

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

“ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ  
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕΣΑ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ”

*της ΠΕΤΡΙΔΟΥ ΜΕΛΙΝΑΣ*

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΤΟΥΡΑΙΔΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2004

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

**“ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ  
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕΣΑ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ”**

***ΤΗΣ ΠΕΤΡΙΔΟΥ ΜΕΛΙΝΑΣ***

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ  
Αριθμ. Εισαγ.:... 1352  
Ημερομηνία:... 4/11/04

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2004

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας δε θα ήταν δυνατή χωρίς τη συνεργασία και τη βοήθεια του υπεύθυνου καθηγητή κ. Αντώνιου Τουρλιδάκη. Θα ήθελα να απευθύνω τις θερμότερες ευχαριστίες μου για τις χρήσιμες συμβουλές του, καθώς οι γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο που ασχολήθηκα ήταν στοιχείο σημαντικό για την διεκπεραίωση κάθε δυσκολίας που παρουσιάστηκε.

Οφείλω να ευχαριστήσω τους κυρίους Σπύρο Λυσοσούδη και Γεώργιο Θεοδορίδη, υπεύθυνους του προγράμματος που χρησιμοποίησα. Η πραγματοποίηση σεμιναρίου για την εκμάθηση του προγράμματος, αλλά και η αμέριστη συμπαράστασή τους σε κάθε δυσκολία που συναντούσα καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας είναι αξιοσημείωτη.

Θέλω να ευχαριστήσω ολόψυχα τους συμφοιτητές μου Αθανάσιο Γραμματικόπουλο, Γεώργιο Γκαρδιακό και Κωνσταντίνο Συμιακό για τη συνεργασία τους και την αλληλοβοήθεια στα πλαίσια του προγράμματος. Επίσης τους φίλους και συγγενείς που μου συμπαράσταν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στην οικογένεια μου, για την ευκαιρία που μου έδωσαν να εκπληρώσω ίσως το μεγαλύτερο όνειρο που είχα μέχρι σήμερα. Η ολόψυχη αγάπη και συμπαράσταση σε όλες μου τις δυσκολίες ήταν τα κίνητρα για να ολοκληρώσω με επιτυχία τις σπουδές μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Κεφάλαιο .....	6
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2 Αντικείμενο μελέτης.....	10
1.3 Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	11
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	13
2.1 Αναδρομή στην εξέλιξη του επιβατικού αυτοκινήτου και η συμβολή της αεροδυναμικής.....	13
2.2 Ροή γύρω από τα αυτοκίνητα.....	17
2.3 Το πρόβλημα της ροής γύρω από τα αυτοκίνητα.....	18
2.4 Η σημασία της αεροδυναμικής σε θέματα ασφάλειας και οικονομίας στα αυτοκίνητα.....	23
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ.....	33
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	33
3.2 Σκοπός της αριθμητικής ανάλυσης.....	35
3.3 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	36
3.3.1 Προ- επεξεργασία:.....	36
3.3.2 Επίλυση.....	37
3.3.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών:.....	37
3.3.2.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων:.....	37
3.3.2.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων:.....	38
3.3.3 Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων:.....	38
3.4 Σφάλματα υπολογισμών.....	39
3.5 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ.....	42
3.6 Νόμοι που διέπουν την Μηχανική των Ρευστών.....	43
3.6.1 Η εξίσωση της διατήρησης της μάζας.....	43
3.6.2 Η εξίσωση διατήρησης της ορμής.....	43
3.6.3 Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας.....	45
3.6.4 Οι εξισώσεις Navier- Stokes.....	46
3.7 Τυρβώδης ροή.....	47
3.7.1 Η έννοια της τύρβης.....	47



3.7.2	Τα χαρακτηριστικά της τóρβης.....	48
3.7.2.1	Αστάθεια και μη- γραμμικότητα.....	49
3.7.2.2	Ύπαρξη δινών.....	50
3.7.2.3	Ύπαρξη στατιστικών στοιχείων.....	50
3.7.3	Στατιστική επεξεργασία κατά Reynolds.....	50
3.7.4	Η μοντελοποίηση της τóρβης.....	53
3.7.5	Τα γραμμικά μοντέλα τóρβης.....	53
3.7.6	Τα μη γραμμικά μοντέλα τóρβης.....	56
3.8	Διακριτοποίηση.....	57
3.8.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.....	59
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ CFX.....	62
4.1	Κατασκευή Γεωμετρίας.....	62
4.2	Κατασκευή πλέγματος (MESH).....	62
4.3	Προ- επεξεργασία (Pre- Processing).....	63
4.4	Επιλυτής (SOLVER).....	63
4.4.1	Παράλληλη επίλυση (Parallelization).....	64
4.4.1.1	Επιλυτής (Solver Manager).....	65
4.4.1.2	CFX Εσωτερική Γλώσσα Επικοινωνίας (Command Language).....	65
4.4.1.3	CFX Ερμηνευτική Γλώσσα (Expression Language).....	65
4.4.2	Είδη μοντέλων.....	66
4.4.2.1	Πολυφασική ροή (Multiphase).....	66
4.4.2.2	Ελεύθερη Επιφάνεια (Free Surface).....	66
4.4.2.3	Lagrangian Particle Tracking.....	66
4.4.2.4	Μεταφορά μάζας (Interphase Mass Transfer).....	67
4.4.2.5	Μεταφορά θερμότητας (Heat Transfer).....	67
4.4.2.6	Ακτινοβολία (Radiation).....	67
4.4.2.7	Περιστρεφόμενες μηχανές (Rotating Machinery).....	67
4.4.2.8	Τόρβη (Turbulence).....	68
4.4.2.9	Καύση (Combustion).....	68
4.4.2.10	Ιδιότητες ρευστών (Real Fluid).....	68
4.4.2.11	Μεταβλητό πλέγμα (Moving Mesh).....	68
4.4.2.12	Fluid Structure Interaction*.....	69

4.4.3	Μετ- επεξεργασία (POST- PROCESSING).....	69
5.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ.....	71
5.1	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	71
5.2	ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESHING).....	72
5.3	ΠΡΟ- ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (PRE-PROCESSING).....	76
5.4	ΕΠΙΛΥΤΗΣ (SOLVER CONTROL).....	77
5.5	ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (POST-PROCESSING).....	78
6.	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	79
6.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την κίνηση ενός οχήματος μέσα σε τούνελ και σε ανοιχτό δρόμο.....	84
6.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την κίνηση δύο οχημάτων που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο.....	92
6.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για δύο αυτοκίνητα που κινούνται πλευρικά σε τούνελ και σε ανοιχτό δρόμο.....	98
7.	Συμπεράσματα.....	107
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	109

## 1. Κεφάλαιο

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο προηγούμενος αιώνας χαρακτηρίζεται και ως περίοδος αλματώδους ανάπτυξης της τεχνολογίας σε όλους σχεδόν τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Μέσα στην πληθώρα των νέων ανακαλύψεων, παρουσιάστηκαν πάρα πολλές περιπτώσεις στις οποίες οι εκάστοτε ερευνητές αναγκάστηκαν να μελετήσουν πρωτόγνωρα για αυτούς φαινόμενα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ραγδαία ανάπτυξη της αεροπορικής βιομηχανίας. Ο άνθρωπος βρέθηκε αναπάντεχα στους αιθέρες κινούμενος πλέον με ταχύτητες που δεν μπορούσε καν να φανταστεί μέχρι τότε. Αποτέλεσμα των νέων αυτών δραστηριοτήτων ήταν η καλπάζουσα ανάπτυξη της Μηχανικής των Ρευστών και συγκεκριμένα του κλάδου της Αεροδυναμικής, η οποία στη συνέχεια επεκτάθηκε και σε άλλα γνωστικά πεδία εφαρμογών.

Πρώτο από τα υπόλοιπα πεδία, που επηρεάστηκαν άμεσα, υπήρξε αυτό της σχεδίασης των αυτοκινήτων. Εξάλλου ήταν αυτό στο οποίο ο άνθρωπος αντιμετώπιζε για πρώτη φορά την ύπαρξη υψηλών ταχυτήτων. Η αύξηση των μεταφορικών αναγκών υπήρξε ραγδαία και η παγκόσμια παραγωγή αυτοκινήτων παρουσίαζε διαρκώς ανοδικές τάσεις. Παρουσιάστηκε λοιπόν επιτακτική η ανάγκη της πρόβλεψης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των προϊόντων αυτών, προτού καν κατασκευαστούν.

Οι πρώτες προσπάθειες, που έγιναν προς αυτή την κατεύθυνση, βασίστηκαν στην ανάπτυξη νέων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία αποτέλεσαν και τα πρώτα όπλα των επιστημόνων. Μεγάλοι ερευνητές της εποχής διατύπωσαν ολόκληρες σειρές μαθηματικών μεθόδων, προκειμένου να μπορέσουν να προσεγγίσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τους νόμους της μηχανικής των ρευστών. Με βάση όλο αυτό το μαθηματικό υπόβαθρο κατάφεραν επί χρόνια να υπολογίσουν τη συμπεριφορά ενός σχήματος σε διαφορετικές συνθήκες και ταχύτητες. Παρ' όλα αυτά οι δυνατότητες των παραπάνω μεθόδων ήταν αρκετά περιορισμένες και δε μπορούσαν να δώσουν απάντηση σε αρκετά σημαντικά ερωτήματα.

Ο πρώτος μεγάλος σταθμός στην αναζήτηση ενός ακριβέστερου και αποτελεσματικότερου τρόπου αντιμετώπισης των προβλημάτων που σχετίζονται με τα φαινόμενα ροής ήταν το πείραμα. Η χρήση διατάξεων, όπως οι αεροσήραγγες, σε συνδυασμό με την υπό κλίμακα συνήθως μοντελοποίηση του προϊόντος άλλαξε

δραστικά τα υπάρχοντα δεδομένα και οριοθέτησε το νέο πλαίσιο μέσα στο οποίο θα κινούνταν στο εξής οι ερευνητές και κατ' επέκταση οι σχεδιαστές αυτοκινήτων.

Οι αεροσήραγγες έχουν εκτενώς χρησιμοποιηθεί στην αεροδυναμική οχημάτων, με σκοπό τη βελτίωση της σύγχρονης σχεδιαστικής φιλοσοφίας αυτών. Στο παρελθόν τα πειράματα επικεντρώνονταν κυρίως στην μέτρηση των αεροδυναμικών συντελεστών και στην οπτικοποίηση της ροής γύρω από μοντέλα οχημάτων. Συγκεκριμένα κάποια από τα αντικείμενα των παραπάνω μελετών ήταν τα ακόλουθα:

- Η μέτρηση του συντελεστή αντίστασης  $c_d$  και των παραγόντων που τον επηρεάζουν
- Η οπτικοποίηση της ροής και η λήψη αποτελεσμάτων για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης, η οποία οδήγησε σε μια πεταλοειδή μορφή δινών στον απόρο του μοντέλου. Η παρουσία και η ένταση του παραπάνω φαινομένου είχε άμεση σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης.
- Η επιρροή του σχεδιασμού του σκελετού του αυτοκινήτου στην αεροδυναμική συμπεριφορά του

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών έδωσαν μεγάλη ώθηση στον κλάδο της αεροδυναμικής οχημάτων. Βρέθηκαν ικανοποιητικές λύσεις που εφαρμόστηκαν στη συνέχεια στις γραμμές παραγωγής. Βέβαια κάποιες από τις παραπάνω κατευθύνσεις είχαν ήδη ακολουθηθεί στα αυτοκίνητα αγώνων, αλλά δεν είχαν περάσει ούτε στο ελάχιστο στα συμβατικά οχήματα. Η στροφή αυτή στη σχεδιαστική φιλοσοφία των απλών, επαβατικών αυτοκινήτων έδωσε τη δυνατότητα στον καθένα να καρπωθεί τις ευεργετικές συνέπειες ερευνών και πειραμάτων που μέχρι τότε είχαν ως αποκλειστικό πεδίο εφαρμογής τους αγώνες.

Όλα αυτά δεν ήταν παρά μόνο η αρχή. Παρά το πλήθος των μελετών, που είχαν ήδη συντελεστεί, η συνεχής βελτίωση του υπάρχοντος τεχνολογικού εξοπλισμού άνοιγε νέους ορίζοντες στους ερευνητές, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να δραστηριοποιηθούν σε τομείς που ως τότε είχαν μείνει ανέγγιχτοι.

Επί σειρά ετών το πείραμα αποτελούσε το μοναδικό ουσιαστικό όπλο των επιστημόνων, κάτι το οποίο δεν άλλαξε παρά μόνο τα τελευταία χρόνια. Ήταν τότε που

πραγματοποιήθηκε το μέγιστο βήμα στην τεχνολογική εξέλιξη, το οποίο ουσιαστικά «έλυσε τα χέρια» των μελετητών φαινομένων ροής. Είχε φτάσει πλέον η ώρα των Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Μονάδων. Έκαναν αρχικά την εμφάνισή τους σαν ογκώδεις, αργές και δυσκίνητες μονάδες, αλλά ο δρόμος είχε ανοίξει πλέον για μια διαφορετική αντιμετώπιση πάσης φύσεως προβλημάτων. Μετά τα μέσα της δεκαετίας του 80', οι Η/Υ είχαν πλέον ισχυροποιηθεί και ήταν σε θέση να αναλάβουν την επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Η ικανότητά τους να πραγματοποιούν απίστευτα μεγάλο αριθμό υπολογισμών σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, τους καθιέρωσε σαν το πρώτο και βασικότερο μέσο. Έτσι και στην αεροδυναμική οχημάτων, όπως και σε όλους τους τομείς της επιστημονικής δραστηριότητας άλλωστε, δημιουργήθηκαν πακέτα εφαρμογών, τα οποία προσομοιώνουν τη ροή γύρω από το αυτοκίνητο και υπολογίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα μεγέθη που την επηρεάζουν. Την τελευταία δεκαετία, κάθε αυτοκινητοβιομηχανία, που σέβεται τον εαυτό της και επιζητά την καλύτερη δυνατή αεροδυναμική συμπεριφορά των προϊόντων της, έχει στη διάθεσή της πανίσχυρα ηλεκτρονικά υπολογιστικά συστήματα, εφοδιασμένα με αντίστοιχο λογισμικό, στο οποίο έχει ενσωματωθεί όλη η μαθηματική εμπειρία, η σχετική με την ανάλυση και τον υπολογισμό των ρευστομηχανικών φαινομένων. Η νέα αυτή μέθοδος αντιμετώπισης προβλημάτων ροής μέσω της προσομοίωσης αυτής σε προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι το αντικείμενο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Η πλειονότητα των προβλημάτων, που αντιμετωπίζονται με την υπολογιστική μέθοδο, αφορούν κυρίως τη δημιουργία πλέγματος γύρω από πολύπλοκες τριδιάστατες γεωμετρίες, καθώς επίσης και τον υπολογισμό των αεροδυναμικών συντελεστών.

Οι αυξημένες ανάγκες που υπήρχαν, οδήγησαν στη δημιουργία μιας πλειάδας εφαρμογών σε υπολογιστή, για την καλύτερη δυνατή μελέτη των φαινομένων που επηρεάζουν την αεροδυναμική συμπεριφορά των οχημάτων. Ορισμένοι συγγραφείς συγκέντρωσαν τις διαθέσιμες εφαρμογές και μεθόδους και εξέδωσαν μια σύνοψη αυτών.

Το 1988 ο C.T. Shaw προχώρησε σε μία σύγκριση διαφόρων εμπορικών πακέτων CFD και κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι αν και οι δυνάμεις που ασκούνται δεν μπορούσαν να προβλεφθούν με αρκετά καλή ακρίβεια, ποιοτικά η ροή γύρω από το μοντέλο προσέγγιζε τα πειραματικά δεδομένα.



Το 1989 ο T.Han έκανε υπολογισμούς γύρω από ένα τρισδιάστατο τραχύ μοντέλο, σε εγγύτητα με το έδαφος. Εξ' αιτίας της έλλειψης λεπτομερών στοιχείων για την ταχύτητα γύρω από το σώμα, συνέκρινε ποιοτικά το σχηματισμό των δινών στον απόρο και το συντελεστή αντίστασης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Σαν συμπέρασμα, ανέφερε ότι η εγκυρότητα των υπολογισμών εξαρτιόνταν από το μοντέλο τύρβης και από την ακρίβεια την οποία εξασφάλιζε η διακριτοποίηση του χώρου. Οι υπολογισμοί αυτοί έδειξαν επίσης, ότι η χρήση του μοντέλου κ- ε με οριακές συνθήκες τοιχωμάτων, προέβλεπε συνεχώς πίεση μικρότερη της πραγματικής.

Τέλος, τα κυριότερα προβλήματα και κατ' επέκταση οι τομείς στους οποίους απαιτείται να δοθεί η μεγαλύτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό και την εκτέλεση ενός υπολογισμού από κάποιο από τα διαθέσιμα πακέτα εφαρμογών της υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι οι ακόλουθοι:

- Η δημιουργία του πλέγματος με το οποίο θα γίνει η διακριτοποίηση του χώρου
- Η μοντελοποίηση της τύρβης και συγκεκριμένα η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου τύρβης
- Η ακρίβεια των υπολογισμών
- Οι απαιτήσεις από την υπολογιστική μονάδα που θα χρησιμοποιηθεί
- Η ύπαρξη πειραματικών δεδομένων για την εξασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του κώδικα για τις συγκεκριμένες υπό μελέτη γεωμετρίες

Οι δύο αυτές μέθοδοι, η υπολογιστική και η πειραματική, παρ' ότι έχουν ακόμα πολλές δυνατότητες και περιθώρια διείσδυσης σε πιο εξειδικευμένα θέματα, καλύπτουν τις απαιτήσεις της επιστήμης στον τομέα της αεροδυναμικής αυτοκινήτων σε μια εποχή που οι αυτοκινητοβιομηχανίες κινούνται σ' ένα πλαίσιο αυξημένου ανταγωνισμού, αναζητώντας τη λεπτομέρεια που θα κάνει τη διαφορά. Έχει καθιερωθεί η παράλληλη χρήση τους, ώστε να λειτουργούν συμπληρωματικά και να επιτυγχάνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αν προχωρούσε κανείς σε μια πολύ σύντομη αξιολόγησή τους, θα έλεγε ότι το πείραμα αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο που έχει στα χέρια του ο μηχανικός, για να φέρει εις πέρας το έργο του, μιας και του δίνει τη δυνατότητα να μελετήσει ως την τελευταία λεπτομέρεια τη συμπεριφορά οποιασδήποτε διάταξης.



Υπάρχουν ωστόσο κάποιοι τομείς, στους οποίους οι υπολογιστικές μέθοδοι πλεονεκτούν των πειραμάτων. Συγκεκριμένα το μειωμένο κόστος, ο μειωμένος χρόνος που απαιτείται για να επανασχεδιαστεί το σύστημα, η εξάλειψη του κινδύνου που ενδεχομένως να έχει το πείραμα και η αντιμετώπιση προβλημάτων που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν πειραματικά, δικαιολογούν την διαδεδομένη και ευρύτατη χρήση των υπολογιστικών μεθόδων.

## 1.2 Αντικείμενο μελέτης

Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, γίνεται φανερό ότι η επίδραση του αέρα στην κίνηση των οχημάτων είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας. Οι αναπτυσσόμενες, εξαιτίας του αέρα, δυνάμεις επηρεάζουν την ευστάθεια, την απαιτούμενη ισχύ, την κατανάλωση καυσίμου και την άνεση των επιβατών. Κατ' επέκταση η αεροδυναμική επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια, το κόστος κίνησης του οχήματος και φυσικά την αισθητική και την αποδοχή ή μη από το αγοραστικό κοινό.

Μέχρι πριν από μερικά χρόνια η αεροδυναμική μελέτη των οχημάτων γινόταν αποκλειστικά και μόνο με πειραματικές μεθόδους. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνει πλέον τη δυνατότητα αντιμετώπισης ορισμένων προβλημάτων με αριθμητικές μεθόδους.

Η παρούσα εργασία υπολογίζει τον αεροδυναμικό συντελεστή, μία διαδικασία που επιτρέπει την εξαγωγή άμεσων συμπερασμάτων αναφορικά με την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός σώματος. Ο υπολογισμός των αεροδυναμικών συντελεστών είναι απαραίτητος τόσο για τον έλεγχο και βελτίωση της ευστάθειας του οχήματος όσο και για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου. Επίσης υπολογίζει το συντελεστή άνωσης, ο οποίος δεν είναι τόσο καθοριστικός στον τομέα της αεροδυναμικής αλλά συντελεί σημαντικά στην ευστάθεια του οχήματος.

Επίσης παρουσιάζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το όχημα, δίνοντας μία άμεση εικόνα του αεροδυναμικού πεδίου και των φαινομένων που δημιουργούνται από την κίνηση του αέρα.

Τέλος προσδιορίζεται η κατανομή της πίεσης του αέρα πάνω στις επιφάνειες του οχήματος. Η διαδικασία αυτή παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της κατανομής και

του μεγέθους των αναπτυσσόμενων δυνάμεων, την άμεση βελτίωση σε ότι αφορά στο σχεδιασμό των επιφανειών του αμαξώματος και τον προσδιορισμό των περιοχών αποκόλλησης της ροής του αέρα.

Η παρούσα εργασία μελετά την κίνηση οχήματος μέσα σε τούνελ. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είναι το S-40 της εταιρίας Volvo. Τα χαρακτηριστικά του τούνελ επιλέχθηκαν τυχαία και είναι μήκους 50 μ., πλάτους 15 μ και ύψους 7,5 μ.

Γίνεται μία εκτενής μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων που διεξήχθησαν στα διάφορα σενάρια που επιλέχθηκαν. Τα σενάρια που μελετήθηκαν είναι τα εξής:

- Κίνηση οχήματος στην αριστερή λωρίδα κυκλοφορίας μέσα σε τούνελ
- Κίνηση οχήματος στην αριστερή λωρίδα κυκλοφορίας σε ανοιχτό δρόμο
- Πλευρική κίνηση δύο οχημάτων μέσα σε τούνελ
- Πλευρική κίνηση δύο οχημάτων σε ανοιχτό δρόμο
- Κίνηση δύο οχημάτων, τα οποία να βρίσκονται στην ίδια λωρίδα κυκλοφορίας σε κοντινή απόσταση μέσα σε τούνελ
- Κίνηση δύο οχημάτων, τα οποία να βρίσκονται στην ίδια λωρίδα κυκλοφορίας σε κοντινή απόσταση σε ανοιχτό δρόμο

### 1.3 Σκοπός της παρούσας εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η παρουσίαση και η διερεύνηση των προβλημάτων που σχετίζονται με την αεροδυναμική των αυτοκινήτων. Συγκεκριμένα επιχειρείται η αριθμητική προσομοίωση του ροϊκού πεδίου του αέρα γύρω από μοντέλο αυτοκινήτου και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός οχήματος, η μορφή του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από αυτό, η διανομή της στατικής πίεσης και της ταχύτητας του αέρα στις επιφάνειές του, η εμφάνιση των δινών κυρίως στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου και ο βαθμός επίδρασής του σε γειτονικό αυτοκίνητο, ο υπολογισμός του συντελεστή αεροδυναμικής  $C_D$  και άνωσης  $C_L$  καθώς και η εμφάνιση του φαινομένου αποκόλλησης των ροϊκών γραμμών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα προβλήματα που δημιουργεί η ροή του αέρα γύρω από τα οχήματα, εξετάζονται τα θέματα της ασφάλειας και της οικονομίας στην κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με την κίνηση του οχήματος μέσα στον αέρα και διαπιστώνεται το πρόβλημα της παρουσίας του εδάφους σε ότι αφορά στη διαμόρφωση του ροϊκού πεδίου γύρω και πίσω από ένα κινούμενο όχημα.

## 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

### 2.1 Αναδρομή στην εξέλιξη του επιβατικού αυτοκινήτου και η συμβολή της αεροδυναμικής.

Ανάμεσα στις αναρίθμητες τεχνολογικές κατακτήσεις του ανθρώπου, το αυτοκίνητο καταλαμβάνει αναμφίβολα μια από τις σπουδαιότερες θέσεις. Η θέση αυτή ήρθε από τις πρώτες κιάλας ημέρες εμφάνισης των αυτοκινούμενων κατασκευών,, αφού με τον τρόπο αυτό το όνειρο του ανθρώπου να κινηθεί ευκολότερα, μακρύτερα, γρηγορότερα γινόταν πραγματικότητα. Οι πρώτες προσπάθειες για την κατασκευή αυτοκινούμενων κατασκευών ξεκινούν στα μέσα του 18<sup>ου</sup> αιώνα με το ατμοκίνητο, τρίτροχο όχημα του Γάλλου μηχανικού Guignot. Ουσιαστικά όμως το πρώτο αυτοκίνητο με τα σημερινά χαρακτηριστικά των αυτοκινήτων εμφανίζεται έναν αιώνα μετά το 1886, μέσα από τις προσπάθειες του Γερμανού μηχανικού Benz ο οποίος, χρησιμοποιώντας ένα βενζινοκινητήρα που είχε ήδη ανακαλυφθεί από το 1876 από τον Otto, κατασκεύασε αρχικά μία μοτοσυκλέτα και στη συνέχεια ένα τρίτροχο όχημα. Από την εποχή αυτή ξεκινά η συνεχής και κοπιαστική εξέλιξη, τόσο των επιμέρους συστημάτων ενός αυτοκινήτου, όσο και γενικότερα της μορφής του.

Μέχρι το 1900 σειρά μεγαλοφυών εφευρέσεων δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός πραγματικά αυτοκινούμενου οχήματος με χαρακτηριστικά που βασικά δεν έχουν αλλάξει μέχρι σήμερα. Ανάμεσα στις πρωτότυπες εκείνες εφευρέσεις μπορούν να αναφερθούν, το τιμόνι το 1894 από τον Vacheron, το σύστημα του εξαερωτήρα το 1892 από τον Maybach, τα ελαστικά με αεροθαλάμους από τον Dunlop και τους αδερφούς Michelin, ο άξονας μετάδοσης της κίνησης το 1895 από τον Lanchester, οι κινητήρες πολλών κυλίνδρων από τους Mors και Daimler, το ψυγείο με κυψέλες, το κιβώτιο ταχυτήτων και η τοποθέτηση χαμηλά του συστήματος αυξομείωσης της ταχύτητας από τον Daimler και τέλος ο καρδονικός σύνδεσμος για τη μετάδοση της κίνησης από το διαμήκη άξονα κίνησης στους άξονες των τροχών από τον Renault.

Όπως και αργότερα με την περίπτωση των αεροσκαφών, στην αρχή επικράτησε αρκετός σκεπτικισμός σε ότι αφορά στην ασφάλεια που παρείχαν οι αυτοκινούμενες κατασκευές, όχι τόσο για τον οδηγό ή τους επιβάτες, όσο για τους ανυποψίαστους πεζούς, όταν μάλιστα οι περισσότερες πόλεις δεν είχαν δρόμους κατάλληλους για αυτοκίνητα αλλά ούτε πεζοδρόμια για τους πεζούς. Έτσι δεν είναι τυχαίο ότι η εμφάνιση των πρώτων αυτοκινήτων συνοδεύτηκε από σειρά νόμων και περιορισμών, ιδιαίτερα αυστηρών σε αρκετές περιπτώσεις, που καθιστούσαν τη μετακίνηση με αυτοκίνητο σχεδόν μαρτυρική ενέργεια. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του νόμου της κόκκινης σημαίας που εφαρμόστηκε για λίγα χρόνια στη Μεγάλη Βρετανία στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, κάθε αυτοκίνητο εκτός από τον οδηγό χρειαζόταν και ένα συνοδό, ο οποίος όταν το αυτοκίνητο κυκλοφορούσε στις πόλεις έπρεπε να τρέχει εμπρός από το αυτοκίνητο κουνώντας μία κόκκινη σημαία και προειδοποιώντας τους πεζούς για το επερχόμενο με ταχύτητα μόλις 3,2 χιλιόμετρα την ώρα, που αποτελούσε άλλωστε και το όριο ταχύτητας μέσα στις πόλεις. Ωστόσο, τα χαμηλά όρια ταχύτητας και ανάλογοι αυστηρότητας νόμοι, δεν μπόρεσαν να περιορίσουν στο ελάχιστο το ενδιαφέρον των κατασκευαστών αλλά και των απλών ανθρώπων. Έτσι σύντομα οι πρώτοι αγώνες και τα ρεκόρ ταχύτητας έγιναν γεγονός, με μεγάλη δημοσιότητα και σημαντική αναγνώριση για τους ελάχιστους αρχικά τολμηρούς. Ο πρώτος στην ιστορία του αυτοκινήτου αγώνας έγινε το 1895 στη Γαλλία και τα αυτοκίνητα κάλυψαν την απόσταση Παρίσι- Μπορντώ με επιστροφή (1200 χιλιόμετρα) με μέση ωριαία ταχύτητα σχεδόν 24 χιλιόμετρα.

Αν και οι κινητήρες εσωτερική καύσης βρήκαν από την αρχή μεγάλη εφαρμογή στα αυτοκίνητα, τα πρώτα ρεκόρ ταχύτητας προήλθαν από ηλεκτρικά κινούμενα οχήματα. Το γεγονός αυτό που έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τη σημερινή αναλογία ηλεκτροκίνητων και βενζινοκίνητων οχημάτων δεν πρέπει να εκπλήσσει, αφού μέχρι σχεδόν τα μέσα της δεύτερης δεκαετίας του εικοστού αιώνα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ήταν ιδιαίτερα δημοφιλή κυρίως για την ευκολία στην οδήγησή τους και την ομαλή λειτουργία τους. Το πρώτο ρεκόρ το 1898 ήταν 63 km/h και το κατείχε ο Γάλλος Chasseloup- Loubat με ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο ενώ το 1899 ο Βέλγος Cammile Jenatzy το ανέβασε στα 106 km/h. Το όχημα αυτό είχε τη μορφή πυραύλου κάτι που φανερώνει τη διάθεση του κατασκευαστή να μειώσει την αεροδυναμική αντίσταση του αυτοκινήτου. Ήταν σίγουρα μια κίνηση προς τη σωστή κατεύθυνση και δείχνει τη



σημασία που έδειξαν οι πρώτοι κατασκευαστές για την αεροδυναμική των οχημάτων τους, κάτι που αργότερα ατόνησε.

Λίγα μόλις χρόνια αργότερα, το 1902, ο Charles Baker με το δικό του ηλεκτροκίνητο, όχημα σε σχήμα σταγόνας, δημιούργησε νέο ρεκόρ με 137 km/h ενώ το 1904 ο ίδιος ανέβασε την επίδοση στα 167 km/h. Το όχημα Baker είχε ένα πολύ εντυπωσιακό σχήμα δίνοντας έμφαση στη μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης και την τοποθέτηση όσο το δυνατό χαμηλότερα του κέντρου βάρους. Χαρακτηριστικό στοιχείο νεωτερισμού ήταν και η κάλυψη των μεγάλων λεπτών τροχών με ειδικά καλύμματα για την παραπέρα μείωση του συντελεστή αντίστασης. Δεν θα ήταν υπερβολική, βλέποντας κανείς σήμερα το όχημα του Baker, να το θεωρούσε ως μία σύγχρονη πρόταση προοριζόμενη για κάποιο διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου.

Καθώς οι κινητήρες εσωτερικής καύσης εξελίσσονταν, η υποδύναμή τους μεγάλωνε και τα αυτοκίνητα γίνονταν όλο και περισσότερο δημοφιλή σε μεγάλες μάζες πληθυσμού, οι ανάγκες και κατά συνέπεια η μορφή των αυτοκινήτων άρχισε να αλλάζει πολύ γρήγορα. Έτσι, πριν από το 1900 τα μηχανικά μέρη των αυτοκινήτων ήταν τοποθετημένα σε διάφορα σημεία χωρίς ιδιαίτερη μελέτη, και τα καθίσματα ήταν τοποθετημένα πάνω στο γυμνό πλαίσιο. Στην πρώτη δεκαετία του 1900 η διάταξη των μηχανικών μερών αρχίζει να τυποποιείται στη διάταξη που είναι γνωστή μέχρι σήμερα, δηλαδή η μηχανή στο εμπρός τμήμα του αυτοκινήτου, η κίνηση στους πίσω τροχούς και οι επιβάτες στο κέντρο. Συγχρόνως δημιουργούνται και τα πρώτα ανοικτού και κλειστού τύπου αμαξώματα. Τα κλειστά αμαξώματα προέρχονταν αρχικά από παλαιές άμαξες, ενώ τα ανοικτού τύπου ήταν κατασκευές στις οποίες ήταν καλυμμένα μόνο ο κινητήρας και τα μηχανικά μέρη. Από τη δεύτερη δεκαετία του 1900 και τα ανοικτού τύπου οχήματα αποκτούν πλήρες αμάξωμα με πόρτες και εμπρός παράθυρο.

Με την έναρξη του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου η τεχνολογία των αυτοκινήτων μεταφέρθηκε σε στρατιωτικές κυρίως εφαρμογές, κάτι που οδήγησε σε τεχνολογικές βελτιώσεις και ιδιαίτερα στην τυποποίηση των κινητήρων και των μηχανικών μερών. Η τυποποίηση αυτή επέτρεψε μετά τον πόλεμο τη μαζική παραγωγή, τη μείωση του κόστους κατασκευής των αυτοκινήτων και κατά συνέπεια την εξάπλωσή τους σε όλες τις πληθυσμιακές τάξεις. Η ιδέα της μαζικής παραγωγής και της τυποποίησης των προϊόντων βρήκε μεγάλη εφαρμογή στις Η.Π.Α όπου η ζήτηση ήταν πολύ σημαντική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της νέας εποχής για τα αυτοκίνητα,



αποτελεί το μοντέλο "T" της Ford το οποίο κατασκευαζόταν σε γραμμές παραγωγής με πολύ χαμηλό κόστος και μικρό χρόνο κατασκευής. Η χαμηλή τιμή αγοράς και το μικρό κόστος συντήρησης συνέβαλαν ώστε το μοντέλο αυτό να γίνει εξαιρετικά δημοφιλές και να παραχθεί σε μεγάλους αριθμούς.

Στο διάστημα μεταξύ των δύο παγκοσμίων πολέμων, η παραγωγή των αυτοκινήτων αυξάνει συνεχώς. Παράλληλα, η οικονομική κρίση ανάγκασε πολλές μικρές εταιρίες να κλείσουν ή να ενωθούν μεταξύ τους, δημιουργώντας πλέον μεγάλες σε μέγεθος βιομηχανίες, οι περισσότερες από τους οποίες συνεχίζουν μέχρι τις μέρες μας.

Οι ταχύτητες των αυτοκινήτων της περιόδου 1900- 1920 ήταν ακόμα πολύ χαμηλές και συνεπώς κατά το σχεδιασμό τους, παράγοντες όπως η αεροδυναμική του αμαξώματος, δεν λαμβάνονταν σχεδόν καθόλου υπόψη. Άλλωστε η προσπάθεια για φθηνότερα αυτοκίνητα επέβαλε στους κατασκευαστές να ακολουθούν τα απλούστερα δυνατά σχήματα, ενώ η χαμηλή τιμή των καυσίμων, κυρίως στις Η.Π.Α, δεν επέβαλε καμία ανάγκη μείωσης της κατανάλωσης.

Από τη δεκαετία του '30, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η βελτίωση των μεθόδων διαμόρφωσης μεγάλων μεταλλικών ελασμάτων, οδήγησε στην καθιέρωση του κλειστού πλέον τύπου αμαξωμάτων με ομαλές οπισθοκλινείς γραμμές, γεγονός που βελτίωσε σημαντικά την άνεση και την ασφάλεια των επιβατών και την αεροδυναμική αντίσταση των οχημάτων. Ακόμα, αυξήθηκε ο εξοπλισμός και η πολυτέλειά τους με διάφορα εξαρτήματα, όπως για παράδειγμα οι υαλοκαθαριστήρες, το ραδιόφωνο, οι επιχρωμιωμένες διακοσμήσεις κ.α. , στοιχεία τα περισσότερα από τα οποία είχαν κύριο σκοπό τον εντυπωσιασμό και την προσέλκυση του αγοραστικού κοινού και λιγότερο την κάλυψη πρακτικών αναγκών.

Αλλά αν στις Η.Π.Α η προσπάθεια εντυπωσιασμού του αγοραστικού κοινού μέσω της μεγαλύτερης δυνατής πολυτέλειας και άνεσης γινόταν καθημερινή πρακτική. Η οικονομική κατάσταση, κυρίως μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, αλλά και οι ανάγκες του πληθυσμού, επέβαλαν στις βιομηχανίες την κατασκευή μικρών και φθηνών αυτοκινήτων

## 2.2 Ροή γύρω από τα αυτοκίνητα

Αντίθετα με ότι ισχύει στην περίπτωση των αεροπλάνων, η ροή γύρω από τα αυτοκίνητα είναι πολύ πιο σύνθετη. Εμφανίζονται μεγάλες περιοχές έντονης αποκόλλησης της ροής, ενώ η ύπαρξη του εδάφους αυξάνει την πολυπλοκότητα των φαινομένων. Ακόμα, η παρουσία αναγκαίων εξαρτημάτων που εξέχουν σε σχέση με την επιφάνεια του οχήματος, όπως οι καθαριστήρες και οι καθ, τα ανοίγματα για τη ψύξη του κινητήρα και τον αερισμό του χώρου των επιβατών αλλά και η μορφή του δαπέδου με όλα τα αναγκαία μηχανικά μέρη, αυξάνουν πάρα πολύ τη δυσκολία ανάλυσης της ροής.

Σε όλα τα παραπάνω θα πρέπει επίσης να προστεθεί η περιστροφική κίνηση των τροχών, καθώς και το γεγονός ότι η κίνηση του περιβάλλοντος αέρα δεν είναι σταθερή σε σχέση με την πορεία του αυτοκινήτου, λόγω των ανωμαλιών του εδάφους ή λόγω της ύπαρξης μεγάλων εμποδίων. Γίνεται συνεπώς φανερό ότι το μέγεθος της δυσκολίας προσομοίωσης της πραγματικής ροής τόσο σε πειραματικό όσο και σε υπολογιστικό επίπεδο είναι πολύ μεγάλο. Για το λόγο αυτό, η μελέτη του πεδίου ροής γύρω από αυτοκίνητα σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, γίνεται σε απλοποιημένης μορφής σχήματα όπου λεπτομέρειες, όπως οι καθρέφτες ή οι προφυλακτήρες, απομακρύνονται, το δάπεδο του αυτοκινήτου θεωρείται λείο, ενώ θόλοι των τροχών συνήθως κλείνονται. Η προσομοίωση του εδάφους συνήθως γίνεται με την τοποθέτηση ενός συμμετρικού προς την επιφάνεια του δρόμου οχήματος, ένα τέχνασμα που εφαρμόζεται και σε πειραματικές δοκιμές. Η ροή που δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο του εδάφους και κατά συνέπεια το επίπεδο συμμετρίας αποτελεί επιφάνεια ροής και αναπαριστά τη δυναμική ροή επάνω από επίπεδη επιφάνεια.

Προκειμένου να περιοριστεί η δυσκολία επίλυσης του πεδίου ροής γύρω από ένα σώμα, γίνονται ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές που αφορούν τις ιδιότητες του μέσου, μέσα στο οποίο κινείται το υπό εξέταση σώμα. Σύμφωνα με τις παραδοχές αυτές, ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί είτε σαν ιδανικό ρευστό, πράγμα που σημαίνει ότι είναι ομοιογενές και μη συνεκτικό, είτε απλά ασυμπίεστο και συνεκτικό.

Στην περίπτωση του ιδανικού ρευστού, η παραδοχή της μη ύπαρξης συνεκτικότητας μεταξύ των στοιχείων του ρευστού, απλοποιεί σημαντικά τη δυσκολία επίλυσης του πεδίου ροής, αλλά φυσικά μειώνει και την ακρίβεια της λύσης. Αντίθετα,

η περίπτωση του ασυμπίεστου συνεκτικού ρευστού καλύπτει σχεδόν απόλυτα τις ιδιότητες του πραγματικού αέρα, τουλάχιστον σε ότι αφορά στην περίπτωση των αυτοκινήτων όπου οι ταχύτητες είναι χαμηλές.

Πάντως και στην περίπτωση του ιδανικού ρευστού, η προσομοίωση είναι αποδεκτή, τουλάχιστον στις περιοχές που δεν υπάρχει αποκόλληση της ροής, δηλαδή μέχρι περίπου το μέσον όλων σχεδόν των αυτοκινήτων. Τα καλά αποτελέσματα, η ευκολία αλλά και οι μικροί υπολογιστικοί χρόνοι που απαιτεί η επίλυση της δυναμικής ροής (όπως ονομάζεται η περίπτωση της ροής ιδανικού ρευστού), είναι οι λόγοι που η υπόθεση της δυναμικής ροής εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό, ως ένα χρήσιμο και γρήγορο υπολογιστικό εργαλείο.

### 2.3 Το πρόβλημα της ροής γύρω από τα αυτοκίνητα

Ο καθορισμός των έξι αδιάστατων αεροδυναμικών συντελεστών ενός σώματος, τριών για τις αντιστάσεις και τριών για τις ροπές, μπορεί να γίνει μόνο αν είναι γνωστές οι αντίστοιχες δυνάμεις και ροπές, γεγονός που απαιτεί είτε την πραγματοποίηση μετρήσεων σε αεροσήραγγα εφοδιασμένη με κατάλληλο μετρητικό μηχανισμό είτε την αριθμητική επίλυση του ροϊκού πεδίου του αέρα γύρω από το σώμα με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Το μέγεθος, η διεύθυνση, το σημείο εφαρμογής και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει ένα σώμα που αναπτύσσεται εξαιτίας της κίνησης του αέρα εξαρτώνται από τη μορφή που έχει η ροή του αέρα γύρω από αυτά. Η μορφή που διαμορφώνεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σώματος και από την επίδραση άλλων παραγόντων όπως η παρουσία ή μη ενός στερεού ορίου κοντά στο σώμα που κινείται.

Στην περίπτωση των αυτοκινήτων, η ροή του αέρα εμφανίζεται ιδιαίτερα σύνθετη αφού η μορφή τους ξεφεύγει κατά πολύ από αυτή των αεροδυναμικών σωμάτων όπως για παράδειγμα των αεροτομών. Η μορφή τους πλησιάζει περισσότερο αυτή ενός συμπαγούς, ασύμμετρου, τετραγωνισμένου όγκου με σημαντικές αυξομειώσεις της διατομής του κατά μήκος. Οι αυξομειώσεις αυτές δημιουργούν τις προϋποθέσεις σχηματισμού περιοχών με μεγάλες αεροδυναμικές πιέσεις ή έντονο στροβιλισμό της ροής, περιοχές στις οποίες εμφανίζεται επιβράδυνση ή επιτάχυνση της ταχύτητας του αέρα και γενικά σημαντικές διαταραχές της ροής.

Το γεγονός αυτό ενισχύεται από την αναγκαστική παρουσία των περιστρεφόμενων τροχών και της μικρής απόστασης του οχήματος από το έδαφος, παράγοντες που δεν επιτρέπουν σε καμία περίπτωση τη διαμόρφωση συμμετρικών συνθηκών για τη ροή. Συνέπεια της ασυμμετρίας του πεδίου ροής είναι η διαφοροποίηση της διανομής της πίεσης μεταξύ της επάνω και της κάτω επιφάνειας του οχήματος και η εμφάνιση της άνωσης, η οποία ενισχύεται και από την περιστροφή των τροχών. Η δύναμη αυτή αποτελεί την κάθετη συνιστώσα της συνολικής αεροδυναμικής δύναμης που δέχεται το κινούμενο όχημα και η οποία σχετίζεται άμεσα όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, με το θέμα της ευστάθειας.

Ωστόσο, το κυριότερο πρόβλημα στα αυτοκίνητα προέρχεται από την οριζόντια συνιστώσα της συνολικής δύναμης που ασκεί ο αέρας, την οπισθέλκουσα η οποία επηρεάζει άμεσα τόσο την κατανάλωση καυσίμου, όσο και τις επιδόσεις ενός οχήματος. Η οπισθέλκουσα δύναμη προκαλείται από πέντε βασικές αιτίες κάθε μία από τις οποίες συνεισφέρει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό στη διαμόρφωση της ολικής τιμής της αεροδυναμικής αντίστασης.

■ Η πρώτη και βασικότερη αιτία είναι η αντίσταση λόγω της μορφής του οχήματος και η οποία προκαλείται από την προσπάθεια του σώματος να μετατοπίσει, κατά την κίνησή του, τα μόρια του αέρα που το περιβάλλουν. Η αντίσταση αυτή σχετίζεται άμεσα με τη μορφή και τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος καθώς οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν ουσιαστικά τον όγκο του αέρα που εκτοπίζει το όχημα κατά την κίνησή του αλλά και το πόσο βίαια γίνεται η μετατόπιση αυτή. Η τελευταία παρατήρηση έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς η βίαιη μετατόπιση του αέρα στα διάφορα σημεία της επιφάνειας του οχήματος μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία στροβιλισμών και την απορρόφηση μεγαλύτερης ενέργειας από τον αέρα. Ελαχιστοποίηση της αντίστασης αυτής μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος και τη διαμόρφωση των επιφανειών έτσι ώστε να μεταβάλλουν ομαλά την κατεύθυνση του αέρα.

Ειδικά στην περίπτωση των αυτοκινήτων, αυτό δεν είναι ιδιαίτερα εύκολο καθώς το μεγαλύτερο μέρος του οχήματος, ο χώρος των επιβατών, πρέπει να προσφέρει άνεση, εύκολη πρόσβαση, πλήρη ορατότητα στον οδηγό αλλά και



προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία. Δεδομένου δε του τρόπου που κáθονται οι επιβάτες στο χώρο αυτό, προκύπτει ότι θα πρέπει να προσφέρεται αρκετό ύψος για την άνεσή τους και να αποφεύγονται οι μεγάλες κλίσεις των γυάλινων επιφανειών.

■ Η δεύτερη αιτία αντίστασης είναι λόγω της τριβής του αέρα, συνέπεια της οποίας είναι η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων μεταξύ των στρωμάτων του αέρα που περιβάλλουν την επιφάνεια του κινούμενου οχήματος. Η αντίσταση αυτή έχει άμεση σχέση με την επιφάνεια που έρχεται σε επαφή ο αέρας και βρίσκεται σε σχετική κίνηση με αυτόν καθώς και με τη μορφή του οριακού στρώματος που περιβάλλει την επιφάνεια. Η ελαχιστοποίηση της αντίστασης αυτής επιτυγχάνεται περιορίζοντας την έκταση της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με τον αέρα, σχεδιάζοντας δηλαδή μικρά σε μέγεθος οχήματα. Ακόμα, η μορφή των επιφανειών πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διατηρείται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έκταση η στρωτή ροή πάνω στην επιφάνεια του οχήματος, να αποφεύγεται η ανάπτυξη τυρβώδους οριακού στρώματος και η απορρόφηση περισσότερης ενέργειας από τον αέρα.

■ Η τρίτη αιτία αντίστασης ονομάζεται επαγόμενη αντίσταση και προέρχεται από το σχηματισμό προσκολλημένων στροβίλων επάνω από την πίσω επιφάνεια και τον ομόρροου του οχήματος. Η δημιουργία των στροβίλων αυτών προκαλείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ του επάνω και του κάτω μέρους του οχήματος και συνεπώς έχει άμεση σχέση και με την άνωση, καθώς έντονος σχηματισμός στροβίλων σημαίνει εκτός από μεγάλη αντίσταση και μεγάλη άνωση.

Η σημασία της αντίστασης αυτής και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει την ολική αεροδυναμική αντίσταση του οχήματος γίνεται φανερός συγκρίνοντας την περίπτωση δύο αεροδυναμικών σωμάτων που έχουν ελάχιστη αντίσταση αλλά στο μεν ένα δεν υπάρχει άνωση, ενώ στο άλλο υπάρχει. Στην πρώτη περίπτωση η αντίσταση του σώματος προέρχεται από την αντίσταση μορφής και την αντίσταση τριβής. Κάθε μείωση του μήκους σώματος ή απότομο κόψιμο στο πίσω μέρος, παρά τη μείωση της αντίστασης τριβής αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την πίεση βάσης και συνεπώς την αντίσταση μορφής επηρεάζοντας δυσμενώς την τιμή της ολικής αντίστασης. Στη δεύτερη περίπτωση εκτός από τις δύο

παραπάνω αντιστάσεις συμμετέχει και η επαγόμενη αντίσταση. Στην περίπτωση αυτή, το απότομο κόψιμο του πίσω μέρους, σε σχέσης με την ομαλή διαμόρφωση, μειώνει την επαγόμενη αντίσταση περισσότερο από ότι αυξάνει την αντίσταση μορφής, παρουσιάζοντας το παράδοξο ένα σώμα με απότομο κόψιμο να έχει ίδια ή μικρότερη ολική αντίσταση από ένα σώμα ίδιου μήκους με ομαλό πίσω μέρος. Το φαινόμενο αυτό διαπιστώθηκε λίγο μετά την εμφάνιση των πρώτων σε σχήμα αεροτομής αυτοκινήτων και η αρχή του εφαρμόστηκε με μεγάλη επιτυχία στα μετέπειτα μοντέλα.

Η αιτία του παράδοξου αυτού γεγονότος βρίσκεται στον τρόπο σχηματισμού των στροβίλων την πίσω επιφάνεια του σώματος. Στην περίπτωση της απότομης διαμόρφωσης, οι στροβίλοι που σχηματίζονται είναι κυρίως δύο διαστάσεων, η ανάπτυξή τους δηλαδή γίνεται σε διαμήκη επίπεδα, κάθετα στις επιφάνειες του σώματος και δημιουργούνται λόγω της χαμηλής πίεσης βάσης και της αποκόλλησης της ροής στις άκρες του σώματος. Αντίθετα η ομαλή διαμόρφωση του πίσω μέρους ευνοεί το σχηματισμό τρισδιάστατων επαγόμενων στροβίλων επάνω από την πίσω επιφάνεια του σώματος, ανάλογης μορφής με αυτούς που παρατηρούνται σε πτέρυγες τύπου ΔΕΛΤΑ. Η ένταση των στροβίλων αυτών και η έκταση που εμφανίζονται καθορίζουν και το ποσοστό της επιβάρυνσης που επιφέρουν στην ολική αντίσταση του σώματος.

Στην περίπτωση των αυτοκινήτων, καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος της επαγόμενης αντίστασης είναι η μορφή του πίσω μέρους του οχήματος και ειδικότερα η κλίση του πίσω παραθύρου. Η παρατήρηση αυτή έχει προέλθει από το σύνολο των ερευνών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, διαπιστώνοντας ότι υπάρχει μια μικρή περιοχή τιμών της γωνίας του πίσω παραθύρου, μεταξύ 35 και 45 μοιρών περίπου προς την οριζόντια διεύθυνση, περιοχή μέσα στην οποία η αντίσταση και η άνωση αυξάνουν σχεδόν κατακόρυφα. Η συμπεριφορά αυτή της επαγόμενης αντίστασης είναι απόρροια των όσων ειπώθηκαν ήδη για το μηχανισμό σχηματισμού των επαγόμενων στροβίλων καθώς είναι φανερό ότι στην περιοχή αυτή τιμών της κλίσης του πίσω μέρους, υπάρχει μια μεταβατική κατάσταση μεταξύ του σχεδόν δύο διαστάσεων φαινομένου, όταν η κλίση του παραθύρου είναι μεγάλη και του τρισδιάστατου σχηματισμού φύλλων



στροβιλότητας στις άκρες του οχήματος, όταν η κλίση του παραθύρου είναι μικρή.

Περιορισμός του παραπάνω φαινομένου καθώς και γενικότερα της επαγόμενης αντίστασης μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας της κολόνας του πίσω παραθύρου και με την εξάλειψη των ανωμαλιών στη σύνδεση του παραθύρου με την κολόνα οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποκόλληση της ροής.

■ Η τέταρτη αιτία αντίστασης προέρχεται από τη διαταραχή της ροής που δημιουργούν διάφορα πρόσθετα αντικείμενα τοποθετημένα εξωτερικά του αμαξώματος. Τέτοια αντικείμενα είναι οι καθρέφτες, οι υαλοκαθαριστήρες, η κεραία κλπ, τα οποία παρά το μικρό τους μέγεθος, διαταράσσουν σε σημαντικό βαθμό τον κύριο όγκο της ροής συμβάλλοντας στην αποκόλληση τοπικά της ροής και τη δημιουργία μικρών περιοχών έντονου στροβιλισμού του αέρα. Επιπλέον τα αντικείμενα αυτά συμβάλλουν σε μεγάλο ποσοστό στη δημιουργία του αεροδυναμικού θορύβου, απόρροια των έντονων και μικρών σε μέγεθος στροβίλων που σχηματίζουν.

■ Η πέμπτη αιτία αντίστασης δημιουργείται από την ανάγκη διατήρησης σταθερής της θερμοκρασίας στον κινητήρα και τον αερισμό ή τη θέρμανση του χώρου των επιβατών. Είναι η αντίσταση που προκαλείται από τον αέρα που μπαίνει είτε στο χώρο του κινητήρα για να απομακρύνει τη θερμότητα που αναπτύσσεται από αυτόν, είτε στο χώρο των επιβατών για την εναλλαγή του αέρα. Η θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό καθορίζονται εξετάζοντας τη διανομή της πίεσης την επιφάνεια του οχήματος και που όπως περιγράφεται στη συνέχεια, είναι διαδικασία που έχει μεγάλη σημασία για τη σωστή λειτουργία του κινητήρα και τη μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης.

Εκτός από τις δύο συνιστώσες της συνολικής δύναμης που ασκεί ο αέρας, κατά το διαμήκη και τον κάθετο άξονα του οχήματος, στις πραγματικές συνθήκες που συναντά ένα αυτοκίνητο όταν κινείται στο δρόμο εμφανίζεται και μια τρίτη συνιστώσα, η πλευρική δύναμη. Η συνιστώσα αυτή παρουσιάζεται γιατί συγχρόνως με την κίνηση του οχήματος, το οποίο ανάλογα με τη μορφή του δρόμου αλλάζει συνεχώς

κατεύθυνση, κινείται και ο αέρας. Συνεπώς η ταχύτητα αναφοράς του οχήματος, σε κάθε στιγμή της κίνησής του, προκύπτει από την συσχέτιση της ταχύτητας του αέρα και της πραγματικής ταχύτητας του οχήματος γεγονός που σημαίνει ότι το διάνυσμα της ταχύτητας αναφοράς βρίσκεται υπό γωνία σε σχέση με το διαμήκη άξονα του οχήματος. Η γνώση της τιμής της πλευρικής δύναμης για διάφορες γωνίες πλευρικής προσβολής του αέρα είναι απαραίτητη για τον καθορισμό της ευστάθειας ενός οχήματος και τον υπολογισμό των συνολικών φορτίων που δέχονται οι αναρτήσεις και τα ελαστικά των οχημάτων.

#### **2.4 Η σημασία της αεροδυναμικής σε θέματα ασφάλειας και οικονομίας στα αυτοκίνητα**

Εδώ και δύο δεκαετίες, η αεροδυναμική αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες έρευνας και εξέλιξης στο χώρο της βιομηχανίας αυτοκινήτων, έρευνας η οποία αν και ξεκίνησε από τα πρώτα χρόνια της εμφάνισης του αυτοκινήτου, δεν αξιοποιήθηκε και δεν εφαρμόστηκε στο παρελθόν παρά μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις. Ωστόσο, η κρίση στη Μέση Ανατολή το 1973, η αλματώδης αύξηση της τιμής των καυσίμων και ο κίνδυνος εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων, επανέφερε και μάλιστα με επιτακτικό τρόπο ανάμεσα στα άλλα και το θέμα της αεροδυναμικής αντίστασης και καθιέρωσε τον παράγοντα αεροδυναμική ως έναν από τους πρωτεύοντες στόχους σε κάθε νέα εφαρμογή στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Ωστόσο, η ελαχιστοποίηση της αεροδυναμικής αντίστασης και η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου δεν είναι και τα μόνα που απασχολούν το σύγχρονο τρόπο σχεδίασης ενός οχήματος καθώς ιδιαίτερος σημαντικά είναι ακόμα τα προβλήματα της ευστάθειας, της επίδρασης της κίνησης του οχήματος από τους πλευρικούς ανέμους, το θέμα της απαγωγής της θερμότητας από το χώρο του κινητήρα, αλλά και το θέμα του αεροδυναμικού θορύβου, της άνεσης και του αερισμού του χώρου των επιβατών.

Όλα τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τα πολλά προβλήματα που ήδη υπάρχουν από την κατασκευή και τη σχεδίαση ενός αυτοκινήτου, σχηματίζουν ένα

σύνθετο πλαίσιο μέσα στο οποίο στόχοι, δυνατότητες και περιορισμοί αντιστρατεύονται μεταξύ τους σε σχέση πάντα με τη μείωση του κόστους.

Κάθε όχημα που κινείται με σταθερή ταχύτητα ή επιταχύνει, χρησιμοποιεί την ισχύ του κινητήρα του προκειμένου να υπερνικήσει τις αντιστάσεις που οφείλονται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι η αντίσταση λόγω τριβής των κινούμενων μηχανικών τμημάτων του κινητήρα, του συστήματος μετάδοσης της κίνησης καθώς επίσης και της κύλισης των ελαστικών. Οι απώλειες από τον παράγοντα αυτό είναι σχεδόν σταθερές, αυξανόμενες ελαφρά με την αύξηση της ταχύτητας. Η επίδρασή τους δε γίνεται φανερή κυρίως στις μικρές ταχύτητες και τις επιταχύνσεις. Ο δεύτερος παράγοντας αντίστασης προκαλείται εξαιτίας της κίνησης του οχήματος μέσα στον αέρα. Η σπουδαιότητά του σε ότι αφορά την κατανάλωση και το κέρδος στην οικονομία καυσίμου γίνεται φανερή από το γεγονός ότι ήδη από την ταχύτητα των 60 km/h αρχίζει να αποτελεί το μεγαλύτερο παράγοντα αντίστασης ενώ στην ταχύτητα πλέον των 100 km/h η αεροδυναμική αντίσταση αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα απωλειών που καταναλίσκονται στην κίνηση του οχήματος.

Αλλά το πόσο επιτακτικό γίνεται το πρόβλημα της μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης φαίνεται και από τη διαπίστωση ότι η μείωση του συντελεστή αεροδυναμικής κατά 10% επιφέρει αντίστοιχη μείωση τουλάχιστον κατά 4% στην κατανάλωση καυσίμου. Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός ότι ένα όχημα με συντελεστή αντίστασης 0,46 το οποίο κινείται με 120 Km/h, χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο 2 λίτρα καυσίμου ανά 100 χιλιόμετρα περισσότερα από ένα παρόμοιο όχημα με συντελεστή αντίστασης 0,30. Η σημασία των παραπάνω ποσοστών γίνεται εμφανέστερη συγκρινόμενη με αντίστοιχες μειώσεις των υπολοίπων παραγόντων που επηρεάζουν άμεσα την κατανάλωση καυσίμου ( το βάρος του οχήματος, η ειδική κατανάλωση καυσίμου και η ισχύς του κινητήρα). Έτσι ανάλογη μείωση κατά 10% του βάρους του οχήματος επιφέρει μείωση της κατανάλωσης 3% περίπου, ενώ μείωση της ισχύος κατά 10% επιφέρει μείωση της κατανάλωσης κατά 4%. Φαίνεται δηλαδή ότι η αεροδυναμική αντίσταση έχει το ίδιο ή μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας από άποψη συνεισφοράς στην κατανάλωση καυσίμου με τους δύο από τους τρεις παραπάνω παράγοντες.

Συνεπώς αναμενόμενη θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και η πορεία της μέσης τιμής των αεροδυναμικών συντελεστών αντίστασης των Ευρωπαϊκών αυτοκινήτων

καθώς διαπιστώνεται ότι ενώ τη δεκαετία του '40 η μέση τιμή πλησίαζε το 0,6 μέχρι το 1974 είχε φθάσει στο 0,46. Από το τέλος δε της δεκαετίας του '70 ξεκινά μια συστηματική και γενικευμένη, από τους περισσότερους κατασκευαστές αυτοκινήτων πλέον, προσπάθεια μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης φθάνοντας τη μέση τιμή το 1981 στο 0,42 και το 1985 στο 0,38 ενώ τη δεκαετία του '90 ξεκινά ήδη με τη μέση τιμή κοντά στο 0,33 και συνεχή τάση για περαιτέρω μείωση με απότερο στόχο την τιμή 0,20 που ήδη αρκετά πειραματικά οχήματα προσεγγίζουν.

Εξετάζοντας ωστόσο κανείς τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία, θα μπορούσε να υποθέσει ότι την περίοδο '40-'70 υπήρξε μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε ότι αφορά στη βελτίωση της αεροδυναμικής αντίστασης καθώς τα αποτελέσματα δείχνουν, χωρίς ωστόσο να είναι, περισσότερο εντυπωσιακά σε σχέση με τα αποτελέσματα των επόμενων δεκαετιών. Κάθε τέτοια υπόθεση θα ήταν εσφαλμένη αφού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα περιθώρια βελτίωσης των παλαιών αυτοκινήτων σε όλους τους τομείς αλλά κυρίως στο θέμα των αμαξωμάτων, ήταν πολύ μεγάλα καθώς τα περισσότερα από τα οχήματα αυτά διατηρούσαν ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά των πρώτων αυτοκινήτων, δηλαδή τους εξωτερικούς θόλους των τροχών, τις κάθετες επιφάνειες, τα εξωτερικά φώτα, τα επιβλητικά σε όγκο ψυγεία κ.α. Σημαντικό είναι επίσης ότι όλη αυτή η εξέλιξη στη σχεδίαση των αμαξωμάτων την περίοδο αυτή μείωσε ουσιαστικά το κόστος παραγωγής των οχημάτων ξεκινώντας από την ορθολογικότερη χρήση των μεταλλικών ελασμάτων στη διαμόρφωση των επιφανειών και φθάνοντας στη μερική αυτοματοποίηση πολλών από των εργασιών στις γραμμές παραγωγής.

Αντίθετα, τα σημερινά οχήματα και λέγοντας σημερινά εννοούνται όλα τα μετά την δεκαετία του '70, έχουν στενά περιθώρια εξέλιξης είτε ως προς τη μορφή είτε ως προς τη διαδικασία παραγωγής και οι βελτιώσεις πλέον δεν είναι τόσο εμφανείς.

Ως προς τη μορφή, η αεροδυναμική οδηγεί όλους τους κατασκευαστές προς παραπλήσιες μεταξύ τους λύσεις και ήδη έχουν γίνει μειώσεις του συντελεστή αντίστασης της τάξης του 20% , ενώ σε κάποιες των περιπτώσεων ακόμα περισσότερο. Οι σημαντικές αυτές μειώσεις γίνονται πλέον χάρη την προσεκτική σχεδίαση και τον έλεγχο όλων σχεδόν των τμημάτων του αμαξώματος που έχουν επίδραση στην ομαλή ροή του αέρα, διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα που απαιτεί τη χρήση μεγάλων εγκαταστάσεων όπως είναι οι αεροσήραγγες. Είναι επίσης ενδιαφέρον ότι οι βελτιώσεις αυτές δεν γίνονται σε καμία περίπτωση σε βάρος της άνεσης και του διαθέσιμου χώρου



των επιβατών ο οποίος αντίθετα ολοένα και αυξάνει ενώ οι μορφές των οχημάτων δεν προκαλούν με τις σχεδιαστικές τους ακρότητες.

Ως προς την παραγωγή, η αυτοματοποίηση είναι πλέον σχεδόν καθολική σε όλη τη γραμμή συναρμολόγησης. Το σοβαρότερο είναι ότι κάθε νέα προσπάθεια βελτίωσης είναι πλέον εις βάρος του κόστους παραγωγής του οχήματος γεγονός που καθιστά την όλη προσπάθεια βελτίωσης υπό αμφισβήτηση στο κατά πόσο θα ωφελήσει μακροπρόθεσμα ή όχι τον αγοραστή.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα και σε σχέση με τα όσα ειπώθηκαν προωτέρως σχετικά με τα οφέλη από τη μείωση του βάρους στην κατανάλωση καυσίμου, αποτελεί το γεγονός ότι με τα σημερινά δεδομένα ένα ελαφρύτερο αυτοκίνητο μπορεί να έχει μικρότερη κατανάλωση και συνεπώς να είναι οικονομικότερο σε ότι αφορά την καθημερινή του χρήση. Ωστόσο, η τιμή αγοράς του εξαιτίας ακριβώς της μείωσης του βάρους μπορεί να αυξηθεί σε σημείο που να εξανεμίζει το μακροπρόθεσμο όφελος του αγοραστή από την περιορισμένη κατανάλωση. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που δεν έχει γενικευθεί ακόμα η χρήση υλικών όπως το αλουμίνιο το οποίο υπερέρχει σαφώς έναντι του χάλυβα ως προς το βάρος και τις απαιτήσεις συντήρησης, έχει όμως τριπλάσιο κόστος.

Σε αυτό ακριβώς το σημείο βρίσκονται και τα οφέλη από τη σωστή αεροδυναμική σχεδίαση, αφού παρά το αρχικό κόστος της έρευνας που απαιτείται για το σχεδιασμό ενός οχήματος μικρής αντίστασης, τα αποτελέσματα μπορούν να μεταφερθούν σχετικά εύκολα στη διαδικασία παραγωγής χωρίς σημαντική επιβάρυνση του κόστους παραγωγής. Κατά δεύτερο λόγο μικρότερη αεροδυναμική αντίσταση συνεπάγεται διατήρηση ή αύξηση της ταχύτητας του οχήματος.

Αρχικά και ειδικά στον τομέα της αεροδυναμικής, η χρήση των υπολογιστών για αρκετά χρόνια είχε περιοριστεί μόνο σε εφαρμογές αεροπορικού ενδιαφέροντος, αφού η αεροδυναμική σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν ο κυριότερος παράγοντας σχεδιασμού. Η ανάγκη περιορισμού του χρόνου και του κόστους εξέλιξης ενός νέου οχήματος οδήγησε τα κέντρα έρευνας των αυτοκινητοβιομηχανιών στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων περιορισμένης μεν ακρίβειας αλλά κατάλληλων για τον προκαταρκτικό έλεγχο των οχημάτων. Ως εκ τούτου οι πειραματικές δοκιμές σε αεροσήραγγες εξακολουθούν να αποτελούν το κύριο μέσο μελέτης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς ενός οχήματος αλλά έχει περιοριστεί ο χρόνος και το κόστος των

δοκιμών αυτών που γίνονται πλέον κυρίως στο τελικό στάδιο εξέλιξης ενός νέου αυτοκινήτου. Η μελλοντική γενίκευση της χρήσης αριθμητικών μεθόδων για τον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης, κάτι που έχει επικρατήσει ήδη στους υπόλοιπους τομείς σχεδίασης και κατασκευής των οχημάτων, προβλέπεται ότι θα μειώσει ακόμα περισσότερο το κόστος της αεροδυναμικής εξέλιξης ενός νέου οχήματος και συνεπώς τα οφέλη θα είναι ακόμα μεγαλύτερα.

Αλλά η μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης είναι ένα μόνο από τα θέματα της αεροδυναμικής σχεδίασης ενός οχήματος. Η ολοένα μεγαλύτερη μείωση του βάρους των οχημάτων και οι απαιτήσεις για αύξηση της ταχύτητας κίνησης των οχημάτων έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων ευστάθειας και συνεπώς και ασφάλειας στην κίνηση των οχημάτων και ειδικά κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Πράγματι όπως έχει ειπωθεί, η ασυμμετρία του πεδίου ροής του αέρα γύρω από ένα όχημα λόγω της παρουσίας του εδάφους αλλά και λόγω της μορφής του οχήματος, δημιουργεί τις προϋποθέσεις εμφάνισης ανωστικών δυνάμεων, θετικής ή αρνητικής κατεύθυνσης. Όταν οι δυνάμεις αυτές είναι θετικές, δηλαδή όταν τείνουν να σηκώσουν το όχημα, τότε επηρεάζεται άμεσα η πρόσφυση των τροχών και ο έλεγχος του οχήματος είναι περιορισμένες. Σκοπός της αεροδυναμικής σχεδίασης είναι συνεπώς να μειώσει στο ελάχιστο τις θετικές ανωστικές δυνάμεις ή ακόμα καλύτερα να δημιουργήσει αρνητικές ανωστικές δυνάμεις οι οποίες θα βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά οδήγησης του οχήματος στις υψηλές ταχύτητες. Συνήθως η έρευνα των ανωστικών δυνάμεων γίνεται ανεξάρτητα για τους δύο άξονες των τροχών, δίνοντας έτσι πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και την κατεύθυνση της ανωστικής δύναμης που δέχεται ο εμπρός ή ο πίσω άξονας του οχήματος.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τη μελέτη της ροπής πρόνευσης, της ροπής δηλαδή του ως προς το πλάτος του άξονα του οχήματος, οι θετικές τιμές της οποίας υποδηλώνουν ότι το εμπρός μέρος του οχήματος τείνει να σηκωθεί. Γενική επιδίωξη των σχεδιαστών είναι η ροπή πρόνευσης να έχει αρνητικές τιμές δηλαδή το εμπρός μέρος να τείνει προς τα κάτω αυξάνοντας έτσι την πρόσφυση των τροχών που ελέγχουν την πορεία του οχήματος. Είναι ίσως ενδιαφέρον ότι πολλά οχήματα ακόμα και σήμερα παρουσιάζουν θετική ροπή πρόνευσης αναγκάζοντας σε πολλές περιπτώσεις τους κατασκευαστές ή τους ιδιοκτήτες τους να τοποθετήσουν πρόσθετα





αεροδυναμικά βοηθήματα με τη μορφή προεκτάσεων στο εμπρός μέρος του οχήματος περιορίζοντας την ποσότητα του αέρα που περνά κάτω από αυτό και δημιουργώντας μια σημαντική πτώση της πίεσης στο κάτω, εμπρός μέρος του οχήματος. Η σωστή σχεδίαση μιας τέτοιας προέκτασης μπορεί να βελτιώσει συγχρόνως και την αεροδυναμική αντίσταση αλλά και την απόδοση του συστήματος ψύξης καθώς ο περιορισμός της ποσότητας του αέρα που περνά κάτω από το όχημα έχει ως συνέπεια τη μείωση της αντίστασης τριβής στο δάπεδο του οχήματος.

Ωστόσο ο κυριότερος παράγοντας αστάθειας δημιουργείται από την εμφάνιση της πλευρικής δύναμης που προέρχεται από τη σχετική κίνηση του οχήματος ως προς τον κινούμενο επίσης αέρα. Η δύναμη αυτή μεταφέρεται άμεσα στα σημεία επαφής των ελαστικών με την επιφάνεια του δρόμου και συμβάλλει στην τάση για εκτροπή του οχήματος από την πορεία.

Πάντως τόσο για την ανωστική δύναμη αλλά ακόμα περισσότερο για την πλευρική δύναμη, καθοριστικό στοιχείο δεν είναι μόνο το μέτρο ή η κατεύθυνση των δυνάμεων αυτών. Πρέπει να διαπιστωθεί και η θέση του κέντρου της πίεσης, δηλαδή του θεωρητικού σημείου εφαρμογής των αεροδυνάμεων. Η σχετική θέση του σημείου αυτού ως προς το κέντρο βάρους του οχήματος και συνεπώς και των ροπών που σχηματίζονται από τις δυνάμεις ως προς το κέντρο βάρους, είναι ακόμα πιο σημαντική από την τιμή αυτών των ίδιων των δυνάμεων. Αν το κέντρο της πίεσης είναι πιο μπροστά από το κέντρο βάρους, το όχημα εμφανίζεται ασταθές στους πλευρικούς ανέμους και όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από το κέντρο βάρους τόσο περισσότερο ευπαθές στις επιδράσεις αυτές γίνεται. Στην περίπτωση αυτή και υπό την επίδραση πλευρικού ανέμου, το εμπρός μέρος του οχήματος τείνει να ξεφύγει από την πορεία του, συμπαρασύροντας και το πίσω μέρος που απλά ακολουθεί. Όταν το κέντρο της πίεσης ταυτίζεται με το κέντρο βάρους, το όχημα παρουσιάζει ουδέτερη συμπεριφορά με τάση όμως να ξεφύγει από την κατάσταση ισορροπίας. Η καλύτερη και η πλέον ασφαλής θέση του κέντρου της πίεσης για την ευστάθεια ενός οχήματος είναι πίσω από το κέντρο βάρους καθώς σε αυτή την περίπτωση η επίδραση του πλευρικού αέρα δεν εκτρέπει το όχημα από την πορεία του, ενώ η όποια τάση εκτροπής διορθώνεται από την πορεία του εμπρός συστήματος κίνησης.

Καθώς το κέντρο της πίεσης αλλάζει ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης, τη γωνία δηλαδή που σχηματίζει το δάπεδο του οχήματος με τη διεύθυνση του αέρα αλλά

και τη γωνία προσβολής του πλευρικού ανέμου, είναι βασικό να ελέγχεται η μεταβολή της θέσης του κέντρου της πίεσης, συναρτήσει των δύο αυτών γωνιών προκειμένου να ελεγχθεί η διατήρηση της θέσης αυτής σχετικά ως προς το κέντρο βάρους. Διαφορετικά, είναι δυνατόν να αλλάζει η συμπεριφορά ενός οχήματος εμφανιζόμενο ευσταθές υπό κάποιες συνθήκες κίνησης και ασταθές υπό κάποιες άλλες χωρίς ο οδηγός να μπορεί να το γνωρίζει κάθε στιγμή.

Ένα θέμα που σχετίζεται άμεσα με τα παραπάνω είναι το θέμα της κίνησης του οχήματος κοντά σε άλλα κινούμενα οχήματα και κυρίως σε οχήματα πολύ μεγαλύτερα από αυτό. Το πρόβλημα είναι σύνθετος και γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι σε μια τέτοια περίπτωση δεν ισχύουν οι συνθήκες ευστάθειας που ίσχυαν όταν το όχημα ήταν μόνο του.

Όταν το μικρότερο όχημα ακολουθεί το μεγαλύτερο, εμπρός ακριβώς από το δεύτερο, η διαφορά πίεσης που δημιουργείται από την κίνηση του πρώτου διευκολύνει το όχημα που ακολουθεί και η αντίστασή του μειώνεται. Καθώς όμως το δεύτερο όχημα ξεκινά να ξεπεράσει το πρώτο, οι συνθήκες που συναντά αλλάζουν δραματικά καθώς πέρα από την αντίσταση του αέρα που θα έπρεπε να υπερνικήσει αν ήταν μόνο του, έχει να αντιμετωπίσει και τη διαταραχή της ροής που επιβάλλει τη συμμετρία του πεδίου ροής του αέρα στο δεύτερο όχημα δημιουργώντας έτσι τις συνθήκες εμφάνισης πλευρικών δυνάμεων.

Ανάλογο είναι και το πρόβλημα που δημιουργείται όταν τα δύο οχήματα διασταυρώνονται καθώς η διαταραχή του αέρα από το μεγαλύτερο όχημα επιδρά στη ροή που συναντά το άλλο όχημα δημιουργώντας και σε αυτή την περίπτωση την εμφάνιση στιγμιαίας πλευρικής δύναμης. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο είναι λιγότερο σοβαρό και αντιμετωπίζεται ευκολότερα από τον οδηγό καθώς η διάρκειά του είναι μερικά δέκατα του δευτερολέπτου ενώ σε μεγάλους δρόμους ταχείας κυκλοφορίας η διαχωριστική νησίδα ανάμεσα στα δύο ρεύματα κυκλοφορίας περιορίζει στο ελάχιστο την εμφάνιση του φαινομένου.

Πέρα από την ασφάλεια κατά την κίνηση ενός οχήματος και την οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου, η αεροδυναμική καλείται να συνεισφέρει στη σωστή λειτουργία των κινητήρων και την άνεση των επιβατών.

Η απομάκρυνση της αναπτυσσόμενης θερμότητας, από τον κινητήρα του οχήματος, είναι καθοριστικής σημασίας για την απρόσκοπτη λειτουργία και τη διάρκεια

ζωής του κινητήρα. Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται βασικά σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, μέρος της θερμότητας μεταφέρεται από τα τοιχώματα των θαλάμων καύσης στο νερό που κυκλοφορεί γύρω από αυτούς. Στο δεύτερο στάδιο, η θερμότητα που έχει μεταφερθεί πλέον στο νερό απομακρύνεται εκ νέου, μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, μεταφερόμενη στον αέρα που εισέρχεται γι' αυτό το λόγο από τα ειδικά ανοίγματα, συνήθως στο εμπρός μέρος του οχήματος. Παράλληλα, μέρος του εισερχόμενου αέρα περνά εξωτερικά από τις επιφάνειες του κινητήρα συμβάλλοντας περαιτέρω στην απομάκρυνση της αναπτυσσόμενης θερμότητας.

Είναι συνεπώς φανερό ότι η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στο χώρο του κινητήρα πρέπει να είναι αφ' ενός μεν αρκετή ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις προκειμένου να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα αφ' ενός δε να μην είναι υπερβολικά μεγάλη γιατί στην περίπτωση αυτή αυξάνει σημαντικά η αεροδυναμική αντίσταση του οχήματος.

Τα τελευταία χρόνια και προκειμένου να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό η αντίσταση του αέρα, οι κατασκευαστές δίνουν ιδιαίτερη σημασία στο θέμα της ροής του αέρα μέσα στο χώρο του κινητήρα. Συγκεκριμένα, έχουν μειώσει σημαντικά την έκταση των εισαγωγών του αέρα στην κινητήρα, έχουν μεταφέρει τα ανοίγματα σε θέσεις που εμφανίζονται μεγάλες αεροδυναμικές πιέσεις, διαμορφώνοντας παράλληλα τον εναλλάκτη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν διαφυγές προς άλλες κατευθύνσεις και να γίνεται εκμετάλλευση όλης της ποσότητας του εισερχόμενου αέρα. Φροντίζουν επίσης ώστε ο αέρας να απομακρύνεται από το χώρο του κινητήρα χωρίς δυσκολία και να μην εγκλωβίζεται μέσα σε αυτόν. Συνήθως δε επιδιώκεται ο αέρας να διαφεύγει από περιοχές του αμαξώματος που υπάρχουν μικρές πιέσεις ή από σημεία που υπάρχει ήδη έντονος στροβιλισμός της ροής έτσι ώστε η έξοδος του αέρα από τα σημεία εκείνα να μη δημιουργήσει επιπλέον διαταραχή της ροής του αέρα.

Εκτός από τη ροή του αέρα στο χώρο του κινητήρα, ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση δίνεται και στον έλεγχο της ροής προς το χώρο των επιβατών και που είναι απαραίτητος για το σωστό αερισμό του χώρου αυτού. Όπως και στην περίπτωση των ανοιγμάτων για τη ψύξη του κινητήρα, οι θέσεις συνήθως των ανοιγμάτων εισόδου του αέρα για τον αερισμό επιλέγονται μεταξύ των περιοχών αυτών του αμαξώματος όπου εμφανίζονται μεγάλες πιέσεις. Τέτοια περιοχή είναι συνήθως η θέση που το σκέπασμα του χώρου του κινητήρα συναντά το εμπρός παράθυρο. Για την έξοδο του αέρα από το

χώρο των επιβατών επιλέγονται θέσεις στις οποίες σχηματίζεται υποπίεση, κυρίως στο πίσω μέρος, έτσι ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση του αέρα και συγχρόνως να αυξάνει τοπικά η πίεση στη θέση αυτή με θετικές συνέπειες είτε στη διαμόρφωση του ομόρρου είτε στο μέγεθος των ανωστικών δυνάμεων.

Η άνεση των επιβατών είναι ένας ακόμα χώρος στον οποίο η αεροδυναμική μελέτη μπορεί να επέμβει βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων οχημάτων. Ο θόρυβος είναι ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά.

Ο θόρυβος που φθάνει στο χώρο των επιβατών προέρχεται από διάφορες αιτίες οι κυριότερες από τις οποίες είναι ο κινητήρας, η επαφή των τροχών στο οδόστρωμα, οι μετακινήσεις των τμημάτων της ανάρτησης και τέλος ο αέρας. Ο θόρυβος από τη λειτουργία του κινητήρα είναι αναμφίβολα ο κυριότερος για όλες τις ταχύτητες κίνησης ενώ ακολουθεί ο θόρυβος λόγω του αέρα και της κύλισης των ελαστικών. Ωστόσο, και λόγω των κανονισμών που αρχίζουν να θεσπίζονται σχετικά με τα επιτρεπόμενα επίπεδα θορύβου των οχημάτων, ο θόρυβος από τον κινητήρα τείνει να μειωθεί, παραχωρώντας ουσιαστικά την πρώτη θέση από άποψη σπουδαιότητας στον αεροδυναμικό θόρυβο. Γι' αυτό και παρά τις μεγάλες τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάζει η διερεύνηση των επιπέδων του αεροδυναμικού θορύβου στις αεροσήραγγες, κάθε νέο όχημα πριν την παραγωγή, εξετάζεται και βελτιώνεται ως προς αυτό το σημείο.

Θα πρέπει επίσης να διευκρινισθεί ότι η διερεύνηση του αεροδυναμικού θορύβου δεν γίνεται ανεξάρτητα από την υπόλοιπη διαδικασία βελτιστοποίησης των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών αφού χαμηλή αεροδυναμική αντίσταση δεν σημαίνει κατά ανάγκη και χαμηλό επίπεδο αεροδυναμικού θορύβου. Είναι ενδιαφέρον να τονιστεί ότι πολλά χαρακτηριστικά του αμαξώματος ενός οχήματος που έχουν ελάχιστη ή μηδενική επίδραση στην αντίσταση ή την άωση, μπορεί να έχουν μεγάλη επίδραση στο επίπεδο θορύβου που προκαλούν. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι για παράδειγμα η κλίση και η ακτίνα καμπυλότητας της εμπρός κολώνας ή ο εξωτερικός καθρέφτης.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι πέρα από την καλλιτεχνική και εμπορική σχεδίαση των οχημάτων, η επιστήμη της αεροδυναμικής μπορεί να επλύσει πολλά από τα προβλήματα ευστάθειας των οχημάτων κατά την κίνησή τους στο δρόμο αυξάνοντας την πρόσφυση των ελαστικών και ελαττώνοντας τις επιδράσεις των πλευρικών ανέμων. Επιτρέπει ακόμα τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων



νόξης του κινητήρα και των φρένων, βελτιώνει την απόδοση του κυκλώματος εξαερισμού στο χώρο των επιβατών και τέλος επιδρά άμεσα στον περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμων συμβάλλοντας αποφασιστικά στην παγκόσμια προσπάθεια εξοικονόμησης των ενεργειακών αποθεμάτων.



### 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη ανάπτυξη που γνωρίζουν τα υπολογιστικά συστήματα είναι κάτι παραπάνω από βέβαιο ότι έχουν αλλάξει, και προβλέπεται να αλλάξουν ακόμα περισσότερο τον τρόπο αντιμετώπισης όλων εκείνων των πρακτικών προβλημάτων, τα οποία οι μηχανικοί καλούνται να αντιμετωπίσουν. Ήδη σε πολλούς τομείς τεχνολογικών εφαρμογών οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν επικρατήσει σχεδόν απόλυτα και ασφαλώς αυτό δεν είναι τυχαίο αλλά συνέπεια των μεγάλων δυνατοτήτων που προσφέρουν.

Η ανάπτυξη αυτή δεν ήταν δυνατόν να μην επηρεάσει έναν καθαρά τεχνολογικό τομέα όπως είναι η βιομηχανία κατασκευής αυτοκινήτων, η οποία αποτελεί πλέον έναν από τους κυριότερους αποδέκτες όλων των πραγματικά εντυπωσιακών επιτευγμάτων της ηλεκτρονικής τεχνολογίας.

Με τη βοήθεια προηγμένης τεχνολογίας υπολογιστικών συστημάτων, γίνεται πλέον ο σχεδιασμός, η εξέλιξη αλλά και ο έλεγχος ενός αυτοκινήτου πριν ξεκινήσει η παραγωγή του. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά το κόστος και ο χρόνος εξέλιξης και παραγωγής ενός νέου τύπου αυτοκινήτου. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα στους σχεδιαστές και μηχανικούς να επιλέξουν μεταξύ διαφόρων λύσεων, είτε ως προς την κατασκευή, είτε ως προς το σχεδιασμό, χωρίς να περιορίζονται αναγκαστικά από το κόστος που θα απαιτούσε η τυχόν κατασκευή και δοκιμή, για παράδειγμα, ενός νέου τύπου οχήματος, έστω και σε μικρή κλίμακα. Στον τομέα της αεροδυναμικής, και ειδικότερα στον τομέα της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων, η έρευνα των διαφόρων προβλημάτων με τη βοήθεια των Η/Υ ολοένα επεκτείνεται και μάλιστα με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Ωστόσο λόγω της ιδιαίτερας μεγάλης πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα φαινόμενα που πρέπει να αντιμετωπιστούν, προς το παρόν τουλάχιστον, η εφαρμογή όλων των μεθόδων που υπάρχουν μέχρι

σήμερα, περιορίζεται στον προκαταρκτικό έλεγχο απλοποιημένων σχημάτων, ενώ τα αποτελέσματα δεν έχουν ακόμα την ουσιαστική, πρακτική αξία η οποία θα καθιστούσε την πειραματική έρευνα μη αναγκαία. Παράλληλα λοιπόν με τη λειτουργία των μεγάλων αεροσπράγγων και την πειραματική έρευνα, οι αυτοκινητοβιομηχανίες αναπτύσσουν μεγάλα ερευνητικά κέντρα με πολύ ισχυρά υπολογιστικά συστήματα. Στα κέντρα αυτά γίνεται γρήγορα και με σχετικά χαμηλό κόστος η βασική αεροδυναμική έρευνα και εξέλιξη των διαφόρων σχεδιαστικών προτάσεων, κάτι που παλαιότερα απαιτούσε πολύ μεγάλους χρόνους και ιδιαίτερα μεγάλη οικονομική επιβάρυνση, τόσο για την κατασκευή των απαιτούμενων ομοιωμάτων, όσο και για λειτουργία των αεροσπράγγων. Μετά τη βασική έρευνα, οι σχεδόν τελικές ιδέες υλοποιούνται και δοκιμάζονται πλέον στην αεροσπράγγα όπου γίνεται και ο τελικός καθορισμός της μορφής και των λεπτομερειών του οχήματος.

Η επίλυση της δυναμικής ροής αποτελεί σήμερα το βασικό μέσο αντιμετώπισης των πρακτικών εφαρμογών, λόγω της απλότητας που παρουσιάζει, τόσο στην επίλυση, όσο και στον καθορισμό της γεωμετρίας των εξεταζόμενων σχημάτων.

Οι προσπάθειες για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από σώματα με τη βοήθεια υπολογιστικών αλγορίθμων έχουν ξεκινήσει εδώ και αρκετά χρόνια. Αρχικά εφαρμόστηκαν για την εξέταση απλών σχημάτων, ενώ άμεση εφαρμογή βρήκαν στο σχεδιασμό αεροσκαφών, όπου η αεροδυναμική αποτελεί το κυριότερο ίσως μέρος του όλου σχεδιασμού.

Αντιθέτως, στα αυτοκίνητα η εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων άργησε πολύ να εμφανιστεί, λόγω του περιορισμένου ενδιαφέροντος που παρουσίαζε η αεροδυναμική για τις αυτοκινητοβιομηχανίες μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του '70. Αντιθέτως, στην επόμενη δεκαετία, η ανάπτυξη ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και η τάση σχεδιασμού αεροδυναμικής μορφής οχημάτων για λόγους οικονομίας και προσέλκυσης αγοραστικού κοινού, έδωσε τεράστια ώθηση στον τομέα αυτό της τεχνολογίας. Ο συνδυασμός της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και των ισχυρών Η/Υ αποτελεί πλέον ένα πολύ χρήσιμο και ισχυρό μέσο για τον αρχικό αεροδυναμικό σχεδιασμό ενός νέου οχήματος γεγονός που περιορίζει σημαντικά το χρόνο και το κόστος της εξέλιξης.

Θέλοντας να κάνουμε μια πιο ακριβή προσέγγιση στον όρο υπολογιστική ρευστομηχανική θα λέγαμε ότι είναι η μέθοδος ανάλυσης και επίλυσης συστημάτων

ροής που μπορεί να περιέχουν και φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας σε συνδυασμό και με χημικές αντιδράσεις. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται και των νόμων πάνω στους οποίους στηρίζεται η επίλυση ενός ροϊκού πεδίου με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

### 3.2 Σκοπός της αριθμητικής ανάλυσης

Ο βασικός σκοπός της αριθμητικής ανάλυσης είναι να βρίσκει εύχρηστες μεθόδους για την λύση προβλημάτων που μπορεί να εκφραστούν με μαθηματικές εξισώσεις.

Αναλυτικές λύσεις των προβλημάτων, όταν υπάρχουν, μπορεί μεν να είναι ακριβείς αλλά να μη βρίσκονται σε εύχρηστη μορφή, από την άποψη να μην είναι δυνατή η απ' ευθείας αριθμητική επεξεργασία. Στην περίπτωση αυτή ο αναλυτής πρέπει να επιχειρήσει να δημιουργήσει μια μέθοδο για την παραπέρα αριθμητική επεξεργασία της λύσης ή μπορεί να προτιμήσει να βασίσει την ανάλυσή του στην απαρχής μόρφωση και αριθμητική λύση του προβλήματος.

Γενικά ο αναλυτής δεν ενδιαφέρεται για το αυστηρό μαθηματικό πρόβλημα αλλά κυρίως επιχειρεί να μορφώσει μια μεθοδολογία που θα δώσει τη λύση στο πρόβλημα με μια προσέγγιση που θα διαφέρει από την ακριβή λύση λιγότερο από μια ορισμένη ανοχή. Όταν πάλι η πληροφορία που του παρέχεται δεν είναι ακριβής επιχειρεί να αποκτήσει ένα μέτρο της αβεβαιότητας της λύσης που προκύπτει από την ανακρίβεια της πληροφορίας, αβεβαιότητα όμως που να είναι συγκρίσιμη με την ανακρίβεια της πληροφορίας.

Ένα από τα πιο γρήγορα αυξανόμενα πεδία αριθμητικής ανάλυσης είναι εκείνο που ασχολείται με την προσεγγιστική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Συνεχώς νέοι αλγόριθμοι αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων προτείνονται και εφαρμόζονται με κριτήρια αξιολόγησής τους, την ευστάθεια, την ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος, την απαιτούμενη χωρητικότητα μνήμης του υπολογιστή και φυσικά την ακρίβεια της λύσης.

### 3.3 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής

Ο σύγχρονος τρόπος επίλυσης προβλημάτων ρευστομηχανικής κινείται στο πρίσμα της προσομοίωσής τους σε Η/Υ. Με τη λέξη κώδικας εννοούμε συνήθως το πρόγραμμα σε Η/Υ που επεξεργάζεται τη ροή που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Οι κώδικες που επεξεργάζονται προβλήματα ρευστομηχανικής είναι βασισμένοι πάνω σε αλγορίθμους ευρείας έκτασης και σε γνωστές γλώσσες προγραμματισμού όπως Fortran, C κτλ.

Η προσέγγιση και επίλυση ενός προβλήματος ρευστομηχανικής είναι ενιαία σε κάθε περίπτωση και ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα:

- A. Προεπεξεργασία του προβλήματος (pre processing)
- B. Επίλυση (solver)
- Γ. Μετεπεξεργασία του προβλήματος (post preprocessing)

Αναλυτικότερα:

#### 3.3.1 Προ- επεξεργασία:

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η εισαγωγή και η επεξεργασία το προβλήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συμβατή με τον επίλυτή. Έτσι, ορίζεται η γεωμετρία και η περιοχή όπου εμφανίζεται το ενδιαφέρον επίλυσης. Στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα προσομοίωσης της ροής, το οποίο δεν είναι κάτι διαφορετικό από όγκους ελέγχου που πραγματοποιούν διακριτοποίηση στο χώρο του φαινομένου. Επόμενο βήμα είναι η επιλογή των φυσικών και χημικών δεδομένων που απαιτούν μοντελοποίηση καθώς και ο καθορισμός των φυσικών χαρακτηριστικών της ροής. Τέλος, καθορίζεται το είδος των ορίων του προβλήματος (τοιχώματα, είσοδος και έξοδος ρευστού).

Το στάδιο αυτό μπορεί να είναι το πιο επίπονο και χρονοβόρο, αλλά η σημαντικότητά τους είναι καθοριστική. Από την άλλη, ο ακριβής καθορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου προς εξέταση είναι ένα επίσης πολύ σημαντικό και επίπονο στάδιο. Είναι και εδώ σαφές ότι η προσέγγιση της πραγματικής γεωμετρίας του

μοντέλου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις σχεδιασμού σε υπολογιστικό περιβάλλον και το τελικό αποτέλεσμα καθορίζεται σημαντικά από την υπομονή που επιδεικνύει ο χειριστής και το βαθμό τελειότητας τον οποίο επιζητά. Τέλος, η επιλογή των οριακών συνθηκών του προβλήματος είναι καθοριστική και λαθεμένες επιλογές οδηγούν σε λαθεμένα αποτελέσματα, έστω και αν όλοι οι άλλοι παράγοντες που προαναφέρθηκαν είναι σωστοί και επαρκείς.

### 3.3.2 Επίλυση

Το στάδιο αυτό είναι το αμέσως επόμενο από το στάδιο της προ- επεξεργασίας. Εδώ επιλέγεται ουσιαστικά μια από τις διαθέσιμες μεθόδους προσέγγισης του προβλήματος. Οι θεμελιώδεις μέθοδοι στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική είναι οι εξής:

- I. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών
- II. Μέθοδος πεπερασμένων όγκων
- III. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Συγκεκριμένα:

#### 3.3.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών:

Οι διακριτοποιημένες εκφράσεις των παραγώγων που εμφανίζονται στις εξισώσεις κατά το ανάπτυγμα Taylor για κάθε κόμβο όπου ενώνονται οι γραμμές  $i$  και  $j$  του πλέγματος. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα επιτυχής σε απλά ροϊκά προβλήματα και εφαρμόζεται πολύ εύκολα όταν εμφανίζεται ισοκατανομή των γραμμών διακριτοποίησης.

#### 3.3.2.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων:

Ολοκληρώνονται προσεγγιστικά οι εξισώσεις που διέπουν την εξέλιξη της ροής για ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου που διαμορφώνεται γύρω από κάθε κόμβο. Ο όγκος ελέγχου έχει συγκεκριμένες διαστάσεις και στα όρια αυτού εκφράζονται όλοι οι όροι



που εμφανίζονται στη ολοκληρωμένη εξίσωση. Η μέθοδος περιγράφει τους συγκεκριμένους όρους της εξίσωσης σαν όρους συναγωγής, διάχυσης, πηγής και τους διαχειρίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καταλήγει σε συστήματα εξισώσεων προς επίλυση. Οι όροι του συστήματος αναφέρονται για κάθε όγκο ελέγχου και για κάθε είδος διακριτοποιημένου όρου που εμφανίζεται στην ολοκληρωμένη εξίσωση. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων γίνεται με μια επαναληπτική μέθοδο. Το βασικό ισοζύγιο για μια ποσότητα  $\phi$  που γίνεται σε έναν όγκο ελέγχου περιγράφεται ως εξής:

*Μεταβολή της  $\phi$  στον όγκο ελέγχου = Ροή της  $\phi$  λόγω συναγωγής + Ροή της  $\phi$  λόγω διάχυσης + παραγωγής της  $\phi$*

### **3.3.2.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων:**

Χρησιμοποιεί κάποιες ειδικές συναρτήσεις προσέγγισης για να περιγράψει τις μεταβολές και τις τιμές των άγνωστων προς επίλυση μεταβλητών της  $\phi$ .

### **3.3.3 Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων:**

Σε αυτό το τελικό στάδιο ο μηχανικός- ερευνητής θα πρέπει από την ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της επίλυσης του κώδικα να οδηγηθεί σε ασφαλή συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά της ροής τις ιδιαιτερότητες του υπό εξέταση φαινομένου κτλ. Στα σύγχρονα εμπορικά λογισμικά η μετατροπή των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε γραφήματα, διαγράμματα και γενικότερα βασίζονται σε μια επαναληπτική μέθοδο υπολογισμού όπου αρχίζοντας από κάποιες αρχικές τιμές που προδιαγράφουν ένα πεδίο ροής προχωρούν στην επίλυσή του ή όπως λέγεται στη σύγκλιση του προβλήματος έχοντας σαν κριτήριο έναν πολύ μικρό αριθμό, το σφάλμα. Όταν οι τιμές των χαρακτηριστικών της ροής γίνουν πιο μικρές από το σφάλμα, τότε θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει ή ότι το πεδίο ροής που υπολογίζει ο κώδικας είναι αυτό που θέλει κανείς να προσομοιώσει.

### 3.4 Σφάλματα υπολογισμών

Ένα βασικό ερώτημα που πρέπει να απασχολεί κάθε αναλυτή-προγραμματιστή είναι η ακρίβεια των αριθμητικών πράξεων που ο Η/Υ εκτελεί, η μετάδοση του σφάλματος από αριθμητική πράξη στην επόμενη κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος και το σφάλμα που περιέχεται στο τελικό αποτέλεσμα των υπολογισμών. Στην συνέχεια και πολύ συνοπτικά παρουσιάζονται διάφορα είδη αριθμητικών σφαλμάτων χωρίς το θέμα να καλύπτεται ούτε κατ' ελάχιστο μια και αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά αντικείμενα της αριθμητικής ανάλυσης.

Είναι φανερό ότι ο υπολογιστής πάντοτε θα δώσει ένα τελικό αποτέλεσμα, μερικές φορές όμως το σφάλμα που περιέχεται σ' αυτό το αποτέλεσμα είναι τόσο σημαντικό ώστε να κάνει το αποτέλεσμα αναξιόπιστο και χωρίς πρακτική αξία.

Διακρίνονται δυο τιμές μιας ποσότητας  $x$ , η ακριβής τιμή  $x$  και η υπολογισμένη αλλά προσεγγιστική τιμή  $\bar{x}$ . Η διαφορά

$$\sigma_x = x - \bar{x}$$

καλείται απόλυτο σφάλμα, και ο λόγος

$$\frac{\sigma_x}{x} = \frac{x - \bar{x}}{x} = 1 - \frac{\bar{x}}{x}$$

καλείται σχετικό σφάλμα.

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει ότι, κατά κανόνα για μεγάλους αριθμούς, το απόλυτο σφάλμα  $\sigma_x$  είναι μεγάλος αριθμός, το δε σχετικό σφάλμα μικρός. Αντίθετα για πολύ μικρούς αριθμούς το απόλυτο σφάλμα είναι μικρός αριθμός το δε σχετικό πολύ μεγάλο. Για αριθμούς της τάξης της μονάδας τα δύο σφάλματα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Από τα προηγούμενα γίνεται φανερή η ιδιαίτερη σημασία του καθορισμού της ακρίβειας προσέγγισης στην πραγματική τιμή του αριθμού. Αν ο αριθμός βρίσκεται κοντά στη μονάδα, η ακρίβεια προσέγγισης μπορεί να οριστεί είτε με το απόλυτο είτε

με το σχετικό σφάλμα. Για μεγάλους αριθμούς, το σχετικό σφάλμα αποτελεί καλύτερο οδηγό προσέγγισης στην πραγματική τιμή του αριθμού, ενώ για πολύ μικρούς αριθμούς, σημασία έχει το απόλυτο σφάλμα. Στην περίπτωση όμως αυτή, ο αριθμός των ψηφίων της διακριτής εκπροσώπησης του αριθμού στον υπολογιστή έχει ιδιαίτερη βαρύτητα.

Στην συνέχεια αναφέρονται οι διάφορες πηγές σφαλμάτων που οδηγούν στην διαφοροποίηση της τιμής υπολογισμού από την ακριβή τιμή.

#### ■ Προσέγγιση αριθμών

Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των αριθμών που είναι ακριβείς και εκείνων που είναι προσεγγιστικοί. Ακριβείς αριθμοί είναι εκείνοι που αντιπροσωπεύονται με ένα σύμβολο, π.χ. όλοι οι ακέραιοι, όλα τα κλάσματα που εκφράζονται ως πηλίκο ακεραίων καθώς και οι αριθμοί  $\pi$ ,  $e$ .

#### ■ Σφάλματα από στρογγυλοποίηση

Η παράσταση στον υπολογιστή αριθμών με περιορισμένο αριθμό ψηφίων δημιουργεί σφάλματα στην εκτέλεση αριθμητικών πράξεων, ακόμη και στην περίπτωση που οι αριθμοί είναι ακριβείς.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι στρογγυλοποίησης, είτε αγνοώντας όσα ψηφία του αριθμού δεν μπορούν να παρασταθούν από μια θέση στη μνήμη του υπολογιστή είτε με συμμετρική στρογγυλοποίησης. Στην πρώτη μέθοδο το σχετικό σφάλμα είναι

$$\frac{\sigma_x}{x} = 10^{-t+1}$$

$$\frac{\sigma_x}{x} = \frac{1}{2} 10^{-t+1}$$

όπου  $t$  ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων που ο αριθμός παρίσταται στον υπολογιστή. Συνήθως οι Η/Υ αποθηκεύουν τους αριθμούς σε δυαδική μορφή χρησιμοποιώντας 32

δυναμικά ψηφία (bits) ή 4 bytes (1 byte=8bits). Το σφάλμα στρογγυλοποίησης στον 32 bit υπολογιστή είναι  $3 \cdot 10^{-8}$ .

#### ■ Σφάλματα αρχικών ή οριακών τιμών

Αυτά είναι σφάλματα στις τιμές των δεδομένων που εισάγονται στον υπολογιστή και που προέρχονται από αβεβαιότητα της φυσικής κατάστασης των πραγμάτων (π.χ. θερμοκρασία). Μία φυσική μέτρηση, όπως η απόσταση ή η ταχύτητα δεν μπορεί να είναι γνωστή παρά μόνο με προσέγγιση, ανάλογα με το πειραματικό σφάλμα. Η αβεβαιότητα λοιπόν στα δεδομένα εισόδου μεταφέρεται και στη λύση του προβλήματος και στο τέλος η αβεβαιότητα αυτή γίνεται μεγαλύτερη της αρχικής με προσθήκη σφαλμάτων από άλλες πηγές.

#### ■ Σφάλματα αποκοπής

Τα σφάλματα αυτά προέρχονται από την προσέγγιση μιας συνάρτησης από λίγους μόνον όρους του αναπτύγματος της σε σειρά Taylor. Έστω η συνάρτηση  $f(x)$  με  $(n+1)$  συνεχείς παραγώγους στο διάστημα  $(a,b)$ . Τότε μπορεί να παρασταθεί με σειρά Taylor της μορφής

$$f(x) = f(a) + \frac{(x-a)}{1!} f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2!} f''(a) + \dots + \frac{(x-a)^n}{n!} f^{(n)}(a) + \frac{(\xi-a)^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi)$$

όπου  $a < \xi < b$

Αν η  $f(x)$  προσεγγισθεί από το άθροισμα των πρώτων  $(n+1)$  όρων τότε γίνεται ένα σφάλμα προσέγγισης στην  $f(x)$  από την αποκοπή των υπολοίπων όρων της σειράς, το δε σφάλμα αντιπροσωπεύεται από τον τελευταίο όρο που καλείται υπόλοιπο.



### 3.5 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Σημαντική φροντίδα πρέπει να λαμβάνεται στην αριθμητική ανάλυση ώστε ένα σφάλμα  $\sigma$  ένα σημείο της διαδικασίας εκτέλεσης υπολογισμών να μη μεταφέρεται στις επόμενες πράξεις αυξανόμενο, π.χ. η αφαίρεση δύο σχεδόν ίσων αριθμών είναι μία ακραία περίπτωση διότι ακόμα και αν οι δύο αριθμοί έχουν μικρό σφάλμα, το σχετικό σφάλμα της διαφοράς μπορεί να γίνει μεγάλο, κι αυτό μπορεί να μεταδοθεί στις παραπέρα αριθμητικές πράξεις. Συνοπτικά αναφέρονται στη συνέχεια τρόποι μετάδοσης σφάλματος στις διάφορες αριθμητικές πράξεις.

#### Απόλυτο σφάλμα

$$\sigma_{x+y} = \sigma_x + \sigma_y$$

$$\sigma_{x-y} = \sigma_x + \sigma_y$$

$$\sigma_{xy} = x \sigma_y + y \sigma_x$$

$$\sigma_{x/y} = \frac{\sigma_x}{y} + \frac{x \sigma_y}{y^2}$$

#### Σχετικό σφάλμα

$$\frac{\sigma_{x+y}}{x+y} = \frac{x}{x+y} \frac{\sigma_x}{x} + \frac{y}{x+y} \frac{\sigma_y}{y}$$

$$\frac{\sigma_{x-y}}{x-y} = \frac{x}{x-y} \frac{\sigma_x}{x} + \frac{y}{x-y} \frac{\sigma_y}{y}$$

$$\frac{\sigma_{xy}}{xy} = \frac{\sigma_x}{x} + \frac{\sigma_y}{y}$$

$$\frac{\sigma_{x/y}}{x/y} = \frac{\sigma_x}{x} + \frac{\sigma_y}{y}$$

Είναι φανερό ότι τα σφάλματα που οφείλονται στην στρογγυλοποίηση επαυξάνονται κατά την διαδικασία εκτέλεσης πράξεων, διότι αυτά που εμπεριέχονται στους δύο αριθμούς ( από εκτέλεση προηγούμενης πράξης) σταθμιστικά προστίθενται και μεταφέρονται στην επόμενη αριθμητική πράξη. Στην χειρότερη περίπτωση, όταν το σφάλμα επαυξάνεται αθροιστικά προς την ίδια κατεύθυνση, μετά από  $N$  αριθμητικούς υπολογισμούς που ο κάθε έχει σφάλμα  $\epsilon$ , το συνολικό σφάλμα γίνεται  $N\epsilon$ . Συνήθως

όμως τα σφάλματα μεταφέρονται με τυχαίες διαδικασίες, οπότε το συνολικό σφάλμα γίνεται μόνο  $\sqrt{N\varepsilon}$ .

### 3.6 Νόμοι που διέπουν την Μηχανική των Ρευστών

#### 3.6.1 Η εξίσωση της διατήρησης της μάζας

Για ένα ροϊκό στοιχείο η εξίσωση διατήρησης της μάζας εκφράζεται από την πρόταση:

*Η ροή μάζας διαμέσου ενός ροϊκού στοιχείου παραμένει σταθερή*

Μαθηματικά αυτό εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0$$

η οποία είναι γραμμένη σε συμπαγή μορφή και αφορά περιπτώσεις μη-μόνιμης, τρισδιάστατης συμπιεστής ροής και αναπτύσσεται στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Η εξίσωση συνέχειας αποτελεί μια από τις θεμελιώδεις εξισώσεις περιγραφής ενός ροϊκού προβλήματος και η χρήση της είναι επιβεβλημένη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές που συναντά κανείς.

#### 3.6.2 Η εξίσωση διατήρησης της ορμής

Ο 2<sup>ος</sup> Νόμος του Νεύτωνα όταν εφαρμόζεται για κίνηση ρευστών, αναφέρεται στη μεταβολή της ορμής του ρευστού και τη συσχετίζει με το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό.

**Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός ροϊκού στοιχείου ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό**

Μαθηματικά, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής για ένα ροϊκό στοιχείο δίνεται από τις ολικές παραγωγίσεις των τριών συνιστωσών των ταχυτήτων,  $\rho \frac{Du}{Dt}$ ,  $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ,  $\rho \frac{Dw}{Dt}$ . Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα ροϊκό στοιχείο είναι οι δυνάμεις λόγω πίεσης και ιξώδους καθώς και οι τυχόν εξωτερικές δυνάμεις εξαιτίας της βαρύτητας, της φυγοκέντρου, της επιτάχυνσης Coriolis και άλλα. Κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση αυτών των δυνάμεων, συνήθως οι δυνάμεις πίεσεως και ιξώδους διαχωρίζονται από τις υπόλοιπες και ενσωματώνονται με τις μεταβολές τους στη γενική εξίσωση μεταφοράς της ορμής, ενώ οι υπόλοιπες αποτελούν ένα ξεχωριστό όρο πηγής που αναφέρεται σε όλο το ροϊκό στοιχείο. Αυτό συμβαίνει διότι οι πρώτες αφορούν και υπολογίζονται συνήθως στις επιφάνειες ενός στοιχειώδους τμήματος της ροής, ενώ οι άλλες σε όλο το ροϊκό στοιχείο. Η μαθηματική έκφραση του 2<sup>ου</sup> Νόμου του Νεύτωνα για ρευστά δίνεται από τη σχέση:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + s_x$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + s_y$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + s_z$$

Όπως μπορεί να δει κανείς, οι εξισώσεις είναι εκφρασμένες για τις τρεις διευθύνσεις του χώρου προκειμένου να εκφραστεί η μεταβολή της ορμής για κάθε διεύθυνση. Επίσης έχουν δοθεί οι εκφράσεις για τις μεταβολές των δυνάμεων επιφανείας (που είναι η πίεση αλλά και οι τάσεις που ασκούνται πάνω στις επιφάνειες του ροϊκού στοιχείου) ενώ οι υπόλοιπες δυνάμεις έχουν ενσωματωθεί σε έναν όρο πηγής  $S$  για κάθε μία από τις διευθύνσεις. Στην εξίσωση αυτή όμως δεν έχουν δοθεί οι ακριβείς εκφράσεις για τον υπολογισμό των τάσεων.

Οι εξισώσεις μεταφοράς της ορμής είναι ό,τι πιο γενικό υπάρχει για να περιγραφεί η κίνηση ενός ρευστού. Όμως αν σε κάθε περίπτωση ροής κάνουμε συγκεκριμένες παραδοχές, δημιουργούμε ένα πιο απλό πρόβλημα. Έτσι, θα δούμε παρακάτω, για ασυμπίεστη ιδανική ροή ότι οι εξισώσεις παίρνουν τη γενική μορφή των εξισώσεων του Euler.

### 3.6.3 Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας σε ένα ροϊκό στοιχείο εκφράζεται από την παρακάτω πρόταση:

*Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ενός ροϊκού στοιχείου ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της θερμικής του ενέργειας + το καθαρό έργο που αποδίδεται ή προσδίδεται στο ρευστό.*

Η μαθηματική έκφραση αυτής της πρότασης είναι:

$$\rho \frac{DI}{Dt} = -p \operatorname{div}(U) + \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial w}{\partial z} + s,$$

Σε αυτή την εξίσωση,  $I$  είναι η εσωτερική ενέργεια του ροϊκού στοιχείου και  $k$  ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. Το  $S$  αποτελεί το αλγεβρικό άθροισμα των έργων που ασκούνται προς ή από το ροϊκό πεδίο.



Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας του ρευστού δίνεται σε πολλές μορφές ανάλογα με το είδος της ροής και τις θερμοδυναμικές παραδοχές που κάνουμε για αυτή. Μια κλασική έκφραση είναι αυτή της διατήρησης της ενθαλπίας του ρευστού, που χρησιμοποιείται κυρίως για τις συμπιεστές ροές. Τέλος, στην εξίσωση αυτή παρατηρεί κανείς και την εισαγωγή της θερμοκρασίας  $T$  του ρευστού. Προκειμένου να είναι εφικτή μια σύνδεση αυτής με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του ρευστού, χρησιμοποιείται η καταστατική εξίσωση που αποτελεί μια συνάρτηση της πίεσης με πεδίο ορισμού την πυκνότητα και τη θερμοκρασία  $P=P(\rho, T)$ .

Για την περίπτωση ιδανικών αερίων, η εξίσωση που δίνεται είναι:

$$P=\rho RT$$

### 3.6.4 Οι εξισώσεις Navier- Stokes

Οι εξισώσεις Navier- Stokes εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία ροής ρευστών. Πρόκειται για δεύτερης τάξης, μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες εκφράζουν ουσιαστικά τον ισολογισμό των αδρανειακών δυνάμεων, των δυνάμεων πίεσης και των εσωτερικών δυνάμεων τριβής μέσα σε ένα κινούμενο ρευστό. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη διαφορική διατύπωση του θεωρήματος της ορμής του Newton όπως είναι γνωστό από την κλασική μηχανική

$$F = \frac{\partial(mu)}{\partial t}$$

και το οποίο συνδέει την κινηματική με τη δυναμική κατάσταση του ρευστού.

Η επίλυση των εξισώσεων αυτών γίνεται συνήθως, αφού γίνουν κάποιες παραδοχές. Αυτό όμως έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Στην εξίσωση διατήρησης της ορμής εμφανίζεται ως άγνωστοι οι εμφανιζόμενες τάσεις, που αποτελούν και μέρος των επιφανειακών δυνάμεων σε ένα ροϊκό στοιχείο. Η μορφή αυτών των τάσεων είναι ανάλογη με κάποια μοντέλα που εισάγονται και σχετίζονται άμεσα με το ιξώδες της ροής. Στα περισσότερα είδη ρευστών οι τάσεις εξαιτίας του ιξώδους εκφράζονται σαν συναρτήσεις της τοπικής παραμόρφωσης του ρευστού. Στην περίπτωση των τριών διαστάσεων η παραμόρφωση αυτή αναλύεται σε μια γραμμική παραμόρφωση και σε μια παραμόρφωση επί του συνόλου του όγκου του ροϊκού πεδίου. Για να είναι εφικτή η μοντελοποίηση αυτών των [σελίδα 10](#)

### 3.7 Τυρβώδης ροή

Παρακάτω γίνεται μια ανάπτυξη της έννοιας της τύρβης. Αναπτύσσονται οι εξισώσεις Navier- Stokes για τυρβώδεις ροές και αναφέρονται μερικά κλασσικά μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές μέσα από τα υπολογιστικά εργαλεία.

#### 3.7.1 Η έννοια της τύρβης

Έως τώρα δεν εξετάστηκε καθόλου η έννοια της τύρβης αλλά μόνο οι περιπτώσεις στρωτών ροών. Είναι γνωστό από τη μηχανική ρευστών ότι στη φύση η πλειοψηφία των ροών χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης. Η έννοια της τύρβης μπορεί σε πρώτο στάδιο να οριστεί μέσα από μια διακύμανση της τοπικής ταχύτητας του ρευστού που παρατηρείται για συγκεκριμένο σημείο σε ένα ροϊκό πεδίο. Ο ορισμός αυτός μπορεί να παραπέμψει κάποιον στη μη- μόνιμη ροή δεδομένου ότι οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις είναι σαφώς συναρτήσεις του χρόνου.

Κατά την εξέλιξη της μετρητικής τεχνολογίας, από το 1920 και μετά, εμφανίστηκαν όργανα μέτρησης ταχύτητας, τα οποία είχαν υψηλή ακρίβεια και ήταν σε θέση να μετρήσουν με πολύ καλή απόκριση τις ελάχιστες διακυμάνσεις της ροής. Παράλληλα, οι μέθοδοι οπτικοποίησης της ροής γινόντουσαν ολοένα και πιο αποδοτικές. Τα δύο αυτά συνέκλιναν στην παρατήρηση ότι τελικά μια ροή μπορεί να δώσει ένα εύρος τιμών ταχυτήτων γύρω από μία μέση τιμή.

Κατά τη στρωτή ροή, η μετρούμενη ταχύτητα είναι μία ευθεία γραμμή χωρίς καμία διαταραχή. Στη φάση της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη παρατηρούνται κάποιες τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας αλλά στο μεγαλύτερο εύρος η μετρούμενη ταχύτητα είναι ευθεία γραμμή. Στην τρίτη περίπτωση μειώνονται ισχυρές διαταραχές με κάποιο εύρος και παράλληλα μπορεί να εξαχθεί μία μέση τιμή γύρω από την οποία κινούνται αυτές οι διαταραχές. Η ροή όντως φαίνεται ότι είναι μη-μόνιμη. Αλλά αυτό ισχύει για μια πολύ μικρή χρονική κλίμακα, η οποία σε κάθε περίπτωση είναι τόσο μικρή ώστε στη μακροκλίμακα της ροής που μπορεί να ενδιαφέρει τον μηχανικό, να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Τελικά η τυρβώδης ροή, σε πραγματική κλίμακα χρόνου, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μόνιμη ροή. Το ουσιαστικό χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει τέτοια υφή ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η στατιστική προκειμένου να εξαχθούν μεγέθη όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, το εύρος, η συσχέτιση κ.α.

### 3.7.2 Τα χαρακτηριστικά της τύρβης

Ένας πρώτο ορισμός της τύρβης δόθηκε από τον Reynolds και αναφέρθηκε από τον Von Karman το 1937:

*Τύρβη είναι η ακανόνιστη κίνηση που εν γένει εμφανίζεται στα ρευστά όταν ροή αυτών διέρχεται κοντά σε στερεές επιφάνειες ή ακόμα όταν γειτονικά ρεύματα του ίδιου ρευστού αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.*

Εδώ υπήρξε μία πρώτη ένδειξη της διαταραχής που εισάγει μία στερεή επιφάνεια μέσω του οριακού στρώματος που αποτελεί άμεση απόρροια του ιξώδους. Σαφώς και δε σημαίνει αυτό ότι πάντα τα οριακά στρώματα είναι τυρβώδη. Υπάρχει όμως μία περίπτωση το στρωτό οριακό στρώμα για κάποιο λόγο (π.χ. αποκόλληση ή φυσική αστάθεια) να γίνει τυρβώδες και στη συνέχεια η διαταραχή αυτή να διαδοθεί σε όλο το ροϊκό πεδίο με αποτέλεσμα την πλήρη τυρβώδη ροή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η τύρβη είναι άμεσα συνυφασμένη με τον αριθμό Reynolds. Είναι βαθιά αποτυπωμένη σε όλους η χαρακτηριστική τιμή του 2300 για σωλήνες που αποτελεί και μια ένδειξη της μεταπήδησης σε τυρβώδη ροή. Για

τον αριθμό Reynolds θα πρέπει να αναφερθούν τα εξής: α) ο αριθμός αυτός ισχύει αποκλειστικά και μόνο για σωλήνες, δεν είναι αυστηρά καθορισμένος και σίγουρα επιδέχεται κάποιες αποκλίσεις. Παράλληλα είναι ορισμένος βάσει της υδραυλικής διαμέτρου του σωλήνα. Έτσι για άλλου είδους ροή (π.χ. για ροή πάνω από επίπεδη πλάκα) έχουμε άλλο αριθμό Re. β) είναι δυνατόν ροές με μεγάλο αριθμό Re να είναι στρωτές γιατί κατέστη δυνατόν να αποφευχθεί οποιαδήποτε διαταραχή. Αντίθετα, μπορεί να υπάρξουν ροές που αντιστοιχούν σε χαμηλό αριθμό Re και να είναι τυρβώδες.

Ο Hinze το 1975 έδωσε έναν πιο ολοκληρωμένο ορισμό για την τύρβη:

*Η τυρβώδης ροή είναι μία «ανόμαλη» κατάσταση κίνησης, όπου οι διάφορες παράμετροι της ροής έχουν μία τυχαία μεταβολή σε σχέση με το χρόνο αλλά και με τον χώρο, τέτοιες που είναι δυνατή η εξαγωγή μέσων τιμών μέσω στατιστικής.*

Ο βασικός λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτή η ακανόνιστη κίνηση είναι η ύπαρξη μικρών δομών δινών. Αυτές είναι υπαίτιες για την μεταφορά των διαταραχών από το ένα στρώμα του ρευστού στο άλλο και για τη μεταφορά κινητικής ενέργειας μέσω της περιστροφής τους. Παράλληλα, λόγω της ακανόνιστης κίνησης αλλά και της περιστροφής, η αλληλεπίδραση μεταξύ τους εισάγει τάσεις, τις λεγόμενες τυρβώδεις τάσεις, οι οποίες συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τάσεις της στρωτής ροής. Το μέγεθος αυτών των δινών ποικίλει. Κατά αυτόν τον τρόπο ορίζονται πολλές κλίμακες τύρβης, η κάθε μία εκ των οποίων έχει μία μέση διάσταση και συνεισφέρει στο φάσμα της ενέργειας της τύρβης.

### 3.7.2.1 Αστάθεια και μη-γραμμικότητα

Η τυρβώδης ροή αναπτύσσεται ως μία αστάθεια της στρωτής ροής. Παράλληλα, οι εξισώσεις που περιγράφουν την τυρβώδη ροή εισάγουν μη-γραμμικούς όρους, οι οποίοι καθιστούν εξαιρετικά δύσκολη την επίλυσή τους. Ιδιαίτερες τεχνικές απαιτούνται για την επίλυση απλών ροών.



### 3.7.2.2 Ύπαρξη δινών

Η τύρβη είναι αποκλειστικά συνδεδεμένη με τρισδιάστατες ροές. Οι δίνες που αποτελούν τα βασικά κομμάτια του μηχανισμού εξέλιξης της διαδίδονται με έναν μηχανισμό επιμήκυνσής τους κατά τη διεύθυνση κάθετα της περιστροφής τους. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση της τύρβης με δισδιάστατη θεώρηση απέχει αρκετά από την πραγματικότητα, με αποτέλεσμα οι λύσεις που δίνουν οι μοντελοποιήσεις της ροής να κρίνονται απλά ικανοποιητικές για βιομηχανικές εφαρμογές μηχανικού. Σε επίπεδο έρευνας χρήζουν περισσότερης ακρίβειας.

### 3.7.2.3 Ύπαρξη στατιστικών στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε, η τύρβη για να μοντελοποιηθεί σωστά απαιτείται μία ρεαλιστική θεώρηση της χρονικής της μικροκλίμακας, η οποία ουσιαστικά είναι και ο μοναδικός τρόπος να αποτυπωθεί σωστά σαν πρόβλημα. Λόγω όμως της μέχρι πρότινος αδυναμίας των υπολογιστών να έχουν υψηλότερες ταχύτητες επεξεργασίας υπολογισμών, οι εξισώσεις περιγραφής της τύρβης γίνεται με βάση τη στατιστική και με τη χρήση συγκεκριμένων μοντέλων τύρβης, τα οποία και πάλι δίνουν απλά μια ικανοποιητική λύση.

### 3.7.3 Στατιστική επεξεργασία κατά Reynolds

Στην προσπάθεια να γίνει η μεταπήδηση από τις στιγμιαίες τιμές των παραμέτρων της ροής στις μέσες τιμές, μια ιδιαίτερη τεχνική «μέσης τιμής» στην παράμετρο του χρόνου μπορεί να εφαρμοστεί. Έτσι για ασυμπιεστη ροή μπορούν να γραφτούν οι ταχύτητες και οι πιέσεις σαν ένα άθροισμα μίας μέσης τιμής και μιας διακύμανσης:

$$\vec{u}(x, y, z, t) = \vec{u}(x, y, z, t) + \vec{u}'(x, y, z, t)$$

$$p(x, y, z, t) = \overline{\overline{p}}(x, y, z, t) + p'(x, y, z, t)$$

όπου οι μπάρες δηλώνουν μέση τιμή και οι τόνοι διακυμάνσεις. Η τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας δίδεται από τη σχέση:

$$\overrightarrow{u}(x, y, z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(x, y, z, t) dt$$

Από τη Στατιστική είναι επίσης γνωστό ότι:

$$\overline{\overrightarrow{u}}(x, y, z) = \overrightarrow{u}(x, y, z)$$

$$\overline{\frac{\partial p}{\partial x}} = \frac{\partial \overline{p}}{\partial x}, \quad \overline{\frac{\partial u}{\partial x}} = \frac{\partial \overrightarrow{u}}{\partial x}$$

Επίσης για οποιαδήποτε ποσότητα  $\phi$  και  $\psi$  ισχύει:

$$\overline{c_1 \phi + c_2 \psi} = c_1 \overline{\phi} + c_2 \overline{\psi}$$

και τέλος:

$$\overline{\phi \psi} = \overline{(\overline{\phi} + \phi')(\overline{\psi} + \psi')} = \overline{\phi \psi + \phi \psi' + \psi \phi' + \phi' \psi'} = \overline{\phi \psi} + \phi' \psi'$$

Το επόμενο βήμα είναι η αντικατάσταση των ορισμένων στιγμιαίων μεγεθών στις εξισώσεις Navier Stokes, όπως έχουν δοθεί μέχρι τώρα και η εφαρμογή των προηγούμενων σχέσεων της στατιστικής. Η τελική μορφή των εξισώσεων Navier Stokes είναι για τις τρεις συνιστώσες:

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f_x + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \left( -\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right)$$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + f_y + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) + \left( -\frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right)$$

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + f_z + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) + \left( -\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right)$$

Η ουσιαστική διαφορά πλέον από τις εξισώσεις για στρωτή ροή είναι η εμφάνιση των μέσων τιμών των συσχετίσεων των στιγμιαίων διακυμάνσεων των ταχυτήτων. Οι όροι αυτοί στην ουσία αποτελούν την μεταβλητότητα από τη μέση τιμή και ονομάζονται και τάσεις Reynolds διότι στην ουσία απορροφούν ή παράγουν ενέργεια από τη ροή ομοιάζοντας με τις κλασσικές τάσεις εξαιτίας του ιξώδους (εκφρασμένο εδώ σαν κινηματικό ιξώδες αφού η πυκνότητα ενσωματώθηκε στο δεξί σκέλος της εξίσωσης).

Αν εξετάσει κανείς τις προηγούμενες εξισώσεις υπό το πρίσμα μοντελοποίησης θα παρατηρήσει ότι υπάρχει ένα πρόβλημα όσον αφορά την εύρεση των τιμών των τάσεων Reynolds. Και αυτό γιατί παρόλο που έγινε αναγωγή στις μέσες τιμές της ροής, εξακολουθεί να υπάρχει η χροιά των στιγμιαίων συσχετίσεων υπό το πρίσμα της μεταβλητότητας που εισάγουν οι τάσεις Reynolds. Το πρόβλημα αυτό επιχειρήθηκε να επιλυθεί με τη χρήση των μοντέλων τύρβης.

### 3.7.4 Η μοντελοποίηση της τύρβης.

Εάν κάποιος έθετε το πρόβλημα της επίλυσης των εξισώσεων Navier- Stokes σε έναν μαθηματικό, τότε με την στεγνή λογική των μαθηματικών θα προσπαθούσε να κάνει μία απευθείας επίλυση με τη χρήση κάποιας τεχνικής διακριτοποιώντας αυτές στην χρονική μικροκλίμακα της τύρβης, τάξης nsec ένεκα πάντα της ύπαρξης των τάσεων Reynolds. Ή με μία ακόμη πιο στεγνή αντίληψη θα προσπαθούσε να επιλύσει τις εξισώσεις ξεκινώντας από την πρωταρχική εξίσωση:

$$\begin{aligned}\bar{u}(x, y, z, t) &= \vec{u}(x, y, z, t) + u'(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) &= \bar{p}(x, y, z, t) + p'(x, y, z, t)\end{aligned}$$

και επαναδιατυπώνοντας το ΘMR (Θεώρημα Μεταφοράς Reynolds) με τη χρήση αυτής. Η απευθείας αυτή επίλυση- προσομοίωση γίνεται (DNS- Direct Numerical Simulation) αλλά απαιτεί υπολογιστές τερατώδους ισχύος και ροές προς επίλυση αρκετά κλασσικές και πολύ απλής γεωμετρίας.

Ο μηχανικός στα προβλήματα που αντιμετωπίζει λαμβάνει πάντοτε το χρόνο επίλυσης και το κόστος επίλυσης. Προτιμά να έχει μία ικανοποιητική λύση με κάποιες καλές παραδοχές σε ένα δύσκολο πρόβλημα σε μικρό χρόνο που ουσιαστικά θα αυξήσει την παραγωγικότητά του, παρά μία τέλεια λύση σε κυριολεκτικά ουτοπικό χρόνο για ένα πρόβλημα που μόνο σε συνθήκες εργαστηρίου μπορεί να υπάρξει. Για αυτόν τον λόγο εμφανίστηκαν τα μοντέλα τύρβης τα οποία και κατέστησαν την προσομοίωση ένα ρεαλιστικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού.

### 3.7.5 Τα γραμμικά μοντέλα τύρβης.

Ο σκοπός να μοντελοποιηθούν οι τάσεις Reynolds οδήγησε σε μία πληθώρα μοντέλων που εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Το κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιεί μία, δύο ή και παραπάνω εξισώσεις οι οποίες σε συνδυασμό με τις τυρβώδεις Navier- Stokes δίδουν ικανοποιητικές λύσεις.



Μία κατηγορία μοντέλων είναι αυτή που θεμελιώνεται από την υπόθεση του Boussinesq η οποία δίδει μία εξίσωση για την προσομοίωση των τάσεων Reynolds υπό την χροιά των κλασσικών τάσεων που εμφανίζονται στη στρωτή ροή. Σε αυτή την εξίσωση ισχύει:

$$\tau_{ij} = -\rho u_i' u_j' = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k$$

όπου  $\nu_t$  είναι το λεγόμενο ιξώδες της τύρβης (δεν μετράται γιατί δεν είναι φυσικό μέγεθος αλλά υπολογιστικό) και  $k$  είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης η οποία θα οριστεί παρακάτω. Ουσιαστικά μεταβαίνει κανείς από τις μέσες τιμές των στιγμιαίων συσχετίσεων στις μέσες τιμές της ροής. Από τη σχέση αυτή φαίνεται επιπροσθέτως ότι απαιτείται μία σχέση για τον υπολογισμό του ιξώδους της τύρβης και της κινητικής ενέργειας της τύρβης.

Πριν δοθούν οι ορισμοί των δύο τελευταίων παραμέτρων της ροής, πρέπει να σημειωθεί ότι η υπόθεση αυτή είναι πραγματικό εργαλείο στην προσομοίωση της τύρβης αλλά έχει ένα βασικό μειονέκτημα: στηρίζεται στην αρχή του ισότροπου ιξώδους της τύρβης κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα διότι αυτό προδιαγράφεται άμεσα από τους ρυθμούς παραμόρφωσης της ροής στις τρεις κατευθύνσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο χάνεται και η έντονη τριδιάστατη υφή της τύρβης και οι λύσεις που δίδονται κρίνονται οριακά ικανοποιητικές. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, διάφοροι ερευνητές δώσανε διάφορες μορφές στις εξισώσεις συγκεκριμένες ροές οι οποίες καθιστούσαν για το λόγο αυτό τα μοντέλα να έχουν έλλειψη «παγκοσμιοποίησης» εφαρμογών.

Επιστρέφοντας πάλι στους ορισμούς των μεγεθών των μοντέλων τύρβης, η κινητική ενέργεια της τύρβης ορίζεται σαν:

$$k = \frac{1}{2} (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2)$$

είναι ένα μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί αλλά και να υπολογιστεί. Δεδομένου ότι αποτελεί ιδιότητα της ροής, μπορεί να καταστρωθεί για αυτό μία εξίσωση μεταφοράς κατά τα πρότυπα της Navier- Stokes και υπό το πρίσμα της ενέργειας που καταστρέφεται αλλά και παράγεται.

Το ιξώδες της τύρβης σε έναν πρωτογενή τύπο δίδεται από τη σχέση:

$$\nu_t = 0.09 \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Το  $\varepsilon$  είναι ο αριθμός διασποράς της τύρβης και συνήθως τίθεται ανάλογο του πηλίκου  $k^{3/2}/l$  όπου  $l$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας της τύρβης. Και για το  $\varepsilon$  υπάρχει μία εξίσωση μεταφοράς.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά της κινητικής ενέργειας της τύρβης και του ρυθμού διασποράς της είναι:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -u_i' u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \nu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j}]$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} u_i' u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \nu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}]$$

Όπου  $C_{\varepsilon 1}=1,44$   $C_{\varepsilon 2}=1,92$   $\sigma_k=1,0$   $\sigma_\varepsilon=1,3$

Οι σταθερές αυτές υπολογίστηκαν για συγκεκριμένες ροές και επιδέχονται πληθώρα αλλαγών για διάφορες ροές που εφαρμόζονται αυτές οι εξισώσεις. Για το λόγο αυτό εξηγείται και η πληθώρα των μοντέλων τύρβης. Εναπόκειται στην εμπειρία του μηχανικού για την επιλογή του μοντέλου που θα είναι ανάλογα με το είδος της ροής που θα πρέπει να επιλύσει.

Στην εξίσωση μεταφοράς του  $k$  το αριστερό σκέλος είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τις εξισώσεις ορμής, με τη διαφορά ότι η μεταβαλλόμενη ποσότητα είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης. Στο δεξί σκέλος διαφαίνεται η διασπορά της με το  $\varepsilon$ , η διάχυσή

της με τον τελευταίο όρο όπου σε αυτόν τον μηχανισμό συμμετέχει και το φυσικό ιξώδες της ροής μαζί με ιξώδες της τύρβης. Τέλος, ο όρος  $u', \bar{u}', \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  αποτελεί την λεγόμενη παραγωγή της τύρβης, που αποτελεί στην ουσία τη συσχέτιση των τάσεων Reynolds με τις κλίσεις της ταχύτητας. Όπου εμφανίζεται κλίση ταχύτητας (οριακά στρώματα, ροές που υπόκεινται σε κλίση ταχύτητας κλπ) εμφανίζεται και παραγωγή κινητικής ενέργειας της τύρβης. Ο όρος παραγωγής πολλές φορές εμφανίζεται στην βιβλιογραφία και ως  $P_\tau$ .

Αντίστοιχα για το ρυθμό διασποράς της τύρβης έχουμε την παραγωγή διασποράς (πάντα για το δεξί σκέλος), την διασπορά της διασποράς και την διάχυση της διασποράς λόγω φυσικού και τυρβώδους ιξώδους.

Το μοντέλο που αναφέρθηκε αποτελεί το γνωστό ως κ-ε και είναι το πιο διαδεδομένο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Κάθε εμπορικό πακέτο λογισμικού που σέβεται τον εαυτό του περιέχει πάντα και αυτό το μοντέλο, όχι τόσο για τα ικανοποιητικά σχετικά αποτελέσματα που δίνει όσο για την ευστάθειά του σε μία επαναληπτική διαδικασία επίλυσης. Υπάρχουν φυσικά και άλλα μοντέλα, τα οποία διαφοροποιούνται κυρίως ως την χρήση μίας άλλης μεταβλητής αντί του ε όπως είναι το ω που είναι ο ειδικός ρυθμός διασποράς.

Τα εναλλακτικά μοντέλα, εκτός από την καλύτερη συμπεριφορά σε κάποια είδη ροών έχουν κάποιες φορές έναν πιο εύχρηστο τρόπο εισαγωγής οριακών συνθηκών για τις τιμές των τυρβωδών παραμέτρων σε περιοχές τοιχωμάτων.

### 3.7.6 Τα μη γραμμικά μοντέλα τύρβης

Στην προσπάθειά τους οι μοντελιστές να υπερπηδήσουν τον σκόπελο της αρχής του Boussinesq υπό το πρίσμα της ανισοτροπίας της τύρβης, επικεντρώθηκαν σε μια ανάπτυξη της σχέσης του Boussinesq με επιπλέον όρους προκειμένου να ενσωματωθούν οι τανυστές παραμόρφωσης γωνιακής παραμόρφωσης και παραμόρφωσης όγκου. Η λογική ήταν ότι εφόσον υπάρχουν διαφορετικές παραμορφώσεις σε διαφορετικές κατευθύνσεις της ροής, οι τάσεις Reynolds πρέπει να αισθάνονται αυτές τις παραμορφώσεις. Έτσι, την τελευταία δεκαετία γίνεται μια ευρεία χρήση της παρακάτω έκφρασης των τάσεων Reynolds:

$$\frac{u'_i u'_j}{k} = \frac{2}{3} \delta_{ij} - \frac{\nu_t}{k} S_{ij} + c_1 \frac{\nu_t}{\varepsilon} (S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{kl} S_{kl}) + c_2 \frac{\nu_t}{\varepsilon} (\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}) +$$

$$c_3 \frac{\nu_t}{\varepsilon} (\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl}) + c_4 \frac{\nu_t k}{\varepsilon^2} (S_{ki} \Omega_{ij} + S_{ij} \Omega_{ki}) S_{kl} + c_5 \frac{\nu_t k}{\varepsilon^2} (S_{li} S_{kl} - \Omega_{li} \Omega_{kl}) S_{ij}$$

με  $C_1=-0,1$ ,  $C_2=0,1$ ,  $C_3=0,26$ ,  $C_4=-10 C_\mu^2$ ,  $C_5=-5 C_\mu^2$ ,  $C_\mu=0,09$

Και οι υπόλοιποι τανυστές ορισμένοι κατά τα γνωστά. Η έκφραση των τάσεων Reynolds για κάθε επίπεδο εξάγεται με την αποπομπή του  $K$  στο δεξί μέλος της εξίσωσης και την αντικατάσταση των δεικτών  $i,j$  στις κατευθύνσεις που απαιτείται.

Τα μοντέλα αυτά ουσιαστικά διαφοροποιούνται ως προς την έκφραση των τάσεων Reynolds ενώ κρατούν ίδιες τις εξισώσεις μεταφοράς του  $K$  και του  $\varepsilon$ . Δίδουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα αλλά το κόστος σε χρόνο υπολογισμών και σε μεγάλες αστάθειες είναι πολλές φορές τεράστιο.

Πέρα από τις απλές αναφορές που έγιναν στα συγκεκριμένα μοντέλα τύρβης υπάρχουν και άλλα μοντέλα τα οποία δεν στηρίζονται στην υπόθεση του ιξώδους της τύρβης. Αντά επιλύουν απευθείας τις τάσεις Reynolds με την χρήση 9 εξισώσεων (για τρεις διαστάσεις) μεταφοράς των τάσεων.

### 3.8 Διακριτοποίηση

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή ενός ρευστού είναι διαφορετικές εξισώσεις στις οποίες εμφανίζονται μικτών παραγωγίσεων. Για συγκεκριμένες συνθήκες-σχετικά απλές- τα μαθηματικά μπορούν να δώσουν λύσεις αλλά σε δυσκολότερες περιπτώσεις οι διαδικασίες επίλυσης είναι πολύπλοκες και αρκετές φορές ανέφικτες.

Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής δίνει λύσεις οι οποίες όμως δεν είναι ακριβείς αλλά προσεγγιστικές. Οι προσεγγιστικές αυτές λύσεις χρησιμοποιούν τη μέθοδο της διακριτοποίησης. Σύμφωνα με αυτή το διαφορικό και κατ' επέκταση η παράγωγος μιας συνάρτησης προσεγγίζεται με μικρές διαφορές. Όσο αυτές οι διαφορές τείνουν στο ελάχιστο τόσο και η προσέγγιση μιας εκφράσεως παραγώγου γίνεται πιο ακριβής.

Οι προσεγγιστικές λύσεις για ένα πρόβλημα δίνουν τιμές των μεγεθών που επιλύονται πάνω σε διακριτά σημεία του πεδίου ροής του ρευστού. Τα διακριτά σημεία ονομάζονται κόμβοι ενός πλέγματος και δημιουργούνται με συγκεκριμένο τρόπο επάνω στο πεδίο ροής. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των σημείων είναι η δεδομένη μεταξύ τους απόσταση για κάθε κατεύθυνση στο χώρο.

Τα βασικά στοιχεία που διακρίνονται σε αυτό το πλέγμα είναι:

- Υπάρχει ένας συγκεκριμένος τρόπος αρίθμησης των κόμβων που συνθέτουν το πλέγμα. Στη γενική περίπτωση χρησιμοποιούνται οι δείκτες  $i, j$  εφόσον έχουμε δύο διαστάσεις. Για ένα τυχαίο σημείο, έστω  $P$  ορίζονται το ζεύγος  $i, j$ . Γύρω από αυτό υπάρχουν τα γειτονικά σημεία του, τα οποία βάσει αυτού θα έχουν τις αριθμήσεις όπως φαίνονται στο σχήμα 1.
- Δύο γειτονικά σημεία θα έχουν απόσταση έστω  $\Delta x$  κατά τη  $x$ - διεύθυνση και  $\Delta y$  κατά την  $y$ - διεύθυνση. Στη γενική περίπτωση αυτές είναι διαφορετικές σε κάθε περιοχή και για κάθε διεύθυνση. Στην ειδική περίπτωση τα  $\Delta x$  μπορούν να θεωρηθούν ίσα μεταξύ τους και τα  $\Delta y$  επίσης ίσα μεταξύ τους. Σε πιο ειδική περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι όλες οι αποστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους.
- Σε κάθε σημείο υπάρχει και η προς εύρεση τιμή του πεδίου ροής. Επίσης για κάθε πλέγμα υπάρχει και η χωρική πληροφορία, δηλαδή ποιες είναι οι συντεταγμένες του στο χώρο, οπότε εύκολα συνάγεται ότι χρήζουν τα ζεύγη  $x(i, j)$  και  $y(i, j)$  για δύο διαστάσεις.

Στην πράξη, τα πλέγματα που προσομοιώνουν ένα πεδίο ροής για δύσκολα υπολογιστικά ρευστομηχανικά προβλήματα δεν είναι τόσο απλά. Προκειμένου να αποδοθούν πολύπλοκοι χώροι ροής τα πλέγματα διαμορφώνονται σε ιδιαίτερα σχήματα στα οποία δεν είναι δυνατόν να αποτελούνται ούτε από γραμμές που είναι κάθετες μεταξύ τους αλλά ούτε και από κόμβους που ισαπέχουν.

Αφού δημιουργηθούν οι κόμβοι του πλέγματος (σε πολύπλοκο ή μη πρόβλημα πεδίου ροής) το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της τεχνικής με την οποία θα επιλυθεί το



πρόβλημα. Για επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων υπάρχουν τρεις βασικές μεθοδολογίες:

- Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών
- Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

### 3.8.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι η βασική μέθοδος της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Στόχος αυτής της μεθόδου είναι η αντικατάσταση των μαθηματικών εκφράσεων των μερικών παραγωγίσεων μιας συνάρτησης με τις πεπερασμένες διαφορές.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην τεχνική του αναπτύγματος του Taylor. Σύμφωνα με αυτή τη τιμή μιας συνάρτησης σε κάποιο σημείο μπορεί να υπολογιστεί σε σχέση με ένα γειτονικό, γνωστής τιμής σημείο σύμφωνα με τη σχέση:

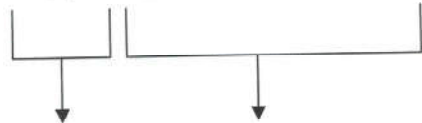
$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \dots + \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \frac{(\Delta x)^n}{n!} + \dots$$

Έτσι αφού είναι γνωστή η τιμή της συνάρτησης  $f(x)$  και υπολογίζεται η τιμή της στην απόσταση  $x + \Delta x$  βάσει των τιμών των παραγωγίσεων πρώτης, δεύτερης και ανώτερης τάξης. Με την ίδια λογική αλλά διαφορετικό συμβολισμό μπορεί να υπολογιστεί η τιμή  $u_{i,j}$  της ταχύτητας  $u$  ενός ρευστού σε μια επόμενη θέση από τον αρχικό κόμβο σε απόσταση  $\Delta x$ .

$$u_{i+1,j} = u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots$$

Η εξίσωση αυτή δίνει την ακριβή της τιμή  $u_{i+1,j}$  όταν αποτελείται από μια σειρά άπειρους όρους και το  $\Delta x$  τείνει στο μηδέν.

Η εξίσωση του αναπτύγματος Taylor μπορεί να επλυθεί ως προς την παράγωγο πρώτης τάξης που εμφανίζεται στο δεξί μέλος.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{\Delta x}{2} - \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{6} + \dots$$


Έκφραση πεπερασμένων διαφορών      Σφάλμα αποκοπής

Έτσι κατέστη η έκφραση μιας παραγωγίσσεως με τη μορφή μιας διακριτοποιημένης σχέσης από τιμές των ταχυτήτων σε δυο γειτονικούς κόμβους του πλέγματος. Συνηθίζεται να λέγεται ότι αυτή η έκφραση των πεπερασμένων διαφορών είναι ακρίβειας πρώτης τάξης. Η αποδεκτή παράσταση πεπερασμένων διαφορών όταν απαλείφονται οι επιπλέον όροι είναι η εξής:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Η ονομασία αυτής της έκφρασης πεπερασμένων διαφορών είναι πεπερασμένη διαφορά πρώτης τάξης ακρίβειας στην κατάντη διεύθυνση. Ονομάζεται στην κατάντη διεύθυνση διότι προκειμένου να υπολογιστεί η παράγωγος στον κόμβο  $i, j$  παίρνουμε τιμές από έναν κατάντη κόμβο.

Η αντίστοιχη ανάντη έκφραση δίδεται ως:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Συμπερασματικά, για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μπορούμε να πούμε:

Με τη χρήση του αναπτύγματος Taylor μπορούν να δοθούν οι εκφράσεις των πεπερασμένων διαφορών για τις παραγωγίσεις πρώτης τάξης. Έτσι μπορεί να έχει κανείς εκφράσεις ανάντη, κατάντη και κεντρώες. Ανάλογα με το σχήμα που επιλέγουμε εισάγουμε και ένα σφάλμα αποκοπής των υπολοίπων όρων Taylor. Το μικρότερο σφάλμα για έκφραση πεπερασμένων διαφορών της πρώτης παραγώγου έχει η κεντρώα έκφραση.

Ανακεφαλαιώνοντας τα περί υπολογιστικής ρευστομηχανικής, πρέπει να αναφερθεί ότι το είδος της προσέγγισης μιας παραγωγίσης που θα επιλεγεί, αποτελεί σοβαρή πρόκληση ικανή να επηρεάσει το χρόνο και την ποιότητα της λύσης του ροϊκού πεδίου. Ουσιαστικά μεγάλο μέρος της έρευνας στην περιοχή αυτή επικεντρώνεται στο πρόβλημα αυτό, δεδομένου ότι ακόμη και η χρήση μιας υψηλότερης τάξης ακρίβειας παραγωγή μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αστάθεια της διαδικασίας προσομοίωσης του προβλήματος.

## 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ CFX

Το υπολογιστικό πακέτο CFX απαρτίζεται από πέντε αξιόλογα προγράμματα. Το πρώτο είναι το σχεδιαστικό πακέτο ANSYS Design Modeler, το οποίο είναι πολύ εύχρηστο για τη σχεδίαση της γεωμετρίας. Η δημιουργία του πλέγματος γίνεται στον ICEM CFD. Ο ορισμός των οριακών συνθηκών και της φυσικής του προβλήματος καθορίζονται στον CFX-Pre. Την επίλυση των εξισώσεων ροής πραγματοποιείται στον CFX-Solver και η ανάλυση των αποτελεσμάτων στον CFX-Post.

### 4.1 Κατασκευή Γεωμετρίας

Ο ANSYS DesignModeler είναι ένα ολοκληρωμένο σχεδιαστικό πακέτο με πολλές δυνατότητες. Οι γεωμετρίες μπορεί να είναι είτε δισδιάστατες είτε τρισδιάστατες.

Η αρχική σχεδίαση γίνεται στο δισδιάστατο επίπεδο και στη συνέχεια με διάφορα εργαλεία που είναι διαθέσιμα στο συγκεκριμένο προκύπτει το τρισδιάστατο σχήμα. Ένα σημαντικό προτέρημα του προγράμματος είναι η εισαγωγή γεωμετριών άλλα υπολογιστικά προγράμματα, αλλά και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πολλές μορφές αρχείων. Ο τύπος αρχείου που δημιουργείται είναι \*.agdb αλλά και \*.prt όταν η σχεδίαση γίνεται στον ANSYS.

### 4.2 Κατασκευή πλέγματος (MESH)

Στη συνέχεια εισάγουμε τη γεωμετρία και δημιουργούμε πλέγμα γύρω αυτή. Αρχικά διαλέγουμε τη μορφή του πλέγματος. Υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος με τετράεδρα (tetra mesh) και εξαέδρα (hexa mesh). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι διαφορετική για τις δύο μορφές πλέγματος. Η κατασκευή των εξαέδρων είναι μια πιο πολύπλοκη διαδικασία συγκριτικά με αυτήν των τετραέδρων, ποιοτικά όμως είναι πιο ακριβής. Η πλεγματοποίηση μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη σε όλο το πλέγμα αλλά σε μερικά σημεία, όπου απαιτείται, μπορεί να γίνει πιο πυκνό. Αυτό εξαρτάται από τις απαιτήσεις κάθε προβλήματος. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα

για περαιτέρω επεξεργασία, βελτίωση του πλέγματος και της ίδιας της γεωμετρίας με τη χρήση των κατάλληλων εργαλείων.

Στο τέλος αποθηκεύουμε αρχείο τύπου \*.msh

### 4.3 Προ- επεξεργασία (Pre- Processing)

Στο πακέτο αυτό ορίζονται οι οριακές συνθήκες της γεωμετρίας μας, μετά την εισαγωγή του αρχείου της πλεγματοποίησης. Επίσης δημιουργείται ένα simulation file μορφής αρχείου \*. Cfx.

Συγκεκριμένα επιλέγουμε τις περιοχές εισροής, εκροής του ρευστού ή του αερίου και των τοιχωμάτων, εισάγοντας για την κάθε μία τις συνθήκες (π.χ. πίεση, θερμοκρασία , ταχύτητα ) που επιθυμούμε. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής πλήθους ρευστών καθώς και η δημιουργία οποιουδήποτε άλλου, ακόμα και μείγματος με την εισαγωγή όλων των φυσικών ιδιοτήτων του. Στον Pre- Processing δίνονται πίνακες με όλες τις θερμοδυναμικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες κάθε ρευστού.

Τέλος καθορίζουμε το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για την επίλυση του προβλήματος και όλες τις παραμέτρους της ροής.

Τελικά δημιουργείται ένα αρχείο τύπου \*.def.

### 4.4 Επιλυτής (SOLVER)

Το CFD solver συγκεντρώνει πολλές τεχνολογίες για την υψηλότερη απόδοση του CFD. Ο solver επιτυγχάνει την αξιόπιστη και γρήγορη σύγκλιση με την επίλυση των γραμμικών εξισώσεων.



Η multigrid μέθοδος CFX έχει εξελιχθεί για περισσότερο από 20 χρόνια και έχει χρησιμοποιηθεί για να λύσει εκατομμύρια προσομοιώσεις. Διαθέσιμο είναι μόνο το γραμμικό solver στο CFX 5. Οι δυνατότητες του είναι:

- Πλήρως εξελίσσιμη, επιτυγχάνει γραμμική αύξηση ανάλογα με το μέγεθος του προβλήματος,
- Ανεξάρτητα από το λόγο διάστασης πλέγματος επιτυγχάνει μεγάλη σύγκλιση
- Προσομοιώνει την πραγματική φυσική του προβλήματος,
- Εύκολο να λειτουργεί σε συνεχή και σε παράλληλη επίλυση.

Είναι σημαντικό ότι τα αριθμητικά λάθη μειώνουν γρήγορα και αξιόπιστα καθώς το πλέγμα έχει καθοριστεί. Τα αριθμητικά λάθη εμφανίζονται στα βασικά μεγέθη, στη μεταφορά διάχυσης και στις πηγές.

Η μέθοδος ανάλυσης πλέγματος του CFX-5 που εφαρμόζεται στη γεωμετρία εξάγει με ακρίβεια τα αποτελέσματα του πλέγματος.

Στον CFX-Solver εισάγεται το αρχείο \*.def και ξεκινά η επίλυση του προβλήματος

#### 4.4.1 Παράλληλη επίλυση (Parallelization)

Το CFX-5 συνδυάζει τη μνήμη και τις πηγές των πολλαπλών επεξεργαστών για να μειώσει το χρόνο υπολογισμού, και για να καταστήσει πιθανές τις μεγαλύτερες προσομοιώσεις. Όλα τα φυσικά μοντέλα, οι ιδιότητες, οι τρόποι, και οι επιλογές του CFX-5 λειτουργούν παράλληλα χωρίς καμία εξαίρεση. Η παράλληλη επίλυση είναι εύκολο να αποδοθεί σε έναν υπολογιστή, σε ένα δίκτυο υπολογιστών ή σε οποιοδήποτε συνδυασμό τους. Το μόνο που χρειάζεται είναι να επιλεγτούν οι επεξεργαστές. Η πρωτογενής επίλυση βασίζεται, εν μέρει, στο γεγονός ότι η παράλληλη προσομοίωση ακολουθεί τα ίδια χαρακτηριστικά σύγκλισης με την ισοδύναμη προσομοίωση ενός προβλήματος. Η μνήμη αλλά και οι ιδιότητες των επεξεργαστών παραμένουν ακόμη και για μεγάλο αριθμό επεξεργαστών.

#### 4.4.1.1 Επύλυτής (Solver Manager)

Ο solver μας δίνει αποτελέσματα για τις οριακές ροές, για τις δυνάμεις, για τα ισοζύγια, τα σημεία που έχουν επιλεχτεί από τον χρήστη (monitor points) και τα διαγράμματα που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της επίλυσης και κατά τα χρονικά βήματα (timesteps) που έχουν οριστεί. Όταν είναι απαραίτητο, οι παράμετροι όπως οι οριακές συνθήκες, το χρονικό βήμα (timesteps) και τα κριτήρια σύγκλισης μπορούν έπειτα να τροποποιηθούν χωρίς να γίνει παύση του solver προκειμένου να επιταχυνθεί η σύγκλιση.

Στο CFX-5 υπάρχουν εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τελειοποίηση του μοντέλου κατά τον σχεδιασμό, τη ταχύτερη ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων και την ευκολότερη σύγκλιση. Μερικά από αυτά τα εργαλεία είναι:

#### 4.4.1.2 CFX Εσωτερική Γλώσσα Επικοινωνίας (Command Language)

Η Command Language (CCL) είναι η εσωτερική γλώσσα επικοινωνίας και εντολής που διευκρινίζει τις παραμέτρους, όπως την ταχύτητα εισροής ή τις παραμέτρους επίλυσης και επιτρέπει την πρόσβαση στα προηγμένα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η Command Language του CFX επιτρέπει τον έλεγχο της σύνθεσης των παραμέτρων που εμείς ορίζουμε.

#### 4.4.1.3 CFX Ερμηνευτική Γλώσσα (Expression Language)

Η γλώσσα CFX (CEL) είναι μια ερμηνευμένη γλώσσα που επιτρέπει στους χρήστες να ενισχύσουν τις προσομοιώσεις χωρίς προσφυγή στις εξωτερικές γλώσσες FORTRAN. Οι κανόνες σύνταξης για τα CEL ακολουθούν τη συμβατική αριθμητική ανάλυση και έχουν πρόσβαση στις εσωτερικές μεταβλητές επίλυσης. Οι χρήστες μπορούν περαιτέρω να επεκτείνουν τη γλώσσα CEL και να την εισάγουν σε άλλο λογισμικό.

#### 4.4.2 Είδη μοντέλων

Η ακριβής προσομοίωση είναι πιο ακριβής επειδή σχεδόν όλα τα φυσικά πρότυπα επικοινωνούν το ένα με το άλλο, σε όλα τις γραμμές πλέγματος και τους τύπους διασύνδεσης, χρησιμοποιώντας συνδεδεμένο multigrid solver.

##### 4.4.2.1 Πολυφασική ροή (Multiphase)

Οι multiple φάσεις (ρευστά) λύνονται ταυτόχρονα με συνδεδεμένο τον solver, που παρέχει σταθερότητα και κερδίζοντας χρόνο στον χρόνο επίλυσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι η σύζευξη του inter-phase επιλύεται κατά τρόπο γρήγορο και αποδοτικό.

##### 4.4.2.2 Ελεύθερη Επιφάνεια (Free Surface)

Με τον εντοπισμό μίας ακμής που δημιουργείται μεταξύ δύο φάσεων κατά ακριβή τρόπο, ο CFX-5 δημιουργεί την ακριβή προσομοίωση της ροής σε ελεύθερες επιφάνειες. Χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση του Euler, ο CFX-5 παρέχει μια τεχνολογία που είναι περισσότερο ακριβής και γρηγορότερη στη διαμόρφωση της ροής στις ελεύθερες επιφάνειες.

##### 4.4.2.3 Lagrangian Particle Tracking

Ακολουθεί πρότυπο μορίων και επιτρέπει την επίλυση μιας ή περισσότερων φάσεων μορίων μέσα σε μια συνεχή ροή. Οι φάσεις μπορούν να συνδεθούν μέσω της διπλής κατεύθυνσης ορμής, της ενέργειας και της μεταφοράς της μάζας. Υπάρχουν επιλογές που καθορίζουν το μέγεθος των μορίων, τη θέση εγχύσεως και του καθορισμού του ορίου έτσι ώστε η προσομοίωση να ταιριάζει με τους πραγματικούς όρους.

#### **4.4.2.4 Μεταφορά μάζας (Interphase Mass Transfer)**

Ένα γενικό πλαίσιο για τη μεταφορά της μάζας σε ενδιάμεση φάση παρέχεται στον CFX-5 μαζί με τα πρότυπα για τη δημιουργία κοιλότητας, τη συμπύκνωση, την εξάτμιση και να το σημείο βρασμού.

#### **4.4.2.5 Μεταφορά θερμότητας (Heat Transfer)**

Ο CFX-5 παρέχει την πιο πρόσφατη τεχνολογία για την επίλυση της ροής των ρευστών στις τρισδιάστατες περιοχές συμπεριλαμβανομένης του υπολογισμού της μεταφοράς θερμότητας. Οι υπολογισμοί συνδέονται με τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των ρευστών.

#### **4.4.2.6 Ακτινοβολία (Radiation)**

Τα πρότυπα ακτινοβολίας καλύπτουν μια ευρεία κατηγορία προβλημάτων μεταφοράς της θερμότητας συμπεριλαμβανομένης της μη-θερμικής παράλληλης ακτινοβολίας (ηλιακή θέρμανση).

#### **4.4.2.7 Περιστρεφόμενες μηχανές (Rotating Machinery)**

Το λογισμικό του CFX έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση περιστρεφόμενων μηχανών για σχεδόν 20 έτη. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί για ποικίλες εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των αντλιών, των συμπιεστών, των ανεμιστήρων, των στροβίλων, των στροφείων, του στάτη και του πτερυγίου του κινητήρα. Όλα τα αναμενόμενα εργαλεία και τα παραδείγματα που απαιτούνται στη βιομηχανία περιστρεφόμενων μηχανημάτων παρέχονται.

#### 4.4.2.8 Τύρβη (Turbulence)

Ο CFX-5 προσφέρει μια επιλογή από 16 διαφορετικά πρότυπα τυρβώδους ροής, συμπεριλαμβανομένου του τυποποιημένου K-E μοντέλου. Εντούτοις, το ευρέως διαδεδομένο πρότυπο SST τυρβώδους ροής προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για το τυρβώδες οριακό στρώμα και τις προβλέψεις της μετάδοσης θερμότητας. Το SST πρότυπο είναι τόσο οικονομικό όσο και το K-E μοντέλο, αλλά προσφέρει υψηλότερη ακρίβεια, ειδικά για ασταθής ροές, και δίνει άριστα αποτελέσματα για ένα ευρύ φάσμα ροών και στην περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε τη ροή στα πλέγματα κοντά στα τοιχώματα.

#### 4.4.2.9 Καύση (Combustion)

Ο CFX-5 επιλύει όλα τα είδη ως ενιαίο σύστημα συγκλίνοντας πολύ γρήγορα, ειδικά για τους σύνθετους μηχανισμούς αντίδρασης. Τα φαινόμενα ανάφλεξης και εξάλειψης της φλόγας συμπεριλαμβάνονται μέσω των χημικών χρονοδιαγραμμάτων και της θερμοκρασίας. Οι μηχανισμοί και οι ιδιότητες που θέλουμε να εφαρμόσουμε μπορούν να επιλεγούν εύκολα από μια παρεχόμενη βιβλιοθήκη με επιλεγμένες τιμές.

#### 4.4.2.10 Ιδιότητες ρευστών (Real Fluid)

Οι ιδιότητες κάθε ρευστού εμπεριέχονται στο CFX-5 και υποστηρίζονται από τα γενικά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά για οποιοδήποτε κορεσμένο ρευστό συμπεριλαμβανομένου και των υγροποιημένων ατμών. Τα γενικά χαρακτηριστικά και όλες οι θερμοδυναμικές σχέσεις δίνονται από πίνακες που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο πρόγραμμα.

#### 4.4.2.11 Μεταβλητό πλέγμα (Moving Mesh)

Όταν προσομοιάσουμε ροή ρευστού τροποποιώντας τη γεωμετρία, παραδείγματος χάριν οι συσκευές όπως οι συμπιεστές, οι αντλίες, οι βαλβίδες καρδιάς και οι μηχανές εσωτερικής καύσεως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεταβαλλόμενα



πλέγματα. Τα πλέγματα που είναι διαθέσιμα: η μετακίνηση επιφανειών με αυτόματα πλέγματα και η τρισδιάστατη μετακίνηση πλέγματος. Αυτές οι περιπτώσεις καλύπτουν σχεδόν κάθε ανάγκη μετακίνησης πλέγματος.

#### 4.4.2.12 Fluid Structure Interaction\*

Σε περιπτώσεις όπου η επίδραση ενός ρευστού γύρω από το στερεό είναι σημαντική, μπορεί να εφαρμοστεί μια προσομοίωση (FSI). Για τις πιο σύνθετες περιπτώσεις FSI, όπως οι μεγάλης κλίμακας στερεές παραμορφώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το CFX-5 και να γίνει η ανάλυση στο ANSYS.

### 4.4.3 Μετ- επεξεργασία (POST- PROCESSING)

#### Επεξεργασία αποτελεσμάτων (CFX-Post):

Ο CFX-Post χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έχουν εξαχθεί από τον Solver. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται στον CFX-Post, ο οποίος διαβάζει το αρχείο της μορφής \*\_001.res. Οι δυνατότητες του προγράμματος είναι οι εξής:

- Μπορούν να παραχθούν διανύσματα ταχυτήτων, ισοϋψείς θερμοκρασιών, πύσσων, συγκεντρώσεων κλπ.
- Μπορούν να παραχθούν contours, surface plots, isosurfaces, vectors και streamlines στις επιφάνειες που εμείς θα ορίσουμε.
- Μπορούμε να εξάγουμε τα αποτελέσματα και να τα επεξεργαστούμε σε άλλο λογισμικό, όπως π.χ. στο excel.
- Μπορούμε να εξετάσουμε μεμονωμένα σημεία (monitor points) στο χώρο υπολογίζοντας τις παραμέτρους που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

■ Μας επιτρέπει να εισάγουμε εξισώσεις χρονικά μεταβαλλόμενες, τις οποίες εμείς ορίζουμε, καθώς και να εισάγουμε ουσίες και μίγματα με συγκεκριμένη σύσταση που εμείς θα ορίσουμε.

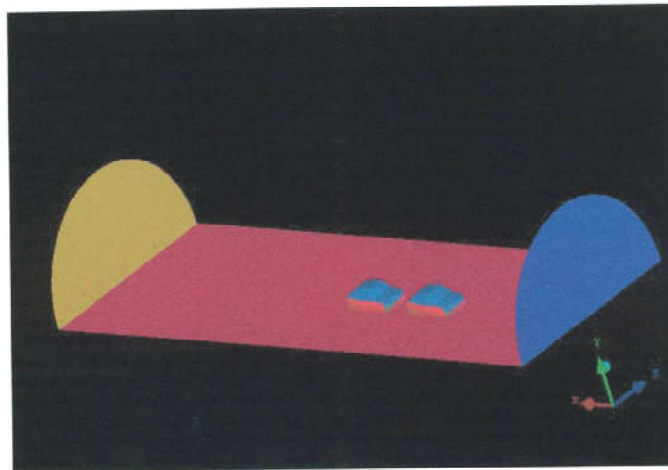
■ Τέλος, μια σημαντική δυνατότητα του post είναι η δημιουργία αρχείου βίντεο \*.mpreg, το οποίο μας επιτρέπει να δούμε την εξέλιξη του φαινομένου είτε χρονικά στο ίδιο επίπεδο είτε σε διαφορετικά επίπεδα στον ίδιο χρόνο.

## 5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

### 5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η σχεδίαση του πειράματος πραγματοποιήθηκε στον ANSYS DesignModeler, ένα ολοκληρωμένο σχεδιαστικό πακέτο το οποίο δίνει τη δυνατότητα για τη δημιουργία 3D (τριδιάστατων) γεωμετριών.

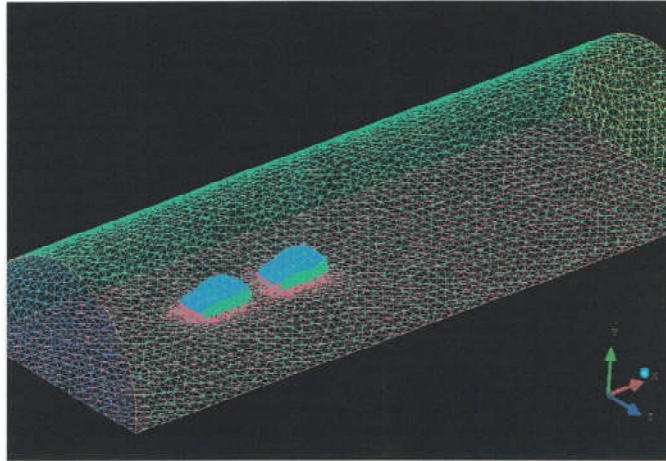
Στο παρόν πείραμα έγινε εισαγωγή της γεωμετρίας του αυτοκινήτου Volvo S-40 σε μορφή \*.iges, η οποία βρέθηκε από την σχεδιάστρια εταιρία. Στη συνέχεια έγινε ένα ημικυκλικό τούνελ διαστάσεων 50 μ. μήκος και 15 μ. πλάτος, τα οποία φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 1.



Σχήμα 5-1

## 5.2 ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESHING)

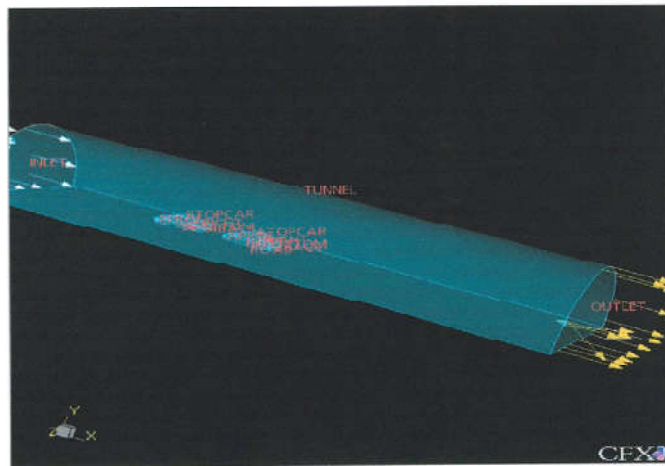
Το πλέγμα κατασκευάζεται στο advanced- meshing, δείγμα του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 5-2 .



Σχήμα 5-2

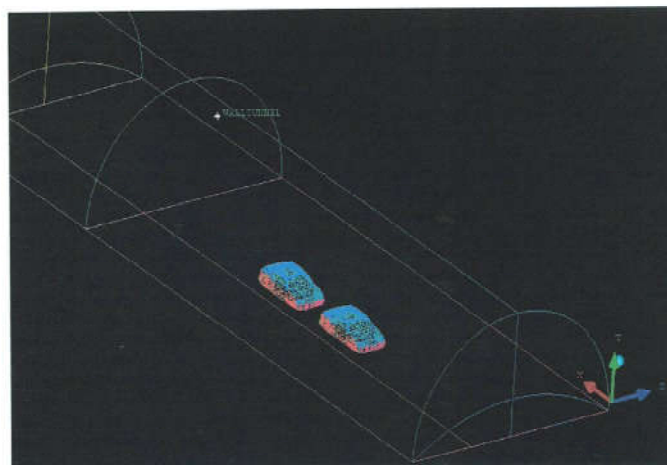
Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

- Ονομάζουμε όλα τα τμήματα της γεωμετρίας. Στην παρούσα εργασία ήταν σκόπιμο να χωριστεί και το αυτοκίνητο σε τμήματα, όπως προφυλακτήρας, πίσω μέρος, πάνω μέρος κ.τ.λ. (Σχήμα 5-3) Αυτό έγινε για να διευκολυνθούμε στο επόμενο κομμάτι της μελέτης που είναι η προ- επεξεργασία (pre- processing).



Σχήμα 5-3

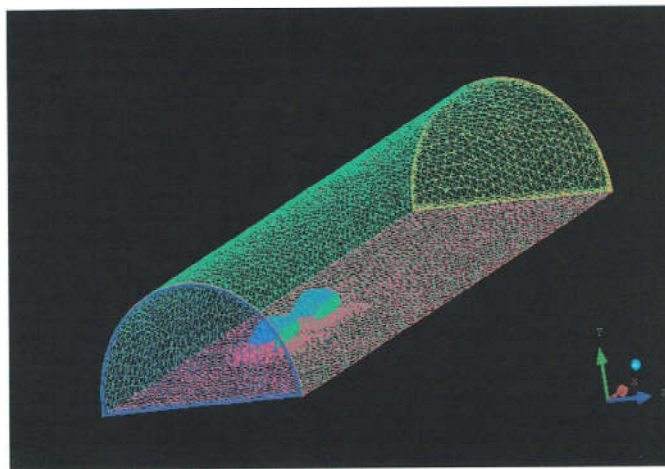
- Ορίζουμε ένα εσωτερικό σημείο της γεωμετρίας, ώστε να καθοριστεί που θα γίνει η πλεγματοποίηση (Σχήμα 5-4).



Σχήμα 5-4

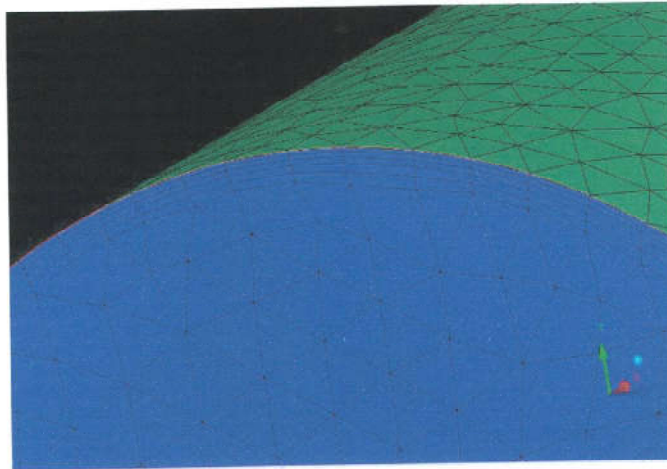


■ Ορίζουμε το μέγεθος των element ώστε να είναι ικανοποιητικό το πλέγμα που γίνεται με τετράεδρα στο παρών σημείο ( Σχήμα 5-5 ). Ο CFX-5 μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε διαφορετική πλεγματοποίηση στα σημεία που εμείς επιθυμούμε. Στην παρούσα εργασία επειδή το μοντέλο του αυτοκινήτου εν συγκρίσει με το τούνελ ήταν πολύ μικρό, το μέγεθος των element που δώσαμε παραμόρφωσε το αυτοκίνητο. Για το λόγο αυτό έχουμε δώσει διαφορετική πλεγματοποίηση, πιο πυκνή, στα τοιχώματα του αυτοκινήτου.



Σχήμα 5-5

■ Κάνουμε το πλέγμα με hexa-mesh (εξάεδρα). Για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα διαιρούμε το πλέγμα σε 5 layers σε όλα τα τοιχώματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-6 .



Σχήμα 5-6

■ Εδώ σώζουμε τα αποτελέσματα του πλέγματος σε μορφή \*. msh και προχωρούμε στο επόμενο πακέτο που είναι ο PRE-PROCESSING.

Ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων που έχει δημιουργήσει το πλέγμα παρατίθενται παρακάτω για κάθε γεωμετρία ξεχωριστά.

Ο Πίνακας 1 αναφέρεται στην περίπτωση που έχουμε μόνο ένα αυτοκίνητο. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των elements είναι σχεδόν διπλάσιος από τις άλλες δύο περιπτώσεις.

Domain Details

	Nodes	Elements
AIR	183912	619136

Πίνακας 1

Ο Πίνακας 2 αναφέρεται στην περίπτωση που έχουμε δύο αυτοκίνητα που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο.

Domain Details

	Nodes	Elements
AIR	114437	383944

Πίνακας 2

Τέλος ο Πίνακας 3 αναφέρεται στην περίπτωση που έχουμε δύο αυτοκίνητα που κινούνται πλευρικά.

Domain Details

	Nodes	Elements
AIR	114649	385310

Πίνακας 3

### 5.3 ΠΡΟ- ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (PRE-PROCESSING)

Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

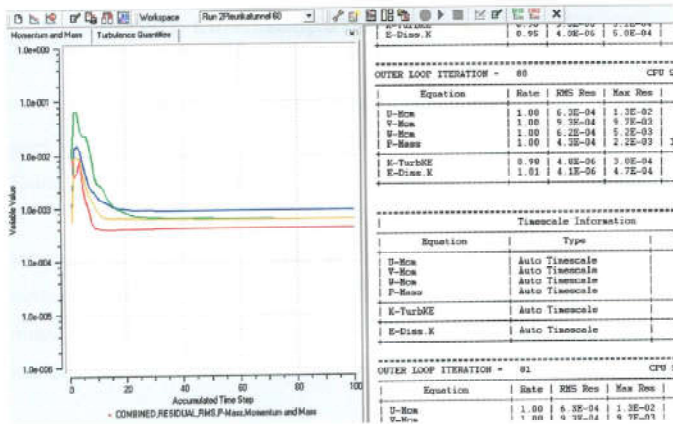
- Αρχικά καθορίζουμε το simulation type, transient ή steady state. Το παρόν πρόβλημα είναι steady state.
- Ορίζουμε τις οριακές συνθήκες (boundary condition). Στην εισροή ορίζω ταχύτητα 60 ή 120 km/h, ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζουμε. Στην εκροή ορίζω πίεση εξόδου 0 Pa. Και τέλος όλα τα άλλα τμήματα τα ορίζω σαν smooth wall. Στην περίπτωση που δεν είχαμε τούνελ οι οριακές συνθήκες ήταν διαφορετικές. Πάλι ορίζαμε ταχύτητα εξόδου και τα άλλα τμήματα σαν smooth wall, αλλά το τούνελ και την εκροή την ορίζαμε σαν opening. Οι παραμέτρους που βάζαμε εκεί ήταν ότι θέλουμε πίεση μηδενική (0 Pa) χωρίς καθορισμένη διεύθυνση (pressure and no direction).

- Καθορίζουμε το βαθμό σύγκλισης στα 0,00001 και επιλέγουμε ποιες παραμέτρους (πίεση, ταχύτητα, συγκέντρωση, δυνάμεις κ.τ.λ.) θέλουμε να υπολογιστούν κατά τη διάρκεια επίλυσης στον solver για το συγκεκριμένο μοντέλο.
- Γράφουμε ένα αρχείο \*.def για να αρχίσει η ανάλυση στον solver.

#### 5.4 ΕΠΙΑΥΤΗΣ (SOLVER CONTROL)

Στον SOLVER του CFX-5.7 εισάγουμε το αρχείο \*.def στο definition file που έχουμε δημιουργήσει στον PRE και να πατήσουμε το Start Run για να ξεκινήσει το πρόγραμμα. Παρακάτω (Σχήμα 5-7)βλέπουμε το διάγραμμα μάζας και ταχύτητας σε συνάρτηση με τα Time Steps μετά την περάτωση της ανάλυσης. Δεξιά της εικόνας αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων για κάθε Time Step και στο τέλος της ανάλυσης βρίσκονται σε συγκεντρωτικό πίνακα οι τιμές αυτών των παραμέτρων σε όλα τα τμήματα που εμείς ορίσαμε στον mesh και σε όλους τους άξονες. Από αυτόν τον πίνακα θα υπολογίσουμε αργότερα το συντελεστή αεροδυναμικής και τον συντελεστή άνωσης. Η σύγκριση των συντελεστών αεροδυναμικής είναι ένα καλό μέτρο σύγκρισης των περιπτώσεων που έχουμε εξετάσει.

Η επίλυση θα σταματήσει όταν το διάγραμμα συγκλίνει στη τιμή του σφάλματος που εμείς έχουμε θέσει. Όσο μικρότερη είναι αυτή η τιμή τόσο μικρότερο είναι το σφάλμα. Όπως αναφέραμε παραπάνω ορίσαμε το σφάλμα residual target= 1e-005.



Σχήμα 5-7

## 5.5 ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (POST-PROCESSING)

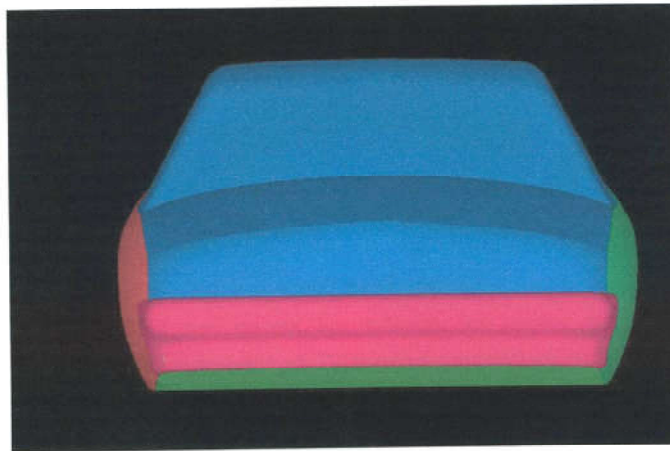
Αφού τελειώσει ο solver εισάγουμε τα αποτελέσματα, που είναι της μορφής \*\_001.res στον CFX-Post. Από εδώ θα εξάγουμε όλα τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας contours, surface plots, isosurfaces, vectors και streamlines στις επιφάνειες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα streamlines πάνω στην επιφάνεια του αυτοκινήτου για να δούμε πώς κινούνται οι ροϊκές γραμμές, σε ποιο σημείο εμφανίζεται το φαινόμενο της αποκόλλησης και να παρακολουθήσουμε τις δίνες που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου.



## 6. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μετά την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων στον solver αλλά και στον post σε μορφή contour, vector και streamline.

Από τον solver μπορούμε να δούμε αναλυτικά τις δυνάμεις που ενεργούν σε όλα τα τοιχώματα ξεχωριστά. Αυτό μας βοηθά στον υπολογισμό των συντελεστών αντίστασης ( $C_D$ ) και άνωσης ( $C_L$ ). Στην αεροδυναμική του αυτοκινήτου οι συντελεστές αυτοί ανάγονται στην επιφάνεια πρόσπτωσης του αέρα. Η επιφάνεια αυτή είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 7. Μετά από υπολογισμούς βρέθηκε ότι είναι  $A=4,12 \text{ m}^2$ .



Σχήμα 6-1

Ο συντελεστής αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας την παρακάτω σχέση:

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

Όπου  $D$  είναι η δύναμη που εφαρμόζεται στον άξονα  $x$  λόγω πίεσης και λόγω του ιξώδους. Στην παρούσα εργασία για να υπολογιστεί αυτή η δύναμη αθροίζουμε τις δυνάμεις πίεσης και ιξώδους που ασκούνται στον προφυλακτήρα, στο πάνω μέρος, στο κάτω μέρος, στο πίσω μέρος, δεξιά και αριστερά του αυτοκινήτου. Στην περίπτωση που έχουμε δύο αυτοκίνητα υπολογίζουμε ξεχωριστά το  $C_D$  των αυτοκινήτων.  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα που είναι  $1,185 \text{ kg/m}^3$ .  $U_x$  είναι η αξονική ταχύτητα εισόδου του αέρα στο τούνελ και  $A$  είναι η επιφάνεια πρόσπτωσης που υπολογίσαμε παραπάνω  $A=4,12 \text{ m}^2$ .

Το επιθυμητό είναι να έχουμε καλύτερη αεροδυναμική. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο συντελεστής αντίστασης είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.

Ο συντελεστής άνωσης δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_x^2 A}$$

Όπου  $L$  είναι η κατακόρυφη δύναμη, που ασκείται στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου και έχει φορά προς τα επάνω. Προέρχεται από τη ροή του αέρα κάτω από το αυτοκίνητο, καθώς αυτό κινείται, και αυξάνεται όσο αυξάνει η ταχύτητα του αυτοκινήτου, αποσταθεροποιώντας το. Το φαινόμενο μετριάζεται, αν το κάτω μέρος του αυτοκινήτου έχει όσο το δυνατόν πιο ομαλή επιφάνεια. Απόλυτη λύση στο πρόβλημα αποτελεί ο σχεδιασμός με τη μορφή ακροφυσίου (δηλ. να ανασηκώνεται σταδιακά προς τα πίσω), ιδέα που επινοήθηκε από τον Κόλιν Τσάπμαν, ιδρυτή της Lotus. Με τον τρόπο αυτόν, το αυτοκίνητο πιέζεται προς τα κάτω, καθώς αναπτύσσεται αρνητική άντωση.

Και σε αυτή την περίπτωση ο υπολογισμός της δύναμης  $L$  γίνεται με τον τρόπο που αναφέραμε παραπάνω για τη δύναμη  $D$ . Επίσης η πυκνότητα είναι  $\rho=1,185 \text{ kg/m}^3$  και η επιφάνεια πρόσπτωσης  $A$  είναι  $A=4,12 \text{ m}^2$ .

Καθοριστικής σημασίας παράγοντας για τον συντελεστή άνωσης είναι η απόσταση του οχήματος από το έδαφος καθώς αύξηση της απόστασης από το έδαφος έχει γενικά ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή άνωσης. Η διαπίστωση όμως

αυτή έρχεται τις περισσότερες φορές σε αντίθεση με τη βασική επιδίωξη των μηχανικών να κρατήσουν το κέντρο βάρους του οχήματος όσο το δυνατόν χαμηλότερα μειώνοντας σημαντικά την απόσταση από το έδαφος. Συνεπώς δεν είναι τυχαίο που τα περισσότερα οχήματα, επειδή πρέπει να έχουν χαμηλά το κέντρο βάρους έχουν μικρή απόσταση από το έδαφος ενώ το πρόβλημα της άνωσης αντιμετωπίζεται με πρόσθετα αεροβοηθήματα. Σκοπός των βοηθημάτων αυτών είναι είτε η τοπική αύξηση της πίεσης σε περιοχές στην επάνω επιφάνεια του οχήματος, είτε η ανάπτυξη αρνητικών ανωστικών δυνάμεων με τη χρήση ανεστραμμένων αεροτομών.

Επίσης και σε αυτόν τον συντελεστή το επιθυμητό είναι να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

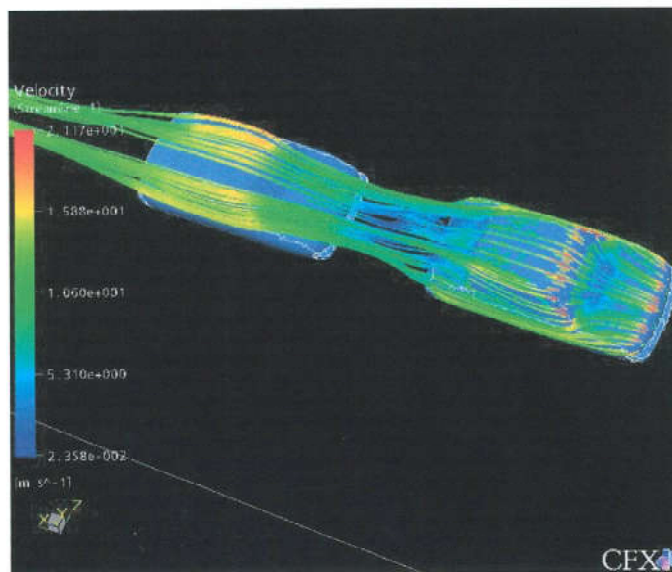
Τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι αυτά που προκύπτουν συγκρίνοντας τους συντελεστές αντίστασης και άνωσης. Παρακάτω θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον post- processing, που στηρίζουν τα συμπεράσματα που αναφέρουμε για τους συντελεστές. Για το λόγο αυτό θα παρουσιαστούν κάποια σχήματα ενδεικτικά για την κάθε περίπτωση.

Αρχικά δημιουργήσα streamline στο πάνω μέρος του αυτοκινήτου (Σχήμα 6-2) για να διαπιστωθεί η ομαλή ροή και να εντοπιστούν σημεία που προκαλούν έντονη διαταραχή της ροής. Όπως προκύπτει από την παρατήρηση των σχετικών Σχημάτων που φαίνονται παρακάτω, σε όλο το επάνω μέρος του ομοιώματος, με εξαίρεση στη βάση του πίσω παραθύρου, η ροή είναι πολύ ομαλή. Ομαλή είναι η ροή και στην περιοχή της βάσης του εμπρός παραθύρου καθώς η διαμόρφωση που σχηματίζεται εκεί λειτουργεί αποδοτικά, κατευθύνοντας προοδευτικά τη ροή παράλληλα προς την επιφάνεια του εμπρός παραθύρου. Σε αυτό συμβάλλει και η μεγάλη κλίση του παραθύρου καθώς και η απουσία, από το μοντέλο, των υαλοκαθαριστήρων. Διαπιστώνεται επίσης η πολύ ομαλή κίνηση της ροής σε όλο το επάνω μέρος του οχήματος και κυρίως στην περιοχή ένωσης του εμπρός με το πλαϊνό παράθυρο. Συνήθως στο σημείο αυτό εμφανίζονται μικρές περιοχές αποκόλλησης της ροής ως συνέπεια της απότομης αλλαγής κλίσης των επιφανειών.

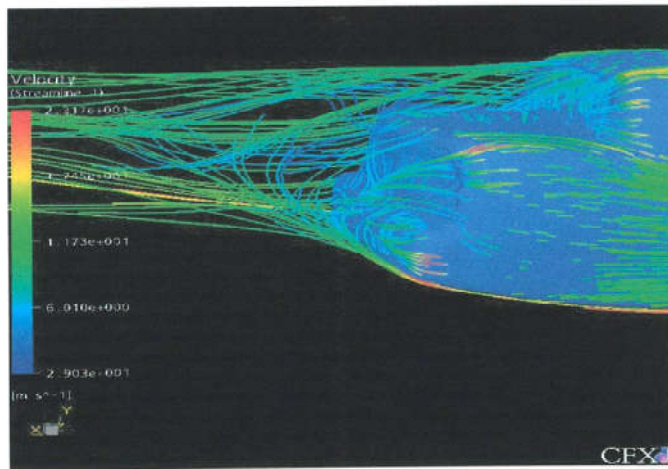
Στην περιοχή της βάσης του πίσω παραθύρου, η ροή παρουσιάζει μικρή διαταραχή η οποία οφείλεται στη συμβολή δύο βασικών ροών, μίας κατά το μήκος της

επάνω επιφάνειας του αυτοκινήτου και μίας δεύτερης στο ύψος των πλαϊνών παραθύρων.

Για το λόγο αυτό η μελέτη που έχει γίνει έχει επικεντρωθεί σε αυτά τα σημεία. Τα planes που έχω δημιουργήσει σε κάθε περίπτωση είναι μπροστά από το αυτοκίνητο, στο ψηλότερο σημείο, στο πίσω τζάμι αλλά και στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου. Τα contours βασίζονται πάνω στα planes που προανέφερα και δηλώνουν την αξονική ταχύτητα και την πίεση.



Σχήμα 6-2 : Δύο οχήματα κινούμενα το ένα πίσω από το άλλο



**Σχήμα 6-3: Δίνες που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του οχήματος αλλά και στη βάση του πίσω παραθύρου.**

Από το Σχήμα 6-3 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ροή του ομόρου παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά που δίνονται και στις βιβλιογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν. Δηλαδή, χαρακτηριστικό της ροής στην περιοχή αυτή είναι η δημιουργία μίας περιοχής έντονης ανακυκλοφορίας, ελλειψοειδούς μορφής, προερχόμενη από τη ροή στο κάτω μέρος του οχήματος και η οποία κατευθύνεται προς τα πάνω. Επίσης στο επάνω μέρος του πίσω παραθύρου παρατηρείται ότι δημιουργείται ακόμη μία ανακυκλοφορία με διεύθυνση προς τα κάτω. Οι δύο αυτές περιοχές καλύπτουν το χώρο στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου δημιουργώντας την κύρια περιοχή του ομόρου, μια περιοχή που εκτείνεται σε μικρή απόσταση στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου.

Τέλος παρατηρούμε ότι δε δημιουργούνται στροβιλισμοί στο πίσω μέρος του οχήματος. Αυτό οφείλεται σε μία φιλοσοφία που έχουν υιοθετήσει σχεδόν όλες οι σχεδιάστριες εταιρίες, και είναι η καμπυλότητα του πίσω μέρους του οχήματος.



### 6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την κίνηση ενός οχήματος μέσα σε τούνελ και σε ανοιχτό δρόμο.

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες οι συντελεστές  $C_d$   $C_l$  συγκριτικά για κίνηση μέσα σε τούνελ και σε ανοιχτό δρόμο.

Οι Πίνακες 4 και 5 και τα διαγράμματα 8 και 9 αναγράφουν τους συντελεστές  $C_D$ ,  $C_L$  αντίστοιχα για την περίπτωση που έχουμε κίνηση ενός οχήματος.

$C_D$ για ένα αυτοκίνητο		
Ταχύτητες	60 Km/h	120 km/h
Κινούμενο σε τούνελ	0,044	0,7304
Κινούμενο σε ανοιχτό δρόμο	0,0393	0,421

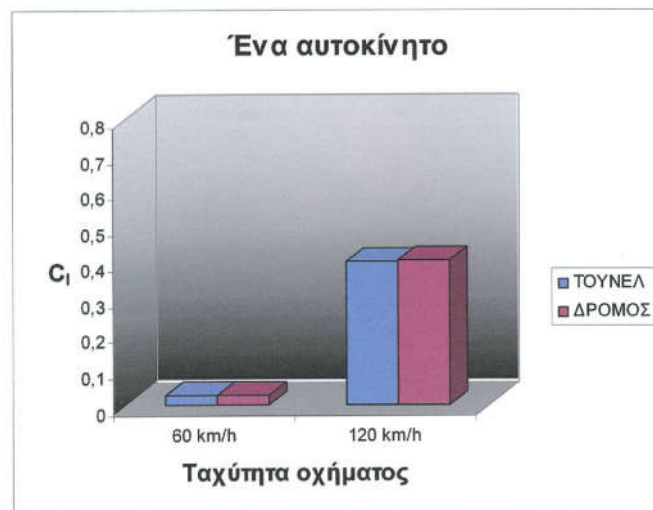
Πίνακας 4

$C_l$ για ένα αυτοκίνητο		
Ταχύτητες	60 Km/h	120 km/h
Κινούμενο σε τούνελ	0,028	0,404
Κινούμενο σε ανοιχτό δρόμο	0,0393	0,403

Πίνακας 5



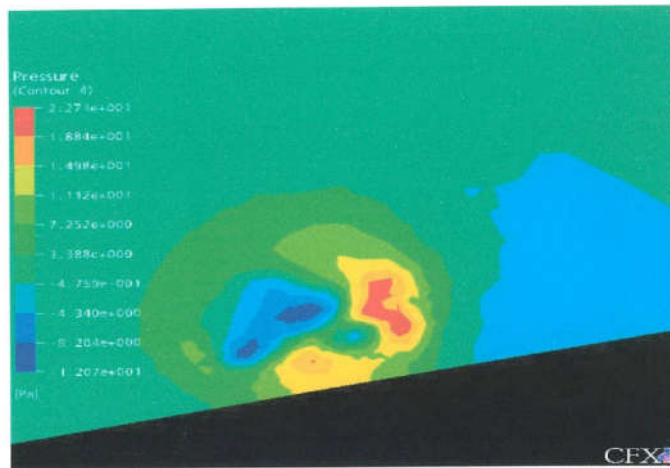
Σχήμα 6-4



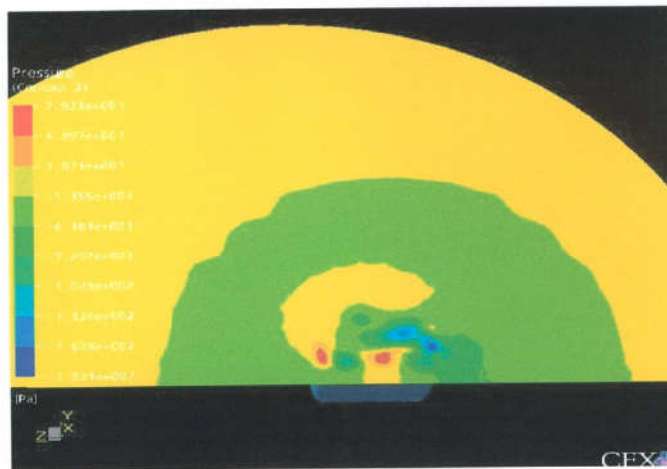
Σχήμα 6-5

Από τους δύο παραπάνω πίνακες συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα, δηλαδή από τα 60 στα 120 km/h, οι συντελεστές αυξάνονται. Δηλαδή καλύτερη αεροδυναμική έχουμε όταν κινείται το όχημα με μικρότερη ταχύτητα. Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι όταν κινούμαστε σε ανοιχτό δρόμο έχουμε καλύτερη αεροδυναμική από ότι όταν κινούμαστε μέσα σε τούνελ. Προκύπτει ότι έχουμε καλύτερη αεροδυναμική, στην περίπτωση που έχουμε κίνηση ενός οχήματος, όταν κινείται με 60 km/h σε ανοιχτό δρόμο.

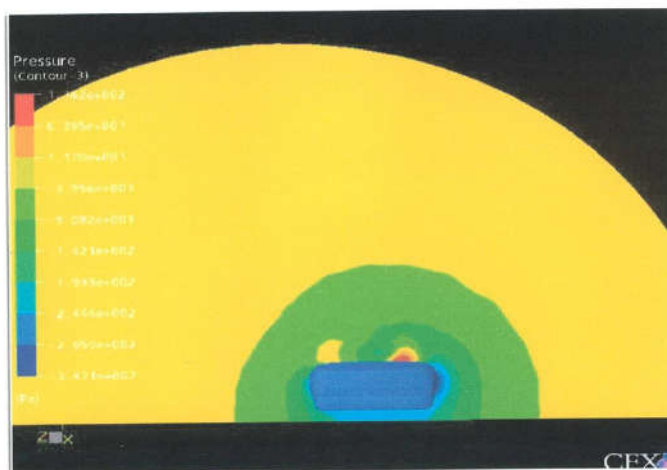
Τα συμπεράσματα που αναφέραμε παραπάνω προκύπτουν και από τον μεταεπεξεργαστή (Post- Processing) σε μορφή contours, vectors και streamlines.



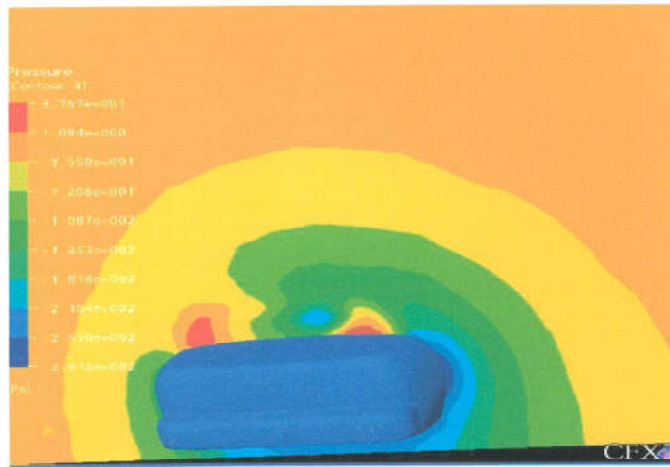
**ΣΧΗΜΑ 6-1** Λιανομή της πίεσης στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου όταν κινείται μέσα στο τούνελ.



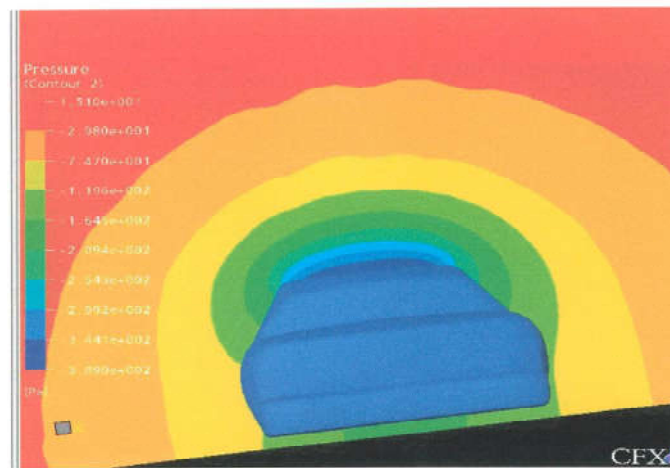
**ΣΧΗΜΑ 6-2** Διανομή πίεσης στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου όταν κινείται σε ανοιχτό δρόμο μέσα στο τούνελ.



**ΣΧΗΜΑ 6-3** Διανομή πίεσης στη βάση του πίσω παραθύρου μέσα στο τούνελ.

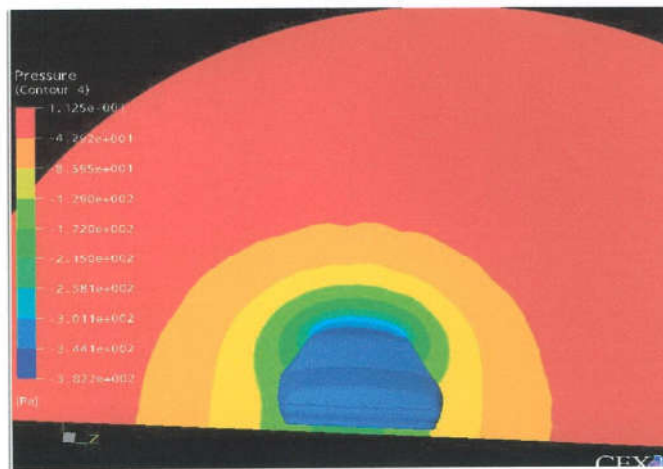


ΣΧΗΜΑ 6-4 Διανομή πίεσης στη βάση του πίσω παραθύρου σε ανοιχτό δρόμο.

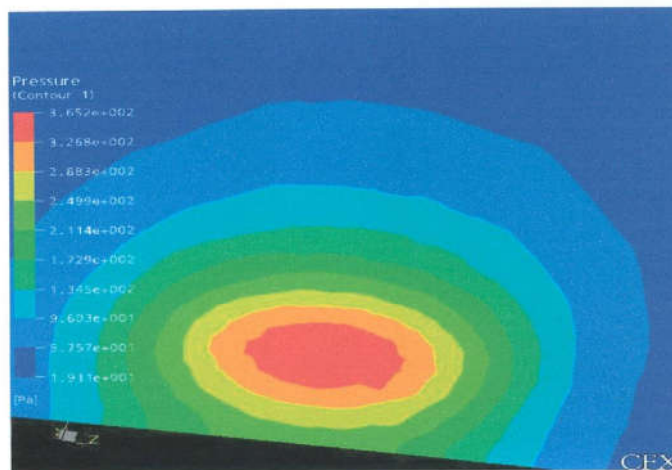


ΣΧΗΜΑ 6-5 Διανομή πίεσης στο ψηλότερο μέρος του αυτοκινήτου μέσα σε τούνελ.

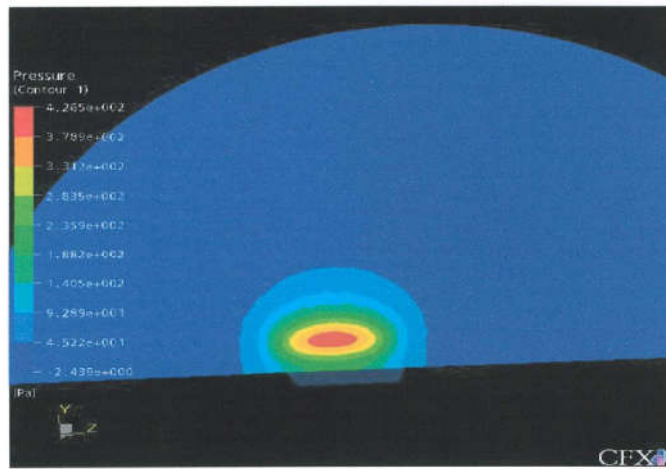




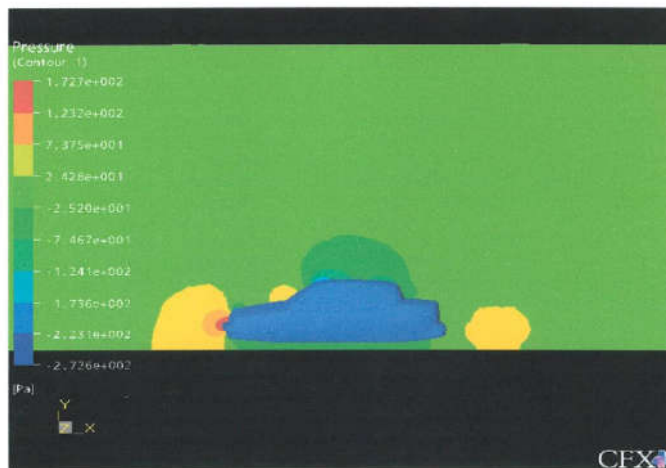
**ΣΧΗΜΑ 6-6** Διανομή πίεσης στο υψηλότερο σημείο του αυτοκινήτου σε ανοιχτό δρόμο.



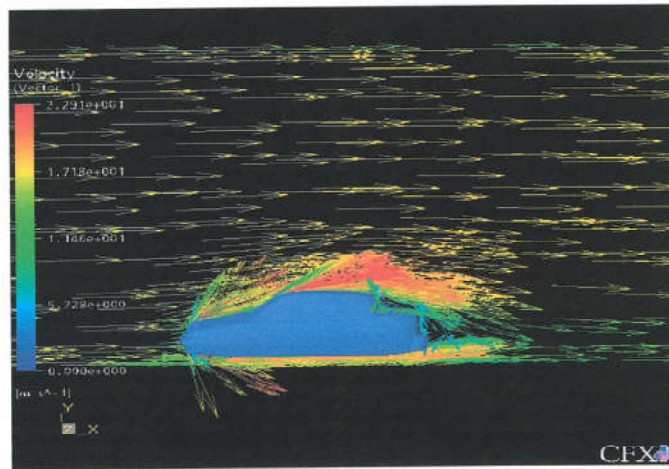
**ΣΧΗΜΑ 6-7** Διανομή πίεσης στο μπροστινό μέρος μέσα σε τούνελ.



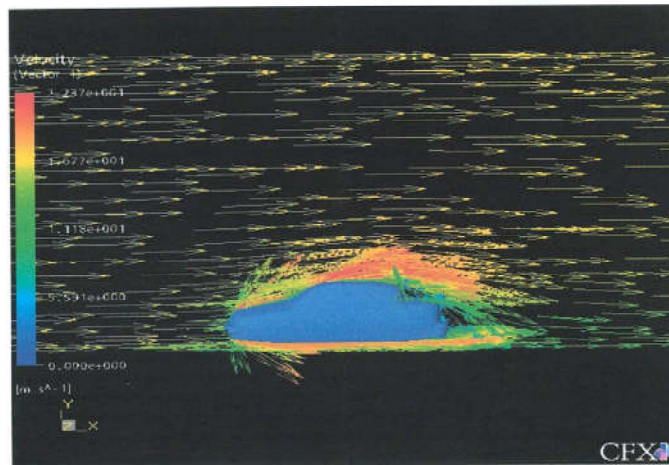
**ΣΧΗΜΑ 6-8** Διανομή πίεσης στο μπροστινό μέρος σε ανοιχτό δρόμο.



**Σχήμα 6-6:** Διανομή πίεσης κατά μήκος της τομής του οχήματος.



Σχήμα 6-7: Vector κατά μήκος του οχήματος όταν κινείται μέσα σε τούνελ.



Σχήμα 6-8: Vector κατά μήκος του οχήματος όταν κινείται σε ανοιχτό δρόμο

## 6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την κίνηση δύο οχημάτων που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο.

Οι Πίνακες 6 και 7 και τα διαγράμματα 6,9 και 6,10 αναγράφουν τους συντελεστές  $C_D$ ,  $C_L$  αντίστοιχα για την περίπτωση που έχουμε κίνηση δύο οχημάτων που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο.

$C_D$ για δύο αυτοκίνητα που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο		
Ταχύτητες	<u>60 Km/h</u>	<u>120 km/h</u>
<b>Κινούμενο σε τούνελ</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,024	0,095
Για το πίσω όχημα	0,049	0,198
<b>Κινούμενο σε ανοιχτό δρόμο</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,079	0,306
Για το πίσω όχημα	0,185	0,722

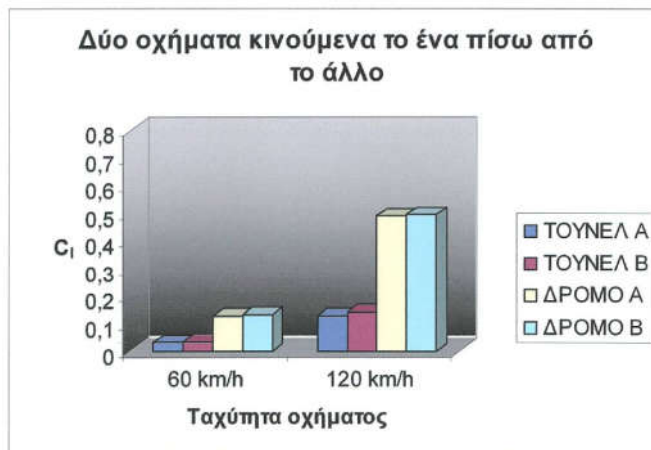
Πίνακας 6

$C_L$ για δύο αυτοκίνητα που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο		
Ταχύτητες	<u>60 Km/h</u>	<u>120 km/h</u>
<b>Κινούμενο σε τούνελ</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,032	0,128
Για το πίσω όχημα	0,035	0,141
<b>Κινούμενο σε ανοιχτό δρόμο</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,125	0,491
Για το πίσω όχημα	0,13	0,496

Πίνακας 7



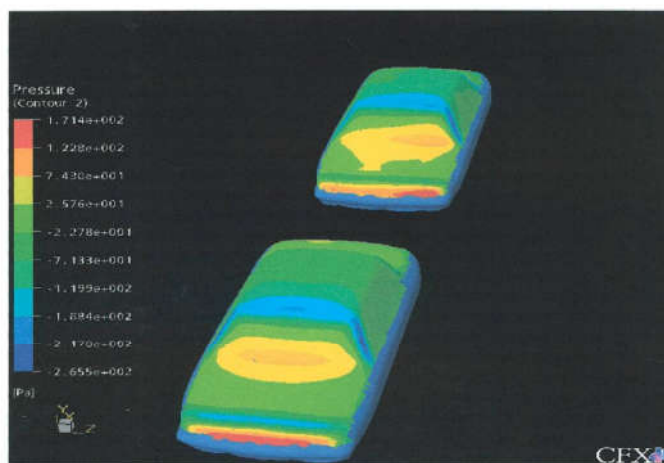
ΣΧΗΜΑ 6-9



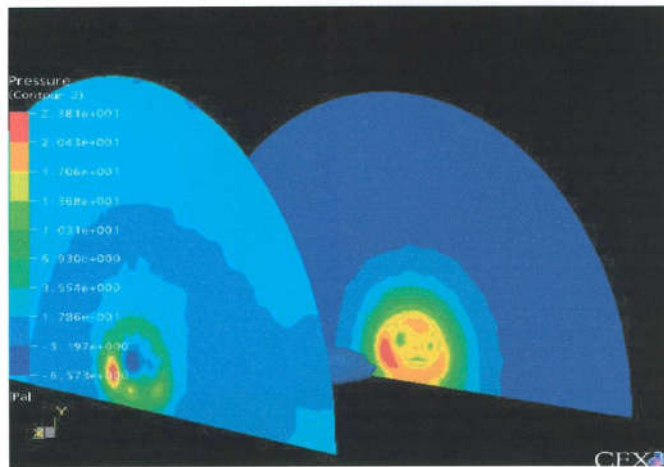
ΣΧΗΜΑ 6-10



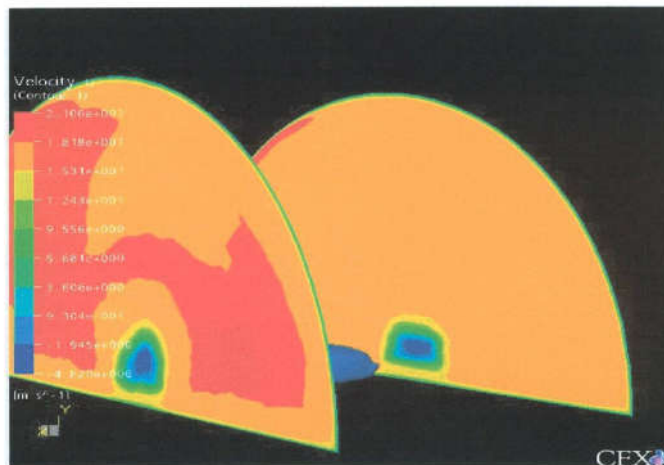
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες ότι και οι δύο συντελεστές αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας. Επίσης οι συντελεστές είναι αισθητά μεγαλύτεροι για το αυτοκίνητο που κινείται πίσω. Αυτό συμβαίνει γιατί ασκούνται μεγαλύτερες δυνάμεις σε αυτό λόγω των δινών που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του μπροστινού αυτοκινήτου. Αυτό μπορεί να φανεί καθαρά και από τα contour που φαίνονται στο Σχήμα 6-11 πάνω στα πάνω μέρη των αυτοκινήτων. Τέλος σε αντίθεση με την περίπτωση που είχαμε κίνηση ενός οχήματος, στην περίπτωση που έχουμε κίνηση δύο οχημάτων το ένα πίσω από το άλλο, οι συντελεστές είναι μικρότεροι όταν τα οχήματα κινούνται μέσα στο τούνελ και όχι σε ανοιχτό δρόμο.



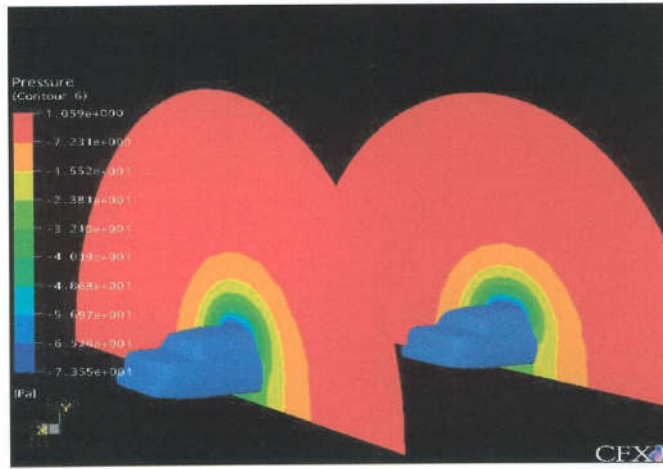
ΣΧΗΜΑ 6-11 Πίεση στην επιφάνεια του αυτοκινήτου.



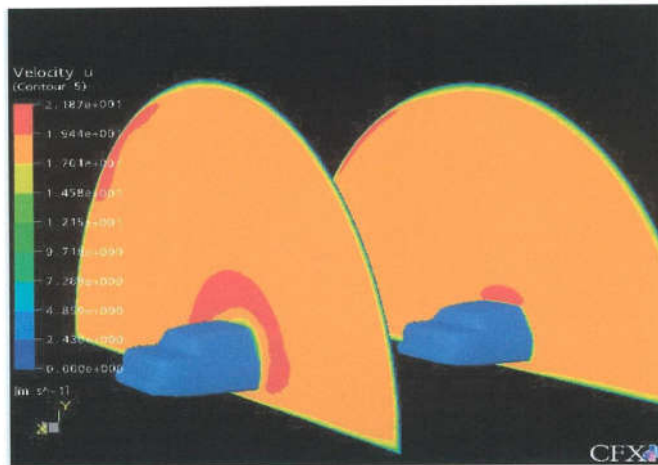
**ΣΧΗΜΑ 6-12 Πίεση στο πίσω μέρος των αυτοκινήτων.**



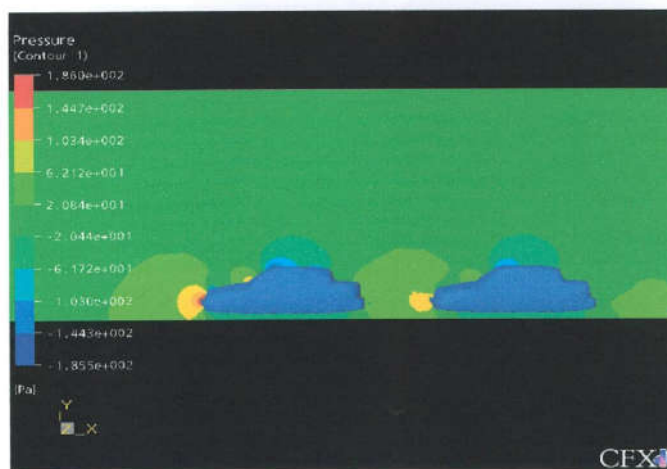
**ΣΧΗΜΑ 6-13 Ταχύτητα στο πίσω μέρος των αυτοκινήτων.**



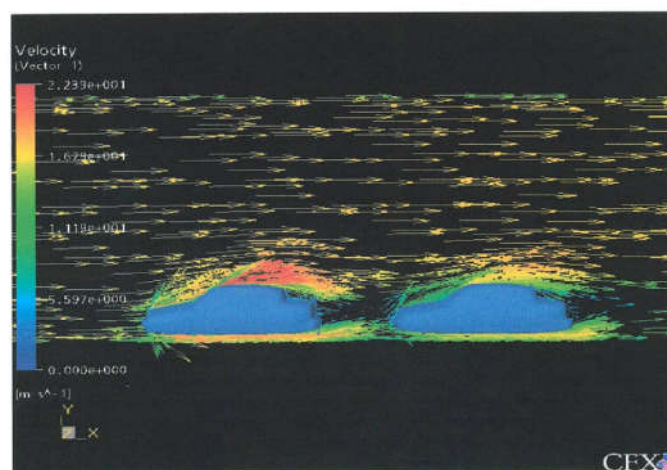
**ΣΧΗΜΑ 6-14 Ταχύτητα στο υψηλότερο σημείο των αυτοκινήτων.**



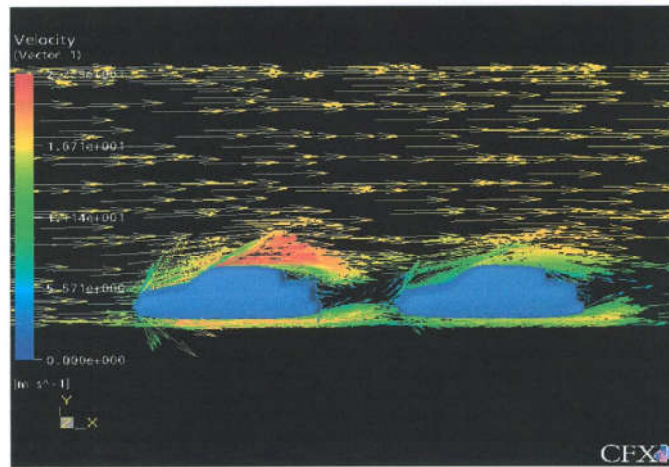
**ΣΧΗΜΑ 6-15 Ταχύτητα στο υψηλότερο σημείο των αυτοκινήτων.**



Σχήμα 6-9: Διανομή της πίεσης κατά μήκος της τομής των οχημάτων.



Σχήμα 6-10: Vector κατά μήκος του οχήματος όταν αυτό κινείται σε τούνελ.



**Σχήμα 6-11: Vector κατά μήκος του οχήματος όταν αυτό κινείται σε ανοιχτό δρόμο.**

### **6.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για δύο αυτοκίνητα που κινούνται πλευρικά σε τούνελ και σε ανοιχτό δρόμο.**

Οι Πίνακες 8 και 9 και τα Σχήματα αναγράφουν τους συντελεστές  $C_D$ ,  $C_L$  αντίστοιχα για την περίπτωση που έχουμε κίνηση δύο οχημάτων που κινούνται πλευρικά.

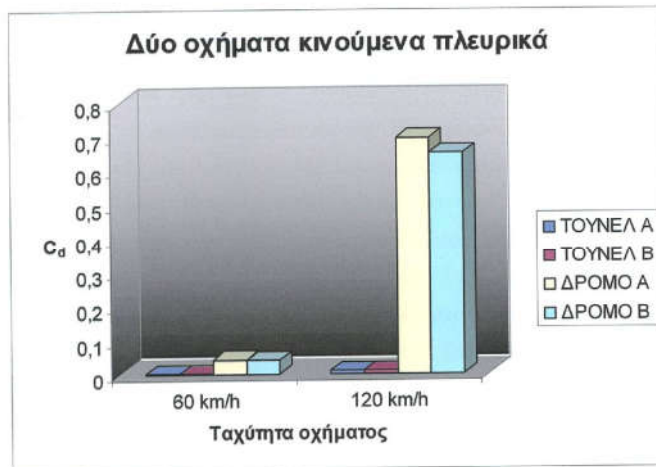


$C_D$ για δύο αυτοκίνητα που κινούνται πλευρικά		
Ταχύτητες	<u>60 Km/h</u>	<u>120 km/h</u>
<b>Κινούμενο σε τούνελ</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,0011	0,0086
Για το πίσω όχημα	0,0012	0,0099
<b>Κινούμενο σε ανοιχτό δρόμο</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,0427	0,694
Για το πίσω όχημα	0,0410	0,6504

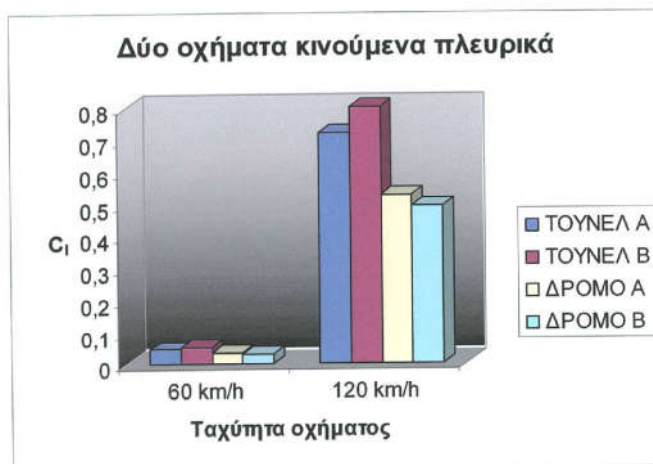
Πίνακας 8

$C_L$ για δύο αυτοκίνητα που κινούνται πλευρικά		
Ταχύτητες	<u>60 Km/h</u>	<u>120 km/h</u>
<b>Κινούμενο σε τούνελ</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,0011	0,0086
Για το πίσω όχημα	0,0012	0,0099
<b>Κινούμενο σε ανοιχτό δρόμο</b>		
Για το μπροστινό όχημα	0,0427	0,694
Για το πίσω όχημα	0,0410	0,6504

Πίνακας 9

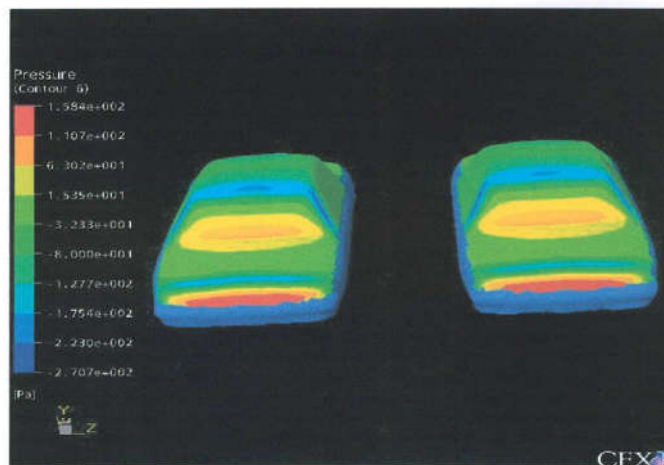


Εικόνα 6-12

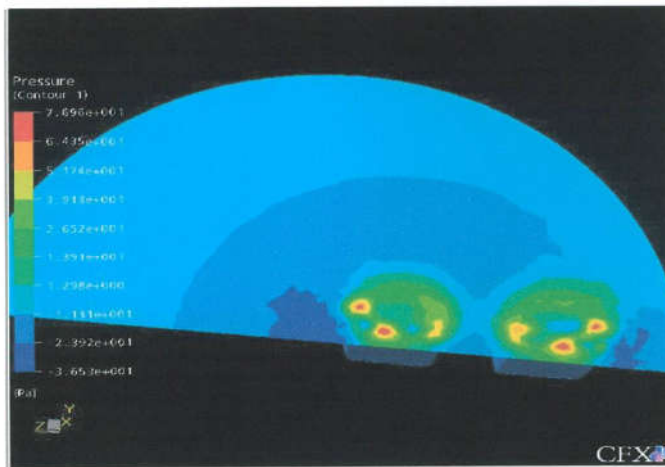


Εικόνα 6-13

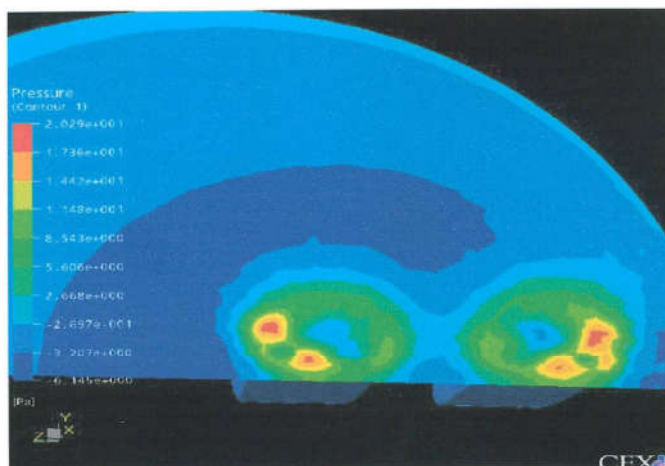
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους παραπάνω Πίνακες είναι οι εξής: παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα οι συντελεστές αυξάνονται. Επίσης παρατηρείται ότι ο συντελεστής αντίστασης είναι μικρότερος όταν τα οχήματα κινούνται σε τούνελ, ενώ ο συντελεστής άνωσης είναι μικρότερος όταν κινούνται σε ανοιχτό δρόμο. Τέλος, είναι να επισημάνουμε ότι όσο κινούνται σε τούνελ ο συντελεστής αντίστασης του πρώτου αυτοκινήτου είναι μικρότερος από αυτό του δεύτερου για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω. Το αξιοσημείωτο όμως είναι ότι στην περίπτωση που κινούνται σε ανοιχτό δρόμο πλευρικά, ο συντελεστής αντίστασης είναι μικρότερος για το όχημα που κινείται αριστερά. Στο Σχήμα 9 φαίνεται η δύναμη της πίεσης που ασκείται στα δύο οχήματα.



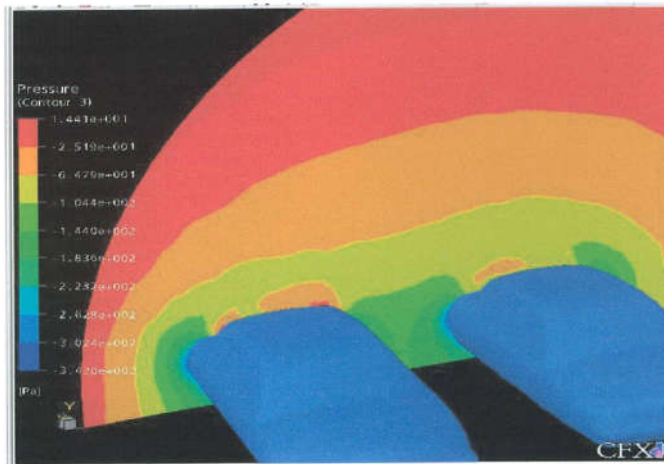
ΣΧΗΜΑ 6-14 Πίεση στην πάνω επιφάνεια των αυτοκινήτων.



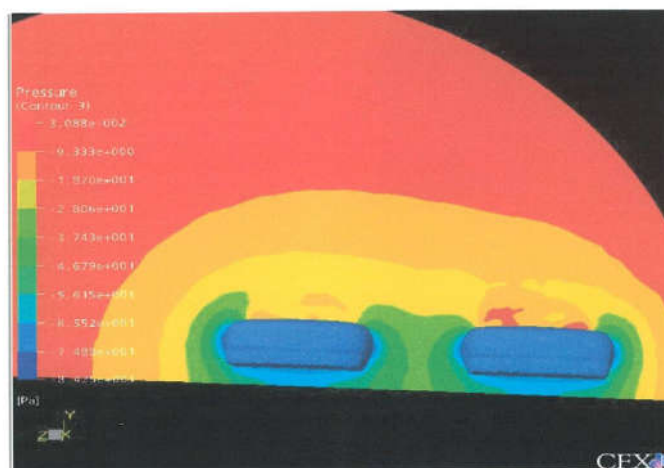
ΣΧΗΜΑ 6-165 Πίεση στο πίσω μέρος των αυτοκινήτων σε τούνελ.



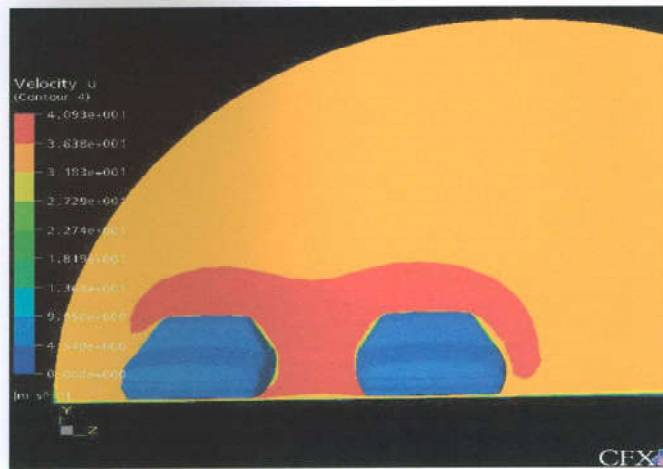
ΣΧΗΜΑ 6-176 Πίεση στο πίσω μέρος σε ανοιχτό δρόμο.



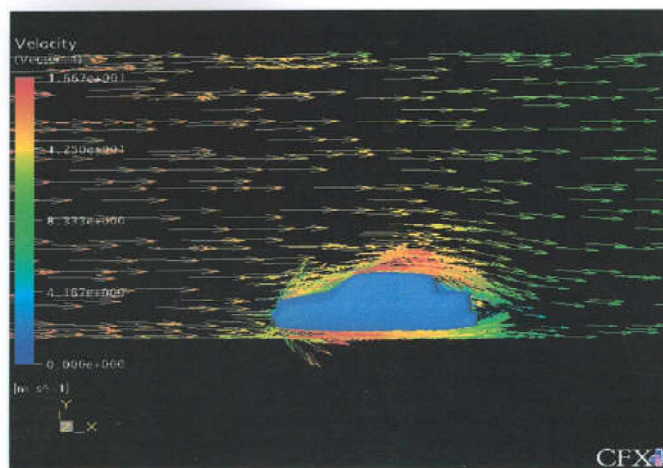
**ΣΧΗΜΑ 6-187 Πίεση στο πίσω παράθυρο των αυτοκινήτων σε τούνελ.**



**ΣΧΗΜΑ 6-18 Πίεση στο πίσω παράθυρο σε ανοιχτό δρόμο.**

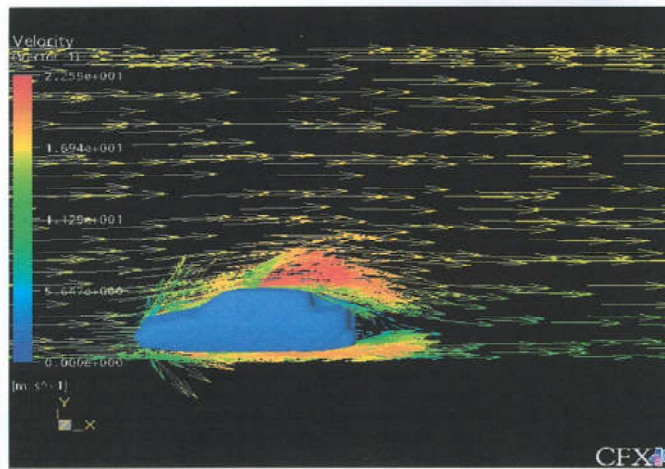


ΣΧΗΜΑ 6-19 Ταχύτητα στο υψηλότερο σημείο των αυτοκινήτων.

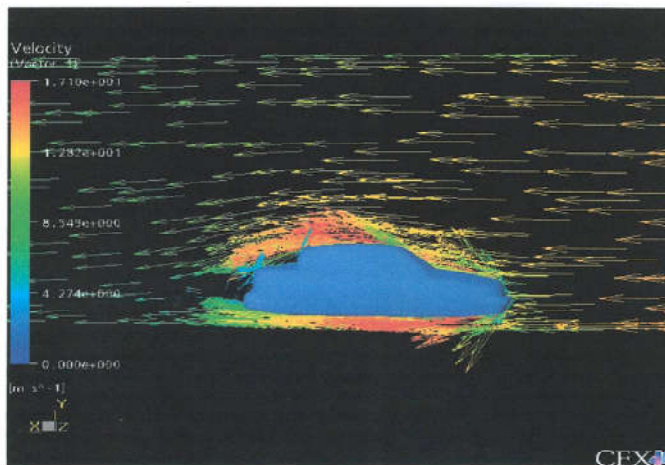


Εικόνα 6-20: Vector στο αριστερό αυτοκίνητο μέσα σε τούνελ.

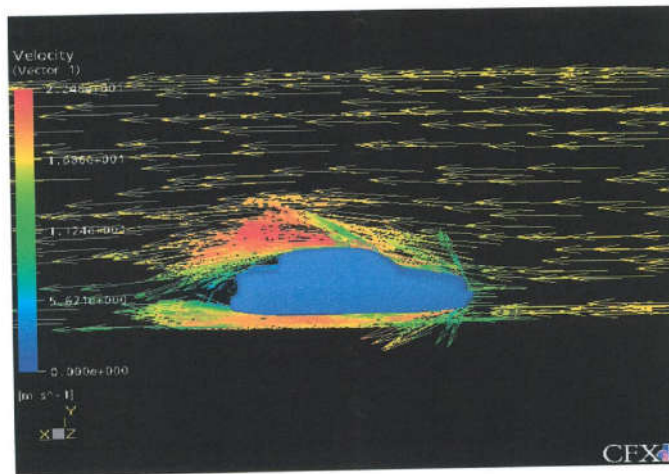




Εικόνα 6-21: Vector στο αριστερό αυτοκίνητο σε ανοιχτό δρόμο



Εικόνα 6-22: Vector στο δεξί αυτοκίνητο μέσα σε τούνελ.



Εικόνα 6-23: Vector στο δεξί αυτοκίνητο σε ανοιχτό δρόμο.

Από άποψη υπολογιστικών χρόνων και απαιτήσεων, η μέθοδος επίλυσης της δυναμικής ροής που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως ο μικρός απαιτούμενος χρόνος, οι περιορισμένες απαιτήσεις μνήμης και χώρου αλλά και η απλότητα ως προς την εφαρμογή. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τη μέθοδο ένα γρήγορο, πρακτικό και σίγουρο υπολογιστικό εργαλείο το οποίο σε συνδυασμό με τις εξελιγμένες εφαρμογές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός οχήματος, χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις από τους χρήστες ή μεγάλα υπολογιστικά συστήματα.

## 7. Συμπεράσματα

- Και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζουμε, καλύτερη αεροδυναμική (χαμηλότερο  $C_D$ ) έχουμε όταν κινείται το όχημα με μικρότερη ταχύτητα.
- Στην περίπτωση που έχουμε κίνηση ενός οχήματος, όταν κινούμαστε σε ανοιχτό δρόμο έχουμε καλύτερη αεροδυναμική από ότι όταν κινούμαστε μέσα σε τούνελ.
- Στην περίπτωση που έχουμε δύο οχήματα που κινούνται το ένα πίσω από το άλλο οι συντελεστές είναι αισθητά μεγαλύτεροι για το αυτοκίνητο που κινείται πίσω.
- Σε αντίθεση με την περίπτωση που είχαμε κίνηση ενός οχήματος, στην περίπτωση που έχουμε κίνηση δύο οχημάτων το ένα πίσω από το άλλο, οι συντελεστές είναι μικρότεροι όταν τα οχήματα κινούνται μέσα στο τούνελ και όχι σε ανοιχτό δρόμο.
- Όταν τα δύο οχήματα κινούνται πλευρικά παρατηρείται ότι ο συντελεστής αντίστασης είναι μικρότερος όταν τα οχήματα κινούνται σε τούνελ, ενώ ο συντελεστής άνωσης είναι μικρότερος όταν κινούνται σε ανοιχτό δρόμο.
- Όσο κινούνται σε τούνελ ο συντελεστής αντίστασης του αυτοκινήτου που κινείται στην αριστερή λωρίδα είναι μικρότερος. Ενώ όταν κινούνται σε ανοιχτό δρόμο πλευρικά, ο συντελεστής αντίστασης είναι μικρότερος για το όχημα που κινείται δεξιά.

Τα σύγχρονα προβλήματα και η επιτακτική ανάγκη αντιμετώπισής τους, οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε ότι αφορά στον περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου, στην άνεση των επιβατών, στην ασφάλεια και στις επιδόσεις αλλά και ο συνεχής ανταγωνισμός μεταξύ των εταιρειών, καθιστούν απαραίτητη και αναγκαία τη συνεχή εξέλιξη των οχημάτων, όλων των κατηγοριών. Το ευρύ φάσμα τόσο της εξέλιξης αυτής όσο και των ίδιων των οχημάτων, προσφέρει γόνιμο έδαφος για μελλοντική έρευνα.

Στον τομέα της αεροδυναμικής, η σχεδίαση οχημάτων με μικρή αεροδυναμική αντίσταση, καλύτερη ευστάθεια σε υψηλές ταχύτητες, αποδοτικότερα συστήματα απαγωγής της θερμότητας του κινητήρα και ανανέωσης του αέρα στο χώρο των επιβατών, μικρότερο αεροδυναμικό θόρυβο αλλά και διατήρησης ή και αύξηση του ωφέλιμου εσωτερικού χώρου είναι βασικές επιδιώξεις όλων των κατασκευαστών.

Είναι γεγονός ότι οι μορφές των οχημάτων πλέον δεν αλλάζουν σημαντικά. Όλο το ενδιαφέρον στρέφεται στο να αναπτυχθούν μεθοδολογίες και τεχνικές οι οποίες θα επιτρέψουν τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου, την ελαχιστοποίηση του κόστους, αλλά που κυρίως θα βοηθήσουν στη διερεύνηση όλων των δυνατοτήτων που υπάρχουν και θα μπορούσαν να εφαρμοστούν ώστε τα μελλοντικά αυτοκίνητα να καλύπτουν απόλυτα τις επιδιώξεις των κατασκευαστών.

Στο μέλλον φαίνεται τη λύση στο πρόβλημα να τη δίνουν οι προσομοιώσεις με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Παρατηρούμε ότι οι πειραματικές διαδικασίες έρχονται πλέον σαν δεύτερη λύση και ολοένα ελαττώνονται. Για πιο έμπιστα όμως αποτελέσματα καλό θα ήταν να υπήρχε ένας συνδυασμός πειράματος σε μεγάλες αεροσήραγγες αλλά και προσομοιώσεων με ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Σαν μελλοντική εργασία θα πρότεινα εξέταση της ροής σε δύο αυτοκίνητα που κινούνται με αντίθετη κατεύθυνση. Επίσης θα μπορούσε να μελετηθεί η περίπτωση που έχουμε εισροή του αέρα υπό γωνία. Τέλος, θα παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς δεν έχει γίνει παρόμοια μελέτη, η εξέταση τοποθεσίας αισθητήρων μέσα στο τούνελ σε περίπτωση ατυχήματος ή έκρηξης.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Υπολογιστική ρευστομηχανική, Γ. Μπεργελές
- Βασικές αρχές στις Στροβιλομηχανές, Απόστολος Γούλας
- Σημειώσεις μαθήματος Μηχανές Μεταφοράς Ενέργειας
- Manual του προγράμματος CFX
- Hoerner SF. Fluid dynamic drag, Hoerner Fluid dynamics
- Sovran G, Morel T, Mason WT. Aerodynamic drag Mechanisms of Bluff bodies and road vehicles, plenum press, New York
- Aero Engineering L. Scott Miller
- Aerodynamic Engineering, Michael Papadakis
- [www.has.lrt.tubelft](http://www.has.lrt.tubelft)
- [www.autotriti.gr](http://www.autotriti.gr)
- [www.4troxoi.gr](http://www.4troxoi.gr)
- [www.kiteboard.gr/aerodynamic](http://www.kiteboard.gr/aerodynamic)
- [www.autodynamic.com](http://www.autodynamic.com)
- [www.aerodynamic.net](http://www.aerodynamic.net)
- [www.ajmotorsport.com](http://www.ajmotorsport.com)