



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΛΟΠΟΝΗΣΟΥ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ  
ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ**



**ΟΝΟΜΑ :ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΠΙΘΕΤΟ:ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**ΑΜ:6980**

**ΟΝΟΜΑ :ΛΕΝΤΙΟΝ**

**ΕΠΙΘΕΤΟ:ΜΠΕΚΙΡΑΪ**

**ΑΜ:6933**

**ΕΠΙΒΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΥΓΕΝΙΟΣ ΣΚΟΥΡΑΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

**Πάτρα,2020**

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Κ. Ευγένιο Σκούρα για όλη την υποστήριξη και βοήθεια που μας παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που έδειξαν να έχουν στο πρόσωπο μας.

## ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: LGOC B-type.....	9
Εικόνα 2: Το πρώτο εσωτερικής καύσης του 1895 .....	9
Εικόνα 3: Ένα λεωφορείο δημόσιων συγκοινωνιών της Mercedes-Benz O405NH CNG .....	11
Εικόνα 4: Τουριστικό λεωφορείο .....	12
Εικόνα 5: Ιδιωτικό λεωφορείο .....	13
Εικόνα 6: Δρόμος στις ΗΠΑ όπου φαίνεται ξεκάθαρα η μόλυνση του Περιβάλλοντος.....	16
Εικόνα 7: Μοντέλο σε αεροδυναμικό έλεγχο .....	19
Εικόνα 8: Μοντέλο σε αεροδυναμικό έλεγχο .....	20
Εικόνα 9: Μηχανικοί μελετώντας αεροδυναμική συμπεριφορά αυτοκινήτου .....	22
Εικόνα 10: Πρότυπο Μοντέλο Αεροδυναμικού Αυτοκινήτου .....	23
Εικόνα 11: Το Nissan ARC - Χ αποτελεί μια κλασική ιαπωνική πρόταση για την αεροδυναμική των μελλοντικών αμαξωμάτων .....	24
Εικόνα 12: Η σχεδίαση βεβαίως δε γίνεται με το χέρι. Δεξιά, μια άποψη φάντασμα του ARC - Χ.....	25
Εικόνα 13: Πολλές ώρες αφιερώνονται για τη σύγκριση ανάμεσα στα πρώτα σκίτσα- σχέδια και το πρόπλασμα του μοντέλου .....	26
Εικόνα 14: Με συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης μόνο 0.161 το αρχικό σχήμα του Πινιφαρίνα ήταν μια γενναία προσπάθεια για τη μείωση της κατανάλωσης βενζίνης.....	31
Εικόνα 15: Μοντέλο υπό εξέταση.....	31
Εικόνα 16: Μοντέλο υπό εξέταση .....	32
Εικόνα 17: Επιμήκυνση της δομής υπό την επίδραση φορτίου .....	40
Εικόνα 18: Διαίρεση δομής (αριστερά) σε στοιχεία (δεξιά). .....	41
Εικόνα 19: Στοιχεία και κόμβοι. ....	41
Εικόνα 20: Πλέγμα πολύπλοκης κατασκευής. ....	42
Εικόνα 21: Ράβδος δικτυώματος i j ως προς ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων XOY... ..	45
Εικόνα 22 .....	49
<i>Εικόνα 23: Παράδειγμα 1.1. ....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 24: Παράδειγμα 1.2. ....</i>	<i>54</i>
Εικόνα 25: Πρόσωση Λεωφορείου.....	57
Εικόνα 26: Πλάγια όψη Λεωφορείου.....	57
Εικόνα 27: Λεωφορείο .....	58
Εικόνα 28: Εισαγωγή Γεωμετρίας .....	59
Εικόνα 29: Δημιουργία Enclosure .....	59

Εικόνα 30: Μοντέλο μέσα στο Enclosure.....	60
Εικόνα 31: Διακριτοποίηση Μοντέλου .....	60
Εικόνα 32: Ορίζοντας ποιες θα είναι είσοδοι-έξοδοι -wall.....	61
Εικόνα 33: Wall.....	61
Εικόνα 34: Ορισμός input.....	62
Εικόνα 35: Επίλυση επετεύχθη .....	69
Εικόνα 36: Ταχύτητα που αναπτύσσεται γύρω από το λεωφορείο .....	69
Εικόνα 37: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου .....	70
Εικόνα 38: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου .....	70
Εικόνα 39: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην είσοδο του λεωφορείου .....	71
Εικόνα 40: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου .....	71
Εικόνα 41: Πίεση που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου .....	72
Εικόνα 42: Pressure Gradient.....	72
Εικόνα 43: Ταχύτητα $u$ .....	73
Εικόνα 44: Ταχύτητα $v$ .....	73
Εικόνα 45: Ταχύτητα $w$ .....	74
Εικόνα 46:Ολοκλήρωση λύσης.....	75
Εικόνα 47: Ανάπτυξη πίεσης στην είσοδο .....	75
Εικόνα 48: Ανάπτυξη πίεσης στην έξοδο.....	75
Εικόνα 49: Συντελεστής Αντίστασης $C_d$ .....	76
Εικόνα 50: Drag Force .....	76
Εικόνα 51: Συντελεστή $C_l$ .....	77
Εικόνα 52:Δύναμη Lift .....	77

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	4
1.1 Προϊστορία .....	4
1.2 Τύποι .....	9
1.3 Χρήσεις.....	10
Κεφάλαιο 2 Περιβάλλον και συνέπειες .....	13
2.1 Μόλυνση αέρα .....	13
2.2 Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	16
2.2.1 Εκπομπές από Βαρέα οχήματα .....	16
2.3 Οφέλη καθαρού αέρα από ηλεκτρικά φορτηγά και λεωφορεία.....	17
Κεφάλαιο 3 Αεροδυναμική .....	18
3.1 Ωφέλειες από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό .....	21
3.2 Αεροδυναμική στα αμαξώματα .....	21
3.3 Αεροδυναμική οικονομία.....	27
3.3.1 Το αυτοκίνητο και η ροή του αέρα γύρω απ' αυτό .....	28
3.4 Τι είναι ο Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης .....	32

Κεφάλαιο 4 Πεπερασμένα στοιχεία.....	34
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	34
4.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	37
4.3 ΛΟΓΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	38
4.4 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	39
4.5 ΔΙΚΤΥΩΤΟΙ ΦΟΡΕΙΣ – ΡΑΒΔΟΣ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ .....	44
Κεφάλαιο 5 Παρουσίαση μοντέλου .....	57
Κεφάλαιο 6 Αριθμητικά αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	59
6.1 Εισαγωγή Μοντέλου στο Ansys.....	59
6.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	63
Συμπεράσματα .....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	80

## Κεφάλαιο 1

### 1.1 Προϊστορία

Ένα λεωφορείο (συμβόλαιο από omnibus, multibus με παραλλαγές, μηχανοκίνητο λεωφορείο, λεωφορείο κ.λπ.) είναι ένα οδικό όχημα σχεδιασμένο να μεταφέρει πολλούς επιβάτες. Τα λεωφορεία μπορούν να έχουν χωρητικότητα ύψους 300 επιβατών.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος λεωφορείου είναι ο άκαμπτος λεωφορείο, μονής καταστρώματος, με μεγαλύτερα φορτία που μεταφέρονται από διώροφα και αρθρωτά λεωφορεία και μικρότερα φορτία που μεταφέρονται από μικρά λεωφορεία, ενώ τα πούλμαν χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες μεγαλύτερης διάρκειας.

Πολλοί τύποι λεωφορείων, όπως τα αστικά λεωφορεία και τα υπεραστικά λεωφορεία, χρεώνουν ένα ναύλο. Άλλοι τύποι, όπως λεωφορεία δημοτικού ή μέσου σχολείου ή λεωφορεία εντός μιας πανεπιστημιακής πανεπιστημιούπολης, δεν χρεώνουν ναύλο. Σε πολλές δικαιοδοσίες, οι οδηγοί λεωφορείων απαιτούν ειδική άδεια πέραν της τακτικής άδειας οδήγησης.

Τα λεωφορεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τακτικές μεταφορές, σχολικές μεταφορές, ιδιωτικές μισθώσεις ή τουρισμό. τα διαφημιστικά λεωφορεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολιτικές εκστρατείες και άλλα ιδιωτικά.

Λειτουργούν για ένα ευρύ φάσμα σκοπών, συμπεριλαμβανομένων των οχημάτων για περιοδεία ροκ και pop μπάντα.

Τα ιπτάμενα λεωφορεία χρησιμοποιήθηκαν από τη δεκαετία του 1820, ακολουθούμενα από ατμοκίνητα λεωφορεία στη δεκαετία του 1830 και ηλεκτρικά λεωφορεία το 1882.

Τα πρώτα λεωφορεία με κινητήρα εσωτερικής καύσης ή λεωφορεία κινητήρων χρησιμοποιήθηκαν το 1895. Πρόσφατα, αυξάνεται το ενδιαφέρον των υβριδικών ηλεκτρικών λεωφορείων, των λεωφορείων κυψελών καυσίμου και των ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς και των λεωφορείων που τροφοδοτούνται με συμπιεσμένο φυσικό αέριο ή βιοντίζελ.

Από το 2010, η κατασκευή λεωφορείων γίνεται όλο και πιο παγκόσμια, με τα ίδια σχέδια να εμφανίζονται σε όλο τον κόσμο.

Το λεωφορείο (bus) είναι μια αποκομμένη μορφή της λατινικής adjectival φόρμας omnibus ("για όλους"), του dativeplural ή omnis-e ("all").

Το θεωρητικό πλήρες όνομα είναι στο γαλλικό *voitureomnibus* [1] ("όχημα για όλους").

Το όνομα προέρχεται από μια υπηρεσία μαζικών μεταφορών που ξεκίνησε το 1823 από έναν Γάλλο ιδιοκτήτη καλαμποκιού Stanislas Baudry στο Richebourg, ένα προάστιο της Ναύτης, ένα παραπροϊόν ή ο μύλος του ήταν ζεστό νερό και έτσι δίπλα του δημιουργούσε μια επιχείρηση sra.

Για να ενθαρρύνει τους πελάτες του, ξεκίνησε μια υπηρεσία μεταφοράς από το κέντρο της πόλης ή τη Nantes στην εγκατάσταση του. Τα πρώτα οχήματα σταμάτησαν μπροστά από το κατάστημα ή ένα καπέλο με το όνομα Omnes, το οποίο έδειξε ένα μεγάλο σημάδι με την ένδειξη «Omnes Omnibus», μια λέξη για το Λατινικό ακουστικό επώνυμό του, όμοια με την αντρική και θηλυκή ονομαστική, το επίθετο omnis-e ("όλα"), σε συνδυασμό με το omnibus, ο πληθυντικός όρος που σημαίνει "για όλους", δίνοντας έτσι στο κατάστημά του το όνομα "Omnes for all" ή "όλα για όλους".

Το σχέδιό του στον τομέα των μεταφορών ήταν μια τεράστια επιτυχία, αν και όχι όπως σκόπευε, καθώς οι περισσότεροι ή οι επιβάτες του δεν επισκέπτονταν το sra του.

Έστρεψε την υπηρεσία μεταφοράς στην κύρια προσοδοφόρα επιχείρηση και έκλεισε το μύλο και το spa.

Ο πολίτης της Ναύτης έδωσε σύντομα το ψευδώνυμο "omnibus" στο όχημα.

Έχοντας εφεύρει την επιτυχημένη ιδέα, ο Baudry μετακόμισε στο Παρίσι και ξεκίνησε την πρώτη ομώνυμη υπηρεσία εκεί τον Απρίλιο του 1828. Μια παρόμοια υπηρεσία εισήχθη στο Λονδίνο το 1829.

### 1.1.2 Ιστορία

#### **Λεωφορεία-Ατμού**

Οι τακτικές υπηρεσίες υπεραστικών λεωφορείων με ατμοκίνητα λεωφορεία πρωτοστάτησαν στην Αγγλία στη δεκαετία του 1830 από τον Walter Hancock και από συνεργάτες του Sir Goldsworthy Gurney, μεταξύ άλλων, με αξιόπιστες υπηρεσίες σε οδικές συνθήκες, οι οποίες ήταν πολύ επικίνδυνες για μεταφορές με άλογα.

Το πρώτο μηχανοκίνητο λεωφορείο ατμού εμφανίστηκε στους δρόμους του Λονδίνου στις 22 Απριλίου 1833. [9] Τα βαγόνια ατμού ήταν πολύ λιγότερο πιθανό να ανατραπούν, ταξίδευαν ταχύτερα από την άμαξα, ήταν πολύ φθηνότερα για να τρέξουν και προκάλεσαν πολύ λιγότερες ζημιές στην επιφάνεια του δρόμου λόγω των μεγάλων ελαστικών τους. [10]

Ωστόσο, τα βαριά οδικά τέλη που επιβλήθηκαν από τις καταπιστευτικές εταιρείες καταστρέφουν τα οχήματα ατμού και αφήνουν το δρόμο για τις εταιρείες λεωφορείων αλόγων και από το 1861 και μετά, η σκληρή νομοθεσία απέλυσε ουσιαστικά μηχανικά προωθούμενα οχήματα από τους δρόμους της Μεγάλης Βρετανίας για 30 χρόνια, Πράξη εκείνης της χρονιάς που επιβάλλει περιοριστικά όρια ταχύτητας στις "οδικές ατμομηχανές" ή 5 μίλια / ώρα στις πόλεις και 10 μίλια / ώρα στη χώρα.

#### **Τρόλεϊ**

Παράλληλα με την ανάπτυξη του λεωφορείου, η εφεύρεση του ηλεκτρικού λεωφορείου τροφοδοτήθηκε τυπικά μέσω πόλων τρόλεϊ με υπερυψωμένα σύρματα. Οι αδελφοί της Siemens, William στην Αγγλία και ο Ernst Werner στη Γερμανία, συνεργάστηκαν στην ανάπτυξη της έννοιας του τρόλεϊ.

Ο Sir William πρότεινε για πρώτη φορά την ιδέα σε ένα άρθρο στο περιοδικό της Εταιρείας των Τεχνών το 1881 ως "... ρύθμιση με την οποία ένα συνηθισμένο πανταχού ... θα είχε ένα ψαλίδι που ρίχτηκε κατά διαστήματα από τη μία πλευρά του δρόμου προς την άλλη , και δύο καλώδια που κρέμονται από αυτά τα τράντες, επιτρέποντας στους κυλίνδρους επαφής να τρέχουν σε αυτά τα δύο καλώδια, το ρεύμα θα μπορούσε να μεταφερθεί στο αυτοκίνητο τραμ και πίσω στο μηχάνημα δυναμό στο σταθμό, χωρίς την ανάγκη να κινούνται σε ράγες καθόλου . "

Το πρώτο τέτοιο όχημα, το Electromote, κατασκευάστηκε από τον αδελφό του. Ernst Wernervon Siemens και παρουσιάστηκε στο κοινό το 1882 στο Halensee της Γερμανίας . Αν και αυτό το πειραματικό όχημα πληρούσε όλα τα τεχνικά κριτήρια ή ένα τυπικό τρόλεϊ, αποσυναρμολογήθηκε το ίδιο έτος μετά την επίδειξη .

Ο Max Schiemann άνοιξε ένα τρόλεϊ που μεταφέρει επιβάτες το 1901 κοντά στη Δρέσδη, στη Γερμανία. Παρόλο που το σύστημα αυτό λειτουργούσε μόνο μέχρι το 1904, ο Schiemann είχε αναπτύξει αυτό που είναι τώρα το συνηθισμένο σύστημα συλλογής ρεύματος τροχόσπιτου. Στις πρώτες μέρες χρησιμοποιήθηκαν μερικές άλλες μέθοδοι ή συλλογή ρεύματος. Το Λιντς και το Μπράντφορντ έγιναν οι πρώτες πόλεις που έβαλαν τα τρόλεϊ σε λειτουργία στη Μεγάλη Βρετανία στις 20 Ιουνίου 1911.

### **Μηχανοκίνητα λεωφορεία**

Στο Siegerland της Γερμανίας, δύο γραμμές επιβατικών λεωφορείων έτρεξαν σύντομα, αλλά ασύμφορα, το 1895 με τη χρήση έξι επιβατικών κινητήρων που αναπτύχθηκαν από την Benz Viktoria του 1893. Μια άλλη εμπορική γραμμή λεωφορείων που χρησιμοποιεί το ίδιο μοντέλο Benzomnibuses έτρεξε για ένα μικρό χρονικό διάστημα το 1898 στην αγροτική περιοχή Landudno, στην Ουαλία.

Η Daimler παρήγαγε επίσης ένα από τα παλαιότερα μοντέλα αυτοκινητάμαξας το 1898, που πωλούσε ένα διώροφο λεωφορείο στην Motor Traction Company που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στους δρόμους του Λονδίνου στις 23 Απριλίου 1898.

Το όχημα είχε μέγιστη ταχύτητα 18 km / h (11,2 mph) και φιλοξένησε μέχρι 20 επιβάτες, σε κλειστό χώρο κάτω και πάνω σε υπαίθρια πλατφόρμα. Με την επιτυχία και τη δημοτικότητα αυτού του λεωφορείου, η Daimler επεκτείνει την παραγωγή, που πουλάει περισσότερα λεωφορεία σε εταιρείες στο Λονδίνο και, το 1899, στη Στοκχόλμη και το Spreyer.

Η Daimler συνάπτει επίσης εταιρική σχέση με τη βρετανική εταιρεία Milnes και ανέπτυξε ένα νέο δώροφο κατά το 1902 που έγινε το πρότυπο της αγοράς.

### **Αρχικός τύπος τύπου LGOC**

Το πρώτο μοντέλο μαζικής παραγωγής λεωφορείων ήταν το δώροφο λεωφορείο τύπου Β, το οποίο σχεδίασε ο Frank Searle και λειτούργησε από τη Γενική Εταιρεία Omnibus του Λονδίνου - τέθηκε σε λειτουργία το 1910 και σχεδόν 3,000 είχαν κατασκευαστεί μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Εκατοντάδες είδαν στρατιωτική θητεία στο δυτικό μέτωπο κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Daimler CC Bus 1912. Ένα από τα πέντε λεωφορεία της Daimler που εξάγονται στην Αυστραλία.

Η εταιρεία Yellow Coach Manufacturing, η οποία γρήγορα έγινε μεγάλος κατασκευαστής λεωφορείων στις ΗΠΑ, ιδρύθηκε στο Σικάγο το 1923 από τον John D. Hertz.

Η General Motors αγόρασε μερίδιο πλειοψηφίας το 1925 και άλλαξε το όνομά της στην εταιρεία Yellow Truck and Coach Manufacturing Company. Στη συνέχεια αγόρασαν το υπόλοιπο των μετοχών το 1943 για να σχηματίσουν το τμήμα φορτηγών και λεωφορείων GM.

Τα μοντέλα επεκτάθηκαν τον 20ο αιώνα, οδηγώντας στην ευρεία εισαγωγή της σύγχρονης αναγνωρίσιμης μορφής ή των λεωφορείων πλήρους μεγέθους από τη δεκαετία του 1950. Το AEC Routemaster, που αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1950, ήταν ένα πρωτοποριακό σχέδιο και παραμένει μια εικόνα του Λονδίνου μέχρι σήμερα .

Ο καινοτόμος σχεδιασμός χρησιμοποιεί ελαφρύ αλουμίνιο και τεχνικές που αναπτύχθηκαν στην παραγωγή αεροσκαφών κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου. Εκτός από ένα καινοτόμο σχεδιασμό εξοικονόμησης βάρους, εισήχθη για πρώτη φορά σε ανεξάρτητο μπροστινό ζυγό ανάρτησης, υδραυλικό τιμόνι, πλήρως αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων και υδραυλική πέδηση.





Εικόνα 1: LGOC B-type



Εικόνα 2: Το πρώτο εσωτερικής καύσης του 1895

## 1.2 Τύποι

Οι μορφές περιλαμβάνουν δώροφο λεωφορείο (συνήθως με άκαμπτο πλαίσιο) και αρθρωτό λεωφορείο, ο επιπολασμός του οποίου ποικίλλει από χώρα σε χώρα.

Μεγάλα αρθρωτά λεωφορεία μεγάλης χωρητικότητας κατασκευάζονται επίσης και τα ρυμουλκόμενα μεταφοράς επιβατών - είτε ρυμουλκόμενα πίσω από ένα άκαμπτο λεωφορείο είτε ρυμουλκόμενα ως ρυμουλκόμενο με φορτηγό. Τα μικρότερα midibuses έχουν μικρότερη χωρητικότητα και τα ανοικτά λεωφορεία συνήθως χρησιμοποιούνται για αναψυχή. Σε πολλούς νέους στόλους, ιδιαίτερα στα συστήματα τοπικής διαμετακόμισης, η

μετάβαση σε λεωφορεία χαμηλού δαπέδου είναι κοινή, κυρίως για ευκολότερη προσβασιμότητα.

Τα λεωφορεία έχουν σχεδιαστεί για μετακινήσεις μεγαλύτερης διάρκειας και είναι συνήθως εξοπλισμένα με ατομικά καθίσματα με κλίση προς τα πίσω, ζώνες ασφαλείας, τουαλέτες και συστήματα οπτικοακουστικής ψυχαγωγίας και μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες με μεγαλύτερη χωρητικότητα για αποσκευές.

Τα πούλμαν μπορεί να είναι μονόκλινα ή διπλά καταστρώματα, αρθρωτά και συχνά περιλαμβάνουν χωριστό χώρο αποσκευών κάτω από το πάτωμα του συνοδηγού. Τα καθοδηγούμενα λεωφορεία είναι εξοπλισμένα με τεχνολογία που τους επιτρέπει να τρέχουν σε καθορισμένους οδηγούς, επιτρέποντας την ελεγχόμενη ευθυγράμμιση στις στάσεις των λεωφορείων και τις λιγότερες διαστημικές εργασίες με οδηγημένες λωρίδες από τους συμβατικούς δρόμους ή τις λωρίδες λεωφορείων.

Η κατασκευή λεωφορείων μπορεί να γίνεται από μία μόνο εταιρεία (κατασκευαστή ολοκληρωμένη) ή από ένα κατασκευαστικό κτίριο από ένα κατασκευαστή ενός λεωφορείου πάνω από ένα πλαίσιο που παράγεται από άλλο κατασκευαστή.

### 1.3 Χρήσεις

#### **Δημόσια συγκοινωνία**

Τα λεωφορεία διαμετακόμισης, τα οποία χρησιμοποιούνται στις υπηρεσίες λεωφορείων των δημόσιων συγκοινωνιών, διαθέτουν βοηθητικά εξαρτήματα σχεδιασμένα για αποτελεσματική μετακίνηση μεγάλου αριθμού ατόμων και συχνά έχουν πολλαπλές πόρτες. Τα λεωφορεία χρησιμοποιούνται για διαδρομές μεγάλων αποστάσεων. Οι υπηρεσίες γρήγορης διαβίβασης υψηλής ταχύτητας με λεωφορεία μπορούν να χρησιμοποιούν τα δύο αρθρωτά λεωφορεία ή λεωφορεία τύπου τραμ όπως το Wright Street Car και το Irisbus Civis.

Οι υπηρεσίες λεωφορείων και πούλμαν λειτουργούν συχνά σε προκαθορισμένο χρονοδιάγραμμα δημοσίων μεταφορών που καθορίζει τη διαδρομή και το χρονοδιάγραμμα, αλλά μικρότερα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιο ευέλικτες υπηρεσίες μεταφορών που ανταποκρίνονται στη ζήτηση.



Εικόνα 3: Ένα λεωφορείο δημόσιων συγκοινωνιών της Mercedes-Benz O405NH CNG

## ΤΟΥΡΙΣΜΟΣ

Τα λεωφορεία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην τουριστική βιομηχανία. Τα λεωφορεία σε όλο τον κόσμο επιτρέπουν στους τουρίστες να δουν τοπικά αξιοθέατα ή τοπία. Αυτά είναι συχνά ανοικτά λεωφορεία, αλλά μπορούν επίσης να είναι κανονικά λεωφορεία ή πούλμαν.

Στα τοπικά αξιοθέατα, το City Sightseeing είναι ο μεγαλύτερος φορέας εκμετάλλευσης των τοπικών λεωφορείων, τα οποία λειτουργούν σε προνομιακή βάση σε όλο τον κόσμο. Τα εξειδικευμένα λεωφορεία περιήγησης συχνά ανήκουν και λειτουργούν συχνά από πάρκα σαφάρι και άλλα θεματικά πάρκα ή θέρετρα.

Οι μακρινές περιηγήσεις πραγματοποιούνται επίσης με λεωφορείο, είτε με κατεύθυνση προς τα πάνω είτε με οργανωτή ταξιδιών, και συνήθως επιτρέπουν την αποβίβαση από το λεωφορείο για να επιτρέπεται η περιοδεία σε αξιοθέατα. Αυτές μπορεί να είναι ημερήσιες εκδρομές ή μακρύτερες εκδρομές που περιλαμβάνουν διαμονές στο ξενοδοχείο. Τα λεωφορεία περιοδεύουν συχνά έναν ξεναγό, παρόλο που ο οδηγός ή ένα εγγεγραμμένο ηχητικό σχόλιο μπορεί επίσης να εκτελέσει αυτή τη λειτουργία.

Ο ταξιδιωτικός πράκτορας μπορεί να είναι θυγατρική εταιρίας που εκμεταλλεύεται λεωφορεία και πούλμαν για άλλες χρήσεις ή ανεξάρτητη εταιρεία που εκτελεί δρομολόγια

λεωφορείων ή πούλμαν. Οι μεταφορείς εμπορευματικών μεταφορών μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν τα πούλμαν τους για να πραγματοποιήσουν περιηγήσεις στην πόλη-στόχο μεταξύ του πρωινού και του απογεύματος οδικώς.

Τα λεωφορεία και τα πούλμαν αποτελούν επίσης ένα κοινό στοιχείο της ευρύτερης βιομηχανίας διακοπών, παρέχοντας ιδιωτικές μεταφορές αεροδρομίου (εκτός από τα γενικά λεωφορεία του αεροδρομίου) και οργανωμένες εκδρομές και ημερήσιες εκδρομές για παραθεριστές.



Εικόνα 4: Τουριστικό λεωφορείο

### Ιδιωτικό χάρτη

Λόγω του κόστους που συνεπάγεται η ιδιοκτησία, η λειτουργία και η οδήγηση λεωφορείων και πούλμαν, πολλά λεωφορεία και πούλμαν χρησιμοποιούν ιδιωτική μίσθωση οχημάτων από εταιρίες, είτε για μία ή δύο ημέρες είτε για μια πιο μακροχρόνια σύμβαση, όπου η ναυλωμένη εταιρεία παρέχει τα οχήματα και ειδικευμένους οδηγούς.

Οι εταιρίες λεωφορείων μπορεί να είναι εντελώς ανεξάρτητες επιχειρήσεις ή η μίσθωση ναύλων μπορεί να είναι θυγατρική επιχείρηση φορέα εκμετάλλευσης δημόσιων μεταφορών που μπορεί να διατηρεί χωριστό στόλο ή να χρησιμοποιεί πλωτά λεωφορεία, πούλμαν και λεωφορεία διπλής χρήσης.

Πολλές ιδιωτικές εταιρίες ταξί χρησιμοποιούν επίσης μεγαλύτερα οχήματα μικρών λεωφορείων για να καλύψουν τους ναύλους των ομίλων. Οι εταιρίες, οι ιδιωτικές ομάδες



και οι κοινωνικοί σύλλογοι μπορούν να προσλαμβάνουν λεωφορεία ή πούλμαν ως οικονομικά αποδοτικό τρόπο μεταφοράς μιας ομάδας σε ένα γεγονός ή μια τοποθεσία, όπως μια συνάντηση ομάδας, μια διοργάνωση αγώνων ή μια οργανωμένη ψυχαγωγική δραστηριότητα όπως ένας καλοκαιρινός καταυλισμός.

Τα σχολεία συχνά προσλαμβάνουν υπηρεσίες τακτικών λεωφορείων σε τακτική βάση για τη μεταφορά παιδιών προς και από τα σπίτια τους. Τα ταξινομημένα λεωφορεία χρησιμοποιούνται επίσης από εκπαιδευτικά ιδρύματα για τη μεταφορά σε συμβάσεις, εκθέσεις και εκδρομές. Οι εταιρείες ψυχαγωγίας ή εκδηλώσεων μπορούν επίσης να προσλαμβάνουν λεωφορεία μεταφοράς για μεταφορές σε εκδηλώσεις όπως φεστιβάλ ή συνέδρια.



Εικόνα 5: Ιδιωτικό λεωφορείο

## Κεφάλαιο 2 Περιβάλλον και συνέπειες

### 2.1 Μόλυνση αέρα

Τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και τα λεωφορεία που κινούνται με ορυκτά καύσιμα συνεισφέρουν σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Στην πραγματικότητα, η μεταφορά εκπέμπει πάνω από το ήμισυ των οξειδίων του αζώτου στον αέρα μας και αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών της παγκόσμιας υπερθέρμανσης στις ΗΠΑ. Μελέτες έχουν συνδέσει τους ρύπους από τα καυσαέρια οχημάτων σε δυσμενείς επιπτώσεις σε σχεδόν κάθε σύστημα οργάνων του σώματος.

Ενώ αυτή η ατμοσφαιρική ρύπανση συνεπάγεται σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, μέσω των καθαρών τεχνολογιών οχημάτων και καυσίμων, μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά τις εκπομπές από τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά μας, ενώ παράλληλα μειώνουμε την προβλεπόμενη χρήση πετρελαίου στις ΗΠΑ κατά τα επόμενα 20 χρόνια.

### **Τα συστατικά της ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

Τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και τα λεωφορεία προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση καθότι οι πρόσθετες εκπομπές σχετίζονται με το ραφινάρισμα και τη διανομή καυσίμων και σε μικρότερο βαθμό με την κατασκευή και διάθεση του οχήματος.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση από αυτοκίνητα, φορτηγά και λεωφορεία χωρίζεται σε πρωτογενή και δευτερογενή ρύπανση. Η πρωτογενής ρύπανση εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα ενώ η δευτερογενής ρύπανση οφείλεται σε χημικές αντιδράσεις μεταξύ ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα έμβρυα, τα νεογέννητα παιδιά και τα άτομα με χρόνιες ασθένειες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις επιδράσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι κύριοι ρύποι από μηχανοκίνητα οχήματα είναι οι εξής:

- Σωματίδια (PM). Ένας τύπος σωματιδίων είναι η αιθάλη που παρατηρείται στην εξάτμιση του οχήματος. Τα λεπτά σωματίδια - λιγότερο από το ένα δέκατο της διάμετρος μιας ανθρώπινης τρίχας - αποτελούν σοβαρή απειλή για την ανθρώπινη υγεία, καθώς μπορούν να διεισδύσουν βαθιά στους πνεύμονες. Τα PM μπορεί να είναι κύριος ρύπος ή δευτερογενής ρύπος από υδρογονάνθρακες, οξείδια του αζώτου και διοξείδια του θείου. Η εξάτμιση των καυσίμων ντίζελ αποτελεί μείζονα παράγοντα ρύπανσης από PM.
- Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (ΠΟΕ). Αυτοί οι ρύποι αντιδρούν με οξείδια του αζώτου παρουσία ηλιακού φωτός για να σχηματίσουν το όζον σε επίπεδο εδάφους, ένα κύριο συστατικό στο νέφος. Αν και ευεργετική στην ανώτερη ατμόσφαιρα, στο επίπεδο του εδάφους το αέριο αυτό ερεθίζει το αναπνευστικό σύστημα, προκαλώντας βήχα, πνιγμό και μειωμένη πνευμονική ικανότητα. Τα VOC που εκπέμπονται από τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και τα λεωφορεία - τα οποία περιλαμβάνουν τους τοξικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους βενζόλιο, ακεταλδεΐδη και 1,3-βουταδιένιο - συνδέονται με διαφορετικούς τύπους καρκίνου.
- Οξείδια του αζώτου (NOx). Αυτοί οι ρύποι σχηματίζουν όζον εδάφους και σωματίδια (δευτερογενή). Επίσης επιβλαβής ως πρωτεύον ρύπος, τα NOx μπορούν να προκαλέσουν ερεθισμό των πνευμόνων και να αποδυναμώσουν την άμυνα του

οργανισμού έναντι λοιμώξεων του αναπνευστικού συστήματος όπως η πνευμονία και η γρίπη.

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Αυτό το άοσμο, άχρωμο και δηλητηριώδες αέριο σχηματίζεται από την καύση ορυκτών καυσίμων όπως η βενζίνη και εκπέμπεται κυρίως από αυτοκίνητα και φορτηγά. Όταν εισπνέεται, το CO μπλοκάρει το οξυγόνο από τον εγκέφαλο, την καρδιά και άλλα ζωτικά όργανα.
- Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>). Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα μηχανοκίνητα οχήματα δημιουργούν αυτόν τον ρύπο με την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο, ιδιαίτερα του ντίζελ και του άνθρακα. Το διοξείδιο του θείου μπορεί να αντιδράσει στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσει λεπτά σωματίδια και, όπως και άλλοι ατμοσφαιρικοί ρύποι, αποτελεί τον μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία για τα μικρά παιδιά και τους ασθματικούς.

#### **Αέρια θερμοκηπίου.**

Τα οχήματα με κινητήρα εκπέμπουν επίσης ρύπους, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, που συμβάλλουν στην παγκόσμια αλλαγή του κλίματος. Στην πραγματικότητα, οι εκπομπές καυσαερίων από τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και τα λεωφορεία αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το ένα πέμπτο της συνολικής ρύπανσης της παγκόσμιας υπερθέρμανσης των Ηνωμένων Πολιτειών. η οποία περιλαμβάνει και αεροπλάνα, τρένα και πλοία αντιπροσωπεύει περίπου το τριάντα τοις εκατό όλων των εκπομπών αερίων που παγιδεύουν τη θερμότητα.



*Εικόνα 6: Δρόμος στις ΗΠΑ όπου φαίνεται ξεκάθαρα η μόλυνση του Περιβάλλοντος*

## 2.2 Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Οι ρύποι από την εξάτμιση του οχήματος μπορούν να επηρεάσουν περισσότερο τους πνεύμονές σας. Πράγματι, οι ρυπογόνοι σωλήνες εξάτμισης δημιουργούν κινδύνους για την υγεία σε κάθε στάδιο της ζωής και μπορεί ακόμη και να προκαλέσουν πρόωρο θάνατο.

Αλλά οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, που οφείλονται στις εκπομπές της υπερθέρμανσης του πλανήτη, επηρεάζουν επίσης την υγεία των ανθρώπων και την ευημερία ολόκληρων κοινοτήτων. Η υπερθέρμανση του πλανήτη οδηγεί σε συχνότερα και έντονα κύματα καύσωνα - ιδιαίτερα επικίνδυνα για τα παιδιά και τους ηλικιωμένους – και στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας, τις πλημμύρες και την ξηρασία που μπορεί να καταστρέψει τις τοπικές κοινότητες.

Οι άνθρωποι σε κοινότητες χαμηλού εισοδήματος και σε κοινότητες χρώματος είναι δυσανάλογα εκτεθειμένες σε υψηλότερα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι κοινότητες αυτές είναι συχνά τοποθετημένες κοντά σε κέντρα εμπορευματικών μεταφορών και σε βαριά οδοστρώματα και δεν έχουν πρόσβαση στους πόρους για να προσαρμοστούν - ή να απομακρυνθούν από - την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις ζημιές που σχετίζονται με το κλίμα.

### 2.2.1 Εκπομπές από Βαρέα οχήματα

Τα φορτηγά και τα λεωφορεία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη ζωή μας, μεταφέροντας αγαθά από κατασκευαστές σε καταστήματα, παραλαμβάνουν τα σκουπίδια μας, παραδίδουν πακέτα και μεταφέρουν χιλιάδες ανθρώπους γύρω από τις πόλεις καθημερινά. Αλλά αυτά τα οχήματα επηρεάζουν επίσης σημαντικά τη δημόσια υγεία και την υπερθέρμανση του πλανήτη.



Τα βαρύτερα οχήματα αποτελούν μόνο το 5% περίπου όλων των οχημάτων στο δρόμο, αλλά παράγουν πάνω από το 25% των εκπομπών της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας που προέρχονται από τον τομέα των μεταφορών και σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Καθώς οι Ηνωμένες Πολιτείες μεταφέρουν όλο και περισσότερο φορτία κάθε χρόνο, η πρόκληση της μείωσης των εκπομπών από τον τομέα αυτό θα συνεχίσει να αυξάνεται.

Η αντιμετώπιση της ρύπανσης από βαρέα οχήματα είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και τη μείωση των εκπομπών θέρμανσης του πλανήτη στις κοινότητες της χώρας. Η συνέχιση της μείωσης των εκπομπών από οχήματα με ορυκτά καύσιμα είναι ένα σημαντικό πρώτο βήμα

### 2.3 Οφέλη καθαρού αέρα από ηλεκτρικά φορτηγά και λεωφορεία

Ακριβώς όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης από επιβατικά οχήματα, τα ηλεκτρικά φορτηγά και τα λεωφορεία θα μπορούσαν να εξαλείψουν εξ ολοκλήρου τη ρύπανση από την εξαγωγή και να αυξήσουν την ανάπτυξη καθαρών μετακινήσεων.

Εκτός από το ότι δεν εκπέμπουν επιβλαβή ρύπανση από την εξαγωγή, τα ηλεκτρικά φορτηγά και τα λεωφορεία έχουν σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές θέρμανσης από ό, τι τα οχήματα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Ένα ηλεκτρικό λεωφορείο με μπαταρία στο σημερινό ηλεκτρικό δίκτυο είναι το χαμηλότερο δυναμικό άνθρακα σε κάθε μέρος της χώρας.

Τα ηλεκτρικά φορτηγά και τα λεωφορεία με μπαταρίες και καύσιμα, ειδικά τα λεωφορεία διαμετακόμισης, λειτουργούν ήδη σε πόλεις στις Ηνωμένες Πολιτείες και αυτοί οι στόλοι συνεχίζουν να επεκτείνονται καθώς τα νέα μοντέλα διατίθενται. Ένας αυξανόμενος αριθμός πόλεων δεσμεύεται για 100% λεωφορεία διαμετακόμισης μηδενικών εκπομπών στους στόλους τους - συμπεριλαμβανομένης της Νέας Υόρκης και του Λος Άντζελες, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τους δύο μεγαλύτερους στόλους λεωφορείων στη χώρα.

#### **Ο καθαρότερος αέρας έρχεται**

Οι σωστές πολιτικές και επενδύσεις από τις ομοσπονδιακές, κρατικές και δημοτικές αρχές θα επιταχύνουν τη μετάβαση σε ένα σύστημα μεταφοράς μηδενικών εκπομπών. Μεταξύ αυτών είναι ο καθορισμός στόχων για την υιοθέτηση ηλεκτρικών φορτηγών και λεωφορείων, η θέσπιση προτύπων για τους κατασκευαστές για την κατασκευή περισσότερων από αυτά τα είδη οχημάτων και η ανάπτυξη και χρηματοδότηση

προγραμμάτων παροχής κινήτρων για να βοηθήσουν πόλεις και εταιρείες να επιτύχουν αυτούς τους στόχους.

Αυτές οι πολιτικές και οι επενδύσεις πρέπει επίσης να εξασφαλίζουν ότι οι εργαζόμενοι από περιθωριοποιημένες κοινότητες έχουν πρόσβαση στην κατάρτιση και στις ευκαιρίες απασχόλησης και ότι η εγκατάσταση ηλεκτρικών οχημάτων έχει προτεραιότητα στις κοινότητες που ήδη αναπνέουν τον πιο βρώμικο αέρα.

### Κεφάλαιο 3 Αεροδυναμική

Οι αεροδυναμικές δοκιμές πραγματικών αυτοκινήτων σε σήραγγα είναι πανάκριβη πειραματική διαδικασία. Έτσι οι αυτοκινητοβιομηχανίες καταφεύγουν σε αυτές, αφού πρώτα εξαντλήσουν κάθε άλλο μέσο.

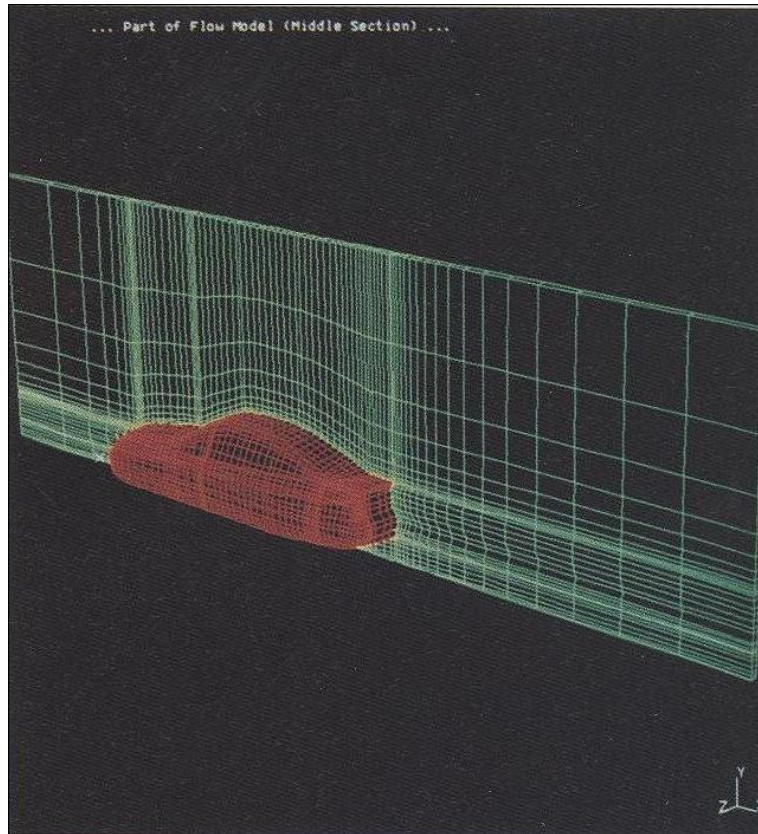
Στη συνέχεια αρχίζουν οι τελικές αεροδυναμικές δοκιμές στις σήραγγες που συνήθως ανήκουν σε διάφορα πανεπιστήμια, αεροναυπηγικές βιομηχανίες και εξειδικευμένους σχεδιαστικούς οίκους της Ευρώπης.

Η ΚΙΝΗΣΗ των ρευστών στο χώρο και συνεπώς και του αέρα γύρω από το αυτοκίνητο περιγράφεται μαθηματικά από ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που είναι γνωστές σαν εξισώσεις Navier-Stokes.

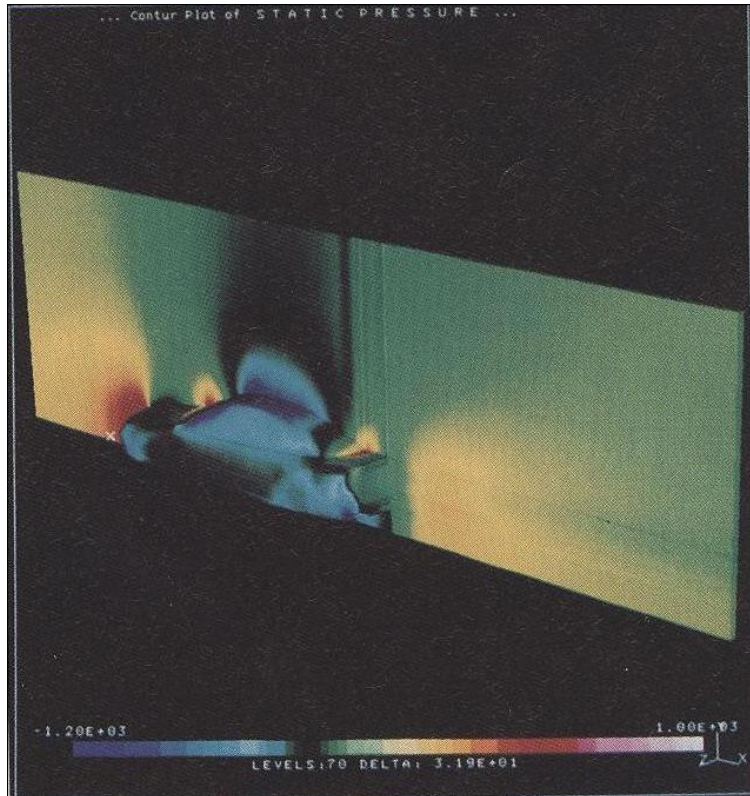
Έτσι, θεωρητικά, είναι δυνατή η αεροδυναμική μελέτη του αμαξώματος ενός αυτοκινήτου, χωρίς την ανάγκη πειραματικών δοκιμών, απλά με την επίλυση αυτών των εξισώσεων.

Όμως, στην πράξη, η λύση αυτών των εξισώσεων είναι δυνατή με χαρτί και μολύβι, μόνο αν γίνουν απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες στην περίπτωση ενός σύνθετου προβλήματος όπως το αυτοκίνητο θα οδηγούσαν σε λύσεις μη αποδεκτές.

Τη δυνατότητα για ακριβή (ή μάλλον ακριβέστερη) λύση των εξισώσεων Navier-Stokes μας τη δίνουν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και το χωρισμό της επιφάνειας του αμαξώματος σε πεπερασμένα στοιχεία.



*Εικόνα 7: Μοντέλο σε αεροδυναμικό έλεγχο*



Εικόνα 8: Μοντέλο σε αεροδυναμικό έλεγχο

Για τις ανάγκες της εξομοίωσης στον ηλεκτρονικό υπολογιστή η επιφάνεια του αμαξώματος χωρίζεται με πλέγμα που η ανάλυσή του μπορεί να φτάσει και τα 200.000 στοιχεία. Στα όρια κάθε στοιχείου με τα διπλανά του ο ηλεκτρονικός υπολογιστής υπολογίζει τις τριβές στον αέρα, τις ταχύτητες ροής και τις αντίστοιχες πιέσεις. Η απεικόνιση των μεγεθών αυτών στην οθόνη γίνεται με εύκολα κατανοητό τρόπο, για παράδειγμα με κάποιο κώδικα χρωμάτων.

Για την εξομοίωση αυτή είναι απαραίτητη η χρήση υπερυπολογιστή τύπου Cray, η ταχύτητα του οποίου φτάνει τις 350.000.000 πράξεις το δευτερόλεπτο. Με αυτή την ταχύτητα οι υπολογισμοί ολοκληρώνονται σε μερικές ώρες, τη στιγμή που και οι ισχυρότεροι συμβατικοί υπολογιστές θα χρειαζόνταν ακόμα και εβδομάδες.

Ακόμη και έτσι όμως από το μαθηματικό μοντέλο του αμαξώματος στον υπολογιστή παραλείπονται τα τμήματα που προκαλούν διακοπές στην ομαλή ροή του αέρα. Έτσι δεν υπάρχουν φτερά, καθρέφτες, μηχανικά μέρη κάτω από το δάπεδο και οτιδήποτε άλλο θα μπορούσε να διαταράξει τη ροή του αέρα.

Αυτό συμβαίνει πρώτον, διότι τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου εξομοίωσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι αξιόπιστα μόνο στα σημεία της επιφάνειας του αμαξώματος

που η ροή του αέρα είναι ομοιόμορφη και δεν εμφανίζεται το φαινόμενο του στροβιλισμού (τυρβώδης ροή). Ο δεύτερος λόγος είναι ότι η λύση των εξισώσεων που προαναφέραμε θα γινόταν τόσο περίπλοκη που ακόμα και οι ισχυρότεροι υπολογιστές δε θα μπορούσαν να δώσουν αποτελέσματα σε λογικό χρονικό διάστημα.

### 3.1 Ωφέλειες από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των σύγχρονων αυτοκινήτων δε βελτιώνει μόνο το συντελεστή οπισθέλκουσας και τις επιδόσεις. Είναι ταυτόχρονα παράγοντας ασφάλειας και οικονομίας. Σε ένα αεροδυναμικά σχεδιασμένο αμάξωμα οι δυνάμεις άνωσης στον εμπρός και τον πίσω άξονα παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την καλή κατευθυντικότητα του αυτοκινήτου.

Τα σύγχρονα αεροδυναμικά σχήματα με τις απαλές καμπύλες γραμμές μειώνουν επιπλέον τις πιθανότητες τραυματισμού των πιο ευάλωτων χρηστών του δρόμου. Η απουσία γωνιών, οι κρυμμένοι άξονες των υαλοκαθαριστήρων, οι επίπεδες χειρολαβές στις πόρτες, το σχήμα των προφυλακτήρων, των καθρεφτών κ.λπ. μειώνουν τους κινδύνους από τον τραυματισμό πεζών και δικυκλιστών στην περίπτωση ατυχήματος.

Τέλος ο αεροδυναμικός σχεδιασμός βοηθάει και στη μείωση της κατανάλωσης. Έχει υπολογιστεί ότι η οπισθέλκουσα είναι υπεύθυνη για το 40% της κατανάλωσης ενός αυτοκινήτου στο ταξίδι. Εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς τη σημασία της μείωσής της.

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός ήρθε έντονα στο προσκήνιο στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας. Σήμερα ο αρχικός θόρυβος έχει κοπάσει αλλά η έρευνα και εξέλιξη στον τομέα αυτό συνεχίζεται αδιάκοπα με στόχο τη βελτίωση των αριθμητικών μεθόδων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και της αληθοφάνειας των πειραματικών δοκιμών.

Η πιθανότητα επικείμενη επιβολή ορίων και στην κατανάλωση καυσίμου από την Ευρωπαϊκή Ένωση μπορεί να ξαναφέρει τον αεροδυναμικό σχεδιασμό άλλη μία φορά στην επικαιρότητα.

### 3.2 Αεροδυναμική στα αμαξώματα

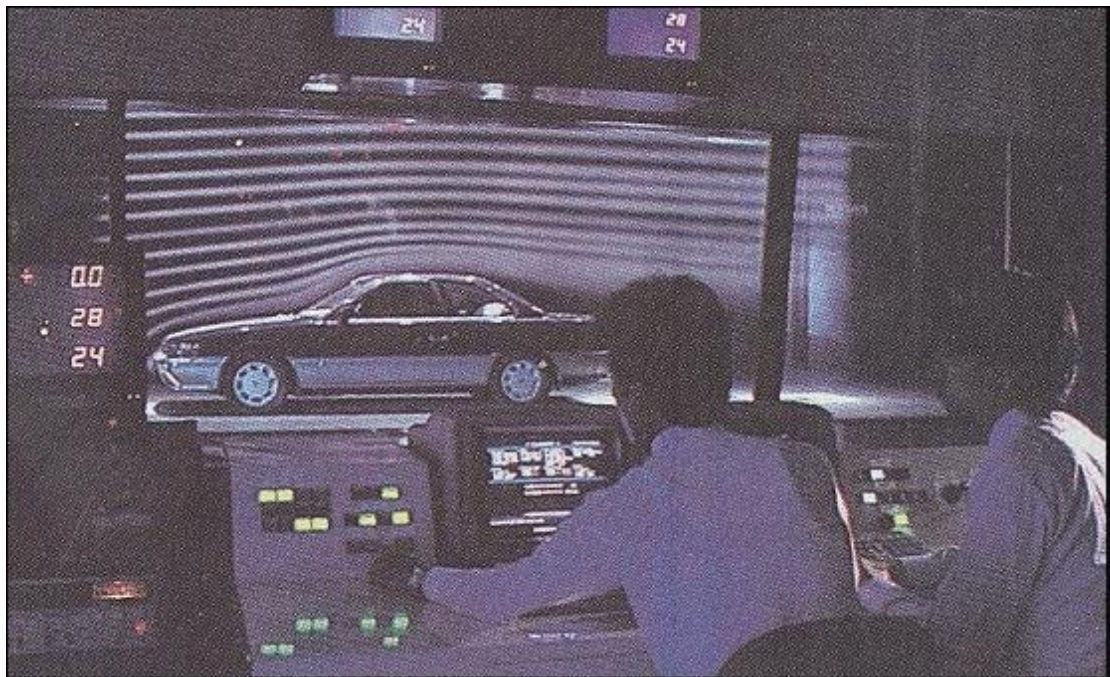
Δεν ήταν πάντα έτσι πριν μια δεκαπενταετία, τα αυτοκίνητα που παράγονταν για μαζική κατανάλωση, στον τομέα της αεροδυναμικής, δεν είχαν να επιδείξουν και πολλά πράγματα. Τους συλλίστες, τότε, ενδιέφερε περισσότερο η εξωτερική εμφάνιση του οχήματος, η αισθητική και πολύ λιγότερο η πρακτική πλευρά. Η ενεργειακή κρίση άλλωστε απείχε λίγα



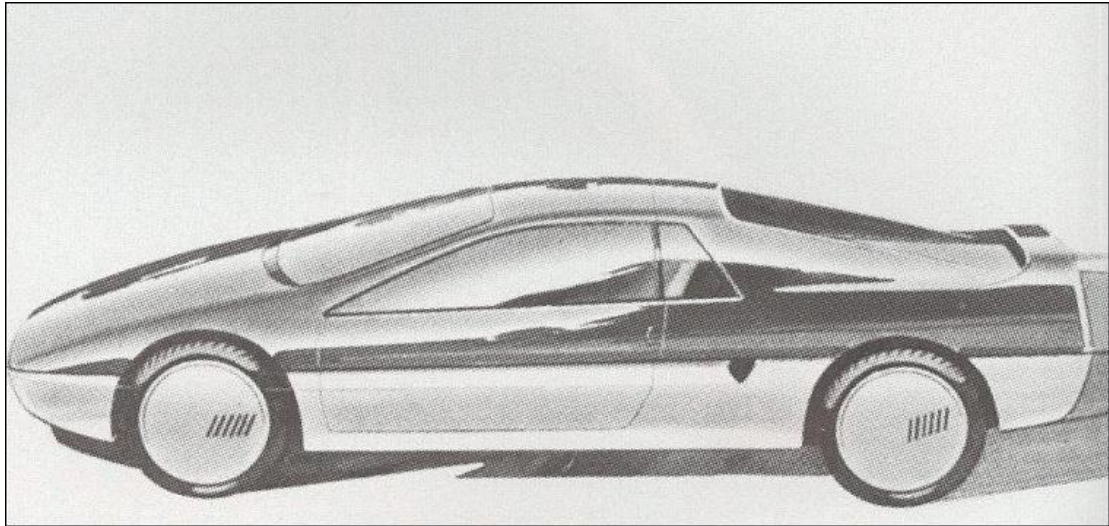
χρόνια μέχρι να απειλήσει την ίδια την ύπαρξη του αυτοκινήτου. Κανείς, λοιπόν, λόγος για οικονομία μέσα από ένα καλύτερο αεροδυναμικά αμάξωμα.

Η αεροδυναμική στα αμαξώματα, άρχισε και αυτή να εφαρμόζεται ευρέως μετά την ενεργειακή κρίση. Η αεροναυπηγική εδώ στάθηκε πολύτιμος σύμβουλος με την πολύτιμη πείρα της. Σιγά-σιγά οι στυλίστες αντιλήφθηκαν ότι ένα αμάξωμα πρέπει πρώτα να είναι λειτουργικό και πρακτικό και μετά όμορφο. Αυτό είχε ως συνέπεια να περάσουν στο περιθώριο κάποιες εξεζητημένες λύσεις που ήθελαν το αμάξωμα εξωτερικά να είναι εντυπωσιακό, αλλά ελάχιστα λειτουργικό.

Τα περιττά νίκελ, οι παράξενες γωνίες, τα εντυπωσιακά φωτιστικά σώματα κ.λπ. παραχώρησαν τη θέση τους στα αμαξώματα «σταγόνες» ή «πτέρυγες», τα οποία ως πρώτο μέλημα έχουν το πώς θα «γλιστρούν» ευκολότερα μέσα από τον αέρα. Σήμερα, λέξεις όπως «αεροδυναμικός συντελεστής», «συντελεστής οπισθέλκουσας», «μετωπική επιφάνεια» δεν ξενίζουν κανένα και εν πάση περιπτώσει υπονοούν την προσπάθεια του εργοστασίου να σχεδιάσει ένα αεροδυναμικό αμάξωμα.



*Εικόνα 9: Μηχανικοί μελετώντας αεροδυναμική συμπεριφορά αυτοκινήτου*



*Εικόνα 10: Πρότυπο Μοντέλο Αεροδυναμικού Αυτοκινήτου*

Η μελέτη και η σχεδίαση με υπολογιστή βοήθησε εδώ πάρα πολύ. Τα λεγόμενα συστήματα CAD (Computer Aided Design) -στα ελληνικά σημαίνει σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή- βοηθούν, όχι μόνο στην αεροδυναμική σχεδίαση του αμαξώματος, αλλά και στην κατασκευή αυτού με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχει αυξημένη αντοχή και ακαμψία δίχως να είναι και υπερβολικά βαρύ.

Η μέθοδος των «πεπερασμένων στοιχείων» έχει στη συγκεκριμένη περίπτωση τον κύριο λόγο.

Η εισαγωγή εξελιγμένης τεχνολογίας, επιτρέπει επιπλέον τη μείωση του πάχους της λαμαρίνας, την επινικέλωση των ελασμάτων και από τις δυο όψεις (την καθιέρωσε πρώτη η Porsche και ακολούθησε σχεδόν αμέσως η Audi), ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα διάβρωσης, τη χρήση συνθετικών υλικών σε περισσότερα μέρη του αυτοκινήτου (προφυλακτήρες, πίσω πόρτα ή πορτ-μπαγκάζ, καπό κ.λπ.) για μείωση του συνολικού βάρους, την επικασιτέρωση του κάτω μέρους του αυτοκινήτου, για να αποφευχθεί η σκουριά κ.λπ.

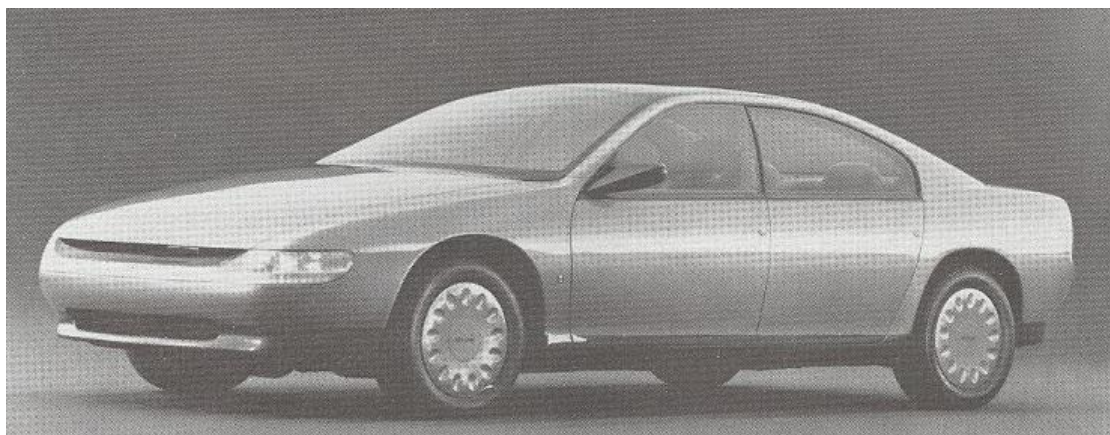
Μια και μιλάμε για το κάτω μέρος του αυτοκινήτου, να πούμε και κάτι άλλο. Τα πρώτα χρόνια εφαρμογής της αεροδυναμικής, κανείς σχεδόν κατασκευαστής δεν ασχολιόταν με τις κάτω επιφάνειες του αμαξώματος. Τα μηχανικά μέρη τοποθετούνταν ακάλυπτα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επίπεδη επιφάνεια ούτε και ομαλή ροή του αέρα.

Αποτέλεσμα, μια καλή, κατά τα υπόλοιπα, αεροδυναμική προσπάθεια, πήγαινε χαμένη για τους παραπάνω λόγους. Βεβαίως, σήμερα το κάτω μέρος του αυτοκινήτου, έχει την προσοχή που του χρειάζεται.

Γίνεται μια προσπάθεια να μη μένουν ακάλυπτα μηχανικά μέρη, (π.χ. αναρτήσεις, σωλήνες εξαγωγής κ.λπ.) και το πάτωμα του αμαξώματος να είναι κατά το δυνατόν επίπεδο. Λεπτομέρειες, οι οποίες λίγα χρόνια πριν περνούσαν απαρατήρητες, στις μέρες μας καθορίζουν το πόσο προσεκτικός είναι ένας κατασκευαστής από τον άλλο.

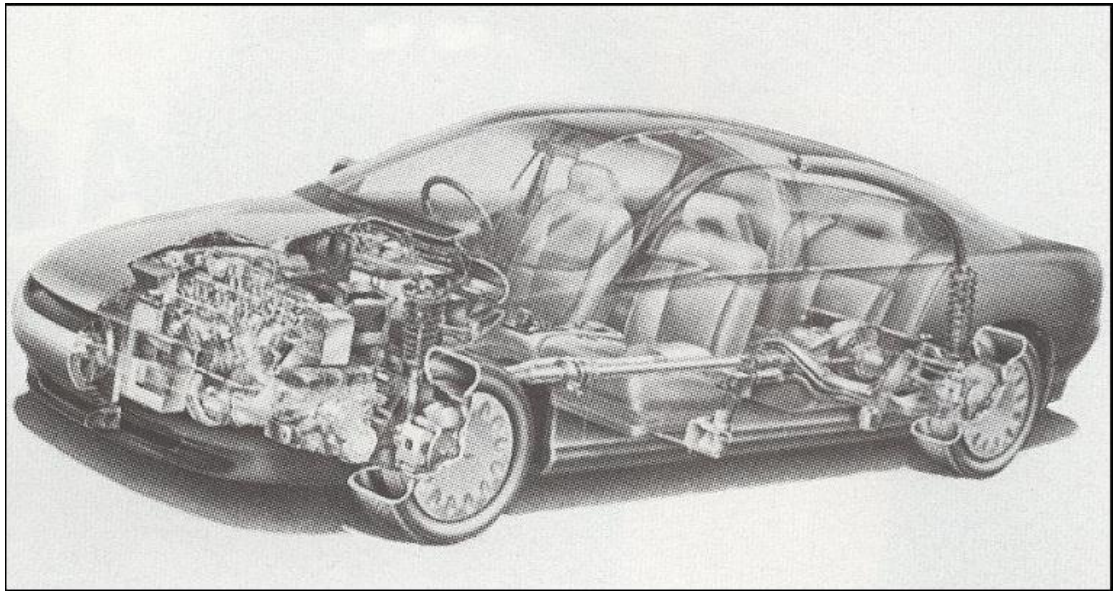
### **Αισθητική αμαξώματος και το προσωπικό γόητρο**

Οι νόμοι της αεροδυναμικής είναι κοινοί για όλους. Πολλοί είναι αυτοί που παραπονιούνται ότι τα σημερινά αυτοκίνητα μοιάζουν όλο και περισσότερο μεταξύ τους. Η απάντηση που δίνεται από τα σχεδιαστικά κέντρα, αλλά και από τα εργοστάσια είναι αυτή που αναφέραμε στην αρχή. Βεβαίως, όσο πιο έμπειρος και ταλαντούχος είναι ο στυλίστας, τόσες περισσότερες δυνατότητες έχει να «παρέμβει» στο σχέδιο του υπολογιστή, και με μικρές υποχωρήσεις να διαφοροποιήσει το τελικό προϊόν. Παρ' όλα αυτά παραμένει γεγονός, ότι τα περισσότερα (ιδίως φτηνά) αυτοκίνητα έχουν πολλά κοινά σχεδιαστικά σημεία. Δεν ευθύνεται όμως μόνο η αεροδυναμική γι' αυτό. Η απαίτηση για χαμηλό κόστος, η μεγάλη παραγωγή ανά μοντέλο και συγχώνευση πολλών ανεξάρτητων, μέχρι χθες, παραγωγών, είναι μερικοί ακόμη βασικοί λόγοι.



*Εικόνα 11: Το Nissan ARC - Χ αποτελεί μια κλασική ιαπωνική πρόταση για την αεροδυναμική των μελλοντικών αμαξωμάτων*





*Εικόνα 12: Η σχεδίαση βεβαίως δε γίνεται με το χέρι. Δεξιά, μια άποψη φάντασμα του ARC - X.*



*Εικόνα 13: Πολλές ώρες αφιερώνονται για τη σύγκριση ανάμεσα στα πρώτα σκίτσα- σχέδια και το πρόπλασμα του μοντέλου*

Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό και με την ευκολία πια απόκτησης αυτοκινήτου από τις μεγάλες μάζες του πληθυσμού, δημιούργησαν ακόμη ένα σοβαρό πρόβλημα. Σε παλιότερες εποχές, όπου η αγορά αυτοκινήτου προϋπέθετε κάποια οικονομική άνεση, ίσχυε λίγο ως πολύ, το: «αυτοκίνητο να 'ναι κι ό,τι να 'ναι».

Το πρόβλημα τότε ήταν να πάψει το αυτοκίνητο να είναι ακριβό, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται από όλους. Σήμερα, όπου κάτι τέτοιο έχει γίνει δυνατό στις περισσότερες τουλάχιστον χώρες και όπου έχουμε συνηθίσει να λέμε ότι το αυτοκίνητο είναι πια εργαλείο δουλειάς, αναπόσπαστο μέρος της ζωής μας κ.λπ. δε θεωρείται πια και ως κοινωνικό σύμβολο. Δημιουργήθηκε όμως μια άλλη ανάγκη, η οποία έχει σχέση με κάτι που αναφέραμε πιο πάνω.

Ότι δηλαδή όλα τα αυτοκίνητα λίγο ή πολύ μοιάζουν μεταξύ τους. Ποιος όμως θέλει σήμερα να έχει κάτι το οποίο είναι κοινό για όλους, ποιος είναι αυτός που δε θέλει το αυτοκίνητο του να ξεχωρίζει ανάμεσα στα άλλα ίδιας μάρκας και μοντέλου του κυκλοφορούν κατά χιλιάδες. Η απάντηση είναι πολύ εύκολη, αν παρατηρήσει κανείς τις αλλαγές και τις προσθήκες που κάνουν όλοι σχεδόν οι οδηγοί στα αυτοκίνητά τους.

Αλλαγές οι οποίες άλλο σκοπό δεν έχουν από το να τονίσουν την προσωπικότητα του ιδιοκτήτη έναντι όλων των άλλων που οδηγούν το ίδιο μοντέλο. Τα εργοστάσια θα ήταν πολύ αφελή, εάν αυτήν την τάση την έπαιρναν απηψήφιστα. Όντας όμως ευαίσθητα απέναντι στις απαιτήσεις των καταναλωτών (όταν συμβαίνει να μην τις κατευθύνουν τα ίδια), απάντησαν αμέσως.

Τα διάφορα ΚΙΤ αισθητικών βελτιώσεων και μετατροπών, ελάχιστα έχουν να κάνουν ως επί το πλείστον με την καθαυτή βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών του μοντέλου-αντίθετα στόχος τους είναι η ενίσχυση της απαίτησης του οδηγού για κάτι «πιο προσωπικό». Αυτό το νόημα έχουν οι «ειδικές εκδόσεις», τα αριθμημένα αμαξώματα, η μικρή παραγωγή ορισμένων εκδόσεων κ.λπ.

Άλλωστε, σήμερα ανθούν οι ειδικοί κατασκευαστές, αυτές οι μικρές εταιρείες οι οποίες δέκα χρόνια πριν απειλούνταν με εξαφάνιση. Φαίνεται αστείο, αλλά ίσως σε λίγα χρόνια να δούμε να κυριαρχεί ο κατασκευαστής που θα κάνει πρώτος πράξη την ιδέα του «φτιάξτο μόνος σου». Να έχει δηλαδή ο καταναλωτής τη δυνατότητα μέσα από ένα μεγάλο αριθμό παραλλαγών να διαλέγει το δικό του αποκλειστικά προσωπικό αυτοκίνητο. Η λύση αυτή, με διάφορες παραλλαγές έχει ήδη αρχίσει να προβληματίζει μικρούς και μεγάλους κατασκευαστές και είναι σίγουρο ότι τα τμήματα μάρκετινγκ των εργοστασίων έχουν έτοιμες μελέτες, για άμεση εφαρμογή όταν και αφού χρειαστεί.

### 3.3 Αεροδυναμική οικονομία

Εξετάζουμε το παρόν και το, άμεσο, μέλλον, προσπαθούμε να διαλύσουμε μερικές από τις παρεξηγήσεις που υπάρχουν σχετικά με την αποτελεσματικότητα της αεροδυναμικής σχεδίασης στις μικρές ταχύτητες και γενικά αισθανόμαστε καλά που επικοινωνούμε με τους αναγνώστες μας.

Στέκονταν ακίνητοι ένα κύκλο, με σταγόνες νερού να κυλούν στα μέτωπά τους απ' τη βροχή που έπεφτε ασταμάτητα στο Τουρίνο εκείνη την ημέρα, θαυμάζοντας το Σχήμα. Τα μάτια τους, τα γεμάτα θαυμασμό κι ενδιαφέρον μάτια αυτών των παιδιών μ' έκαναν να γυρίσω το κεφάλι μακριά απ' τα αυτοκίνητο που είχε σχεδιάσει ο Σέρτζιο Πινιφαρίνα και να παρακολουθήσω τους επισκέπτες του περιπτέρου του, τους μαθητές του δημοτικού που είχαν έρθει με τις σάκες του σχολείου και τους δασκάλους τους, τους μαθητές του γυμνασίου που κρατούσαν σημειώσεις στα μπλοκ τους και φωτογράφιζαν αδιάκοπα τους εργάτες, τους επιστήμονες, τους αμέτρητους φοιτητές.

Βρισκόμουν απ' το πρωί στην έκθεση αυτοκινήτου του Τουρίνου, κουρασμένος, ιδρωμένος απ' το βάρος της βαλίτσας με τις φωτογραφικές μηχανές, μεσόγειος δημοσιογράφος, που προσπαθούσε να κάνει τη δουλειά που θα έκαναν δύο ευρωπαίοι συνάδελφοι. Το Σχήμα ήταν το «αυτοκίνητο μπανάνα», μια προσπάθεια του μεγάλου Ιταλού σχεδιαστή να επιτύχει αεροδυναμική αποτελεσματικότητα παραμένοντας πάντα μέσα στα πλαίσια του πραγματικού, του εφικτού, του καθημερινού.

Οι θεατές του ήταν Ιταλοί... Άνθρωποι που, όπως έγραψε και το Time της 17 Αύγουστου, «αν δεν ξόδευαν το 90% του χρόνου τους για να προφυλαχτούν απ' την κυβέρνηση τους και τους νόμους τους, θα μεγαλοουργούσαν...». Ο θεατής των θεατών ήταν Έλληνας... Άνθρωπος που ξόδευε το 90 τοις εκατό του χρόνου του για να προφυλαχτεί απ' τους άλλους Έλληνες. Έμεινα κοντά τους κάμποση ώρα, μη ξέροντας τι πρέπει να πρωτοθαυμάσω, το αποτέλεσμα ή την αιτία, σκεφτόμενος πότε επιτέλους οι κατασκευαστές θ' ανοίξουν τα βιβλία της ιστορίας για να «ανακαλύψουν» πως ο φθηνότερος δρόμος προς την οικονομία είναι η αεροδυναμική σχεδίαση του οχήματος.

Πράγματι, από τις περισσότερο διαδεδομένες παρεξηγήσεις είναι αυτή που λέει, οι δυνάμεις της αεροδυναμικής αποκτούν σημασία μόνο όταν το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα.

### 3.3.1 Το αυτοκίνητο και η ροή του αέρα γύρω απ' αυτό

Δεν αποτελεί είδηση το γεγονός ότι οι αεροδυναμικές δυνάμεις αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας. Είδηση αποτελεί η δήλωση, ότι από την ταχύτητα των 60 χιλιομέτρων/ώρα η αντίσταση του αέρα αρχίζει ν' απορροφά περισσότερη ενέργεια από την αντίσταση κύλισης που προξενείτε από την τριβή των ελαστικών με το δρόμο και των κινουμένων μερών μεταξύ τους.

Όλες αυτές οι δυνάμεις αντίστασης επηρεάζουν άμεσα την ισχύ που χρειάζεται για να κινηθεί το όχημα. Όσο μεγαλύτερες είναι, τόσο πιο δυνατός πρέπει να είναι ο κινητήρας, τόσο μεγαλύτερη η κατανάλωση. Να γιατί, ξαφνικά, η αεροδυναμική σχεδίαση απόκτησε τόσο μεγάλη σημασία.

Η κίνηση του αυτοκινήτου μέσα στο ρευστό του αέρα, «χωρίζει» τα αερονημάτια (υποθετικά, για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας) δημιουργώντας διαφορές πιέσεων στα διάφορα σημεία του. Οι διαφορές αυτές μπορούν εύκολα να αναγκάσουν τη

ροή να «αποκολληθεί» από την επιφάνεια του σώματος, ιδιαίτερα όταν τα αερονημάτια συναντήσουν στο δρόμο τους ένα στρόβιλο που δημιουργείται από μια προεξοχή ή απότομη μεταβολή της καμπυλότητας της επιφάνειας. Όπως εύκολα γίνεται κατανοητό, η δύναμη (ισχύς) που απαιτείται για να κινηθεί ένα αντικείμενο μαζί με τους... στρόβιλους του είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι θα χρειαζόνταν για να κινηθεί ένα αντικείμενο χωρίς στρόβιλους, αφού, ο κάθε στρόβιλος, απορροφά τη δική του ενέργεια.

Για να ξεχωρίσουν τις δυνάμεις αεροδυναμικής αντίστασης από τις άλλες δυνάμεις αντίστασης στην κύλιση, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν την αεροδυναμική σήραγγα που αναπαράγει την προς τα εμπρός κίνηση, στέλνοντας αέρα προς ένα σταθερό ομοίωμα. Τελευταίες παρατηρήσεις απέδειξαν ότι όταν ο αέρας απορροφάτε απ' το πίσω μέρος της σήραγγας —αντί να στέλνεται προς το ομοίωμα—, η ροή των αερονηματίων γύρω απ' το τελευταίο είναι πιο «καθαρή». Ειδικά αριθμημένες κλίμακες, πάνω στις όποιες «πατούν» οι τροχοί του αυτοκινήτου που δοκιμάζεται, μετρούν τις αντιδράσεις του αμαξώματος στην ταχύτητα ροής του αέρα στο οριζόντιο και στο κάθετο επίπεδο.

Αυτό που ενδιαφέρει τον... κινητήρα (και τον μηχανικό σχεδιαστή) είναι η συνολική αεροδυναμική αντίσταση, που αντιστέκεται στην προς τα εμπρός κίνηση, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν λαμβάνει υπόψη και τ' αποτελέσματα της άνωσης. Για να έχουμε ένα σχετικά εύκολο τρόπο που να μπορούμε να μετράμε την αποδοτικότητα ενός σώματος τη ροή του αέρα γύρω απ' αυτό (την αεροδυναμικότητα;) η αεροδυναμική αντίσταση διαιρείται με τη μέγιστη μετωπική επιφάνεια και τη δυναμική πίεση του αέρα. Ο συντελεστής που βγαίνει (CD) χρησιμοποιείται σε κάθε εργασία εξέλιξης και κάθε σύγκριση των διαφόρων σωμάτων στην κίνησή τους μέσα τον αέρα.

Τα ακριβή χαρακτηριστικά της ροής του αέρα γύρω απ' ένα σώμα είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν αφού η ολική αντίσταση είναι ένας συνδυασμός της αντίστασης (οπισθέλκουσας) που προξενείτε από το ιζώδες του αέρα κι εκείνης που είναι αποτέλεσμα των στρόβιλων που δημιουργούνται στα σημεία εκείνα της επιφάνειας, που η ροή αποκολλιέται από το αμάξωμα. Όταν κανείς εξετάζει σχετικά απλές αεροδυναμικές μορφές, όπως είναι η πτέρυγα ενός αεροπλάνου, τότε ανακαλύπτει ότι τα δύο αυτά στοιχεία μπορούν να μετρηθούν χωριστά. Όταν όμως στη σήραγγα υπάρχει ένα σώμα σύνθετο, όπως είναι το αμάξωμα ενός αυτοκινήτου, τότε βλέπει ότι είναι άμεσα συνδεδεμένα μεταξύ τους, αφού η δυσδιάστατη ροή πάνω απ' το αμάξωμα επηρεάζεται απ' τα τρισδιάστατα φαινόμενα των στρόβιλων που δημιουργούνται, όπως είπαμε, στα διάφορα σημεία του.

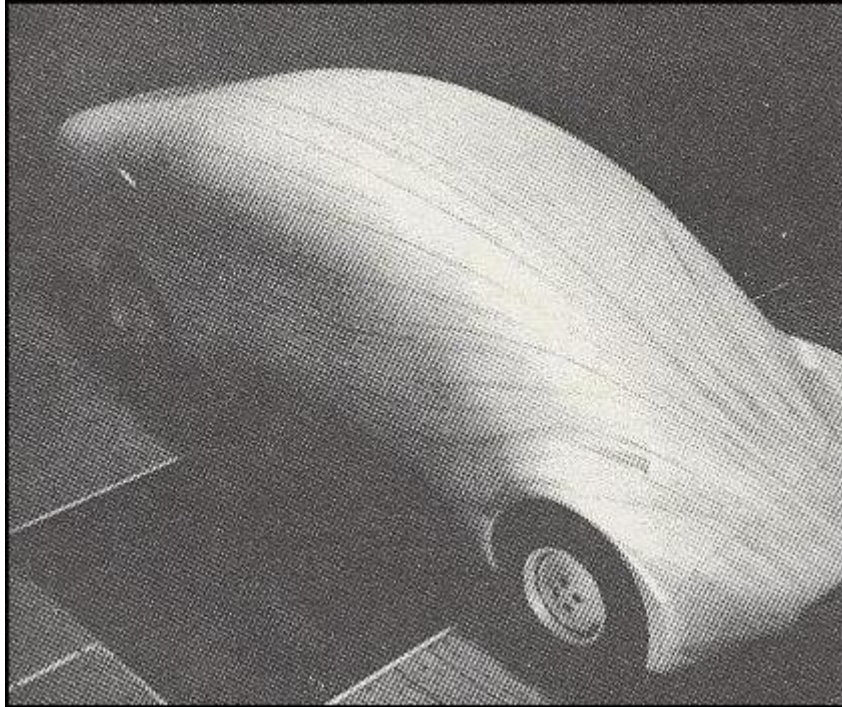
Η αντίσταση που προκαλείται από την πυκνότητα (ιξώδες) του αέρα χωρίζεται κι αυτή στα δύο: στην αντίσταση από την πίεση και στην αντίσταση από την τριβή επιφανείας. Καθώς η επιφάνεια του αμαξώματος κινείται σε σχέση με τη ροή του αέρα, τότε τα αερονήματα που βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια «αποχωρίζονται» μεταξύ τους, δημιουργώντας μια διαφορά πίεσης στο άμεσο (μικρομετρικό) περιβάλλον της επιφάνειας.

Αν η καμπύλη της πίεσης ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας του αμαξώματος, τότε η ροή αποκολλιέται απ' την επιφάνεια (βλέπε σχετική σχηματική παράσταση). Μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί τρόπος για να μετριέται ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης με τη χρήση π.χ. ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο μηχανικός σχεδιαστής πρέπει ν' ανοίξει τους δικούς του δρόμους δουλεύοντας μακριές ώρες στη σήραγγα, μετρώντας, μεταβάλλοντας και ξανά μετρώντας.

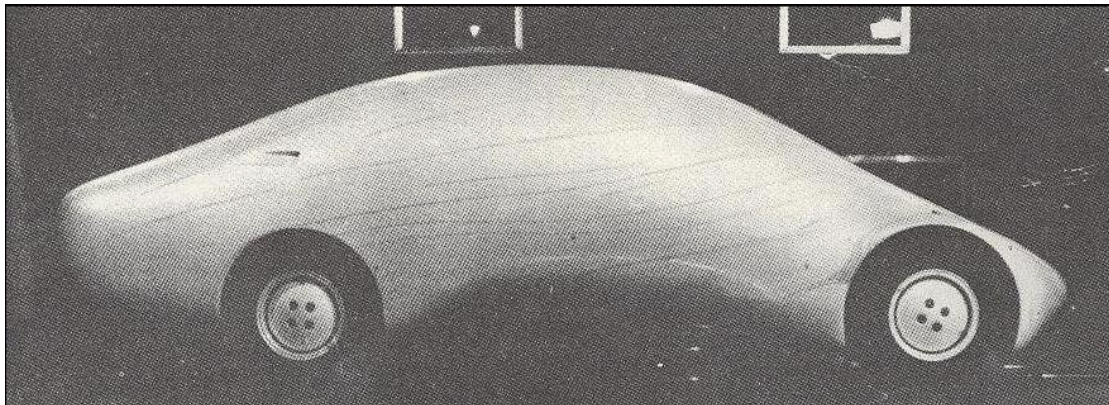
Όταν πια πεισθεί ότι έχει πλησιάσει το στόχο του, συνεχίζει τις δοκιμές του από δρόμο, για να δει αν οι περίπου ιδανικές συνθήκες της αεροσυραγγας έχουν εφαρμογή και στο δρόμο. Δεν είναι λίγες οι φορές που οι μετρήσεις του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης στο δρόμο είναι τόσο διαφορετικές απ' τις μετρήσεις στη σήραγγα, ώστε οι μηχανικοί δεν ανακοινώνουν πλέον συντελεστές πριν να τους επαληθεύσουν ή έστω τους πλησιάσουν στο δρόμο.

**Τελειώνοντας τη σύντομη εισαγωγή, μπορούμε να πούμε πως αν ο σχεδιαστής καταφέρει να μειώσει το συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά 10 τοις εκατό, τότε είναι σίγουρο πως θα έχει οικονομία στην κατανάλωση της τάξης του 3 τοις εκατό μίνιμουμ! Βλέπουμε λοιπόν πως με την κατανάλωση ελάχιστης φαιάς ουσίας μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων.**

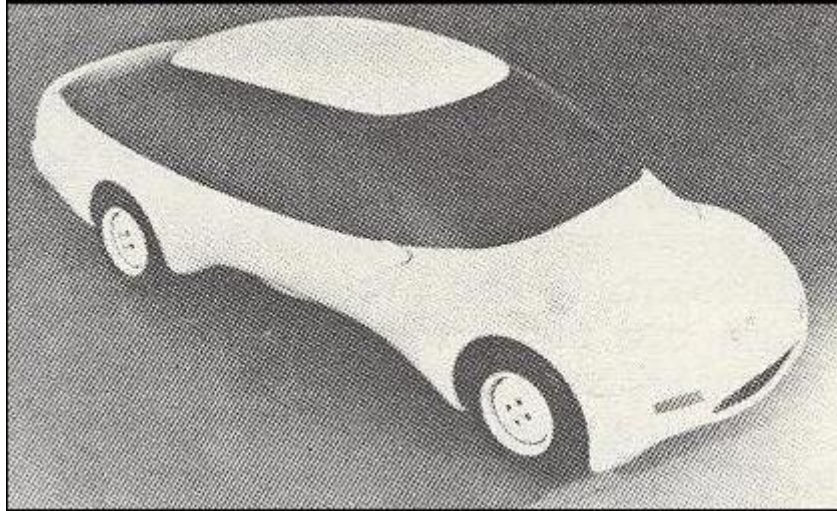




*Εικόνα 14: Με συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης μόνο 0.161 το αρχικό σχήμα του Πινινφαρίνα ήταν μια γενναία προσπάθεια για τη μείωση της κατανάλωσης βενζίνης*



*Εικόνα 15: Μοντέλο υπό εξέταση*



Εικόνα 16: Μοντέλο υπό εξέταση

### 3.4 Τι είναι ο Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι μετρήσεις που παίρνονται στην αεροσήραγγα αντιπροσωπεύουν το συνολικό συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης του αυτοκινήτου.

$$D = C_d A q$$

όπου  $D$  είναι ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης, όπως μετρήθηκε στη αεροσήραγγα,  $A$  είναι η μέγιστη μετωπική επιφάνεια του οχήματος και  $q$  είναι η δυναμική πίεση του αέρα που βγαίνει από τη σχέση :

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα της μάζας του αέρα και  $V$  η ταχύτητα. Αν διαιρέσουμε αυτή τη δύναμη με το εμβαδό της μέγιστης μετωπικής επιφάνειας του οχήματος και πολλαπλασιάσουμε με την τιμή της δυναμικής πίεσης του αέρα παίρνουμε ένα συντελεστή που είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του οχήματος και την ταχύτητά του. Έτσι ο Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης (Σ.Α.Α,  $C_d$ ) βγαίνει από τον τύπο: Σ.Α.Α.

$$C_d = 2D / \rho v^2 A$$

Με δύο τρόπους μπορεί ο μηχανικός σχεδιαστής να μειώσει την αεροδυναμική αντίσταση:

1. μειώνοντας τη μετωπική επιφάνεια



## 2. μειώνοντας τον Σ.Α.Α.

Η τάση των τελευταίων ετών για μικρότερα αυτοκίνητα βοήθησε αρκετά στην ελάττωση του παράγοντα . Υπάρχει όμως ένα όριο στο χώρο που απαιτείται για να χωρέσουν τέσσερις επιβάτες, άρα και στη μετωπική του επιφάνεια. Εκεί που δεν υπάρχει όριο είναι στη φαντασία του μηχανικού- σχεδιαστή, όπως φαίνεται από τη γενναία σύλληψη του Πινινφαρίνα. **Στο πείραμά του ο μεγάλος Ιταλός μηχανικός-καλλιτέχνης κατάφερε να εξελίξει ένα αμάξωμα με συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης 0.160, που ήταν μικρότερος κι από το περίφημο «Δάκρυ» του Γκέτιγκεν.**

Ο συντελεστής αυτός έφτασε το 0.161 όταν έγιναν οι πρώτες μετατροπές για να μεταβληθεί το θεωρητικό σχήμα σε επιβατικό αυτοκίνητο. Πρώτα παρουσιάστηκαν δύο «εξογκώματα» στο δάπεδο του αυτοκινήτου για τα πόδια των επιβατών αύξηση του Σ.Α.Α από 0.160 στο 0.161. Μετά έγινε η εισαγωγή για τον αέρα που ψύχει το νερό του κινητήρα αύξηση στο 0.172. Οι τεχνικοί του Πινινφαρίνα υπολόγιζαν ότι αν ποτέ το Σχήμα έμπαινε στην παραγωγή, **ο Σ.Α.Α θα ήταν μόνο 0.23**, κάτι που κανένα επιβατικό αυτοκίνητο δεν μπορεί να παρουσιάσει αυτή τη στιγμή.

Δυστυχώς, μέχρι σήμερα το αμάξωμα δεν χρησιμοποιήθηκε σε κανένα αυτοκίνητο παραγωγής, αλλά επηρέασε σημαντικά τη μορφή όλων των αυτοκινήτων που παρουσιάστηκαν από τότε. Οι συντελεστές Α.Α απλών σχημάτων διαφέρουν σημαντικά όπως μπορείτε να δείτε στο σχετικό πίνακα που παραθέτουμε. Ένα αλεξίπτωτο π.χ. έχει Cd 1.35, ενώ η πτέρυγα ενός μαχητικού αεροπλάνου έχει Cd 0.05. ο μέσος αεροδυναμικός συντελεστής των ευρωπαϊκών οικογενειακών αυτοκινήτων κυμαίνεται γύρω στο 0.45. Τα πειραματικά αυτοκίνητα έχουν Cd κάτω από 0.25.

Η πρώτη δουλειά του μηχανικού-σχεδιαστή, όταν ξεκινάει τη μελέτη ενός νέου σώματος στη σήραγγα, είναι να προσδιορίσει τα αεροδυναμικά φορτία που επενεργούν στο όχημα. Για να φέρει σε πέρας την αποστολή του αυτή χρησιμοποιεί μοντέλα από πηλό, σε κλίμακα που μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιαστή για ακρίβεια, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός μοντέλου μπορεί να δώσει ακριβείς μετρήσεις, στις οποίες θα μπορούσε να βασιστεί ο σχεδιαστής.

Απλώς τα μοντέλα χρησιμοποιούνται στο πρώτο στάδιο της αξιολόγησης του οχήματος. Στα υπόλοιπα στάδια η μελέτη της συμπεριφοράς γίνεται είτε με ένα μοντέλο 1:1 είτε με το πρώτο πρωτότυπο αυτοκίνητο.

Δεν είναι όμως μόνο τα μοντέλα που παρουσιάζουν προβλήματα για τους μηχανικούς, αλλά και οι ίδιες οι σήραγγες. Αν είναι πολύ στενές, ο αέρας που χτυπά στα τοιχώματά τους «ξαναγυρίζει» προς το μοντέλο επηρεάζοντας τη ροή γύρω απ' αυτά. Γι' αυτό, οι μεγάλες εταιρίες απέκτησαν τώρα σήραγγες πραγματικά τεραστίων διαστάσεων σαν τη σήραγγα της Τζένεραλ Μότορς, που έχει πλάτος 21.3 μ, ύψος 5.5μ και ενεργό μήκος... 282 μέτρων.

Λέμε «ενεργό» μήκος, γιατί στη σήραγγα αυτή ο ανεμιστήρας δεν βρίσκεται εμπρός ή πίσω απ' το προς δοκιμή όχημα, αλλά δίπλα του. Ο αέρας κυκλοφορεί σ' ένα κλειστό κύκλωμα, το συνολικό μήκος του οποίου είναι - 282 μέτρα (βλέπε σχήμα). Ο ανεμιστήρας κινείται από έναν ηλεκτροκινητήρα 2.235 KW, που επιτρέπει στους επιστήμονες να αναπτύσσουν ταχύτητες αέρος της τάξης των 241 χιλιομέτρων /ώρα.

## Κεφάλαιο 4 Πεπερασμένα στοιχεία

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energymethods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design).

Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητά της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Αρχικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε μια ενεργειακή μέθοδο για την επίλυση δισδιάστατων φορέων, όπως οι μέθοδοι Rayleigh-Ritz και Galerkin, τις οποίες μετέφερε ουσιαστικά από το χώρο των συνεχών συστημάτων στα διακριτά συστήματα. Στη συνέχεια επικράτησαν οι αρχές των ισοπαραμετρικών στοιχείων που εξασφαλίζουν ακρίβεια στους υπολογισμούς και βελτιώνουν σημαντικά τον ενιαίο προγραμματισμό της μεθόδου.

Τέλος, η ανάπτυξη των προγραμμάτων προ- και μετά-επεξεργασίας (pre- and post-processing) των δεδομένων και αποτελεσμάτων καθιέρωσαν τη μέθοδο και τα αντίστοιχα προγράμματα που αναπτύχθηκαν. Έτσι σήμερα χρησιμοποιώντας προγράμματα που στηρίζονται στις αρχές του CAD ο χρήστης είναι σε θέση να μορφώσει, να τροποποιήσει το προσομοίωμά του και να καθορίσει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις κατά τρόπο απλό και εύκολα ελέγξιμο. Μετά την επίλυση του προβλήματος, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται άμεσα και εποπτικά ενώ σε πολλά συστήματα παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης των αποτελεσμάτων με τη μορφή βάσεων δεδομένων (databases).

Η επόμενη γενιά των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αναμένεται να περιλάβει και τη συγκροτημένη διαστασιολόγηση κατασκευών κατά τρόπο που να ενσωματώνει ισχύοντες κανονισμούς αλλά και εμπειρία από το σχεδιασμό διαφόρων κατηγοριών κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ως προσεγγιστική μέθοδος επιδέχεται βελτιώσεις και προσφέρεται για διαρκή έρευνα με σκοπό τη βελτίωση της. Έτσι παρά τα είκοσι πέντε χρόνια ζωής που διανύει, πολλά θέματα που σχετίζονται με τη μέθοδο δεν έχουν βρει ακόμη ευρύτερα αποδεκτές λύσεις. Έτσι πληθώρα πεπερασμένων στοιχείων διατίθενται για γενική ή ειδική εφαρμογή, ειδικές φορτίσεις κλπ., ενώ τα θέματα των βασικών κριτηρίων που κάθε αναπτυσσόμενο στοιχείο θα πρέπει να ικανοποιεί δεν είναι ακόμη πλήρως διευκρινισμένα και παραπέμπουν σε σύνθετες μαθηματικές αντιμετώπισεις. Για την συστηματοποίηση της έρευνας στη περιοχή έχουν θεσπιστεί χαρακτηριστικά παραδείγματα (benchmarktests) που διευκολύνουν και προωθούν σημαντικά την έρευνα για τη συμπεριφορά των στοιχείων [2].

Η εισαγωγή και ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (Η/Υ) άνοιξε νέους ορίζοντες στις επιστήμες. Αναπτύχθηκαν θεωρίες προσαρμοσμένες στον Η/Υ υπό μορφή μητρώων ή σειρών καθώς και υπολογιστικές μέθοδοι για να επιλύουν προβλήματα που ήταν αδύνατον να λυθούν παλαιότερα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finiteelements method) αναπτύχθηκε λόγω των Η/Υ και χρησιμεύει για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής, της Θερμότητας, της Ρευστομηχανικής, του Ηλεκτρομαγνητισμού και άλλων. Η μέθοδος είναι δημοφιλής, δυνατή και χρησιμοποιείται στις κατασκευές και μελέτες αεροσκαφών, πλοίων, αυτοκινήτων, παντός είδους μηχανημάτων, γεφυρών, σηράγγων, πολυκατοικιών, θεμελιώσεων, οδοστρωμάτων και άλλων εφαρμογών.

Επίσης όλα τα Ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, οι βιομηχανίες, οι τεχνικές εταιρείες και οι μελετητές μηχανικοί, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για την λύση των προβλημάτων των.

Υπάρχουν διαφορετικοί μέθοδοι (ή διαφορετικές φιλοσοφίες) για την ανάπτυξη της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Δύο από τις μεθόδους είναι:

- Η ενεργειακή μέθοδος, βασίζεται στην ολική δυναμική ενέργεια του σώματος ή της κατασκευής (totalpotentialenergy), μαζί με την μέθοδο των μετατοπίσεων. Η μέθοδος είναι απλή και δεν απαιτεί την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Επίσης στα προβλήματα της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται η ενεργειακή μέθοδος, όταν υπάρχει η εξίσωση της δυναμικής ενέργειας, η οποία μετονομάζεται και λέγεται συναρτησιακή ενέργεια (functional). Η ενεργειακή μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν υπάρχει η δυνατότητα να εκφρασθεί η ολική δυναμική ενέργεια του προβλήματος στα στερεά ή η functional στα προβλήματα της μεταφοράς θερμότητας. Αν δεν γνωρίζουμε την ολική δυναμική ενέργεια, τότε χρησιμοποιούνται άλλοι μέθοδοι, όπως η μέθοδος του Galerkin.
- Η μέθοδος του Galerkin ανήκει στην γενική κατηγορία των Σταθμικών Υπολοίπων (methodsofWeightedResiduals). Η μέθοδος Galerkin είναι γενική, δυνατή και εφαρμόζεται απ' ευθείας στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων

Ο τρόπος επιλύσεως προβλημάτων με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχεδόν ο ίδιος σε όλες τις περιοχές που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα, για την επίλυση μιας κατασκευής σχεδιάζουμε πρώτα την κατασκευή κατόπιν την χωρίζουμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή τετράπλευρα, τα οποία λέγονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες του υλικού και οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το υλικό εξετάζονται στα πεπερασμένα στοιχεία σαν συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου (μέθοδος των μετατοπίσεων). Λαμβάνουμε υπόψη τις οριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία (μηχανικά και θερμικά) και καταλήγουμε στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι

κομβικές μετατοπίσεις, είναι η ζητούμενη προσεγγιστική λύση. Γνωστών των κομβικών μετατοπίσεων υπολογίζονται στα διάφορα σημεία της κατασκευής οι τάσεις ( $\sigma$ ), οι παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) και οι αντιδράσεις ( $R$ ) των στηρίξεων [3].

## 4.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρις της εφευρέσεως του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές.

Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών.

Το 1941 ο Hrennikoff εισήγαγε την καλούμενη frameworkmethod (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών.

Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που εφευρέθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο.

Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα “Ενεργειακά θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων” και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων.

Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου “University of California, Berkeley” της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα “Πεπερασμένα στοιχεία” (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία.

Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων.

Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες [3].

### 4.3 ΛΟΓΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Προβλήματα που δεν μπορούσαν να τα αγγίξουν οι επιστήμονες έως τώρα και τα θεωρούσαν άλυτα, με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y) και των υπολογιστικών μεθόδων όπως των πεπερασμένων στοιχείων τα λύνουν σε μικρό χρόνο.

Στις Ηνωμένες πολιτείες της Αμερικής, στην Ευρώπη, και στις ανεπτυγμένες χώρες, η βιομηχανία, ο στρατός και το κράτος χρηματοδοτούν τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα και τις ερευνητικές εταιρείες, με σκοπό την ανάπτυξη προγραμμάτων.

Η ανάγκη της βιομηχανίας και των προβλημάτων της πράξης, οδήγησε την ανάπτυξη γραφικών προγραμμάτων τα οποία συνοδεύουν την ανάλυση-υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Ο συνδυασμός των γραφικών με την ανάλυση-υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων υψώνουν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική (state of the art).

Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των εμπορικών προγραμμάτων για τον H/Y. Τα εμπορικά προγράμματα αποτελούνται από δύο μεγάλα προγράμματα: τα γραφικά και την ανάλυση.

*Γραφικά προγράμματα.* Τα γραφικά προγράμματα χρησιμοποιούνται πριν από την ανάλυση (Preprocessing) και μετά την ανάλυση (Post-processing).

- Preprocessing. Με την χρήση του γραφικού προγράμματος το σώμα ή η κατασκευή σχεδιάζεται και κατόπιν διακριτοποιείται στα πεπερασμένα στοιχεία.
- Post-processing. Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων όπως είναι η παραμόρφωση του σώματος, η διανομή των τάσεων εντός του σώματος και άλλων.

*Πρόγραμμα για την ανάλυση-υπολογισμό.* Το πρόγραμμα της ανάλυσης χρησιμοποιείται για την μελέτη ποικίλων προβλημάτων που μπορεί να αφορούν την μηχανική των στερεών ή των κατασκευών, στα ρευστά, στην θερμότητα, στην ακουστική, στην κατεργασία των μετάλλων, στον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες περιοχές. Όλα τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, η βιομηχανία, οι τεχνικές εταιρείες, οι μηχανικοί της πράξης, οι προ-πτυχιακοί και οι μεταπτυχιακοί φοιτητές, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα για τον H/Y για την μοντελοποίηση (ή προσομοίωση) προβλημάτων, όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω:

- ANSYS
- LUSAS [5]
- ABAQUS
- NASTRAN
- MARC
- ADINA

- SAP90
- COSMOS

Τα προγράμματα παρέχουν υπορουτίνες (subroutines), ώστε ο χρήστης να μπορεί να προσθέσει το δικό του πρόγραμμα συνήθως σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN ή C, για να προσθέσει πληροφορίες που δεν υπάρχουν στο εμπορικό πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα να τροποποιήσει, να βελτιώσει ή να προσθέσει νέες καταστατικές εξισώσεις (constitutive equations).

Υπάρχουν επίσης ειδικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω:

HITCAN (Metal matrix composites analyzer) και

CODSTRAN (polymer composites analyzer),

Τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο ερευνητικό κέντρο NASA Glen (Lewis) Research Center, Cleveland, Ohio, USA υπό την επίβλεψη και δημιουργού αυτών Dr. Christos C. Chamis. Τα προγράμματα αυτά, χρησιμοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία και την μηχανική των σύνθετων υλικών (fiber composite materials).

Η θεωρητική γνώση των πεπερασμένων στοιχείων βοηθά να αναπτύξει ο φοιτητής, ο ερευνητής ή ο μηχανικός της πράξης την αυτοεκτίμηση και την ικανότητα να λύνει, να λειτουργεί και να ερμηνεύει σωστά τα αποτελέσματα που λαμβάνει από ένα πρόγραμμα, και αν χρειαστεί να γράψει το δικό του πρόγραμμα.

#### 4.4 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην ουσία η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μία μαθηματική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Επειδή είναι μία αριθμητική (numerical) μέθοδος, έχει τη δυνατότητα επίλυσης περίπλοκων προβλημάτων που είναι δυνατό να εκφραστούν με τη μορφή διαφορικών εξισώσεων. Τέτοιου είδους προβλήματα παρουσιάζονται σε όλα τα πεδία των φυσικών επιστημών, επομένως η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων θεωρητικά δεν έχει όρια στην εφαρμογή της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων.

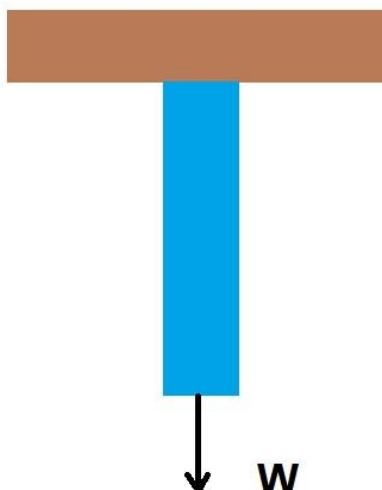
Εξαιτίας του υψηλού κόστους της υπολογιστικής ισχύος τα αρχικά χρόνια εφαρμογής τους τα Πεπερασμένα Στοιχεία χρησιμοποιούνταν για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων, αλλά τα τελευταία χρόνια χρησιμεύουν στην επίλυση όλων και περισσότερων προβλημάτων σε μεγάλη ποικιλία επιστημών. Αρχικά χρησιμοποιούνταν mainframes, αλλά πλέον υπάρχει λογισμικό που εργάζεται σε προσωπικούς υπολογιστές σε περιβάλλον windows. Βεβαίως όπως και κάθε μέθοδος, τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά με την κατάλληλη εφαρμογή είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση των πηγών λάθους και η πληρέστερη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων.

Η μελέτη ενός προβλήματος με Πεπερασμένα Στοιχεία συνίσταται στη δημιουργία ενός μοντέλου, ενός υλικού ή μιας κατασκευής, το οποίο αναλύεται στη συνέχεια στον Η/Υ για την εξαγωγή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, τα οποία ερμηνεύουν τις ιδιότητές του ή προβλέπουν την επίδραση συγκεκριμένων συνθηκών. Η μέθοδος χρησιμεύει στη

δημιουργία νέων προϊόντων, τα οποία σχεδιάζονται στον Η/Υ και οι ιδιότητές τους μελετώνται λεπτομερώς προτού αυτό αποκτήσει φυσική υπόσταση.

Επίσης χρησιμεύει στην τροποποίηση υπάρχοντων υλικών και στην περίπτωση μηχανικών αποτυχιών, χρησιμεύει στη διαπίστωση και διόρθωση του προβλήματος. Χρησιμοποιούνται δύο ειδών αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων, ανάλογα με το μοντέλο που εφαρμόζεται: δύο διαστάσεων και τριών διαστάσεων. Η ανάλυση δύο διαστάσεων είναι απλούστερη, έχει μικρότερο κόστος και είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και σε απλό Η/Υ, αλλά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της είναι λιγότερο ακριβή. Η ανάλυση τριών διαστάσεων είναι περισσότερο ακριβής στις προβλέψεις της, απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και ειδικό λογισμικό, η χρήση της είναι ακριβέστερη και είναι περισσότερο απαιτητική στο σχεδιασμό της.

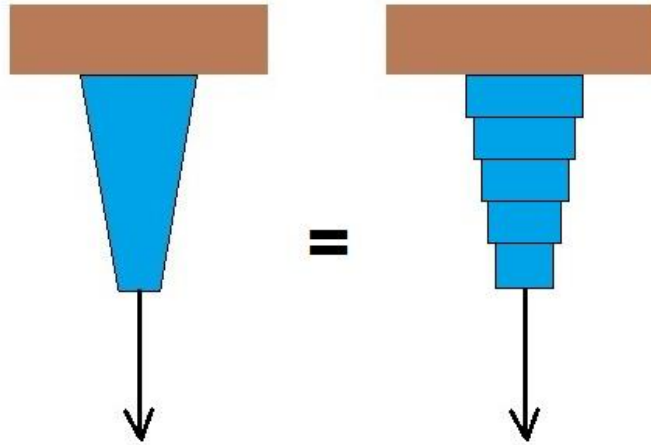
Η λογική στην οποία στηρίζεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα: Η επιμήκυνση της δομής στο Σχ. 3.1 υπό την επίδραση ενός φορτίου εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης και από τις ιδιότητες του υλικού.



*Εικόνα 17:Επιμήκυνση της δομής υπό την επίδραση φορτίου*

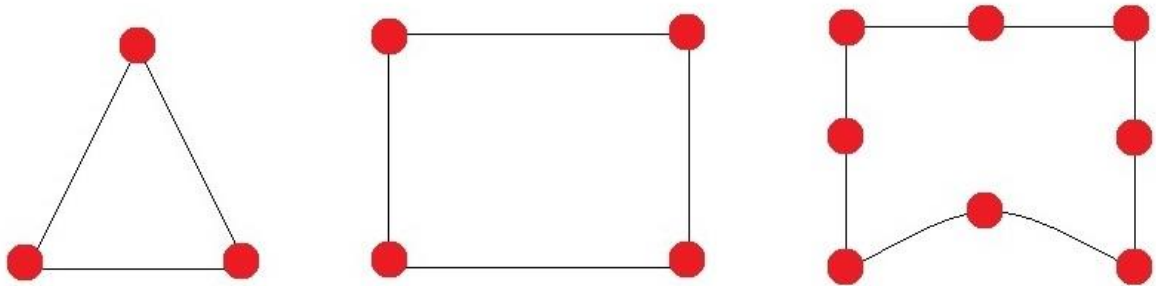
Η φόρτιση που ασκείται ισούται με το γινόμενο της ακαμψίας του υλικού επί την Παρεκτόπιση που προκαλεί η δράση της, σύμφωνα με το νόμο του Hooke. Εάν η κατασκευή αυτή διαιρεθεί σε περισσότερα τμήματα (στοιχεία, elements), τα οποία θα συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι (nodes), Σχ. 3.2, η συνολική φόρτιση θα ισούται με το άθροισμα του γινομένου (ακαμψία  $\times$  παρεκτόπιση) για κάθε τμήμα. Η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (mesh generation) ονομάζεται διακριτοποίηση (discretization).





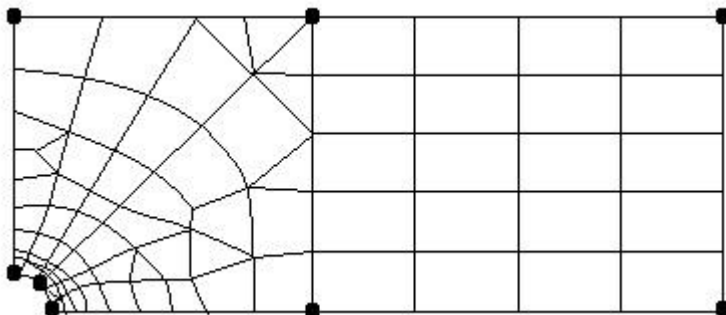
Εικόνα 18: Διαίρεση δομής (αριστερά) σε στοιχεία (δεξιά).

Τα στοιχεία είναι δυνατό να λάβουν κάθε μορφή, αλλά συνήθως έχουν τη μορφή γνωστών γεωμετρικών σχημάτων, όπως είναι το τρίγωνο, το παραλληλόγραμμο, το τετράγωνο και άλλα.



Εικόνα 19: Στοιχεία και κόμβοι.

Στις τρεις διαστάσεις τα στοιχεία είναι δυνατό να είναι κύβιοι, παραλληλεπίπεδα και άλλα. Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων αποκαλείται επομένως από το στοιχεία που το αποτελούν δισδιάστατο ή τρισδιάστατο. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί ένα περίπλοκο σύστημα σημείων που καλούνται κόμβοι (nodes), αυτά σχηματίζουν ένα δίκτυο που αποκαλείται πλέγμα (mesh). Μία πολύπλοκη κατασκευή αναλύεται σε ένα πλέγμα πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος.



Εικόνα 20: Πλέγμα πολύπλοκης κατασκευής.

Το στοιχείο είναι η βασική δομική μονάδα με προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Το πλέγμα προσομοιάζει με ιστό αράχνης, στον οποίο από κάθε κόμβο εκτείνεται ένα στοιχείο πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιό τρόπο θα συμπεριφερθεί μία κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης.

Οι κόμβοι τοποθετούνται με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Περιοχές με μεγαλύτερη αναμενόμενη τάση θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων από αυτές που η αναμενόμενη τάση είναι μικρότερη. Περιοχές που λαμβάνουν ιδιαίτερη σημασία είναι οι περιοχές στις οποίες είχε διαπιστωθεί σε πειραματικές μελέτες η παρουσία θραύσης ή γωνίες, κενά και περιοχές υψηλής τάσης.

Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Εάν το πλέγμα είναι αδρό τότε είναι δυσχερής η σωστή επίλυση του προβλήματος. Αντίθετα, εάν το πλέγμα είναι ιδιαίτερα λεπτομερές και περιέχει μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων από ότι είναι αναγκαίο, τότε το κόστος του υπολογιστικού χρόνου και ο αναγκαίος χρόνος για την ανάλυση είναι δυνατό να υπερβαίνουν το όφελος από την ανάλυση.

Είναι χρήσιμη μία σχετική γνώση σχετικά με την κατανομή των τάσεων εντός του υλικού. Υπάρχει ανάγκη λεπτομερούς πλέγματος όταν υπάρχει σημαντική μεταβολή των τάσεων και παραμορφώσεων και αδρού πλέγματος σε περιοχές με σταθερή σχετικά τάση. Η παρεκτόπιση των στοιχείων θεωρείται ότι περιγράφεται από απλές πολυωνυμικές εξισώσεις.

Οι εξισώσεις ισορροπίας καταγράφονται σε ένα μαθηματικό πίνακα και επιλύονται από τον  $H/Y$ . Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες συνθήκες περιορισμού (boundary conditions) και τις επιθυμητές φορτίσεις υπολογίζονται οι παρεκτοπίσεις των κόμβων επιλύοντας τις εξισώσεις του πίνακα. Από τις παρεκτοπίσεις των κόμβων υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που ασκούνται στην κατασκευή ή στο υλικό που μελετάται. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης σημαντικού αριθμού παραμέτρων, όπως είναι η μάζα, ο όγκος, η θερμοκρασία, η ενεργειακή τάση, η παραμόρφωση, η δύναμη, η παρεκτόπιση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση και άλλα.

Είναι επίσης δυνατή η εφαρμογή πολλαπλών συνθηκών στο ίδιο μοντέλο. Κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων συνοδεύεται από μία βιβλιοθήκη στοιχείων, όπως ράβδοι, δοκοί, πλάκες, συμπαγή στοιχεία, ελατήρια και άλλα. Είναι επίσης δυνατή η μελέτη υλικών με διαφορετικές ιδιότητες εντός του ίδιου μοντέλου, δηλαδή ιστροπικών υλικών (με ομοιογενείς ιδιότητες σε όλη τη έκτασή τους), ορθοτροπικών υλικών (οι ιδιότητές τους είναι όμοιες μόνο σε γωνία 90°) και ανισοτροπικών υλικών (με διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε όλη την έκτασή τους).

Η δομική ανάλυση συνίσταται στη χρήση γραμμικών και μη γραμμικών μοντέλων. Τα γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιούν απλές παραμέτρους θεωρώντας ότι το υλικό δεν υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Στα μη γραμμικά μοντέλα πραγματοποιείται φόρτιση πέραν της ελαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή το υλικό θεωρείται ότι υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, η οποία και μελετάται.

Παράδειγμα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι η ανάλυση κόπωσης, με την οποία γίνεται πρόβλεψη της αντοχής μίας κατασκευής σε κυκλική φόρτιση. Τέτοιου είδους ανάλυση αποκαλύπτει τις περιοχές στις οποίες είναι περισσότερο πιθανή η δημιουργία ή η επέκταση μίας ρωγμής. Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτέλεσε τη λύση στο ζήτημα της πρόβλεψης της αποτυχίας ενός υλικού εξαιτίας μη γνωστών τάσεων, επιτρέποντας τη μελέτη της κατανομής τάσεων εντός του υλικού, αποκαλύπτοντας την ύπαρξη προβληματικών περιοχών.

Η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο απλή από την κατασκευή και τον έλεγχο δειγμάτων για κάθε πιθανή περίπτωση. Άλλο παράδειγμα εφαρμογής είναι η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας, με την οποία μελετάται η αγωγιμότητα των υλικών ή των κατασκευών. Ενώ η μέθοδος αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις ανάγκες της αεροπορικής και της πυρηνικής βιομηχανίας, η χρήση της μεθόδου εξαπλώθηκε σημαντικά για την επίλυση μεγάλου αριθμού προβλημάτων.

Το **προ-υπολογιστικό στάδιο** (preprocessor stage) της ανάλυσης συνίστανται σε:

- Ορισμό του τίτλου του προβλήματος
- Επιλογή των προτιμήσεων (preferences)
- Ορισμός τύπου και της μορφής των πεπερασμένων στοιχείων (2D ή 3D)
- Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού (μέτρο ελαστικότητας Young, λόγος Poisson και άλλα)
- Δημιουργία μοντέλου με κατάλληλες διαστάσεις
- Καθορισμός πυκνότητας πλέγματος (meshdensity)
- Δημιουργία πλέγματος (meshing)

Στο **στάδιο της επίλυσης** (computation stage) εφαρμόζονται στο μοντέλο οι συνθήκες φόρτισης και περιορισμού (loading and boundary conditions).

Στο **μετα-υπολογιστικό στάδιο** (post-processor stage) γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν την μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων.

Το κόστος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι μικρότερο από την πειραματική δοκιμή υλικών, αλλά δεν είναι και φθηνή. Το κόστος της χρήσης του ειδικού λογισμικού είναι σημαντικό, η χρήση του χρεώνεται σε ετήσια βάση, ενώ η τεχνική υποστήριξη και η εκπαίδευση είναι επίσης ακριβές. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο σε όσους ασχολούνται με το βιομηχανικό και μηχανολογικό σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε περιοχές όπως:

1. Ο σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών
2. Η ανάλυση του Shock
3. Η ακουστική
4. Η θερμική ανάλυση
5. Η μελέτη των δονήσεων
6. Η προσομοίωση συγκρούσεων
7. Μελέτη ηλεκτρικών φαινομένων
8. Προβλήματα λυρισμού
9. Δυναμικές αναλύσεις
10. Η μελέτη ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων

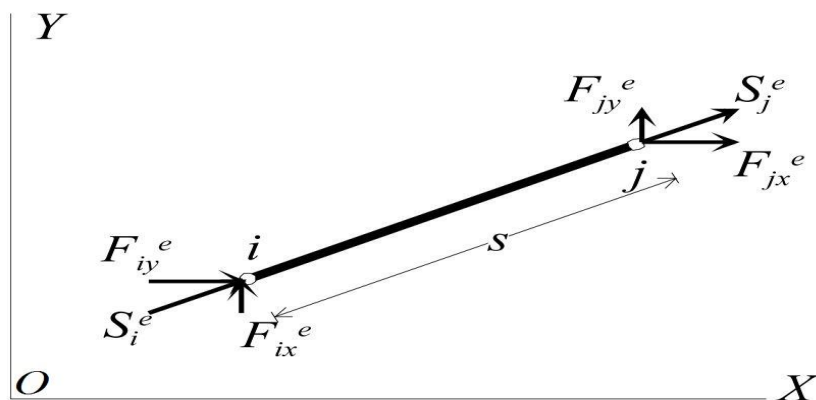
Ο σχεδιασμός ακόμα και των πιο απλών προϊόντων στηρίζεται στη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων αφού τα σχεδιαστικά προβλήματα δεν είναι δυνατό να επιλυθούν φθηνότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια με άλλη διαθέσιμη μέθοδο. Η φυσική εξέταση των υλικών που για δεκαετίες ήταν ο κανόνας θεωρείται πλέον ακριβή και όπου είναι δυνατό αντικαθίσταται με φθηνότερες, αξιόπιστες μεθόδους.

#### 4.5 ΔΙΚΤΥΩΤΟΙ ΦΟΡΕΙΣ – ΡΑΒΔΟΣ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ

Αριθμούμε τους κόμβους και τις ράβδους του δικτύωματος, στη συνέχεια απομονώνουμε την ράβδο  $e$ . Η ράβδος  $e$  είναι ένα στοιχείο, μονοδιάστατο αμφιαρθρωτό, αφόρτιστο μεταξύ των δύο άκρων του, που καταπονείται μόνον από τις αξονικές δυνάμεις  $S_i$  και  $S_j$  που δρουν στα άκρα της  $i, j$ . Συμβολίζουμε με  $S^e$  το διάνυσμα των δυνάμεων  $S^e = [S_i, S_j]^T$  που δρα στους κόμβους  $i, j$ , δηλαδή:

$$S^e = \begin{Bmatrix} S_i^e \\ S_j^e \end{Bmatrix}$$

Κάθε ράβδος του δικτυώματος είναι ορισμένη από τις συντεταγμένες των άκρων της  $i, j$  ως προς ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων, Σχ. 3.5, και χαρακτηρίζεται από το μήκος της  $s$ , τη σταθερή της διατομή  $A$  και το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του υλικού από το οποίο αποτελείται.



Εικόνα 21: Ράβδος δικτυώματος  $i, j$  ως προς ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων  $XOY$

Ας πάρουμε ένα τοπικό σύστημα αξόνων με αρχή το σημείο  $i$  τέτοιο ώστε ο άξονας των  $x$  να συμπίπτει με την διεύθυνση της ράβδου με φορά από τον κόμβο  $i$  προς τον κόμβο  $j$ , εικ.21.

Οι μετατοπίσεις της ράβδου είναι πάντα κατά την έννοια της ράβδου. Ας συμβολίσουμε με  $\delta(x)$  την μετατόπιση κατά τη διεύθυνση της ράβδου ενός σημείου  $M$  που απέχει  $x$  από το σημείο  $i$  (χρησιμοποιείται το σύμβολο  $\delta$  αντί του  $q$  επειδή αναφερόμαστε σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων). Η μετατόπισή του πρέπει να εκφραστεί σαν συνάρτηση των μετατοπίσεων  $\delta_i$  και  $\delta_j$  με έναν απλό παρεμβολικό τύπο. Αυτό μπορεί να γίνει κατ' ευθείαν ή με το να θεωρήσουμε ότι η μετατόπιση  $\delta(x)$  δίνεται από ένα απλό πολυώνυμο:

$$\delta(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots = [1 + x + x^2 \dots] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Η Εξ. (3.1) πρέπει να ισχύει και στους κόμβους  $i(x=0)$  και  $j(x=s)$  όπου οι μετατοπίσεις είναι αντίστοιχα  $\delta_i$  και  $\delta_j$ , δηλαδή:

$$\delta(0) = \delta_i \quad (3.2)$$

$$\delta(s) = \delta_j$$

Άρα μόνο δύο όρους μπορούμε να κρατήσουμε από τη Εξ. (3.2) και κρατάμε πάντα τους όρους με ανιούσα σειρά, δηλαδή:

$$\delta(x) = a_1 + a_2x = [1 \quad x] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix}$$

Ή

$$\delta(x) = M(x)a \quad (4.3)$$

Όπου

$$M(x) = [1 \quad x], \quad a = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Εφαρμόζοντας τις Εξ. (3.1, 3.2) έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix}$$

Ή

$$\delta^e = Aa \quad (3.5)$$

Λύνοντας ως προς  $a$  και αντικαθιστώντας στην Εξ. (3.3) έχουμε:

$$\delta(x) = \left(1 - \frac{x}{s}\right) \delta_i + \frac{x}{s} \delta_j \quad \text{ή} \quad \delta(x) = (1 - \xi) \delta_i + \xi \delta_j, \quad \xi = \frac{x}{s}$$

Οπότε:

$$\delta(x) = [1 - \xi \quad \xi] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

Συμβολίζω με  $N_i(x) = 1 - \xi$  και  $N_j(x) = \xi$ . Τα  $N_i(x)$ ,  $N_j(x)$  λέγονται **συναρτήσεις σχήματος**. Η Εξ. (3.6) γράφεται:

$$\delta(x) = [N_i(x) \quad N_j(x)] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = N \delta^e \quad (3.7)$$

Στην Εξ. (3.7) θα φτάναμε αν αντιστρέψαμε την Εξ. (3.5), οπότε:

$$a = A^{-1}\delta^e$$

Και την αντικαθιστούμε στην Εξ. (3.3) οπότε:

$$\delta(x) = M(x)A^{-1}\delta^e$$

Άρα

$$N(x) = M(x)A^{-1} \quad (3.8)$$

Οι παραμορφώσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{d\delta(x)}{dx} = \frac{1}{s} [-1 \quad 1] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix}$$

Ή σε μητρωϊκή μορφή:

$$\varepsilon = B_1 \delta^e \quad (3.9)$$

Όπου:

$$B_1 = \frac{1}{s} [-1 \quad 1] \quad (3.10)$$

Ενώ οι τάσεις προκύπτουν από τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων:

$$\sigma = E\varepsilon = EB_1\delta^e = \frac{E}{s} [-1 \quad 1]\delta^e \quad (2.11)$$

Το επόμενο βήμα που θα κάνουμε είναι να εφαρμόσουμε την αρχή δυνατών έργων στο στοιχείο  $e$ . Οι δυνατές παραμορφώσεις δε εκφράζονται με μια σχέση ανάλογη της Εξ. (3.9) αφού το μόνο που αλλάζει είναι οι δυνατές μετατοπίσεις των κόμβων. Επομένως αν

συμβολίσουμε με  $\delta\delta^e$  το διάνυσμα των δυνατών κομβικών μετατοπίσεων η δυνατή παραμόρφωση είναι:

$$\delta\varepsilon = B_1\delta\delta^e = \frac{1}{s}[-1 \quad 1]\delta\delta^e$$

Η αρχή των δυνατών έργων λέει ότι το δυνατό έργο  $E_\xi$  των εξωτερικών δυνάμεων

$E_\xi = [\delta\delta^e]^T S^e$  είναι ίσο με το έργο των  $E_\sigma$  των εσωτερικών δυνάμεων:

$$E_\sigma = \int_{V^e} \delta\varepsilon^T \sigma dV$$

δηλαδή:

$$[\delta\delta^e]^T (S^e - \int_{V^e} B_1^T E B_1 dV \delta\delta^e) = 0 \quad (3.12)$$

Ονομάζω ακαμψία  $\bar{k}^e$  του στοιχείου  $e$  στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων την ποσότητα:

$$\bar{k}^e = \int_{V^e} B_1^T E B_1 dV \quad (3.13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα  $B_1$ ,  $E$  και η διατομή  $A$  της ράβδου είναι σταθερά προκύπτει:

$$\bar{k}^e = \frac{AE}{s} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Δεδομένου ότι το διάνυσμα  $\delta\delta^e$  είναι ένα τυχαίο μη μηδενικό διάνυσμα η Εξ. (4.12) γράφεται:

$$\bar{k}^e \delta\delta^e = S^e \quad (3.15)$$

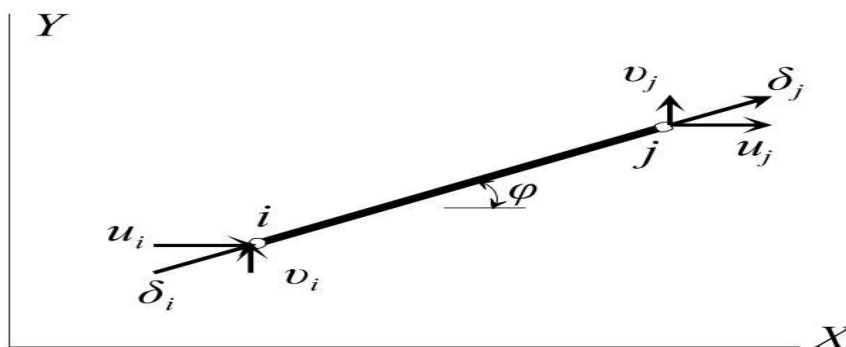
Θεωρούμε τώρα τις μετατοπίσεις στο καθολικό σύστημα  $XOY$ . Το διάνυσμα των κομβικών μετατοπίσεων  $q^e$  της ράβδου είναι:



$$q^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

Το διάνυσμα  $\delta^e$  συνδέεται με το διάνυσμα  $q^e$  με την σχέση:

$$\begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \quad \text{ή}$$



Εικόνα 22

$$\delta^e = a_1 q^e \quad (3.17)$$

Όπου  $l, m$  είναι τα συνημίτονα κατεύθυνσης της ράβδου  $e$  ως προς τους άξονες  $X, Y$ , δηλαδή:

$$l = \frac{X_j - X_i}{s} = \cos \varphi \quad m = \frac{Y_j - Y_i}{s} = \sin \varphi \quad (3.18)$$

Και  $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j)$  οι συντεταγμένες των κόμβων  $i, j$  αντίστοιχα.

Έστω  $(F_{ix}^e, F_{iy}^e)$  και  $(F_{jx}^e, F_{jy}^e)$  οι συνιστώσες των  $S_i^e$  και  $S_j^e$  αντίστοιχα στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Από το Σχ. 30 προκύπτει:

$$\begin{Bmatrix} F_{ix}^e \\ F_{iy}^e \\ F_{jx}^e \\ F_{jy}^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l & 0 \\ m & 0 \\ 0 & l \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_i^e \\ S_j^e \end{Bmatrix} \quad \text{ή} \quad F^e = a_1^T S^e \quad (3.19)$$

Η Εξ. (3.19) συνδέει το μητρώο στήλη  $F^e$  των κομβικών δυνάμεων στο καθολικό σύστημα με το μητρώο των κομβικών δυνάμεων  $S^e$  στο τοπικό σύστημα. Αντικαθιστώντας την Εξ. (3.17) στις Εξ. (4.9) και Εξ. (4.11) προκύπτει:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= B_1 a_1 q^e = B q^e \\ \sigma &= E B_1 a_1 q^e = E B q^e\end{aligned}$$

Εφαρμόζοντας ξανά την αρχή των δυνατών έργων μετά από μια ανάλογη διαδικασία όπως προηγουμένως βρίσκουμε:

$$k^e q^e = F^e \quad (3.20)$$

Όπου

$$k^e = \int_{V^e} B^T E B dV = \int_{V^e} a_1^T B_1^T E B_1 a_1 dV = a_1^T \left( \int_{V^e} B_1^T E B_1 dV \right) a_1$$

Δηλαδή

$$k^e = a_1^T \bar{k}^e a_1 \quad (3.21)$$

το μητρώο ακαμψίας στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Κάνοντας τις πράξεις βρίσκουμε:

$$k^e = \frac{AE}{s} \begin{bmatrix} l^2 & lm & -l^2 & -lm \\ lm & m^2 & -lm & -m^2 \\ -l^2 & -lm & l^2 & lm \\ -lm & -m^2 & lm & m^2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Το μητρώο ακαμψίας  $\bar{k}^e$  και το μητρώο των κομβικών μετατοπίσεων  $\delta^e$  στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, συνδέονται με το μητρώο των κομβικών δυνάμεων  $S^e = [S_i^e \ S_j^e]^T$  επίσης στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων με την Εξ. (4.2), δηλαδή πρέπει να ισχύει:

$$AE \frac{(\delta_i - \delta_j)}{s} = S_i^e \quad AE \frac{(\delta_j - \delta_i)}{s} = S_j^e \quad (3.23)$$

Που είναι ήδη γνωστά από τον εφελκυσμό των ράβδων. Δηλαδή, η Εξ. (3.15) μπορεί να προκύψει και απευθείας.

Πολλαπλασιάζοντας από αριστερά την Εξ.(3.15) με  $a_1^T$  και χρησιμοποιώντας τις Εξ. (3.17) και Εξ. (3.19) προκύπτει:

$$(a_1^T \bar{k}^e a_1) q^e = F^e \leftrightarrow k^e q^e = F^e$$

Που συμπίπτει με την (3.20).

Από τη στιγμή που έχει αναπτυχθεί η Εξ. (4.20) η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος ακολουθεί τα βήματα της μητρωϊκής ανάλυσης των κατασκευών. Δηλαδή εφαρμόζουμε τις εξισώσεις ισορροπίας σε κάθε κόμβοι του δικτυώματος. Στις εξισώσεις αυτές τις εσωτερικές δυνάμεις  $F_{ix}^e, F_{iy}^e, F_{iz}^e$  στον κόμβοι της ράβδου  $e$  τις αντικαθιστούμε από τη Εξ. (4.20). Έτσι βρίσκουμε σχέσεις που συνδυάζουν τις ακαμψίες  $k^e (e=1,2,\dots,N)$  και των  $N$  ράβδων του δικτυώματος καθώς και όλες τις μετατοπίσεις των κόμβων.

Η σχέσεις αυτές έχουν ως δεύτερο μέλος τις γνωστές εξωτερικές δυνάμεις  $R$  που εφαρμόζονται στους κόμβους του δικτυώματος. Αν συμβολίσουμε με  $K$  τον συνδυασμό-σύνθεση των ακαμψιών των επί μέρους ράβδων που περιγράψαμε πιο πάνω και με  $r$  το διάνυσμα που παριστά όλες τις μετατοπίσεις των κόμβων τότε θα έχουμε:

$$Kr = R \quad (3.24)$$

Όπου

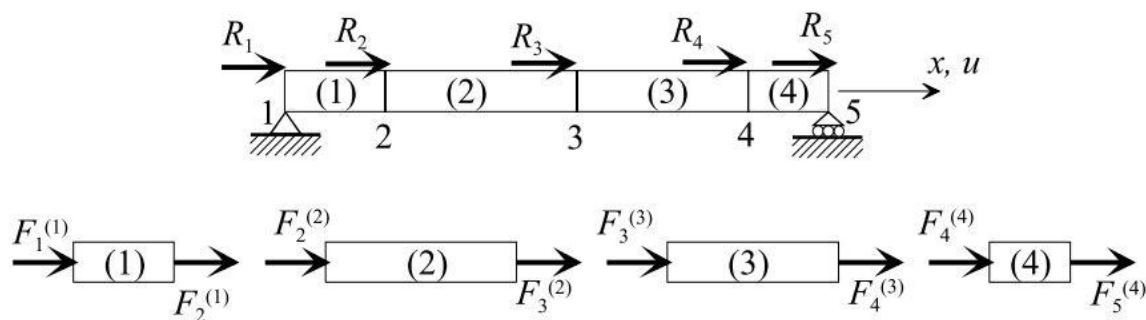
$$K = \sum_{e=1}^N k^e \quad (3.25)$$

Είναι το μητρώο ακαμψίας της ραβδωτής κατασκευής. (Προσοχή το σύμβολο  $\Sigma$  δεν παριστά κλασική άθροιση).

Πιο πολύ μπορεί να καταλάβει κανείς την διαδικασία μέσα από τα παραδείγματα που ακολουθούν.

### Παράδειγμα 1.1

Θεωρούμε τη μονοδιάστατη αμφιέριστη δοκό σταθερής διατομής που φορτίζεται μονοαξονικά και έχει χωρισθεί σε τέσσερα πεπερασμένα στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα. Δεχόμαστε ότι η δοκός δεν λυγίζει επιπλέον, θεωρούμε ότι τα μητρώα ακαμψία και φορτίσεως των στοιχείων είναι γνωστά.



Εικόνα 23: Παράδειγμα 1.1.

Κάθε κόμβος  $i$  έχει μόνον ένα βαθμό ελευθερίας, την αξονική μετατόπιση  $u_i=q_i$ . Εφαρμόζοντας την Εξ. (3.22) για κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1^{(1)} \\ F_2^{(1)} \end{Bmatrix} \quad \begin{bmatrix} k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} \\ k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_2^{(2)} \\ F_3^{(2)} \end{Bmatrix} \quad (\alpha)$$

$$\begin{bmatrix} k_{33}^{(3)} & k_{34}^{(3)} \\ k_{43}^{(3)} & k_{44}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_3^{(3)} \\ F_4^{(3)} \end{Bmatrix} \quad \begin{bmatrix} k_{44}^{(4)} & k_{45}^{(4)} \\ k_{54}^{(4)} & k_{55}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_4 \\ q_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_4^{(4)} \\ F_5^{(4)} \end{Bmatrix}$$

Τα στοιχεία  $k_{ij}^e$  των μητρώων  $k^e$  είναι μονοδιάστατα (1x1).

Για να σχηματισθούν οι εξισώσεις ισορροπίας όλης της δοκού θεωρείται η ισορροπία κάθε κόμβου ξεχωριστά. Οπότε,

$$R_1 = F_1^{(1)} = k_{11}^{(1)} q_1 + k_{12}^{(1)} q_2$$

$$R_2 = F_2^{(1)} + F_2^{(2)} = k_{21}^{(1)} q_1 + [k_{22}^{(1)} k_{22}^{(2)}] q_2 + k_{23}^{(2)} q_3$$

$$R_3 = F_3^{(2)} + F_3^{(3)} = k_{32}^{(2)} q_2 + [k_{33}^{(2)} k_{33}^{(3)}] q_3 + k_{34}^{(3)} q_4$$

$$R_4 = F_4^{(3)} + F_4^{(4)} = k_{43}^{(3)} q_3 + [k_{44}^{(3)} k_{44}^{(4)}] q_4 + k_{45}^{(4)} q_5$$

$$R_5 = F_5^{(4)} = k_{54}^{(4)} q_4 + k_{55}^{(4)} q_5 \quad (\beta)$$

Όπου,  $R_1, \dots, R_5$  οι συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους 1, ..., 5 αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να γραφούν σε μητρωϊκή μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} + k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} + k_{33}^{(3)} & k_{34}^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & k_{43}^{(3)} & k_{44}^{(3)} + k_{44}^{(4)} & k_{45}^{(4)} \\ 0 & 0 & 0 & k_{54}^{(4)} & k_{55}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{Bmatrix} \quad (\gamma)$$

Ή

$$Kr = R \quad (\gamma')$$

Όπου,  $K$  είναι το ολικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής,  $r$  το μητρώο διάνυσμα των μετατοπίσεων των κόμβων και  $R$  το μητρώο διάνυσμα των κομβικών δυνάμεων.

Το σύστημα των εξισώσεων ( $\gamma'$ ) αποτελεί το τελικό σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας όλου του μέσου. Οποιοσδήποτε φορέας και να αντιμετωπισθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το σύστημα των τελικών εξισώσεων που θα σχηματισθεί θα είναι της μορφής των εξισώσεων ( $\gamma'$ ).

Παρατηρώντας το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων ( $\gamma$ ), βλέπουμε ότι θα μπορούσαμε να σχηματίσουμε το ολικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής και απ' ευθείας. Έτσι δύναμη σε ένα κόμβο  $i$  προκαλούν οι μετακινήσεις  $u_j$  των κόμβων των στοιχείων  $e_1, e_2, \dots, e_N$  που έχουν κοινούς κόμβους τον  $i$  και  $j$ . Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο  $K_{ij}$  του ολικού μητρώου ακαμψίας θα είναι:

$$K_{ij} = k_{ij}^{e_1} + k_{ij}^{e_2} + \dots + k_{ij}^{e_N} \quad (\delta)$$

Όπου  $k_{ij}^{e_1}, k_{ij}^{e_2}, \dots, k_{ij}^{e_N}$  είναι τα επιμέρους στοιχεία των μητρώων ακαμψίας των στοιχείων  $e_1, e_2, \dots, e_N$ .

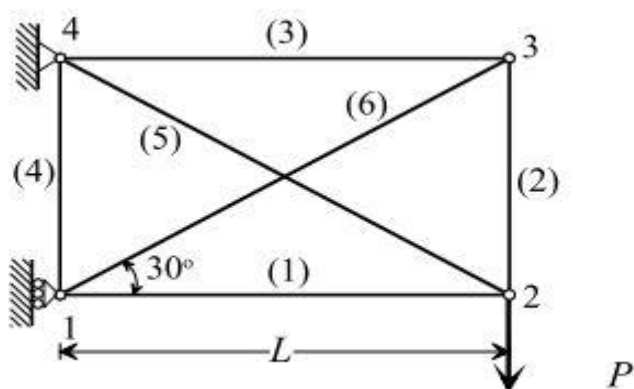
Αξίζει να τονίσουμε ότι αν ο κόμβος  $j$  ανήκει μόνο στα στοιχεία  $e_1$  και  $e_2$  τότε η Εξ. (δ) περιλαμβάνει μόνο τους δύο πρώτους όρους αφού οι υπόλοιποι όροι είναι μηδενικοί.

Το πρόβλημα περιπλέκεται ελαφρώς αν ο αριθμός των κομβικών παραμέτρων είναι μεγαλύτερος του 1. Έτσι για παράδειγμα στον κόμβο  $j$  υπάρχουν οι μετατοπίσεις  $u_j, v_j$  οπότε και οι δυνάμεις θα είναι  $R_{xj}, R_{yj}$  θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η δύναμη  $R_{xj}$  προκαλείται από τις μετατοπίσεις  $u_j, v_j$  που πολλαπλασιάζουν τα στοιχεία της  $(2j-1)$  γραμμής του

μητρώου ακαμψίας κοκ. Στο παράδειγμα που ακολουθεί αποφύγαμε, για λόγους ευκολότερης κατανόησης αυτή την περιπλοκή παίρνοντας τις μετατοπίσεις  $u_j, v_j$ , με τη μορφή ενός διανύσματος  $q_j$  οπότε και τα στοιχεία  $K_{ij}$  του μητρώου ακαμψίας είναι μητρώα  $(2 \times 2)$ .

### Παράδειγμα 1.2

Υπολογίζουμε τις τάσεις των ράβδων του δικτυώματος του Σχ. 3.8 που έχουν κοινό μέτρο ελαστικότητας  $E$  και κοινό εμβαδό διατομής  $A$ . Από την Εξ. (3.22) προκύπτουν τα μητρώα ακαμψίας των ράβδων 1,2,3,4,5 αφού τα συνημίτονα κατεύθυνσης της κάθε ράβδου είναι:



Εικόνα 24: Παράδειγμα 1.2.

Ράβδος (1):  $(l, m) = (1, 0)$

Ράβδος (2):  $(l, m) = (0, 1)$

Ράβδος (3):  $(l, m) = (-1, 0)$

Ράβδος (4):  $(l, m) = (0, -1)$

Ράβδος (5):  $(l, m) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$

Ράβδος (6):  $(l, m) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$

$$k^1 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k^2 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$$



$$k^3 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k^4 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$$

$$k^5 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} \\ -\frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} \\ -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} \\ \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix}, \quad k^6 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} \\ \frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} \\ -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} \\ -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix}$$

Επομένως η σχέση που συνδέει τις μετατοπίσεις των κόμβων με τα επικόμβια εξωτερικά φορτία και τις αντιδράσεις  $R_{1x}$ ,  $R_{4x}$ ,  $R_{4y}$  στους κόμβους 1, 4 είναι:

$$\begin{Bmatrix} R_{1x} \\ 0 \\ 0 \\ -P \\ 0 \\ 0 \\ R_{4x} \\ R_{4y} \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -1 & 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & 0 & 0 \\ \frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & 0 & -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & -\sqrt{3} \\ -1 & 0 & 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & 0 & 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} \\ 0 & 0 & -\frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & -\sqrt{3} & \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} \\ -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & 0 & 0 & 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -1 & 0 \\ -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & -\sqrt{3} & \frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -1 & 0 & 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} \\ 0 & -\sqrt{3} & \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & 0 & -\frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_3 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Η λύση του συστήματος δίνει:

$$u_1 = -0.12847 \frac{PL}{EA}, \quad u_2 = -0.26340 \frac{PL}{EA}, \quad u_3 = -1.15864 \frac{PL}{EA},$$

$$u_3 = 0.38541 \frac{PL}{EA}, \quad u_3 = -1.82379 \frac{PL}{EA}$$

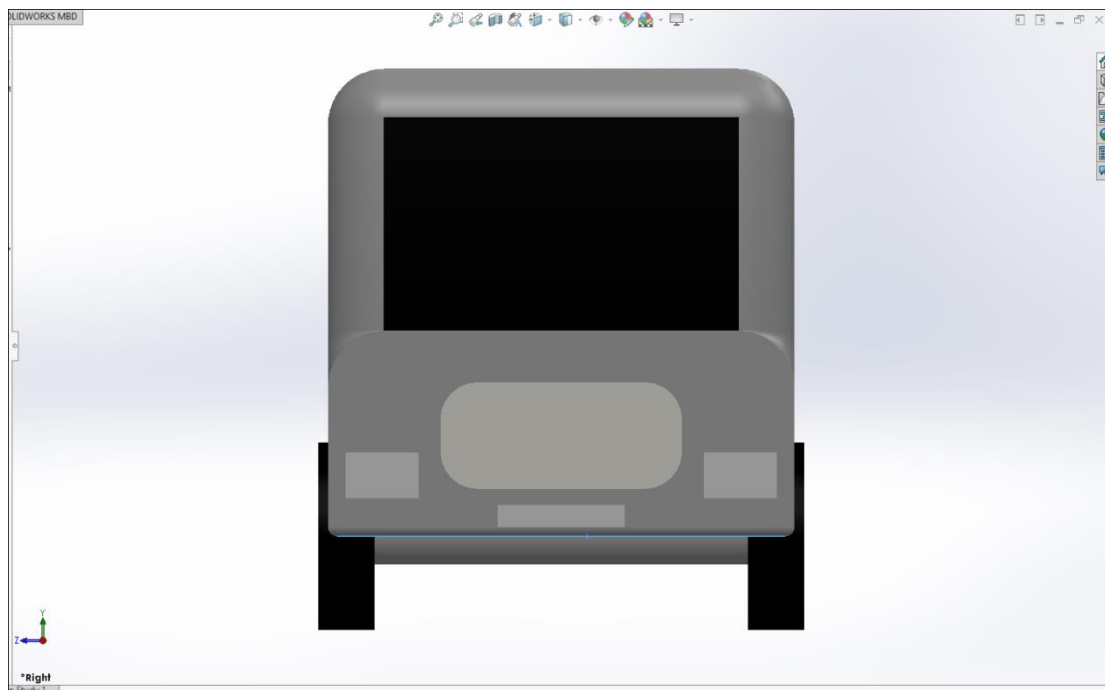
Οπότε η ισορροπία μας δίνει τις αντιδράσεις στους κόμβους 1, 4

$$R_{4x} = P \quad , \quad F_{4y} = -P\sqrt{3} \quad , \quad F_{1x} = P\sqrt{3}$$

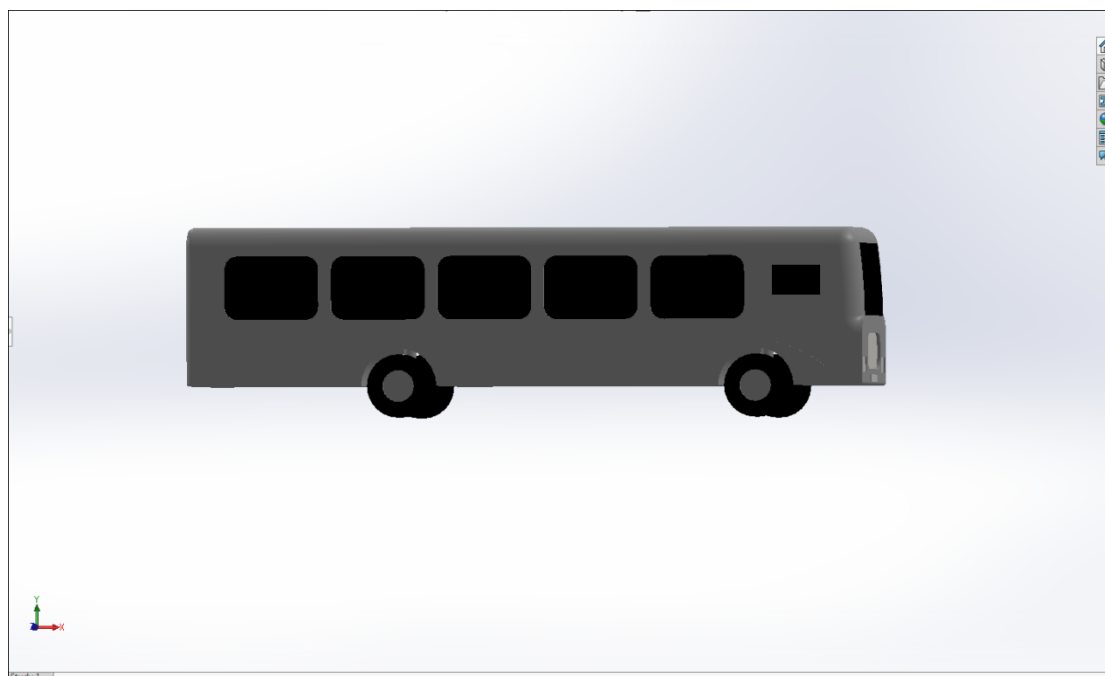
Τέλος, αντικαθιστώντας τις μετατοπίσεις στις Εξ. (4.17) και Εξ. (4.15) προσδιορίζουμε τις τάσεις των ράβδων.

## Κεφάλαιο 5 Παρουσίαση μοντέλου

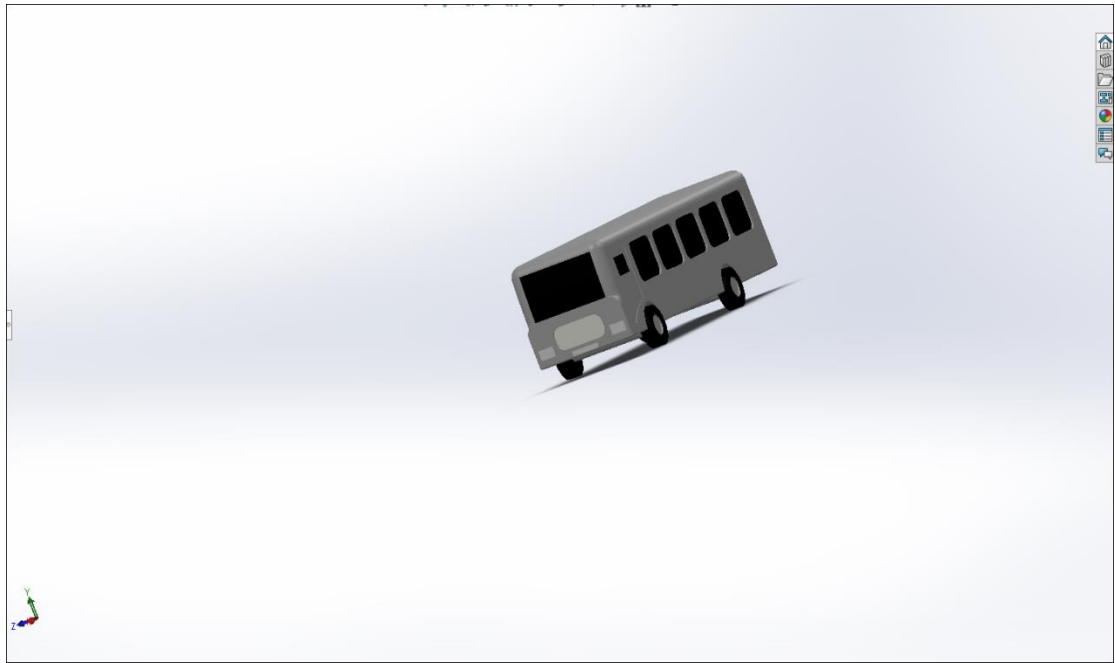
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση του μοντέλου όπως αυτό σχεδιάστηκε στο λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 25: Πρόσοψη Λεωφορείου



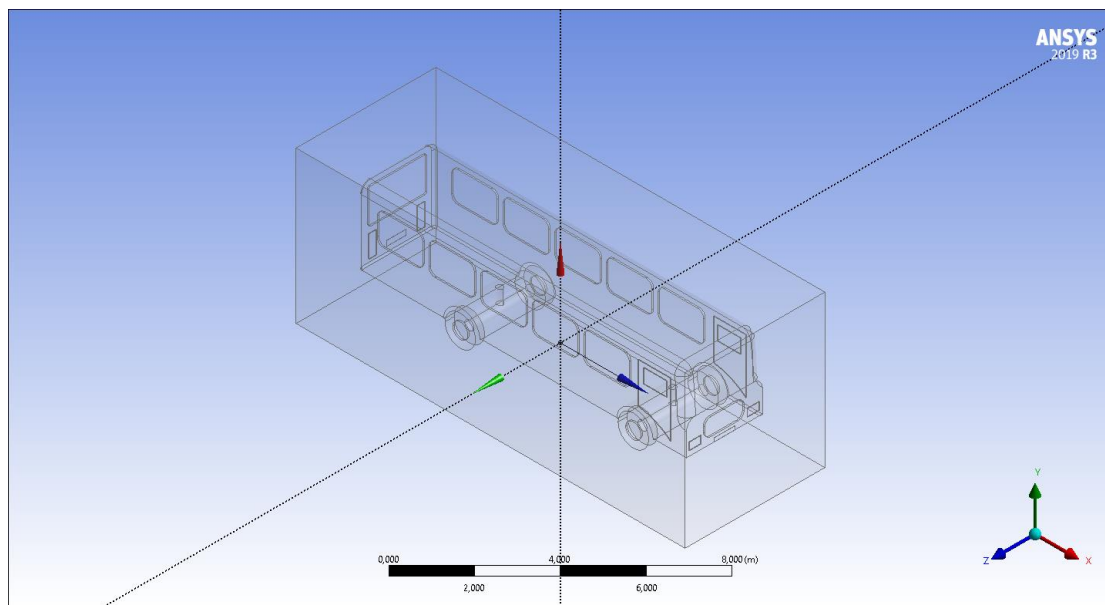
Εικόνα 26: Πλάγια όψη Λεωφορείου



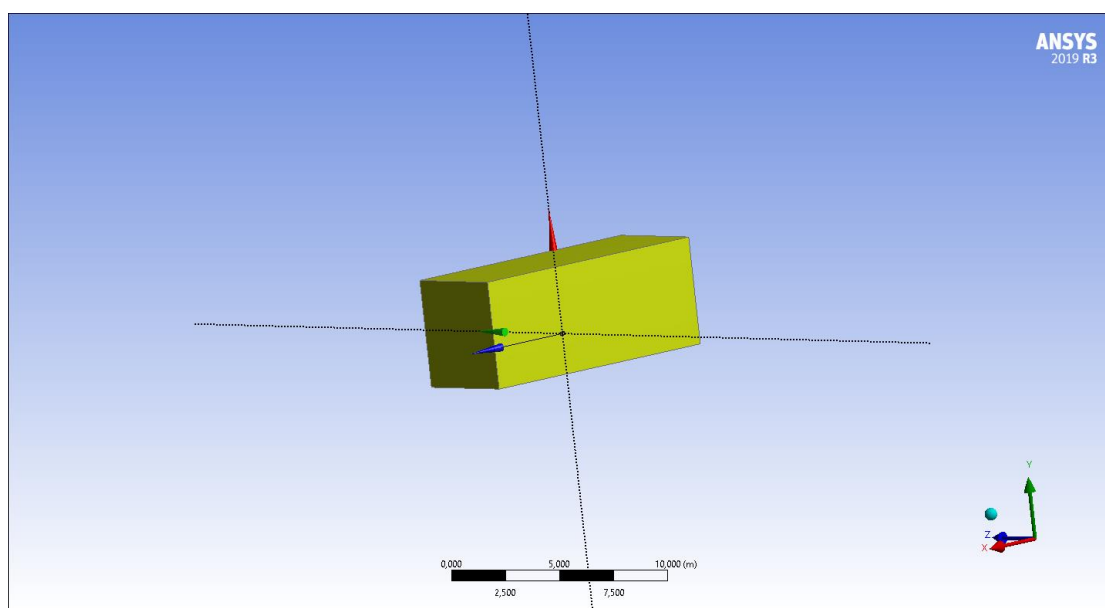
Εικόνα 27: Λεωφορείο

## Κεφάλαιο 6 Αριθμητικά αποτελέσματα Προσομοίωσης

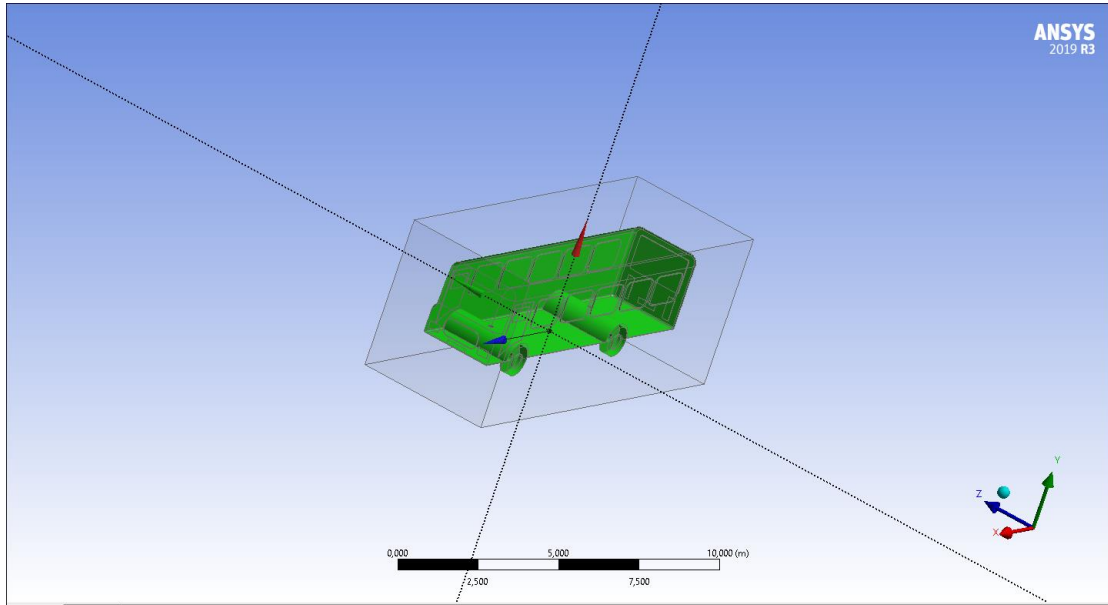
### 6.1 Εισαγωγή Μοντέλου στο Ansys



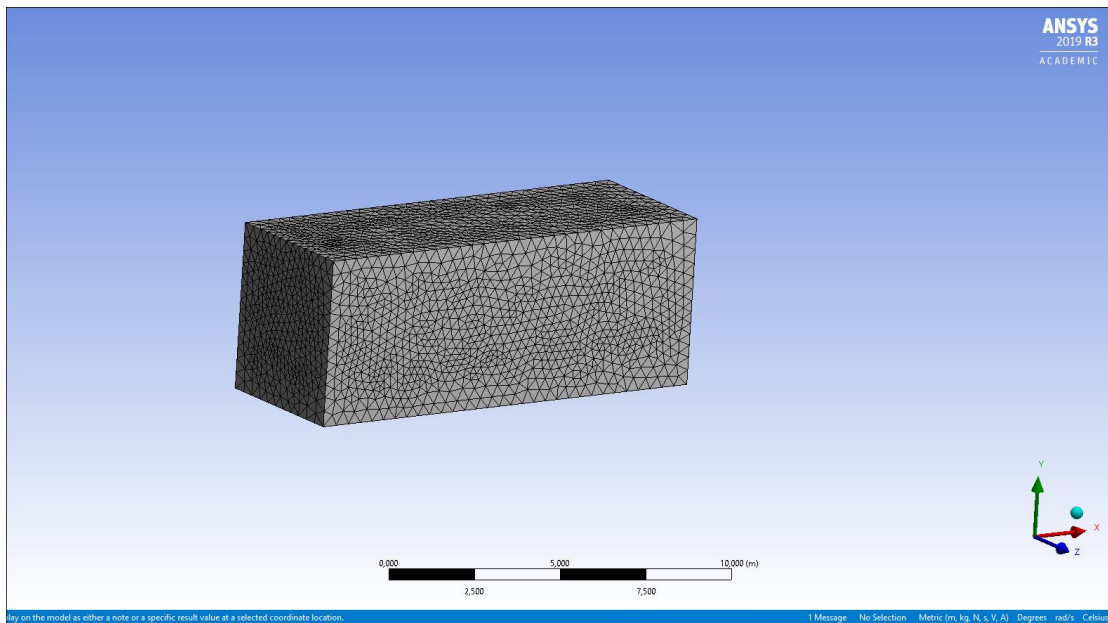
Εικόνα 28: Εισαγωγή Γεωμετρίας



Εικόνα 29: Δημιουργία Enclosure



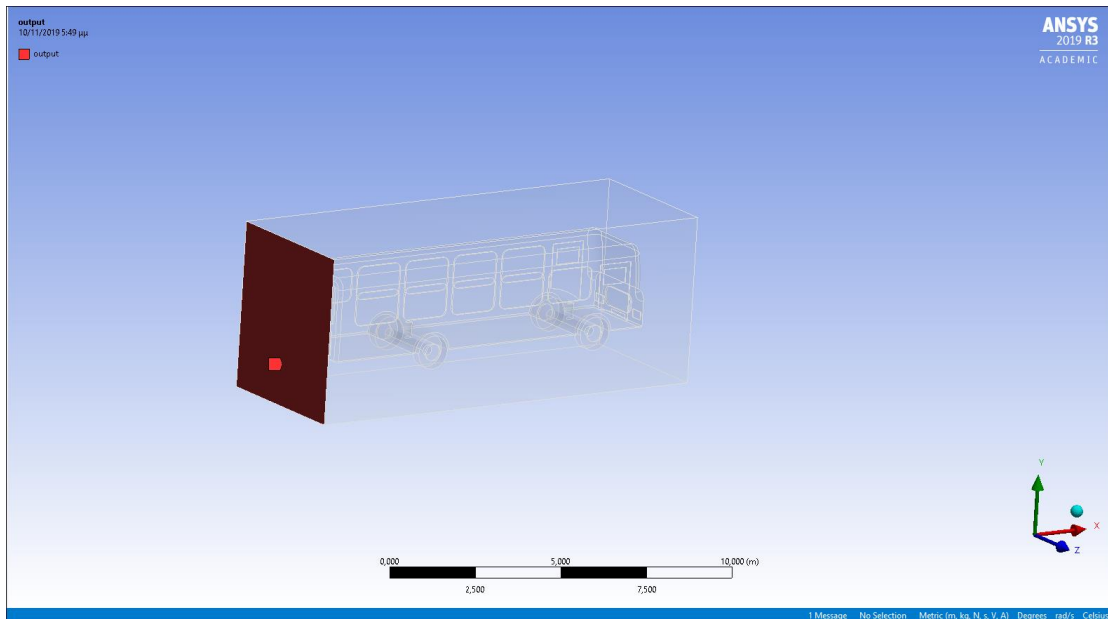
Εικόνα 30: Μοντέλο μέσα στο Enclosure



Εικόνα 31: Διακριτοποίηση Μοντέλου

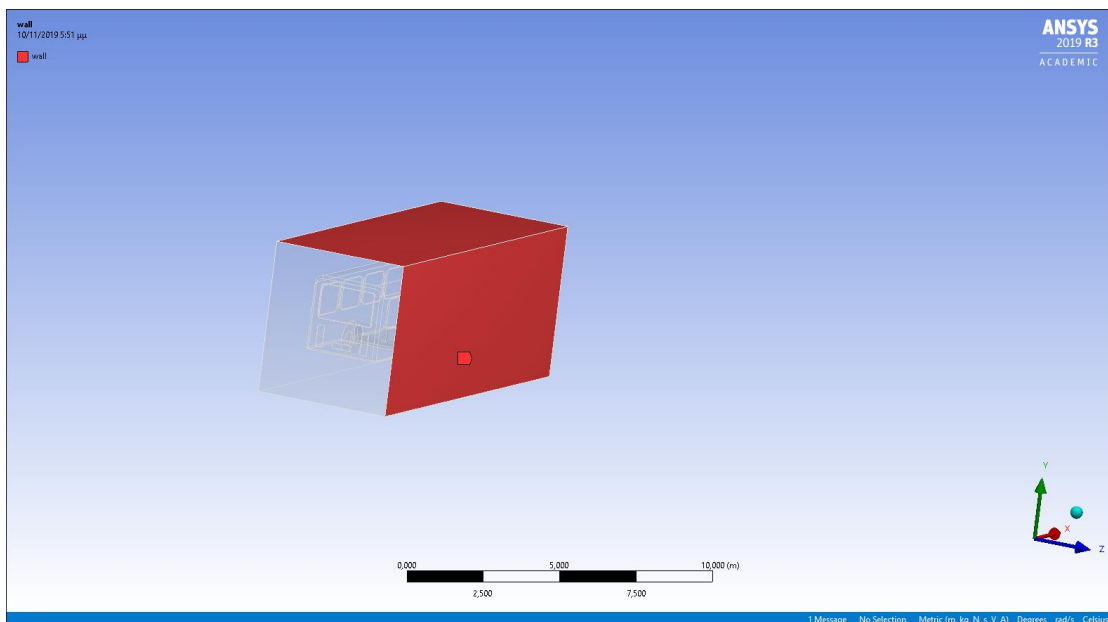
Στην εικόνα 31 βλέπουμε την διακριτοποίηση του πλέγματος με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία.





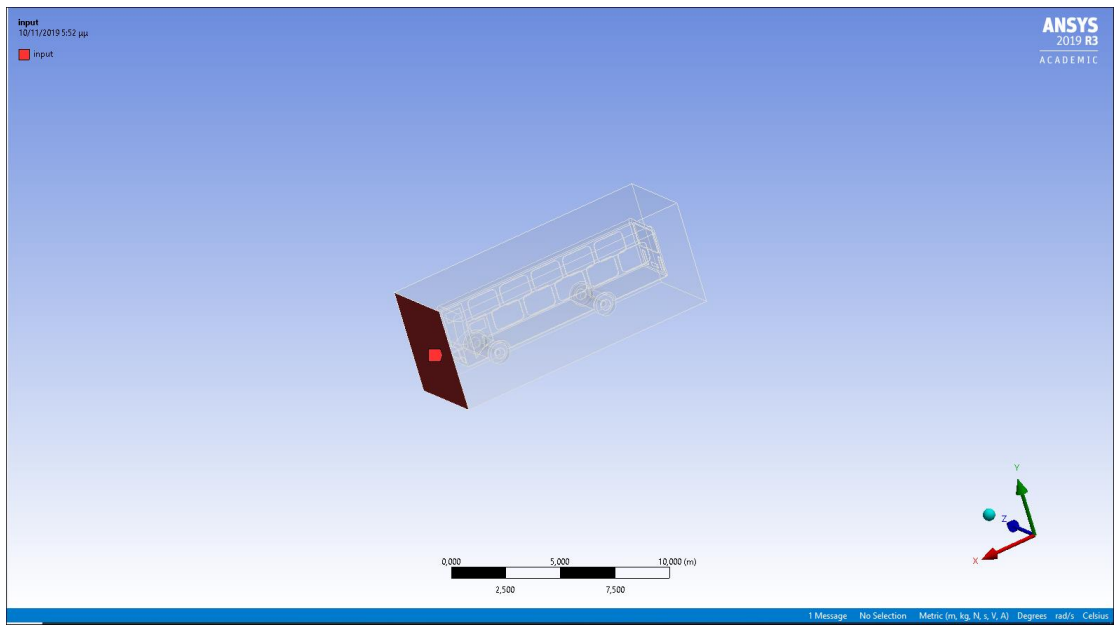
Εικόνα 32: Οριζοντια ποιες θα είναι εισοδοι-εξοδοι –wall

Στην εικόνα 32 βλέπουμε ποια θα είναι η εισοδος ώστε να το εισάγουμε μετά ως inlet.



Εικόνα 33: Wall

Στην εικόνα 33 βλέπουμε τις γύρω γύρω επιφάνειες όπου τις έχουμε ορίσει ως wall.

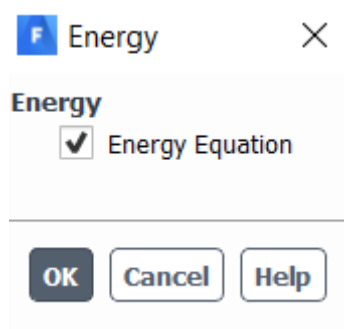


Εικόνα 34: Ορισμός input

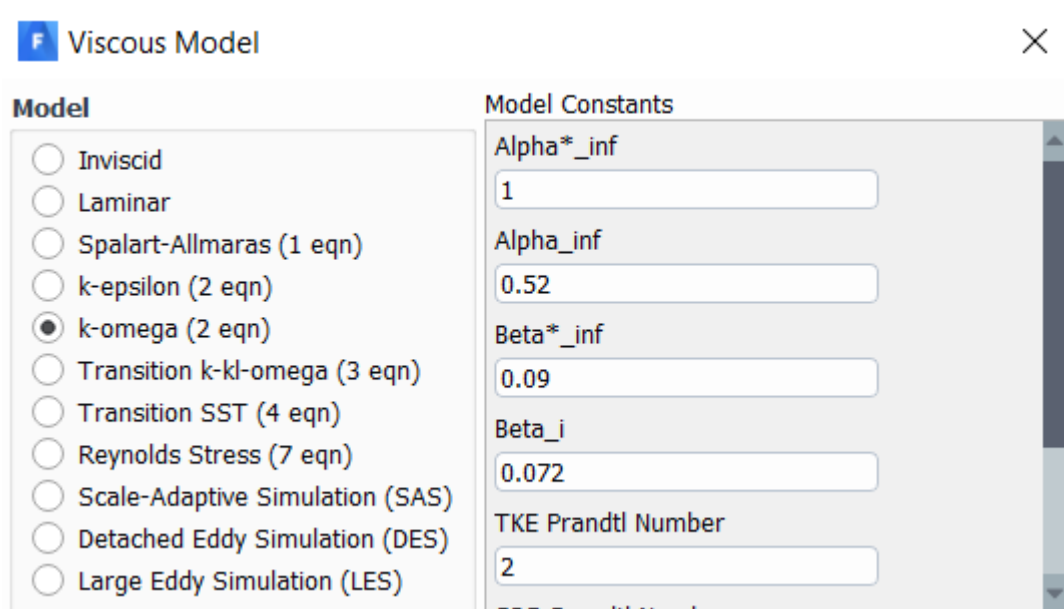
## 6.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στην ανάλυση που παρουσιάζεται παρακάτω και η οποία βασίζεται στο Fluent του Ansys , θεωρήθηκε ότι το λεωφορείο τρέχει με 80km/h που είναι μια συνηθισμένη ταχύτητα για το όχημα αυτό. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση αυτή παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

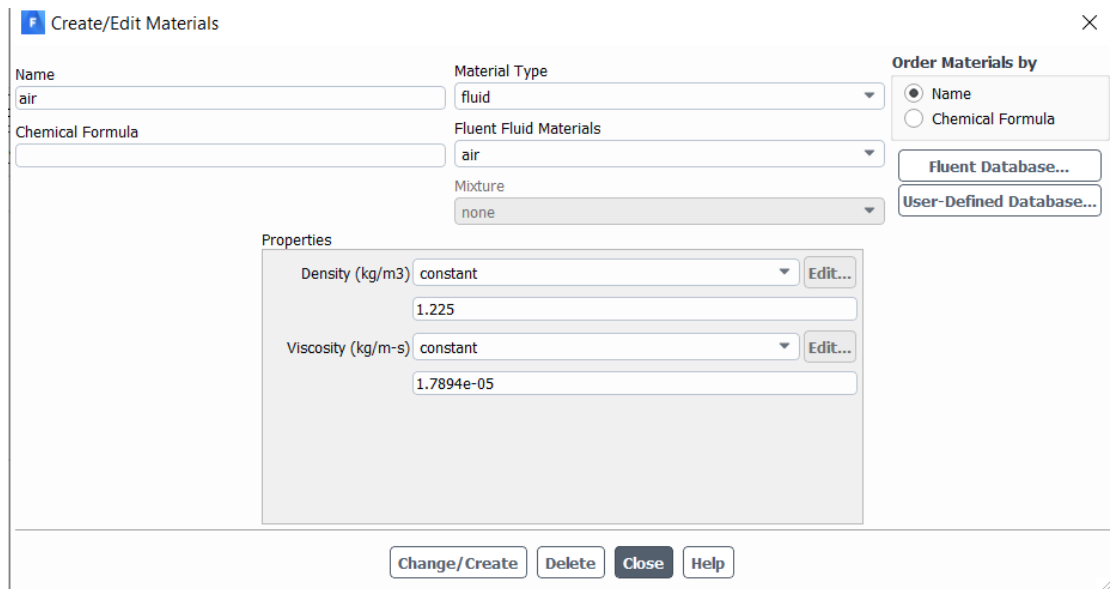
Οι φυσικές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο είναι:



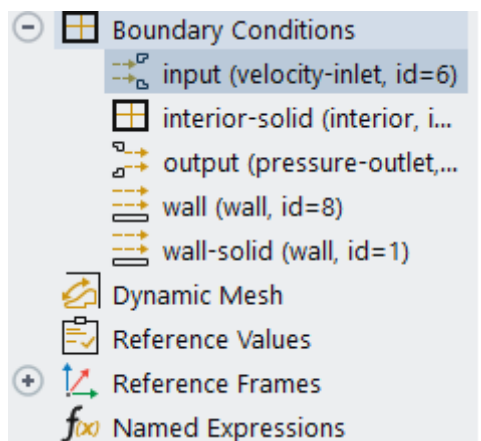
Το viscous Model που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σαν μέσο ροής γύρω από το λεωφορείο χρησιμοποιήθηκε ο αέρας με τις παρακάτω ιδιότητες.



Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο είναι:



**Velocity Inlet** ✕

Zone Name  
input

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary ▾

Reference Frame Absolute ▾

Velocity Magnitude (m/s) 22 ▾

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0 ▾

**OK** Cancel Help

**Pressure Outlet** ✕

Zone Name  
output

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Backflow Reference Frame Absolute ▾

Gauge Pressure (pascal) 0 ▾

Pressure Profile Multiplier 1 ▾

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary ▾

Backflow Pressure Specification Total Pressure ▾

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

**OK** Cancel Help

**General** ?

**Mesh**

Scale... Check Report Quality

Display... Units...

**Solver**

**Type**

Pressure-Based  
 Density-Based

**Velocity Formulation**

Absolute  
 Relative

**Time**

Steady  
 Transient

Wall ×

Zone Name

Adjacent Cell Zone

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential Structure

**Wall Motion**

Stationary Wall  
 Moving Wall

**Motion**

Relative to Adjacent Cell Zone

**Shear Condition**

No Slip  
 Specified Shear  
 Specularity Coefficient  
 Marangoni Stress

**Wall Roughness**

Roughness Height (m)  ▾

Roughness Constant  ▾

OK Cancel Help



**Wall** ×

Zone Name

Adjacent Cell Zone

**Wall Motion**      **Motion**

Stationary Wall       Relative to Adjacent Cell Zone  
 Moving Wall

**Shear Condition**

No Slip  
 Specified Shear  
 Specularity Coefficient  
 Marangoni Stress

**Wall Roughness**

Roughness Height (m)  ▼

Roughness Constant  ▼

**Reference Values** ?

Compute from

**Reference Values**

Area (m2)	<input type="text" value="1"/>
Density (kg/m3)	<input type="text" value="1.225"/>
Enthalpy (j/kg)	<input type="text" value="0"/>
Length (m)	<input type="text" value="1"/>
Pressure (pascal)	<input type="text" value="0"/>
Temperature (k)	<input type="text" value="288.16"/>
Velocity (m/s)	<input type="text" value="1"/>
Viscosity (kg/m-s)	<input type="text" value="1.7894e-05"/>
Ratio of Specific Heats	<input type="text" value="1.4"/>

**Operating Conditions**

**Pressure**

Operating Pressure (pascal)

**Reference Pressure Location**

X (m)

Y (m)

Z (m)

**OK** **Cancel** **Help**

**Mesh Display** ×

**Options**

Nodes  
 Edges  
 Faces  
 Partitions  
 Overset

**Edge Type**

All  
 Feature  
 Outline

Shrink Factor  Feature Angle

**Outline** **Interior**

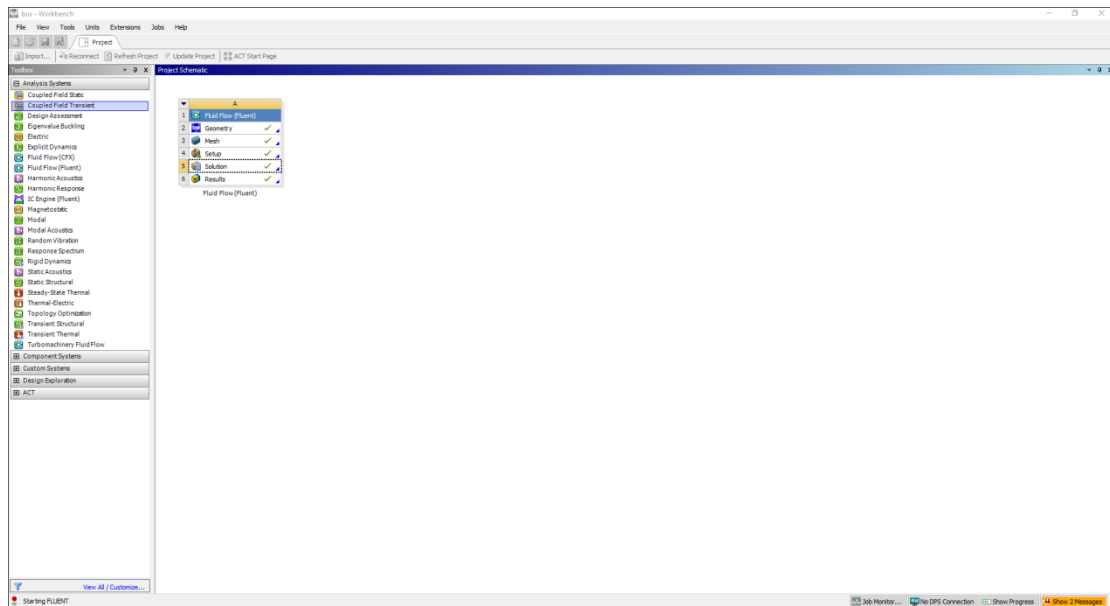
**Adjacency...**

Surfaces

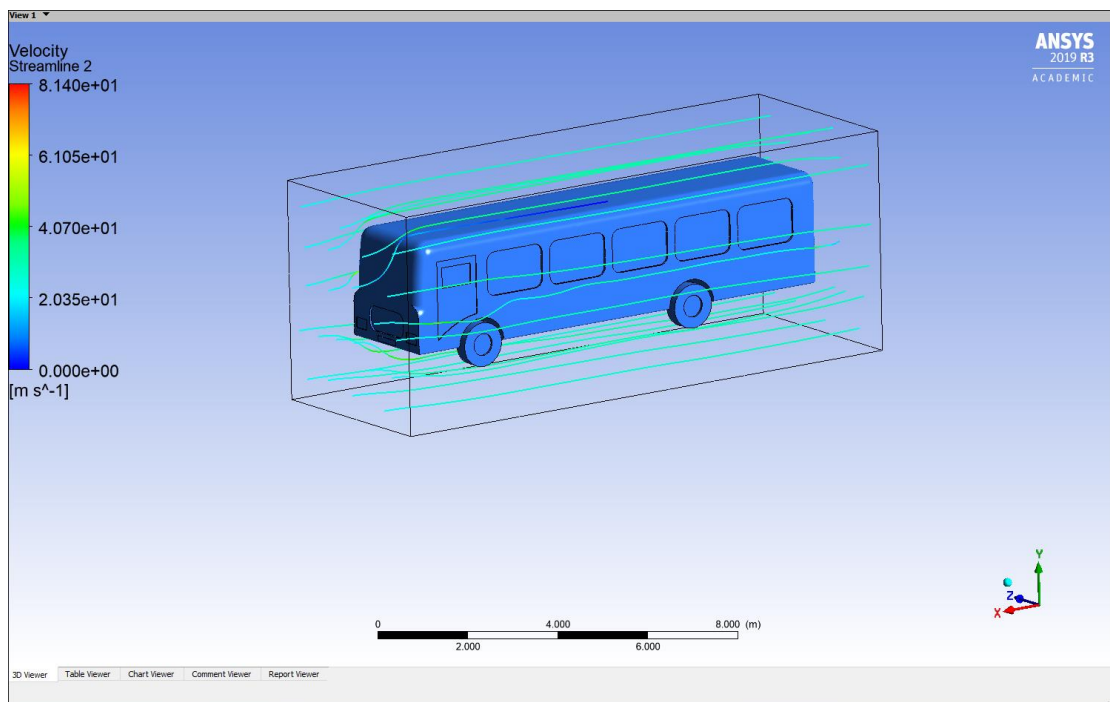
input  
interior-solid  
output  
wall  
wall-solid

**New Surface** ▾

**Display** **Colors...** **Close** **Help**

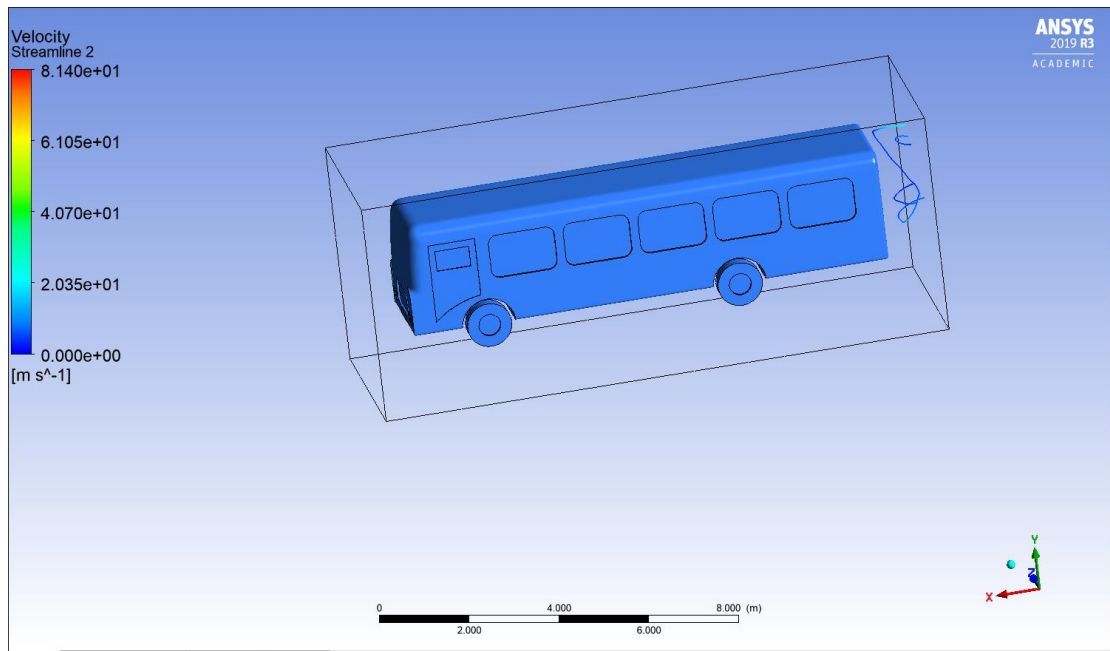


Εικόνα 35: Επίλυση επεξεύχθη



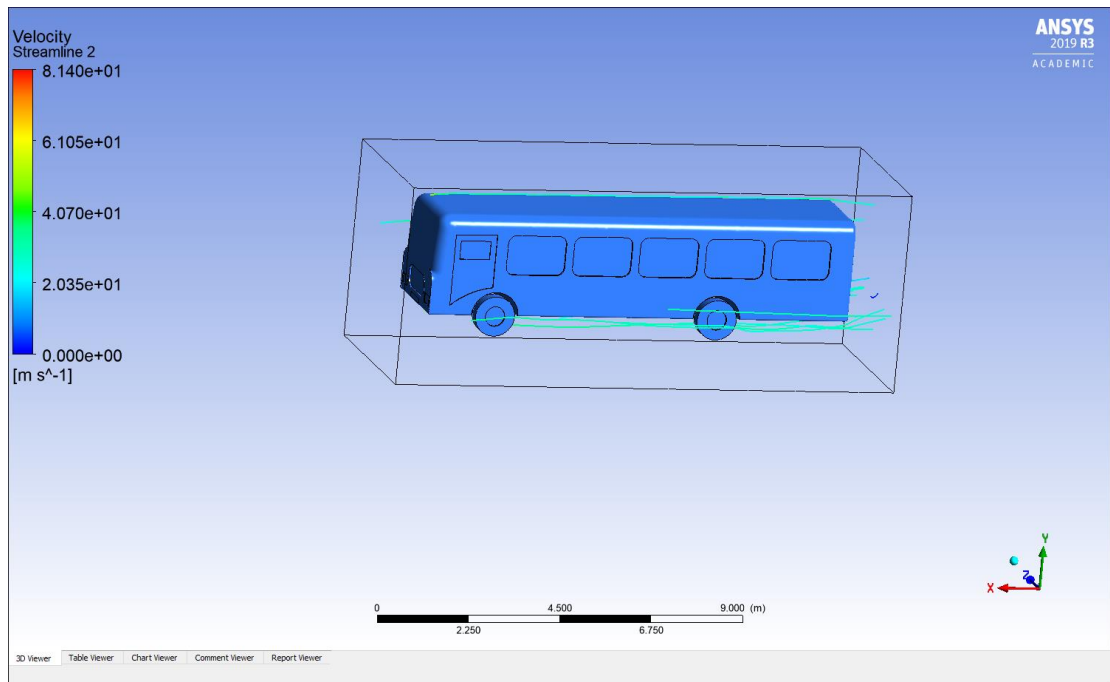
Εικόνα 36: Ταχύτητα που αναπτύσσεται γύρω από το λεωφορείο

Στην εικόνα 36 βλέπουμε ότι οι ροή γύρω από το λεωφορείο αναπτύσσεται σχεδόν ομοιόμορφα και οι ταχύτητες της ροής είναι σχεδόν ίδιες παντού με μικρές διαφορές.



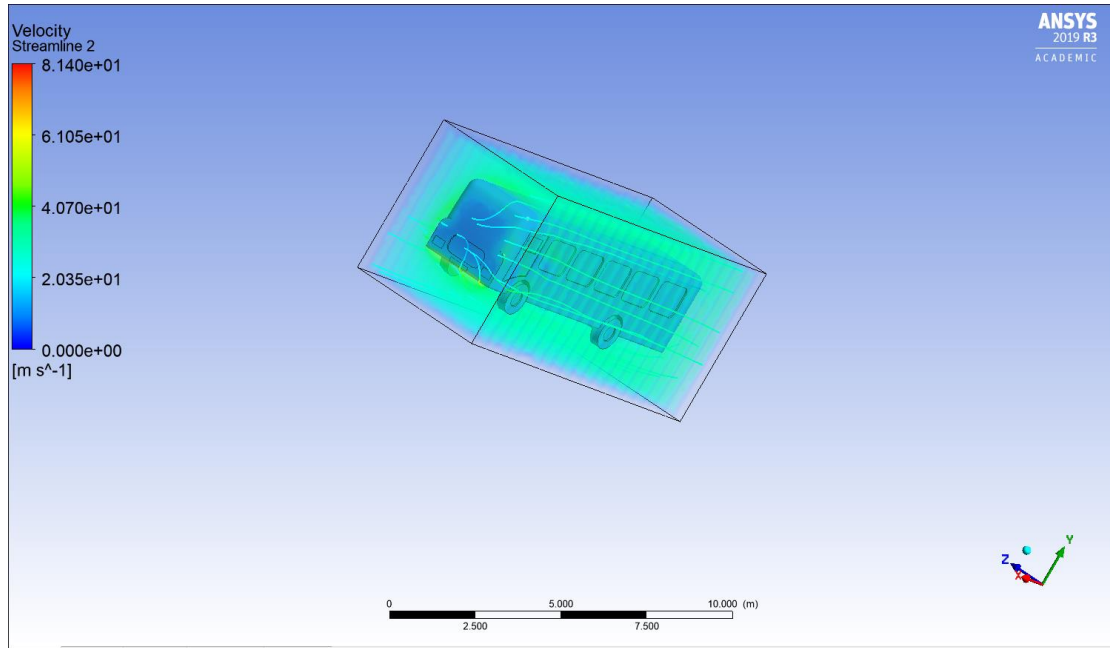
Εικόνα 37: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου

Στην εικόνα 37 βλέπουμε ότι οι ροή στο πίσω μέρος του λεωφορείου είναι σχετικά μικρή και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναπτύσσονται και μικρότερες δυνάμεις πάνω στο λεωφορείο.

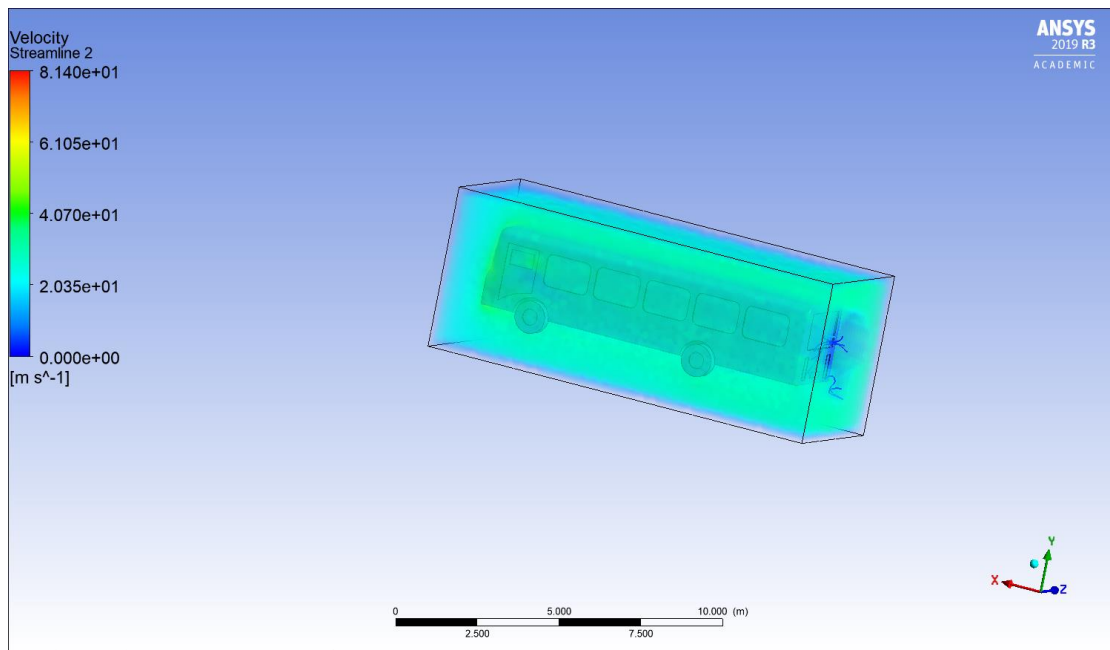


Εικόνα 38: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου

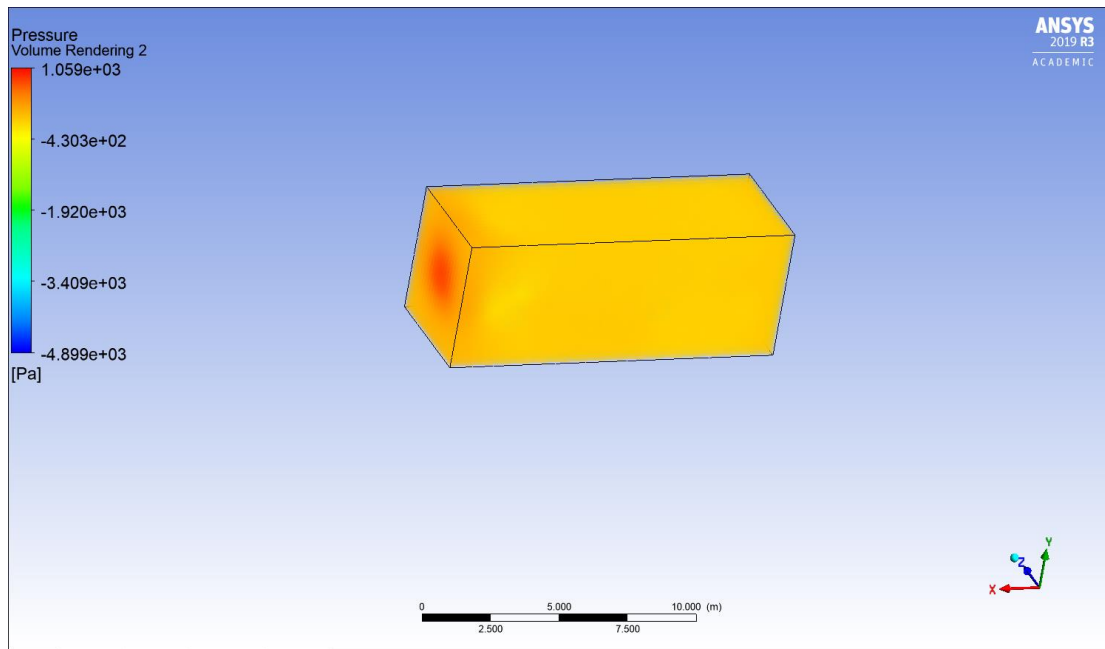
Στην εικόνα 38 βλέπουμε ότι η ροή γύρω από τις πλευρές του λεωφορείου αναπτύσσεται σχεδόν ομοιόμορφα και οι ταχύτητες της ροής είναι σχεδόν ίδιες παντού με μικρές διαφορές.



Εικόνα 39: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην είσοδο του λεωφορείου

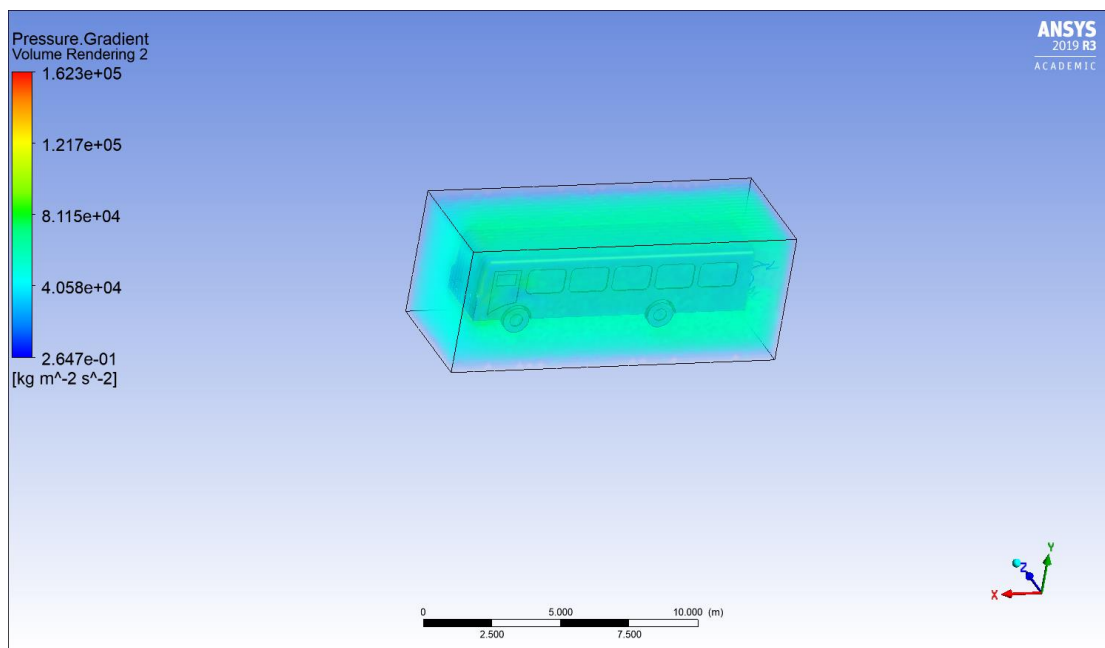


Εικόνα 40: Ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου



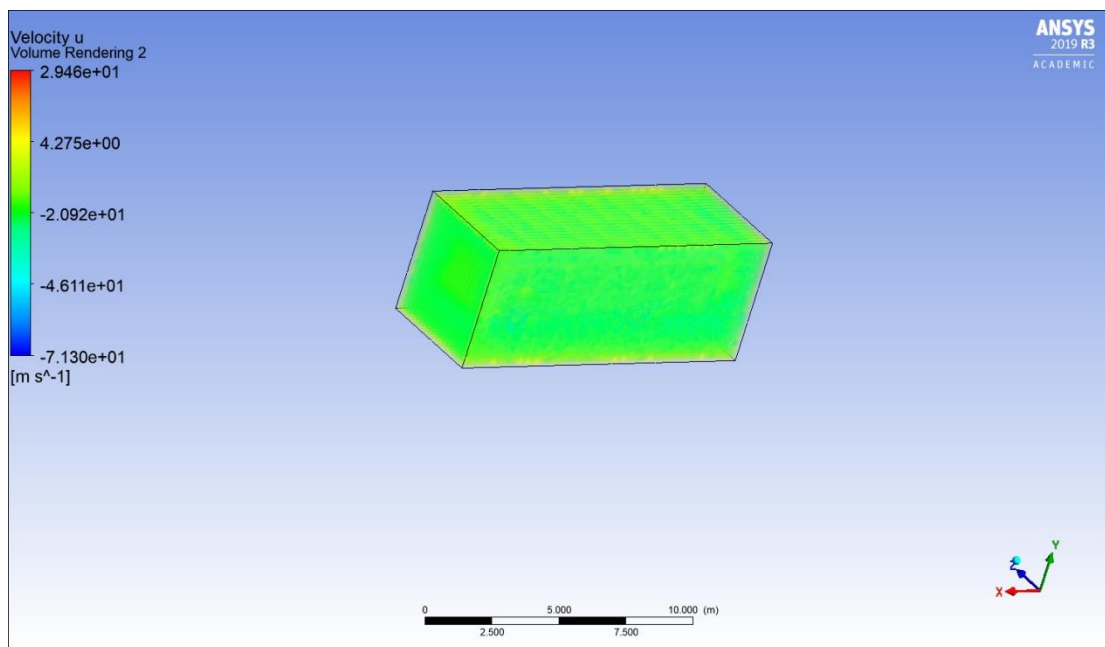
Εικόνα 41: Πίεση που αναπτύσσεται στην έξοδο του λεωφορείου

Στην εικόνα 41 παρατηρούμε ότι η μέγιστη πίεση παρατηρείται ακριβώς στην πρόσοψη του λεωφορείου και αυτό είναι αναμενόμενο καθώς εκεί είναι το σημείο ανακοπής.



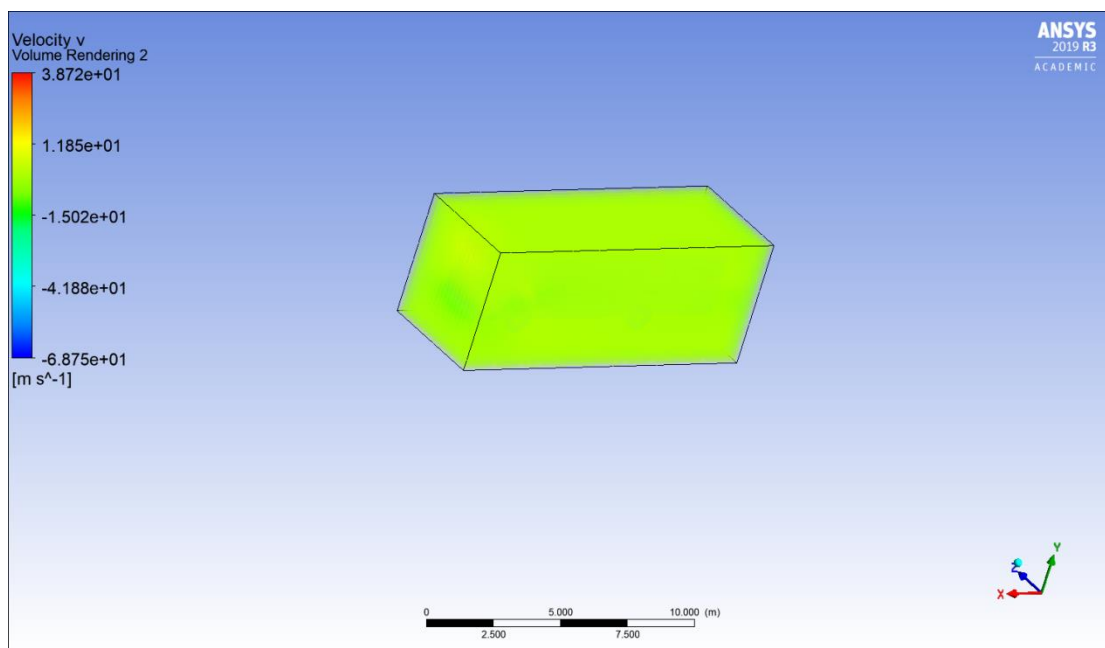
Εικόνα 42: Pressure Gradient

Στην εικόνα 42 παρατηρούμε ότι η βάρθρωση της πίεσης είναι μοιρασμένη σχεδόν κατά ομοιόμορφο τρόπο γύρω από το λεωφορείο και αυτό είναι επιθυμητό για να μην έχουμε μεγάλες διαφορές πίεσης γύρω του και ίσως και προβλήματα αστάθειας στις μεγάλες στροφές.



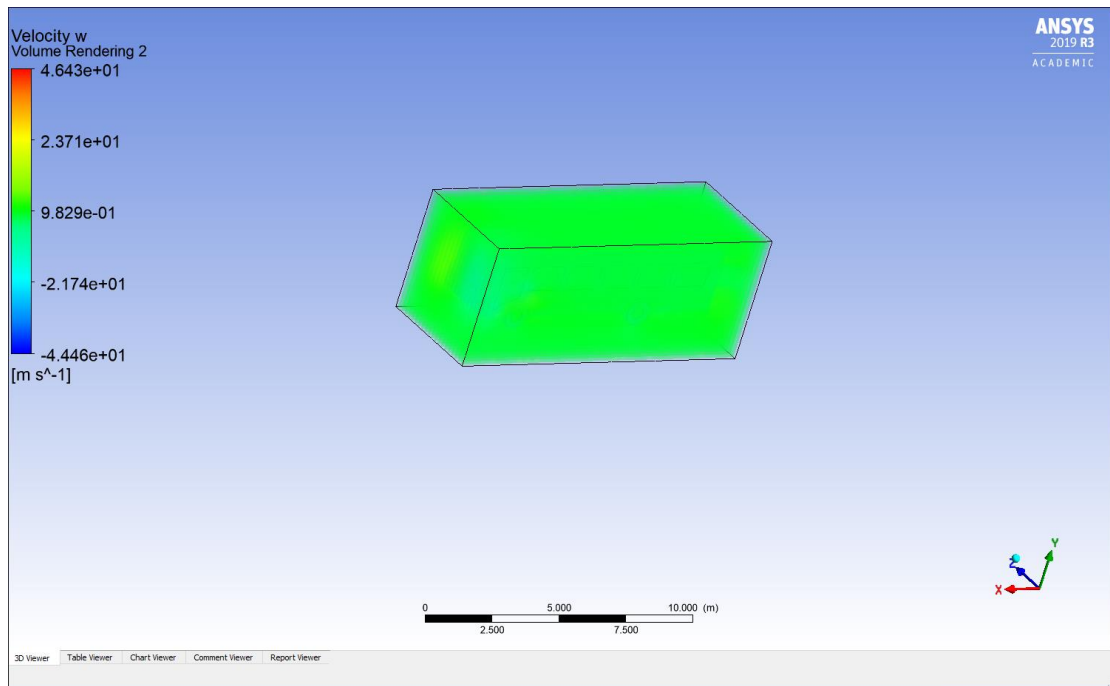
Εικόνα 43: Ταχύτητα u

Οι εικόνες 43 ,44 και 45 μας δείχνουν ότι οι καταμόνη ταχύτητας γύρω από το λεωφορείο είναι ομοιόμορφη και στις τρεις κατευθύνσεις.

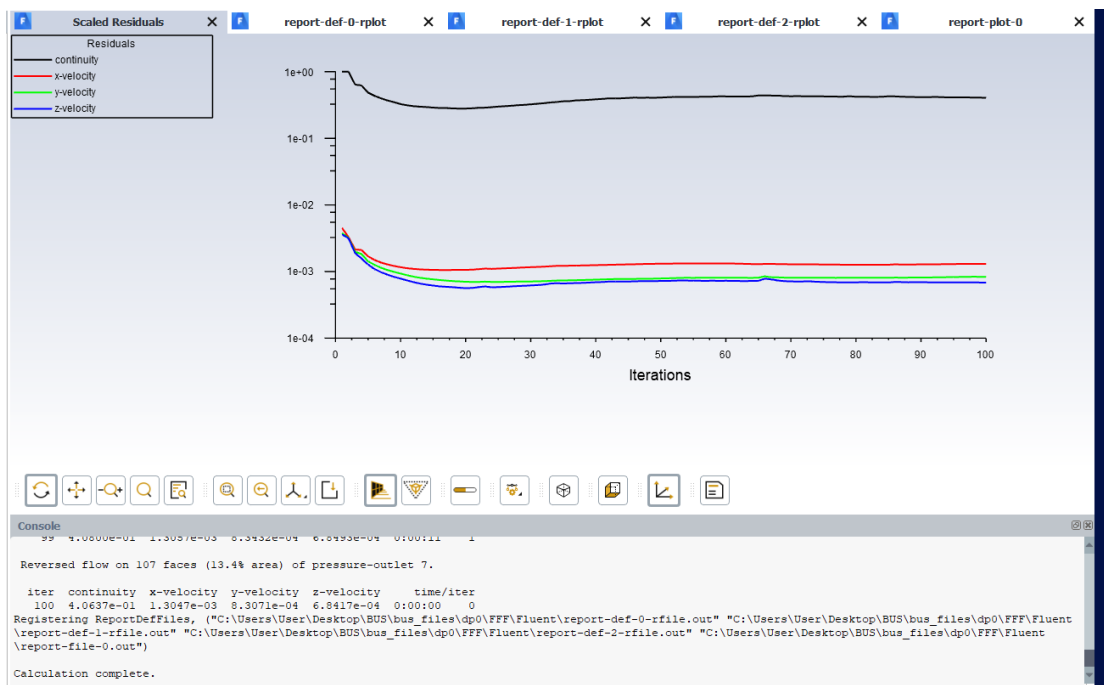


Εικόνα 44: Ταχύτητα



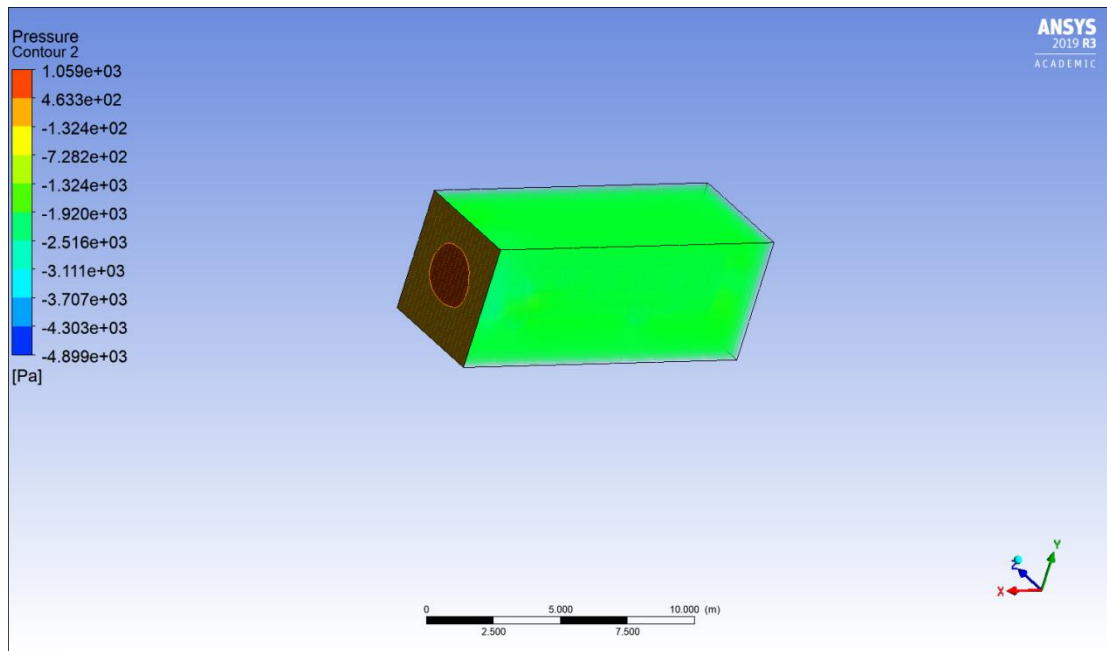


Εικόνα 45: Ταχύτητα  $w$



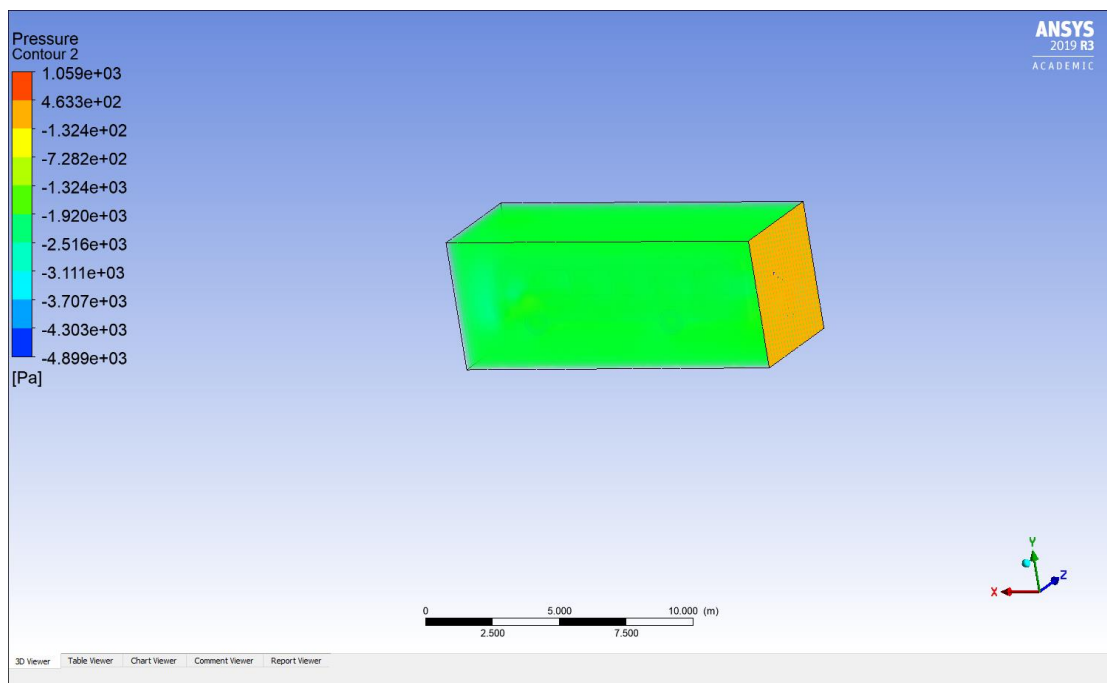
Εικόνα 46: Ολοκλήρωση λύσης

Στην εικόνα 46 βλέπουμε ότι η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρειάστηκε 100 βήματα για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

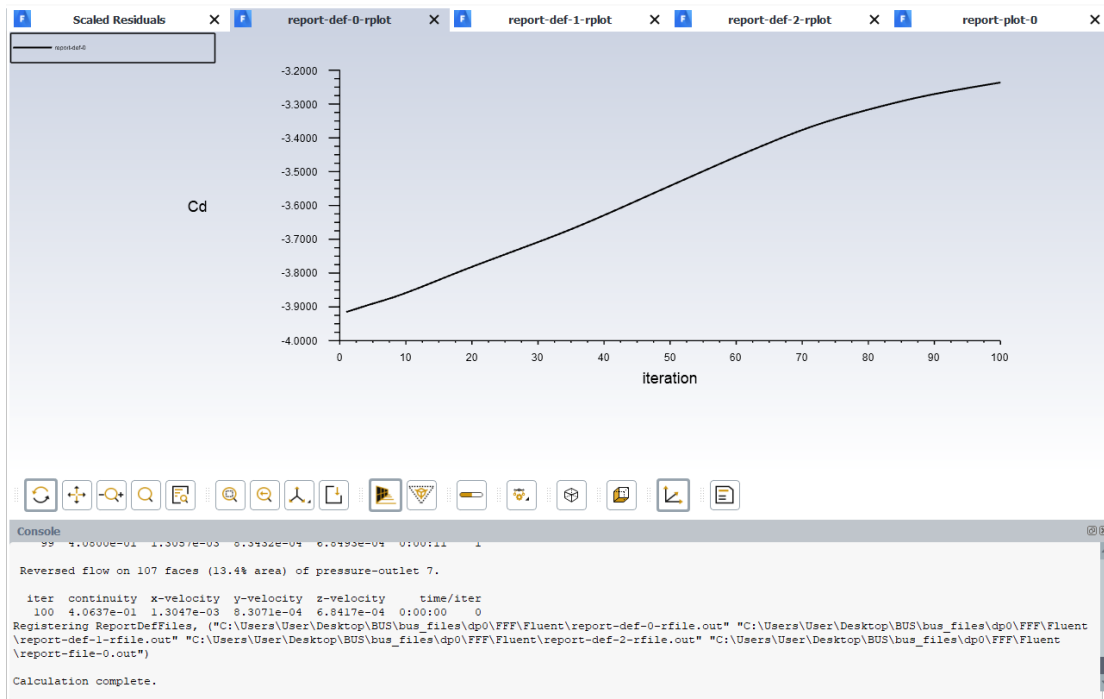


Εικόνα 47: Ανάπτυξη πίεσης στην είσοδο

Στην εικόνα 47 παρατηρούμε ότι και στην εικόνα 41 ότι η μέγιστη πίεση παρατηρείται ακριβώς στην πρόσοψη του λεωφορείου και αυτό είναι αναμενόμενο καθώς εκεί είναι το σημείο ανακοπής.



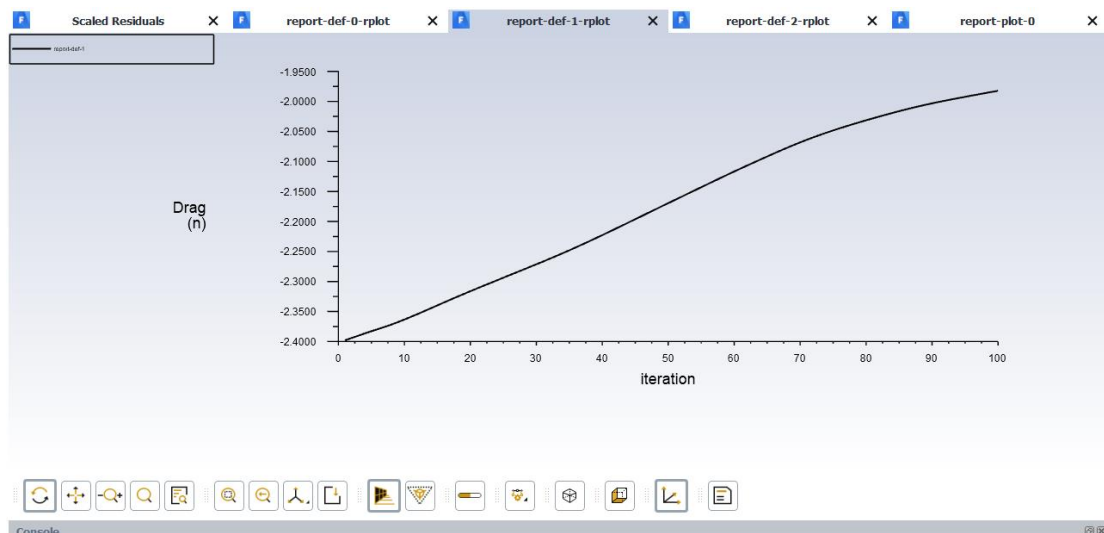
Εικόνα 48: Ανάπτυξη πίεσης στην έξοδο



Cd	( )
wall	-3.2363618

Εικόνα 49: Συντελεστής αντίστασης Cd

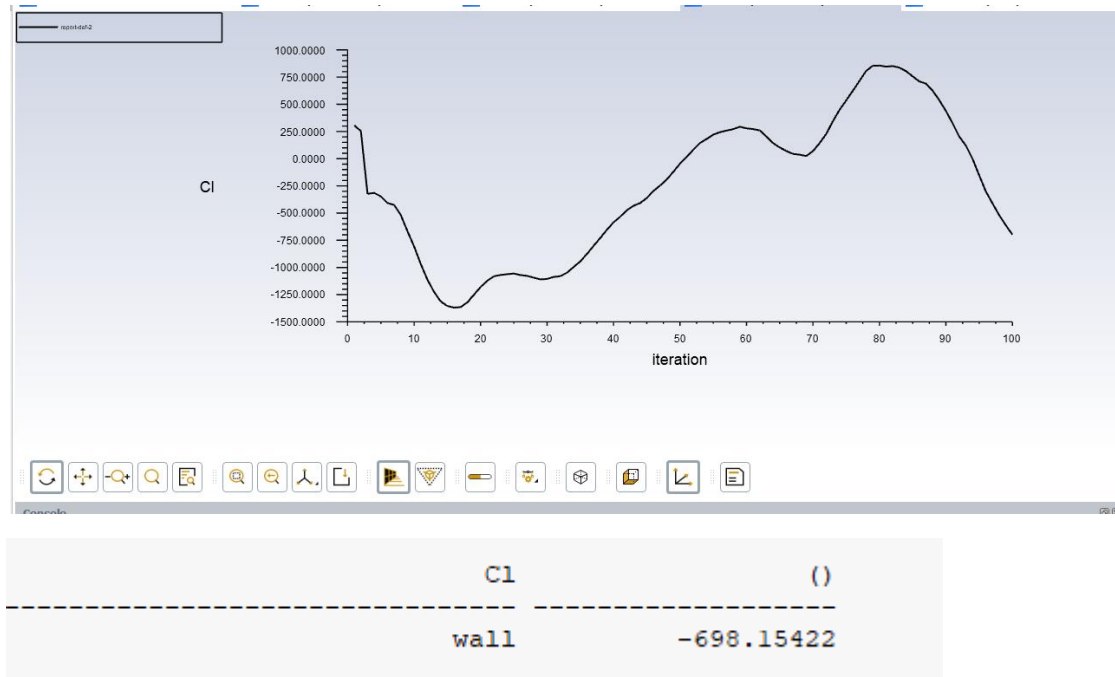
Στην εικόνα 49 Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής αντίστασης Cd είναι κατά μεγάλο διάστημα γραμμικός και μετά γίνεται καμπύλη. Η γραμμικότητα του μας βοηθάει στον να τον υπολογίζουμε εύκολα ενώ για τις μη γραμμικές περιοχές υπάρχουν ειδικά μοντέλα που βοηθούν στην επίλυση του.



Drag (n)	(n)
wall	-1.9822716

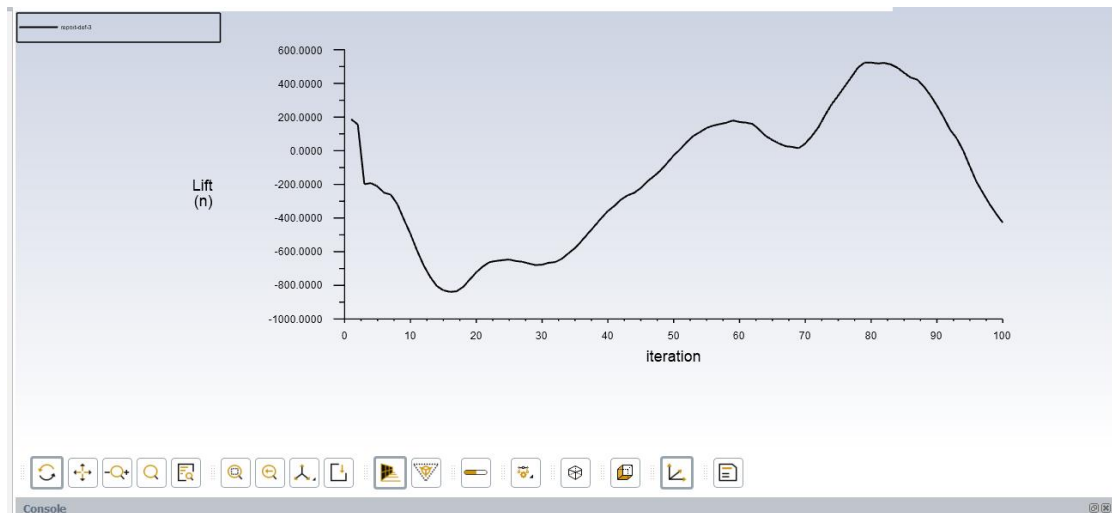
Στην εικόνα 50 Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής αντίστασης  $C_I$  είναι κατά μεγάλο διάστημα γραμμικός και μετά γίνεται καμπύλη. Η γραμμικότητα του μας βοηθάει στον να τον υπολογίζουμε εύκολα ενώ για τις μη γραμμικές περιοχές υπάρχουν ειδικά μοντέλα που βοηθούν στην επίλυση του.

Εικόνα 50: Drag Force



Εικόνα 51: Συντελεστή  $C_I$

Στην εικόνα 51 Παρατηρούμε ότι η δύναμη drag force που είναι η δύναμη της οπισθέλκουσας έχει μεγάλες αυξομειώσεις. Αυτό κάνει πολύ εύκολο το έργο των μηχανικών όταν εκτελούν μελέτες αεροδυναμικής συμπεριφοράς οχημάτων και για το λόγο αυτό σε πιο μικρά οχήματα έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι όπως αεροδυναμικά σχήματα στα οχήματα με όσον το δυνατόν περισσότερες καμπύλες ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο αυτός ο συντελεστής και να γίνει πιο αποδοτικό το όχημα.



Lift	(n)
wall	-427.61946

Εικόνα 52: Δύναμη Lift

Στην εικόνα 52 Παρατηρούμε ότι η δύναμη ανύψωσης που είναι η δύναμη της έχει μεγάλες αυξομειώσεις. Αυτό μας ενδιαφέρει σε οχήματα που πετάνε κυρίως αεροπλάνα, εδώ δίνεται για πληρότητά της εργασίας.

## Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη ανάλυση ο σπουδαστής είχε την δυνατότητα να έρθει σε επαφή και να προβληματιστεί σε πολλά και σύνθετα θέματα της μηχανικής ρευστών και πώς εισάγονται κάποιοι βασικοί νόμοι αυτής στην προσομοίωση μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων όπως το Ansys Fluent.

- ✓ Μέσω της ανάλυση αυτής σε περαιτέρω στάδιο που ξεφεύγει από τα όρια της πτυχιακής αυτής μπορεί με τα δεδομένα που εξήγαμε να υπολογιστούν δυνάμεις φυγόκεντρες κλπ.
- ✓ Με βάση τέτοιους είδους αναλύσεις μπορεί να γίνει καλύτερη σχεδίαση στο βασικό πλαίσιο του λεωφορείου στην αρχή του σχεδιασμού του , με σκοπό τις καλύτερες επιδόσεις του λεωφορείου και λιγότερη κατανάλωση άρα και λιγότερη ρύποι στην ατμόσφαιρα.
- ✓ Με βάση αναλύσεις σαν αυτές προκύπτουν και οι καμπύλες που θα έχει το μοντέλο που θα σχεδιαστεί ώστε να έχει καλύτερη συμπεριφορά οδήγησης στο δρόμο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Chisholm, Hugh, ed. (1911). "Omnibus" . *Encyclopedia Britannica*. **20** (11th ed.). Cambridge University Press. p. 104.
2. ^ "China's longest bus unveiled in Shanghai". *Jongo.com*. 15 March 2007. Archived from the original on 30 September 2011.
3. ^ Jump up to:<sup>a</sup> <sup>b</sup> Eckermann, Erik (2001), *World History of the Automobile*, SAE, pp. 67–68, ISBN 9780768008005, retrieved 6 October 2013
4. ^ Jump up to:<sup>a</sup> <sup>b</sup> Marchant, J.R.V.; Charles, Joseph F., eds. (1928). *Cassell's Latin Dictionary (Revised ed.)*. Missing or empty |title= (help)
5. ^ "La préhistoire des transports urbains" [The prehistory of urban transport] (in French). Chelles, Seine-et-Marne, France: TransportationMuseum.
6. ^ Fierro 1996, p. 1031.
7. ^ "Omnibus (n.)". *Online Etymology Dictionary*. Retrieved 30 March 2013.
8. ^ "Histoire générale des transports" (in French). French transportations Museum Website. Archived from the original on 18 July 2011. Retrieved 16 September 2010.
9. ^ "Centenary of the Omnibus". *The Times*. 28 April 1933. p. 16.
10. ^ Benson, Bruce L. "The Rise and Fall of Non-Government Roads in the United Kingdom". *Street Smart: Competition, Entrepreneurship and the Future of Roads*. pp. 263–264.
11. ^ Locomotives Act, 1861 Pratt's *Law of Highways* Edition 10, Shaw & Sons (1865) p. 388
12. ^ "Trolleybus history – current collector design".
13. ^ *Elektromote* Archived 29 July 2016 at the [Wayback Machine](#), Siemens History website. Retrieved 2011-08-28
14. ^ Charles S. Dunbar, *Buses, Trolleys and Trams*, (Paul Hamlyn Ltd, 1967, no ISBN) p. 81 et seq.
15. ^ Ward, Ian (1974), *The World of Automobiles: An Illustrated Encyclopedia of the Motor Car*, **15**, Orbis, p. 1773
16. ^ Jump up to:<sup>a</sup> <sup>b</sup> "1898: The world's first bus series launched by Daimler – a milestone for passenger transport – marsMediaSite".
17. ^ Robbins, G. J.; Atkinson, J. B. (1991). *The London B-Type Motor Omnibus (3rd ed.)*. Twickenham: World of Transport. ISBN 1-871979-04-8.
18. ^ "AEC Southall Enthusiast page". *Aecsouthall.co.uk*. Retrieved 19 April 2013.
19. ^ "he Bus We Loved book description, 12 September 2006". *Londonbooks.co.uk*. Archived from the original on 21 February 2014. Retrieved 6 October 2013.
20. ^ [Routemaster.org](#) homepage
21. ^ Gross, Daniel. "Further". *Slate*. *The Slate Group*. Retrieved 5 September 2014.
22. ^ Robert Farley (25 August 2011). "Obama's Canadian-American Bus". *FactCheck*. Retrieved 17 October 2011.
23. ^ "Chesapeake Fire Department". *Cityofchesapeake.net*. 1 May 1998. Archived from the original on 21 November 2010. Retrieved 12 October 2010.
24. ^ City of Winnipeg Corporate Web Services. "Winnipeg Fire Department". *Winnipeg.ca*. Archived from the original on 6 January 2010. Retrieved 12 October 2010.
25. ^ "Three Decker Auto Bus Carries 88 Persons" *Popular Mechanics*, August 1932
26. ^ Event preview: Fashion Bus On The Square, London *The Guardian*, 16 August 2008