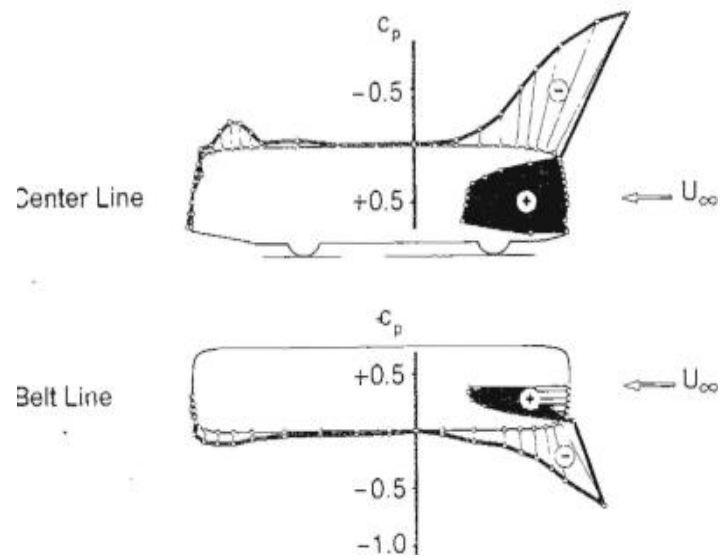
Συντελεστής οπισθέλκουσας c_D ενός κυβοειδούς σώματος σε αντιπαράθεση με την γωνία αποσταθεροποίησης για διαφορετικές αναλογίες μήκους / πλάτους L/W , από τον H.NAKAGUCHI



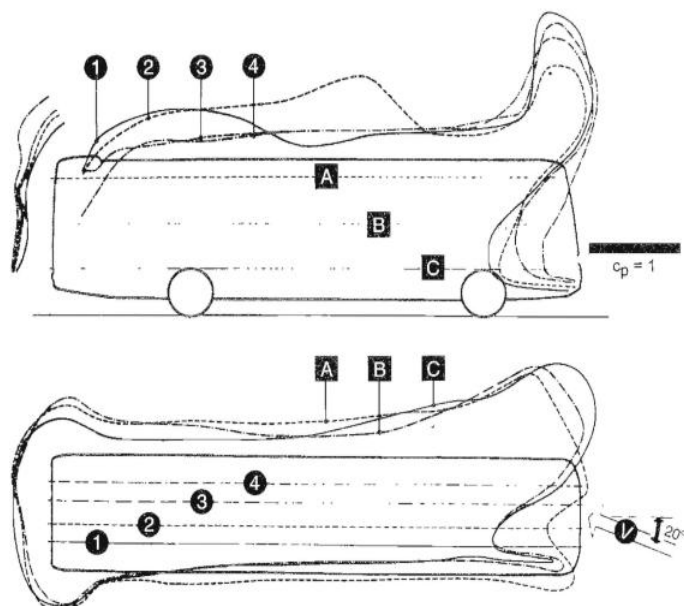
Οι συντελεστές οπισθέλκουσας c_D των γεωμετρικών σωμάτων σε αντιπαράθεση με την αναλογία μήκους l/d .



Χαρακτηριστικές συνθήκες ροής σε λεωφορείο. Πάνω φωτογραφία: 0° γωνία αποσταθεροποίησης.
Κάτω φωτογραφία: 15° γωνία αποσταθεροποίησης.



Κατανομή της πίεσης c_p σε λεωφορείο με συμμετρική ροή.



Κατανομή της πίεσης c_p σε δύο διαφορετικά σχέδια, οριζοντίως και καθέτως με 20° γωνία αποσταθεροποίησης.

3.4. Λεωφορεία

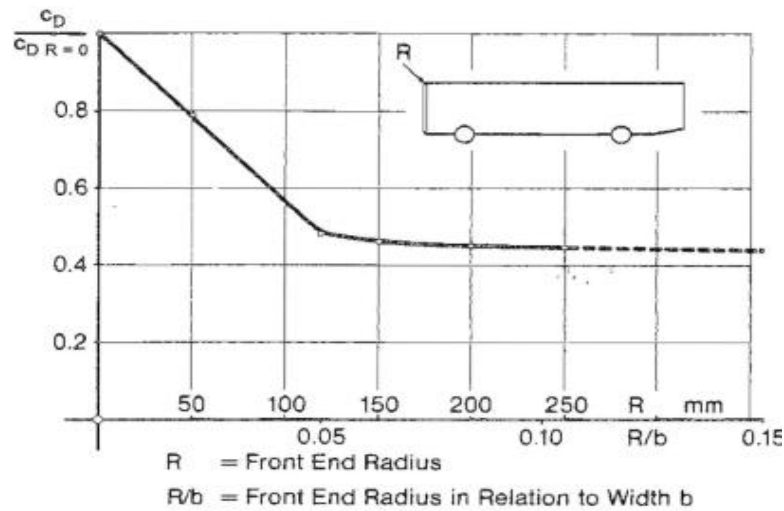
3.4.1. Βελτιστοποίηση του μπροστινού άκρου

Το μέγεθος του μπροστινού άκρου έχει μια σημαντική επίδραση στην αντίσταση ενός λεωφορείου. Στην εικόνα 3.4.1.1 η ακτίνα του μπροστινού άκρου έχει διαδοχικά διευρυνθεί, ξεκινώντας από το σχήμα με αιχμηρές άκρες του μπροστινού άκρου του οχήματος. Είναι προφανές ότι μια ακτίνα περίπου 150mm είναι επαρκής για να μειώσει την αντίσταση του λεωφορείου τόσο πολύ ώστε περαιτέρω αισθητή βελτίωση δεν μπορεί να γίνει ακόμη και με τα λεγόμενα αεροδυναμικά σχήματα του μπροστινού μέρους, τα οποία έχουν διερευνηθεί από τον A. GILHAUS (σχήμα 3.4.1.2). Σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί από τον G.W. CARR, όπως μπορούμε να συμπεράνουμε και από την εικόνα 3.4.1.3

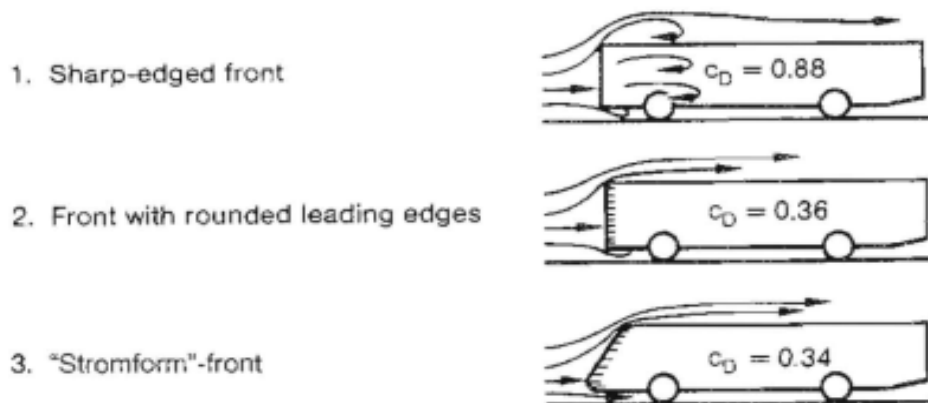
Στο όχημα αυτό καθεαυτό τα μπροστινά άκρα μπορούν να αξιοποιηθούν για την πιθανότητα μείωσης της αντίστασης συχνά μόνο με μικρή τροποποίηση στο προηγούμενο σχέδιο. Η εικόνα 3.4.1.4 για παράδειγμα δείχνει τις τροποποιήσεις της μείωσης της αντίστασης σε μια κολόνα A. Μία μόνο ελαφρώς διευρυμένη ακτίνα στο εμπρόσθιο άκρο του ίδιου οχήματος εμπόδισε τον διαχωρισμό ροής. Η κάτω φωτογραφία στην εικόνα 3.4.1.5 δείχνει τον διαχωρισμό της ροής στην αιχμηρή μπροστινή άκρη. Η πάνω φωτογραφία δείχνει την συνημμένη ροή εξαιτίας της στρογγυλοποιημένης μπροστινής άκρης

Από την εικόνα 3.4.1.6 γίνεται φανερό πόσο μικρές αλλαγές μερικές φορές θα πρέπει να είναι εντάξει, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της ροής. Η μικρή αλλαγή στην σχεδίαση της

οροφής (βλ. τις «χοντρές» γραμμές) δίνει μια μείωση της αντίστασης του $\Delta c_D = -0,02$ χωρίς απώλεια του εσωτερικού χώρου ή οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή στο στυλ. Ακόμη και μια προσανατολισμένη στην παραγωγή στην χρησιμοποίηση σιδηροδρόμου στο ενδιάμεσο μεταξύ παρμπρίζ και οροφής για καθαρό αέρα. Προχωρώντας την χρησιμοποίηση σιδηροδρόμου παρακάτω (Εικ. 3.4.1.7) κρατά τη ροή συνημμένη (βλ. εικόνα 3.4.1.8).

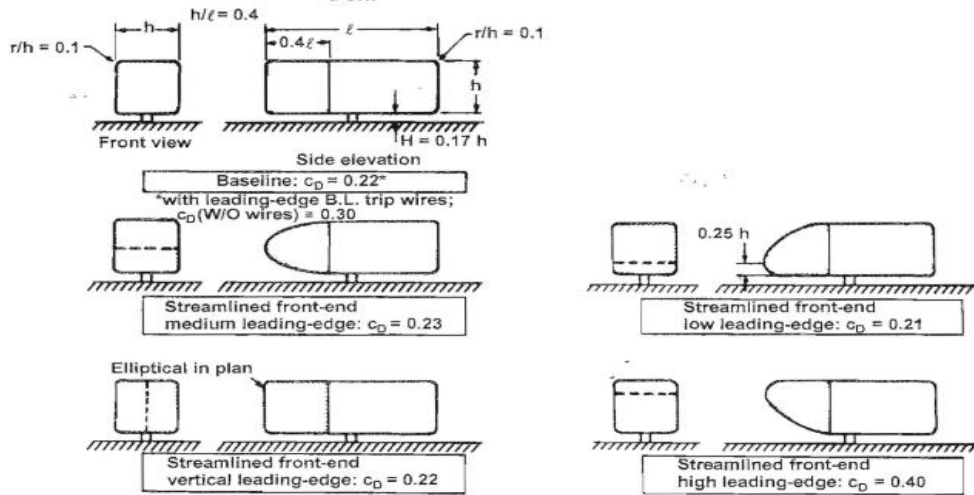


3.4.1.1 Επίδραση των μπροστινών ακτινών στην αντίσταση.

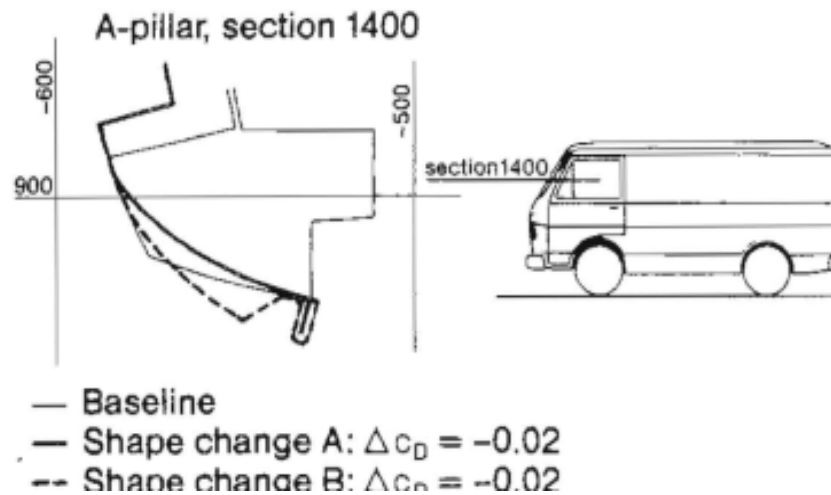


3.4.1.2 Σχέση ανάμεσα στο μπροστινό σχήμα του οχήματος και στο συντελεστή οπισθέλκουσας από τον A. GILHAUS

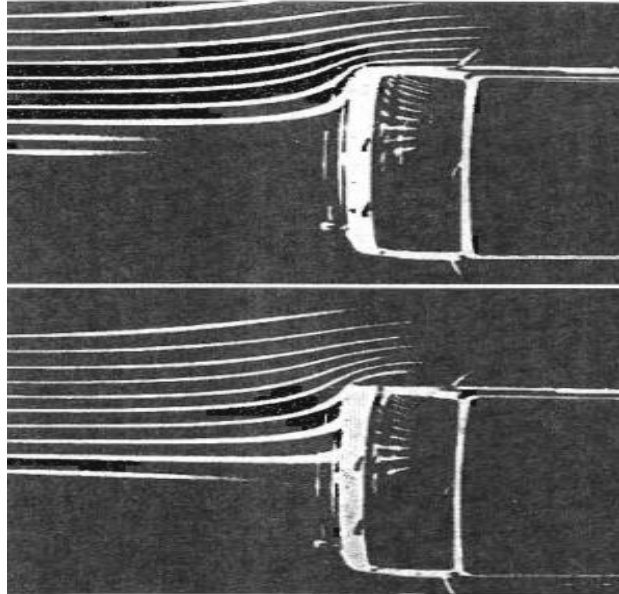
Based on Carr (1967) $Re_{d\text{ eff.}} \approx 1 \times 10^6$



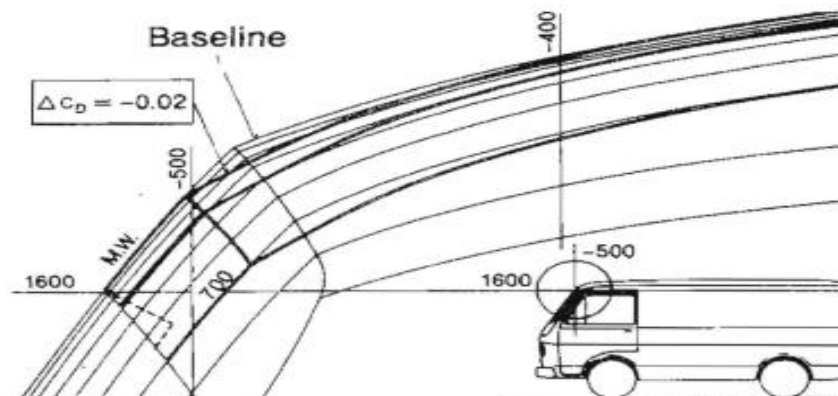
3.4.1.3 Επίδραση των αεροδυναμικών μπροστινών άκρων στο συντελεστή οπισθέλκουσας των ορθογωνίων σωμάτων σε εδαφική εγγύτητα από τον G.W. CARR.



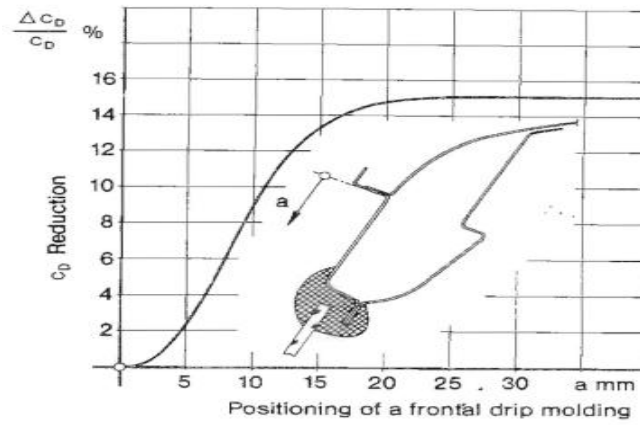
3.4.1.4 Μείωση της αντίστασης και σχέδιο ορθοστάτη - A, από τον W.- H. HUCHO και τον H. - J. EMMELMANN [9.25].



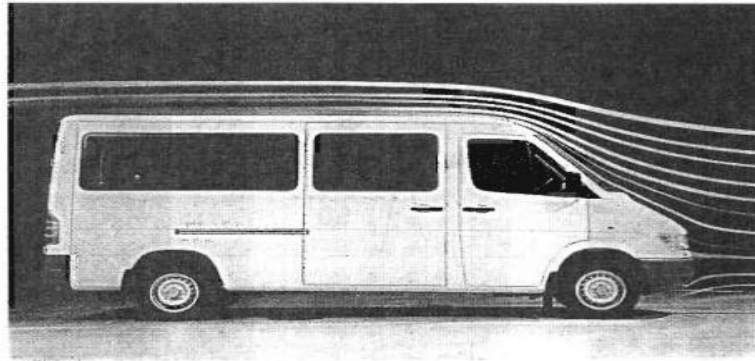
3.4.1.5 Η ροή γύρω από την πλευρά του μπροστινού άκρου. Πάνω φωτογραφία: η ροή εφάπτεται. Κάτω φωτογραφία: η ροή χωρίζεται εξαιτίας της γωνίας με μυτερές άκρες, από τους: W. – H. HUCHO και H. – J. EMMELMANN.



3.4.1.6 Μείωση της αντίστασης από τη βελτιωμένη άκρη του μπροστινού μέρους της οροφής.

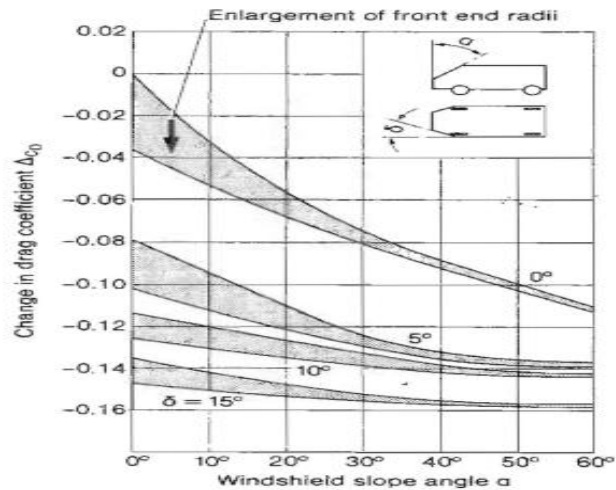


3.4.1.7 Τροποποίηση της υδρορροής, που μειώνει την αντίσταση.



3.4.1.8 Η ροή του αέρα πάνω από το κεντρικό τμήμα του οχήματος.

Όταν ένα ολοκαίνουργιο όχημα σχεδιάζεται, η ευκαιρία μπορεί να ληφθεί για να επιλεγούν σωστά όλες οι διαστάσεις. Η εικόνα 3.4.1.9 δείχνει την επίδραση διαφόρων σημαντικών παραμέτρων σχεδιασμού μπροστινού άκρου επί της c_D ενός κλειστού φορτηγού.

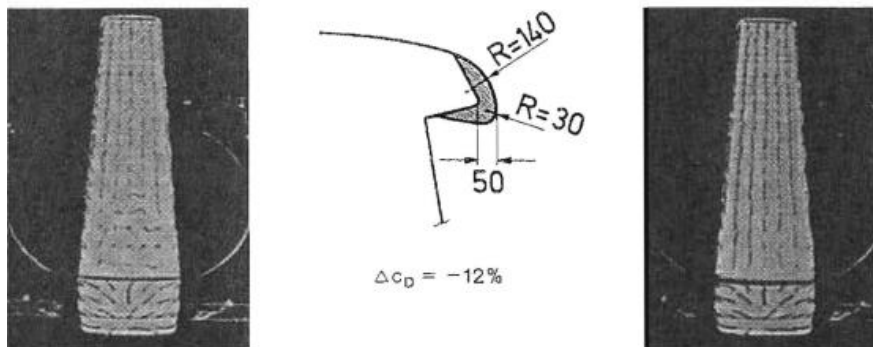


3.4.1.9 Επίδραση του σχήματος του μπροστινού άκρου στο c_D , από τον R. BUCHHEIM.

Τα παρακάτω είναι ολοφάνερα:

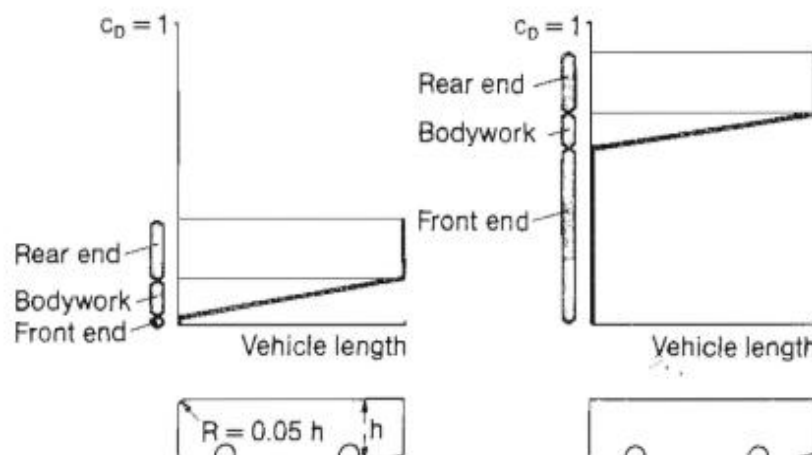
- Το κωνικό μπροστινό άκρο δ είναι πολύ αποτελεσματικό με απότομο παρμπρίζ
- Τα αποκλίνοντα παρμπρίζ α είναι πολύ αποτελεσματικά, εάν δεν υπάρχει κωνικό μπροστινό άκρο
- Με αρμόζουσα κωνικότητα, το αποκλινομένο παρμπρίζ έχει μόνο ελάχιστη επιρροή
- Οι ακτίνες για τα μπροστινά άκρα είναι επίσης αποτελεσματικές μέχρι ορισμένες διαστάσεις

Στο μέλλον, η αεροδυναμική σχεδίαση είναι πιθανό να επηρεάσει την παραγωγή οχημάτων μέσω παραμέτρων, φυσικά, με τις τεχνικές απαιτήσεις, τον χώρο της καμπίνας του οδηγού, εισόδους, την ορατότητα, και άλλες πτυχές της ασφάλειας. Ακόμα κι έτσι, μπορούμε να περιμένουμε να δούμε σημαντικές αεροδυναμικές βελτιώσεις σε σχέση με τα οχήματα του σήμερα. Αυτές οι άκρες του εφέ της ομοιογένειας, που είναι απαραίτητες για τον εξαερισμό, μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για χαμηλή αντίσταση.



3.4.1.10 Ομοιογενής άκρη χαμηλής αντίστασης στο λεωφορείο.

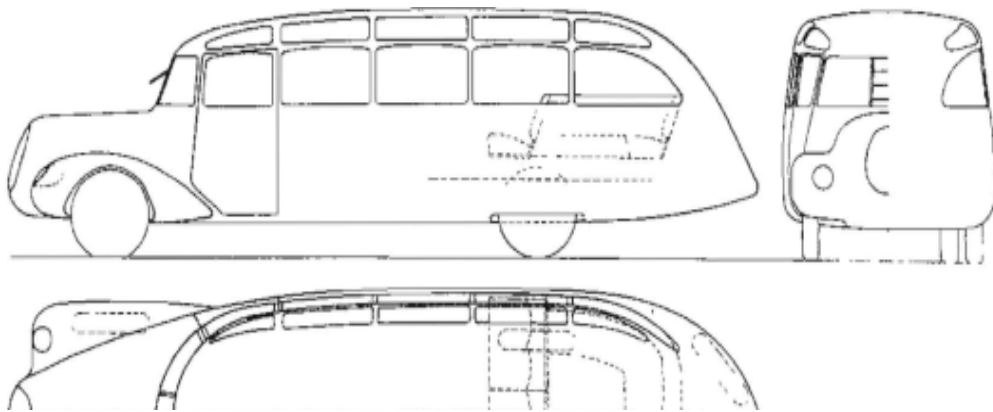
Η διάσπαση της αντίστασης στην εικόνα 3.4.1.11 δείχνει πόσο μακριά μπορεί να μειωθεί η αντίσταση με ένα βέλτιστο μπροστινό άκρο και το τι μπορεί να αναμένεται από τα άλλα τμήματα του οχήματος. Μόλις το εμπρόσθιο άκρο έχει βελτιστοποιηθεί, το πίσω άκρο είναι ο κύριος συντελεστής αντίστασης.



3.4.1.11 Κατανομή της αντίστασης του αέρα πάνω από τα μέρη των οχημάτων τόσο με στρογγυλεμένες όσο και με μυτερές άκρες μπροστινό μέρος

3.4.2. Βελτιστοποίηση του πίσω άκρου

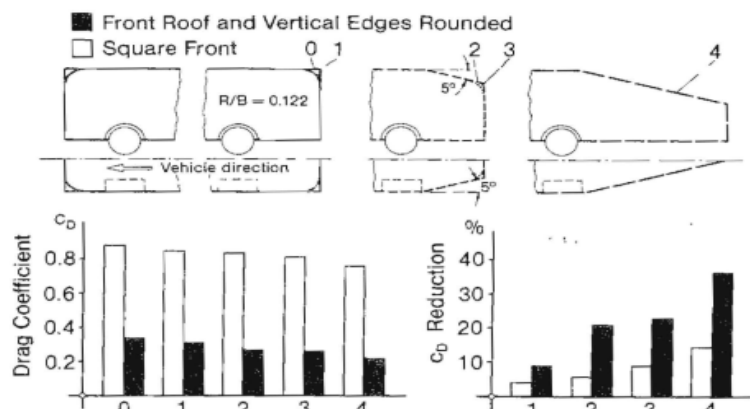
Κάθε μέτρο που θα μείωνε τον χρήσιμο εσωτερικό χώρο θα είχε πολύ λίγες πιθανότητες να υιοθετηθεί σε έναν πρακτικό σχεδιασμό λεωφορείου. Τα χαμηλής οπισθέλκουσας λεωφορεία της δεκαετίας του 1930, με ουρές που βασίζονταν στις ιδέες του P. JARAY (Εικ. 3.4.2.1) , απαιτούν κωνικότητα σε βαθμό που δεν τα κάνει πλέον χρήσιμα για τους τωρινούς σχεδιασμούς όσον αφορά τις απαιτήσεις των χρηστών (εύκολη επιβίβαση, πρόσβαση στο κάθισμα, ράφια αποσκευών, άνεση καθισμάτων) και τις απαιτήσεις του χειριστή (οικονομία, χωρητικότητα, ικανότητα ελιγμών).



3.4.2.1 Ο σχεδιασμός του πίσω άκρου ενός λεωφορείου από τον JARAY.

Ρεαλιστικά χαρακτηριστικά, ωστόσο, φαίνεται να είναι ακτίνες μέτριας βαρύτητας στο πίσω άκρο, μια ελαφρά πτώση στο τέλος της οροφής και μια ελαφριά κωνικότητα των πλευρικών πάνελ. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 3.4.2.2. Μελέτες σε μοντέλα στο 1/10 της κλίμακας σχετικά με ένα πρότυπο μοντέλο λεωφορείου (χωρίς τροχό, με ομαλό κάτω μέρος) για άλλη μια φορά δείχνουν την κυρίαρχη επιρροή του μπροστινού άκρου του λεωφορείου (με μυτερές γωνίες ή στρογγυλεμένο), δεδομένου ότι η έκταση της μείωσης της αντίστασης πιθανόν οφείλεται στον καλύτερο σχεδιασμό του πίσω άκρου, εξαρτάται από αυτό.

Μαζί με μια ορισμένη μείωση της μεταφορικής χωρητικότητας, οι μειώσεις του c_D της τάξης του 4% - 8% σαν αποτέλεσμα των ακτινών του πίσω άκρου, μείωση της τάξης του 6% - 20% από το πλευρικό πάνελ και την κωνικότητα της οροφής και μείωση της τάξης του 9% - 22% με επιπλέον ακτίνες στο πίσω άκρο. Το υπόλοιπο 14% - 35% των δυνατοτήτων για μείωση της αντίστασης με ένα πίσω άκρο ίδιο με την ουρά της βάρκας δεν μπορεί να αξιοποιηθεί χωρίς τη ριζική μείωση της μεταφορικής χωρητικότητας ή χωρίς να ξεφεύγει από τους περιορισμούς του κράτους για το μήκος.

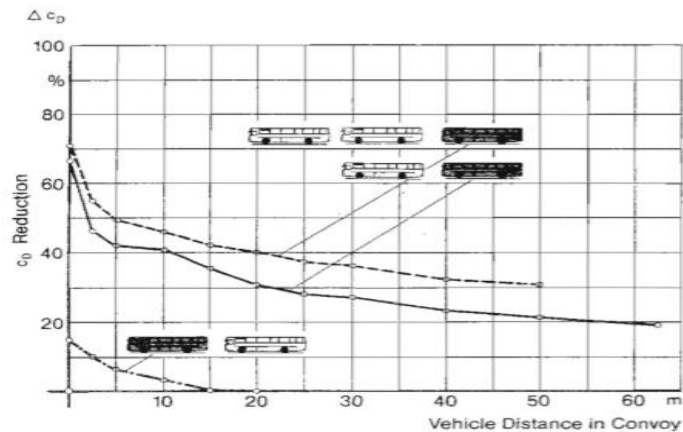


3.4.2.2 Επίδραση του σχεδιασμού του πίσω άκρου ενός λεωφορείου στην αντίσταση του αέρα.

4. Αποκτώντας πλεονέκτημα των επιδράσεων των αεροδυναμικών παρεμβολών

4.1. Οδήγηση σε φάλαγγα

Η οδήγηση σε φάλαγγα μειώνει την αντίσταση. Η αύξηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας οδηγεί συχνά σε σχηματισμό φάλαγγας εμπορικών οχημάτων, λόγω των ορίων ταχύτητας και των περιορισμένων ευκαιριών για προσπέρασμα. Οι υψηλές μέσες ταχύτητες είναι δυνατές στους αυτοκινητοδρόμους και οριστικά προβλήματα παρεμβολής συμβαίνουν μεταξύ των οχημάτων. Κάθε όχημα ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή, η οποία μειώνει την δυναμική πίεση στο ακόλουθο όχημα. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως αερολίσθηση (slipstreaming) ή σύνταξη σε ομάδα στους αγώνες, είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση των επαγγελματικών οχημάτων, ώστε οι σαφείς βελτιώσεις της αντίστασης ακόμα έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα διαστήματα μεταξύ των οχημάτων.



Επίδραση της οδήγησης σε φάλαγγα στην αντίσταση του αέρα.

Εάν μία φάλαγγα διαφόρων οχημάτων έχει διαμορφωθεί και οι οδηγοί διατηρούν την ασφαλή απόσταση των 40 m με ταχύτητα 80 χλμ/ώρα (50 μίλια/ώρα), πραγματοποιείται μια βελτίωση της αντίστασης περίπου κατά 20% για το δεύτερο όχημα, περίπου 30% για το τρίτο και κάθε πρόσθετο όχημα. Το ίδιο ισχύει για τα φορτηγά και για τα φορτηγά – ρυμουλκούμενα. Δεν είναι απαραίτητο να μείνει ακριβώς στην τροχιά του προηγούμενου οχήματος. Τα οχήματα μπορούν να κλιμακώνονται μέχρι και στο μισό πλάτος του οχήματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι η αντίσταση του αέρα μειώνεται με μειωμένες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων, οι οδηγοί πρέπει να είναι ενήμεροι για τους κινδύνους της «ευφορίας εξοικονόμησης καυσίμων».

Ένας δείκτης του είδους του αποτελέσματος, που μπορεί να αναμένεται στον πραγματικό τομέα χρήσης παρέχεται από μετρήσεις κατανάλωσης καυσίμου, που έχουν γίνει με τη χρήση ενός εφοδιασμένου φορτηγού – ρυμουλκούμενου 40 τόνων οδηγώντας το σε φάλαγγα. Ακόμη και σε αποστάσεις 20μ. έως 80μ. μεταξύ των οχημάτων, οι εξοικονομήσεις καυσίμων παραμένουν σημαντικές, κατά περίπου 9% (Εικ. 4.1.1).

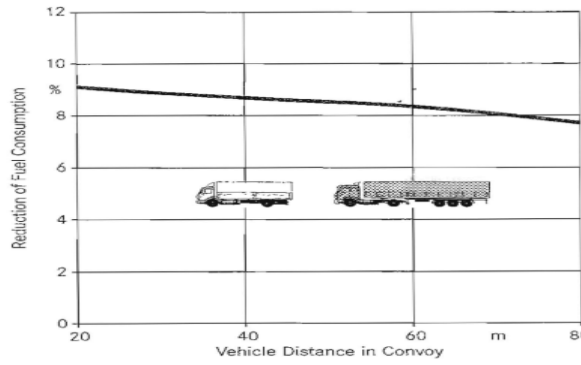


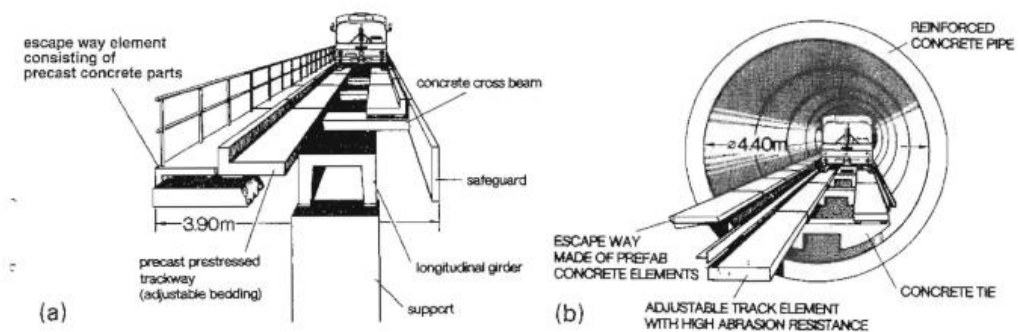
Fig. 4.20 Influence of Convoy Driving on Fuel Consumption

4.1.1 Επίδραση της οδήγησης σε φάλαγγα στην κατανάλωση καυσίμου.

4.2. Οδήγηση μέσω σηράγγων

Υπάρχουν ακόμη μεγαλύτερα πλεονεκτήματα στις φάλαγγες λεωφορείων σε στενές σήραγγες, ίσως τουλάχιστον με τις μειώσεις αντίστασης για το ταξίδι σε φάλαγγα στον ανοιχτό δρόμο. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας c_D ενός λεωφορείου που περνάει μέσω μιας σήραγγας είναι μέχρι έξι φορές μεγαλύτερος σε σύγκριση με αυτόν ενός λεωφορείου σε ανοιχτό δρόμο. Μια λύση για τα περιφερειακά και τα προβλήματα κυκλοφορίας μέσα στην πόλη είναι η επέκταση των δημόσιων μεταφορών. Το λεωφορείο είναι το πιο οικονομικό μέσο μεταφοράς για τις περισσότερες απαιτήσεις. Λειτουργεί σε κανονικούς δρόμους και είναι ευέλικτο στο να ανταποκριθεί στις νέες ανάγκες μεταφοράς, αλλά κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής τα λεωφορεία στα κέντρα των πόλεων εμποδίζονται από τα ιδιωτικά οχήματα που χρησιμοποιούν τις ίδιες λωρίδες με αυτά.

Μια πρόταση για αξιόπιστη, γρήγορη και άνετη διέλευση είναι η "O-Bahn" ("O-Train"), σύστημα μεταφοράς του λεωφορείου, το οποίο έχει τις δικές του γραμμές (Εικ. 4.2.1), που εν μέρει δρομολογούνται μέσω των στενών σηράγγων όταν δεν υπάρχει αρκετός χώρος για τις λωρίδες των λεωφορείων στους δρόμους. Μετά την επιτυχή εισαγωγή του συστήματος το 1979 στο Διεθνές σαλόνι μεταφορών στο Αμβούργο, η πόλη του Essen (Γερμανία) ξεκίνησε η λειτουργία της "O-Bahn" σε ένα τμήμα μιας διαδρομής το 1980. Στην Αδελαΐδα, Αυστραλία, τα βορειοανατολικά προάστια που συνδέονται με το κέντρο της πόλης με μία διαδρομή "O-Bahn" 12 χιλιομέτρων. Η εικόνα 4.2.2 δείχνει πόσο αρμονικά μπορεί ο δρόμος να ενσωματωθεί στην εξοχή.



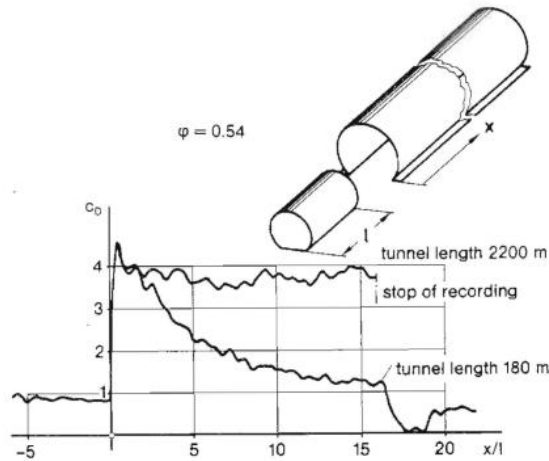
4.2.1 Οι γραμμές του λεωφορείου: (α) υπερυψωμένες γραμμές, (β) υπόγειες γραμμές.



4.2.2 Η “O-Bahn” στην Αδελαΐδα, Αυστραλία.

Σε γενικές γραμμές, η αντίσταση του αέρα είναι μία από τις πιο βασικές ανησυχίες των συστημάτων προώθησης και σχεδιασμού των τούνελ σε σωληνοειδή συστήματα μεταφοράς. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, οι δοκιμές διεξήχθησαν σε ένα γραμμικό σύστημα κινητήρα, που συνήθως χρησιμοποιείται για τη δοκιμή πρόσκρουσης, με κυλινδρικού σχήματος σώματα λεωφορείων κλίμακας 1:20. Οι εικόνες 4.2.3 και 4.2.4 δείχνουν το πώς έγινε τεστ για μετρήσεις φαλαγγών λεωφορείων μέσα σε σήραγγες. Ένα μικρό τούνελ ($L_{1:1} = 180\mu$) και μία μακριά σήραγγα ($L_{1:1} = 2200 \mu$) ήταν διαθέσιμα. Για τεχνικούς λόγους, στην μακριά σήραγγα ακριβείς μετρήσεις μπορούσαν να γίνουν μόνο στα πρώτα 180μ. Τα μοντέλα ανέπτυξαν ταχύτητες μέχρι 70 χλμ/ώρα (44 μίλια/ώρα). Η αναλογία μπλοκαρίσματος $\phi = 0.54$ (από αντιπροσωπευτικό δείγμα λεωφορείου σε αντιπροσωπευτικό δείγμα σήραγγας) είχε επιλεγεί να είναι πολύ κοντά σε πρακτικές απαιτήσεις.

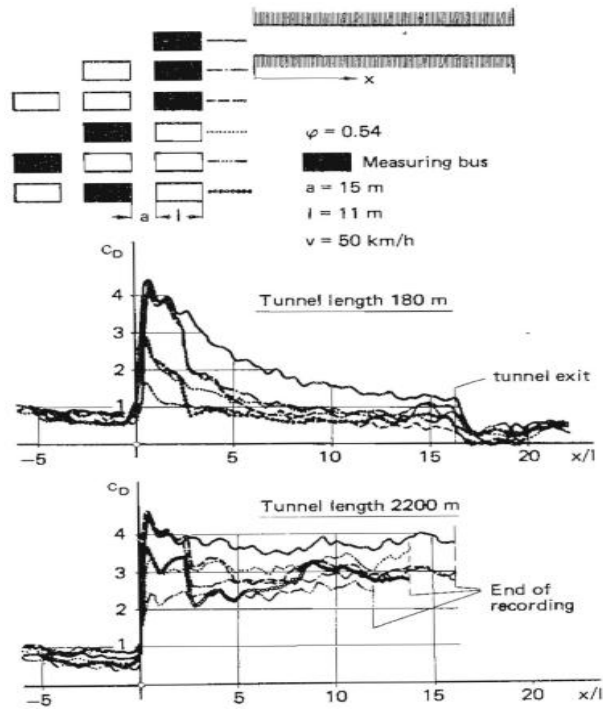
Οι πρώτες δοκιμές ήταν μετρήσεις της πίεσης της επιφάνειας του μπροστινού και πίσω άκρου ενός μονού λεωφορείου. Η υψηλή κλίση πίεσης στην μπροστινή επιφάνεια κατά τη διάρκεια της εναρκτήριας φάσης, που προκλήθηκε από την επιτάχυνση που έμοιαζε με ώθηση από την μάζα αέρα της σήραγγας, ξεχωρίζει. Μια ραγδαία πτώση στην αντίσταση της πίεσης της μπροστινής επιφάνειας ακόμη και κάτω από αυτή της ελεύθερης ατμόσφαιρας (η μάζα αέρα της σήραγγας έχει ήδη επιταχυνθεί) ακολουθεί αμέσως μετά, έτσι ώστε η συνολική πίεση της αντίστασης μετά την εναρκτήρια φάση προσδιορίζεται κυρίως από την ποσότητα της αντίστασης της βάσης.



4.2.3 Τυπική ανάπτυξη του συντελεστή οπισθέλκουσας c_D για ένα σώμα μέσα σε σήραγγα.

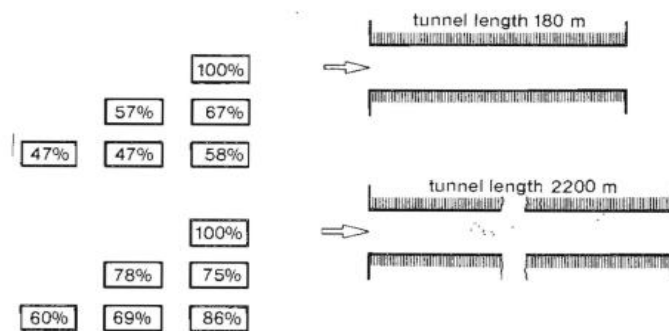
Η αντίσταση του αέρα μετρήθηκε με τη βοήθεια ενός αισθητήρα δύναμης συναρμολογημένου εντός του μοντέλου. Κατά τη διάρκεια της διέλευσης της σήραγγας, ο συντελεστής οπισθέλκουσας c_D και η συνολική πίεση στις επιφάνειες των μπροστινών και πίσω άκρων ακολουθούν παρόμοιες καμπύλες. Όσο μικρότερη είναι η σήραγγα, τόσο πιο γρήγορα μειώνεται ο c_D . Αυτό αντιστοιχεί στην επιτάχυνση της μάζας του αέρα της σήραγγας. Κατά τη φάση εξόδου, η καμπύλη c_D επιδεικνύει μία σύντομη εξασθένηση κάτω από την τιμή στο άνοιγμα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της πίεσης από το μέρος πίσω από τον κύλινδρο λόγω της αιφνίδιας διάλυση του ρεύματος δακτυλίου, που περιβάλλει το επόμενο στη σήραγγα και μειώνει την πίεση στον τρόπο που δουλεύει ένας εγχυτήρας.

Σε σύγκριση με το μονό λεωφορείο, περισσότερο ή λιγότερο οι αναφερθείσες μειώσεις αντίστασης (ανάλογα με τον αριθμό των λεωφορείων και τη θέση της φάλαγγας) έρχονται σαν αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της φάσης εισόδου τόσο για μικρές σήραγγες όσο και για τις μακριές σήραγγες. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας c_D του πρώτου λεωφορείου πέφτει αισθητά όταν το λεωφορείο, που ακολουθεί εισέρχεται στη σήραγγα. Πέφτει πάλι, αλλά σε μικρότερο βαθμό, όταν το τρίτο λεωφορείο εισέρχεται στη σήραγγα (Εικ. 4.2.4, πάνω φωτογραφία). Η αρνητική πίεση στην επιφάνεια του πίσω άκρου μειώνεται. Η μέγιστη αντίσταση στη φάση της εισόδου στη σήραγγα είναι μικρότερη με περισσότερα λεωφορεία μπροστά εντείνοντας την επίδραση αναρρόφησης στο επόμενο λεωφορείο. Κατά τη διάρκεια της διέλευσης της σήραγγας, όλα τα λεωφορεία-σε οποιαδήποτε θέση-δείχνουν μια καμπύλη c_D μόνο περίπου το μισό από το ύψος του μονού λεωφορείου. Στην μακριά σήραγγα ($L_{1:1} = 2200\mu.$) οι αλλαγές στην αντίσταση του αέρα ακολουθούν παρόμοια πορεία όπως και στη μικρή, αλλά λαμβάνουν χώρα σε ένα υψηλότερο επίπεδο μετά την αρχική φάση, τουλάχιστον πάνω από το μετρημένο τμήμα $L_{1:1} = 180\mu.$ (Εικ. 4.2.4, κάτω φωτογραφία).



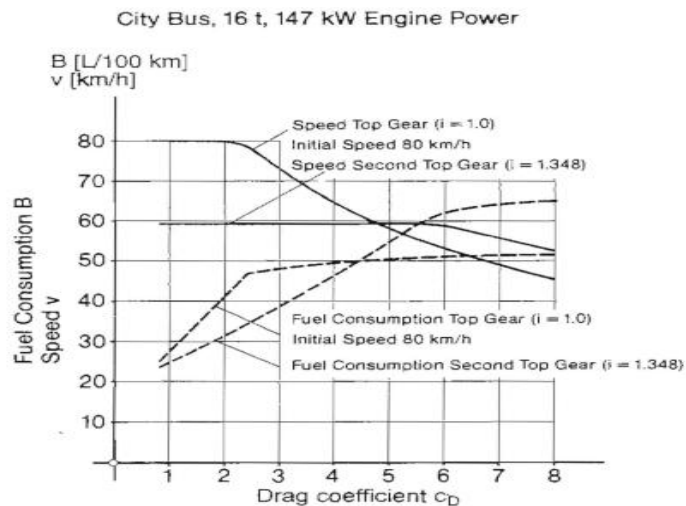
4.2.4 Επίδραση της αλληλουχίας στο συντελεστή οπισθέλκουσας των φαλαγγών λεωφορείων σε μία σήραγγα. Πάνω φωτογραφία: μικρή σήραγγα $L_{1:1} = 180\mu$. Κάτω φωτογραφία: μακριά σήραγγα $L_{1:1} = 2200\mu$.

Η εικόνα 4.2.5 δείχνει ότι οι βελτιώσεις της αντίστασης έως και 50% είναι δυνατές με τις φάλαγγες λεωφορείων. Με μια αναλογία μπλοκαρίσματος $\varphi = 0.54$ και μια σήραγγα μήκους 180 μ ., τρία λεωφορεία σε φάλαγγα με διαστήματα της τάξης των 15 μ . ($V_{max} = 50$ χλμ/ώρα (31,3 μίλια/ώρα), μαζί έχουν μόνο την μισή αντίσταση αέρα από ότι έχουν τρία λεωφορεία που ταξιδεύουν μόνα.



4.2.5 Μείωση της αντίστασης του αέρα με φάλαγγες λεωφορείων σε μία σήραγγα.

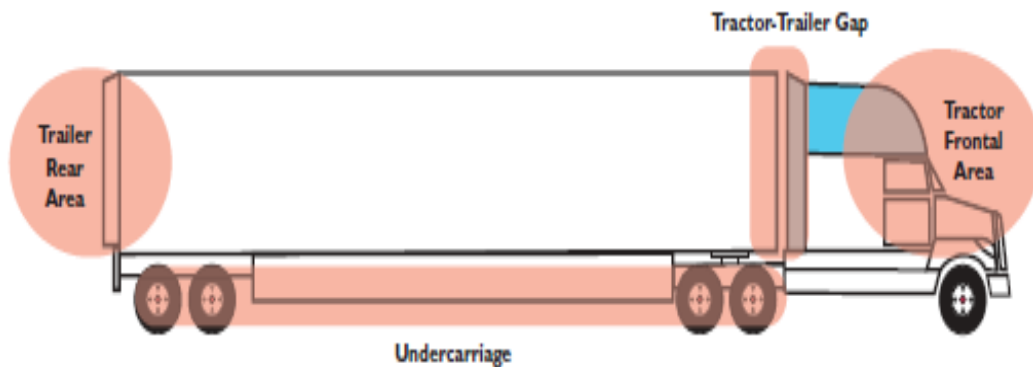
Για λόγους κόστους, η τάση είναι να κρατηθεί η περιοχή διατομής της σήραγγας όσο το δυνατόν μικρότερη. Αυτό οδηγεί προφανώς σε μια υψηλή καμπύλη c_D κατά τη διάρκεια της διόδου της σήραγγας, έτσι ώστε τίθεται το ερώτημα αν η ταχύτητα έξω από τη σήραγγα μπορεί επίσης να διατηρείται και εντός της σήραγγας. Από την εικόνα 4.2.6 προκύπτει ότι ένα αστικό λεωφορείο με 147 kW ισχύ κινητήρα και 16 τόνων GVW είναι πιθανό να διατηρήσει την ταχύτητα των 60 χλμ/ώρα (37,5 μιλίων/ώρα) - επαρκής για λεωφορεία που κινούνται σε τροχιά-μέ συντελεστή οπισθέλκουσας $c_D = 5.7$, αλλά σε βάρος της σαφώς μεγαλύτερης κατανάλωσης καυσίμου.



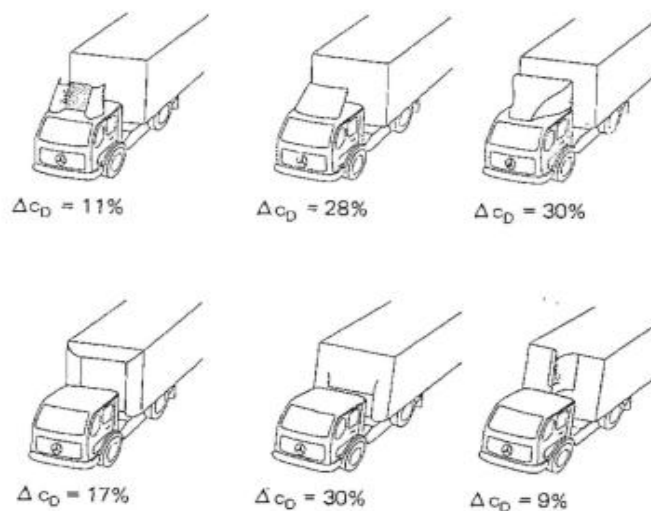
4.2.6 Επίδραση του συντελεστή οπισθέλκουσας στην ταχύτητα του ταξιδιού και στην κατανάλωση καυσίμου με μία δεδομένη δύναμη του κινητήρα.

5. Πρόσθετα εξαρτήματα

Τα φορτηγά μπορούν να βελτιωθούν σε τέσσερα βασικά σημεία. Στο πίσω μέρος της ρυμούλκας, στο κενό ανάμεσα στον τράκτορα και το ρυμουλκούμενο μέρος, στο μπροστινό μέρος του τράκτορα και στο κενό που δημιουργείται στο κάτω μέρος ανάμεσα στον τράκτορα και το ρυμουλκούμενο μέρος.

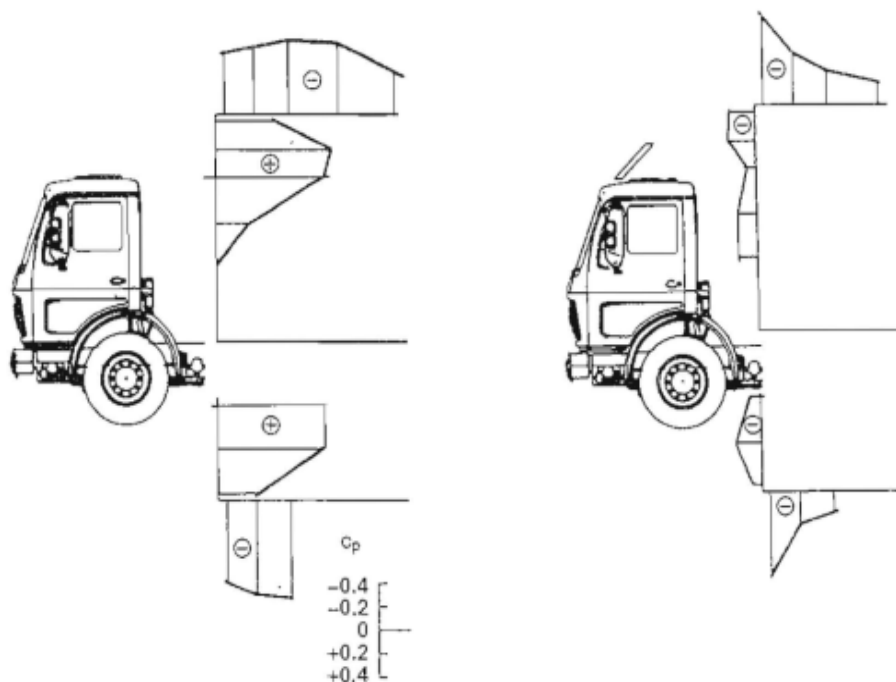


Τα φορτηγά λειτουργούν με μια ποικιλία διαφορετικών ρυμουλκών. Η χαμηλή αντίσταση μιας καμπίνας οδηγού δεν εγγυάται χαμηλή αντίσταση για όλους τους συνδυασμούς φορτηγών με ρυμουλκούμενα. Για μεγάλα σώματα όμως έχει αναπτυχθεί μια ολόκληρη σειρά πρόσθετων εξαρτημάτων για να μειωθεί η αντίσταση του αέρα. Μερικά από αυτά που βλέπουμε στο δρόμο συγκρίνονται στην παρακάτω εικόνα.



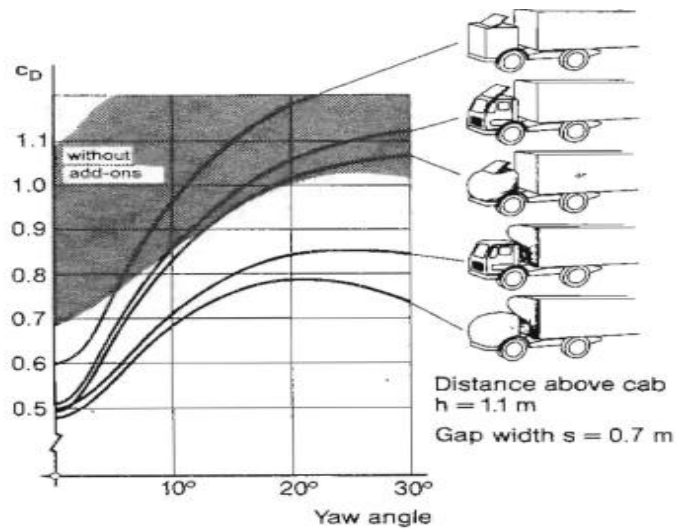
Μείωση της αντίστασης μέσω επιπρόσθετων συσκευών και με μετωπική ροή αέρα.

Για τον εξοπλισμό της καμπίνας εμπρόσθιες και πλαϊνές αποκλίσεις αέρα ή προσαρμόσιμα καλύμματα αέρα έχουν αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικά. Τα καλύμματα αέρα είναι εύκολο να τοποθετηθούν και είναι και φθηνά. Η κατανομή της πίεσης στην εικόνα 5.1 δείχνει την επίδραση του καλύμματος αέρα. Μηχανήματα που τοποθετούνται στο σώμα του φορτηγού, για παράδειγμα, σταθεροποιητές στροβίλου που έχουν το σχήμα πτερυγίων στο μπροστινό τοίχωμα, οι οποίοι με σχηματισμό στροβίλου μειώνουν την ροή του αέρα ανάμεσα στην καμπίνα και στο σώμα του φορτηγού σε παράλληλους ανέμους ή ελάσματα αέρα, που έχουν το σχήμα μισού μπαλονιού, βοηθούν να μειωθεί η συνολική αντίσταση.



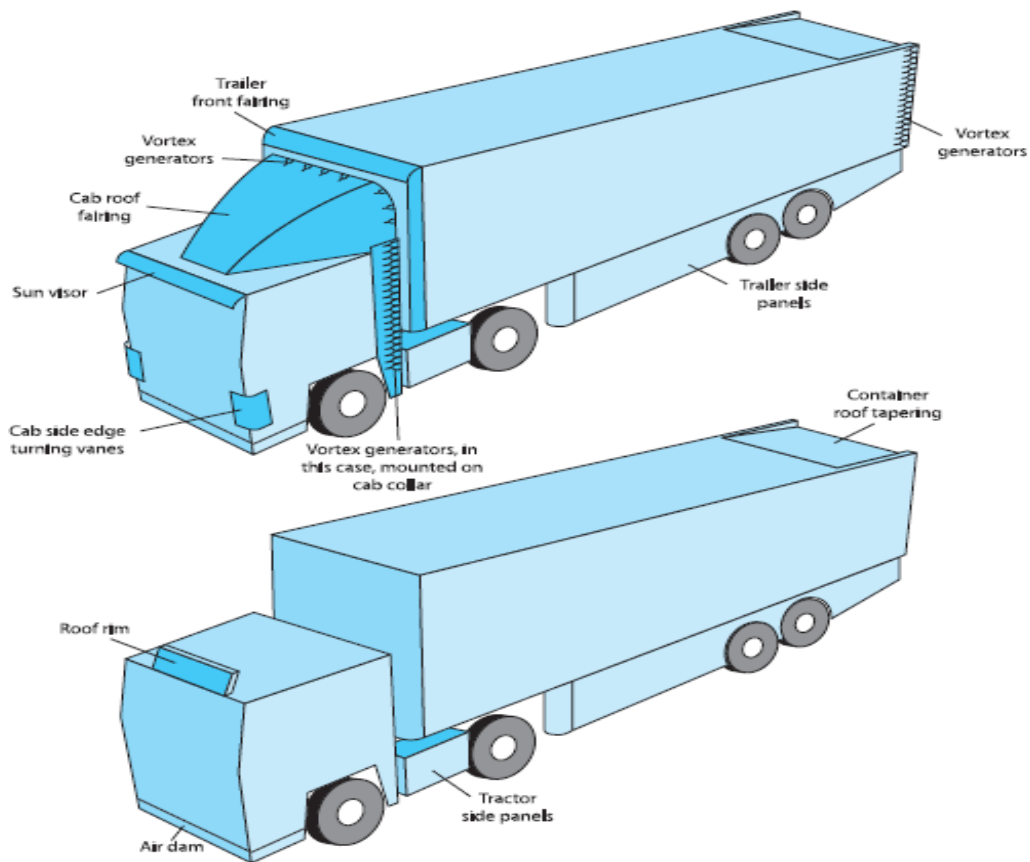
5.1 Επίδραση της ασπίδας του αέρα στην κατανομή της πίεσης.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.2 για φορτηγά με καμπίνες με αιχμηρές άκρες, οι συσκευές εκτροπής του ανέμου μπορούν να μειώσουν την αντίσταση μέχρι περίπου 10%, ενώ για εκδόσεις, που αφορούν χαμηλή αντίσταση, οι μειώσεις είναι δυνατόν να φτάσουν έως και 30%, με σχετικό άνεμο από ευθεία μπροστά (μηδενική γωνία αποσταθεροποίησης).

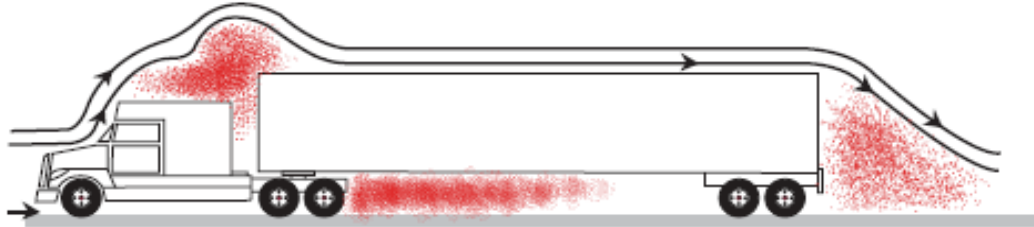


5.2 Μείωση της αντίστασης ενάντια στην αποσταθεροποίηση μέσω επιπρόσθετων συσκευών σε ένα τμήμα ενός ημιρυμουλκούμενου.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τα πιο κοινά και συνηθισμένα εξαρτήματα που μπορούν να μειώσουν την αεροδυναμική αντίσταση στα αρθρωτά και άκαμπτα οχήματα.



Με τη χρήση των αεροδυναμικών προσθέτων επιτυγχάνεται ομαλότερη ροή του αέρα γύρω από το όχημα που συνεπάγεται με μικρότερη αεροδυναμική αντίσταση και χαμηλότερη κατανάλωση όπως φαίνεται παρακάτω.



A: A tractor-trailer without aerodynamic devices installed produces a large amount of drag (shown as shaded area)



B: A tractor-trailer with aerodynamic devices installed produces less drag (shown as shaded area)

5.1. Αναλυτική παρουσίαση των εξαρτημάτων

5.1.1. Αεροδυναμικοί καθρέπτες

Η λύση που δίνει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμων είναι η αντικατάστασή τους με κάμερες, οι οποίες μπορεί να είναι ενσωματωμένες στο αμάξωμα, μειώνοντας έτσι την μετωπική επιφάνεια, συνεπώς και την αεροδυναμική αντίσταση. Οι κάμερες μπορούν να παρέχουν ένα ευρύτερο οπτικό πεδίο προς τα πίσω και αυτές που είναι εξοπλισμένες με την τεχνολογία υπερύθρων μπορεί να διεισδύσουν στην ομίχλη και τη βροχή, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Οι αεροδυναμικοί καθρέπτες έχουν τοποθετηθεί σε νέα οχήματα για μερικά χρόνια τώρα. Η τοποθέτηση των αεροδυναμικών καθρεπτών επηρεάζει την κατανάλωση καυσίμου: η εξοικονόμηση (σε σύγκριση με τους συμβατικούς καθρέπτες) είναι 0,3%, 0,2% και 0,2% για ένα άκαμπτο όχημα, ένα αρθρωτό όχημα και ένα όχημα έλξης αντίστοιχα.



5.1.2. Ανεμοθραύστης

Ο ανεμοθραύστης είναι ουσιαστικά μια προς τα κάτω προέκταση του προφυλακτήρα. Σταματά τον αέρα από το να ρέει κατά μήκος της κάτω πλευράς του οχήματος, καθοδηγώντας τον κατά μήκος των πιο αεροδυναμικών επιφανειών, δηλαδή τις πλευρές και την οροφή, μειώνοντας έτσι την πίεση του ανέμου στις ανωμαλίες στην κάτω πλευρά του οχήματος, εξ ου και την οπισθέλκουσα. Η μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας εξαρτάται από το κάτω μέρος του αμαξώματος του οχήματος: αν αυτό είναι ομαλό, ένας ανεμοθραύστης θα έχει ακόμη και το αντίθετο αποτέλεσμα, αυξάνοντας την μετωπική επιφάνεια. Ένα παράδειγμα ενός φράγματος αέρα δείχνεται (βλέπε το λευκό βέλος). Ένα ανεμοθραύστης αποδίδει εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 0,9%, 0,4% και 0,3% για ένα άκαμπτο όχημα, ένα αρθρωτό όχημα όσο και ένα όχημα έλξης αντίστοιχα.



5.1.3. Αεροδυναμικοί λασπωτήρες

Τα Eco και Vortex Guard είναι διάτρητοι λασπωτήρες που αντικαθιστούν τους παραδοσιακούς λασπωτήρες που έχουν τοποθετηθεί πίσω από τους τροχούς. Επιτρέπουν περίπου το 75% του αέρα για να περάσει μέσα από αυτούς, με αποτέλεσμα λιγότερη οπισθέλκουσα. Με την εγκατάσταση υπάρχει μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά περίπου 1,5%, επίσης μειώνουν τον διασκορπισμό ακαθαρσιών στο δρόμο.



5.1.4. Πλευρικά πάνελ

Αυτά χρησιμοποιούνται για να γεφυρωθεί το κενό μεταξύ των εμπρός και πίσω αξόνων του ελκυστήρα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε συνθήκες πλευρικών ανέμων, που εμποδίζουν την είσοδο αέρα κάτω από το τράκτορα. Έχουν, επίσης, τα πλεονεκτήματα της οδικής ασφάλειας: να μειώσει το ποσό του ψεκασμού του δρόμου, καθώς και τη βελτίωση της ασφάλειας για τους ποδηλάτες, τους πεζούς και τους οδηγούς μοτοσυκλέτας, οι οποίοι είναι λιγότερο πιθανό να εμπλακούν κάτω από τους τροχούς. Τοποθέτηση πάνελ πλευρά του ελκυστήρα ενός αρθρωτού οχήματος παράγει μια εξοικονόμηση καυσίμου της τάξεως του 0,7%.



5.1.5. Αεροδυναμικά καλύμματα ζαντών

Αεροδυναμικά καλύμματα ζαντών είναι από τους γρηγορότερους και ευκολότερους τρόπους εξοικονόμησης καυσίμου σε ένα φορτηγό. Εξορθολογούν τη ροή του αέρα γύρω από τους τροχούς, μειώνοντας έτσι την αντίσταση. Ο κατασκευαστής δεν έχει κυκλοφορήσει ακόμα στοιχεία σχετικά με την ακριβείς εξοικονόμηση καυσίμου που μπορεί να επιτευχθεί. Το μειονέκτημα είναι ότι αυτά τα καλύμματα εμποδίζουν τη ροή αέρα μέσω του ζαντών, η οποία είναι απαραίτητη για την ψύξη των φρένων.



5.1. 6. Εξωτερικό αλεξήλιο

Η πρωταρχική λειτουργία του αλεξήλιου είναι φυσικά να διασφαλιστεί ότι ο οδηγός δεν υποφέρει από το εκτυφλωτικό φως. Οι στρογγυλεμένες άκρες του μπορεί επίσης να έχουν μια αεροδυναμική λειτουργία, τη μείωση της οπισθέλκουσας στην καμπίνα με αιχμηρά οριζόντια άκρα, με την καθοδήγηση της ροής του αέρα γύρω από αυτό καλύτερα. Η Τοποθέτηση ενός αλεξήλιου δίνει μια εξοικονόμηση καυσίμου κατά 3% για ένα άκαμπτο όχημα, και 1,9% και 2,3% για ένα αρθρωτό όχημα και για ένα όχημα έλξης αντίστοιχα.

Η ελάχιστη ακτίνα της στρογγυλοποίησης της οριζόντιας ακμής της οροφής της καμπίνας που απαιτείται για να επιτευχθεί μια μείωση της οπισθέλκουσας εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα του οχήματος. Για να επιτευχθεί μείωση για όλες τις ταχύτητες του οχήματος μια ακτίνα των εκατό πενήντα χιλιοστών είναι το ιδανικότερο. Με τη χρήση μιας ακτίνας 75mm μπορεί να επιτευχθεί μείωση της αντίστασης για ταχύτητες άνω των 80km/h.



5.1.7. Μάσκα οροφής ή εκτροπής

Μια κοινή αεροδυναμική τροποποίηση που γίνεται στις καμπίνες είναι η προσαρμογή μίας μάσκας οροφής / εκτροπής, όπως συχνά λανθασμένα αναφέρεται ως αεροτομή. Αυτές οι μάσκες έρχονται σε δύο τύπους:

1. Ο εκτροπέας οροφής, ο οποίος είναι μια επίπεδη ή κυρτή (δύο διαστάσεων) πλάκα με ρυθμιζόμενη γωνία.
2. Το φαίρινγκ οροφής, το οποίο είναι τρισδιάστατο.

Το φαίρινγκ οροφής είναι πιο αποτελεσματικό σε συνθήκες πλευρικού ανέμου από τον εκτροπέα οροφής, που είναι ο λόγος ότι ο εκτροπέας δεν χρησιμοποιείται πολύ στις μέρες μας. Η πλειονότητα των κατασκευαστών επιλέγουν να προσαρμόσουν φαίρινγκ, στο επάνω μέρος του τράκτορα.

Το σώμα ή το ημι-ρυμουλκούμενο πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την καμπίνα του τράκτορα, αλλιώς η τοποθέτηση του fairing / εκτροπής οροφής θα είναι επιζήμια, καθώς αυξάνει την μετωπική επιφάνεια. Είναι σημαντικό να ταιριάζει ένας ρυθμιζόμενος τύπος, καθώς αν είναι πολύ υψηλό, δημιουργεί πρόσθετη έλξη λόγω της μεγαλύτερης μετωπικής επιφάνειας. Στον αντίποδα εάν είναι πολύ χαμηλό, δημιουργεί πρόσθετη οπισθέλκουσα πίεση στην κορυφή του σώματος.

Για να είναι πλήρως αποτελεσματικό ένα φαίρινγκ οροφής / εκτροπής σε όλες τις γωνίες της ροής θα πρέπει να παρατάσσεται καλά με την καμπίνα. Η ρύθμιση θα εξαρτάται από το ύψος, το σχήμα και τη θέση του φαίρινγκ / εκτροπέα σε σχέση με το άκρο της οροφής του σώματος ή του ημι-ρυμουλκούμενο. Μια καλή αρχική ρύθμιση μπορεί να επιτευχθεί με την επέκταση μιας νοητής ευθείας γραμμής από το πίσω άκρο του φέρινγκ / εκτροπής έτσι ώστε να περνάει πάνω από την άκρο της οροφής του σώματος ή του ημι-ρυμουλκούμενο. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ της οπίσθιας ακμής του φαίρινγκ / εκτροπέα και του σώματος, τόσο μικρότερη θα πρέπει να είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ αυτής της ευθείας γραμμής και του άκρου της οροφής. Με άλλα λόγια, αν το φαίρινγκ / εκτροπέα εκτείνεται στο ρυμουλκούμενο, το οριζόντιο άκρο εκφυγής του θα πρέπει να είναι σε επαφή με το εμπρόσθιο άκρο της οροφής του ρυμουλκούμενου. Μια σωστά ρυθμισμένη μάσκα φέρινγκ / εκτροπής αποδίδει μια εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 5,9% για ένα άκαμπτο όχημα. Εξοικονόμηση 4% μπορεί να επιτευχθεί για ένα αρθρωτό όχημα και ένα όχημα έλξης χρησιμοποιεί 2,8% λιγότερα καύσιμα με φέρινγκ οροφής ή εκτροπής.



5.1. 8. Κολάρο με φέρινγκ οροφής

Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί το χάσμα και ιδανικά να γεφυρωθεί, αλλά αυτό δεν είναι δυνατόν στην περίπτωση ορισμένων άκαμπτων οχημάτων, λόγω της αιώρησης της καμπίνας. Εάν η καμπίνα είναι μη αναρτώμενη είναι σκόπιμο να καλυφθεί το κενό. Η λύση είναι αυτό που είναι γνωστό ως «κολάρο» (ένα βελτιωμένο κομμάτι γεφύρωσης του χάσματος μεταξύ της καμπίνας και του σώματος), σε συνδυασμό με ένα φαίρινγκ οροφής. Όπως και το φαίρινγκ οροφής, το κολάρο μειώνει τον συντελεστή οπισθέλκουσας σε όλες τις γωνίες της ροής. Αυτό μπορεί να έχει

εξοικονόμηση καύσιμου 8% για ένα άκαμπτο όχημα και 3,7% εξοικονόμηση για ένα όχημα έλξης. Επίσης, βελτιώνει τη σταθερότητα και την εμφάνιση του οχήματος.



5.1.9. Πλευρικά πτερύγια

Οι πρότυπες πλαϊνές ποδιές με ανοιχτό το κομμάτι στις ρόδες προσφέρουν μείωση κατά 8,5% της οπισθέλκουσας. Η διαμόρφωση των πλευρικών πτερυγίων, είναι οι ίσιες ποδιές με ένα βελτιστοποιημένο προφίλ που παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της οπισθέλκουσας: από 14% έως 17%.

Η εξαιρετικά αεροδυναμική απόδοση των πλευρικών πτερυγίων έχει δημιουργηθεί από το βελτιστοποιημένο προφίλ πρόσοψής του: τον αγωγός ροής τους. Το φτερωτό σχήμα της κατασκευής κατευθύνει τη ροή του αέρα πίσω από τον τράκτορα, δημιουργώντας μια ώθηση στην κατεύθυνση οδήγησης και προλαμβάνει το διαχωρισμό της ροής του. Αυτό το μοναδικό σχήμα πτέρυγας σχεδόν διπλασιάζει την απόδοση των οποιοδήποτε άλλων λύσεων.



Ένα περίτεχνο δοκιμαστικό τεστ με τα πλευρικά πτερύγια εκτελέστηκε το 2010 και το 2011, τόσο σε πίστα δοκιμών, όσο και σε δημόσιους δρόμους στις καθημερινές λειτουργικές δραστηριότητες μαζί με αρκετές εταιρείες μεταφορών. Τα πλευρικά πτερύγια αποδείχθηκε ότι προσφέρουν μια μέση εξοικονόμηση καυσίμου από 1,5 λίτρα ανά 100 km ή αλλιώς 3,9 kg ανά 100 km, με λιγότερες εκπομπές CO₂, που αντιστοιχεί σε με διαφορά 5%. Με υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, δηλαδή ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 8 m/s, η εξοικονόμηση καυσίμου αποδείχτηκε πάνω από 2 λίτρα ανά 100 km.

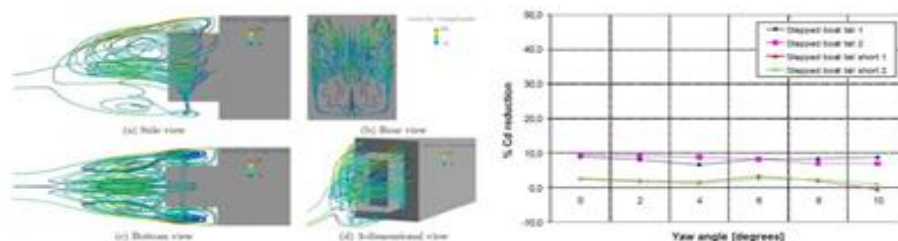
5.1.10. Πτερύγια στο πίσω μέρος του ρυμουλκούμενου (Ουρές)

Το πίσω μέρος του ρυμουλκούμενου έχει μεγάλη συμβολή στη συνολική αντίσταση ενός ενσωματωμένου συρμού ελκυστήρα-ρυμουλκούμενου. Για να μειωθεί την αντίσταση, και κατά συνέπεια να βελτιωθεί η εξοικονόμηση καυσίμου, διάφορα αεροδυναμικά βοηθήματα και τεχνικές χειραγώγησης της ροής μπορεί να εφαρμοστούν.

Βαθμωτά πτερύγια

Τα βαθμωτά πτερύγια μπορούν να περιγραφούν ως ένα αεροδυναμικό πρόσθετο που αποτελείται από 4 ορθογώνιες πλάκες που τοποθετούνται στην οπίσθια επιφάνεια του ρυμουλκούμενου σε μια ορισμένη θέση σε σχέση με τις ακμές του. Με τη βοήθεια των αριθμητικών προσομοιώσεων και πειράματα στην αεροδυναμική σήραγγα σε βαθμωτά πτερύγια έχει γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων σε ένα απλοποιημένο μοντέλο φορτηγού. Από τα αποτελέσματα αυτά συνάγεται το συμπέρασμα ότι μακρύτερα πτερύγια θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερη μείωση της οπισθέλκουσας. Οι καλύτερες επιδόσεις των κλιμακωτών πτερυγίων δημιουργούν μια μείωση της οπισθέλκουσας της τάξεως του 10%, ενώ οι μειώσεις οπισθέλκουσας στις μικρότερες εκδόσεις είναι αμελητέες.

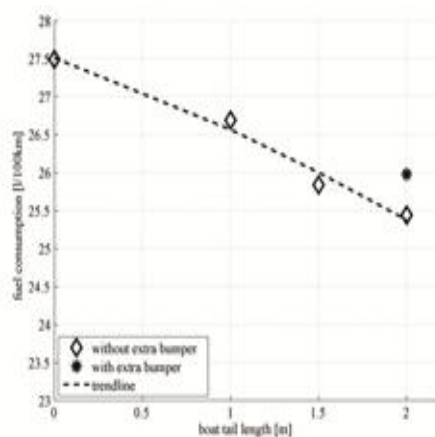
Ένα πρότυπο πτερύγιο δημιουργεί μια μείωση της οπισθέλκουσας κατά σχεδόν 40% για το ίδιο απλοποιημένο μοντέλο φορτηγού.



Αριθμητικές προσομοιώσεις (αριστερά) και τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής σήραγγας των κλιμακωτών πτερυγίων (δεξιά).

Άκαμπτα πτερύγια

Το 2008, εκτελέστηκε η πρώτη δοκιμή με άκαμπτα πτερύγια για το ρυμουλκούμενο σε δρόμο . Για ένα χρόνο, ένα ρυμουλκούμενο με άκαμπτα πτερύγια επιτράπηκε από την νομοθεσία να οδηγηθεί σε δημόσιους δρόμους. Τα στοιχεία για την κατανάλωση καυσίμου είχαν ήδη καταγραφεί πριν τα πτερύγια τοποθετηθούν πάνω στο τρέιλερ, επιτρέποντας τη σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμων με και χωρίς αυτά. Κατά τη διάρκεια της περιόδου δοκιμής, το μήκος της ουράς ήταν ποικίλο. Αρχικά, το άκαμπτο πτερύγιο είχε μήκος 2 m και συντομεύθηκε σταδιακά σε 1,5 m και 1m. Μια οικονομία καυσίμου των 2 λίτρων ανά 100km επετεύχθη με ένα άκαμπτο πτερύγιο μήκους 2m. Όταν το μήκος της ουράς μειώθηκε σταδιακά προς 1,5 m και 1 m, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν έδειξαν εξοικονόμηση καυσίμου 1,7 και 0,8 λίτρα ανά 100km αντίστοιχα.



Αναδιπλούμενα και φουσκωτά πτερύγια

Περισσότερες πρακτικές έννοιες των πτερυγίων έχουν σχεδιαστεί και δοκιμαστεί στην πίστα και στο οδικό δίκτυο. Η πρώτη έννοια είναι τα πτερύγια που μπορούν να διπλωθούν με το χέρι για να τις πίσω πόρτες των ρυμουλκούμενων, εξασφαλίζοντας την προσβασιμότητα του ρυμουλκούμενου. Δοκιμαστικά τεστ έδειξαν μία εξοικονόμηση καυσίμου πάνω από ένα λίτρο ανά 100km. Αυτά τα πτερύγια δοκιμάστηκαν επίσης κατά τις επιχειρησιακές δραστηριότητες εταιριών για μία περίοδο πέντε μηνών, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμου 1,6 λίτρα ανά 100km. Αυτό το πτυσσόμενο πτερύγιο αποδείχθηκε ως μια πολύ αποτελεσματική λύση που δεν εμποδίζει τις επιχειρησιακές δραστηριότητες του οδηγού του φορτηγού.

Μία δεύτερη έννοια είναι το φουσκωτό πτερύγιο που είναι κατασκευασμένο από ένα εύκαμπτο υλικό. Το πτερύγιο διογκώνεται με τη βοήθεια των αντλιών στο επιθυμητό σχήμα. Δοκιμαστικά τεστ με ένα πρωτότυπο απέδειξαν μια εξοικονόμηση καυσίμου 1 λίτρο ανά 100 km.



Αναδιπλούμενα (αριστερά) και φουσκωτά (δεξιά) πτερύγια.

Κατευθυντήρια πτερύγια

Ένας εναλλακτικός τρόπος για να μειωθεί η συνολική οπισθέλκουσα ενός ελκυστήρα-ρυμουλκούμενου είναι με την εφαρμογή κατευθυντήριων πτερυγίων με σχήμα αεροτομής στο πίσω μέρος του ρυμουλκούμενου. Η νέα αυτή συσκευή μείωσης της οπισθέλκουσας, αναπτύσσεται με τη βοήθεια των αριθμητικών προσομοιώσεων και τη διεξαγωγή πειραμάτων στην αεροδυναμική σήραγγα του Delft University of Technology. Τον Αύγουστο του 2011, εκτελέστηκε μια πρώτη δοκιμή με ένα πλήρους κλίμακας πρωτότυπο.

Με τη βοήθεια της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, η ανάλυση της ροής γύρω από τα πτερύγια στο πίσω μέρος του ρυμουλκούμενου μέρους παρέχει περισσότερες πληροφορίες των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών. Χρησιμοποιώντας αυτές τις αριθμητικές προσομοιώσεις, διάφορες παράμετροι των πτερυγίων προσομοιώθηκαν για να πάρουν μια πρώτη ένδειξη για την ενδεχόμενη μείωση της οπισθέλκουσας. Το σχήμα της αεροτομής μεταβάλλεται, καθώς η θέση των πτερυγίων σε σχέση με την οροφή του ρυμουλκούμενου, τις πλευρές και το κάτω μέρος. Επίσης, οι γωνίες προσβολής ποικίλλουν καθώς δεν έχει βρεθεί μια βέλτιστη γωνία προσβολής για την αεροτομή.

Πειράματα στην αεροδυναμική σήραγγα ανέφεραν την επίδραση σε διαφορετικές διαμορφώσεις πτερυγίου επί της συνολικής οπισθέλκουσας του οχήματος. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραλλαγές κατά τη διάρκεια αριθμητικές προσομοιώσεις, δηλαδή στο σχήμα της αεροτομής, τη θέση και τη γωνία προσβολής, μετρώνται οι δυνητικές μειώσεις της οπισθέλκουσας. Επιπλέον, μετρώνται μειώσεις της οπισθέλκουσας που λαμβάνονται με διαφορετικές διαμορφώσεις των κατευθυντήριων πτερυγίων. Κατά τη διάρκεια πειραμάτων στην αεροδυναμική σήραγγα πιθανές μειώσεις της αντίστασης έως 20% είχαν αποδειχθεί με πλήρη κλειστό δακτύλιο, δηλαδή πτερύγια σε κάθε πλευρά του ρυμουλκούμενου.

Κατά τη διάρκεια ενός δοκιμαστικού τεστ τα κατευθυντήρια πτερύγια ήταν τοποθετημένα επάνω σε ένα πρότυπο ρυμουλκούμενο ορθογωνικού σχήματος, προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη διαμόρφωση και η αντίστοιχη εξοικονόμηση καυσίμων. Οι επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν με ένα ρυμουλκούμενο που δεν ήταν εξοπλισμένο με οποιαδήποτε συσκευή μείωσης της οπισθέλκουσας. Η διαμόρφωση με το πτερύγιο κορυφής έδειξε

μόνο, εξοικονόμηση καυσίμου 0,5 λίτρα ανά 100km. Επίσης, ελέγχθηκε η διαμόρφωση με τα τέσσερα περύγια στα πίσω άκρα. Η διαμόρφωση αυτή οδήγησε σε μια ελαφρά βελτίωση σε σύγκριση την τοποθέτηση μόνο του επάνω περυγίου. Ο λόγος για αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να βρεθεί στην ανάπτυξη του οριακού στρώματος στις πλευρές του οχήματος. Περισσότερη έρευνα απαιτείται για τη βελτίωση της αεροδυναμικής αποτελεσματικότητας του περυγίου.



Vandes at four sides



Only top vane

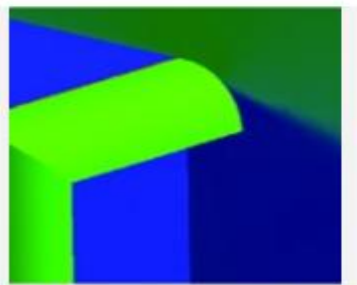
5.1.11. Σύστημα μείωση της οπισθέλκουσας

Η σύστημα μείωσης της οπισθέλκουσας (SDR), είναι μια αεροδυναμική συσκευή μείωση της οπισθέλκουσας η οποία τοποθετείται επάνω στην οροφή ενός ρυμουλκούμενου στο πίσω άκρο. Οι αεροδυναμικές επιδόσεις και η αντίστοιχη εξοικονόμηση καυσίμου που λαμβάνονται κατ 'εφαρμογή του SDR μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας ημέρας δοκιμής σε πλήρη κλίμακα με βάση τον τύπο πρωτοκόλλου ΣΑΕ II. Μετρήθηκε μια απόλυτη εξοικονόμηση καυσίμου 0,24 λίτρα ανά 100 km, που αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση 1% για μια μέση κατανάλωση καυσίμου των 23,96 λίτρα ανά 100km για τις συνθήκες ανέμου που προκύπτουν κατά την οδήγηση.

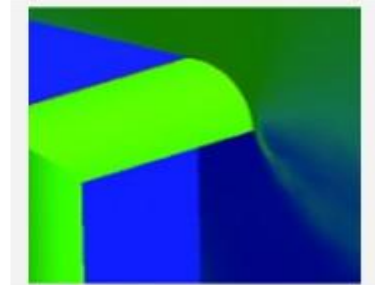


5.1.12. Ενεργητικός έλεγχος ροής

Οι ενεργητικού ελέγχου ροής τεχνολογίες χειρίζονται ενεργά τη συμπεριφορά της ροής σε τοπικό επίπεδο για να υπάρχει μια χαμηλότερη συνολική αντίσταση του αντίστοιχου αντικειμένου. Ένα από τα πιο γνωστά τυπικά παραδείγματα ενεργητικού χειρισμού της ροής είναι να αποτρέπεται ο διαχωρισμός της ροής. Διεξήχθησαν αριθμητικές προσομοιώσεις για να αναλυθεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων που εμπλέκονται στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Η βελτιστοποίηση των εμπλεκόμενων παραμέτρων ενός συστήματος συνεχούς διογκώσεως οδήγησε σε μέγιστη καθαρή μείωση της οπισθέλκουσας του 20%.



Blowing jet not activated: flow separation



Blowing jet activated: attached flow

Μια πρόταση είναι να ισχύσει η παλμική πνοή η οποία είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της αντίστασης. Το πανεπιστήμιο του Τελ Αβίβ (Ισραήλ) ανέπτυξε έναν συνδυασμό συνεχής αναρρόφησης του οριακού στρώματος σε συνδυασμό με παλμική διόγκωση που έχει ίδιο αποτέλεσμα με τη συνεχή εμφύσηση, αλλά πολύ πιο αποτελεσματικό από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας. Οι ενεργητικές τεχνολογίες ελέγχου ροής είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, προκειμένου να εφαρμοστούν με επιτυχία σε ένα πλήρους κλίμακας όχημα κατά τη διάρκεια δοκιμαστικών τεστ, όπου είναι μεγάλος ο αριθμός Reynolds και υπάρχουν, πλευρικοί άνεμοι, ριπές και βροχή. Παρά το γεγονός ότι, είναι πιο απαραίτητη η θεμελιώδης και η πειραματική έρευνα για να κατανοήσουμε πλήρως τους διαφορετικούς μηχανισμούς της ροής, ο ενεργητικός έλεγχος της ροής έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει τα επίπεδα αντίστασης των οδικών οχημάτων στο μέλλον.



Boundary layer suction and pulsed blowing

6. Μελλοντικός Σχεδιασμός

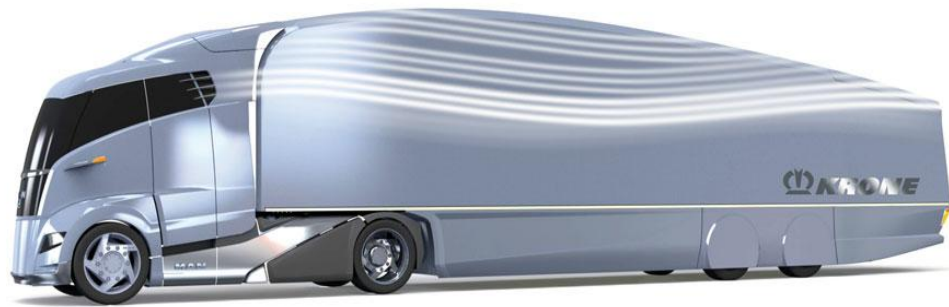
Mercedes-Benz Aero Trailer

Η Mercedes-Benz ισχυρίζεται ότι ο συνδυασμός του επανασχεδιασμένου τράκτορα Actros και της επαναστατικής σχεδίασης Aero Trailer ρυμούλκας αποφέρει 5% μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Η αεροδυναμική αντίσταση του τράκτορα είναι μειωμένη κατά 15% και της ρυμούλκας κατά 18%. Η συνολική βελτίωση αντιστοιχεί, σύμφωνα με τις δηλώσεις της εταιρίας, σε εξοικονόμηση περίπου 2.000 λίτρων καυσίμου για 150.000 διανυθέντα χιλιόμετρα.



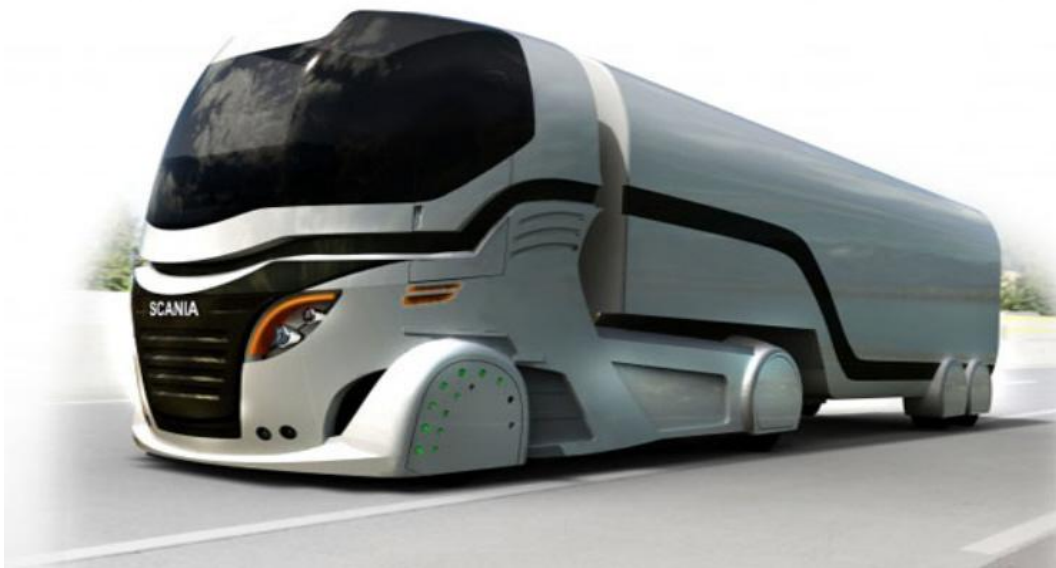
MAN Concept S

Το Concept S της MAN καταφέρνει να μειώσει την κατανάλωση στο εκπληκτικό 25% από ένα συμβατικό φορτηγό 40 τόνων. Σαν συνέπεια, μειώνονται και οι ρύποι CO₂ στο 25%. Αυτό, βέβαια, επιτυγχάνεται με ένα, επίσης, αεροδυναμικό trailer της ίδιας εταιρίας. Το μόνο "μειονέκτημά" του είναι ότι το μήκος του φτάνει περίπου τα 20 μέτρα για να χωρέσει ο ίδιος όγκος στην αεροδυναμική ρυμούλκα, ενώ η νομοθεσία επιτρέπει μέχρι πρότινος μόνο 16,5 μέτρα. Όσον αφορά τον εξωτερικό σχεδιασμό του έχουν ενσωματωθεί όλα τα πρόσθετα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή στα εμπορικά οχήματα. Να σημειωθεί ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής του κυμαίνεται γύρω στο 0.3, είναι παρόμοιος δηλαδή με ένα απλό επιβατηγό όχημα.



Scania Concept

Το συγκεκριμένο Scania είναι ένα concept, το οποίο δεν έχει ανακοινωθεί αν θα βγει στην παραγωγή ακόμα, αλλά είναι αξιοσημείωτο, γιατί μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι το σύνολο τράκτορας-ρυμούλκα είναι ιδιαίτερα αεροδυναμικά σχεδιασμένο, αφού μέχρι και όλοι οι τροχοί έχουν καλυφθεί.



Luigi Colani Concept

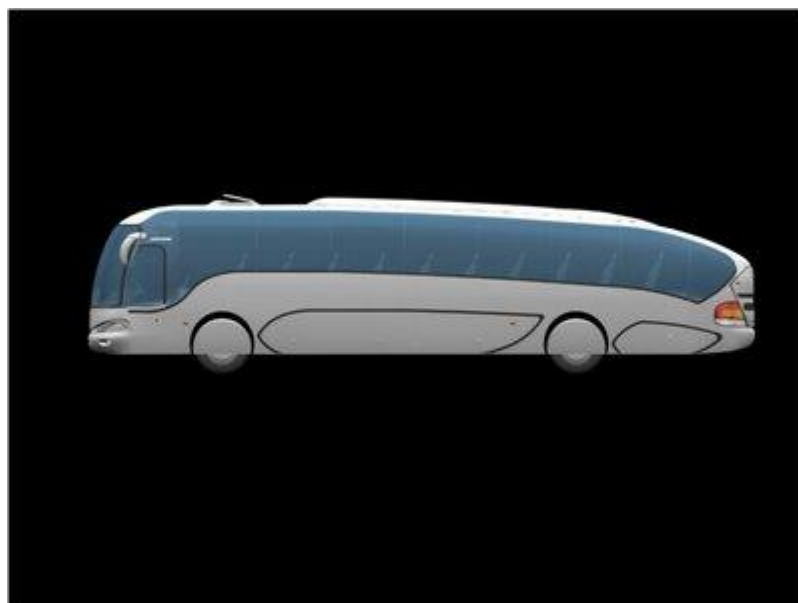
Το συγκεκριμένο concept είναι αξιόλογο γιατί μας παρουσιάζεται μια εκδοχή αεροδυναμικής βελτιστοποίησης ενός βυτιοφόρου οχήματος. Η μορφολογία της μετώπης είναι ιδιαίτερη, όπως φαίνεται και παρακάτω, και παρατηρούνται: μικρό κενό τράκτορα-βυτιοφόρας ρυμούλκας, καλυμμένοι πίσω τροχοί τράκτορα και όλοι οι τροχοί του ρυμουλκούμενου και αεροδυναμικό-ομαλό πίσω τελείωμα.



Marcopolo S.A. and the University of America project

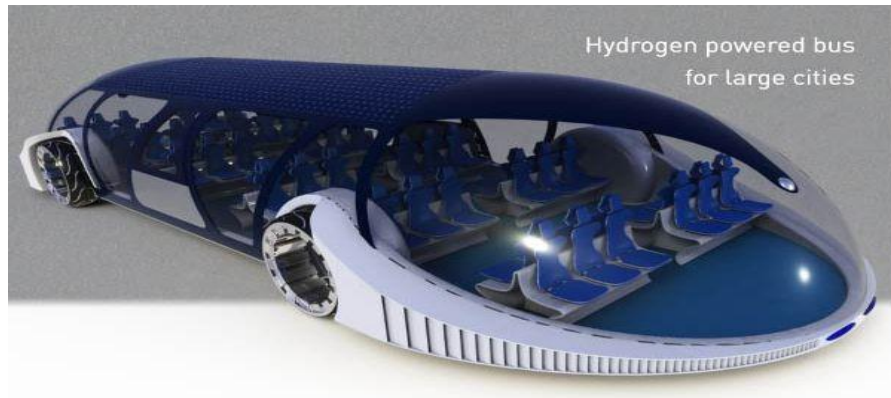
Μια προσπάθεια απομίμησης του πιο αεροδυναμικού σχήματος στην φύση: της σταγόνας του νερού. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου λεωφορείου από την αεροδυναμική σχεδίασή του, μεταφράζονται σε:

- 1) Μείωση κατανάλωσης καυσίμου
- 2) Γενική μείωση κραδασμών-δονήσεων
- 3) Γενική βελτίωση εμφάνισης
- 4) Καλύτερη κατανομή βάρους σε όλο το όχημα



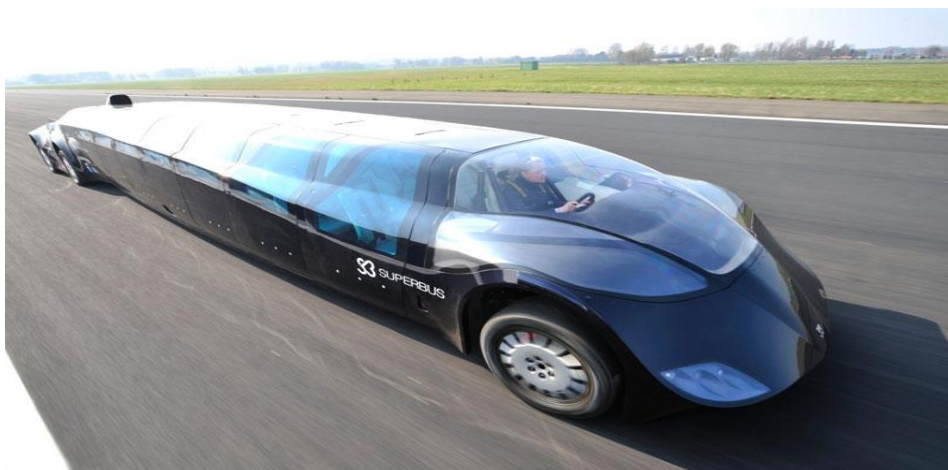
SKhy bus

Το συγκεκριμένο λεωφορείο είναι μια εναλλακτική πρόταση για μετακινήσεις σε μεγάλες πόλεις. Παρατηρείται ένα ιδιαίτερα στρογγυλοποιημένο αεροδυναμικό σχήμα, σαφώς πιο αεροδυναμικό σε σχέση με τα κοινά συμβατικά λεωφορεία που κυκλοφορούν στις μέρες μας. Η μερική κάλυψη των τροχών καθώς και η χρήση καμερών για τον έλεγχο του περιβάλλοντος αντί για καθρέπτες, συμβάλλουν στη περαιτέρω μείωση των αεροδυναμικών αντιστάσεων.



Superbus

Το Superbus σχεδιάστηκε από τον Wubbo Ockels, καθηγητή αεροδιαστημικής μηχανικής και τεχνολογίας και είναι ένα ηλεκτροκίνητο όχημα (EV) με χωρητικότητα 23 επιβατών. Χάρη στον αρκετά μεγάλο λόγο L/W (μήκους- πλάτους) και στον διαχύτη (Diffuser) που έχει η σχεδιάσή του, του επιτρέπει να αγγίζει τα 250 km/h, πράγμα που αποτελεί αρκετά ενδιαφέρουσα προσέγγιση σ' αυτό που μέχρι τώρα ξέραμε ως "λεωφορείο". Η ταχύτητά του, όμως, μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, αλλά λόγω γερμανικής νομοθεσίας η μέγιστη ταχύτητα στις Autobahn είναι ηλεκτρονικά περιορισμένη στα 250 km/h. Το Superbus θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιείται στο εγγύς μέλλον για την ταχύτατη κάλυψη μεγάλων αποστάσεων, όπως επίσης θα μπορούσε και να αυξηθεί η χωρητικότητά του για την εξυπηρέτηση ακόμα περισσότερων ατόμων.



Γίνεται σαφές μετά από όλη αυτή την μελέτη, ότι η αεροδυναμική βελτίωση των βαρέων οχημάτων είναι αρκετά σημαντική για την βλέψη ενός αποδοτικότερου παγκόσμιου εμπορίου. Μέσω της μείωσης των αεροδυναμικών απωλειών, το κόστος μεταφοράς αγαθών μειώνεται αξιόλογα, πόσο μάλλον στις μέρες μας που το κόστος των υγρών καυσίμων έχει εκτιναχθεί στα ύψη και είναι πλέον δυσβάσταχτο. Ισχυρισμοί θέλουν την αεροδυναμική βελτίωση να φτάνει μέχρι ένα ανώτατο σημείο μεν, που δεν θα μπορεί να ωφελήσει παραπάνω την εξοικονόμηση καυσίμου, αλλά θεωρούν ότι είναι ένα από τα σημαντικότερα βήματα για την μείωση της κατανάλωσης την σήμερα ημέρα δε. Όπως και να έχει, είναι πλέον γεγονός ότι η φράση "αεροδυναμική βαρέων οχημάτων" δεν υπήρχε καν πριν ένα αιώνα και αν κοιτάξουμε τις πρώτες προσπάθειες βελτίωσης που έγιναν (π.χ. με το λεωφορείο Golden Dolphin, το 56') μέχρι τώρα, που η υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD) έχει εξελιχθεί τόσο πολύ και έχει τον πρώτο λόγο στην αεροδυναμική μελέτη ενός οχήματος, τα αποτελέσματα της βελτίωσης είναι εντυπωσιακά. Παρατηρούμε ότι σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές βαρέων οχημάτων έχουν σκεφτεί, έχουν υλοποιήσει και παρουσιάσει διάφορες προτάσεις για την μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή, αλλά και ότι πρακτικά, τα concept-project για να περάσουν στην γραμμή παραγωγής κωλύονται. Η αιτία για αυτό το φαινόμενο, σύμφωνα με δηλώσεις των κατασκευαστριών εταιριών, είναι ότι το κόστος είναι αρκετά υψηλό. Σαν ανταπάντηση του Kevin R. Cooper, ερευνητή στο National Research Council of Canada, η δημιουργία μιας παγκόσμιας βιομηχανικής συνεργασίας μεταξύ κατασκευαστριών εταιριών θα έλυne τα όποια λειτουργικά προβλήματα προκύπτουν λόγω κόστους και ότι η απόδοση και η ανάπτυξη του τομέα θα ήταν βέλτιστη.

Βιβλιογραφία

1. GÖTZ, H., "Die Aerodynamik des Nutzfahrzeuges-Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung," Fortschr, Berichte der VDI-Zeitschriften, Series 12, No. 31, 1997.
2. IAA-FORUM, Broschüre des VDA anlässlich der 53. Internationalen Automobilausstellung, Frankfurt am Main, 1989.
3. DEUTSCHER WETTERDIENST, Windverhältnisse der Wetterstation Stuttgart-Echterdingen von 1981-1990.
4. GARDELL, L., "Low Drag Truck Cabs," Scania Div. Saab-Scania, Hausmitteilung, 1980.
5. INGRAM, K.C., "The Wind-Averaged Drag Coefficient Applied to Heavy Goods Vehicles," Department of the Environment, Department of Transport, Transport of Road Research Laboratory Report Supplementary Report 392, Crowthorne, 1978.
6. NAYSMITH, A., "Aerodynamic Drag of Commercial Vehicles," Department of the Environment, Department of Transport, Transport of Road Research Laboratory Report Supplementary Report 732, Crowthorne, 1981.
7. HUCHO, W.-H., JANSSEN, L.J., EMMELMANN, H.-J., "The Optimization of Body Details-A method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles," SAE Paper No. 760185, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1976.
8. GILHAUS, A., HAU, E., KÜNSTNER, R., POTTHOFF, J., "Über den Luftwiderstand von Fernlastzügen, Ergebnisse aus Modellmessungen im Windkanal," *Automobil-Industrie*, 3/1979, pp.125-137, 3/1980, pp.45-64
9. MOREL, T., M.S., "Flow Over Two Circular Disks in Tandem," *Aerodynamics of Transportation*, ASME-CSME-Conf., Niagara Falls, June 1979, pp253-286.
10. BERTA. C., BONIS, B., "On Shape Experimental Research of Ideal Aerodynamic Characteristics for Industrial Vehicles," SAE Paper No. 801402, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1980.
11. GILHAUS, A., HAU, E., "Drag Reduction on Trucks by Aerodynamic Parts and Covers," Int.Symposium on *Vehicle Aerodynamics*, Wolfsburg, December 1982.
12. GLAS, D.R., "Reduction of Aerodynamic Drag on Truckaway Units," 320707-F, the University of Michigan, August 1978.
13. NAKAGUCHI, H., "Recent Japanese Research on Three-Dimensional Bluff Body Flows Relevant to Road-Vehicle Aerodynamics," in SOVRAN, pp 227-252.
14. BARTH, R., "Lüftkräfte am Kraftfahrzeug," *Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik*, No.184, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1966.
15. GILHAUS, A., "The Main Parameters Determining the Aerodynamic Drag of Buses," Colloque Construire avec le vent, Vol. 2, Centre Scientifique et Technique du Batiment, Antes, June 1981.
16. CARR. G.W., "The Aerodynamics of Basic Shapes of Road Vehicles, Part I, Simple Rectangular Bodies," MIRA Report No. 1982/2.
17. BUCHHEIM, R., "Aerodynamik bei leichten Nutzfahrzeugen -heute und morgen," Pressemappe VW-Transportertage, 1983.
18. YOUNG, R.A., "Bluff Bodies in a Shear Flow," PhD Thesis, University of Cambridge.

19. GÖTZ, H., "The Influence of Wind Tunnel Tests on Body Design, Ventilation and Surface Deposits of Sedans and Sports Cars," SAE Paper No. 710212, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1971.
20. YAMANAKA, A., NAGAIKE, N., "Measurements and Control of Truck Spray on Wet Roads," Mitsubishi Motors Corp., Japan.
21. GÖTZ, H., SCHOCH, R., "Reducing Splash and Spray of Trucks and Passenger Cars," SAE Paper No. 950631, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1992.
22. FUJIMOTO, T., MIYAKE, N., WATANABE, Y., TAKEYAMA, T., "Suppression of Mud Adhesion to the Rear Surface of a Van-Type Truck," SAE Paper No.920203, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1992.
23. COOPER, K.R., "The Effect of Front-Edge Rounding and Rear Edge Shaping on the Aerodynamic Drag of Bluff Vehicles in Ground Proximity," SAE Paper No. 850288, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa.,1985.
24. KOENIG-FACHSENFELD, R., *Aerodynamik des Kraftfahrzeuges*, Vols. 3and 4, Facsimile Edition, Kurt Maier Verlag, Heubach, 1992.
25. COOPER, K.R., "Commercial Vehicle Aerodynamic Drag Reduction: Historical Perspective as a Guide,".
26. SAE Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses. Recommended Practice, SAE J1252, August 1979.
27. GÖTZ, H., "Present and Future Trends in Automotive Aerodynamics," VKI Fluid Dynamics Vehicle Aerodynamics Short Course 1984-01, Rhode-St.-Genese, Belgium, 1984.
28. Multiyear Program Plan for 1998-2002, Office of Heavy Vehicle Technologies and Heavy Vehicle Industry Partners, DOE/ORO-2071, August 1998.
29. HAMMACHE, M., BROWAND, F., "Aerodynamic Forces on Truck Models, Including Two Trucks in Tandem," SAE 2002-01-0530, SAE 2002 World Congress, Detroit, MI, March 2002.
30. <http://www.exa.com/aerodynamic-efficiency-commercial-vehicle.html>
31. <http://www.tenfourmagazine.com/2011/12/performance-zone/reducing-drag/>
32. <http://www.atdynamics.com/skirts.htm>
33. <http://www.aerodynamictrucks.com/background.html>
34. <http://www.part20.eu/en/applications/cab/>
35. <http://www.whistle.gatech.edu/archives/05/jan/10/fueltruck.shtml>
36. <http://www.colani.org>
37. <http://www5.mercedes-benz.com/en/vehicles/trucks/>
38. <http://inhabitat.com/skhy-bus-is-a-carbon-negative-solar-wastewater-fueled-shuttle-bus-of-the-future/>
39. <http://www.car-addicts.com/car-types/concept-cars/800-hp-dutch-superbus-project>
40. <http://www.ubergizmo.com/2009/06/scania-concept-makes-trucks-much-more-friendly/>
41. <http://www.trucknews.com/>
42. http://www.marcopolo.com.br/website/2011/marcopolo_sa/en
43. http://www.mantruckandbus.com/com/en/innovation___competence/research_and_innovation_projects/man_concept_s/MAN_Concept_S.html