

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπολογιστική αεροδυναμική μελέτη επέκτασης αυτονομίας  
ηλεκτρικών οχημάτων**

***Μπαρτζελιώτης Παναγιώτης***  
***A.E.M.: 1972***

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: Α. ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ, Κ.ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ 2021**

## Ευχαριστίες

Ευχαριστίες: Στους καθηγητές και επιβλέποντές μου, Τουρλιδάκη Αντώνιο και Βαφειάδη Κυριάκο για τις γνώσεις, την βοήθεια και τον χρόνο που προσέφεραν για την υλοποίηση αυτής της μελέτης. Την οικογένειά μου για την στήριξη όλα τα χρόνια.

Ημερομηνία 4/11/2021

Συγγραφέας Μπαρτζελιώτης Παναγιώτης

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει εξετασθεί η ροή του αέρα γύρω από ένα σώμα για την παραγωγή ενέργειας και την αύξηση της αυτονομίας ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Το σώμα που επιλέχθηκε για την σύγκριση και ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων είναι το Ahmed body. Το σώμα αυτό σχεδιάστηκε για πρώτη φορά το 1984 από τον **S. R. Ahmed** και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποτελεί το  $\frac{1}{4}$  του μεγέθους ενός κανονικού οχήματος. Στη συνέχεια το Ahmed body διαμορφώθηκε με τροχούς και θόλους για να πραγματοποιηθεί η υπολογιστική μελέτη. Η ανάλυση της μελέτης πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής **ANSYS-FLUENT (CFD)** το οποίο επικεντρώνεται στην επίλυση εξισώσεων ροής ρευστών και στην μοντελοποίηση της ροής του ρευστού γύρω από το υπό μελέτη αντικείμενο. Στην συνέχεια σχεδιάζεται η διάταξη με την οποία πραγματοποιείται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας όπου αποτελείται από έναν ακτινικό στρόβιλο. Αρχικά έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για το αρχικό Ahmed body με τα αποτελέσματα από το ERCOFTAC για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα του συντελεστή πίεσης σε 10 σημεία και της ταχύτητας σε 6 διαφορετικά σημεία και στη συνέχεια έγινε σύγκριση της ροής σε 5 διαφορετικά πεδία. Έπειτα έγινε μελέτη στο τροποποιημένο μόνο με τροχούς Ahmed body για την περιοχή στο θόλο των τροχών όπου θα σχεδιαστεί στη συνέχεια ο αγωγός εκροής για τον υπολογισμό της εισερχόμενης παροχής μάζας για τις ταχύτητες 50,90 και 130 km/h. Εν τέλει σχεδιάστηκε ένας ακτινικός στρόβιλος για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας όπου επιτεύχθηκε η παραγωγή 0.774, 0.644 και 0.382 kW καθώς επιτεύχθηκε και μείωση της οπισθέλκουσας κατά 10% για τις ταχύτητες 90 και 130 km/h και 6% για 50 km/h.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ahmed body, υπολογιστική ρευστοδυναμική, αεροδυναμικοί συντελεστές, επέκταση ηλεκτρικής αυτονομίας, ακτινικός στρόβιλος.

## Abstract

This diploma thesis is an effort to perform a computational aerodynamic study of the flow around the Ahmed body for extension of autonomy for electrical vehicles. The selected body for comparison and identification of results is **Ahmed body**. The body designed for first time from **S. R. Ahmed**. The Ahmed model is the equivalent of one quarter the size of real automobile. This body formed with wheels for the computational study. The results of the computational solution was performed using the commercial code of Computational Fluid Dynamics (CFD) Ansys-Fluent which focuses on solving fluid flow equations and modeling the flow around the under study object. Subsequently designed the device to produce the electrical energy which consists with a radial charge turbine. The results for the original Ahmed body were initially compared with the results from the ERCOFTAC for the reliability of the results. The relative error of the pressure coefficient at 10 points and the velocity at 6 different points were calculated and then compared the flow at 5 different fields. Then a study was made on the wheel-only modified Ahmed body for the area in the wheel arch where the tunnel will be designed from the incoming mass flow for the speed of 50, 90 and 130 km/h. Finally, a radial turbine was designed for the production of electricity where the production is 0.774, 0.644 and 0.382 kW was achieved as well as a reduction of the traction by 10% for the speeds 90 and 130 km/h and 6% for 50 km/h.

**Keywords:** Ahmed body, computational fluid dynamics, aerodynamic coefficient, extension of electrical autonomy, radial turbine





# Πίνακας περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1.</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	1
1.1.1 Ιστορικά δεδομένα.....	2
1.1.2 Στόχος της εργασίας .....	4
1.1.2 Βασικές έννοιες .....	5
1.1.3 Γεωμετρία <i>Ahmed Body</i> .....	10
1.2 Δομή της εργασίας.....	13
<b>Κεφάλαιο 2.</b>	<b>14</b>
2.1 Σχετικές εργασίες.....	14
2.2 Περιγραφή γεωμετρίας πειράματος.....	16
<b>Κεφάλαιο 3.</b>	<b>17</b>
3.1 Ορισμός προβλήματος και αλγόριθμοι επίλυσης .....	17
3.2 Σχεδίαση και αρχιτεκτονική λογισμικού.....	18
3.3 Μοντέλο τύρβης K- $\omega$ SST .....	19
<b>Κεφάλαιο 4. Υλοποίηση</b>	<b>20</b>
4.1 Πλατφόρμες και προγραμματιστικά εργαλεία.....	20
4.2 Δημιουργία Γεωμετρίας στο SpaceClaim για το Ahmed body .....	22
4.3 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh) για το Ahmed body.....	24
4.4 Εισαγωγή Παραμέτρων στο Fluent για το Ahmed body .....	28
4.5 Δημιουργία Γεωμετρίας στο SpaceClaim για το τροποποιημένο Ahmed body ..	32
4.6 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh) για το τροποποιημένο Ahmed body	33
4.7 Εισαγωγή Παραμέτρων για το τροποποιημένο Ahmed body.....	35
4.8 Δημιουργία Γεωμετρίας στο SpaceClaim για το τροποποιημένο Ahmed body με αγωγό εκροής .....	36
4.9 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh) για το τροποποιημένο Ahmed body	36
4.10 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης.....	38

4.11	Παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης ροής σε επίπεδα.....	45
4.11.1	Επίπεδο $X=500mm$ .....	45
4.11.2	Επίπεδο $X=200mm$ .....	48
4.11.3	Επίπεδο $X=80mm$ .....	50
4.11.4	Επίπεδο $X=0$ .....	52
4.11.5	Επίπεδο $X=-38mm$ .....	53
4.12	Αποτελέσματα τροποποιημένου Ahmed body.....	54
4.12.1	Ταχύτητα $50 km/h$ .....	54
4.12.2	Ταχύτητα $90 km/h$ .....	57
4.12.3	Ταχύτητα $130 km/h$ .....	60
4.13	Υπολογισμός σημείου σχεδιασμού αγωγού εκροής.....	63
4.14	Αποτελέσματα Ahmed body με αγωγό εκροής.....	66
4.14.1	Σύγκριση της ροής λόγω της δέσμης αέρα.....	70
4.14.2	Σύγκριση πιέσεων στον θόλο του τροχού.....	73
4.15	Σχεδιασμός διάταξης παραγωγής ενέργειας.....	79
4.16	Καλύτερος σχεδιασμός των πτερυγίων.....	84
4.16.1	Διανύσματα ταχύτητας, κατανομή πίεσης και της τυρβώδης κινητικής ενέργειας στο πτερύγιο για ταχύτητα $50km/h$ ( $0.0099 kg/s$ ).....	86
4.16.2	Διανύσματα ταχύτητας, κατανομή πίεσης και Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια στο πτερύγιο για ταχύτητα $90km/h$ ( $0.018 kg/s$ ).....	87
4.16.3	Διανύσματα ταχύτητας, κατανομή πίεσης και Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια στο πτερύγιο για ταχύτητα $130km/h$ ( $0.026 kg/s$ ).....	89
<b>Κεφάλαιο 5. Επίλογος.....</b>		<b>93</b>
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	93
5.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	94
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>95</b>
<b>Παράρτημα.....</b>		<b>97</b>
Πίνακας 1 Τοποθεσία σημείων και τιμές $C_p$ από ERCOFTAC.....		38
Πίνακας 2 Πίνακας αποτελεσμάτων πίεσης και συντελεστή πίεσης της προσομοίωσης.....		39
Πίνακας 3 Σφάλμα μετρήσεων $C_p$ με ολόκληρο Ahmed body.....		39
Πίνακας 4 Σφάλμα μετρήσεων συμμετρικού Ahmed body.....		40

Πίνακας 5 Τοποθεσία σημείων και τιμή της ταχύτητας από ERCOFTAC.....	41
Πίνακας 6 Αποτελέσματα ταχύτητας προσομοίωσης ολόκληρου σώματος.....	41
Πίνακας 7 Θέση και ταχύτητα από ERCOFTAC για το συμμετρικό όχημα.....	42
Πίνακας 8 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το συμμετρικό σώμα.....	42
Πίνακας 9 Σφάλμα μετρήσεων ταχύτητας προσομοίωσης.....	42
Πίνακας 10 Σφάλμα μετρήσεων ταχύτητας συμμετρικού σώματος.....	43
Πίνακας 11 Αποτελέσματα από το Vista RTD.....	81
Πίνακας 12 Συνολικά αποτελέσματα.....	91

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Εφεδρικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας.....	2
Σχήμα 2 Εφεδρικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας.....	2
Σχήμα 3 Γεωμετρία Ahmed body.....	10
Σχήμα 4 Γεωμετρία ολόκληρου Ahmed body.....	11
Σχήμα 5 Γεωμετρία συμμετρικού Ahmed body.....	11
Σχήμα 6 Γεωμετρία τροχού.....	12
Σχήμα 7 Γεωμετρία Ahmed body.....	16
Σχήμα 8 Block του Fluent στο περιβάλλον εργασίας του Ansys.....	20
Σχήμα 9 Περιβάλλον εργασίας του SpaceClaim.....	22
Σχήμα 10 3-D γεωμετρία του Ahmed body.....	23
Σχήμα 11 Διαστάσεις του όγκου ελέγχου για το Ahmed body.....	23
Σχήμα 12 Δημιουργία named selections στο περιβάλλον του Fluent.....	24
Σχήμα 13 Πλέγμα του εξεταζόμενου σώματος.....	25
Σχήμα 14 υπολογιστικό πλέγμα κατά μήκος του Y άξονα.....	25
Σχήμα 15 Υπολογιστικό πλέγμα κατά μήκος του X άξονα.....	26
Σχήμα 16 Υπολογιστικό πλέγμα κατά μήκος του Z άξονα στο πίσω μέρος όπου υπάρχει η πύκνωση.....	26
Σχήμα 17 Υπολογιστικό πλέγμα συμμετρικού οχήματος κατά μήκος του Z άξονα στο πίσω μέρος όπου υπάρχει η πύκνωση.....	27
Σχήμα 18 Υπολογιστικό πλέγμα συμμετρικού οχήματος κατά μήκος του Y άξονα.....	27
Σχήμα 19 Υπολογιστικό πλέγμα συμμετρικού οχήματος κατά μήκος του X άξονα.....	27
Σχήμα 20 K-ω SST.....	29
Σχήμα 21 Ταχύτητα εισόδου.....	30
Σχήμα 22 Οριακές συνθήκες κινούμενου τοίχους-δρόμου.....	30
Σχήμα 23 Τιμές αναφορές.....	31

Σχήμα 24 Τελική μορφή τροποποιημένου Ahmed body .....	32
Σχήμα 25 Διαστάσεις όγκου ελέγχου τροποποιημένου σώματος .....	32
Σχήμα 26 Δημιουργία named selections .....	33
Σχήμα 27 Πλέγμα εστιασμένης πύκνωσης στο τροχό που είναι υπό εξέταση .....	33
Σχήμα 28 Υπολογιστικό πλέγμα στο θόλο του τροχού .....	34
Σχήμα 29 Υπολογιστικό πλέγμα στο πίσω μέρος του οχήματος.....	34
Σχήμα 30 Οριακή συνθήκη τροχών στα 50km/h.....	35
Σχήμα 31 Ahmed body με αγωγό εκροής .....	36
Σχήμα 32 Υπολογιστικό πλέγμα του αγωγού εκροής.....	37
Σχήμα 33 Υπολογιστικό πλέγμα στην έξοδο των αγωγών .....	37
Σχήμα 34 Τοποθεσία σημείων μέτρησης συντελεστή πίεσης $C_p$ .....	38
Σχήμα 35 Συμπεριφορά $C_p$ από ERCOFTAC και πειραματικές μετρήσεις.....	40
Σχήμα 36 Τοποθεσία σημείων για την σύγκριση της ταχύτητας.....	41
Σχήμα 37 Horseshoe vortex system in wake Ahmed et al. (1984).....	43
Σχήμα 38 Horseshoe vortex system in wake computational.....	44
Σχήμα 39 Ισοϋψής ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=500\text{mm}$ .....	45
Σχήμα 40 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=500\text{mm}$ .....	46
Σχήμα 41 Ισοϋψής ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=500\text{mm}$ .....	46
Σχήμα 42 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=500\text{mm}$ .....	47
Σχήμα 43 Ισοϋψής της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=200\text{mm}$ .....	48
Σχήμα 44 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=200\text{mm}$ .....	48
Σχήμα 45 Ισοϋψής της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=200\text{mm}$ .....	49
Σχήμα 46 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=200\text{mm}$ .....	49
Σχήμα 47 Ισοϋψής της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=80\text{mm}$ .....	50
Σχήμα 48 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=80\text{mm}$ .....	50
Σχήμα 49 Ισοϋψής της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=80\text{mm}$ .....	51
Σχήμα 50 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=80\text{mm}$ .....	51
Σχήμα 51 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=0$ .....	52
Σχήμα 52 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=0$ .....	52
Σχήμα 53 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο $X=-38\text{mm}$ .....	53
Σχήμα 54 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο $X=-38\text{mm}$ .....	53
Σχήμα 55 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο $X=500\text{mm}$ .....	54
Σχήμα 56 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο $X=200\text{mm}$ .....	55
Σχήμα 57 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο $X=80\text{mm}$ .....	55
Σχήμα 58 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο $X=0$ .....	56
Σχήμα 59 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο $X=-38\text{mm}$ .....	56

Σχήμα 60 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=500mm .....	57
Σχήμα 61 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=200mm .....	58
Σχήμα 62 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=80mm .....	58
Σχήμα 63 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=0 .....	59
Σχήμα 64 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=-38mm.....	59
Σχήμα 65 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=500mm.....	60
Σχήμα 66 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=200mm.....	61
Σχήμα 67 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=80mm.....	61
Σχήμα 68 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=0 .....	62
Σχήμα 69 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=-38mm.....	62
Σχήμα 70 Ροή στους τροχούς στα 50 km/h .....	63
Σχήμα 71 Ροή στους τροχούς στα 90 km/h.....	64
Σχήμα 72 Ροή στους τροχούς στα 130 km/h.....	64
Σχήμα 73 Ροή κατά μήκος του οχήματος και εσωτερικά του αγωγού εκροής για 50 km/h .....	66
Σχήμα 74 Ροή περιμετρικά του οχήματος για 50 km/h.....	67
Σχήμα 75 Ροή κατά μήκος του οχήματος και εσωτερικά του αγωγού εκροής για 90 km/h .....	67
Σχήμα 76 Ροή περιμετρικά του οχήματος για 90 km/h.....	68
Σχήμα 77 Ροή κατά μήκος του οχήματος και εσωτερικά του αγωγού εκροής για 130 km/h.....	68
Σχήμα 78 Ροή περιμετρικά του οχήματος για 130 km/h .....	69
Σχήμα 79 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με αγωγό εκροής για 50 km/h.....	70
Σχήμα 80 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος χωρίς αγωγό εκροής για 50 km/h .....	70
Σχήμα 81 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με αγωγό εκροής για 90 km/h.....	71
Σχήμα 82 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος χωρίς αγωγό εκροής για 90 km/h .....	71
Σχήμα 83 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με αγωγό εκροής για 130 km/h.....	72
Σχήμα 84 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος χωρίς αγωγό εκροής για 130 km/h.....	72
Σχήμα 85 Κατανομή πίεσης χωρίς τον αγωγό εκροής.....	73
Σχήμα 86 Κατανομή πίεσης με αγωγό εκροής .....	73
Σχήμα 87 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος χωρίς αγωγό εκροής.....	74
Σχήμα 88 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος με αγωγό εκροής.....	74
Σχήμα 89 Κατανομή πίεσης χωρίς αγωγό εκροής .....	75
Σχήμα 90 Κατανομή πίεσης με αγωγό εκροής .....	75
Σχήμα 91 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος χωρίς αγωγό εκροής.....	76
Σχήμα 92 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος με αγωγό εκροής.....	76

Σχήμα 93 Κατανομή πίεσης χωρίς αγωγό εκροής .....	77
Σχήμα 94 Κατανομή πίεσης με αγωγό εκροής .....	77
Σχήμα 95 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος χωρίς αγωγό εκροής.....	78
Σχήμα 96 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος με αγωγό εκροής.....	78
Σχήμα 97 Αρχικές συνθήκες στροβίλου.....	79
Σχήμα 98 Γεωμετρία στροβίλου.....	80
Σχήμα 99 Τρίγωνα ταχύτητας .....	80
Σχήμα 100 Μορφή στροβίλου .....	81
Σχήμα 101 Πάχος πτερυγίων.....	82
Σχήμα 102 Ορισμός γωνιών $\beta$ και $\theta$ .....	83
Σχήμα 103 Γωνίες $\beta$ και $\theta$ .....	83
Σχήμα 104 Διανύσματα της ταχύτητας με οδηγητικά πτερύγια από το Vista.....	84
Σχήμα 105 Νέα μεταβολή του πάχους.....	84
Σχήμα 106 Νέα μεταβολή γωνιών $\beta$ και $\theta$ .....	85
Σχήμα 107 Τελική μορφή στροβίλου .....	85
Σχήμα 108 Διανύσματα της ταχύτητας με εφαπτομενική κατεύθυνση εισόδου.....	86
Σχήμα 109 Κατανομή πίεσης του πτερυγίου για 0.0099 kg/s .....	86
Σχήμα 110 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια για 0.0099 kg/s.....	87
Σχήμα 111 Διανύσματα της ταχύτητας με εφαπτομενική κατεύθυνση εισόδου.....	87
Σχήμα 112 Κατανομή πίεσης του πτερυγίου για 0.018 kg/s.....	88
Σχήμα 113 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια του πτερυγίου για 0.018 kg/s.....	88
Σχήμα 114 Διανύσματα της ταχύτητας με εφαπτομενική κατεύθυνση εισόδου.....	89
Σχήμα 115 Κατανομή πίεσης του πτερυγίου για 0.026 kg/s.....	89
Σχήμα 116 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια του πτερυγίου για 0.026 kg/s.....	90





# Κεφάλαιο 1.

## 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η ιδέα της υλοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας προήλθε από τις απαιτήσεις της εποχής στην οποία ζούμε για την οικονομία καυσίμων και μείωση της εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς και η ανάπτυξη και η εξέλιξη της τεχνολογίας των μεταφορικών μέσων έχει μία εντελώς διαφορετική τροπή από αυτή που είχε από τα χρόνια της βιομηχανικής επανάστασης. Βρισκόμαστε στην εποχή όπου προσπαθούμε να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερη εξάρτηση από μηχανές εσωτερικής καύσης. Δηλαδή βρισκόμαστε σε μία μεταβατική εποχή η οποία από την συνεχή λειτουργία μηχανών εσωτερικής καύσης, κατά κύριο λόγο, περνάμε στην εποχή όπου τις αντικαθιστούμε με μηχανές βασιζόμενες στο ρεύμα. Αυτό γίνεται για την περαιτέρω προστασία του περιβάλλοντος από τους ρύπους όπου εκπέμπονται από τα οχήματα καθώς και για την διασφάλιση αποθεμάτων στερεών και υγρών καυσίμων για τα επόμενα χρόνια.

Τα μέχρι τώρα ηλεκτροκινούμενα οχήματα που έχουν κατασκευασθεί, έχουν ως ένα βασικό μειονέκτημα, κυρίως στην χώρα που βρισκόμαστε, στην Ελλάδα, ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα επαναφόρτισης των συσσωρευτών και σε συνδυασμό με την μικρή (έως τώρα) αυτονομία που διαθέτουν έχει ως αποτέλεσμα να διστάζουν πολλοί άνθρωποι να κάνουν το βήμα της αλλαγής. Επίσης μέχρι στιγμής δεν έχουμε εκμεταλλευτεί, σε ευρεία παραγωγή οχημάτων, τις διάφορες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όλα αυτά ώθησαν στο να βρεθεί κάτι έτσι ώστε να λύνει σε ένα ποσοστό το πρόβλημα της αυτονομίας χρησιμοποιώντας μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που στα μέσα μεταφοράς υπάρχει συνεχώς και αυτή είναι η αιολική ενέργεια. Για τα οχήματα υπάρχει ένας κλάδος που ασχολείται μόνο για την συμπεριφορά του ρευστού γύρω από αυτά που ονομάζεται αεροδυναμική ή υδροδυναμική αναλόγως το ρευστό που περικλείει το κάθε όχημα. Όλες οι μελέτες γίνονται στο να καταφέρουμε να έχουμε την καλύτερη αεροδυναμική σε κάθε όχημα έτσι ώστε να μειώσουμε τις απώλειες απόδοσης που προκαλούνται από την αντίσταση του ρευστού καθώς και μελέτες για την χρησιμοποίηση του ρευστού για καλύτερη λειτουργία, καύση και ψύξη του κινητήρα αλλά δεν έχουμε χρησιμοποιήσει ακόμη το ρευστό για να παραχθεί έστω και ελάχιστες ποσότητες ενέργειας οι οποίες εκτός από οικονομία του καταναλωτή θα έχει ως

συνέπεια σε μία πιο καθαρή από ρύπους ατμόσφαιρα και θα διασφαλίσει κάποιες ποσότητες καυσίμων για κάποια άλλη λειτουργία.

Οπότε έχοντας μία αρχική ιδέα και έπειτα ορμώμενος από την εύρεση μίας τεχνολογίας για εφεδρική παραγωγή και παροχή ενέργειας στα αεροπλάνα κατά την διάρκεια της πτήσης, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η αεροδυναμική συμπεριφορά στους θόλους των πίσω τροχών ενός οχήματος έτσι ώστε μέσω ενός συμπιεστή να παράγει ηλεκτρική ισχύς η οποία θα καταλήγει είτε στην αποθήκευσή του σε έναν συσσωρευτή είτε για την χρησιμοποίησή του για άλλες λειτουργίες του οχήματος.



Σχήμα 2 Εφεδρικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας



Σχήμα 1 Εφεδρικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας

### 1.1.1 Ιστορικά δεδομένα

Η μηχανική ρευστών ορίζεται ως η επιστήμη που ασχολείται με την συμπεριφορά των ρευστών είτε σε ηρεμία(στατική των ρευστών) είτε εν κινήσει (δυναμική των ρευστών). Η δυναμική των ρευστών ασχολείται με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από τα ρευστά. Η μηχανική ρευστών αποτελεί μια επιστήμη με απεριόριστες εφαρμογές που κυμαίνονται από μικρές συμπεριφορές ροής σε οργανισμούς μέχρι σε αυτοκίνητα, αεροσκάφη, προωθητικά συστήματα διαστημικών οχημάτων όπως επίσης και σε διάφορες συσκευές που είναι αναγκαίες για την μεταφορά του νερού (αντλίες), σε ανεμιστήρες και φυσητήρες, στην ναυπηγική ακόμα και στο πλύσιμο των πιάτων και φυσικά σε πολλές άλλες εφαρμογές είτε φαινομενικά μικρές και απλές είτε περίπλοκες και μεγάλες.

Η αρχαιότερη αναγνωρίσιμη συμβολή της θεωρίας της μηχανικής των ρευστών έγινε από τον Έλληνα μαθηματικό **Αρχιμήδη** ( 285-212 π.Χ) ο οποίος διατύπωσε και εφάρμοσε την αρχή της άνωσης στην πρώτη μη καταστροφική δοκιμή στην ιστορία για την μέτρηση της περιεκτικότητας σε χρυσό του στέμματος του βασιλιά Ιέρων. Σειρά στην εξέλιξη της επιστήμης είχαν οι Ρωμαίοι οι οποίοι κατασκεύασαν υδραγωγεία για την μεταφορά καθαρού νερού όμως με μικρή απόδοση καθώς οι γνώσεις τους ήταν ελάχιστες πάνω στην μηχανική των ρευστών.

Η περίοδος της αναγέννησης είχε ως αποτέλεσμα την συνεχή ανάπτυξη των συστημάτων των ρευστών αλλά ως αποκορύφωμα είχε την τελειοποίηση και την υιοθέτηση σε όλη την Ευρώπη της επιστημονικής μεθόδου. Μια σειρά από μεγάλους επιστήμονες και ερευνητές ασχολήθηκαν και έβαλαν ένα μεγάλο λιθαράκι για την ανάπτυξη και την συνέχιση αυτής της επιστήμης. Αυτοί ήταν οι **Simon Stevin, Galileo Galilei, Edme Mariotte, Blaise Pascal** και **Bernoulli** ο οποίος με την διατριβή του το 1738, **Hydrodynamica** τοποθετεί το πρώτο κείμενο για την μηχανική ρευστών. Μέχρι τα μέσα του δέκατου ένατου αιώνα εμφανιζόντουσαν διάφορα επιτεύγματα. Ο **Jean Poiseuille** μέτρησε με ακρίβεια την ροή μέσα σε τριχοειδείς σωλήνες, ο **Gotthilf Hagen** διαφοροποίησε την στρωτή από την τυρβώδη ροή καθώς ο **Reynolds** συνέχισε αυτή την δουλειά και ανέπτυξε τον ομώνυμο αδιάστατο αριθμό. Ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα ήταν αυτό της ολοκλήρωσης των γενικών εξισώσεων της κίνησης ενός ρευστού **Navier-Stokes**, που πήραν το όνομά τους από τα ονόματα των επιστημόνων που τις ανέπτυξαν.

Έχοντας αυτά τα εργαλεία στα χέρια τους η πρόοδος δεν άργησε να έρθει καθώς στα μέσα του εικοστού αιώνα έγιναν πράξη πολλά θεωρητικά κομμάτια της μηχανικής ρευστών σε διάφορες εφαρμογές. Αυτό αποτέλεσε τα μέσα του εικοστού αιώνα ως χρυσή εποχή για την επιστήμη. Από την στιγμή της δημιουργίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή με την ικανότητα επίλυσης μεγάλων και σύνθετων προβλημάτων, όπως την δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού ενός πτερυγίου του στροβίλου η επιστήμη φτάνει σε μεγάλα επίπεδα εφαρμοσιμότητας αλλά και αναγκαιότητας ύπαρξης για την βελτίωση των συνθηκών ζωής.[21]

### 1.1.2 Στόχος της εργασίας

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η επίτευξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την χρήση καυσίμου άμεσα από το όχημα είτε έμμεσα από κάποιον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό ισοδυναμεί με μικρότερη εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα και στην λιγότερη κατανάλωση υγρών και στερεών καυσίμων. Έχει αποδειχθεί ότι η ανθρωπότητα απειλείται από μεγάλες περιβαλλοντικές καταστροφές, με αιχμή του δόρατος την επαπειλούμενη παγκόσμια κλιματική αλλαγή ως συνέπεια των διαρκώς αυξανόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Η ύπαρξη αυτών των κινδύνων για τον άνθρωπο και το περιβάλλον του είναι απόρροια της αλόγιστης ανάλωσης πρώτων υλών και ενέργειας κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Με έμφαση στη διατήρηση της ικανότητας της γης να ευνοεί τη ζωή σε όλη της την ποικιλία, την τήρηση των ορίων των φυσικών πόρων του πλανήτη και την εξασφάλιση υψηλού επιπέδου όσον αφορά στην προστασία και τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Αναπόσπαστο στόχο αποτελούν η πρόληψη και μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και η προώθηση αειφόρων προτύπων κατανάλωσης και παραγωγής, ώστε να αποσυνδεθεί η οικονομική μεγέθυνση από την υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Επίσης για τον καταναλωτή αυτό ισοδυναμεί με λιγότερα έξοδα μετακίνησης. Προς το παρόν, ο τομέας της ενέργειας παραμένει μια τεράστια πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 70% των ευρωπαϊκών εκπομπών διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ), το 21% οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και το 94% των εκπομπών αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ), παρά τις σημαντικές μειώσεις αυτών από την δεκαετία του 90. Για να επιτευχθεί η εργασία αυτή έγινε αεροδυναμική μελέτη στο πρότυπο όχημα του Ahmed body έχοντας προσθέσει τροχούς για την λήψη δεδομένων της ροής στους θόλους και στη συνέχεια στον αγωγό εκροής. Έπειτα αφού αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί σαν διάταξη παραγωγής ενέργειας ένας ακτινικός στρόβιλος, σχεδιάστηκε αρχικά σύμφωνα με την εισερχόμενη παροχή.

## 1.1.2 Βασικές έννοιες

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι βασικές έννοιες της μηχανικής ρευστών, των ηλεκτρικών μηχανών και των στροβιλομηχανών οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω και χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της εργασίας.

### 1.1.2.1 Βασικές αρχές μηχανικής ρευστών

#### Μόνιμη και μη-μόνιμη ροή:

*Μόνιμη ροή* σημαίνει ότι οποιαδήποτε μεταβλητή σε μια θέση του ροϊκού πεδίου δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο.

*Μη-μόνιμη ροή* μπορεί να χαρακτηριστεί μια ροή η οποία δεν είναι μόνιμη δηλαδή μία περιοδική, μεταβατική ή τυρβώδεις ροή.

#### Αναπαράσταση πεδίων ροής:

Η αναπαράσταση των πεδίων ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ροϊκές γραμμές είτε με τροχιακές γραμμές είτε με γραμμές εκπομπής.

#### Streamlines:

Ροϊκές γραμμές (streamlines) είναι οι καμπύλες που σχηματίζονται κατά την γραφική απεικόνιση της κίνησης του ρευστού.

#### Συμπίεστη και μη-συμπίεστη ροή:

*Ασυμπίεστη ροή* θεωρείται μια ροή όπου η πυκνότητα του ρευστού παραμένει παντού ίδια. Οι περισσότερες ροές υγρών είναι ασυμπίεστες ενώ των αερίων είναι συμπίεστες σε μεγάλες ταχύτητες.

#### Ιξώδες:

Ιξώδες είναι η ιδιότητα του ρευστού να αντιτίθεται σε διατμητικές τάσεις.

#### Συνθήκη μη-ολίσθησης:

Το ρευστό έχει την ιδιότητα να προσκολλάτε στην στερεή επιφάνεια λόγω συνεκτικότητας και την οφείλει στο ιξώδες του με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια, έτσι απλοποιούμε το πρόβλημα και θεωρούμε μηδενικές ταχύτητες του ρευστού σε αυτές τις επιφάνειες.

### Reynolds (Re):

Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι ένα αδιάστατο νούμερο στην μηχανική των ρευστών. Έχει ευρείες εφαρμογές, από τη ροή υγρού μέσα σε ένα σωλήνα ή τη κίνηση του αέρα πάνω από μια πτέρυγα ενός αεροσκάφους έως τον υπολογισμό μετεωρολογικών και κλιματολογικών προβλέψεων. Ο αριθμός Reynolds χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}, \text{ [Εξίσωση 1]}$$

Όπου:

$\rho$  = Πυκνότητα

$V$  = Ταχύτητα

$L$  = Χαρακτηριστικό μήκος

$\mu$  = Συντελεστή ιξώδους

### Στροβιλή ροή ή στροβιλισμός:

Εάν η στροβιλότητα σε ένα σημείο του ροϊκού πεδίου είναι μη-μηδενική τα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται εκεί περιστρέφονται.

### Συντελεστής πίεσης $C_p$ :

Ορίζεται ως απόλυτος αριθμός που συσχετίζει την πίεση

$$C_p = (P - P_\infty) / q_\infty, \text{ [Εξίσωση 2]}$$

Όπου  $P, P_\infty$  η τοπική και ελεύθερης ροής στατική πίεση

$$q_\infty = \frac{\rho}{2} V_\infty^2, \text{ [Εξίσωση 3] η δυναμική πίεση}$$

### 1.1.2.2 Βασικές αρχές ηλεκτρικών μηχανών

#### Γωνιακή ταχύτητα $\omega$ :

Η γωνιακή ταχύτητα ενός σώματος που περιστρέφεται είναι ο λόγος της μεταβολής της γωνίας της θέσης του ως προς τον χρόνο που διαρκεί αυτή η μεταβολή.

#### Ροπή $T$ :

Πρόκειται κατά κάποιον τρόπο για την 'περιστροφική δύναμη' που ασκείται πάνω σε ένα σώμα.

$$T=Fr(\sin\theta) \text{ [Nm]}, \text{ [Εξίσωση 4]} \text{ όπου}$$

F: η εφαρμοζόμενη δύναμη

r(sinθ): η κάθετη απόσταση

#### Ισχύς $P$ :

Ισχύς είναι ο λόγος του παραγόμενου έργου στη μονάδα του χρόνου.

$$P=dW/dt=d(Fr)/dt=Fv \text{ [Εξίσωση 5]}$$

Έτσι εάν υποθέσουμε σταθερή την ροπή στην περίπτωση της περιστροφικής κίνησης η ισχύς είναι:

$$P=T\omega \text{ [Watt ή hp]} \text{ [Εξίσωση 6]}$$

#### Σύγχρονη Γεννήτρια:

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι μια σύγχρονη μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε τριφασική ηλεκτρική ισχύ στην έξοδό της. Η κινητήρια μηχανή μιας τέτοιας γεννήτριας είναι κάποιος κινητήρας ντίζελ, ατμοστρόβιλος ή κάθε άλλη παρόμοια μηχανή. Η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στον άξονά της, ενώ η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι ίση με:

$$P_{\text{conv}}=3E_A I_A (\cos\gamma), \text{ [ Εξίσωση 7]} \text{ όπου}$$

$\gamma$ : η γωνία μεταξύ των  $E_A$  και  $I_A$  [20]

### 1.1.2.3 Βασικές αρχές στροβιλομηχανών

Στις στροβιλομηχανές κατηγοριοποιούνται όλες εκείνες οι συσκευές στις οποίες ενέργεια μεταφέρεται είτε προς ή από ένα συνεχώς ρέον ρευστό μέσω της δυναμικής δράσης μίας ή περισσότερων πτερυγώσεων. Ουσιαστικά μία περιστρεφόμενη πτερύγωση, ένας ρότορας ή μια πτερωτή αλλάζει την ενθαλπία ανακοπής του ρευστού που κινείται διαμέσου αυτής, παράγοντας θετικό ή αρνητικό έργο ανάλογα με την λειτουργία της μηχανής. Οι αλλαγές ενθαλπίας συνδέονται άμεσα με τις αλλαγές πίεσης που συμβαίνουν ταυτόχρονα στο ρευστό. Οι στροβιλομηχανές κατηγοριοποιούνται ως εκείνες που απορροφούν ισχύ για να αυξηθεί η πίεση ή το ύψος του ρευστού (συμπιεστές, αντλίες) και ως αυτές που παράγουν ισχύ με την αποτόνωση του ρευστού σε χαμηλότερη πίεση ή ύψος (ανεμογεννήτριες, ατμοστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι). Επίσης κατηγοριοποιούνται και ως προς της ροής του ρευστού διαμέσω του ρότορα. Όταν είναι πλήρως ή κυρίως παράλληλη προς τον άξονα περιστροφής τότε καλείται *στροβιλομηχανή αξονικής ροής*. Ένα μείζον πρόβλημα της ρευστομηχανικής στις στροβιλομηχανές είναι ο σχεδιασμός των συμπιεστών. Ένας στρόβιλος, με την ροή να πηγαίνει συνήθως από μια υψηλή σε μια χαμηλή πίεση, λειτουργεί πάντα με τη δέουσα προσοχή. [5]

#### Γραμμή πάλμωσης:

Ένα χαρακτηριστικό οποιουδήποτε χάρτη λειτουργίας ενός συμπιεστή είναι η γραμμή πάλμωσης. Η γραμμή αυτή αποτελεί το όριο ευσταθούς λειτουργίας και τυπικά αναφέρεται ως γραμμή πάλμωσης (surge) ή περιστροφικής αποκόλλησης (stall). Αστάθεια στη λειτουργία μπορεί να προκληθεί μειώνοντας την παροχή μάζας ενώ ταυτόχρονα η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή.

#### Παράγοντας ολίσθησης:

Ακόμα και υπό ιδανικές συνθήκες η σχετική ταχύτητα στην έξοδο της πτερωτής ενός συμπιεστή ή μιας αντλίας δεν οδηγείται τέλεια από τα πτερύγια και η πραγματική ροή λέμε ότι ολισθαίνει και ο παράγοντας ολίσθησης ορίζεται ως:

$$\sigma = C_{\theta 2} / C_{\theta 2'} \quad [\text{Εξίσωση 8}]$$

Όπου  $C_{\theta 2}$  η εφαπτομενική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας και σχετίζεται με τη σχετική γωνία ροής του ρευστού  $\beta_2$  και η υποθετική εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας σχετίζεται με την γωνία των πτερυγίων  $\beta_2'$ .

#### Σχέσεις υπολογισμού παράγοντα ολίσθησης:

Μία από τις πρώτες και απλούστερες εκφράσεις είναι αυτή που δόθηκε από τον Stodola (1945):

$$\sigma = 1 - \frac{\left(\frac{\pi}{Z}\right) \cos \beta_2'}{1 - \Phi_2 \tan \beta_2'}, \quad [\text{Εξίσωση 9}]$$



Όπου  $Z$ : ο αριθμός των πτερυγίων και  $\Phi_2=C_{r2}/U_2$ .

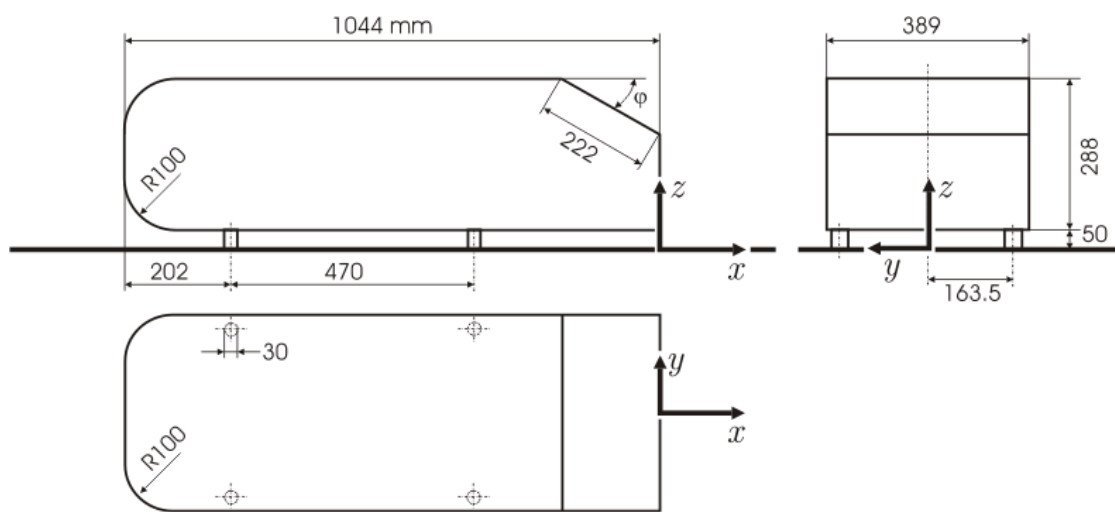
Το 1928 πιο δημοφιλείς ήταν του Busemann όπου μπορεί να εφαρμοστεί στην ειδική περίπτωση 2D πτερυγίων.

Σύμφωνα με την εξίσωση του Busemann συμπεραίνουμε ότι τιμή του παράγοντα ολίσθησης κατά Stodola ήταν κοντά στην ακριβή τιμή της εάν η γωνία εξόδου των πτερυγίων κυμαίνεται στο διάστημα  $50^\circ \leq \beta_2' \leq 70^\circ$  και με αριθμό πτερυγίων μεγαλύτερο του έξι (6). Το 1952 ο Stanitz χρησιμοποίησε τη μαθηματική μέθοδο της χαλάρωσης για να λύσει το πεδίο δυναμικής ροής μεταξύ των πτερυγίων οκτώ πτερωτών κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μεταξύ των γωνιών  $0^\circ$  και  $45^\circ$  η ταχύτητα ολίσθησης δεν επηρεάζεται από την γωνία  $\beta_2'$  αλλά από τον αριθμό των πτερυγίων.[18]

$$\sigma=1-0.63\pi/Z \text{ [Εξίσωση 10]}$$

### 1.1.3 Γεωμετρία Ahmed Body

Η γεωμετρία Ahmed body είναι ένα εξιδανικευμένο μοντέλο οχήματος πάνω στο οποίο γίνονται μελέτες για την καλύτερη αεροδυναμική σχεδίαση κυρίως σε εμπορικά μοντέλα αυτοκινήτων τύπου hatchback. Χρησιμοποιήθηκε αυτή η γεωμετρία επειδή είναι μια απλή σχεδιαστική διάταξη με δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία έχουν οριστεί από τον S.R. Ahmed και αποτελούν το  $\frac{1}{4}$  των διαστάσεων ενός αληθινού οχήματος[16]. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις του μοντέλου αυτού.



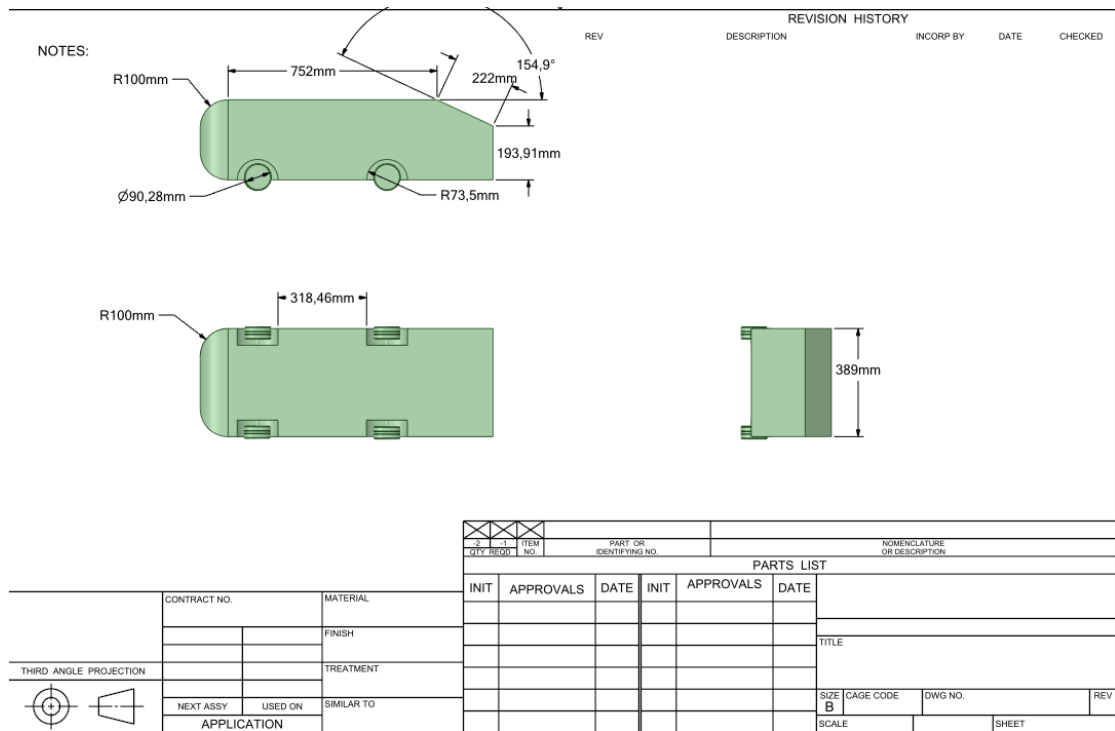
Σχήμα 3 Γεωμετρία Ahmed body

[8]

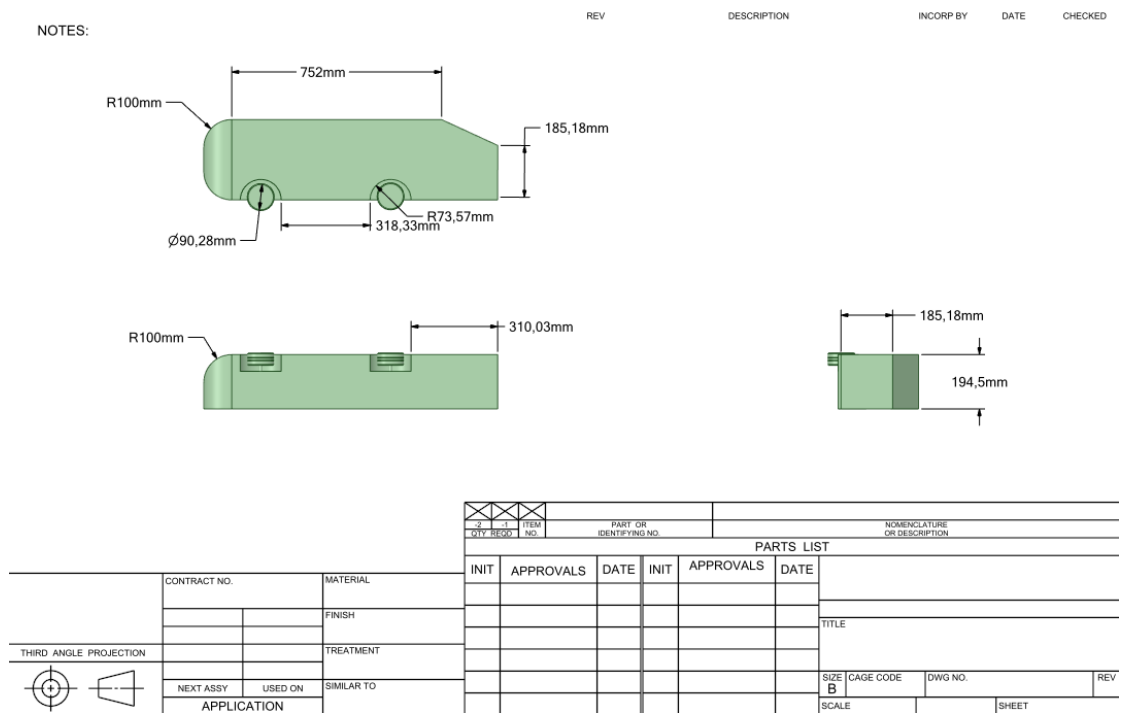
Στην εργασία αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί οι παραπάνω διαστάσεις με την μόνη διαφορά ότι έχουν προστεθεί ρόδες για να είναι τα αποτελέσματα πιο κοντά στην πραγματικότητα στους θόλους του οχήματος. Για την εξασφάλιση των σωστών υπολογισμών αρχικά έγινε μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που υπάρχουν στο ERCOFTAC.

Οι διαστάσεις του τροχού που σχεδιάστηκε είναι: διάμετρος 96mm και πλάτος 43,9mm με 10 mm κενό από το υπόλοιπο σώμα. Η απόσταση από το έδαφος πλέον είναι στα 36mm με τον τροχό καθώς και η γωνία  $\phi$  ισούται με 25 μοίρες.(Σχήμα 4&5)

Στην εργασία αυτή σαν εξεταζόμενο μοντέλο έχουν χρησιμοποιηθεί δύο ειδών γεωμετρίας. Το ένα είναι η προαναφερόμενη και το άλλο είναι η μισή γεωμετρία για καλύτερη αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι γεωμετρίες αυτές καθώς και ο άξονας που έχει προστεθεί ως 'ψαλίδι' των τροχών διαμέτρου 10 mm.



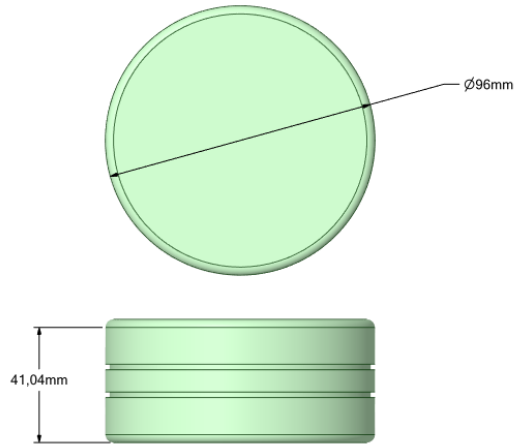
Σχήμα 4 Γεωμετρία ολόκληρου Ahmed body



Σχήμα 5 Γεωμετρία συμμετρικού Ahmed body

NOTES:

REV DESCRIPTION INCORP BY DATE CHECKED



QTY		ITEM		PART OR IDENTIFYING NO.			NOMENCLATURE OR DESCRIPTION			
3	4			PARTS LIST						
INIT	APPROVALS	DATE	INIT	APPROVALS	DATE					
							TITLE			
CONTRACT NO.		MATERIAL					TREATMENT			
		FINISH					SIMILAR TO			
THIRD ANGLE PROJECTION		APPLICATION					SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	REV
							B			
							SCALE			SHEET

Σχήμα 6 Γεωμετρία τροχού

## 1.2 Δομή της εργασίας

### Κεφάλαιο 1

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περίληψη της διπλωματικής εργασίας καθώς και το θέμα για το οποίο ασχολείται. Στις τρεις (3) υποενότητες παρουσιάζονται κάποια ιστορικά δεδομένα και βασικές έννοιες που είναι χρήσιμα για το αντικείμενο της μελέτης. Τέλος αναφέρεται η γεωμετρία όσο της αρχικής τόσο και της τροποποιημένης γεωμετρίας του Ahmed body.

### Κεφάλαιο 2

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο έγινε ο υπολογισμός των ταχυτήτων και του συντελεστή πίεσης από το **ERCOFTAC** για να πραγματοποιηθεί εν συνεχεία η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την αξιοπιστία των μετρήσεων.

### Κεφάλαιο 3

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το περιβάλλον του **Ansys Fluent CFD** και οι παράμετροι που τέθηκαν για την επίλυση του προβλήματος και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

### Κεφάλαιο 4

Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος και η διαδικασία υλοποίησης για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της **ERCOFTAC** καθώς και για τα αποτελέσματα της μελέτης του Ahmed body τροποποιημένο με τροχούς καθώς και του Ahmed body με τον αγωγό εκροής καθώς παρουσιάζεται και η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί και ο τρόπος υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας. .

### Κεφάλαιο 5

Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα-αποτελέσματα. Πόσο αποδοτική είναι μία τέτοια διάταξη, πόση αυτονομία μπορεί να προσφέρει καθώς και μελλοντικά σχέδια για ανάπτυξη και βελτίωση αυτής της μελέτης.

## Κεφάλαιο 2.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη από το ERCOFTAC για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση και τον υπολογισμό του σφάλματος των μετρήσεων της διπλωματικής εργασίας. Επίσης παρουσιάζεται το άρθρο "*Passive flow control on Ahmed body by rear linking tunnels*" των B. Mohammadikalakoo, P. Schito και M. Mani όπου χρησιμοποιήθηκε για την μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης στο μοντέλο Ahmed body καθώς και άλλες τρεις σχετικές εργασίες.

### 2.1 Σχετικές εργασίες

#### I. **ERCOFTAC**

Εξετάστηκε ένα τυπικό σχήμα οχήματος, το Ahmed body σε δύο πειράματα. Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε στο **DLR-Göttingen** σε αεροδυναμική σήραγγα με ταχύτητα ανέμου στην είσοδο 60 m/s. Το μοντέλο ήταν τοποθετημένο όπως θα ήταν στο δρόμο για να υπάρχει η επίδραση του εδάφους. Για να ελαττώσουν αυτό το φαινόμενο τοποθέτησαν μία πλάκα ανάμεσα στο δρόμο και το σώμα. Οι μελέτες έγιναν για γωνίες από 0° έως 40° με βήμα 5 μοιρών. Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο του **Erlangen LSTM** σε συνεργασία με το **MOVA**(Models for Vehicle Aerodynamics). Από το πείραμα αυτό παρέχονται αποτελέσματα για 25 και 35 μοίρες και παρουσιάζεται η ροή σε 13 διαφορετικά επίπεδα καθώς και τα αποτελέσματα της πίεσης στο πίσω μέρος του οχήματος. Η εισερχόμενη τύρβη του πειράματος είναι λιγότερη από 0,25% το οποίο προήλθε από μετρήσεις σε απόσταση 400mm από το όχημα και η αναλογία ιξώδους είναι 10. Το σφάλμα των μετρήσεων για τις μέσες ταχύτητες είναι λιγότερο από 0,005% στην έξοδο της ροής καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων υπολογίζεται στο 1% για τις μέσες τιμές.

## ***II. Passive flow control on Ahmed body by rear linking tunnels***

Σε αυτή την εργασία μελετάται η επίδραση της ροής στο όχημα Ahmed body για την μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης. Η κύρια ιδέα για την επίτευξη της μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης είναι η δημιουργία καναλιών αποτελούμενα από υψηλής και χαμηλής πίεσης ζώνες για τον έλεγχο της ροής. Η αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε γωνία  $25^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  και  $35^{\circ}$  του πίσω μέρους του οχήματος Ahmed body καθώς επίσης και σε τρεις ταχύτητες της ροής στα 10,20 και 30m/s. Σύμφωνα με αυτές τις αριθμητικές μετρήσεις επιτυγχάνεται μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης κατά 2 με 5% αναλόγως τις εκάστοτε διαφοροποιήσεις.[7]

## ***III. Aerodynamic drag reduction and flow control of Ahmed body with flaps***

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε από τους Ie Tian, Yingchao Zhang, Hui Zhu και Hongwei Xiao όπου προσπάθησαν να μειώσουν την οπισθέλκουσα δύναμη του Ahmed body για 25 και 35 μοίρες προσθέτοντας δύο είδη από πτερύγια στην κεκλιμένη επιφάνεια. Η μελέτη ανέλυσε διεξοδικά τις επιπτώσεις των πτερυγίων «μεγάλου τύπου» και «μικρού τύπου» στην οπισθέλκουσα. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης επιβεβαίωσαν ότι τα μεγάλα και μικρά πτερύγια είναι πιο αποτελεσματικά όταν διαμορφώνονται στο μοντέλο μοιρών επιτεύχθηκε έως και 21% μείωση του συντελεστή πίεσης (διαμορφώσεις πτερυγίων στην κεκλιμένη πλευρά) και 6% για το μοντέλο 35 Ahmed (διαμορφώσεις πτερυγίων και στις δύο πλευρές και επάνω άκρες). Τα περιγράμματα ταχύτητας και πίεσης έδειξαν ότι το κλειδί για τη μείωση της οπισθέλκουσας είναι η αποδυνάμωση (αν όχι η εξάλειψη) της διαμήκης δίνης που δημιουργείται στα πλευρικά άκρα της πίσω κλίσης.[16]

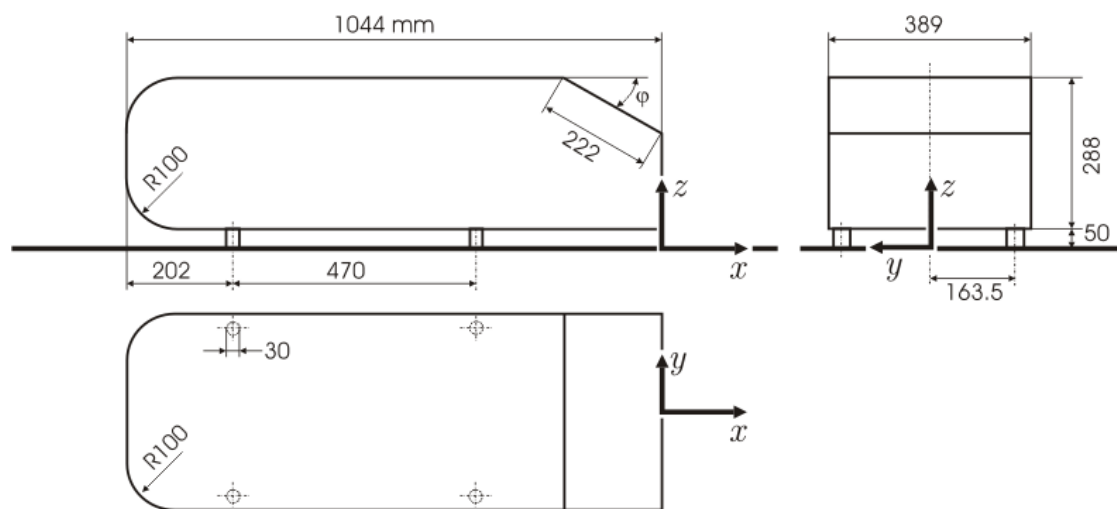
## ***IV. Aerodynamic Study of an Ahmed Body with the help of CFD Simulation***

Η μελέτη αυτή έχει ως στόχο την μείωση της οπισθέλκουσας και για αυτό τον λόγο προβαίνει στην αεροδυναμική ανάλυση του Ahmed body και μελετάει την ροή σε επίπεδα πίσω από το όχημα. Η μελέτη εστιάζει επίσης σε σημαντικές ιδιότητες όπως το μέγεθος της ταχύτητας σε διαφορετικές τοποθεσίες για διαφορετικές περιπτώσεις πλέγματος και η σύλληψη του μοτίβο ροής στο μπροστινό μέρος.[14]

## V. *PIV measurement of the flow past a generic car body with wheels at LES applicable Reynolds number*

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με την μέθοδο 2D-2C PIV η οποία δίνει την δυνατότητα της οπτικοποίησης της ροής σε ένα πείραμα που βρίσκεται στο εργαστήριο λόγω της ρίψης σωματιδίων. Επίσης τροποποιεί το μοντέλο Ahmed body σχεδιάζοντας τροχούς και θόλους στο όχημα οι οποίοι περιστρέφονταν.[1]

## 2.2 Περιγραφή γεωμετρίας πειράματος



Σχήμα 7 Γεωμετρία Ahmed body [8]

Όπως φαίνεται από το σχήμα 7 η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο πίσω και κάτω μέρος και στη μέση του οχήματος. Το συνολικό μήκος του οχήματος είναι 1044mm έχει πλάτος 389mm και μήκος 288mm. Το σώμα στηριζόταν στο έδαφος σε απόσταση 50mm από δοκούς με διάμετρο 30mm για να αποφευχθεί η επίδραση του εδάφους από την αεροδυναμική σήραγγα.



## Κεφάλαιο 3.

### 3.1 Ορισμός προβλήματος και αλγόριθμοι επίλυσης

Η ανάλυση της μελέτης πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής **ANSYS-FLUENT (CFD)** το οποίο επικεντρώνεται στην επίλυση εξισώσεων ροής ρευστών και στην μοντελοποίηση της ροής του ρευστού γύρω από το υπό μελέτη αντικείμενο. Για να καταφέρει να προσομοιάσει την ροή παρέχει προσεγγιστικές και όχι αναλυτικές λύσεις των εξισώσεων **Navier-Stokes** και της **εξίσωσης της συνέχειας** χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες αρχικές και οριακές συνθήκες. Λόγω του ότι οι εξισώσεις **Navier-Stokes** ισχύουν σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου ροής οι λύσεις αυτών αντίστοιχα που θα υπάρξουν, είναι για κάθε ένα σημείο που αυτό το αποτελεί, έτσι η προσομοίωση **CFD** μέσω της διαδικασίας διακριτοποίησης του υπό μελέτη σώματος καταφέρνει να κάνει τους υπολογισμούς ξεχωριστά για το κάθε ένα σώμα με μία τεχνική παρεμβολής. Τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης δεν αντιπροσωπεύουν ποτέ εξ ολοκλήρου την πραγματικότητα επειδή:

- Τα εισαγόμενα δεδομένα ενδέχεται να περιλαμβάνουν ανακρίβειες
- Το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος μπορεί να είναι ανεπαρκές
- Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων περιορίζεται από την εκάστοτε υπολογιστική ισχύ [13]

Παρακάτω είναι οι εξισώσεις που διέπουν το ροϊκό πεδίο:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \text{ Εξίσωση συνέχειας [Εξίσωση 11]}$$

Η εξίσωση της συνέχειας προέρχεται από την εξίσωση της διατήρησης της μάζας ενός συστήματος. Η εξίσωση της συνέχειας μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν όγκο ελέγχου που οριοθετείται από μια επιφάνεια ελέγχου. Επίσης αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις εξισώσεις της Μηχανικής των ρευστών και ισχύει για μόνιμες και μη μόνιμες, συμπιεστές και ασυμπίεστες ροές.

Έχοντας ορίσει τις τάσεις με τις εξισώσεις Cauchy μπορούν να αντικατασταθούν στις διαφορικές εξισώσεις κίνησης και να απλοποιηθούν με τη βοήθεια της εξίσωσης κίνησης για ασυμπίεστη ροή [12].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \text{ Εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστη ροή [Εξίσωση 12]}$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Εξίσωση Ορμής- Εξισώσεις Navier-Stokes [Εξίσωση 13]

Τα  $u, v, w$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά  $x, y$  και  $z$ . Αποτελούν εκφράσεις του 2ου νόμου του Νεύτωνα. Στο αριστερό μέλος είναι οι όροι των επιταχύνσεων και στο δεξί οι όροι των δυνάμεων. Αυτές οι τρεις εξισώσεις μαζί με την εξίσωση της συνέχειας αποτελούν μια πλήρη μαθηματική περιγραφή της ροής των ασυμπίεστων ρευστών.

### 3.2 Σχεδίαση και αρχιτεκτονική λογισμικού

Το πρώτο βήμα που πρέπει να πραγματοποιηθεί είναι αυτό του σχεδιασμού ή της εισαγωγής ενός έτοιμου χωρίου το οποίο θα τεθεί σε μελέτη. Το επόμενο βήμα το οποίο αποτελεί και ένα από τα καθοριστικά βήματα για τον βαθμό ποιότητας της λύσης είναι η διακριτοποίηση του χωρίου. Έτσι επιλέγοντας ένα υπολογιστικό χωρίο δημιουργείται ένα υπολογιστικό πλέγμα. Αυτό διαιρεί το χωρίο σε μικρότερα χωρία (κελιά) στο οποίο επιλύεται η διακριτοποιημένη έκδοση των εξισώσεων συνέχειας. Προσδιορίζεται ο τύπος του ρευστού (νερό, αέρας κλπ) και οι ιδιότητές του (θερμοκρασία, πυκνότητα κλπ). Επιλέγονται οι αριθμητικές παράμετροι και οι αλγόριθμοι επίλυσης ( $k-\epsilon$  model,  $k-\omega$ ,  $k-\omega$  SST). Εν συνεχεία ορίζονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες έτσι ώστε να ακολουθήσουν οι υπολογισμοί για την λύση του προβλήματος καθώς και για την δημιουργία της προσομοίωσης σε γραφικό επίπεδο. Ξεκινώντας από τις αρχικές εκτιμήσεις οι διακριτοποιημένες μορφές των εξισώσεων συνέχειας και Navier-Stokes επιλύονται επαναληπτικά συνήθως στο κέντρο κάθε κελιού. Εάν όλοι οι όροι μεταφέρονταν στο ένα μέρος της εξίσωσης η λύση θα ήταν ακριβής εάν το άθροισμά τους ήταν μηδέν. Ωστόσο, σε μια CFD λύση το αποτέλεσμα δεν μπορεί να είναι ποτέ ακριβώς αλλά να είναι πάρα πολύ κοντά. Μόλις η λύση συγκλίνει οι ροϊκές μεταβλητές

όπως η ταχύτητα και η πίεση οπτικοποιούνται και αναλύονται γραφικά. Οι CFD προσομοιώσεις των τυρβωδών ροών είναι αρκετά δυσκολότερες από εκείνες των στρωτών λόγω του ότι τα κύρια χαρακτηριστικά ενός τυρβώδους πεδίου ροής είναι πάντοτε μη-μόνιμα και τρισδιάστατα και δημιουργούνται τυρβώδεις δίνες. Ως εκ τούτου για να προσομοιάσουμε σύνθετα, υψηλών αριθμών Reynolds, τυρβώδη πεδία ροής, είναι απαραίτητο να κάνουμε κάποιες απλοποιητικές υποθέσεις. Για τον υπολογισμό της ενισχυμένης ανάμιξης και διάχυσης που προκαλούνται από τις τυρβώδεις δίνες θεωρούμε μόνο μόνιμες ασυμπίεστες ροές. Όταν χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο τύρβης η μόνιμη εξίσωση Navier-Stokes αντικαθίσταται από την **μέση κατά Reynolds εξίσωση Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)**. Κάθε ποσότητα αναφέρεται ως άθροισμα μιας μέσης τιμής κατά Reynolds και μιας διακύμανσης που ωστόσο η χρήση των κατάλληλων παραδοχών και ο επιτυχής συνδυασμός πράξεων οδηγούν τις εξισώσεις σε μια νέα μορφή, περισσότερο πρακτική που αφορά τις μέσες τιμές των μεταβλητών.

$$\left(\frac{\vec{v}}{\nabla}\right) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{v} + \nabla (\tau_{ij,turbulent}) \quad [\text{Εξίσωση 15}]$$

### 3.3 Μοντέλο τύρβης K-ω SST

Υπάρχουν πολλά χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης. Τα τρία πιο δημοφιλή είναι το k-ε, k-ω και q-ω. Αυτά καλούνται και μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων επειδή προσθέτουν δύο επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς οι οποίες πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα με τις εξισώσεις για τη μάζα και τη γραμμική ορμή. Το μοντέλο K-ω SST μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαμηλούς αριθμούς Reynolds χωρίς να χρησιμοποιεί κάποια επιπλέον εξίσωση. Το SST μοντέλο επίσης έχει την δυνατότητα να αλλάζει συμπεριφορά, στην ελεύθερη ροή, σε K-ε για να αποφύγει το πρόβλημα του μοντέλου K-ω που είναι ότι το μοντέλο είναι ευαίσθητο στην εισερχόμενη ελεύθερη ροή. [21],[22]

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1-F_1)\sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\beta' k}$$

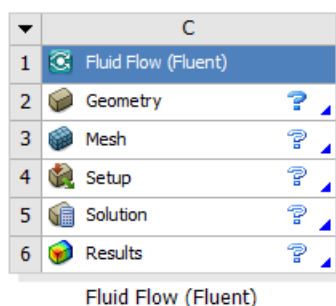
$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

[Εξίσωση 16]

# Κεφάλαιο 4. Υλοποίηση

## 4.1 Πλατφόρμες και προγραμματιστικά εργαλεία

Το **Ansys** διαθέτει αρκετές δυνατότητες για υπολογιστική προσομοίωση, εκτός από τη ροή ρευστού, σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων όπως προσομοίωση ανάφλεξης σε κινητήρα εσωτερικής καύσης, προσομοίωση μετάδοσης ηχητικών κυμάτων, προσομοίωση ανάλυσης τάσεων ή δυναμικής καταπόνησης, κ.ά. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην μελέτη της ροής του αέρα γύρω από το Ahmed body και χρησιμοποιείται το **Fluent**. Το λογισμικό Fluent είναι υπολογιστικό πρόγραμμα της εταιρείας Fluent Inc. του ομίλου Ansys που επιλύει αριθμητικά της εξισώσεις Navier-Stokes για την προσομοίωση θερμικών πεδίων ή πεδίων ροής ρευστών. Στο πακέτο Ansys το Fluent υπάρχει διαθέσιμο είτε ως ενιαίο block που περιλαμβάνει πρόγραμμα σχεδιασμού της γεωμετρίας (με το DesignModeler ή το SpaceClaim), πρόγραμμα δημιουργίας πλέγματος (με το Mesh), πρόγραμμα παραμετροποίησης για την επίλυση του προβλήματος με διαθέσιμες βιβλιοθήκες υλικών, μοντέλων τύρβης, οριακών συνθηκών, το κυρίως πρόγραμμα επίλυσης (δηλαδή το Fluent) και μετεπεξεργαστή για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, είτε τα επιμέρους τμήματα του ξεχωριστά.



Σχήμα 8 Block του Fluent στο περιβάλλον εργασίας του Ansys

Ορισμένες παράμετροι που μπορούν να καθοριστούν στο Fluent για την επίλυση της ροής είναι οι εξής:

- Η επίλυση μόνιμης (steady) ή μη μόνιμης (unsteady) ροής
- Η επιλογή του μοντέλου τύρβης
- Η ενεργοποίηση άλλου μοντέλου ή συναρτήσεων συγκεκριμένες ροές όπως η σπηλαίωση ή όπως συμπιεστές ροές
- Η επιλογή των ρευστών και ο καθορισμός των ιδιοτήτων του είτε άμεσα από το χρήστη είτε από συναρτήσεις
- Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών
- Η επιλογή του αλγορίθμου και των αριθμητικών σχημάτων της επίλυσης για τη συσχέτιση των μεγεθών της ροής όπως ταχύτητα και πίεση
- Οι αρχικές συνθήκες
- Το σφάλμα της λύσης
- Η καταγραφή μεγεθών όπως η άντωση και η οπισθέλκουσα ή η ροπή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το Fluent που περιλαμβάνεται στο πακέτο **Ansys Student 2021R1**.

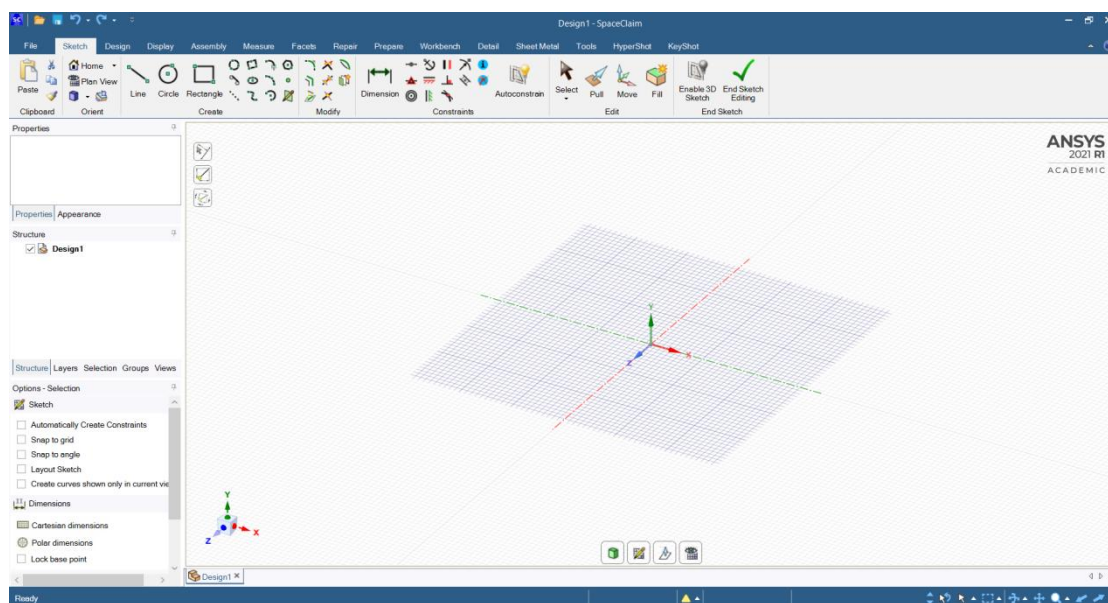
Οι ελάχιστες απαιτήσεις της εφαρμογής αυτής σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα της Ansys (<https://www.ansys.com/>) είναι:

- Microsoft Windows 10, 64-bit
- Processor(s): Workstation class
- 4 GB RAM
- 25 GB hard drive space
- Ο υπολογιστής πρέπει να έχει C:/ drive present
- Κάρτα γραφικών: Professional workstation class 3-D
- OpenGL-capable

## 4.2 Δημιουργία Γεωμετρίας στο SpaceClaim για το

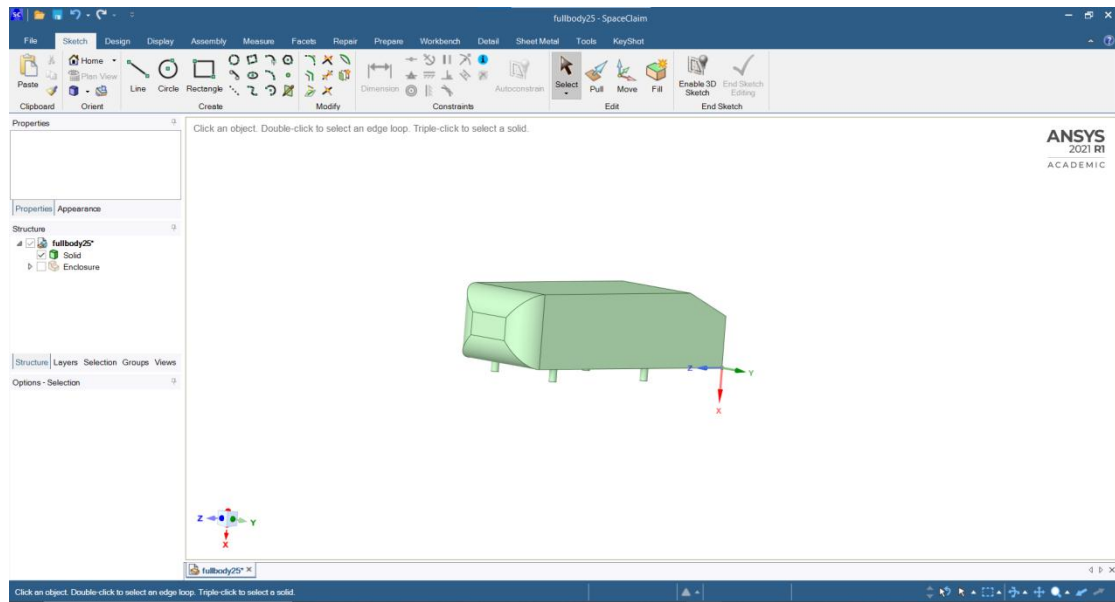
### Ahmed body

Το Ansys διαθέτει το SpaceClaim για να σχεδιαστούν είτε δισδιάστατες είτε τρισδιάστατες γεωμετρίες. Στη συγκεκριμένη μελέτη όλες οι γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν σχεδιάστηκαν σε αυτό το περιβάλλον (Σχήμα 10).



Σχήμα 9 Περιβάλλον εργασίας του SpaceClaim

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ahmed body που αναφέρθηκαν και στο σχήμα 7 η τελική γεωμετρία του αυθεντικού σώματος που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση και ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων φαίνεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 10 3-D γεωμετρία του Ahmed body

Στη συνέχεια με την εντολή Enclosure που βρίσκετε στην περιοχή Tools δημιουργείται ο όγκος ελέγχου γύρω από το εξεταζόμενο σώμα. Οι διαστάσεις του όγκου ελέγχου του ύψους είναι 507mm κατά μήκος 1566mm και από τις δύο κατευθύνσεις και τέλος κατά πλάτος 597mm αντίστοιχα (Σχήμα 12).

Enclosure	
Type	Box
Cushion -X	507mm
Cushion +X	0
Cushion -Y	597mm
Cushion +Y	597mm
Cushion -Z	1566mm
Cushion +Z	1566mm

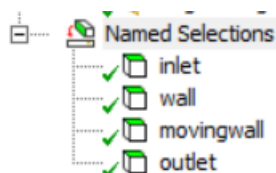
Σχήμα 11 Διαστάσεις του όγκου ελέγχου για το Ahmed body

## 4.3 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh) για το

### Ahmed body

Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας του σχεδίου στο περιβάλλον του SpaceClaim ακολούθησε η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος γύρω από το αποτύπωμα του σώματος στον όγκο ελέγχου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της ροής γύρω από το σώμα. Το πλέγμα είναι τύπου μη-δομημένο (unstructured) από τετραεδρικά στοιχεία (tetrahedrons). Στη συνέχεια εισήχθη με την εντολή Inflation στην όψη του σώματος που θέλουμε σε σχέση με τον όγκο ελέγχου για να εξοικονομήσουμε κάποιο αριθμό στοιχείων του πλέγματος καθώς στην φοιτητική έκδοση του Ansys Fluent υπάρχει όριο στοιχείων 512000 και δημιουργεί πυκνά δομημένα πλέγματα γύρω από επιλεγμένες επιφάνειες. Το σημείο αυτό είναι στο πίσω μέρος του οχήματος στην επιφάνεια που υπάρχει η κλίση των 25 μοιρών. Έπειτα με την εντολή Edge sizing μίκρυνε η γεωμετρία του πλέγματος σε αυτό το σημείο, το οποίο συνεισφέρει στην ακρίβεια των υπολογισμών.

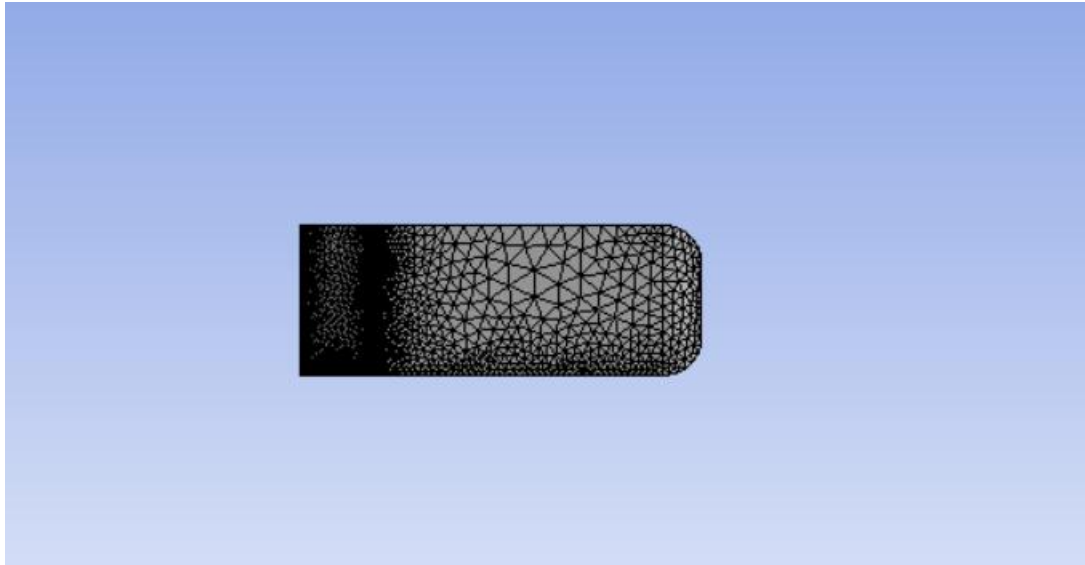
Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία των ορίων του πλέγματος. Αυτό εξυπηρετεί την αναγνώρισή τους από το Fluent για την δημιουργία οριακών συνθηκών. Η πρόσοψη του εξωτερικού όγκου ελέγχου ονομάζεται inlet, η πίσω όψη outlet, οι εξωτερικοί τοίχοι walls οι οποίοι είναι ακίνητοι, και ο κάτω από το σώμα εξωτερικός τοίχος που αντιπροσωπεύει το έδαφος ως movingwall.



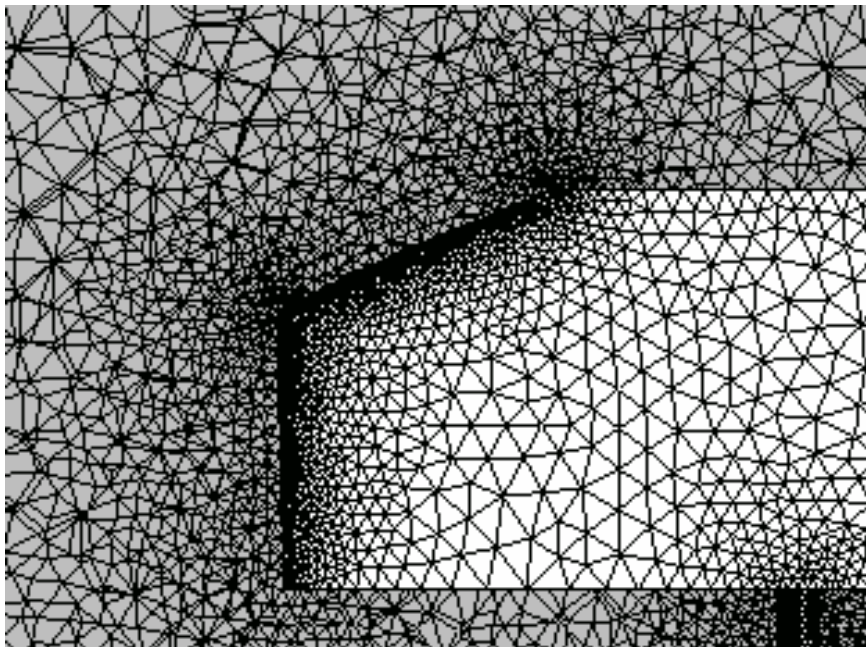
Σχήμα 12 Δημιουργία named selections στο περιβάλλον του Fluent

Όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 14,15,16&17 η πύκνωση του πλέγματος επικεντρώνεται στο πίσω μέρος του οχήματος στον Y,X και Z άξονα αντίστοιχα για μεγαλύτερη ακρίβεια των υπολογισμών και στα σχήματα 18,19 και 20 το υπολογιστικό πλέγμα του συμμετρικού Ahmed body.

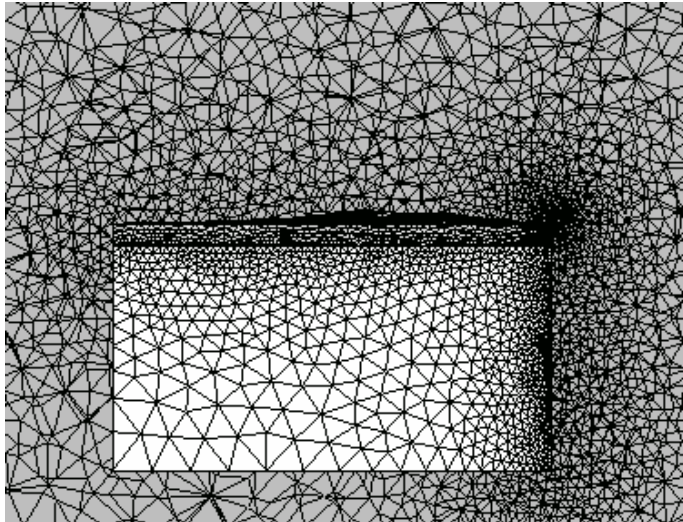




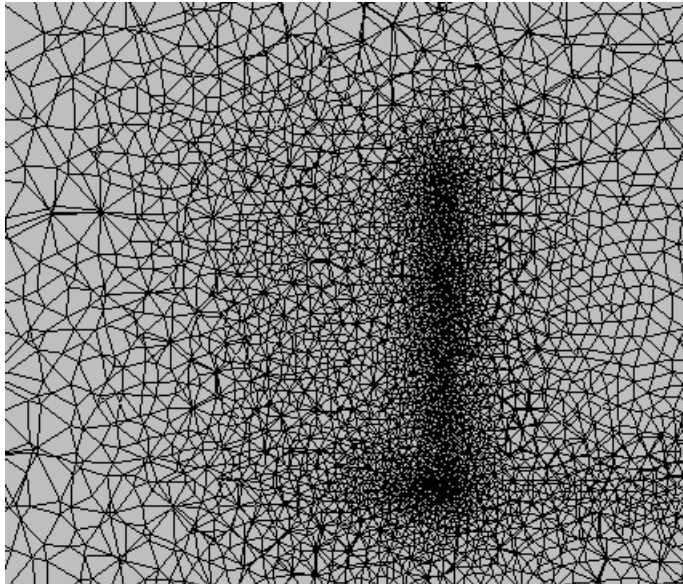
Σχήμα 13 Πλέγμα του εξεταζόμενου σώματος



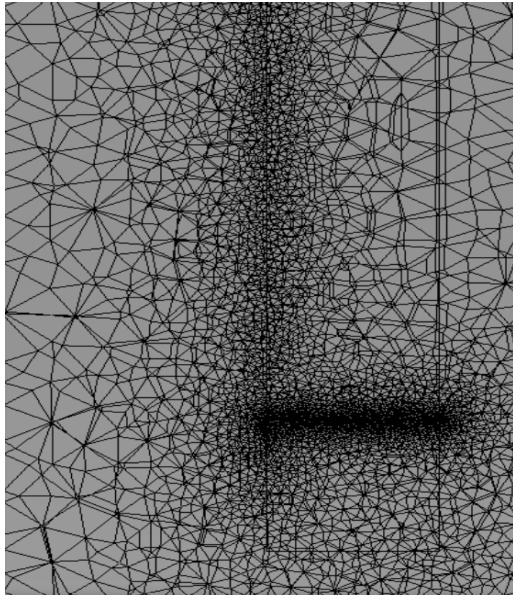
Σχήμα 14 υπολογιστικό πλέγμα κατά μήκος του Y άξονα



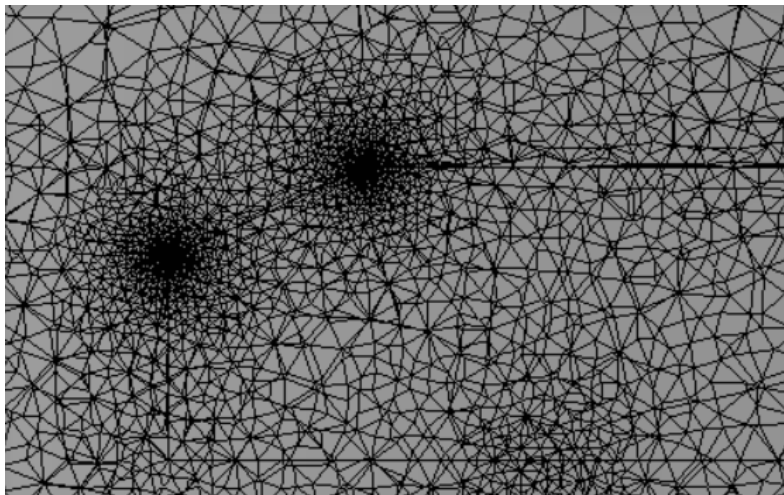
Σχήμα 15 Υπολογιστικό πλέγμα κατά μήκος του X άξονα



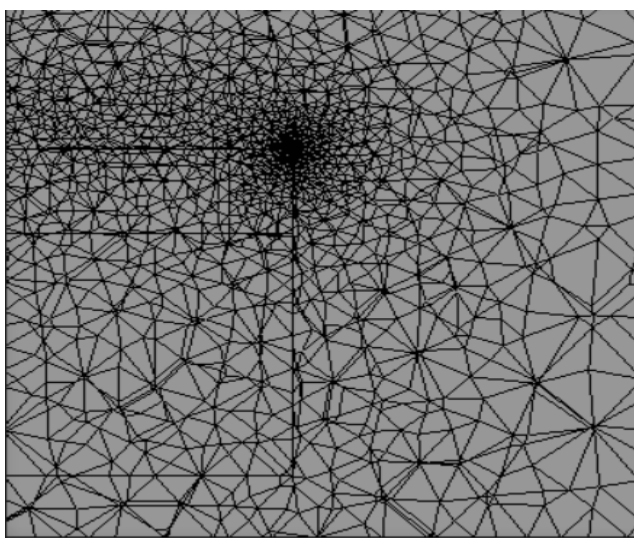
Σχήμα 16 Υπολογιστικό πλέγμα κατά μήκος του Z άξονα στο πίσω μέρος όπου υπάρχει η πύκνωση



Σχήμα 17 Υπολογιστικό πλέγμα συμμετρικού οχήματος κατά μήκος του Z άξονα στο πίσω μέρος όπου υπάρχει η πύκνωση



Σχήμα 18 Υπολογιστικό πλέγμα συμμετρικού οχήματος κατά μήκος του Y άξονα



Σχήμα 19 Υπολογιστικό πλέγμα συμμετρικού οχήματος κατά μήκος του X άξονα

## 4.4 Εισαγωγή Παραμέτρων στο Fluent για το Ahmed

### body

Αφού κατασκευάστηκε το υπολογιστικό πλέγμα στο Mesh γίνεται η εκκίνηση του Fluent έτσι ώστε να οριστούν οι παράμετροι της υπολογιστικής επίλυσης της ροής γύρω από το όχημα. Ξεκινώντας εμφανίζεται το μήνυμα Fluent Launcher και ορίζονται οι επιλογές του Fluent. Επιλέγεται μονή ακρίβεια (Single Precision) στις μετρήσεις αφού η γεωμετρία του σώματος Ahmed body δεν είναι πολύπλοκη. Ακόμη, από τις επιλογές της επεξεργασίας (Processing Options) επιλέγεται η παράλληλη επεξεργασία (Parallel Solver). Μετά την εκκίνηση του Fluent και την εισαγωγή του πλέγματος σε αυτό πραγματοποιείται ο καθορισμός των συνθηκών του προβλήματος όπως το ρευστό μέσο και οι ιδιότητες του, οι οριακές συνθήκες, το μέγεθος της ταχύτητας, αν η επίλυση αφορά μόνιμη ή μεταβατική ροή κ.α. Από την καρτέλα Setting Up Physics επιλέγονται ο τύπος της επίλυσης, το σύστημα αναφοράς, και αν η επίλυση αφορά σταθερό χρόνο σε μόνιμη κατάσταση ή μεταβατική ροή. Η προσομοίωση ορίζεται Pressure – Based, μόνιμης ροής (steady-state) και το σύστημα αναφοράς επιλέχθηκε σταθερό. Από το μενού Models/Viscous επιλέγεται το μοντέλο τύρβης. Η επίλυση γίνεται με το μοντέλο τύρβης k- $\omega$  SST (Σχήμα 21). Στο μενού Materials, Fluid επιλέγεται το ρευστό που δεν είναι άλλο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και ορίζονται και αποθηκεύονται οι τιμές  $1.225 \text{ kg/m}^3$  και  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kgm/s}$  για την πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες.

Στο μενού Boundary Conditions τίθενται οι οριακές συνθήκες στον όγκο ελέγχου. Αυτές καθορίζονται αυτόματα με βάση τις ονομασίες που δόθηκαν στις Named Selections κατά τη δημιουργία του πλέγματος. Η επιφάνεια που ονομάστηκε inlet κατά τη δημιουργία του πλέγματος ορίστηκε ως είσοδος ταχύτητας (velocity-inlet). Σε αυτή κάθε φορά γίνεται ο ορισμός της ταχύτητας και του ποσοστού της έντασης της τύρβης (Σχήμα 22). Η οριακή συνθήκη του τοίχου που προσομοιάζει τον δρόμο είναι η ταχύτητα στα  $40 \text{ m/s}$  με συνθήκη μη-ολίσθησης (Σχήμα 23). Οι τιμές αναφοράς έμειναν ως έχουν εκτός από εμβαδόν της πρόσοψης του σώματος το οποίο είναι  $0,183654 \text{ m}^2$  (Σχήμα 24).

**F** Viscous Model
✕

<p><b>Model</b></p> <p><input type="radio"/> Inviscid</p> <p><input type="radio"/> Laminar</p> <p><input type="radio"/> Spalart-Allmaras (1 eqn)</p> <p><input type="radio"/> k-epsilon (2 eqn)</p> <p><input checked="" type="radio"/> k-omega (2 eqn)</p> <p><input type="radio"/> Transition k-kl-omega (3 eqn)</p> <p><input type="radio"/> Transition SST (4 eqn)</p> <p><input type="radio"/> Reynolds Stress (7 eqn)</p> <p><input type="radio"/> Scale-Adaptive Simulation (SAS)</p> <p><input type="radio"/> Detached Eddy Simulation (DES)</p> <p><input type="radio"/> Large Eddy Simulation (LES)</p> <p><b>k-omega Model</b></p> <p><input type="radio"/> Standard</p> <p><input type="radio"/> GEKO</p> <p><input type="radio"/> BSL</p> <p><input checked="" type="radio"/> SST</p> <p><b>k-omega Options</b></p> <p><input type="checkbox"/> Low-Re Corrections</p> <p><b>Options</b></p> <p><input type="checkbox"/> Curvature Correction</p> <p><input type="checkbox"/> Corner Flow Correction</p> <p><input type="checkbox"/> Production Kato-Launder</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Production Limiter</p> <p><b>Transition Options</b></p> <p>Transition Model <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">none</span></p>	<p><b>Model Constants</b></p> <p>Alpha*_inf <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">1</span></p> <p>Alpha_inf <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">0.52</span></p> <p>Beta*_inf <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">0.09</span></p> <p>a1 <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">0.31</span></p> <p>Beta_i (Inner) <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">0.075</span></p> <p>Beta_i (Outer) <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">0.0828</span></p> <p>TKE (Inner) Prandtl # <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">1.176</span></p> <p>TKE (Outer) Prandtl # <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">1</span></p> <p>SDR (Inner) Prandtl # <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">2</span></p> <p>SDR (Outer) Prandtl # <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">1.168</span></p> <p>Production Limiter Clip Factor <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;"> </span></p> <p><b>User-Defined Functions</b></p> <p>Turbulent Viscosity <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">none</span></p>
--	--

OK
Cancel
Help

Σχήμα 20 K-ω SST



**F** Velocity Inlet ×

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method **Magnitude, Normal to Boundary**

Reference Frame **Absolute**

Velocity Magnitude [m/s] **40**

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] **0**

**Turbulence**

Specification Method **Intensity and Viscosity Ratio**

Turbulent Intensity [%] **0.25**

Turbulent Viscosity Ratio **10**

**Apply** **Close** **Help**

Σχήμα 21 Ταχύτητα εισόδου

**F** Wall ×

Zone Name  
movingwall

Adjacent Cell Zone  
fff-enclosure\_enclosure

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure

**Wall Motion**

Stationary Wall  
 Moving Wall

**Motion**

Relative to Adjacent Cell Zone Speed [m/s] **40**

Absolute

**Direction**

Translational  
 Rotational  
 Components

X **1**

Y **0**

Z **0**

**Shear Condition**

No Slip  
 Specified Shear  
 Specularity Coefficient  
 Marangoni Stress

**Wall Roughness**

**Roughness Models**

Standard  
 High Roughness (Icing)

**Sand-Grain Roughness**

Roughness Height [m] **0**

Roughness Constant **0,5**

**Apply** **Close** **Help**

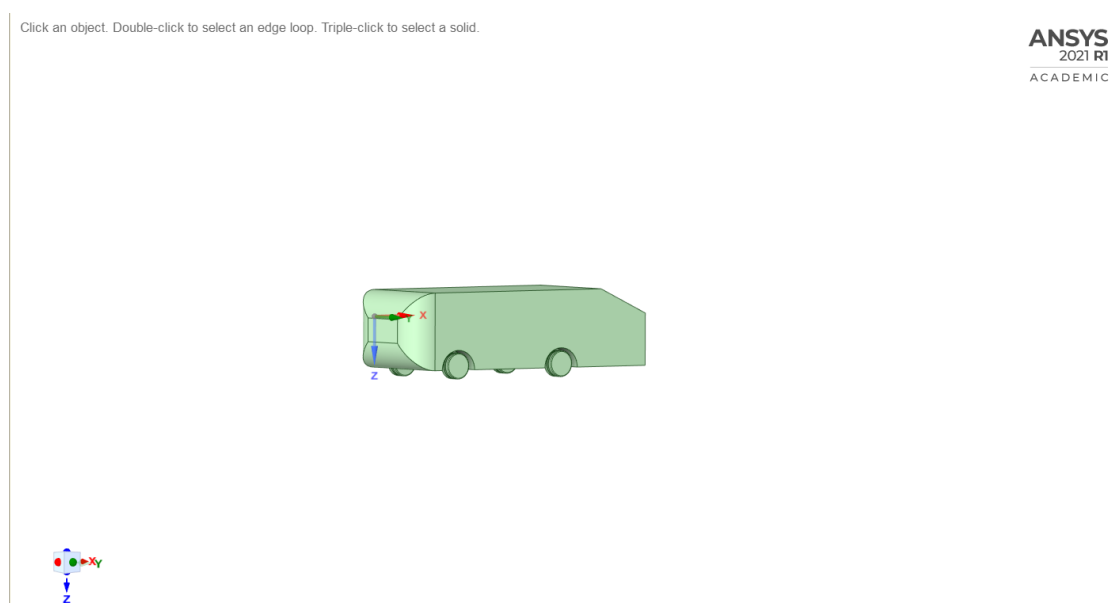
Σχήμα 22 Οριακές συνθήκες κινούμενου τοίχους-δρόμου

Reference Values	
Area [m <sup>2</sup> ]	0.183654
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	1
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	1
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

Σχήμα 23 Τιμές αναφορές

## 4.5 Δημιουργία Γεωμετρίας στο SpaceClaim για το τροποποιημένο Ahmed body

Στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Ansys ,SpaceClaim, αρχικά σχεδιάστηκε ο τροχός που ενσωματώνεται στο όχημα. Ο τροχός έχει διάμετρο 96mm και πλάτος 41mm. Επίσης σχεδιάστηκε ένας κύλινδρος διαμέτρου 10mm ο οποίος προσομοιώνει το ψαλίδι του τροχού το οποίο το συνδέει με το υπόλοιπο ξεταζόμενο σώμα. Η απόσταση των τροχών κατά μήκος του οχήματος παραμένει στα 470mm από το κέντρο τους όπως και τα υποστυλώματα του αρχικού Ahmed body. Η τελική γεωμετρία του τροποποιημένου Ahmed body φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 24 Τελική μορφή τροποποιημένου Ahmed body

Οι τροχοί ενσωματώθηκαν στο υπόλοιπο σώμα με την εντολή Assembly. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ο όγκος ελέγχου (Enclosure) με τις εξής διαστάσεις:

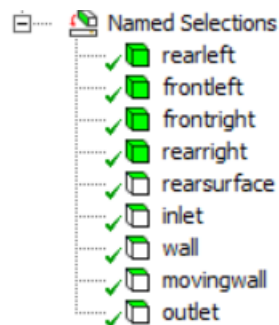
Enclosure	
Type	Box
Cushion -X	2300mm
Cushion +X	2300mm
Cushion -Y	1000mm
Cushion +Y	1000mm
Cushion -Z	1000mm
Cushion +Z	34,2mm

Σχήμα 25 Διαστάσεις όγκου ελέγχου τροποποιημένου σώματος

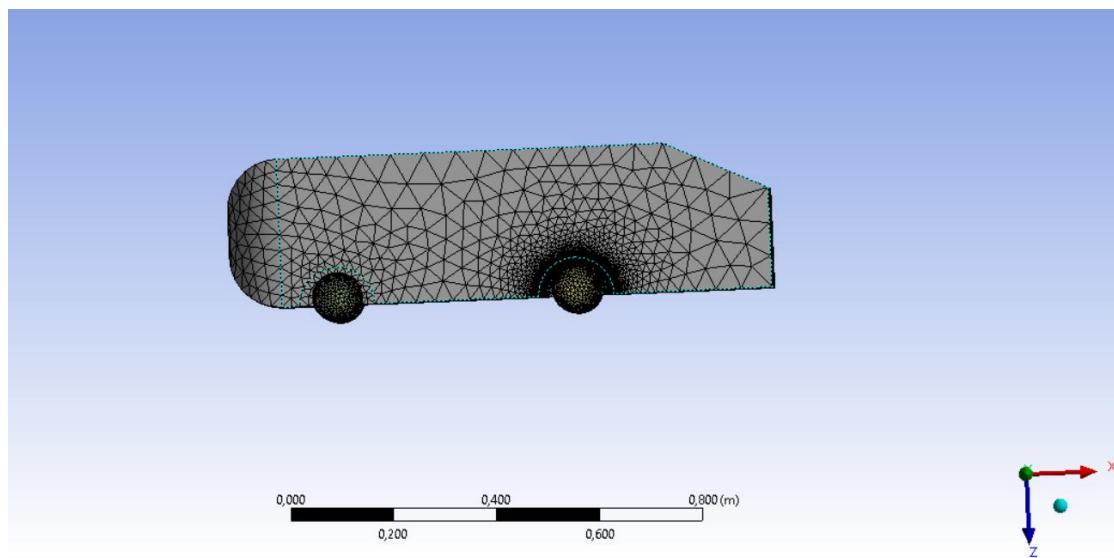


## 4.6 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh) για το τροποποιημένο Ahmed body

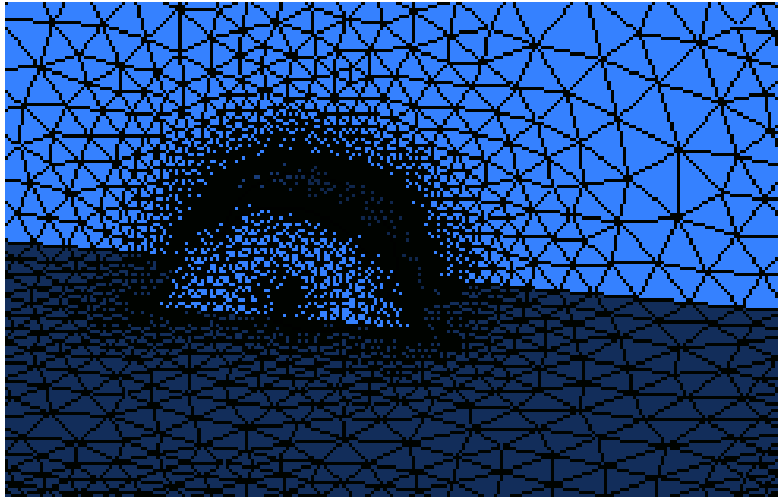
Η πορεία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή του αρχικού σώματος δηλαδή, το πλέγμα είναι τύπου μη-δομημένο (unstructured) από τετραεδρικά στοιχεία (tetrahedrons). Στη συνέχεια εισήχθη με την εντολή Inflation στην όψη του σώματος που θέλουμε, στην προκειμένη περίπτωση στο εσωτερικό του τροχού, σε σχέση με τον όγκο ελέγχου. Στο βήμα για την ονομασία και θέση των ορίων του πλέγματος έχουν προστεθεί οι τέσσερις τροχοί καθώς πρέπει να οριστεί η περιστροφική τους κίνηση εφόσον θέλουμε μία προσομοίωση που αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα.



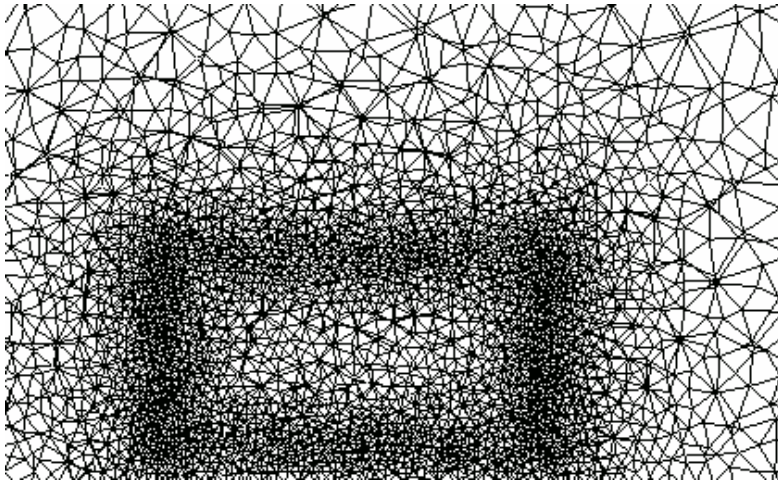
Σχήμα 26 Δημιουργία named selections



Σχήμα 27 Πλέγμα εστιασμένης πυκνώσης στο τροχό που είναι υπό εξέταση



Σχήμα 28 Υπολογιστικό πλέγμα στο θόλο του τροχού

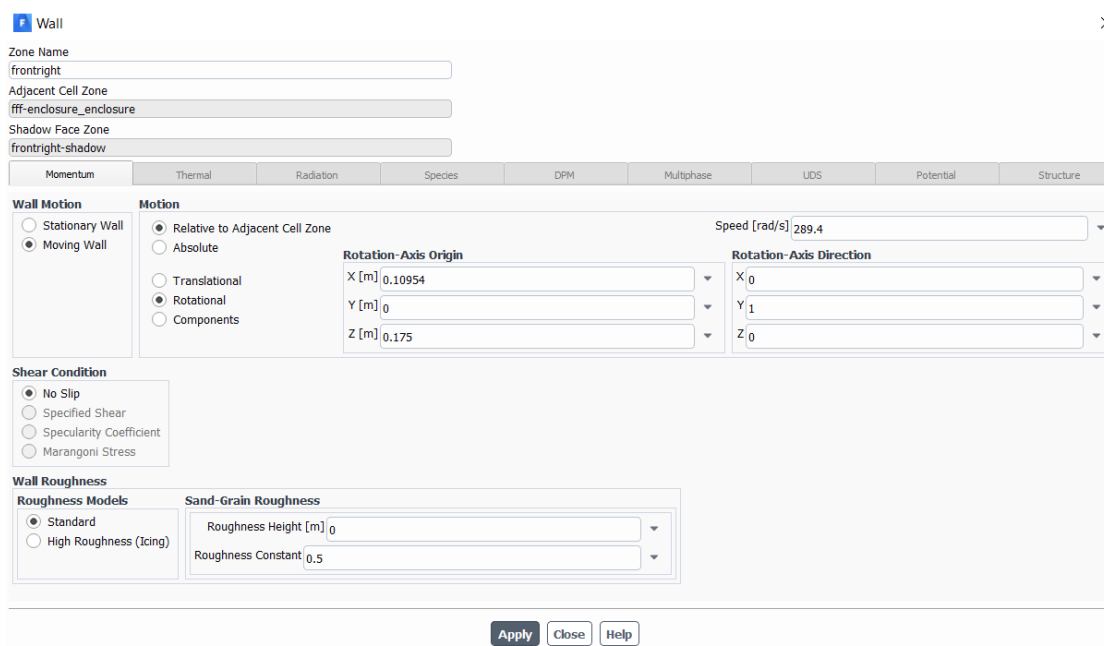


Σχήμα 29 Υπολογιστικό πλέγμα στο πίσω μέρος του οχήματος

## 4.7 Εισαγωγή Παραμέτρων για το τροποποιημένο

### Ahmed body

Η διαφορά των παραμέτρων που εισήχθησαν είναι στις οριακές συνθήκες όπου αλλάζει η ταχύτητα εισόδου του αέρα. Οι ταχύτητες όπου γίνεται η μελέτη είναι 50,90 και 130 km/h. Επίσης στις οριακές συνθήκες πλέον έχουν προστεθεί οι τροχοί όπου πρέπει να θέσουμε την περιστροφική τους ταχύτητα όπου είναι 289.38, 520.84 και 692.3 rad/s για τις αντίστοιχες ταχύτητες καθώς και το κέντρο περιστροφής των τροχών.

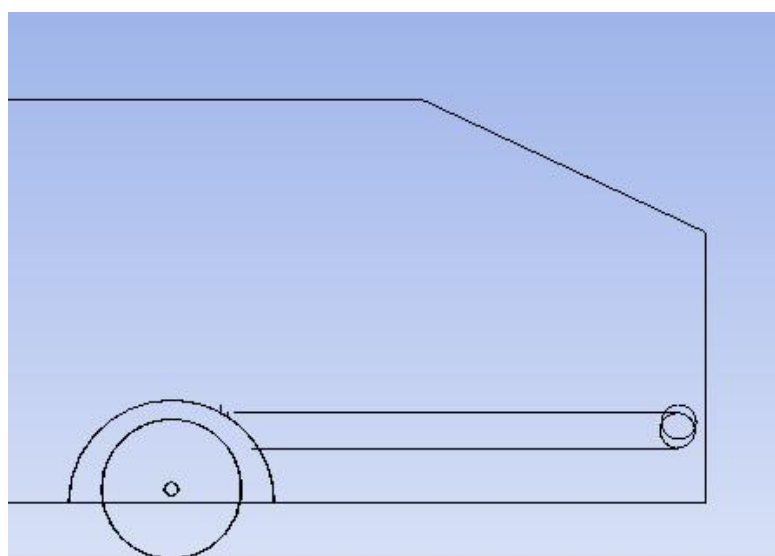


The image shows the 'Wall' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Zone Name' is 'frontright'. The 'Adjacent Cell Zone' is 'fff-enclosure\_enclosure' and the 'Shadow Face Zone' is 'frontright-shadow'. The 'Momentum' tab is selected. Under 'Wall Motion', 'Moving Wall' is chosen. The 'Motion' section is set to 'Relative to Adjacent Cell Zone' with a 'Speed [rad/s]' of 289.4. The 'Rotation-Axis Origin' is defined by X [m] = 0.10954, Y [m] = 0, and Z [m] = 0.175. The 'Rotation-Axis Direction' is defined by X = 0, Y = 1, and Z = 0. Under 'Shear Condition', 'No Slip' is selected. Under 'Wall Roughness', 'Standard' is selected with a 'Roughness Height [m]' of 0 and a 'Roughness Constant' of 0.5. Buttons for 'Apply', 'Close', and 'Help' are at the bottom.

Σχήμα 30 Οριακή συνθήκη τροχών στα 50km/h

## 4.8 Δημιουργία Γεωμετρίας στο SpaceClaim για το τροποποιημένο Ahmed body με αγωγό εκροής

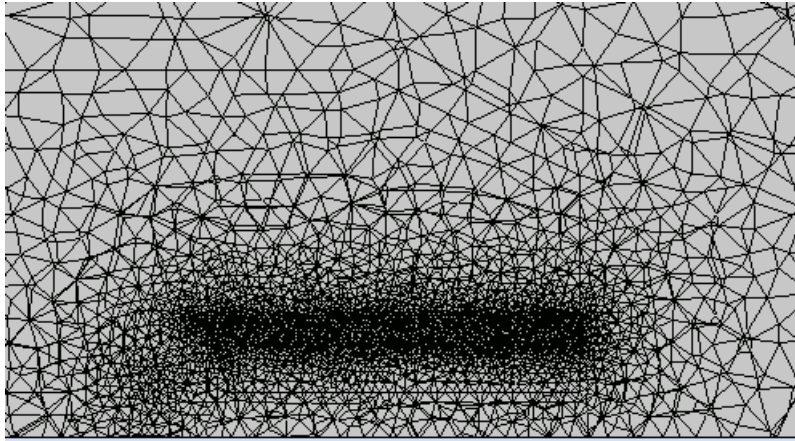
Η διαδικασία του σχεδιασμού από το σχεδιαστικό περιβάλλον Spaceclaim του Ansys παρέμεινε η ίδια όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.7 με την μόνη διαφορά ότι προστέθηκε ένα αγωγό εκροής σε κάθε θόλο των πίσω τροχών διαμέτρου 27mm με έξοδο στο πίσω μέρος του οχήματος. Το σημείο στο οποίο τοποθετήθηκε η οπή είναι εκεί όπου τα διανύσματα ταχύτητας της ροής από την ανακυκλοφορία λόγω των τροχών έχουν τις μέγιστες τιμές με κέντρο 50mm από το τέλος του οχήματος.



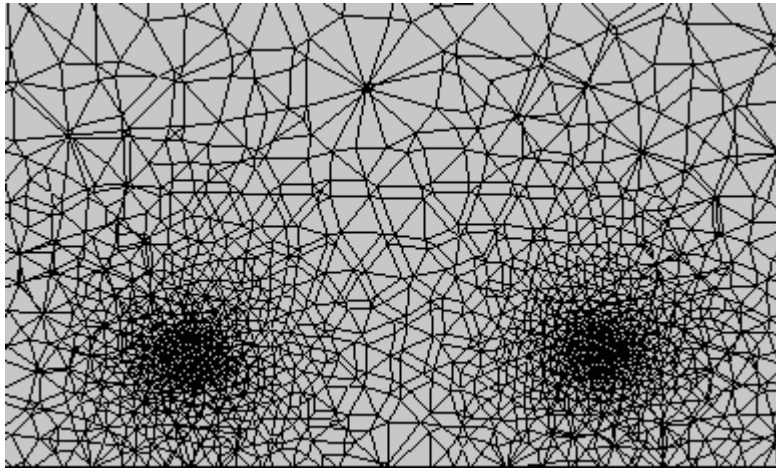
Σχήμα 31 Ahmed body με αγωγό εκροής

## 4.9 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh) για το τροποποιημένο Ahmed body

Η πορεία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή του αρχικού σώματος δηλαδή, το πλέγμα είναι τύπου μη-δομημένο (unstructured) από τετραεδρικά στοιχεία (tetrahedrons). Στη συνέχεια εισήχθη με την εντολή Inflation στην όψη του σώματος που θέλουμε, στην προκειμένη περίπτωση στο εσωτερικό του τροχού, σε σχέση με τον όγκο ελέγχου. Στο βήμα για την ονομασία και θέτηση των ορίων του πλέγματος έχουν προστεθεί οι τέσσερις τροχοί καθώς πρέπει να οριστεί η περιστροφική τους κίνηση εφόσον θέλουμε μία προσομοίωση που αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα.



Σχήμα 32 Υπολογιστικό πλέγμα του αγωγού εκροής



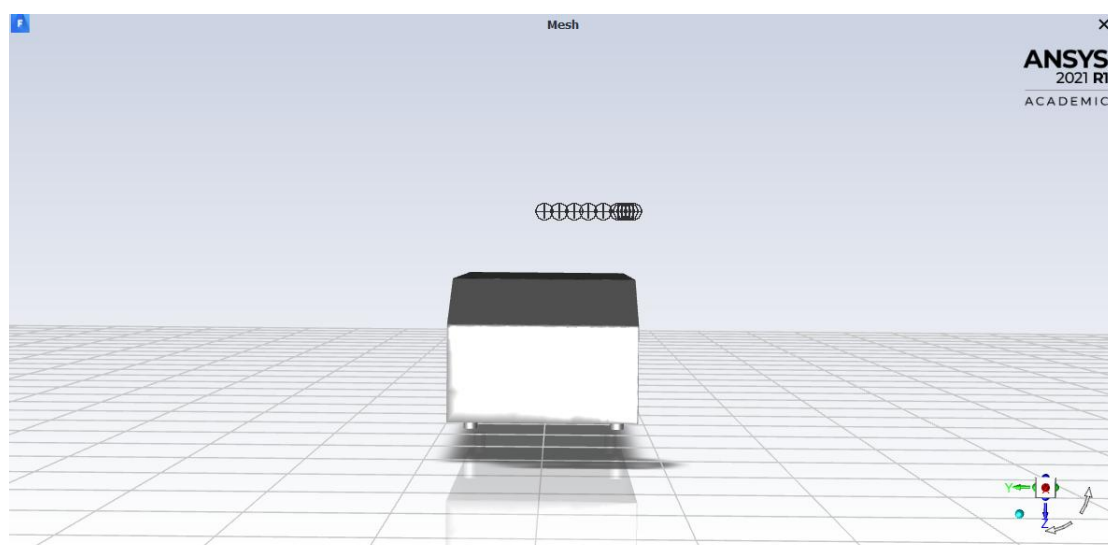
Σχήμα 33 Υπολογιστικό πλέγμα στην έξοδο των αγωγών

## 4.10 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης με αυτά από το πείραμα που παρουσιάζονται στο ERCOFTAC. Αρχικά έγινε μία πρώτη σύγκριση και υπολογισμός του σφάλματος σε 10 σημεία ως προς το συντελεστή πίεσης  $C_p$ . Τα σημεία αυτά τοποθετούνται στο πίσω μέρος του οχήματος και αρχίζουν από τον άξονα συμμετρίας και κινούνται προς τα δεξιά του (Σχήμα 35). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θέσεις των σημείων και τα αποτελέσματα του συντελεστή πίεσης  $C_p$  από το ERCOFTAC(Πίνακας 1).

Πίνακας 1 Τοποθεσία σημείων και τιμές  $C_p$  από ERCOFTAC

	X	Y	Z	$C_p$
1	0,000	0,000	0,232	-0,192
2	0,000	-0,030	0,232	-0,190
3	0,000	-0,060	0,232	-0,185
4	0,000	-0,090	0,232	-0,179
5	0,000	-0,120	0,232	-0,177
6	0,000	-0,150	0,232	-0,174
7	0,000	-0,158	0,232	-0,172
8	0,000	-0,165	0,232	-0,170
9	0,000	-0,173	0,232	-0,168
10	0,000	-0,180	0,232	-0,169



Σχήμα 34 Τοποθεσία σημείων μέτρησης συντελεστή πίεσης  $C_p$

Από την εκτέλεση της προσομοίωσης με τις ορισμένες οριακές και αρχικές συνθήκες (βλ. 4.4), τα αποτελέσματα που λάβαμε είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 2).

**Πίνακας 2 Πίνακας αποτελεσμάτων πίεσης και συντελεστή πίεσης της προσομοίωσης**

Xm	Ym	Zm	Pressure	Cpm
0,944	0,195	-0,329	-127,184	-0,191
0,944	0,165	-0,329	-126,46	-0,190
0,944	0,135	-0,329	-124,45	-0,188
0,944	0,105	-0,329	-122,43	-0,186
0,944	0,075	-0,329	-120,085	-0,184
0,944	0,045	-0,329	-118,649	-0,182
0,944	0,037	-0,329	-118,051	-0,182
0,944	0,030	-0,329	-117,498	-0,181
0,944	0,022	-0,329	-116,884	-0,180
0,944	0,015	-0,329	-116,558	-0,180

Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα το σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε με την σχέση:

$$Error = \left( \frac{|Cp - Cpm|}{|Cp|} \right) \text{ [Εξίσωση 14]}$$

Και είναι εκφρασμένο σε %.

**Πίνακας 3 Σφάλμα μετρήσεων Cp με ολόκληρο Ahmed body**

Σφάλμα
1%
0%
2%
4%
4%
5%
6%
6%
7%
7%

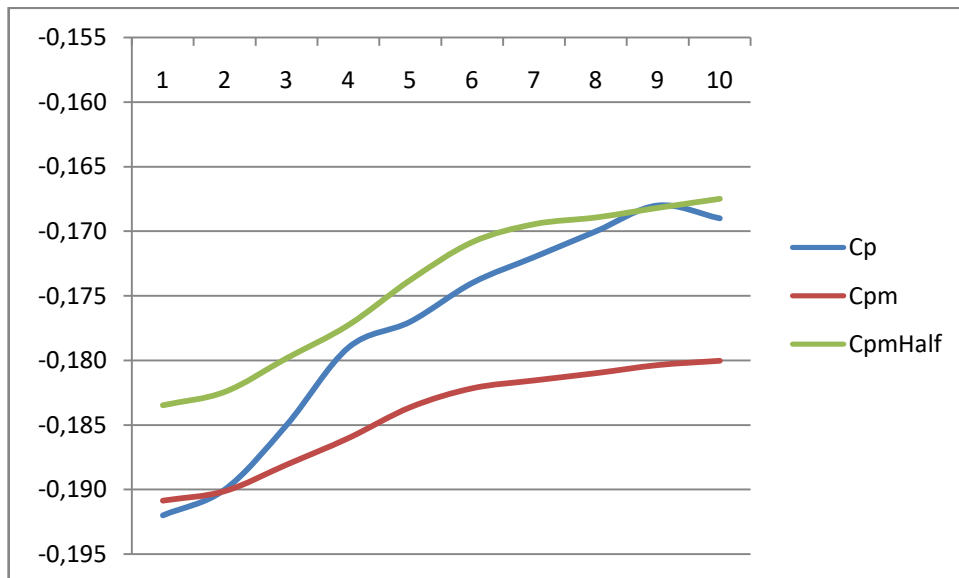
Όπως βλέπουμε στον Πίνακα 3 το ελάχιστο σφάλμα των μετρήσεων είναι 0% και το μέγιστο 7% στα δύο τελευταία σημεία.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα σφάλματα των μετρήσεων του συμμετρικού εξεταζόμενου σώματος Ahmed body όπου το ελάχιστο σφάλμα είναι πάλι 0% και μέγιστο 4%.

Πίνακας 4 Σφάλμα μετρήσεων συμμετρικού Ahmed body

Σφάλμα
4%
4%
3%
1%
2%
2%
1%
1%
0%
1%

Στη συνέχεια παραθέτονται τα διαγράμματα που δείχνουν την συμπεριφορά του συντελεστή πίεσης. Παρόλο το σφάλμα των μετρήσεων, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα η συμπεριφορά των τιμών, δηλαδή η αύξηση ή μείωσή τους είναι παρόμοια.



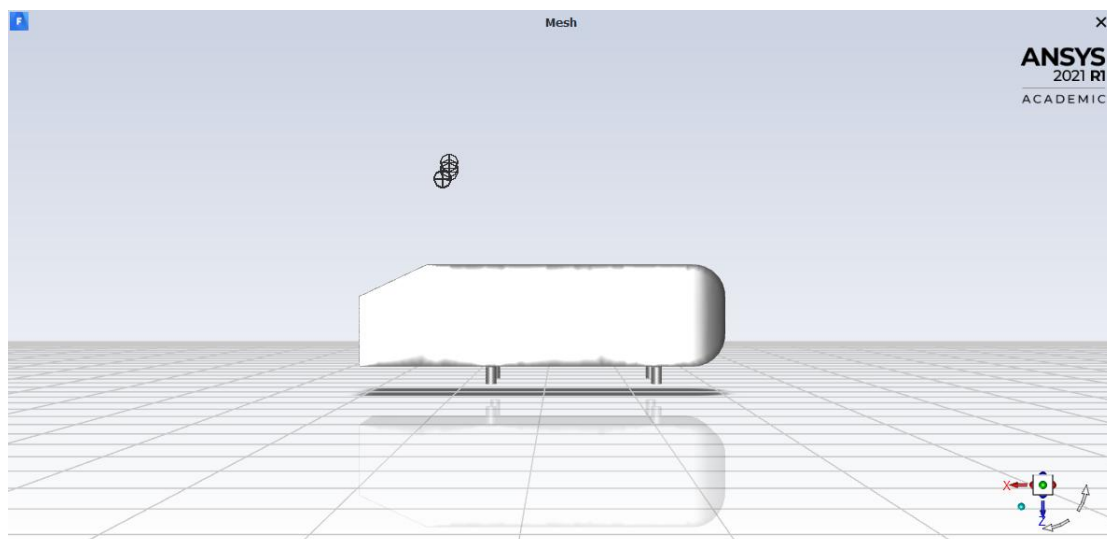
Σχήμα 35 Συμπεριφορά Cp από ERCOFTAC και πειραματικές μετρήσεις



Στη συνέχεια έγινε σύγκριση σε έξι (6) σημεία στη ταχύτητα της ροής τόσο του συμμετρικού όσο και σε ολόκληρο το όχημα (φαίνονται στο Σχήμα 37).

**Πίνακας 5 Τοποθεσία σημείων και τιμή της ταχύτητας από ERCOFTAC**

x[mm]	y[mm]	z[mm]	U[m/s]
-243,000	0,000	363,000	48,147
-243,000	0,000	373,000	47,798
-243,000	0,000	388,000	47,207
-223,000	0,000	339,700	38,375
-223,000	0,000	340,700	40,929
-223,000	0,000	341,700	42,532



**Σχήμα 36 Τοποθεσία σημείων για την σύγκριση της ταχύτητας**

**Πίνακας 6 Αποτελέσματα ταχύτητας προσομοίωσης ολόκληρου σώματος**

xm[mm]	ym[mm]	zm[mm]	Um[m/s]
701,000	194,500	-462,000	44,917
701,000	194,500	-472,000	44,837
701,000	194,500	-487,000	44,734
721,000	194,500	-438,700	44,776
721,000	194,500	-439,700	44,764
721,000	194,500	-440,700	44,752

**Πίνακας 7 Θέση και ταχύτητα από ERCOFTAC για το συμμετρικό όχημα**

x[mm]	y[mm]	z[mm]	U[m/s]
-243,000	-195,000	340,000	42,960
-243,000	-195,000	343,000	45,130
-243,000	-195,000	348,000	46,020
-243,000	-195,000	358,000	45,990
-243,000	-195,000	388,000	45,120
-223,000	-195,000	340,000	45,200

**Πίνακας 8 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το συμμετρικό σώμα**

xm[mm]	ym[mm]	zm[mm]	Um[m/s]
701,000	0,000	-439,000	44,223
701,000	0,000	-442,000	44,205
701,000	0,000	-447,000	44,176
701,000	0,000	-457,000	44,118
701,000	0,000	-487,000	43,964
721,000	0,000	-439,000	44,190

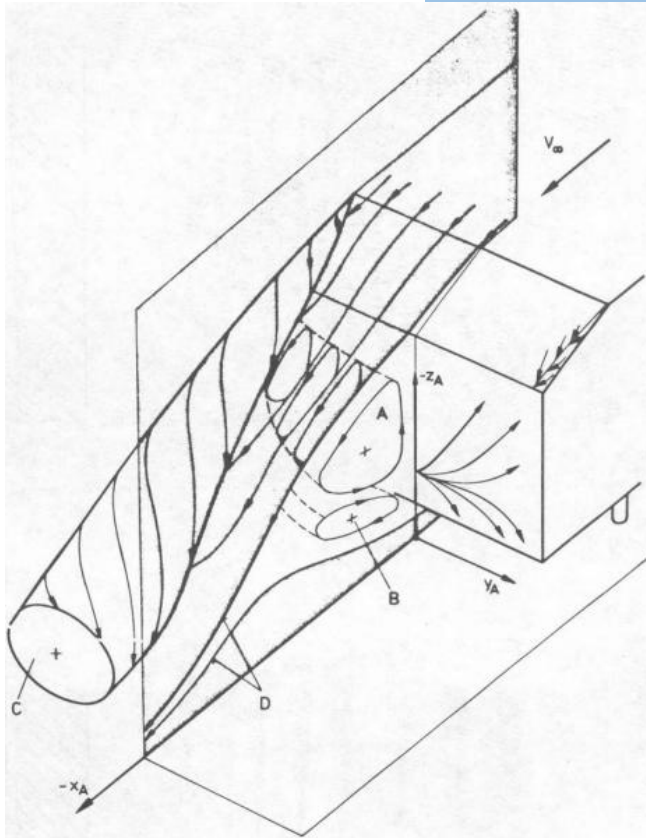
Το μέγιστο σφάλμα των μετρήσεων της ταχύτητας ολόκληρου του εξεταζόμενου σώματος είναι 17% και ελάχιστο 5% (Πίνακας 9) ενώ το σφάλμα των μετρήσεων της ταχύτητας στο συμμετρικό όχημα είναι 4% και 2% αντίστοιχα (Πίνακας 10).

**Πίνακας 9 Σφάλμα μετρήσεων ταχύτητας προσομοίωσης**

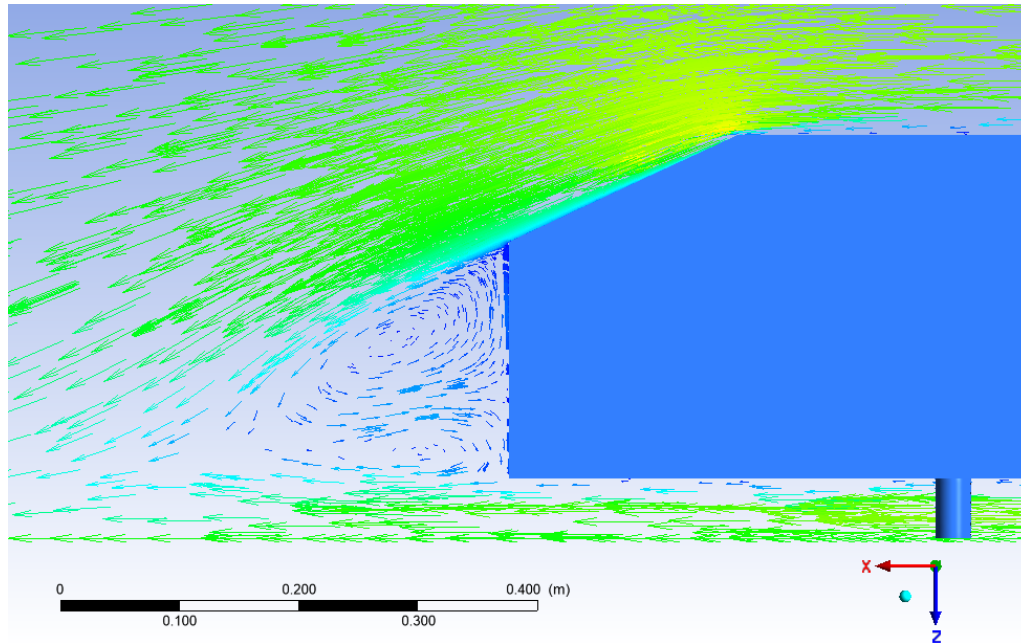
Σφάλμα
7%
6%
5%
17%
9%
5%

Πίνακας 10 Σφάλμα μετρήσεων ταχύτητας συμμετρικού σώματος

Σφάλμα Συμμετρικού σχήματος
3%
2%
4%
4%
3%
2%



Σχήμα 37 Horseshoe vortex system in wake Ahmed et al. (1984)



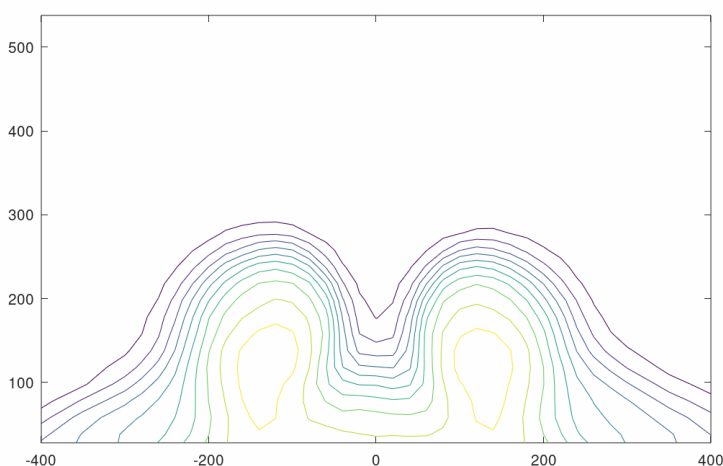
**Σχήμα 38 Horseshoe vortex system in wake computational**

Το στρώμα διάτμησης που προέρχεται από την κεκλιμένη πλευρική άκρη συνεχίζει σε διαμήκης δίνη με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που παρατηρείται στο πλάι λόγω της χαμηλής αναλογίας διαστάσεων. Στις άνω και κάτω άκρες της επίπεδης και κάθετης βάσης, το στρώμα διάτμησης τυλίγεται όπως υποδεικνύεται στις δύο ανακυκλοφορίας ροής A και B που βρίσκονται η μία πάνω στην άλλη. Καθώς η ροή πάνω από την κεκλιμένη επιφάνεια επηρεάζεται από τη δίνη C βγαίνοντας από το πλευρικό άκρο, η δύναμη της δίνης A εξαρτάται από τη δύναμη της δίνης C. Όσο η ροή παραμένει προσκολλημένη πάνω από την κεκλιμένη επιφάνεια, η δύναμη της δίνης C εξαρτάται από την κλίση της γωνίας  $\varphi$ . κατά συνέπεια, η δύναμη της δίνης A εξαρτάται από την γωνία  $\varphi$ . η ισχύς της δίνης B εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες ροής από την απόσταση του διάκενου από το έδαφος και έμμεσα με την γωνία  $\varphi$ .

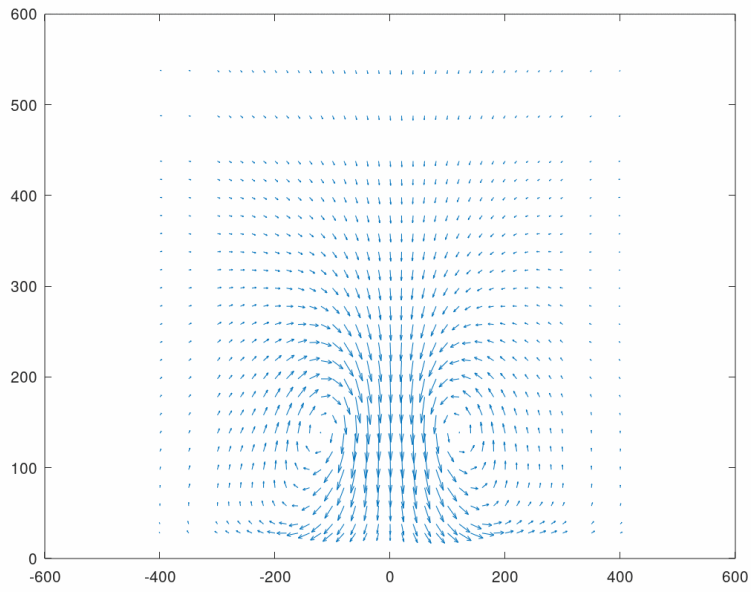
## 4.11 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης ροής σε επίπεδα

Αφού έγινε η πρώτη σχετική σύγκριση για το συντελεστή πίεσης και της ταχύτητας και είδαμε ότι τα σφάλματα των μετρήσεων δεν είναι μεγάλα για να θεωρηθούν αναξιόπιστα τα αποτελέσματα έγινε και σύγκριση της ροής σε διάφορα πεδία της ροής (planes) εκφρασμένα ως προς την ταχύτητα σε διανύσματα (vectors) και σε ισοψείς (contour). Αυτά δημιουργήθηκαν από το πρόγραμμα Results που υπάρχει στο περιβάλλον του Ansys Fluent. Τα διανύσματα μέσης ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής συμμετρίας στο πίσω μέρος του οχήματος δείχνουν ότι δεν συμβαίνει διαχωρισμός της ροής. Οι δύο δίνες που υπάρχουν είναι υπεύθυνες για την συντήρηση της ροής για κλίση έως 30 μοίρες και εκτείνονται για περισσότερο από 500 mm από το πέρασ του οχήματος.

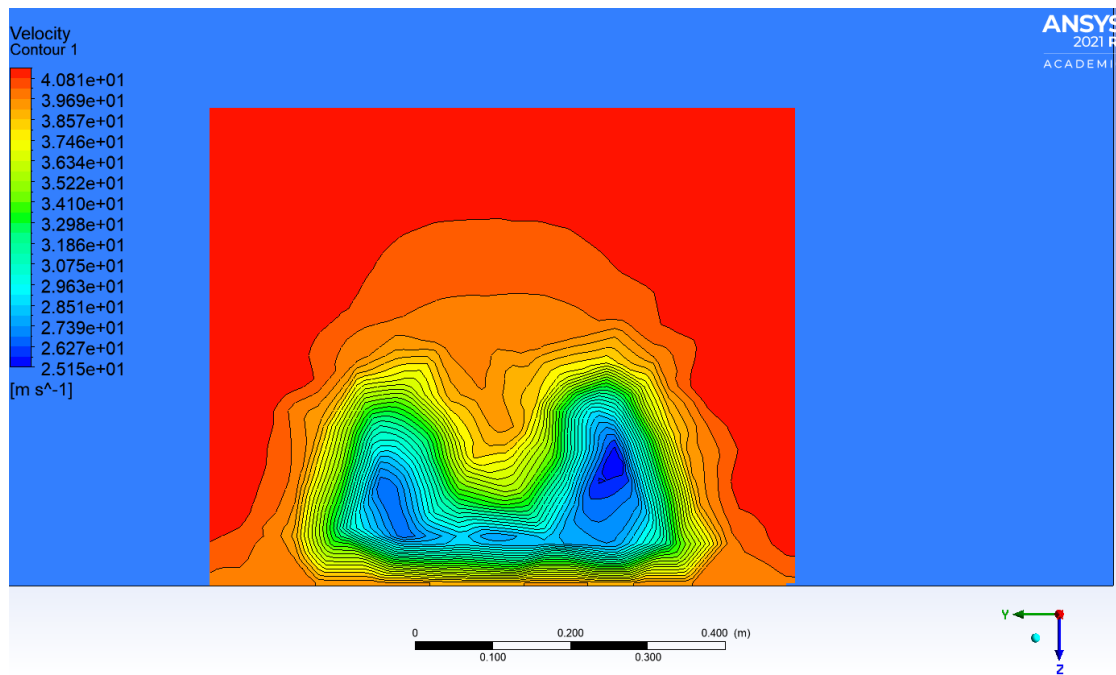
### 4.11.1 Επίπεδο X=500mm



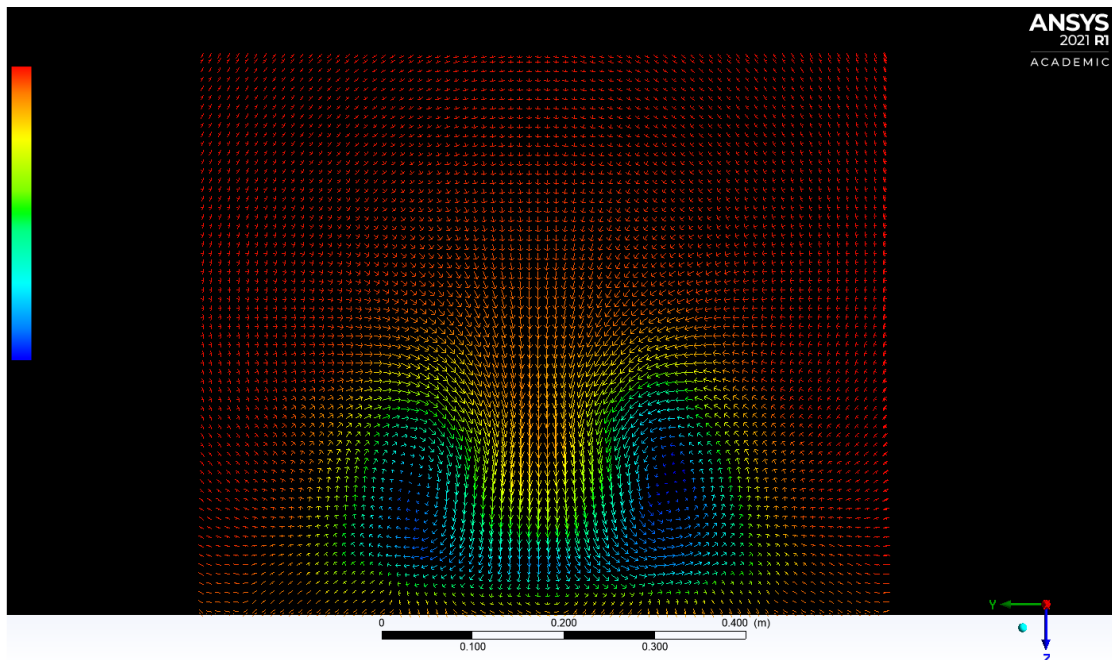
Σχήμα 39 Ισοψής ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο X=500mm



Σχήμα 40 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο X=500mm



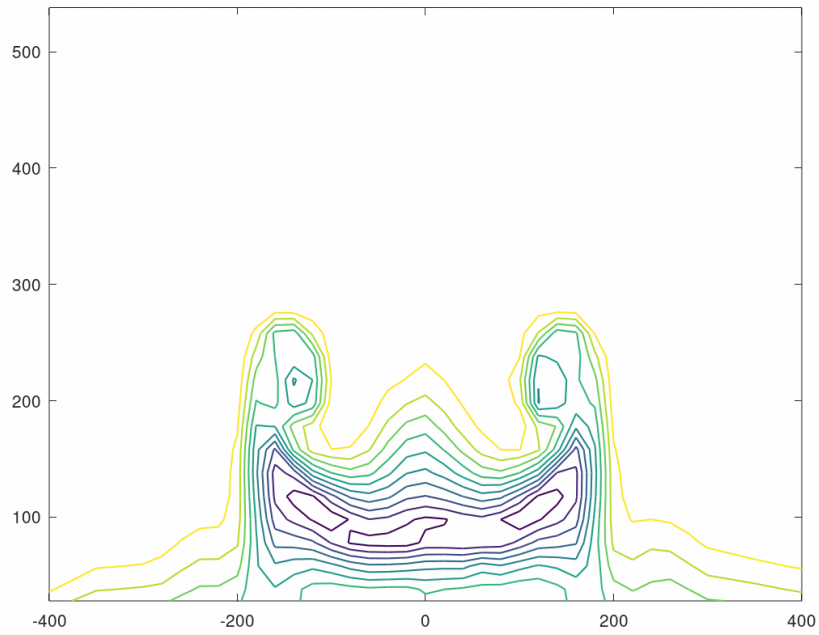
Σχήμα 41 Ισοψής ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο X=500mm



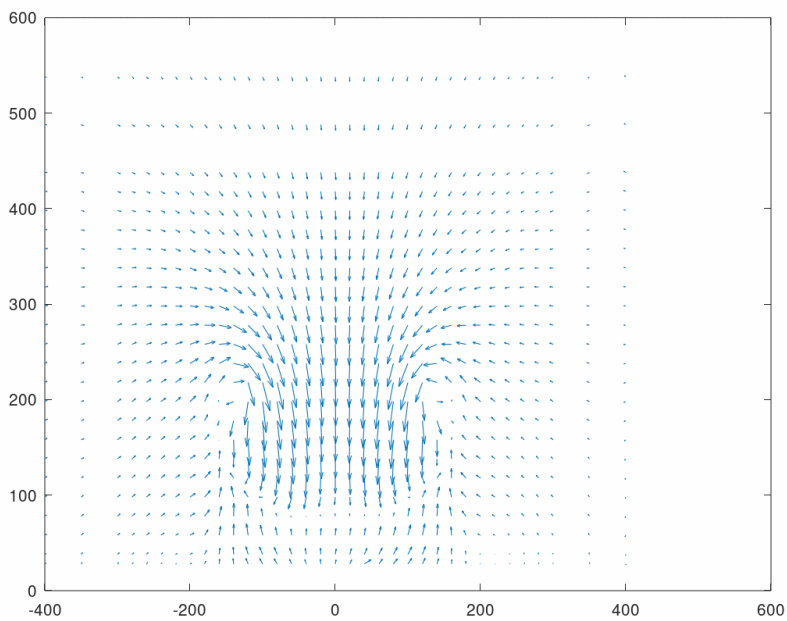
**Σχήμα 42** Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο  $X=500\text{mm}$

Από την σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων συμπεραίνεται ότι η ροή στο πεδίο  $X=500\text{mm}$  της προσομοίωσης συγκλίνει αρκετά με το αντίστοιχο πεδίο από τα αποτελέσματα ERCOFTAC, και ως διανύσματα και ως ισοψής. Επίσης το σφάλμα της ελάχιστης ταχύτητας είναι 2% και της μέγιστης 7%.

#### 4.11.2 Επίπεδο $X=200\text{mm}$

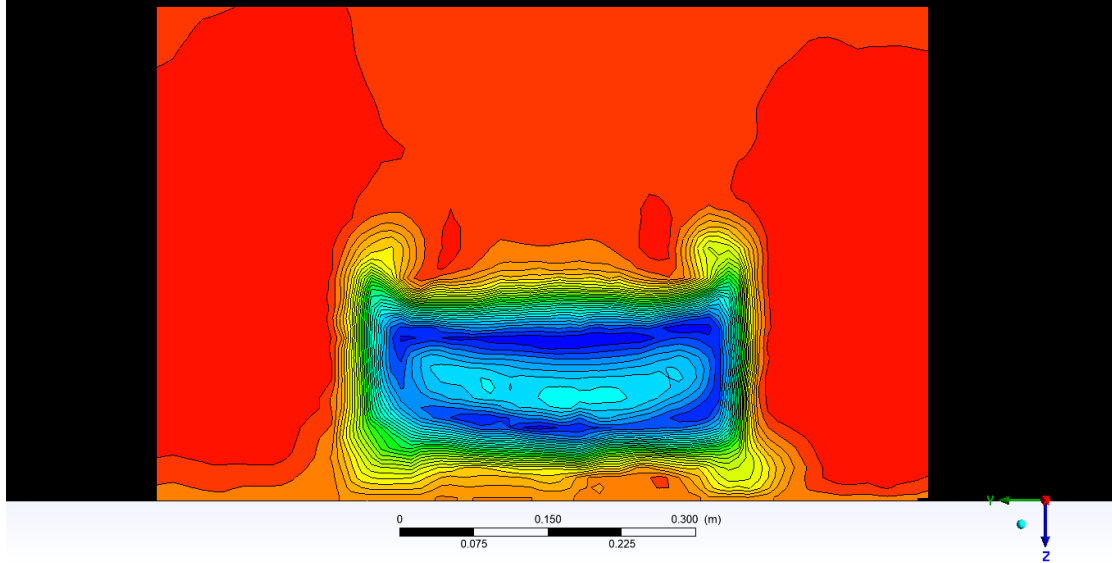


Σχήμα 43 Ισοϋψής της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο  $X=200\text{mm}$

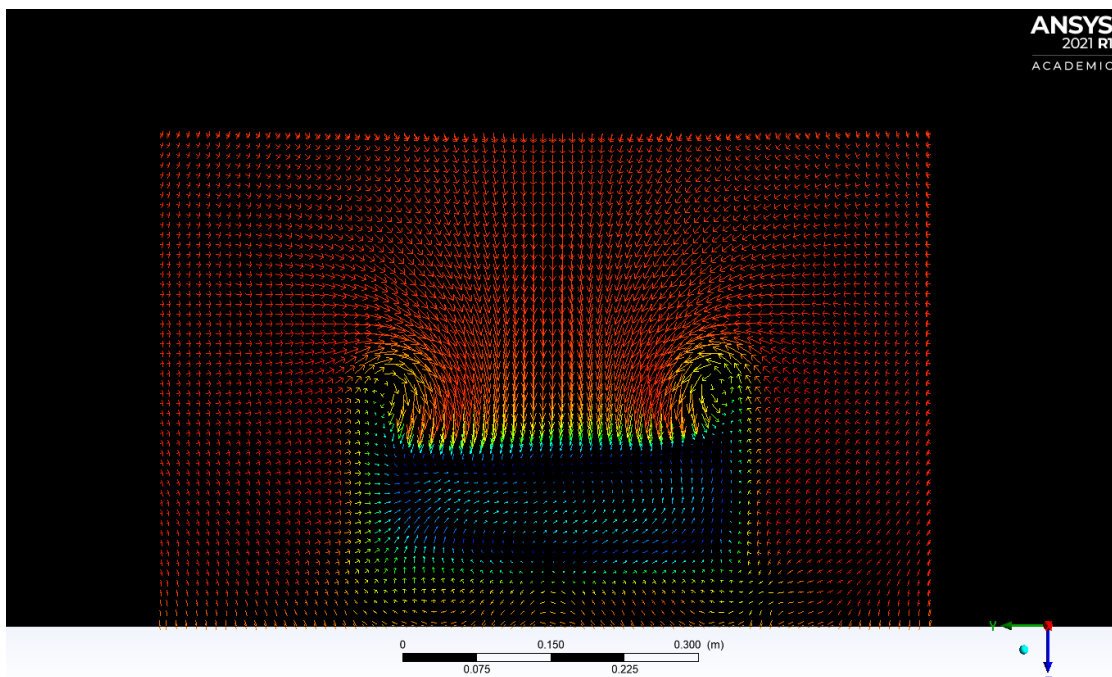


Σχήμα 44 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο  $X=200\text{mm}$





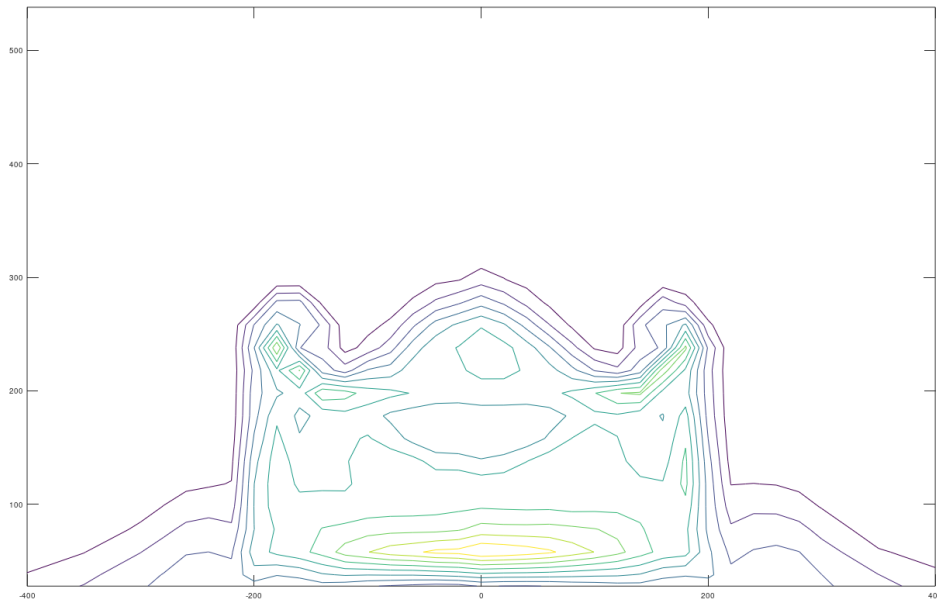
Σχήμα 45 Ισοϋψής της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο X=200mm



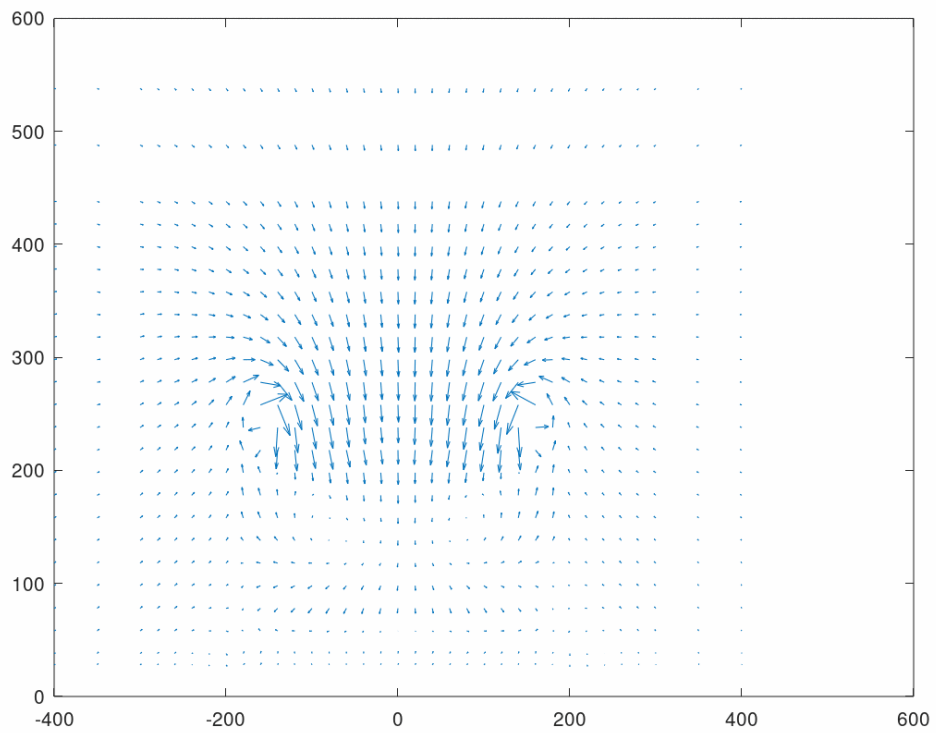
Σχήμα 46 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο X=200mm

Και σε αυτό το πεδίο η ροή συγκλίνει με το σφάλμα της ελάχιστης ταχύτητας να είναι 2% και της μέγιστης 12%.

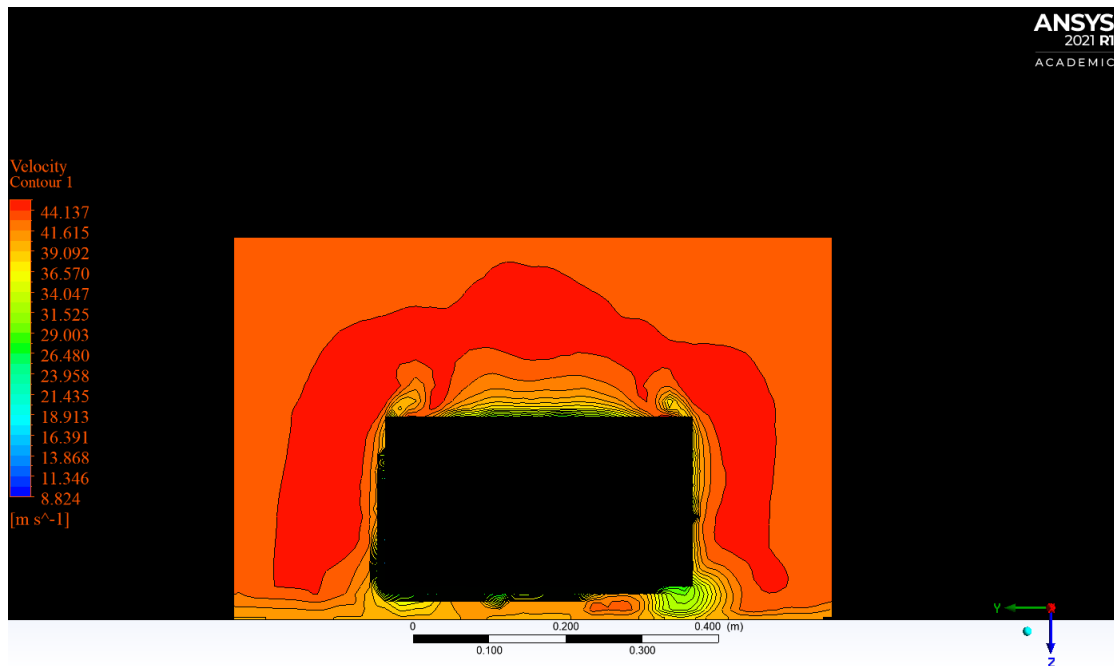
### 4.11.3 Επίπεδο X=80mm



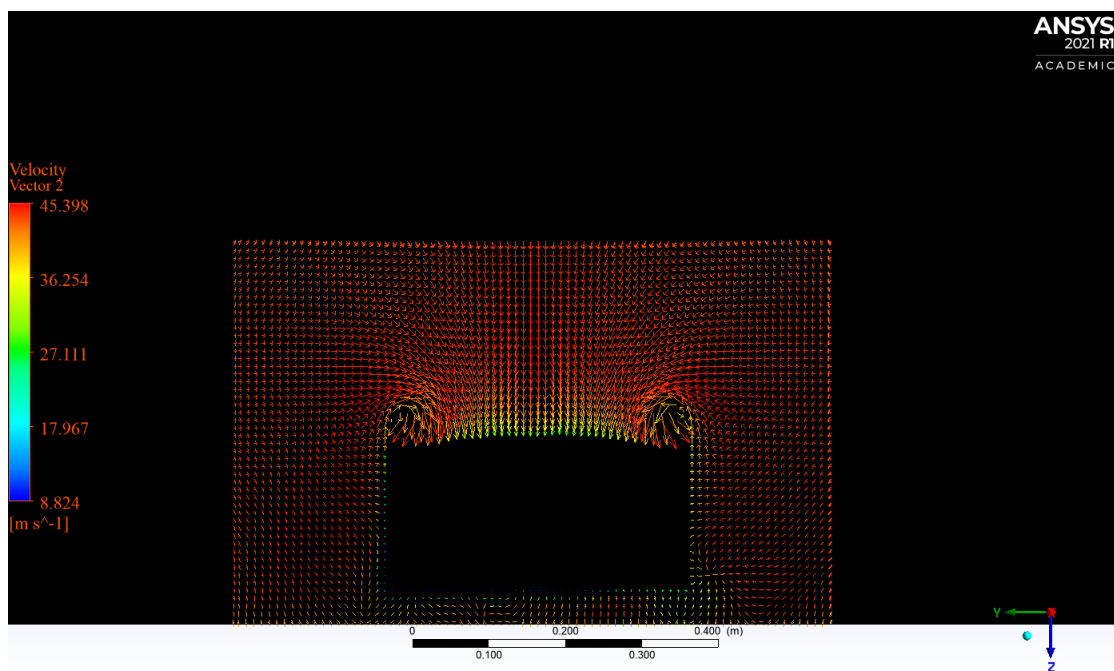
Σχήμα 47 Ισοϋψής της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο X=80mm



Σχήμα 48 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο X=80mm



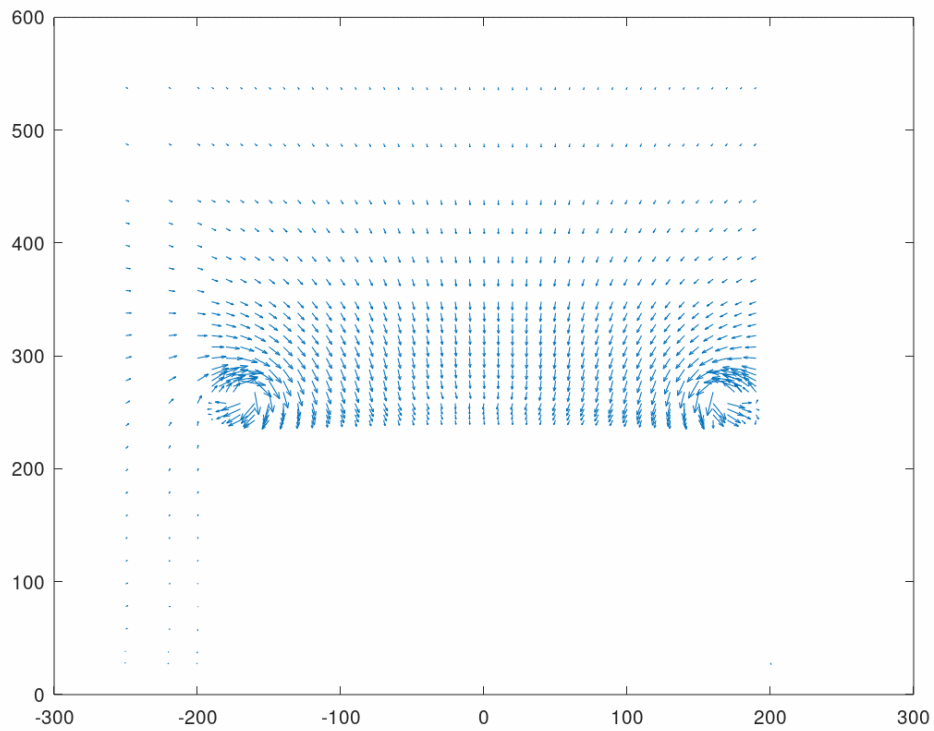
Σχήμα 49 Ισοϋψής της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο X=80mm



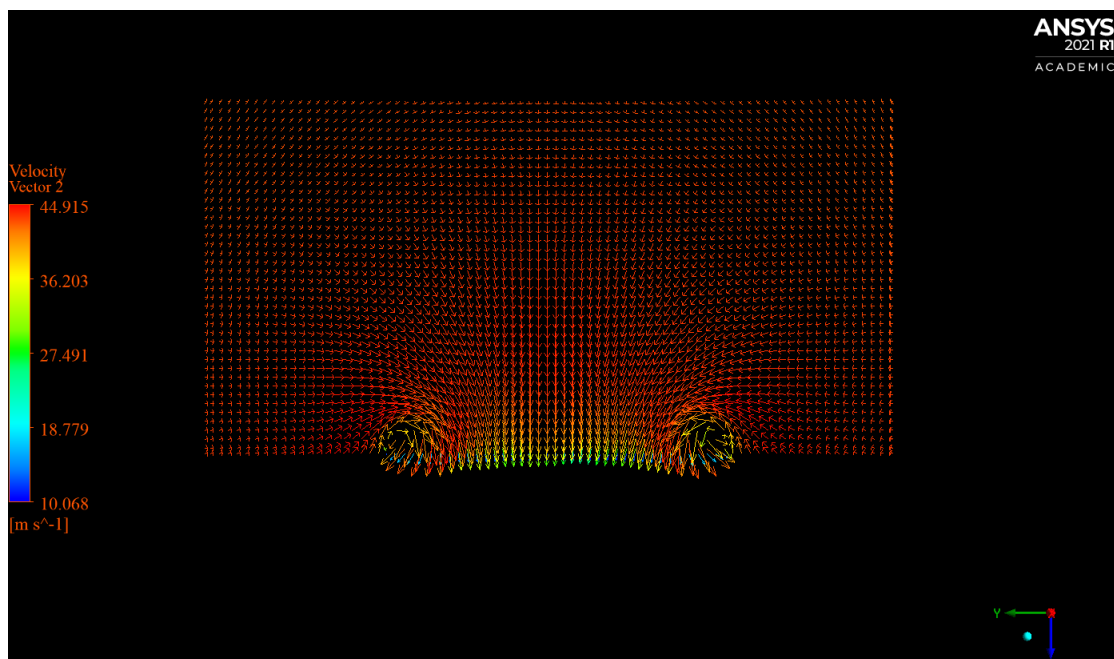
Σχήμα 50 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο X=80mm

Με σφάλμα της μέγιστης ταχύτητας να είναι 2%.

#### 4.11.4 Επίπεδο $X=0$

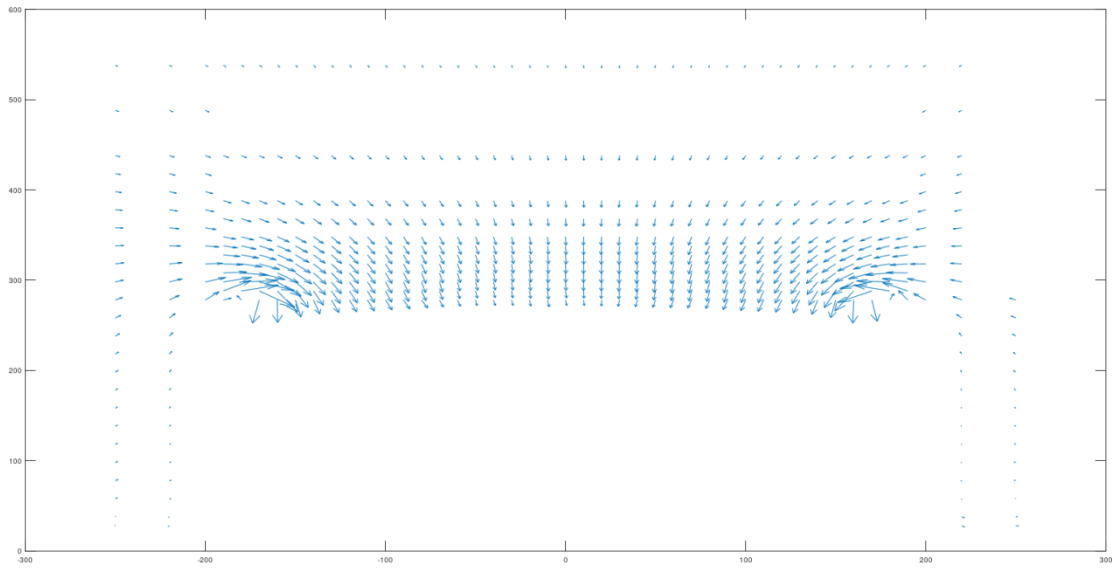


Σχήμα 51 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο  $X=0$

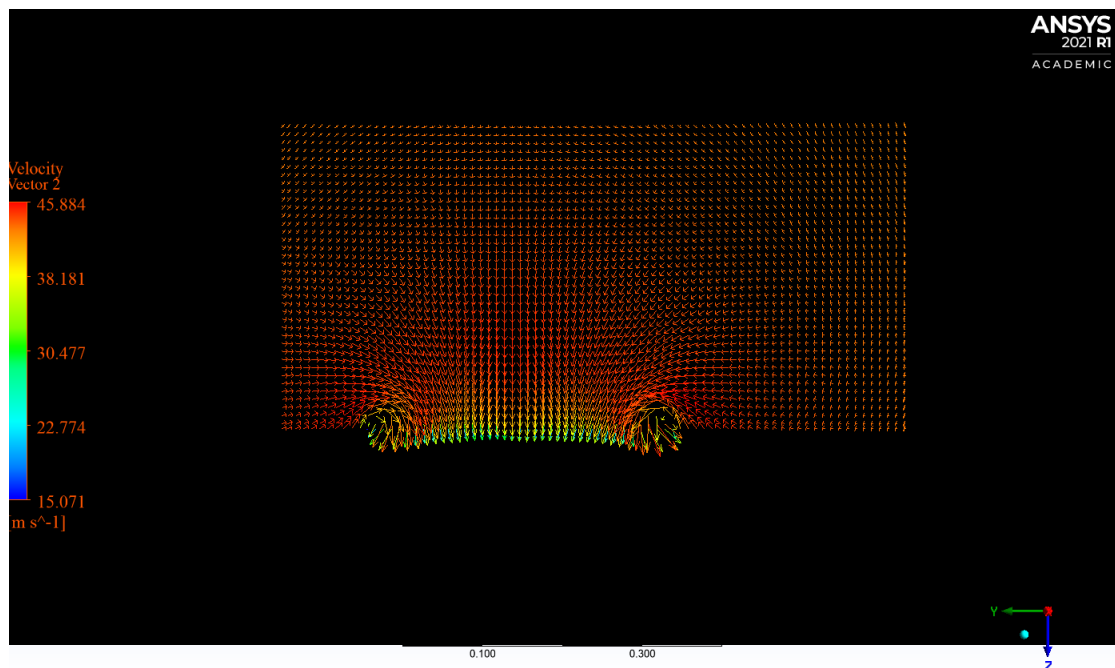


Σχήμα 52 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομείωση: Επίπεδο  $X=0$

#### 4.11.5 Επίπεδο X=-38mm



Σχήμα 53 Διανύσματα της ταχύτητας από ERCOFTAC: Επίπεδο X=-38mm



Σχήμα 54 Διανύσματα της ταχύτητας από την προσομοίωση: Επίπεδο X=-38mm

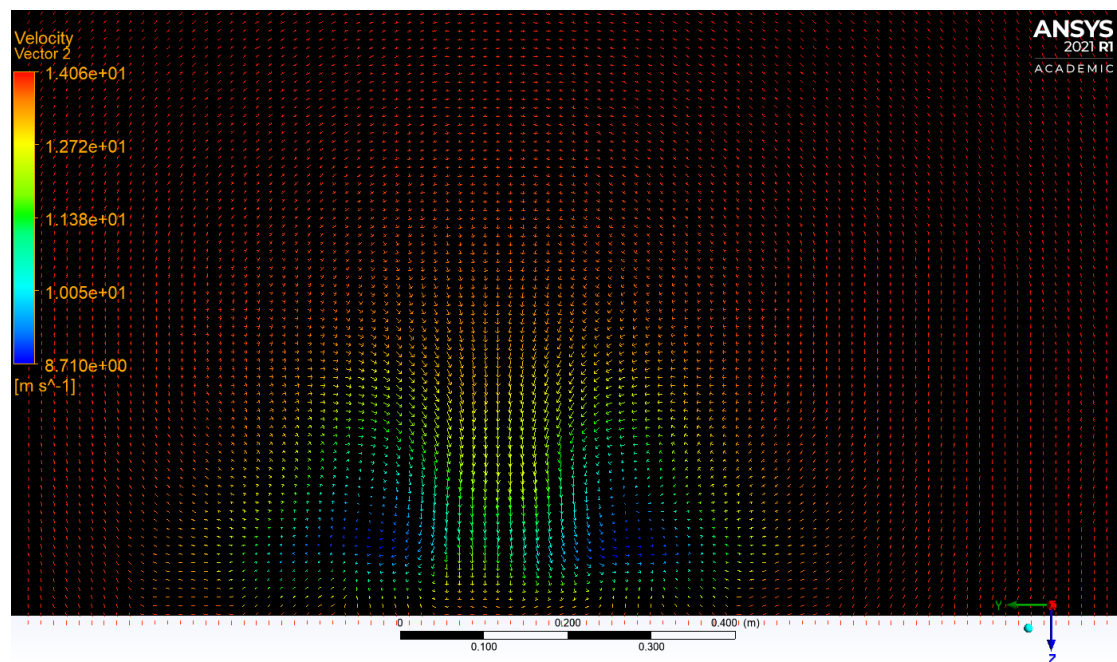
Με σφάλμα ελάχιστης ταχύτητας να είναι 2% και μέγιστης 6%.

## 4.12 Αποτελέσματα τροποποιημένου Ahmed body

Εφόσον πραγματοποιήθηκε η σύγκριση και το σφάλμα των μετρήσεων είναι μικρό ακολουθεί η προσομοίωση του τροποποιημένου οχήματος Ahmed body με τροχούς. Αφού τα σφάλματα είναι μικρά και οι ροές στα εξεταζόμενα πεδία συγκλίνουν σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που θα λάβουμε είναι αξιόπιστα. Θα παρουσιαστούν στα ίδια πεδία, όπου έγινε και η σύγκριση των μετρήσεων, η ροή για τις τρεις (3) διαφορετικές ταχύτητες, 50,90&130 km/h.

### 4.12.1 Ταχύτητα 50 km/h

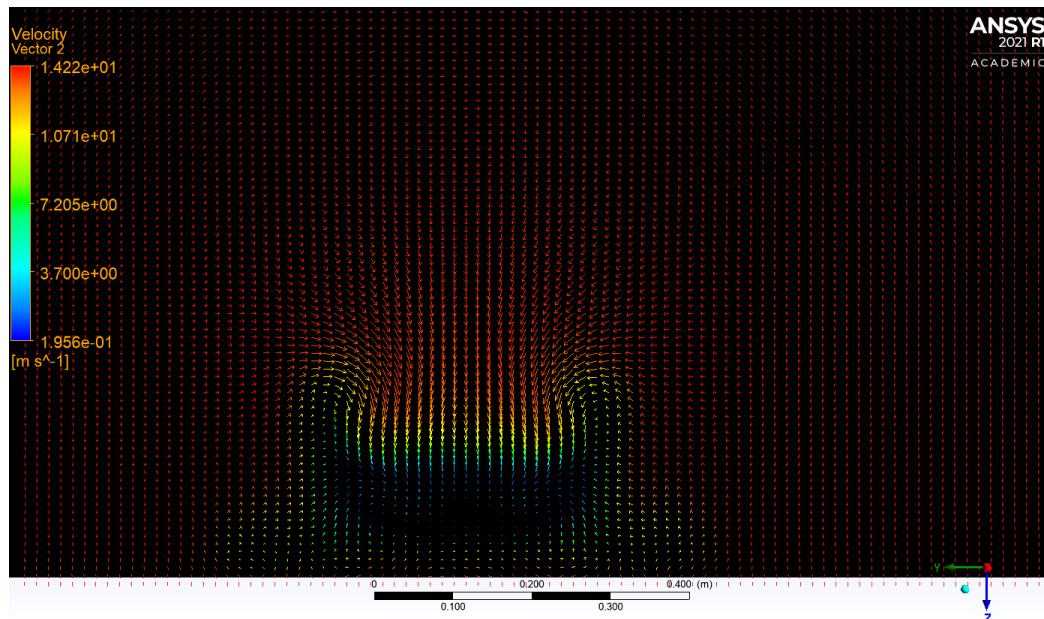
#### 4.12.1.1 Επίπεδο X=500mm



Σχήμα 55 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο X=500mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 14m/s (50,4 km/h) και η ελάχιστη 8.7m/s (31.3 km/h).

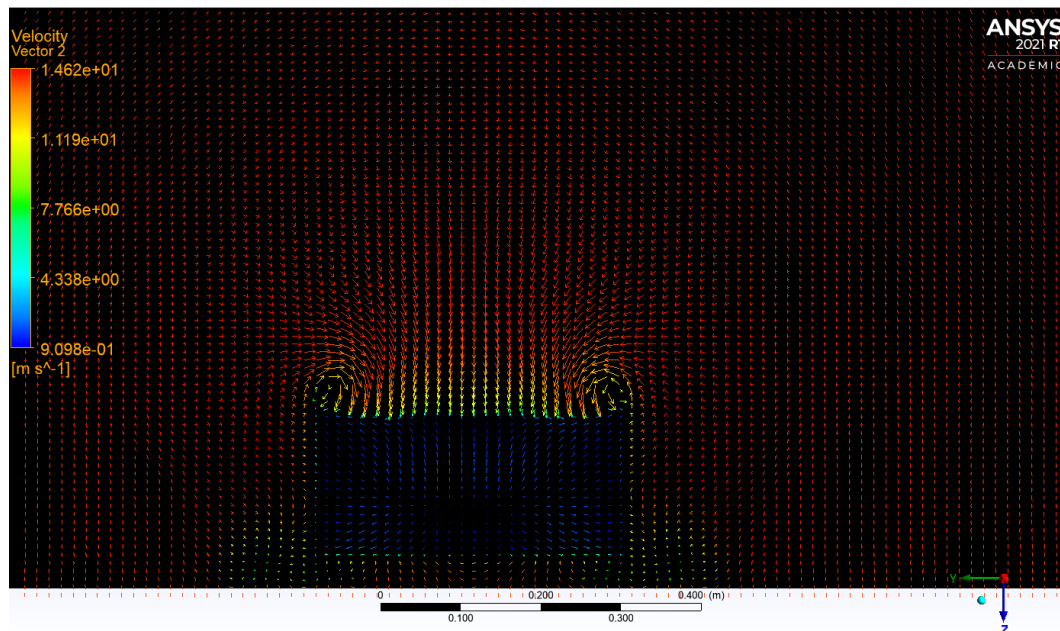
#### 4.12.1.2 Επίπεδο X=200mm



Σχήμα 56 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο X=200mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 14.2m/s (50,4 km/h) και η ελάχιστη 1.9 m/s (6.8 km/h).

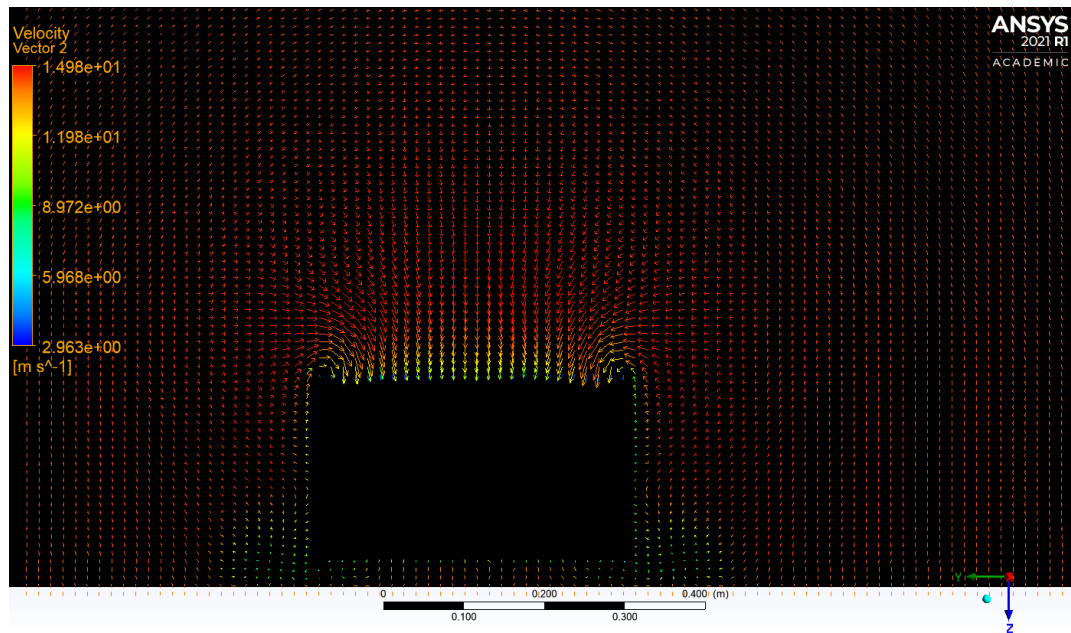
#### 4.12.1.3 Επίπεδο X=80mm



Σχήμα 57 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο X=80mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 14.6m/s (51.6 km/h) και η ελάχιστη 9.1 m/s (32.8 km/h).

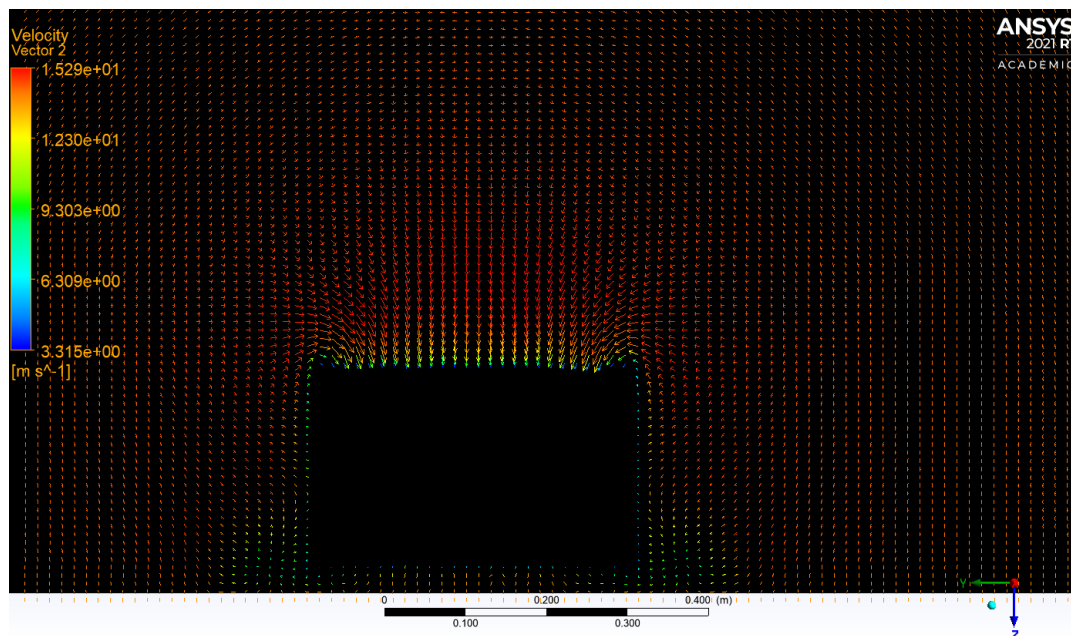
#### 4.12.1.4 Επίπεδο X=0



Σχήμα 58 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο X=0

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 14.9m/s (53.6 km/h) και η ελάχιστη 2.9 m/s (10.5 km/h).

#### 4.12.1.5 Επίπεδο X=-38mm



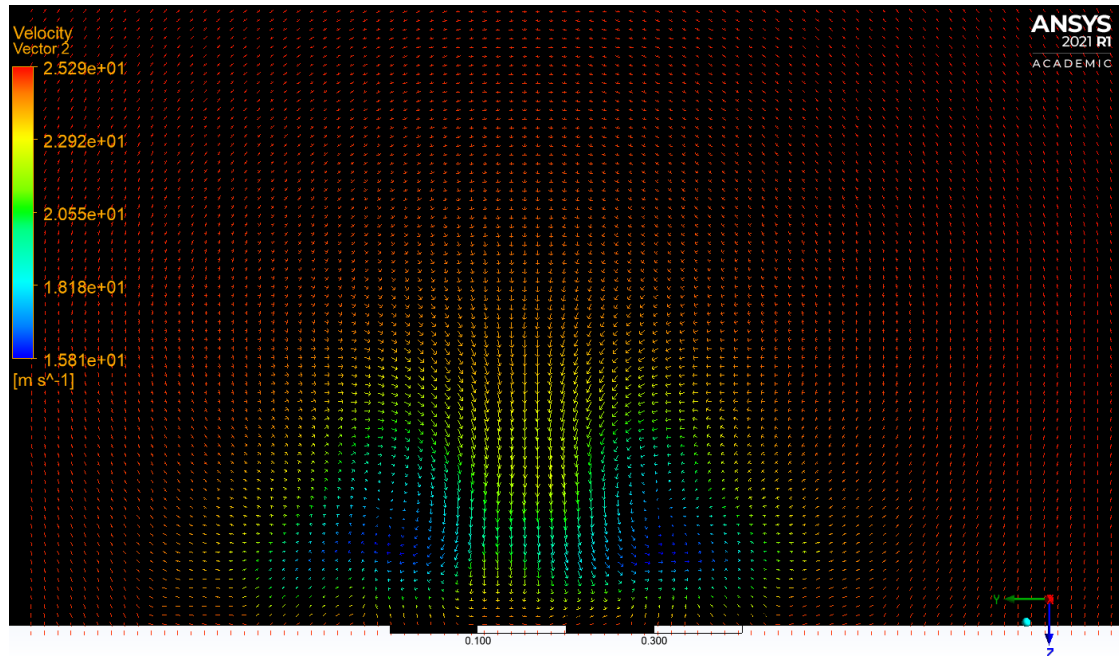
Σχήμα 59 Διανύσματα της ταχύτητας για 50km/h: Επίπεδο X=-38mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 15.3 m/s (55 km/h) και η ελάχιστη 3.3m/s (11.9 km/h).



## 4.12.2 Ταχύτητα 90 km/h

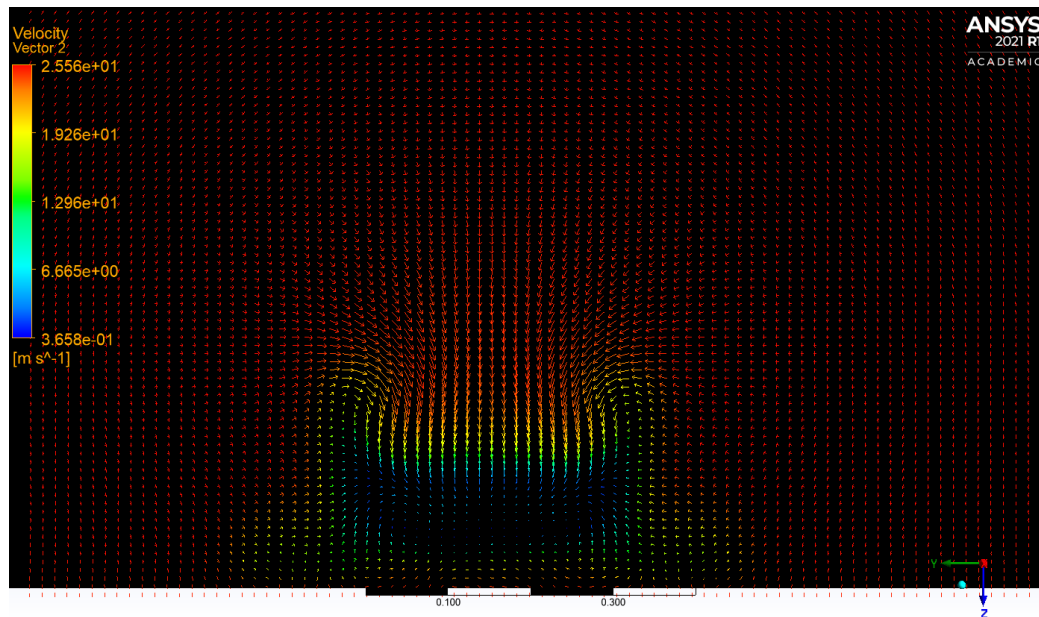
### 4.12.2.1 Επίπεδο X=500mm



Σχήμα 60 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=500mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 25.3m/s (91 km/h) και η ελάχιστη 15.8 m/s (56.9 km/h).

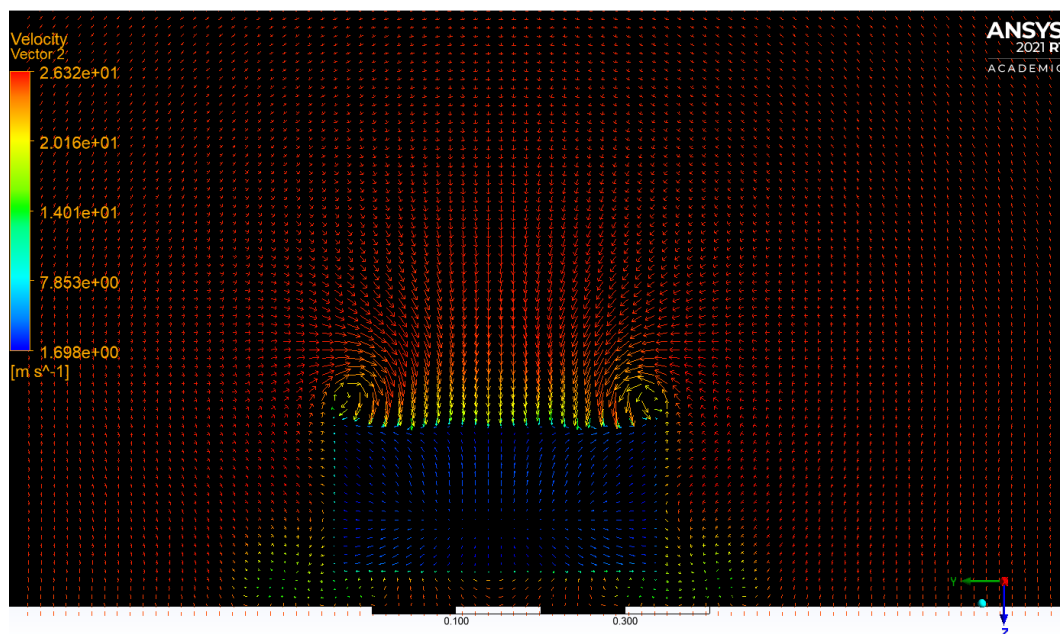
#### 4.12.2.2 Επίπεδο X=200mm



Σχήμα 61 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=200mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 25.5m/s (91.4 km/h) και η ελάχιστη 3.6 m/s (12.9 km/h).

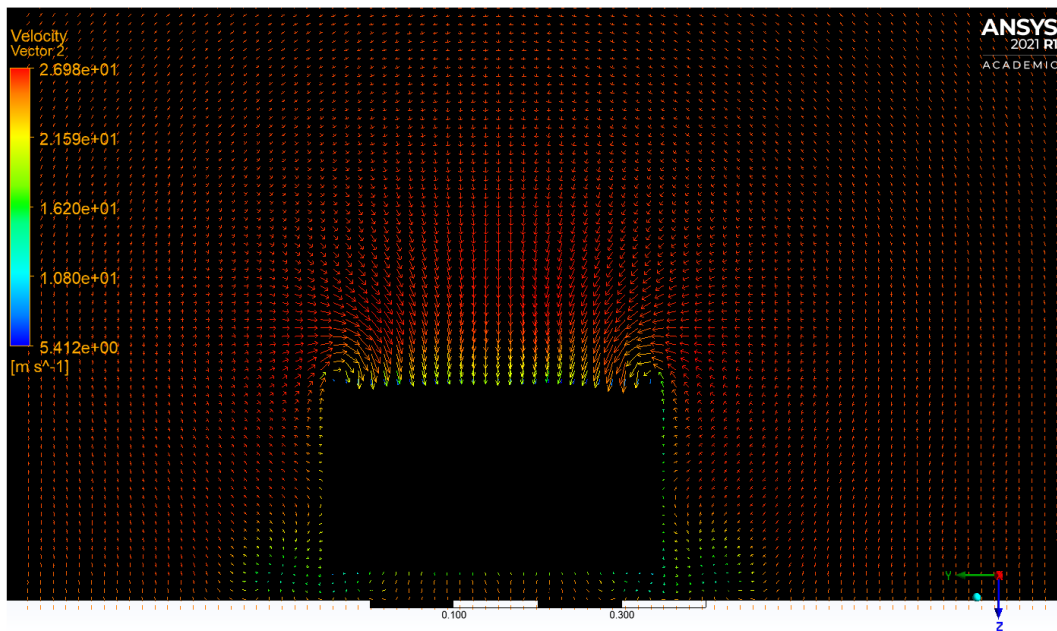
#### 4.12.2.3 Επίπεδο X=80mm



Σχήμα 62 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=80mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 26.3 m/s (94.7 km/h) και η ελάχιστη 1.7 m/s (6.12 km/h).

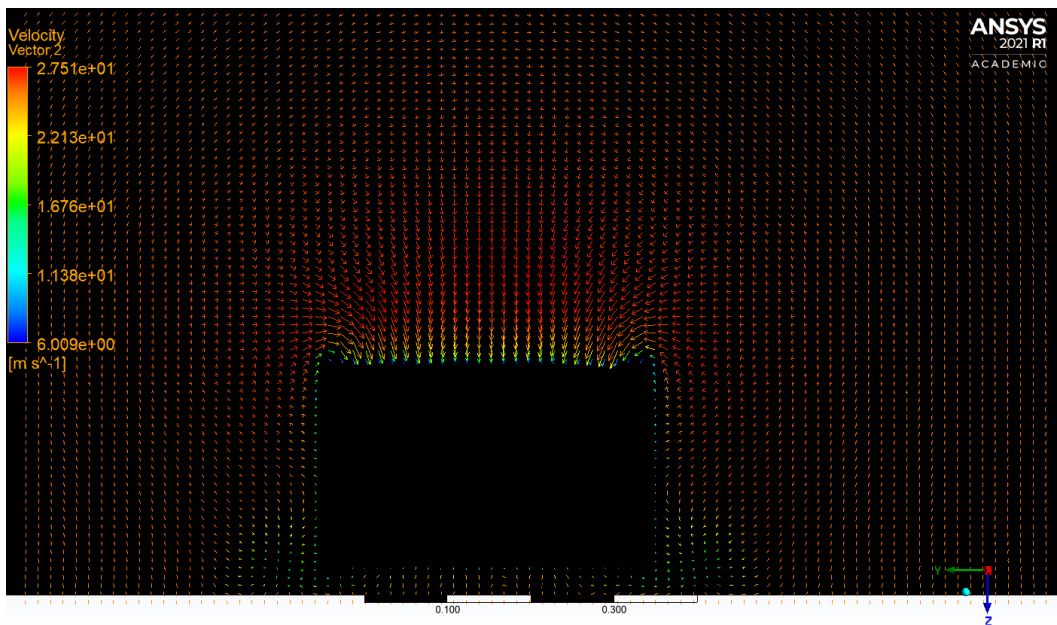
#### 4.12.2.4 Επίπεδο X=0



Σχήμα 63 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=0

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 26.9m/s (94.8 km/h) και η ελάχιστη 5.4 m/s (19.4 km/h).

#### 4.12.2.5 Επίπεδο X=-38mm

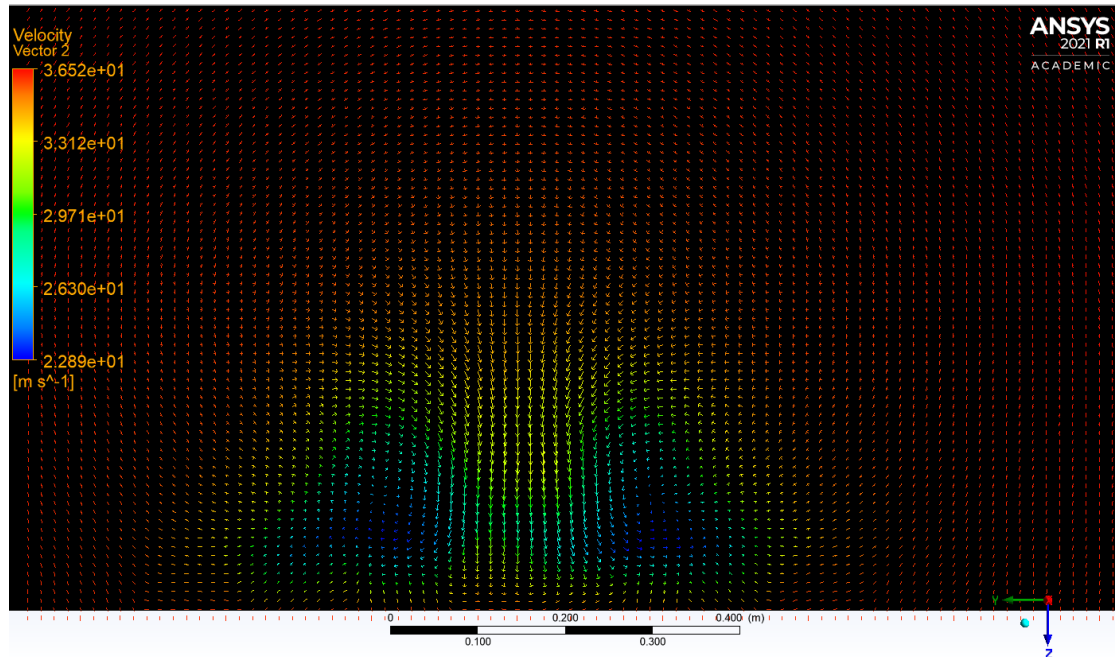


Σχήμα 64 Διανύσματα της ταχύτητας για 90km/h: Επίπεδο X=-38mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 27.5 m/s (99 km/h) και η ελάχιστη 6 m/s (21.6 km/h).

### 4.12.3 Ταχύτητα 130 km/h

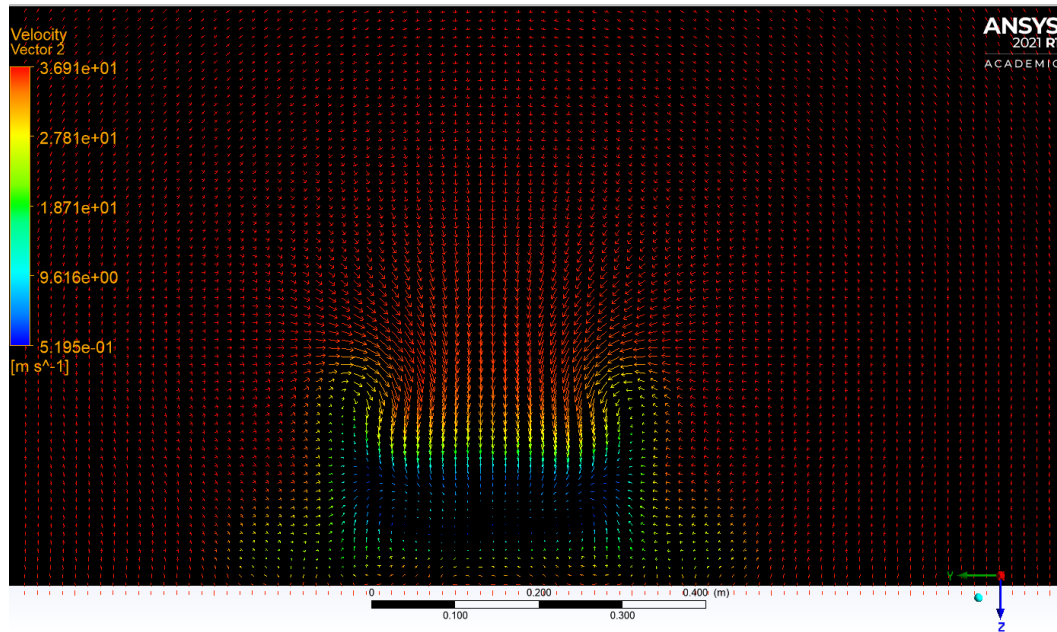
#### 4.12.3.1 Επίπεδο X=500mm



Σχήμα 65 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=500mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 36.5m/s (130.7 km/h) και η ελάχιστη 22.9 m/s (82.4 km/h).

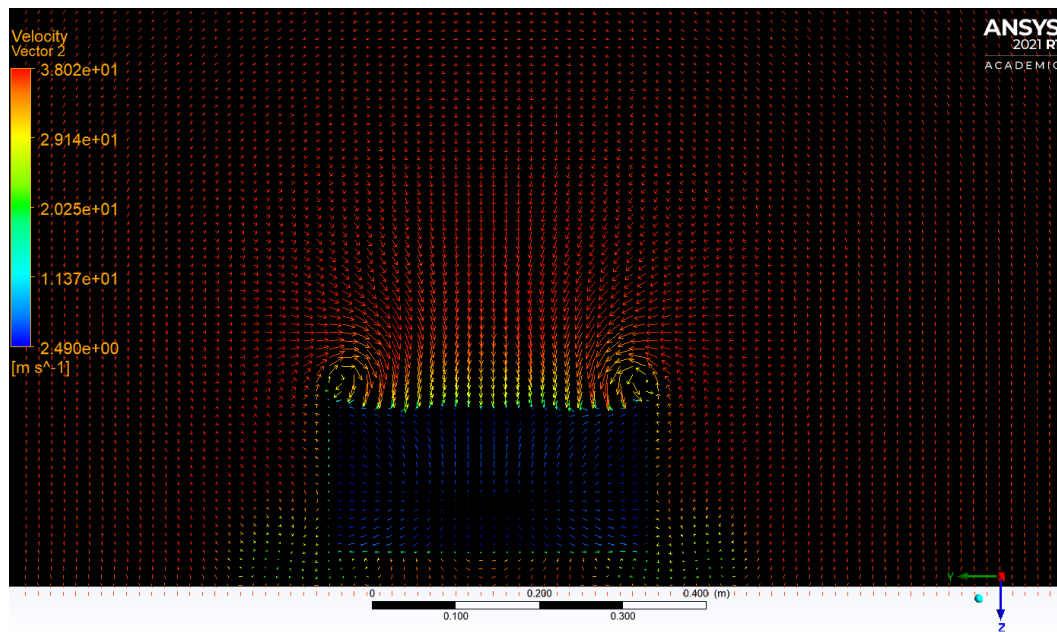
#### 4.12.3.2 Επίπεδο X=200mm



Σχήμα 66 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=200mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 36.9m/s (131.1 km/h) και η ελάχιστη 5.2 m/s (18.7 km/h).

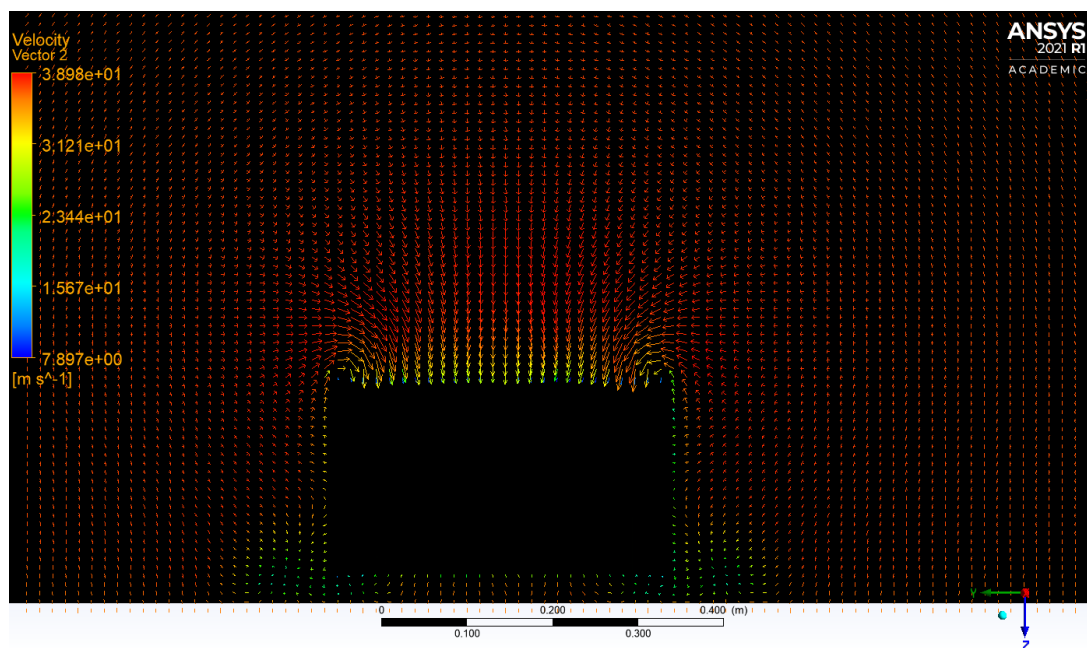
#### 4.12.3.3 Επίπεδο X=80mm



Σχήμα 67 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=80mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 38/s (136.8 km/h) και η ελάχιστη 2.5 m/s (9 km/h).

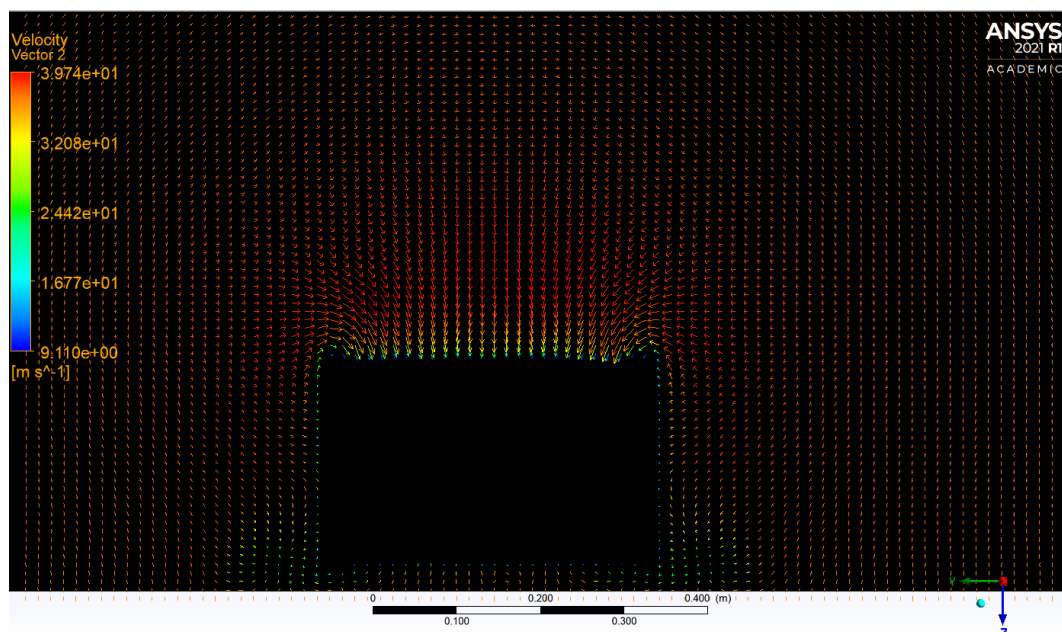
#### 4.12.3.4 Επίπεδο X=0



Σχήμα 68 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=0

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 38.9 m/s (136.1 km/h) και η ελάχιστη 7.9m/s (28.4 km/h).

#### 4.12.3.5 Επίπεδο X=-38mm

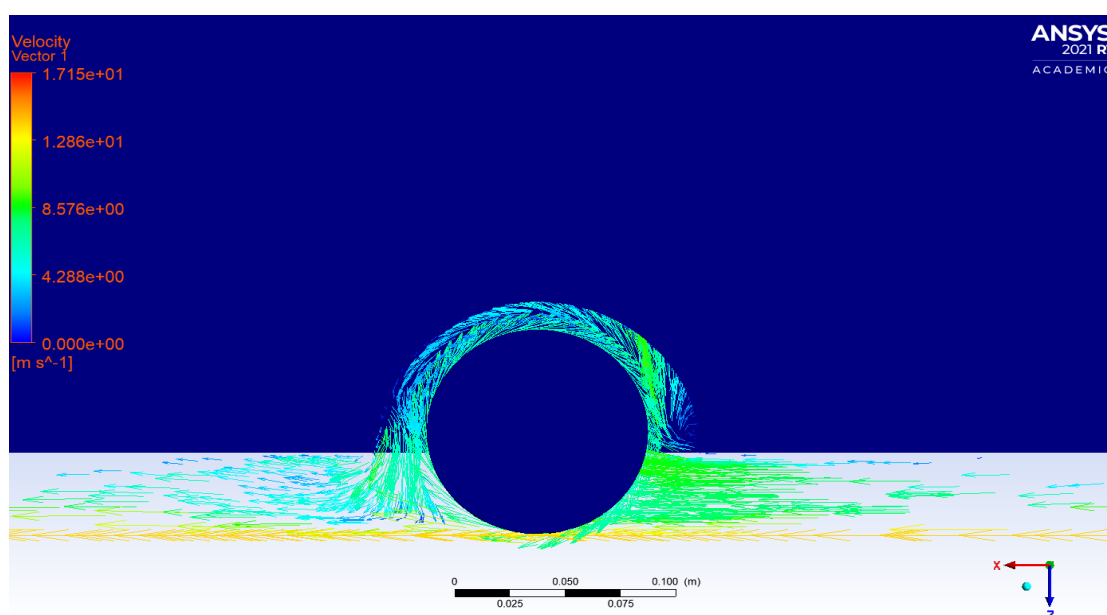


Σχήμα 69 Διανύσματα της ταχύτητας για 130km/h: Επίπεδο X=-38mm

Σε αυτό το πεδίο ροής η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται είναι 39.7 m/s (142.9 km/h) και η ελάχιστη 9.1 m/s (32.7 km/h).

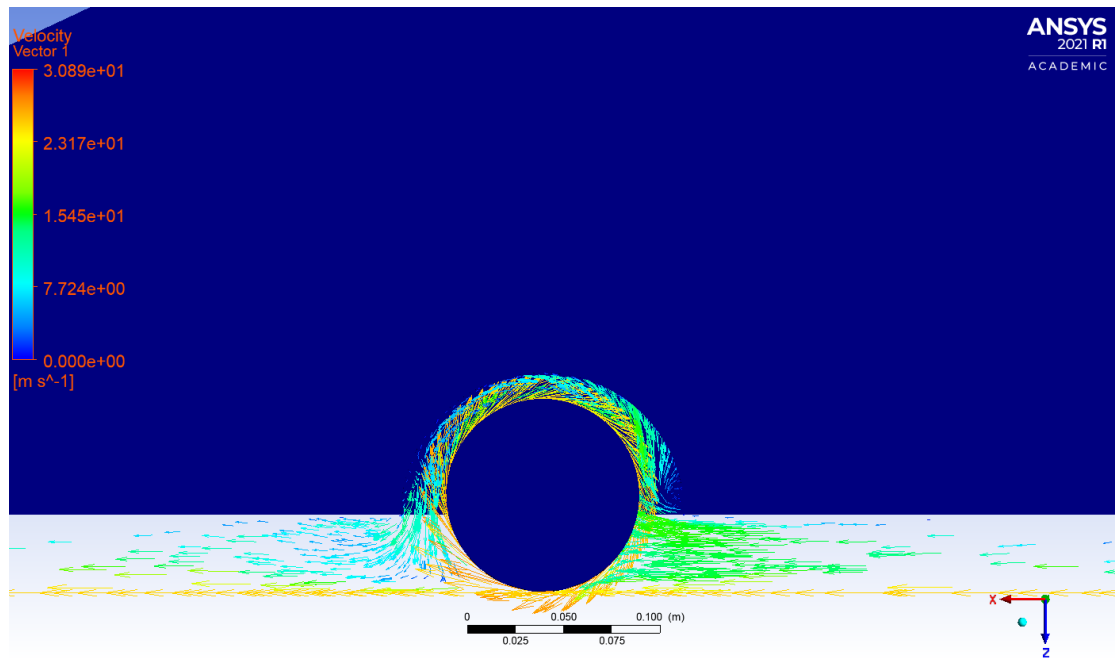
## 4.13 Υπολογισμός σημείου σχεδιασμού αγωγού εκροής

Στο σημείο όπου παρατηρούμε τις μέγιστες τιμές των διανυσμάτων της ταχύτητας της ροής λόγω της ανακυκλοφορίας από την περιστροφική κίνηση των τροχών έχει κατεύθυνση προς την αρχή του οχήματος πράγμα που σημαίνει ότι για να κατευθυνθεί η ροή στο πίσω μέρος θα έπρεπε να δημιουργηθεί στροφή στον αγωγό 180<sup>ο</sup> η οποία με τη σειρά της θα δημιουργήσει συστροφή του ρευστού με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κάποιο πλεονέκτημα από αυτό. Οπότε το σημείο που επιλέχθηκε για τον αγωγό είναι στο πίσω μέρος του θόλου 50mm πάνω από το τέλος του οχήματος.



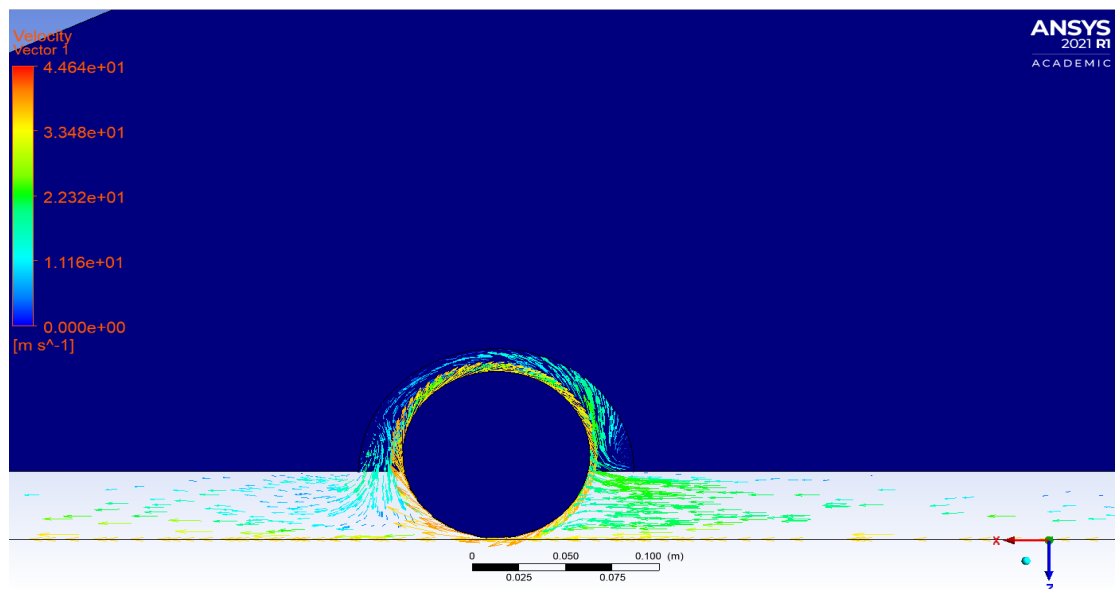
Σχήμα 70 Ροή στους τροχούς στα 50 km/h

Στο θόλο των πίσω τροχών το μέτρο των διανυσμάτων της ταχύτητας κυμαίνεται από 3 έως 9 m/s. Η δύναμη που αναπτύσσεται στον X άξονα υπολογίσθηκε στα 5,85 N και κατά Z άξονα -5,29 N για ταχύτητα ελεύθερης ροής 50 km/h. (Σχήμα 71)



**Σχήμα 71 Ροή στους τροχούς στα 90 km/h**

Στο θόλο των πίσω τροχών το μέτρο των διανυσμάτων της ταχύτητας κυμαίνεται από 7.7 έως 25 m/s. Η δύναμη που αναπτύσσεται στον X άξονα υπολογίσθηκε στα 19,3 N και κατά Z άξονα -18,09 N για ταχύτητα ελεύθερης ροής 90 km/h. (Σχήμα 72)



**Σχήμα 72 Ροή στους τροχούς στα 130 km/h**

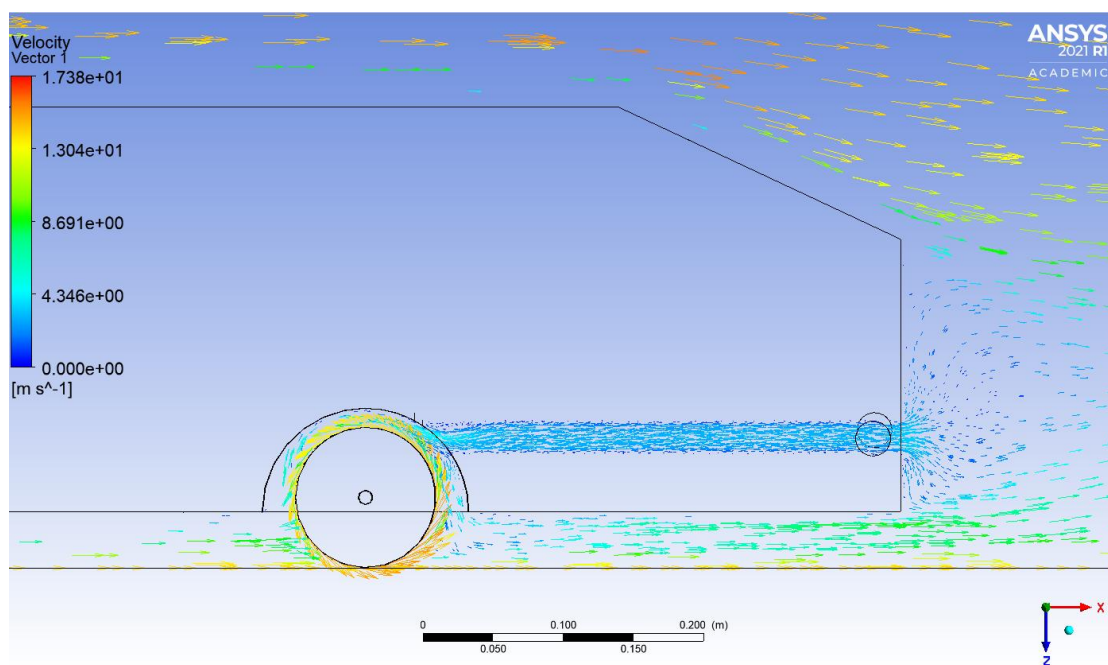
Στο θόλο των πίσω τροχών το μέτρο των διανυσμάτων της ταχύτητας κυμαίνεται από 11 έως 35 m/s. Η δύναμη που αναπτύσσεται στον X άξονα υπολογίσθηκε στα 40,22 N και κατά Z άξονα -38,31 N για ταχύτητα ελεύθερης ροής 130 km/h. (Σχήμα 73).



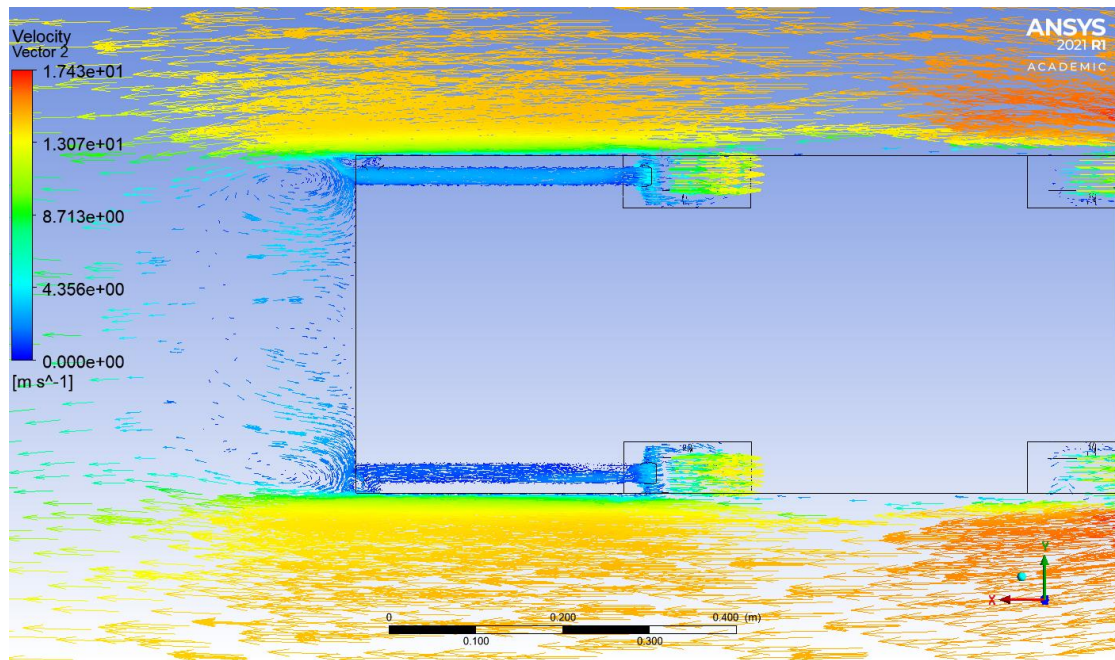
Αυτό που παρατηρείται και από τα τρία σχήματα, 71,72 και 73, είναι ότι υπάρχει έντονη ανακυκλοφορία στην περιοχή που βρίσκονται οι ρόδες λόγω της περιστροφής τους με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγαλύτερες ταχύτητες και να δυσκολεύουν την κίνηση του οχήματος καθώς αναπτύσσεται δύναμη αντίστασης (drag force). Η ροή μάζας που εισέρχεται στον αγωγό εκροής της εκάστοτε ταχύτητας που είναι υπό μελέτη είναι 0.0099, 0.018 και 0.026 kg/s.

#### 4.14 Αποτελέσματα Ahmed body με αγωγό εκροής

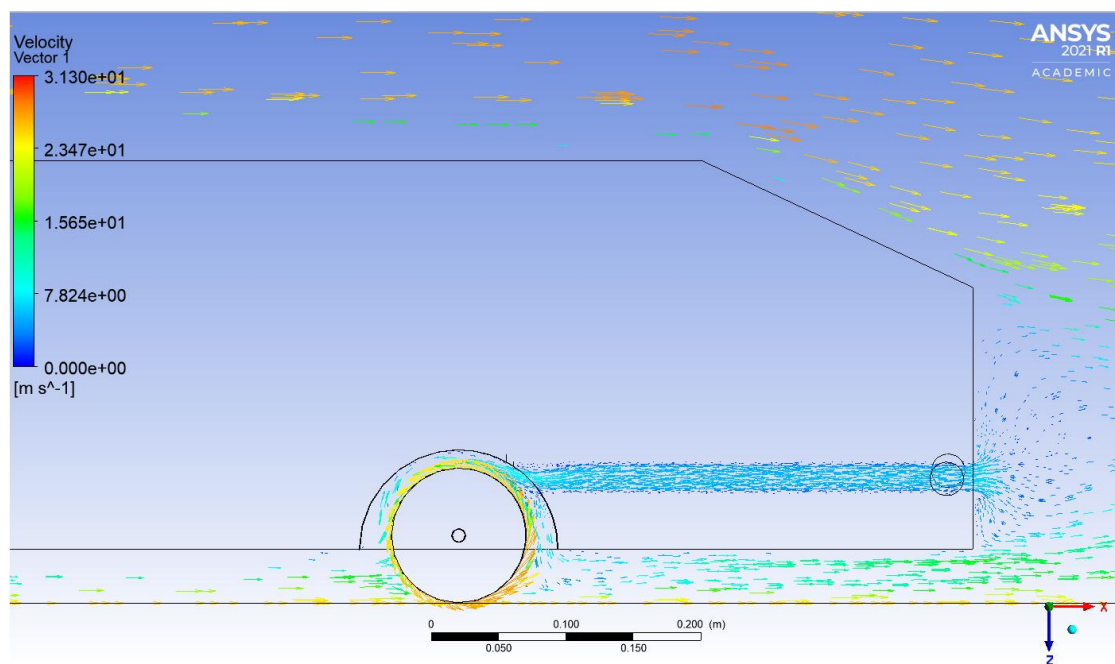
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η οπτικοποίηση της ροής για το όχημα Ahmed body με τον αγωγό εκροής στους δύο πίσω τροχούς καθώς και τη ροή στο εσωτερικό του αγωγού. Η ταχύτητα της ροής εντός του αγωγού για 50, 90 και 130 km/h είναι 4.35, 7.8 και 11.3 m/s αντίστοιχα. Στην είσοδο της ροής υπάρχει ανακυκλοφορία της ροής χωρίς όμως να φαίνεται να επηρεάζει έντονα την ανάπτυξη της στη συνέχεια του αγωγού. Στα σχήματα 74, 76 και 78 φαίνεται η διαφοροποίηση στην ακρίβεια των μετρήσεων και διαφορετικό τρόπο οπτικοποίησης της ροής από την μία μεριά του οχήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλέγμα είναι πιο πυκνό για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων έχοντας ταυτόχρονα έναν περιορισμό κελιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.



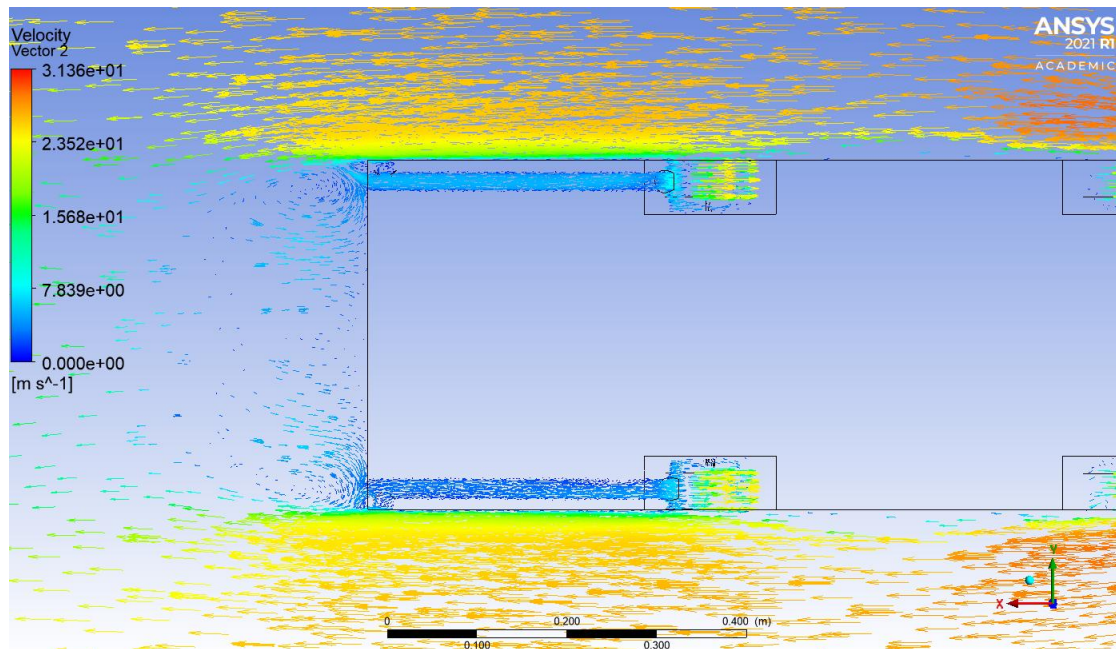
Σχήμα 73 Ροή κατά μήκος του οχήματος και εσωτερικά του αγωγού εκροής για 50 km/h



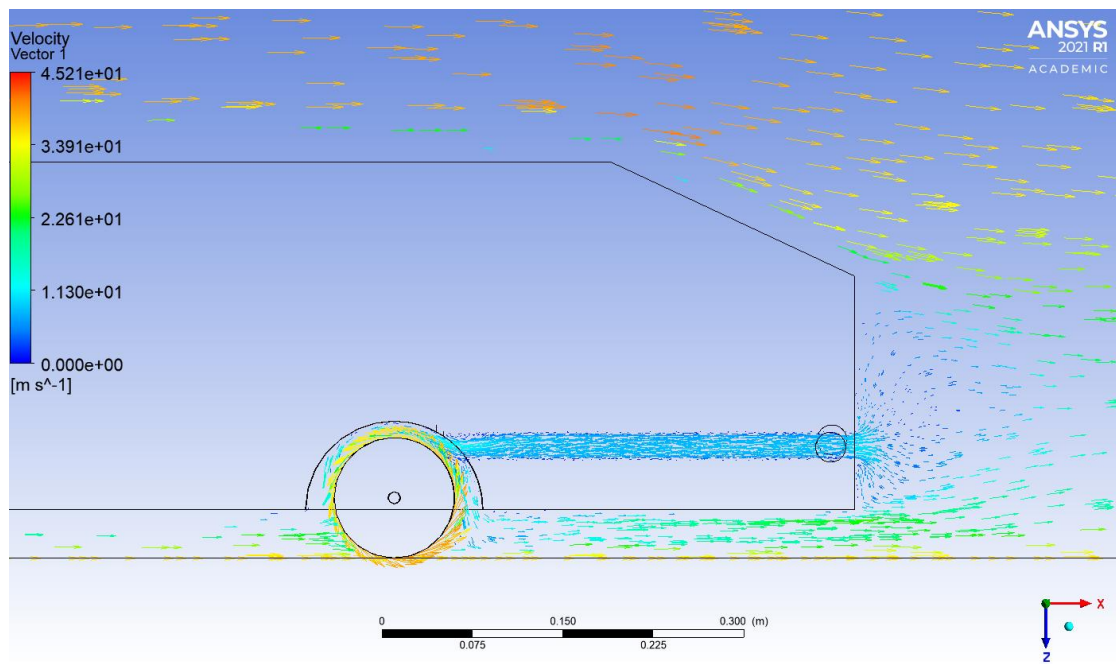
Σχήμα 74 Ροή περιμετρικά του οχήματος για 50 km/h



Σχήμα 75 Ροή κατά μήκος του οχήματος και εσωτερικά του αγωγού εκροής για 90 km/h

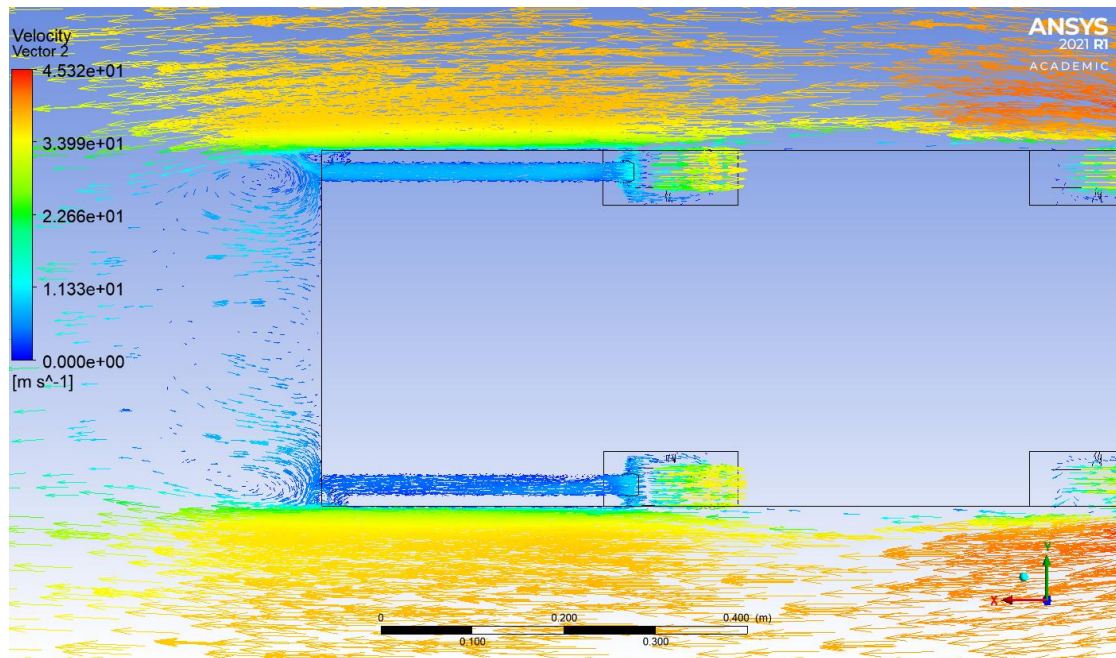


Σχήμα 76 Ροή περιμετρικά του οχήματος για 90 km/h



Σχήμα 77 Ροή κατά μήκος του οχήματος και εσωτερικά του αγωγού εκροής για 130 km/h

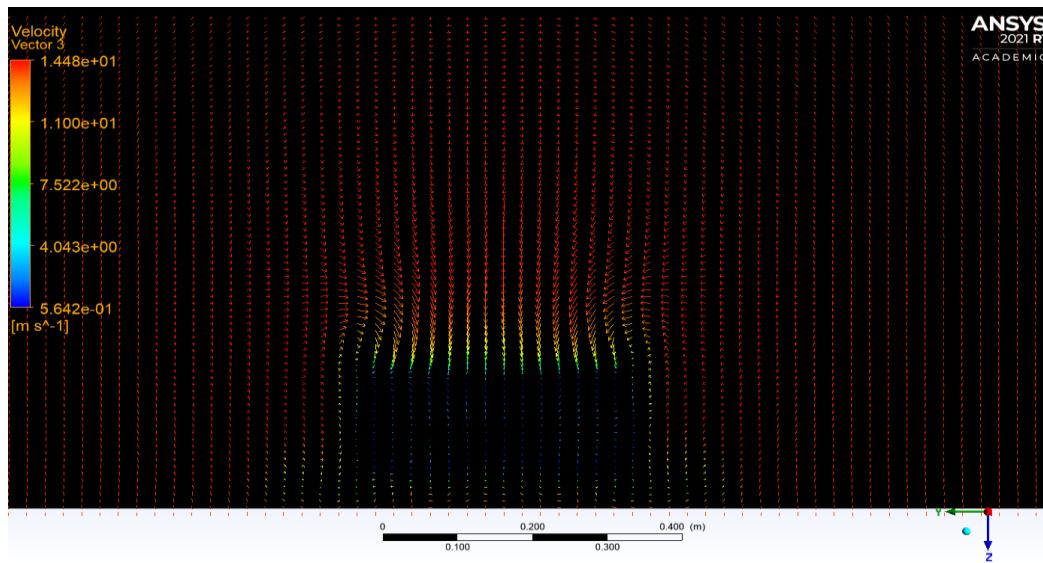




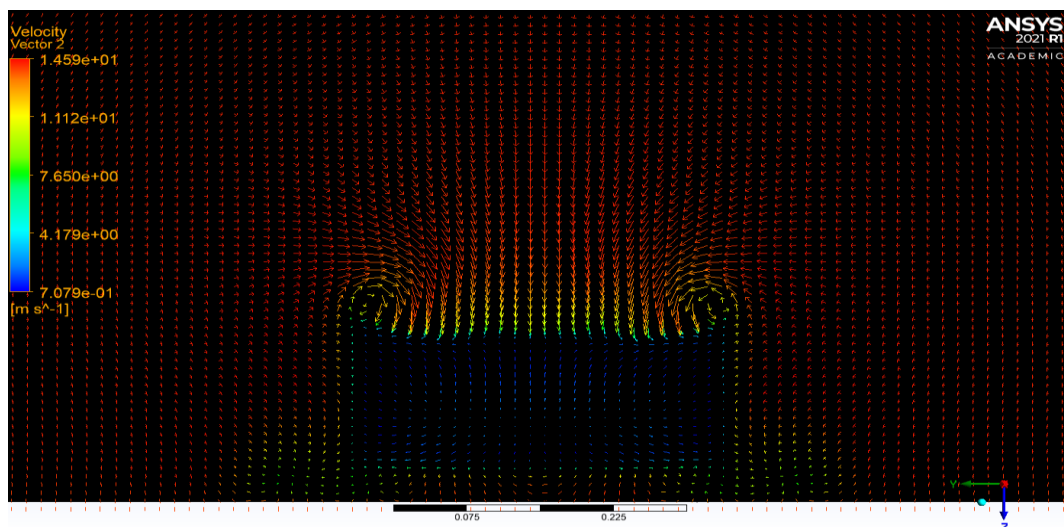
Σχήμα 78 Ροή περιμετρικά του οχήματος για 130 km/h

#### 4.14.1 Σύγκριση της ροής λόγω της δέσμης αέρα

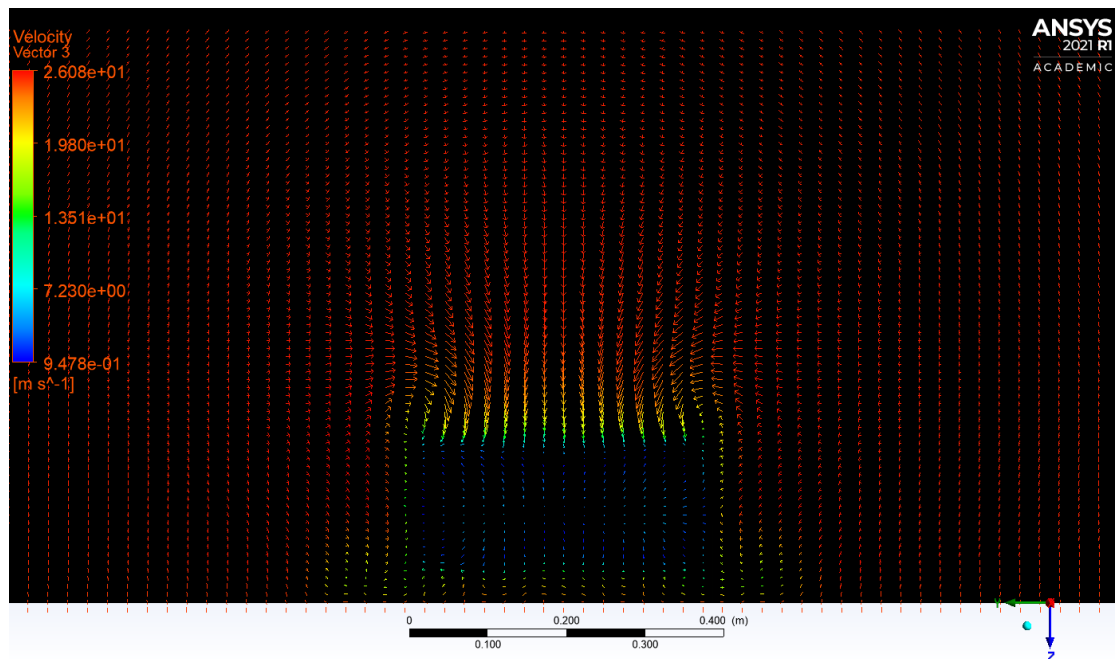
Όπως φαίνεται και από τις παρακάτω εικόνες η ροή 20mm από το πίσω μέρος του οχήματος και για τις τρεις ταχύτητες βλέπουμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση της μέγιστης ταχύτητας. Παρόλα ταύτα με την παρουσία του αγωγού παρατηρείται ότι υπάρχει η προδιάθεση να κινήσει, η δέσμη του αέρα που εξέρχεται από αυτόν, τον σταματημένο αέρα που βρίσκεται στο πίσω μέρος του οχήματος ο οποίος δυσχεραίνει την κίνηση του οχήματος καθώς και στο όχημα χωρίς τον αγωγό παρατηρείται ότι υπάρχει έντονα το φαινόμενο του στροβιλισμού στις ακμές της κεκλιμένης επιφάνειας ενώ στο όχημα με τον αγωγό δεν είναι τόσο έντονο.



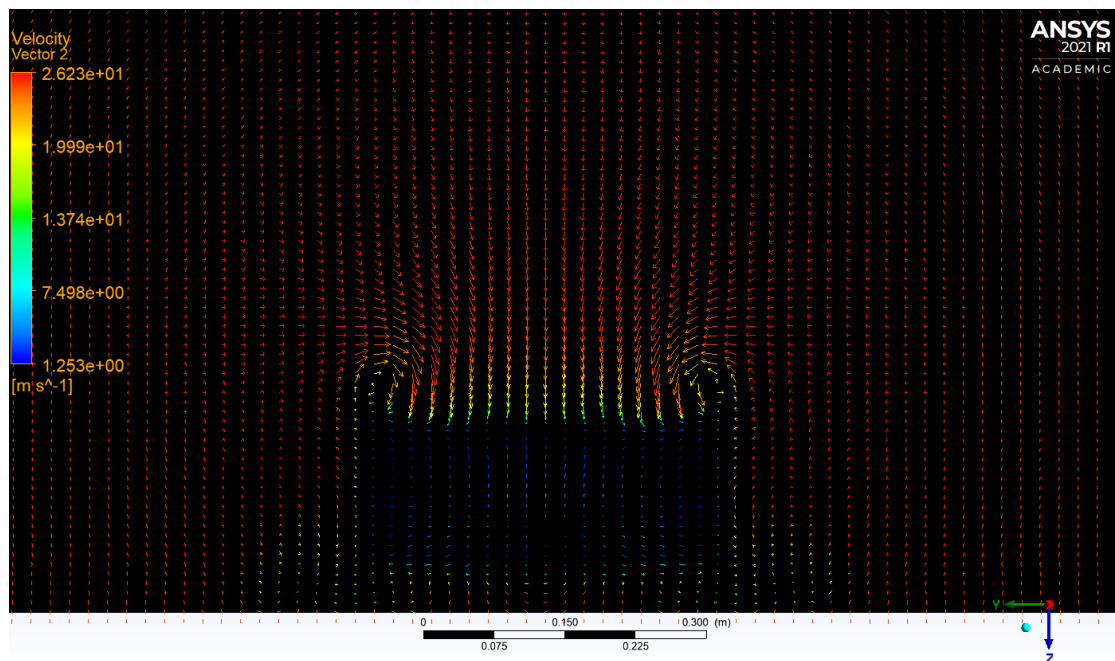
Σχήμα 79 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με αγωγό εκροής για 50 km/h



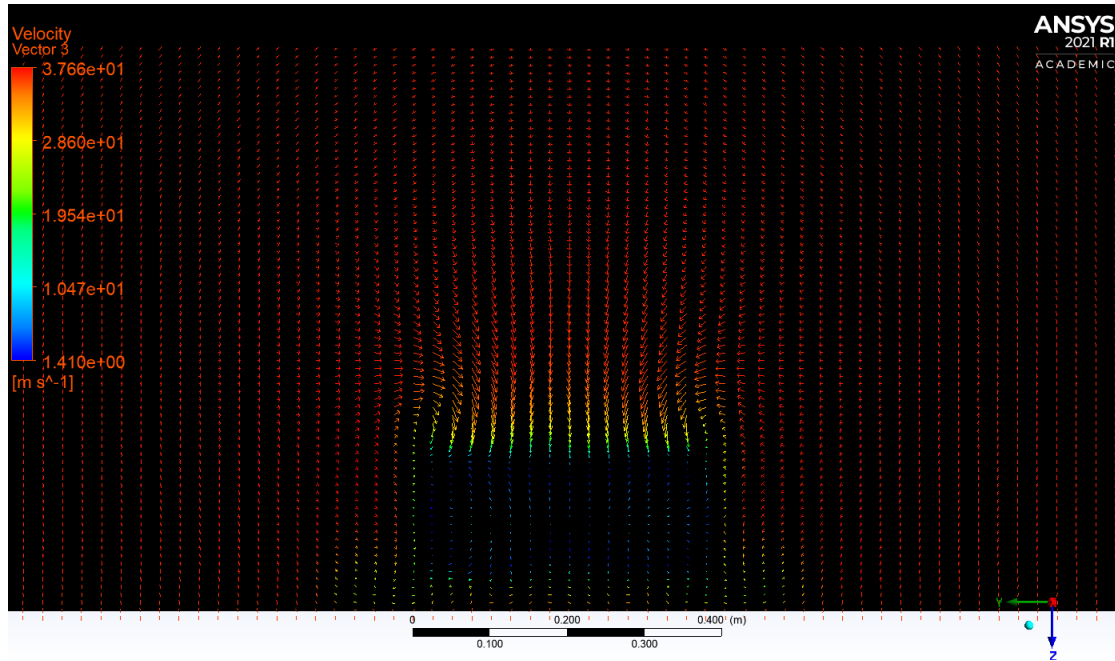
Σχήμα 80 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος χωρίς αγωγό εκροής για 50 km/h



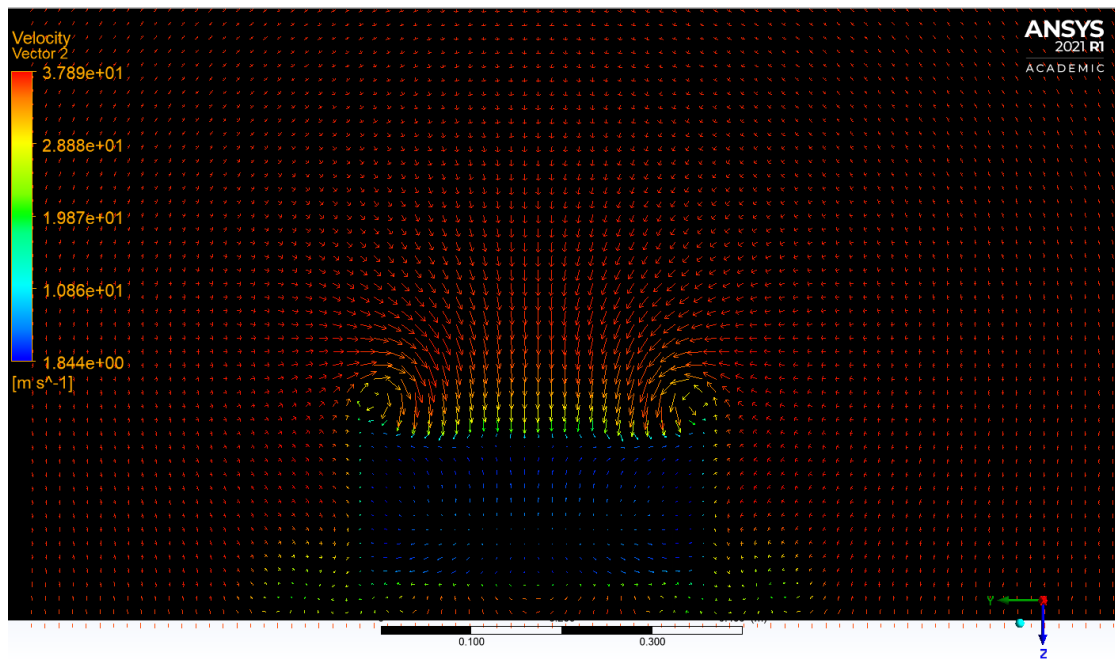
Σχήμα 81 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με αγωγό εκροής για 90 km/h



Σχήμα 82 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος χωρίς αγωγό εκροής για 90 km/h



Σχήμα 83 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος με αγωγό εκροής για 130 km/h



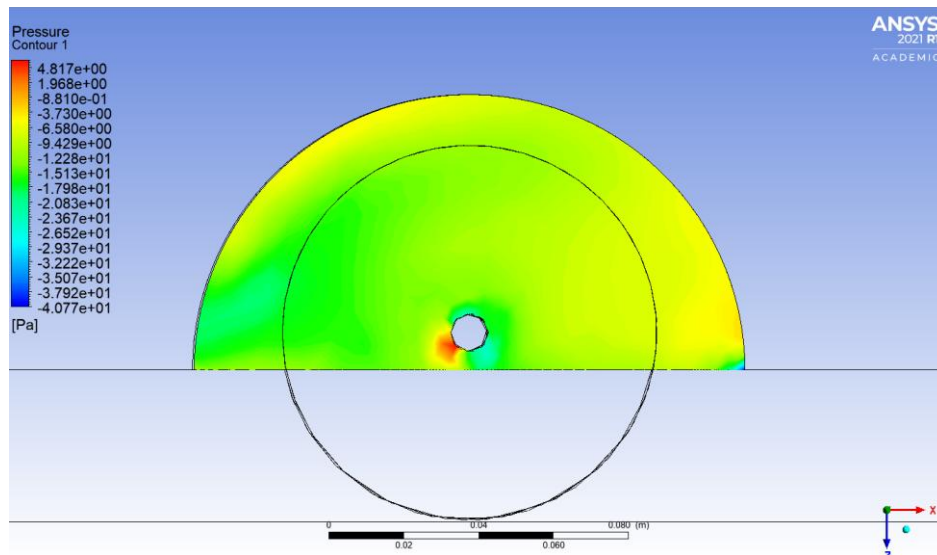
Σχήμα 84 Ροή στο πίσω μέρος του οχήματος χωρίς αγωγό εκροής για 130 km/h



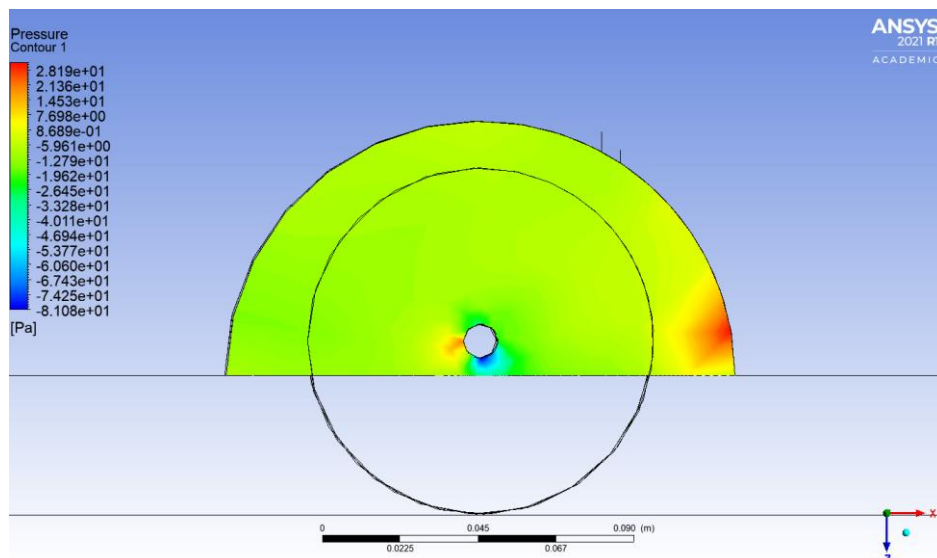
#### 4.14.2 Σύγκριση πιέσεων στον θόλο του τροχού

Από τις παρακάτω εικόνες που παρουσιάζουν τις ισοϋψείς των πιέσεων στο εσωτερικό του θόλου του τροχού με και χωρίς την παρέμβαση του αγωγού εκροής φαίνεται η επίδραση που έχει ο αγωγός σε αυτόν. Παρατηρείται ότι η πίεση στον θόλο χωρίς τον αγωγό είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένη στον εσωτερικό θόλο σε αντίθεση με την συμμετοχή του αγωγού όπου είναι αυξημένη στο δεξί μέρος της εικόνας όπου είναι η περιοχή στην οποία βρίσκεται ο αγωγός. Το ίδιο συμβαίνει και στο επάνω μέρος του θόλου όπου στην περιοχή κάτω από τον αγωγό εκροής παρατηρείται αύξηση στην πίεση ενώ στην μπροστινή μεριά είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένη.

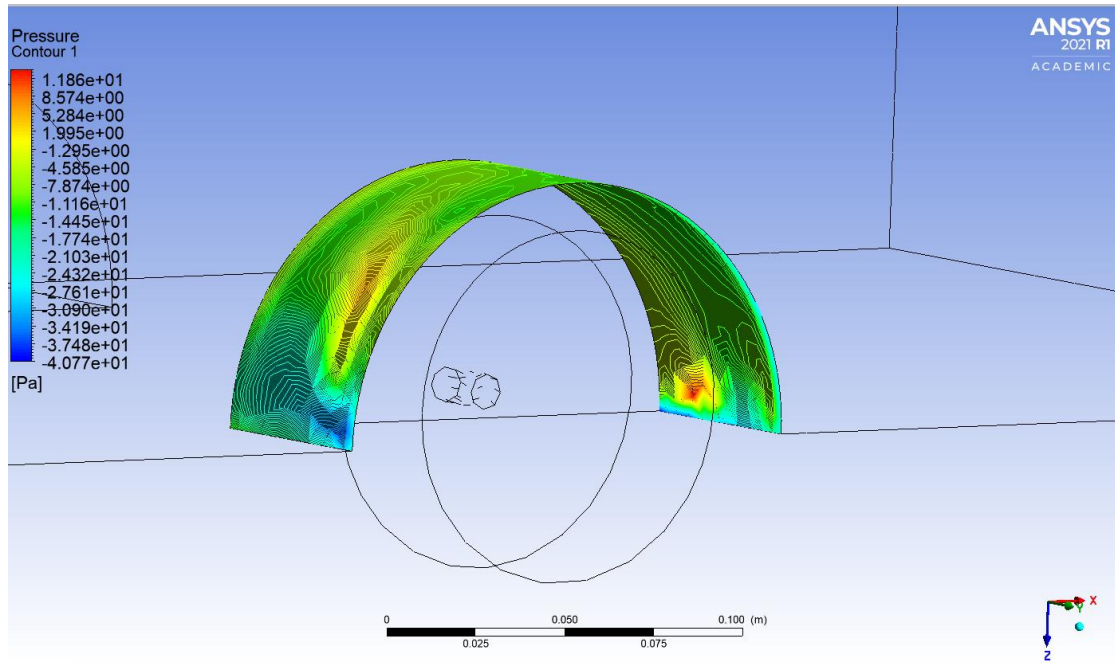
##### 4.14.2.1 Πίεση για ταχύτητα 50 km/h



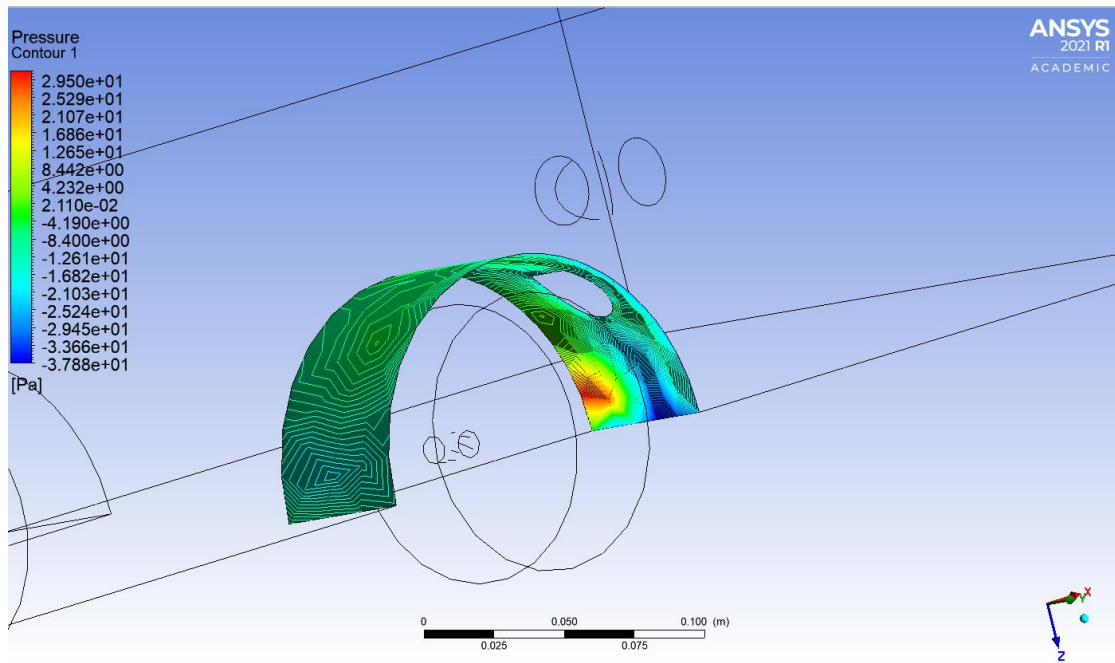
Σχήμα 85 Κατανομή πίεσης χωρίς τον αγωγό εκροής



Σχήμα 86 Κατανομή πίεσης με αγωγό εκροής

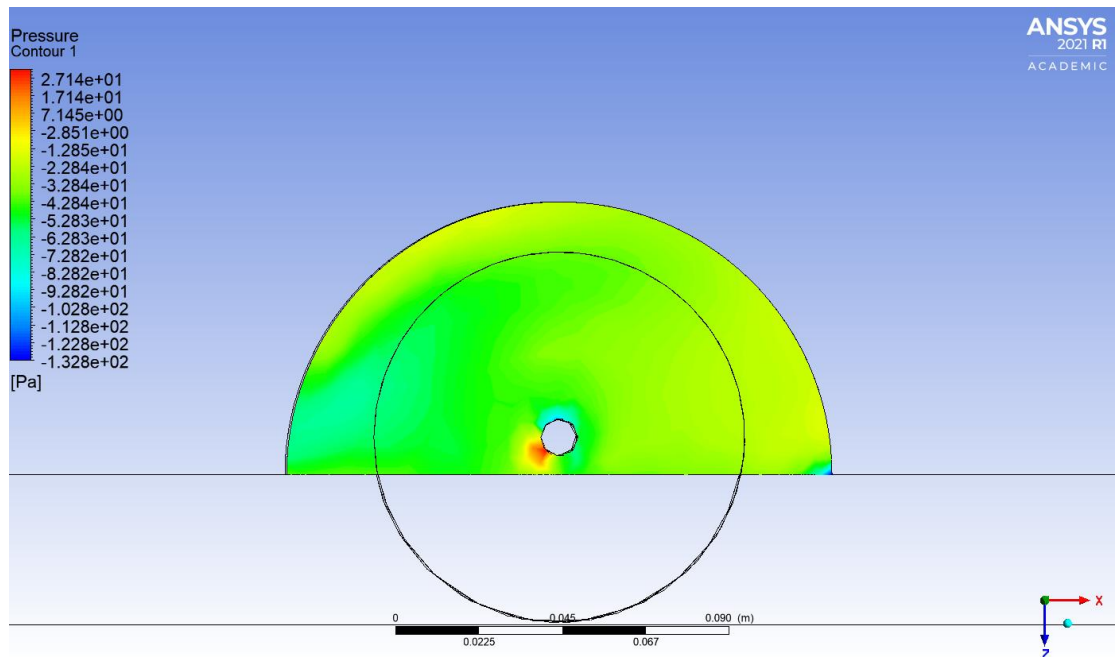


Σχήμα 87 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος χωρίς αγωγό εκροής

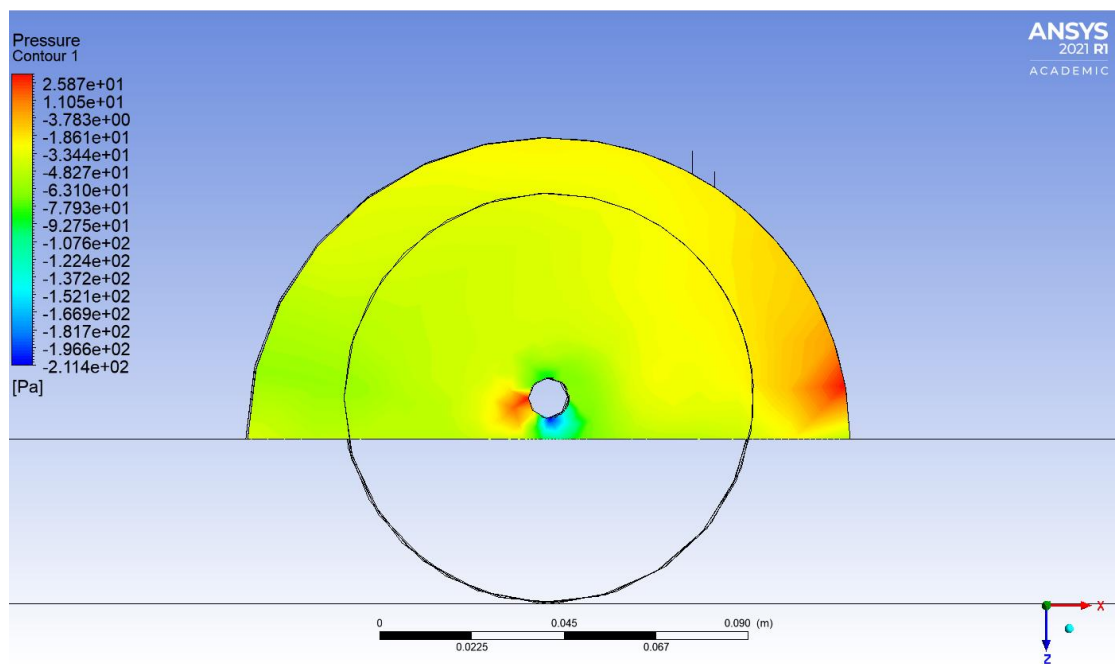


Σχήμα 88 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος με αγωγό εκροής

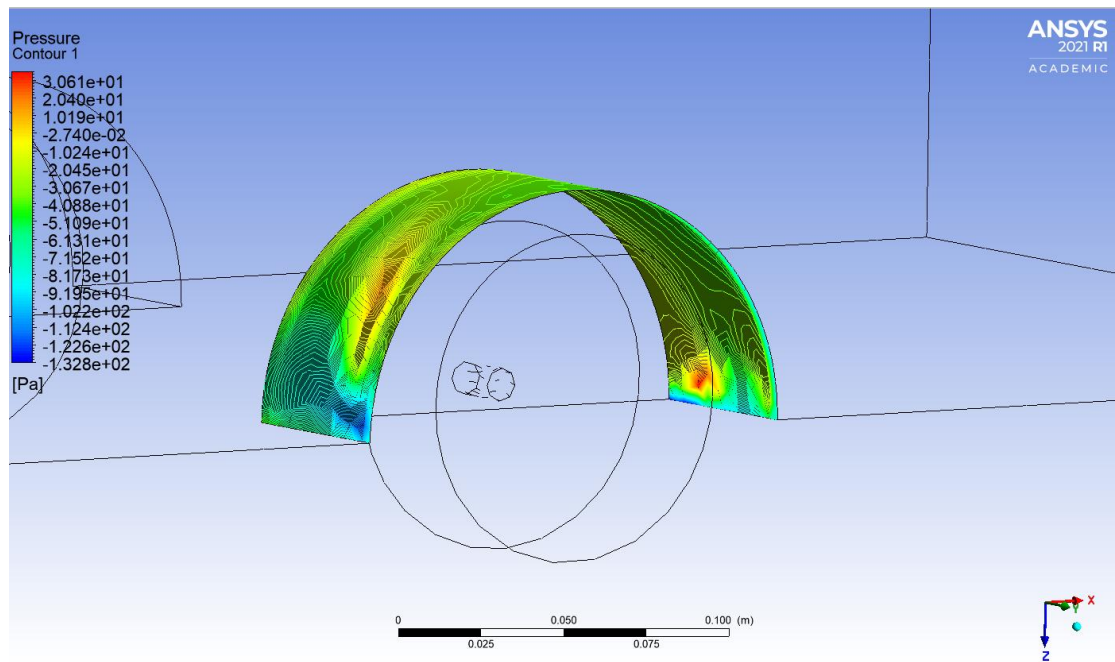
#### 4.14.2.2 Κατανομή πίεσης για ταχύτητα 90 km/h



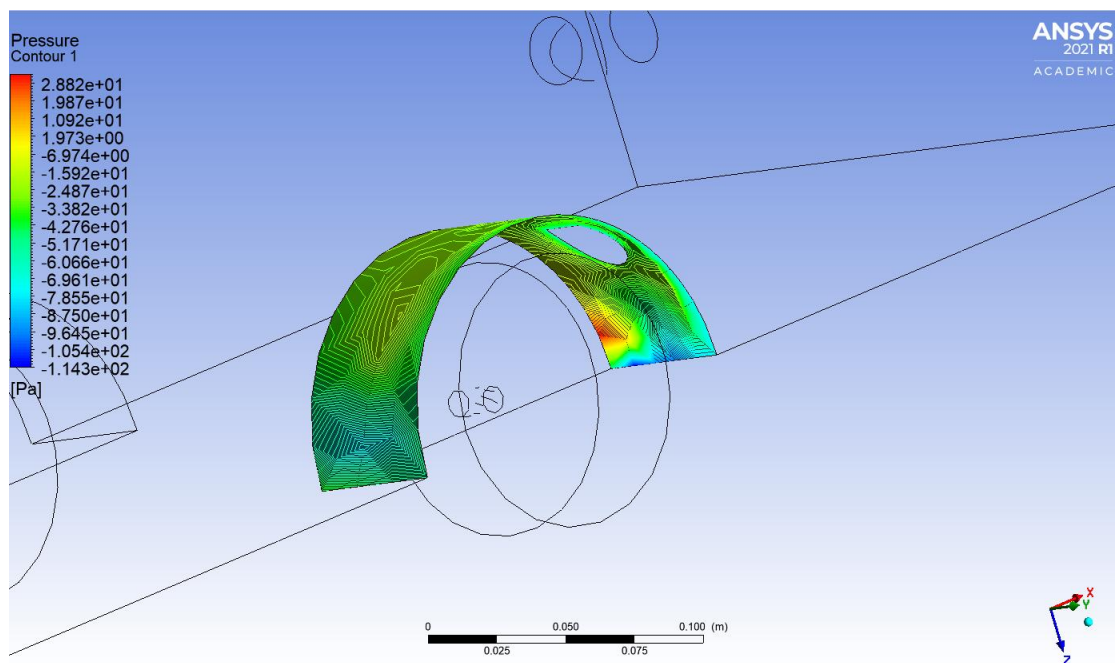
Σχήμα 89 Κατανομή πίεσης χωρίς αγωγό εκροής



Σχήμα 90 Κατανομή πίεσης με αγωγό εκροής

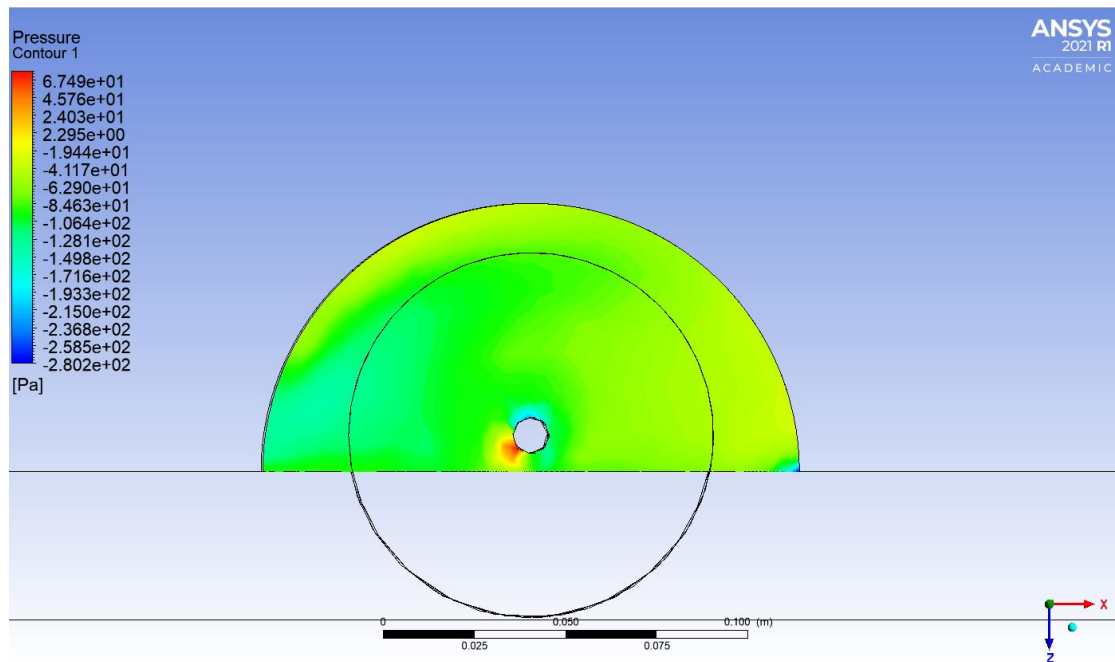


Σχήμα 91 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος χωρίς αγωγό εκροής

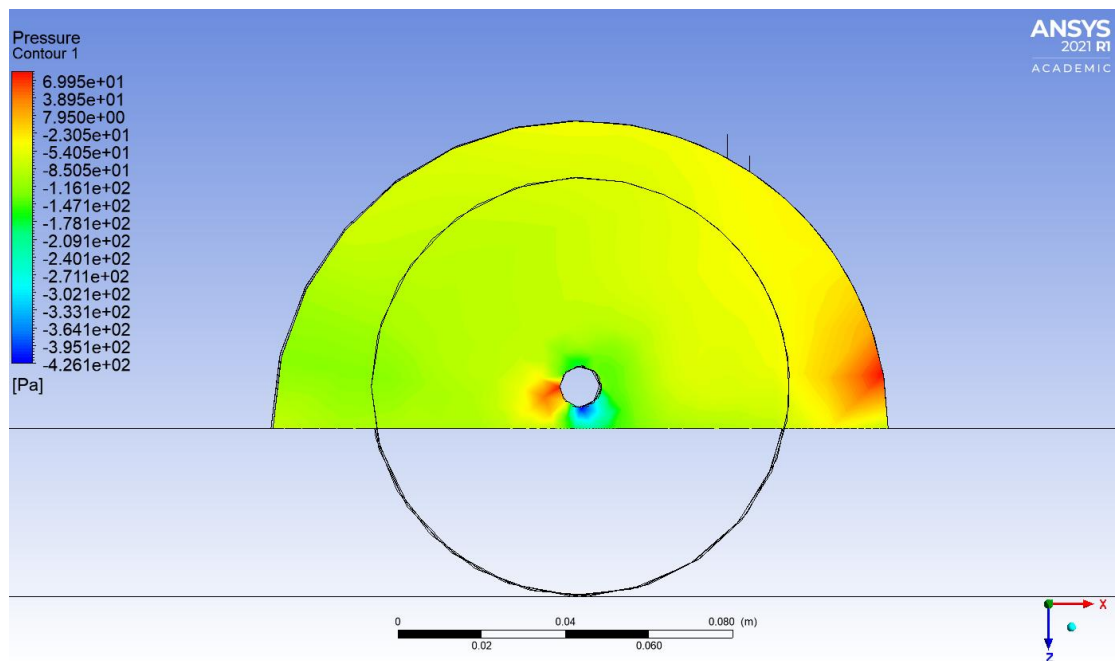


Σχήμα 92 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος με αγωγό εκροής

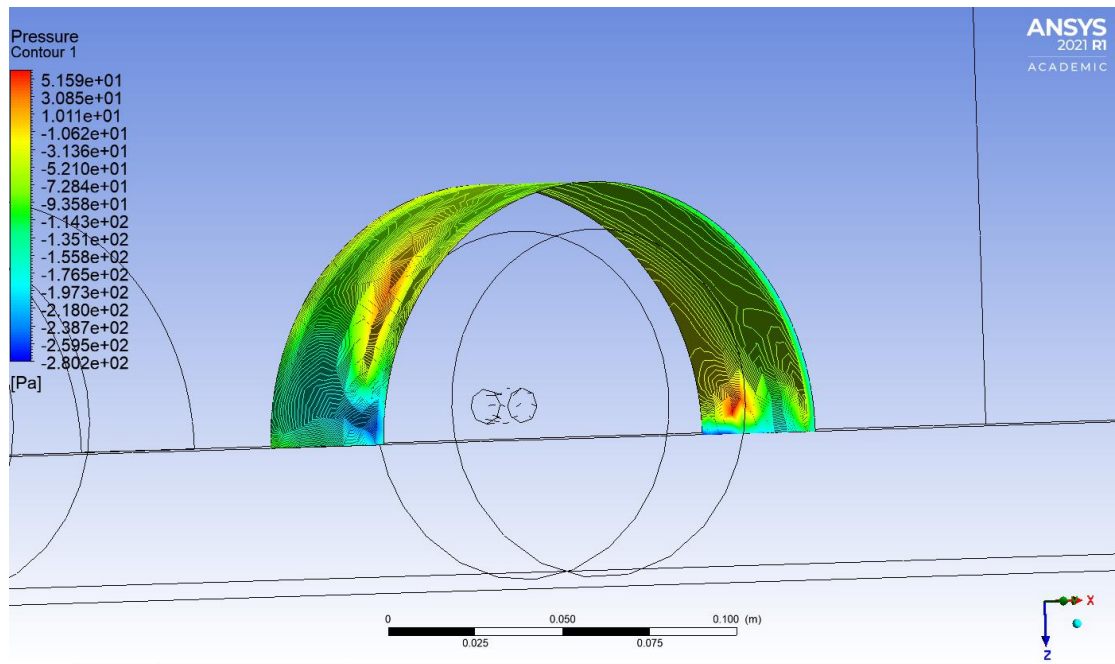
#### 4.14.2.3 Κατανομή πίεσης για ταχύτητα 130 km/h



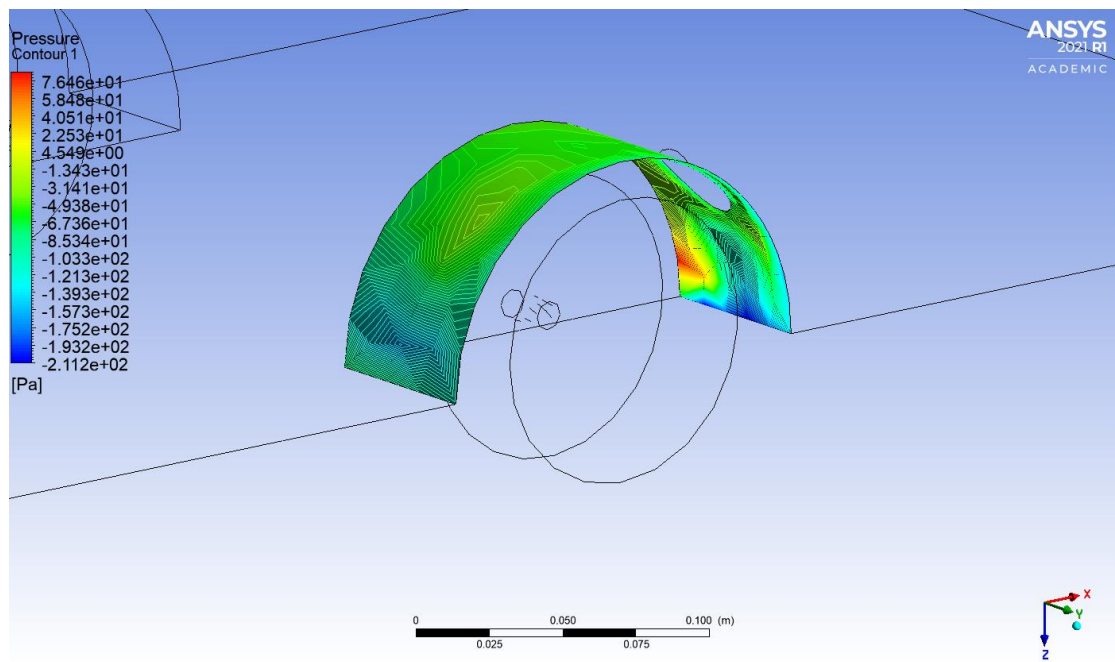
Σχήμα 93 Κατανομή πίεσης χωρίς αγωγό εκροής



Σχήμα 94 Κατανομή πίεσης με αγωγό εκροής



Σχήμα 95 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος χωρίς αγωγό εκροής



Σχήμα 96 Κατανομή πίεσης στο πάνω μέρος με αγωγό εκροής



## 4.15 Σχεδιασμός διάταξης παραγωγής ενέργειας

Για την παραγωγή της ενέργειας αποφασίστηκε να είναι ένας ακτινικός στρόβιλος. Αρχικά έγινε από το Vista RTD σύμφωνα με την ροή μάζας στην είσοδο της οπής. Οι αρχικές συνθήκες για τον σχεδιασμό του στροβίλου παρουσιάζονται στο σχήμα 98. Η θερμοκρασία εισόδου είναι 27°C με πίεση 1 atm και ροή μάζας του αέρα 0.026, 0.018 και 0.0099 kg/s. Ο στρόβιλος διαθέτει 13 πτερύγια με ελάχιστο πάχος στην έξοδο 1 mm και η διάμετρος του καλύμματος του στροφείου η αναλογία εισόδου/εξόδου είναι 0.6 ενώ στο κέντρο 0.22. Εν τέλει στο σχήμα 100 παρουσιάζονται τα τρίγωνα ταχύτητας εισόδου και εξόδου του πτερυγίου.

Aerodynamics Geometry Results Velocity Triangles

**Operating conditions**

Inlet stagnation temper: 300 K

Inlet stagnation pressu: 100 kPa

Mass flow rate: 0.026 kg/s

Expansion ratio t-t: 2.2

Rotational speed: 80000 rpm

Blade speed ratio (U/C): 0.6

**Fluid properties**

Air

Air / fuel ratio: 50

Fixed value C: 1300 J/kg K

R: 287.1 J/kg K

**Flow angles**

**Inlet angle**

Zero relative inlet angle

Relative: 5

Absolute: 70

**Exit angle**

Relative: -50

Absolute: -2.8

**Units**

SI

Imperial

Calculate

Close

**Efficiencies**

**Stage**

Correlatio n: Suhmann

User spe: 0.78

**Nozzle**

Nozzle efficiency: 0.9

Diagram showing a cross-section of a turbine with red arrows labeled 2 and 3 indicating flow directions.

Σχήμα 97 Αρχικές συνθήκες στροβίλου

**Impeller**

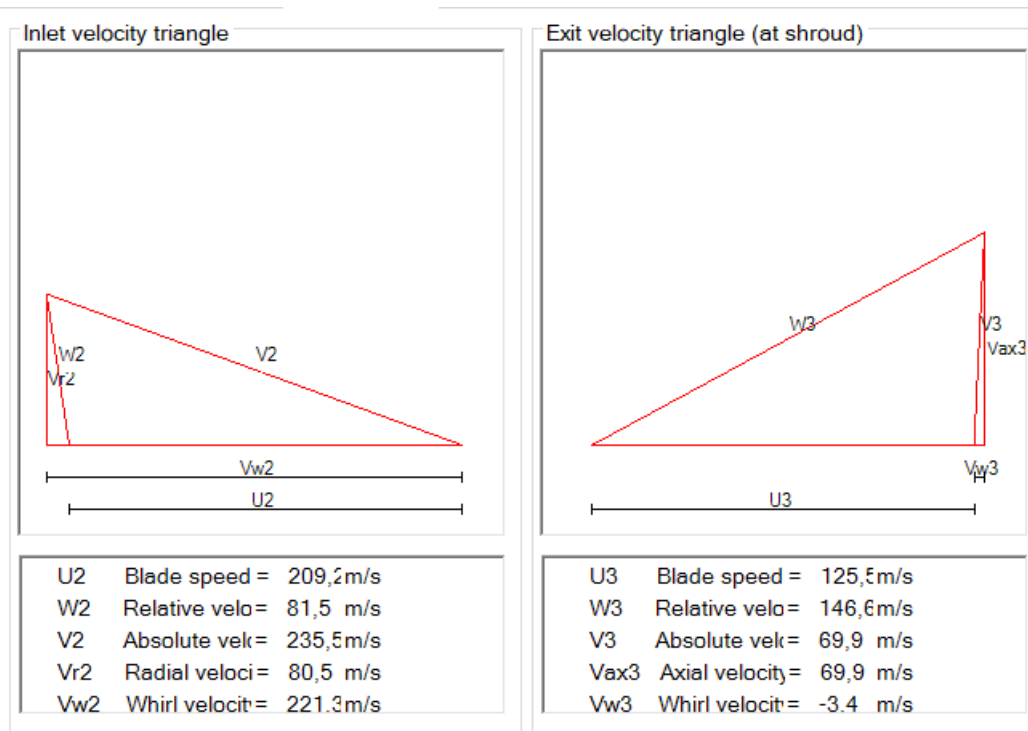
**Diameters**  
 επιφάνεια εξιχνισμού radius ratio       πύλο εξιχνισμού radius ratio

**Vanes**  
 Number of vanes       Vane roughness   
 mean vane thickness at exit  mm      Spanwise distribution

**Axial length**  
 Correlatio  
 Specify length/diameter  %

**Tip clearance**  
 Tip clearance/vane height   
 Tip clearance  mm

Σχήμα 98 Γεωμετρία στροβίλου



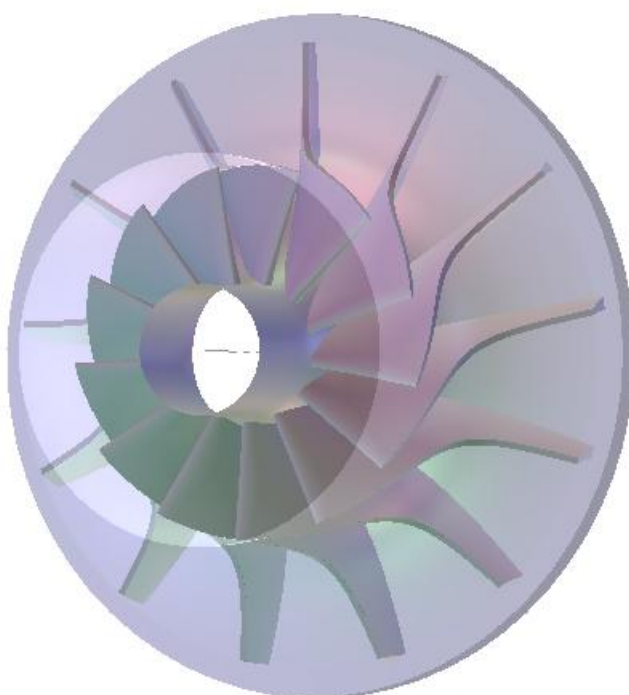
Σχήμα 99 Τρίγωνα ταχύτητας

Τρίγωνο ταχυτήτων σε μία θέση ονομάζεται το διανυσματικό τρίγωνο του οποίου οι τρεις πλευρές είναι οι  $\vec{c}$ ,  $\vec{u}$ ,  $\vec{w}$ . Οι κλίσεις των  $c$  και  $w$  μετρώνται από την αντίστοιχη περιφερειακή διεύθυνση, δηλαδή ως προς την αντίστοιχη περιφερειακή ταχύτητα. Η γωνία  $\beta$  της σχετικής ταχύτητας μετράται από την περιφερειακή διεύθυνση προς το διάνυσμα  $\vec{w}$ .



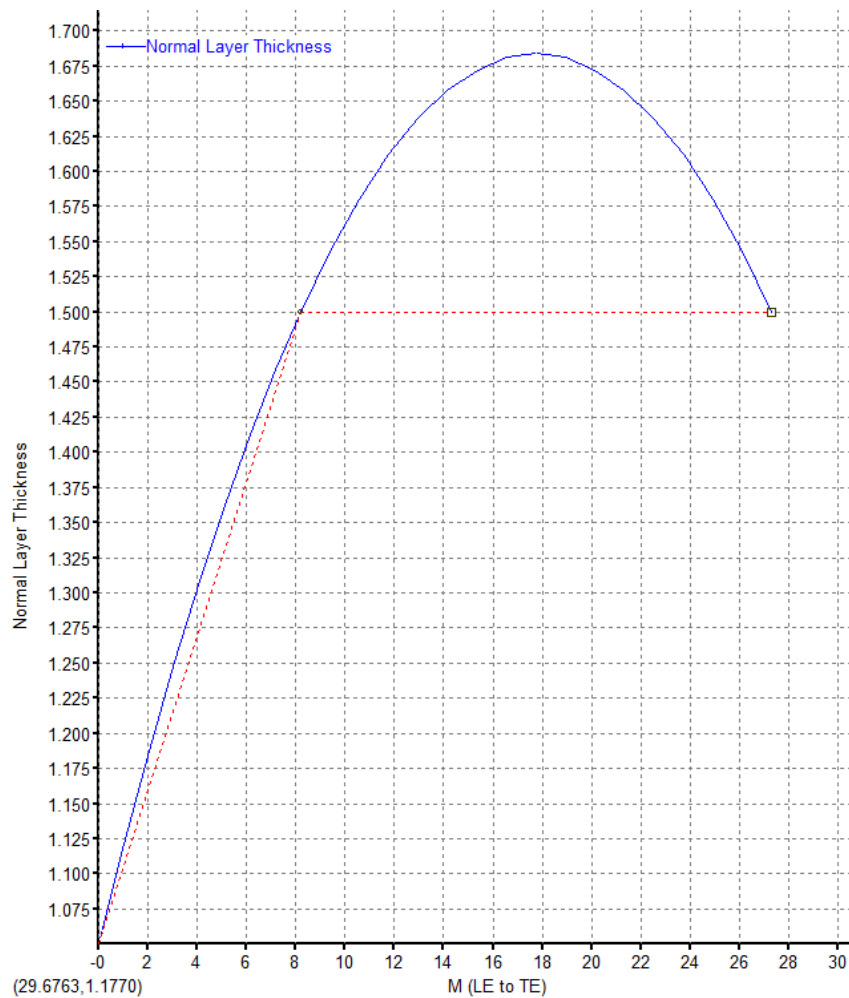
**Πίνακας 11 Αποτελέσματα από το Vista RTD**

Αρχικές συνθήκες	T01(K)	Παροχή(kg/s)	N(rpm)	Αποτελεσματικότητα %
	300	0,026	80000	90
Είσοδος	Γωνία α2	Γωνία β2		
	70	8,541		
Έξοδος	Γωνία α3	Γωνία β3	P(kW)	
	-2,8	61,553	1,22	
Γεωμετρία δρομέα	d2 (mm)			
	49,95			
Γεωμετρία ακροφυσίου	Q/Qchk	Διάμετρος στροβίλου	Επιφάνεια (mm <sup>2</sup> )	
	0,921	57,437	126	

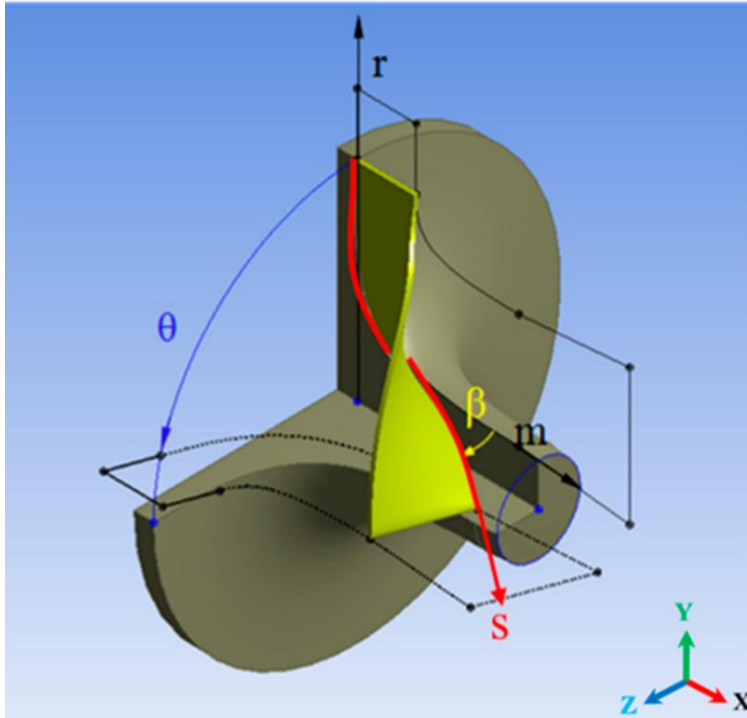


**Σχήμα 100 Μορφή στροβίλου**

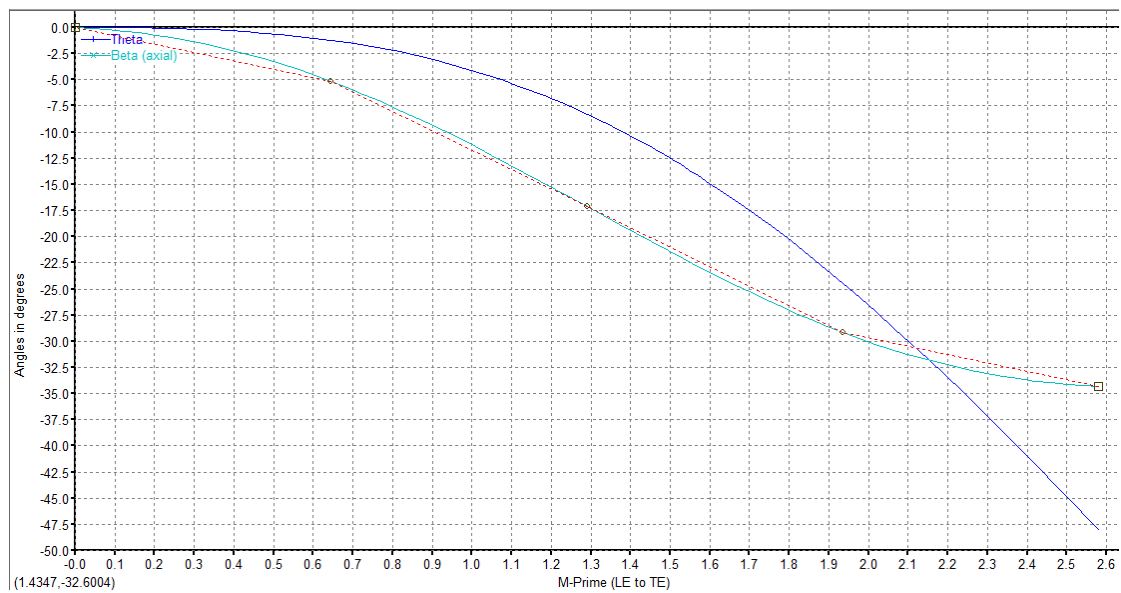
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα του στροβίλου όπου το ένα δείχνει πως κυμαίνεται το πάχος των πτερυγίων ενώ το δεύτερο την διακύμανση της γωνίας  $\beta$  και  $\theta$ . Η γωνία  $\beta$  ορίζεται ως η εφαπτομενική γωνία από την βάση του πτερυγίου και την διάταξη ενώ η γωνία  $\theta$  ορίζεται η γωνία που μετράται από την αρχή του πτερυγίου που έχει διαγράψει στην πορεία του. Το μέγιστο πάχος των πτερυγίων είναι 1.680mm. Η γωνία των πτερυγίων  $\beta$  κυμαίνεται από 0 έως -35 μοίρες ενώ η γωνία  $\theta$  κυμαίνεται από 0 έως -47.7 μοίρες.



Σχήμα 101 Πάχος πτερυγίων



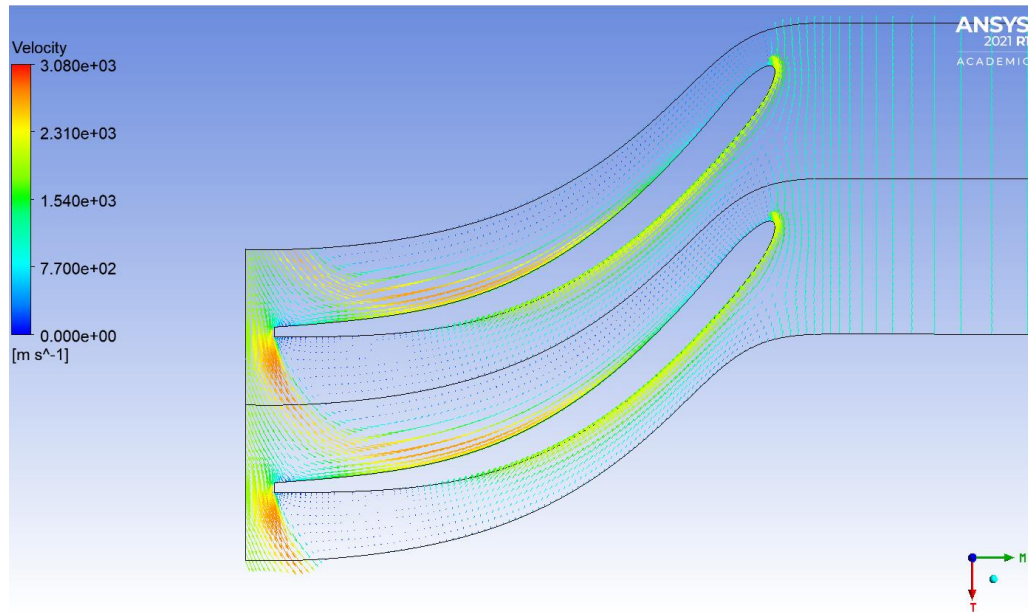
Σχήμα 102 Ορισμός γωνιών β και θ



Σχήμα 103 Γωνίες β και θ

Για την καλύτερη και πιο αναλυτική μελέτη του στροβίλου στη συνέχεια τοποθετήθηκε η γεωμετρία του στο BladeGen και στο TurboGrid για την δημιουργία της διακριτοποίησης (mesh) και στην συνέχεια την επίλυση και οπτικοποίηση της ροής από το CFX για τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης που δέχεται το περύγιο για να υπολογισθεί εν τέλει η παραχθείσα ισχύς για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις εισερχόμενης ροής. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα ο αρχικός σχεδιασμός του στροβίλου από το Vista χρησιμοποιεί οδηγητικά περύγια με αποτέλεσμα η ροή να

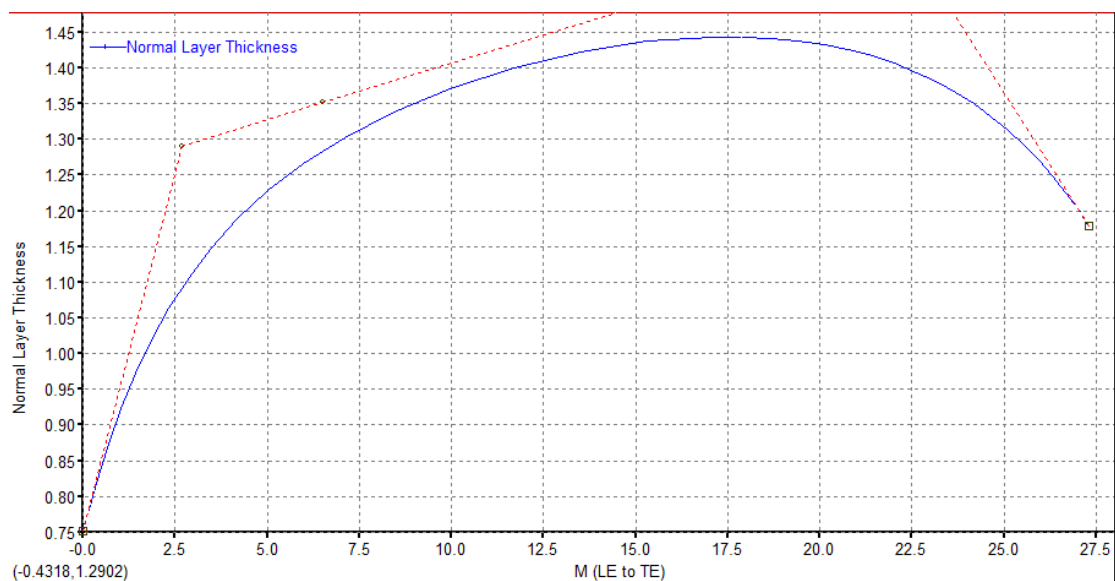
μην κατευθύνεται εφαπτομενικά με τα περύγια του στροβίλου με αποτέλεσμα να δημιουργείται υψηλές τιμές στο πεδίο ροής. Επίσης από τον αρχικό σχεδιασμό των πτερυγίων η είσοδος είναι αρκετά απότομη με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη αποκόλληση της ροής.



Σχήμα 104 Διανύσματα της ταχύτητας με οδηγητικά περύγια από το Vista

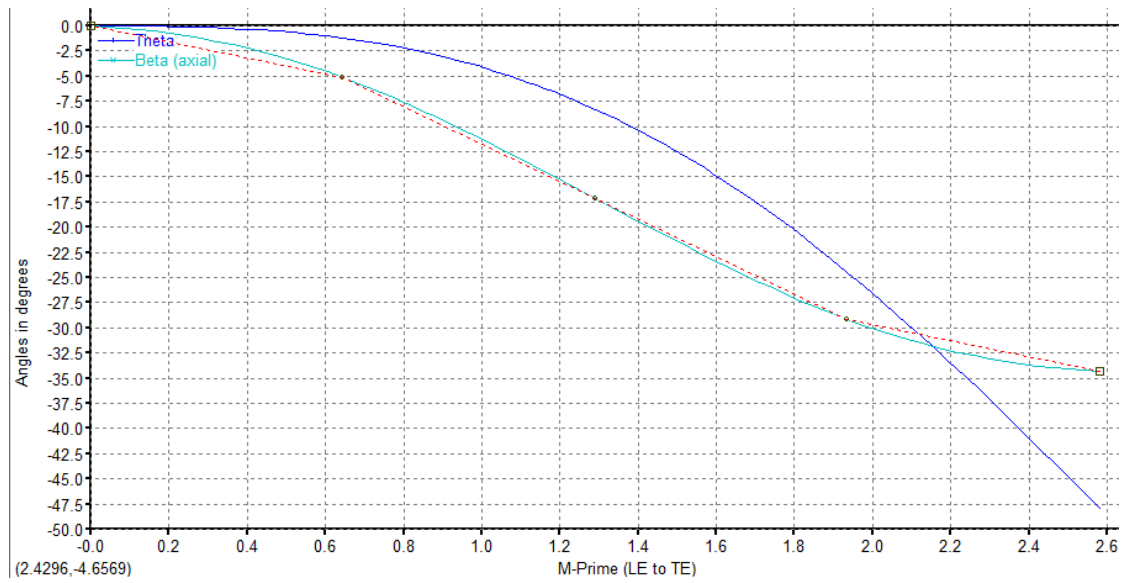
#### 4.16 Καλύτερος σχεδιασμός των πτερυγίων

Εν συνεχεία από το λογισμικό Bladegen του Ansys έγινε προσπάθεια για καλύτερο σχεδιασμό των πτερυγίων αλλάζοντας το πάχος τους στη βάση και στην κορυφή με την μέθοδο Bezier 6 σημείων. Στο σχήμα 106 φαίνεται η νέα μεταβολή του πάχους των πτερυγίων μετά την τροποποίησή του με μέγιστο πάχος 1.45mm.

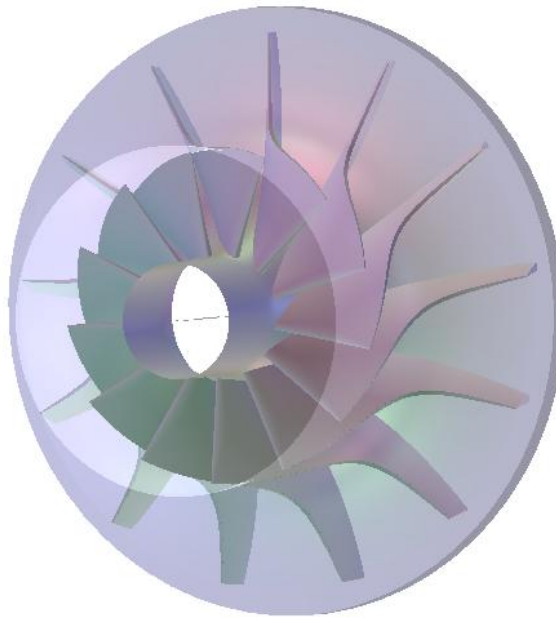


Σχήμα 105 Νέα μεταβολή του πάχους

Επίσης στο σχήμα 107 φαίνεται η νέα μεταβολή των γωνιών  $\beta$  και  $\theta$  οι οποίες κυμαίνονται από 0 έως  $-34^\circ$  και 0 έως  $-48^\circ$  αντίστοιχα.



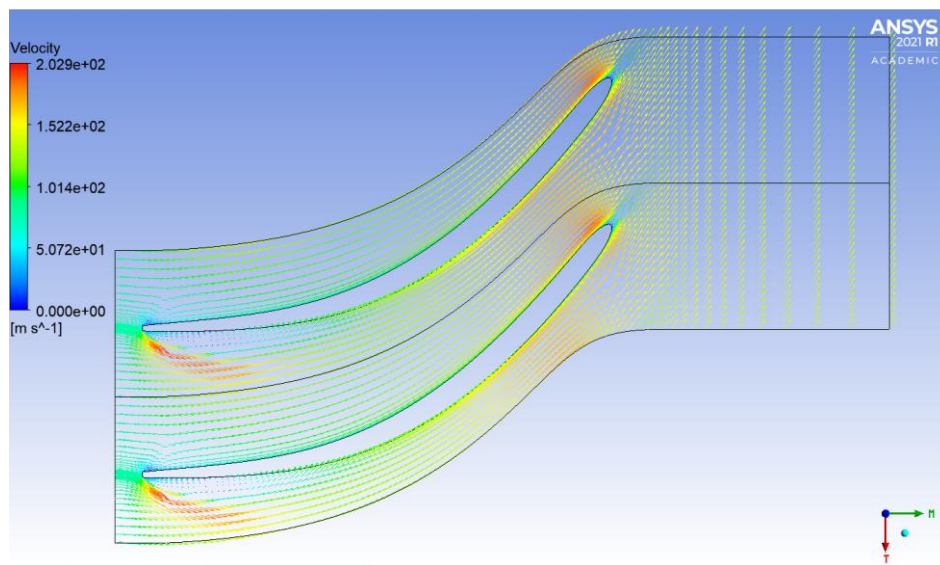
Σχήμα 106 Νέα μεταβολή γωνιών  $\beta$  και  $\theta$



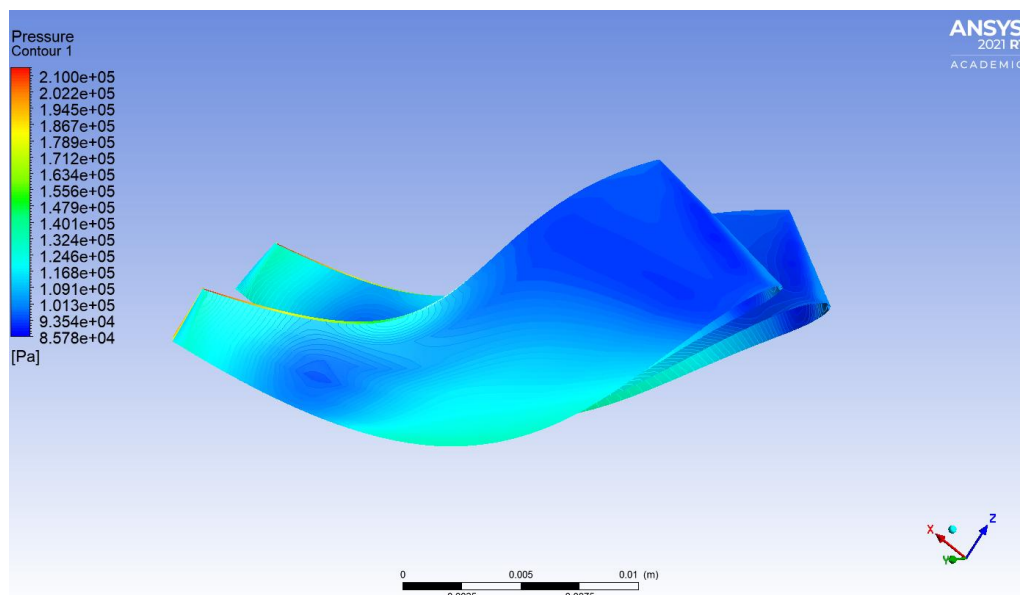
Σχήμα 107 Τελική μορφή στροβίλου

#### 4.16.1 Διανύσματα ταχύτητας, κατανομή πίεσης και της τυρβώδης κινητικής ενέργειας στο πτερύγιο για ταχύτητα 50km/h (0.0099 kg/s)

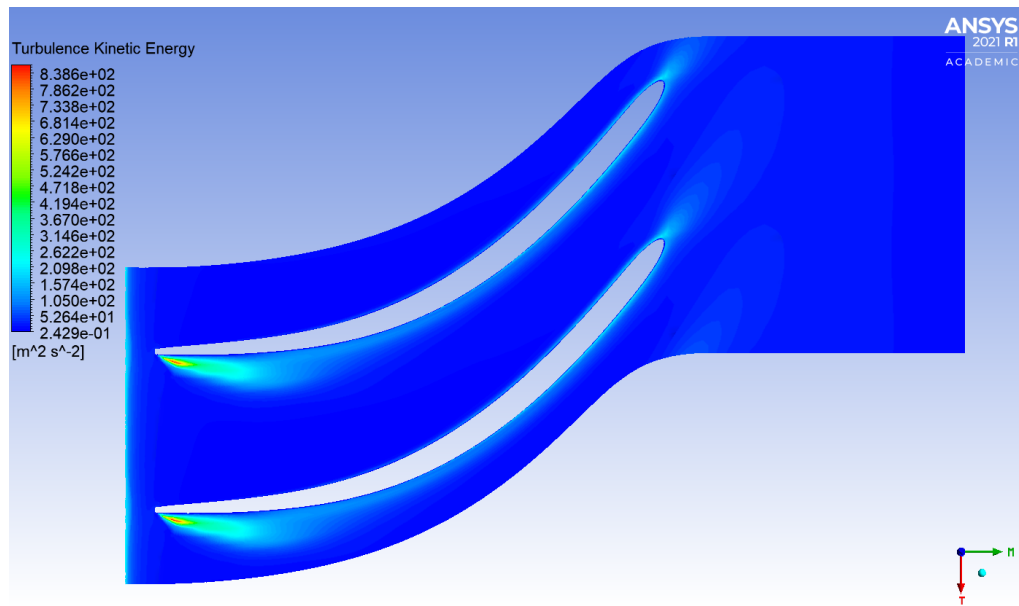
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η σωστή εφαπτομενική πορεία της ροής στα πτερύγια, κατανομή της πίεσης στο πτερύγιο του στροβίλου καθώς και η κινητική ενέργεια στροβιλισμού. Όπως φαίνεται από τα σχήματα της ταχύτητας αλλά και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο υπάρχει το σημείο ανακοπής στην ακμή το οποίο προκαλεί επιτάχυνση της ροής και υπάρχει ένα μέρος στο οποίο δημιουργείται κενό και μικρή ανακυκλοφορία της ροής.



Σχήμα 108 Διανύσματα της ταχύτητας με εφαπτομενική κατεύθυνση εισόδου



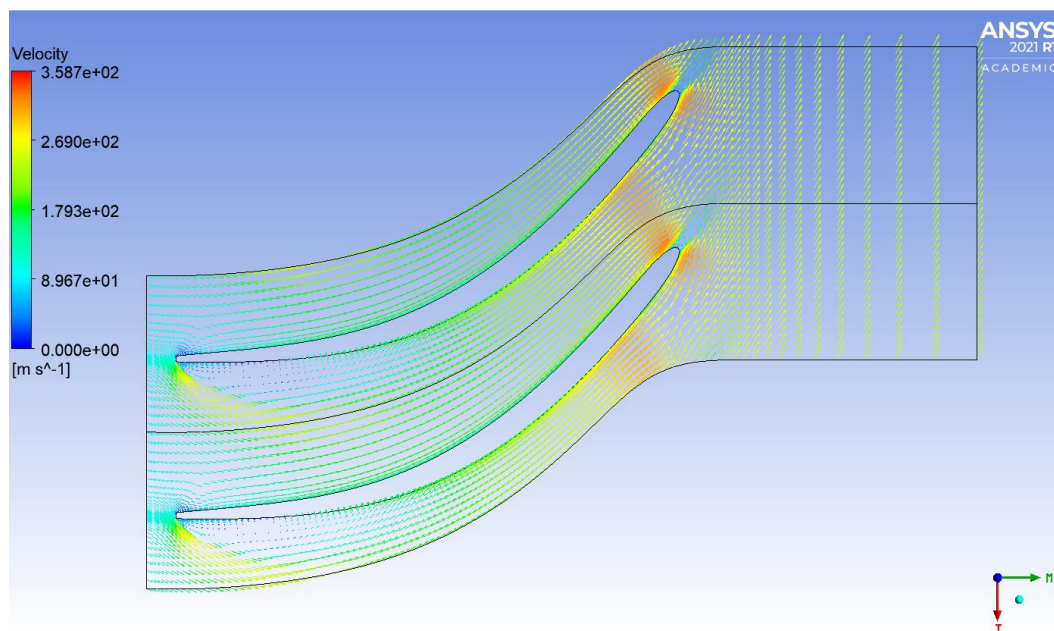
Σχήμα 109 Κατανομή πίεσης του πτερυγίου για 0.0099 kg/s



Σχήμα 110 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια για 0.0099 kg/s

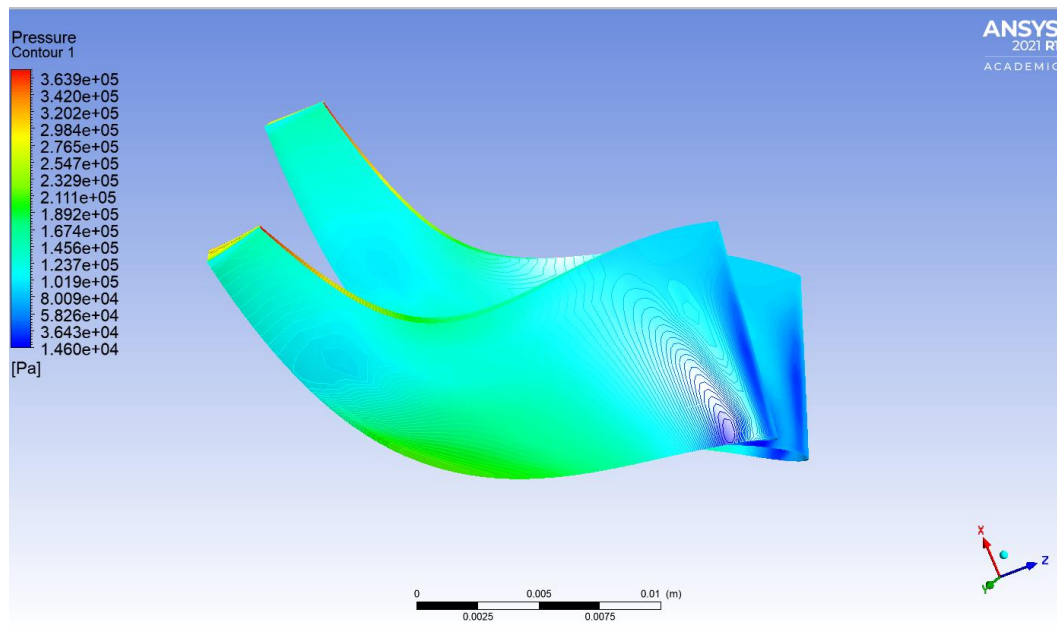
#### 4.16.2 Διανύσματα ταχύτητας, κατανομή πίεσης και Τυρβώδης Κινητική

Ενέργεια στο περύγιο για ταχύτητα 90km/h (0.018 kg/s)

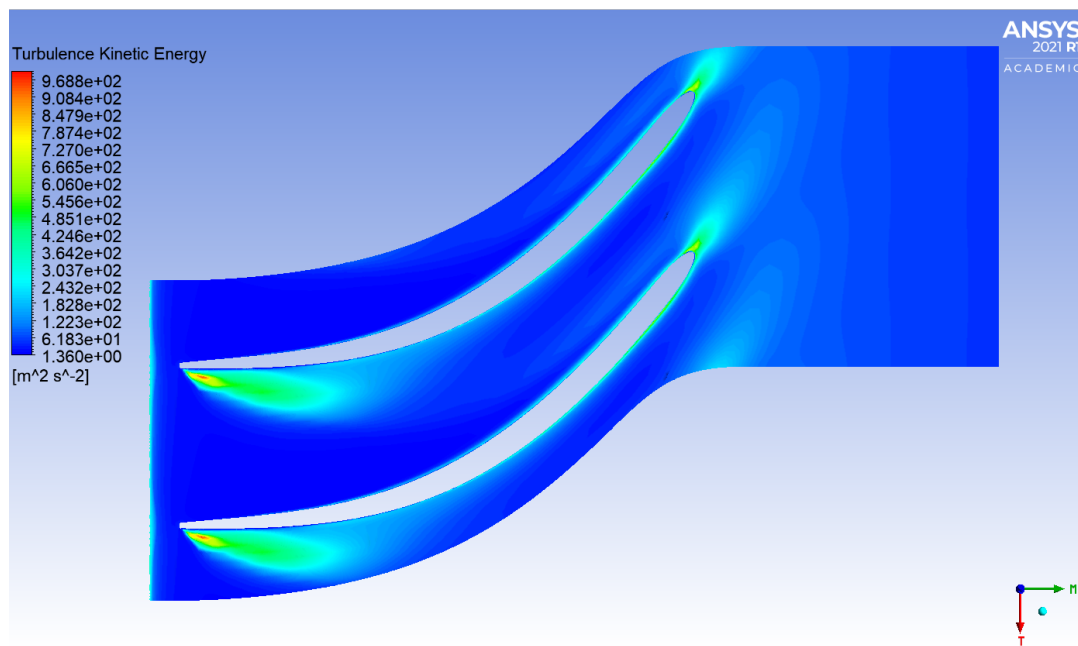


Σχήμα 111 Διανύσματα της ταχύτητας με εφαπτομενική κατεύθυνση εισόδου





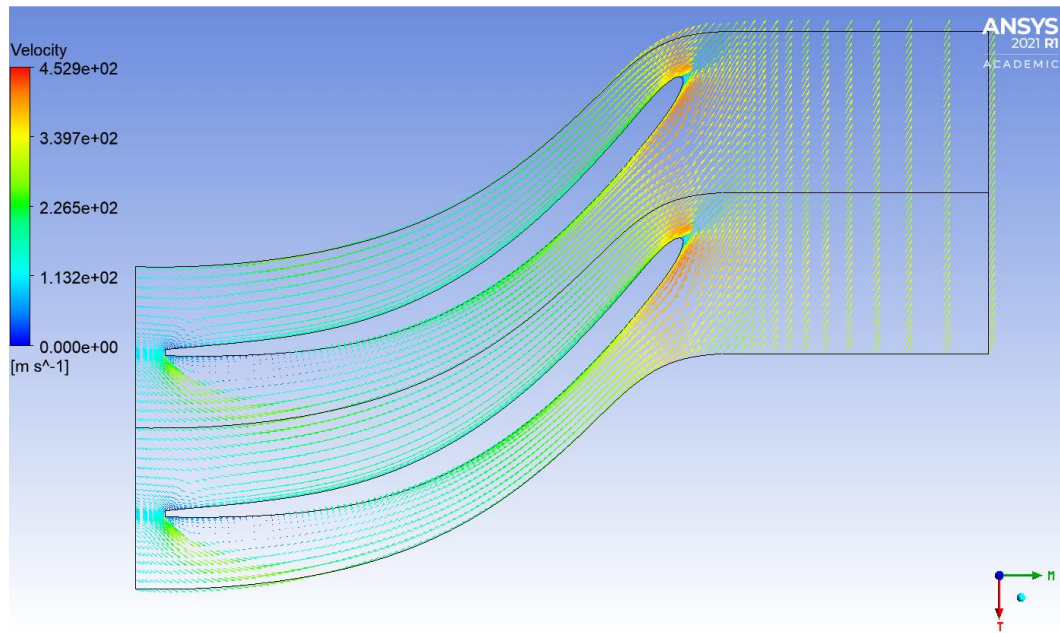
Σχήμα 112 Κατανομή πίεσης του πτερυγίου για 0.018 kg/s



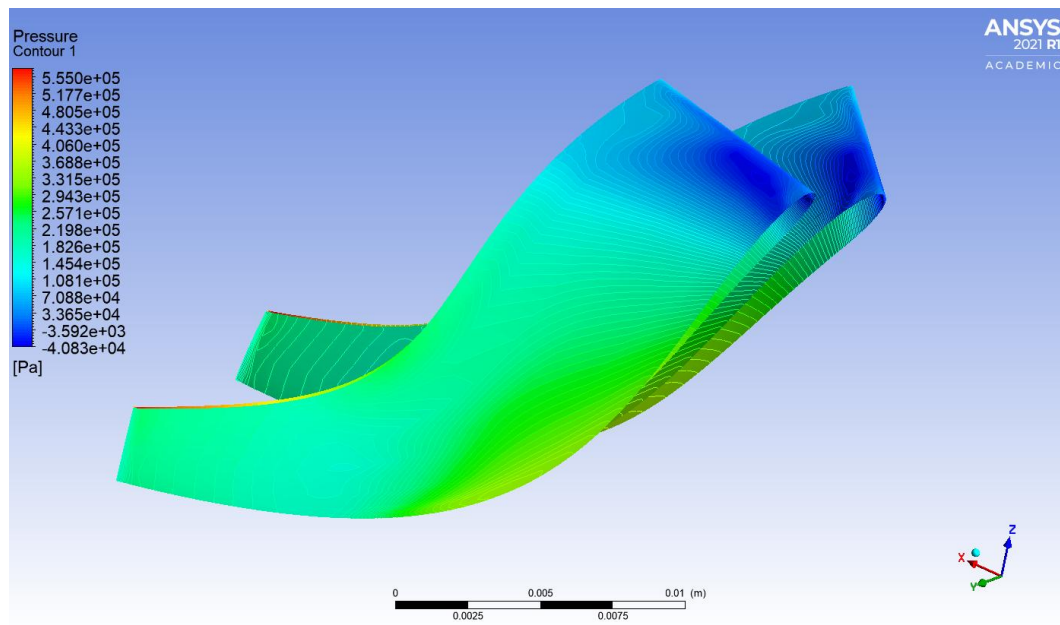
Σχήμα 113 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια του πτερυγίου για 0.018 kg/s



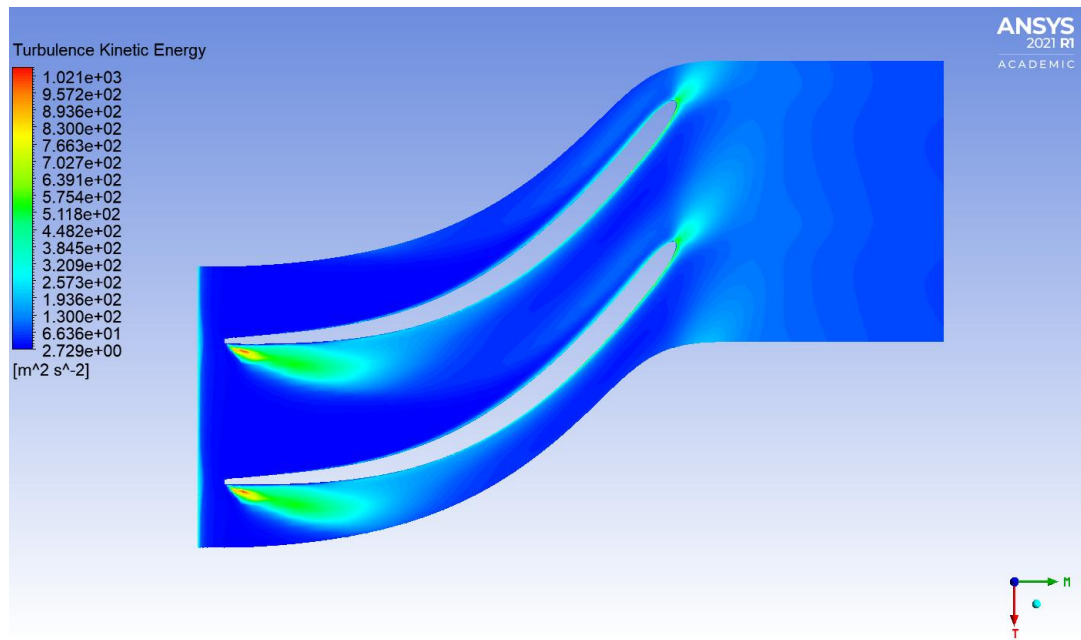
### 4.16.3 Διανύσματα ταχύτητας, κατανομή πίεσης και Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια στο περύγιο για ταχύτητα 130km/h (0.026 kg/s)



Σχήμα 114 Διανύσματα της ταχύτητας με εφαπτομενική κατεύθυνση εισόδου



Σχήμα 115 Κατανομή πίεσης του περυσίου για 0.026 kg/s



Σχήμα 116 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια του πτερυγίου για 0.026 kg/s

Σύμφωνα με τους τελικούς υπολογισμούς της ροπής στα πτερύγια του στροβίλου και πολλαπλασιάζοντας την γωνιακή ταχύτητα για να βρεθεί η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου για κάθε μία από τις περιπτώσεις της. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί είναι 0.774 kW για ταχύτητα 130 km/h. Επίσης με την δημιουργία του αγωγού εκροής παρατηρείται μείωση της δύναμης αντίστασης του οχήματος κατά 6% για ταχύτητα 50km/h και 10% για 90 και 130 km/h ενώ υπάρχει αύξηση της αρνητικής άντωσης του οχήματος κατά 6%,3% και 2% για τις αντίστοιχες ταχύτητες.

**Πίνακας 12 Συνολικά αποτελέσματα**

V (m/s)	36,11	25	13,89
Massflow (kg/s)	0,026	0,018	0,0098
Force in car without X (N)	40,22	19,3812	5,85865
Force X in car with tunnel (N)	36,0613	17,4431	5,508
Force in car without Z (N)	-38,3136	-18,0989	-5,2981
Force Z in car with tunnel (N)	-39,2507	-18,5796	-5,61223
Μείωση δύναμης αντίστασης κατά X	10%	10%	6%
Αύξηση της κάθετης δύναμης κατά Z	2%	3%	6%
Torque (Nm)	0.0924	0.0769	0.0455
Power (kW)	<b>0.774</b>	<b>0.644</b>	<b>0.382</b>

Καταλήγοντας η συνολική παραγόμενη ισχύς από τους δύο στροβίλους (έναν σε κάθε τροχό) ισούται με **1.548, 1.288** και **0.764** kW.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για την παραγόμενη ισχύς που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11 είναι εφικτό να υπολογιστεί η αυτονομία που μπορεί να προσφέρει σε ένα ηλεκτρικό όχημα. Οπότε σύμφωνα με το περιοδικό Kosmocar έχουμε τα εξής δεδομένα για 2 ηλεκτρικά αυτοκίνητα ευρείας παραγωγής:

### 1. Audi e-tron

a) Μέση κατανάλωση κατά WLTP 24.65kWh/100km : 0.2465kWh/km

b) Πραγματική κατανάλωση κατά WLTP 26.22kWh/100km:  
**0.2622kWh/km**

### 2. Volkswagen e-Golf

a) Μέση κατανάλωση κατά WLTP 15.65kWh/100km : 0.1565kWh/km

b) Πραγματική κατανάλωση κατά WLTP 16.65kWh/100km:  
**0.1665kWh/km** [10]

Καταλήγοντας η ανάκτηση ενέργειας που πραγματοποιείται για τις ταχύτητες 50,90 και 130 km/h από το Πίνακα 11 είναι **0.764** για 50km, **1.288** για 90km και **1.548 kWh** για 130km.

Με αναγωγή στα 100km η ανάκτηση ενέργειας ισούται με **1.528, 1.431** και **1.191** kWh/100km

**Άρα έχουμε μία παραγωγή αυτονομίας ανά 100km της τάξης :**

Για το Audi e-tron 6% 5% 5%

Και για το Volkswagen e-golf 9% 9% 7%

Συμπερασματικά σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη και με βάση τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι μπορούμε να έχουμε όφελος από αυτή την διάταξη ως προς την παραγόμενη ενέργεια είτε χρησιμοποιώντας την για φόρτιση ενός εφεδρικού συσσωρευτή είτε για την διοχέτευσή της για την κάλυψη δευτερευόντων αναγκών.

# Κεφάλαιο 5. Επίλογος

## 5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει εξετασθεί η ροή του αέρα γύρω από ένα σώμα για την παραγωγή ενέργειας και την αύξηση της αυτονομίας ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Το σώμα που επιλέχθηκε για την σύγκριση και ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων είναι το Ahmed body. Το σώμα αυτό σχεδιάστηκε για πρώτη φορά το 1984 από τον S. R. Ahmed και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποτελεί το  $\frac{1}{4}$  του μεγέθους ενός κανονικού οχήματος. Στη συνέχεια το Ahmed body διαμορφώθηκε με τροχούς και θόλους για να πραγματοποιηθεί η υπολογιστική μελέτη. Η ανάλυση της μελέτης πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής *ANSYS-FLUENT (CFD)* το οποίο επικεντρώνεται στην επίλυση εξισώσεων ροής ρευστών και στην μοντελοποίηση της ροής του ρευστού γύρω από το υπό μελέτη αντικείμενο. Στην συνέχεια σχεδιάζεται η διάταξη με την οποία πραγματοποιείται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας όπου αποτελείται από έναν ακτινικό στρόβιλο. Αρχικά έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων για το αρχικό Ahmed body με τα αποτελέσματα από το ERCOFTAC για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Υπολογίσθηκε το σχετικό σφάλμα του συντελεστή πίεσης σε 10 σημεία και της ταχύτητας σε 6 διαφορετικά σημεία και στη συνέχεια έγινε σύγκριση της ροής σε 5 διαφορετικά πεδία. Έπειτα έγινε μελέτη στο τροποποιημένο μόνο με τροχούς Ahmed body για την περιοχή στο θόλο των τροχών όπου θα σχεδιαστεί στη συνέχεια ο αγωγός εκροής για τον υπολογισμό της εισερχόμενης παροχής μάζας για τις ταχύτητες 50,90 και 130 km/h. Έγινε σύγκριση της ροής του οχήματος με και χωρίς τον αγωγό εκροής όπου παρατηρούμε στο όχημα χωρίς τον αγωγό εκροής υπάρχει στροβιλισμός στις ακμές της κεκλιμένης επιφάνειας ενώ στο όχημα με τον αγωγό εκροής δεν είναι τόσο έντονο το φαινόμενο. Εν τέλει σχεδιάστηκε ένας ακτινικός στρόβιλος για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας όπου επιτεύχθηκε η παραγωγή 0.774, 0.644 και 0.382 kW καθώς επιτεύχθηκε και μείωση της οπισθέλκουσας κατά 10% για τις ταχύτητες 90 και 130 km/h και 6% για 50 km/h.

## 5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Επειδή η εργασία πραγματοποιήθηκε στην φοιτητική έκδοση του Ansys υπήρχε περιορισμός στον αριθμό των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος. Αυτό έχει ως συνέπεια την μικρότερη ακρίβεια των μετρήσεων άρα και αυξημένο το σφάλμα των μετρήσεων σύγκρισης αλλά και διαφορετικό τελικό αποτέλεσμα. Οπότε για την ακριβέστερη ανάλυση πρέπει να ξανά γίνει η μελέτη με μεγαλύτερο αριθμό υπολογιστικών κελιών. Επίσης η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε μοντέλο κλίμακας 1:4 ενός πραγματικού οχήματος άρα θα ήταν καλό να επαναληφθεί η μελέτη με μοντέλο κλίμακας 1:1 καθώς και η εκτέλεση του πειράματος στο εργαστήριο για την λήψη ρεαλιστικών τιμών αποτελεσμάτων. Βελτιστοποίηση του στροβίλου και περαιτέρω έρευνα της επίδρασής του στην επίδοση του οχήματος τόσο κατά την λειτουργία του όσο και για τον τρόπο εξόδου της ροής έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για την μείωση της οπισθέλκουσας με αποτέλεσμα την επίτευξη της λιγότερης κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύς. Συνέπεια αυτού είναι η ελάττωση των εκπομπών των ρύπων από σταθμούς παραγωγής ενέργειας και η εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων. Οπότε είναι πρέπει να συνεχιστεί η εργασία με τον υπολογισμό της μείωσης της εκπομπής των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κλείνοντας θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω για την διάταξη στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύς διαφορετική αυτή του ακτινικού στροβίλου.

# Βιβλιογραφία

1. András Gulyás , Ágnes Bodor , Tamas Regert , Imre M. Jánosi , PIV measurement of the flow past a generic car body with wheels at LES applicable Reynolds number, 8 July 2013
2. ANSYS CFD-Post User's Guide, Release 2018
3. Ansys Lecture 5 Global Mesh Controls 14. 5 Release, 2012
4. Ansys Lecture 8 Mesh Quality 14. 5 Release, 2012
5. ANSYS TurboGrid Tutorials, Release 2013
6. ANSYS TurboSystem User's Guide, Release 2013
7. B. Mohammadikalakoo , P. Schito , M. Mani, Passive flow control on Ahmed body by rear linking tunnels, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics
8. David Gordon Wilson & Theodosios Korakianitis, 2<sup>η</sup> Έκδοση, 2018, Εκδόσεις Τζιόλα , Σχεδιασμός Στροβιλομηχανών και Αεριοστροβίλων υψηλής απόδοσης
9. Fluent User Services Center, Introductory FLUENT Notes FLUENT v6.3 December 2006
10. H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker, Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model), Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) Universität Erlangen-Nürnberg
11. <https://kbwiki.ercsoftac.org/>
12. <https://www.ansys.com/>
13. <https://www.kosmocar.gr/site> Δέκα “Μύθοι και Αλήθειες” για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα 01.11.2019, Kosmocar
14. Indrashis Saha, T athagatha Mukherjee, Ankit Saha, Richa Pandey, Aerodynamic Study of an Ahmed Body with the help of CFD Simulation, 12 Ιουνίου 2020
15. Jie Tian, Yingchao Zhang, Hui Zhu and Hongwei Xiao, Aerodynamic drag reduction and flow control of Ahmed body with flaps, Advances in Mechanical Engineering 2017
16. Jie Tian, Yingchao Zhang, Hui Zhu and Hongwei Xiao, Aerodynamic drag reduction and flow control of Ahmed body with flaps, 7 Σεπτεμβρίου 2016
17. Keerati Sulaksana, & Phattharaphan Thamatkeng, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Heat Transfer & Fluid Flow Simulation with ANSYS

18. Keerati Sulaksana, Phattharaphan Thamatkeng, Heat Transfer & Fluid Flow Simulation, School of Mechanical Engineering Suranaree University of Technology
19. Marco Lanfrit, Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT, Version 1.2 (Feb 9 th 2005), Fluent Deutschland GmbH
20. Menter, F. R. (1993), "Zonal Two Equation k- $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows", AIAA Paper 93-2906
21. Menter, F. R. (1994), "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605
22. Munson, Young & Okiishi Μηχανική Ρευστών 2017, 8<sup>η</sup> έκδοση, Ελλάδα, Εκδόσεις Τζιόλα
23. Rolf Gscheidle, 4<sup>η</sup> Έκδοση, 2015, Εκδόσεις ΙΩΝ, Τεχνολογία Αυτοκινήτων-Οχημάτων
24. S. R. Ahmed and G. Ramm, Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake, Institut für Entwurfs- Aerodynamik, DF, Copyright 1985 Society of Automotive Engineers, Inc.
25. S.L Dixon & C.A.Hall, 7<sup>η</sup> Έκδοση, 2014, Εκδόσεις Founta, Στροβιλομηχανές
26. Stephen J. Chapman, 4<sup>η</sup> έκδοση, 2013, Εκδόσεις Τζιόλα, Ηλεκτρικές Μηχανές
27. Yunus Cengel, John Cimbala, Μηχανική Ρευστών, 3<sup>η</sup> έκδοση, Ελλάδα, Εκδόσεις Fountas



# Παράρτημα

## Αλγόριθμος Matlab

```
% TA1 External Aerodynamics AC5 Ahmed Body Partner 15 University of
Poitiers
%
% Measurements MOVA- project : Ahmed Car Model
% slant - angle = 25 degree
%
% LDA measurements
%
% H. Lienhart/Th. Schenk
%
% Origin of coordinate system:
% x=0: end of the car, y=0: symmetry plane, z=0: ground plane
%
% Kinematic viscosity of air: 15x10-6 m2 s-1
% Bulk velocity: Ub=40 m s-1
% Height of the body: h=288 mm
% Reynolds number based on the height of the body: Re=768,000
%
#####
#####
%Column1Name = x   %Column1Units = m   %Column1Type = Real
%Column2Name = y   %Column2Units = m   %Column2Type = Real
%Column3Name = z   %Column3Units = m   %Column3Type = Real
%Column4Name = U   %Column4Units = m s-1 %Column4Type = Real
%Column5Name = V   %Column5Units = m s-1 %Column5Type = Real
%Column6Name = W   %Column6Units = m s-1 %Column6Type = Real
%Column7Name = u_rms %Column7Units = m s-1 %Column7Type = Real
```

```

%Column8Name = v_rms %Column8Units = m s-1 %Column8Type = Real
%Column9Name = w_rms %Column9Units = m s-1 %Column9Type = Real
%Column10Name = uv %Column10Units = m2 s-2 %Column10Type = Real
%Column11Name = uw %Column11Units = m2 s-2 %Column11Type = Real
%Column12Name = uuu %Column12Units = m3 s-3 %Column12Type = Real
%Column13Name = vvv %Column13Units = m3 s-3 %Column13Type = Real
%Column14Name = www %Column14Units = m3 s-3 %Column14Type = Real
%Column15Name = uuv %Column15Units = m3 s-3 %Column15Type = Real
%Column16Name = uuw %Column16Units = m3 s-3 %Column16Type = Real
%Column17Name = uvv %Column17Units = m3 s-3 %Column17Type = Real
%Column18Name = uww %Column18Units = m3 s-3 %Column18Type = Real

```

```

% This program plots contours and velocity vectors
% using experimental data on a plane which are read from an input file.

```

```

numdata = xlsread('input.xlsx');

x=numdata(:,1);
y=numdata(:,2);
z=numdata(:,3);
u=numdata(:,4);
v=numdata(:,5);
w=numdata(:,6);
urms=numdata(:,7);
vrms=numdata(:,8);
wrms=numdata(:,9);
uv=numdata(:,10);
uw=numdata(:,11);
uuu=numdata(:,12);
vvv=numdata(:,13);
www=numdata(:,14);
uuv=numdata(:,15);
uuw=numdata(:,16);
uvv=numdata(:,17);
uww=numdata(:,18);

n=numel(x);

vel=sqrt(u.^2+v.^2+w.^2);
velrms=sqrt(urms.^2+vrms.^2+wrms.^2);

```

```

for i=1:35
for j=1:24
ii=(i-1)*24+j;

x2d(i,j)=x(ii,1);
y2d(i,j)=y(ii,1);
z2d(i,j)=z(ii,1);

u2d(i,j)=u(ii,1);
v2d(i,j)=v(ii,1);
w2d(i,j)=w(ii,1);

uv2d(i,j)=uv(ii,1);
uw2d(i,j)=uw(ii,1);
urms2d(i,j)=urms(ii,1);
vrms2d(i,j)=vrms(ii,1);
wrms2d(i,j)=wrms(ii,1);

vel2d(i,j)=vel(ii,1);
velrms2d(i,j)=velrms(ii,1);

end
end

% plot the velocity distribution as a contour plot

tiledlayout(2,2)

ax1 = nexttile;
[C,h]=contour(ax1,y2d,z2d,vel2d,'LineWidth', 1);
axis equal
v=[5,10,15,20,25,30,35,40];
clabel(C,h,v)
title('Velocity distribution [m/s]');
xlabel('y axis');
ylabel('z axis');
grid on;

% vector plot of the velocity field

```

```
ax2 = nexttile;  
quiver(ax2,y2d,z2d,v2d,w2d)  
axis equal  
title(ax2,'Vector plot on the plane')  
xlabel('y axis');  
ylabel('z axis');  
grid on;
```

% plot the velocity distribution as a surface plot

```
ax3 = nexttile;  
surf(ax3,y2d,z2d,vel2d)  
title(ax3,'Velocity magnitude [m/s]')  
xlabel('y axis');  
ylabel('z axis');  
grid on;
```

% plot the velocity distribution of the rms of  
% the velocity variation as a surface plot

```
ax4 = nexttile;  
[C,h]=contour(ax4,y2d,z2d,velrms2d);  
axis equal  
v=[3,6,9,12,15,18,21];  
clabel(C,h,v)  
axis equal  
title(ax4,'rms of velocity variation [m/s]')  
xlabel('y axis');  
ylabel('z axis');  
grid on;
```

