

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ
ΕΠΙΓΕΙΑ ΜΕΣΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΡΑΜΠΕΤΣΟΣ ΜΙΧΑΛΗΣ (Α.Μ. 5380)
ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (Α.Μ. 5469)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ
ΔΡ. ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την ολοκλήρωση των σπουδών μας που πραγματοποιήθηκαν στο Α.Τ.Ε.Ι της Πάτρας του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ. Η πτυχιακή έκθεση αναφέρεται στην αεροδυναμική μελέτη τριών τύπων οχημάτων. Ένος αυτοκινήτου, ενός λεωφορείου και ενός φορτηγού. Για να πραγματοποιηθεί η εργασία αυτή χρειάστηκαν οι γνώσεις δύο σχεδιαστικών προγραμμάτων, του Solidworks και του Ansys. Στο πρόγραμμα Solidworks βασίστηκε η εξολοκλήρου σχεδίαση των οχημάτων. Στο πρόγραμμα Ansys στηρίχτηκε η μελέτη της ροής αέρα γύρω από τα σώματα των οχημάτων.

Αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για όλα όσα μας πρόσφεραν στην διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μας χρόνων και την αμέριστη υποστήριξη τους σε κάθε μας επιλογή.

Επίσης ευχαριστούμε την Εθνική Βιβλιοθήκη Αθηνών καθώς και όλους όσους συνετέλεσαν στην ολοκλήρωση της συγγραφής αυτής της εργασίας. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Ευγένιο Σκούρα για την ανάθεση αυτής της εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εφαρμόζεται η τεχνική της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ή αλλιώς CFD για την μοντελοποίηση του ρευστού (αέρα) και την αεροδυναμική μελέτη τριών τύπων οχημάτων: ενός αυτοκινήτου, ενός λεωφορείου και ενός φορτηγού. Για τις προσομοιώσεις όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιείται το λογισμικό ANSYS. Η πτυχιακή εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια.

Στο 1^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές έννοιες της μηχανικής ρευστών και της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Επιπλέον, αναφέρονται οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Επίσης αναλύονται οι εξισώσεις και η μεθοδολογία που οδηγούν στη παραγωγή του πλέγματος και στην επίλυση των προβλημάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφεται το λογισμικό πακέτο ANSYS για την προσομοίωση προβλημάτων CFD. Ειδικότερα, περιγράφονται τα μοντέλα επίλυσης προβλημάτων CFD, η μεθοδολογία επίλυσης των προβλημάτων μέσω της δημιουργίας της γεωμετρίας του μοντέλου με το ANSYS Design Modeler, της παραγωγής του πλέγματος με το ANSYS Meshing και της επίλυσης του προβλήματος με το ANSYS Fluent.

Στο 3^ο κεφάλαιο επιλύεται το case study για το μοντέλο του αυτοκινήτου. Γίνεται η αεροδυναμική μελέτη του αυτοκινήτου από την αρχή, αφού δημιουργηθεί το κατάλληλο πλέγμα, για το εύρος ταχυτήτων από 40 – 120 km / h ανά 10 km / h. Επιπλέον αναλύεται η ταχύτητα των 250 km / h για το μοντέλο του αυτοκινήτου. Τέλος επιλύονται τα μοντέλα ενέργειας και τυρβώδους ροής έχοντας ως είσοδο την κατά περίπτωση ταχύτητα. Μελετάται η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του οχήματος στα μεγέθη της ολικής πίεσης που ασκείται στο όχημα, στην τύρβη του αέρα, στην κινητική ενέργεια τύρβης, της άντωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης. Κατόπιν μελετάται η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας και η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης στην κατανάλωση καυσίμου του οχήματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο επιλύεται το case study για το μοντέλο του λεωφορείου. Αφού γίνει η αεροδυναμική μελέτη του οχήματος και δημιουργηθεί το σωστό πλέγμα μελετάται η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του οχήματος στα μεγέθη της ολικής πίεσης που ασκείται στο όχημα, στην τύρβη του αέρα, στην κινητική ενέργεια τύρβης, της άντωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης για το εύρος ταχυτήτων από 40 έως 120 km/h. Τέλος και εδώ μελετάται η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας και η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης στην κατανάλωση καυσίμου του οχήματος.

Στο 5^ο κεφάλαιο επιλύεται το case study για το μοντέλο του φορτηγού. Μελετάται η αεροδυναμική μελέτη του φορτηγού, αφού δημιουργηθεί το κατάλληλο πλέγμα, για το εύρος ταχυτήτων 40 – 120 km / h ανά 10 km / h και επιλύονται τα μοντέλα ενέργειας και τυρβώδους ροής, έχοντας ως είσοδο την κατά περίπτωση

ταχύτητα. Μελετάται η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του οχήματος στα μεγέθη της ολικής πίεσης που ασκείται στο όχημα, στην τύρβη του αέρα, στην κινητική ενέργεια τύρβης, της άντωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης. Κατόπιν μελετάται η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας και η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης στην κατανάλωση καυσίμου του οχήματος.

Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο παραθέτουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη της αεροδυναμικότητας των τριών οχημάτων και δημιουργούμε νέες βάσεις για μελλοντικές έρευνες πάνω στην μελέτη της ροής αέρα γύρω από τα τρία αυτά οχήματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

1.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	6
1.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	12
1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ NAVIER - STOKES.....	14
1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	16
1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	19
1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ FINITE VOLUME.....	20
1.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	30
1.8 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

2.1 ANSYS	51
2.2 ANSYS FLUENT	52
2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ.....	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

3.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	65
3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ	67
3.3 ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ ΚΑΙ ΑΝΤΩΣΗ.....	73
3.4 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ	74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ

4.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ	100
4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ	102

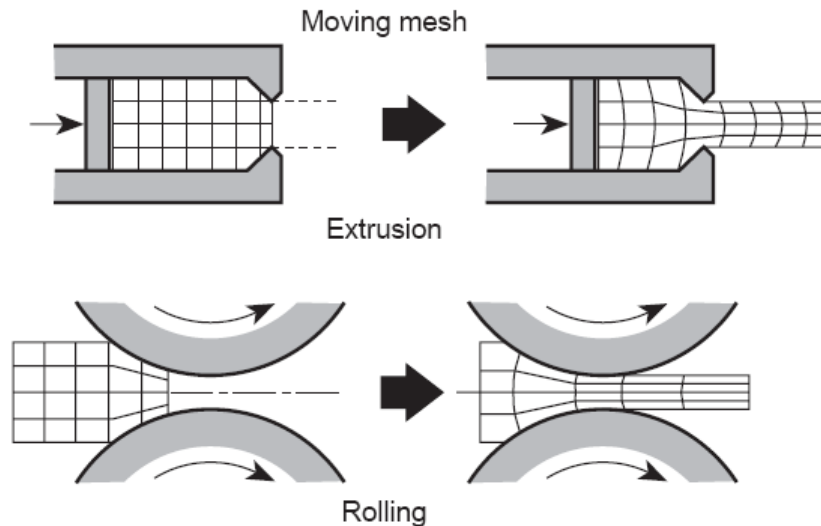
4.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ	107
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΗΓΟΥ	
5.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ.....	131
5.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ	133
5.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΟΡΤΗΓΟΥ	138
5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ	159
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	161
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	163

1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

1.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

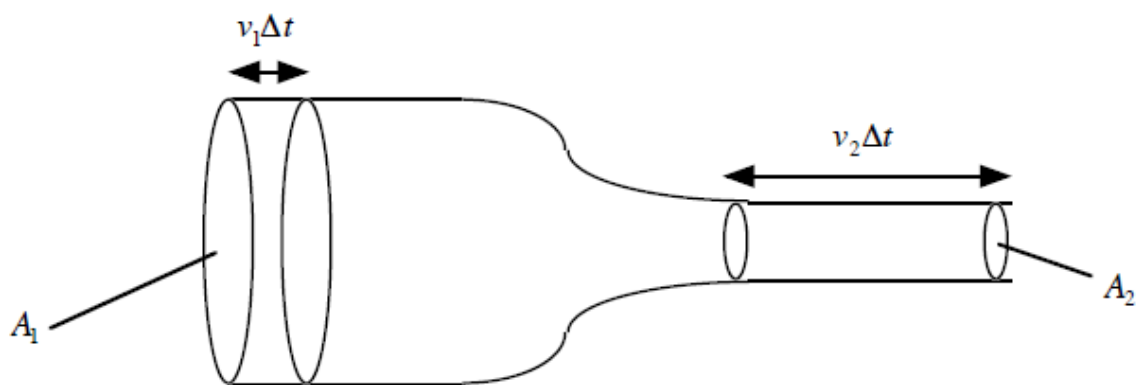
Από την πλευρά της θερμοδυναμικής οι καταστάσεις της ύλης είναι τρεις: στερεά, υγρά και αέρια. Όμως στην ρευστομηχανική τα αέρια και τα υγρά ορίζονται σαν ρευστά. Ως εκ τούτου από την πλευρά της ρευστοδυναμικής οι καταστάσεις της ύλης είναι δύο: στερεά και ρευστά.

Η ροή του ρευστού ορίζεται ως συμπιεσμένη όταν η μεταβολή της πίεσης είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στην πυκνότητα του ρευστού όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Συμπιεσμένη ροή ρευστού

Στα ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα ρ είναι σταθερή σε όλο το ρευστό. Η διατήρηση της μάζας σημαίνει ότι σε κάθε σημείο ο όγκος του ρευστού που ρέει πρέπει να είναι ο ίδιος. Με άλλα λόγια, η ίδια ποσότητα που εισέρχεται σε έναν όγκο πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα του ρευστού που εξέρχεται από αυτόν (αρχή της διατήρησης της μάζας). Αν η διατομή του ρευστού αλλάξει, τότε η ταχύτητα ροής πρέπει να αλλάξει ώστε να διατηρηθεί ο όγκος της ροής σταθερός. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η ροή ενός ρευστού σε ένα σωλήνα μεταβαλλόμενης διατομής.



Σχήμα 1.2: Ρευστό κινείται σε σωλήνα μεταβαλλόμενης διατομής

Η μάζα του ρευστού στο ένα τμήμα του σημείου πρέπει να ισούται με τη μάζα του ρευστού στο δεύτερο τμήμα του σημείου. Ισχύουν δηλαδή οι σχέσεις (1.1) και (1.2)

$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (1.1)$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{const} \quad (1.2)$$

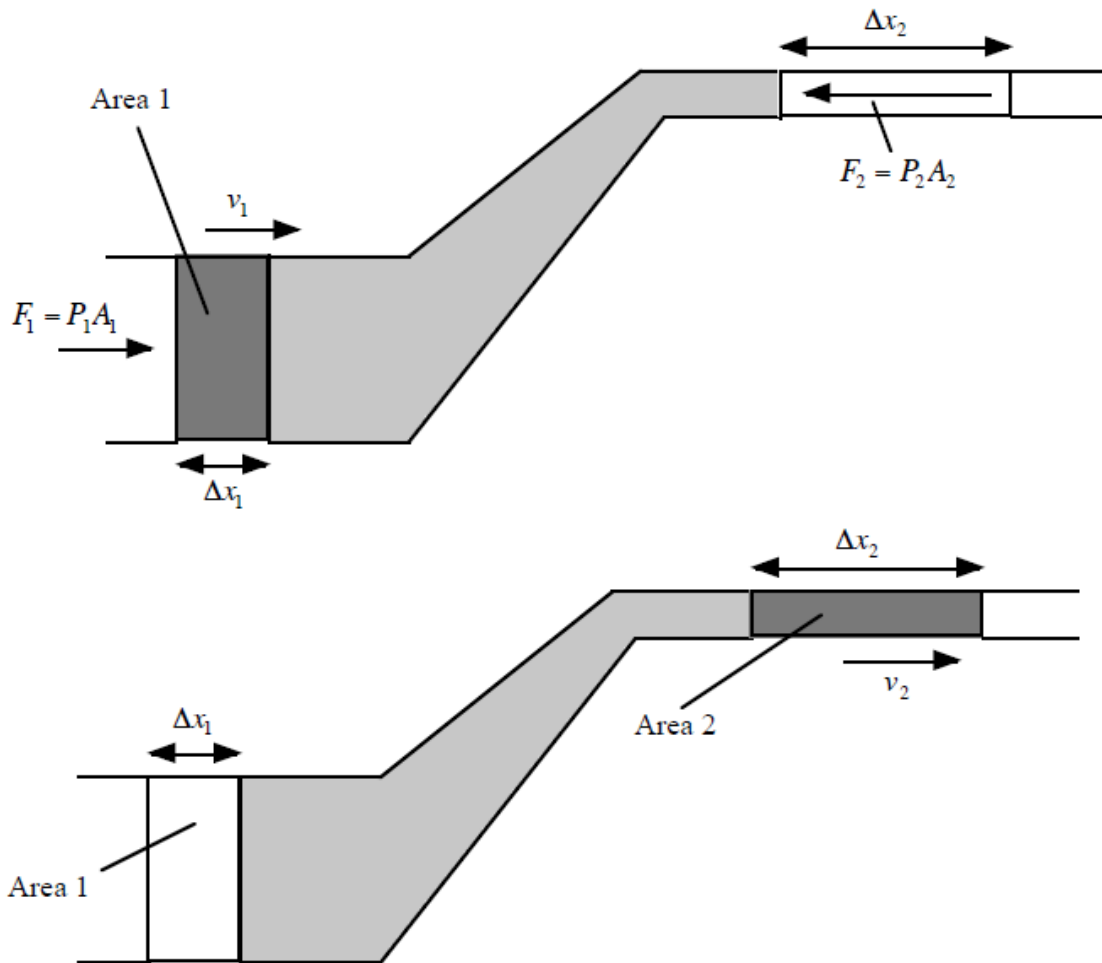
Οι σχέσεις αυτές εκφράζουν την αρχή της διατήρησης της μάζας. Από πιο μαθηματική σκοπιά η αρχή διατήρησης της μάζας εκφράζεται από την διαφορική εξίσωση (1.3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{q} = 0 \quad (1.3)$$

Ο δεύτερος όρος της σχέσης (1.3) εκφράζει την διαφορά μεταξύ της μάζας που ρέει εντός και εκτός ενός σημείου του όγκου. Ο δεύτερος όρος πρέπει να ισορροπήσει τον πρώτο όρο της σχέσης ο οποίος εκφράζει την συγκέντρωση της μάζας στο συγκεκριμένο σημείο. Στην περίπτωση που το ρευστό είναι ασυμπίεστο, η πυκνότητα ρ είναι σταθερή ως προς τον χώρο και τον χρόνο και η σχέση (1.3) μετατρέπεται στη σχέση (1.4).

$$\nabla \vec{q} = 0 \quad (1.4)$$

Αν ληφθούν υπόψη οι διάφορες δυνάμεις που προκαλούν την ροή του ρευστού όπως επίσης και η αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί να δημιουργηθούν εξισώσεις που εμπλέκουν και την ενέργεια του ρευστού. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται η ροή ενός ρευστού εντός ενός σωλήνα.



Σχήμα 1.3: Ρευστό κινείται σε σωλήνα από την περιοχή 1 στην περιοχή 2

Το έργο W_{net} που απαιτείται για κινηθεί το ρευστό από την περιοχή 1 στην περιοχή 2, λαμβάνοντας υπόψη την πίεση και αγνοώντας την ιξώδη κατάσταση του ρευστού προκύπτει από τις σχέσεις (1.5) (1.6):

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V \quad (1.5)$$

$$W_2 = F_2 \Delta x_2 = -P_2 A_2 \Delta x_2 = P_2 \Delta V \quad (1.6)$$

$$W_{net} = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V \quad (1.7)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροή του ρευστού οδηγείται από την διαφορά των πιέσεων στα δύο σημεία όπως φαίνεται από τις σχέσεις (1.5) (1.6) (1.7). Το ρευστό κινείται από σημεία υψηλότερης πίεσης σε σημεία χαμηλότερης πίεσης.

Αν ληφθεί υπόψιν η βαρύτητα τότε το έργο που απαιτείται για να κινηθεί το ρευστό από την περιοχή ένα στην υψηλότερη περιοχή δύο δίνεται από την σχέση (1.8), αν η μάζα του είναι γνωστή σε κάθε περιοχή δίνεται από την σχέση (1.9).

$$m = \rho A_1 \Delta x_1 = \rho A_2 \Delta x_2 = \rho \Delta V \quad (1.8)$$

$$W = -mg(h_2 - h_1) = -\rho g \Delta V (h_2 - h_1) \quad (1.9)$$

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας επιβάλλει ότι η μεταβολή της κινητικής ενέργειας ισούται με το έργο που καταναλώνεται στο ρευστό. Ειδικότερα:

$$\frac{1}{2} \rho \Delta V v_1^2 - \frac{1}{2} \rho \Delta V v_2^2 = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V + \rho g \Delta V (-h_2 + h_1) \quad (1.10)$$

Η απλοποίηση της σχέσης (1.10) δίνει την εξίσωση Bernoulli (για μη ιξώδες ρευστό):

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2 = \text{const} \quad (1.11)$$

Η εξίσωση (1.11) είναι ισοδύναμη με την κλασσική εξίσωση Navier-Stokes. Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

$$m \vec{a} = \sum \vec{F} \quad (1.12)$$

Όπου οι δυνάμεις F περιλαμβάνουν τις εξωτερικές δυνάμεις, όπως είναι η βαρύτητα, οι μαγνητικές δυνάμεις κ.α. Συμπεριλαμβάνοντας την πίεση και την κατάσταση ιξώδους η (1.12) γίνεται:

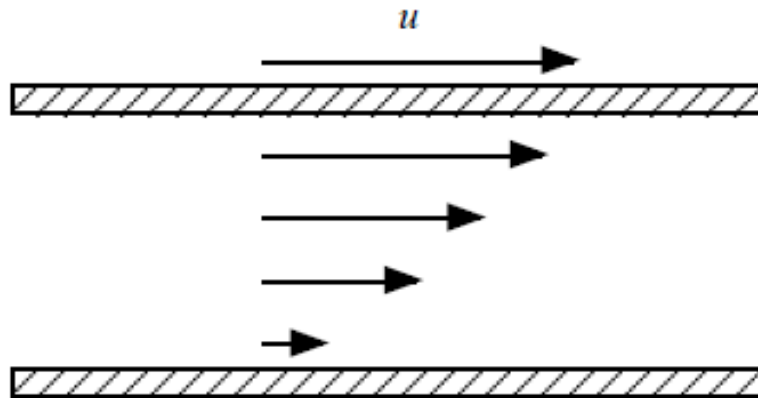
$$\rho \frac{d\vec{q}}{dt} = \vec{F} + \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{q} \quad (1.13)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (1.13) είναι ο όρος της επιτάχυνσης, ο δεύτερος των εξωτερικών δυνάμεων, ο τρίτος της κλίσης της πίεσης και ο τέταρτος της ιξώδους κατάστασης. Συγκρίνοντας με την εξίσωση (1.10) οι όροι της κινητικής ενέργειας αντιστοιχούν στον όρο επιτάχυνσης της σχέσης (1.13). Οι δύο εξισώσεις περιλαμβάνουν διαφορές στην πίεση και όρους εξωτερικών δυνάμεων. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι στην εξίσωση (1.13) ο όρος ιξώδους κατάστασης είναι ανάλογος την τριβής.

Η ιξώδης κατάσταση (viscosity) είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των ρευστών και εκφράζει πως το ρευστό προβάλλει αντίσταση στις καταπονήσεις (stresses) και στις δυνάμεις τάσεων (strains). Για παράδειγμα το ανακάτεμα του νερού είναι πολύ πιο

εύκολο από το ανακάτεμα ενός ποτηριού με μέλι διότι ο δείκτης ιξώδους του νερού είναι πολύ μικρότερος. Οι καταπονήσεις που υφίσταται το ρευστό μπορούν να κατανοηθούν ως αντίδραση του ρευστού σε μια δύναμη που του ασκείται.

Παραδείγματος χάρη, ένα ακίνητο ρευστό βρίσκεται ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες (σχήμα 1.4) και η πάνω πλάκα αρχίζει να κινείται με μια σταθερή ταχύτητα. Η πάνω πλάκα ασκεί μια δύναμη στο ρευστό και το ρευστό αντιδρά ασκώντας μια δύναμη επίσης. Όσο αφορά τις δυνάμεις τάσεων, περιγράφουν την παραμόρφωση του ρευστού υπό την επίδραση καταπόνησης.

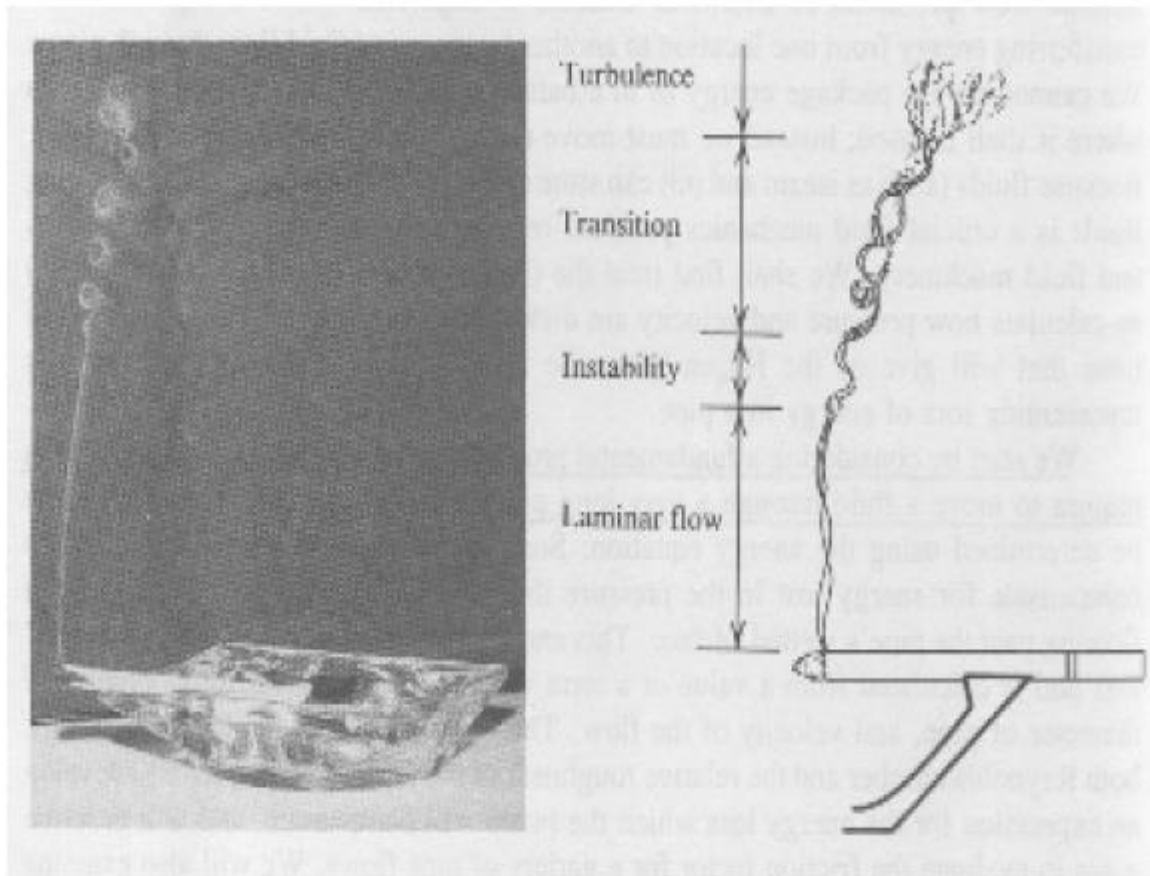


Σχήμα 1.4: Ταχύτητα ρευστού μεταξύ μιας κινούμενης και μιας ακίνητης πλάκας

Για να δοθούν λύσεις σε προβλήματα ρευστοδυναμικής είναι απαραίτητο να επαναπροσδιοριστούν και να συνοπτικοποιηθούν οι εξισώσεις της ρευστοδυναμικής. Έτσι θεωρώντας ρ την πυκνότητα, u την ταχύτητα του ρευστού, L το μήκος του αντικειμένου μέσα στο οποίο συμβαίνει η ροή και μ τον δείκτη ιξώδους, προσδιορίζεται ο δείκτης Reynolds από την σχέση (1.14) που περιγράφει τα χαρακτηριστικά του ρευστού.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1.14)$$

Αν ο δείκτης Reynolds είναι μικρός τότε η ροή του ρευστού είναι νηματική (laminar flow) το οποίο σημαίνει ότι το ρευστό ρέει σε διακριτά επίπεδα, ενώ αν ο δείκτης είναι μεγάλος τότε η ροή του ρευστού είναι τυρβώδης (turbulent flow). Δηλαδή το ρευστό ρέει σε επίπεδα που επικαλύπτονται δημιουργώντας μεγάλες δίνες στην αρχή και μικρότερες κατά την διάρκεια της ροής. Οι ενδιάμεσες καταστάσεις ροής ονομάζονται μεταβατικές (transitional). Στο σχήμα 1.5 οι μορφές της ροής παριστάνονται με το καπνό ενός τσιγάρου. Φαίνεται ότι το ρευστό για να μεταβεί από την νηματική ροή (laminar flow) στην μεταβατική (transitional) και στην συνέχεια στην τυρβώδη (turbulence) περνάει από ένα στάδιο αστάθειας (instability).

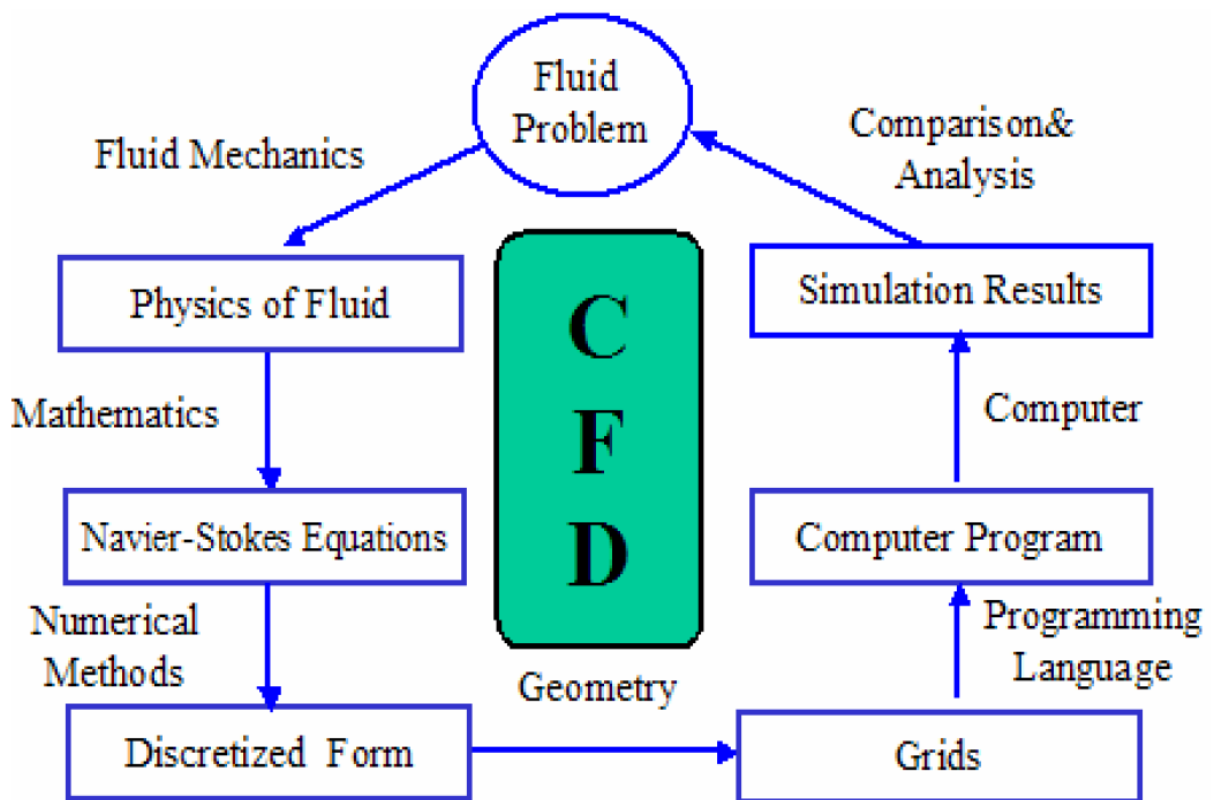


Σχήμα 1.5: Μορφές ροής ρευστού

Μπορούμε επιπλέον να θεωρήσουμε μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του περιβλήματός του. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται είτε με αγωγή είτε με συναγωγή είτε με ακτινοβολία. Η αγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας που συμβαίνει μέσω της διάχυσης της θερμότητας ή με απευθείας αλληλεπίδραση των μορίων. Συναγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας που συμβαίνει μέσω μεταφοράς μάζας, π.χ. στους εναλλάκτες όπου το καυσαέριο θερμαίνει ένα μεταλλικό σωλήνα και αυτός θερμαίνει το νερό. Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δεν χρειάζεται άμεση επαφή του θερμαινόμενου αντικειμένου και της πηγής θερμότητας, αλλά συμβαίνει εξ'αποστάσεως μέσω εκπομπής υπέρυθρης ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, π.χ. η μεταφορά θερμότητας από μια λάμπα πυρακτώσεως στο περιβάλλον.

1.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluids Dynamics) είναι η προσομοίωση μηχανικών συστημάτων ρευστών χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος και αριθμητικές μεθόδους. Η CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ροής του ρευστού, την μεταφορά της θερμότητας, της μεταφορά μάζας, τις χημικές αντιδράσεις και συναφή φαινόμενα. Η διαδικασία παριστάνεται στο σχήμα 1.6.

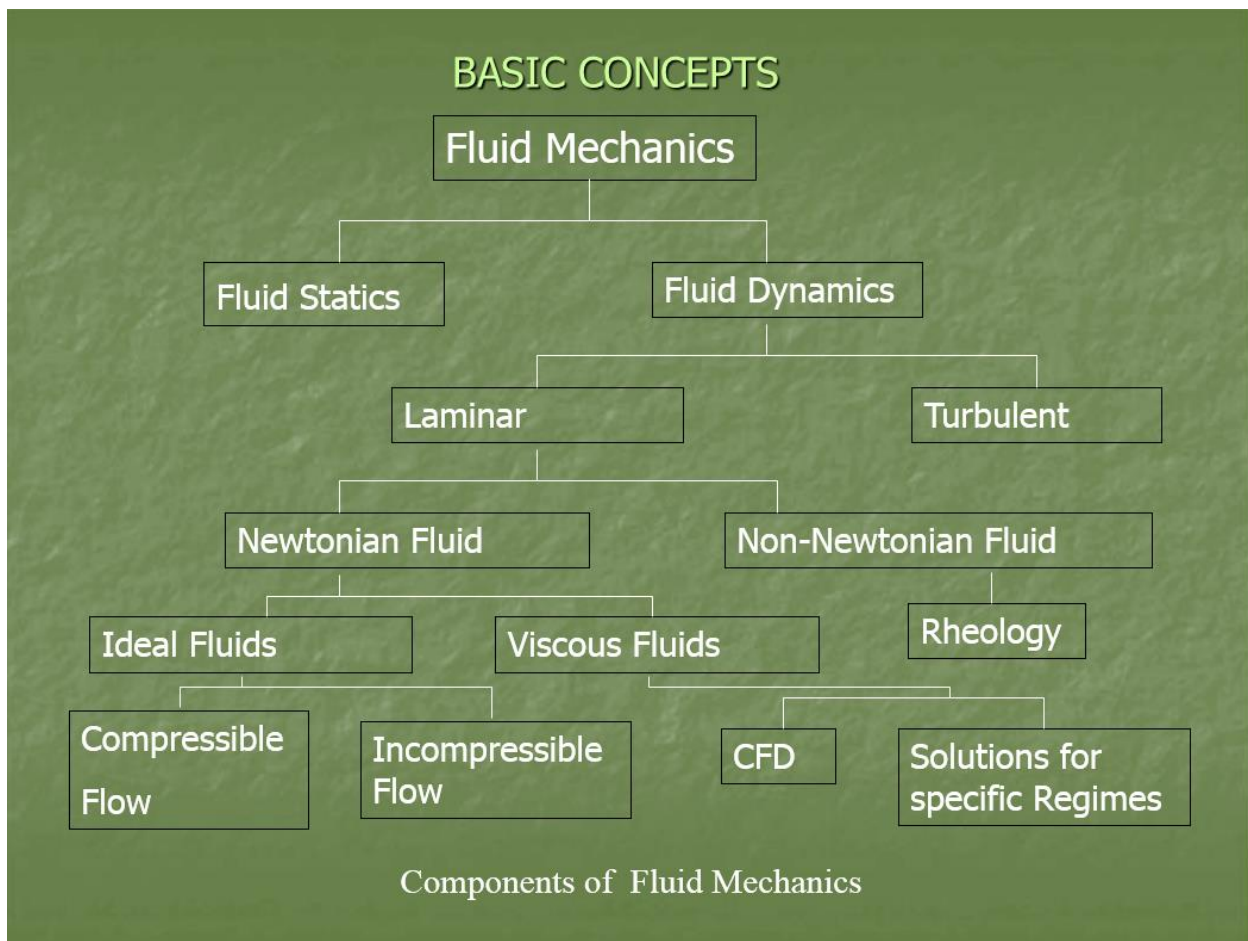


Σχήμα 1.6: Διαδικασία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Αρχικά ορίζεται το πρόβλημα. Για να επιλυθεί το πρόβλημα, πρέπει να είναι γνωστές οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού από την μηχανική ρευστών (Fluids Mechanics). Στην συνέχεια εφαρμόζονται μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν αυτές τις φυσικές ιδιότητες. Αυτές είναι οι εξισώσεις Navier – Stokes οι οποίες είναι οι κυρίαρχες εξισώσεις της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Με την αναλυτική μορφή των εξισώσεων Navier – Stokes, είναι δυνατόν να περιγραφεί και να επιλυθεί το πρόβλημα με το χέρι. Όμως για να επιλυθεί το πρόβλημα με την χρήση υπολογιστή πρέπει να μετατραπεί το πρόβλημα σε διακριτή μορφή (discretized form). Οι μετατροπές για αυτή την δουλειά είναι αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης όπως είναι η Finite Difference, η Finite Element και η Finite Volume. Επομένως πρέπει το

πρόβλημα να διαιρεθεί σε πολλά μικρά τμήματα (Grids), γιατί η διακριτοποίηση βασίζεται σε αυτά. Η επίλυση των εξισώσεων του προβλήματος γίνεται είτε μέσω κώδικα είτε μέσω υπολογιστικών πακέτων. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης αναλύονται και συγκρίνονται με τα αναμενόμενα αποτελέσματα και αν δεν είναι ικανοποιητικά τότε ξαναορίζεται το πρόβλημα. Αυτό το loop είναι η διαδικασία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Από το σχήμα 1.7 φαίνεται η θέση που καταλαμβάνει η CFD στο διάγραμμα ροής της μηχανικής ρευστών. Η CFD μπορεί να εφαρμοστεί για να επιλύσει είτε προβλήματα τυρβώδους είτε προβλήματα νηματικής ροής ενώ λαμβάνει ως παράμετρο την ιξώδη κατάσταση του ρευστού. Εφαρμόζεται μόνο σε νευτώνεια ρευστά, δηλαδή σε ρευστά στα οποία οι ιξώδεις καταπονήσεις είναι γραμμικά ανάλογες με τον τοπικό ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate) του ρευστού. Ρευστά με αυτό το χαρακτηριστικό είναι το νερό, τα υδατικά διαλύματα, ορισμένοι υδατικοί διαλύτες, τα αραιά αιωρήματα και γαλακτώματα, καθώς και όλα τα αέρια.

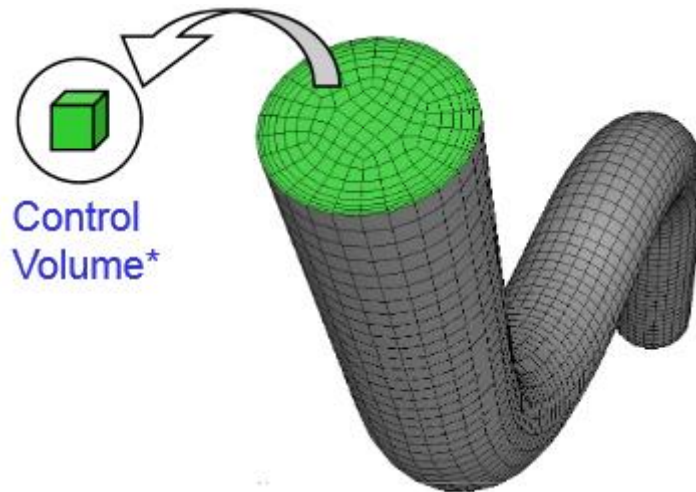


Σχήμα 1.7: Διάγραμμα ροής Μηχανικής Ρευστών

Για την επίλυση προβλημάτων ρευστοδυναμικής με υπολογιστή συνήθως χρησιμοποιούνται Fluent Solvers οι οποίοι εφαρμόζουν την αριθμητική μέθοδο Finite

Volume. Το πεδίο μελέτης διακριτοποιείται σε πεπερασμένο αριθμό τμημάτων όγκου (mesh) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8. Οι γενικές εξισώσεις διατήρησης για την μάζα, την ορμή και την ενέργεια λύνονται σύμφωνα με την σχέση (1.15). Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων και στην συνέχεια επιλύονται αριθμητικά.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generation}} \quad (1.15)$$



Σχήμα 1.8: Η ροή ενός ρευστού σε ένα σωλήνα διακριτοποιείται σε πεπερασμένο αριθμό τμημάτων όγκου.

1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ NAVIER - STOKES

Οι εξισώσεις Navier – Stokes και οι εξισώσεις συνέχειας αποτελούν τις θεμελιώδεις εξισώσεις για την μοντελοποίηση της κίνησης των ρευστών. Οι νόμοι της κίνησης που ισχύουν για τα στερεά βρίσκουν πλήρη εφαρμογή στα υγρά και στα αέρια. Όμως μια βασική διαφορά μεταξύ των ρευστών και των στερεών είναι ότι τα ρευστά παραμορφώνονται χωρίς όριο. Για παράδειγμα, αν μια διατμητική τάση (shear stress) εφαρμοστεί σε ένα ρευστό τότε τα μόρια του ρευστού θα κινηθούν σχετικά το ένα με το άλλο προς την κατεύθυνση της εφαρμοσμένης τάσης, αλλά δεν θα επιστρέψουν στην

αρχική θέση τους όταν σταματήσει να ασκείται η τάση όπως συμβαίνει στα στερεά. Η ανάλυση του ρευστού πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτές τις παραμορφώσεις.

Ένα μόριο του ρευστού θα ανταποκριθεί σε μια δύναμη όπως ανταποκρίνεται το μόριο ενός στερεού. Όταν ασκείται μια δύναμη στο μόριο του ρευστού, η επιτάχυνση του μορίου προσδιορίζεται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, το οποίο επαγωγικά σημαίνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής του ρευστού είναι ανάλογος με της συνισταμένης δύναμης που ασκείται σε αυτό και το ρευστό κατευθύνεται προς την κατεύθυνση της συνισταμένης δύναμης. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό μπορεί να είναι δυνάμεις που προκαλούνται από την βαρύτητα, από την περιστροφή, από τον ηλεκτρομαγνητισμό όπως και μπορεί να είναι δυνάμεις πίεσης και ιξώδεις δυνάμεις.

Υποθέτοντας ότι ρυθμός διάτμησης είναι γραμμικά σχετιζόμενος με την διατμητική τάση που ασκείται στο ρευστό και ότι η ροή του ρευστού είναι νηματική, ο Navier επινόησε τις εξισώσεις κίνησης για ένα ιξώδες ρευστό. 22 χρόνια αργότερα ο Stokes τροποποίησε την μορφή των εξισώσεων του Navier και πλέον οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή ενός ρευστού είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier – Stokes. Οι εξισώσεις Navier – Stokes μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την επίλυση προβλημάτων τυρβώδους ροής με κατάλληλη τροποποίηση. Η κυρίαρχη ιδέα των εξισώσεων Navier – Stokes είναι η εξής: Οι δυνάμεις αδράνειας που ασκούνται σε ένα σωματίδιο του ρευστού ισορροπούνται από τις επιφανειακές δυνάμεις και τις καθολικές δυνάμεις (βαρυτικές και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις). Αν θεωρηθούν οι συντεταγμένες των τριών αξόνων x, y, z για τις διευθύνσεις και οι αντίστοιχες συνιστώσες της ταχύτητας, η εξίσωση συνέχειας δίνεται από την σχέση (1.16) και οι εξισώσεις Navier – Stokes από την σχέση (1.17).

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (1.16)$$

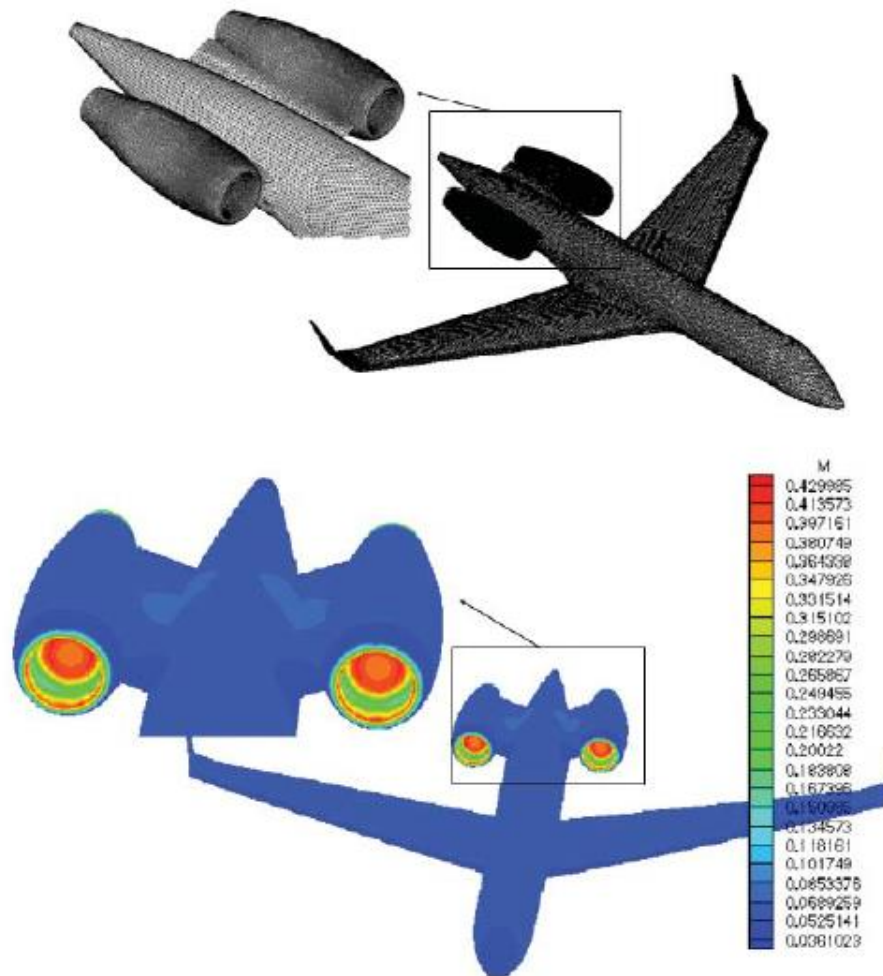
$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \quad (1.17)$$

Όπου P η πίεση, ρ η πυκνότητα, μ το δυναμικό ιξώδες. T ο χρόνος, f οι εξωτερικές δυνάμεις και u, v, w οι συνιστώσες της ταχύτητας.

1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

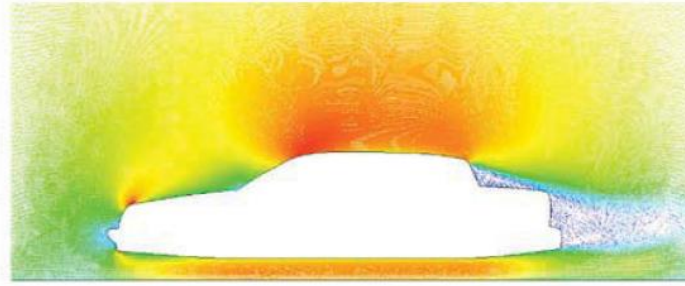
Η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ιδιαίτερα στην βιομηχανία. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες διαδεδομένες εφαρμογές της:

- Αεροδιαστημικές εφαρμογές (aerospace applications) : Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ευρέως διαδεδομένη στις αεροδιαστημικές εφαρμογές με σκοπό την πρόβλεψη της απόδοσης μηχανικών εξαρτημάτων και ως βασικό τμήμα της σχεδίασης. Για παράδειγμα μελετάται η ροή του αέρα γύρω από ένα αεροσκάφος. Η τοποθέτηση του αεροσκάφους σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους για την εκτίμηση των αεροδυναμικών παραμέτρων (wind tunnel tests) απαιτεί ακριβή διαστασιολόγηση το οποίο οδηγεί σε δυσκολίες όσο αφορά την προσαρμογή σημαντικών παραμέτρων ροής, με αποτέλεσμα ο δείκτης Reynolds να προκύπτει κατά πολύ μικρότερος από τον πραγματικό και να γίνεται κακή εκτίμηση της διατμηματικής τάσης και άλλων χαρακτηριστικών. Από την άλλη αν το τεστ πραγματοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες το κόστος προσομοίωσης αυξάνεται ανεπίτρεπτα ενώ υπάρχει και ρίσκο όσο αφορά την ασφάλεια. Για αυτούς τους λόγους η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο που επιτρέπει την προσομοίωση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του αεροσκάφους υπό διαφορετικές συνθήκες. Επιπλέον η υπολογιστική ρευστοδυναμική οδηγεί στην μείωση του κόστους του έργου και επιταχύνει την διαδικασία της σχεδίασης. Ένα παράδειγμα περιβάλλουσας ροής ενός αεροσκάφους φαίνεται στο σχήμα 1.9. Εντός του αεροσκάφους η υπολογιστική ρευστοδυναμική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της κύριας ροής που περιλαμβάνει την τουρμπίνα, τους συμπιεστές και της δευτερεύουσας ροής που αφορά τα συστήματα ψύξης, τους αεραγωγούς κ.α.

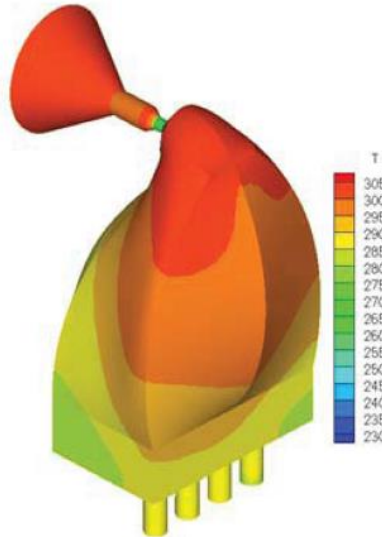


Σχήμα 1.9: Επίλυση της ροής πολιτικού αεροσκάφους με ατράκτους

- Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία (automotive applications): Στην αυτοκινητοβιομηχανία η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιείται σε πολλά πεδία συμπεριλαμβανομένων των εξαρτημάτων της μηχανής, των βοηθητικών συστημάτων όπως και για την μοντελοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος ώστε να ελαχιστοποιηθεί η οπισθέλκουσα δύναμη (drag) και την βελτιστοποίηση της downforce υπό διαφορετικές συνθήκες. Στο σχήμα 1.10α φαίνεται το πεδίο ροής όπως εξάγεται από την CFD. Στο σχήμα 1.10b φαίνεται η ροή στον αεραγωγό επαγωγής (induction duct) ενός μαθητικού αυτοκινήτου τύπου formula. Ο σκόπος της ανάλυσης είναι η κατανόηση της μορφής της ροής του αέρα κατά την διάρκεια της διαδικασίας σχεδίασης και βελτιστοποίησης ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πίεσης και να διασφαλιστεί η ομοιομορφία του αέρα που οδηγείται στους κυλίνδρους.



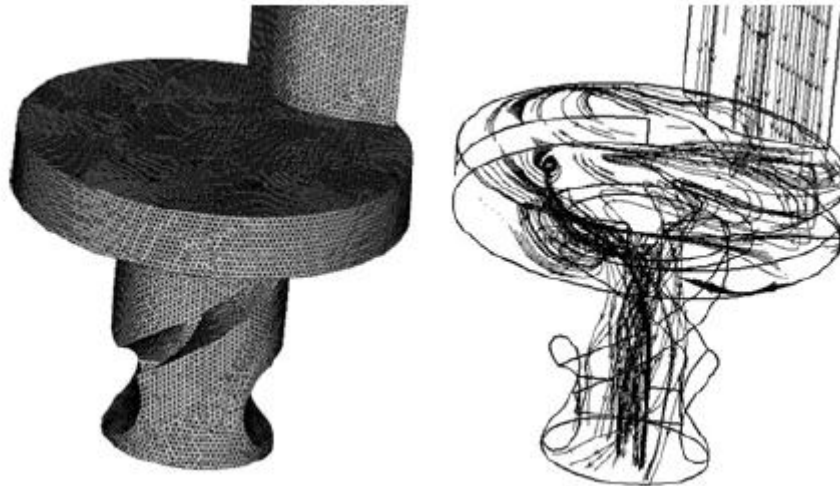
(a) Flow around a car



(b) Formula student racing car induction duct

Σχήμα 1.10: Παραδείγματα εφαρμογής CFD στην αυτοκινητοβιομηχανία

- Βιοϊατρικές εφαρμογές (biomedical application): Στις εφαρμογές βιοϊατρικής η CFD χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της ροής του αίματος στην καρδιά και στις αρτηρίες, της ροής του αίματος σε βοηθητικές συσκευές της καρδιάς και σε άλλες ιατρικές συσκευές, της ροής του αέρα σε αναπνευστήρες. Η χρήση της CFD μειώνει την ανάγκη για δοκιμαστικά ιατρικά τεστ σε ανθρώπους και ζώα έως το τελικό στάδιο της σχεδίασης της συσκευής. Στο σχήμα 1.11 φαίνεται το μοντέλο της ροής του αέρα μέσα σε ένα αναπνευστήρα. Αυτή η μοντελοποίηση έχει ως σκοπό την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του αναπνευστήρα ώστε να ενισχυθεί η μίξη της δόσης του φαρμάκου με τον εισπνεόμενο αέρα ενώ παράλληλα να διατηρεί υψηλό δείκτη εκκένωσης για να ελαχιστοποιείται η αναρρόφηση του αρρώστου.



Σχήμα 1.11: Πλέγμα και ροή αέρα στο εσωτερικό ενός αναπνευστήρα

Άλλα πεδία στα οποία βρίσκει εφαρμογή η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι οι προσομοιώσεις συνθηκών γραφείων και επαγγελματικών χώρων, τα συστήματα εξαερισμού πισίνας, οι εξωτερικές ροές κτιρίων, τα συστήματα βιομηχανικού εξαερισμού, προσομοιώσεις πυρκαγιάς σε αποθήκη, η προσομοίωση μόλυνσης περιβάλλοντος, η προσομοίωση χώρων καπνίσματος, ο σχεδιασμός οικιακών συστημάτων εξαερισμού και άλλες.

Η χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι ελκυστική για την βιομηχανία καθώς είναι οικονομική μέθοδος και αντικαθιστά τα ακριβά φυσικά πειράματα. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι αρκετές φορές οι προσομοιώσεις της ροής είναι πολύπλοκες και επιρρεπείς στο λάθος. Για αυτό τον λόγο οι προσομοιώσεις για να είναι έγκυρες ακολουθούν το loop που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2.

1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Η σημασία της χρήσης της CFD γίνεται κατανοητή από το εύρος και τον χαρακτήρα των εφαρμογών της. Παρακάτω συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα της CFD:

- Σχετικά χαμηλό κόστος: Η χρήση φυσικών πειραμάτων και δοκιμών για να συλλεγούν δεδομένα για την σχεδίαση και εξαχθούν συμπεράσματα αυξάνει το κόστος, μερικές φορές σε ανεπίτρεπτο επίπεδο. Από την άλλη οι CFD προσομοιώσεις έχουν σχετικά μικρό κόστος και όσο αυξάνεται η υπολογιστική ισχύς τόσο μειώνεται περαιτέρω το κόστος.

- Ταχύτητα: Οι CFD προσομοιώσεις μπορούν να γίνουν σε μικρό χρονικό διάστημα και η αλλαγή συνθηκών προσομοίωσης μπορεί να γίνει εύκολα και γρήγορα.
- Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών καταστάσεων: Αρκετές περιπτώσεις ροής και μεταφοράς θερμότητας δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν εύκολα και με ακρίβεια με διαφορετικό τρόπο, π.χ. η ροή υπερήχων. Η CFD μπορεί να προσομοιώσει θεωρητικά όλες τις φυσικές καταστάσεις.
- Το μοντέλο της CFD παρέχει ακριβείς και αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους θερμότητας, εξαερισμού και γενικά της ροής ή του συστήματος που προσομοιώνει.
- Χωρίς να τροποποιηθεί το φυσικό σύστημα ή να εγκατασταθεί κάποιο επιπλέον εξάρτημα για δοκιμή, η CFD προσομοίωση μπορεί να προβλέψει ποιες αλλαγές είναι κρίσιμες για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.
- Η CFD μειώνει τον κίνδυνο τραυματισμών ή ζημιών καθώς ορισμένα πειράμα είναι επικίνδυνο να προσομοιωθούν σε φυσικό περιβάλλον.

Όμως υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα ή περιορισμοί σχετικά με την χρήση της CFD. Ειδικότερα, η CFD βασίζεται σε φυσικά μοντέλα και είναι τόσο αξιόπιστη όσο είναι και τα φυσικά μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι αν το φυσικό μοντέλο δεν εφαρμόζεται ή δεν είναι αξιόπιστο, η CFD δεν είναι σε θέση να κάνει τον έλεγχο της εγκυρότητας. Για να είναι έγκυρα τα αποτελέσματα της CFD πρέπει να προσδιοριστούν τα όρια του φυσικού μοντέλου. Επίσης η CFD χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των ρευστοδυναμικών εξισώσεων και ενδέχεται να εισάγει αριθμητικά λάθη και ανακρίβειες που είτε οφείλονται σε κακούς υπολογισμούς ή σε στρογγυλοποιήσεις. Συχνά είναι τα σφάλματα αποκοπής (truncation errors) τα οποία προκύπτουν από τις προσεγγίσεις των αριθμητικών μεθόδων. Αυτά τα σφάλματα τείνουν στο μηδέν όσο το πλέγμα τελειοποιείται (mesh refinement).

1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ FINITE VOLUME

Η αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων όγκων (Finite Volume) ανακαλύφθηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1970. Μπορεί να θεωρηθεί σαν ειδική περίπτωση της μεθόδου σταθμισμένων υπολοίπων (Weighted Residual Method), όπου η συνάρτηση στάθμισης παίρνει την μορφή $W^i = 1$. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, δημιουργείται ένας αριθμός εξισώσεων σταθμισμένων υπολοίπων διαιρώντας το σύνολο της λύσης σε υποσύνολα που ονομάζονται “control volumes” και ορίζοντας την συνάρτηση στάθμισης να είναι μονάδα προς τα control volumes και μηδέν αλλού. Αυτό σημαίνει ότι το υπόλοιπο προς το κάθε control volume πρέπει να γίνει μηδέν.

Ένας άλλος τρόπος να προσδιοριστεί η διακριτοποίηση ενός πεπαρασμένου όγκου είναι να ξεκινήσουμε από την ολοκληρωματική μορφή των εξισώσεων ροής. Για παράδειγμα η εξίσωση συνέχειας μπορεί να εκφραστεί για έναν όγκο Ω με ένα όριο επιφάνειας Γ ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\Gamma} \rho \vec{U} d\vec{\Gamma} = 0 \quad (1.18)$$

Όπου $\vec{U} = \vec{u} + \vec{v} + \vec{w}$. Η σχέση (1.18) ουσιαστικά σημαίνει ότι ο ρυθμός συγκέντρωσης ύλης εντός του Ω ισούται με τον ρυθμό της ροής διαμέσου των ορίων του. Όμοια ολοκληρωματικές σχέσεις μπορούν να προσδιοριστούν και για τις εξισώσεις. Για παράδειγμα, η ολοκληρωματική μορφή της εξίσωσης ορμής (1.19) στον άξονα x είναι:

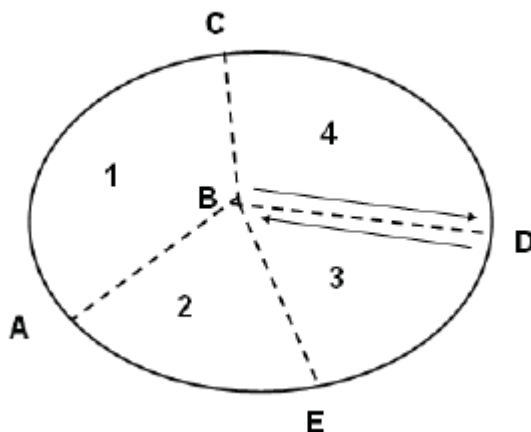
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u d\Omega + \oint_{\Gamma} (\rho u \vec{U} + p - \tau) d\vec{\Gamma} \quad (1.19)$$

Όπου τ είναι η ιξώδης ροή που δίνει από την σχέση (1.20).

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1.20)$$

Όμοιες ολοκληρωματικές σχέσεις προκύπτουν επίσης για τις εξισώσεις ορμής στους άξονες y και z.

Ο σχηματισμός των πεπαρασμένων όγκων μπορεί να ξεκινήσει από αυτές τις ολοκληρωματικές μορφές. Το γεγονός ότι η μεταβολή κάθε ποσότητας εντός του όγκου εξαρτάται αποκλειστικά από τις επιφανειακές τιμές των ροών εξηγεί την βάση του σχηματισμού των πεπαρασμένων όγκων, ο οποίος ξεκινά με την υποδιαίρεση του πεδίου λύσης σε μικρότερους όγκους. Κατόπιν διαμορφώνονται οι ολοκληρωματικές μορφές των αρχών διατήρησης για κάθε όγκο ξεχωριστά. Οι αρχές διατήρησης για τον συνολικό όγκο μπορούν να προκύψουν από την πρόσθεση των ροών των επιμέρους όγκων. Στο σχήμα 1.12 φαίνεται ένας όγκος ο οποίος υποδιαιρείται σε τέσσερις επιμέρους όγκους. Οι ροές διαμέσου των επιμέρους όγκων αλληλοεξουδετερώνονται. Για παράδειγμα η ροή που είναι παράλληλη με το σύνορο BD του όγκου 3 είναι ίση στο πλάτος και αντίθετη στο πρόσημο με την ροή που είναι παράλληλη με το σύνορο DB του όγκου 4. Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων το οποίο μπορεί να επιλυθεί για τις άγνωστες μεταβλητές.



Σχήμα 1.12: Τμήματα πεπερασμένων όγκων

Για να περιγραφούν οι βασικές ιδέες της μεθόδου Finite Volume για προβλήματα ροής ρευστών πρέπει να προσδιοριστεί η εξίσωση διάχυσης. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση Stokes, η οποία περιλαμβάνει την πίεση και τους ιξώδεις όρους στις εξισώσεις Navier – Stokes. Σε μονοδιάστατη στάσιμη κατάσταση παίρνει την μορφή της σχέσης (1.21).

$$\frac{d}{dx} \left(\mu \frac{du}{dx} \right) - \frac{dp}{dx} = F \quad (1.21)$$

Όπου F η καθολική δύναμη. Αν αγνοηθεί η πίεση στην σχέση (1.21), η εξίσωση παριστάνει την εξίσωση αγωγής θερμότητας. Για να έχει περισσότερη φυσική σημασία η εξίσωση αγωγής θερμότητας, η (1.21) παίρνει την μορφή της σχέσης (1.22).

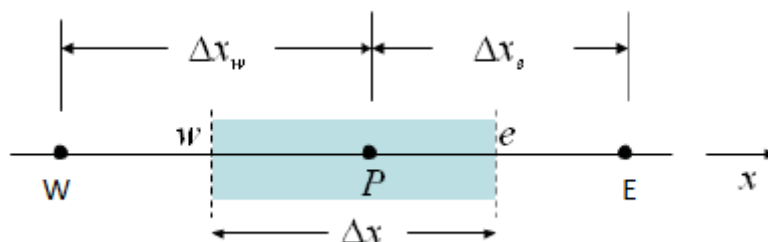
$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (1.22)$$

Όπου k η θερμική αγωγιμότητα, S είναι η πηγή ή η εσωτερική παραγωγή θερμότητας ανά μονάδα όγκου και T η θερμοκρασία.

Για να προκύψει η διακριτοποίηση πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιείται ένα ευθύγραμμο τμήμα (stencil) με τρία σημεία όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13. Ο σκοπός είναι να οριστεί η διακριτοποίηση για το μέσο σημείο P θεωρώντας ότι τα σημεία E και W παριστάνουν την ανατολή και την δύση αντίστοιχα. Στην συνέχεια ολοκληρώνεται η σχέση (1.22) για το τμήμα Δx και προκύπτουν οι σχέσεις (1.23) και (1.24).

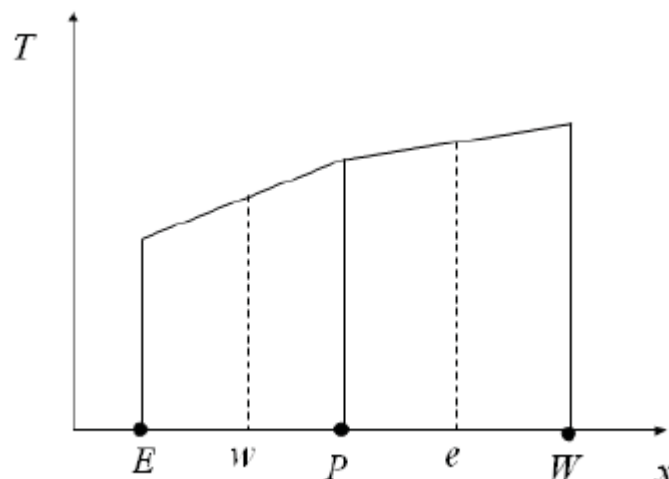
$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = 0 \quad (1.23)$$

$$\left(k \frac{dT}{dx}\right)_e - \left(k \frac{dT}{dx}\right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (1.24)$$



Σχήμα 1.13: Ευθύγραμμο τμήμα πεπερασμένου όγκου για την μονοδιάσταση εξίσωση αγωγής

Για να γίνει ο υπολογισμός της κλίσης της θερμοκρασίας στο ανατολικό και στο δυτικό όριο του τμήματος Δx , πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι το προφίλ της θερμοκρασίας βρίσκεται εντός ενός πλέγματος. Μια λογική υπόθεση θα ήταν ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των σημείων του πλέγματος όπως φαίνεται στο σχήμα 1.14. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια απευθείας εκτίμηση των πρώτων δύο όρων της σχέσης (1.24).



Σχήμα 1.14: Γραμμικό προφίλ θερμοκρασίας

Σχετικά με τον όρο της πηγής παραγωγής θερμότητας της σχέσης (1.24), γίνεται η υπόθεση ότι ο μέσος όρος του S επικρατεί σε όλο τον πεπερασμένο όγκο. Έτσι η (1.24) αλάζει στην εξίσωση (1.25).

$$\frac{k_e(T_E - T_P)}{\Delta x_e} - \frac{k_w(T_P - T_W)}{\Delta x_w} + \bar{S}\Delta x = 0 \quad (1.25)$$

Στην διακριτοποίηση πεπερασμένων όγκων δεν είναι απαραίτητο οι αποστάσεις Δx_e και Δx_w να είναι ίσες. Στην πραγματικότητα η μη ομοιόμορφη τμηματοποίηση του πλέγματος είναι συχνά επιθυμητή γιατί με αυτόν τον τρόπο γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της ισχύος των υπολογιστών. Γενικά μια ακριβής λύση θα υπολογιστεί όταν το πλέγμα θεωρείται επαρκώς ικανοποιητικό. Από την άλλη δεν είναι απαραίτητη η χρήση τέλειων πλεγμάτων σε περιοχές όπου η μεταβλητή μεταβάλλεται αργά με τις συντεταγμένες, ενώ προτείνεται η χρήση τέλειων πλεγμάτων όταν η μεταβολή των μεταβλητών είναι απότομη.

Οι εξισώσεις ροής, εκτός από όρους πίεσης και πηγών θερμότητας, περιέχουν επίσης όρους συναγωγής. Η εξίσωση που περιλαμβάνει τους όρους διάχυσης και συναγωγής δίνεται από την σχέση (1.26).

$$\frac{d}{dx}(\rho u \theta) = \frac{d}{dx}\left(\Gamma \frac{d\theta}{dx}\right) \quad (1.26)$$

Στην σχέση (1.26) η μεταβλητή θ παριστάνει οποιαδήποτε μεταβλητή ροής όπως είναι η ταχύτητα για μια δοσμένη διεύθυνση ή η θερμοκρασία και η μεταβλητή Γ είναι ο συντελεστής διάχυσης (diffusion coefficient), ο οποίος παριστάνει το ιξώδες για την εξίσωση ορμής ή την αγωγιμότητα για την εξίσωση ενέργειας. Ο όρος u υποδεικνύει ότι η συναγωγή γίνεται μέσω του πεδίου της ταχύτητας.

Αν ολοκληρωθεί η σχέση (1.26) για το τμήμα Δx του σχήματος 1.13, όπως έγινε και στην περίπτωση της εξίσωσης αγωγής θερμότητας, τότε προκύπτουν οι σχέσεις (1.27) και (1.28).

$$\int_w^e \frac{d}{dx}(\rho u \theta) dx = \int_w^e \frac{d}{dx}\left(\Gamma \frac{d\theta}{dx}\right) dx \quad (1.27)$$

$$(\rho u \theta)_e - (\rho u \theta)_w = \left(\Gamma \frac{d\theta}{dx}\right)_e - \left(\Gamma \frac{d\theta}{dx}\right)_w \quad (1.28)$$

Οι όροι συναγωγής του αριστερού τμήματος της σχέσης (1.28) μπορούν να αντικατασταθούν αν υποθεθεί ομοιόμορφη τμηματοποίηση του πλέγματος. Είναι:

$$\theta_e = \frac{1}{2}(\theta_E + \theta_P) \quad (1.29)$$

$$\theta_w = \frac{1}{2}(\theta_P + \theta_W) \quad (1.30)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (1.29) και (1.30) στο αριστερό τμήμα της εξίσωσης (1.28) προκύπτει ο όρος (1.31).

$$\frac{1}{2}(\rho u)_e(\theta_E + \theta_P) - \frac{1}{2}(\rho u)_w(\theta_P + \theta_W) \quad (1.31)$$

Αν θεωρηθεί σταθερή η ποσότητα ρu , άρα και $(\rho u)_e$ και $(\rho u)_w$, τότε ο όρος (1.31) παίρνει τη μορφή της σχέσης (1.32).

$$\frac{1}{2}(\rho u)(\theta_E + \theta_P) - \frac{1}{2}(\rho u)(\theta_P + \theta_W) = \frac{1}{2}(\rho u)(\theta_E - \theta_W) \quad (1.32)$$

Ο όρος συναγωγής μετατράπηκε σε ένα δεύτερης τάξης σχήμα κεντρικής διαφοράς (central difference scheme). Όμως αυτό το σχήμα οδηγεί σε ασταθή λύση πράγμα το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Για αυτό χρησιμοποιείται το σχήμα τύπου Upwind για τους όρους συναγωγής. Για το σχήμα Upwind οι σχέσεις μεταξύ των θ συνοψίζονται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Σχέσεις μεταξύ των θ για $u > 0$ και $u < 0$

$u > 0$	$\theta_e = \theta_P$	$\theta_w = \theta_W$
$u < 0$	$\theta_e = \theta_E$	$\theta_w = \theta_P$

Επομένως για μια θετική τιμή u , ο όρος συναγωγής της σχέσης (1.28) γίνεται:

$$(\rho u)_e \theta_P - (\rho u)_w \theta_W \quad (1.33)$$

Αν ξανά θεωρηθεί σταθερή η ποσότητα ρu , παρατηρείται ότι ο όρος (1.33) είναι ισοδύναμος με ένα σχήμα πρώτης τάξης που παράγει μια σταθερή λύση υπό συνθήκη. Για να γίνει κατανοητό αυτό, έστω $\rho u = 2$. Είναι:

$$2\theta_P - 2\theta_W = \theta_P + \theta_P - \theta_W - \theta_W \quad (1.34)$$

Προσθαιρείται το θ_E από το δεξιό τμήμα της σχέσης (1.35):

$$\theta_P + \theta_P - \theta_W - \theta_W = \theta_P + \theta_P - \theta_W - \theta_W + \theta_E - \theta_E \quad (1.35)$$

Μεταφέρονται όλοι οι όροι στο δεξιό τμήμα της σχέσης (1.35):

$$(\theta_E - \theta_W) - (\theta_E + \theta_W - 2\theta_P) \quad (1.36)$$

Η διαφορά $\theta_E - \theta_W$ του όρου (1.36) είναι ανάλογη με την παράγωγο πρώτης τάξης της συνάρτησης πεδίου ενώ το άθροισμα $\theta_E + \theta_W - 2\theta_P$ είναι ανάλογο με την παράγωγο δεύτερης τάξης της συνάρτησης πεδίου. Επομένως το σχήμα Upwind πρώτης τάξης για τον όρο συναγωγής είναι μια διακριτοποίηση του όρου (1.37).

$$\frac{d\theta}{dx} + \alpha \frac{d^2\theta}{dx^2} \quad (1.37)$$

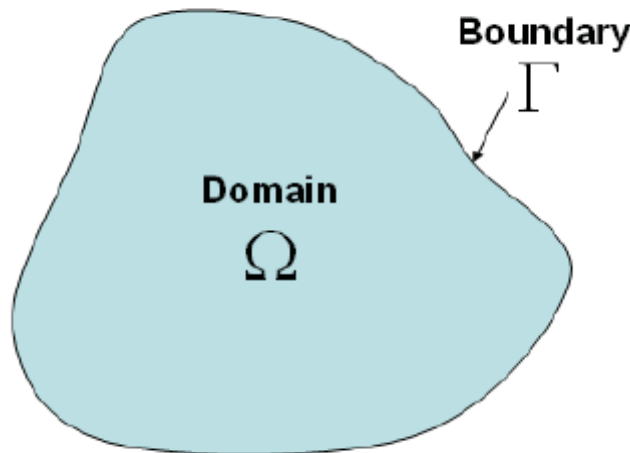
Τελικά ένα ασταθές σχήμα κεντρικής διαφοράς σταθεροποιήθηκε με την προσθήκη ενός όρου διάχυσης. Ο όρος διάχυσης δεν είναι φυσικός αλλά αριθμητικός. Η βασική ιδέα των σχημάτων όπως είναι το σχήμα Upwind είναι η πρόσθεση μια μικρής αλλά επαρκούς ποσότητας διασκεδασμού (dissipation) έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί στο σχήμα και να οδηγήσει σε ακριβή λύση των διαφορικών εξισώσεων.

Η επέκταση του προβλήματος σε δύο ή τρεις διαστάσεις ακολουθεί τις ίδες βασικές αρχές. Χρησιμοποιείται η ίδια λογική που χρησιμοποιήθηκε στο απλό πρόβλημα αγωγής θερμότητας. Έτσι, το πρόβλημα αγωγής θερμότητας σε δύο διαστάσεις και στην στάσιμη κατάσταση διατυπώνεται από την σχέση (1.38).

$$\frac{d}{dx}\left(k \frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(k \frac{dT}{dy}\right) + S = 0 \quad (1.38)$$

Υποθέτοντας ότι είναι επιθυμητή η λύση της εξίσωσης (1.38) στην περιοχή Ω με σύνορο Γ όπως φαίνεται στο σχήμα 1.15. Για να επιλυθεί η εξίσωση με την μέθοδο πεπαρασμένων όγκων, ολοκληρώνεται η εξίσωση (1.38) στην περιοχή Ω :

$$\int_{\Omega} \left[\frac{d}{dx}\left(k \frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(k \frac{dT}{dy}\right) \right] d\Omega + \int_{\Omega} S d\Omega = 0 \quad (1.39)$$

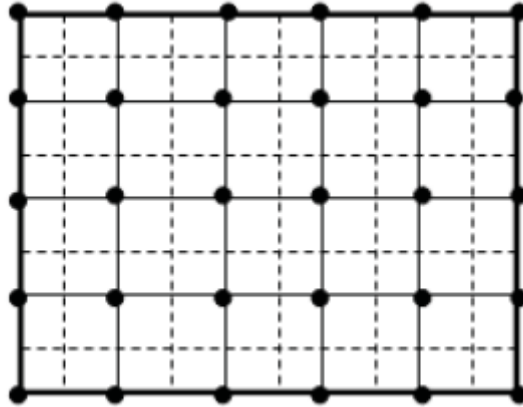


Σχήμα 1.15: Πεδίο λύσης Ω και σύνορο Γ

Το ολοκλήρωμα της σχέσης (1.39) είναι ισοδύναμο με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα (1.40).

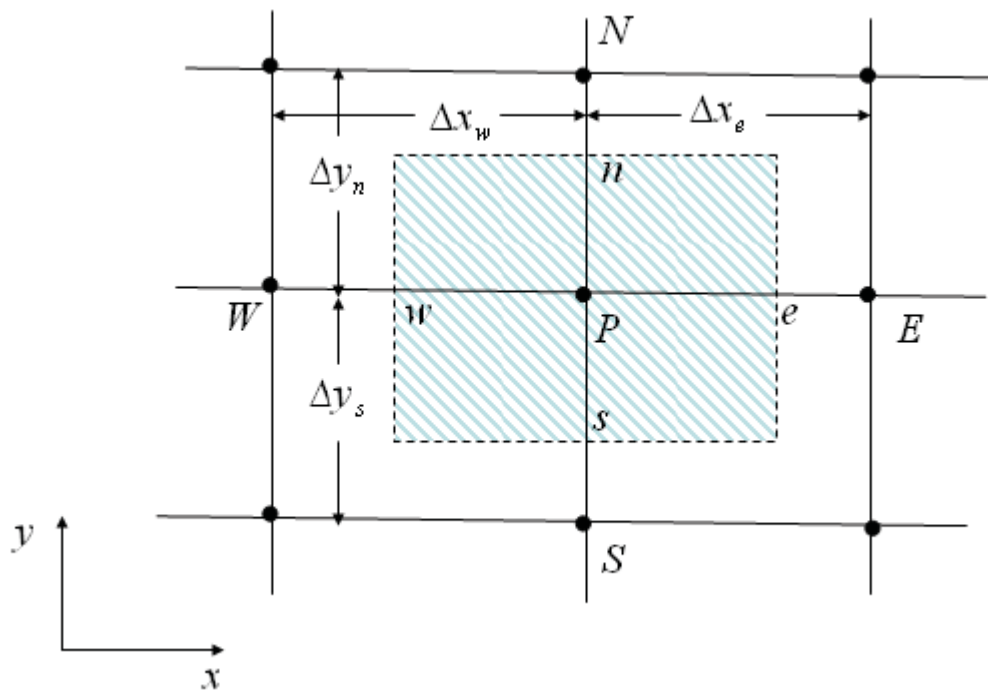
$$\int_{\Omega} \left[\frac{d}{dx}\left(k \frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(k \frac{dT}{dy}\right) \right] d\Omega = \oint_{\Gamma} \left[k \frac{dT}{dx} + k \frac{dT}{dy} \right] d\Gamma \quad (1.40)$$

Άρα το ολοκλήρωμα όγκου αντικαταστάθηκε από ένα ολοκλήρωμα ρών μέσω του συνόρου Γ της περιοχής Ω . Αν το πεδίο λύσης υποδιαιρεθεί σε ένα μεγάλο αριθμό μη επικαλυπτόμενων όγκων, τότε η εξίσωση (1.40) μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε όγκο με την σειρά και έτσι να γίνει η απαιτούμενη διακριτοποίηση.



Σχήμα 1.16: Πλέγμα πεπερασμένου όγκου και κελιά (cells)

Ός παράδειγμα θεωρείται το απλό ορθογώνιο πεδίο τους σχήματος 1.16. Το πεδίο διακριτοποιείται χρησιμοποιώντας ένα κανονικό πλέγμα. Τα σημεία του πλέγματος παριστάνονται από τις τελείες στις κορυφές του ορθογωνίου και τα κελιά πεπερασμένου όγκου ορίζονται από τις διακεκομμένες γραμμές. Ένα stencil του πλέγματος του σχήματος 1.16 φαίνεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 1.17.



Σχήμα 1.17: Stencil δύο διαστάσεων πεπερασμένου όγκου

Η προσθήκη δύο επιπλέον συνόρων στο κελί πεπερασμένου όγκου ορίστηκε ως N και S για τον βορρά και τον νότο. Τα σύνορα του κελιού ευθυγραμμίστηκαν με τους άξονες συντεταγμένων για να απλοποιηθεί η ολοκλήρωση. Αυτό δεν αποτελεί περιορισμό της μεθόδου πεπερασμένων όγκων καθώς τα επιφανειακά σύνορα

μπορούν να έχουν οποιοδήποτε προσανατολισμό σε σχέση με τους άξονες συντεταγμένων υπό την προϋπόθεση ότι οι ροές διαμέσου των συνόρων υπολογίζονται σωστά. Το κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της εξίσωσης (1.40) μπορεί να εκφραστεί σε τέσσερα τμήματα, κάθε ένα από τα οποία ολοκληρώνεται ανεξάρτητα. Το άθροισμα αυτών των τεσσάρων ολοκληρωμάτων είναι η απαιτούμενη ροή. Οι τέσσερις ροές συνοψίζονται στον πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Ροές στα τέσσερα τμήματα του κελιού

Ανατολική πλευρά	$K_e(T_E - T_P) / \Delta x_e$
Δυτική πλευρά	$K_w(T_P - T_W) / \Delta x_w$
Βορινή πλευρά	$K_n(T_N - T_P) / \Delta y_n$
Νότια πλευρά	$K_s(T_P - T_S) / \Delta y_s$

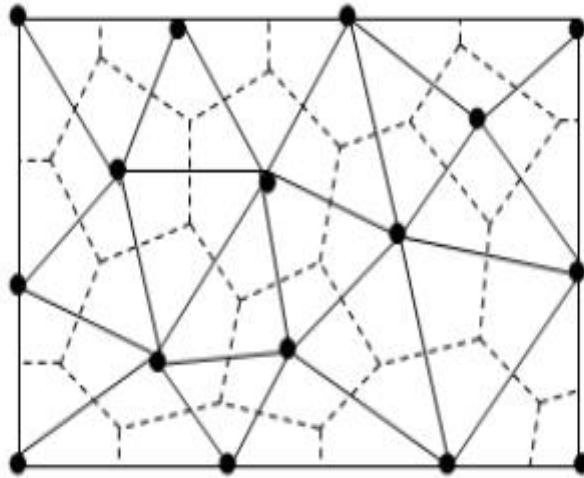
Αν χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος του όρου πηγής θερμότητας S όπως έγινε στην μονοδιάστατη περίπτωση, η διακριτή μορφή της σχέσης (1.39) για το stencil του σχήματος 1.17 δίνεται από την σχέση (1.41).

$$\frac{k_e(T_E - T_P)}{\Delta x_e} + \frac{k_w(T_P - T_W)}{\Delta x_w} + \frac{k_n(T_N - T_P)}{\Delta y_n} + \frac{k_s(T_P - T_S)}{\Delta y_s} + \bar{S}\Delta x\Delta y = 0 \quad (1.41)$$

Η παραπάνω διακριτοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα κελιά και να προκύψουν εξισώσεις παρόμοιες με την (1.41). Για δοσμένες θερμοκρασίες στα σύνορα, μια απευθείας προσθήκη των εξισώσεων για τα σημεία του πλέγματος μπορεί να εφαρμοστεί. Για δοσμένη ροή θερμότητας (κλίση θερμοκρασίας), μπορούν να προστεθούν εικονικά σημεία αντίθετα στα σημεία των συνόρων και να εφαρμοστεί η ίδια στρατηγική με αυτήν που εφαρμόστηκε στην μονοδιάστατη περίπτωση. Αφού προσδιοριστεί το σύστημα εξισώσεων, γίνεται η επίλυση του συστήματος για την εύρεση των άγνωστων θερμοκρασιών.

Όσο αφορά τα αδόμετα πλέγματα (unstructured grids) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια παρόμοια διαδικασία με αυτή των δομημένων πλεγμάτων. Δυο προσεγγίσεις είναι δυνατές. Κατά την πρώτη προσέγγιση που είναι προσανατολισμένη στα κελιά, οι μεταβλητές ροής αναζητούνται στο κέντρο των κελιών και οι ροές υπολογίζονται διαμέσου των ακμών των κελιών. Κατά την δεύτερη προσέγγιση που είναι προσανατολισμένη στις κορυφές των κελιών, τα κελιά ορίζονται γύρω από τα σημεία του πλέγματος δ ενώνοντας τα κέντρα των γειτονικών στοιχείων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18. Τα κελιά παριστάνονται με διακεκομμένες γραμμές. Σε αυτήν την

περίπτωση οι ροές υπολογίζονται μέσω των καινούργιων ακμών ή των εδρών των κελιών.



Σχήμα 1.18: Κελιά πεπερασμένου όγκου ενός αδόμητου πλέγματος

Στην δισδιάστατη περίπτωση κάθε έδρα συμβάλλει στην ροή και στις δύο κατευθύνσεις των συντεταγμένων καθώς τα κάθετα διανύσματα δεν είναι παράλληλα με τις κατευθύνσεις των συντεταγμένων. Εξαιτίας του ακανόνιστου σχήματος του πλέγματος, ένας τρόπος για την διασφάλιση ότι γίνονται σωστοί υπολογισμοί σε περιοχή του κελιού στις δύο διαστάσεις είναι η διαίρεση του κελιού σε τρίγωνα, ο υπολογισμός του κάθε τριγώνου ξεχωριστά και στην συνέχεια η πρόσθεση των επιμέρους τριγώνων. Στην περίπτωση των τριών διαστάσεων η διαδικασία μπορεί να γίνει όμοια διαιρώντας το κάθε κελί σε τετραεδρικά τμήματα, υπολογίζοντας τον όγκο του κάθε τμήματος ξεχωριστά και τελικά προσθέτοντας όλα τα τετραεδρικά τμήματα.

1.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

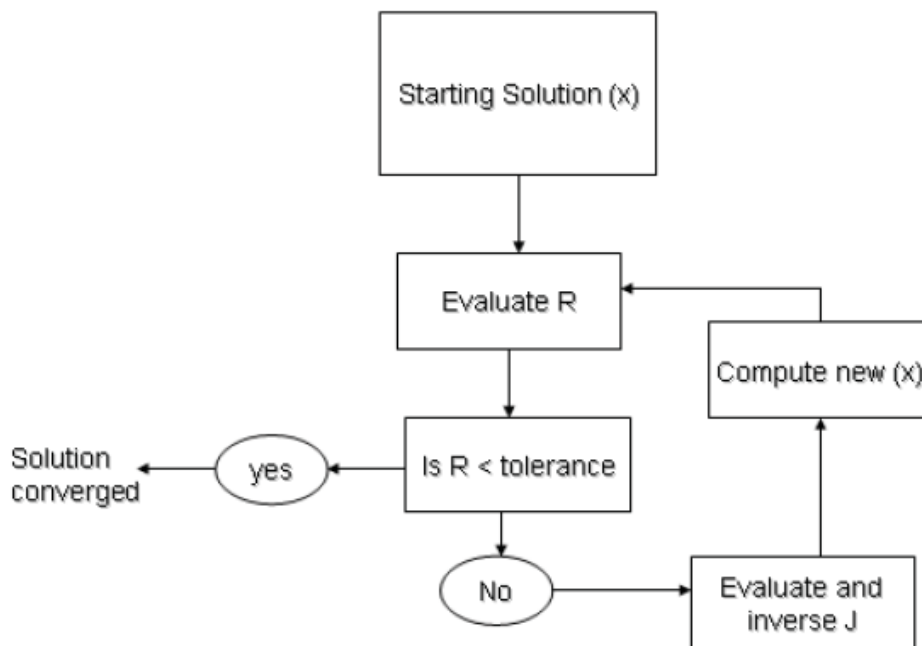
Η μέθοδος Finite Volume που αναλύθηκε στην ενότητα 1.6 αλλά και οι άλλες δύο μέθοδοι διακριτοποίησης, Finite Element και Finite Difference, οδηγούν σε συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων των οποίων οι άγνωστες μεταβλητές πρέπει να βρεθούν στα σημεία του πλέγματος. Το σύστημα των εξισώσεων μπορεί να είναι γραμμικό ή μη γραμμικό ανάλογα με τις βασικές εξισώσεις και την μέθοδο διακριτοποίησης. Οι συνηθισμένες μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων για την απευθείας επίλυση τους μπορεί να μην είναι πρακτικές εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των σημείων του πλέγματος.

$$\{x^{n+1}\} = \{x^n\} - [J^n]^{-1}\{R^n\} \quad (1.48)$$

Όπου n είναι η τρέχουσα επανάληψη και $n+1$ η επόμενη επανάληψη. Η Ιακωβιανή ορίζουσα υπολογίζεται από την εξίσωση (1.49).

$$J = \frac{\partial R}{\partial x} \quad (1.49)$$

Το σύστημα που περιγράφεται από την σχέση (1.48) είναι ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων προς λύση. Το πλεονέκτημα της μεθόδου Newton είναι ότι επιταχύνει την σύγκλιση των μη γραμμικών συστημάτων, ιδιαίτερα αν η αρχική λύση βρίσκεται κοντά στην πραγματική λύση. Το βασικό υπολογιστικό κόστος αυτής της μεθόδου συνίσταται στην αντιστροφή του Ιακωβιανού πίνακα. Το διάγραμμα ροής της μεθόδου Newton φαίνεται στο σχήμα 1.19.



Σχήμα 1.19: Διάγραμμα μεθόδου Newton

Το πρόβλημα της μέθοδου Newton, του υπολογιστικού κόστους της αντιστροφής του Ιακωβιανού πίνακα, επιλύνει η μέθοδος Quasi – Newton. Αυτή η μέθοδος τροποποιεί την σχέση (1.48) έτσι ώστε να προκύψει η σχέση (1.50).

$$\{x^{n+1}\} = \{x^n\} - \omega^n [H^n] \{R^n\} \quad (1.50)$$

Όπου ω είναι μια βαθμωτή ποσότητα και $[H]$ ένας πίνακας που αποτελεί προσέγγιση του αντίστροφου Ιακωβιανού πίνακα. Αν και ο Ιακωβιανός πίνακας είναι αραιός, ο $[H]$ είναι πυκνός.

Ο πίνακας $[H]$ τροποποιείται καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων έως ότου ο $[H]$ προσεγγίσει τον αντίστροφο Ιακωβιανό πίνακα σε σύγκλιση με την κατάλληλη επιλογή του ω . Η αρχική τιμή του $[H]$ είναι υποθετική και η επαναληπτική διαδικασία ορίζεται στις σχέσεις (1.51).

$$\{P^n\} = -\omega^n [H^n] \{R^n\}$$

$$\{\alpha^n\} = \frac{1}{\{P^n\}^T (\{R^{n+1}\} - \{R^n\})} \quad (1.51)$$

$$[H^{n+1}] = [H^n] - \{\alpha^n\} \left([H^n] (\{R^{n+1}\} - \{R^n\}) \{P^n\}^T + \{P^n\} (\{R^{n+1}\} - \{R^n\}) [H^n] \right)$$

Γραμμικά συστήματα επίσης μπορούν να προκύψουν από την διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων οι οποίες δεν είναι μη γραμμικές, όπως είναι οι εξισώσεις αγωγής θερμότητας και παρόμοιες εξισώσεις προβλημάτων διάχυσης. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων παίρνει την μορφή της σχέσης (1.42) με τον πίνακα συντελεστών $[A]$ να είναι ανεξάρτητος του πεδίου των μεταβλητών. Για την επίλυση του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος απαλοιφής του Gauss (Gauss elimination algorithm). Όμως η επιτυχής εφαρμογή του αλγορίθμου εξαρτάται από τις ιδιότητες του πίνακα $[A]$. Για παράδειγμα, για ένα πυκνό πίνακα με λίγους μη μηδενικούς συντελεστές, ο πίνακας αναλύεται με την μέθοδο LU decomposition, δηλαδή διαχωρίζεται σε ένα ανω τριγωνικό και σε ένα κάτω τριγωνικό πίνακα (1.5).

$$c'_1 = \frac{c_1}{d_1}, \quad d'_1 = \frac{d_1}{d_1} \quad (1.54)$$

$$c'_i = \frac{c_i}{b_i - a_i c'_{i-1}}, \quad d'_i = \frac{d_i - a_i d'_{i-1}}{b_i - a_i c'_{i-1}} \quad (1.55)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & c'_1 & & & \\ & 1 & c'_2 & & \\ & & 1 & c'_3 & \\ & & & 1 & c'_4 \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \\ d'_4 \\ d'_n \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

Στο δεύτερο στάδιο το σύστημα προς επίλυση παίρνει την μορφή των σχέσεων (1.57)

$$x_n = d'_n \quad (1.57)$$

$$x_i = d'_i - x_{i+1} c'_i$$

Οι επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης των συστημάτων εξισώσεων είναι αφενός το πλεονέκτημα ότι οι απαιτήσεις μνήμης είναι σημαντικές λιγότερες γιατί ο πίνακας του συστήματος δεν αποθηκεύεται και αφετέρου το μειωμένο υπολογιστικό κόστος. Αν και επαναληπτικές μέθοδοι γενικά θεωρούνται κατάλληλες για μη γραμμικά συστήματα, χρησιμοποιούνται τόσο για γραμμικά συστήματα όσο και για μη γραμμικά συστήματα χρησιμοποιώντας διαδικασίες όπως η μέθοδος Newton. Στις επαναληπτικές μεθόδους γίνεται αρχικά η υπόθεση της λύσης του συστήματος εντός των οριακών συνθηκών. Στην συνέχεια η αρχική λύση διαδοχικά τροποποιείται μέσω των επαναλήψεων έως ότου η λύση να συγκλίνει. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν η λύση μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων γίνει μικρότερη από ένα προκαθορισμένο όριο και δεν το ξεπερνά στις επόμενες επαναλήψεις.

Αν υποθεθεί η σχέση (1.42), τότε η Ιακωβιανή μέθοδος ξεκινά με την υπόθεση ότι μια αρχική εκτίμηση της λύσης x_i είναι γνωστή. Η αρχική λύση βρίσκεται στο κλειστό διάστημα που ορίζεται από τις οριακές συνθήκες. Η επαναληπτική διαδικασία προσδιορίζεται από την σχέση (1.57).

$$x_i^{n+1} = \frac{B_i - \left(\sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^n A_{ij} x_j^n \right)}{A_{ii}} \quad (1.57)$$

Το πρώτο σημαντικό χαρακτηριστικό της Ιακωβιανής μεθόδου είναι ότι το διάνυσμα $A_{ij}x_j^n$ δημιουργείται άμεσα κατά την διάρκεια των υπολογισμών και δεν είναι απαραίτητο να αποθηκευτεί όλος ο πίνακας. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι δυο διανύσματα λύσεων πρέπει να αποθηκεύονται γιατί η λύση της τρέχουσας επανάληψης εξαρτάται από την λύση της προηγούμενης επανάληψης. Αν και η Ιακωβιανή μέθοδος είναι απλή, είναι υπολογιστικά δαπανηρή γιατί χρειάζεται πολλές επαναλήψεις ώστε να συγκίνει τελικά η λύση.

Μια βελτίωση της Ιακωβιανής μεθόδου αποτελεί η μέθοδος Gauss – Seidel. Η μέθοδος Gauss – Seidel είναι παρόμοια με την Ιακωβιανή μέθοδο, με την διαφορά ότι οι τιμές του διανύσματος λύσης x_i^{n+1} χρησιμοποιούνται στο δεξιό τμήμα της σχέσης (1.57). Έτσι οι λύσεις δίνονται από την σχέση (1.58).

$$x_i^{n+1} = \frac{B_i - \left(\sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} x_j^{n+1} \right) - \left(\sum_{j=i+1}^n A_{ij} x_j^n \right)}{A_{ii}} \quad (1.58)$$

Η μέθοδος Gauss – Seidel είναι μέχρι και δύο φορές ταχύτερη από την Ιακωβιανή μέθοδο και σε κάθε περίπτωση η λύση συγκλίνει όταν οι τιμές του κέντρου βάρους των τιμών του πίνακα A βρίσκονται στην διαγώνιο του. Η μέθοδος Gauss – Seidel μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω αν το διάνυσμα λύσης x_i^{n+1} εκτιμηθεί ως σταθμισμένος μέσος όρος της τιμής στην τρέχουσα επανάληψη και της τιμής στην επόμενη επανάληψη χρησιμοποιώντας μια ειδική παράμετρο (relaxation parameter), η οποία διαφέρει από πρόβλημα σε πρόβλημα.

Μια ακόμα μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της αποδοτικότητας της είναι η μέθοδος συζυγών κλίσεων (Conjugate Gradients method). Στην μέθοδο συζυγών κλίσεων γίνεται μια εκτίμηση των ιδιοτιμών του πίνακα του συστήματος. Η επανάληπτική ανάλυση των ιδιοτιμών μπορεί να γίνει η βάση για αρκετές εναλλακτικές εφαρμογές αυτής της μεθόδου. Η μέθοδος συζυγών κλίσεων περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

- Γίνεται μια αρχική υπόθεση της λύσης x της εξίσωσης (1.42).
- Υπολογίζεται ένα αρχικό προκαθορισμένο διάνυσμα $z_0 = M^{-1}r^0$, όπου M μία προσέγγιση του A που είναι εύκολο να αντιστραφεί. Όσο πιο κοντά στον A είναι ο M τόσο πιο αποδοτικός ο αλγόριθμος.

- Υπολογίζεται το αρχικό υπόλοιπο $r_0 = b - Ax_0$ και τίθεται $p_0 = r_0$.
- Υπολογίζεται το διάνυσμα $q_k = Ar_k$, για την k επανάληψη.
- Υπολογίζεται η παράμετρος $\alpha_k = (r_k, r_k) / (q_k, r_k)$, όπου για δύο διανύσματα m και n το εσωτερικό γινόμενο τους είναι $(m, n) = \sum m_i n_i$.
- Υπολογίζεται η μεταβλητή για την νέα επανάληψη, $x_{k+1} = x_k + \alpha_k r_k$.
- Υπολογίζεται το υπόλοιπο για την νέα επανάληψη, $r_{k+1} = r_k - \alpha_k q_k$.
- Υπολογίζεται το προκαθορισμένο διάνυσμα για την νέα επανάληψη, $z_{k+1} = M^{-1} r_{k+1}$.
- Υπολογίζεται νέα βαθμωτή ποσότητα $\beta_k = (r_{k+1}, z_{k+1}) / (r_k, z_k)$.
- Υπολογίζεται νέα παράμετρος $\rho_{k+1} = z_{k+1} + \beta_k r_k$.
- Ορίζεται νέος δείκτης επανάληψης $k = k + 1$.
- Ελέγχεται αν έχει επιτευχθεί η σύγκλιση. Αν δεν έχει επιτευχθεί επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το βήμα 4.

Οι πολυπλεγματικές μέθοδοι (Multigrid methods) μπορούν να εφαρμοστούν επίσης τόσο στα γραμμικά όσο και στα μη γραμμικά συστήματα. Οι πολυπλεγματικές μέθοδοι βασίζονται στην αρχή ότι η λύση αναζητείται στο τέλειο πλέγμα (fine grid). Τα υπόλοιπα πλέγματα θεωρούνται ακανόνιστα (coarse grids) του ίδιου πεδίου λύσης. Ο σκόπος είναι να χρησιμοποιηθούν τα ακανόνιστα πλέγματα για την απόσβεση των ταλαντώσεων υψηλών συχνοτήτων της λύσης και να επεκταθούν οι διορθώσεις στο τέλειο πλέγμα. Το τελευταίο επιταχύνει την διαδικασία επαναλήψεων και την επίτευξη σύγκλισης. Αν θεωρηθεί ένας αριθμός πλεγμάτων από 1 έως M , όπου M είναι το τέλειο πλέγμα. Η λύση που αναζητείται είναι αυτή του συστήματος της σχέσης (1.59).

$$A^M x^M = b^M \quad (1.59)$$

Η προσέγγιση της λύσης x^M δίνεται από την λύση του επόμενου ακανόνιστου πλέγματος x^{M-1} . Για κάθε ενδιάμεσο πλέγμα η λύση αναζητείται στο επόμενο ακανόνιστο πλέγμα, δηλαδή η λύση οποιουδήποτε πλέγματος x^i θεωρείται μια καλή προσέγγιση της λύσης του καλύτερου πλέγματος x^{i+1} . Αν η προσεγγιστική λύση αντικατασταθεί στην σχέση (1.59) προκύπτει το υπόλοιπο που δίνεται από την σχέση (1.60).

$$b^{M+1} - A^{M+1} x^{M+1,c} = R^{M+1} \quad (1.60)$$

Όπου $x^{M+1,c}$ είναι η προσέγγιση της λύσης του πλέγματος $M+1$ όπως προκύπτει από την παρεμβολή (interpolation) του πλέγματος M . Το υπόλοιπο πρέπει να ικανοποιεί την σχέση (1.61).

$$A^{M+1}W^{M+1} = R^{M+1} \quad (1.61)$$

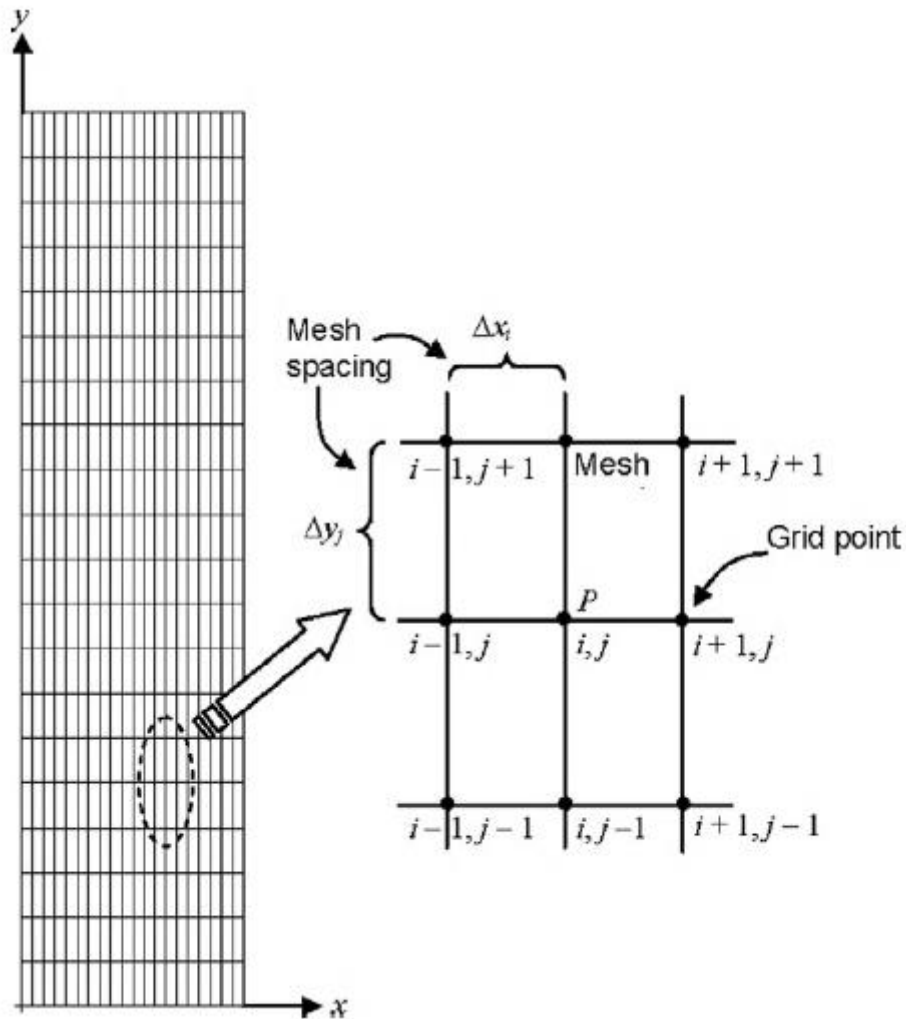
Όπου W είναι η διόρθωση της λύσης. Αν R και W είναι ομαλές συναρτήσεις (smooth functions), η υψηλότερη συχνότητα που μπορεί να παρασταθεί στο ακανόνιστο πλέγμα είναι ανάλογη με το μέγεθος του πλέγματος και συνεπώς οι υψηλότερες συχνότητες αποσβένονται στα ακανόνιστα πλέγματα. Μια τυπική πολυπλεγματική μέθοδος λοιπόν αποτελείται από μια πολυπλεγματική διαδικασία κατά την οποία οι λύσεις προκύπτουν από τα ακανόνιστα πλέγματα και οι διορθώσεις εφαρμόζονται διαδοχικά στα λιγότερα ακανόνιστα πλέγματα. Μόλις η επαναληπτική διαδικασία φτάσει στο τέλειο πλέγμα, οι λύσεις προωθούνται διαδοχικά πίσω στα πιο ακανόνιστα πλέγματα έως ότου η λύση να συγκλίνει.

1.8 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

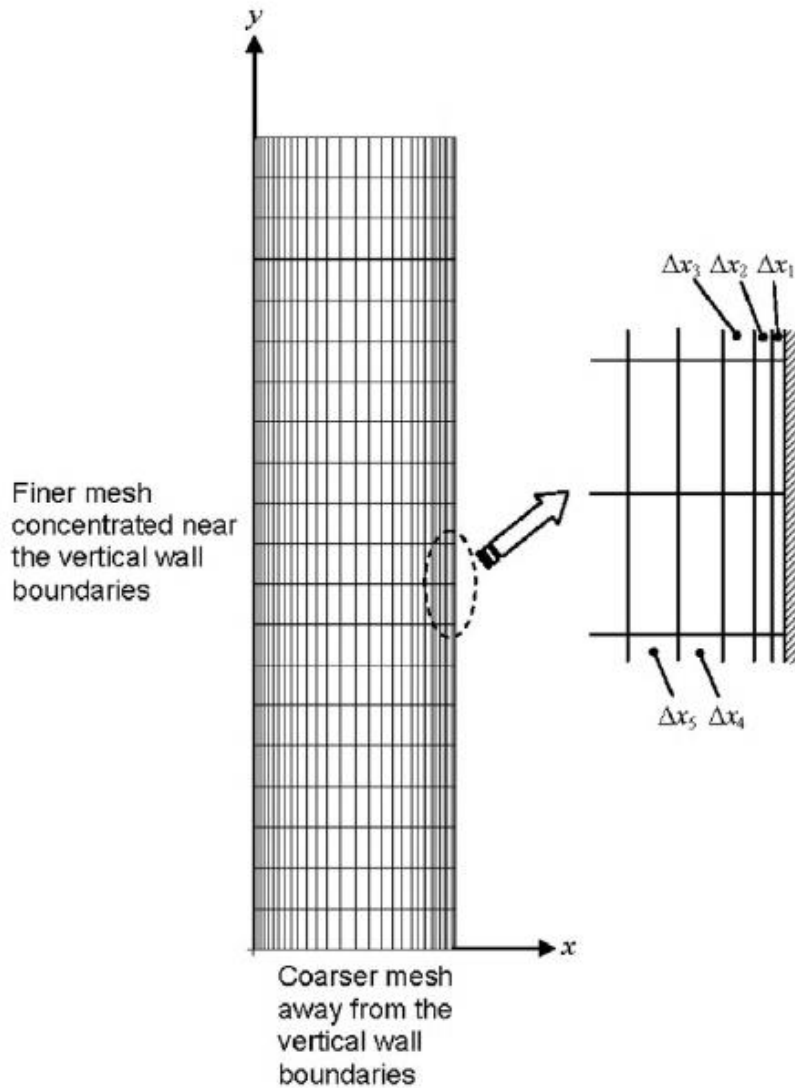
Η παραγωγή πλέγματος (grid / mesh generation) είναι μια σημαντική παράμετρος όσο αφορά στις αριθμητικές λύσεις των βασικών μερικών διαφορικών εξισώσεων της CFD. Ένα καλά δομημένο πλέγμα επηρεάζει σημαντικά τους αριθμητικούς υπολογισμούς, γιατί όχι μόνο αποφεύγονται προβλήματα που οδηγούν σε προφανή αστάθεια ή έλλειψη σύγκλισης αλλά επιπρόσθετα αυξάνει την πιθανότητα εύρεσης της λύσης ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η CFD απαιτεί την υποδιαίρεση του πεδίου υπολογισμών σε μικρότερα τμήματα που ονομάζονται κελιά σε όλη την έκταση του πεδίου. Έτσι αναμένεται ότι το διακριτοποιημένο πεδίο πρέπει να επιλύει τα σημαντικά θέματα φυσικής και να λαμβάνει υπόψη όλες τις γεωμετρικές λεπτομέρειες εντός της περιοχής της ροής. Ο σχεδιασμός του κατάλληλου πλέγματος θεωρείται καθοριστικός παράγοντας.

Ο πιο απλός τύπος πλέγματος είναι το δομημένο πλέγμα. Ένα ομοιόμορφο καρτεσιανό πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 1.20 στο οποίο η τμηματοποίηση των σημείων του πλέγματος μαζί με την x και y διεύθυνση είναι ομοιόμορφη. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ένα τμήμα του διακριτού πλέγματος στο σύστημα $x - y$ και τα ορθογώνια που ορίζονται από τέσσερα διακριτά σημεία του πλέγματος. Σε ένα δισδιάστατο δομημένο πλέγμα, τα σημεία του πλέγματος έχουν διευθύνσεις με δείκτες (i, j) , όπου ο δείκτης i αντιπροσωπεύει τα σημεία στον άξονα x και ο δείκτης j τα σημεία στον άξονα y . Τα γειτονικά σημεία του (i, j) προσδιορίζονται αυξάνοντας ή μειώνοντας του δείκτης ανάλογα κατά μια μονάδα. Κατανέμοντας κατάλληλες διακριτές τιμές Δx_i και Δy_j οι συντεταγμένες στους δύο άξονες μπορούν σταδιακά να προσδιοριστούν και τελικά να δημιουργηθεί ένα ορθογώνιο πλέγμα που καλύπτει όλο το πεδίο.

Στην περίπτωση του μη ομοιόμορφου πλέγματος οι διακριτές τιμές Δx_i και Δy_j μπορούν να πάρουν διαφορετικές τιμές έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί η ανισότητα των τμημάτων και στις δύο διευθύνσεις. Για παράδειγμα ένα καλά τμηματοποιημένο πλέγμα στον άξονα x για να επιλύσει το ιζώδες συνοριακό επίπεδο της πολυφασικής ροής, ενώ παράλληλα να διατηρηθεί η ανομοιομορφία στον άξονα y όπως φαίνεται στο σχήμα 1.21. Αυτού του τύπου το πλέγμα ονομάζεται παραμορφωμένο (stretched mesh) γιατί τα σημεία του πλέγματος συγκεντρώνονται στα συνοριακά τοιχώματα (wall boundaries).



Σχήμα 1.20: Ομοιόμορφο ορθογώνιο πλέγμα

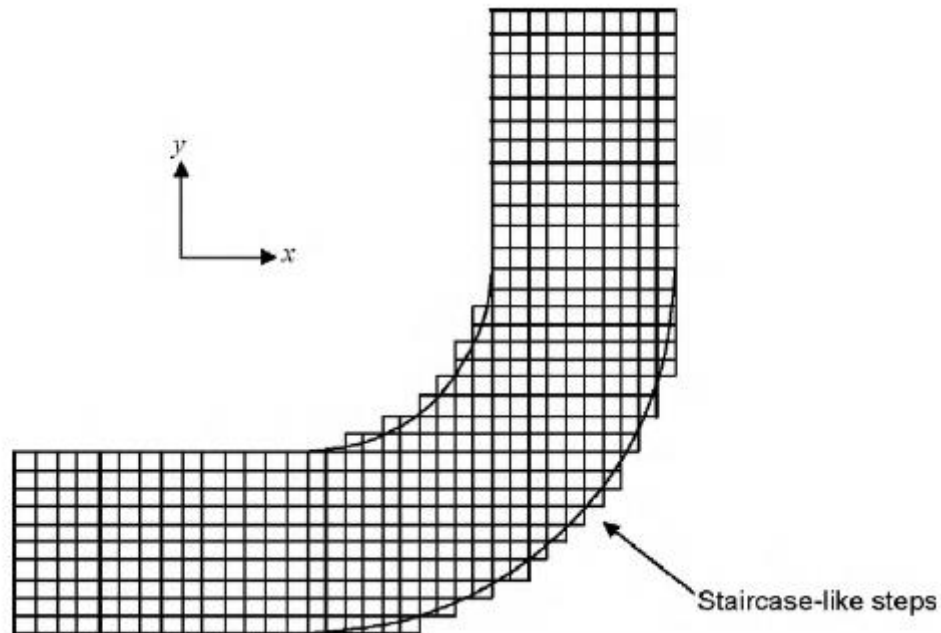


Σχήμα 1.21: Μη ομοιόμορφο ορθογώνιο πλέγμα

Στην περίπτωση των τριών διαστάσεων κάθε σημείο του πλέγματος προσδιορίζεται από τρεις δείκτες (i, j, k), όπου k αντιπροσωπεύει τα σημεία στον άξονα k . Η προσθήκη μιας επιπλέον διάστασης χρειάζεται την γνώση της τμηματοποίησης Δz_k μαζί με τις διακριτές τιμές Δx_i και Δy_j έτσι ώστε να κατασκευαστεί το πλέγμα που θα καλύπτει όλη την τρισδιάσταση γεωμετρία.

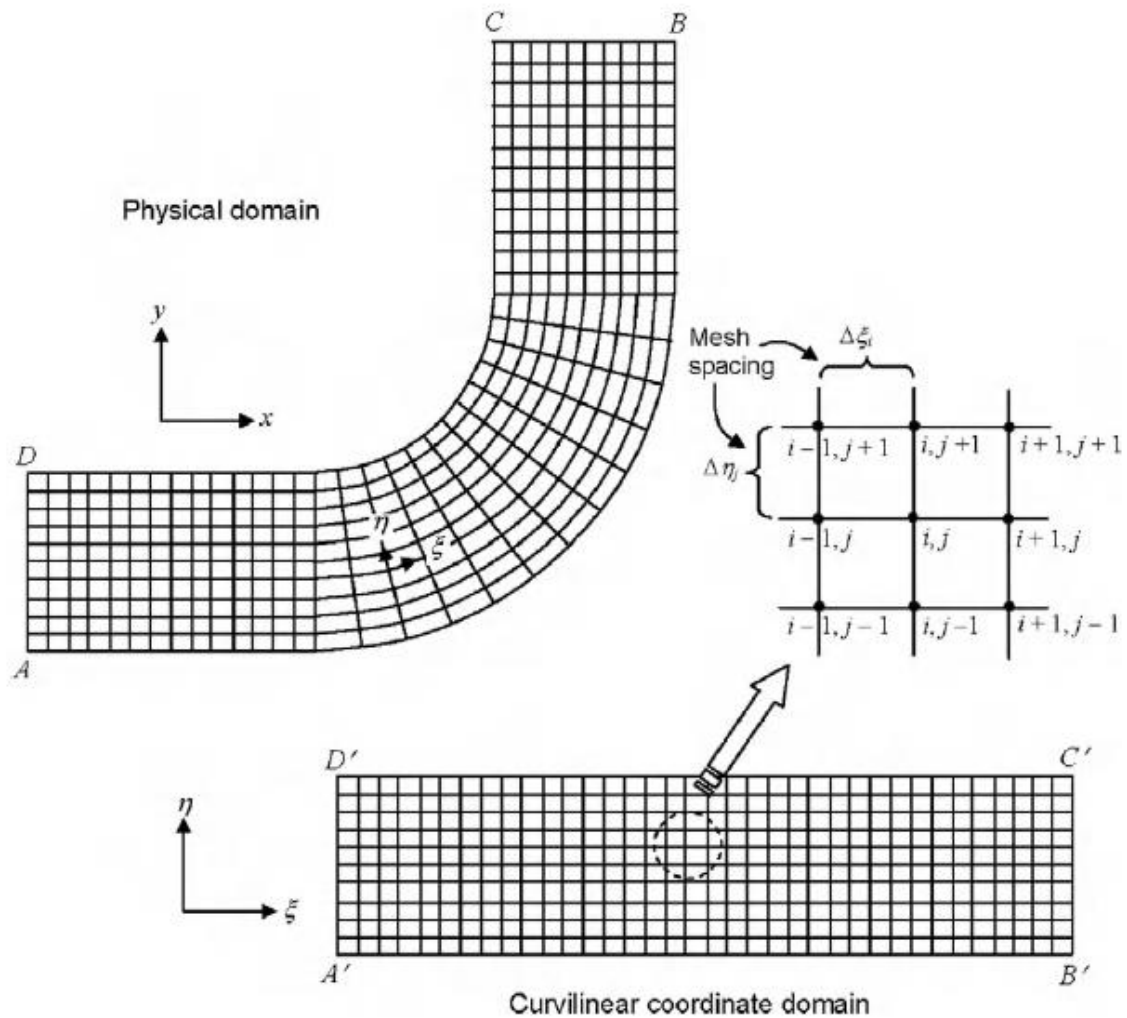
Έστω ένα πρόβλημα ροής εντός μιας στροφής 90° όπως φαίνεται στο σχήμα 1.22. Για να εφαρμοστεί ένα ορθογώνιο πλέγμα σε αυτή την γεωμετρία γίνεται συμβιβασμός όσο αφορά το τμήμα καμπύλης μέσω χαρακτηρισμού του συνόρου με σκαλοπάτια (staircase-like steps). Όμως αυτή η προσέγγιση έχει δύο προβλήματα: Πρώτον η προσεγγιστική περιγραφή του συνόρου είναι χρονοβόρα και δεύτερον τα σκαλοπάτια στο σύνορο εισάγουν σφάλματα στους υπολογισμούς των πιέσεων των τοιχωμάτων, των ροών θερμότητας κτλ. Αυτό το παράδειγμα αποδεικνύει ότι μέθοδοι

υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που βασίζονται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων έχουν περιορισμούς όσο αφορά στα μη συμβατικά σχήματα.



Σχήμα 1.22: Παράδειγμα πλέγματος που χρησιμοποιεί σκαλοπάτια για τον χαρακτηρισμό της στροφής 90°

Για να εφαρμοστεί το λεγόμενο body – fitted πλέγμα στην γεωμετρία του σχήματος 1.22 πρέπει τα τοιχώματα να προσαρμοστούν με τις γραμμές μιας σταθεράς n . Ακολούθως η τοποθεσία σε αυτή την γεωμετρία, π.χ. από A στο B, αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες τιμές του ξ στο υπολογιστικό πεδίο. Αντίστοιχα σημεία των διαδρομών AB και CD συνδεδεμένα με μια συγκεκριμένη γραμμή n θα έχουν την ίδια τιμή ξ αλλά διαφορετική τιμή n . Για ένα σημείο (i, j) κατά μήκος της γραμμής n ισχύει $\xi = \xi_i$ και $n = n_j$. Ένα σημείο με $x = x(\xi_i, n_j)$ και $y = y(\xi_i, n_j)$ στο υπολογιστικό πεδίο έχει ένα αντίστοιχο σημείο στο φυσικό πεδίο.



Σχήμα 1.23: Παράδειγμα body – fitted πλέγματος για γεωμετρία στροφής 90° και η αντίστοιχη υπολογιστική γεωμετρία.

Στο σχήμα 1.22 πρέπει να οριστεί ο μετασχηματισμός έτσι ώστε να υπάρχει μια προς μια αντιστοιχία μεταξύ του ορθογώνιου πλέγματος στο υπολογιστικό πεδίο και του καμπυλόγραμμου πεδίου στο φυσικό πεδίο. Οι αλγεβρικοί μετασχηματισμοί των βασικών εξισώσεων ροής για πολυφασικά προβλήματα πραγματοποιούνται στο υπολογιστικό πεδίο, το οποίο έχει ομοιόμορφη τμηματοποίηση όσο αφορά τα $\Delta\eta$ και $\Delta\xi$. Επειδή χρειάζεται οι εξισώσεις να επιλυθούν στο υπολογιστικό πεδίο, πρέπει οι εξισώσεις να εκφραστούν σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες αντί σε καρτεσιανές συντεταγμένες, το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να γίνει ο μετασχηματισμός $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta)$. Η κατασκευή του πλέγματος της εσωτερικής περιοχής του φυσικού πεδίου μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες μπορούν να προσδιοριστούν αλγεβρικά μέσω της παρεμβολής των συνοριακών τιμών. Δεύτερον ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων των αντίστοιχων καρτεσιανών συντεταγμένων μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά θέτοντας τις συνοριακές τιμές ως

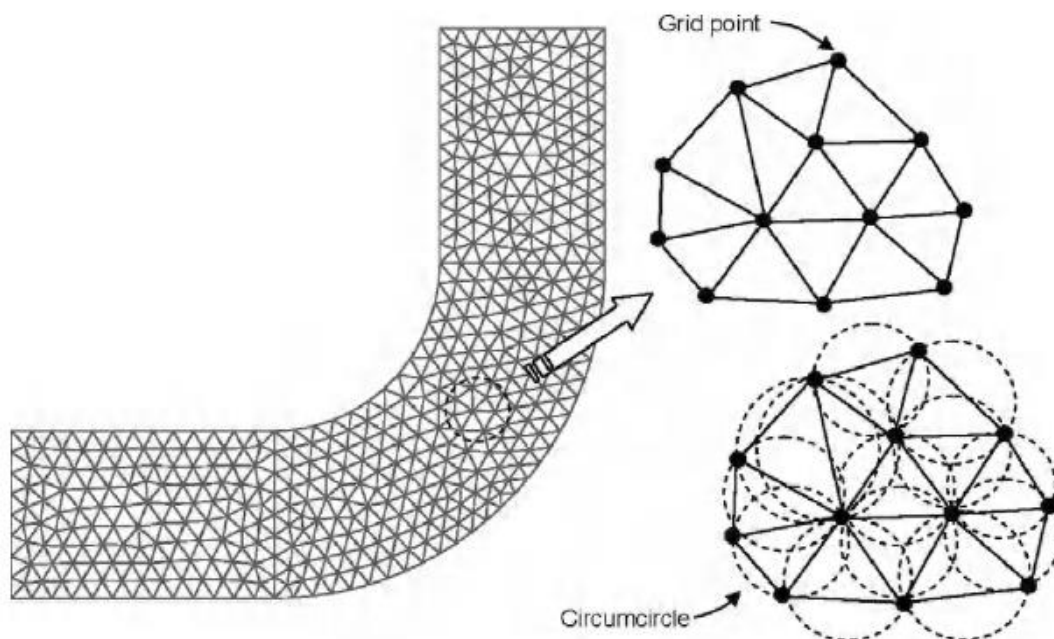
συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να προκύψει ένα ομαλό πλέγμα (smooth mesh) στο φυσικό πεδίο. Οι δύο αυτοί τρόποι ονομάζονται transfinite interpolation και elliptic grid – generation αντίστοιχα.

Ως εναλλακτική στο body – fitted πλέγμα, ένα αδόμητο πλέγμα (unstructured mesh) μπορεί να κατασκευαστεί για να συμπληρωθεί η εσωτερική περιοχή της στροφής 90° όπως φαίνεται στο σχήμα 1.23. Παρατηρείται από το σχήμα 1.24 ότι δεν υπάρχει κανονικότητα στην διάταξη των κελιών. Δεν υπάρχουν γραμμές συντεταγμένες που αντιστοιχούν στις καμπυλόγραμμες διευθύνσεις ξ και η όπως στο body – fitted πλέγμα και τα κελιά είναι απολύτως αδόμητα. Έτσι επιτρέπεται η μέγιστη ευελιξία για το ταίριασμα των κελιών, ιδιαίτερα αυτών με πολύ καμπυλόγραμμο σύνορα και η εισαγωγή των απαιτούμενων κελιών για να επιλυθούν οι περιοχές ροής.

Οι συνηθέστεροι τύποι παραγωγής αδόμητων πλεγμάτων είναι τα τριγωνικά και τα τετραεδρικά πλέγματα. Σύμφωνα με την πλεγματοποίηση (meshing) Delaunay ο αρχικός ορισμός των συνοριακών κόμβων γίνεται σύμφωνα με το κριτήριο τριγωνισμού Delaunay. Η πιο σημαντική ιδιότητα του κριτηρίου τριγωνισμού Delaunay είναι ο άδειος περιγεγραμμένος κύκλος (empty circumcircle). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.24, ο περιγεγραμμένος κύκλος κάθε τριγώνου Delaunay είναι άδειος. Όλοι οι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των τριγωνισμών βασίζονται σε γρήγορες λειτουργίες για τον εντοπισμό των σημείων του πλέγματος που βρίσκονται εντός των περιγεγραμμένων κύκλων και σε μία αποδοτική δομή δεδομένων για την αποθήκευση των τριγώνων και των γωνιών.

Ο πιο άμεσος τρόπος υπολογισμού των τριγωνισμών είναι η επαναληπτική προσθήκη μιας κορυφής και κατόπιν ο επανατριγωνισμός των επηρεασμένων τμημάτων. Όταν προστίθεται μια κορυφή γίνεται αναζήτηση για όλους τους περιγεγραμμένους κύκλους που περιέχουν την κορυφή. Αφαιρούνται τα τρίγωνα των οποίων οι περιγεγραμμένοι κύκλοι περιέχουν το νεοεισερχόμενο σημείο. Ο νέος τριγωνισμός σχηματίζεται ενώνοντας το νέο σημείο με όλες τις συνοριακές κορυφές της κοιλότητας, η οποία δημιουργήθηκε από την προηγούμενη αφαίρεση των τετμημένων τριγώνων. Οι τεχνικές τριγωνισμού Delaunay που βασίζονται στην εισαγωγή σημείου μπορούν να επεκταθούν στις τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες (circumspheres) τετραέδρων.

Όμως ο τριγωνισμός Delaunay δεν λύνει αρκετά προβλήματα που σχετίζονται με τα αδόμητα πλέγματα. Συγκεκριμένα η μέθοδος Delaunay τείνει να μεγιστοποιεί την ελάχιστη γωνία του τριγώνου, αλλά η γωνία μπορεί να είναι πολύ μικρή και να μην προσαρμόζεται στις συνοριακές συνθήκες. Βελτιώσεις του αλγορίθμου Delaunay έχουν προταθεί από τους Chew (1989) και Ruppert (1993).

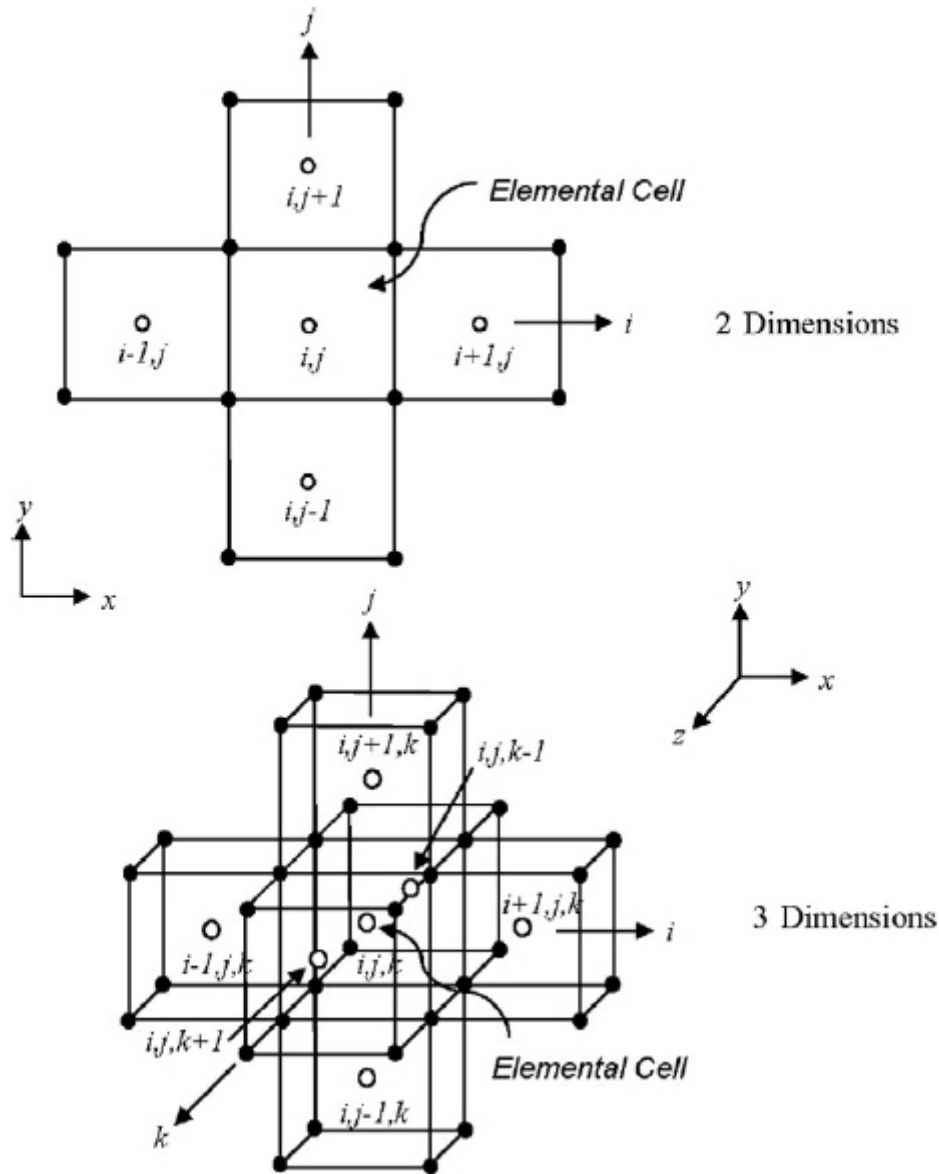


Σχήμα 1.24: Παράδειγμα τριγωνικού πλέγματος για την στροφή 90°

Η εφαρμογή ενός δομημένου πλέγματος έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου πλέγματος είναι ότι τα σημεία ενός δομικού κελιού διευθυνσιοδοτούνται εύκολα με δύο δείκτες στις δύο διαστάσεις ή με τρεις δείκτες στις τρεις διαστάσεις. Η συνδεσιμότητα είναι άμεση γιατί τα γειτονικά κελιά σε μια δοσμένη όψη ενός κελιού ταυτοποιούνται από τους δείκτες, και οι γωνίες των κελιών σχηματίζουν συνεχείς γραμμές πλέγματος οι οποίες ξεκινούν και καταλήγουν σε αντίθετες όψεις κελιών όπως φαίνεται στο σχήμα 1.25. Στις δύο διαστάσεις το κεντρικό κελί συνδέεται με τέσσερα γειτονικά κελιά, ενώ στις τρεις διαστάσεις το κεντρικό κελί συνδέεται με έξι γειτονικά κελιά. Το δομημένο πλέγμα επιτρέπει επίσης την εύκολη διαχείριση των δεδομένων και την συνδεσιμότητα, το οποίο κάνει τον προγραμματισμό πιο εύκολο. Όμως το μειονέκτημα ενός δομημένου πλέγματος, ιδιαίτερα για σύνθετες γεωμετρίες, είναι η αύξηση της πλεγματικής μη ορθογωνιότητας και της πλεγματικής ασυμμετρίας που μπορούν να οδηγήσουν σε μη αποδεκτές λύσεις από την επίλυση των βασικών εξισώσεων ροής. Οι μετασχηματισμένες εξισώσεις που περιλαμβάνουν την μη ορθογωνιότητα συμπεριφέρονται ως σύνδεσμος μεταξύ του δομημένου συστήματος συντεταγμένων και του body – fitted συστήματος συντεταγμένων, άρα αυξάνεται το κόστος των αριθμητικών υπολογισμών και οι δυσκολίες στον προγραμματισμό. Εξαιτίας αυτού ένα τέτοιο πλέγμα επηρεάζει την ακρίβεια και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου που εφαρμόζεται.

Η χρήση αδόμητων πλεγμάτων έχει γίνει πιο δημοφιλής στις εφαρμογές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η πλειοψηφία των εμπορικών εφαρμογών CFD βασίζεται στην προσέγγιση με αδόμητο πλέγμα. Τα κελιά επιτρέπεται να συναρμολογηθούν ελεύθερα εντός του υπολογιστικού πεδίου. Οι πληροφορίες

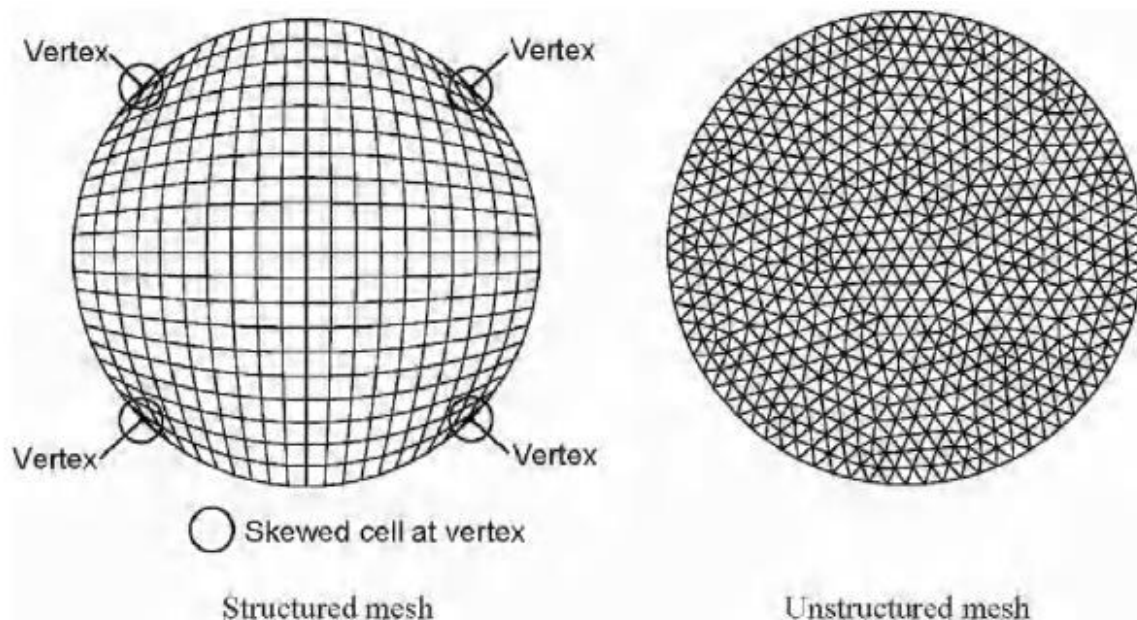
συνδεσιμότητας για κάθε έδρα απαιτεί κατάλληλη αποθήκευση σε ένα πίνακα. Το πιο τυπικό σχήμα ενός αδόμητου στοιχείου είναι το τρίγωνο στις δύο διαστάσεις και το τετράεδρο στις τρεις διαστάσεις. Όμως είναι δυνατή η χρήση οποιοδήποτε σχήματος κελιών συμπεριλαμβανομένων των τετραπλεύρων και των εξαέδρων.



Σχήμα 1.25: Διευθυνσιοδότηση σημείων κελιών ενός δομημένου πλέγματος στις δύο και τρεις διαστάσεις

Τα αδόμητα πλέγματα σαφώς ενδείκνυνται για αυθαίρετα γεωμετρικά σχήματα που έχουν πεδία με καμπυλόγραμμα σύνορα. Στο σχήμα 1.26 φαίνεται το εσωτερικό ενός κυκλικού κυλίνδρου στο οποίο έχει εφαρμοστεί δομημένο και αδόμητο πλέγμα. Για ένα τέτοιο γεωμετρικό σχήμα, το δομημένο body – fitted μη ορθογωνικό πλέγμα έχει την τάση να δημιουργεί κελιά υψηλής ασυμμετρίας στις τέσσερις κορυφές, γιατί το

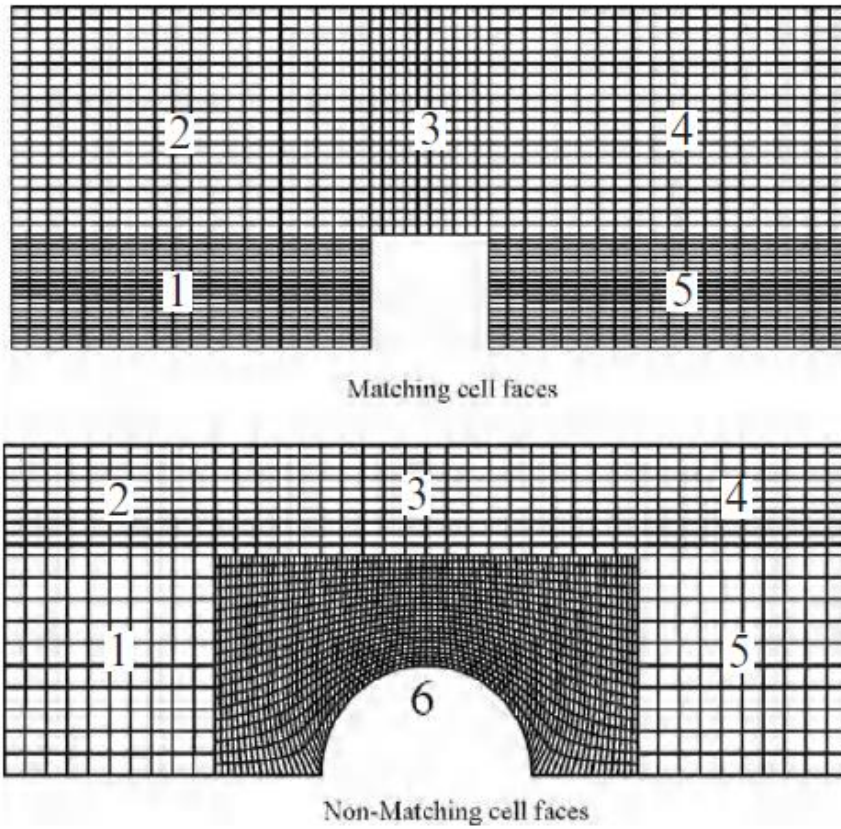
εσωτερικό του πεδίου πρέπει να κατασκευαστεί έτσι ώστε να ικανοποιεί τους γεωμετρικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από τα σύνορα. Αυτός ο τύπος πλέγματος οδηγεί σε αστάθειες και σε ανακριβή υπολογιστικά αποτελέσματα. Είναι σαφώς καλύτερη επιλογή η χρήση ενός αδόμητου τριγωνικού πλέγματος όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα.



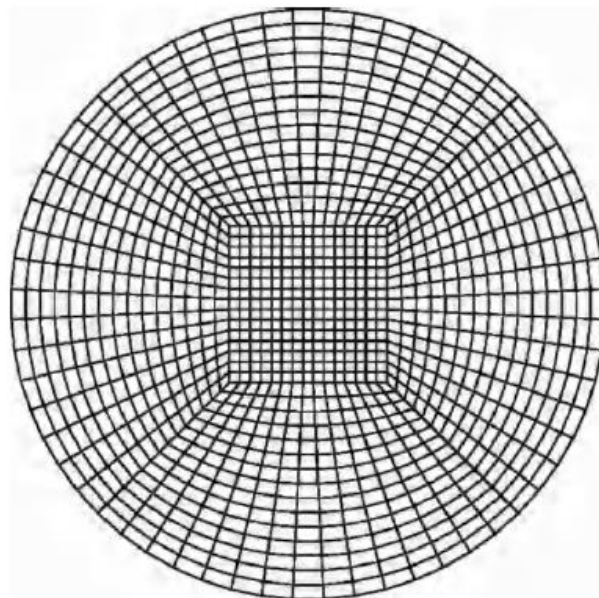
Σχήμα 1.26: Δομημένο και αδόμητο πλέγμα για ένα κυκλικό κύλινδρο.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα τους, τα αδόμητα πλέγματα έχουν και μειονεκτήματα όσο αφορά στις CFD εφαρμογές. Τα κελιά των αδόμητων πλεγμάτων δεν μπορούν να διευθυνσιοδοτηθούν όπως αυτά των δομημένων πλεγμάτων. Επομένως η διαχείριση των δεδομένων γίνεται πιο πολύπλοκη. Επειδή η διαχείριση των δεδομένων και η συνδεσιμότητα των κελιών γίνονται πιο πολύπλοκες, χρειάζονται πιο πολύπλοκοι αλγόριθμοι για να επιλυθούν οι εξισώσεις ροής, πράγμα που μπορεί να καταλήξει σε μεγαλύτερους χρόνους υπολογισμού.

Μια ειδική περίπτωση δομημένου πλέγματος είναι το multi – blocked structured πλέγμα το οποίο συναρμολογείται από έναν αριθμό προσαρμοσμένων δομημένων blocks. Η προσαρμογή κάθε έδρας των γειτονικών blocks μπορεί να είναι είτε κανονική (να υπάρχουν κελιά που ταιριάζουν) είτε αυθαίρετη (να υπάρχουν κελιά που δεν ταιριάζουν) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.27. Η χρήση πολλών blocks αντί ενός block για όλο το πεδίο προσθέτει ευελιξία στο meshing. Είναι δυνατή η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας πλέγματος σχήμα 1.28 με βάση ενός H-, O-, C- πλέγματος ή ενός αδόμητου τετραεδρικού ή εξαεδρικού πλέγματος για την δημιουργία κάθε block.

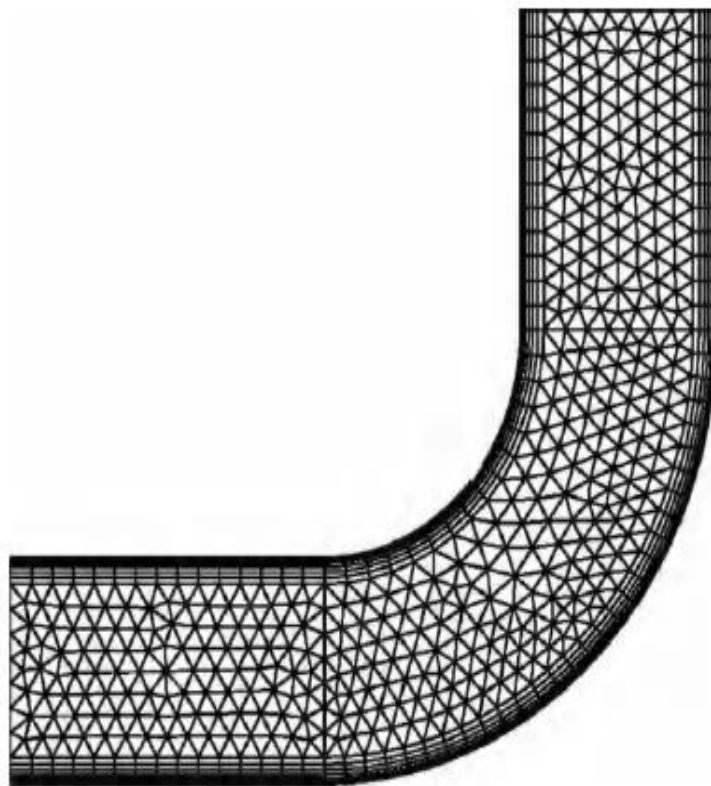


Σχήμα 1.27: Multi – block structured πλέγμα με προσαρμόσιμες και μη έδρες κελιών



Σχήμα 1.28: Παραγωγή δομημένου πλέγματος τύπου O για κυκλικό κύλινδρο

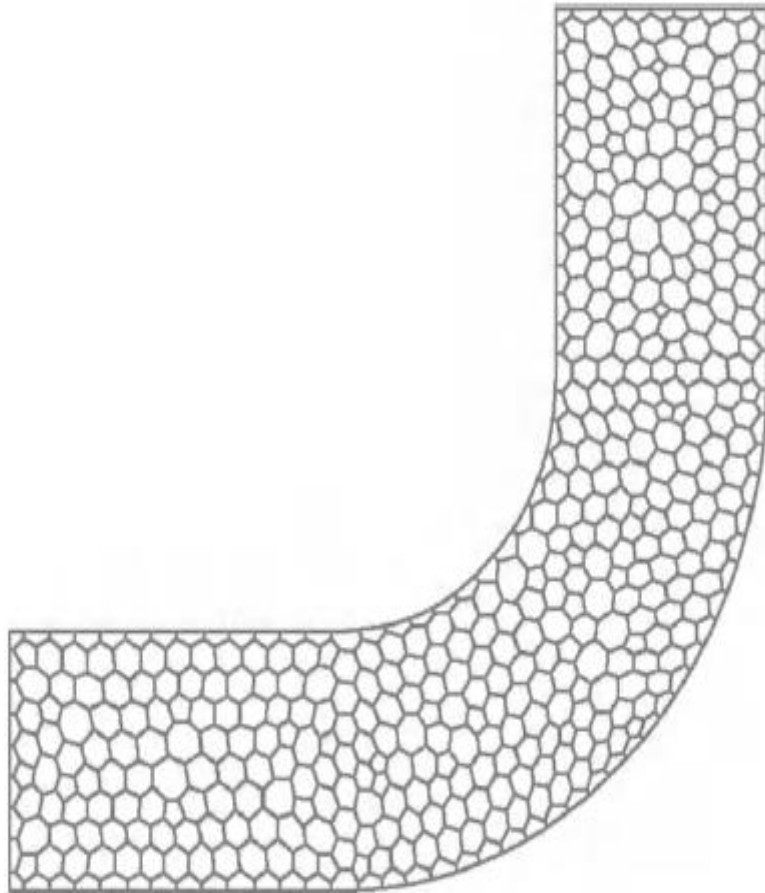
Τα υβριδικά πλέγμα (hybrid grids) συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους στοιχείων, όπως τρίγωνα και τετράπλευρα στις δύο διαστάσεις, και τετράεδρα, εξάεδρα και πυραμίδες στις τρεις διαστάσεις. Η χρήση διαφορετικών στοιχείων παρέχει μέγιστη ευελιξία στην προσαρμογή των κελιών στις συνοριακές επιφάνειες και στην κατανομή των κελιών διαφορετικών τύπων σε πολύπλοκες περιοχές ροής. Ως εμπειρικός κανόνας που έχει ως αποτέλεσμα ακριβείς λύσεις και καλύτερη σύγκλιση, η ποιότητα του πλέγματος βελτιώνεται μέσω της τοποθέτησης τετράπλευρων και εξάεδρων στα συνοριακά επίπεδα κοντά στα τοιχώματα, ενώ στο υπόλοιπο της περιοχής ροής προτιμώνται τα τρίγωνα και τα τετράεδρα. Στο σχήμα 1.29 φαίνεται ένα πλέγμα που αποτελείται από τετράπλευρα κοντά στα τοιχώματα και από τρίγωνα στο υπόλοιπο του πεδίου ροής.



Σχήμα 1.29: Υβριδικό πλέγμα για την στροφή 90° που αποτελείται από δομημένα τετραπλευρικά κελιά κοντά στα τοιχώματα και από αδόμητα τριγωνικά κελιά στο υπόλοιπο του πεδίου ροής.

Τελευταία υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη πλεγμάτων που αποτελούνται από πολυεδρικά κελιά για την επίλυση μεγάλου εύρους πρακτικών προβλημάτων ροής. Ένα πολυεδρικό πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί συνδυάζοντας τετραεδρικά κελιά σε πολυεδρικά κελιά. Αν εφαρμοστεί η πολυεδρική πλεγματοποίηση (polyhedral mesh) στην γεωμετρία στροφής 90° όπως φαίνεται στο σχήμα 1.30, η ποιότητα του πλέγματος βελτιώνεται καθώς μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των

κελιών. Η πολυεδρική πλεγματοποίηση οδηγεί επίσης σε ταχύτερη σύγκλιση της λύσης και δίνει την δυνατότητα σε ένα αδόμητο πλέγμα να εφαρμοστεί σε μια πολύπλοκη γεωμετρία χωρίς το υπολογιστικό κόστος που θα προέκυπτε από την εφαρμογή ενός μεγάλου τετραεδρικού πλέγματος.



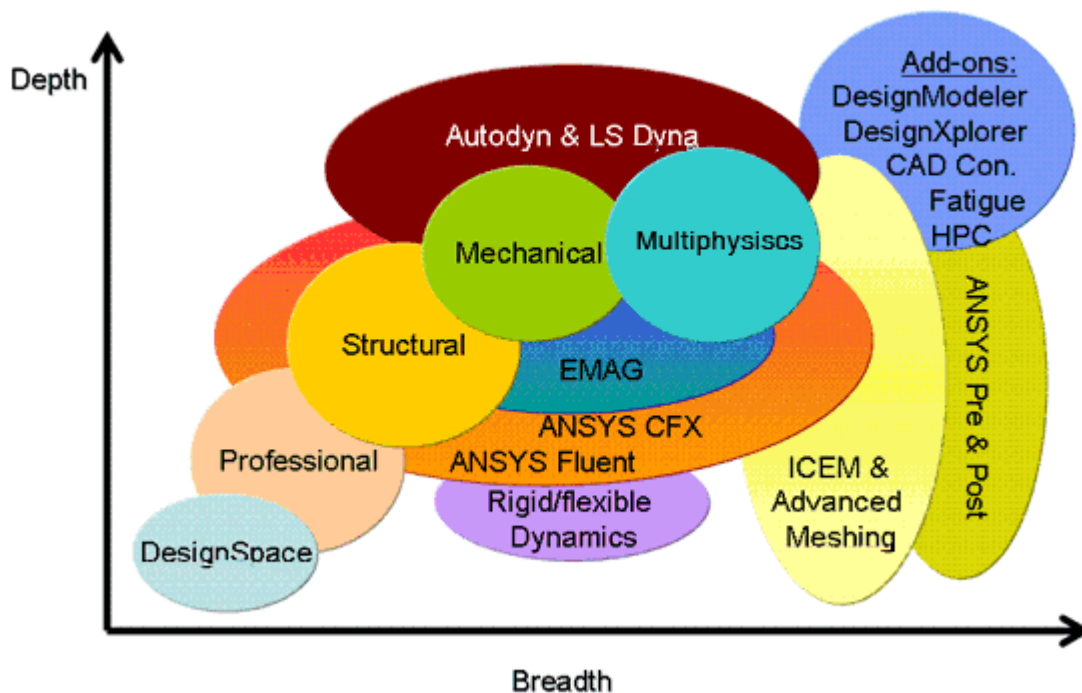
Σχήμα 1.30: Πολυεδρικό πλέγμα για την στροφή 90°

2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

2.1 ANSYS

Το ANSYS είναι ένα εμπορικό λογισμικό γενικού σκοπού που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει αλληλεπιδράσεις σε όλα τα πεδία της φυσικής, των κατασκευών, των δονήσεων, της ρευστοδυναμικής, της μεταφοράς θερμότητας και της ηλεκτρομαγνητικής για τους μηχανικούς. Είναι επίσης δυνατόν να προσομοιωθούν διάφορα tests υπό συνθήκες σε εικονικό περιβάλλον προτού ξεκινήσει η παραγωγή πρότυπων προϊόντων, να προσδιοριστούν τα αδύναμα σημεία του προϊόντος και να βελτιωθούν, να υπολογιστούν και να προβλεφθούν πιθανά προβλήματα μέσω των αναλυτικών τρισδιάστατων προσομοιώσεων.

Το ANSYS λόγω της δομής του, που φαίνεται στο σχήμα 2.1, δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να επιλέγουν μόνο τα απαραίτητα χαρακτηριστικά. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του ANSYS είναι η δυνατότητα συνεργασίας του με άλλα CAD και FEA λογισμικά πακέτα. Ειδικότερα, μπορεί να εισαχθούν δεδομένα από ένα λογισμικό CAD και να δημιουργηθεί η γεωμετρία με την χρήση του λογισμικού προεπεξεργασίας του ANSYS. Όμοια στο ίδιο στάδιο προεπεξεργασίας παράγεται το πλέγμα που είναι απαραίτητο για τους υπολογισμούς. Αφού προσδιοριστούν τα δεδομένα ανάλυσης και διεξαχθεί η ανάλυση, τα αποτελέσματα μπορούν να οπτικοποιηθούν είτε αριθμητικά είτε γραφικά.



Σχήμα 2.1: Η δομή του ANSYS

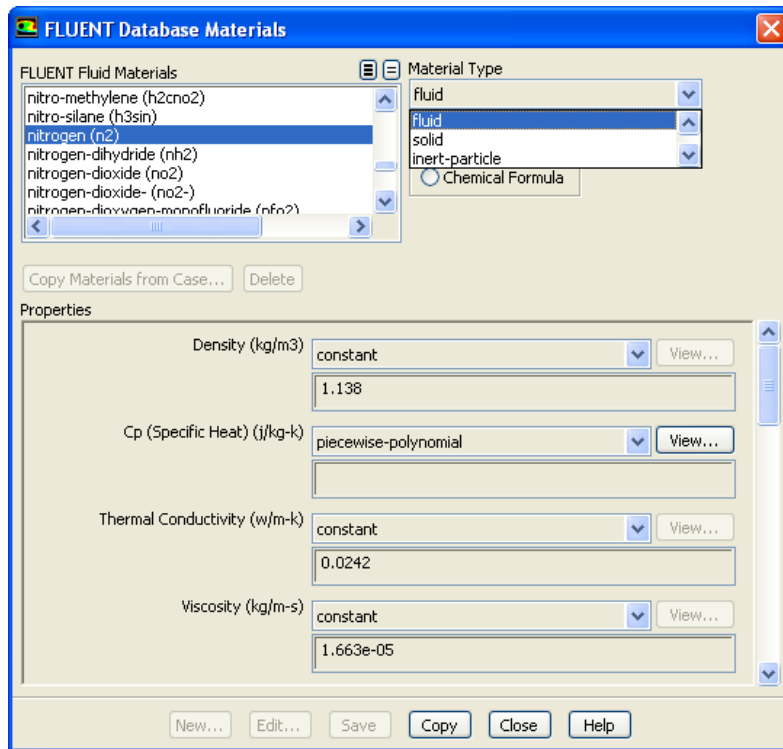
Το ANSYS μπορεί να εκτελέσει προχωρημένες αναλύσεις μηχανικής με ασφάλεια με την χρήση της ποικιλίας των αλγορίθμων επίλυσης, των χαρακτηριστικών βασισμένων στο χρόνο και των μη γραμμικών μοντέλων υλικών που διαθέτει. Το ANSYS Workbench είναι μια πλατφόρμα που ενσωματώνει τεχνολογίες προσομοίωσης και παραμετρικά συστήματα CAD με αυτοματισμό και υψηλή απόδοση. Ουσιαστικά αποτελεί την πλατφόρμα μέσω της οποίας δημιουργείται ένα project.

2.2 ANSYS FLUENT

Το ANSYS FLUENT είναι το πρόγραμμα του πακέτου ANSYS που χρησιμοποιείται για την CFD, για την φυσική μοντελοποίηση της ροής ρευστού, της τυρβώδους ροής, της μεταφοράς ενέργειας και των χημικών αντιδράσεων για βιομηχανικές εφαρμογές με εύρος από την ροή του αέρα γύρω από ένα φτερό αεροπλάνου έως την καύση σε ένα κλίβανο, από τις στήλες φουσαλίδων έως τις υπεράκτιες πλατφόρμες πετρελαίου, από την ροή του αίματος έως την σχεδίαση ημιαγωγών και από την σχεδίαση ενός καθαρού δωματίου έως τις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Ειδικά μοντέλα που επιτρέπουν την μοντελοποίηση κυλίνδρων καύσης, αερακουστικής, τουρμπίνων και πολυφασικών συστημάτων έκαναν δυνατή την επέκταση των εφαρμογών του ANSYS FLUENT.

Το πρόβλημα ορισμού για όλες τις CFD προσομοιώσεις περιλαμβάνει τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions), τις συνθήκες ζωνών κελιών (cell zone conditions) και τις ιδιότητες των υλικών (material properties). Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης εξαρτάται από τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων.

Το ANSYS FLUENT διαθέτει μια βασική βάση δεδομένων με προκαθορισμένα ρευστά και στερεά υλικά όπως και μίγματα, και παρέχεται η δυνατότητα του προσδιορισμού υλικών από τον χρήστη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να τροποποιηθούν ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας, της μάζας, της πίεσης ή της πυκνότητας.



Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός υλικών από την βάση δεδομένων του ANSYS FLUENT

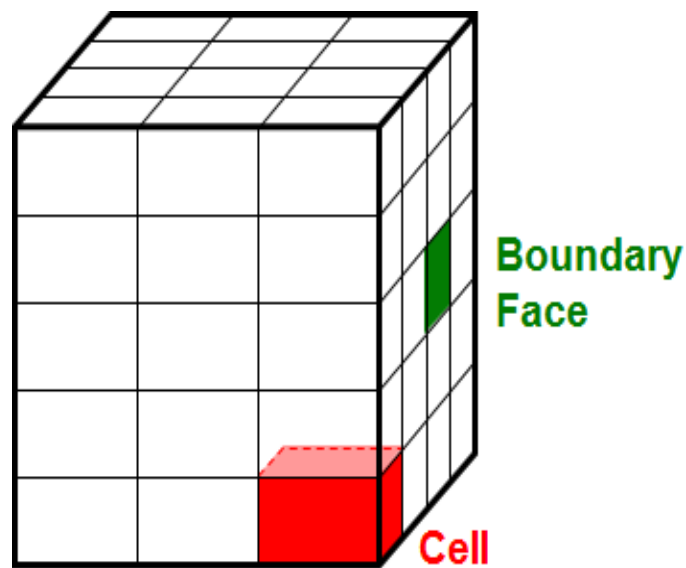
Για ασυμπέστη ροή με σταθερή πυκνότητα ρ επιλέγεται η παράμετρος density ως σταθερή, ενώ για ασυμπέστη ροή στην οποία η πυκνότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία επιλέγονται οι ιδιότητες ιδανικού αερίου (ideal gas properties) για τα οποία ισχύει η σχέση (2.1).

$$\rho = \frac{p_{operating}}{RT} \quad (2.1)$$

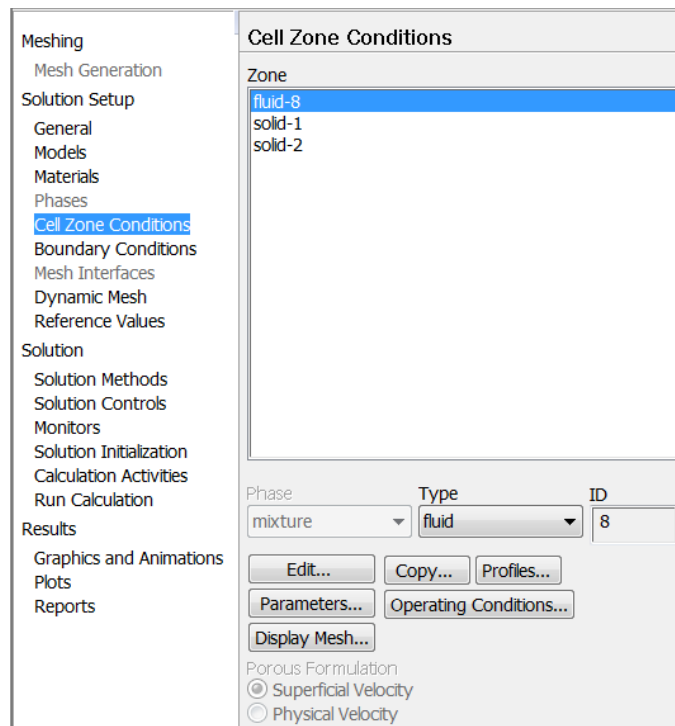
Για συμπιεσμένη ροή εφαρμόζεται ξανά η σχέση (2.1). Συγκεκριμένα, για ροές με χαμηλό αριθμό Mach, η $P_{operating}$ ορίζεται κοντά στη μέση πίεση του προβλήματος για να αποφεύγονται προβλήματα στρογγυλοποίησης. Χρησιμοποιείται η floating operating pressure για ασταθείς ροές με μεγάλες σταδιακές μεταβολές στην απόλυτη πίεση. Η πίεση operating pressure είναι η δεδομένη απόλυτη πίεση από την οποία μπορούν να μετρηθούν όλες οι σχετικές πιέσεις σύμφωνα με την σχέση (2.2). Χρησιμοποιείται για να αποφεύγονται τα σφάλματα στρογγυλοποίησης τα οποία συμβαίνουν όταν οι δυναμικές διαφορές πίεσης σε ένα ρευστό είναι μικρές σε σχέση με το επίπεδο απόλυτης πίεσης.

$$p_{absolute} = p_{operating} + p_{relative} \quad (2.2)$$

Το πλέγμα που δημιουργείται αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό πεπερασμένων όγκων ή αλλιώς από πολλά κελιά. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Τα κελιά ομαδοποιούνται σε ζώνες κελιών. Για παράδειγμα, σε ένα υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μπορεί να υπάρχει μια ζώνη για την περιοχή του ρευστού και μια ζώνη για το στερεό. Κάθε κελί οριοθετείται από ένα αριθμό εδρών. Αυτές οι έδρες ομαδοποιούνται σε ένα αριθμό ζωνών (face zones). Κάποιες έδρες βρίσκονται στα σύνορα του μοντέλου και οι ζώνες στις οποίες ανήκουν λέγονται συνοριακές ζώνες (boundary zones). Οι συνθήκες ζωνών κελιών και οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε όλες τις ζώνες κελιών και σε όλες τις συνοριακές συνθήκες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.

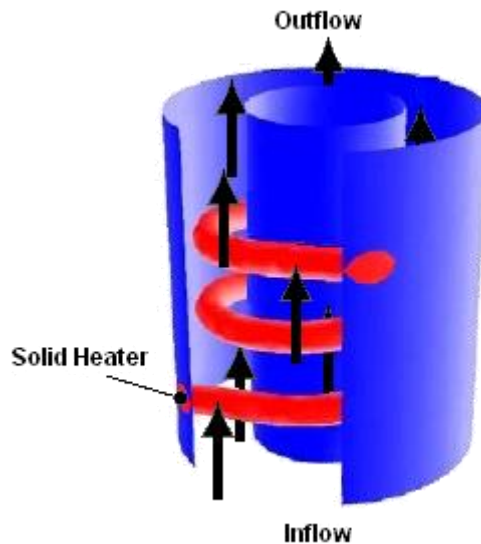


Σχήμα 2.3: Απλό τρισδιάστατο πλέγμα

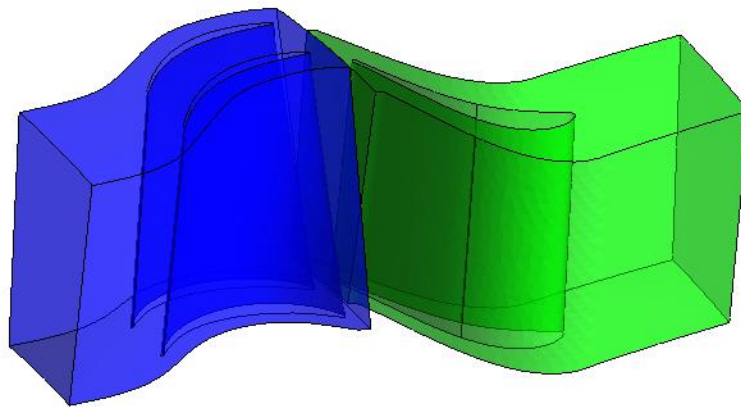


Σχήμα 2.4: Προσδιορισμός συνθηκών κελιών στο ANSYS FLUENT

Μια ζώνη κελιών ενός ρευστού ή πιο απλά μια ζώνη του ρευστού είναι μια ομάδα κελιών για την οποία λύνονται όλες οι εξισώσεις. Δίνονται δύο παραδείγματα για να γίνει κατανοητή η λειτουργία της επίλυσης. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η προσομοίωση ενός πηνίου θέρμανσης (heating coil) από χαλκό στο νερό, η οποία απαιτεί μια ζώνη ρευστού και μια ζώνη στερεού. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του νερού, οι εξισώσεις του ρευστού και της μεταφοράς θερμότητας λύνονται στην ζώνη ρευστού. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του χαλκού, λύνεται μόνο η εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας στην ζώνη στερεού. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται ένας δρομέας ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ένα περιστρεφόμενο πεδίο. Η ζώνη ρευστού του δρομέα χρησιμοποιεί τις εξισώσεις στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, ενώ η ζώνη ρευστού του στάτη χρησιμοποιεί τις εξισώσεις στο στατικό σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 2.5: Μοντέλο πηνίου θέρμανσης στο νερό

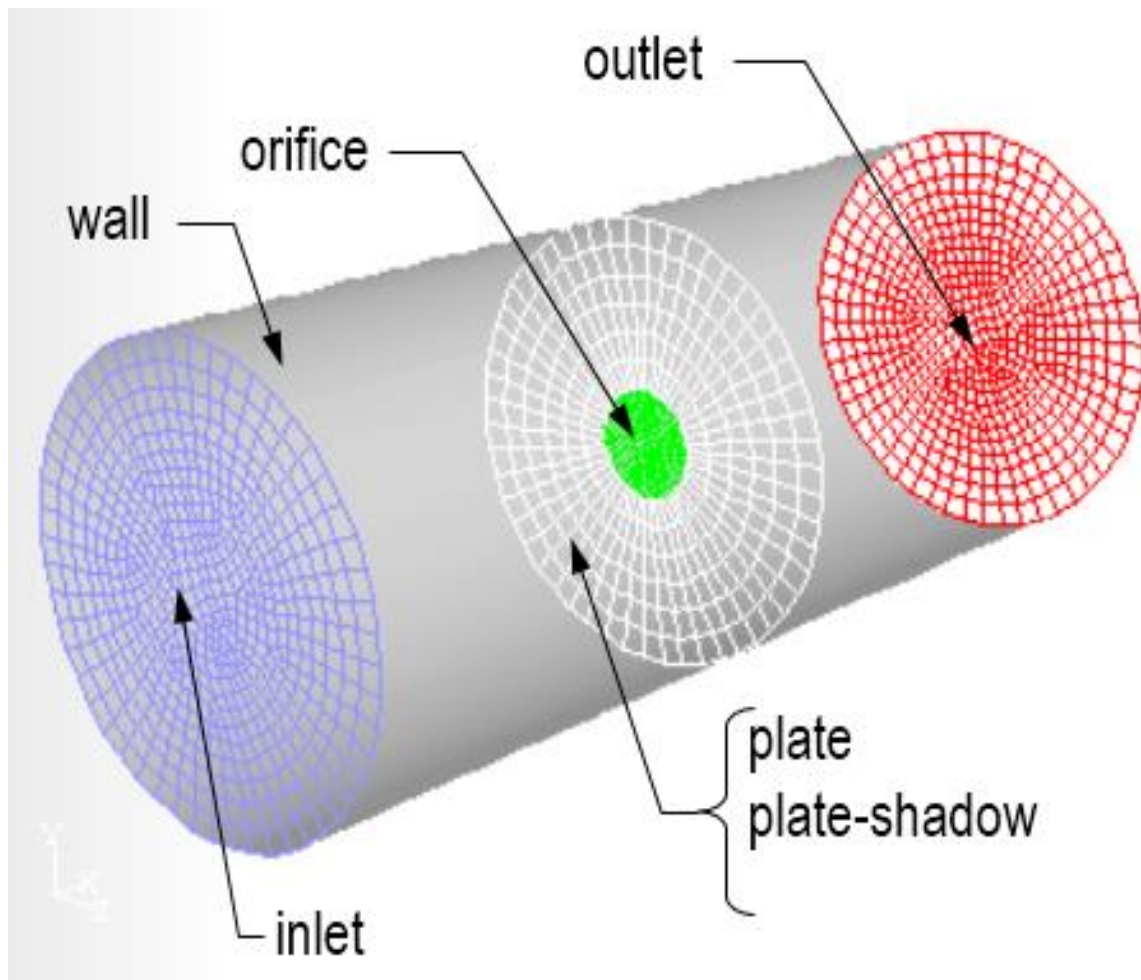


Σχήμα 2.6: Ζώνη ρευστού δρομέα και ζώνη ρευστού στάτη

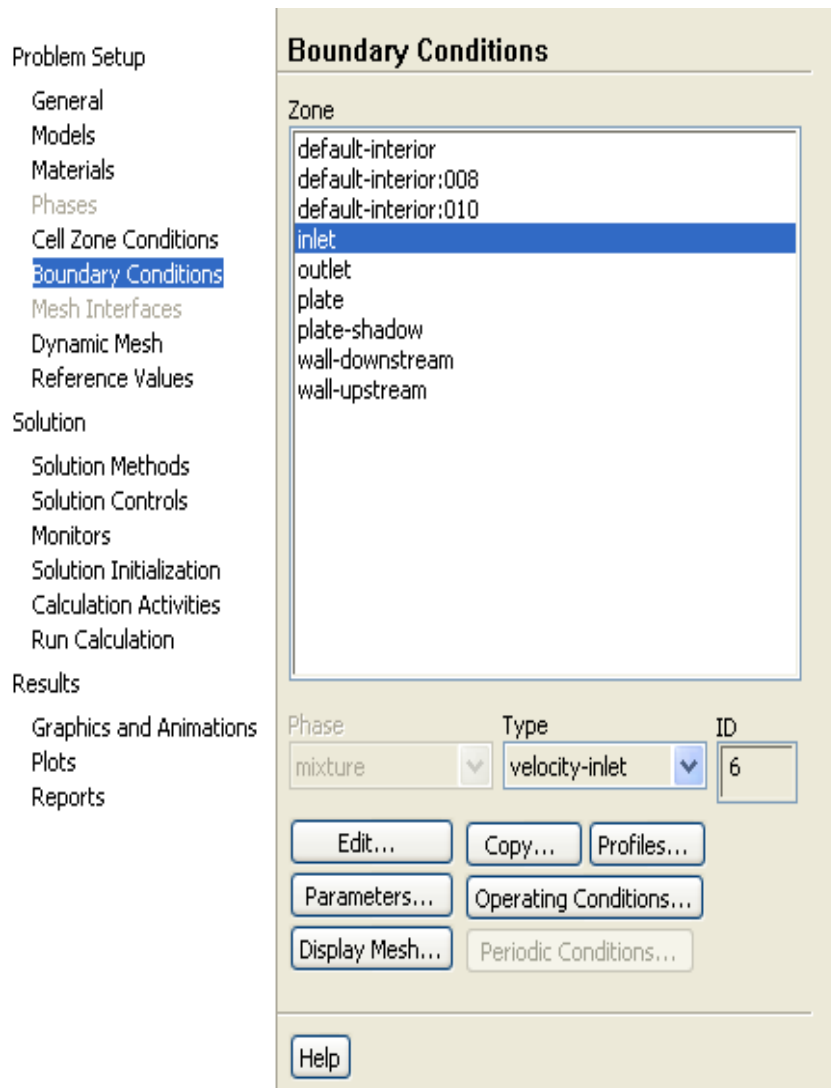
Για να προσδιοριστεί ένα πρόβλημα που έχει μοναδική λύση, πρέπει να προσδιοριστούν οι πληροφορίες των εξαρτώμενων μεταβλητών ροής στο σύνορο. Επειδή οι βασικές εξισώσεις της CFD είναι διαφορικές και για την επίλυση τους απαιτείται ολοκλήρωση, οι συνοριακές συνθήκες είναι μαθηματικά ισοδύναμες με την σταθερά ολοκλήρωσης, η τιμή της οποίας χρειάζεται για να υπολογιστεί μια μοναδική λύση. Επίσης προσδιορίζονται οι ροές της μάζας, της ορμής και της ενέργειας και ό,τι άλλο απαιτείται. Εσφαλμένος προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών μπορεί να καταλήξει σε μη αποδεκτή λύση.

Ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με το σχήμα 2.7 περιλαμβάνει τον ορισμό των τοιχωμάτων (walls), των εισόδων (inlets), της συμμετρίας, της τοποθεσίας κ.α. ενώ η επιλογή τους εξαρτάται από την γεωμετρία, την

διαθεσιμότητα των δεδομένων και τις αριθμητικές μεθόδους. Οι συνοριακές συνθήκες μπορούν επίσης να προσδιοριστούν μέσω συναρτήσεων προγραμματισμού (User – Defined Functions) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.

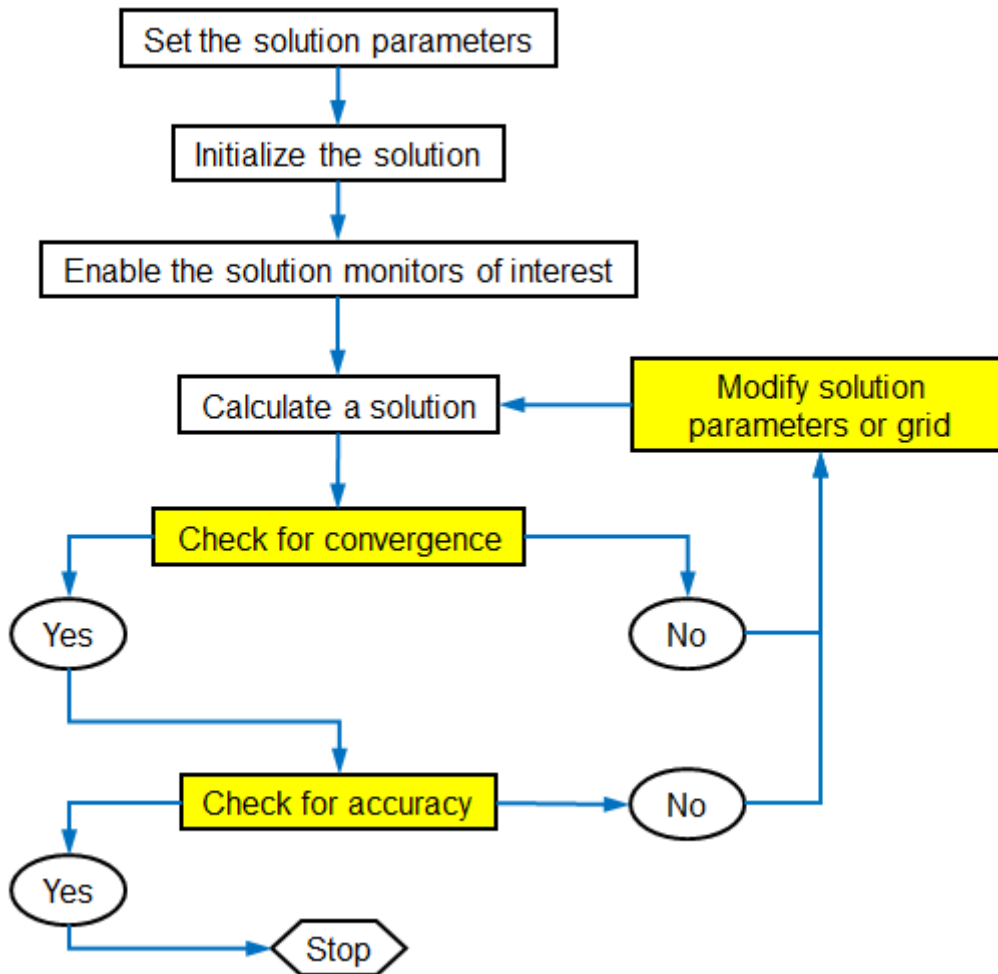


Σχήμα 2.7: Παράδειγμα εξωτερικών και εσωτερικών συνόρων ενός μοντέλου



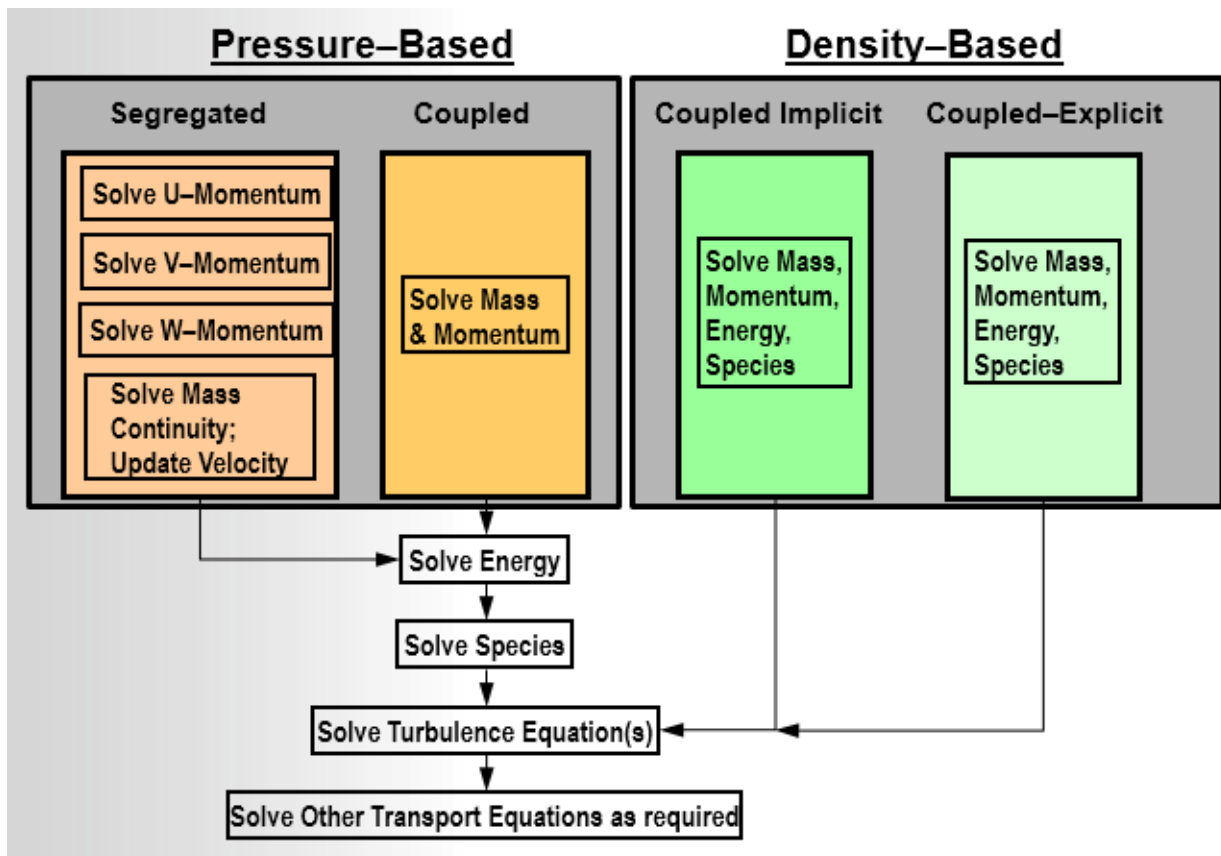
Σχήμα 2.8: Προσδιορισμός συνοριακών συνθηκών στο ANSYS FLUENT

Το ANSYS FLUENT χρειάζεται εισόδους (solver settings) βάσει των οποίων θα υπολογίσει την λύση. Οι έννοιες της ακρίβειας (accuracy), ευστάθειας (stability) και της σύγκλισης (convergence) είναι κρίσιμες για την εύρεση της λύσης. Ιδιαίτερα η σύγκλιση αποτελεί την πιο καθοριστική παράμετρο για την εύρεση της σωστής λύσης. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου επίλυσης του ANSYS FLUENT.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου επίλυσης του ANSYS FLUENT

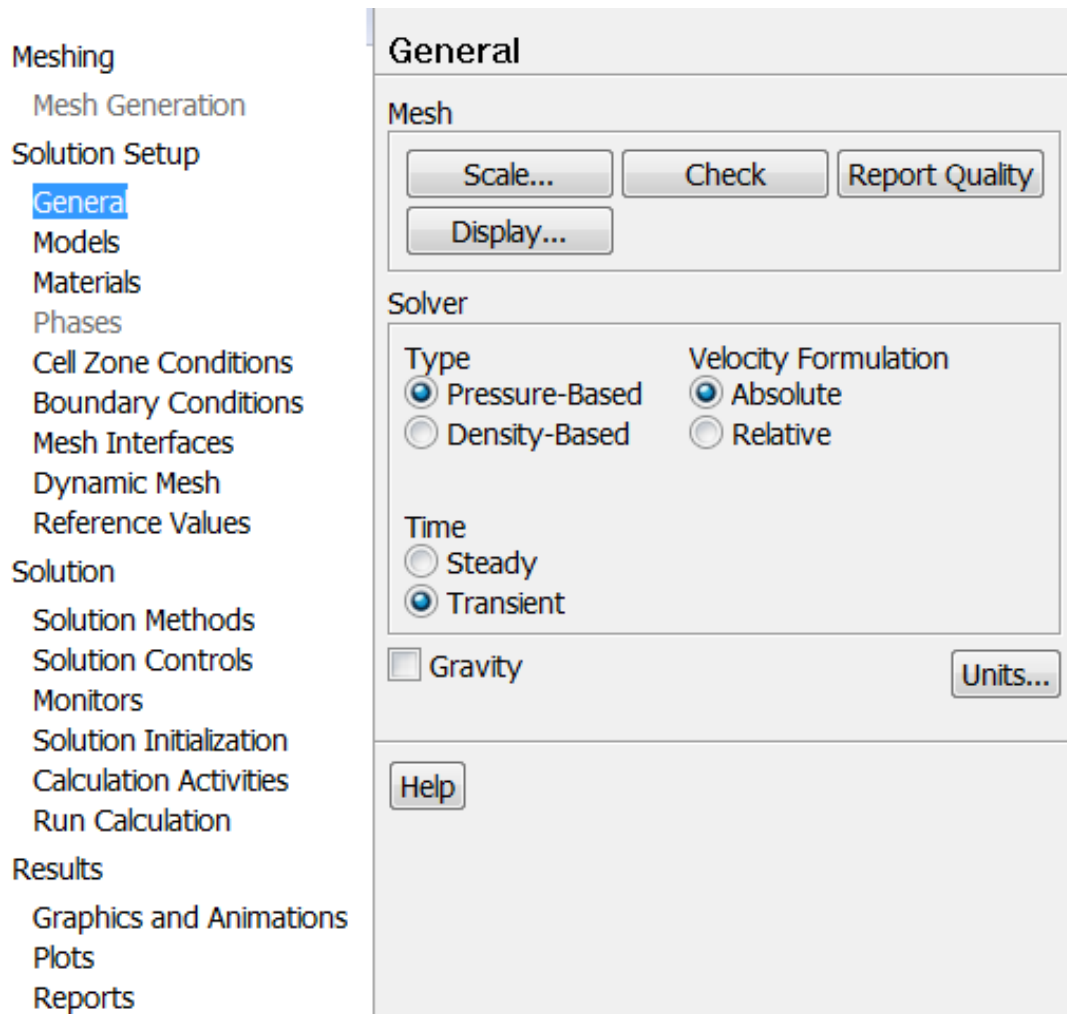
Υπάρχουν δύο είδη επιλυτών (solvers) που είναι διαθέσιμοι στο ANSYS FLUENT: Ο pressure-based και ο density-based σύμφωνα με το σχήμα 2.10. Οι pressure-based solvers λαμβάνουν την ταχύτητα από την εξίσωση της ορμής, ενώ η διατήρηση της μάζας επιτυγχάνεται επιλύοντας μια εξίσωση διόρθωσης της πίεσης (pressure correction equation). Επίσης η εξίσωση ενέργειας επιλύεται σειριακά. Όσο αφορά στους density-based solvers, οι βασικές εξισώσεις της συνέχειας, της ορμής, της ενέργειας και της μεταφοράς σωματιδίων επιλύονται ταυτόχρονα. Οι pressure-based solvers επίσης κατηγοριοποιούνται στους segregated και στους coupled, ενώ οι density-based solvers κατηγοριοποιούνται στους coupled-implicit και coupled-explicit. Ο pressure-based solver (segregated) μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα ροών από χαμηλής ταχύτητας ασυμπίεστες ροές έως υψηλής ταχύτητας συμπιεσμένες ροές, ενώ ο pressure-based coupled solver θεωρείται αποδοτικότερος.



Σχήμα 2.10: Pressure-Based και Density-Based solvers

Ο παράγοντας under – relaxation α στα Solution Controls για την σταθεροποίηση της επαναληπτικής διαδικασίας για τον pressure-based solver. Ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτείται για την σύγκλιση εξαρτάται από τον παράγοντα α , ενώ η τελική λύση που προκύπτει από την σύγκλιση είναι ανεξάρτητη από τον παράγοντα α .

Ο density-based solver εφαρμόζεται όταν υπάρχει ισχυρή σύνδεση ή αλληλεξάρτηση μεταξύ της πυκνότητας, της ορμής, της ενέργειας και των σωματιδίων. Ο implicit density-based solver γενικά προτιμάται από τον explicit γιατί ο δεύτερος εφαρμόζει ένα αυστηρό όριο στην κλίμακα του χρόνου. Ο αριθμός Courant ορίζει το μέγεθος της κλίμακας του χρόνου. Τα όρια ευστάθειας επιβάλλουν ένα μέγιστο όριο για τον αριθμό Courant, ενώ η επιλογή solution steering στα Solution Controls χρησιμοποιείται για να προσαρμόζεται αυτόματα ο αριθμός Courant κατά την επαναληπτική διαδικασία έτσι ώστε να έχει την βέλτιστη τιμή σε όλα τα στάδια των υπολογισμών. Η επιλογή του solver εξαρτάται κυρίως από την φύση του προβλήματος. Στα σχήματα 2.11-2.12 φαίνεται η επιλογή των solvers καθώς και ο τρόπος αρχικοποίησης αντίστοιχα.

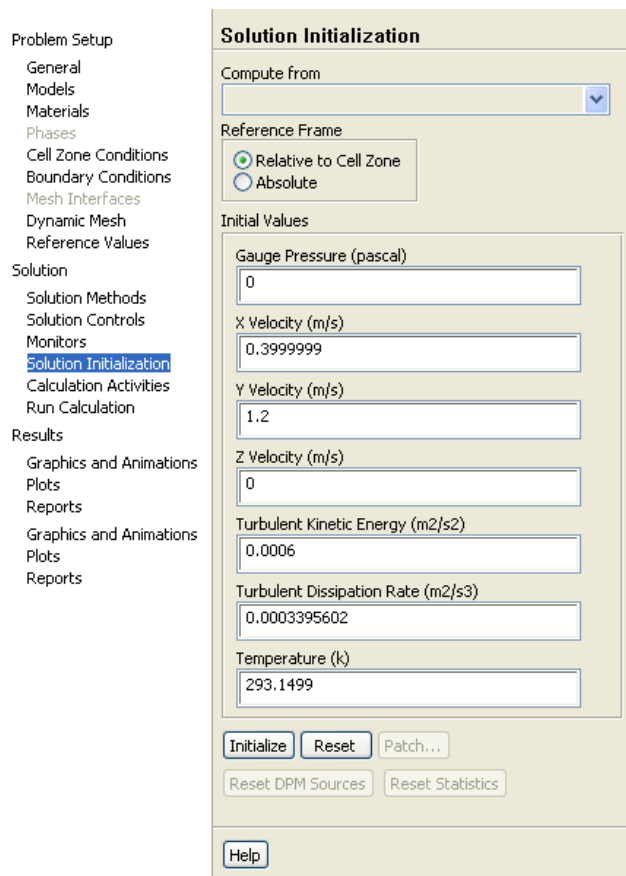


Σχήμα 2.11: Επιλογή solver στο ANSYS FLUENT

Το ANSYS FLUENT χρειάζεται να αρχικοποιήσει τις επιλύσιμες μεταβλητές πριν ξεκινήσουν οι επαναλήψεις. Μια ρεαλιστική αρχική υπόθεση βελτιώνει την ευστάθεια της λύσης και επιταχύνει την σύγκλιση. Σε κάποιες περιπτώσεις μια κακή αρχική υπόθεση μπορεί να προκαλέσει την αποτυχία του επιλύτη στις πρώτες επαναλήψεις. Υπάρχουν 5 τρόποι για την αρχικοποίηση του πεδίου ροής: Standard initialization, Patch values, Hybrid initialization, FMG initialization, Starting from a previous solution. Στον πίνακα 2.1 περιγράφονται οι διάφοροι τύποι αρχικοποίησης του ANSYS FLUENT.

Πίνακας 2.1: Τύποι αρχικοποίησης στο πρόγραμμα Ansys Fluent

Standard initialization	Ο χρήστης επιλέγει ένα inlet boundary για συμπληρωθούν αυτόματα οι αρχικές τιμές με τις τιμές του inlet boundary.
Patch values	Εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες μεταβλητές και περιοχές στα προβλήματα όπως είναι οι ροές jet, τα προβλήματα καύσης, πολυφασικές ροές κ.α.
Hybrid initialization	Αποτελεί μια γρήγορη προσέγγιση της λύσης χρησιμοποιώντας μια συλλογή μεθόδων. Προσδιορίζει τα πεδία πίεσης και πυκνότητας μέσω της εξίσωσης Laplace. Όλες οι άλλες μεταβλητές προσαρμόζονται με βάση τις μέσες τιμές ή με μεθόδους παρεμβολής.
FMG initialization	Είναι χρήσιμη για σύνθετα προβλήματα ροής που περιλαμβάνουν μεγάλες κλίσεις πίεσης και ταχύτητα σε μεγάλα πλέγματα.
Starting from a previous solution	Μερικές φορές ο προσδιορισμός ως αρχικής λύσης μιας προηγούμενα υπολογισμένης λύσης μπορεί να επιταχύνει την διαδικασία.

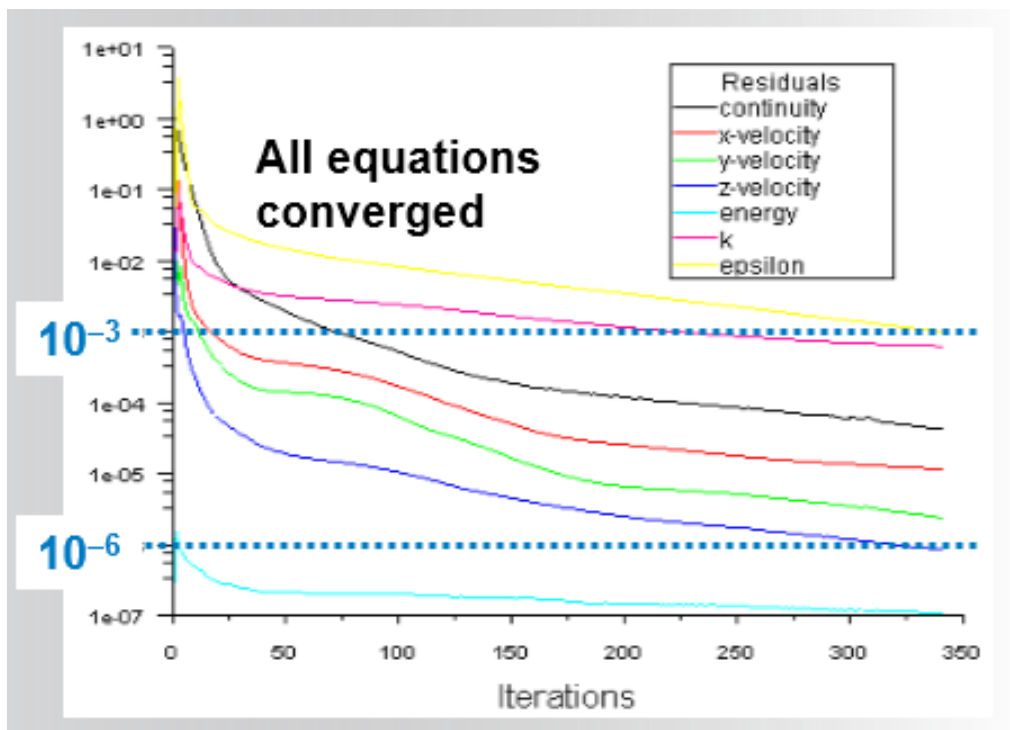


Σχήμα 2.12: Επιλογή τρόπου αρχικοποίησης στο ANSYS FLUENT

Ο επιλύτης πρέπει να εκτελέσει επαρκή αριθμό επαναλήψεων ώστε να επιτύχει σύγκλιση της λύσης. Για την επίτευξη της σύγκλισης πρέπει να ικανοποιούνται τα εξής:

- Όλες οι διακριτές εξισώσεις διατήρησης εφαρμόζονται σε όλα τα κελιά με ένα προκαθορισμένο όριο ανοχής (Residuals) ,τα οποία μετρούν την αστάθεια της τρέχουσας λύσης και δεν αποτελούν αριθμητικά σφάλματα.
- Επιτυγχάνονται οι συνολικές ισορροπίες της μάζας, της ορμής, της ενέργειας και άλλων βαθμωτών ποσοτήτων.
- Οι επιλύσιμες μεταβλητές φτάνουν σε ένα σταθερό επίπεδο.

Γενικά η μείωση των Residuals κατά τρεις τάξεις του πλάτους μπορεί να είναι ένα σημάδι σύγκλισης. Το γράφημα των Residuals δείχνει πότε οι τιμές έχουν φτάσει στο προκαθορισμένο όριο ανοχής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Παράδειγμα σύγκλισης από το γράφημα των Residuals

2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ

Η τύρβη είναι η τρισδιάστατη τυχαία ασταθής κίνηση των ρευστών που παρατηρείται για μέτριους ως υψηλούς αριθμούς Reynolds. Καθώς όλες οι τεχνικές ροές βασίζονται σε ρευστά χαμηλού ιξώδους, όλες οι τεχνικές ροές δεν είναι

τυρβώδεις. Πολλές δυνάμεις τεχνικού ενδιαφέροντος εξαρτώνται από την τύρβη, όπως η ενέργεια, η ορμή, η κίνηση των σωματιδίων, η μεταφορά θερμότητας, οι απώλειες πίεσης, οι δυνάμεις που ασκούνται σε αεροδυναμικά σώματα κ.α.

Είναι γεγονός ότι κανένα μοντέλο τυρβώδους ροής δεν θεωρείται κατάλληλο και ανώτερο για όλες τις κατηγορίες προβλημάτων. Η επιλογή του μοντέλου τυρβώδους ροής εξαρτάται από την φυσική της ροής, από τις συνήθεις πρακτικές για ένα πρόβλημα, το επίπεδο της ακρίβειας, την διαθεσιμότητα των υπολογιστικών πόρων και τον χρόνο που απαιτείται για την προσομοίωση. Τα μοντέλα τυρβώδους ροής (Reynolds Averaged Navier – Stokes) αποτελούν την πιο οικονομική προσέγγιση για τον υπολογισμό σύνθετων τυρβωδών ροών. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι τα μοντέλα $k - \epsilon$ και $k - \omega$. Αυτά τα μοντέλα απλοποιούν την λύση του προβλήματος μέσω δύο επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς και εισάγουν την τύρβη ιξώδους (Eddy – viscosity) για τον υπολογισμό των τάσεων Reynolds.

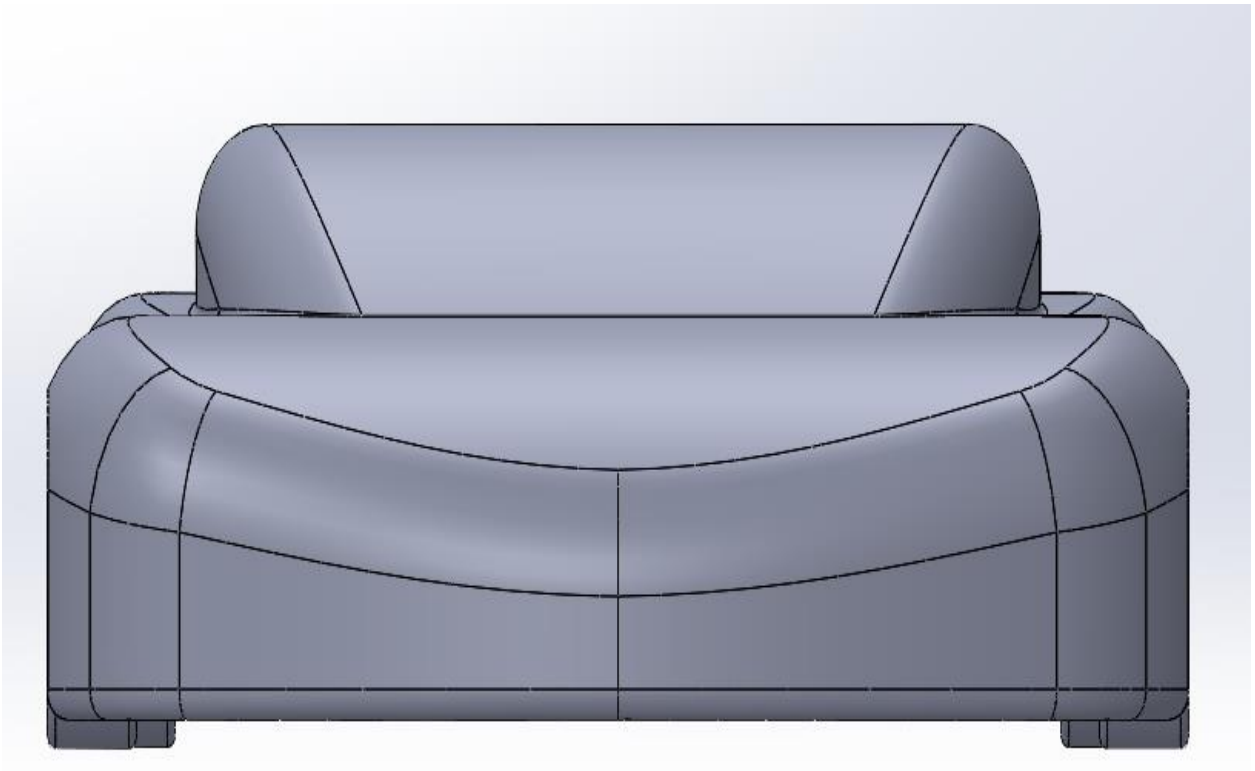
Τα μοντέλα δύο εξισώσεων (two – equation models) είναι ιστορικά τα πιο ευρέως αποδεκτά μοντέλα τυρβώδους ροής στις εφαρμογές CFD. Το μοντέλο $k - \epsilon$ του ANSYS FLUENT αποτελεί την πρακτική επιλογή για προβλήματα ροής. Προσφέρει ευρωστία, οικονομία και λογική ακρίβεια για ένα μεγάλο εύρος τυρβωδών ροών και έτσι εξηγείται η δημοφιλία του στις προσομοιώσεις βιομηχανικών ροών και μεταφοράς θερμότητας. Το μειονέκτημα του μοντέλου $k - \epsilon$ είναι ότι δεν είναι ευαίσθητο σε αντίθετες κλίσεις πίεσης και στον διαχωρισμό συνοριακών επιπέδων, αλλά τυπικά προβλέπει ένα καθυστερημένο και μειωμένο διαχωρισμό που σχετίζεται με τις παρατηρήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υπερβολικά αισιόδοξες σχεδιαστικές αξιολογήσεις ανεξάρτητα από τις επιφάνειες (αεροδυναμικό σώμα, αεροτομές κ.α.). Συνεπώς το μοντέλο $k - \epsilon$ δεν προτείνεται και δεν χρησιμοποιείται στις αεροδυναμικές μελέτες.

Η εξίσωση ω προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με την εξίσωση ϵ . Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι η εξίσωση ω μπορεί να ολοκληρωθεί χωρίς επιπλέον όρους μέσω του ιξώδους υποστρώματος. Γενικά τα μοντέλα $k - \omega$ είναι καλύτερα όσο αφορά στον υπολογισμό αντίθετων κλίσεων πίεσης και στον διαχωρισμό συνοριακών επιπέδων. Το μειονέκτημα της εξίσωσης ω είναι η σχετικά υψηλή ευαισθησία της λύσης η οποία εξαρτάται από τις τιμές k και ω εκτός του επιπέδου διάτμησης. Έτσι, η χρήση του standard $k - \omega$ μοντέλου δεν προτείνεται στο ANSYS FLUENT. Αντίθετα το SST $k - \omega$ μοντέλο σχεδιάστηκε για να αποφεύγεται η προηγούμενη ευαισθησία συνδυάζοντας στοιχεία από τις εξισώσεις ω και ϵ και βαθμονομήθηκε για να υπολογίζεται με ακρίβεια ο διαχωρισμός της ροής από τις επιφάνειες. Το SST $k - \omega$ μοντέλο είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο για τις αεροδυναμικές ροές.

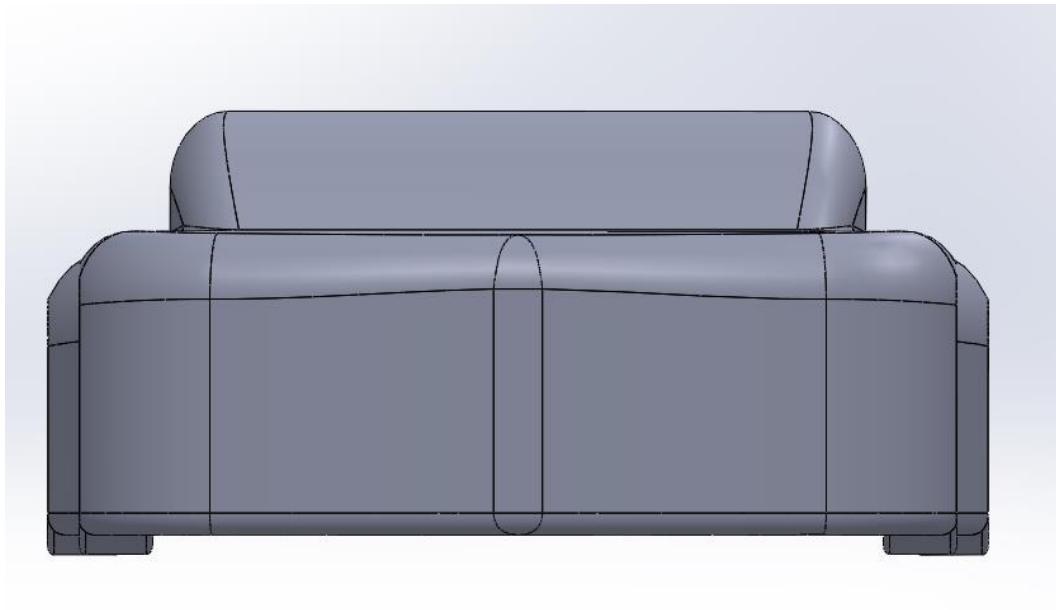
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

3.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

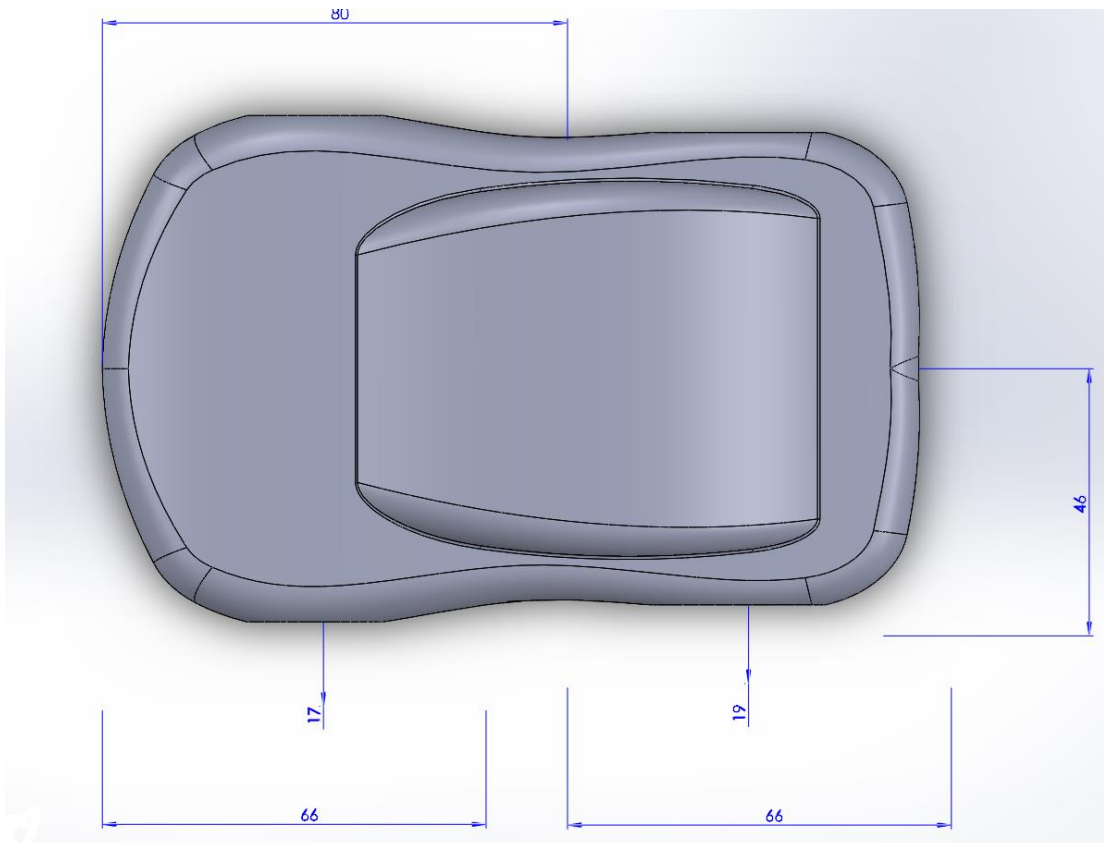
Για την μοντελοποίηση της γεωμετρίας χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Solid works. Παρατίθενται οι όψεις και οι διαστάσεις του τρισδιάστατου μοντέλου ενός αυτοκινήτου σε κλίμακα 1 : 30 και σε mm στα σχήματα 3.1-3.4.



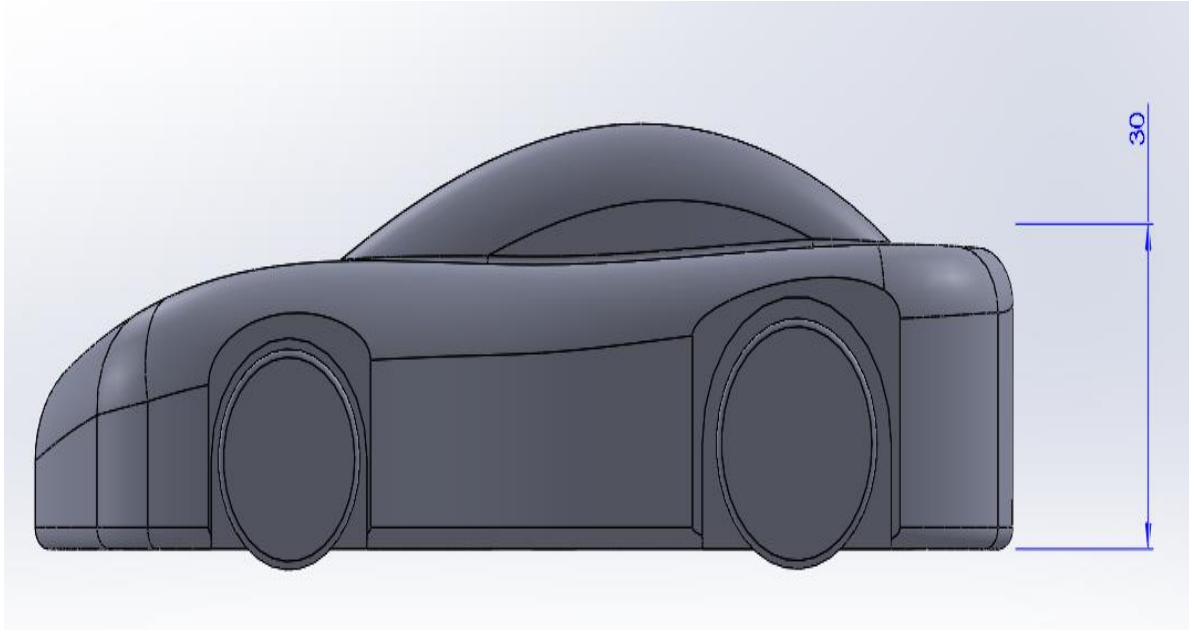
Σχήμα 3.1: Πρόσοψη μοντέλου



Σχήμα 3.2: Πίσω όψη μοντέλου



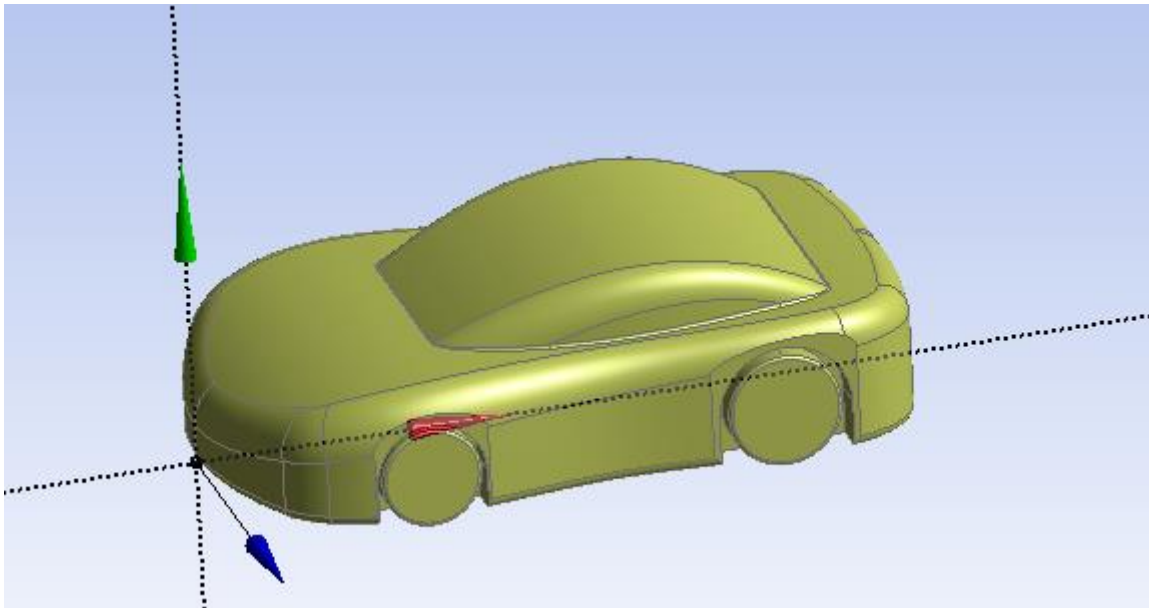
Σχήμα 3.3: Κάτοψη μοντέλου



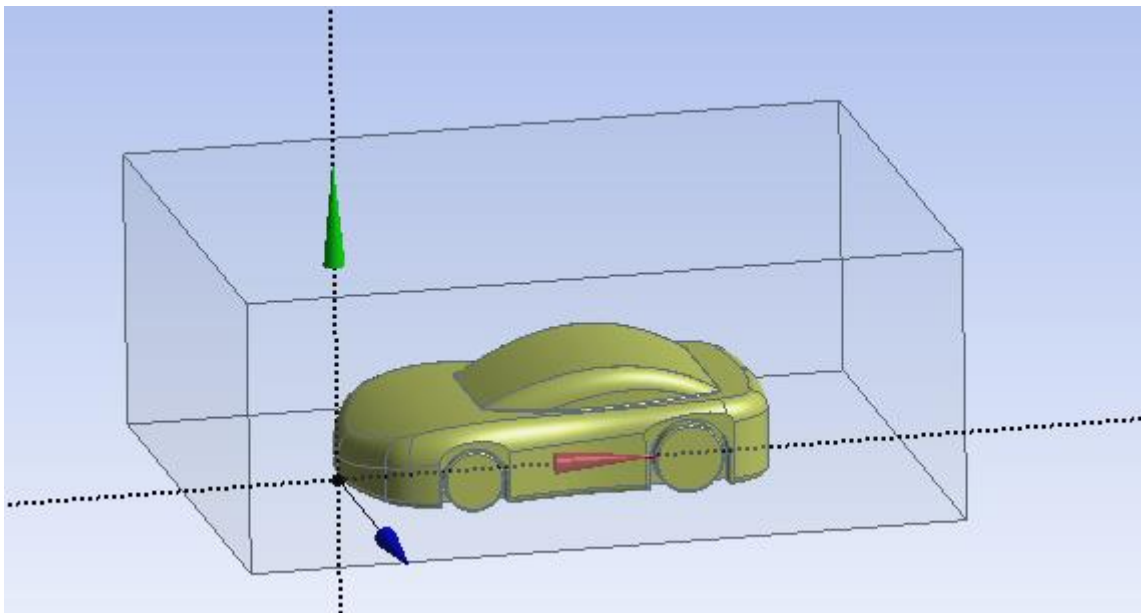
Σχήμα 3.4: Πλάγια όψη μοντέλου

3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

Αρχικά εισάγεται η γεωμετρία του μοντέλου στο Design Modeler ANSYS σχήμα 3.5. Για την προσομοίωση του αέρα γύρω από το αυτοκίνητο χρειάζεται να οριοθετηθεί ο όγκος ρευστού που θα συμπεριλαμβάνει το αυτοκίνητο σχήμα 3.6. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας μιας περίφραξης (enclosure) με ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού. Η περίφραξη παριστάνει το περιβάλλον. Για υπολογιστικούς λόγους το μέγεθος της περίφραξης λαμβάνεται να διαφέρει περίπου 5 cm σε σχέση με το αυτοκίνητο πλην του $-z$ που επιλέγεται 10^{-4} m διότι παριστάνει το έδαφος. Κατόπιν η γεωμετρία του αυτοκινήτου αφαιρείται από τον όγκο του αέρα.



Σχήμα 3.5: Γεωμετρία μοντέλου στο Design Modeler του ANSYS

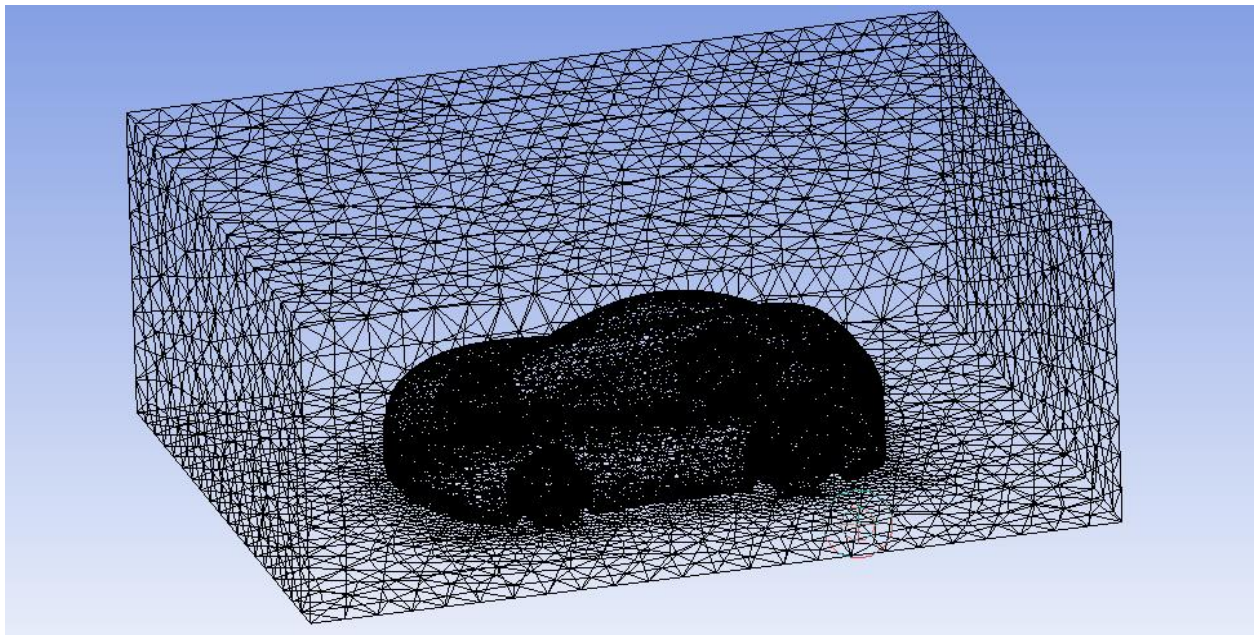


Σχήμα 3.6: Περίφραξη που παριστάνει τον όγκο του αέρα

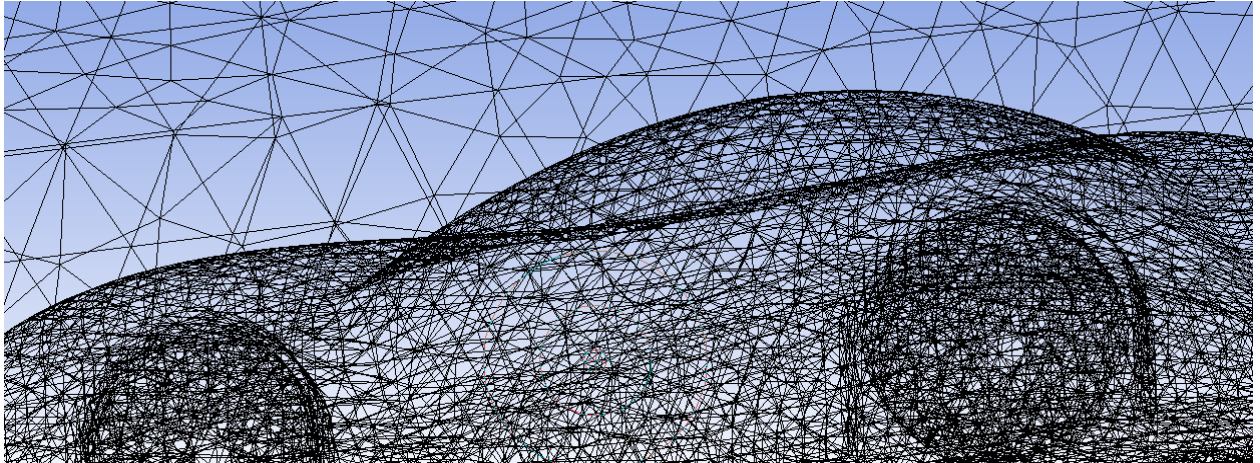
Κατόπιν παράγεται το πλέγμα με το Fluent Meshing του ANSYS όπως φαίνεται στα σχήματα 3.7 και 3.8. Οι παράμετροι παραγωγής πλέγματος που ορίζονται με την μέθοδο parallel meshing συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι παραγωγής του πλέγματος σύμφωνα με την μέθοδο parallel meshing

Use Advanced Size Function	On : Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Speed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	18°
Min Size	0.002 m
Max Size	0.01m
Max Face Size	0.02 m
Minimum Edge Length	$1.875 * 10^{-4}$ m

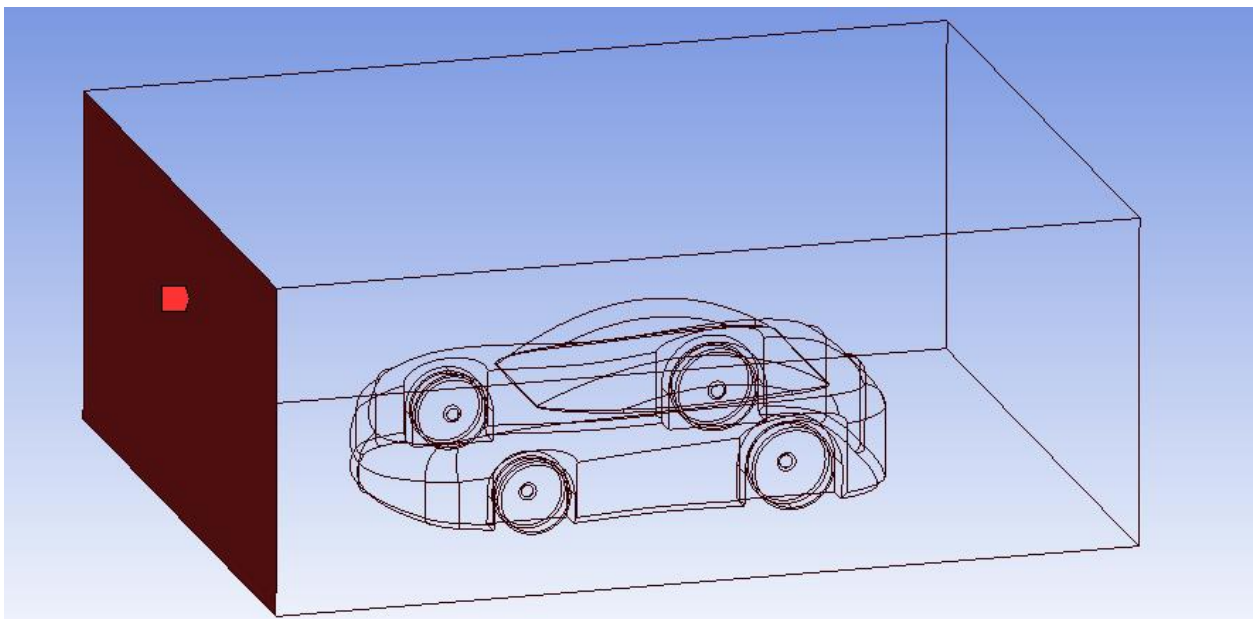


Σχήμα 3.7: Πλέγμα μοντέλου αυτοκινήτου

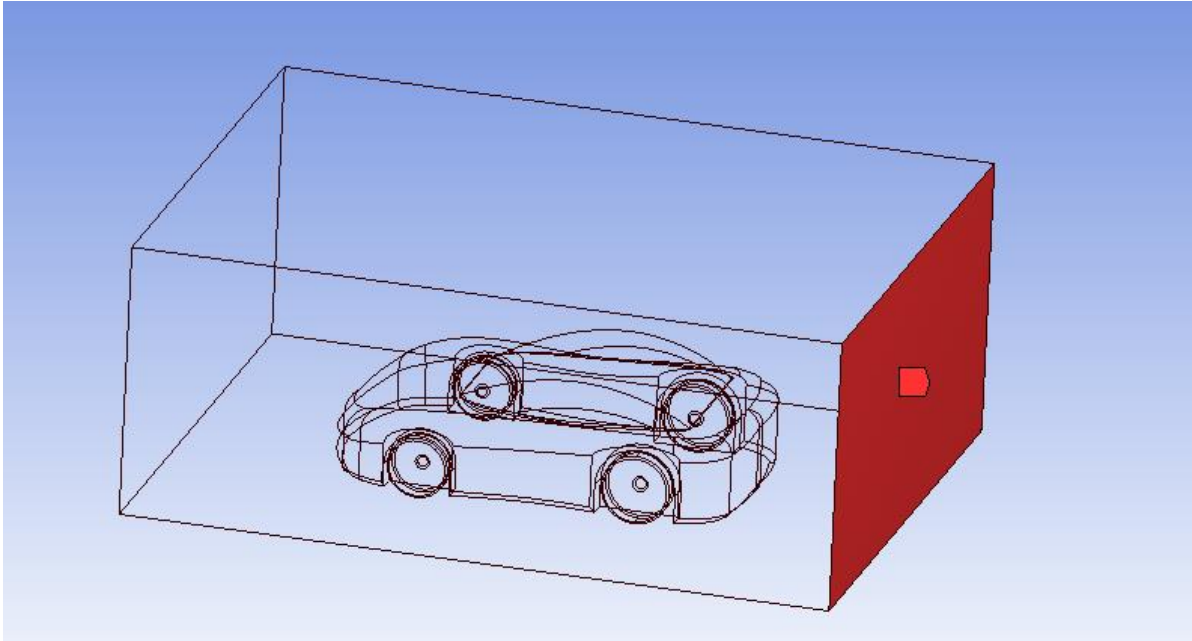


Σχήμα 3.8: Λεπτομέρεια πλέγματος μοντέλου αυτοκινήτου

Στα σχήματα 3.9 και 3.10 ορίζονται η είσοδος (inlet) και η έξοδος (outlet) στον όγκο του ρευστού.

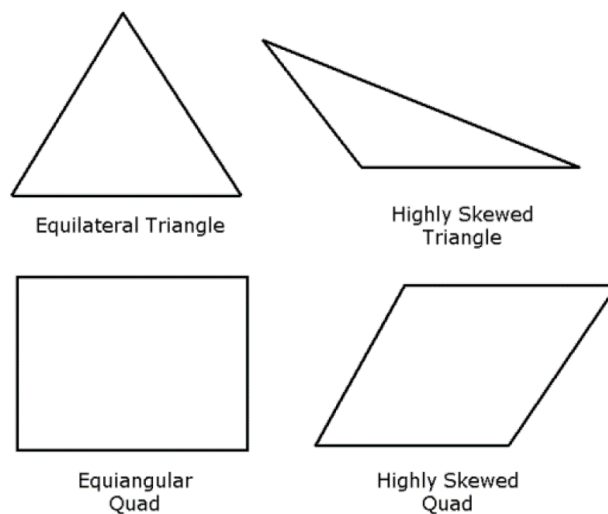


Σχήμα 3.9: Inlet μοντέλου αυτοκινήτου



Σχήμα 3.10: Outlet μοντέλου αυτοκινήτου

Το πλέγμα αποτελείται από 47788 κόμβους και 238871 κελιά. Όσο αφορά την ποιότητα του πλέγματος, η στρεβλότητα (skewness) είναι ένα από τα βασικότερα μέτρα ποιότητας του πλέγματος. Η στρεβλότητα προσδιορίζει πόσο κοντά είναι μια έδρα ή ένα κελί στο ιδανικό ισόπλευρο ή ισογώνιο σχήμα. Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται παράδειγμα ιδανικού και στρεβλωμένου τριγώνου και τετραπλεύρου, ενώ στον πίνακα 3.2 κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ποιότητα του πλέγματος οι δείκτες στρεβλότητας βάσει της τιμής τους.



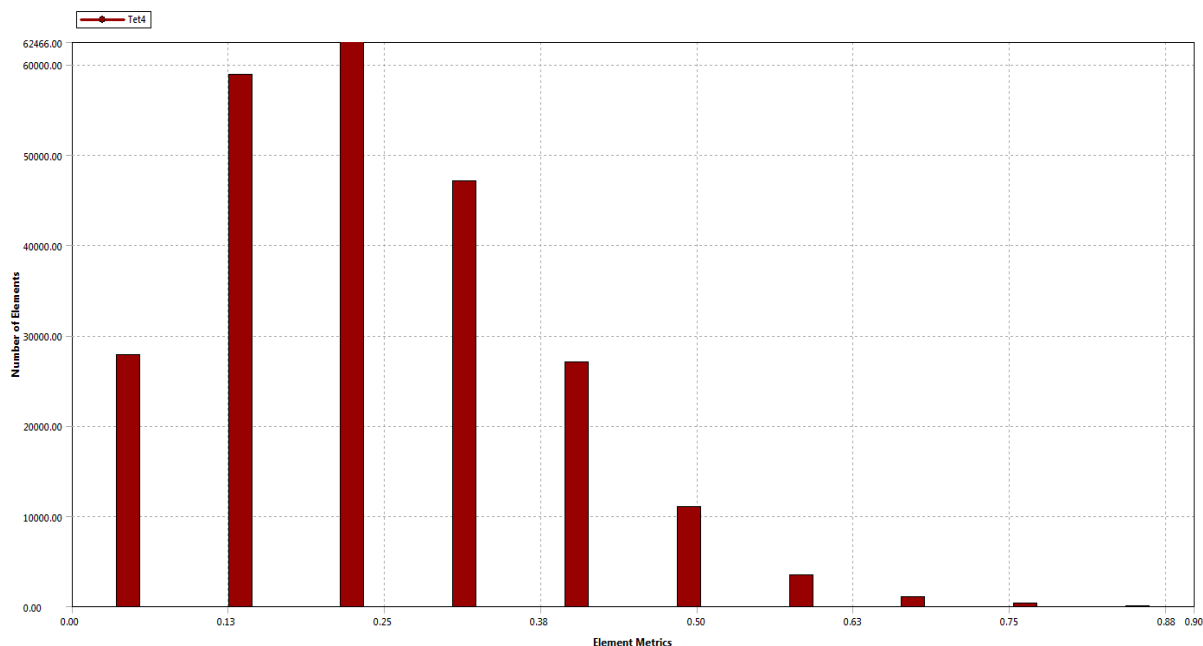
Σχήμα 3.11: Παράδειγμα ιδανικού και στρεβλωμένου τριγώνου και τετραπλεύρου

Πίνακας 3.2: Κατηγοριοποίηση δεικτων στρεβλώτητας

Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9-<1	bad (sliver)
0.75-0.9	poor
0.5-0.75	fair
0.25-0.5	good
>0-0.25	excellent
0	equilateral

Η στρεβλότητα των κελιών καθορίζουν την ποιότητα των κελιών και κατ'επέκταση την ποιότητα του πλέγματος. Σύμφωνα με τον ορισμό της στρεβλότητας, τιμές από 0.9 έως 1 σημαίνουν κακή έως εκφυλισμένη ποιότητα πλέγματος, ενώ τιμές μικρότερες από 0.5 έως 0 είναι αποδεκτές τιμές έως ιδανικές τιμές ποιότητας πλέγματος. Στα τρισδιάστα πλέγματα η πλειονότητα των κελιών πρέπει να είναι από καλή έως εξαιρετική, αλλά ένα μικρό ποσοστό κελιών είναι γενικά στα αποδεκτά όρια. Ο μέσος όρος του δείκτη στρεβλότητας στα τρισδιάστατα πλέγματα είναι περίπου 0.4. Η παρουσία κελιών χαμηλής ποιότητας μπορεί να σημαίνει κακή οριοθέτηση του συνόρου και για αυτό πρέπει να αποφεύγεται.

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.12 αποδεικνύεται ότι το πλέγμα του μοντέλου αυτοκινήτου είναι υψηλής ποιότητας καθώς το εύρος των δεικτών στρεβλότητας του πλέγματος είναι από 0.05 έως 0.5 και περίπου το 96% των κελιών έχει δείκτης στρεβλότητας από καλό έως εξαιρετικό, ενώ το ποσοστό χαμηλής ποιότητας (δείκτης στρεβλότητας > 0.75) θεωρείται αμελητέο. Το πλέγμα αποτελείται κατά αποκλειστικότητα από τετράεδρα.



Σχήμα 3.12: Δείκτες στρεβλότητας και είδη κελιών πλέγματος αυτοκινήτου

3.3 ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ ΚΑΙ ΑΝΤΩΣΗ

Αντίσταση ή οπισθέλκουσα (Drag) ονομάζεται η δύναμη η οποία έχει τον ίδιο φορέα με αυτόν της ταχύτητας, αλλά αντίθετη φορά, και εμφανίζεται κατά την κίνηση αντικειμένων εντός ρευστού. Η παρουσία της δύναμης οφείλεται στη διαφορετική πίεση η οποία επικρατεί στις δύο πλευρές ενός σώματος. Ο συντελεστής Drag C_d ορίζεται από την σχέση (3.1), όπου F_d η οπισθέλκουσα δύναμη, ρ η πυκνότητα του ρευστού, u η ταχύτητα του αντικειμένου εντός του ρευστού και A η επιφάνεια αναφοράς.

$$c_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A} \quad (3.1)$$

Άντωση (lift) ονομάζεται η δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα, όταν το σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό και η κατεύθυνση της οποίας είναι πάντα κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του σώματος. Όταν η φορά της δύναμης είναι προς το έδαφος, όπως συμβαίνει στις αεροτομές των αυτοκινήτων, τότε η δύναμη λέγεται αρνητική άντωση. Αν ο συντελεστής lift για μια συγκεκριμένη γωνία είναι γνωστός τότε η άντωση που προκαλείται για συγκεκριμένες συνθήκες ροής δίνεται από την σχέση (3.2), όπου

L η άντωση, ρ η πυκνότητα του ρευστού (αέρα), u η ταχύτητα του αέρα, A η επιφάνεια αναφοράς και C_L για την επιθυμητή γωνία, αριθμό Mach και αριθμό Reynolds.

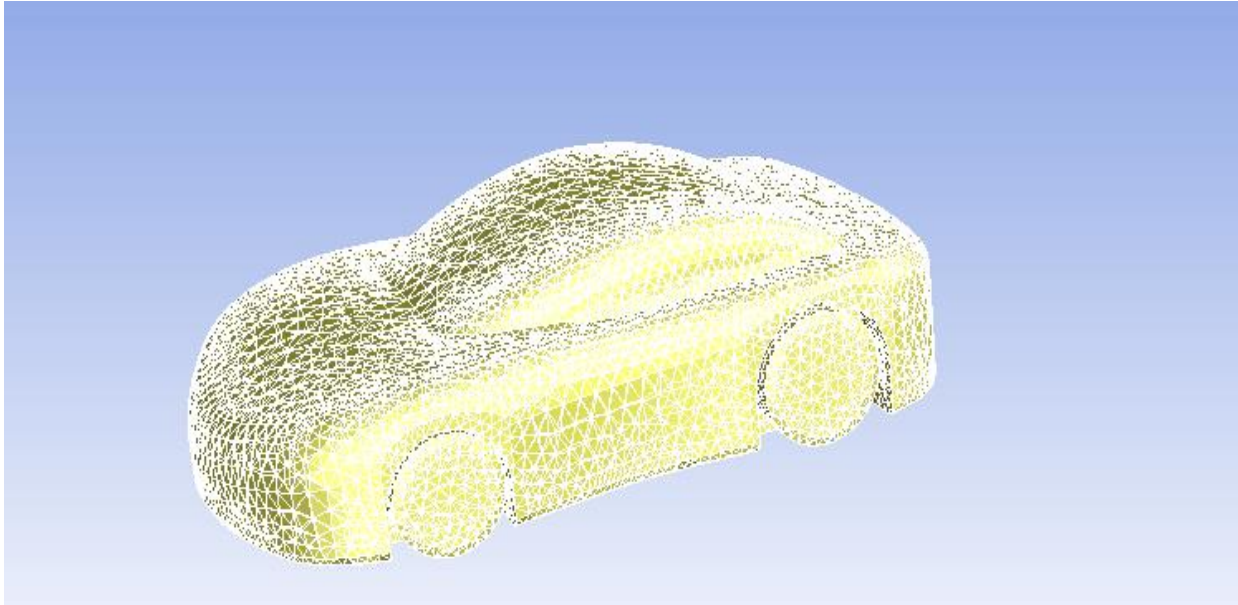
$$L = \frac{1}{2}\rho v^2 AC_L \quad (3.2)$$

Ως λόγος άντωσης – οπισθέλκουσας (lift – to – drag ratio) ή L / D ορίζεται το ποσό της άντωσης που παράγεται από ένα όχημα προς την οπισθέλκουσα όταν αυτό κινείται μέσα στον αέρα. Ένας υψηλός λόγος άντωσης – οπισθέλκουσας είναι επιθυμητός στον σχεδιασμό των οχημάτων γιατί η χαμηλή οπισθέλκουσα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και άλλα οφέλη με δεδομένο ότι το βάρος του οχήματος καθορίζει την άντωση. Ο μέγιστος λόγος L / D που δίνεται από την σχέση (3.3) εξαρτάται από το λόγο μήκους – πλάτους A του οχήματος, από τον συντελεστή απόδοσης ε και τον συντελεστή drag μηδενικής άντωσης $C_{D,0}$, ενώ είναι ανεξάρτητος από το βάρος και την επιφάνεια του οχήματος.

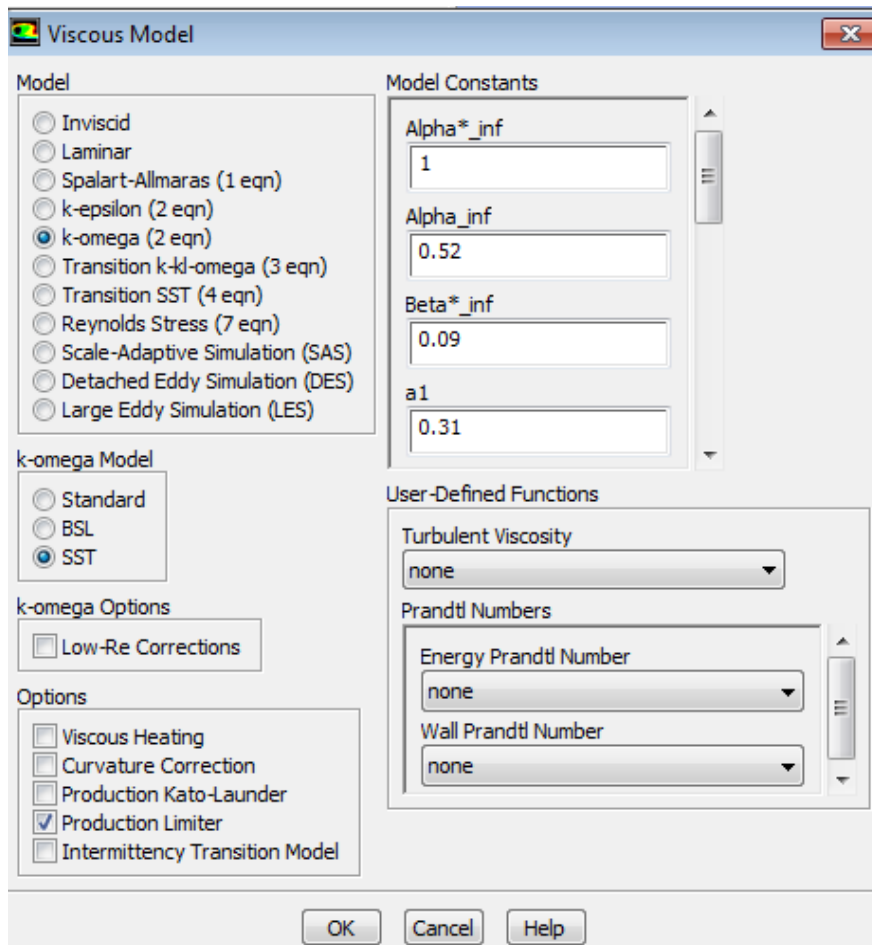
$$(L/D)_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi A \epsilon}{C_{D,0}}} \quad (3.3)$$

3.4 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

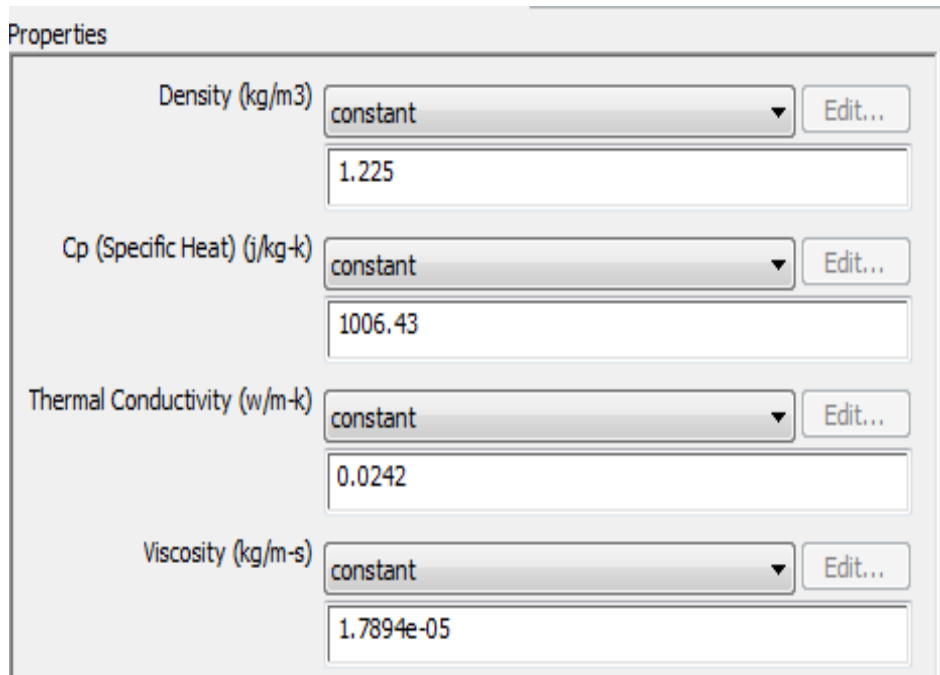
Η αεροδυναμική μελέτη του αυτοκινήτου γίνεται για διάφορες ταχύτητες στο εύρος από 40 – 120 km / h ανά 10 km / h. Αρχικά εισάγεται το πλέγμα του μοντέλου αυτοκινήτου στο ANSYS FLUENT όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13 και επιλέγεται ο solver να είναι pressure. Επιλέγονται το μοντέλο ενέργειας και το μοντέλο τύρβης, οι παράμετροι του οποίου φαίνονται στο σχήμα 3.14. Οι ιδιότητες του ρευστού (αέρα) ορίζονται από την καρτέλα materials (σχήμα 3.15). Στην συνέχεια ορίζονται οι οριακές συνθήκες του μοντέλου, συγκεκριμένα ορίζεται η ταχύτητα του ρευστού, η ένταση και λόγος ιξώδους της τύρβης, και η θερμοκρασία ρευστού (300 K = 27 °C) όπως φαίνονται στα σχήματα 3.16 και 3.17 αντίστοιχα. Στις συνθήκες λειτουργίας στην καρτέλα cell conditions ορίζεται η πίεση λειτουργίας 101325 Pascal που αντιστοιχεί σε 1 atm. Στην καρτέλα Solutions επιλέγεται η εξίσωση κινητικής ενέργειας της τύρβης, και της ορμής να επιλυθούν με σχήμα Upwind δεύτερης τάξης (σχήμα 3.18), ενώ ο συντελεστής relaxation επιλέγεται 0.25. Η αρχικοποίηση γίνεται με βάση τις τιμές της inlet (σχήμα 3.19). Τέλος επιλέγονται 100 επαναλήψεις της επίλυσης έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση της λύσης. Από τα results του ANSYS FLUENT και από το ANSYS CFD POST εξάγονται τα δεδομένα της επίλυσης.



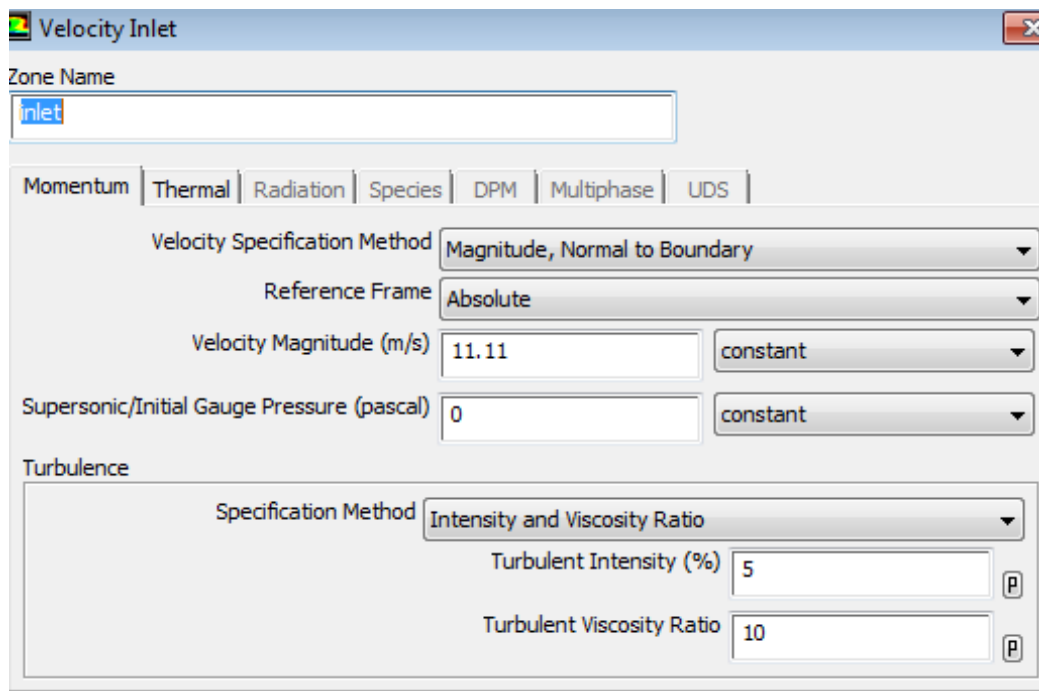
Σχήμα 3.13: Πλέγμα αυτοκινήτου στο ANSYS FLUENT



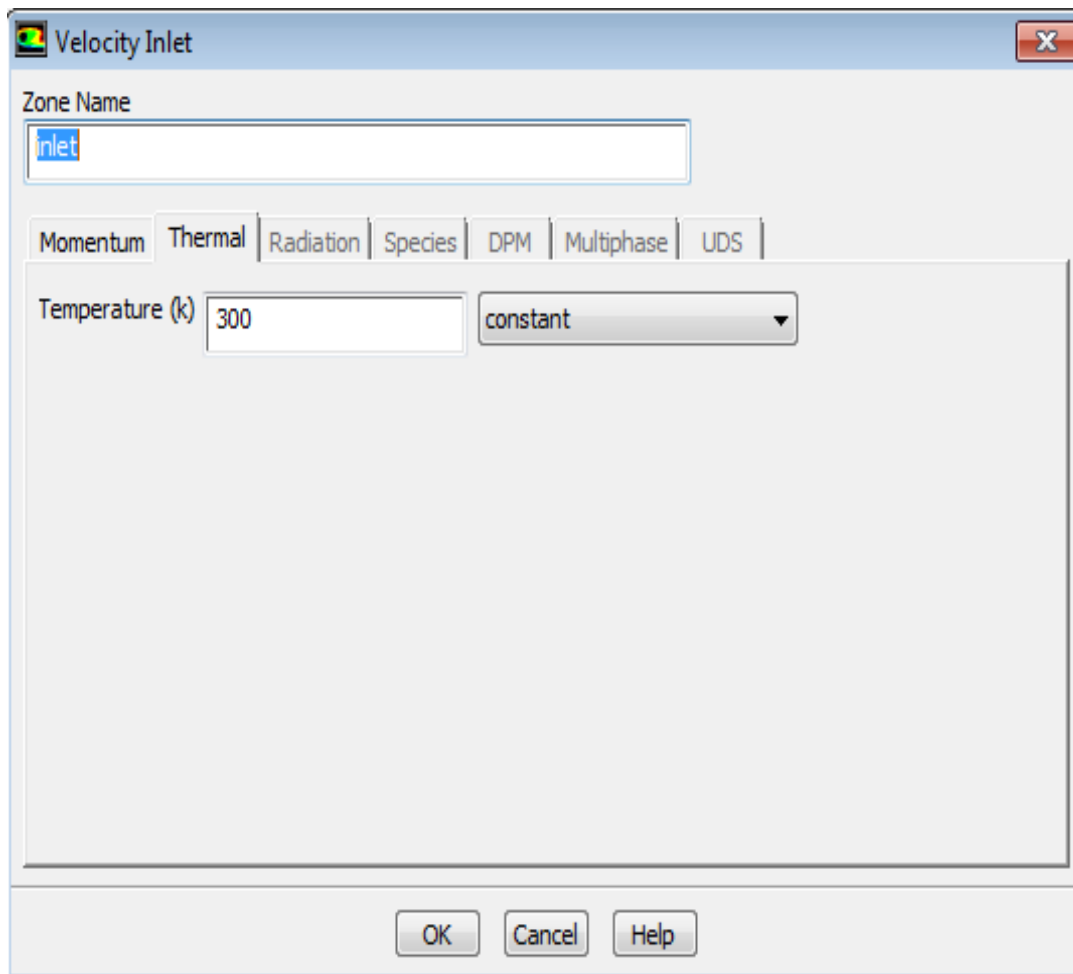
Σχήμα 3.14: Παράμετροι μοντέλου τύρβης για το μοντέλο αυτοκινήτου



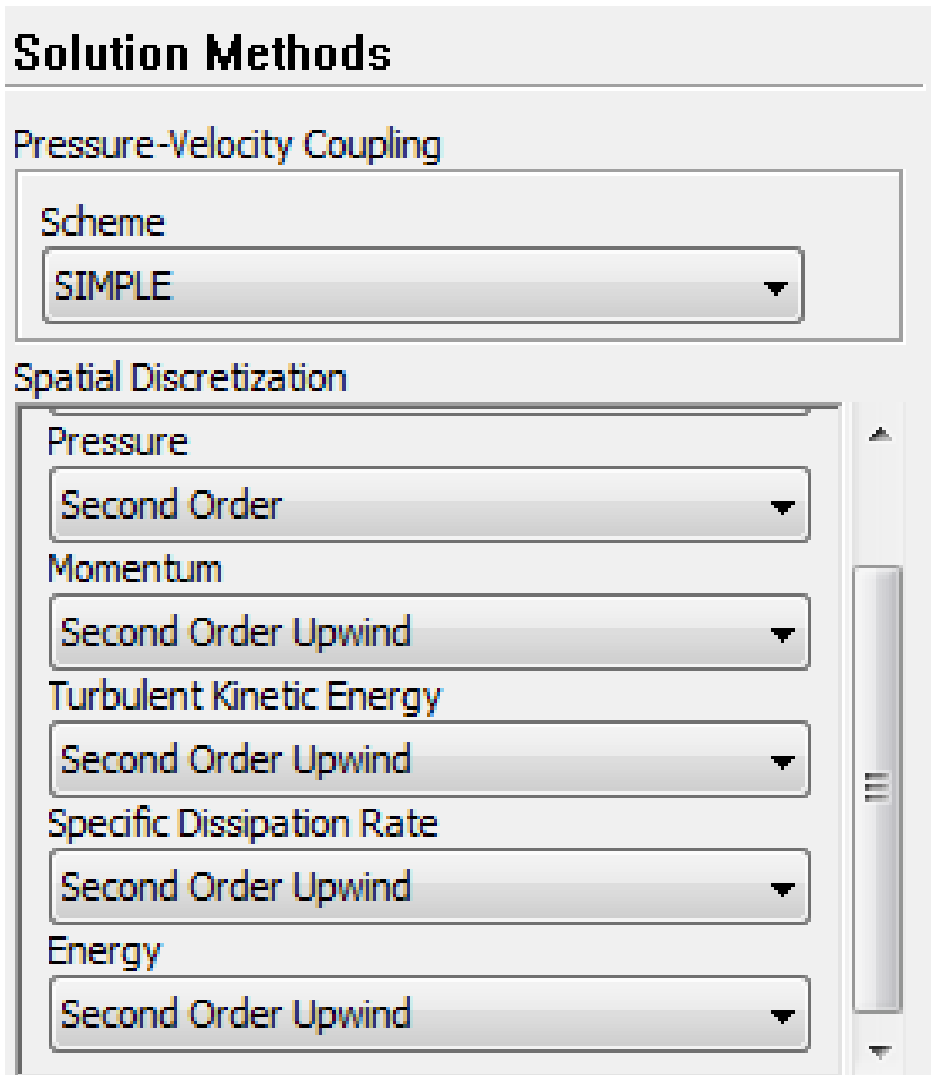
Σχήμα 3.15: Παράμετροι ρευστού (αέρα) για το μοντέλο αυτοκινήτου



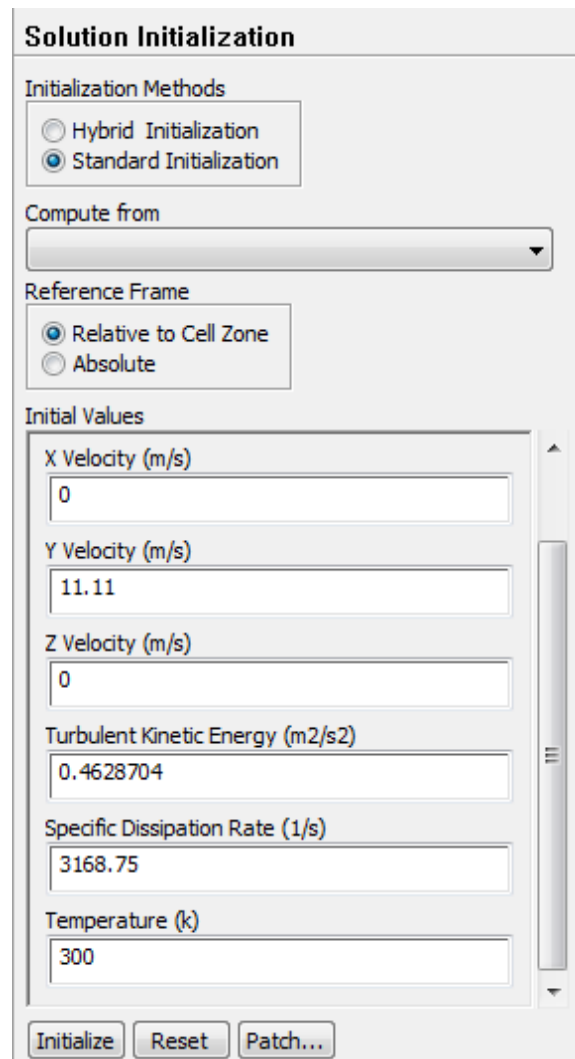
Σχήμα 3.16: Ορισμός ταχύτητας ρευστού, έντασης και λόγου ιξώδους τύρβης για το μοντέλο αυτοκινήτου



Σχήμα 3.17: Ορισμός θερμοκρασίας ρευστού για το μοντέλο αυτοκινήτου

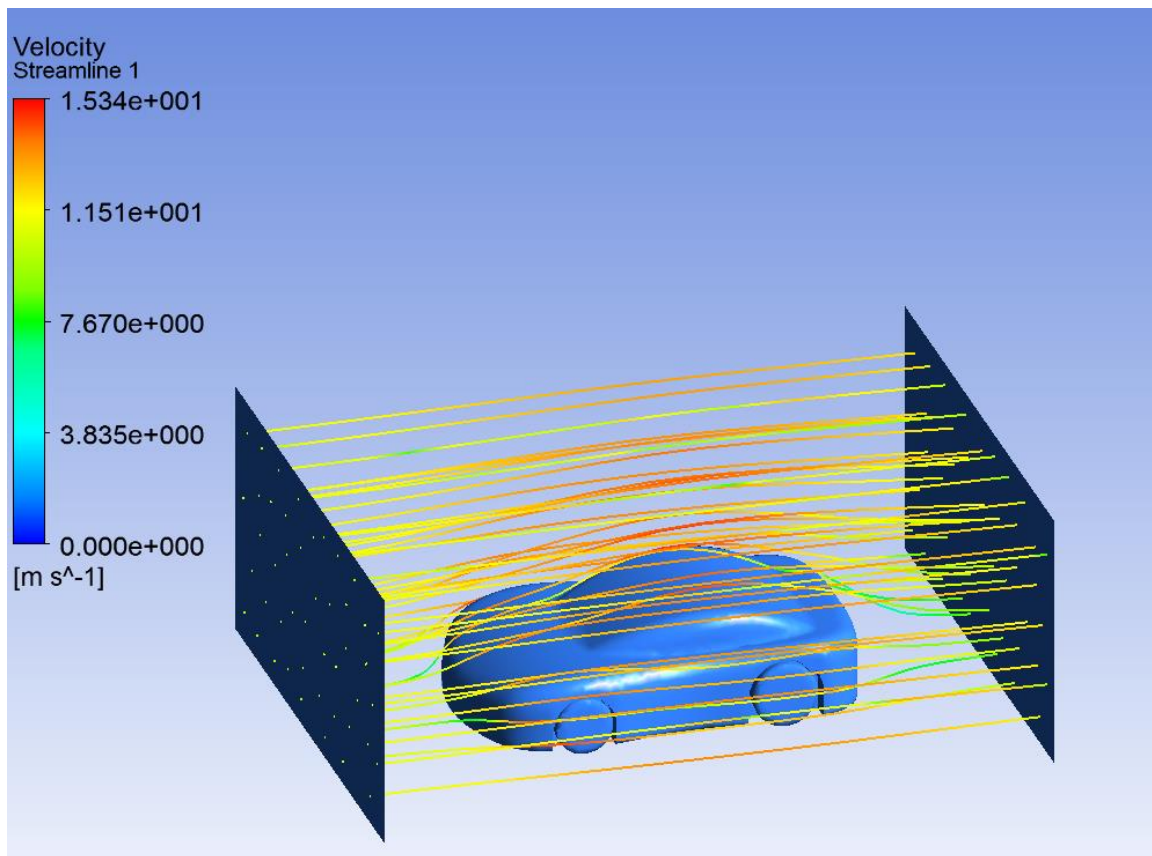


Σχήμα 3.18: Σχήμα Upwind δεύτερης τάξης, για την επίλυση των εξισώσεων κινητικής ενέργειας τύρβης, ενέργειας και ορμής για το μοντέλο αυτοκινήτου.

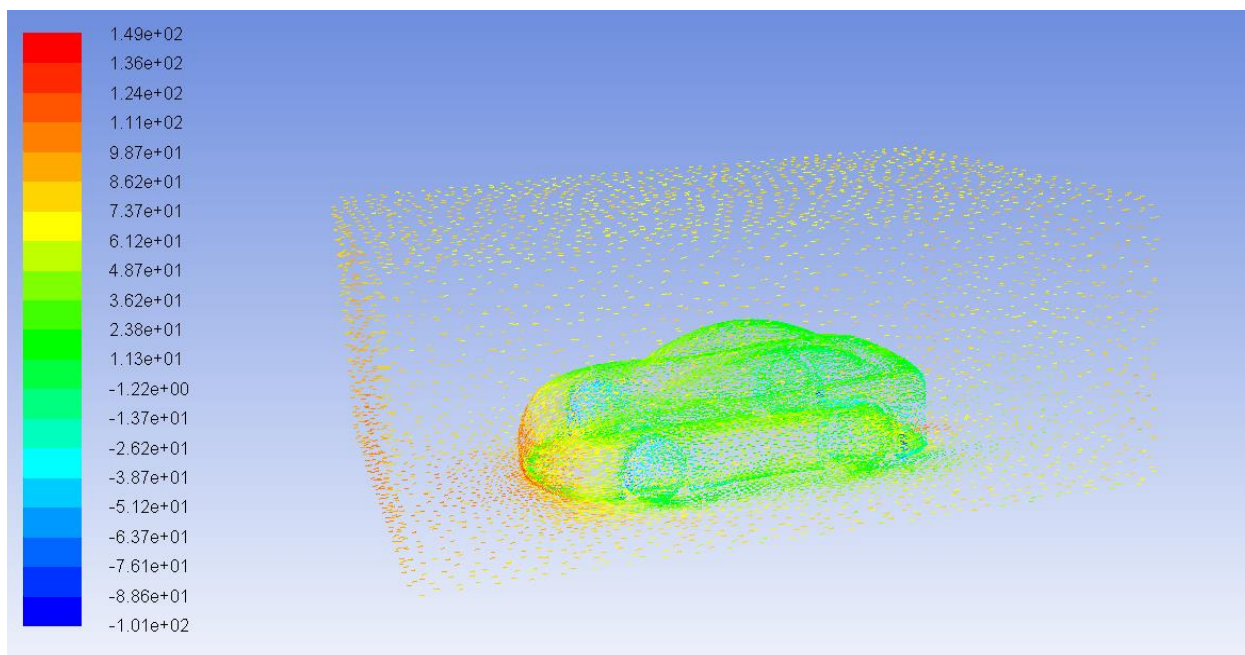


Σχήμα 3.19: Αρχικοποίηση λύσης για το μοντέλο αυτοκινήτου

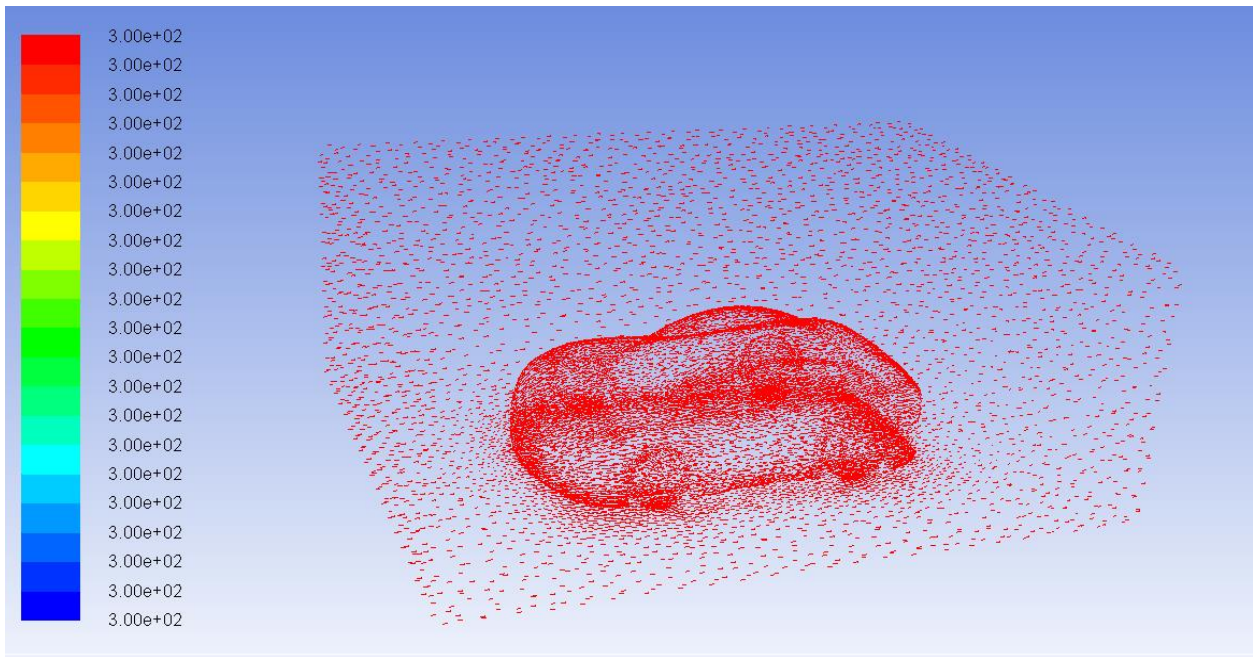
Προχωράμε τώρα στα αποτελέσματα για συγκεκριμένες ροές αέρα από 40 km /h μέχρι 120 km /h. Έτσι για ταχύτητα αέρα 40 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.20 - 3.23.



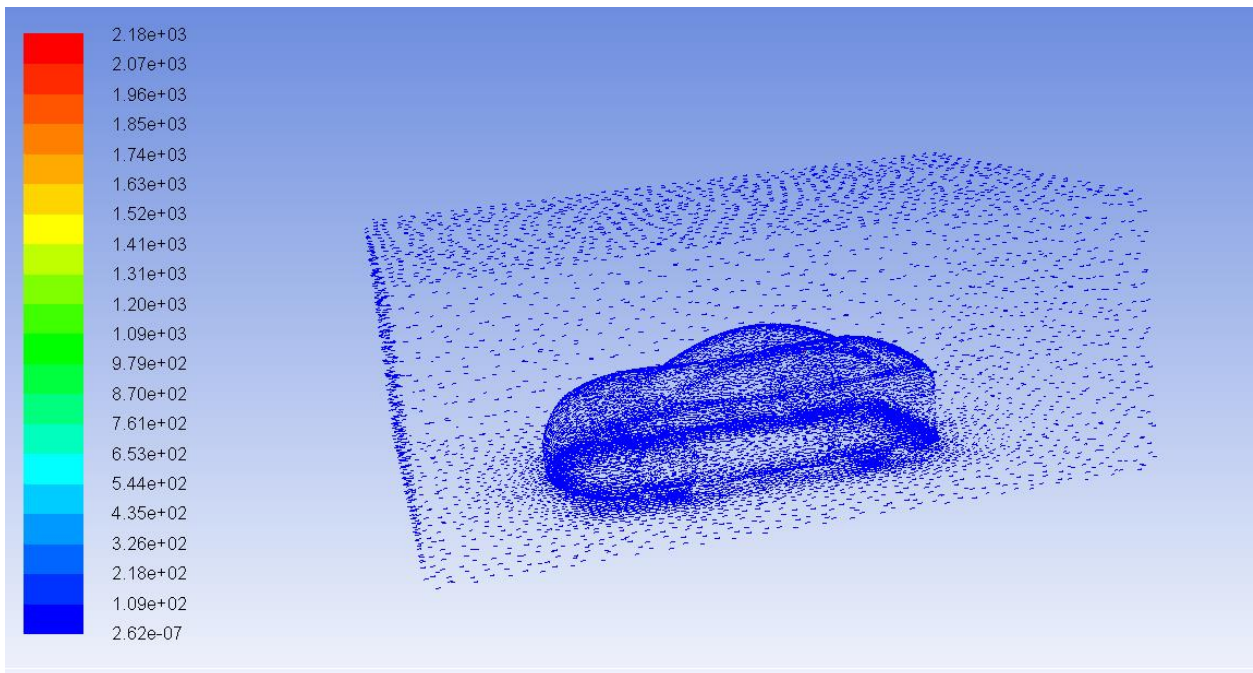
Σχήμα 3.20: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου



Σχήμα 3.21: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

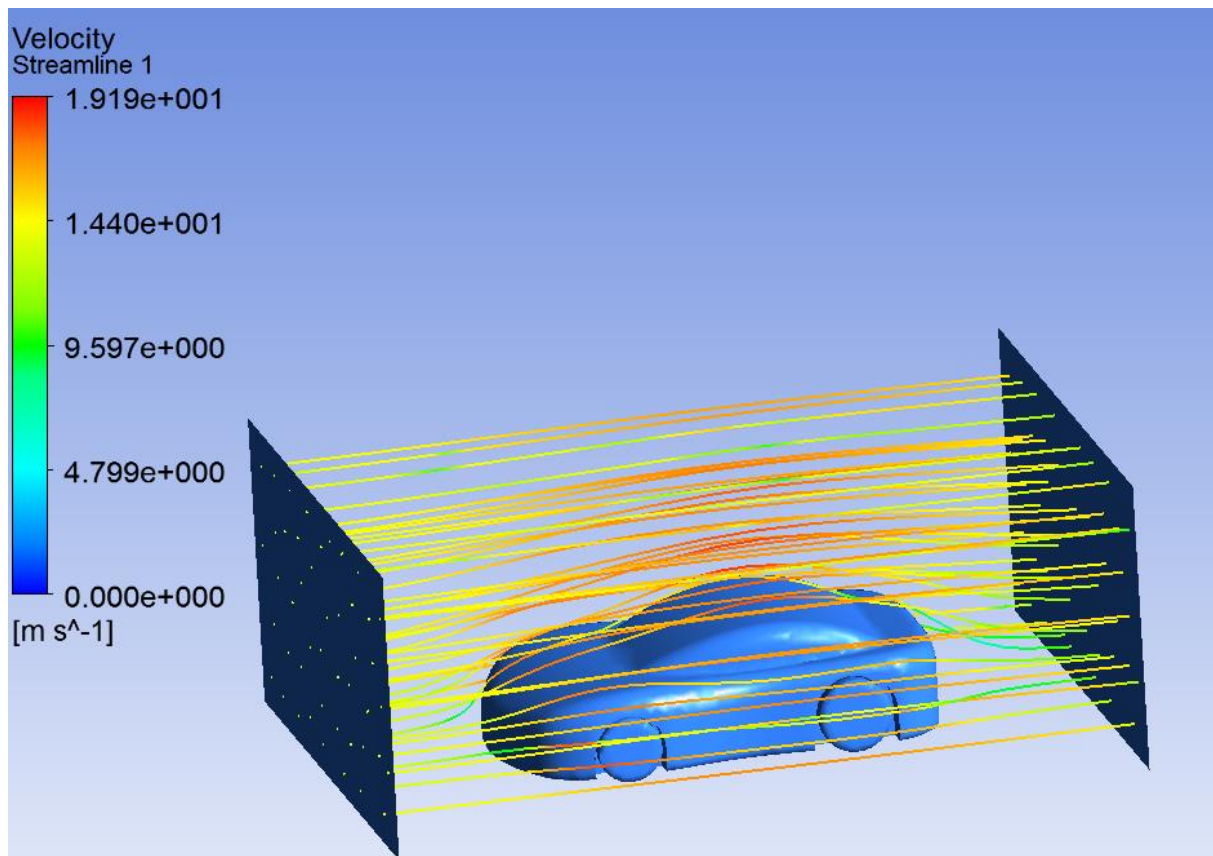


Σχήμα 3.22: Περίγραμμα ολικής θερμοκρασίας, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

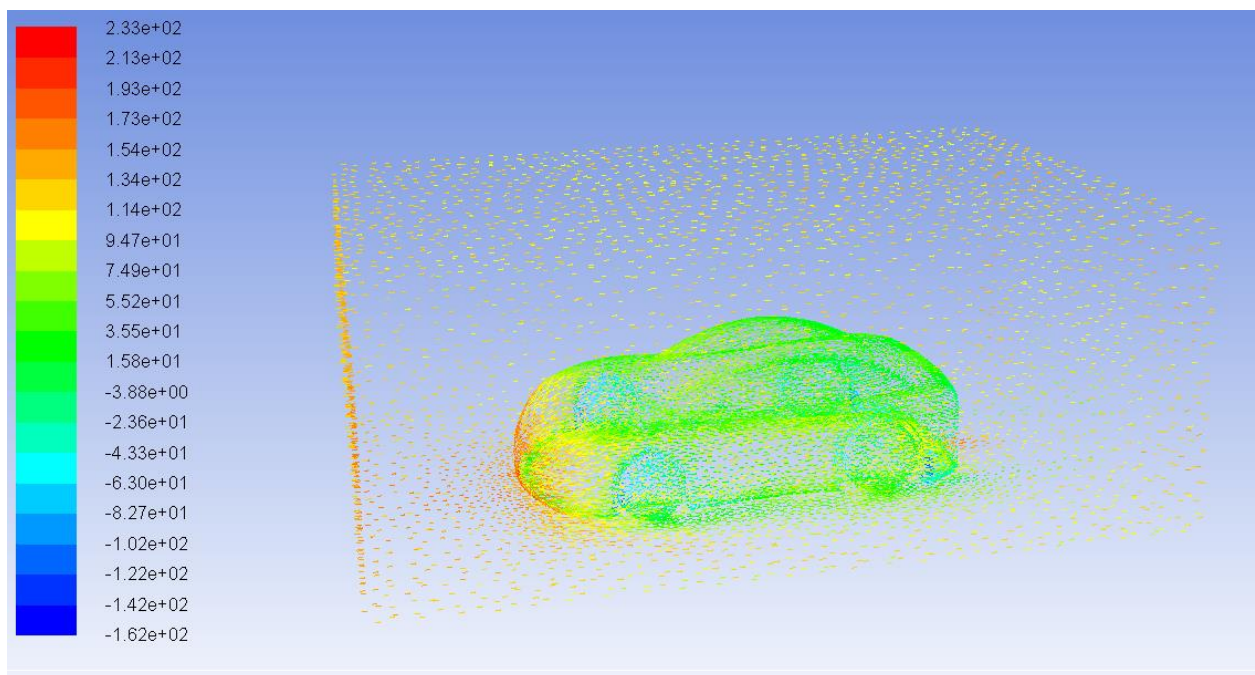


Σχήμα 3.23: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

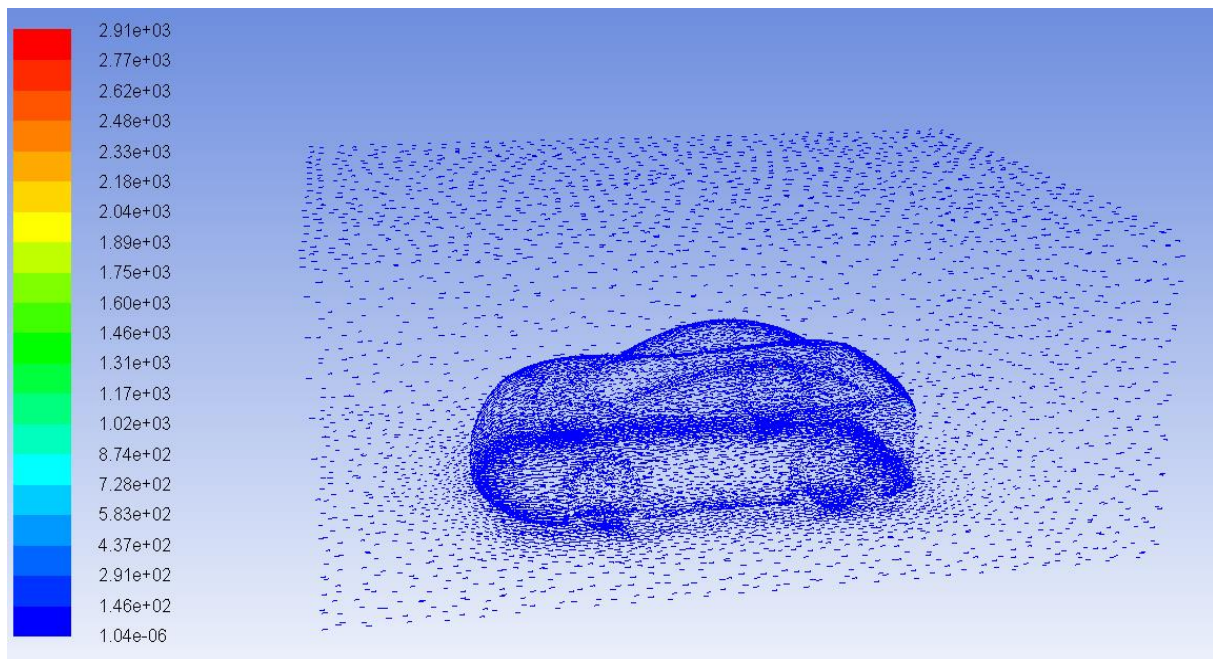
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.12453$ και $c_d = 0.0034943$. Για ταχύτητα αέρα 50 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.24 - 3.26.



Σχήμα 3.24: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

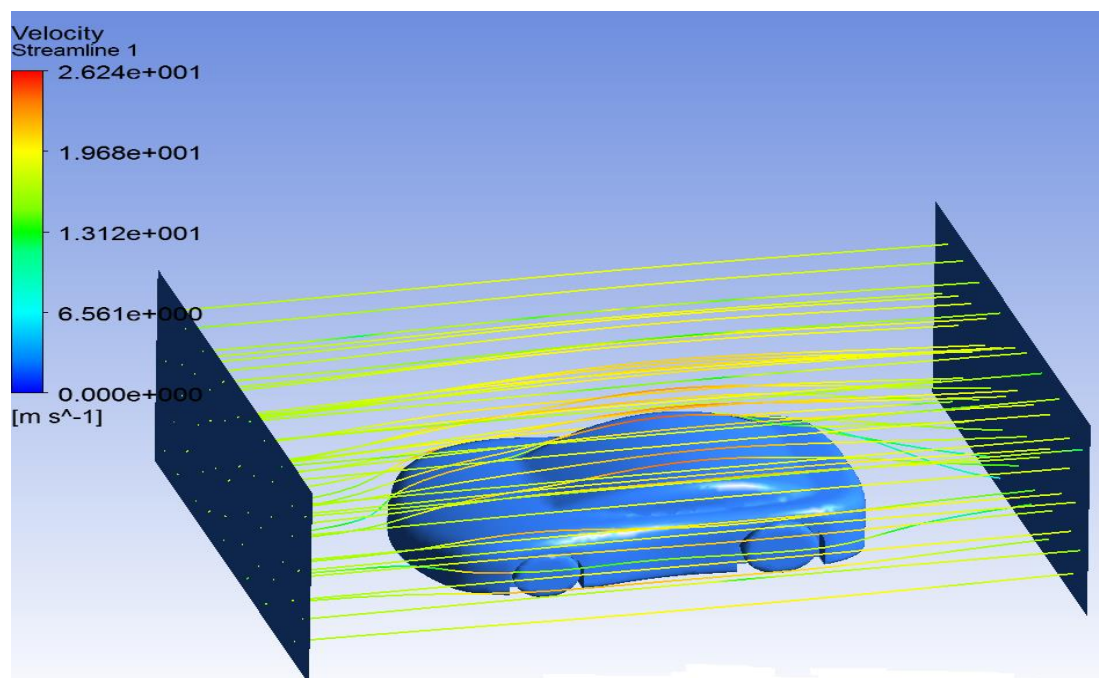


Σχήμα 3.25: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

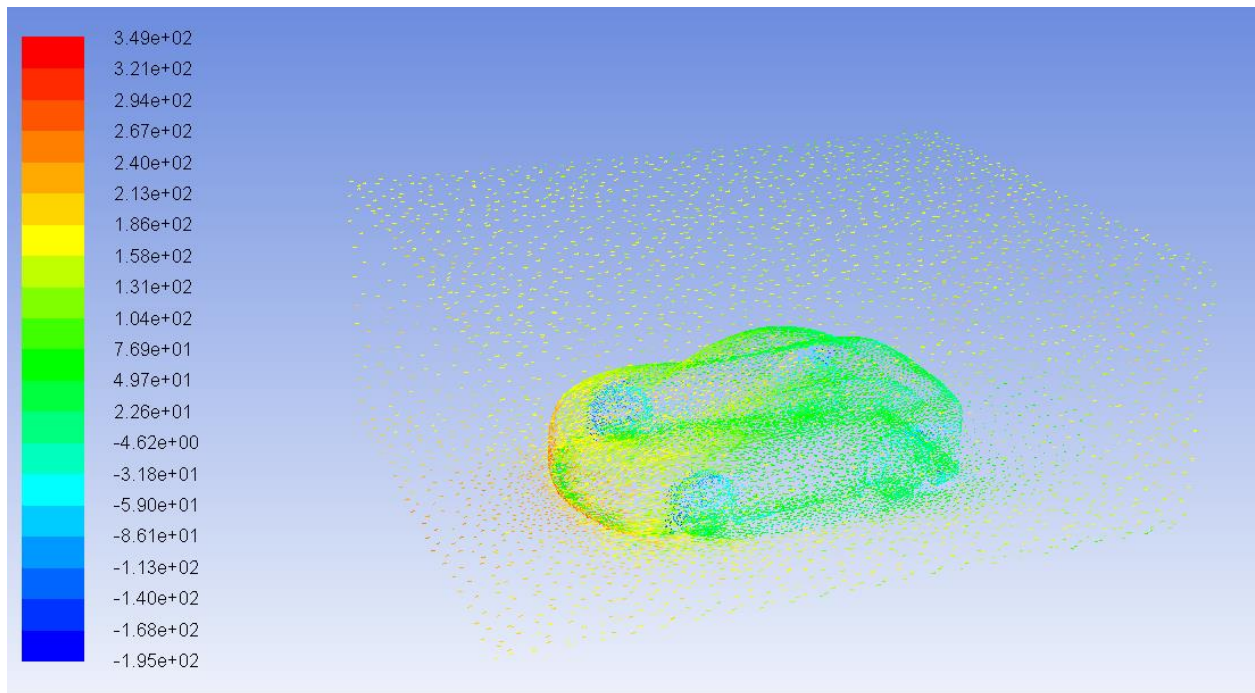


Σχήμα 3.26: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

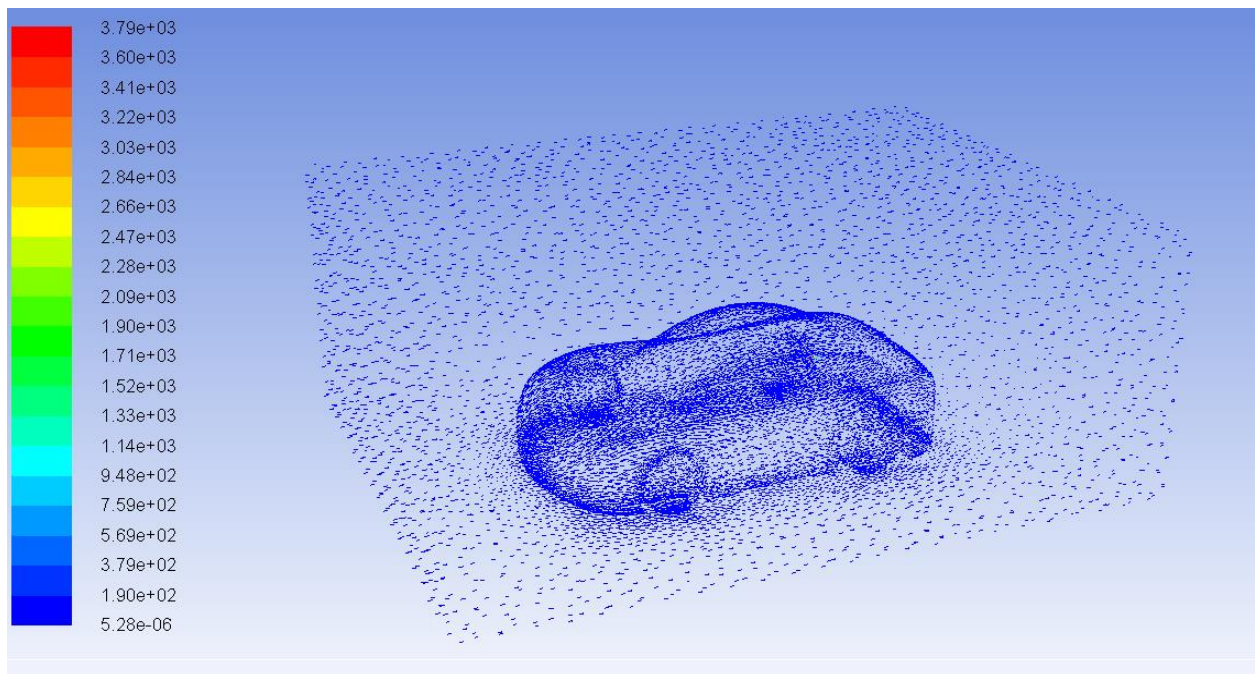
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.18304$ και $c_d = 0.005442$. Για ταχύτητα αέρα 60 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.27 -3 .29.



Σχήμα 3.27: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

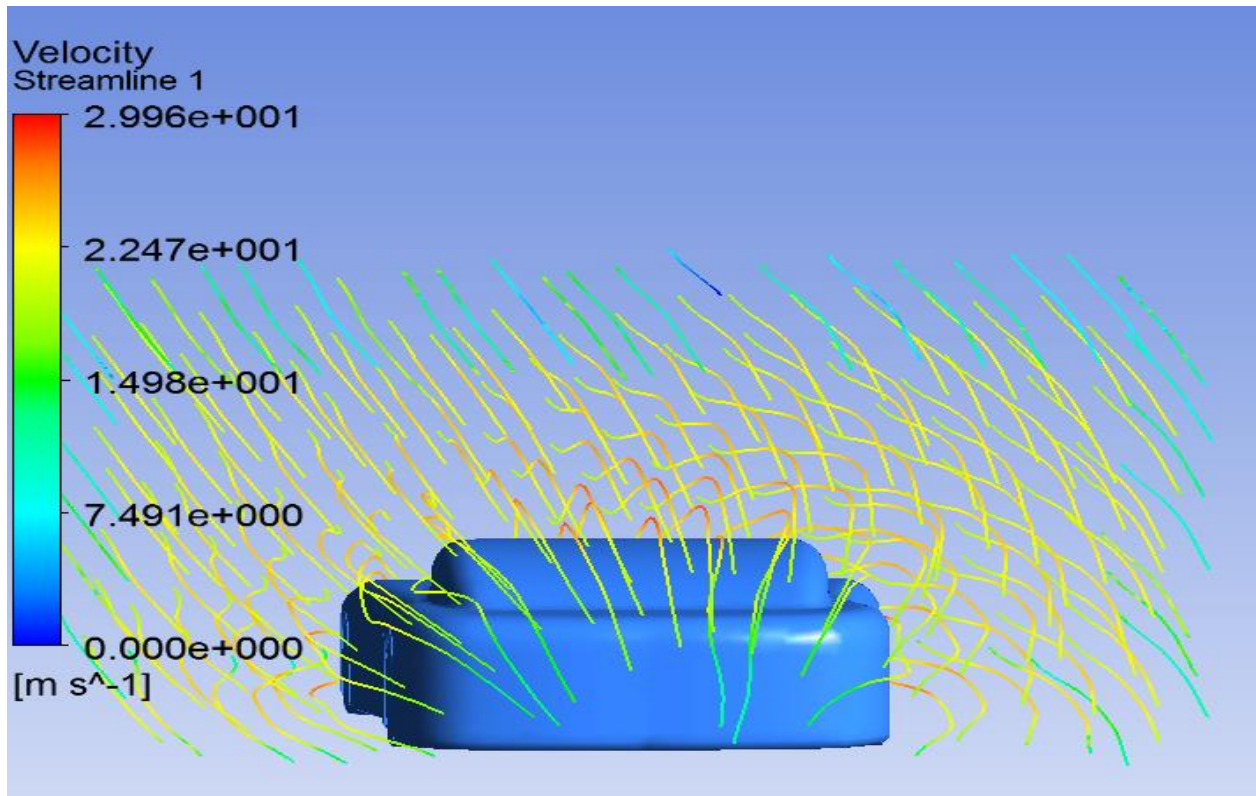


Σχήμα 3.28: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

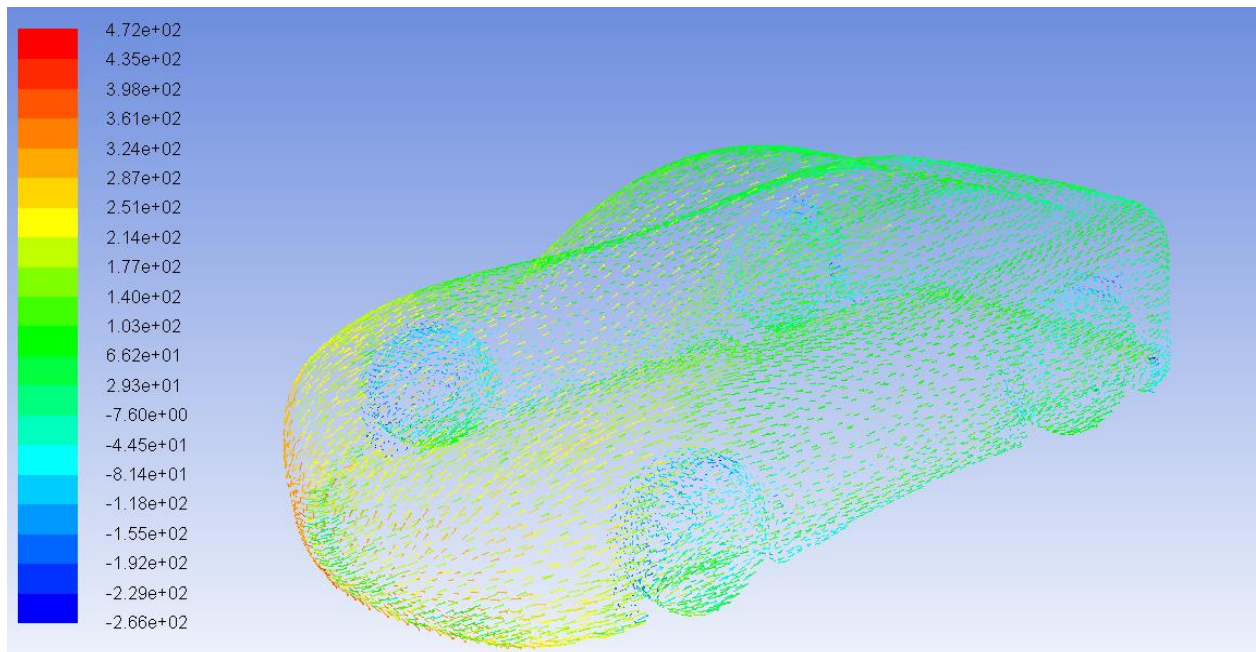


Σχήμα 3.29: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου.

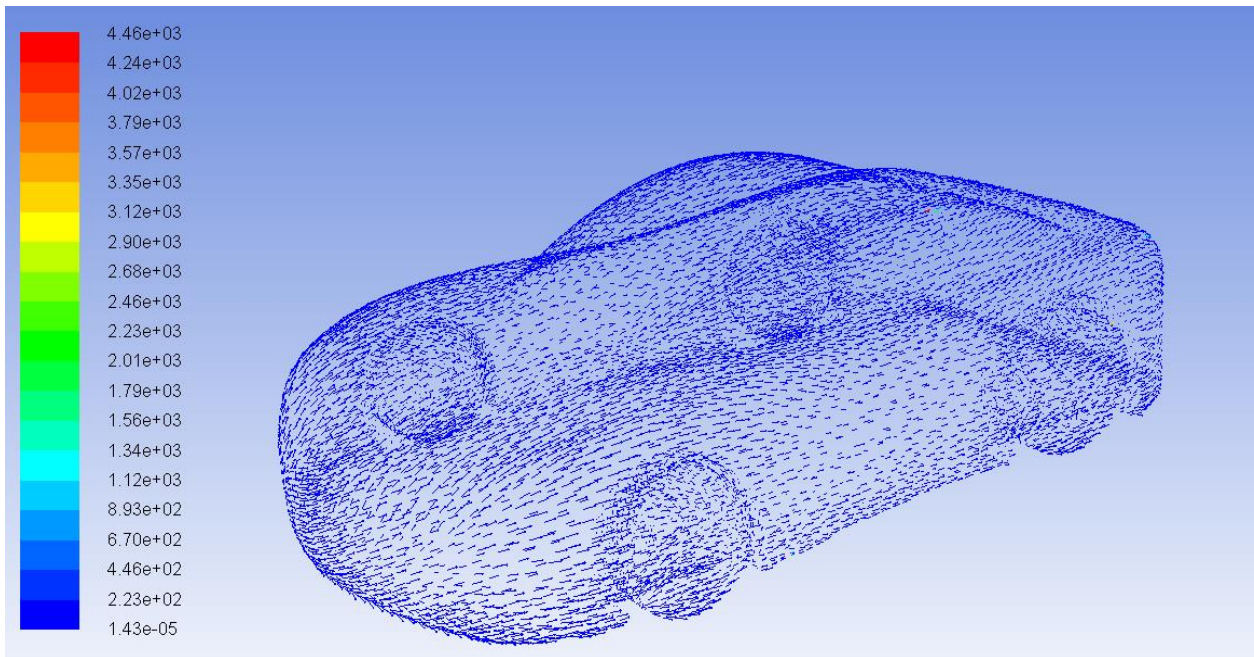
Για ταχύτητα αέρα 70 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.30 - 3.32.



Σχήμα 3.30: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

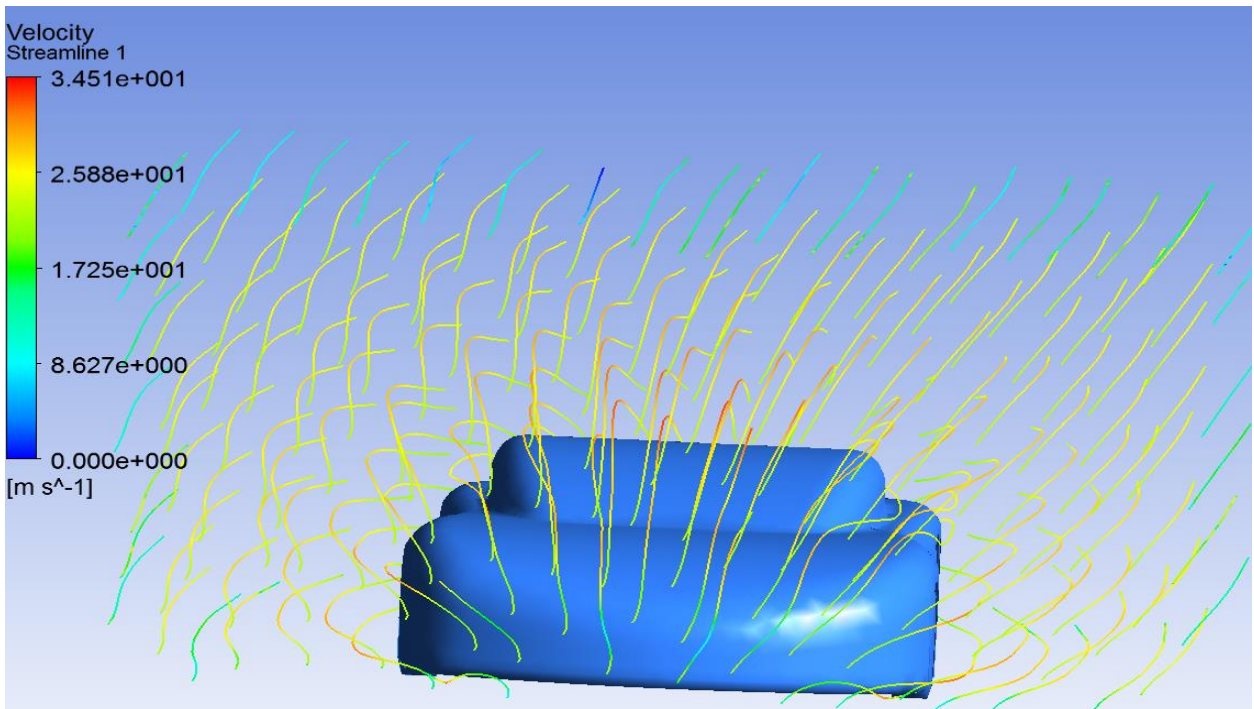


Σχήμα 3.31: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

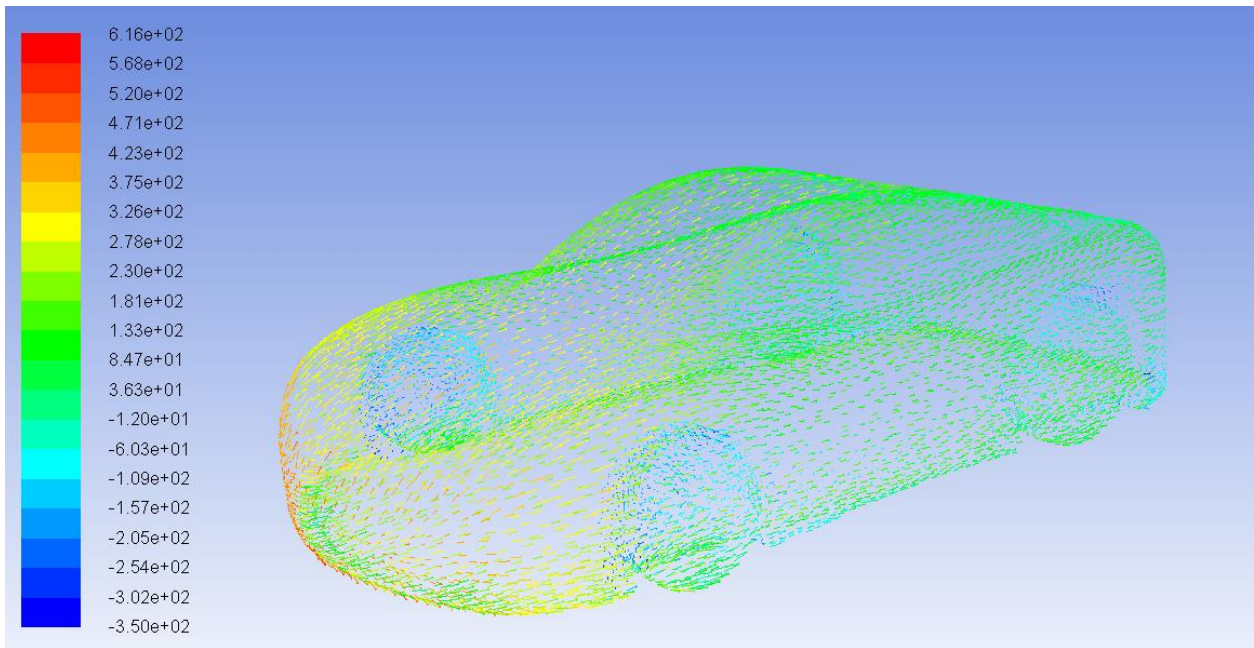


Σχήμα 3.32: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

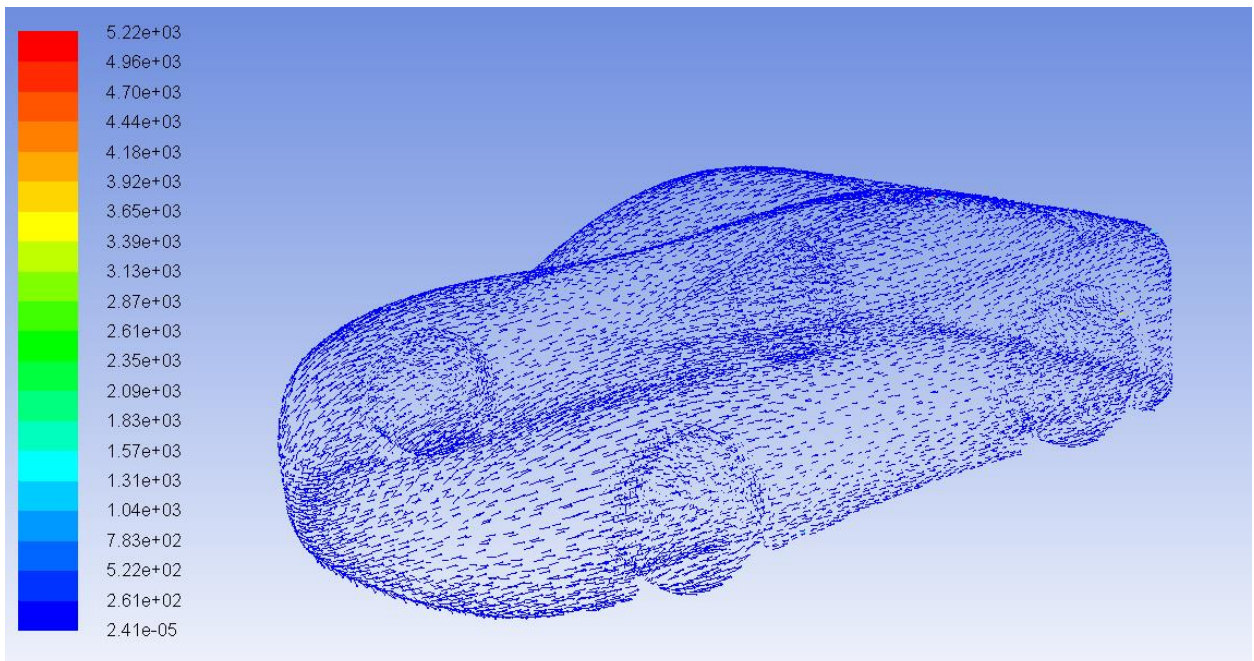
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.30078$ και $c_d = 0.0089931$. Για ταχύτητα αέρα 80 km /h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.33 - 3.35.



Σχήμα 3.33: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

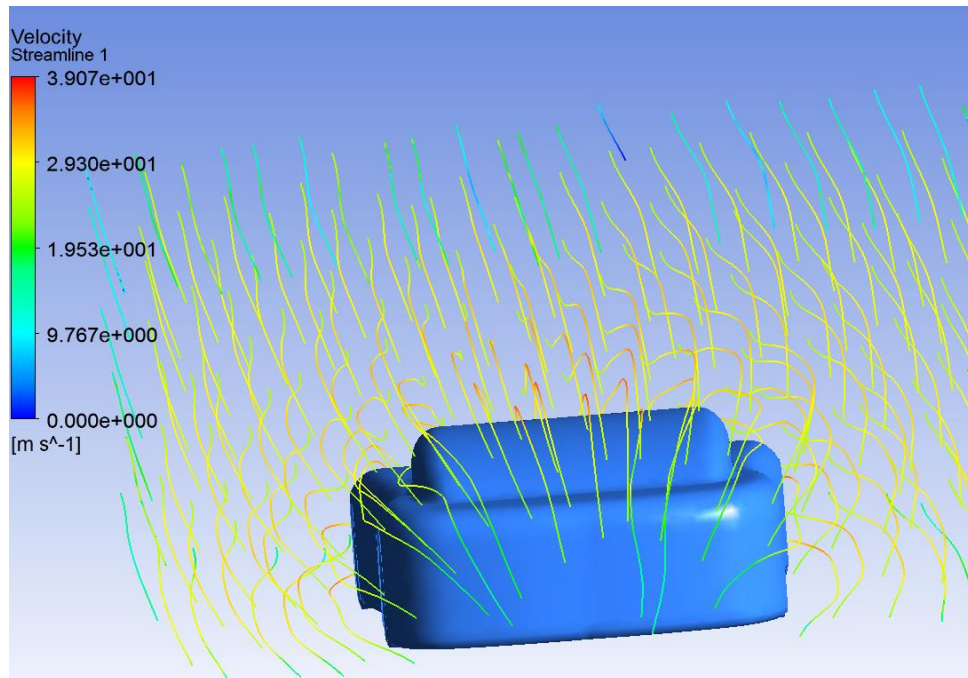


Σχήμα 3.34: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

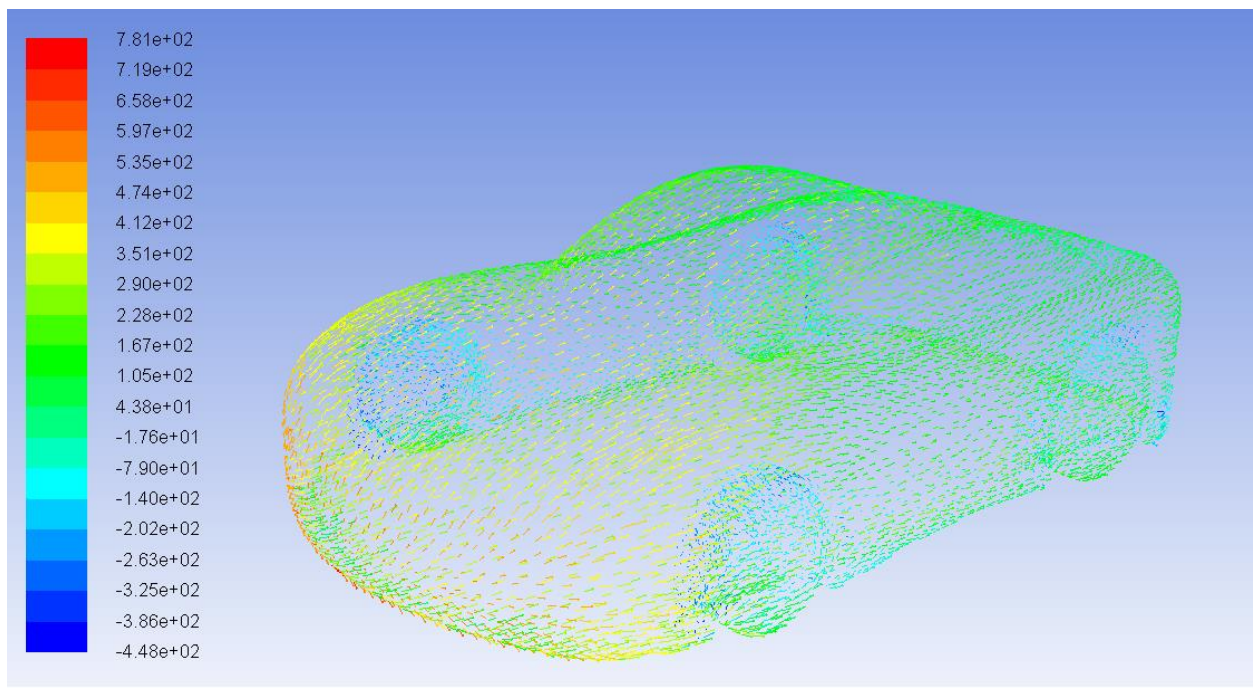


Σχήμα 3.35: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

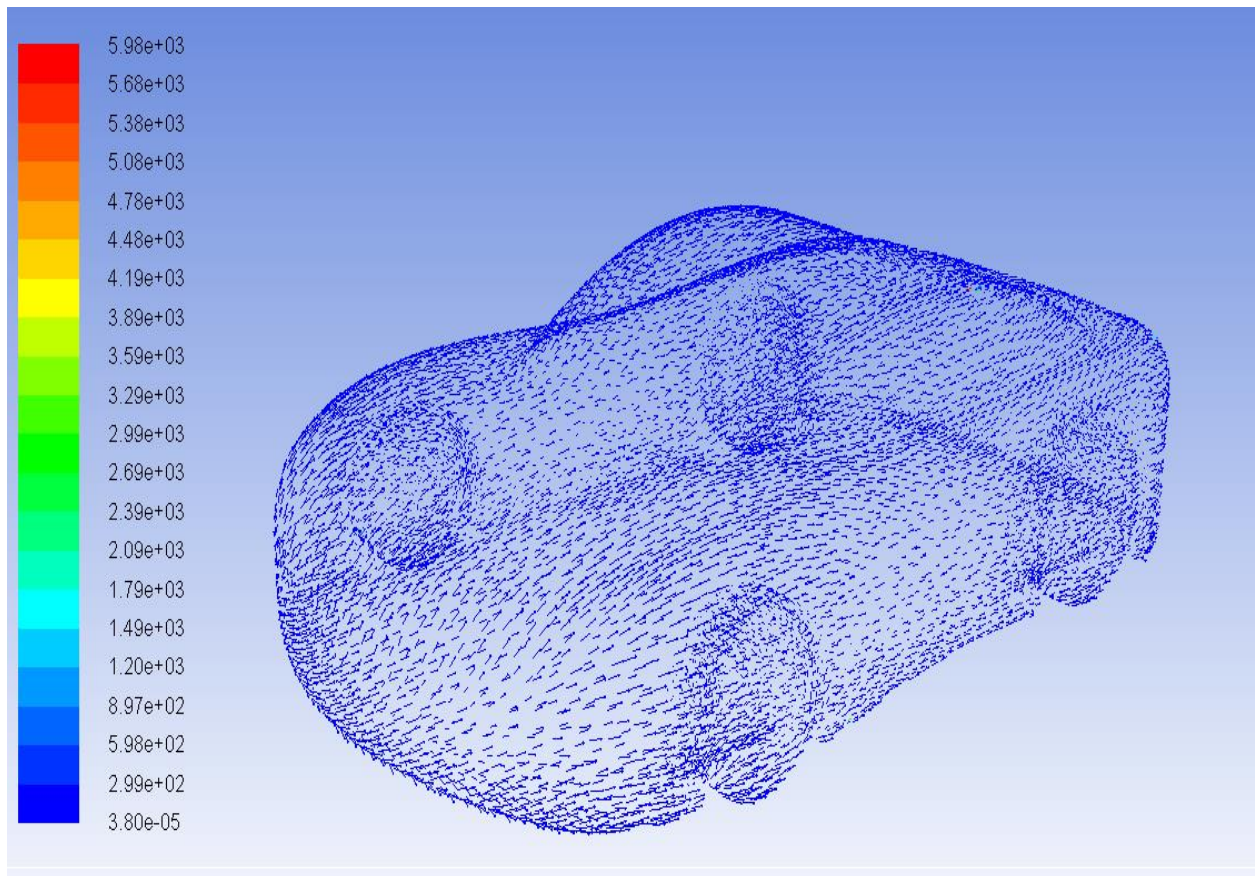
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.37749$ και $c_d = 0.012027$.
Για ταχύτητα αέρα 90 km /h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.36 - 3.38.



Σχήμα 3.36: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

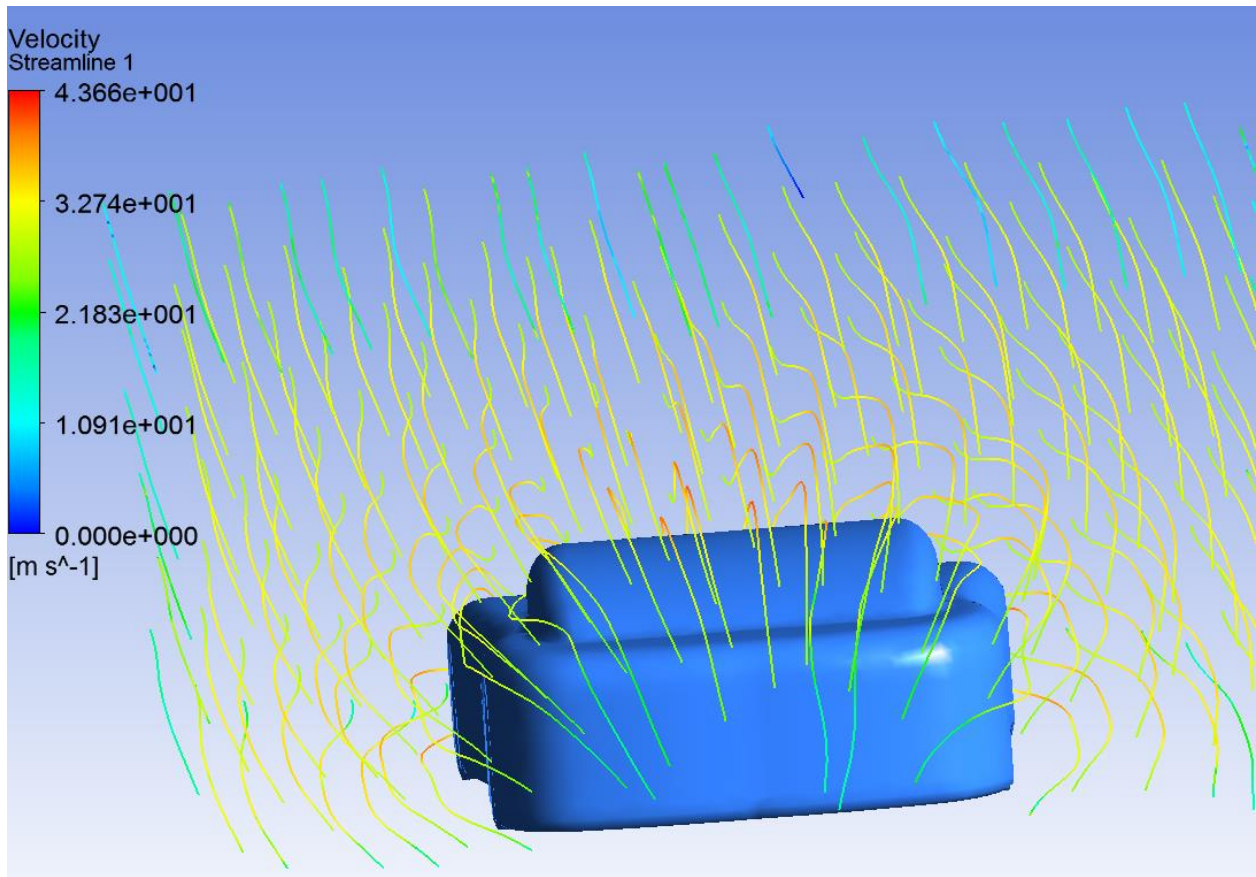


Σχήμα 3.37: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

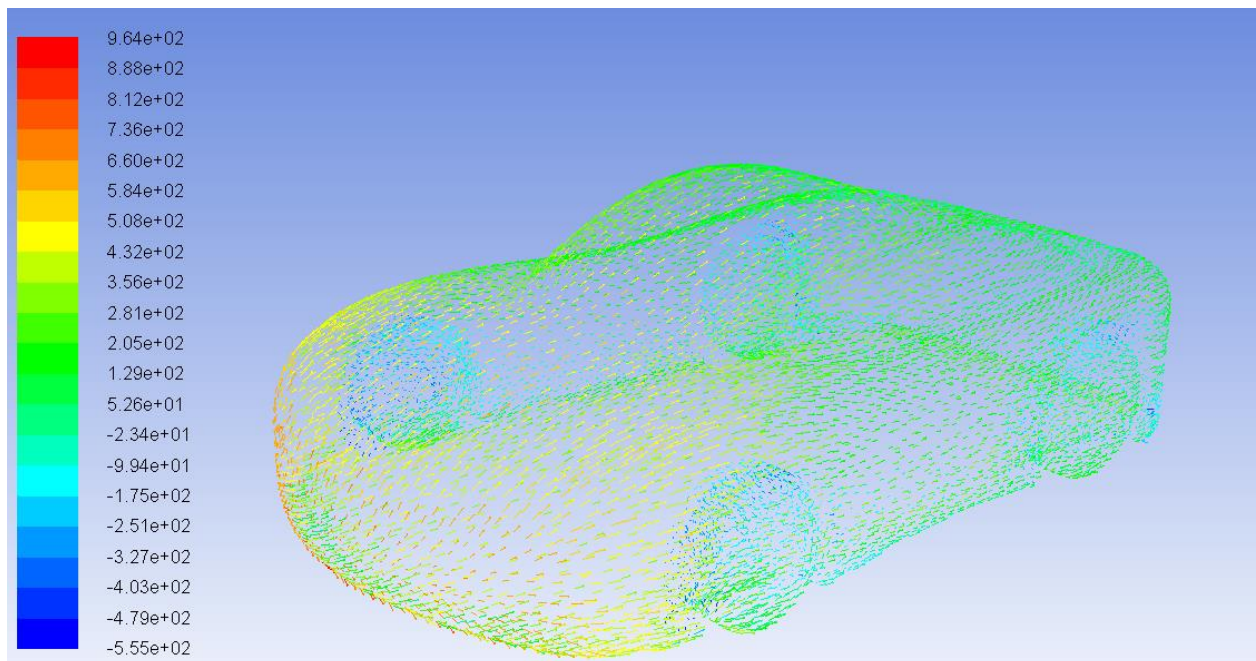


Σχήμα 3.38: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

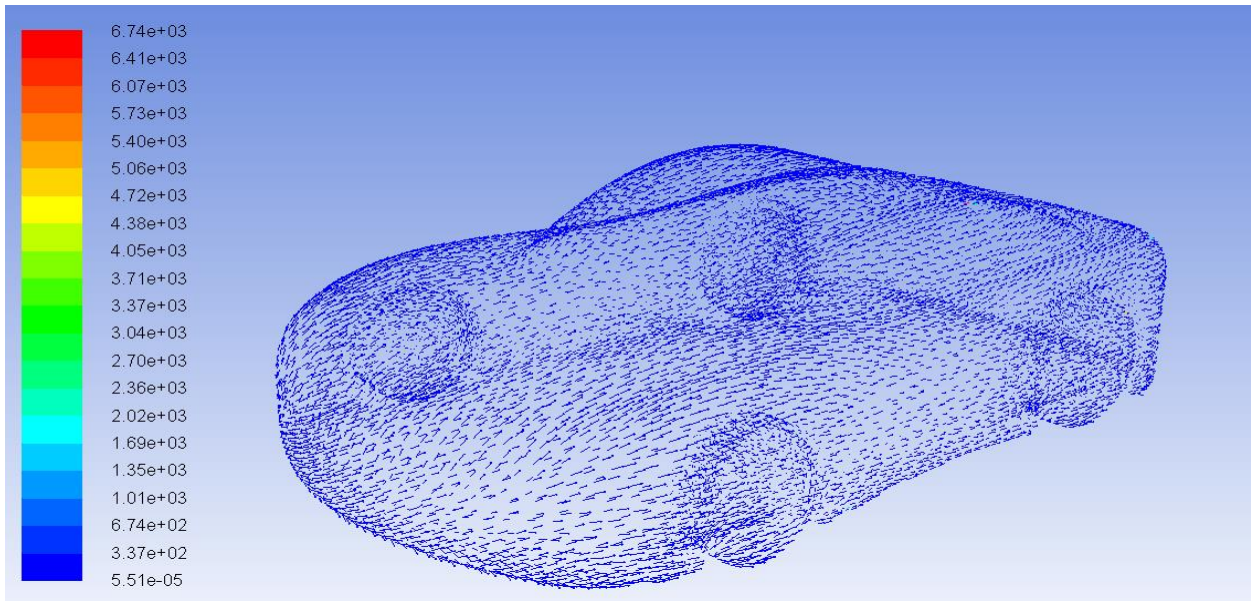
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.46176$ και $c_d = 0.013502$. Για την ταχύτητα αέρα 100 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.39 - 3.41.



Σχήμα 3.39: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

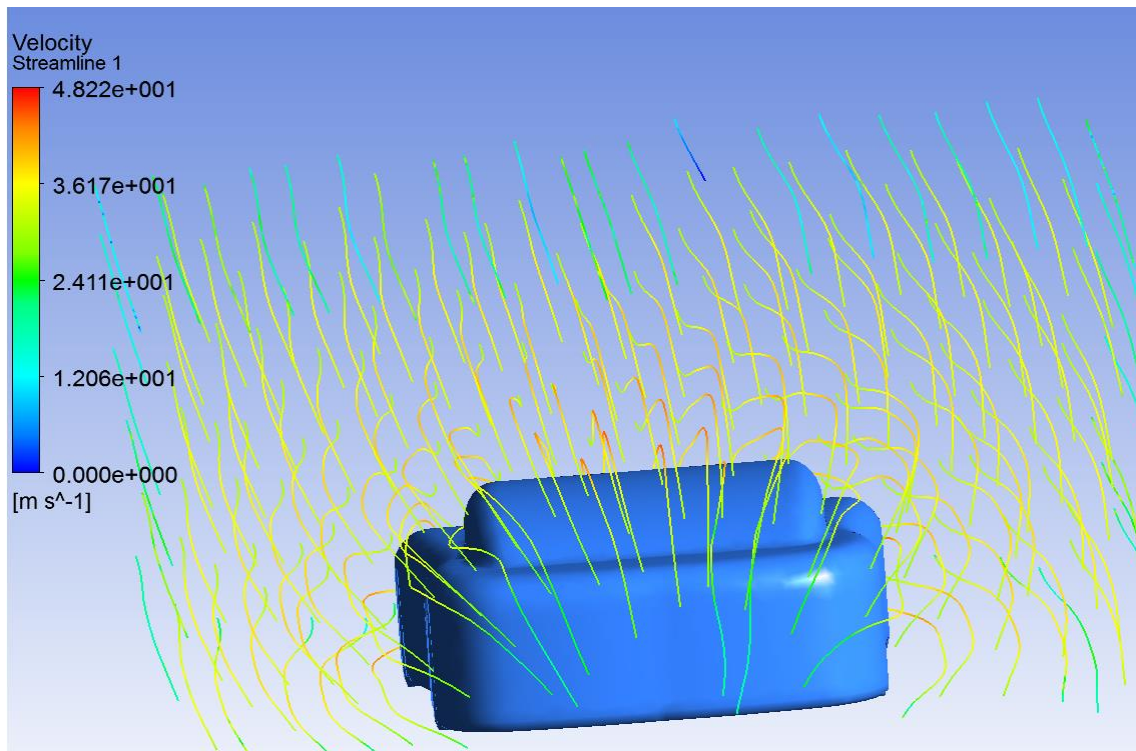


Σχήμα 3.40: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

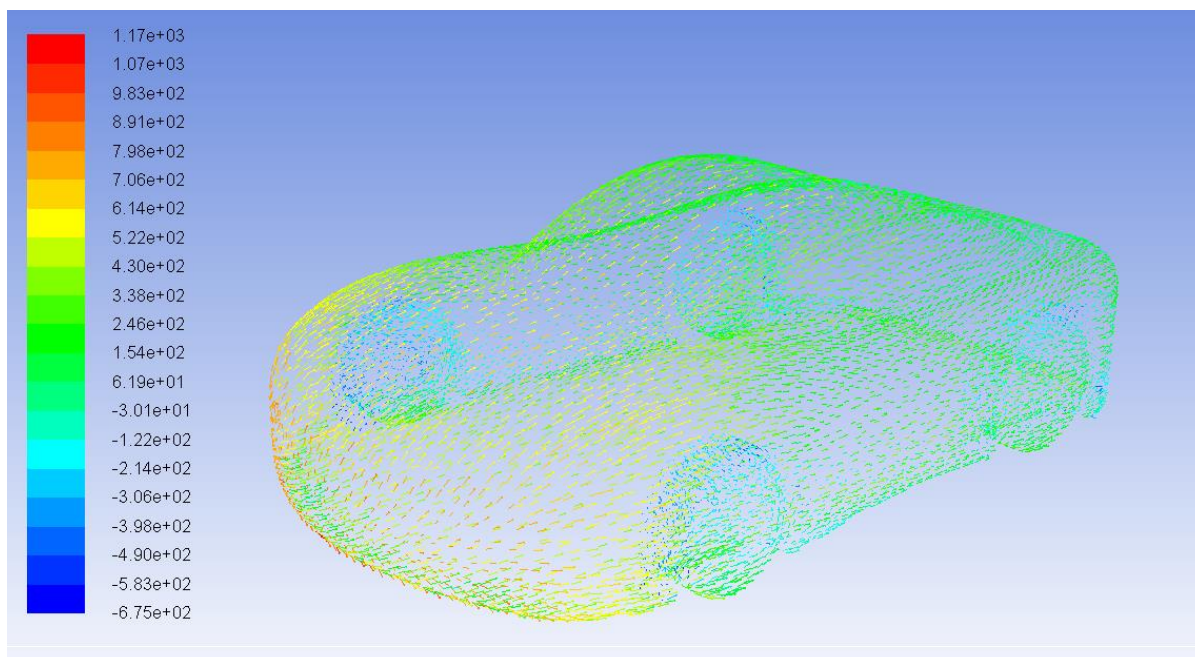


Σχήμα 3.41: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

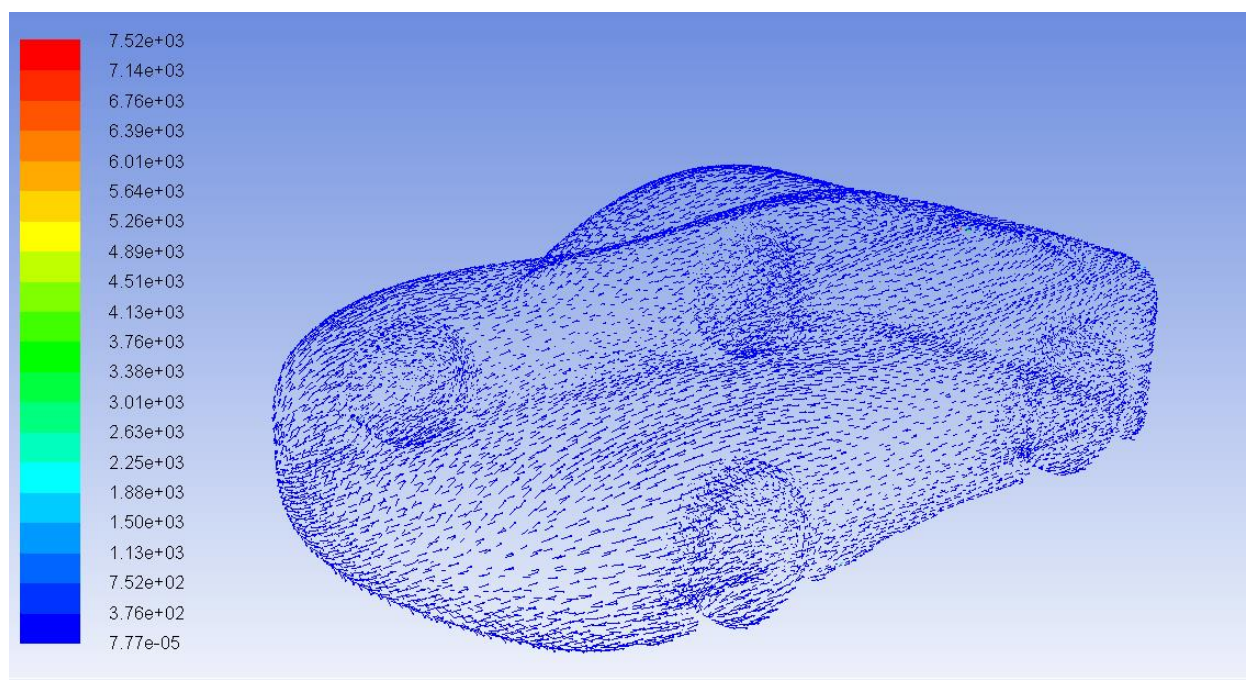
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.55271$ και $c_d = 0.015617$. Για ταχύτητα αέρα 110 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.42 - 3.44.



Σχήμα 3.42: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

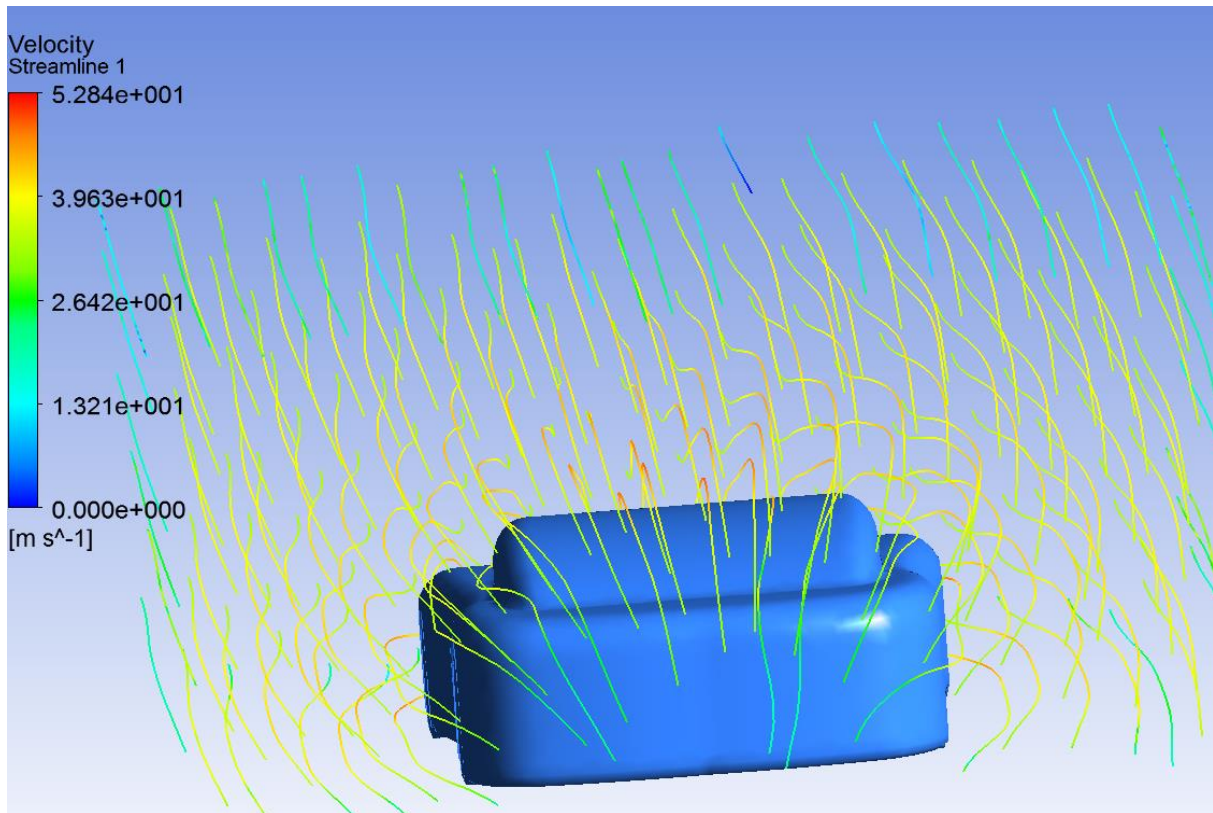


Σχήμα 3.43: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

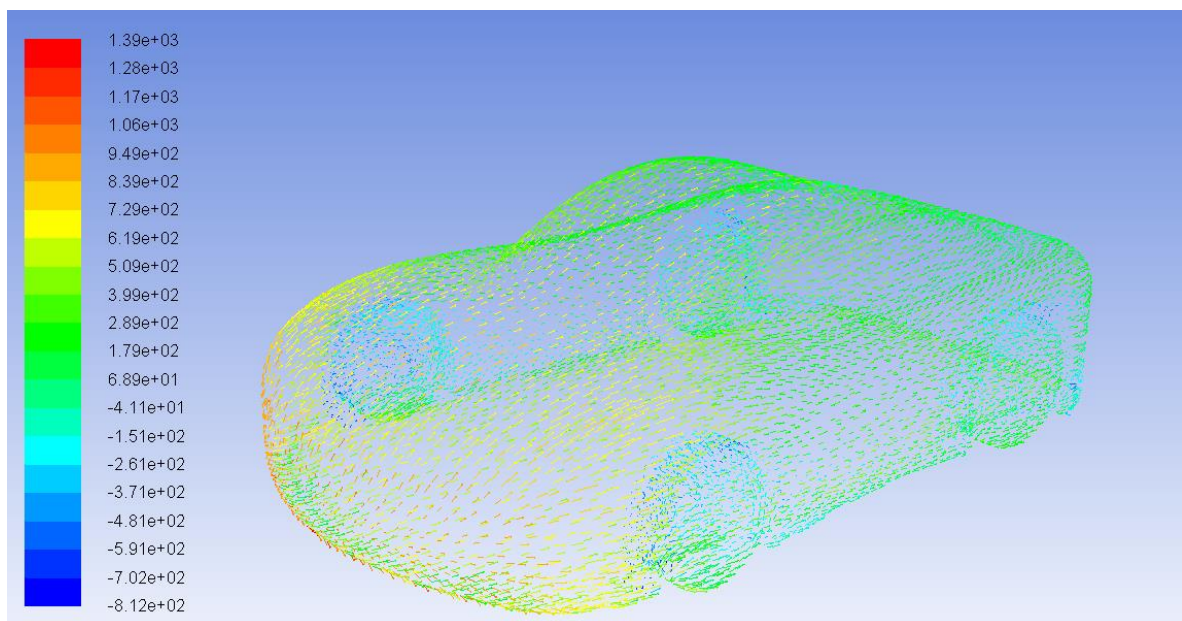


Σχήμα 3.44: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

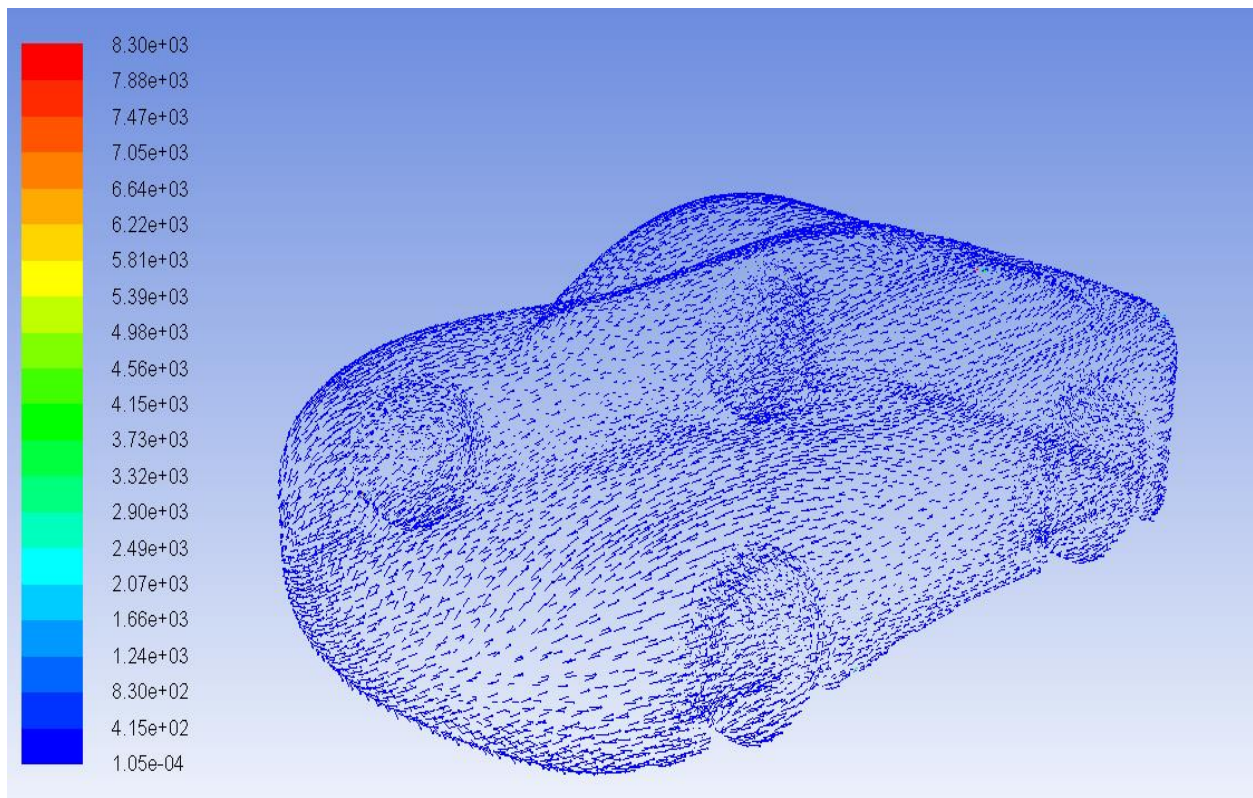
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.65309$ και $c_d = 0.016301$.
Για ταχύτητα αέρα 120 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.45 - 3.47.



Σχήμα 3.45: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου



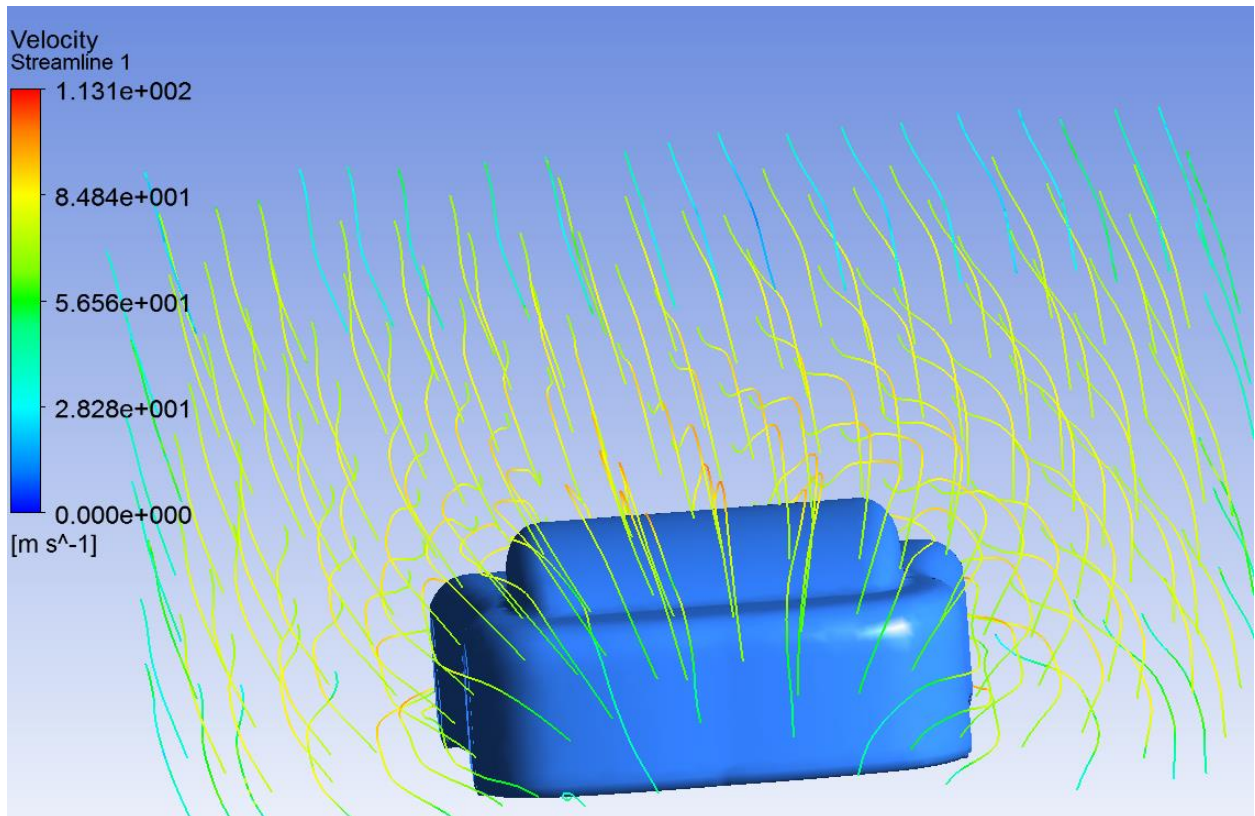
Σχήμα 3.46: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου



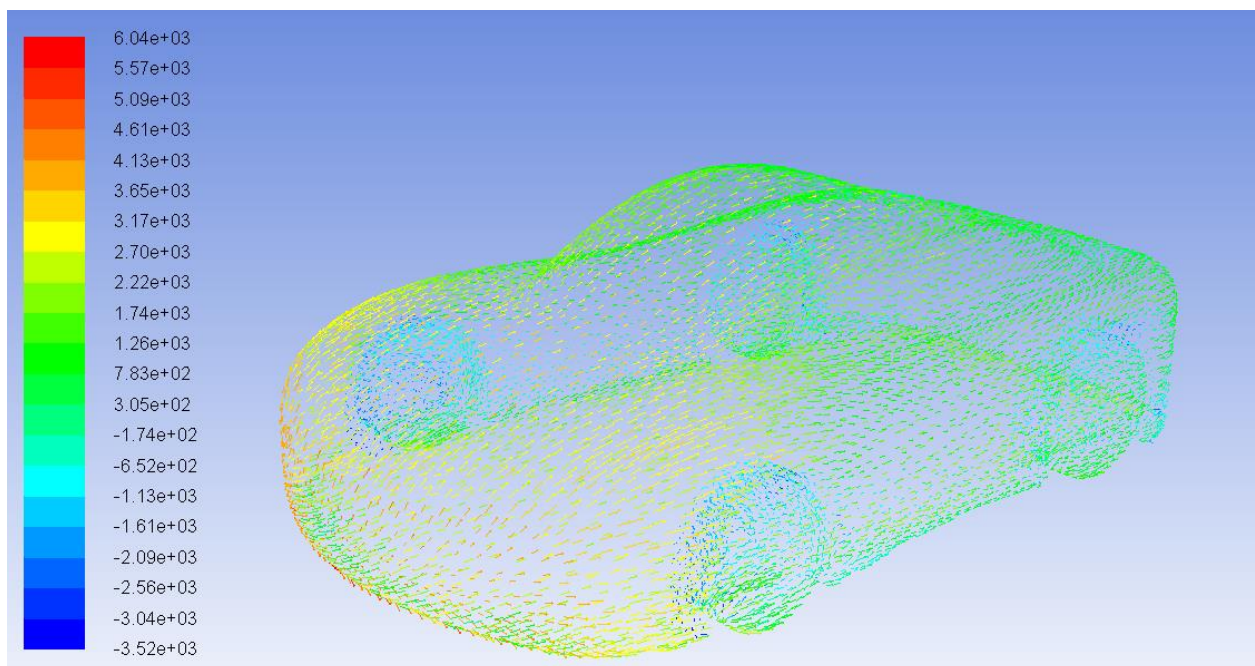
Σχήμα 3.47: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.75517$ και $c_d = 0.018736$.

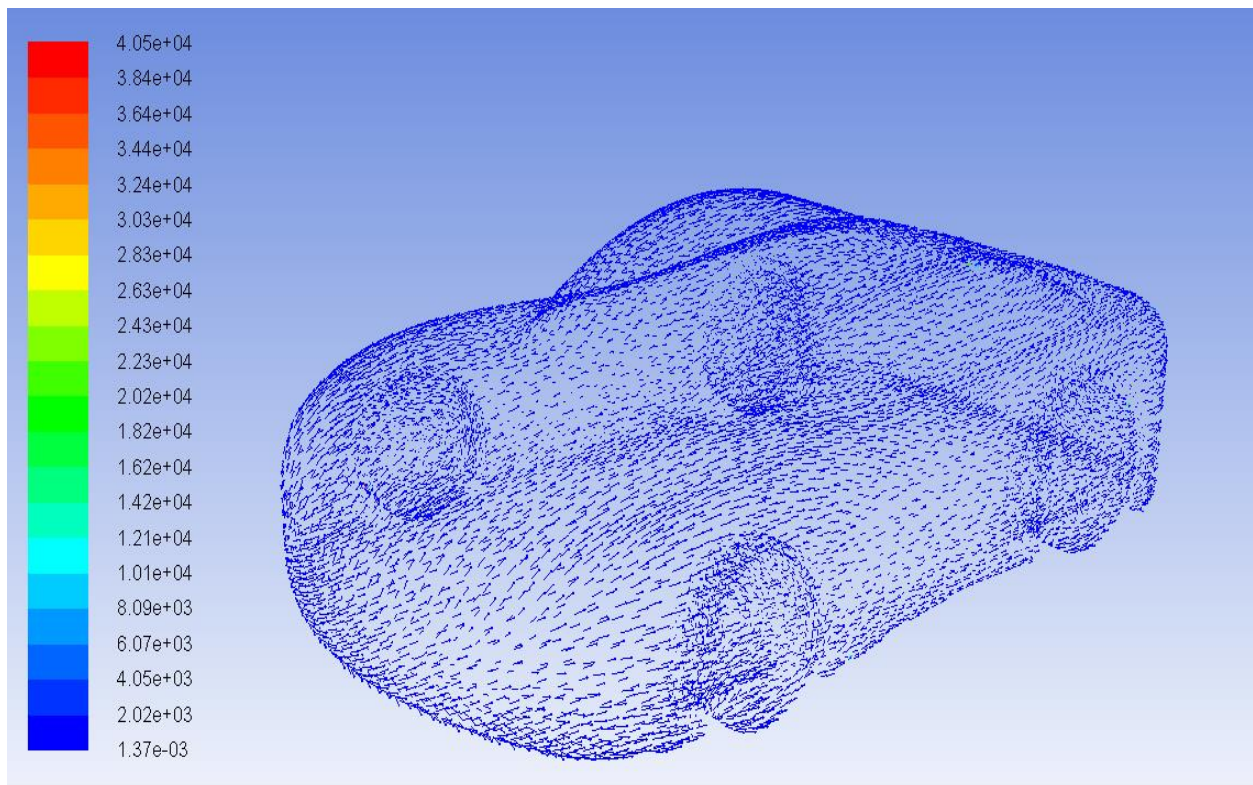
Έπιπλέον για να φάνει καλύτερα ο ρόλος του αεροδυναμικού σχήματος του μοντέλου του αυτοκιμήτου, προχωρήσαμε στη μελέτη για ταχύτητα αέρα 250 km / h. Έτσι λοιπόν για ταχύτητα αέρα 250 km / h έχουμε τα εξής αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στα σχήματα 3.48 - 3.50.



Σχήμα 3.48: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 250 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου



Σχήμα 3.49: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 250 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου



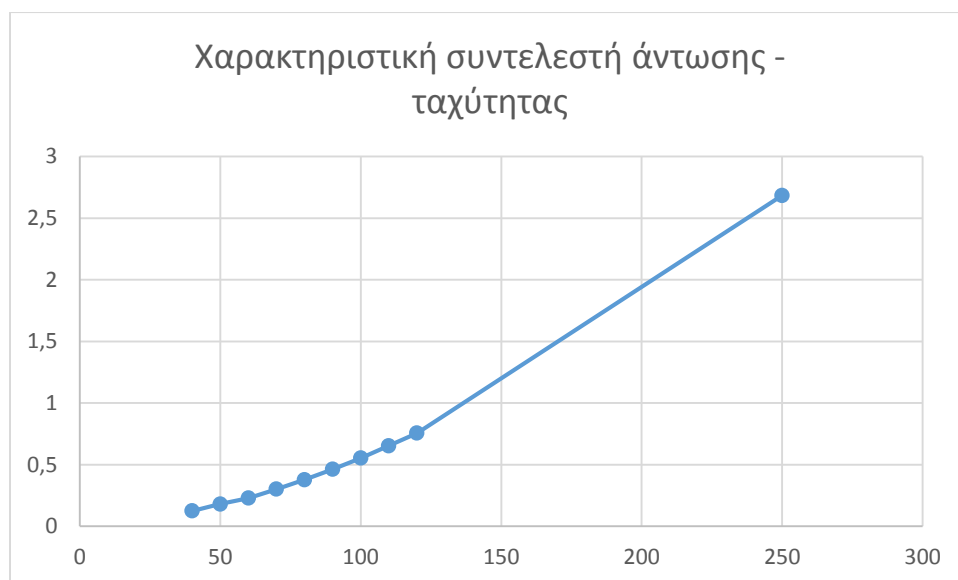
Σχήμα 3.50: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 250 km / h για το μοντέλο αυτοκινήτου

Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 2.6838$ και $c_d = 0.037363$.

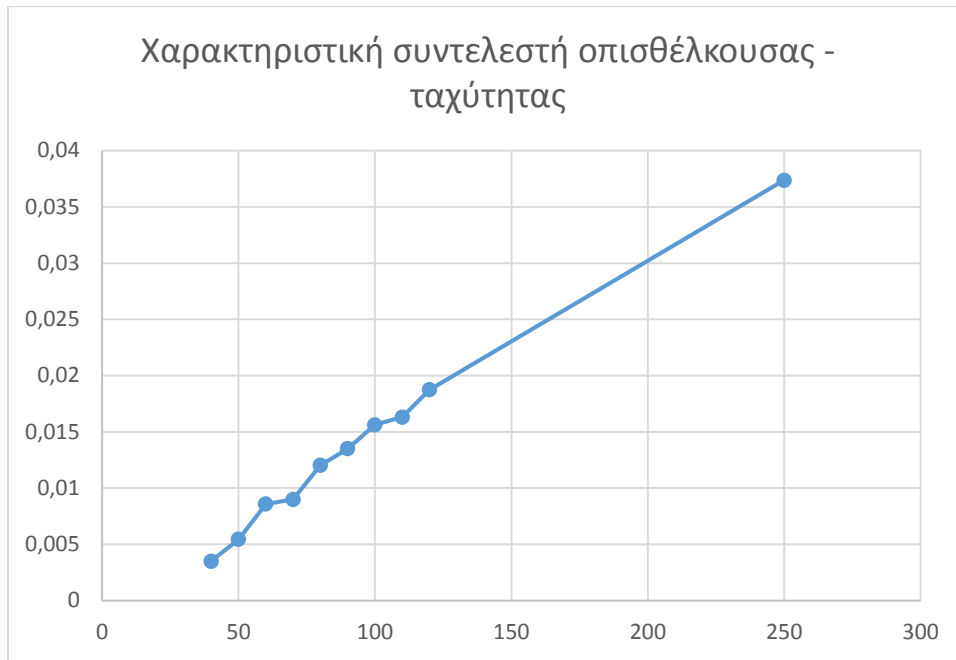
Οι συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και ο λόγος L / D για κάθε περίπτωση ταχύτητας συνοψίζονται στον πίνακα 3.3. Από τα διαγράμματα των σχημάτων 3.51 – 3.53, οι συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας για το εύρος ταχύτητας αέρα 40 – 120 km / h έχουν σχεδόν γραμμική σχέση με την ταχύτητα του αέρα, ενώ η τιμή του λόγου L / D , αν και έχει αυξητική τάση, εξαρτάται από την τιμή της ταχύτητας. Από την περίπτωση της ταχύτητας αέρα 250 km / h αποδεικνύεται η χρησιμότητα του αεροδυναμικού σχήματος του σώματος του αγωνιστικού αυτοκινήτου (μικρός λόγος μήκους – πλάτους) καθώς έχει ως αποτέλεσμα, με λογική τιμή οπισθέλκουσας, μεγάλη άντωση και λόγο L / D σε υψηλές ταχύτητες.

Πίνακας 3.3: Συντελεστές άντωσης, οπισθελκούσας και ο λόγος αυτών για ταχύτητα αέρα 40-250 km/h

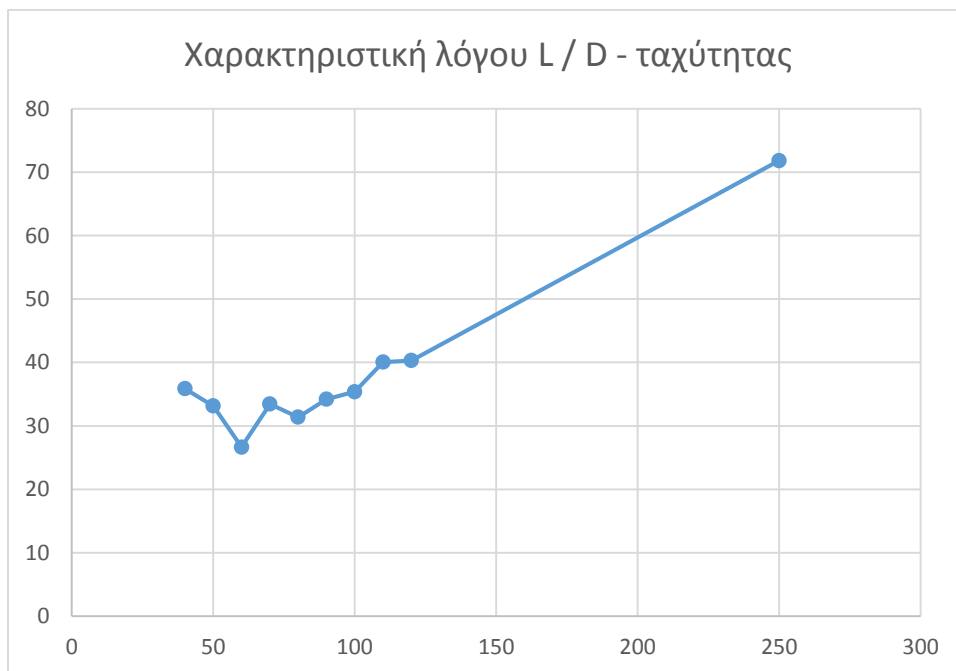
Ταχύτητα (km/h)	ci	cd	L / D
40	0.1253	0.003494	35.8584
50	0.1804	0.005442	33.14958
60	0.22859	0.008571	26.66923
70	0.30078	0.008993	33.44564
80	0.37749	0.012027	31.38688
90	0.46176	0.013502	34.19938
100	0.55271	0.015617	35.39156
110	0.65309	0.016301	40.06441
120	0.75517	0.018736	40.30583
250	2.6838	0.037363	71.83042



Σχήμα 3.51: Διάγραμμα συντελεστή άντωσης – ταχύτητας για το μοντέλο αυτοκινήτου



Σχήμα 3.52: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας – ταχύτητας για το μοντέλο αυτοκινήτου



Σχήμα 3.53: Διάγραμμα λόγου L / D – ταχύτητας για το μοντέλο αυτοκινήτου

Από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας στην άντωση και στην οπισθέλκουσα, αλλά και στα υπόλοιπα μεγέθη. Η ταχύτητα του αέρα στην μοντελοποίηση είναι η ταχύτητα του αυτοκινήτου. Το μέγιστο της ταχύτητας του αέρα εμφανίζεται στην οροφή του αυτοκινήτου και αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αυτοκινήτου. Προφανώς όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αυτοκινήτου, αυξάνεται και η κινητική ενέργεια της τύρβης. Όσο αφορά την ολική πίεση, το μέγιστο της εμφανίζεται στην μάσκα του αυτοκινήτου, ενώ μεγάλες τιμές πίεσης εμφανίζονται στην οροφή του αυτοκινήτου, στις πλευρικές επιφάνειες και στο πίσω μέρος. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αυτοκινήτου, αυξάνονται επίσης οι τιμές της ολικής πίεσης.

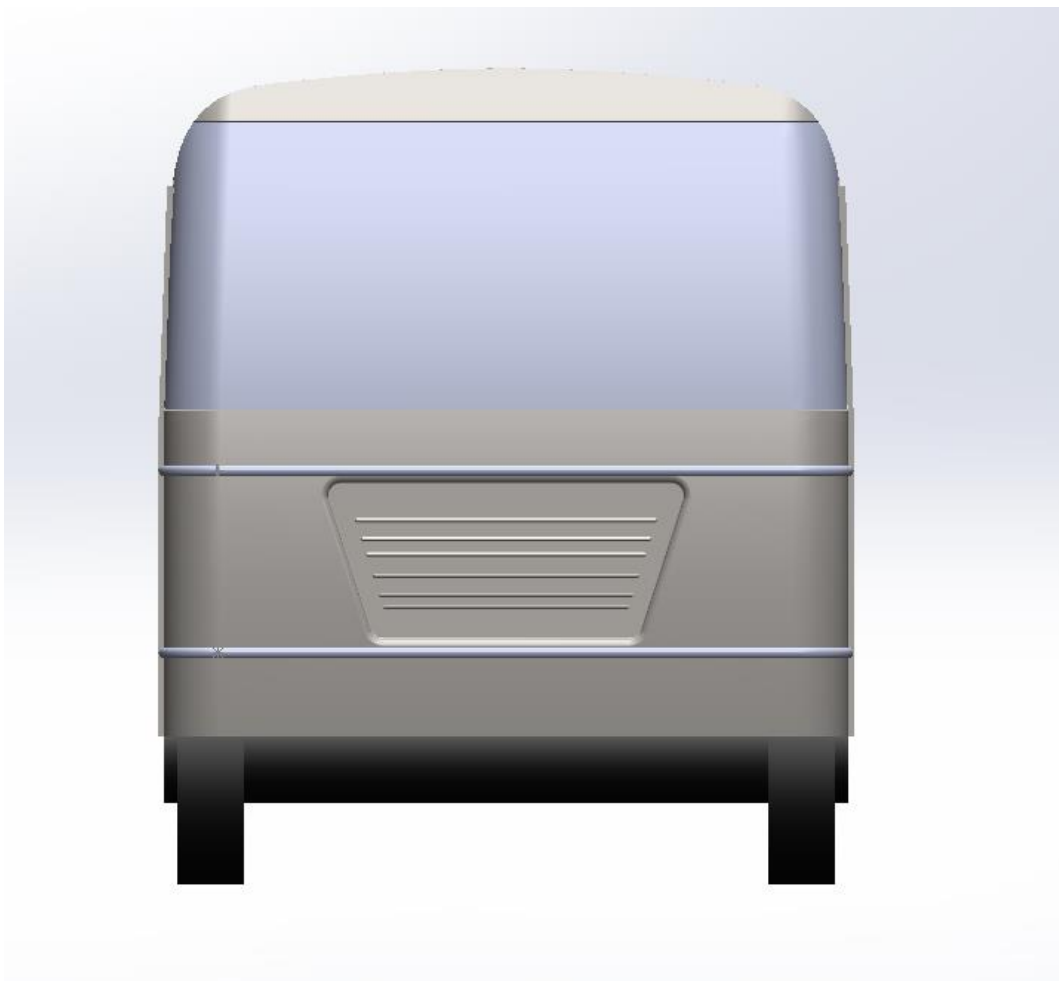
Αρνητικές ολικές πιέσεις εμφανίζονται στις επιφάνειες του αυτοκινήτου που δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το ρευστό (εσωτερικό φτερών αυτοκινήτου) λόγω της πίεσης Gauge. Σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται από τα περιγράμματα των διανυσμάτων ταχύτητας του αέρα η επίδραση της ταχύτητας του αυτοκινήτου στην τύρβη. Στην περίπτωση της ταχύτητας των 250 km / h η τελευταία είναι προφανής.

Η κατανάλωση καυσίμου είναι ευθέως ανάλογη με την συνολική ισχύ του αυτοκινήτου, η οποία εξαρτάται από την ισχύ της οπισθέλκουσας δύναμης που ισούται με το γινόμενο της οπισθέλκουσας δύναμης και της ταχύτητας του αυτοκινήτου. Επομένως όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυξάνεται και η κατανάλωση καυσίμου λόγω της οπισθέλκουσας δύναμης. Η μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης επιτυγχάνεται με την βελτίωση του αεροδυναμικού σώματος και την μείωση της διατομής του αυτοκινήτου, με προσθήκη αεροτομών και γεννητριών δίνης (vortex generators), και με την μείωση της ταχύτητας του αυτοκινήτου.

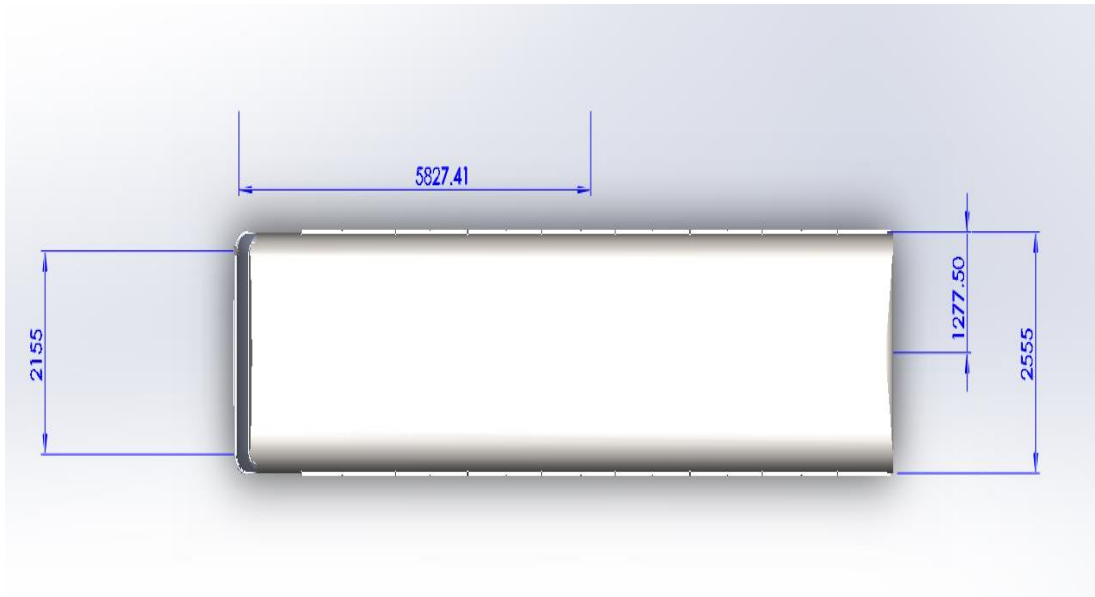
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ

4.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ

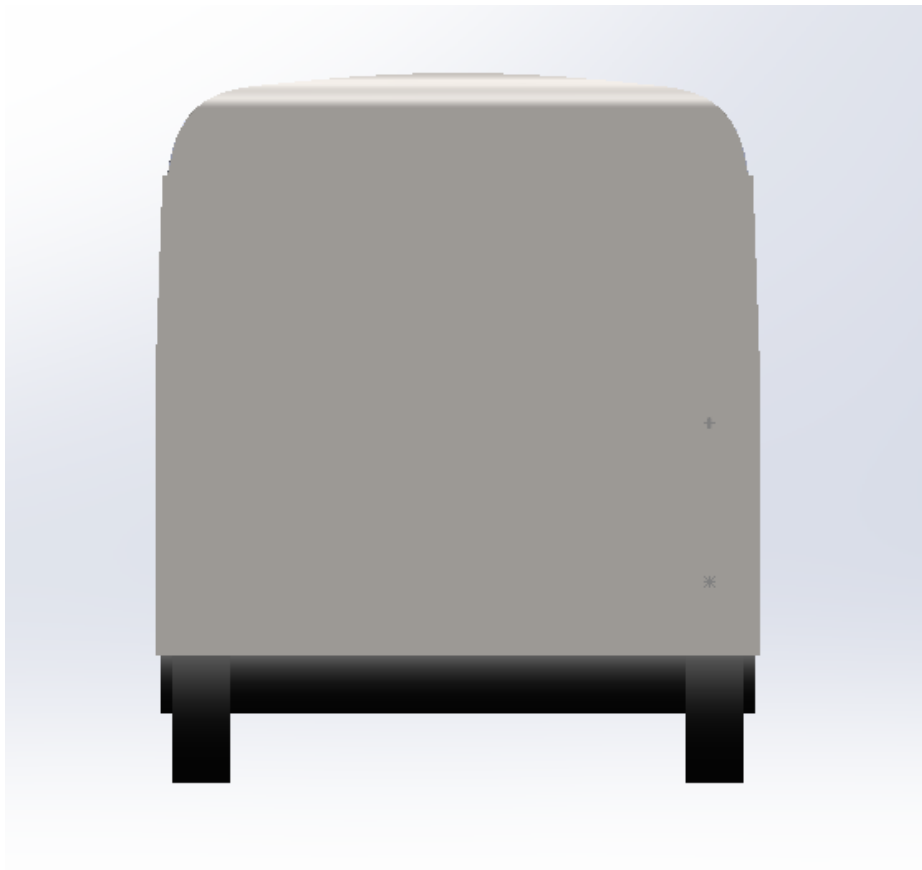
Για την μοντελοποίηση της γεωμετρίας χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Solidworks. Παρατίθενται οι όψεις και οι διαστάσεις του τρισδιάστατου μοντέλου ενός λεωφορείου σε mm. Σύμφωνα με τα σχήματα 4.1 έως 4.4.



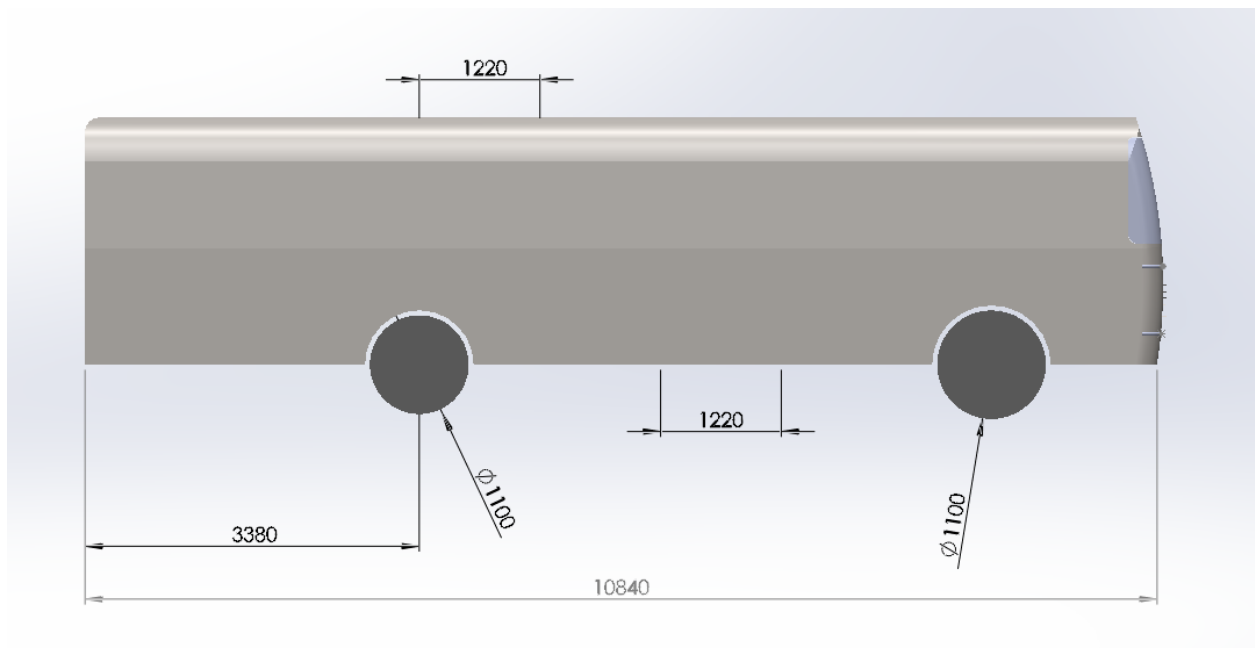
Σχήμα 4.1: Πρόσοψη μοντέλου λεωφορείου



Σχήμα 4.2: Κάτοψη μοντέλου λεωφορείου



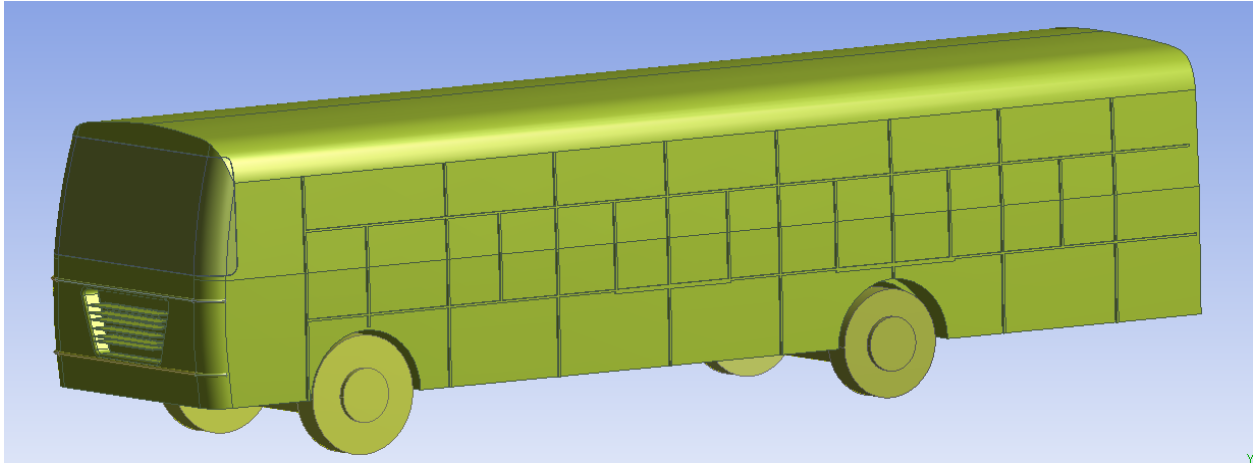
Σχήμα 4.3: Πίσω όψη μοντέλου λεωφορείου



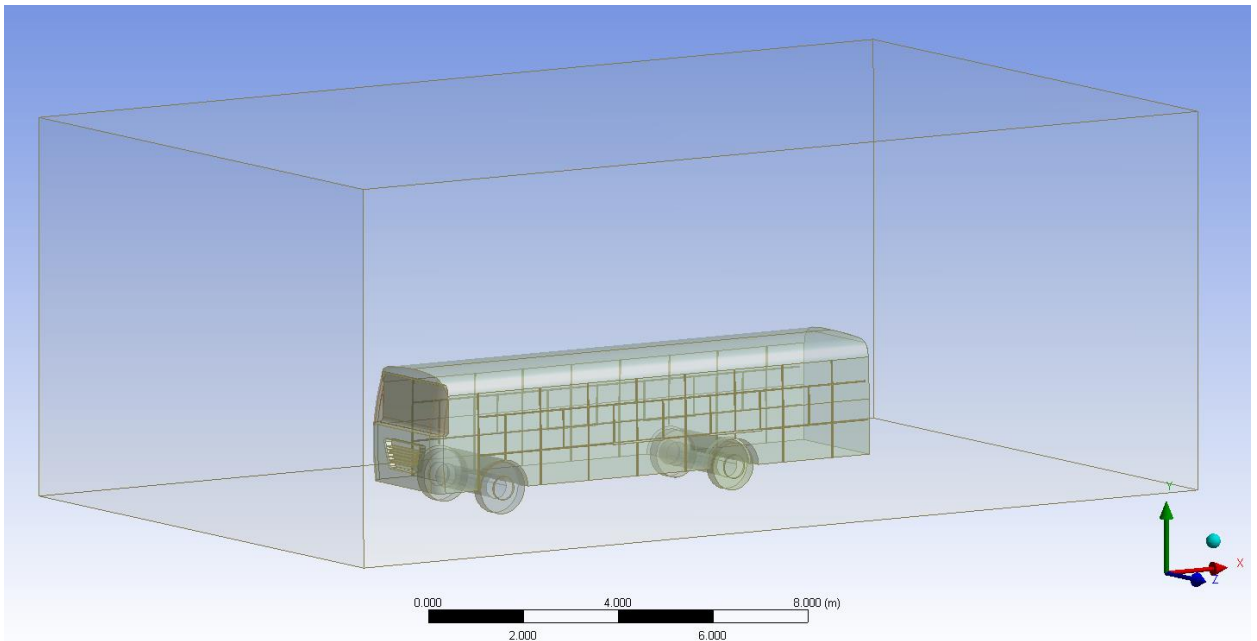
Σχήμα 4.4: Πλάγια όψη μοντέλου λεωφορείου

4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ

Αρχικά εισάγεται η γεωμετρία του μοντέλου στο DesignModeler του ANSYS όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Για την προσομοίωση του αέρα γύρω από το λεωφορείο θα οριοθετηθεί ο όγκος του αέρα που θα συμπεριλαμβάνει το λεωφορείο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας μιας περίφραξης (enclosure) με ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού (σχήμα 4.6). Για υπολογιστικούς λόγους το μέγεθος της περίφραξης λαμβάνεται να διαφέρει 5 m σε σχέση με το αυτοκίνητο πλην του $-y$ που επιλέγεται 0.001 m διότι παριστάνει το έδαφος. Η γεωμετρία του μοντέλου λεωφορείου αφαιρείται από το enclosure. Καθώς το μοντέλο πρέπει να είναι συμπαγές, το μοντέλο εισάγεται και εξάγεται σε μορφή IGES στο SolidEdge της Siemens για να απλοποιηθεί, και κατόπιν μέσω του DesignModeler και χρησιμοποιώντας διαδοχικά τα εργαλεία Connect – Fill – Unite ενώνονται οι τροχοί με το σώμα του λεωφορείου.



Σχήμα 4.5: Γεωμετρία μοντέλου λεωφορείου στο DesignModeler του ANSYS

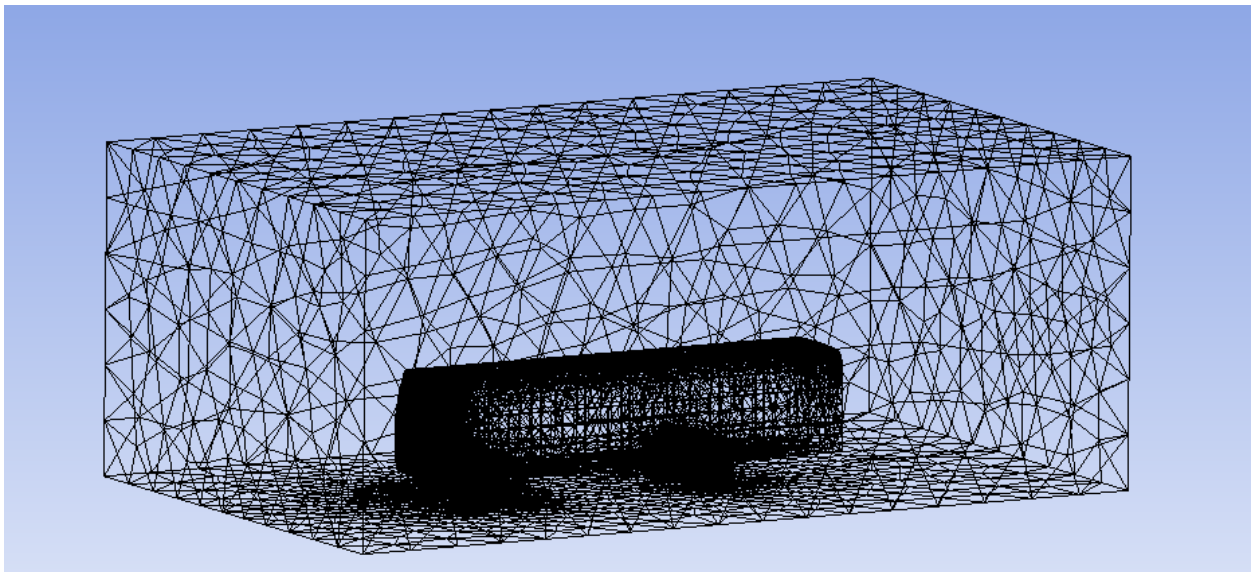


Σχήμα 4.6: Enclosure για το μοντέλο λεωφορείου

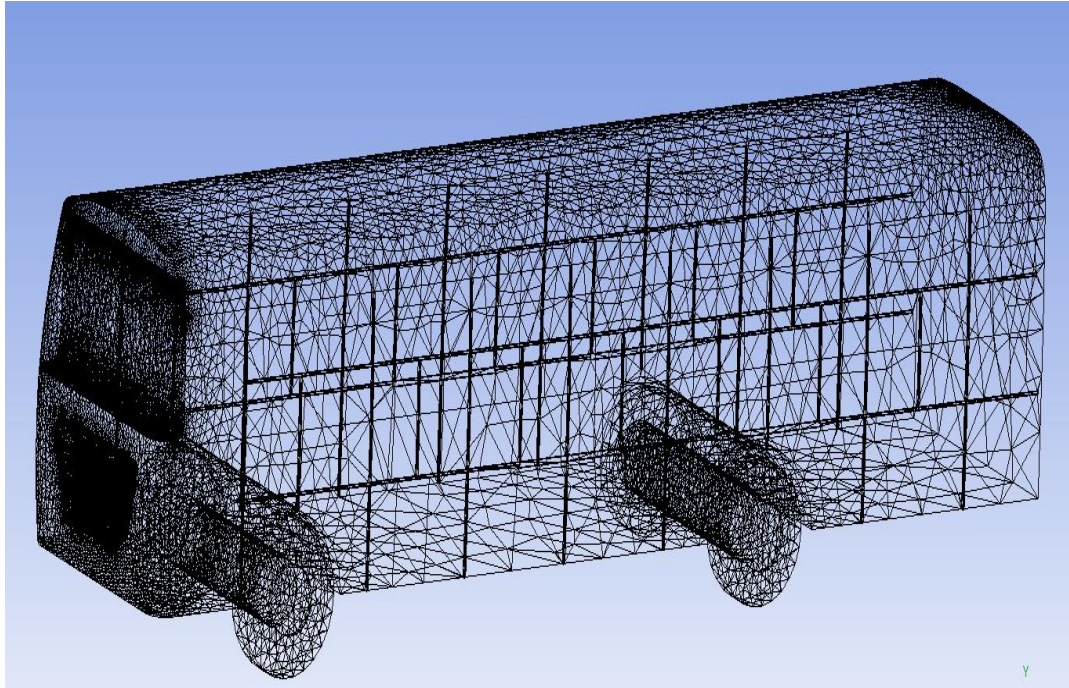
Κατόπιν παράγεται το πλέγμα με το Fluent Meshing του ANSYS, οι λεπτομέρειες του οποίου φαίνονται στα σχήματα 4.7 έως 4.9. Οι παράμετροι παραγωγής πλέγματος που ορίζονται με την μέθοδο parallel meshing συνοψίζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι παραγωγής πλέγματος για το μοντέλο του λεωφορείου

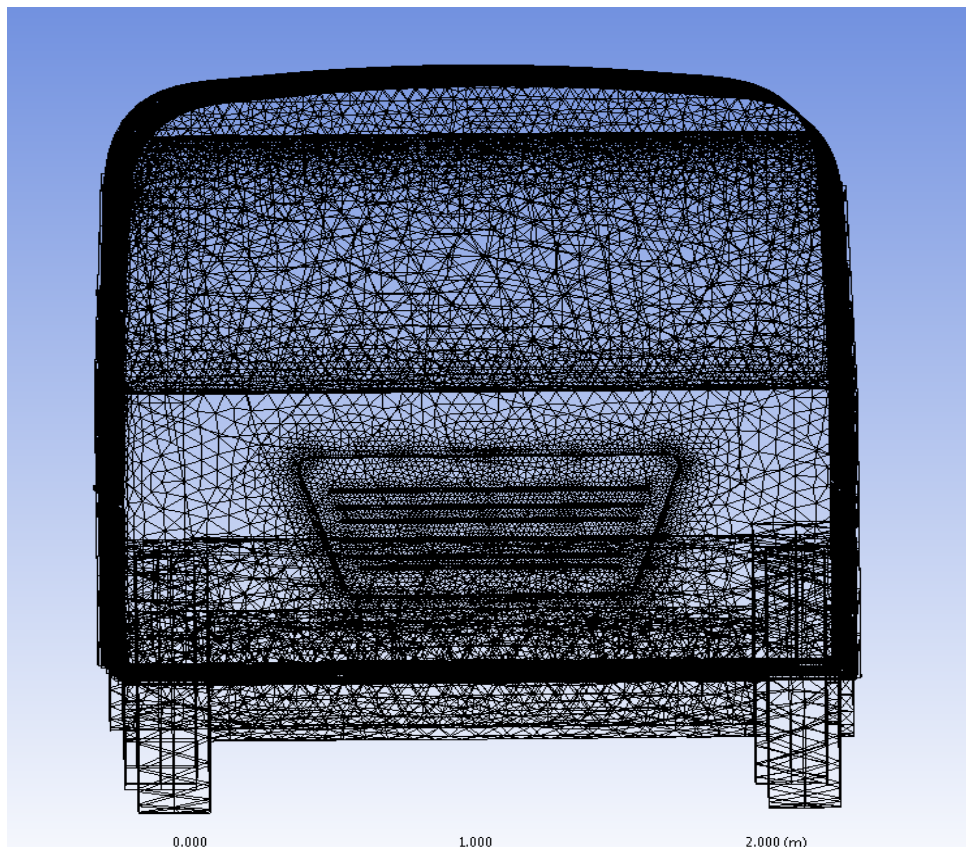
Use Advanced Size Function	On : Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Speed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	18°
Min Size	0.012821 m
Max Size	1.2821 m
Max Face Size	2.5642 m
Minimum Edge Length	$5.3293 \cdot 10^{-4}$ m



Σχήμα 4.7: Πλέγμα μοντέλου λεωφορείου

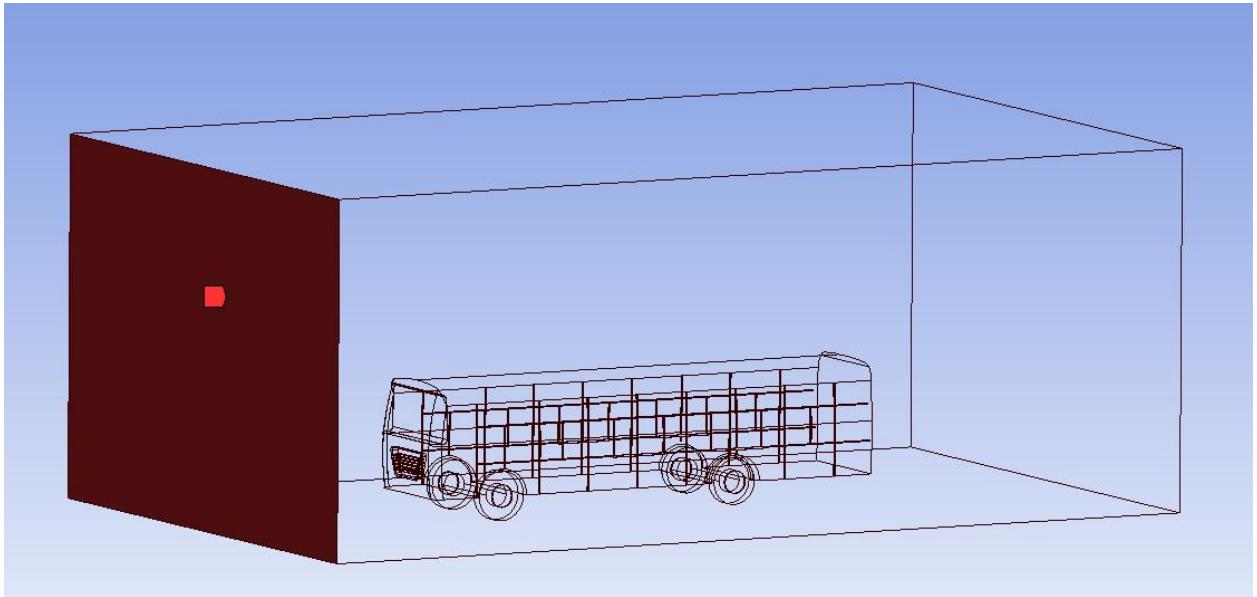


Σχήμα 4.8: Λεπτομέρεια πλέγματος μοντέλου λεωφορείου

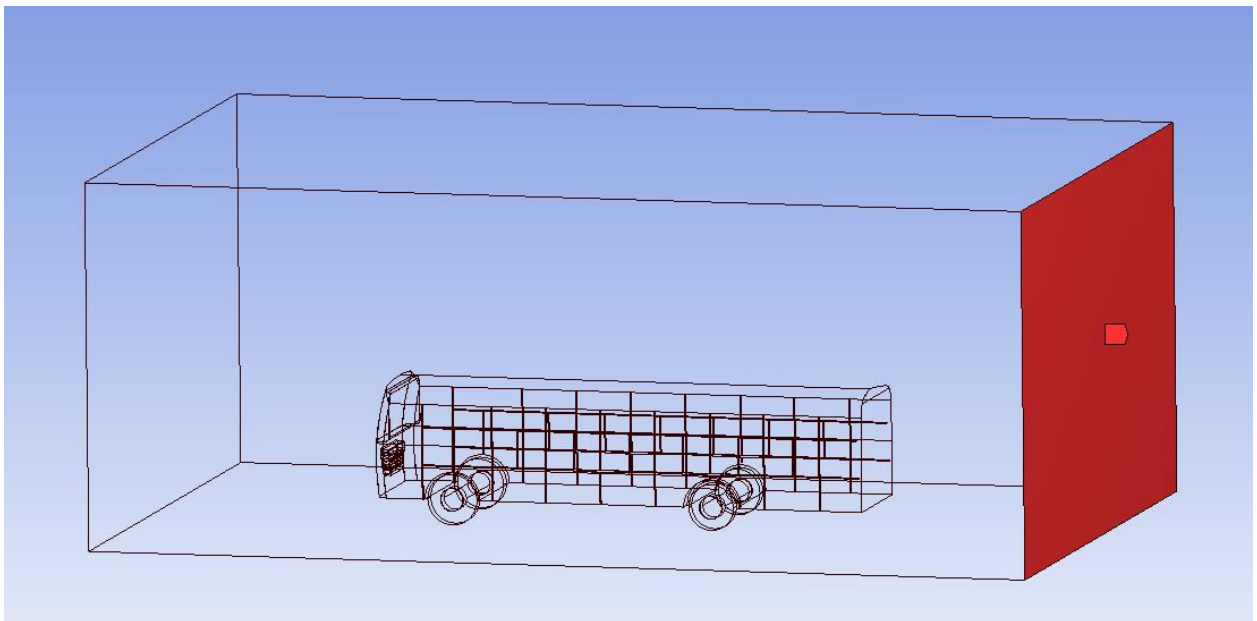


Σχήμα 4.9: Λεπτομέρεια πλέγματος πρόσωσης μοντέλου λεωφορείου

Στα σχήματα 4.10 και 4.11 ορίζονται η είσοδος (inlet) και η έξοδος (outlet) στον όγκο του ρευστού.

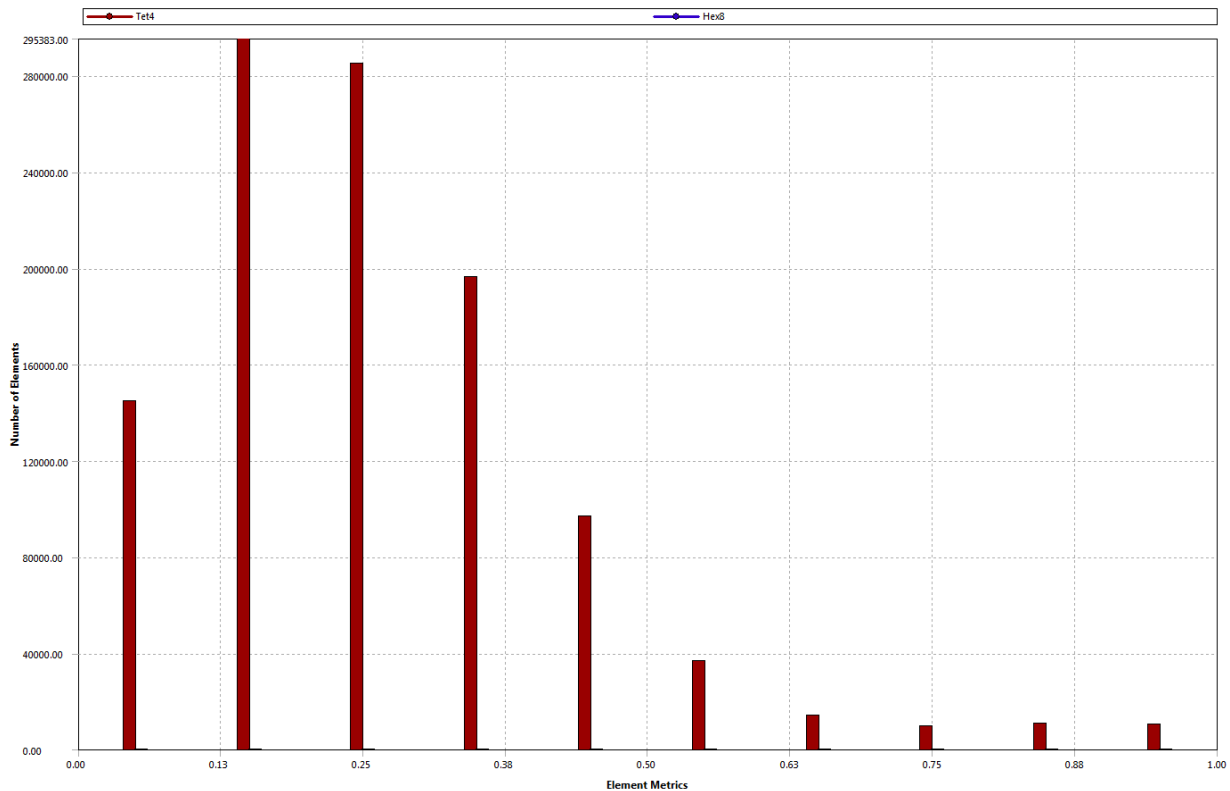


Σχήμα 4.10: Inlet μοντέλου λεωφορείου



Σχήμα 4.11: Outlet μοντέλου λεωφορείου

Το πλέγμα αποτελείται από 215549 κόμβους και 1100138 κελιά. Ο μέσος δείκτης στρεβλότητας προκύπτει 0.265 με τυπική απόκλιση 0.167. Από το διάγραμμα του σχήματος 4.12 αποδεικνύεται ότι το πλέγμα του μοντέλου αυτοκινήτου είναι υψηλής ποιότητας καθώς το εύρος των δεικτών στρεβλότητας του πλέγματος είναι κατά βάση από 0.05 έως 0.5 και περίπου το 91% των κελιών έχει δείκτη στρεβλότητας από καλό έως εξαιρετικό, ενώ το ποσοστό χαμηλής ποιότητας (δείκτης στρεβλότητας > 0.75) θεωρείται αμελητέο. Το πλέγμα αποτελείται κατά πλειονότητα από τετράεδρα.

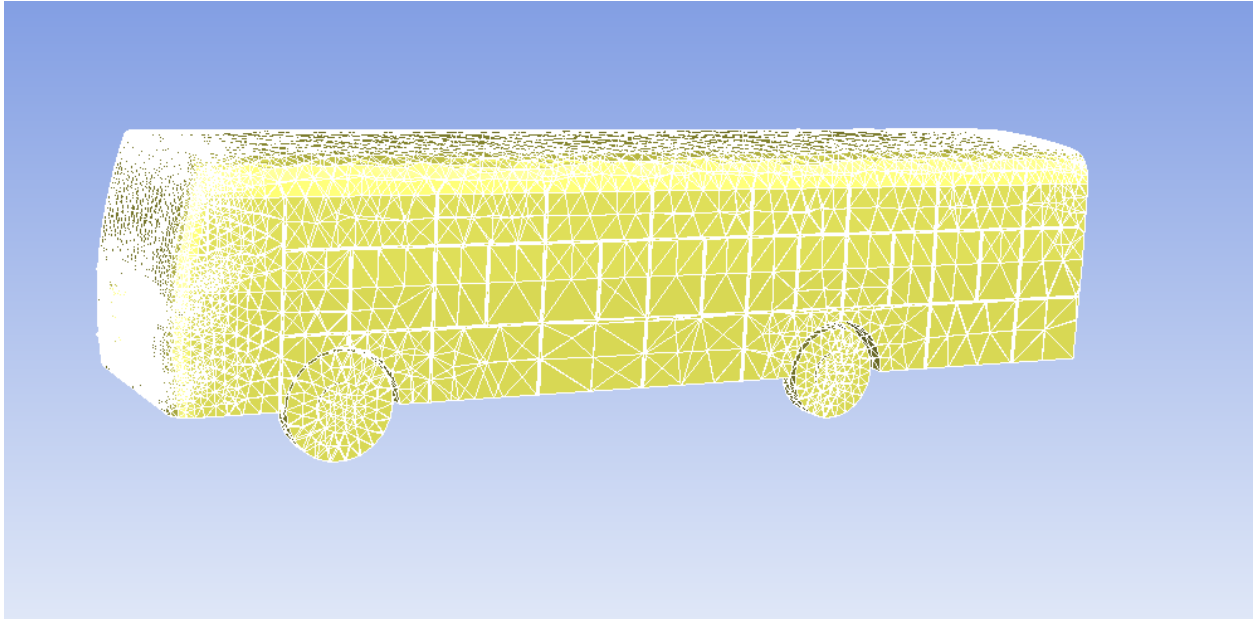


Σχήμα 4.12: Δείκτες στρεβλότητας και είδη κελιών πλέγματος λεωφορείου

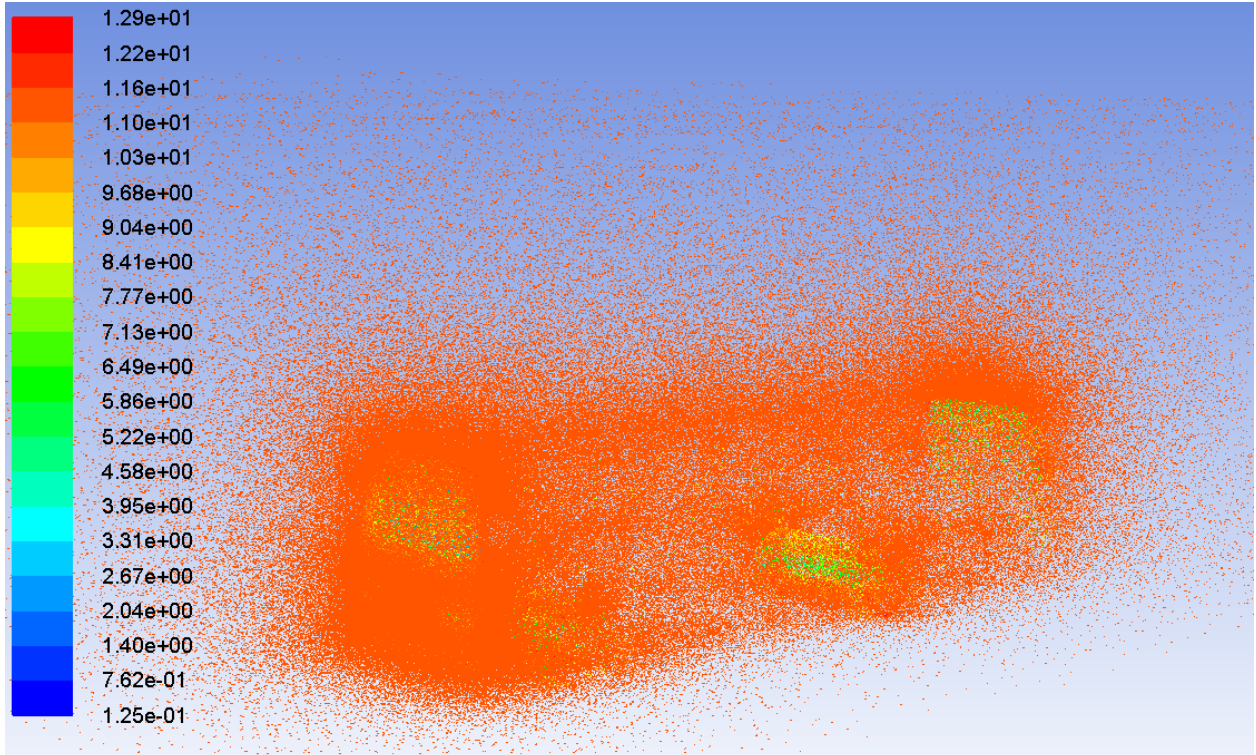
4.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ

Η αεροδυναμική μελέτη του λεωφορείου γίνεται για διάφορες ταχύτητες στο εύρος από 40 – 120 km / h ανά 10 km / h και τα αποτελέσματα αυτών φαίνονται στα σχήματα 4.14 έως 4.40. Εισάγεται το πλέγμα στο ANSYS FLUENT (σχήμα 4.13) και επιλέγεται ο density - based solver, ενώ οι παράμετροι των cell zone conditions, των boundary conditions και του Solution ορίζονται όμοια με την περίπτωση της μελέτης

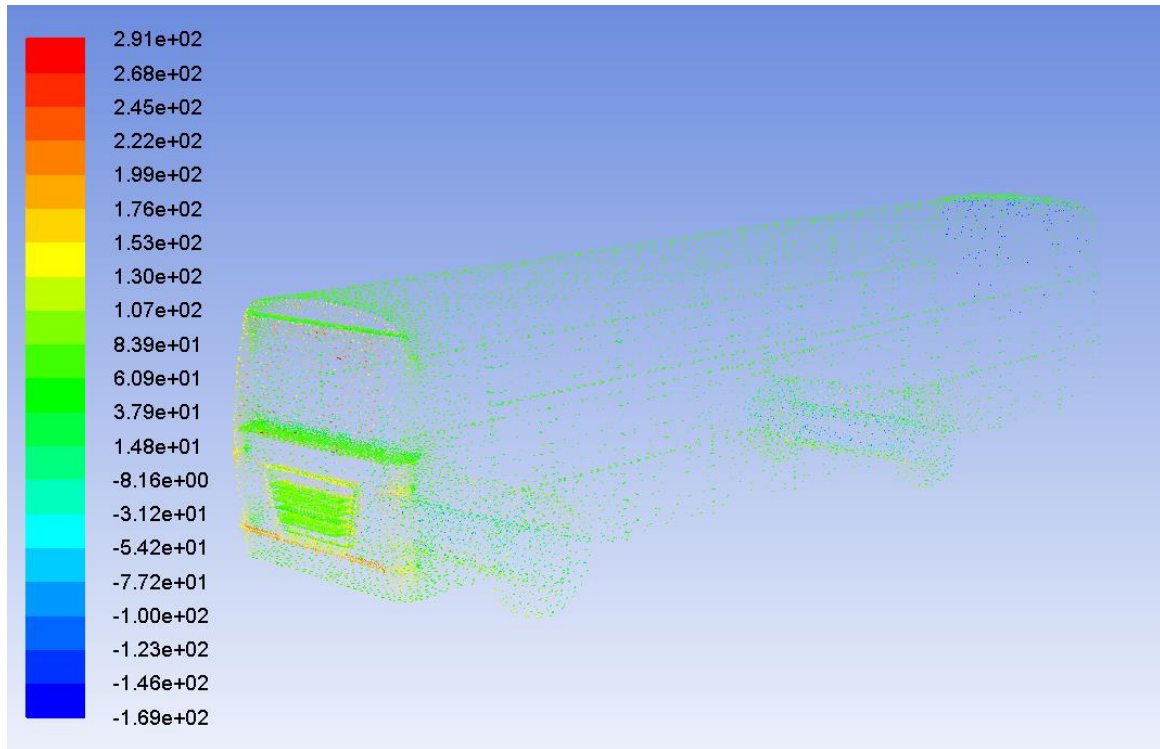
του αυτοκινήτου. Αναλυτικότερα λοιπόν για ταχύτητα αέρα 40 km /h δημιουργήθηκαν τα σχήματα 4.14 έως 4.16.



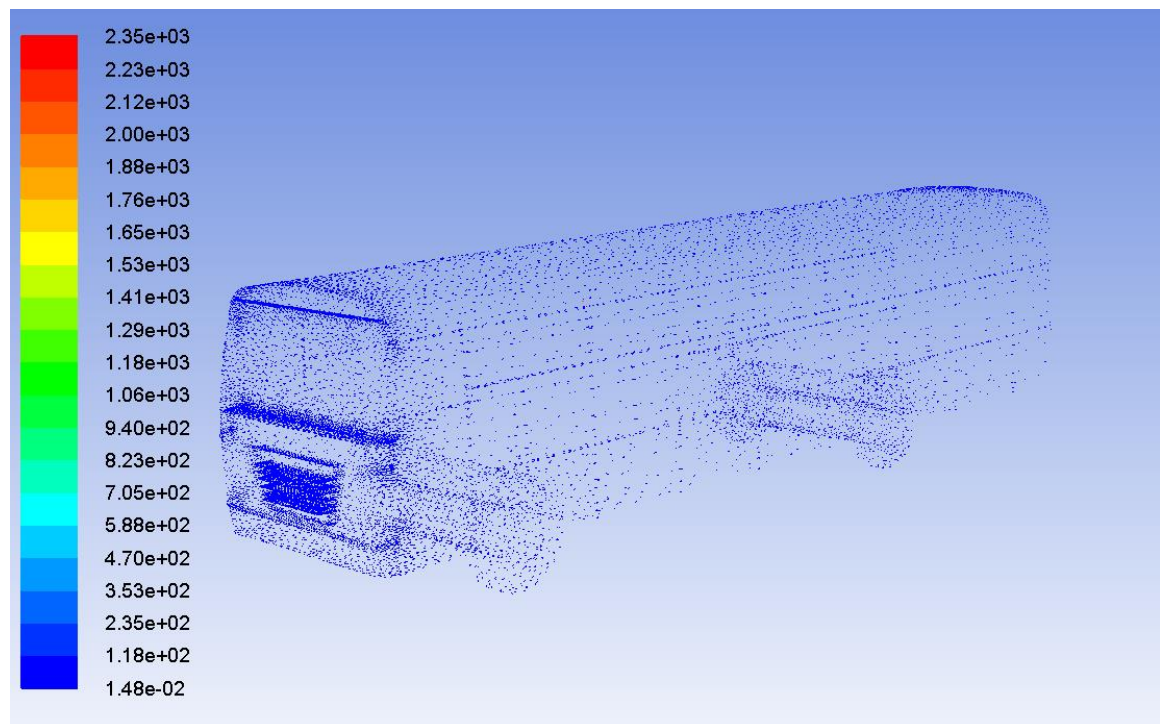
Σχήμα 4.13: Πλέγμα μοντέλου λεωφορείου στο ANSYS FLUENT



Σχήμα 4.14: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

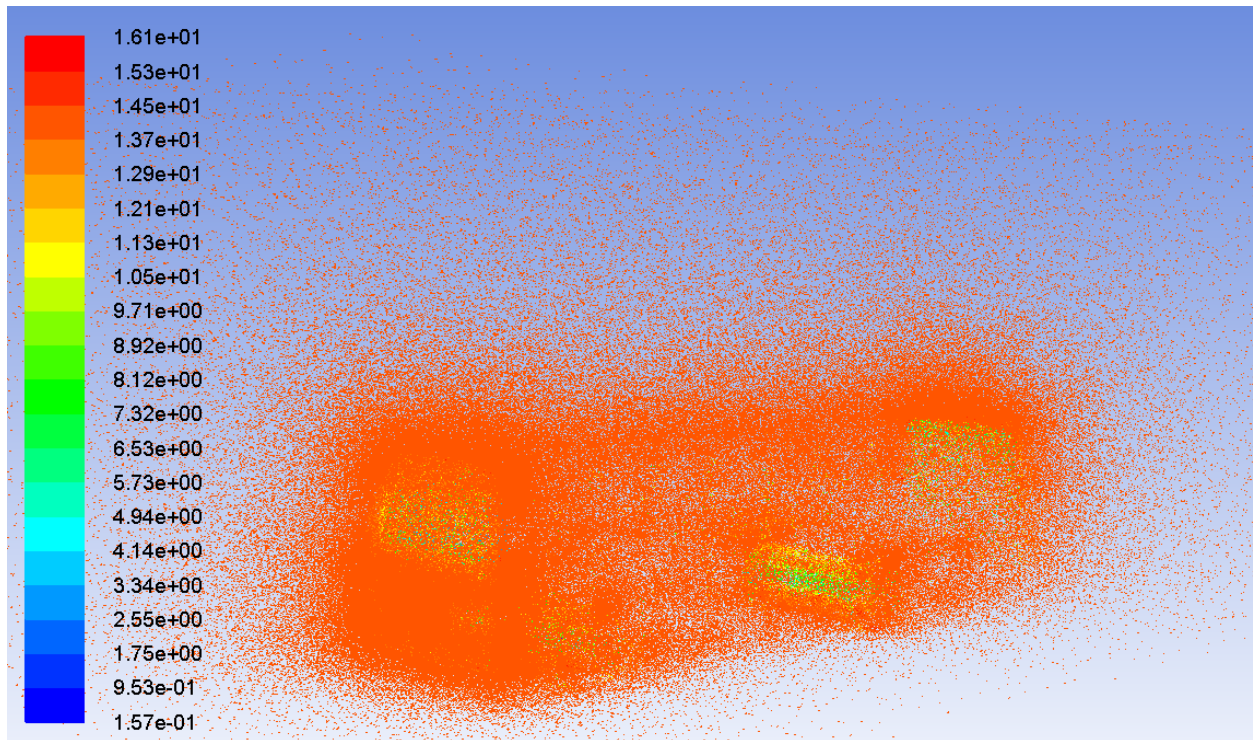


Σχήμα 4.15: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

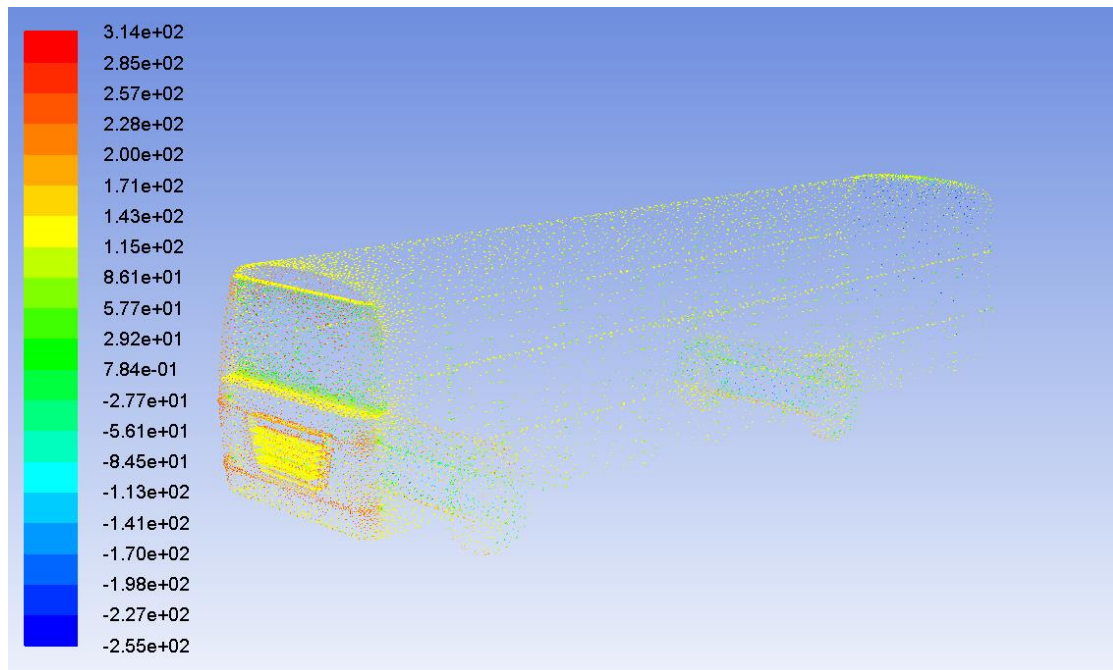


Σχήμα 4.16: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

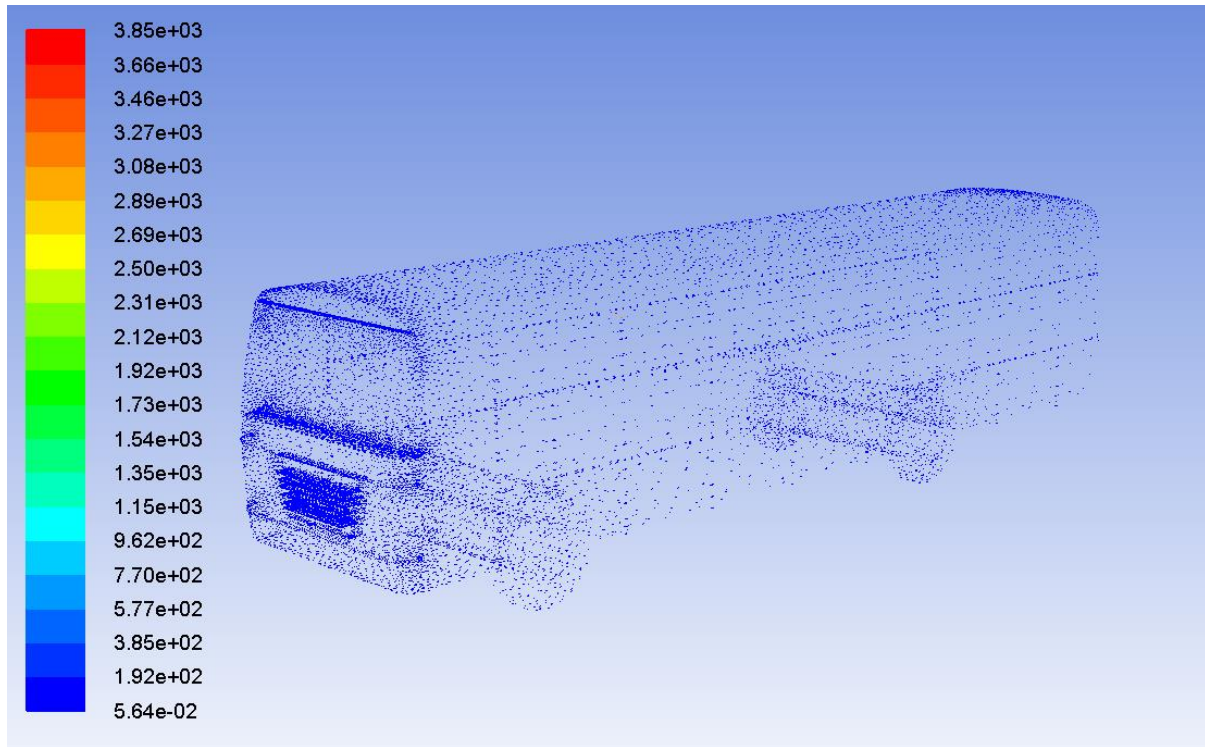
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.27563$ και $c_d = 0.61108$.
Για ταχύτητα αέρα 50 km / h δημιουργήθηκαν τα σχήματα 4.17 έως 4.19.



Σχήμα 4.17: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

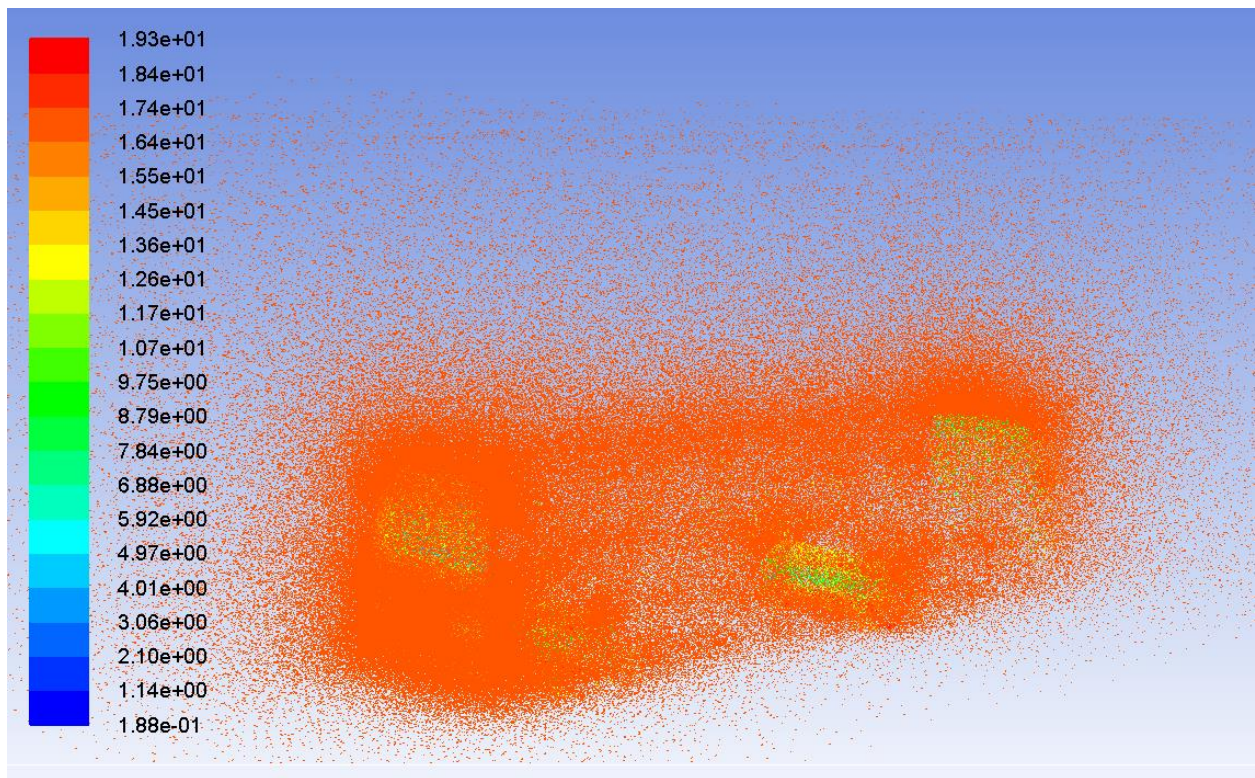


Σχήμα 4.18: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

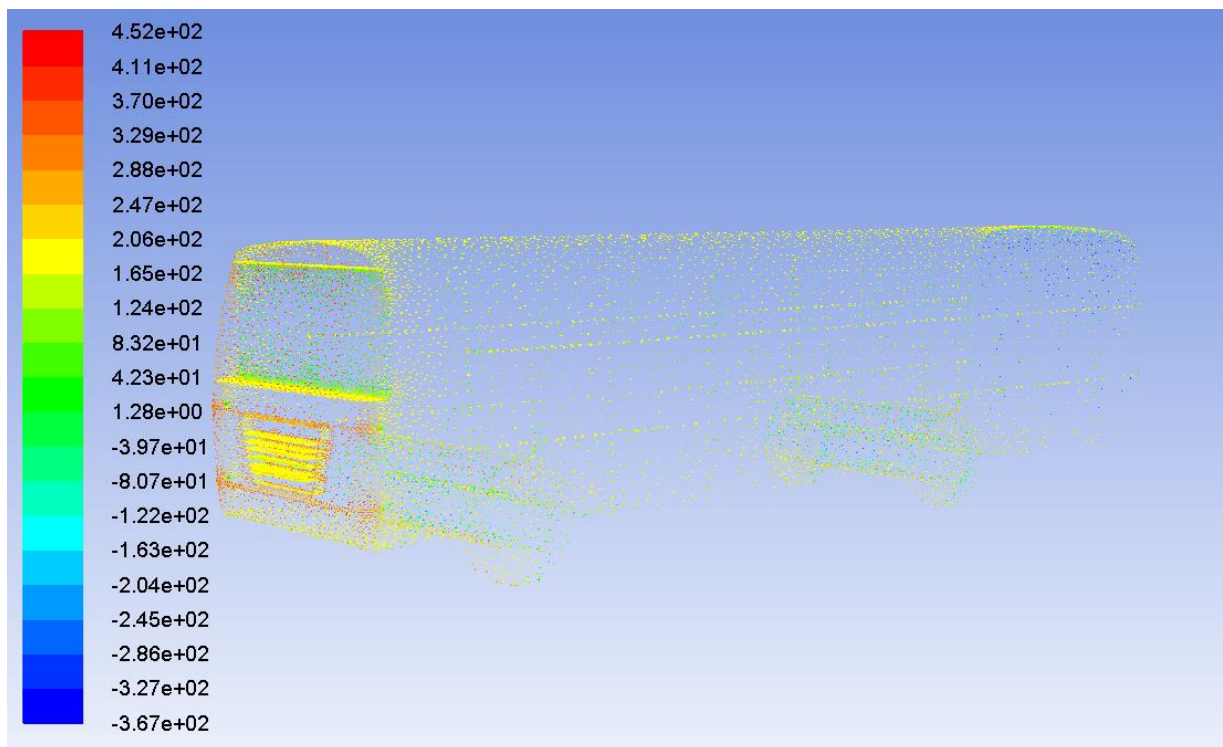


Σχήμα 4.19: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

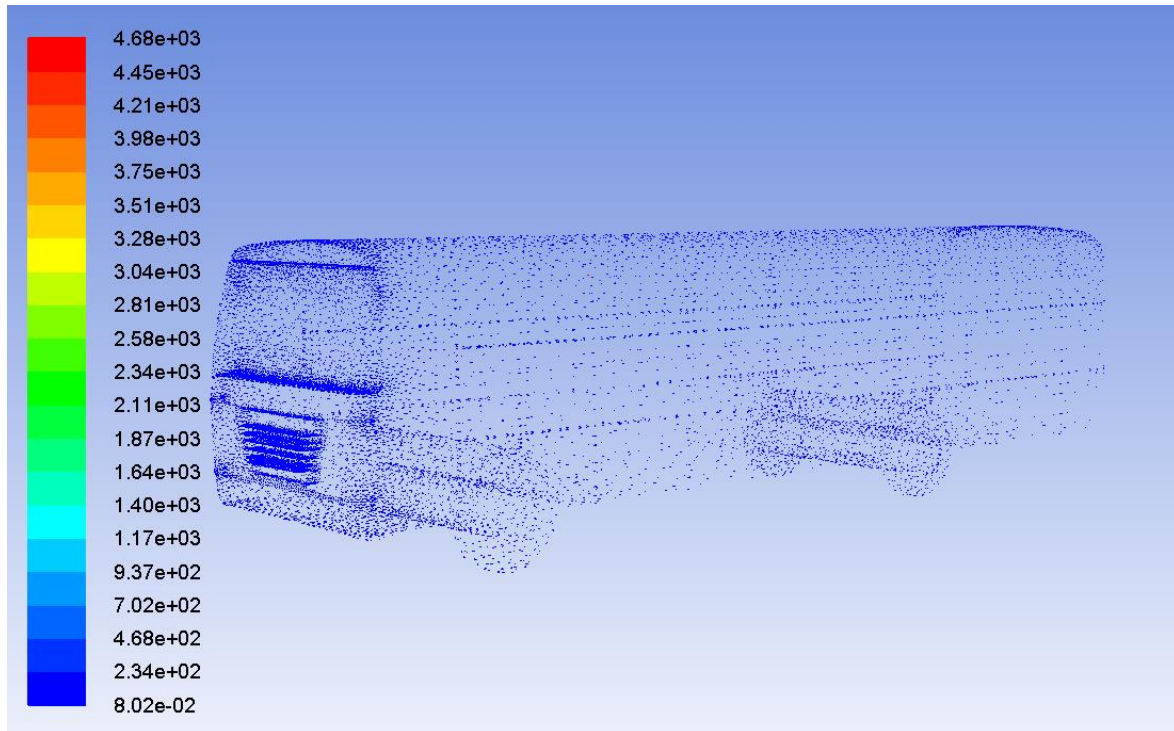
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.43062$ και $c_d = 0.95511$. Για ταχύτητα αέρα 60 km / h έχουμε τα σχήματα 4.20 – 4.22.



Σχήμα 4.20: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

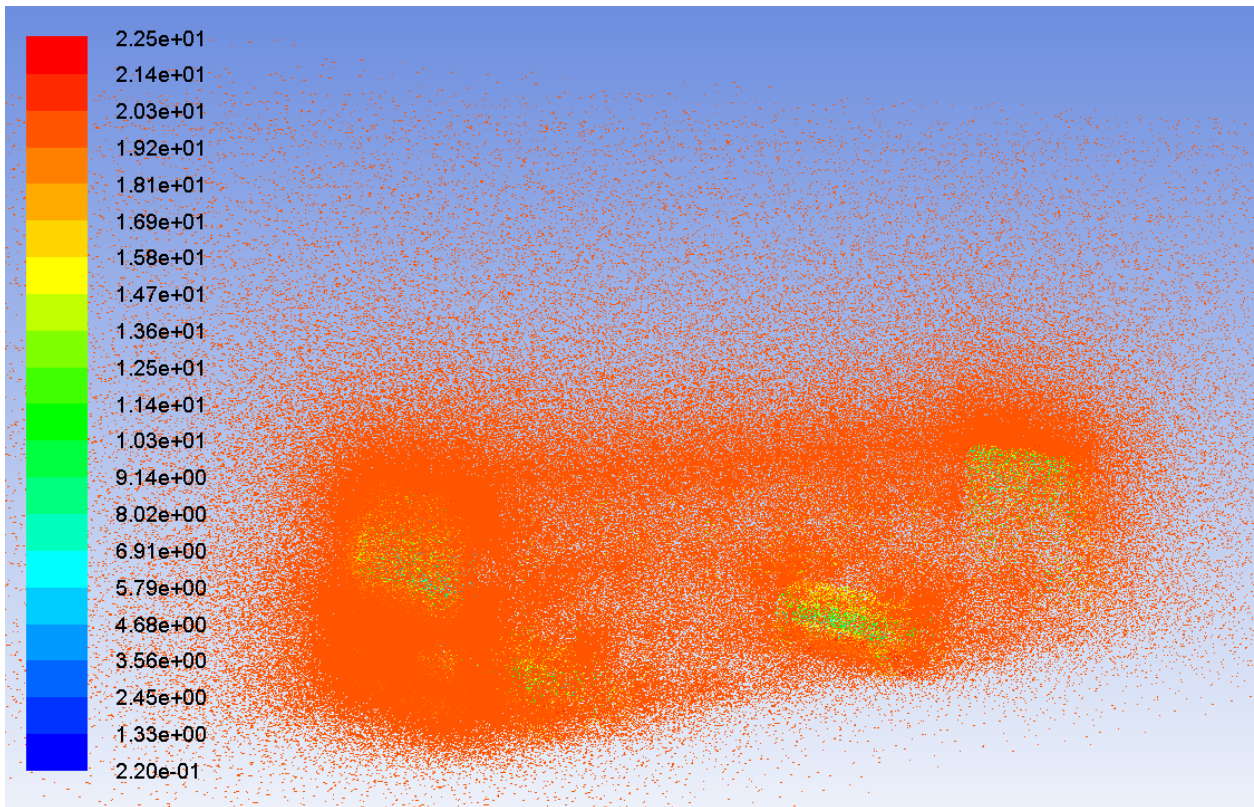


Σχήμα 4.21: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

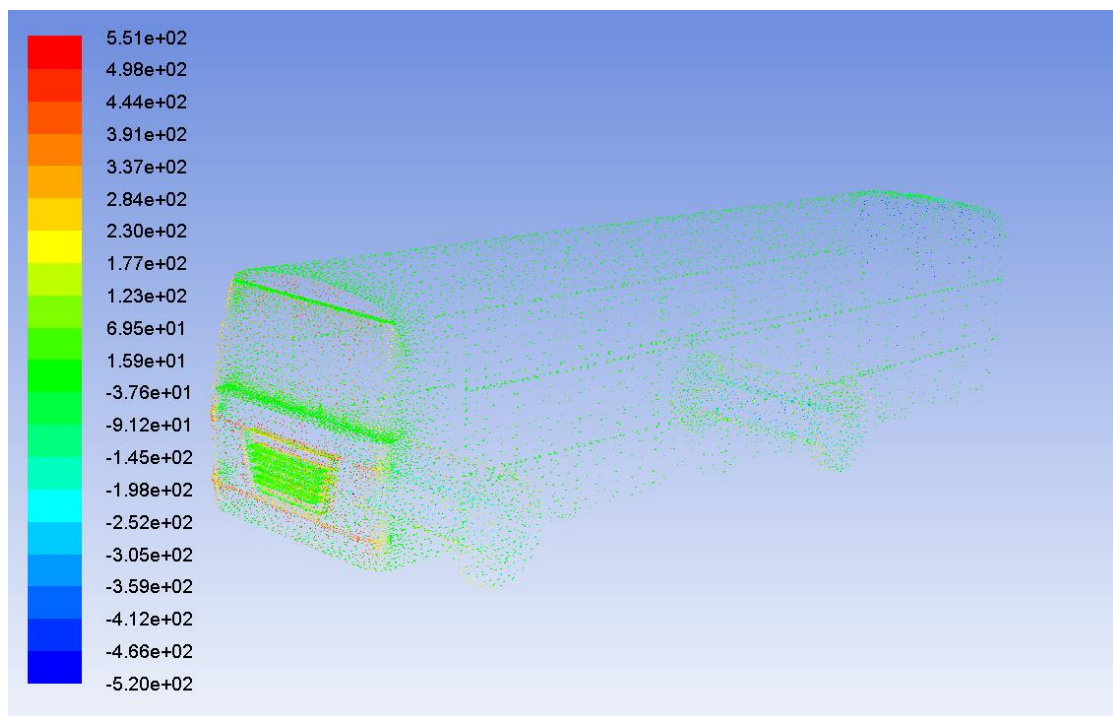


Σχήμα 4.22: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

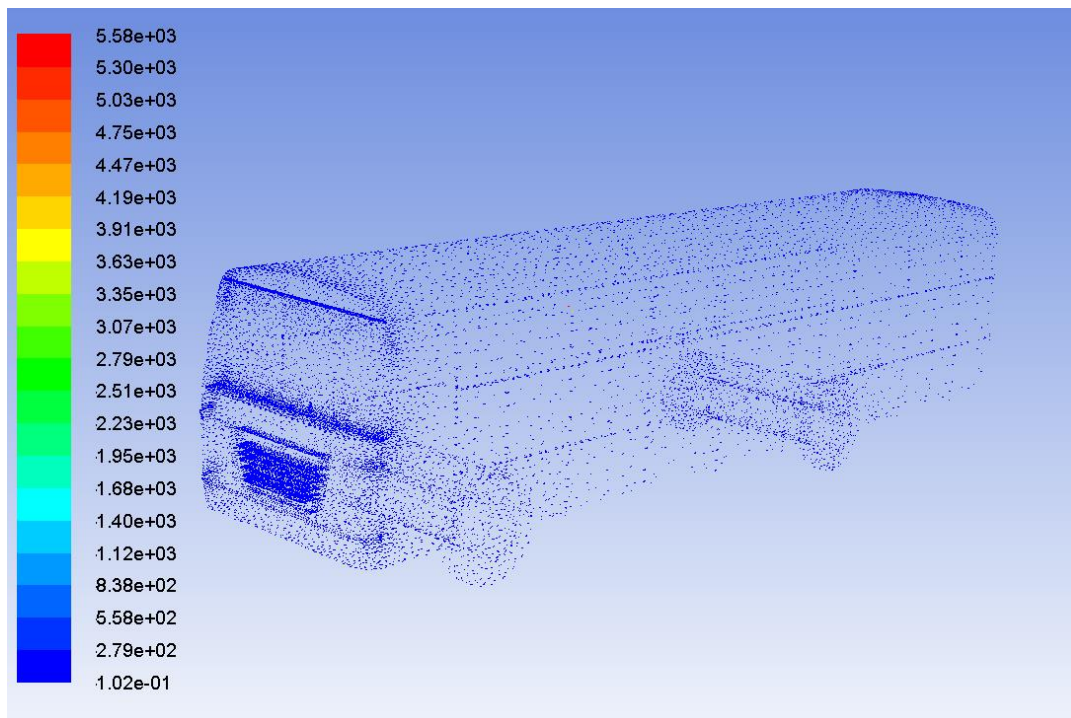
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.62007$ και $c_d = 1.3758$. Για ταχύτητα αέρα 70 km / h δημιουργήθηκαν τα σχήματα 4.23 – 4.25.



Σχήμα 4.23: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

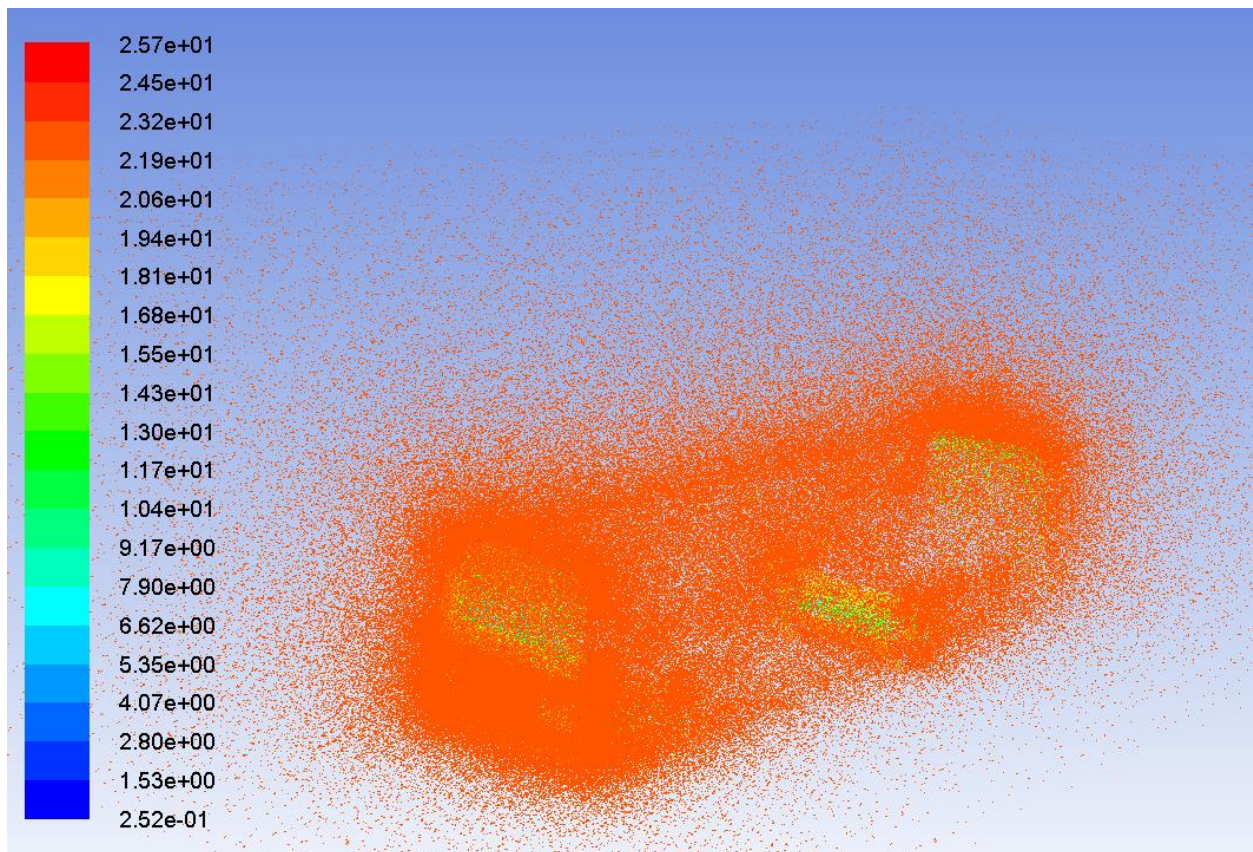


Σχήμα 4.24: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

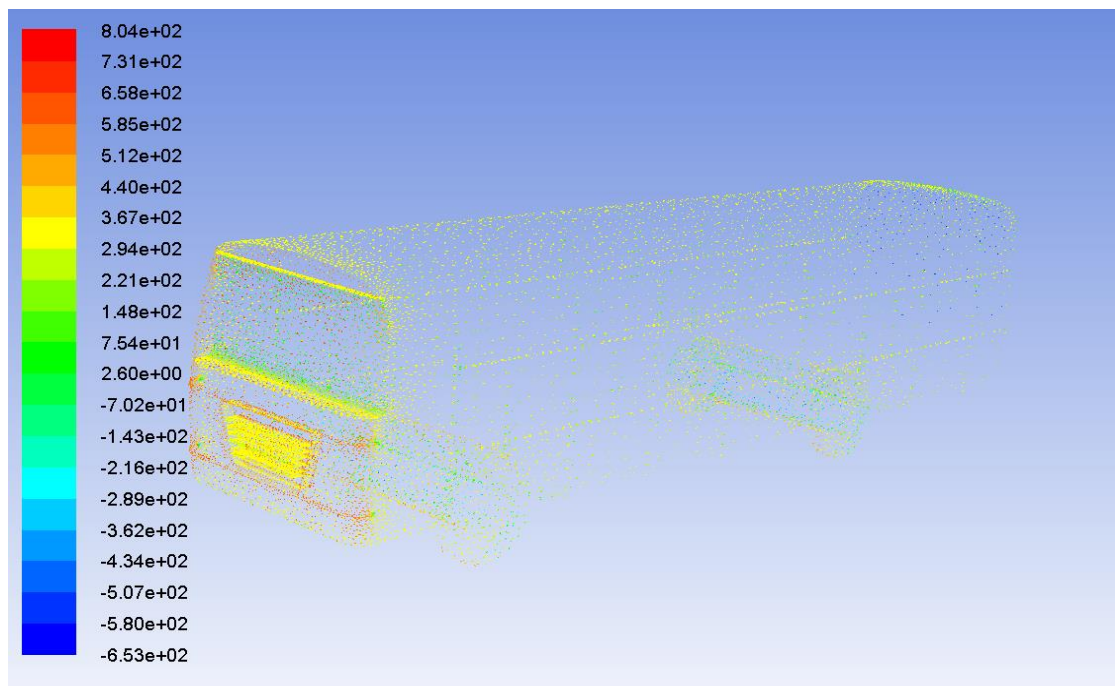


Σχήμα 4.25: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

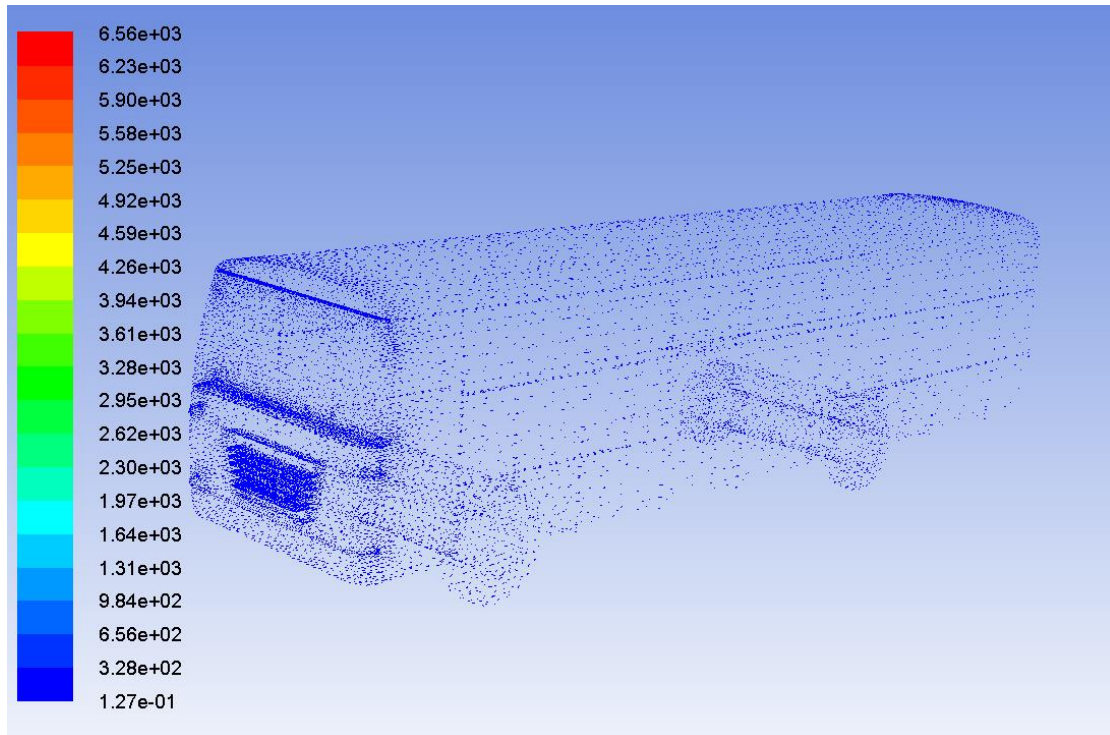
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.84302$ και $c_d = 1.8711$. Για ταχύτητα αέρα 80 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4.26 έως 4.28.



Σχήμα 4.26: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

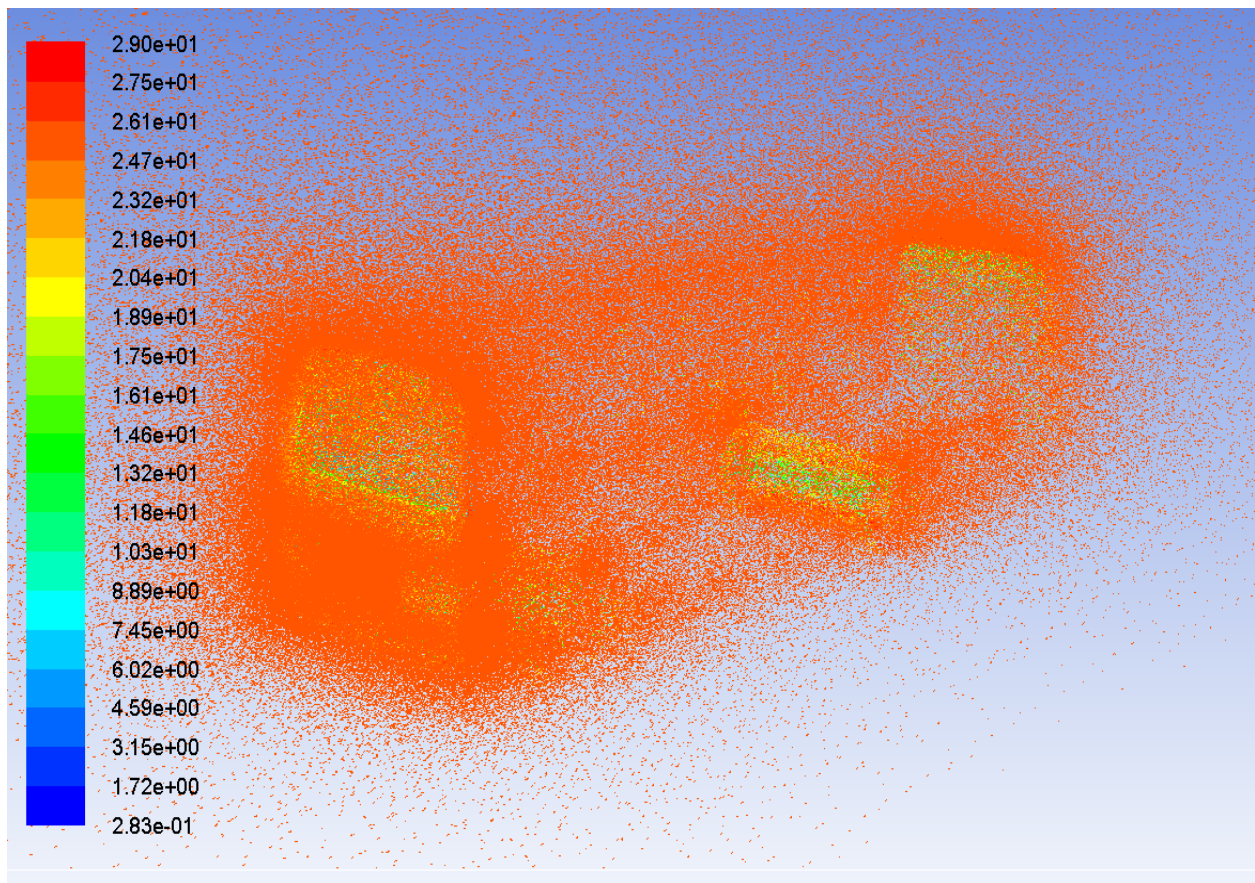


Σχήμα 4.27: Περίγραμμα ολικής πίεσης για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

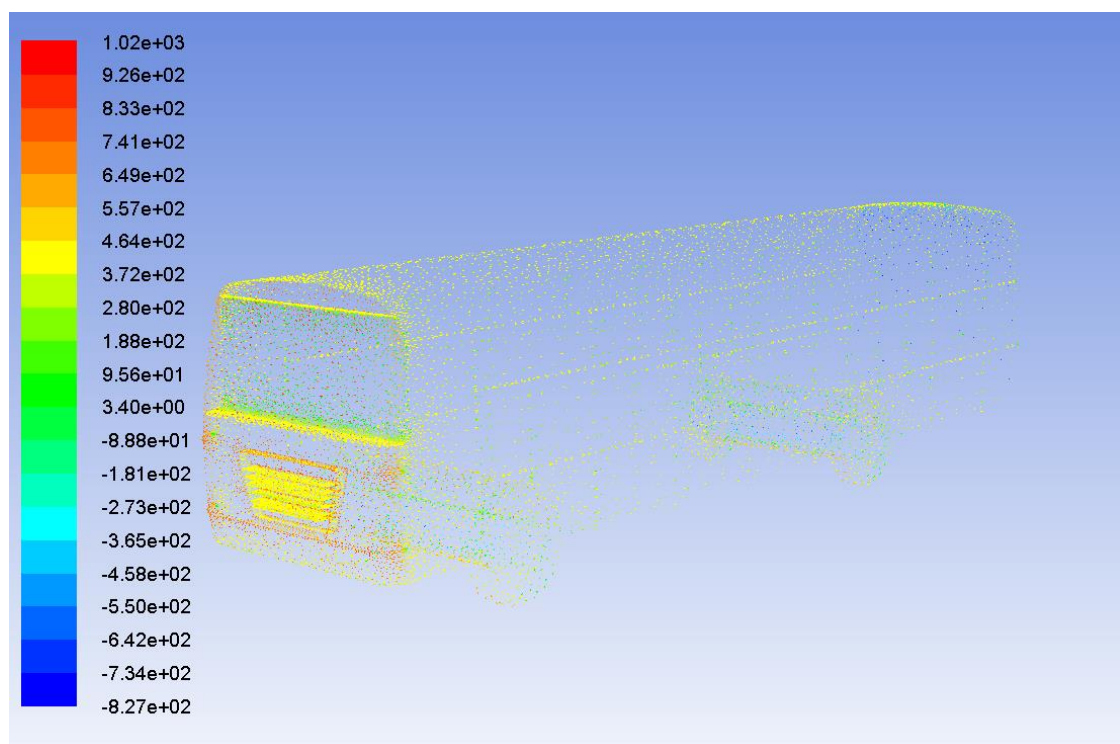


Σχήμα 4.28: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

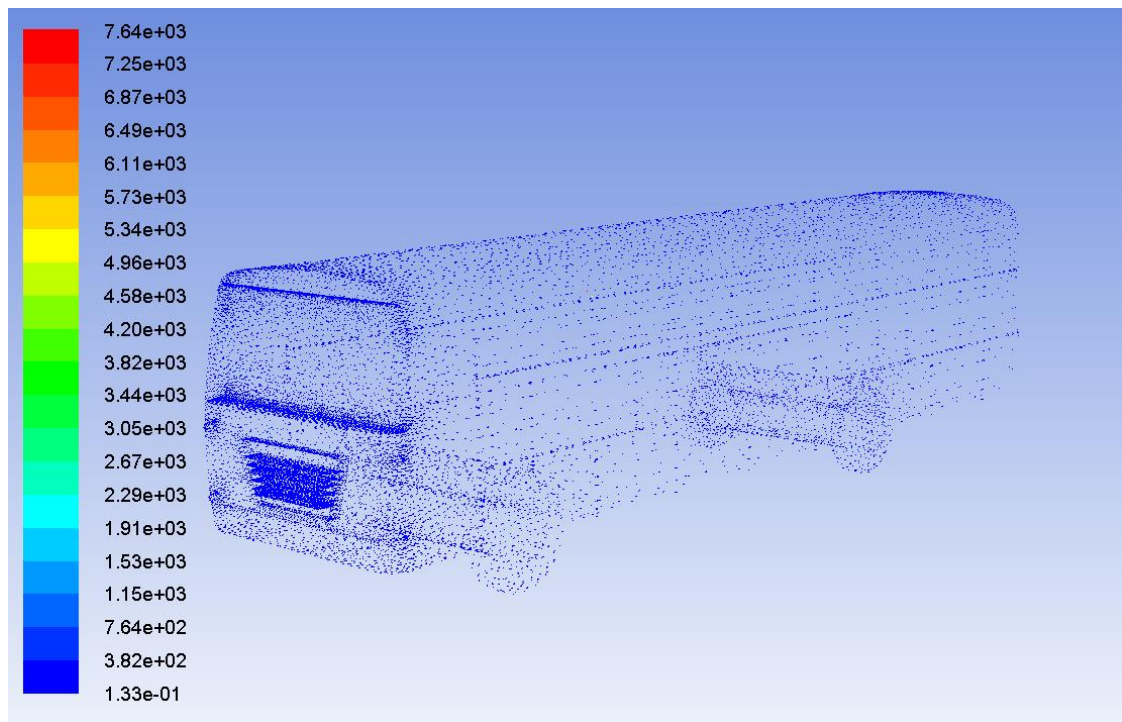
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 1.1006$ και $c_d = 2.4445$. Για ταχύτητα αέρα 90 km / h παίρνουμε τα σχήματα 4.29 έως 4.31.



Σχήμα 4.29: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

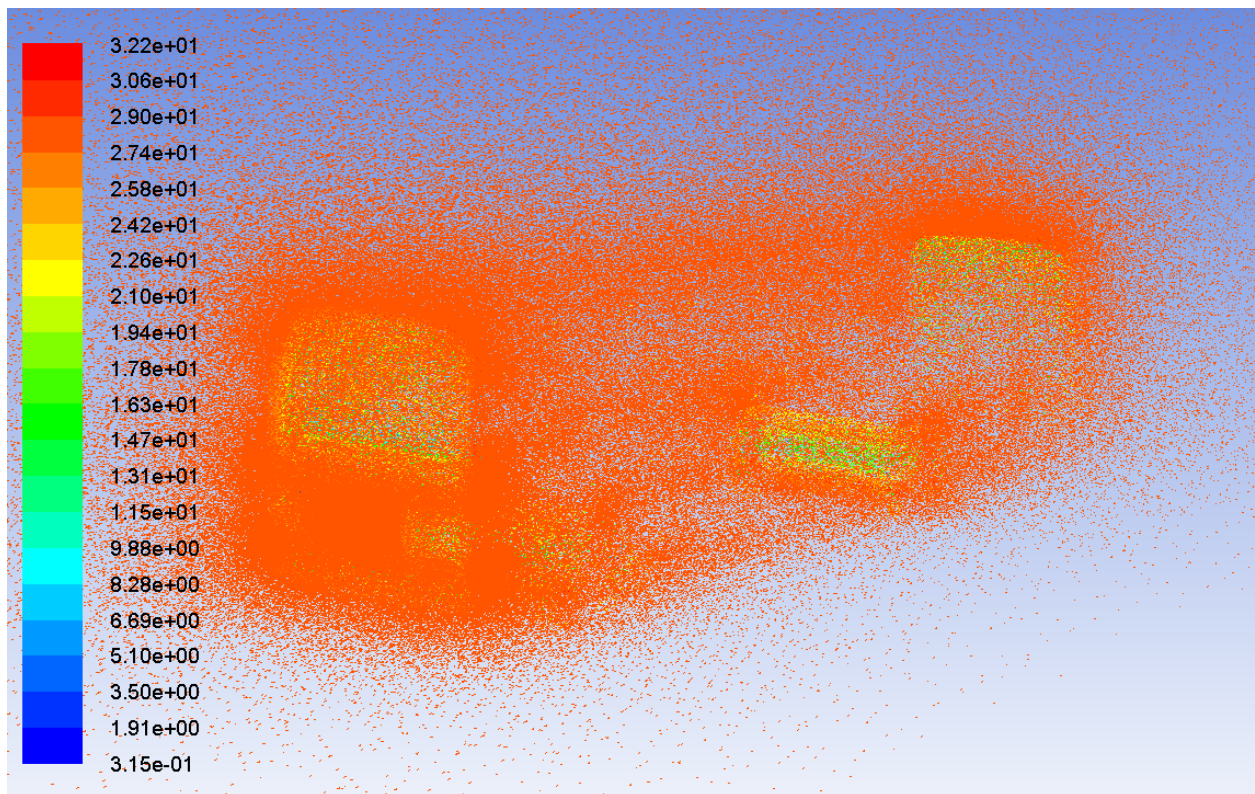


Σχήμα 4.30: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

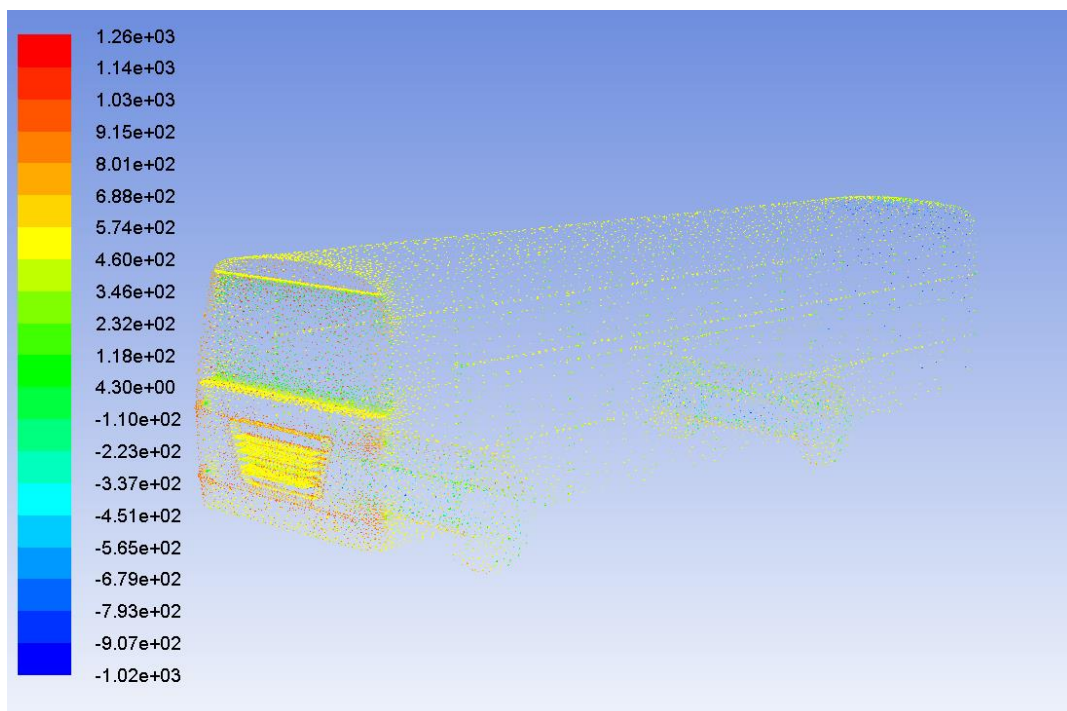


Σχήμα 4.31: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

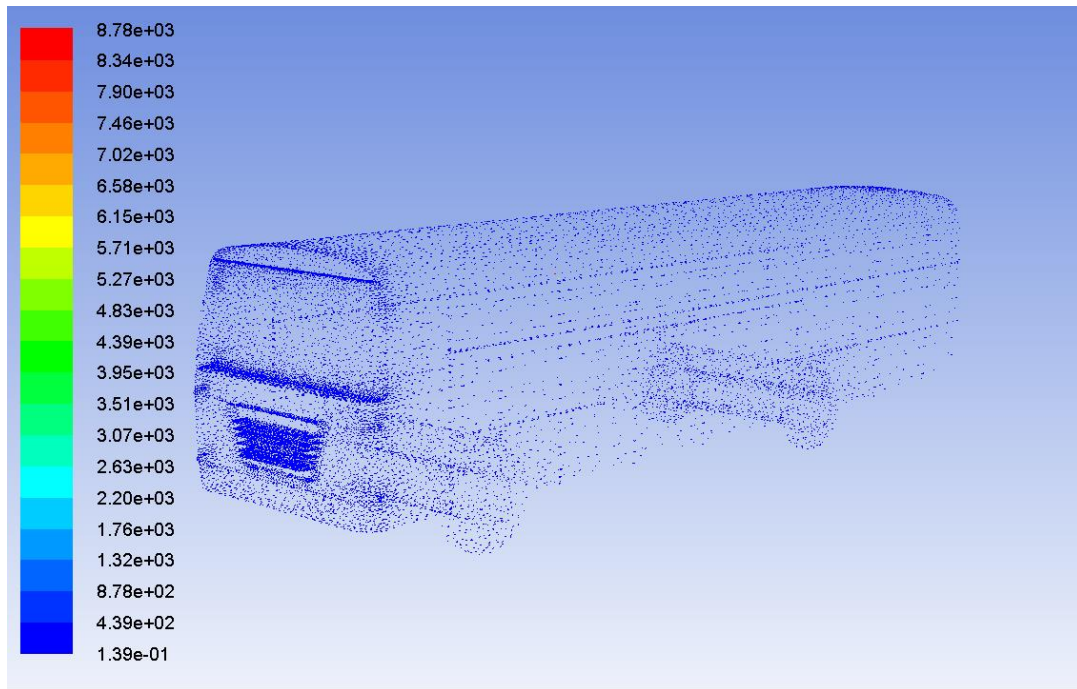
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 1.3939$ και $c_d = 3.0886$.
Για ταχύτητα αέρα 100 km / h θα έχουμε τα σχήματα 4.32 έως 4.34.



Σχήμα 4.32: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

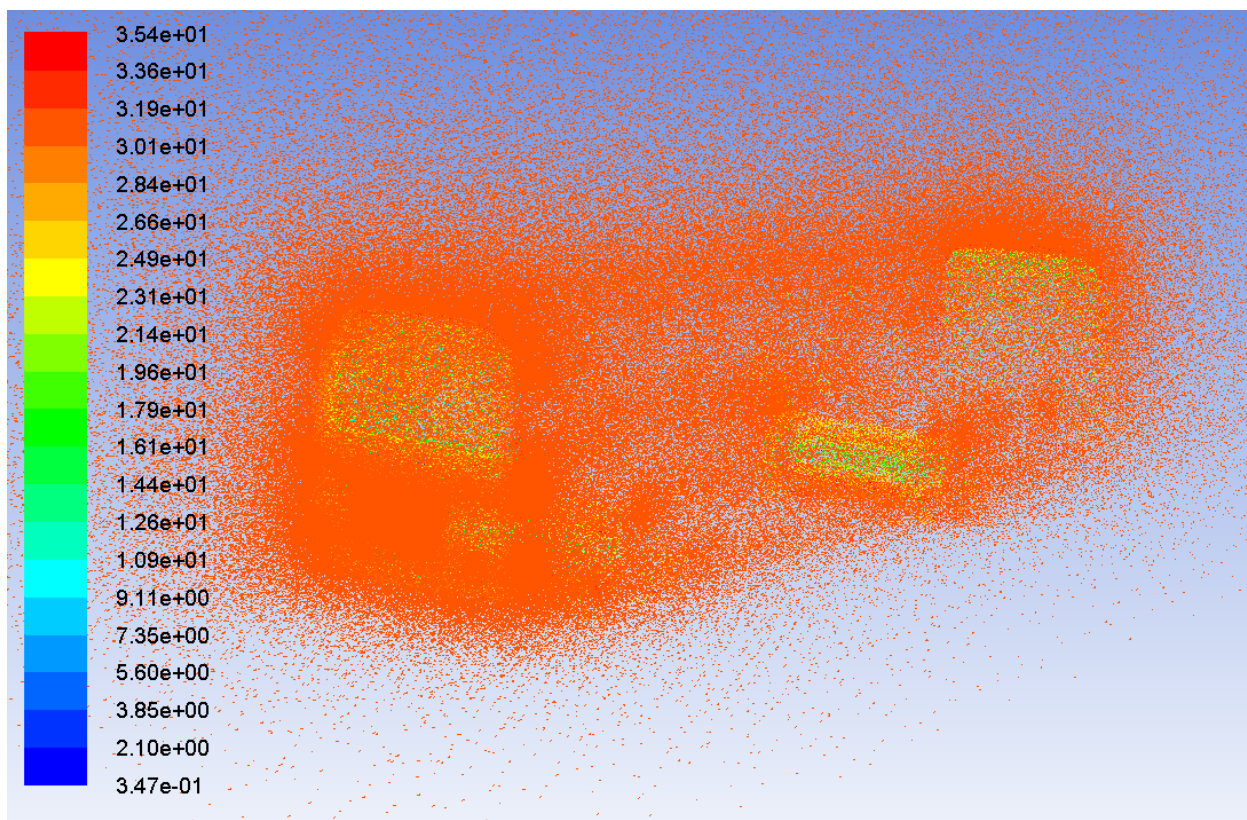


Σχήμα 4.33: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

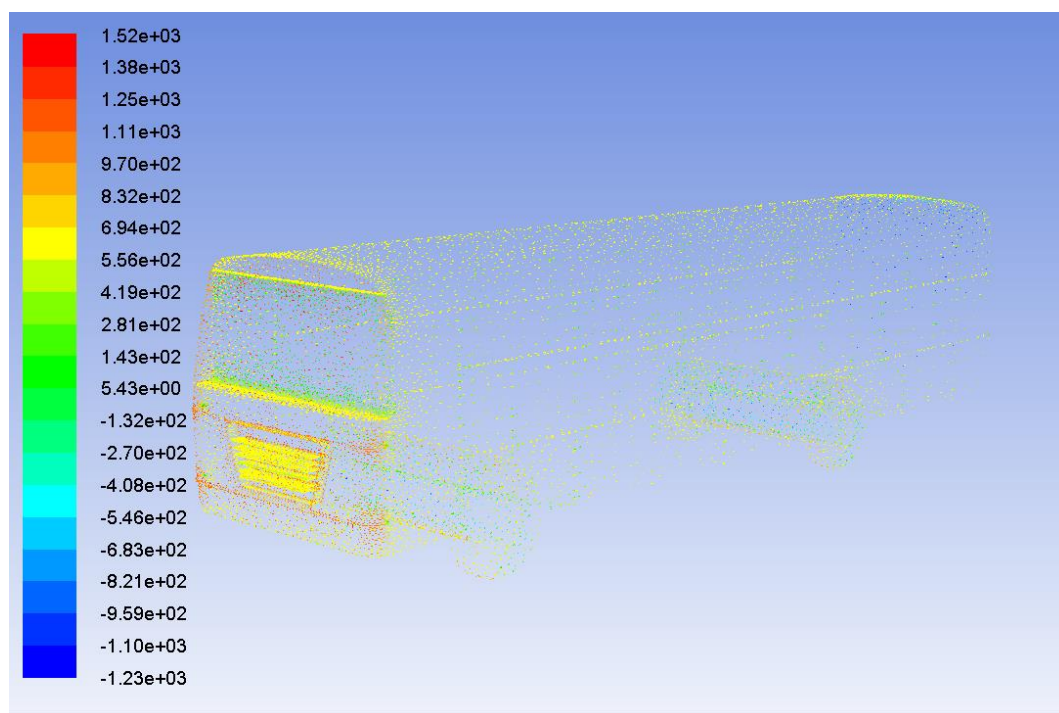


Σχήμα 4.34: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

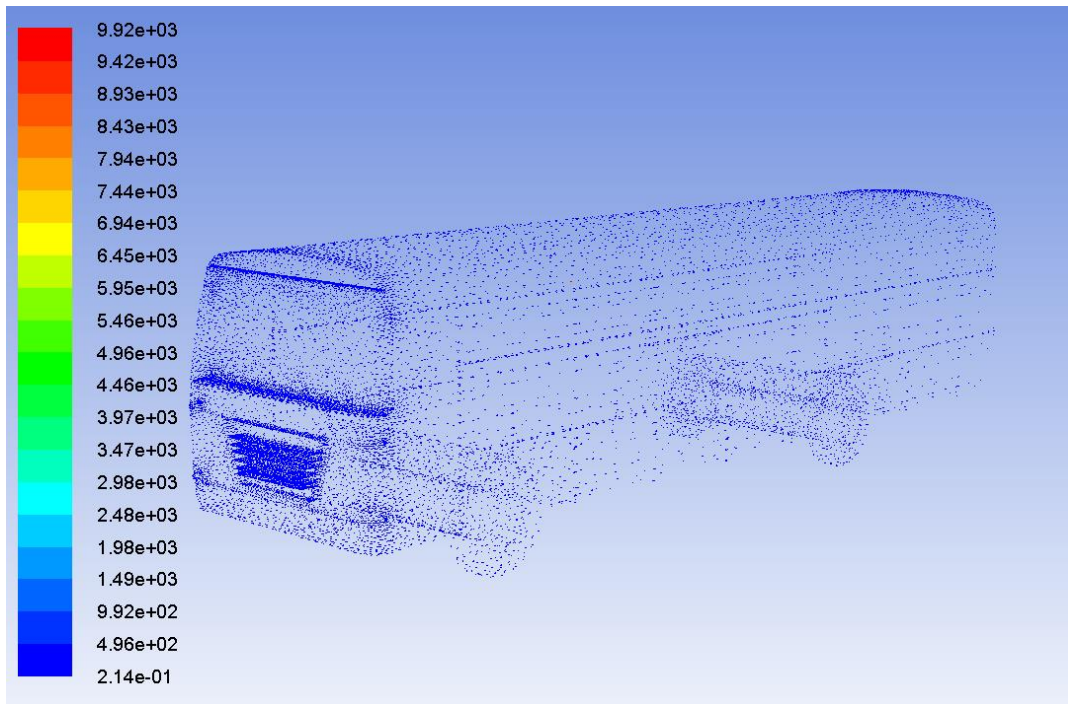
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 1.7193$ και $c_d = 3.8212$.
Για ταχύτητα αέρα 110 km / h βλέπουμε τα σχήματα 4.35 – 4.37.



Σχήμα 4.35: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

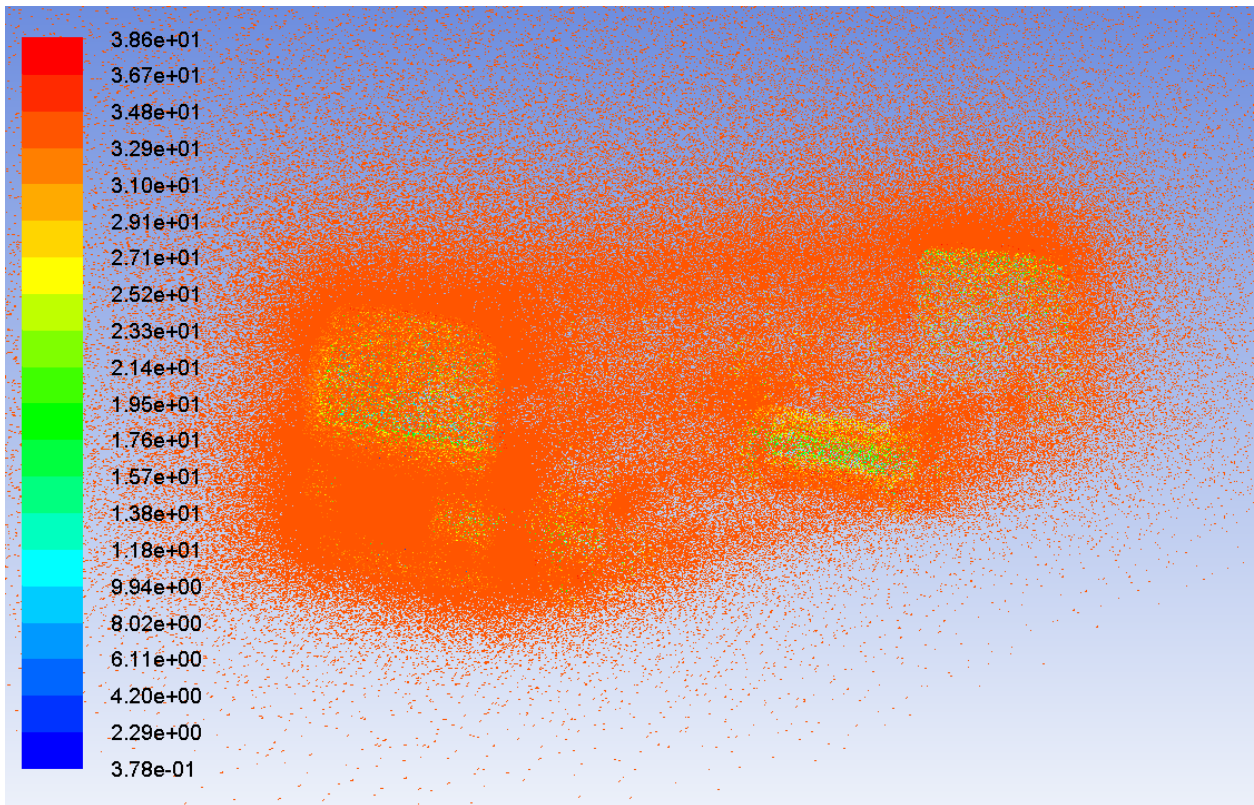


Σχήμα 4.36: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

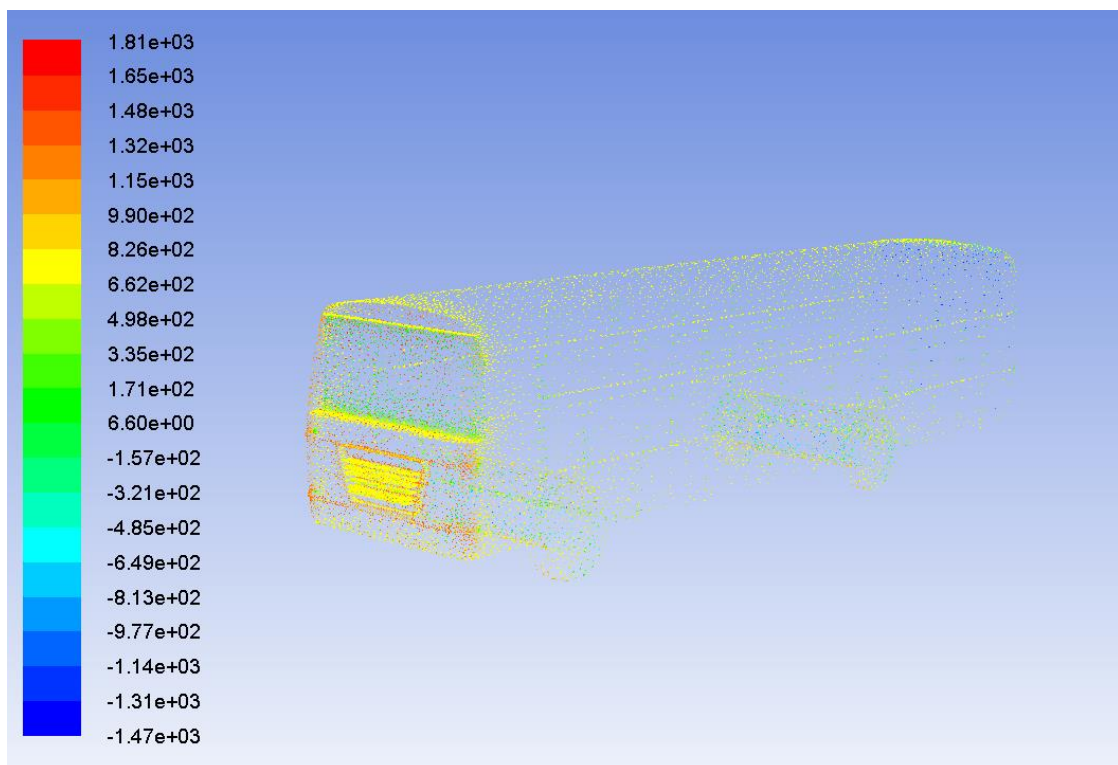


Σχήμα 4.37: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

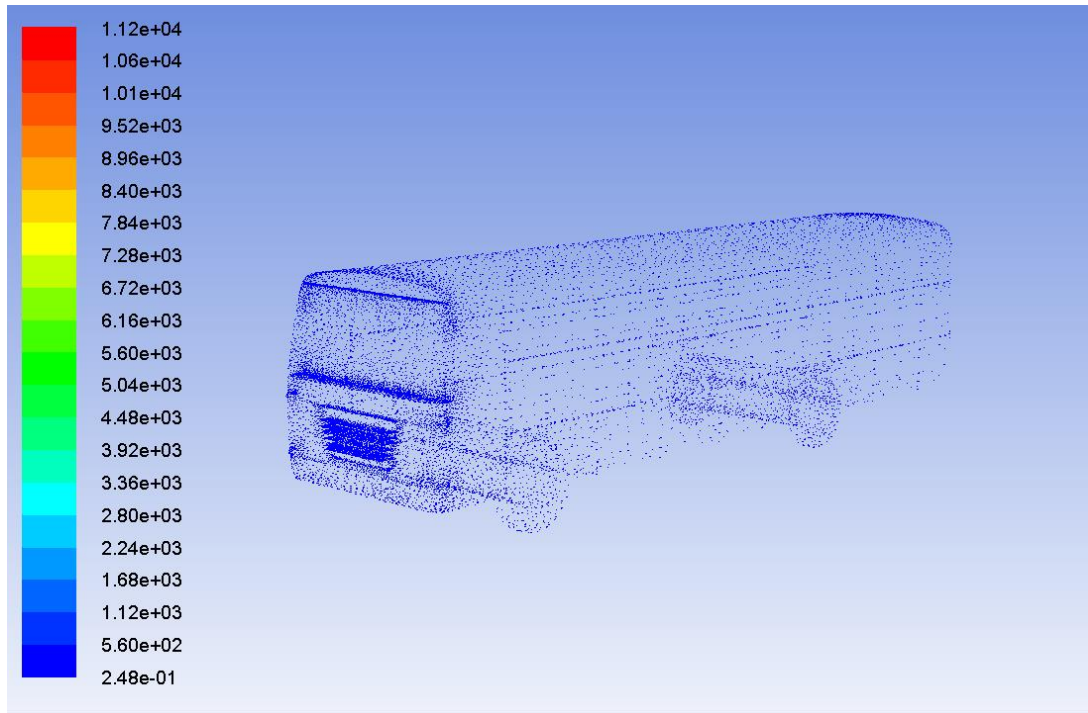
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 2.0788$ και $c_d = 4.6212$. Τέλος για την τελευταία ταχύτητα αέρα των 120 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4.38 έως 4.40.



Σχήμα 4.38: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο λεωφορείου



Σχήμα 4.39: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο λεωφορείου



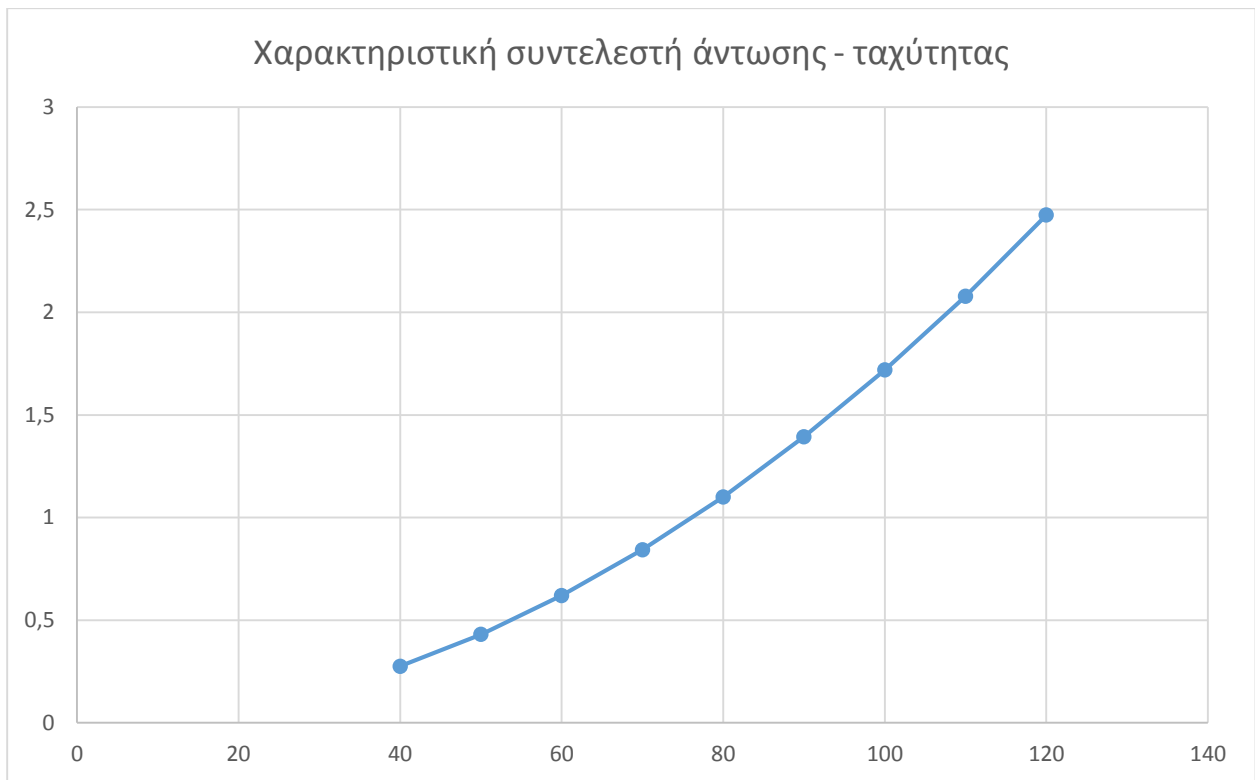
Σχήμα 4.40: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο λεωφορείου

Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 2.4738$ και $c_d = 5.5007$.

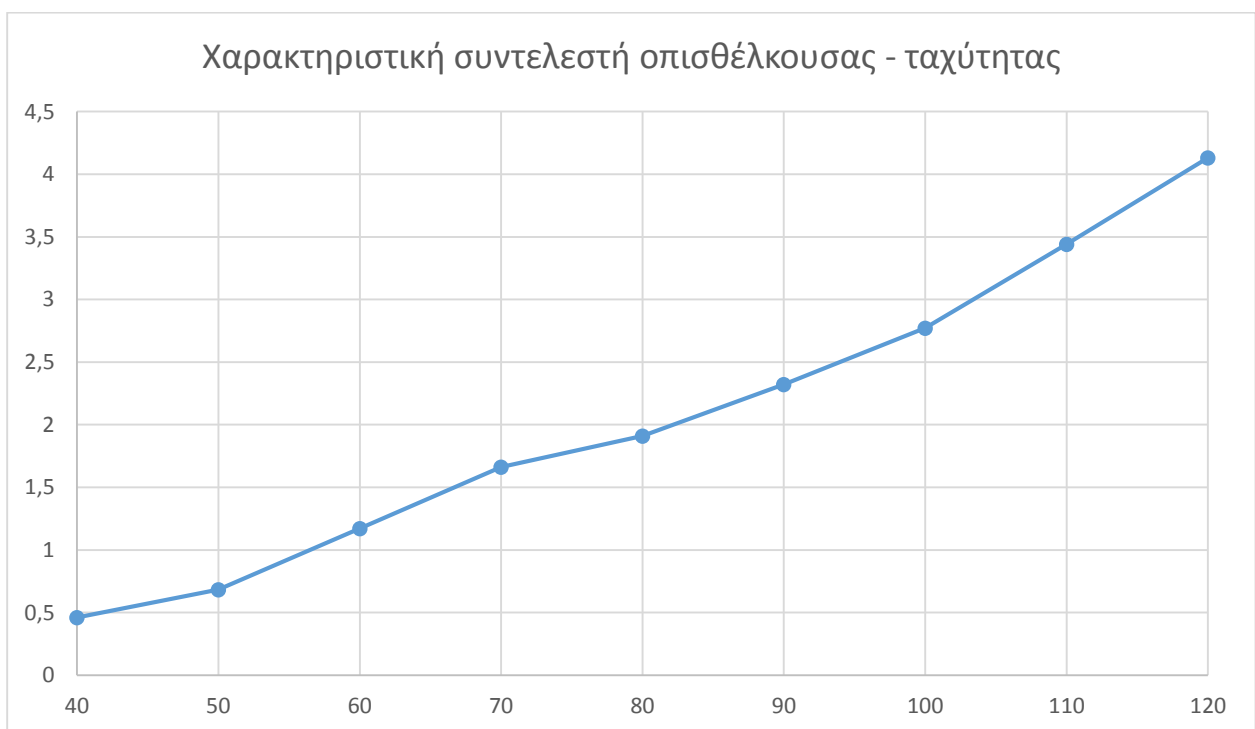
Οι συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και ο λόγος L / D για κάθε περίπτωση ταχύτητας συνοψίζονται στον πίνακα 4.2. Από τα διαγράμματα των σχημάτων 3.41 – 3.43, οι συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας για το εύρος ταχύτητας αέρα 40 – 120 km / h έχουν σχεδόν γραμμική σχέση με την ταχύτητα του αέρα, ενώ η τιμή του λόγου L / D , παραμένει σταθερή για όλο το εύρος τιμών της ταχύτητας.

Πίνακας 4.2: Συντελεστές άντωσης, οπισθελκούσας και ο λόγος αυτών.

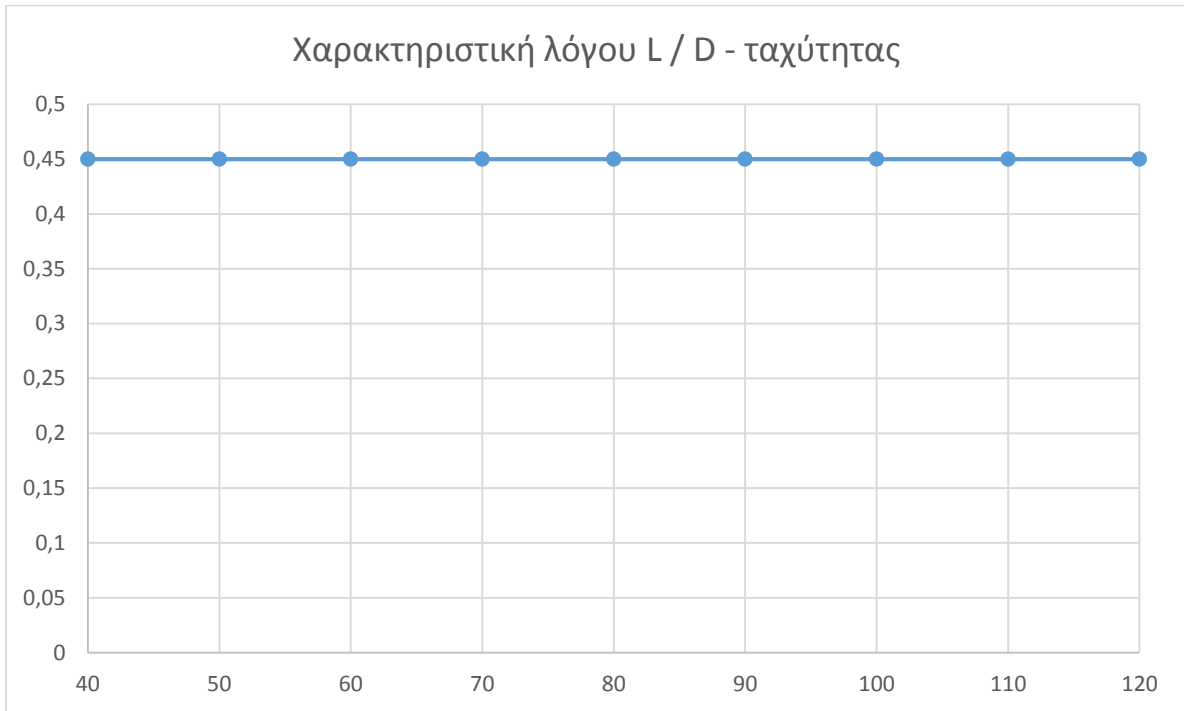
Ταχύτητα (km/h)	cl	cd	L / D
40	0.27563	0.61108	0.45
50	0.43062	0.95511	0.45
60	0.62007	1.3758	0.45
70	0.84302	1.8711	0.45
80	1.1006	2.4445	0.45
90	1.3939	3.0886	0.45
100	1.7193	3.8212	0.45
110	2.0788	4.6212	0.45
120	2.4738	5.5007	0.45



Σχήμα 4.41: Διάγραμμα συντελεστή άντωσης – ταχύτητας για το μοντέλο λεωφορείου



Σχήμα 4.42: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας – ταχύτητας για το μοντέλο λεωφορείου



Σχήμα 4.43: Διάγραμμα λόγου L / D – ταχύτητας για το μοντέλο λεωφορείου

Από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν για το μοντέλο του λεωφορείου φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας στην άντωση και στην οπισθέλκουσα, αλλά και στα υπόλοιπα μεγέθη. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του λεωφορείου, αυξάνονται η ολική πίεση και η κινητική ενέργεια της τύρβης. Η μέγιστη ολική πίεση, όπως και η μέγιστη στατική πίεση, εμφανίζεται στην πρόσοψη του λεωφορείου ασκώντας αντίσταση στην κίνηση του λεωφορείου προς τα εμπρός. Αντίθετα η πίεση στο πίσω μέρος του λεωφορείου είναι σημαντικά μικρότερη συγκρινόμενη με την πίεση που ασκείται στην πρόσοψη. Αυτή η διαφορά πίεσης έχει ως αποτέλεσμα να ασκείται μεγάλη οπισθέλκουσα δύναμη στο σώμα του λεωφορείου. Η ταχύτητα του αέρα είναι σημαντικά αυξημένη στην πρόσοψη και πλευρικά του λεωφορείου, ενώ έχει ελάχιστη τιμή στο πίσω μέρος και στους τροχούς γιατί δεν εκτίθενται άμεσα στην ροή του αέρα. Η ροή του αέρα γύρω από το λεωφορείο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή τύρβη, ενώ η τύρβη τοπικά εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του μοντέλου και φαίνεται από τα διανύσματα της ταχύτητας των αντίστοιχων περιγραμμάτων.

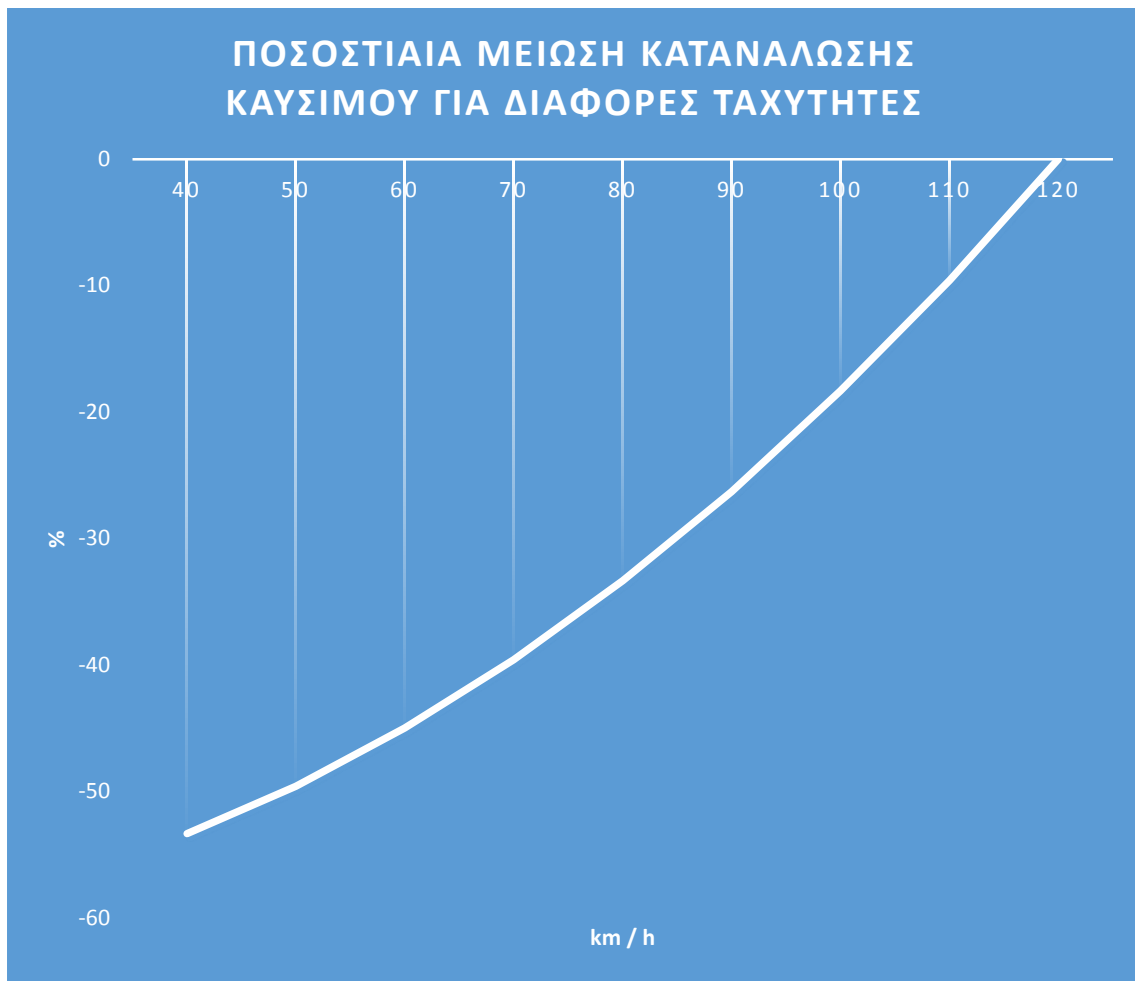
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ

Η αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης λόγω ταχύτητας οδηγεί στην αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Για βαρέα οχήματα, όπως φορτηγά και λεωφορεία, η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με την ποσοστιαία μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση (4.1). Στον πίνακα 4.3 λαμβάνοντας ως ταχύτητα αναφοράς την μέγιστη ταχύτητα, υπολογίζονται οι μειώσεις της οπισθέλκουσας δύναμης και οι αντίστοιχες μειώσεις της κατανάλωσης καυσίμου. Στο σχήμα 4.4 παριστάνονται οι ποσοστιαίες μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου για διάφορες ταχύτητες για το μοντέλο λεωφορείου.

$$\begin{aligned} \text{Μείωση κατανάλωσης καυσίμου (\%)} \\ = 0.6 * \text{Μείωση ολικής οπισθέλκουσας δύναμης (\%)} \quad (4.1) \end{aligned}$$

Πίνακας 4.3: Μειώσεις οπισθέλκουσας δύναμης και κατανάλωσης καυσίμου

Ταχύτητα (km/h)	C_d	Μείωση C_d / 100	Μείωση κατανάλωσης καυσίμου / 100
40	0.61108	-0.88891	-0.53335
50	0.95511	-0.82637	-0.49582
60	1.3758	-0.74989	-0.44993
70	1.8711	-0.65984	-0.39591
80	2.4445	-0.5556	-0.33336
90	3.0886	-0.43851	-0.2631
100	3.8212	-0.30532	-0.18319
110	4.6212	-0.15989	-0.09593
120	5.5007	1	-

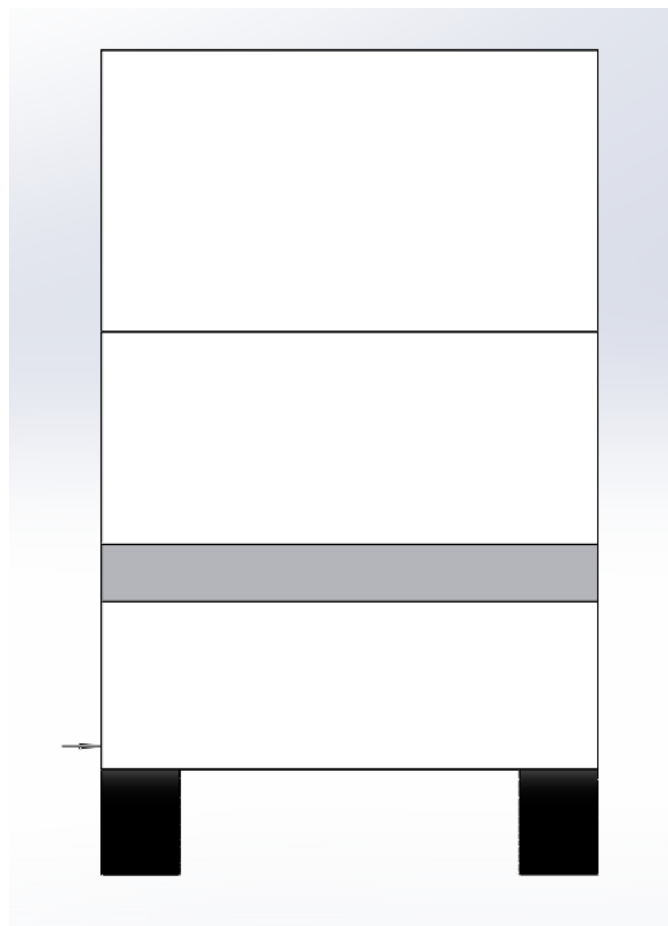


Σχήμα 4.44: Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης καυσίμου, για διάφορες ταχύτητες για το μοντέλο λεωφορείου

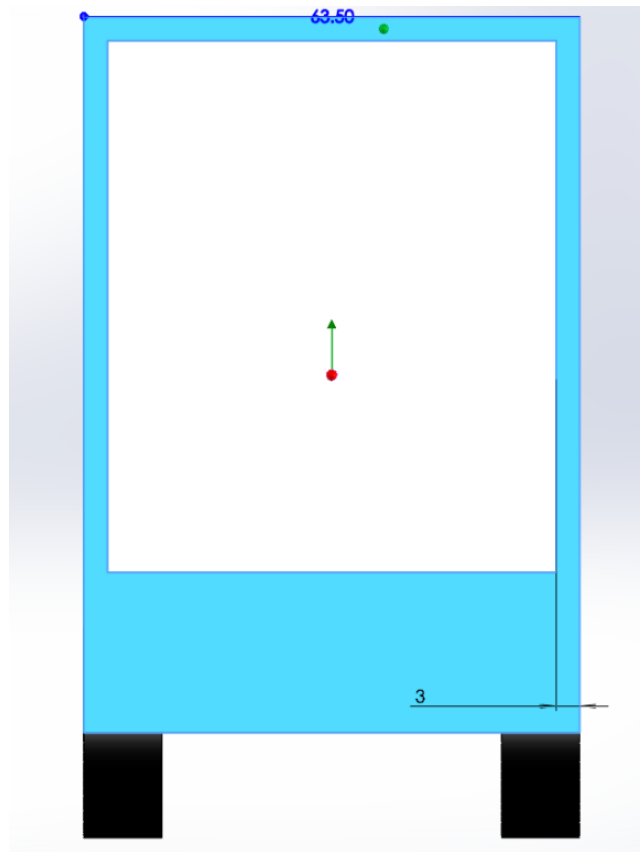
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΗΓΟΥ

5.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ

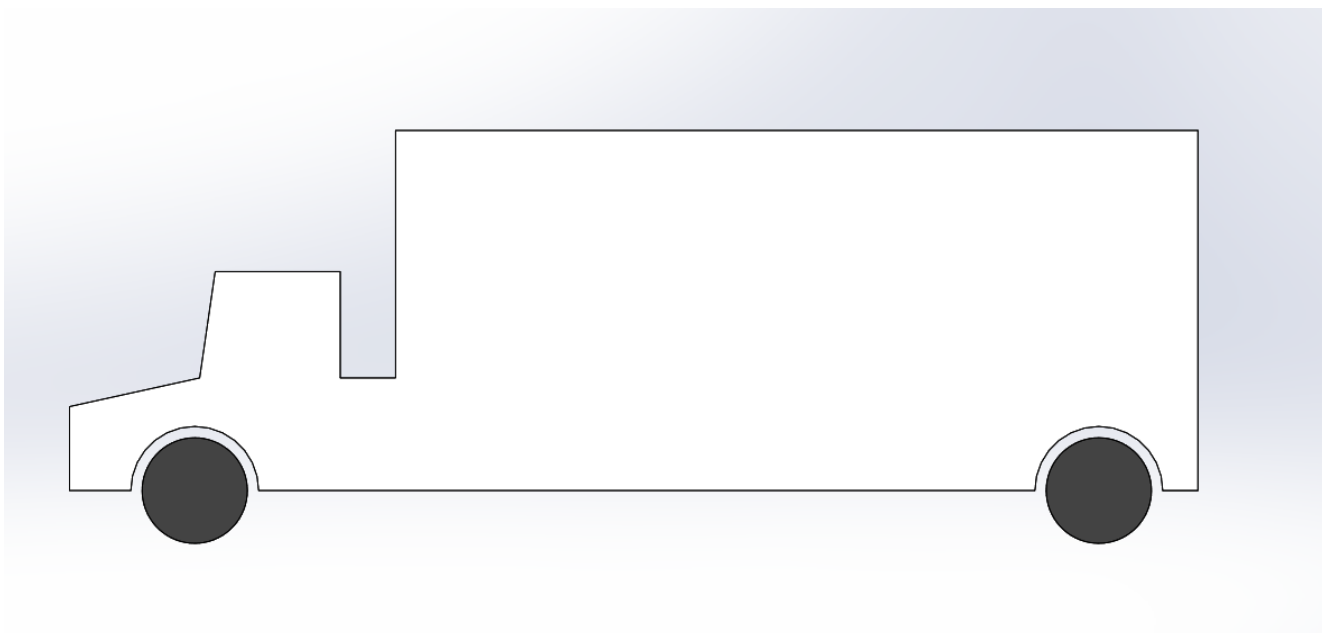
Για την μοντελοποίηση της γεωμετρίας χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Solidworks. Παρατίθενται οι όψεις και οι διαστάσεις του τρισδιάστατου μοντέλου ενός φορτηγού σε κλίμακα 1 : 35 και σε mm στα σχήματα 5.1 έως 5.4.



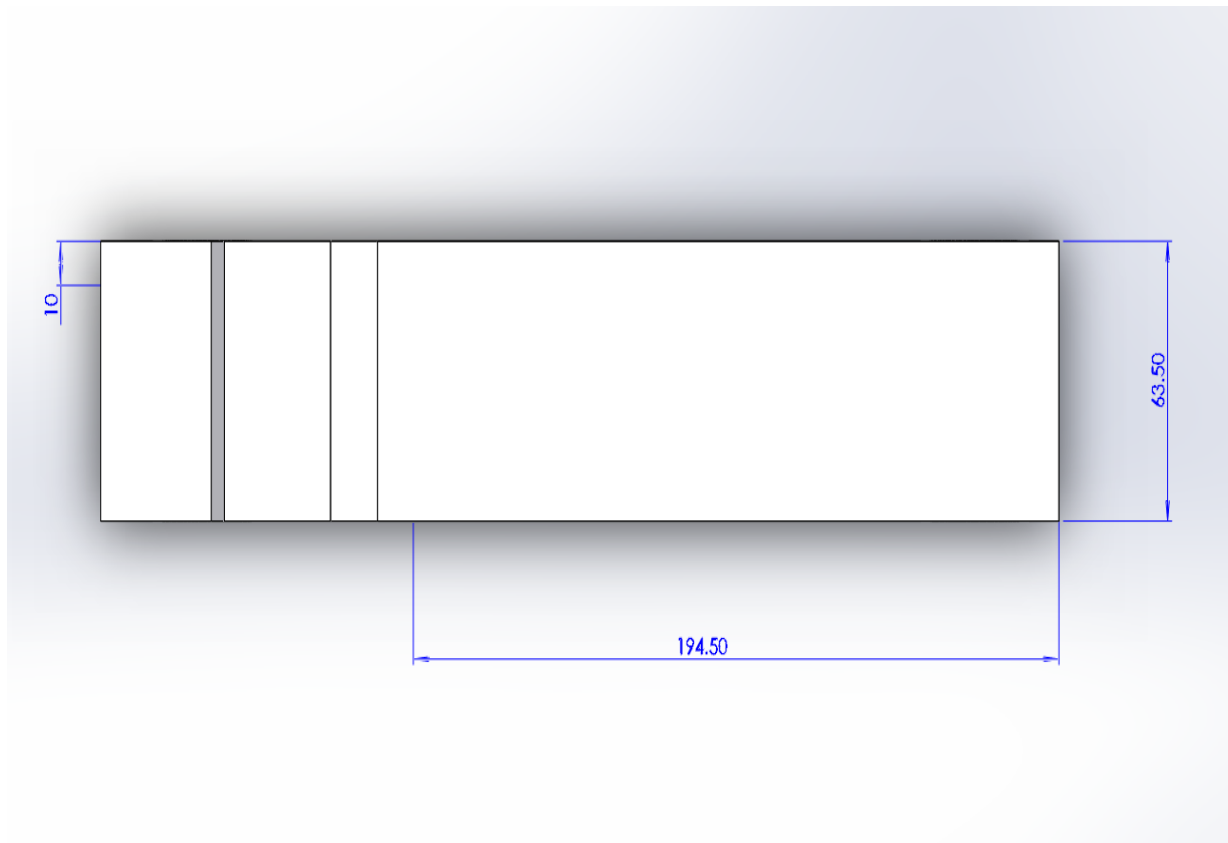
Σχήμα 5.1: Πρόσοψη μοντέλου φορτηγού



Σχήμα 5.2: Πίσω όψη μοντέλου φορτηγού



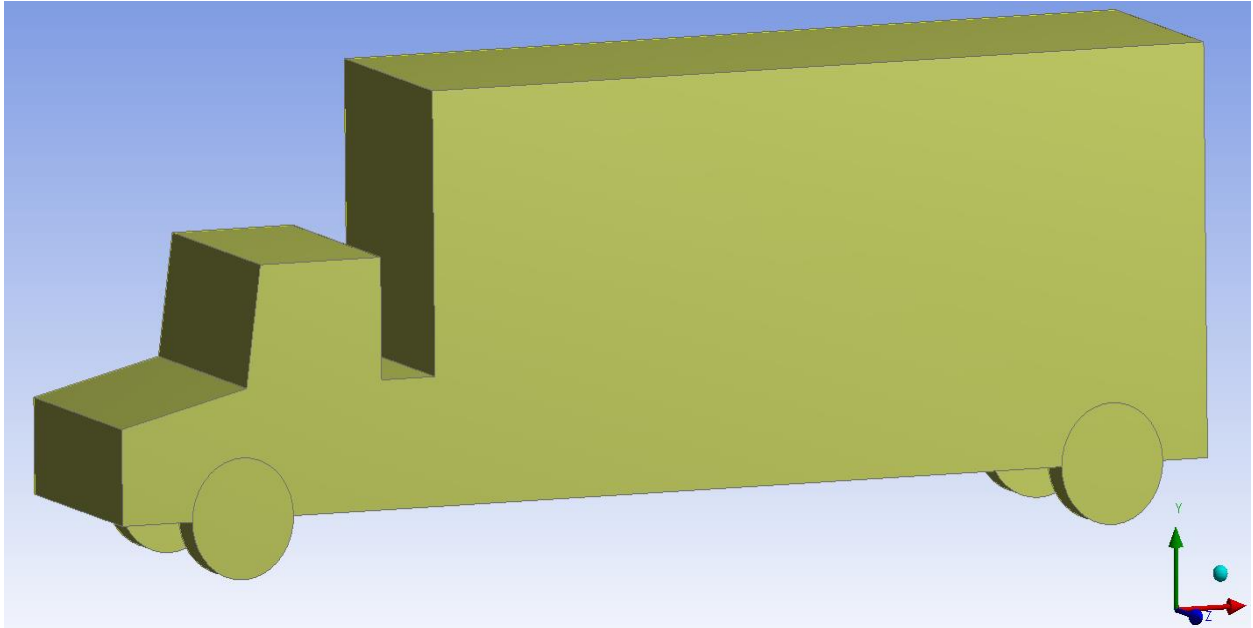
Σχήμα 5.3: Πλάγια όψη μοντέλου φορτηγού



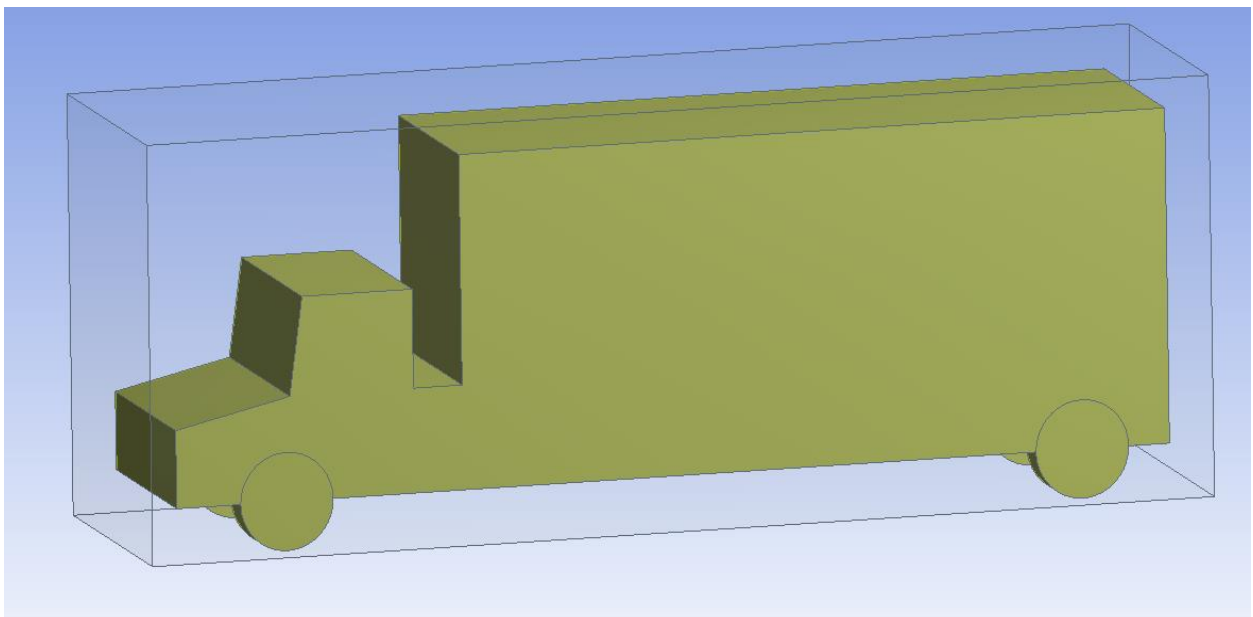
Σχήμα 5.4: Κάτοψη μοντέλου φορτηγού

5.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ

Αρχικά εισάγεται η γεωμετρία του μοντέλου στο DesignModeler του ANSYS (σχήμα 5.5). Για την προσομοίωση του αέρα γύρω από το φορτηγό θα οριοθετηθεί ο όγκος του αέρα που θα συμπεριλαμβάνει το φορτηγό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας μιας περίφραξης (enclosure) με ομοιόμορφη κατανομή του ρευστού (σχήμα 5.6). Για υπολογιστικούς λόγους το μέγεθος της περίφραξης λαμβάνεται να διαφέρει 0.01 m σε σχέση με το αυτοκίνητο πλην του $-y$ που επιλέγεται 0.0001 m διότι παριστάνει το έδαφος. Το μοντέλο τροποποιείται με τα εργαλεία unite, fill και sew του DesignModeler ώστε να είναι συμπαγές και ενιαίο στερεό.



Σχήμα 5.5: Γεωμετρία μοντέλου φορτηγού στο DesignModeler του ANSYS

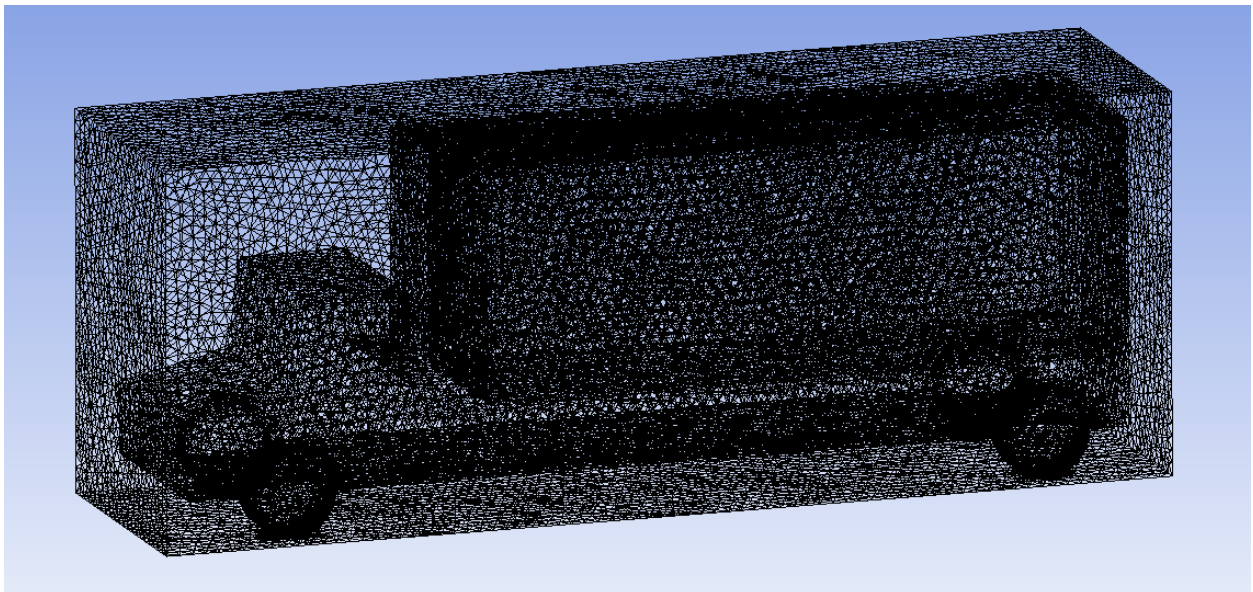


Σχήμα 5.6: Enclosure για το μοντέλο φορτηγού

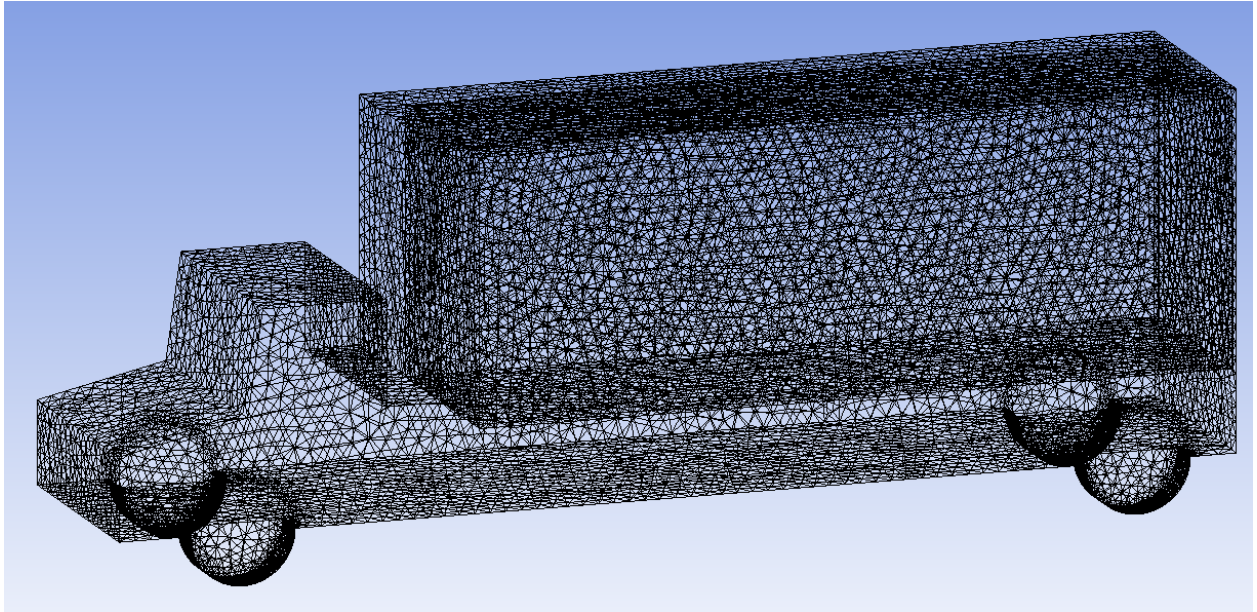
Κατόπιν παράγεται το πλέγμα με το Fluent Meshing του ANSYS. Τα αποτελέσματα του πλέγματος φαίνονται στα σχήματα 5.7 έως 5.9. Οι παράμετροι παραγωγής πλέγματος που ορίζονται με την μέθοδο parallel meshing συνοψίζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: παράμετροι παραγωγής πλέγματος για το μοντέλο του φορτηγού

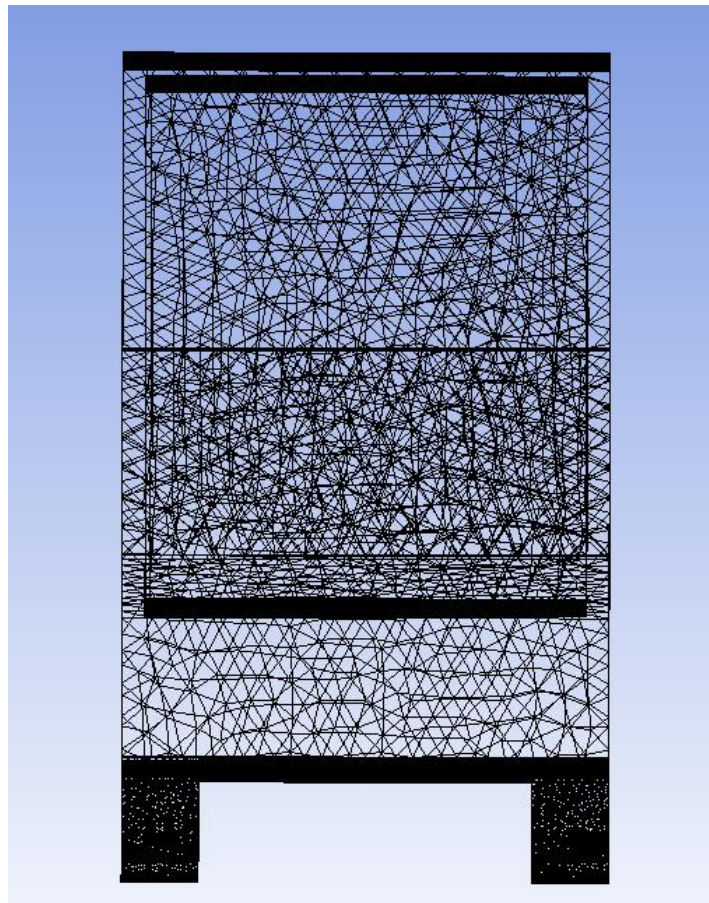
Use Advanced Size Function	On : Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Speed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	4°
Min Size	0.00004 m
Max Size	0.001 m
Max Face Size	0.03898 m
Minimum Edge Length	$5.7705 \cdot 10^{-5}$ m



Σχήμα 5.7: Πλέγμα μοντέλου φορτηγού

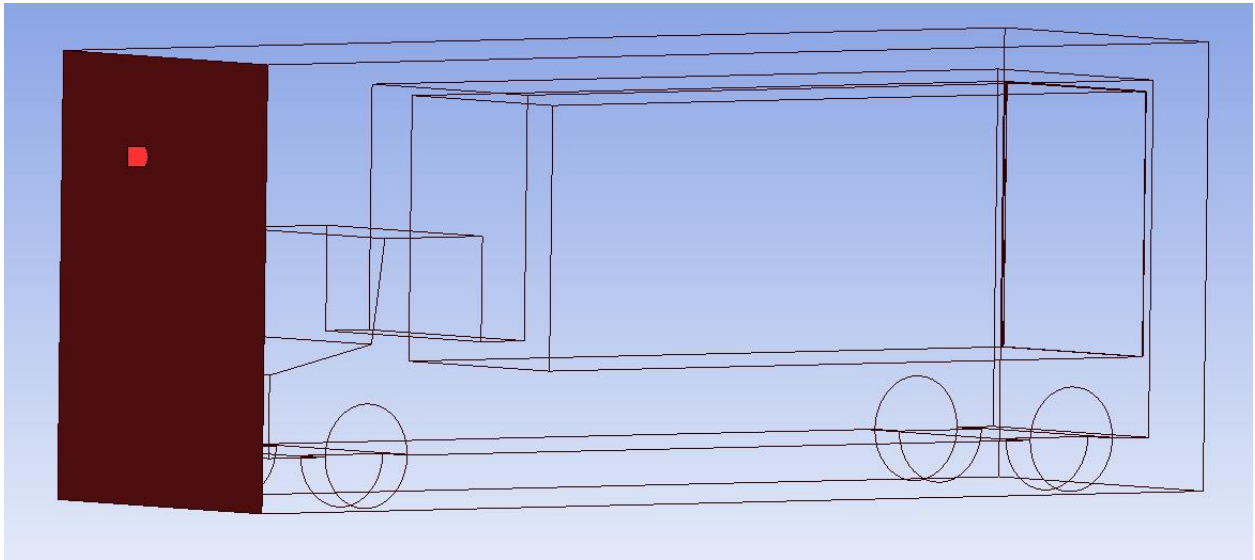


Σχήμα 5.8: Λεπτομέρεια πλέγματος μοντέλου φορτηγού

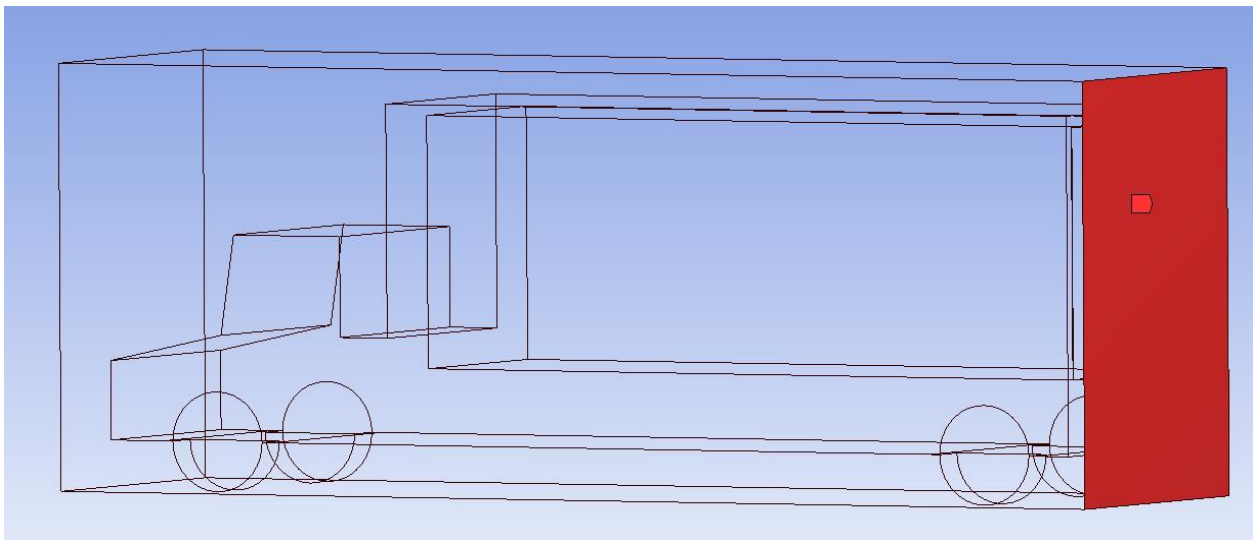


Σχήμα 5.9: Λεπτομέρεια πλέγματος πρόσοψης μοντέλου φορτηγού

Στα σχήματα 5.10 και 5.11 ορίζονται η είσοδος (inlet) και η έξοδος (outlet) στον όγκο του ρευστού.

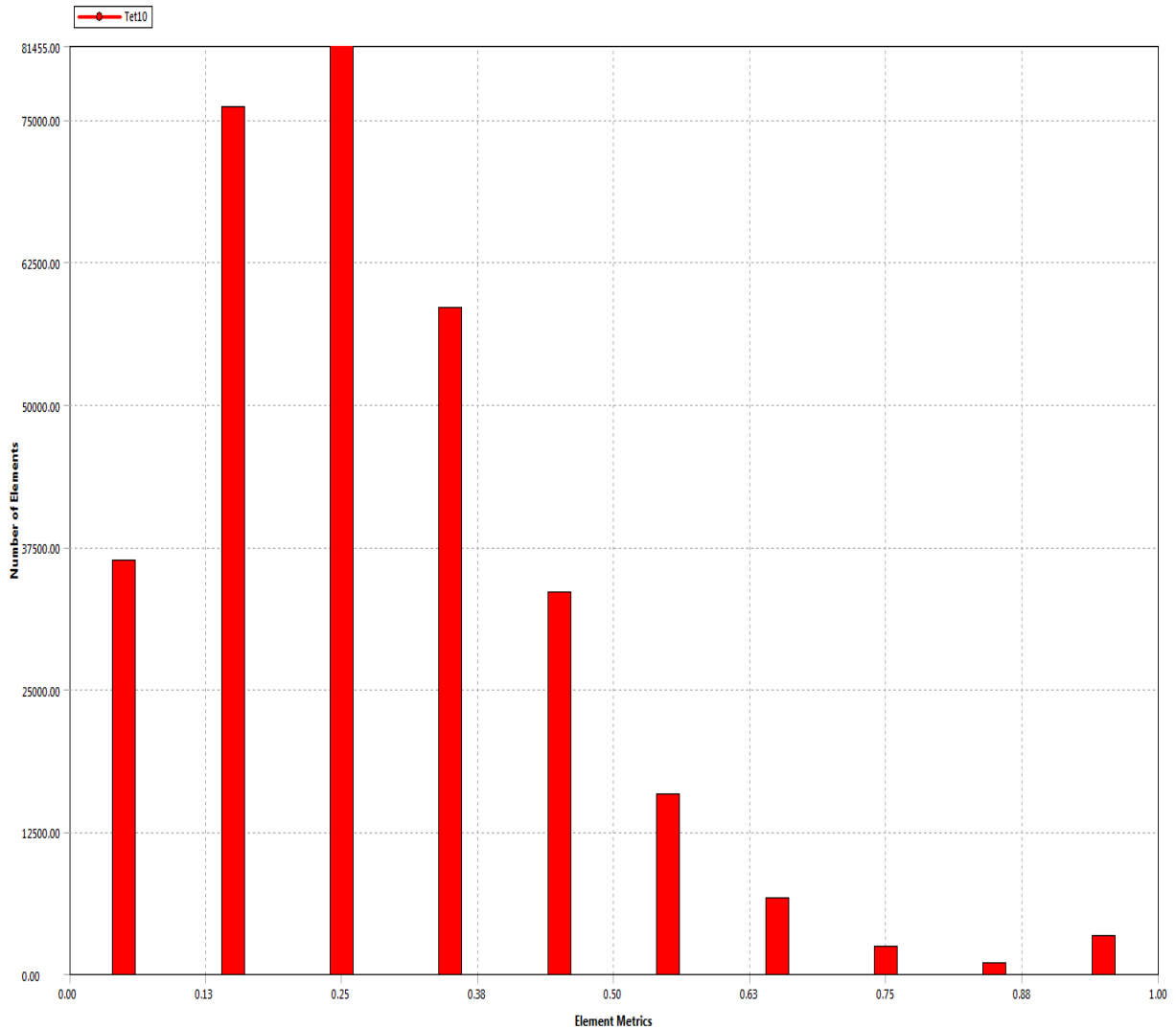


Σχήμα 5.10: Inlet μοντέλου φορτηγού



Σχήμα 5.11: Outlet μοντέλου φορτηγού

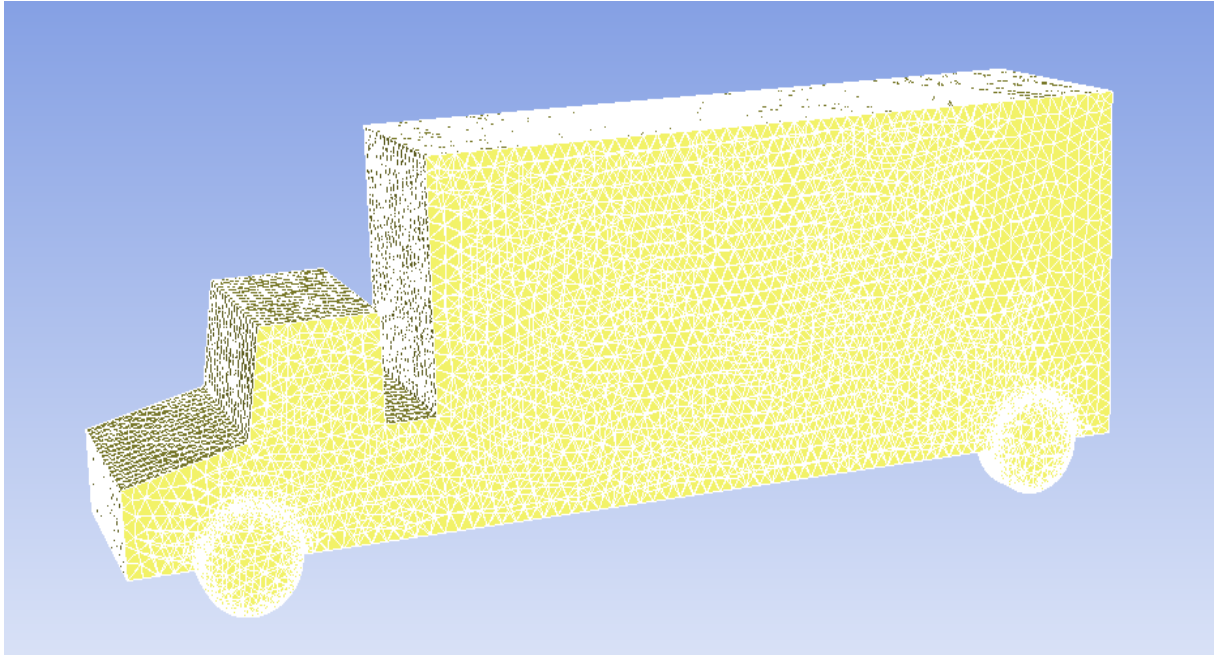
Το πλέγμα αποτελείται από 497414 κόμβους και 314696 κελιά. Ο μέσος δείκτης στρεβλότητας είναι 0.28 με τυπική απόκλιση 0.167. Από το διάγραμμα του σχήματος 5.12 αποδεικνύεται ότι το πλέγμα του μοντέλου αυτοκινήτου είναι υψηλής ποιότητας καθώς το εύρος των δεικτών στρεβλότητας του πλέγματος είναι κατά βάση από 0.05 έως 0.5 και περίπου το 92% των κελιών έχει δείκτη στρεβλότητας από καλό έως εξαιρετικό, ενώ το ποσοστό χαμηλής ποιότητας (δείκτης στρεβλότητας > 0.75) θεωρείται αμελητέο. Το πλέγμα αποτελείται κατά αποκλειστικότητα από τετράεδρα.



Σχήμα 5.12: Δείκτες στρεβλότητας και είδη κελιών πλέγματος φορτηγού

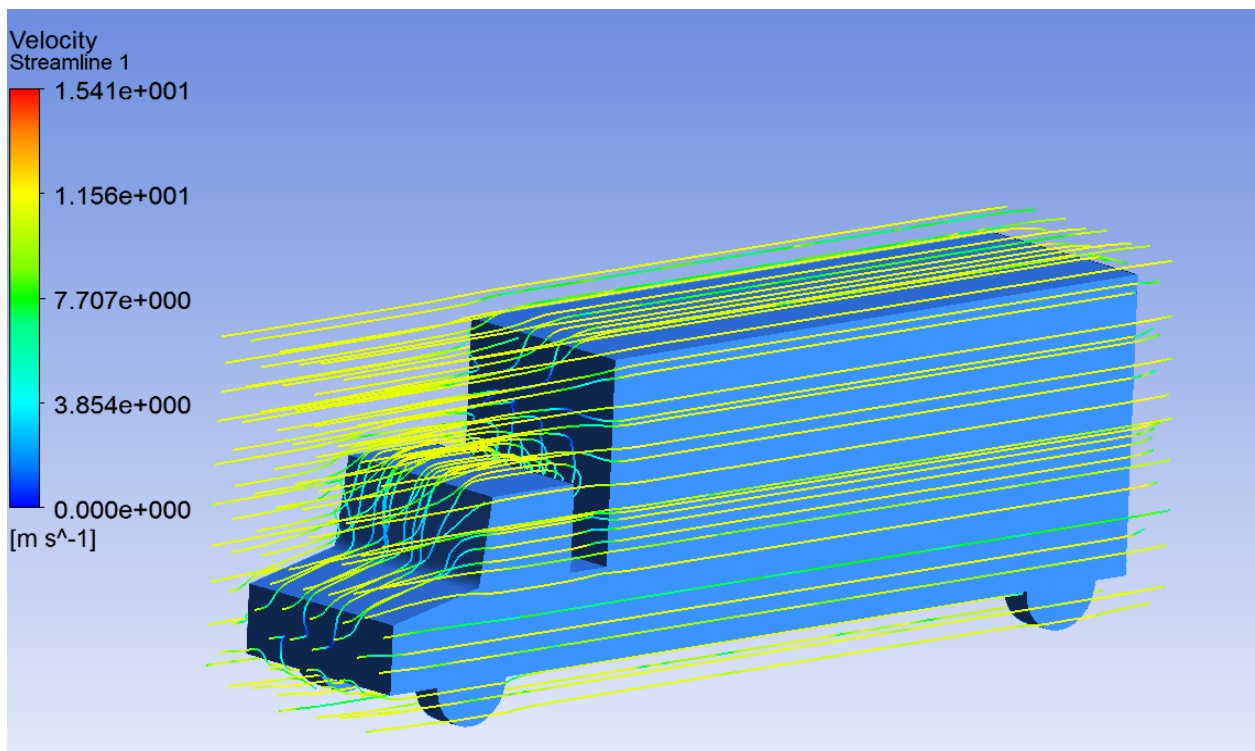
5.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΟΡΤΗΓΟΥ

Η αεροδυναμική μελέτη του φορτηγού γίνεται για διάφορες ταχύτητες στο εύρος από 40 – 120 km / h ανά 10 km / h. Τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στα σχήματα 5.14 – 5.40. Εισάγεται το πλέγμα στο ANSYS FLUENT (σχήμα 5.13) και επιλέγεται ο density - based solver, ενώ οι παράμετροι των cell zone conditions, των boundary conditions και του Solution ορίζονται όμοια με την περίπτωση της μελέτης του αυτοκινήτου και του λεωφορείου.

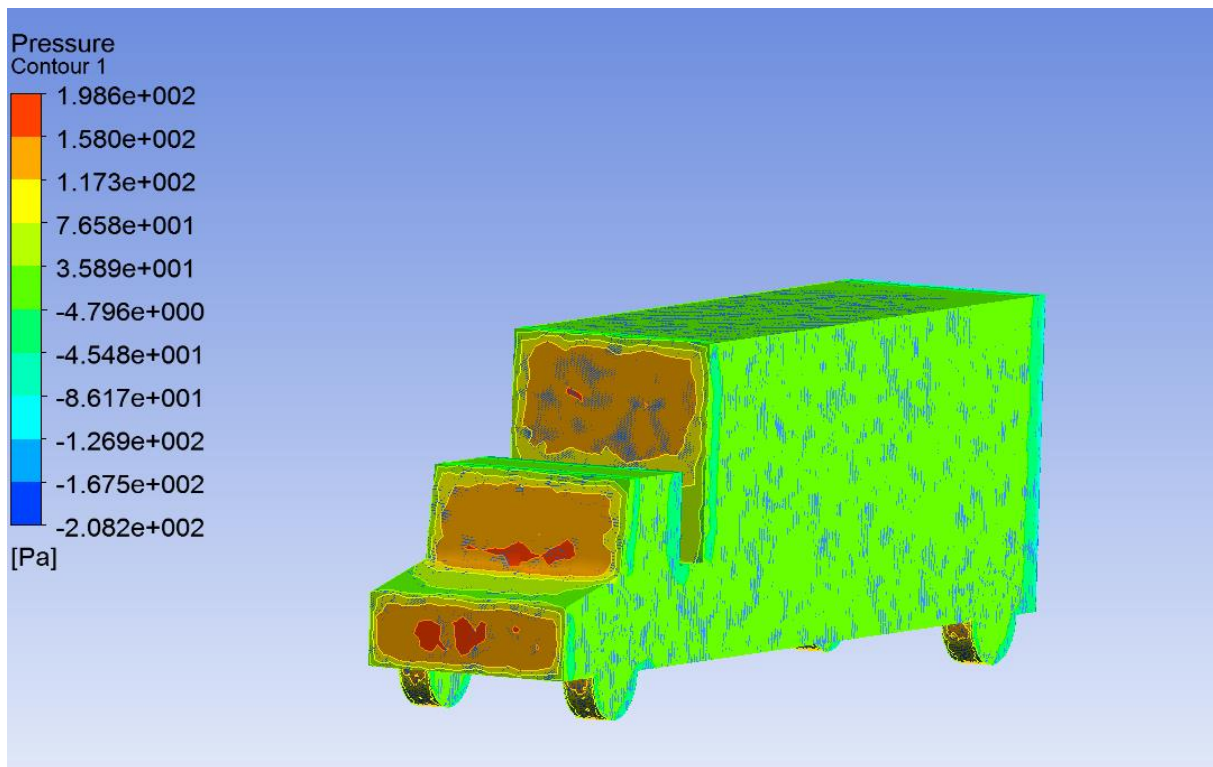


Σχήμα 5.13: Πλέγμα μοντέλου φορτηγού στο ANSYS FLUENT

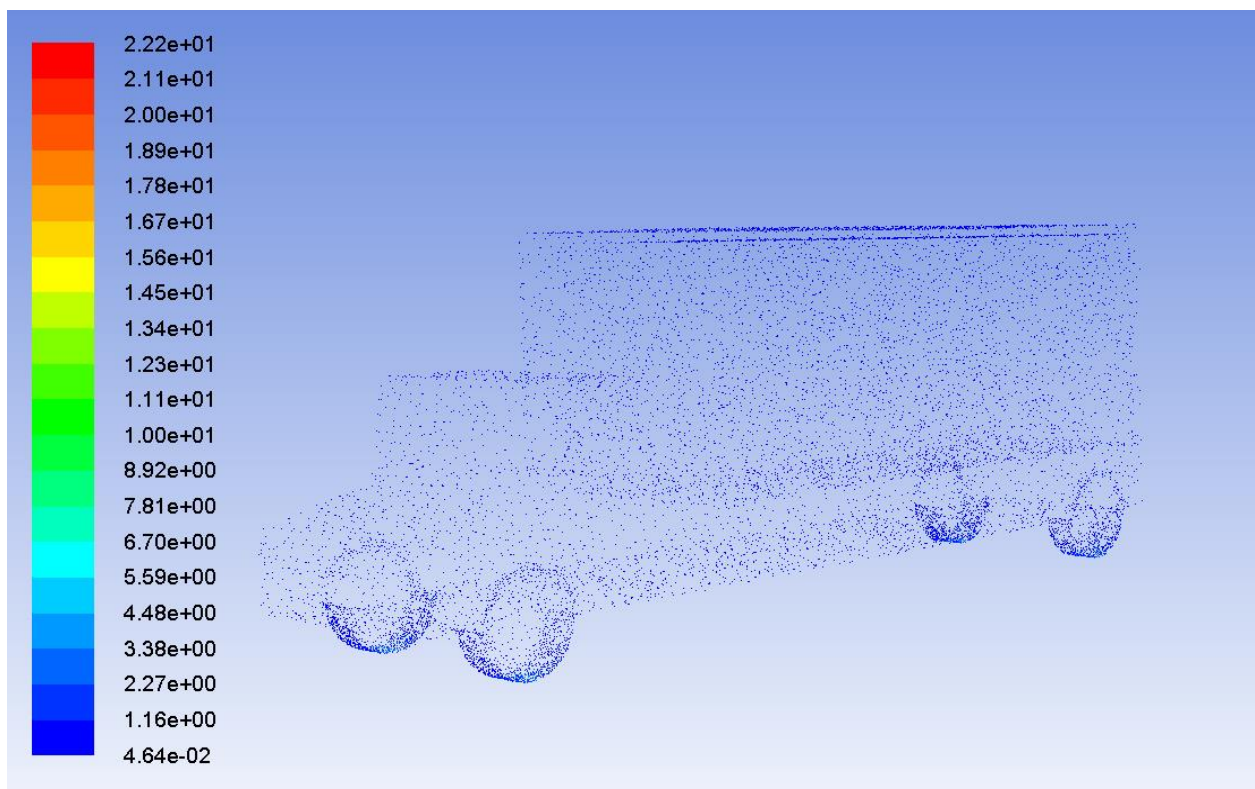
Για ταχύτητα αέρα 40 km / h τα αποτελέσματα της μελέτης διακρίνονται στα σχήματα 5.14, 5.15 και 5.16.



Σχήμα 5.14: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο φορτηγού



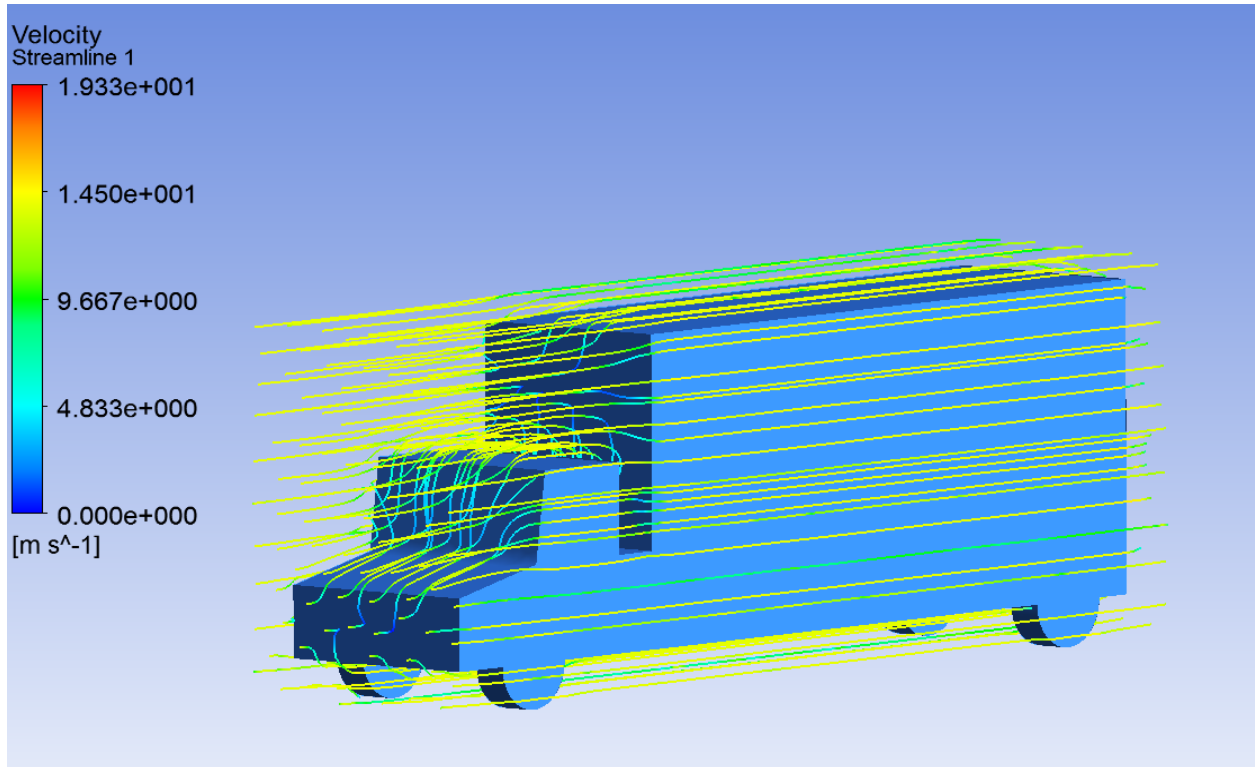
Σχήμα 5.15: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο φορτηγού



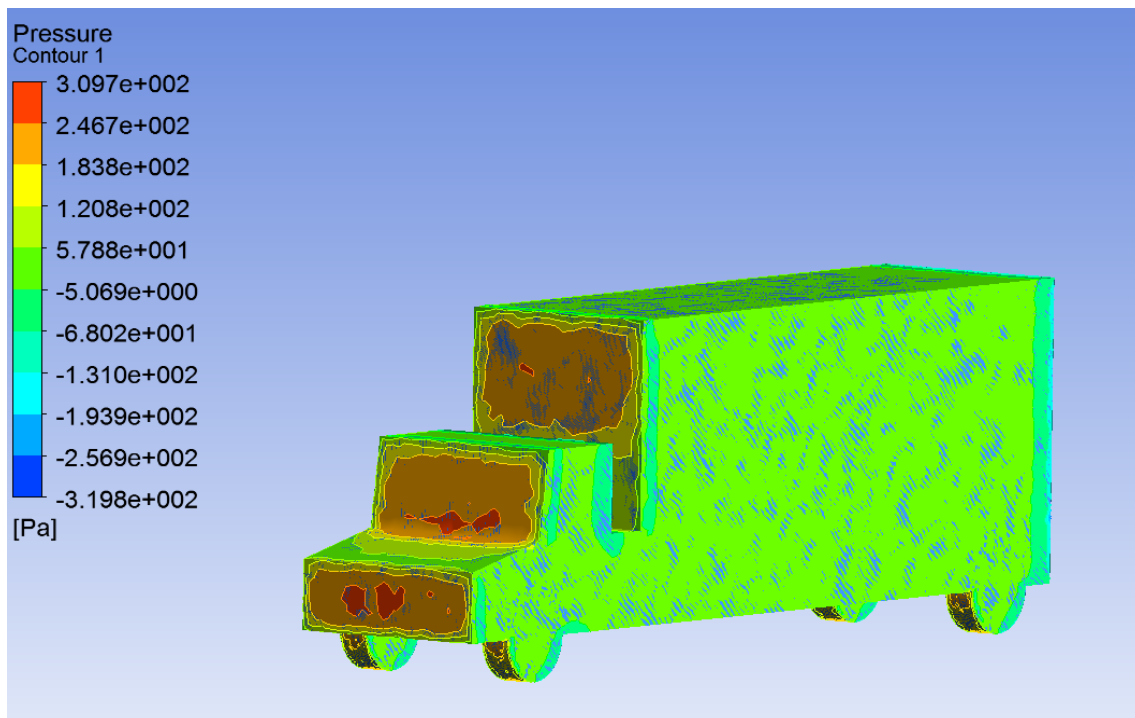
Σχήμα 5.16: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 40 km / h για το μοντέλο φορτηγού

Ο συντελεστής lift και drag για την συγκεκριμένη ταχύτητα είναι 0.11472 και 0.46054 αντίστοιχα.

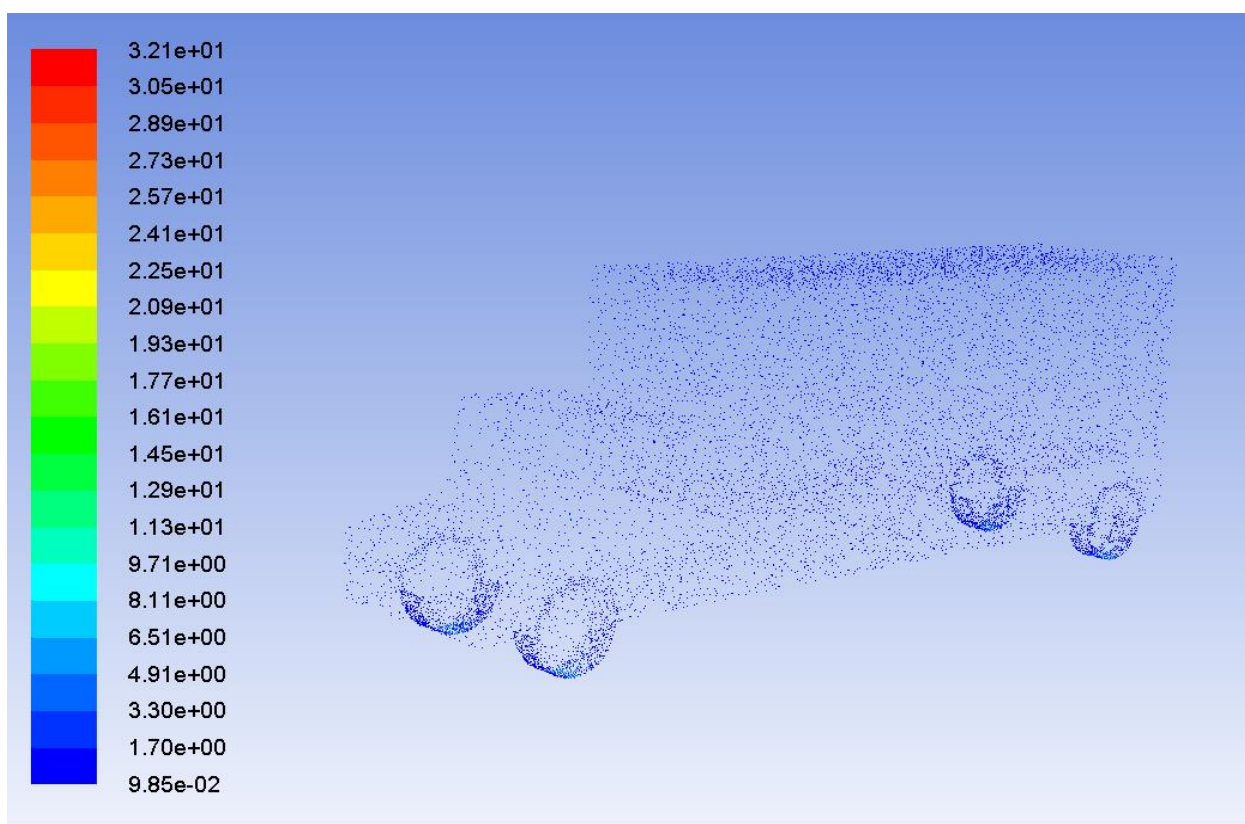
Για ταχύτητα αέρα 50 km / h δημιουργήθηκαν τα σχήματα 5.17, 5.18, 5.19.



Σχήμα 5.17: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο φορτηγού

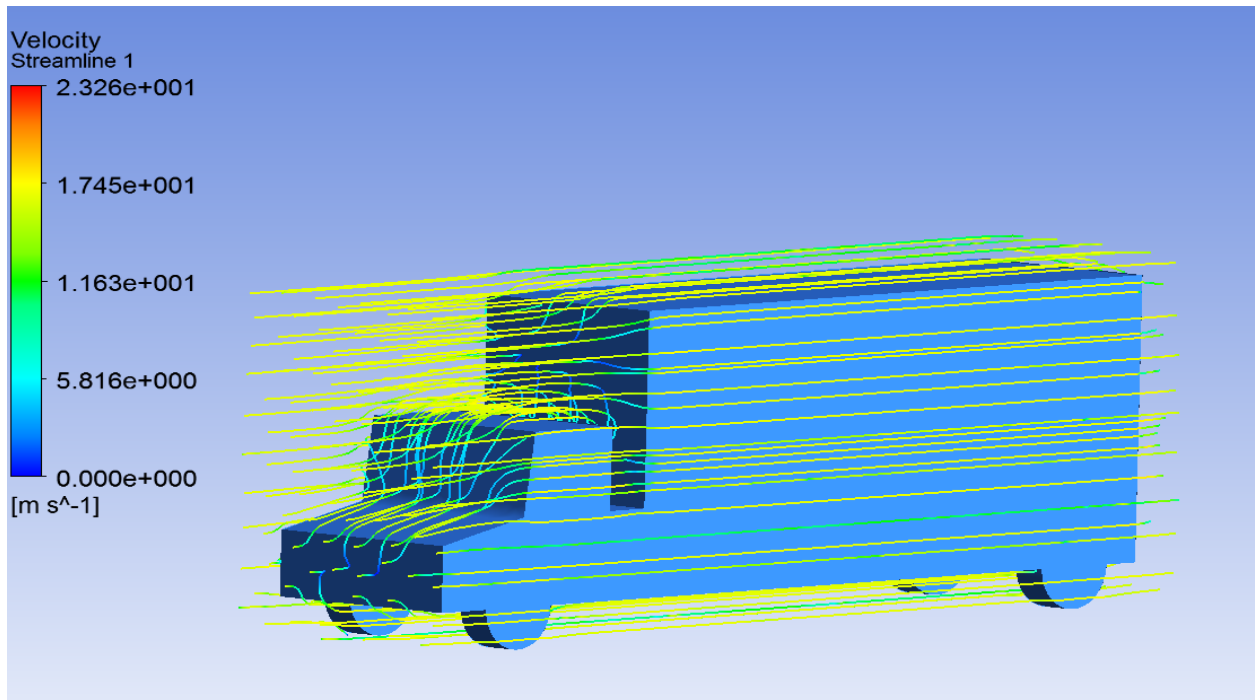


Σχήμα 5.18: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο φορτηγού

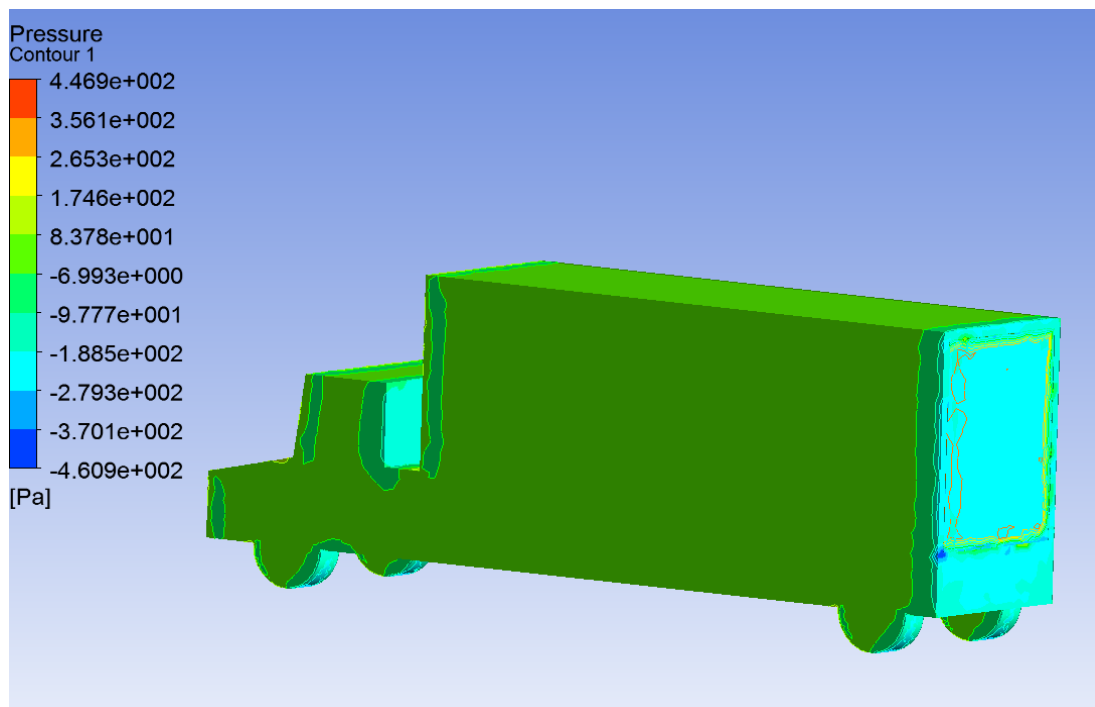


Σχήμα 5.19: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 50 km / h για το μοντέλο φορτηγού

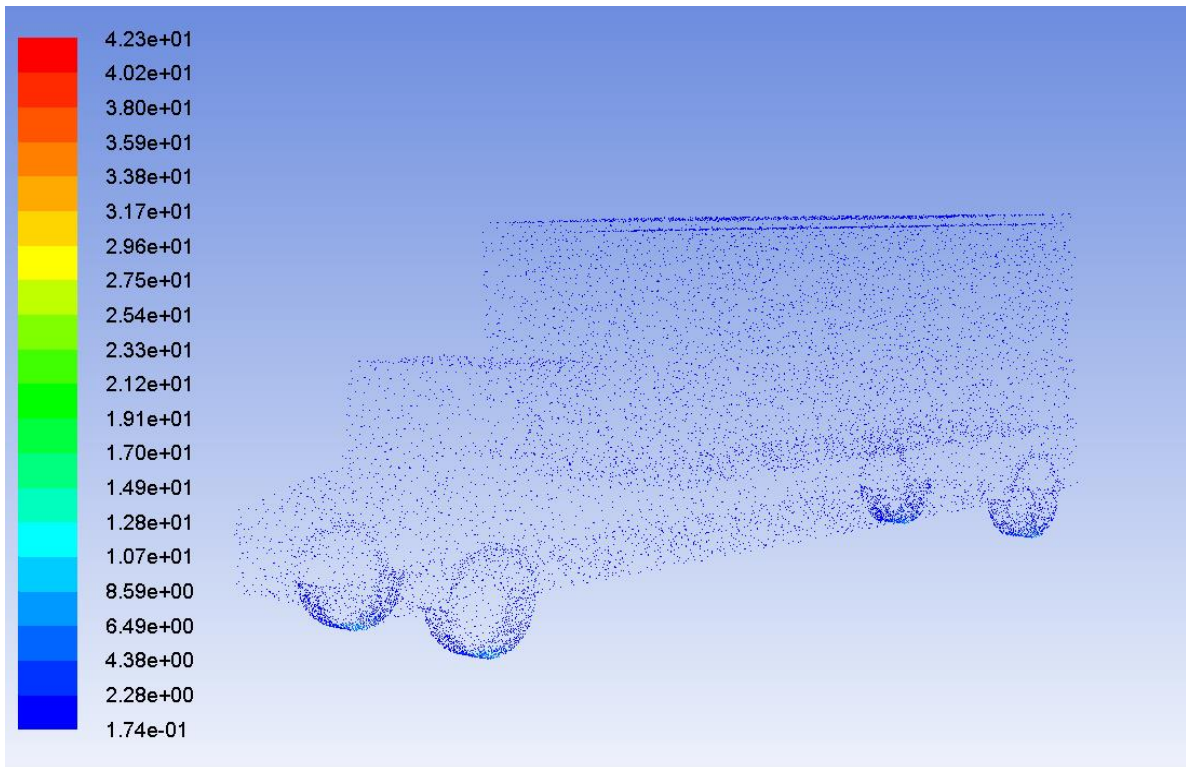
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.18014$ και $c_d = 0.68237$.
Για ταχύτητα αέρα 60 km / h βλέπουμε τα σχήματα 5.20, 5.21 και 5.22.



Σχήμα 5.20: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο φορτηγού



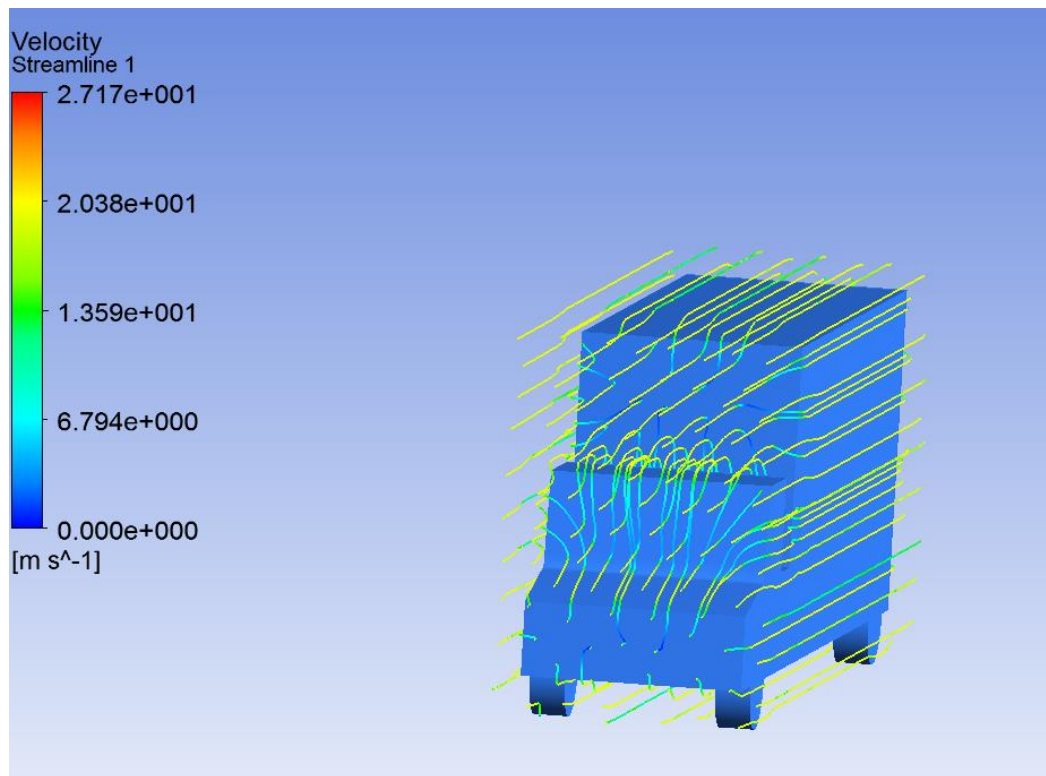
Σχήμα 5.21: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο φορτηγού



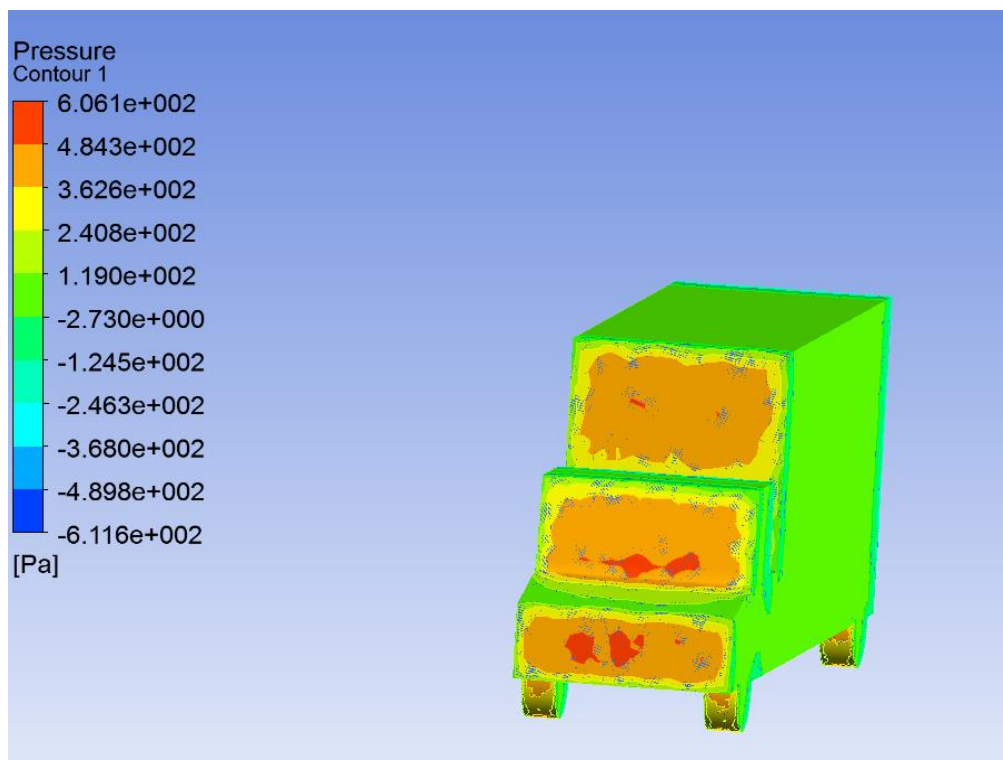
Σχήμα 5.22: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 60 km / h για το μοντέλο φορτηγού

Ο συντελεστής lift και drag για ταχύτητα αέρα 60 km / h είναι αντίστοιχα $c_l = 0.23758$ και $c_d = 1.17140$.

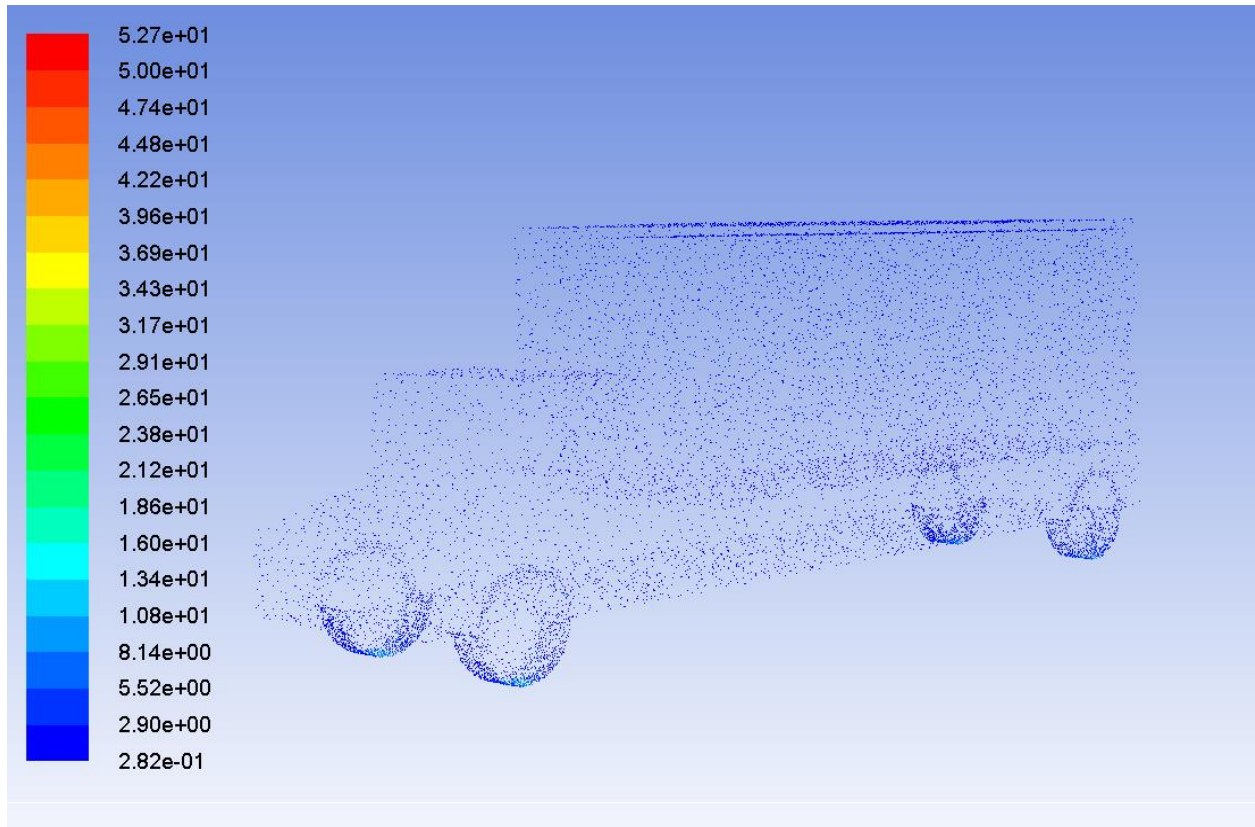
Για ταχύτητα αέρα 70 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.23, 5.24 και 5.25.



Σχήμα 5.23: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο φορτηγού



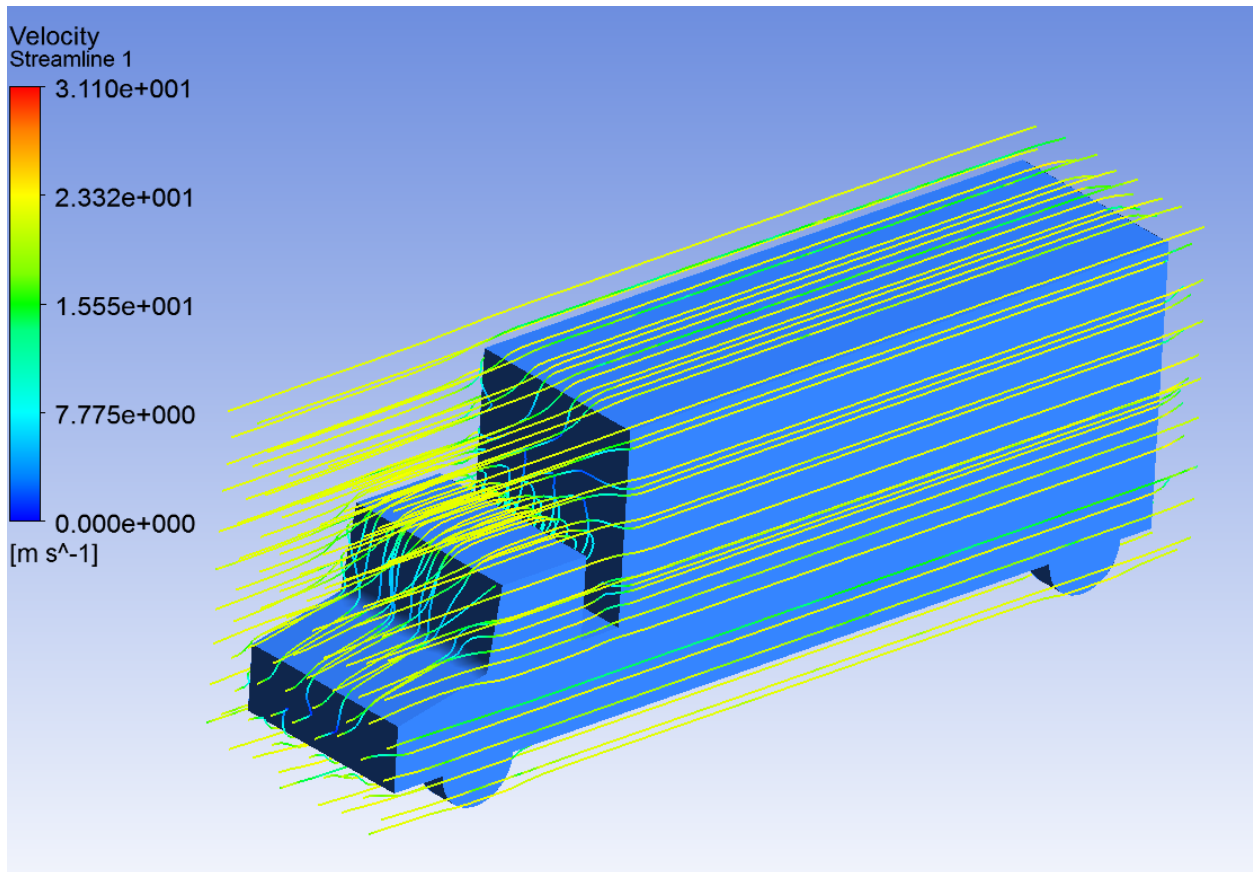
Σχήμα 5.24: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο φορτηγού



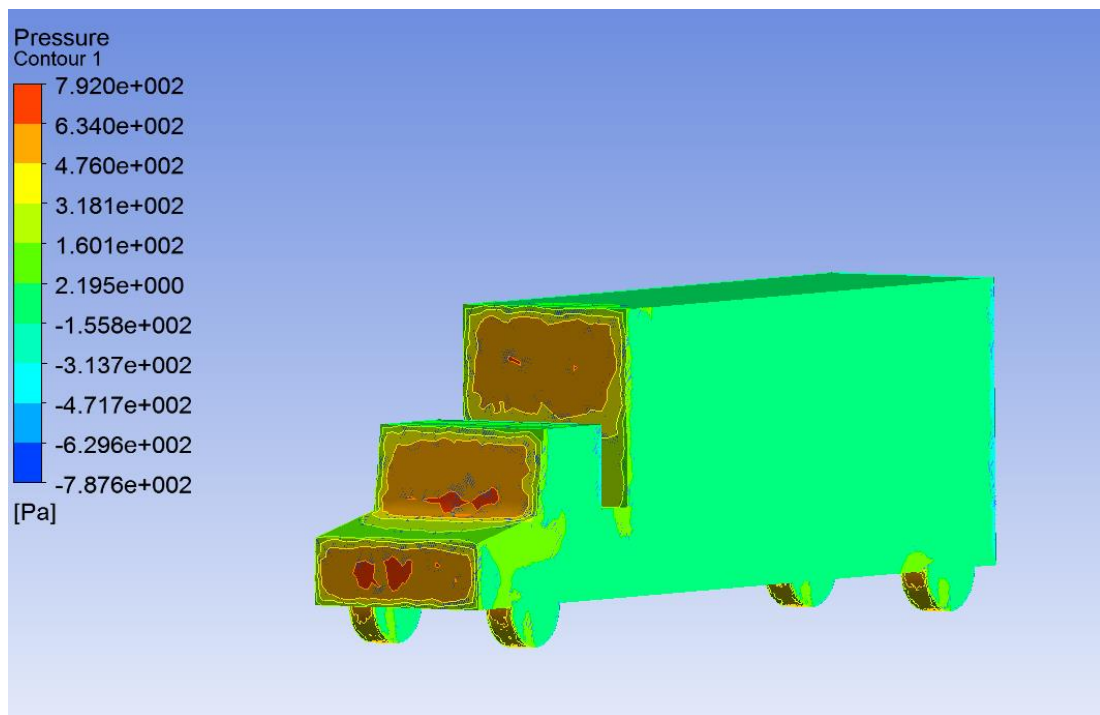
Σχήμα 5.25: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 70 km / h για το μοντέλο φορτηγού

Ο συντελεστής lift και drag για ταχύτητα αέρα 70 km / h είναι αντίστοιχα $c_l = 0.34858$ και $c_d = 1.66195$.

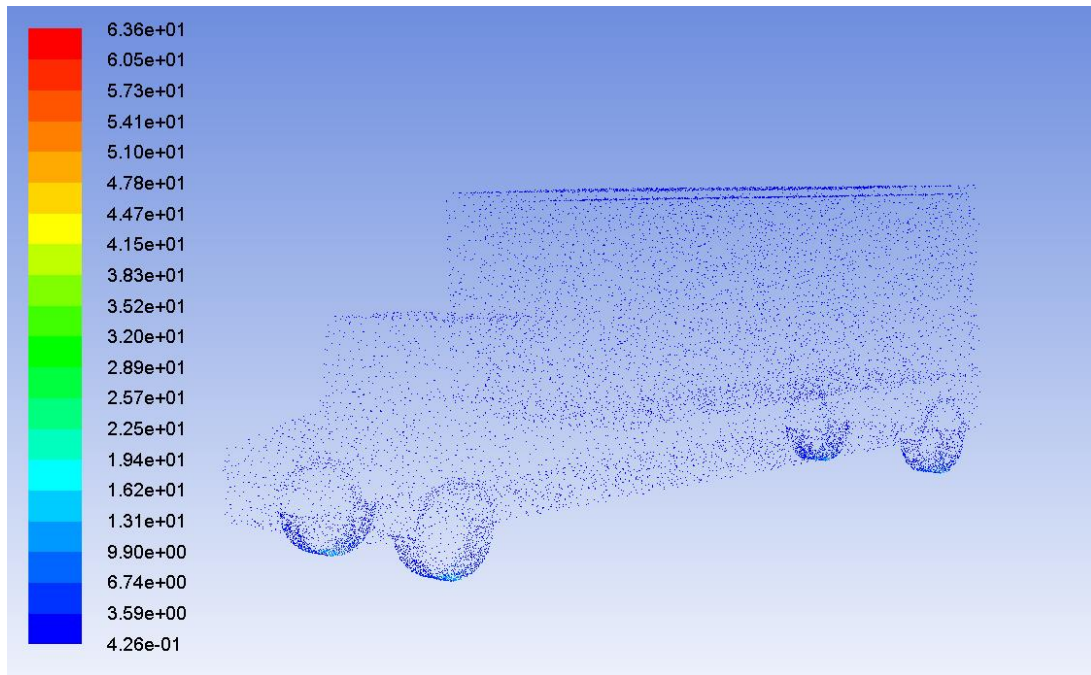
Για ταχύτητα αέρα 80 km / h βλέπουμε τα σχήματα 5.26, 5.27, 5.28.



Σχήμα 5.26: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο φορτηγού



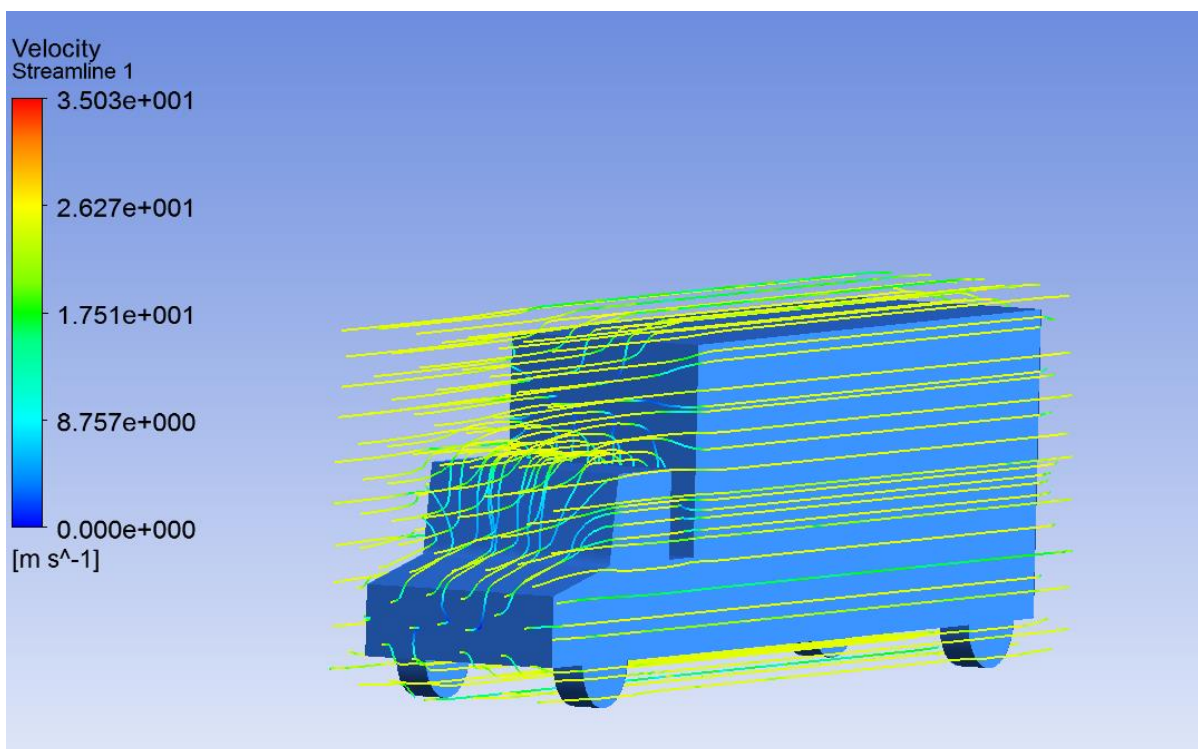
Σχήμα 5.27: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο φορτηγού



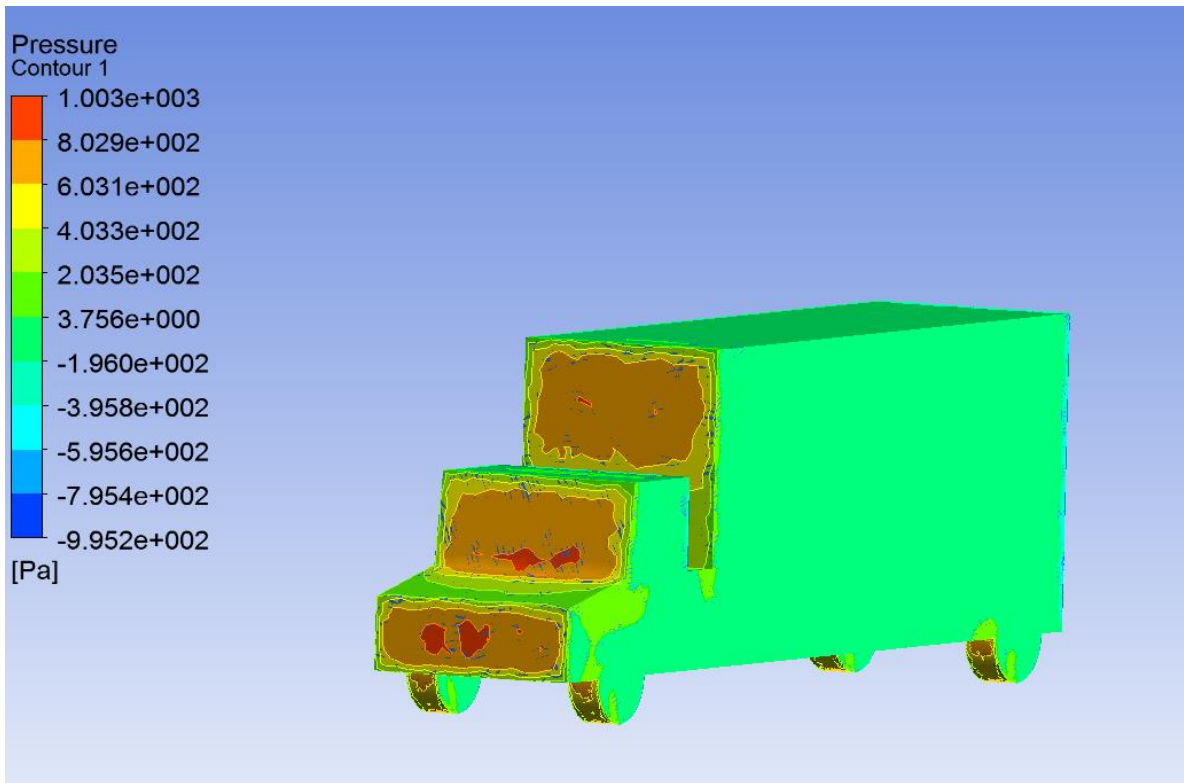
Σχήμα 5.28: Περίγραμμα διανυσμάτων κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 80 km / h για το μοντέλο φορτηγού

Ο συντελεστής lift και drag για ταχύτητα αέρα 80 km / h είναι αντίστοιχα $c_l = 0.45568$ και $c_d = 1.90932$.

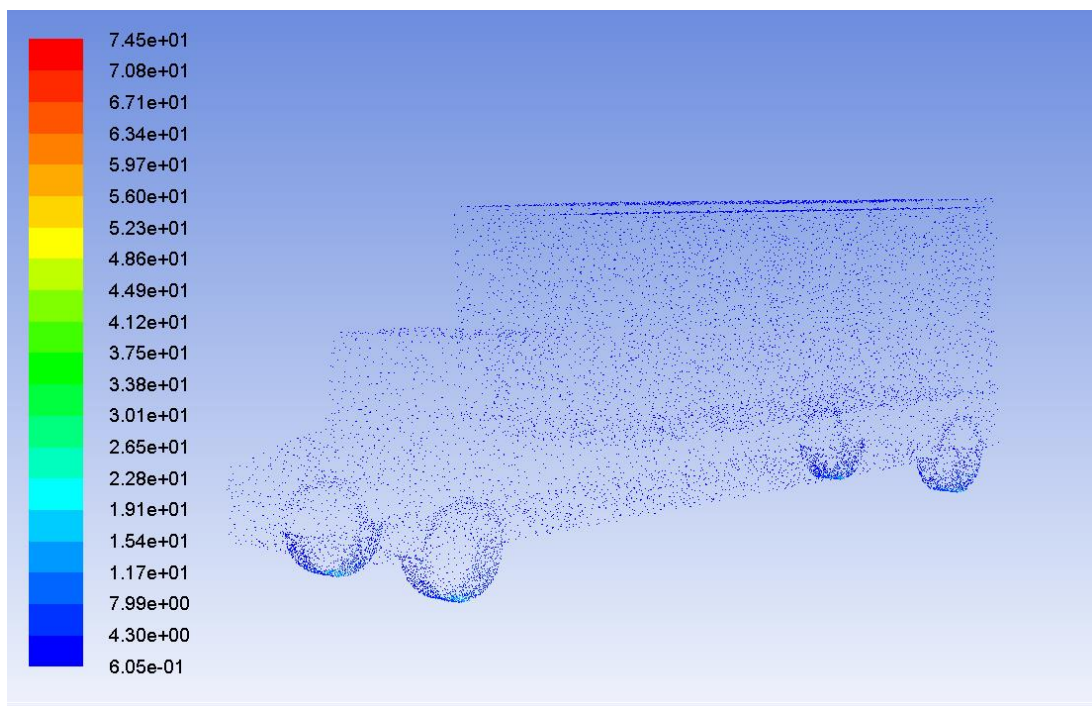
Για ταχύτητα αέρα 90 km / h διακρίνουμε τα σχήματα 5.29, 5.30 και 5.31.



Σχήμα 5.29: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο φορτηγού

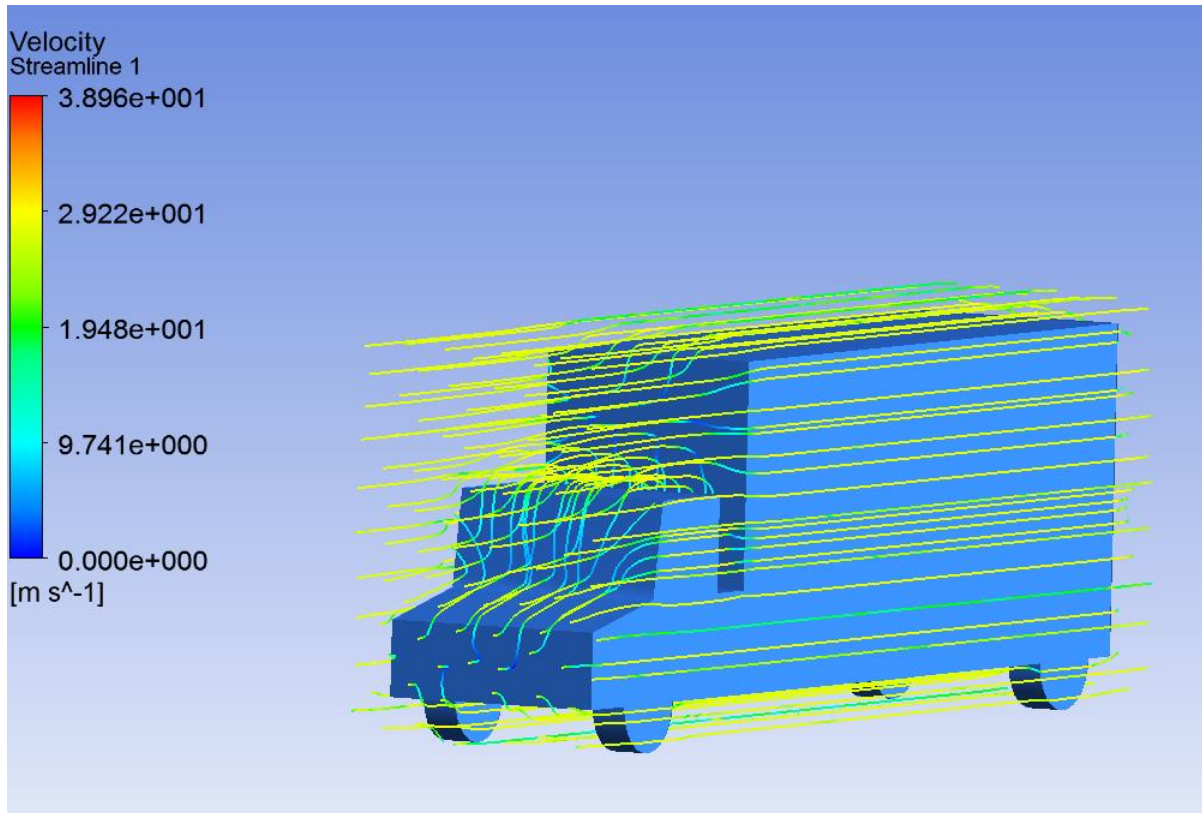


Σχήμα 5.30: Περίγραμμα ολικής πίεσης για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο φορτηγού

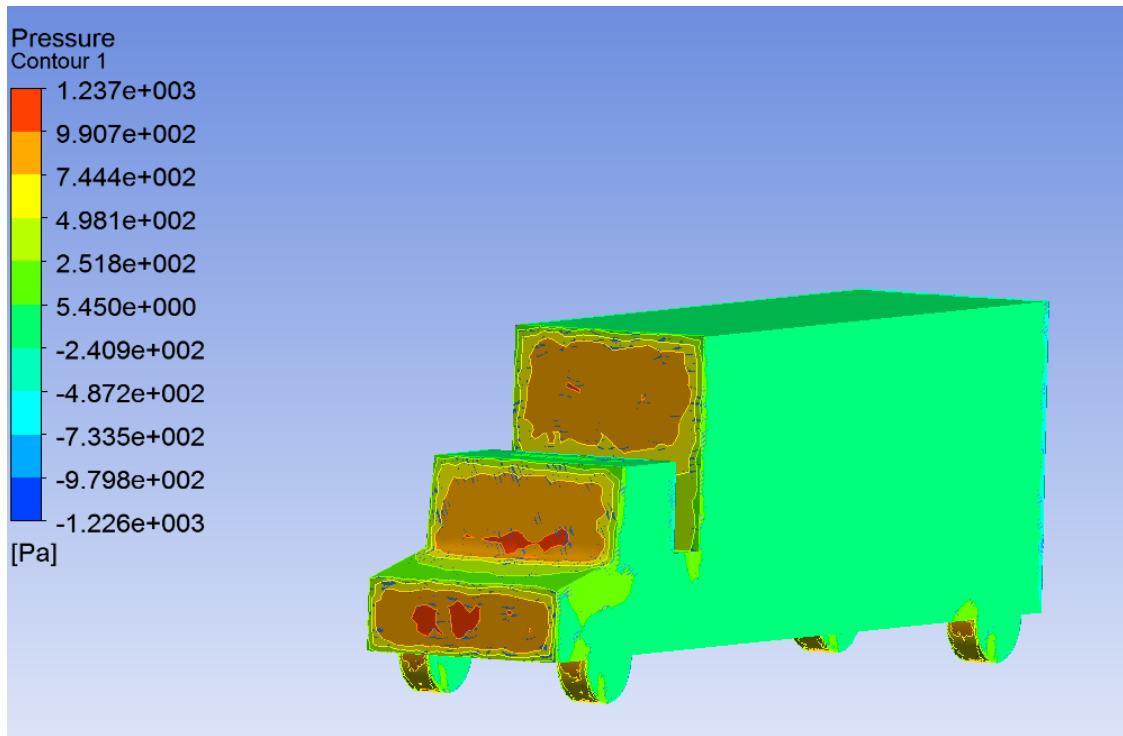


Σχήμα 5.31: Περίγραμμα κινητικής ενέργειας τύρβης, για ταχύτητα αέρα 90 km / h για το μοντέλο φορτηγού

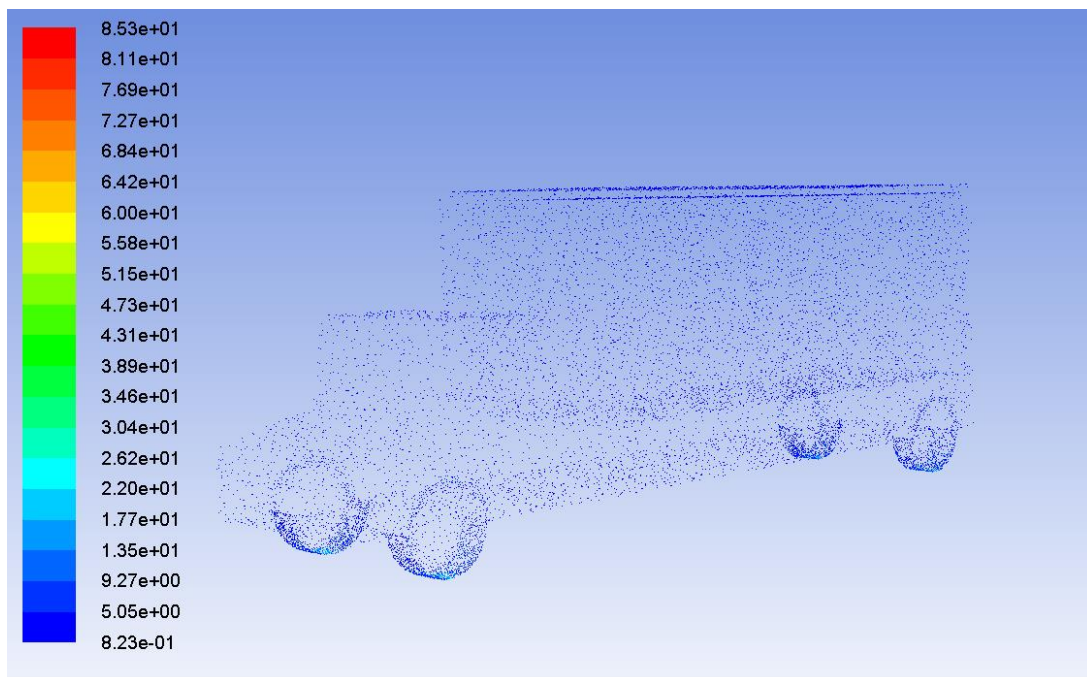
Ο συντελεστής lift και drag για ταχύτητα αέρα 90 km / h είναι αντίστοιχα $c_l = 0.57968$ και $c_d = 2.32071$.
Για ταχύτητα αέρα 100 km / h δημιουργήθηκαν τα σχήματα 5.32, 5.33 και 5.34.



Σχήμα 5.32: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο φορτηγού

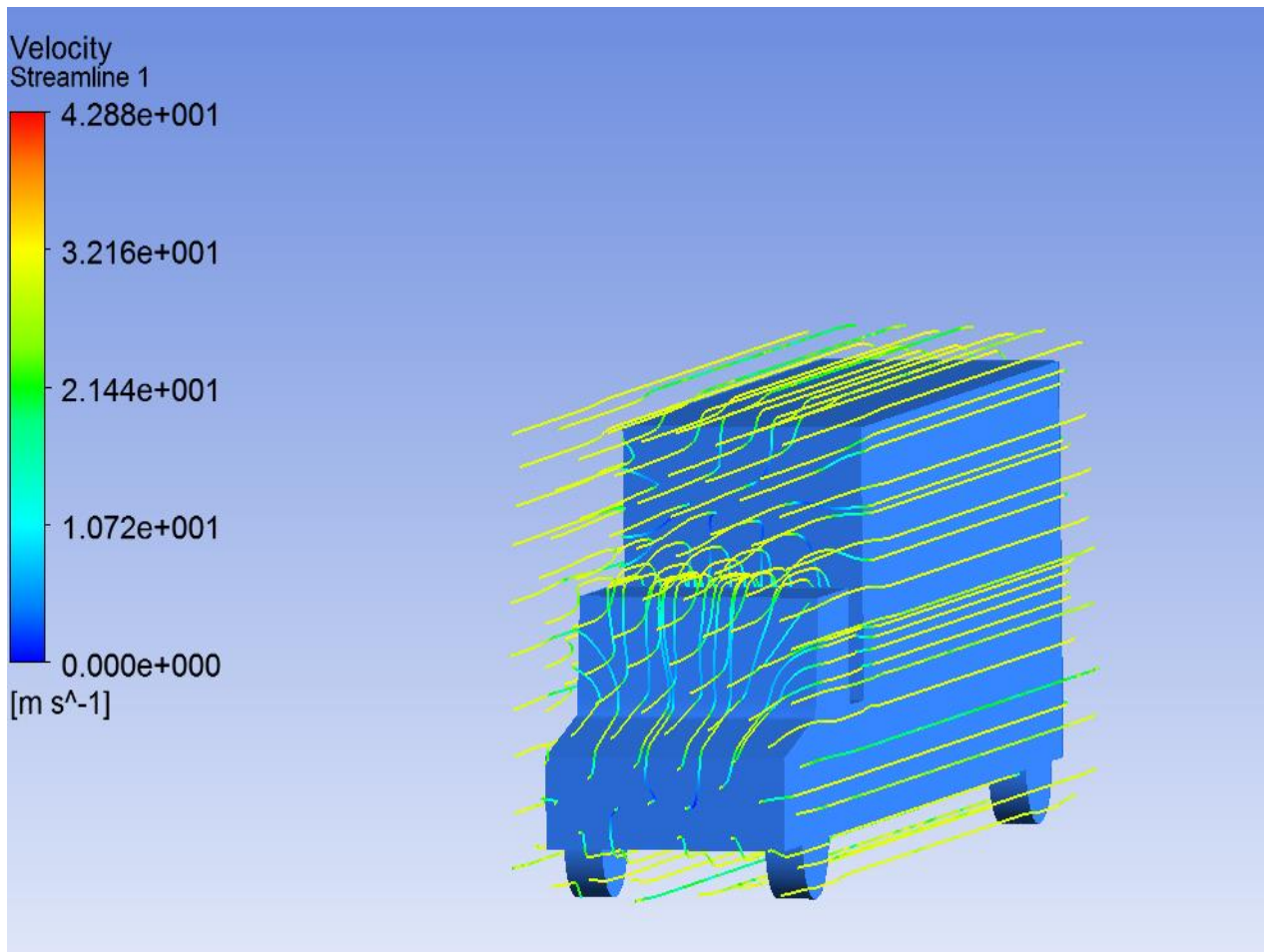


Σχήμα 5.33: Περίγραμμα ολικής πίεσης, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο φορτηγού

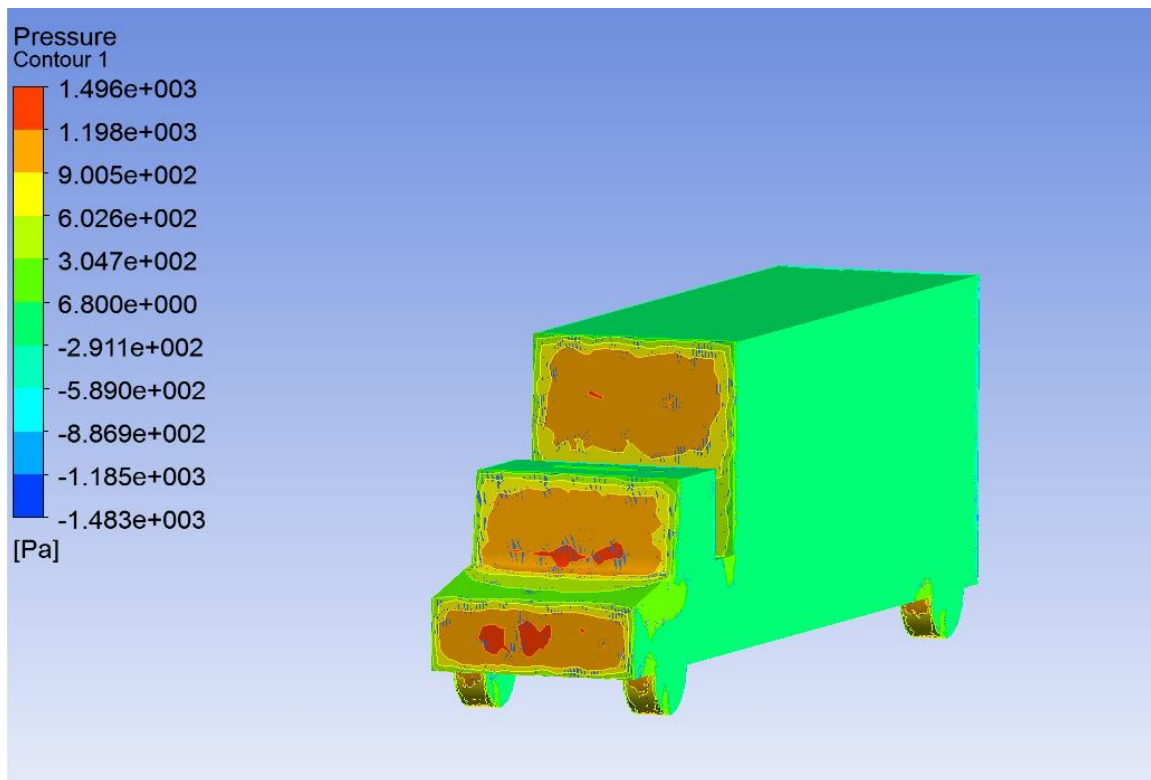


Σχήμα 5.34: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 100 km / h για το μοντέλο φορτηγού

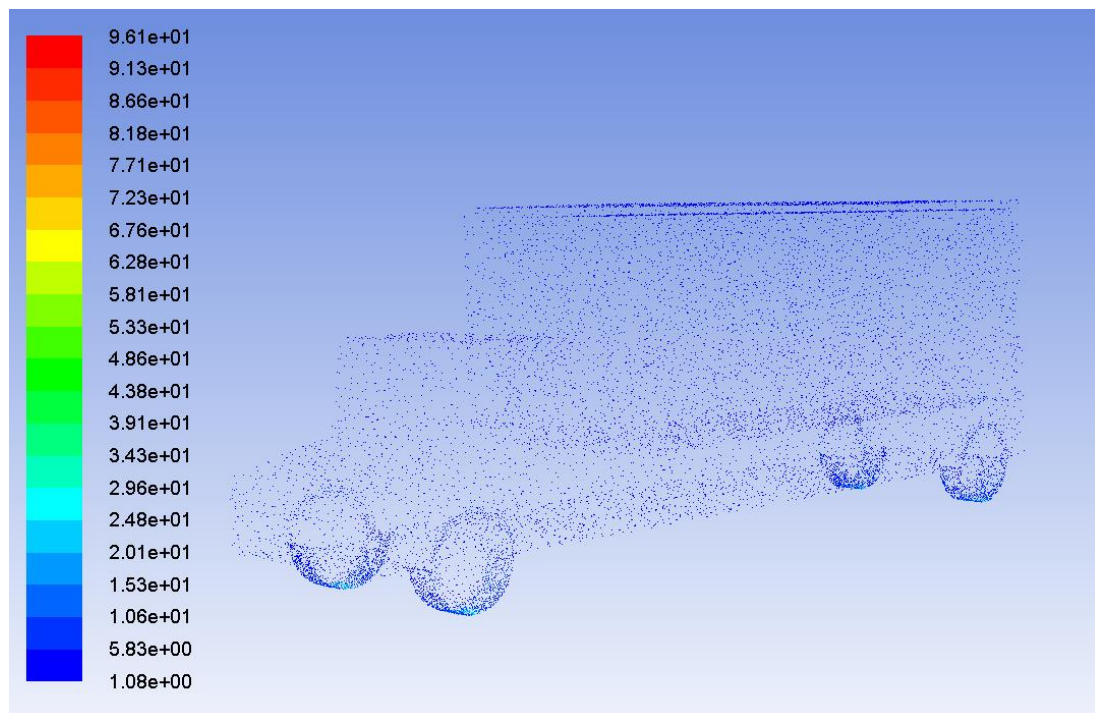
Ο συντελεστής lift και drag για την ταχύτητα των 100 km / h είναι αντίστοιχα $c_l = 0.7153$ και $c_d = 2.77152$.
Για ταχύτητα αέρα 110 km / h βλέπουμε τα σχήματα 5.35, 5.36 και 5.37.



Σχήμα 5.35: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο φορτηγού

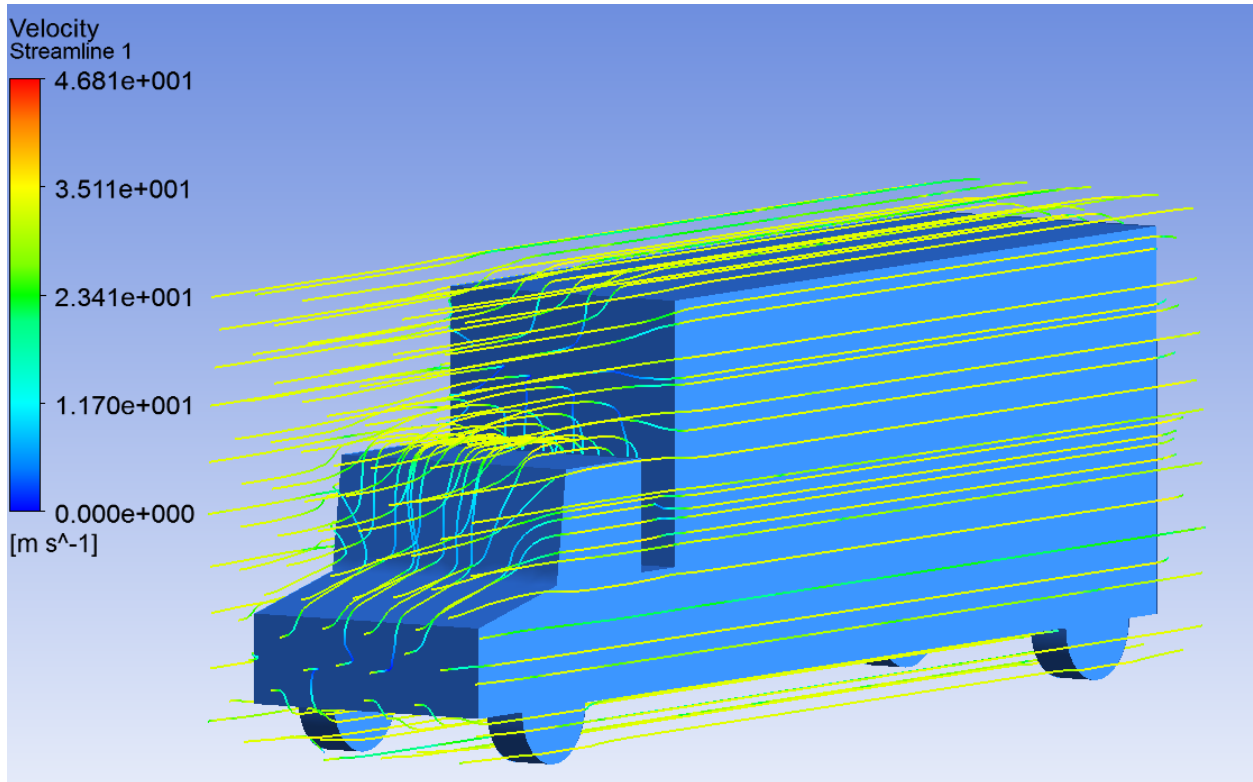


Σχήμα 5.36: Περίγραμμα ολικής πίεσης για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο φορτηγού

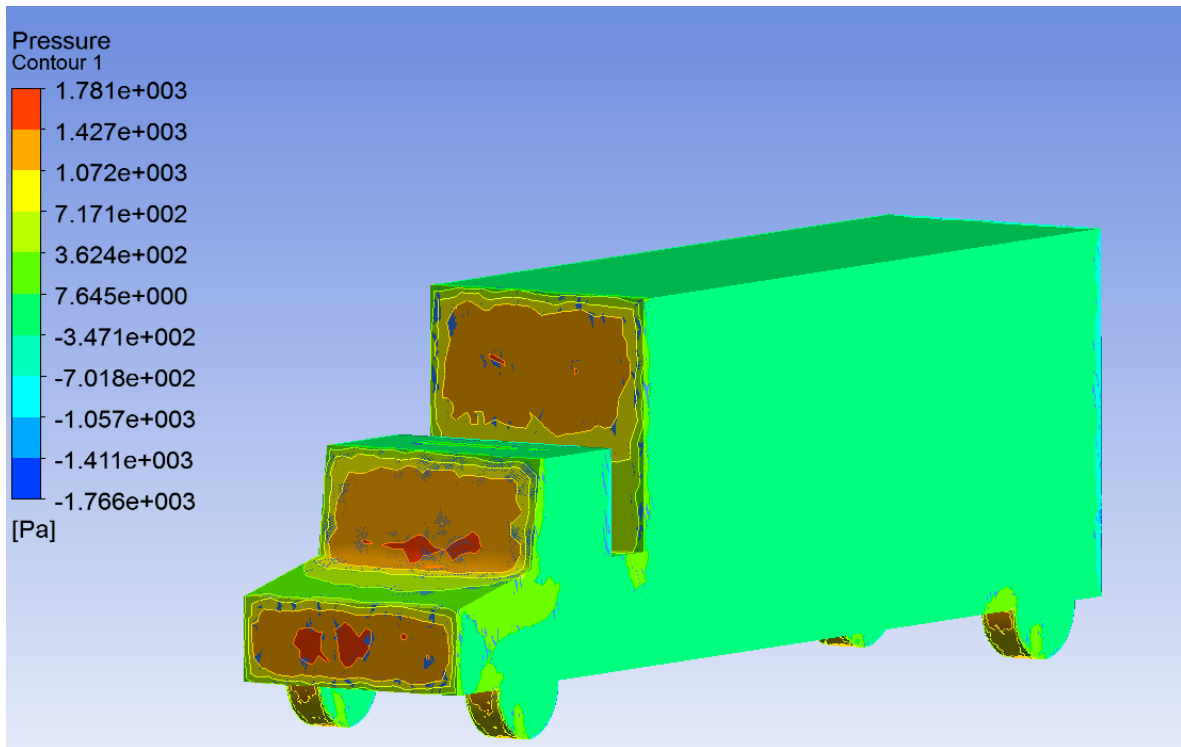


Σχήμα 5.37: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 110 km / h για το μοντέλο φορτηγού

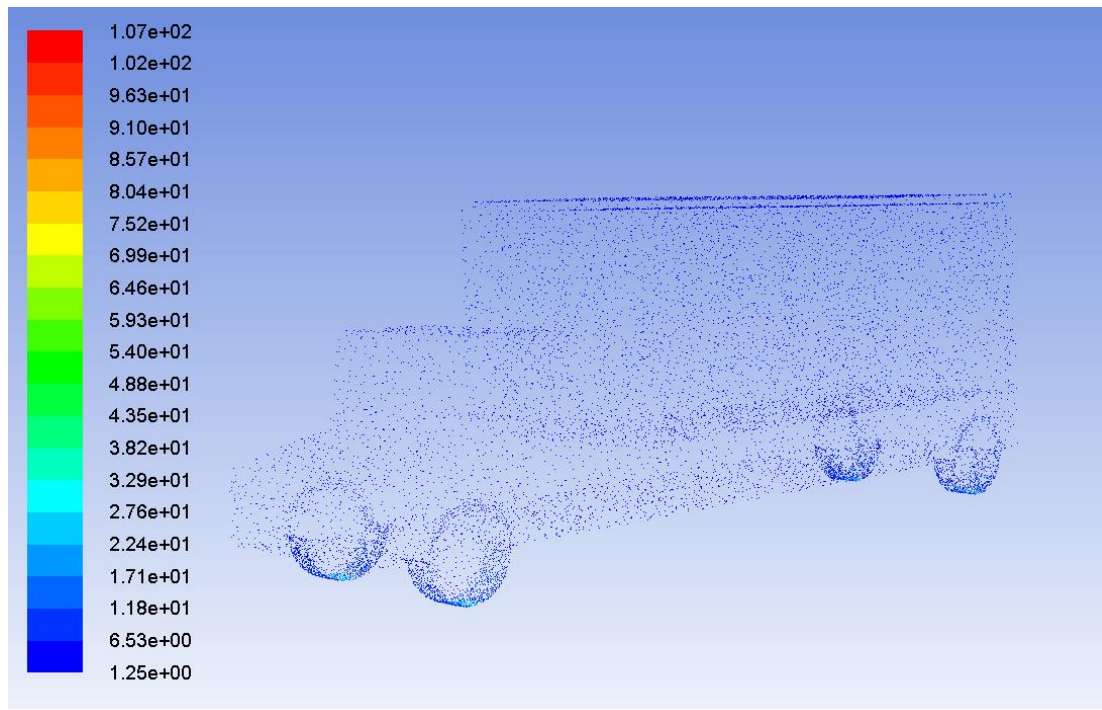
Ο συντελεστής lift και drag είναι αντίστοιχα $c_l = 0.86469$ και $c_d = 3.44090$ για την ταχύτητα αέρα 110 km / h.
Τέλος για την τελευταία ταχύτητα αέρα 120 km / h τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.38, 5.39 και 5.40.



Σχήμα 5.38: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο φορτηγού



Σχήμα 5.39: Περίγραμμα ολικής πίεσης για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο φορτηγού



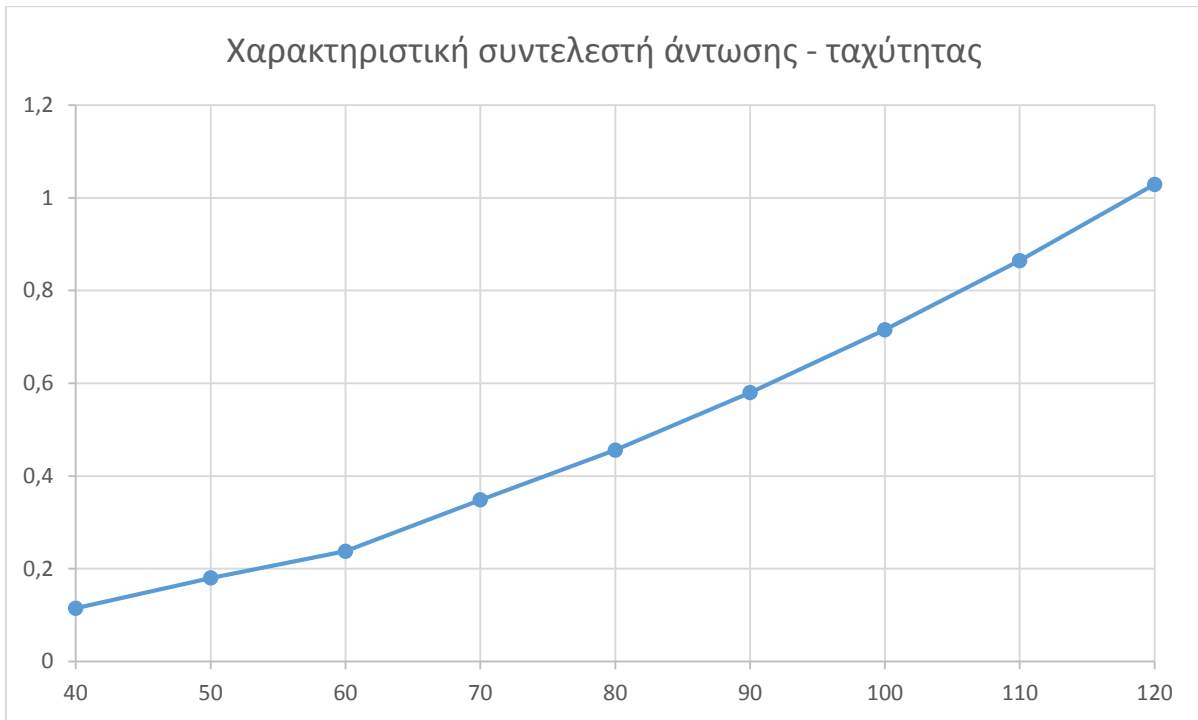
Σχήμα 5.40: Περίγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας, για ταχύτητα αέρα 120 km / h για το μοντέλο φορτηγού

Ο συντελεστής lift και drag για την τελευταία ταχύτητα είναι αντίστοιχα $c_l = 1.0288$ και $c_d = 4.13108$.

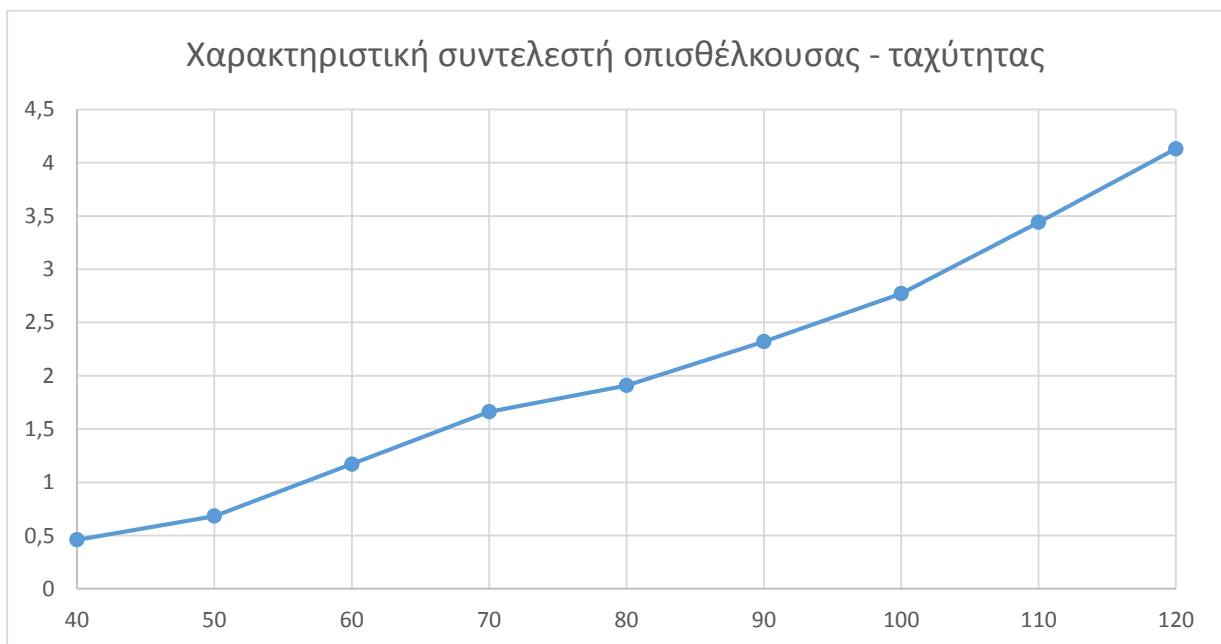
Οι συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και ο λόγος L / D για κάθε περίπτωση ταχύτητας συνοψίζονται στον πίνακα 5.2. Από τα διαγράμματα των σχημάτων 5.41 – 5.43 οι συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας για το εύρος ταχύτητας αέρα 40 – 120 km / h έχουν σχεδόν γραμμική σχέση με την ταχύτητα του αέρα, ενώ η τιμή του λόγου L / D , παραμένει κατά προσέγγιση σταθερή για όλο το εύρος τιμών της ταχύτητας.

Πίνακας 5.2: Συντελεστές άντωσης, οπισθέλκουσας και ο λόγος αυτών

Ταχύτητα (km/h)	c_l	c_d	L / D
40	0.11472	0.46054	0.249
50	0.18014	0.68237	0.264
60	0.23758	1.17140	0.202
70	0.34858	1.66195	0.209
80	0.45568	1.90932	0.238
90	0.57968	2.32071	0.249
100	0.71530	2.77152	0.258
110	0.86469	3.44090	0.252
120	1.0288	4.13108	0.249



Σχήμα 5.41: Διάγραμμα συντελεστή άντωσης – ταχύτητας για το μοντέλο φορτηγού



Σχήμα 5.42: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας – ταχύτητας για το μοντέλο φορτηγού



Σχήμα 5.43: Διάγραμμα λόγου L / D – ταχύτητας για το μοντέλο φορτηγού

Από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν για το μοντέλο του φορτηγού φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας στην άντωση και στην οπισθέλκουσα, αλλά και στα υπόλοιπα μεγέθη. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του φορτηγού, αυξάνονται η ολική πίεση και η κινητική ενέργεια της τύρβης. Η μέγιστη ολική πίεση, εμφανίζεται στην πρόσοψη του φορτηγού και στο εμπρόσθιο τμήμα του ρυμουλκούμενου ασκώντας αντίσταση στην κίνηση του φορτηγού προς τα εμπρός. Αντίθετα η πίεση στο πίσω μέρος του φορτηγού είναι σημαντικά μικρότερη συγκρινόμενη με την πίεση που ασκείται στην πρόσοψη. Αυτή η διαφορά πίεσης έχει ως αποτέλεσμα να ασκείται μεγάλη οπισθέλκουσα δύναμη στο σώμα του φορτηγού. Η ταχύτητα του αέρα είναι ελαφρώς αυξημένη στην πρόσοψη του φορτηγού και στο πάνω τμήμα του ρυμουλκούμενου. Η ροή του αέρα γύρω από το λεωφορείο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή τύρβη, ενώ η τύρβη στην πρόσοψη του φορτηγού και η μεταβολή της ανάλογα με τα ταχύτητα φαίνεται από τα αντίστοιχα περιγράμματα.

5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ

Λαμβάνοντας τα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.4 και ισχύουν για τα βαρέα οχήματα, υπολογίζεται η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης στην κατανάλωση καυσίμου του φορτηγού. Στον πίνακα 5.3 λαμβάνοντας ως ταχύτητα αναφοράς την μέγιστη ταχύτητα, υπολογίζονται οι μειώσεις της οπισθέλκουσας δύναμης και οι αντίστοιχες μειώσεις της κατανάλωσης καυσίμου. Στο σχήμα 5.44 παριστάνονται οι ποσοστιαίες μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου για διάφορες ταχύτητες για το μοντέλο φορτηγού.

Πίνακας 5.3: μειώσεις οπισθέλκουσας δύναμης και κατανάλωσης καυσίμου

Ταχύτητα (km/h)	C_d	Μείωση C_d / 100	Μείωση κατανάλωσης καυσίμου / 100
40	0.46054	-0.888	-0.5328
50	0.68237	-0.835	-0.501
60	1.1714	-0.716	-0.4296
70	1.66195	-0.597	-0.3582
80	1.90932	-0.537	-0.3222
90	2.32071	-0.438	-0.2628
100	2.77152	-0.329	-0.1974
110	3.4409	-0.167	-0.1002
120	4.13108	1	-



Σχήμα 5.44: Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης καυσίμου για διάφορες ταχύτητες για το μοντέλο φορτηγού

Η προσθήκη ενός wind deflector στο εμπρόσθιο τμήμα του φορτηγού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής πίεσης που ασκείται στην πρόσοψη του φορτηγού και του ρυμουλκούμενου, και ακολούθως την μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης και της κατανάλωσης καυσίμου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την αεροδυναμική ανάλυση των τριών οχημάτων αποδεικνύεται ότι σε κάθε περίπτωση η αύξηση της ταχύτητας του οχήματος οδηγεί στην αύξηση της ολικής πίεσης που ασκείται στο όχημα, στην αύξηση της κινητικής ενέργειας της τύρβης και στην μεταβολή της τύρβης του αέρα, όπως και στην αύξηση της άντωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης. Σε κάθε περίπτωση η μέγιστη ολική πίεση ασκείται στο εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος και η ελάχιστη ολική πίεση στο πίσω μέρος του οχήματος. Από αυτή την διαφορά εξαρτάται η τιμή της οπισθέλκουσας δύναμης που ασκείται στο όχημα. Στην περίπτωση του αυτοκινήτου εμφανίζονται αρνητικές ολικές πιέσεις στα σημεία του οχήματος που δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τον αέρα λόγω της πίεσης Gauge. Στις περιπτώσεις του αυτοκινήτου και του φορτηγού η τύρβη του αέρα μεταβάλλεται με την ταχύτητα, ενώ στην περίπτωση του λεωφορείου η τύρβη του αέρα δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές με την ταχύτητα, γιατί το σώμα του λεωφορείου μοιάζει με ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Στην περίπτωση του αυτοκινήτου η μέγιστη ταχύτητα του αέρα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του αέρα, ενώ στις περιπτώσεις του λεωφορείου και του φορτηγού είναι ίση ή αμελητέα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του αέρα.

Το αυτοκίνητο παρουσιάζει την μικρότερη οπισθέλκουσα δύναμη από τους τρεις τύπους οχημάτων για το εύρος ταχυτήτων 40 – 120 km / h, ενώ από την περίπτωση της ταχύτητας των 250 km / h αποδεικνύεται η χρησιμότητα του αεροδυναμικού σχεδιασμού, καθώς το αυτοκίνητο παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερο λόγο άντωσης – οπισθέλκουσας, πράγμα που είναι επιθυμητό για υψηλές ταχύτητες. Το λεωφορείο και το φορτηγό παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές άντωσης και οπισθέλκουσας δύναμης σε σχέση με το αυτοκίνητο και ο λόγος άντωσης – οπισθέλκουσας παραμένει σταθερός ή κατά προσέγγιση σταθερός για το εύρος ταχυτήτων 40 – 120 km / h.

Η αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης αναμφισβήτητα αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου του οχήματος. Στις περιπτώσεις του λεωφορείου και φορτηγού υπολογίστηκε ότι η κατανάλωση καυσίμου στα 40 km / h σε σχέση με την ταχύτητα των 120 km / h είναι μειωμένη 53.33% και 53.28% αντίστοιχα λόγω μεταβολής της οπισθέλκουσας δύναμης.

Η αεροδυναμική ανάλυση των οχημάτων συμβάλλει στην εύρεση μειονεκτημάτων στο σχεδιασμό των οχημάτων και στη βελτίωση της γεωμετρίας του σώματος του οχήματος. Όσο αφορά στη μελέτη των οχημάτων αυτής της εργασίας, για την περίπτωση του φορτηγού παρατηρείται μεγάλη επιφάνεια στο εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος στο οποίο ασκείται η μέγιστη ολική πίεση. Για αυτό τον λόγο προτείνεται η ελαχιστοποίηση της επιφάνειας στην οποία ασκείται η μέγιστη ολική πίεση είτε μέσω της μείωσης του ύψους του ρυμουλκούμενου είτε μέσω της τροποποίησης του σχήματός του. Η αύξηση της τύρβης του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης που αντιμετωπίζει το όχημα και κατά συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη της ίδιας ταχύτητας.

Έτσι, για τις περιπτώσεις του αγωνιστικού αυτοκινήτου και του φορτηγού, οι οποίες παρουσιάζουν συνολικά ή τοπικά αλλαγές στην τύρβη του αέρα με την αύξηση της ταχύτητας, προτείνεται ο συνολικός ή τοπικός επανασχεδιασμός του σώματος του οχήματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν η τύρβη του αέρα, οι τοπικές ζώνες τύρβης, η οπισθέλκουσα δύναμη και να αυξηθεί η απόδοση των οχημάτων. Για τον συνολικό επανασχεδιασμό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίτευξη του μέγιστου δυνατού λόγου μήκους – πλάτους του οχήματος.

Καθώς είναι σαφές ότι η αεροδυναμική συμπεριφορά παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του οχήματος, για περαιτέρω έρευνα προτείνεται η μελέτη των υφιστάμενων οχημάτων υπό άλλες συνθήκες περιβάλλοντος για τις ίδιες ταχύτητες. Συγκεκριμένα υπό άλλες παραμέτρους τύρβης, ατμοσφαιρικής πίεσης και κλίσης επιπέδου. Επίσης προτείνεται η προσθήκη αεροτομών ή άλλων μέσων με στόχο την βελτίωση των δεδομένων που προέκυψαν από αυτή την μελέτη.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "ANSYS Fluent User's Guide", Release 15.0, November 2013
- [2] "ANSYS Fluent Meshing User's Guide", Release 15.0, November 2013
- [3] Klaus A. Hoffmann, Steve T. Chiang, "COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS VOLUME 1", Fourth Edition
- [4] Jiyuan Tu, Guan-Heng Yeoh, Chaoqun Liu, "Computational Fluid Dynamics, A Practical Approach Second Edition", 2013
- [5] Wangda Zuo, "Introduction of Computational Fluid Dynamics", FAU Erlangen-Nürnberg
- [6] Christopher Riff, "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling", Laboratory for Product and Process Design, 2004
- [7] R. B. Sharma, Ram Bansal, "CFD Simulation for Flow over Passenger Car Using Tail Plates for Aerodynamic Drag Reduction", Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 7, Issue 5 (Jul. - Aug. 2013), PP 28-35
- [8] J. Blazek, "COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS"
- [9] Ram Bansal and R. B. Sharma, "Drag Reduction of Passenger Car Using Add-On Devices", Journal of Aerodynamics Volume 2014, Article ID 678518
- [10] JOHAN ZAYA, "Aerodynamic Optimization of Ground Vehicles with the Use of Fluent's Adjoint Solver", Master's Thesis in the Masters Programme Automotive Engineering, 2013
- [11] Akshay Parab, Ammar, Sakarwala Bhushan, Vaibhav Patil, Amol Mangrulkar, "Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5", International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE) ISSN: 2349-7947 Volume: 1 Issue: 4

- [12] Woowon Jeong, Jaehoon Seong, "Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods", International Journal of Mechanical Sciences 78 (2014) 19–26
- [13] Sneha Hetawal, Mandar Gophane, Ajay B.K., Yagnavalkya Mukkamala, "Aerodynamic Study of Formula SAE Car", 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCOMM 2014
- [14] André Luiz Carregari, Paulo Celso Greco Júnior, "COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE AIR FLOW AROUND A COMMERCIAL BUS MODEL", 18th International Congress of Mechanical Engineering November 6-11, 2005, Ouro Preto, MG
- [15] J Abinash, J Arunkumar, "CFD ANALYSIS OF AERODYNAMIC DRAG REDUCTION AND IMPROVE FUEL ECONOMY", ISSN 2278 – 0149 Vol. 3, No. 4, 2014 IJMERR
- [16] Chul – Ho KIM, "A Streamlined Design of a High – Speed Coach for Fuel Savings and Reduction of Carbon Dioxide", International Journal of Automotive Engineering 2, 2011, 101 – 107
- [17] Eyad Amen Mohamed, Muhammad Naeem Radhwi, Ahmed Farouk Abdel Gawad, "Computational investigation of aerodynamic characteristics and drag reduction of a bus model", American Journal of Aerospace Engineering 2015, 2(1-1): 64-73
- [18] Md. Hasan Ali, Mohammad Mashud, Abdullah Al Bari², Muhammad Misbah-Ul Islam, "Aerodynamic Drag Reduction of a Car by Vortex Generation", International Journal of Mechanical Engineering ISSN : 2277-7059 Volume 2 Issue 1
- [19] C. Malca, N. Alves, A. Mateus, "Aerodynamic Analysis of a Frontal Deflector for Vehicles", World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol: 9, No:1, 2015
- [20] JOHAN LEVIN, RIKARD RIDGAL, "Aerodynamic analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD", Master's Thesis, CHALMERS
- [21] Richard M. Wood and Steven X. S. Bauer, "Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks", 2003-01-3377
- [22] Sachin Thorat, G.Amba Prasad Rao, "COMPUTATIONAL ANALYSIS OF INTERCITY BUS WITH IMPROVED AESTHETICS AND AERODYNAMIC

PERFORMANCE ON INDIAN ROADS”, International Journal of Advanced Engineering Technology E-ISSN 0976-3945

[23] Prof. Sham Tickoo, "SolidWorks 2015 for Designers, 13th Edition", Purdue University Calumet, USA

[24] A.Muthuvel, M.K.Murthi, Sachin.N.P, Vinay.M.Koshy, S.Sakthi, E.Selvakumar, "Aerodynamic Exterior Body Design of Bus", Department of Automobile Engineering, Hindustan University, Department of Mechanical Engineering, Nandha Engineering College, India, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 7, July-2013

[25] ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Ι. ΒΑΣΣΗΣ, "ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΕΡΚΡΙΣΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΧΤΟ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ", ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ, 2015

[26] Giovanni Lombardi, Marco Maganzi, Ferdinando Cannizzo, Enrico Cardile, "Use of the CFD for the Aerodynamic Optimization of the Car Shape: Problems and Application", 4th European Automotive Simulation Conference, 2009