

**Σχεδιασμός και ανάλυση του αεροδυναμικού πακέτου ηλιακού αυτοκινήτου για τον διαγωνισμό world solar challenge**

Πτυχιακή Εργασία του φοιτητή

Μωυσιάδη Γεώργιου

Επιβλέπων: Δημήτριος Σοφιαλίδης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΔΙ.ΠΑ.Ε (Κεντρικής Μακεδονίας)

## Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την ανάλυση του εξωτερικού κελύφους ενός ηλιακού αυτοκινήτου με τα πρότυπα που θέτουν οι κανονισμοί του φοιτητικού διαγωνισμού Bridgestone world solar challenge. Ο σχεδιασμός αυτός γίνεται με γνώμονα την βέλτιστη απόδοση του αυτοκινήτου από άποψη αεροδυναμικής. Η έννοια της αεροδυναμικής παίρνει μια εντελώς διαφορετική σημασία από την κλασική έννοια αγωνιστικών αυτοκινήτων τύπου formula 1, αφού σκοπός του αεροδυναμικού πακέτου σε αυτόν τον διαγωνισμό δεν είναι η γρήγορη επιτάχυνση και η καλύτερη δυνατή πρόσφυση στις στροφές αλλά η μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας από τους κινητήρες. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού θα πρέπει το κινούμενο όχημα να συναντά όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση, λόγω της σύγκρουσης του με τον αέρα, όταν κινείται. Για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής θα χρησιμοποιηθούν, το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks για τον σχεδιασμό του αεροδυναμικού κελύφους (fairing) του αυτοκινήτου και το υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent της ANSYS για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση των αεροδυναμικών μεγεθών που χρησιμεύουν στην διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την γεωμετρία που σχεδιάστηκε.

## Περιεχόμενα

1. Σχετικά με τον Διαγωνισμό Worlds Solar car.....	6
1.1. Σκοπός του διαγωνισμού.....	7
1.2. Τεχνικοί έλεγχοι.....	8
2. Εισαγωγή στα βασικά της αεροδυναμικής.....	9
2.1. Δύναμη Αντωσης (Downforce/lift) .....	10
2.2. Οπισθέλκουσα δύναμη (Drag).....	11
2.3. Αποκόλληση ροής.....	12
2.4. Συντελεστές Άντωσης και Οπισθέλκουσας (CL),(CD).....	13
2.5. Θεωρία αεροτομών .....	14
2.6. Φαινόμενο Venturi.....	16
3. Κανονισμοί.....	17
3.1. Κατηγορία συμμετοχής.....	18
3.2. Εξωτερικές διαστάσεις.....	19
3.3. Ρόδες.....	20
3.4. Φωτοβολταϊκά πάνελ.....	21
3.5. Προστατευτικός επιβατών.....	22
3.6. Εργονομία καθίσματος.....	22
4. Στρατηγική σχεδίασης.....	24

5. Εισαγωγή στην Υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD).....	25
5.1. Πλεονεκτήματα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	26
5.2. Τα βήματα επίλυσης CFD ανάλυσης.....	26
5.2.1. Αναγνώριση προβλήματος.....	26
5.2.2. Σχεδιασμός μοντέλου γεωμετρίας.....	28
5.2.3. Πλεγματοποίηση .....	29
5.2.3.1. Οι παράγοντες που καθορίζουν τον σχεδιασμό.....	29
5.2.3.2. Κατηγορίες πλέγματος.....	30
5.2.3.3. Στρατηγική πλεγματοποίησης.....	30
5.2.3.4. Ποιότητα πλέγματος.....	33
5.2.4. Επίλυση.....	37
5.2.4.1. Γενικές ρυθμίσεις επίλυσης.....	37
5.2.4.2. Μοντέλο τύρβης.....	37
5.2.4.3. Ιδιότητες υλικών.....	39
5.2.4.4. Συνθήκες λειτουργίας (Operating conditions).....	39
5.2.4.5. Οριακές συνθήκες.....	39
5.2.4.6. Τιμές αναφοράς.....	41
5.2.4.7. Μέθοδοι επίλυσης.....	42
5.2.4.8. Έλεγχοι επίλυσης.....	42
5.2.4.9. Παρακολουθητές (monitors).....	43
5.2.4.10. Αρχικοποίηση της επίλυσης.....	43
5.2.5. Μετ'επεξεργασία.....	44
6. Συμπεράσματα.....	58
7. Παράρτημα.....	60
8. Πηγές.....	74





## 1. Σχετικά με τον διαγωνισμό

Ο διαγωνισμός World Solar Challenge, χορηγούμενος από την Bridgestone, αποσκοπεί στην ανάπτυξη τεχνολογιών που καθιστούν τα ηλεκτρικά αμάξια ικανά να ανταγωνιστούν αλλά και να υπερσχύσουν των βενζινοκίνητων. Με την εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών ενισχύεται η θέση της βιώσιμης ανάπτυξης και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αφού μπορεί να γίνει χρήση τους και σε άλλους τομείς εκτός της αυτοκίνησης.

Ιδρυτής του διαγωνισμού το 1987 είναι ο Hans Tholstrup ο οποίος μαζί με τον Larry Perkins κατασκεύασαν το πρώτο όχημα με Φωτοβολταϊκά πάνελ με το οποίο διέσχισαν ολόκληρη την Αυστραλία το 1983 (από την δύση έως την ανατολή), χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ενέργεια. Το όχημα τους (Quiet Achiever) διένυσε μία απόσταση 4000 χιλιομέτρων σε λιγότερο από 20 μέρες, γεγονός αξιοσημείωτο αφού το πρώτο βενζινοκίνητο που κατασκευάστηκε χρειάστηκε 30 ημέρες για να διανύσει την ίδια απόσταση. Η επιτυχία και η απήχηση που είχε το όχημα τους είναι που οδήγησε τον Tholstrup στην δημιουργία του πρώτου διαγωνισμού αυτοκίνητων με φωτοβολταϊκά πάνελ.

## 1.1. Σκοπός του διαγωνισμού

Σκοπός του διαγωνισμού είναι να διασχίσουν οι ομάδες στον καλύτερο δυνατό χρόνο μια απόσταση 3000 χιλιομέτρων, από το Ντάργουιν έως την Αδελαΐδα . Για την επίτευξη αυτού το στόχου επιτρέπεται στις ομάδες να εξοπλίζουν τα οχήματα τους με 5 Kwh αποθηκευμένης ενέργειας στο κουτί μπαταριών τους καθώς και η δυνατότητα 2 φορτίσεων σε καθορισμένα σημεία φόρτισης ελεγχόμενα από τους

*Εικόνα 1. Quiet Achiever (Το πρώτο αυτοκίνητο με φωτοβολταϊκά πάνελ).*

διοργανωτές. Οι ομάδες πρέπει να καλύψουν τις περαιτέρω ανάγκες του οχήματος για ενέργεια με φωτοβολταϊκά πάνελ καθώς και από συστήματα ανάκτησης ενέργειας στα φρένα και στις αναρτήσεις.







Εικόνα 2. Ο χάρτης με την διαδρομή του διαγωνισμού. Με πορτοκαλί τα σημεία φόρτισης.

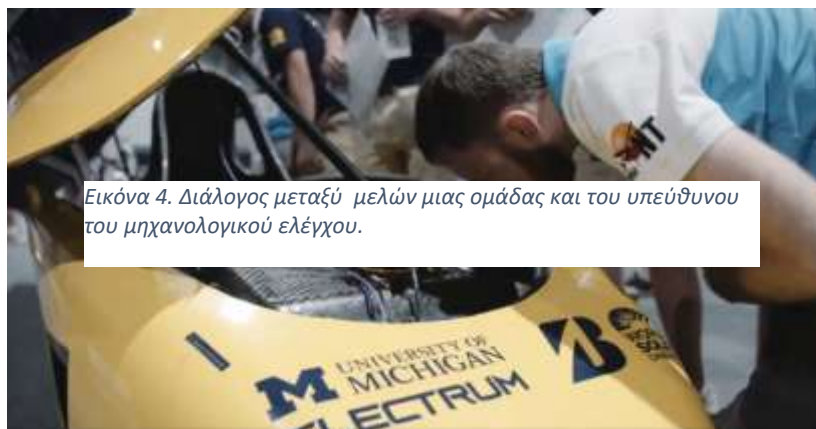
## 1.2. Τεχνικοί έλεγχοι

Για να αγωνιστεί μια ομάδα στον διαγωνισμό θα πρέπει να περάσει τους τεχνικούς ελέγχους που χωρίζονται σε στατικούς και δυναμικούς. Ξεκινώντας από τους στατικούς ελέγχους, υπεύθυνοι της διοργάνωσης ελέγχουν αν έχουν τηρηθεί τα κατασκευαστικά πρότυπα που υπαγορεύονται από τους κανονισμούς (διαστάσεις, ειδή μπαταριών, φωτοβολταϊκά πάνελ κ.α.). Έπειτα όσες ομάδες κατάφεραν να περάσουν τους στατικούς ελέγχους κατευθύνονται στον χώρο του δυναμικού ελέγχου για να εξετασθεί η ταχύτητα, η σταθερότητα καθώς και η ικανότητα πέδησης του οχήματος, όλα σε κανονικές συνθήκες οδήγησης. Απαραίτητη εκτός από τους ελέγχους είναι και η πιστοποίηση, από πτυχιούχο μηχανικό που θα εξετάσει το όχημα εκ μέρους της ομάδας, ότι το όχημα είναι ασφαλές και έχουν επιλεγεί κατάλληλες μέθοδοι και υλικά για την κατασκευή του.

Εικόνα 3. Το όχημα της ομάδας του Michigan περνώντας τους τεχνικούς ελέγχους.

## 2. Εισαγωγή στις βασικές έννοιες της αεροδυναμικής

Όπως



Εικόνα 4. Διάλογος μεταξύ μελών μιας ομάδας και του υπεύθυνου του μηχανολογικού ελέγχου.

αναφέρθηκε νωρίτερα σκοπός του διαγωνισμού είναι να διασχίσουν στον καλύτερο δυνατό χρόνο οι ομάδες μια απόσταση 3000 χιλιομέτρων. Για να τον κάνουν αυτό με τρόπο



ανταγωνιστικό απέναντι στις υπόλοιπες ομάδες δεν θα πρέπει απλά να

αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια, από τα φωτοβολταϊκά και τα υπόλοιπα συστήματα ανάκτησης ενέργειας, αλλά και να την καταναλώνουν με την καλύτερη δυνατή απόδοση. Για να διανύσει μια ομάδα μεγαλύτερη απόσταση από τις υπόλοιπες, με την ίδια καταναλισκόμενη ενέργεια, θα πρέπει η γεωμετρία του αυτοκινήτου να είναι τέτοια που να ελαχιστοποιείται η αντίσταση που ασκείται από τον αέρα στο όχημα κατά την κίνησή του μέσα σε αυτόν. Όσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνει ένα όχημα λόγω της αντίστασης του αέρα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ταχύτητα που θα μπορεί να αναπτύξει σε σχέση με άλλα οχήματα, ώστε να τερματίσει πρώτο στον διαγωνισμό. Αυτό συμβαίνει επειδή η μικρότερη αντίσταση επιτρέπει στο όχημα να καταναλώνει ίδια ενέργεια με κάποιο άλλο, ενώ κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτό. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι η αεροδυναμική του αυτοκινήτου παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του και γι' αυτό θα εστιάσουμε σε αυτήν στις επόμενες παραγράφους.

Η αεροδυναμική αποτελεί ένα μεγάλο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ανάλογα με τον σκοπό που πρέπει να εξυπηρετήσει το κάθε όχημα, προσαρμόζεται και το κατάλληλο αεροδυναμικό πακέτο ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι για τους οποίους δημιουργήθηκε. Σε ένα αγωνιστικό όχημα τύπου F1 για παράδειγμα σκοπός του αεροδυναμικού πακέτου είναι να δώσει σταθερότητα και ευελιξία στις μεγάλες ταχύτητες που επιτυγχάνει. Για να το πετύχει αυτό πρέπει να αυξήσει την αρνητική άντωση του (downforce), η οποία δεν είναι τίποτα παραπάνω από την δύναμη που ασκείται στο όχημα, μέσω της σύγκρουσης του αέρα με το αεροδυναμικό του πακέτο. Η δύναμη αυτή έχει ως αποτέλεσμα να πιέζει το όχημα προς το έδαφος, αυξάνοντας έτσι την πρόσφυση των ελαστικών. Για να πετύχει τα επιθυμητά ποσοστά downforce ένα αγωνιστικό όχημα θα πρέπει να θυσιάσει πολύ περισσότερη ενέργεια από ένα συμβατικό όχημα αφού οι ειδικά σχεδιασμένες για αυτό το σκοπό αεροτομές του, αυξάνουν αισθητά την οπισθέλκουσα δύναμη (drag), το μεγαλύτερο ποσοστό της οποίας προέρχεται από την αντίσταση που προβάλλει ο αέρας πάνω στην μετωπική επιφάνεια του οχήματος.

## 2.1. Δύναμη άντωσης

Σε κάθε σώμα που ταξιδεύει μέσα σε ένα ρευστό, ασκείται μια δύναμη που τείνει να το σηκώσει ή να το σπρώξει προς τα κάτω. Η δύναμη αυτή ονομάζεται άντωση (lift) και διαχωρίζεται σε θετική άντωση (positive lift), όταν το ρευστό τείνει να σπρώξει το σώμα προς τα πάνω και αρνητική άντωση (negative lift) όταν το ρευστό τείνει να σπρώξει το σώμα προς τα κάτω. Η αρνητική άντωση είναι γνωστή και ως downforce και είναι η δύναμη που πιέζει ένα αγωνιστικό όχημα προς τα κάτω. Οι ειδικά διαμορφωμένες διατάξεις του εμπρόσθιου και οπίσθιου φτερού ενός αγωνιστικού οχήματος λειτουργούν με την ίδια λογική, αλλά με αντίθετη γωνία προσβολής από αυτή που λειτουργούν τα φτερά ενός αεροπλάνου. Η γεωμετρία του φτερού σε συνδυασμό, με την γωνία προσβολής του αέρα δημιουργεί την δύναμη άντωσης η οποία είναι κάθετη στην διεύθυνση της ταχύτητας και η φορά της εξαρτάται από την γωνία προσβολής του αέρα στο φτερό.

Η κάθετη αυτή δύναμη που ασκείται στα φτερά ενός αγωνιστικού του προσδίδει μεγαλύτερα ποσοστά πρόσφυσης και του επιτρέπει μεγαλύτερες ταχύτητες στις στροφές αλλά και ταχύτερη πέδηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός των

Εικόνα 5. Αντιστρέφοντας την αεροτομή ενός αεροπλάνου ένα αυτοκίνητο μπορεί να παράγει αρνητική άντωση (Downforce).



αεροτομών τα αγωνιστικά οχήματα πετυχαίνουν ακόμα καλύτερα ποσοστά αρνητικής άντωσης (downforce) εκμεταλλευόμενα το φαινόμενο Venturi στο πάτωμα και τον διάχυτη τους, φαινόμενο το οποίο θα εξηγηθεί σε επόμενες παραγράφους. Για την επίτευξη των κατάλληλων ποσοστών downforce το εκάστοτε αεροδυναμικό πακέτο θα αρχίσει να παράγει οπισθέλκουσα δύναμη η οποία τείνει να αντιστέκεται στην φορά της ταχύτητας. Γίνετε λοιπόν σαφές ότι θα πρέπει να βρεθεί μια χρυσή τομή στην οποία να μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες του αυτοκινήτου στο μέγιστο.

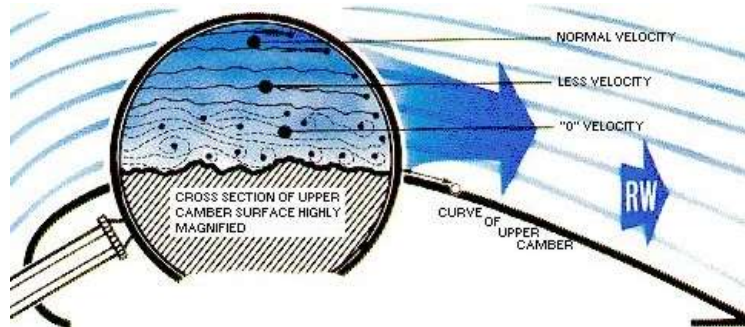
## 2.2. Οπισθέλκουσα δύναμη

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα οπισθέλκουσα είναι η αντίσταση ενός ρευστού, στην προκείμενη περίπτωση του αέρα, που εφαρμόζεται με την μορφή δύναμης στην μετωπική επιφάνεια ενός κινούμενου μέσου και έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της ταχύτητας του κινούμενου μέσου. Γίνετε συνεπώς εύκολα αντιληπτό ότι όσο μικρότερη είναι η μετωπική επιφάνεια ενός οχήματος, τόσο μικρότερη θα είναι και η αντίσταση του αέρα και αυτό έχει μεγάλο αντίκτυπο στην αποδοτικότητα του καυσίμου αλλά και στην τελική ταχύτητα που θα μπορεί να αναπτύξει το όχημα.

Η οπισθέλκουσα επηρεάζεται, αν και σε μικρότερο βαθμό, και από την τριβή του ρευστού κατά μήκος του οχήματος. Οπισθέλκουσα λόγω τριβής προκύπτει όταν ένα κινούμενο μέσο ταξιδεύει μέσα σε ένα ρευστό και τα μόρια του ρευστού που



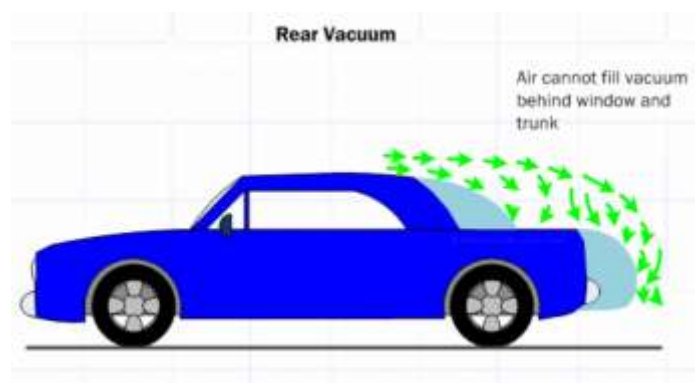
βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια του κινούμενου μέσου προσκολλώνται σε αυτό, με την ταχύτητα τους σε σχέση με το κινούμενο μέσο να ισούται με μηδέν. Τα αμέσως επόμενα μοριακά στρώματα του ρευστού ολισθαίνουν πάνω στα προηγούμενα όμως κινούνται με σχετικά μικρή ταχύτητα λόγω της τριβής τους με τα προσκολλημένα στο κινούμενο μέσο μόρια. Όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του κινούμενου μέσου παρατηρούμε ότι η επιβράδυνση των μοριακών στρωμάτων εξασθενεί έως ότου φτάσει στην ταχύτητα ελεύθερης ροής και σταθεροποιηθεί. Το αρχικό μοριακό στρώμα που προσκολλάτε στην επιφάνεια καθώς και τα επόμενα, των οποίων η ταχύτητα είναι πολύ χαμηλή, είναι γνωστά και ως οριακό στρώμα (boundary layer). Για την ελαχιστοποίηση των τριβών μεταξύ των τοιχωμάτων και των μοριακών στρωμάτων του ρευστού έχουν αναπτυχθεί ειδικά σύνθετα υλικά. Η δημιουργία και παραγωγή αυτών των υλικών έχει πολύ υψηλό κόστος και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε πολύ ειδικές περιπτώσεις όπως σε τελευταίας τεχνολογίας αεροσκάφη, όπου η ταχύτητες είναι πολύ μεγαλύτερες και η διαφορά στην οπισθέλκουσα λόγω μείωσης της τριβής είναι πολύ μεγάλη.



Εικόνα 7. Οριακό στρώμα μιας αεροτομής.

### 2.3. Αποκόλληση ροής

Όταν η ροή του αέρα δεν παραμένει προσκολλημένη επάνω στο αυτοκίνητο, λέμε ότι έχουμε αποκόλληση ροής. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω της απότομης κλίσης στα διάφορα σημεία ενός οχήματος. Με την αύξηση της ταχύτητας τα μοριακά στρώματα δυσκολεύονται να παραμείνουν προσκολλημένα πάνω στην επιφάνεια του οχήματος και παρατηρείται το φαινόμενο της αποκόλλησης στο σημείο που αλλάζει πολύ απότομα η κλίση στην γεωμετρία του ή είναι θετική η κλίση της πίεσης κατά την πορεία της ροής. Στα σημεία που παρουσιάζεται η αποκόλληση της ροής παρατηρούμε ότι δημιουργούνται περιοχές με χαμηλότερη πίεση από ότι στο υπόλοιπο αυτοκίνητο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται δίνες στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου οι οποίες αυξάνουν την οπισθέλκουσα δύναμη. Το φαινόμενο αυτό αυξάνεται δραματικά σε μεγάλες ταχύτητες και μετά από κάποιο σημείο καθίσταται αδύνατο το όχημα να συνεχίσει να επιταχύνει.



Εικόνα 8 Το γαλάζιο στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου απεικονίζει τις περιοχές χαμηλής πίεσης λόγω αποκόλλησης της ροής.

## 2.4. Συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας (CL,CD)

Οι δύο αυτοί συντελεστές αποτελούν αδιάστατα μεγέθη. Μπορεί συνεπώς κανείς να συγκρίνει τους συντελεστές οπισθέλκουσας και άντωσης με αυτούς ενός άλλου αυτοκινήτου χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζει την ταχύτητα στην οποία υπολογίστηκαν.

Ο συντελεστής άντωσης (CL) είναι το αδιάστατο μέγεθος της δύναμης που συσχετίζει την άντωση που παράγει μια επιφάνεια με την πυκνότητα του ρευστού που το περιβάλλει. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την αναλογία της δύναμης άντωσης προς την δύναμη λόγω πίεσης επί της επιφάνειας με την οποία συγκρούεται το ρευστό.

$$C_l = \frac{2 L}{\rho \times V^2 \times A}$$

Όπου (L) η δύναμη άντωσης, (ρ) η πυκνότητα του ρευστού, (V) η ταχύτητα του και (A) η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το ρευστό

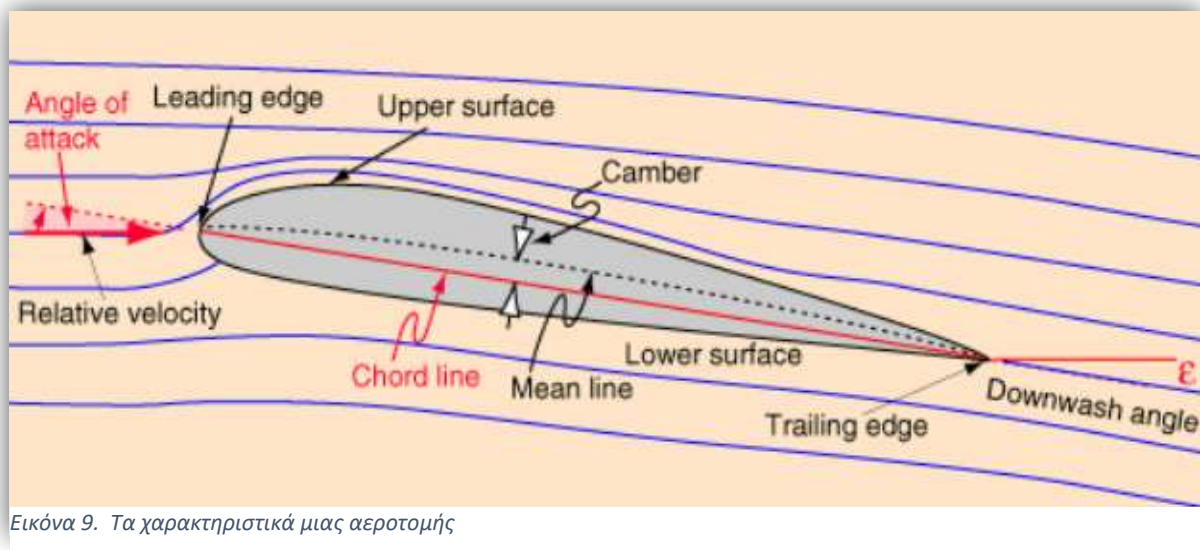
Ο συντελεστής οπισθέλκουσας (CD) είναι το αδιάστατο μέγεθος που χρησιμοποιείται για να ορίσει την αντίσταση που φέρει ένα αντικείμενο μέσα σε ένα ρευστό. Η μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας αυξάνει την αποδοτικότητα ενός οχήματος. Θα ήταν ιδανικό ένα αυτοκίνητο να έχει συντελεστή οπισθέλκουσας πολύ κοντά στο μηδέν αυτό όμως δεν είναι δυνατόν διότι στα συμβατικά αμάξια η μετωπική επιφάνεια, που συγκρούεται με τον αέρα είναι πολύ μεγάλη και στα αγωνιστικά χρειάζεται το αμάξι να παράγει downforce που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης (drag). Καταλαβαίνουμε συνεπώς ότι ανάλογα με τον σκοπό που θα εξυπηρετεί το κάθε όχημα οι υπεύθυνοι κομμάτι του αυτοκινήτου για το αεροδυναμικό προσπαθούν να βρουν την "χρυσή τομή" ανάμεσα στο CL και το CD του.

$$C_d = \frac{D}{\rho A V^2 / 2}$$

Όπου ( $D$ ) η οπισθέλκουσα δύναμη, ( $\rho$ ) η πυκνότητα του ρευστού, ( $A$ ) η μετωπική επιφάνεια του αντικειμένου, ( $V$ ) η ταχύτητα του ρευστού

## 2.5. Θεωρία των αεροτομών

Τεχνικά χαρακτηριστικά αεροτομής :



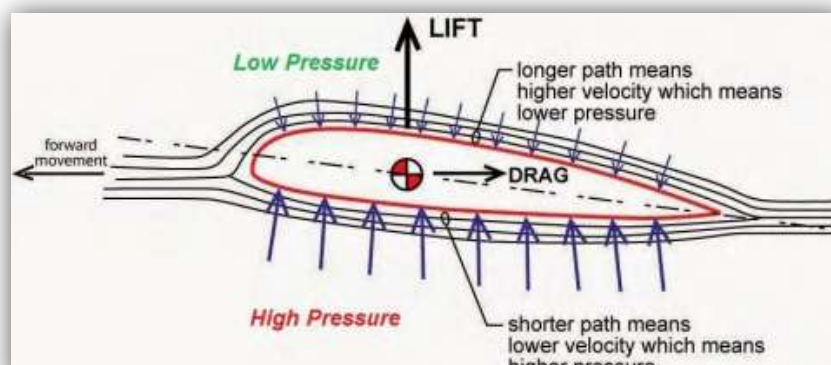
Εικόνα 9. Τα χαρακτηριστικά μιας αεροτομής

- Leading edge** : Ακμή προσβολής
- Angle of attack** : Γωνία προσβολής
- Chord line** : Χορδή
- Camber/Mean line** : Καμπυλότητα/ Μέση γραμμή
- Upper surface** : Επιφάνεια αναρρόφησης ( επιτάχυνση ροής αέρα)
- Lower surface** : Επιφάνεια πίεσης



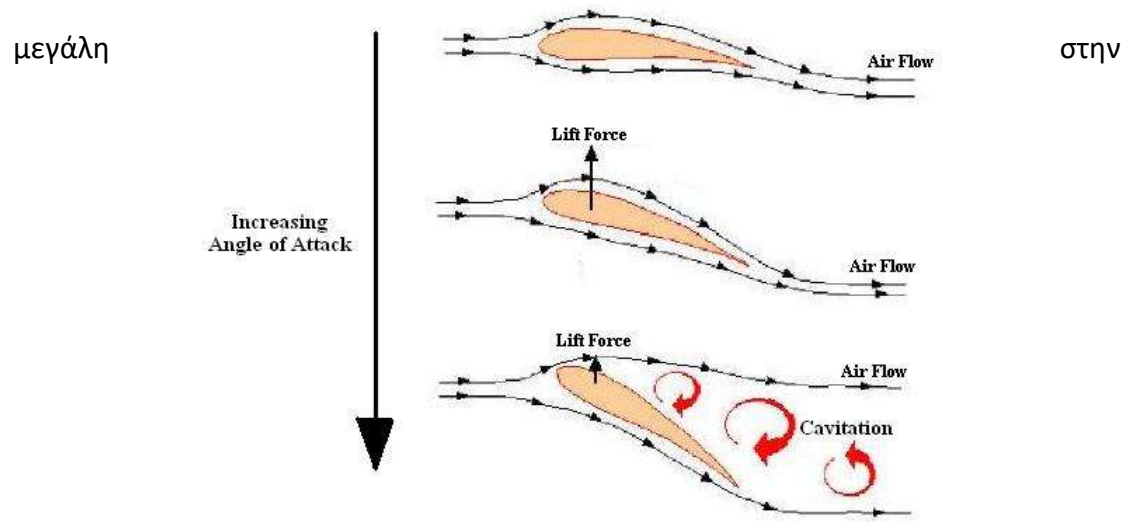
**Trailing edge : Ακμή εκφυγής**

Αεροτομή είναι μια μορφή πτέρυγας η οποία κινούμενη μέσα σε ένα ρευστό παράγει αεροδυναμική δύναμη. Η δύναμη αυτή χωρίζεται σε δύο συνιστώσες. Η κάθετη συνιστώσα είναι η δύναμη άντωσης ενώ η οριζόντια συνιστώσα είναι η οπισθέλκουσα δύναμη. Η άντωση μιας αεροτομής είναι κατά κύριο λόγο αποτέλεσμα της γωνίας προσβολής και του σχήματος της. Οι περισσότερες αεροτομές για να παράξουν άντωση θα πρέπει να έχουν θετική γωνία προσβολής, όμως υπάρχουν και κάποιες καμπύλες αεροτομές οι οποίες παράγουν άντωση και σε μηδενική γωνία. Η ειδική γεωμετρία τους, εκμεταλλευόμενη το θεώρημα Bernoulli, επιτρέπει στον αέρα να ταξιδεύει γρηγορότερα στην μεριά της καμπύλης με συνέπεια να έχουμε στην κάτω πλευρά του φτερού υψηλότερη πίεση που σπρώχνει το φτερό προς τα πάνω. Το θεώρημα Bernoulli, γνωστό και ως Θεμελιώδες θεώρημα της υδροστατικής ταυτίζεται με την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Το θεώρημα αυτό καθορίζει την πίεση που επικρατεί μέσα στα υγρά όταν αυτά βρίσκονται σε κίνηση και πάνω σε αυτό είναι βασισμένο το φαινόμενο Venturi που αναλύεται στην συνέχεια.



Εικόνα 10. Η υψηλότερη πίεση της κάτω επιφάνειας, σε σχέση με την επάνω, είναι που προκαλεί την άντωση.

Σε μια αεροτομή που κινείται με σταθερή ταχύτητα παρατηρείται αύξηση ή μείωση της άντωσης και της οπισθέλκουσας ανάλογα με την αύξηση και την μείωση στην γωνία προσβολής της αντίστοιχα. Όταν η γωνία φτάσει πάνω από κάποιο συγκεκριμένο όριο για την δοθείσα ταχύτητα παρατηρείται στην αεροτομή η αρχή του φαινομένου της αποκόλλησης. Αυτό συμβαίνει γιατί η κλίση είναι πολύ



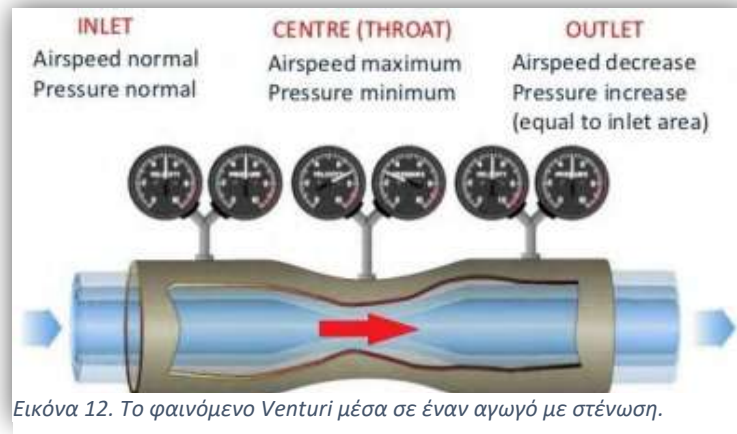
συγκεκριμένη ταχύτητα για να μπορέσουν τα μόρια του αέρα να παραμείνουν προσκολλημένα στην αεροτομή. Αν αυξηθεί ακόμα παραπάνω η γωνία προσβολής το φτερό θα φτάσει στο κρίσιμο σημείο του (stall point), πέρα από το οποίο ελαχιστοποιείται η άντωση και μεγιστοποιείται η οπισθέλκουσα. Τυπικές γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες οι αεροτομές αγγίζουν το stall point είναι από 12 έως 20 μοίρες.

Εικόνα 11. Αυξάνοντας την γωνία προσβολής πάνω από κάποιο όριο, η αεροτομή παύει να παράγει άντωση.

## 2.6. Φαινόμενο Venturi

Φαινόμενο Venturi είναι το φυσικό φαινόμενο στο οποίο όταν ένα ρευστό κινείται μέσα σε ένα σωλήνα και εξαναγκάζεται να περάσει από μία στένωση του, παρατηρείται αύξηση την ταχύτητας του και μείωση της πίεσης του στην περιοχή

της στένωσης. Το φαινόμενο αυτό πήρε το όνομα του από τον Ιταλό φυσικό Τζιοβάνι Μπατίστα Βεντούρη.



Με την ίδια λογική σε ένα αυτοκίνητο δημιουργείται στένωση της ροής ανάμεσα στο πάτωμα του και τον δρόμο. Η επιταχυνόμενη ροή αέρα στο πάτωμα του αυτοκινήτου δημιουργεί διαφορά πίεσης σε σχέση με την επάνω επιφάνεια του αυτοκινήτου, που της ασκείτε μεγαλύτερη πίεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πιέζεται όλο το αυτοκίνητο προς την επιφάνεια του δρόμου, χάρη στην κατάσταση υποπίεσης που δημιουργείτε στο πάτωμα του αυτοκινήτου, φαινόμενο γνωστό και ως επίδραση του εδάφους (ground effect). Σε πολλά αυτοκίνητα για να εκμεταλλευτούν το φαινόμενο αυτό στο έπακρο προσθέτουν στο όχημα διάχυτη. Ο διαχύτης έχει καμπύλη μορφή η οποία μοιάζει με το τέλος της στένωσης ενός σωλήνα. Η γεωμετρία του κάνει ακόμα πιο έντονο το φαινόμενο Venturi στο αυτοκίνητο και παράλληλα βοηθάει στην ομαλότερη μετάβαση της ροής του αέρα στο τέλος του μειώνοντας το μέγεθος των δινών.

### 3. Κανονισμοί

Ο σχεδιασμός και η τελική μορφή του αυτοκινήτου διαμορφώθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχές της αεροδυναμικής που προαναφέρθηκαν, με σκοπό την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, τηρώντας παράλληλα τους κανονισμούς της διοργανώτριας αρχής που αποσκοπούν στην ασφάλεια των συμμετεχόντων και θα αναφερθούν στις επόμενες παραγράφους. Η διοργανώτρια αρχή δίνει ένα αναλυτικότερο εγχειρίδιο κανονισμών που διασαφηνίζει τι είναι αποδεκτό και τι όχι και σκοπός του εγχειριδίου είναι η ασφάλεια κατά της διάρκειας του διαγωνισμού αλλά και η δημιουργία ανταγωνιστικότητας αποτρέποντας ομάδες με περισσότερους πόρους να πάρουν ένα ξεκάθαρο προβάδισμα. Στις παρακάτω παραγράφους αναφέρονται οι κανονισμοί που εμπλέκονται άμεσα ή έμμεσα με τον σχεδιασμό του εξωτερικού κελύφους του αυτοκινήτου.

### **3.1. Κατηγορία συμμετοχής**

Σύμφωνα με τους κανονισμούς (παράγραφος 2.1.1 class regulations) κάθε όχημα που λαμβάνει μέρος στην κατηγορία Cruiser class, για την οποία σχεδιάστηκε το παρόν όχημα, θα πρέπει να διαθέτει δύο τουλάχιστον θέσεις. Αυτός ο κανονισμός αποτελεί μια από τις πιο βασικές διαφορές ανάμεσα στο Cruiser class, το οποίο προσπαθεί να πλησιάσει προς το συμβατικό όχημα και την πρακτικότητα του και το Challenger class, στο οποίο τα οχήματα που συμμετέχουν είναι μονοθέσια και σκοπός τους είναι να πετύχουν μοναδικές επιδόσεις αγνοώντας την παράμετρο της πρακτικότητας όπως άλλωστε συμβαίνει και σε αγωνιστικά τύπου F1 .

### 3.2. Εξωτερικές διαστάσεις

Εικόνα 13. Όχημα κατηγορίας Challenger



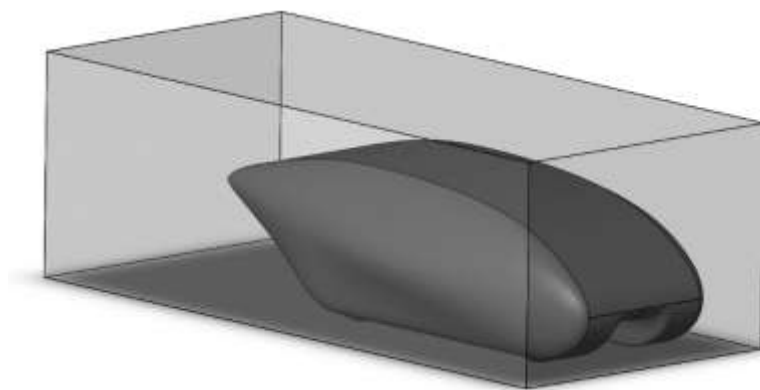
Εικόνα 14. Όχημα κατηγορίας Cruiser



#### Παράγραφος 2.2.1

Σύμφωνα με την παράγραφο 2.2.1 των κανονισμών τα οχήματα θα πρέπει να είναι μικρότερα ενός νοητού ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με 5000 mm μήκος 2200 mm πλάτος και 1600 mm ύψος, με τις ρόδες τους να εφάπτονται στην κάτω επιφάνεια του πρίσματος η οποία αντιπροσωπεύει τον δρόμο.

Εικόνα 15. Παραλληλεπίπεδο (5000x2200x1600mm) με το όχημα στο εσωτερικό του.



### Παράγραφος 2.2.2

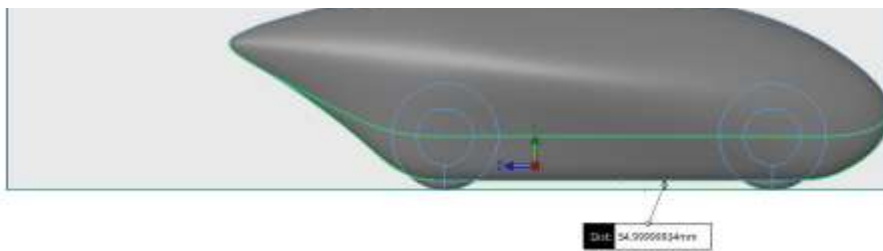
Τα μάτια του οδηγού θα πρέπει να βρίσκονται σε ύψος τουλάχιστον 700 mm από το

έδαφος. Αυτός ο κανονισμός αποτελεί έναν από τους κανονισμούς που καθορίζουν το ύψος του οχήματος αφού και το ύψος των ματιών του οδηγού είναι προκαθορισμένο

### Παράγραφος 2.2.3

Όλα τα μέρη του αυτοκινήτου εκτός από τις ρόδες θα πρέπει να έχουν απόσταση από το έδαφος τουλάχιστον 50 mm, όταν αυτό θα είναι πλήρως φορτωμένο.

Εικόνα 16. Η απόσταση του χαμηλότερου τμήματος του οχήματος από το έδαφος (55mm).



## Ρόδες

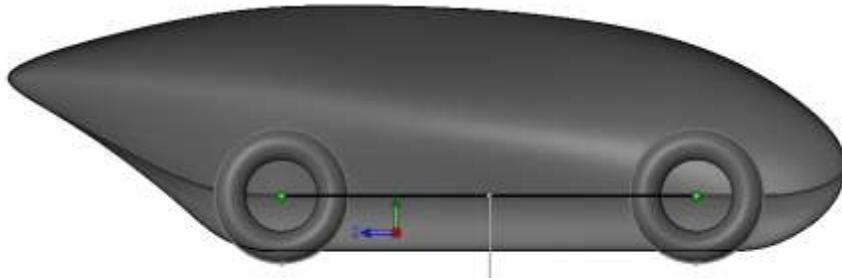
### 3.3.

#### Παράγραφος 2.3.1

Τα οχήματα πρέπει να στηρίζονται σε τέσσερις ρόδες (δύο μπροστά και δύο πίσω) με τα σημεία επαφής τους με τον δρόμο να είναι συμμετρικά σε σχέση με την διαμήκη αξονική γραμμή του οχήματος.

#### Παράγραφος 2.3.2

Το μήκος του ημιαξονίου πρέπει να είναι τουλάχιστον το μισό του πλάτους του οχήματος. Όπως φαίνεται από την εικόνα το μήκος του ημιαξονίου του οχήματος είναι υπεραρκετό αφού το πλάτος του οχήματος είναι 1837 mm.



Εικόνα 17. Μήκος ημιαξονίου (1855 mm).

### 3.4. Φωτοβολταϊκά

Η επιφάνεια που καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ καθορίζεται από την κατηγορία του αυτοκινήτου (Challenger ή Cruiser) καθώς και από το είδος του πάνελ που θα επιλέξει η κάθε ομάδα και επειδή η παρούσα πτυχιακή δεν ασχολείται με τον υπολογισμό της επικερδέστερης διάταξης φωτοβολταϊκών το όχημα σχεδιάστηκε με προδιαγραφές να χωράει στην οροφή του τα πάνελ με την καλύτερη απόδοση ανά τ.μ. (3.300 m<sup>2</sup>, τύπου multi junction).

Class	PV cell chemistry	Allowable total cell area (m <sup>2</sup> )
Challenger	Si	4.000
	thin film single junction	3.560
	thin film multijunction	3.240
	multijunction	2.640
Cruiser	Si	5.000
	thin film single junction	4.440

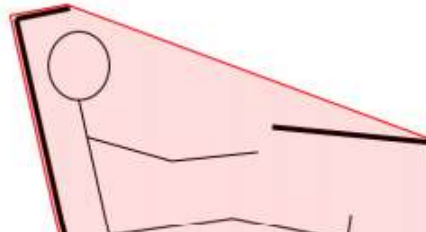
Πίνακας 1. Διαστάσεις για κάθε τύπο πάνελ, ανάλογα με την κατηγορία του οχήματος.



### 3.5. Προστατευτικός χώρος

#### Παράγραφος 2.11

Σύμφωνα με τους κανονισμούς γύρω από τον οδηγό θα πρέπει να δημιουργηθεί μια διάταξη η οποία να τον προστατεύει από τραυματισμό πάσης φύσεως. Η διάταξη αυτή διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψιν ότι κανένα μέρος του οδηγού δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με την νοητή κόκκινη γραμμή που φαίνεται στο παράδειγμα της εικόνας 18 και το κράνος τους οδηγού θα πρέπει να απέχει τουλάχιστον 50 mm από αυτήν. Αυτός ο κανονισμός σε συνδυασμό με την εργονομία του καθίσματος του οδηγού είναι που καθόρισε το ύψος του οχήματος.



Εικόνα 18. Προστατευτικός χώρος επιβατών.

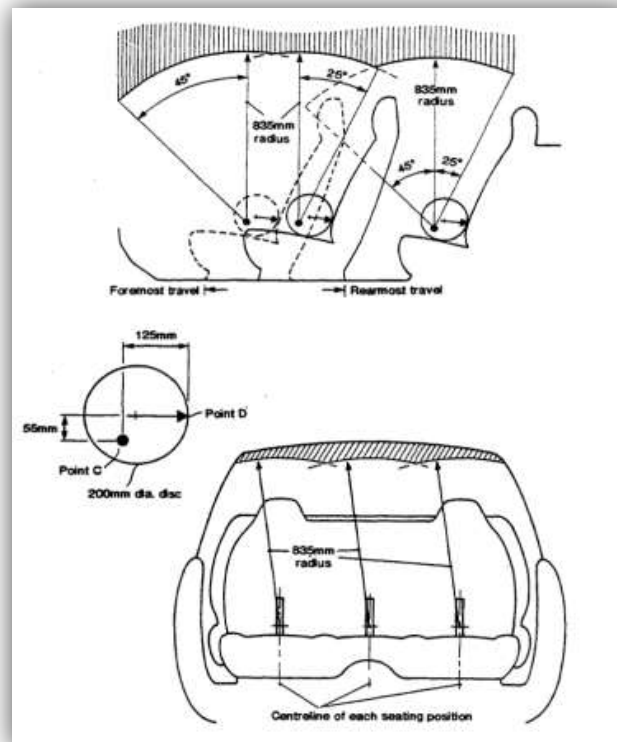
### 3.6. Εργονομία καθισμάτων

#### Παράγραφος 2.12

Τα καθίσματα πρέπει να παρέχουν στήριξη στην πλάτη και το κεφάλι του οδηγού. Η κλίση του καθίσματος σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα θα πρέπει να είναι μικρότερη από 10 μοίρες και η γωνία που σχηματίζεται από τα γόνατα τους γοφούς και τους ώμους του οδηγού να είναι μεγαλύτερη από 90 μοίρες. Τέλος οι φτέρνες του οδηγού θα πρέπει να είναι κάτω από το ύψος του γοφού.

## Παράγραφος 2.13

Σχετικά με τον χώρο του οδηγού ισχύει ότι από την πιο μπροστινή και την πιο πίσω θέση του καθίσματος η νοητή ακτίνα του σχήματος, μήκους 835 mm θα πρέπει να μπορεί να πάρει κλίση 45 μοιρών προς τα μπροστά, 25 μοιρών προς τα πίσω και 7 μοιρών σε κάθε πλευρά χωρίς να το παρεμποδίζει τίποτα. Εξαιρέση αποτελούν το τιμόνι η ζώνη και το κάθισμα τα οποία όμως θα πρέπει να σχεδιαστούν με τρόπο που να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο τραυματισμού. Από τον κανονισμό αυτό γίνεται σαφές ότι το κέλυφος το αυτοκινήτου δεν μπορεί να εισέρχεται στον χώρο που φαίνεται στην εικόνα 19.



Εικόνα 19. Στον εικονιζόμενο χώρο δεν πρέπει να παρεμβάλλεται τίποτα επικίνδυνο για τους επιβάτες.

#### 4. Στρατηγική σχεδίασης

Η γεωμετρία που σχεδιάστηκε προσπαθεί να εκμεταλλευτεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα αεροδυναμικά φαινόμενα που αναφέρθηκαν νωρίτερα χωρίς να παραβιάζει κάποιον από τους κανόνες των διοργανωτών. Πρώτο μέλημα ήταν σαφώς η ελάχιστη δυνατή παραγωγή οπισθέλκουσας και για αυτό η θέση του οδηγού και του συνοδηγού τοποθετήθηκαν ανάμεσα στις μπροστά και πίσω ρόδες, δίνοντας την δυνατότητα να μειωθεί αισθητά η μετωπική επιφάνεια στο κέντρο του αυτοκινήτου. Παράλληλα έγινε προσπάθεια το σχήμα του αυτοκινήτου να δημιουργεί όσο το δυνατόν μικρότερες δίνες κρατώντας την ροή του αέρα προσκολλημένη πάνω του. Τέλος έγινε προσπάθεια τα ποσοστά άντωσης να παραμείνουν όσο το δυνατόν πιο μικρά, με προτεραιότητα όμως πάντα την μείωση της οπισθέλκουσας. Η γεωμετρία του πατώματος αποσκοπεί στην εκμετάλλευση του φαινομένου Venturi. Για ένα όχημα χωρίς αεροτομές είναι πολύ δύσκολο να παραχθούν αρνητικά ποσοστά άντωσης. Για αυτό είναι πολύ σημαντικό να δημιουργηθεί από το πάτωμα όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά πίεσης σε σχέση με την επάνω επιφάνεια του αυτοκινήτου, ώστε να αναρροφάται το όχημα στην επιφάνεια του δρόμου. Με το τέλος του σταδίου σχεδιασμού της γεωμετρίας στο Solidworks το μοντέλο εισάγεται στο CFD πρόγραμμα της ANSYS (Fluent) για να γίνει η ανάλυση της αεροδυναμικής της γεωμετρίας.



Εικόνα 20. Το μοντέλο του οχήματος που εισάχθηκε στο Ansys.

## 5. Εισαγωγή στην Υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι τακτικές που εξασκήθηκαν, με εργαλείο το πρόγραμμα CFD (Fluent) της ANSYS, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Στο πρόγραμμα της ANSYS αναλύθηκαν πολλές παραλλαγές του μοντέλου μας με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων αλλά και κάποιων τεχνικών που είχαν σκοπό να βελτιώσουν την αεροδυναμική του αρχικού μοντέλου. Πρώτα εξετάσθηκε το γενικό μοντέλο του αυτοκινήτου με τις περιστρεφόμενες ρόδες. Στην συνέχεια προστέθηκαν στην γεωμετρία πτερύγια στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου με σκοπό να μειωθεί το μέγεθος των δυνάμεων που δημιουργούνται πίσω από αυτό. Έπειτα ακολούθησε ανάλυση του αυτοκινήτου χωρίς ρόδες (με τα πτερύγια) με σκοπό να γίνει κατανοητή η επίπτωση που έχουν οι ρόδες στα αεροδυναμικά μεγέθη που εξετάζονται. Στο εξής το μοντέλο με τις περιστρεφόμενες ρόδες χωρίς πτερύγια θα αναφέρεται ως περίπτωση (Α), το μοντέλο με περιστρεφόμενες ρόδες και πτερύγια περίπτωση (Β) και το μοντέλο χωρίς ρόδες ως περίπτωση (Γ).

Υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) είναι η επιστήμη της πρόβλεψης της ροής των ρευστών, της μετάδοσης της θερμότητας, της μεταφοράς της μάζας και άλλων σχετικών φαινομένων με ή χωρίς χημικές αντιδράσεις. Η πρόβλεψη γίνεται μέσω αριθμητικής επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων της διατήρησης της μάζας, της ορμής, της ενέργειας και των χημικών ουσιών, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των δυνάμεων πεδίου (βαρύτητα, περιστροφή κ.α.). Μια ολοκληρωμένη CFD ανάλυση αποτελείται από τρία βασικά βήματα, τα οποία πρέπει πάντα να εκτελούνται με την σειρά που θα αναφερθούν. Πρώτο στάδιο είναι η προ-επεξεργασία (pre-processing) στο οποίο εισάγεται η γεωμετρία και κατασκευάζεται το υπολογιστικό πλέγμα. Στο στάδιο αυτό γίνεται επεξεργασία της γεωμετρίας και πραγματοποιούνται όσες απλοποιήσεις είναι δυνατό, χωρίς αυτές να επηρεάζουν δραματικά τα τελικά αποτελέσματα. Σε αυτό το στάδιο γίνεται και ο διαχωρισμός της γεωμετρίας σε μικρότερα κομμάτια, διαδικασία γνωστή και ως πλεγματοποίηση. Έπειτα ακολουθεί το στάδιο της επίλυσης (solving), όπου καθορίζονται οι εξισώσεις Navier-Stokes οι οποίες θα επιλυθούν, για τον κάθε όγκο της γεωμετρίας που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο στάδιο, ξεχωριστά. Τέλος στο στάδιο της μετ'επεξεργασίας (post-processing) οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα της επίλυσης, χρησιμοποιώντας διάφορα διαγράμματα (πίεσης, ταχύτητας κ.α.) για να είναι εύκολα κατανοητά και για την διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

## 5.1. Τα πλεονεκτήματα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική συμβάλει στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος μειώνοντας δραστικά το κόστος και τον χρόνο παραγωγής. Χάρη σε αυτήν είναι δυνατή η ανίχνευση και αντιμετώπιση σφαλμάτων πολύ πριν την διαδικασία παραγωγής. Ένα ακόμη εξαιρετικό πλεονέκτημα που προσφέρει είναι η δυνατότητα βελτιστοποίησης ενός προϊόντος χωρίς να υπάρχει η ανάγκη ενός πρωτότυπου για την διεξαγωγή χρονοβόρων και κοστοβόρων πειραμάτων. Κάποιος που έχει καλές γνώσεις σε προγράμματα CFD μπορεί σε πάρα πολλές περιπτώσεις να εξάγει έγκυρες προβλέψεις και μάλιστα με πολύ καλό επίπεδο λεπτομέρειας και ακρίβειας, που με την μέθοδο των πειραμάτων δεν είναι πάντα εφικτό. Γίνετε λοιπόν ξεκάθαρα σαφές ότι η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι πλέον απαραίτητη για τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση ενός νέου αυτοκινήτου. Ειδικά στην περίπτωση των αγωνιστικών οχημάτων, όπου ο χρόνος είναι πολύ περιορισμένος και το κόστος (για τις απαραίτητες τελικές δοκιμές στις αεροδυναμικές σήραγγες) τεράστιο, τα CFD προγράμματα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο. Συνεπώς για έναν φοιτητικό διαγωνισμό σαν αυτό, ο μόνος δυνατός τρόπος να εξετάσει μια ομάδα την αεροδυναμικότητα του αυτοκινήτου της χωρίς να έχει σπαταλήσει πολύτιμους πόρους (υλικά, χρήματα κ.α.) είναι μέσω κάποιου δωρεάν (για φοιτητές) CFD προγράμματος.

## 5.2. Τα βήματα μιας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ανάλυσης

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναλυθούν περαιτέρω τα 3 βασικά βήματα μιας CFD ανάλυσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Κάθε ένα από αυτά έχει μια επιμέρους ακολουθία βημάτων η οποία θα πρέπει να εφαρμοστεί για την σωστή διεκπεραίωση της ανάλυσης.

### 5.2.1. Αναγνώριση του προβλήματος

#### i. Καθορισμός στόχων

Ξεκινώντας την διεκπεραίωση της ανάλυσης το πρώτο πράγμα που πρέπει κάποιος να κάνει είναι η αναγνώριση του προβλήματος. Πρέπει δηλαδή να

αποφασίσει ποια είναι τα αποτελέσματα που ψάχνει, ποια φυσικά μοντέλα θα ενσωματώσει στην ανάλυση και ποιες παραδοχές μπορεί η πρέπει να κάνει. Στην περίπτωση του ηλιακού αυτοκινήτου τα αποτελέσματα που χρειάζονται είναι η πίεση και η ταχύτητα του αέρα, πάνω στην επιφάνεια του αυτοκινήτου αλλά και γύρο από αυτή. Έγιναν επίσης πολλές απλοποιητικές παραδοχές όπως η διαμήκης συμμετρία του αυτοκινήτου (για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικής δύναμης) αλλά και παραδοχές που αφορούν τα υπόλοιπα μέρη του αυτοκινήτου (πχ απλοποιημένη αναπαράσταση της ρόδας κ.α.).

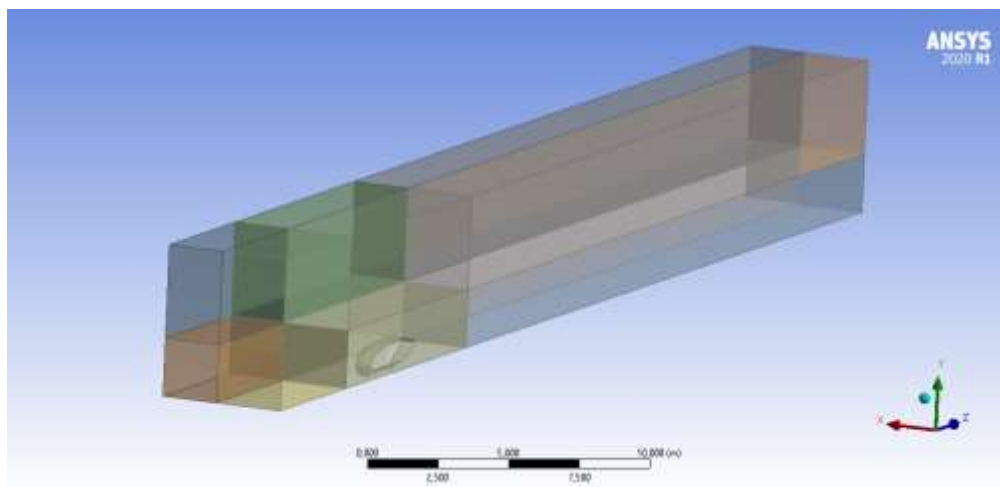
## ii. Αναγνώριση του πεδίου

Αφού έχουν καθοριστεί οι στόχοι θα πρέπει να οριστεί και το υπολογιστικό πεδίο της ανάλυσης. Υπολογιστικό πεδίο είναι το υποσύνολο του χώρου, το οποίο απομονώνεται ώστε να διεξαχθεί σε αυτό η ανάλυση. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον ορισμό του υπολογιστικού πεδίου είναι να γνωρίζει κανείς τις οριακές συνθήκες, δηλαδή τα μεγέθη που είναι αναγκαίο να εισάγουμε ως δεδομένα της ανάλυσης στα όρια του υπολογιστικού πεδίου, για να επιλυθούν με μοναδικό τρόπο οι εξισώσεις. Πρέπει λοιπόν να σιγουρευτεί κανείς ότι υπάρχει αξιόπιστη πληροφορία στα όρια του υπολογιστικού πεδίου που έχει επιλέξει. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτά δημιουργήθηκε υπολογιστικό πεδίο που εκτείνεται μπροστά από το όχημα 2 φορές το μήκος του (7474 mm), πίσω από το όχημα 10 φορές το μήκος του (37380 mm) και έχει ύψος 5 φορές το ύψος του (5450) και πλάτος 5 φορές το πλάτος του (4590 mm). Οι τελικές διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου είναι 48594 mm x 5450 mm x 4590 και ο λόγος που επιλέχθηκε να εκτείνεται τόσο μακριά πίσω από το αυτοκίνητο είναι για να μπορέσει η ροή να αναπτυχθεί πλήρως, με σκοπό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ότι το υπολογιστικό πεδίο έχει χωριστεί σε επιμέρους τμήματα που το απαρτίζουν. Ο λόγος που έγινε αυτός ο διαχωρισμός είναι επειδή μας επιτρέπει να διαχειριστούμε την πλεγματοποίηση σε κάθε κομμάτι ξεχωριστά ανάλογα με τις ανάγκες μας, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των κελιών και την απαιτούμενη υπολογιστική δύναμη, όπου αυτό είναι δυνατό.

Εικόνα 21. Το υπολογιστικό πεδίο χωρισμένο σε επιμέρους τμήματα.

### 5.2.2. Σχεδιασμός μοντέλου γεωμετρίας

Γνωρίζοντας τις διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου ξεκινάει η φάση δημιουργίας του στερεού μοντέλου του αυτοκινήτου. Το ANSYS ως πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να σχεδιαστεί το μοντέλο μέσα από την εφαρμογή Geometry (design modeler) όμως συνεργάζεται το ίδιο καλά και με εξωτερικά σχεδιαστικά προγράμματα τύπου CAD, από τα οποία είναι δυνατόν να εισαχθεί μια έτοιμη γεωμετρία. Για λόγους ευκολίας στην χρήση, επιλέχθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks το οποίο δίνει πληθώρα επιλογών στην σχεδίαση τρισδιάστατων επιφανειών. Τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν αποτελούν μια απλοποιημένη μορφή της τελικής γεωμετρίας (που θα κατασκευαζόταν στο τέλος), απαλλαγμένη από λεπτομέρειες που δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Με την απλοποίηση αυτή μειώνεται ο αριθμός των κελιών και είναι πιο εύκολο να δημιουργηθεί ένα ποιοτικό πλέγμα. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι χάρη στην



συμμετρία του αυτοκινήτου δεν υπήρχε λόγος να τρέξε

το ολόκληρο στην ανάλυση καθώς κάτι τέτοιο θα χρειαζόταν διπλάσιο όγκο κελιών

και άρα διπλάσιο χρόνο επίλυσης χωρίς να προσκομίσει επιπλέον ακρίβεια από αυτήν του συμμετρικού μοντέλου.



Εικόνα 22. Τομή στην συμμετρία του οχήματος

### 5.2.3. Πλεγματοποίηση /Meshing

Αφού η γεωμετρία εισαχθεί στο Design modeler της ANSYS σειρά έχει η πλεγματοποίηση της, η διαδικασία δηλαδή με την οποία χωρίζεται η γεωμετρία σε πολλά επιμέρους ογκίδια. Τα ογκίδια αυτά ονομάζονται στην υπολογιστική ρευστοδυναμική και πεπερασμένοι όγκοι. Η πληροφορία μεταδίδεται από έναν όγκο του πλέγματος στους γειτονικούς του και μεταβάλλεται για κάθε όγκο ανάλογα με τις εξισώσεις που επιλύει το πρόγραμμα αλλά και την γεωμετρία του όγκου και των γειτονικών του. Γίνεται άρα σαφές ότι το σημαντικότερο κομμάτι για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι στον κατάλληλο σχεδιασμό πλέγματος.



### 5.2.3.1. Οι παράγοντες που καθορίζουν τον σχεδιασμό του πλέγματος

#### 1. Πόση υπολογιστική δύναμη είναι διαθέσιμη.

Μια γεωμετρία μπορεί να χωρισθεί με άπειρους τρόπους και τα τμήματα του πλέγματος να είναι από υπερβολικά μικρά έως πολύ μεγάλα για την ανάλυση. Όσο πιο μικρά είναι τα κελιά τόσο περισσότερα χρειάζονται για να καλύψουν όλο το υπολογιστικό πεδίο. Σκοπός είναι τα ογκίδια να είναι όσο το δυνατόν λιγότερα χωρίς όμως να επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για κάθε ένα κελί της ανάλυσης το πρόγραμμα θα πρέπει να επιλύσει επαναληπτικά μία εξίσωση για κάθε υπό επίλυση μεταβλητή της ροής και αυτό έχει ως συνέπεια όσο περισσότερα είναι τα κελιά τόσο περισσότερος να είναι και ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση της ανάλυσης.



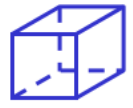
Τρίγωνο  
(tri)



Τετράπλευρο  
(quad)



Τετράεδρο  
(tet)



Εξάεδρο  
(hex)



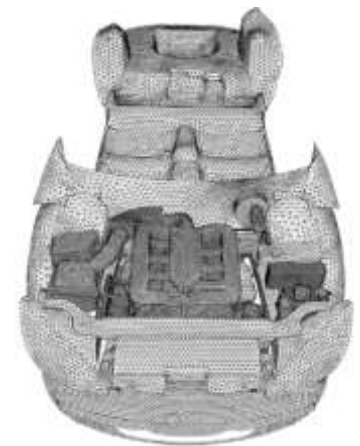
Πυραμίδα



Πρίσμα

#### 2. Η περιπλοκότητα της γεωμετρίας.

Το πλέγμα πρέπει να περιγράφει σωστά την γεωμετρία στην περιοχή του ενδιαφέροντος μας και να σαρώνει αποτελεσματικά τις μεταβολές σημαντικών μεγεθών όπως τις κλίσεις της ταχύτητας, της πίεσης, της θερμοκρασίας κ.α. Όσο πιο περίπλοκη είναι μια γεωμετρία (απότομες τρισδιάστατες καμπύλες ή αλλαγές διεύθυνσης των επιφανειών) τόσο πιο μικρά θα πρέπει να είναι τα ογκίδια του πλέγματος στα σημεία που περιγράφουν τις επιφάνειες ενδιαφέροντος.



### 5.2.3.2. Κατηγορίες πλέγματος

Οι κατηγορίες του πλέγματος χωρίζονται σε τρίγωνα και τετράπλευρά για δυσδιάστατο πλέγμα, τετράεδρα και εξάεδρα για τρισδιάστατο πλέγμα ενώ για ειδικές περιπτώσεις υπάρχουν και τα υβριδικά (πυραμίδα, πρίσμα) που στην ουσία δημιουργούνται για να ενώσουν επιφάνειες τετράεδρων όγκων με επιφάνειες εξάεδρων όγκων. Το πλέγμα τύπου εξάεδρων, όταν είναι προσανατολισμένο στην κατεύθυνση της ροής παρουσιάζει μικρότερη διάχυση σε σχέση με τα τετράεδρα και μπορεί να δώσει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα με πολύ μικρότερο αριθμό κελιών. Αντίθετα όταν η γεωμετρία είναι περίπλοκη τα τετράεδρα και τα

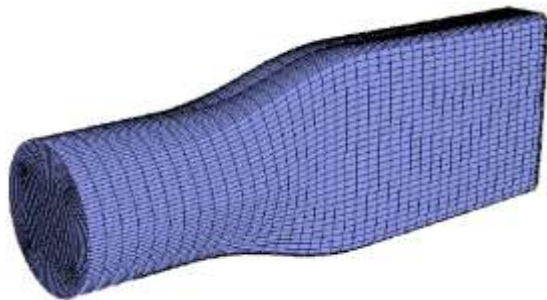
υβριδικά χάρη στην μορφή τους εφάπτονται καλύτερα στην γεωμετρία και μπορούν με μικρότερο αριθμό να πετύχουν την επιθυμητή ακρίβεια .

Εικόνα 24. Πλέγμα εξάεδρων και πρισματικών κελιών

Εικόνα 25. Πλέγμα τετράεδρων και κελιών τύπου πυραμίδας.

### 5.2.3.3. Στρατηγική πλεγματοποίησης

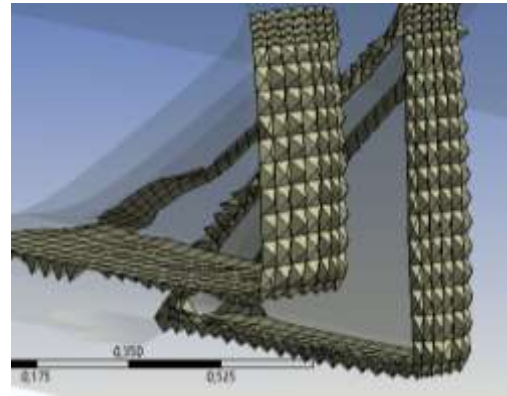
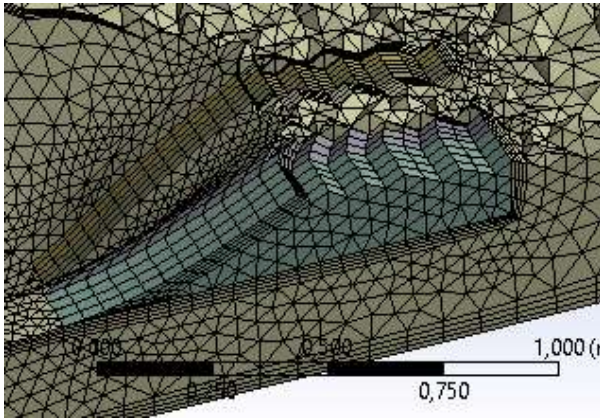
Με αυτά ως γνώμονα επιλέχθηκε ένας συνδυασμός από εξάεδρα και πρίσματα, στα σημεία μακριά από την γεωμετρία του αυτοκινήτου όπου το πλέγμα είναι



ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση της ροής, τα οποία μετατρέπονται σε τετράεδρα πλησιάζοντας στην γεωμετρία του αυτοκινήτου. Στις περιπτώσεις Β και Γ δημιουργήθηκαν υβριδικά κελία τύπου πρίσματος τα οποία βοήθησαν στην ποιοτική πλεγματοποίηση των πτερυγίων.

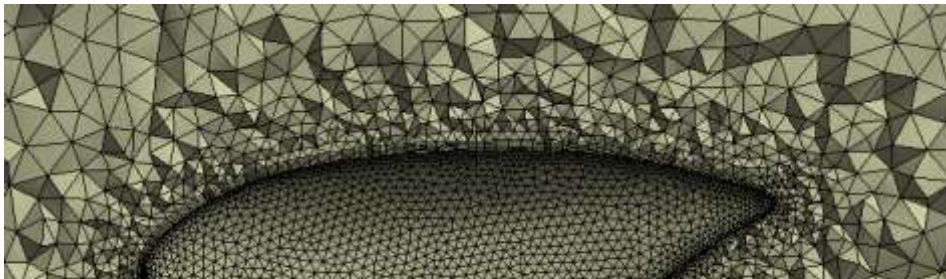
Σημαντικό ρόλο στο πλέγμα παίζει και το επίπεδο πληθωρισμού (inflation layer) το οποίο πυκνώνει το πλέγμα στα πρώτα κελία γύρο από το αμάξι και πάνω από την επιφάνεια του δρόμου και σκοπός του είναι να καταγράψει με ακρίβεια το φαινόμενο της οριακής ροής στα τοιχώματα.

Ο όγκος που περιβάλλει τις επιφάνειες του αυτοκινήτου είναι ο πιο σημαντικός και το μεγαλύτερο μέρος της πλεγματοποίησης είναι αφιερωμένο σε αυτόν. Η πλεγματοποίηση του όγκου αυτού ξεκινάει με τις επιφάνειες του αυτοκινήτου στις οποίες ορίζουμε το μέγεθος των κελιών και το ελάχιστο μέγεθος που μπορούν να πάρουν ώστε να περιγράφουν σωστά την καμπύλη. Στις περιπτώσεις Α και Β το μέγεθος των κελιών αλλά και το ελάχιστο μέγεθος τους είναι μικρότερα από ότι της περίπτωσης Γ γιατί προστέθηκαν οι ρόδες οι οποίες έχουν πιο απότομες καμπύλες. Με την πλεγματοποίηση των επιφανειών του οχήματος έχει οριστεί το μέγεθος που θα έχουν οι επιφάνειες των κελιών που προσομοιάζουν την επιφάνεια του αυτοκινήτου, όμως θα πρέπει στη συνέχεια να οριστεί και το μέγεθος των κελιών



για ολόκληρο τον όγκο που το περιβάλλει.

Στον όγκο αυτό ορίζεται μέγεθος κελιών μεγαλύτερο από ότι στις επιφάνειες του αυτοκινήτου και ελάχιστο μέγεθος κελιών ίσο με το μέγεθος κελιών που ορίστηκε στις επιφάνειες του. Αυτό συμβαίνει γιατί θέλουμε ακρίβεια κοντά στην επιφάνεια του αυτοκινήτου ενώ μακριά από αυτό προσπαθούμε να μειώσουμε τον αριθμό των κελιών για εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος.



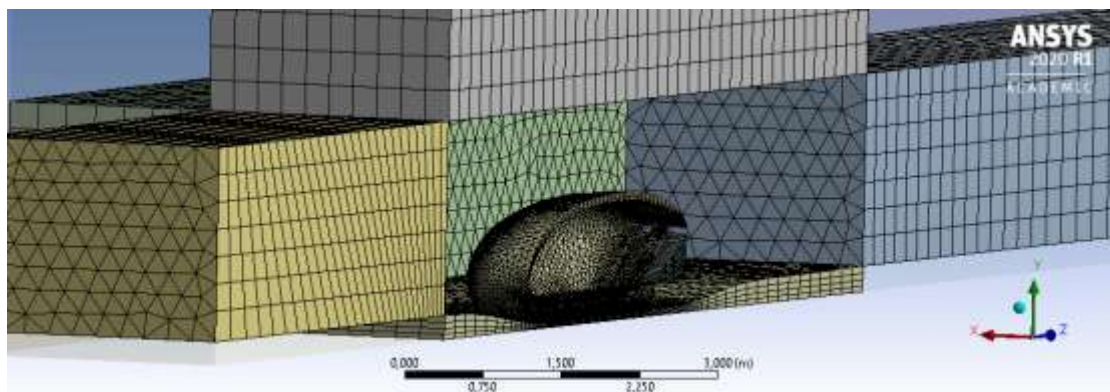
Εικόνα 26. Τα κελιά είναι μεγάλα μακριά από την επιφάνεια του οχήματος και μικραίνουν όσο πιο κοντά είναι σε αυτό.

Για τις περιπτώσεις Β και Γ έχουν δημιουργηθεί όγκοι από τους οποίους θα επιλεγούν δύο επιφάνειες για να ορισθούν ως πτερύγια του αυτοκινήτου. Οι όγκοι αυτοί περιβάλλονται από τον ίδιο όγκο που περιβάλλει και τις επιφάνειες του αυτοκινήτου και για την πλεγματοποίηση τους ακολουθήθηκε μία ξεχωριστή διαδικασία. Τα κελιά που δημιουργήθηκαν στους όγκους αυτούς είναι τύπου πρίσματος και στις τετράπλευρες επιφάνειες τους που έρχονται σε επαφή με τα τετράεδρα κελιά του κύριου όγκου δημιουργούνται πυραμίδες που βοηθούν στην ομαλή ένωση των όγκων.

Στην συνέχεια ορίστηκε το επίπεδο πληθωρισμού (inflation layer) σε όλες τις επιφάνειες που χρειάζεται να απαθανάτισουμε το φαινόμενο της οριακής ροής, με το ύψος του πρώτου στρώματος κελιών να καθορίζεται από το μέγεθος των κελιών στις επιφάνειες του αυτοκινήτου της ρόδας και του δρόμου αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο το ύψος του πρώτου κελιού θα είναι πολύ μικρό στο αυτοκίνητο τις

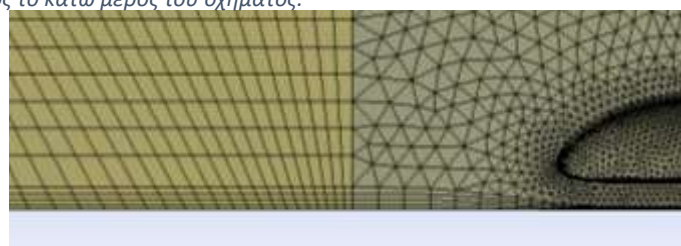
ρόδες και τον δρόμο κάτω από το αμάξι, ενώ στον δρόμο μακριά από το αυτοκίνητο θα μεγαλώνει κερδίζοντας έτσι υπολογιστική ισχύ. Το inflation layer είναι τύπου πρίσματος επειδή τα κελιά που δημιουργούνται σε αυτό έρχονται σε επαφή με μία επιφάνεια των τετράπλευρων κελιών του κύριου όγκου. Στις περιπτώσεις Β και Γ δημιουργήθηκε επίσης inflation layer και στα πτερύγια το οποίο όμως είναι τύπου εξάεδρων. Ο λόγος που το inflation στα πτερύγια αποτελείται από εξάεδρα κελιά είναι γιατί έρχεται σε επαφή μόνο με τις τετράπλευρες επιφάνειες των γειτονικών κελιών του.

Τέλος ορίστηκε το πλέγμα στους υπόλοιπους όγκους του υπολογιστικού πεδίου. Τα κελιά του πλέγματος σε αυτούς τους όγκους είναι εξάεδρα η πρίσματα ανάλογα με το αν έρχονται σε άμεση επαφή με τον κύριο όγκο ο οποίος όπως έχει αναφερθεί αποτελείται από τετράπλευρα κελιά. Από τις 29,30 παρατηρείται πύκνωση των κελιών, στο κάτω μέρος του μπροστά όγκου, πλησιάζοντας τον όγκο που περιβάλλει το αυτοκίνητο. Η πύκνωση αυτή στοχεύει στην καλύτερη δυνατή ακρίβεια σε εκείνο το σημείο του υπολογιστικού πεδίου επειδή η πληροφορία που περνάει από εκείνα τα κελιά στην συνέχεια θα μεταβιβαστεί στα κελιά πάνω και γύρο από την επιφάνεια του αυτοκινήτου που είναι και το σημείο ύψιστου ενδιαφέροντος.



Εικόνα 29. Πύκνωση των κελιών του μπροστά (κίτρινου) όγκου αλλά και των στρωμάτων πληθωρισμού (inflation layer) πλησιάζοντας προς το κάτω μέρος του οχήματος.

Αφού έχουν οι παράμετροι καθορίζουν του πλέγματος απομένει είναι



οριστεί όλες που την μορφή το μόνο που η δημιουργία

του. Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να δημιουργηθεί με μία συγκεκριμένη σειρά το πλέγμα και όχι μαζικά. Στην περίπτωση του μοντέλου αυτού δημιουργείται πρώτα το πλέγμα του κύριου όγκου, δηλαδή του όγκου που περιβάλλει το αυτοκίνητο. Αυτό γίνεται για να μην επηρεαστεί ο τρόπος δημιουργίας του πλέγματος σε αυτό τον όγκο από τους γειτονικούς του. Αντίθετα οι υπόλοιποι όγκοι κατά την δημιουργία τους πρέπει να σεβαστούν την προκαθορισμένη θέση των κελιών του κύριου όγκου και αυτό έχει ως συνέπεια η μορφή που θα πάρει το πλέγμα στα υπόλοιπα μέρη του πεδίου να εξαρτάται άμεσα από αυτόν. Στις περιπτώσεις Β και Γ το πλέγμα δημιουργείται ταυτόχρονα για τους όγκους των πτερυγίων και τον κύριο όγκο, επειδή παρατηρήθηκε από δοκιμές ότι η ποιότητα του πλέγματος είναι καλύτερη κατά αυτόν τον τρόπο. Στην συνέχεια ακολουθείται η διαδικασία που αναφέρθηκε πιο πάνω για τα υπόλοιπα μέρη του υπολογιστικού πεδίου. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα και βλέπουμε από τις εικόνες που ακολουθούν, το πλέγμα στους όγκους που δημιουργήθηκε σε δεύτερη φάση και έρχεται σε επαφή με τις τριγωνικές επιφάνειες των τετράπλευρων κελιών του κύριου όγκου είναι αναγκαστικά τύπου πρίσματος για να ενώνεται κατάλληλα με αυτά.

*Εικόνα 30. Πρισματικά κελία στον κύριο όγκο και τους γειτονικούς του*

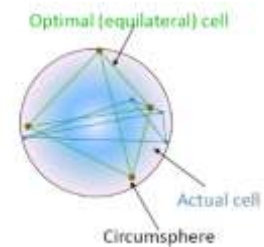
#### 5.2.3.4. Ποιότητα πλέγματος

Πριν εισαχθεί το πλέγμα στον επιλυτή θα πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η ποιότητα του και να εξακριβωθεί ότι είναι αρκετά ποιοτικό ώστε να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες οι οποίοι επιτρέπουν να ελέγξουμε το πόσο σωστή είναι η μορφή των κελιών που έχουν δημιουργηθεί, με πιο δημοφιλείς την αναλογία πλευρών (aspect ratio), την λοξότητα (skewness) και την ορθογωνικότητα (orthogonal quality).

##### **Αναλογία πλευρών (Aspect ratio)**

Το aspect ratio μας δείχνει πόσο τεντώνεται μια επιφάνεια συγκριτικά με τις υπόλοιπες επιφάνειες του κελιού. Aspect ratio ορίζεται ως ο λόγος της απόστασης που απέχει ο πιο απομακρυσμένος κόμβος του κελιού από το κέντρο του προς την απόσταση που απέχει η επιφάνεια με την μικρότερη απόσταση από το κέντρο της ως το κέντρο του κόμβου. Όσο πιο κοντά στο 1 βρίσκετε η τιμή του aspect ratio τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του πλέγματος.

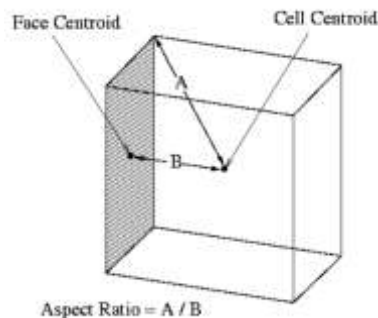
$$\text{Skewness} = \frac{\text{optimal cell size} - \text{cell size}}{\text{optimal cell size}}$$



Εικόνα 31. Αναλογία πλευρών ενός πρισματικού κελιού

### Λοξότητα (Skewness)

Λοξότητα ονομάζεται η πλευρών ενός κελιού. Τα μπορούν να μειώσουν αποσταθεροποιήσουν τη εξάεδρα κελιά έχουν στις 90 μοίρες, ενώ τα πρέπει κατά προτίμηση στις 60 μοίρες και να έχουν όλες τις γωνίες μικρότερες από 90 μοίρες. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι η μέγιστη κλίση για ένα τετράεδρο η εξάεδρο πλέγμα στις περισσότερες ροές πρέπει να διατηρεί skewness κάτω από 0,95 με μέση τιμή μικρότερη από 0,33. Μια μέγιστη τιμή πάνω από 0,95 μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολία σύγκλισης της ανάλυσης. Υπάρχουν δύο τύποι υπολογισμού του skewness ανάλογα με την κατηγορία το πλέγματος.



ασυμμετρία μεταξύ των πολύ κεκλιμένα κελιά την ακρίβεια και να λύση. Τα βέλτιστα γωνίες κορυφής κοντά τετράεδρα κελιά θα να έχουν γωνίες κοντά

Για εξάεδρα και υβριδικά :

Όπου  $\theta_e$  η ισογώνιος που ισούται με 90 μοίρες για κελιά εξάεδρα η τετράπλευρα και 60 μοίρες για κελιά τετράεδρα η τρίγωνα.

Για τετράεδρα :

$$\text{Skewness} = \max \left[ \frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right]$$



Όπου βέλτιστο μέγεθος κελιού είναι ισοσκελές τετράεδρο ίδιου όγκου.

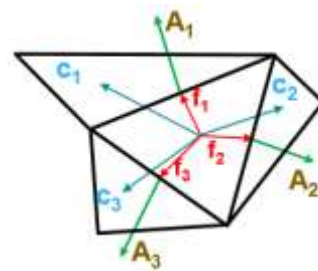
### Ορθογωνικότητα (Orthogonal quality)

Η ορθογωνική ποιότητα (orthogonal quality) καθορίζεται από τον ακόλουθο τύπο και λαμβάνεται υπόψιν για την επιφάνεια του κελιού που δίνει την μικρότερη τιμή.

Όπου  $C_i$  το άνωσμα μεταξύ των κέντρων δύο κελιών,  $A_i$  το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια ενός κελιού και  $f_i$  το διάνυσμα από το κέντρο του κελιού στο κέντρο

$$\frac{A_i \cdot f_i}{|A_i| |f_i|} \quad \frac{A_i \cdot C_i}{|A_i| |C_i|}$$

μίας επιφάνειας του.



Υψηλές

τιμές λοξότητας και χαμηλές τιμές ορθογωνικής ποιότητας δεν συνιστώνται και ο γενικός κανόνας λέει ότι η ελάχιστη ορθογωνική ποιότητα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 0,1 ενώ η μέγιστη λοξότητα να μην ξεπερνάει το 0,95. Αυτές οι τιμές όμως εξαρτώνται άμεσα από την γεωμετρία του κελιού και τους σκοπούς για τους οποίους σχεδιάστηκε οπότε παρατηρείται μια διαφορά των τιμών από περίπτωση σε περίπτωση. Στον πίνακα 2 που ακολουθεί απεικονίζεται η τυπική διαβάθμιση στην ποιότητα των κελιών ανάλογα με τα ποσοστά λοξότητας και ορθογωνικής ποιότητας που πετυχαίνουν.

Για τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν νωρίτερα θα δοθεί βάση στο skewness και σε δεύτερη μοίρα στο orthogonal quality ενώ δεν θα ληφθεί υπόψιν το aspect ratio. Ο λόγος αυτής της προσέγγισης είναι ότι με την δημιουργία του επιπέδου πληθωρισμού τα κελιά που δημιουργούνται κοντά στα τοιχώματα, ειδικά στις

#### Skewness mesh metrics spectrum

Πίνακας 2. Ποιότητα κελιών

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

#### Orthogonal Quality mesh metrics spectrum

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00



πρώτες στρώσεις, είναι πολύ μικρότερα σε ύψος από ότι σε μήκος και είναι

επομένως φυσιολογικό να έχουν υψηλό aspect ratio. Στον πίνακα 3 φαίνονται η μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή για skewness και orthogonal quality για τις περιπτώσεις Α, Β και Γ.

Περιπτώσεις	Skewness			Orthogonal Quality		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
A	1,3e-10	0,85	0,22	0,14	1	0,77
B	1,3e-10	0,96	0,19	0,027	1	0,8
Γ	1,3e-10	0,94	0,22	0,047	1	0,77

Πίνακας 3

Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά ειδικά για αριθμό κελιών κάτω των 500.000, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις. Όπως φαίνεται στον πίνακα οι μέσες τιμές για skewness και orthogonal quality είναι πολύ καλές ενώ οι ακραίες τιμές δεν φτάνουν στο μη αποδεκτό όριο, σε καμία από τις περιπτώσεις.

Για την περιοχή που δημιουργήθηκε το inflation layer θα πρέπει επίσης να εξετασθεί αν καταφέρνει να καταγράψει σωστά το φαινόμενο της οριακής ροής, παράμετρος που εξαρτάται από το ύψος των πρώτων στρωμάτων των κελιών και την ταχύτητα που αναπτύσσει τοπικά η ροή. Για τον έλεγχο της ποιότητας του inflation πρέπει να υπολογισθεί το  $Y^+$  (αδιάστατο μέγεθος για το ύψος του πρώτου κελιού), στην επιφάνεια του αυτοκινήτου και του δρόμου αφού έχει τρέξει η ανάλυση και οι τιμές που θα πάρει να είναι κάτω από 1. Στην περίπτωση του πλέγματος που δημιουργήθηκε, η τιμή αυτή δεν επιτεύχθηκε σε όλη την επιφάνεια του αυτοκινήτου και του δρόμου. Επιλέχθηκε να μην γίνουν κινήσεις βελτίωσης γιατί πρόκειται για αποτελέσματα πτυχιακής εργασίας που για να φτάσουν στο επιθυμητό επίπεδο θα έπρεπε να αυξηθεί κατά πολύ ο αριθμός των κελιών και συνεπώς η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται. Ενδεικτικά ο αριθμός των κελιών σε αναλύσεις ομάδων Formula student κυμαίνεται στα 10 με 30 εκατομμύρια και είναι πολύ μεγαλύτερος από τα 500 χιλιάδες κελιά που δημιουργήθηκαν για τον σκοπό της πτυχιακής.

#### 5.2.4. Επίλυση (solving)



Αφού το πλέγμα είναι έτοιμο ξεκινάει η διαδικασία ορισμού της φυσικής και των ρυθμίσεων επίλυσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να καθοριστούν οι ιδιότητες των υλικών (ρευστών, στερεών, μιγμάτων), να επιλεγθούν τα κατάλληλα φυσικά μοντέλα (τύρβης, καύσης, πολυφασικής ροής κτλ.) να καθοριστούν οι συνθήκες λειτουργίας καθώς και οι οριακές συνθήκες σε όλα τα όρια του υπολογιστικού πεδίου. Θα πρέπει επίσης να ρυθμιστεί ο έλεγχος της λύσης και να οριστούν οι κατάλληλοι παρακολουθητές (monitors) της σύγκλισης της επίλυσης.

#### 5.2.4.1. Γενικές ρυθμίσεις επίλυσης

Ανοίγοντας τον επιλυτή μας δίνετε η δυνατότητα να επιλέξουμε αν η διαδικασία επίλυσης θα γίνει παράλληλα ή σειριακά. Επιλέχθηκε η παράλληλη επίλυση με 6 επεξεργαστές για επιτάχυνση της διαδικασίας, ενώ ενεργοποιήθηκε και η επιλογή double precision η οποία δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα αλλά κοστίζει ταυτόχρονα στην ταχύτητα της επίλυσης.

#### 5.2.4.2. Μοντέλο τύρβης

Για την συγκεκριμένη ανάλυση ορίστηκε το φυσικό μοντέλο της τύρβης ενώ το φυσικό μοντέλο της ενέργειας παρέμεινε (off). Το μοντέλο της ενέργειάς ενεργοποιείται όταν για να ικανοποιηθεί η αρχή διατήρησης της ενέργειας παρατηρείται μεταβολή κάποιας μορφής ενέργειας (π.χ. κινητική) σε θερμική. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επειδή η ταχύτητα που κινούνται τα μόρια του αέρα πάνω στο όχημα δεν είναι πολύ μεγάλη, δεν υπάρχει μεταβολή της κινητικής ενέργειας σε θερμική λόγω τριβών, οπότε δεν υπάρχει και λόγος να ενεργοποιήσουμε το μοντέλο της ενέργειας. Για την τύρβη επιλέχθηκε το μοντέλο SST (shear stress transport) k- $\omega$  το οποίο είναι υβριδικό και χρησιμοποιώντας έναν όρο απόσβεσης προσπαθεί να προσομοιάσει το μοντέλο k- $\omega$  με το μοντέλο k- $\epsilon$  μακριά από τα τοιχώματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος και είναι πολύ διαδεδομένο στις αεροδυναμικές αναλύσεις αυτοκινήτων.

Το μοντέλο k- $\omega$  προσθέτει στην ανάλυση δύο εξισώσεις μεταφοράς. Η πρώτη μεταβλητή μεταφοράς είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης  $K$ , η οποία καθορίζει το ύψος της ενέργειας στην τύρβη. Η δεύτερη μεταβλητή μεταφοράς είναι το ειδικό ποσοστό εξάλειψης  $\omega$ , της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό είναι

πολύ καλό στην προσομοίωση της τύρβης λαμβάνοντας υπόψιν το γραμμικό υπόστρωμα, στο οποίο η ροή κυριαρχείται από φαινόμενα ιξώδους. Μειονέκτημα για το μοντέλο k- $\omega$  αποτελεί η ευαισθησία του στις ιδιότητες της τύρβης στην εισαγωγή του και κατά την ελεύθερη ροή του ρευστού. Το μοντέλο K- $\epsilon$  αποτελεί κι αυτό μοντέλο δύο εξισώσεων μεταφοράς με τον όρο  $\epsilon$  να ορίζεται η μεταβλητή μεταφοράς της εξάλειψης της τυρβώδους ροής. Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για να προβλέπει την συμπεριφορά της ροής σε περιοχές μακριά από τα τοιχώματα (στην ελεύθερη ροή), όμως εμφανίζει μείωση της ακρίβειας του σε περιπτώσεις που η ροή εμφανίζει μεγάλα ποσοστά υποπίεσης, φαινόμενο που εμφανίζεται σε ορισμένα σημεία στα τοιχώματα του αυτοκινήτου. Το μοντέλο SST k- $\omega$  το οποίο αποτελεί μία βελτίωση του k- $\omega$  από τον Menter, καταφέρνει προσθέτοντας έναν παράγοντα ανάμειξης (blending ή damping factor) F1 να μετατρέπει ομαλά το μοντέλο k- $\omega$ , που χρειαζόμαστε στο γραμμικό υπόστρωμα του αυτοκινήτου, σε ένα μοντέλο που τα αποτελέσματα του προσομοιάζουν αυτά του k- $\epsilon$  στο πεδίο της ελεύθερης ροής. Ο παράγοντας F1 παίρνει τιμές από 0 (στο πεδίο της ελεύθερης ροής) έως 1 (στο οριακό στρώμα). Στο σημείο που μηδενίζεται το F1, ο επιπλέον όρος της εξίσωσης του ειδικού ποσοστού εξάλειψης  $\omega$  μηδενίζεται και το μοντέλο πλέον προσπαθεί να προσομοιάσει τα αποτελέσματα του μοντέλου k- $\epsilon$ .

Οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο K- $\omega$  είναι οι εξής :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k$$

Όπου  $G_k$  η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας,  $G_\omega$  η παραγωγή του ειδικού ποσοστού εξάλειψης  $\omega$ . Τα  $\Gamma_k$  και  $\Gamma_\omega$  αντιπροσωπεύουν τα ποσοστά διάχυσης των k και  $\omega$  αντίστοιχα.  $Y_k$  και  $Y_\omega$  αποτελούν τα ποσοστά εξάλειψης των k και  $\omega$  αντίστοιχα.  $D_\omega$  αντιπροσωπεύει τον όρο της διασταυρωμένης διάχυσης και είναι αυτός που περιλαμβάνει το παράγοντα ανάμειξης F1.

### 5.2.4.3. Ιδιότητες υλικών

Στην συνέχεια ορίστηκαν οι ιδιότητες του ρευστού που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο αέρας. Ο αέρας ανήκει στην κατηγορία των Νευτώνειων

ρευστών, που σημαίνει ότι μπορεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες να συμπιεστεί και ότι το ιξώδες του (η τιμή που χαρακτηρίζει την εσωτερική τριβή μεταξύ των μορίων ενός ρευστού) εξαρτάται από την θερμοκρασία του και την πίεση του. Παρόλα αυτά η πυκνότητα του αέρα ορίζεται ως σταθερή και ίση με  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  και το ιξώδες  $\nu = 0,00001789 \text{ m}^2/\text{s}$ . Ο λόγος που οι δύο αυτές τιμές ορίστηκαν σταθερές είναι επειδή η ανάλυση προσομοιάζει τις αγωνίστηκες συνθήκες του διαγωνισμού. Αυτό σημαίνει ότι το αυτοκίνητο θα κινείται σε ένα εύρος ταχυτήτων το οποίο δεν θα ξεπερνάει ποτέ τα 100 χλμ./ώρα και συνεπώς δεν θα φτάσει ποτέ στα φαινόμενα συμπίεσότητας της ροής, τα οποία γίνονται αισθητά και έχουν άμεσες επιπτώσεις για ταχύτητες που ξεπερνούν την ταχύτητα του ήχου. Επίσης η διακύμανση της θερμοκρασίας θα είναι πολύ μικρή και θα εξαρτάται από την χρονική περίοδο του διαγωνισμού και τις καιρικές συνθήκες και οι τιμές της δεν επηρεάζουν αισθητά το ιξώδες που έχει επιλεγεί με βάση τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

#### 5.2.4.4. Συνθήκες λειτουργίας (operating conditions)

Στις συνθήκες λειτουργίας διατηρήθηκε η προκαθορισμένη πίεση η οποία είναι η ατμοσφαιρική και αποτελεί την συνήθη επιλογή για τέτοιου είδους αναλύσεις.

#### 5.2.4.5. Οριακές συνθήκες

Σε αυτό το σημείο ορίζονται οι γνωστές μας συνθήκες για τα όρια του υπολογιστικού μας πεδίου αλλά και για τα τοιχώματα τις γεωμετρίας. Έχουν δημιουργηθεί ήδη κατά την πλεγματοποίηση ομάδες επιφανειών οι οποίες αποτελούν τα όρια του πεδίου η τα τοιχώματα τις γεωμετρίας και τους έχουν δοθεί τα κατάλληλα ονόματα στα named selections.

### Είσοδος-έξοδος (Inlet-Outlet)

Στο inlet τέθηκε ταχύτητα ίση με 19.444 m/s, που αντιστοιχεί με 70 km/h και είναι μια εμπειρική μέση ταχύτητα η οποία θα ήταν καλό να έχει το αυτοκίνητο σύμφωνα με τον χαρακτήρα του διαγωνισμού. Το πόσο ταραχώδης είναι η ροή στην είσοδο της ανάλυσης δεν είναι εφικτό να προβλεφθεί διότι εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Συνήθως σε περιπτώσεις, όπου δεν είναι γνωστές οι συνθήκες της τύρβης στην είσοδο, επιλέγονται Turbulence intensity = 5% και Turbulence viscosity ratio = 10 που είναι οι προκαθορισμένες τιμές του προγράμματος. Για την συγκεκριμένη περίπτωση όμως ορίστηκε το Turbulence intensity = 1%, το οποίο είναι στο εύρος των τυπικών τιμών που χρησιμοποιούνται (1%-5%), επειδή δεν ήταν θεμιτό τα αποτελέσματα να επηρεάζονται από τυχόν τυρβώδη ροή στην είσοδο η οποία και δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθεί. Με την ίδια ακριβώς λογική ορίστηκε το Turbulence intensity = 1% και στο outlet και διατηρήθηκε το Turbulence viscosity ratio = 10 ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν στην προεπιλεγμένη τους μορφή.

### **Wall road, Wall top-side**

Ο δρόμος αλλά και το πάνω και δεξιά όριο του πεδίου ορίστηκαν ως moving walls τα οποία κινούνται με ταχύτητα ίδια με αυτή της ελεύθερης ροής και στην ίδια διεύθυνση (άξονας Z). Ο λόγος αυτής της επιλογής είναι για την προσομοίωση της ροής του αέρα επάνω στα όρια του πεδίου. Στην πραγματικότητα το αμάξι είναι αυτό που κινείται αλλά επειδή αυτό είναι αδύνατον σε μια CFD ανάλυση τίθεται ο αέρας ως κινούμενο μέσω, με διεύθυνση αντίθετη από την διεύθυνση της ταχύτητας του αυτοκινήτου.

### **Wall car**

Το αυτοκίνητο ορίζεται ως stationary wall, μιας και στις αναλύσεις CFD η ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα προσομοιάζεται ορίζοντας τον αέρα ως κινούμενο μέσο με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του αυτοκινήτου.

### **Wall front wheel / Wall rear wheel**

Στις περιπτώσεις A και B οι επιφάνειες που προσομοιάζουν τις ρόδες τίθενται ως περιστρεφόμενες (rotating walls) για να υπάρχει μια ακριβής εικόνα του τι επίπτωση έχει η περιστροφή τους στην ροή του αέρα. Ήδη κατά την πλεγματοποίηση είχε γίνει διαχωρισμός της μπροστινής και πίσω ρόδας στα named selections και ο λόγος είναι ότι πρέπει να ορισθούν στην κάθε μια οι συντεταγμένες του άξονα γύρο από τον οποίο θα περιστρέφεται. Έπειτα ορίζεται και η ταχύτητα περιστροφής τους σε rad/s που προκύπτει κατά την διαίρεση της ταχύτητας της ροής του αέρα με την ακτίνα της ρόδας ( $0.3012 \text{ m}$ )  $\omega = 19.444/0.3012 = 64.555 \text{ m/s}$ .

### Wall fins

Τέλος στις περιπτώσεις Γ και Δ όπου προστέθηκαν στην γεωμετρία πτερύγια θα πρέπει αυτά να ορισθούν ως stationary walls αφού στην πραγματικότητα αποτελούν μέρος του αυτοκινήτου.

#### 5.2.4.6. Τιμές αναφοράς / Reference values

Σε αυτό το παράθυρο ορίζονται φυσικοί παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό φυσικών ποσοτήτων αλλά και αδιάστατων συντελεστών όπως οι συντελεστές οπισθέλκουσας και αντωσης,  $c_d$  και  $c_l$  αντίστοιχα. Πρώτη παράμετρος που ορίστηκε είναι η μετωπική επιφάνεια, την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα από τα projected areas στα reports. Στην συνέχεια ορίζεται το μήκος του αυτοκινήτου και η ταχύτητα στην είσοδο της ανάλυσης. Τέλος ορίζοντας ως αρχικό σημείο επίλυσης το inlet οι υπόλοιπες παράμετροι ενημερώνονται αυτόματα.

### 5.2.4.7. Μέθοδοι επίλυσης

Στο παράθυρο της μεθόδου επίλυσης στην παράμετρο σύζευξης πίεσης-ταχύτητας (pressure-velocity coupling) επιλέχθηκε η επίλυση να γίνει συνδεδεμένα (coupled) δηλαδή να γίνει σύνδεση των εξισώσεων της συνέχειας της ορμής και της μεταφοράς και ταυτόχρονη επίλυση τους. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η παράμετρος είναι γιατί έχει παρατηρηθεί ότι με λιγότερες επαναλήψεις συγκλίνει όπως οι υπόλοιπες (SIMPLE, SIMPLEC, PISO) και η διακύμανση των τιμών CD και CL είναι μικρότερη.

Στην χωρική διακριτοποίηση (Spatial Discretization) για μέθοδο διαβάθμισης επιλέχθηκε η Least Squares Cell Base η οποία προσφέρει καλή ακρίβεια και είναι ελαφρύτερη και φθηνότερη σε υπολογιστική δύναμη από την Green Gauss Node Based. Την λιγότερη υπολογιστική δύναμη απαιτεί η Green Gauss Cell Based όμως είναι η λιγότερο ακριβής και γι' αυτό δεν προτιμήθηκε. Στις υπόλοιπες παραμέτρους της χωρικής διακριτοποίησης επιλέχθηκε η second order upwind που είναι πιο ακριβής από την first order upwind, παρά το γεγονός ότι η first order upwind παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα στα αποτελέσματα από επανάληψη σε επανάληψη.

### 5.2.4.8. Έλεγχοι επίλυσης (Solution control)

Όταν χρησιμοποιείται ο βασισμένος στην πίεση (pressure based) επιλυτής για ροές ανεξάρτητες του χρόνου και γίνεται χρήση του συνδυαστικού σχεδιαγράμματος πίεσης-ταχύτητας (Coupled pressure-velocity) τότε ο Courant number χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση της συμπεριφοράς σύγκλισης και η συνήθης τιμή που εξυπηρετεί αυτό το σκοπό είναι το 50. Οι ρητοί παράγοντες χαλάρωσης (Explicit relaxation factors) καθορίζουν τους παράγοντες χαλάρωσης των μεταβλητών των εξισώσεων της πίεσης και της ορμής από επανάληψη σε επανάληψη και οι τιμές τους τέθηκαν ίσες με 0.25, τιμή οι οποία παρατηρήθηκε ότι χρησιμοποιείται σε παρόμοιες αναλύσεις. Ο pressure based επιλυτής χρησιμοποιεί την χαλάρωση (under-relaxation) των εξισώσεων για να ελέγξει την ανανέωση των υπολογισθέντων μεταβλητών από επανάληψη σε επανάληψη. Στην παράμετρο της χαλάρωσης (under-relaxation) διατηρήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές αφού για τις περισσότερες περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στις βέλτιστες και συστήνεται από την ίδια την ANSYS να μειώνετε η τιμή τους μόνο όταν μετά από τις πρώτες 4-5 επαναλήψεις οι τιμές των residuals εξακολουθούν να αυξάνονται.

#### 5.2.4.9. Παρακολουθητές / Monitors

Στο παράθυρο των monitors επιλέγουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρουν και θα θέλαμε να υπολογίζονται και να εκτυπώνονται στο text console μαζί με τα βασικά residuals. Στην περίπτωση μας τα μεγέθη αυτά είναι οι συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας. Στο τέλος κάθε επανάληψης του επιλυτή υπολογίζονται και αποθηκεύονται οι υπολειπόμενες τιμές (residuals) αλλά και οι τιμές ενδιαφέροντος μας μέχρι να επέλθει η σύγκληση. Σε έναν υπολογιστή άπειρης υπολογιστικής δύναμης και ακρίβειας οι υπολειπόμενες τιμές (residuals) θα έφταναν στο μηδέν, στην πραγματικότητα όμως φτάνουν σε μια πολύ μικρή τιμή και στην συνέχεια σταθεροποιούνται. Όταν οι τιμές έχουν σταθεροποιηθεί και ικανοποιείτε η συνολική αρχή της διατήρησης τότε καταλαβαίνουμε ότι η ανάλυση μας έχει συγκλίνει. Στο παράθυρο των υπολειπόμενων τιμών πρέπει στα κριτήρια σύγκλησης (convergence criterion) να επιλεγεί το (none) γιατί σε περίπτωση που οι τιμές των residuals πέσουν κάτω από την καθορισμένη τιμή το πρόγραμμα θα θεωρήσει ότι η ανάλυση έχει συγκλίνει ακόμα και αν οι τιμές, από επανάληψη σε επανάληψη, δεν έχουν σταθεροποιηθεί και η ανάλυση θα σταματήσει.

#### 5.2.4.10. Αρχικοποίηση της επίλυσης (initialization)

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της επίλυσης απαιτείται από το Fluent η αρχικοποίηση όλων των μεταβλητών της λύσης. Αυτό στην ουσία σημαίνει ότι σε κάθε ένα κελί του πλέγματος μας πρέπει να ορισθεί μια τιμή για την κάθε μεταβλητή των εξισώσεων που να επιτρέπει μια αρχική εικασία της λύσης. Όσο πιο σωστή είναι η αρχική αυτή πρόβλεψη της λύσης τόσο πιο σταθερή είναι η επίλυση και τόσο πιο γρήγορα θα συγκλίνει η ανάλυση. Για την αρχικοποίηση επιλέχθηκε η υβριδική αρχικοποίηση (Hybrid initialization) η οποία είναι η προκαθορισμένη από το πρόγραμμα και ταιριάζει καλύτερα στις περισσότερες περιπτώσεις.

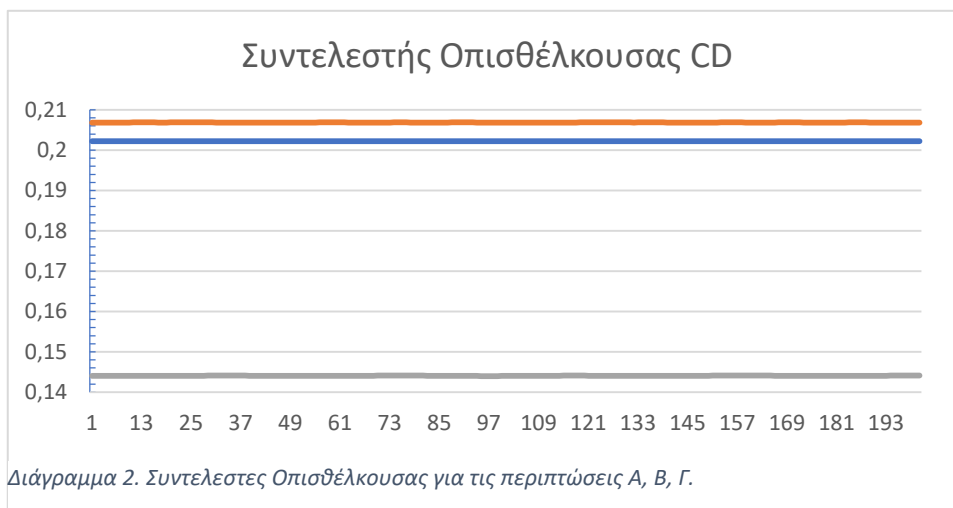
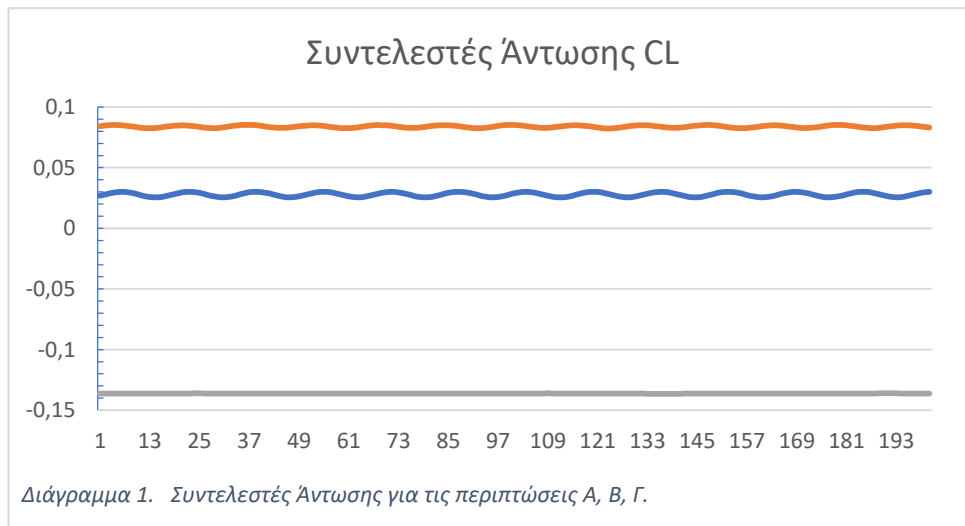
### 5.2.5. Μετ' επεξεργασία αποτελεσμάτων (Post-processing)

Σκοπός των CFD αναλύσεων είναι η απόκτηση ποσοτικών και ποιοτικών πληροφοριών σχετικά με την απόδοση της ροής τους ρευστού του εκάστοτε συστήματος. Αφού έχουν αποκτηθεί τα ποσοτικά αυτά δεδομένα μπορεί πλέον ο χρήστης να τα οπτικοποιήσει για να γίνουν εύκολα κατανοητά τα φαινόμενα που διέπουν την ανάλυση. Η μετ' επεξεργασία αυτή των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει είτε απευθείας στον επιλυτή με τα εργαλεία του επιλυτή του Fluent είτε στην γενική εφαρμογή CFD μετ' επεξεργασίας της ANSYS η οποία και προτιμήθηκε.

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων έγινε αξιολόγηση των διαγραμμάτων, πίεσης και ταχύτητας, των αδιάστατων συντελεστών άντωσης οπισθέλκουσας καθώς και των ροϊκών γραμμών κατά μήκος αλλά και πίσω από το όχημα. Κατά την δημιουργία του διαγράμματος των συντελεστών άντωσης και οπισθέλκουσας της περίπτωσης Α παρατηρήθηκε ταλάντωση των αποτελεσμάτων. Η ταλάντωση αυτή θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα ασταθούς ροής, λόγω της γεωμετρίας του αυτοκινήτου, η να σημαίνει ότι ένα πιο ποιοτικό πλέγμα απαιτείται για να ομαλοποιηθεί η ταλάντωση. Σε περίπτωση ασταθούς ροής θα έπρεπε όλες οι αναλύσεις να ξανατρέξουν με εντελώς διαφορετική προσέγγιση, επιλέγοντας έναν επιλυτή ασταθούς ροής (transient). Σε αυτό το σημείο ήταν που επιλέχθηκε να δημιουργηθούν οι περιπτώσεις Β και Γ από τις οποίες θα γινόταν κατανοητό αν η περιστρεφόμενη ρόδα δημιουργεί αστάθεια της ροής και αν με την προσθήκη πτερυγίων επιτυγχάνεται η εξομάλυνση της. Στα διαγράμματα που ακολουθούν μπορεί να γίνει απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων, αφού στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζονται οι συντελεστές άντωσης και των τριών περιπτώσεων και στο δεύτερο οι συντελεστές οπισθέλκουσας αντίστοιχα.



Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των CI και Cd, στις τελευταίες 200 επαναλήψεις όπου και έχει επέλθει η σύγκλιση των αναλύσεων.



Από τα διαγράμματα γίνεται εύκολα ορατό ότι η ταλάντωση που παρατηρείται στην περίπτωση Α έχει μειωθεί στην περίπτωση Β ενώ στην περίπτωση Γ έχει εξαλειφθεί εντελώς. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι το πλέγμα στην περιοχή της ρόδας δεν είναι αρκετά ποιοτικό ή ότι περνώντας η ροή από την ρόδα παύει να είναι σταθερή. Η διακύμανση της ταλάντωσης στην περίπτωση Β είναι εμφανώς μικρότερη από την περίπτωση Α, όμως ταυτόχρονα παρατηρήθηκε μια αύξηση των τιμών των συντελεστών άντωσης και οπισθέλκουσας, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.

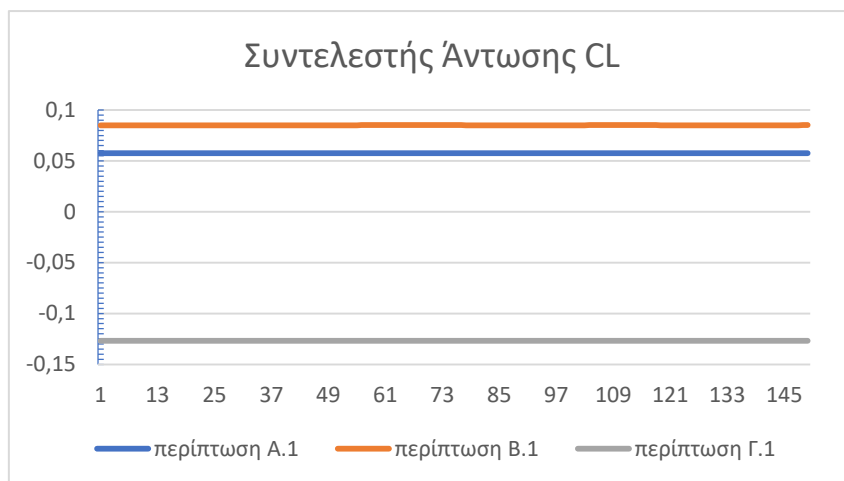
Πίνακας 1 Στην περίπτωση Α έχουν υπολογισθεί οι μέσες τιμές και των δύο συντελεστών ενώ στην περίπτωση Γ

ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΤΩΣΗΣ (CL)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ (CD)	ΛΟΓΟΣ CL/CD
A	0,028	0,202	0,14
B	0,084	0,207	0,4
Γ	-0,136	0,144	0,9

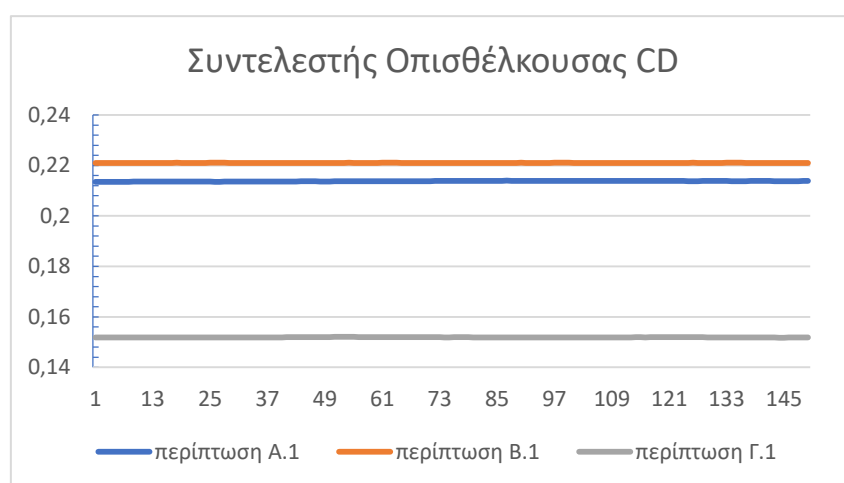
μόνο του CL

Από τον πίνακα 4 καταλαβαίνουμε πόσο επηρεάζουν οι ρόδες την αεροδυναμική του αυτοκινήτου. Χωρίς τις ρόδες το αυτοκίνητο παράγει downforce ενώ μόλις προστεθούν στην ανάλυση το αυτοκίνητο παράγει μικρό ποσοστό lift. Οι τιμές του συντελεστή άντωσης είναι και στις 3 περιπτώσεις πολύ μικρές και κοντά στο μηδέν οπότε δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας ενώ το Cd στις δύο ρεαλιστικές περιπτώσεις (Α,Β) είναι αρκετά ικανοποιητικό αν αναλογιστεί κανείς ότι σε αμάξια μαζικής παραγωγής οι χαμηλότερες τιμές που συναντώνται είναι της τάξης του 0,20 με 0,22. Οι τιμές αυτές δείχνουν μια αρκετά ανταγωνιστική αεροδυναμική γεωμετρία για τους σκοπούς του διαγωνισμού όμως η ταλάντωση στα αποτελέσματα του συντελεστή άντωσης τις καθιστά μη αξιόπιστες. Σε κάθε περίπτωση αποτελούν ένα σημείο αναφοράς και αναμένεται με τις κατάλληλες ενέργειες τα καινούργια αποτελέσματα να είναι σχετικά κοντά σε αυτά που μας έδωσαν οι μέχρι τώρα αναλύσεις.

Στο σημείο αυτό επιλέχθηκε να γίνει πύκνωση του πλέγματος, όπου χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια και να ξανατρέξουν οι αναλύσεις. Αν ακόμα και μετά την πύκνωση τα αποτελέσματα εξακολουθούσαν να εμφανίζουν ταλαντώσεις η τελική προσέγγιση που θα μπορούσε να εφαρμόσει κανείς είναι να τρέξει την ανάλυση με επιλυτή ασταθούς ροής. Οι καινούργιες αναλύσεις που έτρεξαν θα αναφέρονται στο εξής ως περίπτωση Α.1, Β.1, Γ.1 και η μόνη διαφορά που έχουν με τις Α,Β και Γ αντίστοιχα είναι η πύκνωση του πλέγματος στα σημεία ενδιαφέροντος. Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι τιμές των CL και CD για τις τελευταίες 150 επαναλήψεις των περιπτώσεων Α.1, Β.1 και Γ.1.



Διάγραμμα 3. Συντελεστές Άντωσης για τις περιπτώσεις A.1, B.1, Γ.1.



Διάγραμμα 4. Συντελεστές Οπισθέλκουσας για τις περιπτώσεις A.1, B.1, Γ.1.

Από τα διαγράμματα των περιπτώσεων A.1, B.1 και Γ.1 γίνεται ορατό ότι οι ταλαντώσεις που παρατηρήθηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις (πιο αραιού πλέγματος) έχουν εξομαλυνθεί. Αυτό σημαίνει ότι η ταλάντωση εξαρτάται από την ποιότητα του πλέγματος και συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη να γίνει χρήση επιλυτή ασταθούς ροής για τον υπολογισμό των αναλύσεων. Στο εξής για τα γεωμετρικά μοντέλα που σχεδιάστηκαν θα λαμβάνονται υπόψιν οι συντελεστές των περιπτώσεων A.1, B.1 και Γ.1 λόγω της σταθερότητας που εμφανίζουν κατά τις επαναλήψεις τους. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι η απόκλιση από τις μέσες τιμές των περιπτώσεων A, B, Γ δεν είναι πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται και από των πίνακα 5. Εξάιρεση αποτελεί ο συντελεστής άντωσης της περίπτωσης A.1 ο οποίος έχει

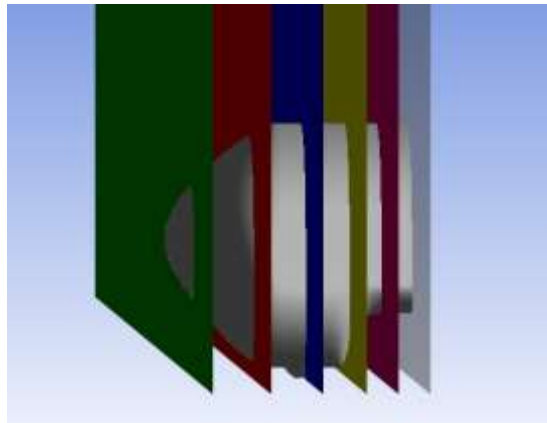
Περιπτώσεις	Συντελεστής Άντωσης (CL)	Συντελεστής Οπισθέλκουσας (CD)	Λόγος CL/CD
A.1	0,057	0,21	0,27
B.1	0,085	0,22	0,38
Γ.1	-0,12	0,15	0,84

αυξηθεί αισθητά.

*Πίνακας 5. Τιμές για CL και CD για τις περιπτώσεις A.1, B.1, Γ.1*

Αφού το νέο πλέγμα έφερε σταθερότητα και συνεπώς μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα οι τρεις περιπτώσεις έτρεξαν για ταχύτητα εισόδου ίση με 100 χλμ./ώρα ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ταχυτήτων. Οι νέες περιπτώσεις θα αναφέρονται στο εξής ως περιπτώσεις A.1.1, B.1.1 και Γ.1.1 και η διαφορά τους με τις περιπτώσεις A.1, B.1, Γ.1 είναι μόνο στην ταχύτητα εισόδου της ανάλυσης. Για αυτές τις 6 περιπτώσεις δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα πίεσης και ταχύτητας στα τα οποία θα γίνει σύγκριση αρχικά μεταξύ των περιπτώσεων A.1, B.1, Γ.1 και στην συνέχεια μεταξύ των ίδιων μοντέλων για τις διαφορετικές ταχύτητες (A.1 με A.1.1, B.1 με B.1.1 και Γ.1 με Γ.1.1). Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων δημιουργήθηκαν τομές σε 5 σημεία της γεωμετρίας (6 μαζί με τον άξονα συμμετρίας), για να απαθανάτισουμε την πίεση αλλά και την ταχύτητα του αέρα κατά μήκος του αυτοκινήτου σε διάφορα σημεία του πλάτους του.

Από τις τομές που φαίνονται στην εικόνα 32 θα αναλυθούν με διαγράμματα η τομή στην ρόδα (μπλε), η οποία μας δίνει μια καλή εικόνα για τα μεγέθη της πίεσης και της ταχύτητας κοντά στην επιφάνεια της ρόδας και η τομή στην συμμετρία (γκρι) η οποία είναι χρήσιμη για την οπτικοποίηση των μεγεθών της πίεσης στο κέντρο. Τα διαγράμματα τομών παραρτήματα της πτυχιακής για την οπτικοποίηση της ταχύτητας και της πίεσης του αυτοκινήτου. των υπόλοιπων παρατίθενται στο παρούσας περρεταίρω μελέτη.



είναι χρήσιμη για των μεγεθών της πίεσης στο κέντρο. Τα διαγράμματα τομών παραρτήματα της πτυχιακής για

*Εικόνα 32. Τομές διαγραμμάτων.*

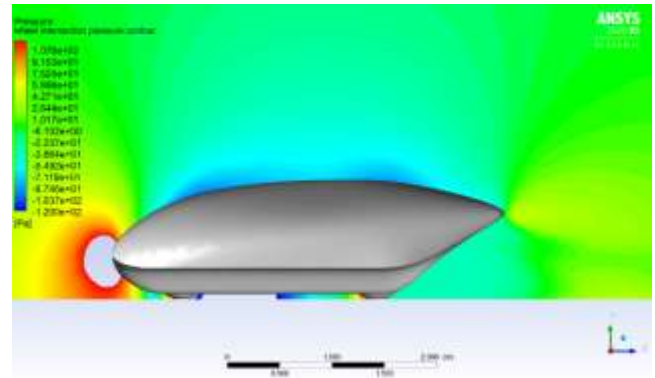
Για να γίνει άμεση σύγκριση των διαγραμμάτων των περιπτώσεων A.1, B1, Γ.1, αλλά και μεταξύ των τομών της κάθε περίπτωσης, ορίστηκε μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή για την πίεση και την ταχύτητα του κάθε διαγράμματος. Όπως φαίνεται στους

πίνακες της σελίδας 60 του παραρτήματος οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της πίεσης αλλά και της ταχύτητας διαφέρουν αρκετά από περίπτωση σε περίπτωση, αλλά και σε κάθε τομή ξεχωριστά. Με την επιλογή των δύο πιο ακραίων τιμών όλων των περιπτώσεων κάποια διαγράμματα είναι αρκετά παραπλανητικά. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν μέγιστες και ελάχιστες τιμές με τις οποίες όλα τα διαγράμματα είναι κατανοητά και συγκρίσιμα μεταξύ τους. Στα σημεία που τα διαγράμματα ξεπερνούν τις ακραίες τιμές που ορίστηκαν δημιουργούνται "τρύπες" για να μην προκύπτουν παρερμηνείες των τιμών.

## Τομή στην ρόδα

### Διαγράμματα πίεσης

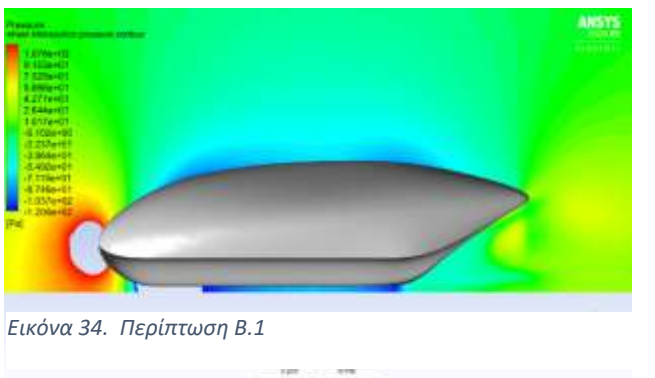
Όπως είναι αναμενόμενο η μεγαλύτερη πίεση εμφανίζεται κατά την πρόσκρουση του αέρα στην αρχή του οχήματος και για τις 3 περιπτώσεις, ενώ στις περιπτώσεις A.1 και B.1 γίνεται αντιληπτό ότι προσκρούοντας ο αέρας με την μπροστά επιφάνεια της κάθε ρόδας έχουμε σε εκείνο το σημείο μια τοπική αύξηση της πίεσης. Στην περίπτωση Γ.1 υπάρχει σημαντική διαφορά πίεσης του πατώματος και της οροφής του οχήματος όπως ήταν αναμενόμενο, αλλά και στις δύο πρώτες περιπτώσεις, παρά το γεγονός ότι παρεμβάλλονται στην ροή οι ρόδες, η πίεση εξακολουθεί να είναι μικρότερη για μεγάλο μέρος του μήκους του. Αυτή είναι μια θετική ένδειξη για την γεωμετρία επειδή όπως φαίνεται καταφέρνει ακόμα και στο σημείο που παρεμβάλλονται οι ρόδες να διατηρεί διαφορά πίεσης σε μεγάλο μέρος του πατώματος με αποτέλεσμα να αναρροφάτε το όχημα στον δρόμο. Η συγκεκριμένη περιοχή του πατώματος είναι που παράγει συνήθως και τα χειρότερα αποτελέσματα (σε σχέση με όλο το υπόλοιπο πάτωμα) αφού η ροή του



Εικόνα 33. Περίπτωση A.1



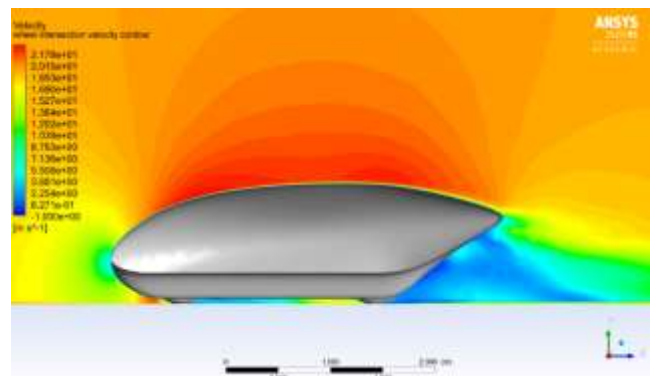
Εικόνα 34. Περίπτωση B.1



Εικόνα 35. Περίπτωση Γ1

## Διαγράμματα ταχύτητας

Βλέποντας κανείς τις τιμές υποπίεσης στο πάτωμα μετά την ρόδα θα περίμενε πως η ταχύτητα σε εκείνη την περιοχή θα ήταν υψηλή για τις περιπτώσεις Α και Β όπως συμβαίνει με την περίπτωση Γ. Αναφέρθηκε άλλωστε σε προηγούμενες παραγράφους ότι όταν η ροή περνάει από μία στένωση η πίεση της πέφτει ενώ η ταχύτητα αυξάνεται. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι στην περιοχή εκείνη δεν αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες. Αυτό σε συνδυασμό με την χαμηλή πίεση σημαίνει ότι λίγες ροϊκές γραμμές περνάνε στην περιοχή πίσω από την ρόδα. Η ροή του αέρα προσκρούοντας στην ρόδα αλλάζει κατεύθυνση ταξιδεύοντας γύρο από αυτήν, δημιουργείται έτσι ένα κενό στο πίσω μέρος της και αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει χαμηλή πίεση σε εκείνη την περιοχή. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα stream lines που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Στο πίσω μέρος του οχήματος φαίνεται η ροή του αέρα να έχει μικρότερη ταχύτητα στην περίπτωση Β σε σχέση με την περίπτωση Α, για μικρότερη όμως απόσταση. Επειδή η συγκεκριμένη τομή πέφτει επάνω στο περὺγιο της γεωμετρίας η μειωμένη ταχύτητα της ροής είναι κάτι το αναμενόμενο, λόγω του φαινομένου της οριακής ροής, και δεν μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα για την ταχύτητα του αέρα στην περιοχή από αυτήν μόνο την τομή.



Εικόνα 36. Περίπτωση Α.1



Εικόνα 37. Περίπτωση Β.1

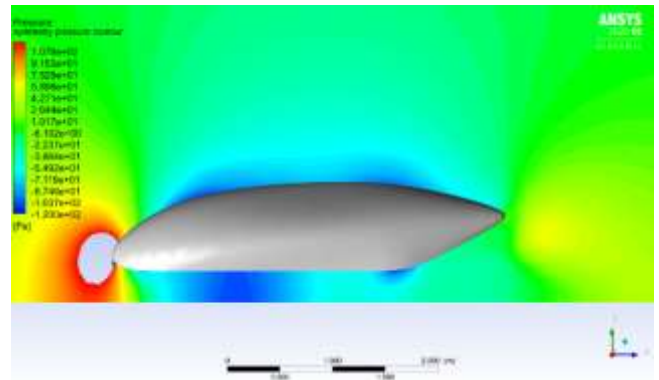


Εικόνα 38. Περίπτωση Γ.1

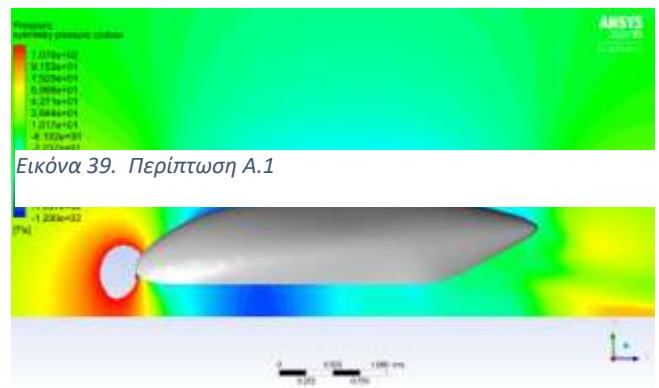
## Συμμετρία

### Διαγράμματα πίεσης

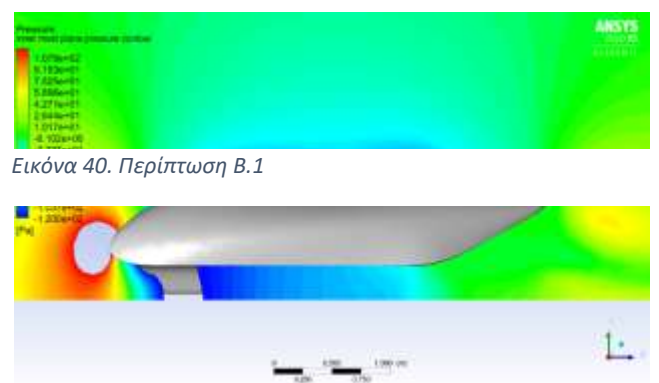
Στην τομή της συμμετρίας παρατηρείται ότι το πάτωμα εξακολουθεί, σε μεγάλο μέρος του, να έχει χαμηλότερη πίεση από ότι η οροφή του οχήματος. Η διαφορά είναι μικρότερη για τις δύο πρώτες περιπτώσεις αφού στα σημεία υποπίεσης στο πάτωμα δεν υπάρχουν "τρύπες" στο διάγραμμα οι οποίες θα σήμαιναν ότι έχει ξεπεραστεί η ελάχιστη τιμή, όπως συνέβη στα διαγράμματα της ρόδας. Στην περίπτωση A υπάρχει ένα σημείο, χαμηλής πίεσης, στο πίσω μέρος του οχήματος το οποίο δεν είναι τόσο έντονο στις άλλες δύο περιπτώσεις. Η πίεση εκεί είναι χαμηλή επειδή η ροή επιταχύνεται, χάρη στην καμπυλότητα και την κλίση της γεωμετρίας. Ο πιθανότερος λόγος που το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο στις περιπτώσεις B και Γ είναι επειδή τα πτερύγια που ξεκινούν από εκεί ακριβώς το σημείο αποτρέπουν την ροή που προσκολλάτε επάνω τους να επιταχυνθεί διατηρώντας και τα γειτονικά ροϊκά στρώματα σε χαμηλότερες ταχύτητες. Στην επιφάνεια της οροφής δεν παρατηρείται καμία σημαντική αλλαγή, σε σχέση με την τομή στην ρόδα, επειδή η επιφάνεια είναι σχεδόν σε όλο το πλάτος της ομοιόμορφη.



Εικόνα 39. Περίπτωση A.1



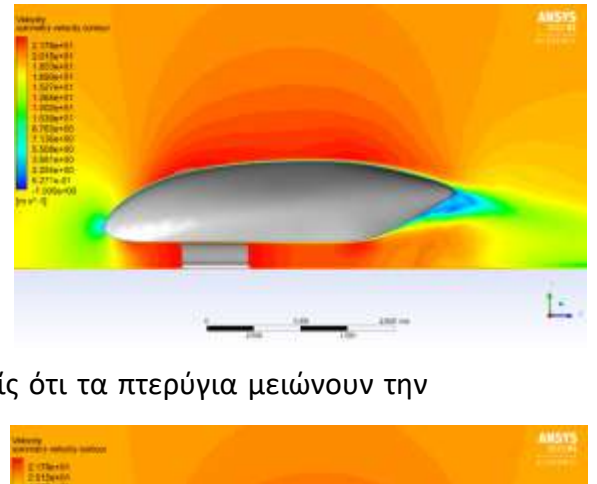
Εικόνα 40. Περίπτωση B.1



Εικόνα 41. Περίπτωση Γ.1

## Διαγράμματα ταχύτητας

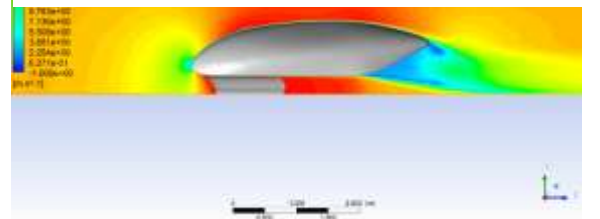
Όπως ήταν αναμενόμενο η ταχύτητα στην τομή της συμμετρίας γίνεται μέγιστη στο σημείο που η πίεση ήταν ελάχιστη. Από αυτήν την τομή, αλλά και την προηγούμενη, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι τα πτερύγια μειώνουν την ταχύτητα της ροής στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου και η διαφορά της ταχύτητας της κάτω μεριάς σε σχέση με την επάνω συνεπάγεται διαφορά πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης είναι πιθανόν να προκαλεί την δημιουργία δινών, γεγονός που αν επιβεβαιωθεί σημαίνει ότι τα συγκεκριμένα πτερύγια έχουν ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα από τον σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκαν. Στην περίπτωση A φαίνεται ότι η ταχύτητα είναι πιο ισορροπημένη στο κάτω και πάνω μέρος του αυτοκινήτου και ότι μειώνεται σε ένα πολύ μικρότερο πεδίο της τομής, όπου είναι και αναμενόμενο λόγω της γεωμετρίας.



Εικόνα 42 Περίπτωση A.1



Εικόνα 43. Περίπτωση B.1

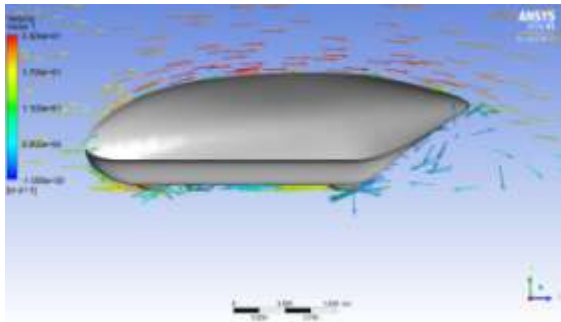


Εικόνα 44. Περίπτωση Γ.1

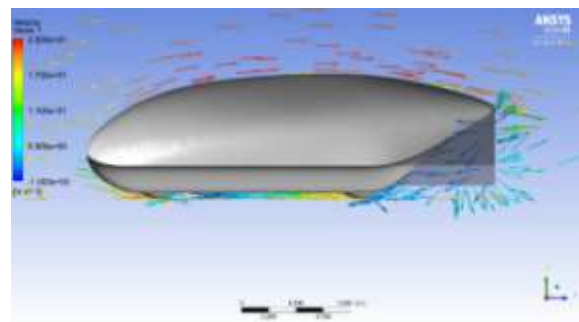


## Διανύσματα ταχύτητας

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να μελετηθούν τα διανύσματα της ταχύτητας, για να γίνει κατανοητή, εκτός από το μέτρο της ταχύτητας των μοριακών στρωμάτων και η κατεύθυνση τους. Στις περιπτώσεις A.1 και B.1, για την τομή της ρόδας, στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου κάποια από τα διανύσματα της ταχύτητας κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της ελεύθερης ροής. Αυτό συμβαίνει λόγω της αποκόλλησης του αέρα στο κάτω μέρος του οχήματος, που τείνει να δημιουργήσει ένα κενό το οποίο καλύπτουν τα μόρια του αέρα που κινούνται με μεγαλύτερη



ταχύτητα στην οροφή του. Το φαινόμενο



αυτό είναι γνωστό και ως ανακυκλοφορία και είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ενός ποσοστού της δίνης στο πίσω μέρος του οχήματος

Εικόνα 45. Διανύσματα ταχύτητας για τομή στην ρόδα (περίπτωση A.1).

Εικόνα 46. Διανύσματα ταχύτητας για τομή στην ρόδα (περίπτωση B.1).

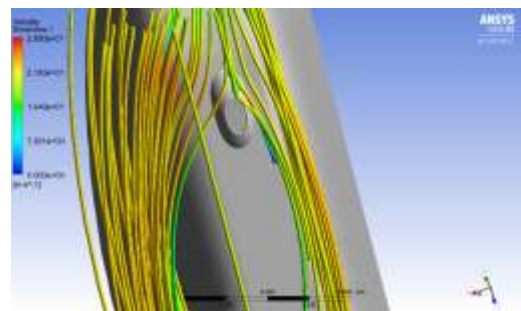
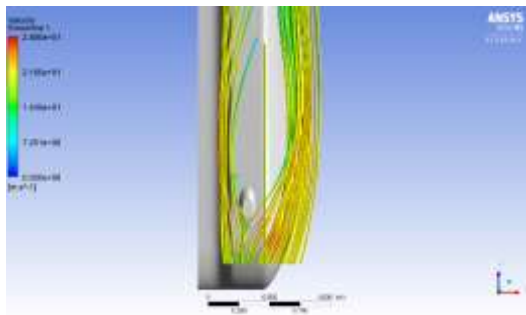
Όπως γίνεται αντιληπτό από τα διανύσματα για την περίπτωση B.1 στην συμμετρία, το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας εξακολουθεί να είναι έντονο, ενώ στην περίπτωση A.1 είναι αρκετά μικρότερο. Αυτό πιθανότατα σημαίνει ότι το συνολικό μέγεθος των δινών στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου είναι μεγαλύτερο για την περίπτωση B και θα εξετασθεί καλύτερα με την οπτικοποίηση των ροϊκών γραμμών που παρατίθενται στην συνέχεια.

Εικόνα 47. Διανύσματα ταχύτητας για τομή στην συμμετρία (A.1)

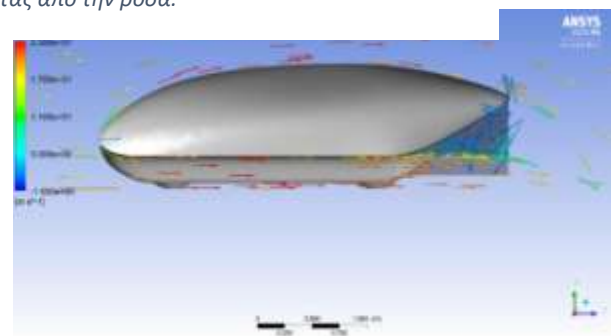
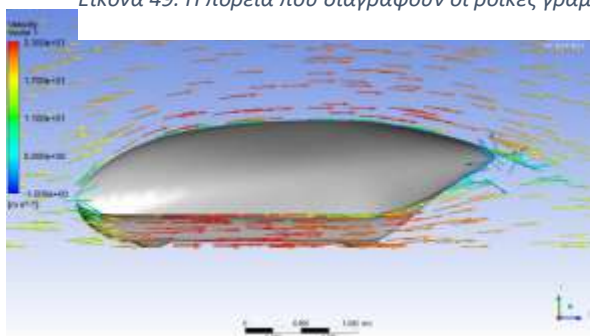
Εικόνα 48. Διανύσματα ταχύτητας για τομή στην συμμετρία (B.1)

## Ροϊκές γραμμές

Οι ροϊκές γραμμές (streamlines) που δημιουργήθηκαν σε μια επιφάνεια λίγο πιο μπροστά από την ρόδα επιβεβαιώνουν την υπόθεση που έγινε νωρίτερα. Από τις εικόνες γίνεται ξεκάθαρο ότι ο αέρας που προσκρούει στην περιστρεφόμενη ρόδα αλλάζει κατεύθυνση με αποτέλεσμα να διέρχεται από το πίσω μέρος της ρόδας μειωμένος αριθμός ροϊκών γραμμών.



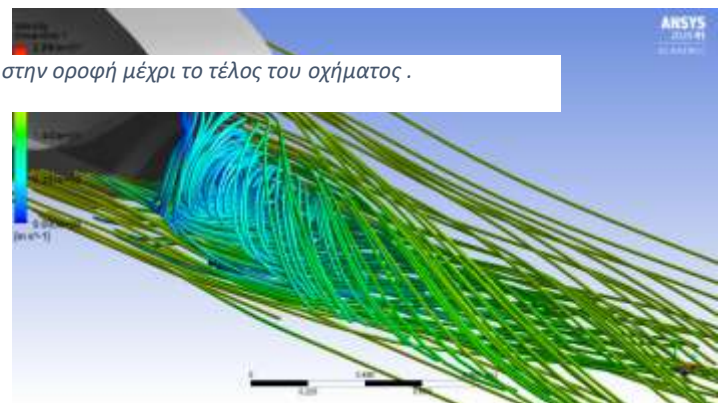
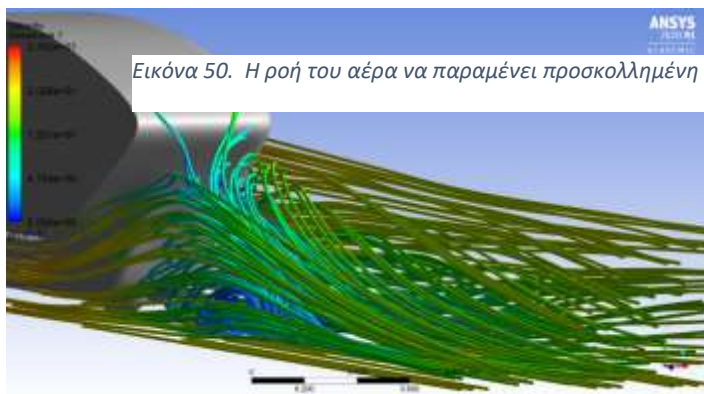
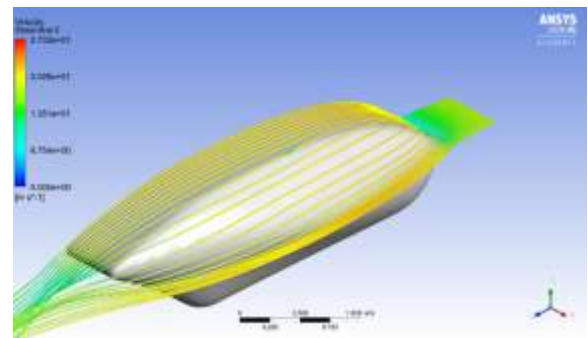
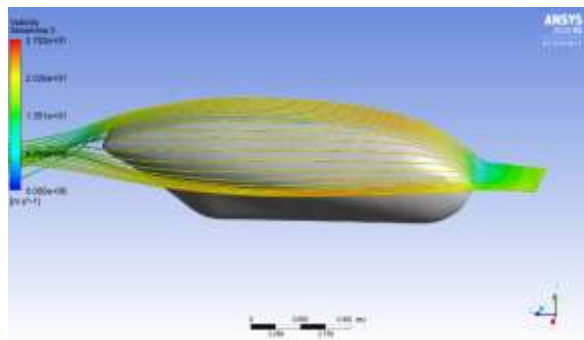
Εικόνα 49. Η πορεία που διαγράφουν οι ροϊκές γραμμές περνώντας από την ρόδα.



Αντίθ  
ετα  
με  
την  
περίπ

τωση της ρόδα οι ροϊκές γραμμές στην οροφή του αυτοκινήτου προσκολλώνται στην γεωμετρία και ταξιδεύουν κατά μήκος της χωρίς να γίνονται αντιληπτά φαινόμενα

αποκόλλησης. Αυτό είναι πολύ θετικό για την γεωμετρία αφού σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή εμφανιζόταν φαινόμενα αποκόλλησης, θα αυξανόταν δραματικά το μέγεθος των δινών πίσω από το όχημα και κατά συνέπεια και ο συντελεστής οπισθέλκουσας.



Εικόνα 50. Η ροή του αέρα να παραμένει προσκολλημένη στην οροφή μέχρι το τέλος του οχήματος .

Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί το μέγεθος της δίνης που δημιουργείται πίσω από το αμάξι, συγκρίνοντας τις περιπτώσεις A και B, μέσω της οπτικοποίηση των ροϊκών γραμμών στην περιοχή. Η οπτικοποίηση των ροϊκών γραμμών για τον προσδιορισμό του μεγέθους των δινών δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο και το συμπέρασμα ως προς ποια από τις δύο περιπτώσεις είναι η καλύτερη βγαίνει αθροιστικά λαμβάνοντας υπόψιν τον συντελεστή οπισθέλκουσας αλλά και τα διάφορα διαγράμματα που αναλύθηκαν νωρίτερα. Από τις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται να επαληθεύονται οι υποθέσεις που έγιναν νωρίτερα αφού ο στροβιλισμός της ροής στην περίπτωση B.1 είναι πιο έντονος και σε μεγαλύτερη έκταση από ότι στην περίπτωση A.1 (περισσότερες εικόνες στο παράρτημα).

Εικόνα 51. Περίπτωση A.1

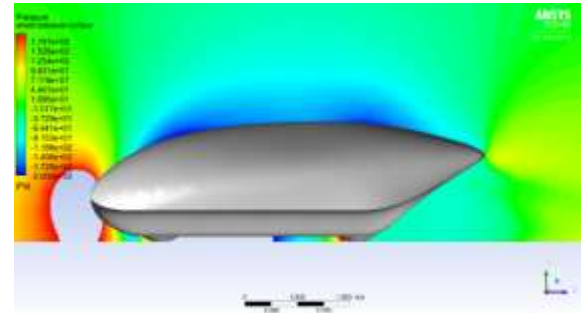
Εικόνα 52. Περίπτωση B.1

## Σύγκριση για διαφορετικές ταχύτητες εισόδου

Εικόνα 53. Περίπτωση Α.1

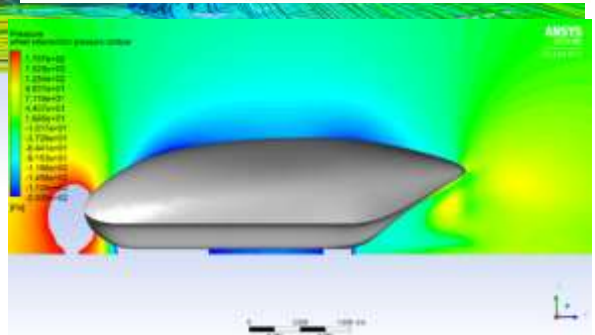
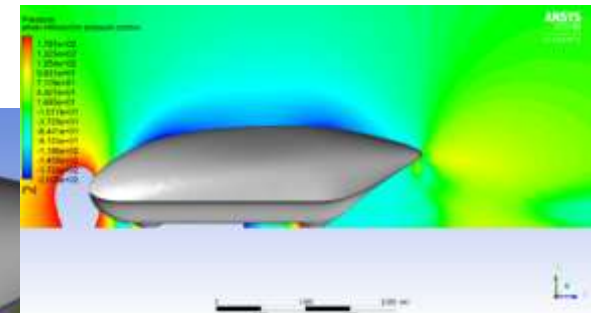
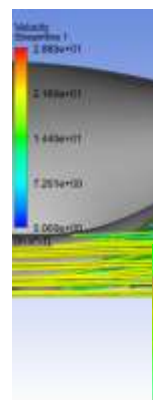
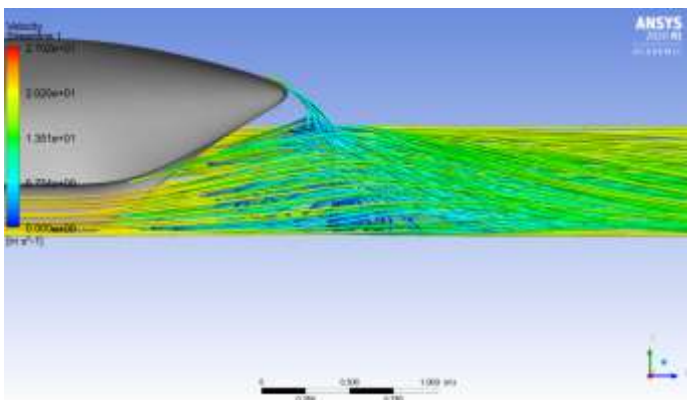
Εικόνα 54. Περίπτωση Β.1

Στο σημείο αυτό μελετήθηκαν τα διαγράμματα των τριών περιπτώσεων για ταχύτητα εισόδου 100χλμ/ώρα. Η σύγκριση των περιπτώσεων για τις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου γίνεται για να εντοπιστούν διαφορές, στην απόδοση της κάθε περίπτωσης με την αύξηση της ταχύτητας.



### Τομή στην ρόδα

### Διαγράμματα πίεσης

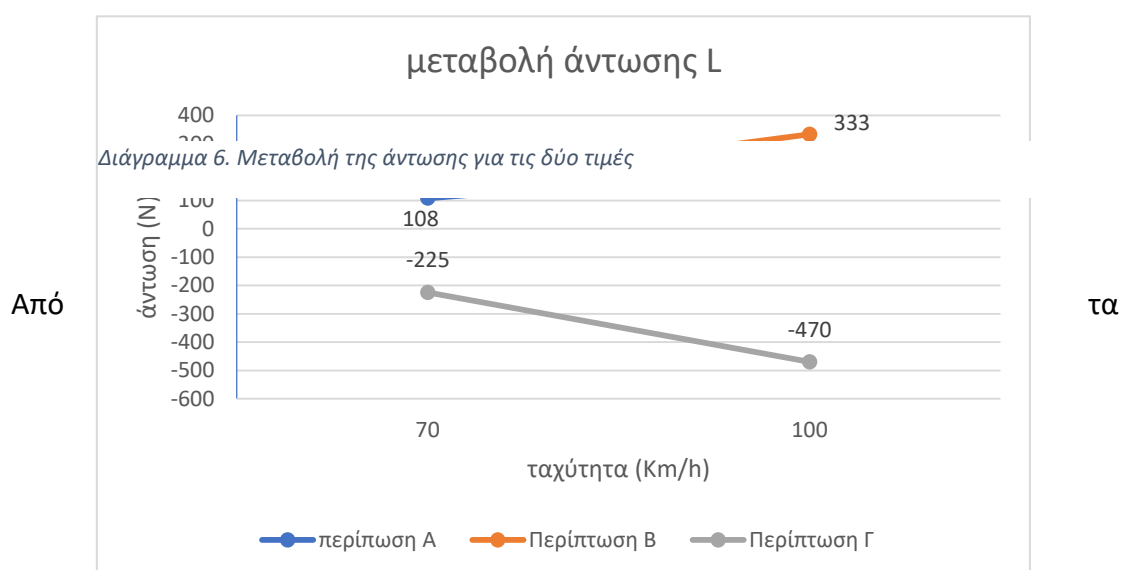
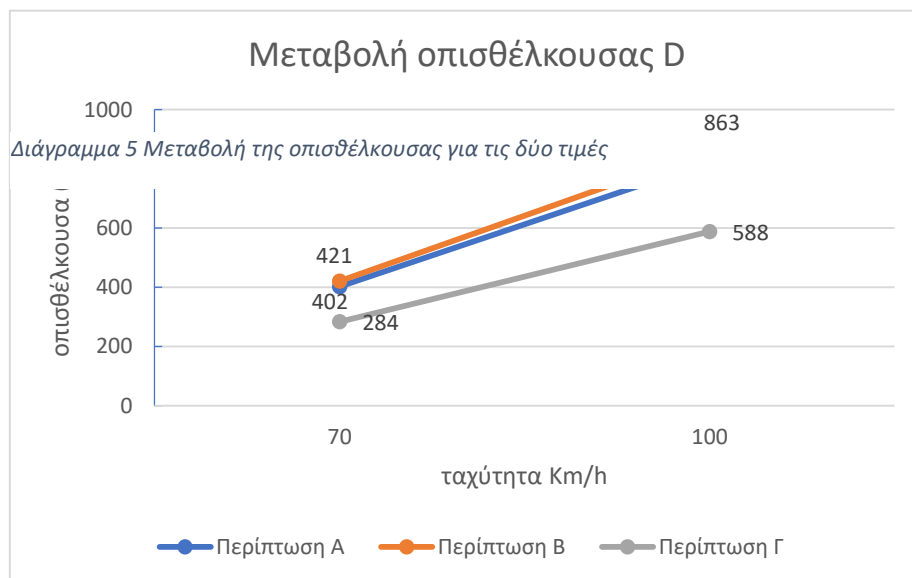


Πριν γίνει οποιαδήποτε σύγκρισή μεταξύ των δύο ταχυτήτων πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της μεγάλης αύξησης των ακραίων τιμών της πίεσης και της ταχύτητας, στα διαγράμματα των 100 χιλιομέτρων έχουν αλλάξει τα όρια των τιμών. Αυτό σημαίνει πως μια άμεση σύγκριση των διαγραμμάτων δεν είναι δυνατή

αφού το χρώματα για την ταχύτητα 100χλμ/ώρα δεν αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές με αυτές για τα 70χλμ/ώρα. Ο αναγνώστης θα πρέπει να παρατηρεί την κλίμακα τιμών του κάθε διαγράμματος και στην συνέχεια να βγάζει συμπεράσματα για τυχών διαφορές. Τα διαγράμματα των περιπτώσεων Α.1.1, Β.1.1, Γ.1.1 μας δείχνουν ότι η μέγιστη πίεση αλλά και η περιοχή υψηλής πίεσης στην αρχή του αυτοκινήτου έχει αυξηθεί πολύ. Η πίεση των 120 Pa που για την ταχύτητα 70 χλμ/ώρα είχε οριστεί ως ακραία τιμή παρατηρείται στα 100 χλμ/ώρα στην περιοχή με χρώμα ανοιχτό πορτοκαλί ενώ προηγούμενος ήταν η περιοχή πέρα από την οποία δημιουργούνταν η "τρύπα" στο διάγραμμα. Η αύξηση αυτή της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της οπισθέλκουσας και αυτό επιβεβαιώνεται υπολογίζοντας την οπισθέλκουσα λόγο πρόσκρουσης του αέρα με την μετωπική επιφάνεια, της κάθε περίπτωσης, για τις δύο ταχύτητες. Αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται και για την δύναμη άντωσης.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα εκτός από την αύξηση των μεγεθών δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στην συμπεριφορά των μοντέλων. Για το λόγο αυτό τα υπόλοιπα διαγράμματα των 100χλμ/ώρα δεν θα αναλυθούν, είναι όμως διαθέσιμα για μελέτη μαζί με τα υπόλοιπα διαγράμματα στο παράρτημα.

Στα διάγραμμα 5 και 6 προβάλλονται οι μεταβολές στις τιμές της οπισθέλκουσας και της άντωσης που παράγει η κάθε περίπτωση για τις δύο διαφορετικές ταχύτητες.



Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι η περίπτωση A έχει ελαφρώς μικρότερο ποσοστό οπισθέλκουσας και ταυτόχρονα λιγότερο ποσοστό άντωσης (για την τιμή των 70

km/h. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα ποσοστά οπισθέλκουσας και άντωσης των δύο περιπτώσεων δεν αυξάνονται με τον ίδιο ρυθμό κατά την μεταβολή της ταχύτητας. Όπως δείχνουν τα διαγράμματα στην περίπτωση με τα πτερύγια η οπισθέλκουσα αλλά και η άντωση αυξάνονται πιο απότομα. Από τα διαγράμματα συμπεραίνει κανείς εύκολα ότι και για τις δύο περιπτώσεις, όσο αυξάνεται η ταχύτητα τόσο πιο ασταθές θα γίνεται το όχημα (λόγο άντωσης), ενώ η μεγαλύτερη αντίσταση που πρέπει να υπερνικήσει θα έχει ως συνέπεια την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Ταυτόχρονα συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καταλαβαίνει κανείς ότι όσο μεγαλώνει η ταχύτητα τόσο πιο ασταθές θα είναι το όχημα της περίπτωσης Β και η διαφορά στην ενέργεια που θα καταναλώνουν θα αυξάνεται.

## 6. Συμπεράσματα- Προτάσεις για βελτίωση

Όπως έγινε αντιληπτό από τις προηγούμενες παραγράφους η αρχική περίπτωση του οχήματος χωρίς πτερύγια τυχάνει να είναι και η βέλτιστη (από τις δύο ρεαλιστικές). Οι τιμές των συντελεστών άντωσης και οπισθέλκουσας δείχνουν μια γεωμετρία η οποία έχει προσεγγίσει σωστά τις απαιτήσεις του διαγωνισμού. Υπάρχουν βέβαια πολλά περιθώρια βελτίωσης και στο τέλος των αναλύσεων ήταν πολλές οι ιδέες που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για να επιτευχθούν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου διαγωνισμού οι βελτιώσεις αυτές δεν θα ήταν εφικτό να εφαρμοστούν για την ίδια αγωνιστική περίοδο καθώς οι πιθανές βελτιώσεις θα καθυστερούσαν την κατασκευαστική περίοδο με κίνδυνο την μη συμμετοχή της ομάδας στο διαγωνισμό. Συνήθως τα λάθη, τα περιθώρια βελτίωσης και οι ιδέες που δεν προλαβαίνουν να μελετηθούν είναι που κάνουν την μεγαλύτερη διαφορά στην επόμενη αγωνιστική περίοδο και για αυτό το λόγο θα αναφερθούν μερικές από τις ιδέες που αποσκοπούν στην βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης και δεν μελετήθηκαν.

Όσον αφορά το ήδη υπάρχον όχημα οι δοκιμές θα πρέπει να επικεντρωθούν στην κλίση που έχει το πάτωμα στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου. Μια μικρότερη κλίση θα μείωνε το ποσοστό αποκόλλησης της ροής και ως συνέπεια και το ποσοστό των δινών που δημιουργεί. Είναι πολύ πιθανό τα πτερύγια να μην είχαν καλά αποτελέσματα λόγω της θέσης η του μεγέθους τους. Θα ήταν λοιπόν λογικό να γίνουν δοκιμές της γεωμετρίας με διάφορα μεγέθη πτερυγίων, σε πλήθος θέσεων ώστε να εξακριβωθεί αν υπάρχει περιθώριο βελτίωσης με την χρήση πτερυγίων η μια ριζική αλλαγή είναι απαραίτητη για την περαιτέρω βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης.

Στην περίπτωση μιας εξολοκλήρου νέας σχεδίασης ίσως θα ήταν σκόπιμο η γεωμετρία να οδηγεί όσο περισσότερο αέρα γίνεται μακριά από τις ρόδες, όπως στο όχημα της εικόνας 57. Η καμπύλη στην αρχή του οχήματος της παρούσας πτυχιακής οδηγεί μεγάλο μέρος του αέρα κάτω από το αμάξι χωρίς όμως να επικεντρώνεται στο να μην περνάει αυτός από τις ρόδες. Έχει παρατηρηθεί ότι πολλές ομάδες που σχεδιάζουν οχήματα τύπου καταμαράν (κενό στο κέντρο) δημιουργούν μια καμπύλη μπροστά από τις ρόδες η οποία οδηγεί τον αέρα είτε κεντρικά και κάτω από το όχημα είτε εξωτερικά του με αποτέλεσμα να μειώνεται η ροή του αέρα που προσκρούει στις ρόδες.



Εικόνα 57. Το όχημα του Πανεπιστημίου New South Wales (eVe).



## 7. Παράρτημα

Στο παράρτημα που ακολουθεί παρατίθενται οι πίνακες των ακραίων τιμών της πίεσης και της ταχύτητας για την κάθε τομή καθώς και τα διαγράμματα των τομών που παραλήφθηκαν.

### Πίνακες ακραίων τιμών

70 χλμ/ώρα

Περίπτωση Α.1

Τομές						
Ρόδα	πίεση	min	-148.51	max	215.189	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	22.9623	m/s
συμμετρία	πίεση	min	-108.887	max	220.923	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.6157	m/s
εσωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-130.111	max	231.095	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	24.0228	m/s
εξωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-193.411	max	98.7098	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	25.95566	m/s
τέρμα έξω τομή	πίεση	min	-126.497	max	49.7512	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.6553	m/s
τέρμα μέσα τομή	πίεση	min	-112.082	max	223.195	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.8216	m/s

Περίπτωση Β.1

Τομές						
Ρόδα	πίεση	min	-147.254	max	212.527	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	22.9923	m/s
συμμετρία	πίεση	min	-108.179	max	227.105	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.6332	m/s
εσωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-129.467	max	227.839	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	24.1157	m/s
εξωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-195.666	max	96.5252	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	26.0888	m/s
τέρμα έξω τομή	πίεση	min	-123.913	max	49.4093	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.8626	m/s
κεντρικά στο πάτωμα	πίεση	min	-112.319	max	223.669	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.8453	m/s

Περίπτωση Γ.1

Τομές						
Ρόδα	πίεση	min	-258.537	max	217.955	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	28.1105	m/s
συμμετρία	πίεση	min	-149.199	max	223.173	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	24.3706	m/s
εσωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-159.501	max	226.2	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	25.3627	m/s
εξωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-228.805	max	97.278	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	27.1675	m/s
τέρμα έξω τομή	πίεση	min	-96.0856	max	46.2809	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	23.222	m/s
κεντρικά στο πάτωμα	πίεση	min	-163.761	max	227.294	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	24.8135	m/s

Παρατηρώντας τις ακραίες τιμές για κάθε περίπτωση για ταχύτητα εισόδου 70 χλμ./ώρα, επιλέχθηκαν οι εξής ακραίες τιμές.

Πίεση : min = -120 Pa , max = 120 Pa

Ταχύτητα : min = -1 m/s , max = 23 m/s

## 100 χλμ/ώρα

Περίπτωση Α.1.1

Τομές						
Ρόδα	πίεση	min	-302.754	max	439.11	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	32.8054	m/s
συμμετρία	πίεση	min	-224.698	max	450.795	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	33.7573	m/s
εσωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-265.616	max	471.587	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	34.1842	m/s
εξωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-394.861	max	201.396	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	37.1052	m/s
τέρμα έξω τομή	πίεση	min	-261.036	max	101.5	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	33.781	m/s
κεντρικά στο πάτωμα	πίεση	min	-229.298	max	455.462	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	34.0419	m/s

Περίπτωση Β.1.1

Τομές						
Ρόδα	πίεση	min	-301.554	max	433695	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	32.8816	m/s
συμμετρία	πίεση	min	-220	max	463.44	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	33.7625	m/s
εσωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-263.886	max	464.9	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	34.4524	m/s
εξωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-401.549	max	196.84	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	37.349	m/s
τέρμα έξω τομή	πίεση	min	-254.446	max	100.639	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	33.9906	m/s
κεντρικά στο πάτωμα	πίεση	min	-229.368	max	456.498	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	34.0588	m/s

Περίπτωση Γ.1.1

Τομές						
Ρόδα	πίεση	min	-531.361	max	444.714	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	40.269	m/s
συμμετρία	πίεση	min	-307.868	max	455.373	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	34.9114	m/s
εσωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-328.684	max	461.505	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	36.2925	m/s
εξωτερικά της ρόδας	πίεση	min	-468.313	max	198.349	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	38.873	m/s
τέρμα έξω τομή	πίεση	min	-196.575	max	94.2426	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	33.1814	m/s
κεντρικά στο πάτωμα	πίεση	min	-338.031	max	463.757	Pa
	ταχύτητα	min	0	max	35.5569	m/s

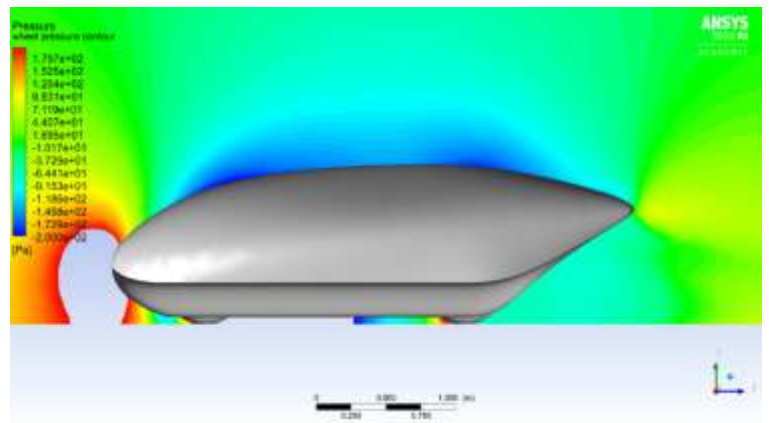
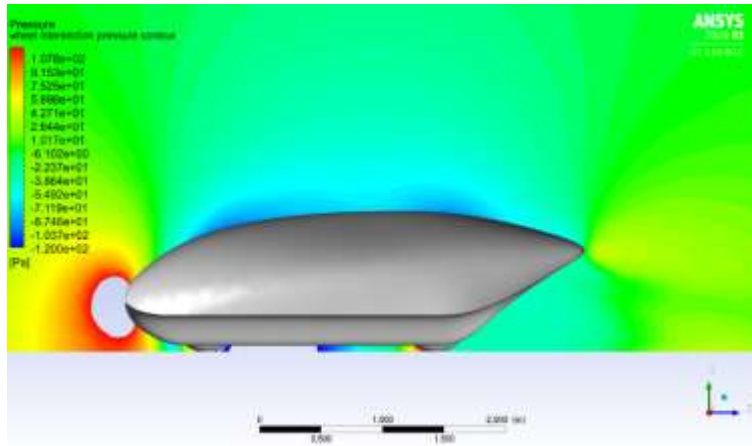
Στην περίπτωση των 100 χλμ οι ακραίες τιμές, έπειτα από δοκιμές, τέθηκαν ως εξής.

Πίεση : min = -200 Pa , max = 200 Pa

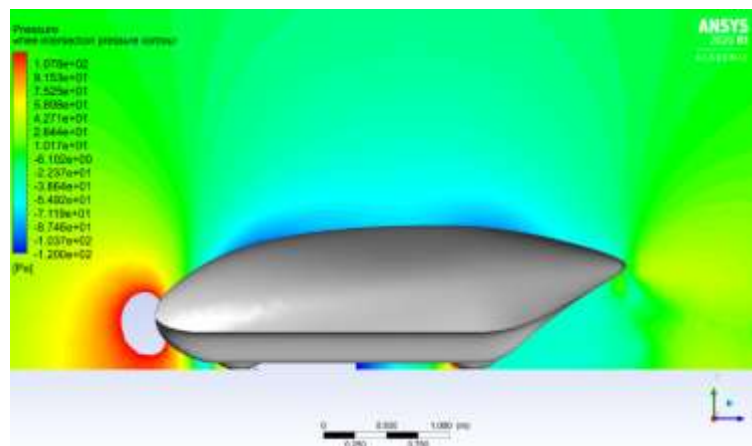
Ταχύτητα : min = -1 m/s , max = 32 m/s

## Διαγράμματα Πίεσης

Τομή στην ρόδα



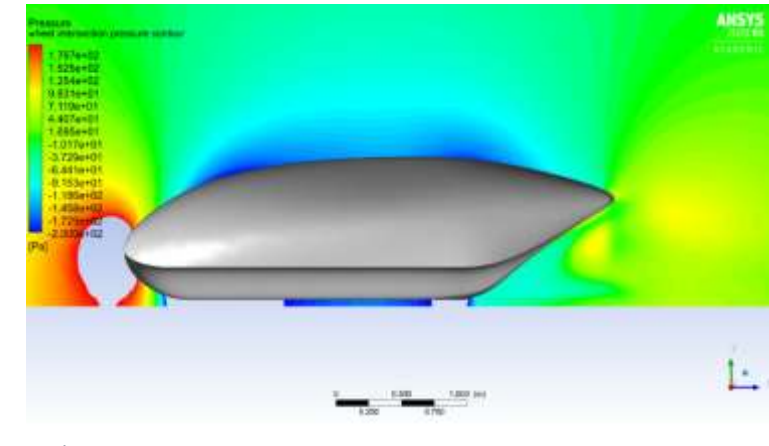
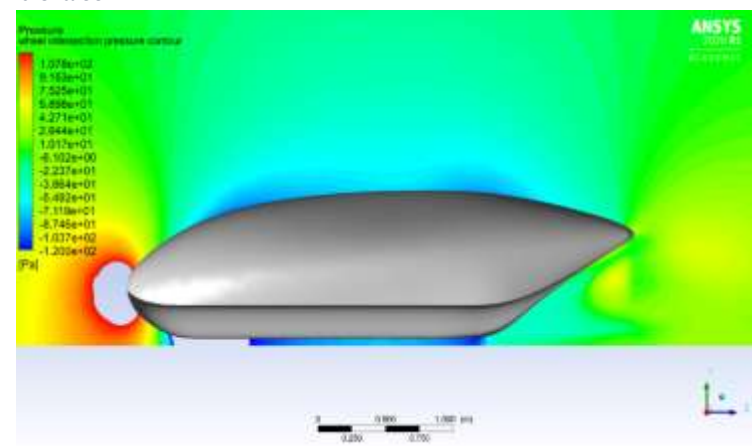
Εικόνα 59. A.1.1



Εικόνα 60. B.1



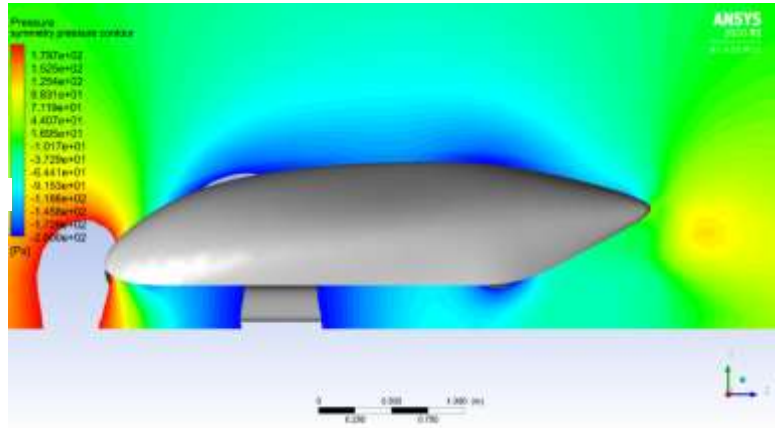
Εικόνα 61. B.1.1



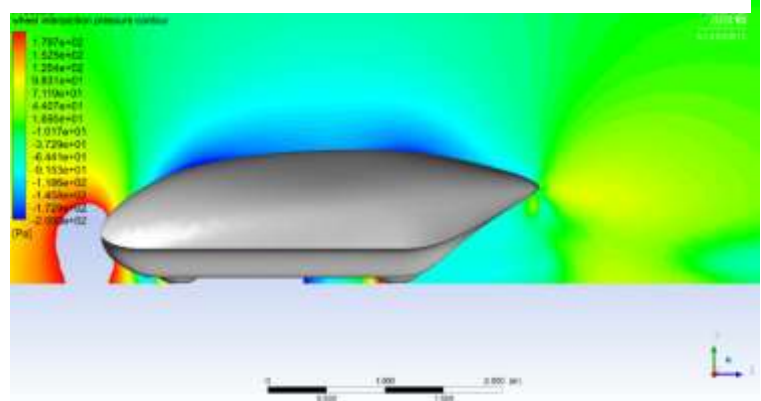
Εικόνα 63. Γ.1.1

Τομή στην συμμετρία

Εικόνα 58. Α.1



Εικόνα 64. Α.1.1

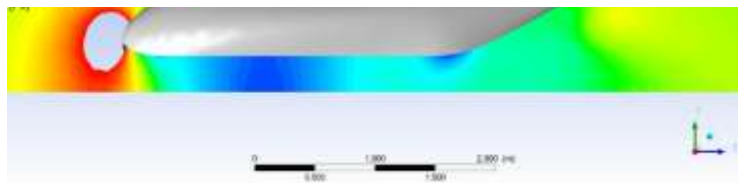


Εικόνα 62. Γ.1

Τέρμα έξω τομή (πράσινη)



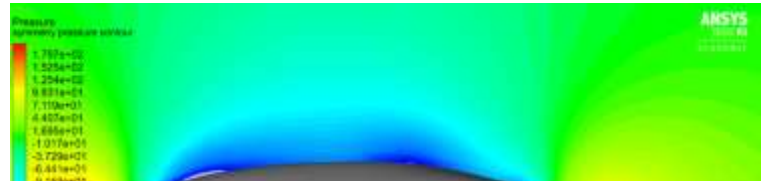
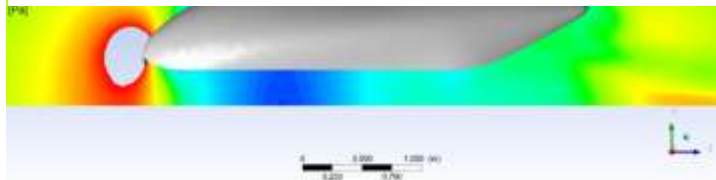
Εικόνα 64. A.1



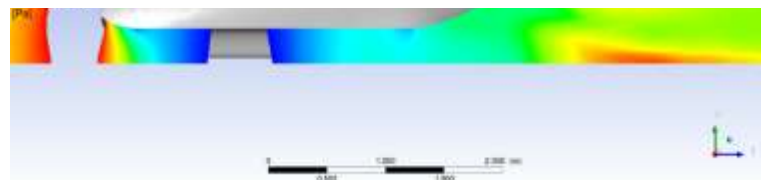
Εικόνα 69. A.1



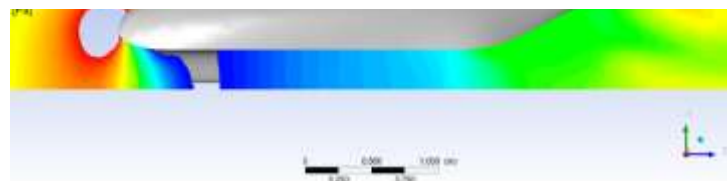
Εικόνα 65. B.1



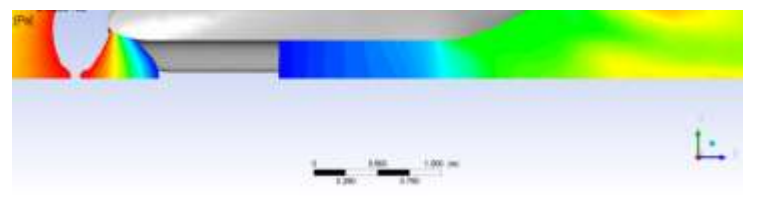
Εικόνα 66. B.1.1

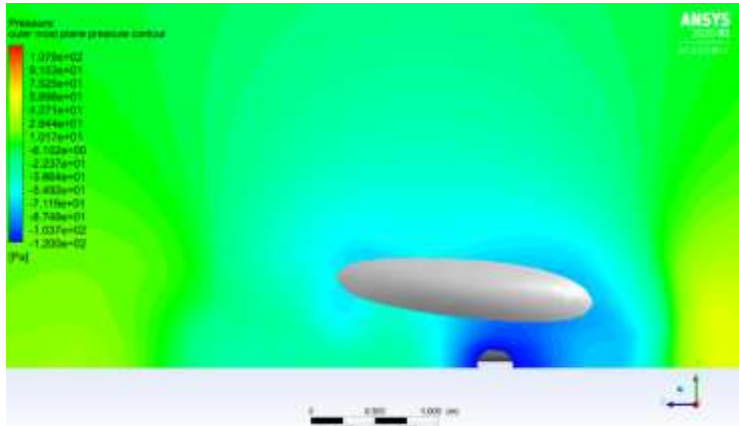


Εικόνα 67. Γ.1

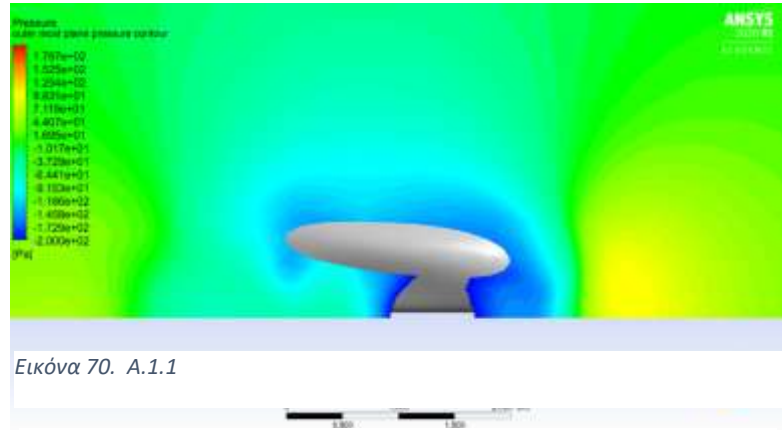


Εικόνα 68. Γ.1.1



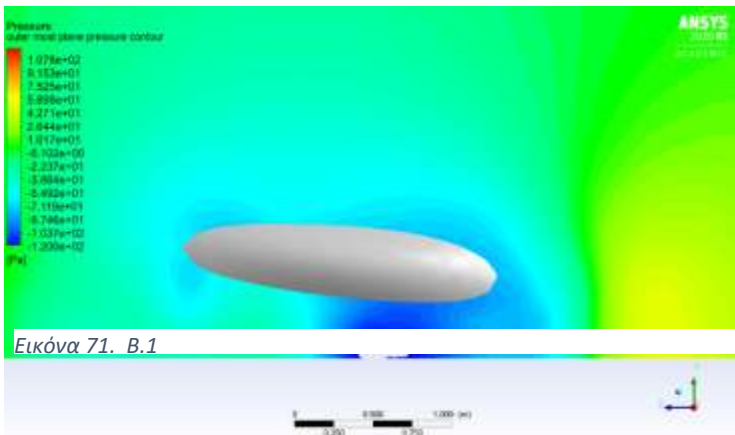


Εικόνα 73. Γ.1

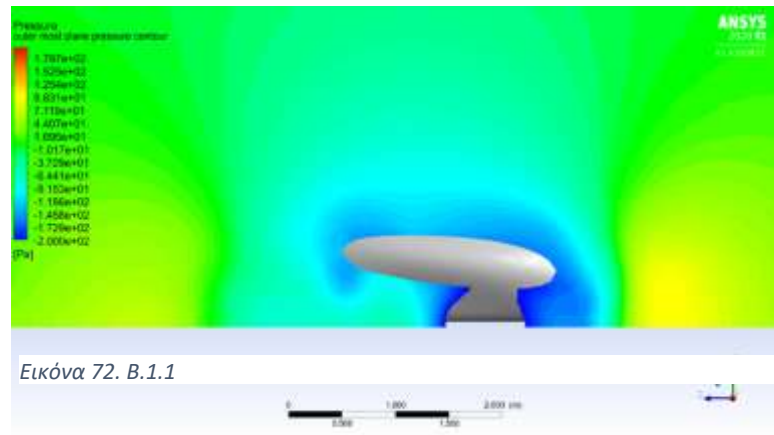


Εικόνα 70. Α.1.1

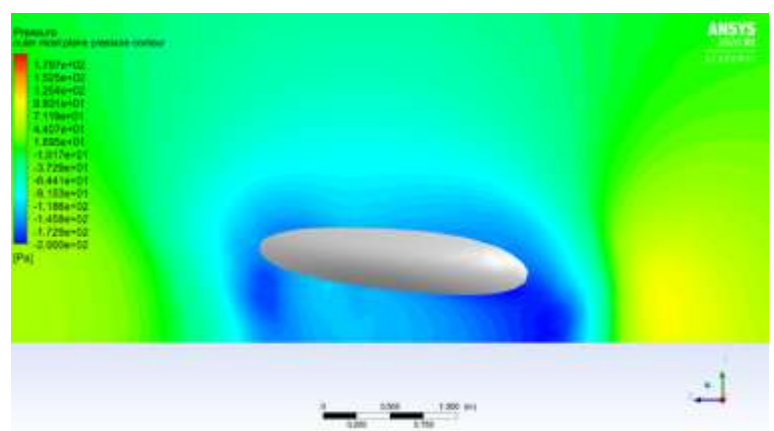
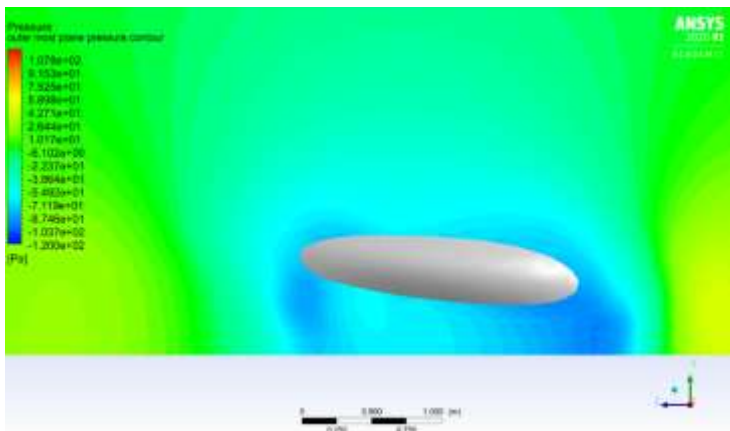
Εικόνα 74. Γ.1.1



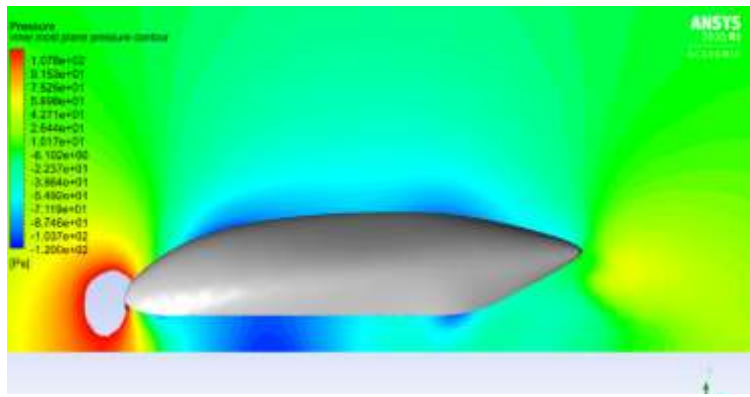
Εικόνα 71. Β.1



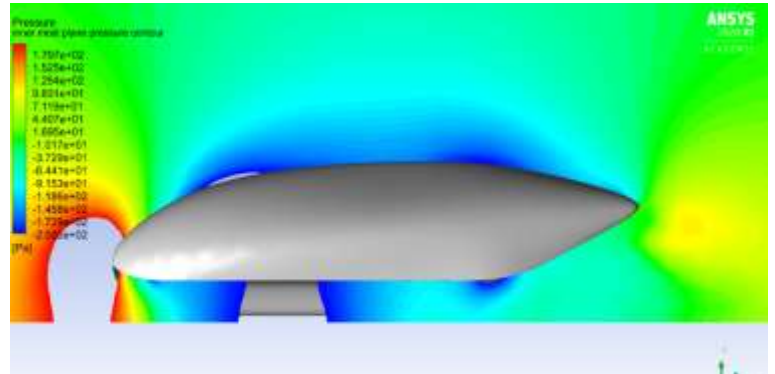
Εικόνα 72. Β.1.1



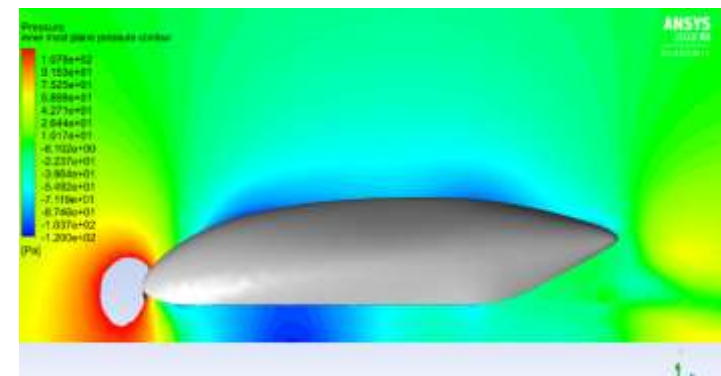
Τέρμα μέσα τομή (μωβ)



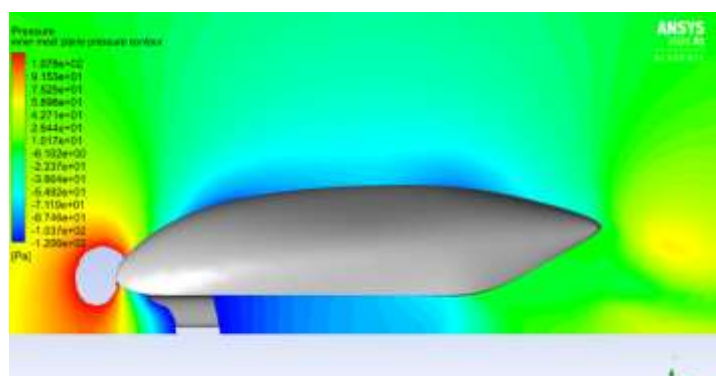
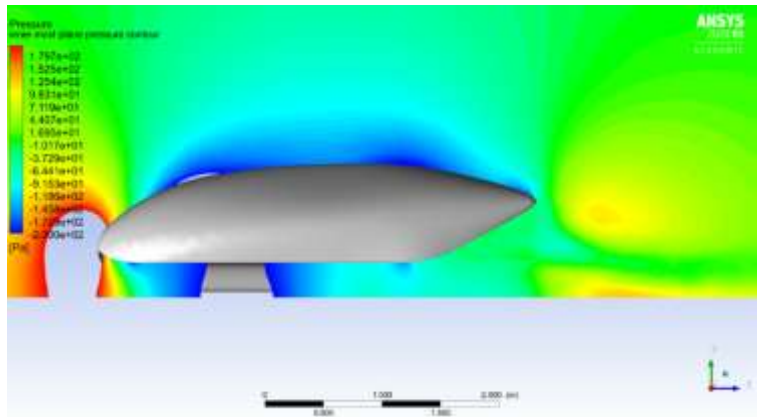
Εικόνα 73Α.1



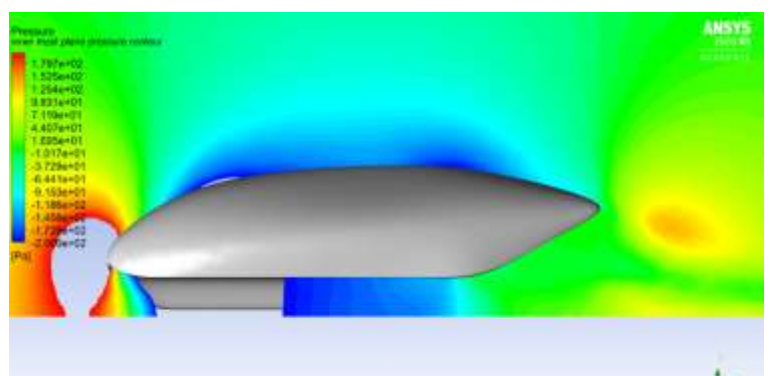
Εικόνα 74. Α.1.1



Εικόνα 75. Β.1

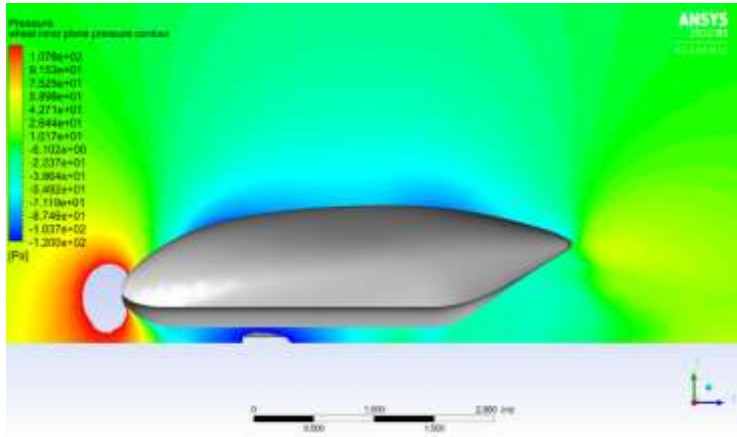


Εικόνα 77. Γ.1

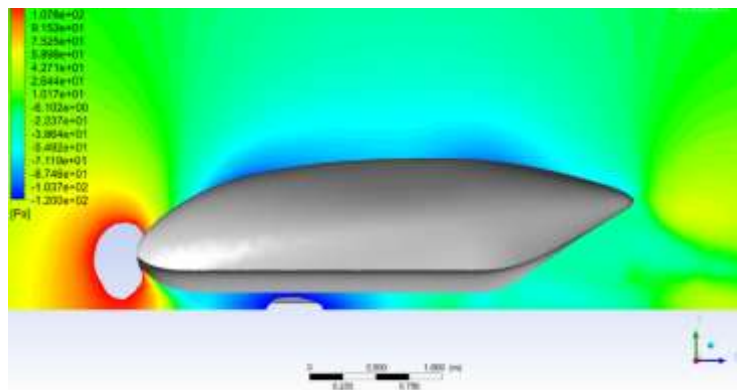


Εικόνα 78. Γ.1.1

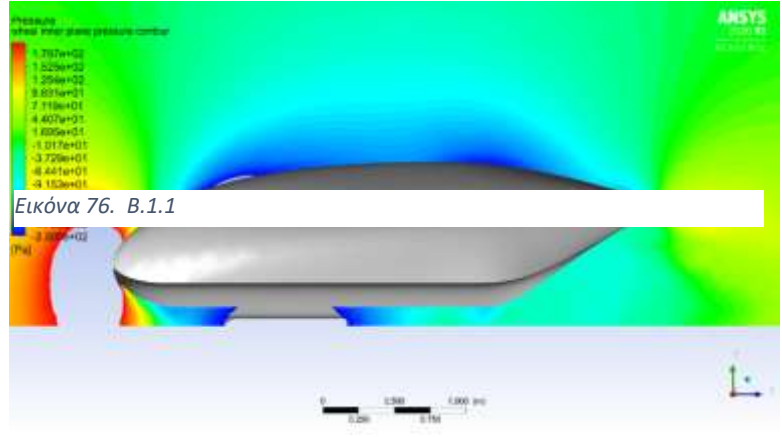
Τομή εσωτερικά της ρόδας (κίτρινη)



Εικόνα 79. A.1

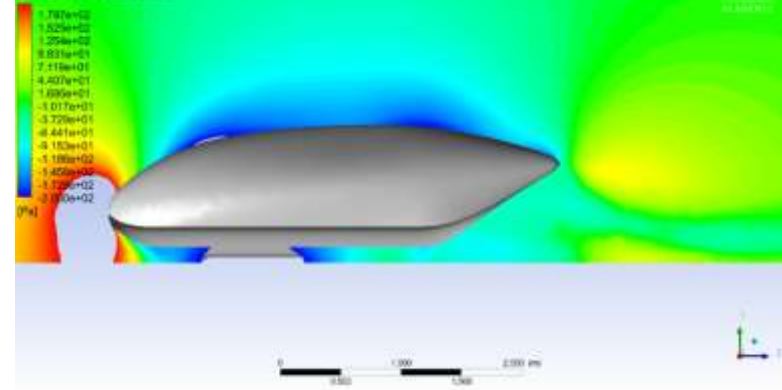


Εικόνα 81. B.1



Εικόνα 76. B.1.1

Εικόνα 80. A.1.1



Εικόνα 82. B.1.1

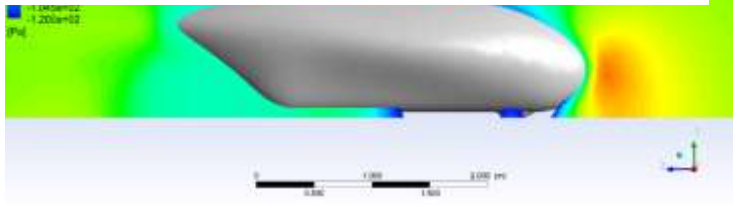


Τομή εξωτερικά της ρόδας (κόκκινη)

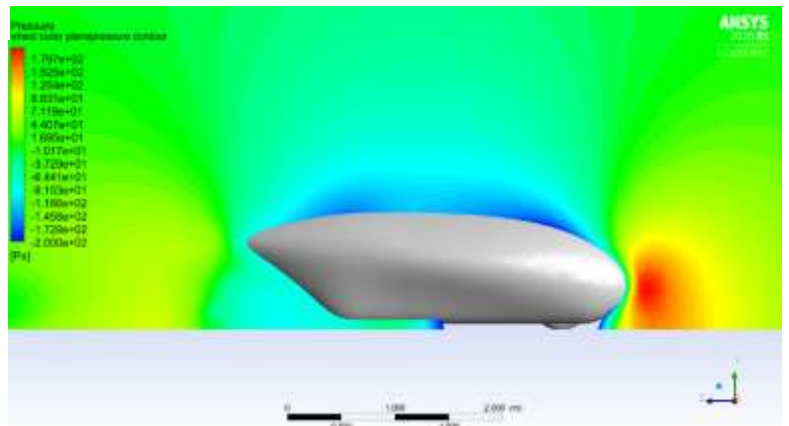


Εικόνα 83. Γ.1

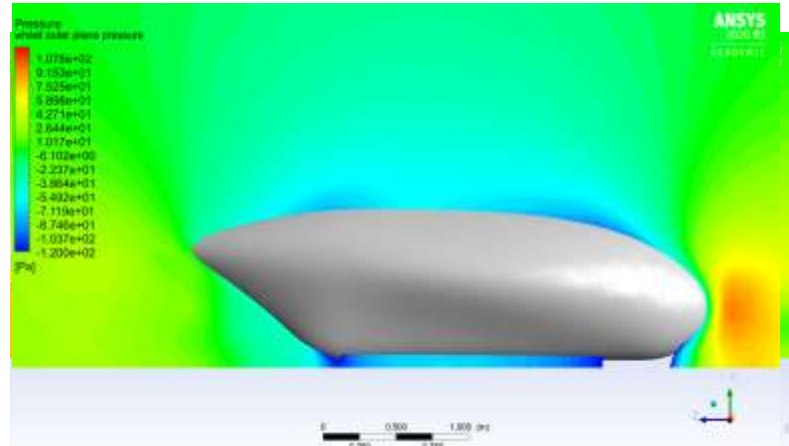
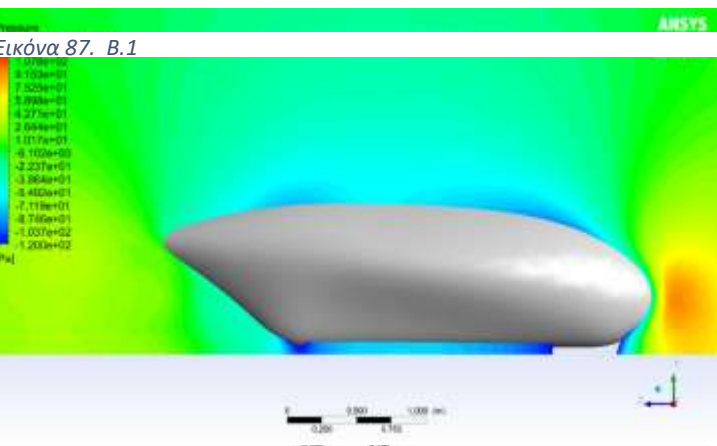
Εικόνα 84. Γ.1.1



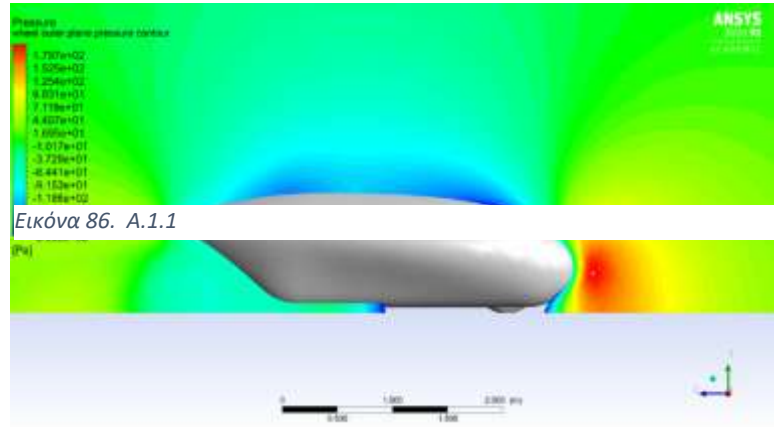
Εικόνα 85. Α.1



Εικόνα 87. Β.1



## Διαγράμματα ταχύτητας



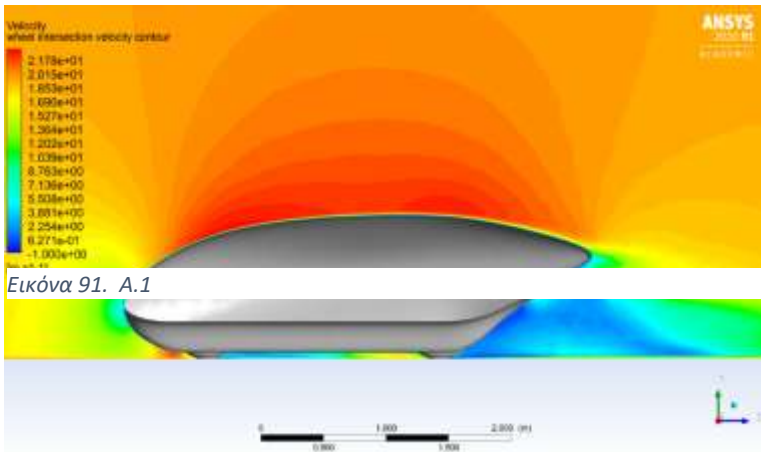
Εικόνα 88. B.1.1

Εικόνα 89. Γ.1

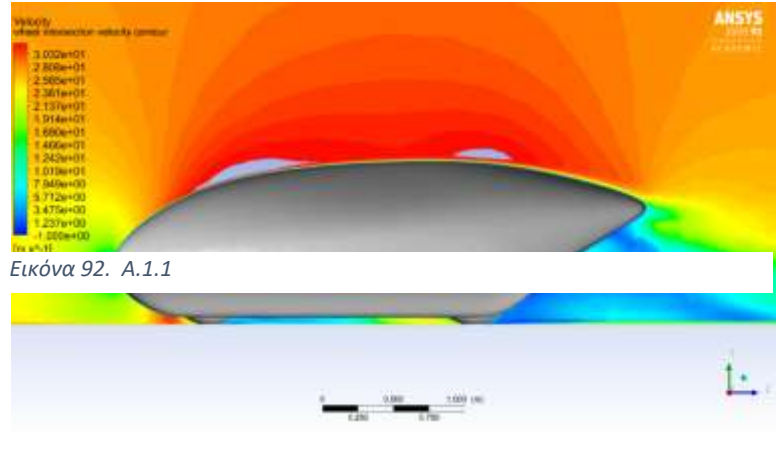
Εικόνα 90. Γ.1.1

Τομή στην ρόδα

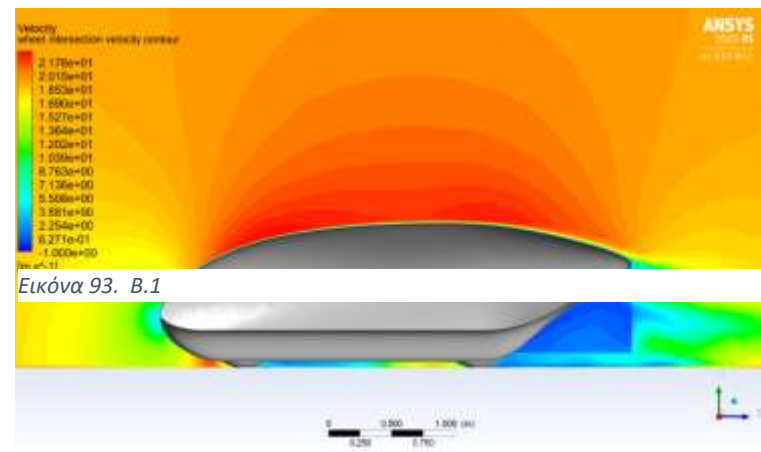
Τομή στην συμμετρία



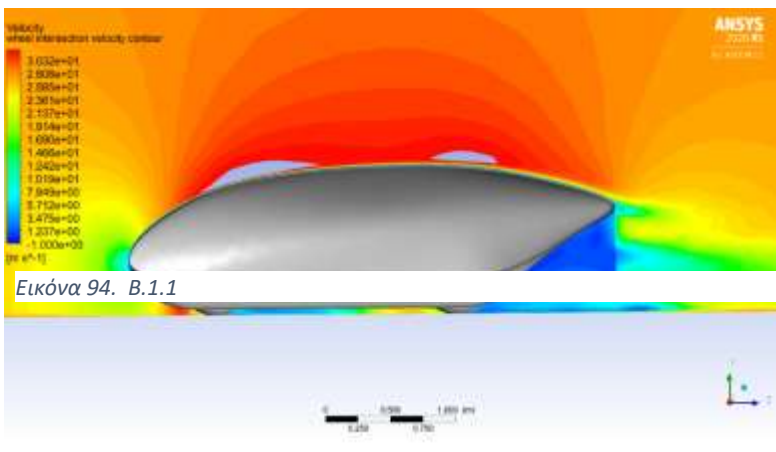
Εικόνα 91. A.1



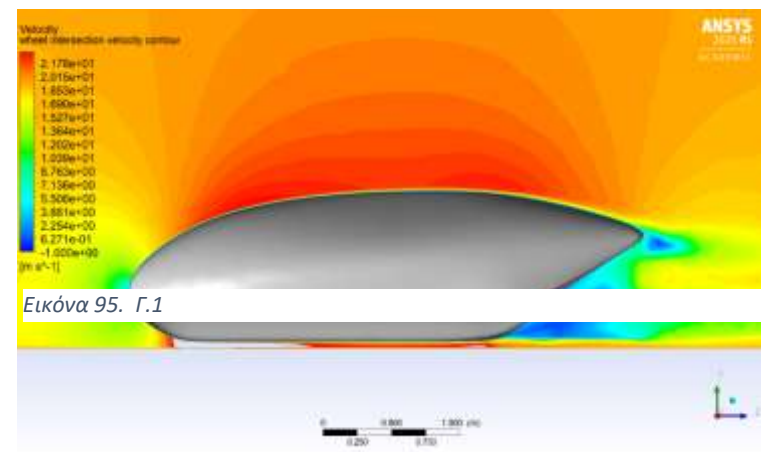
Εικόνα 92. A.1.1



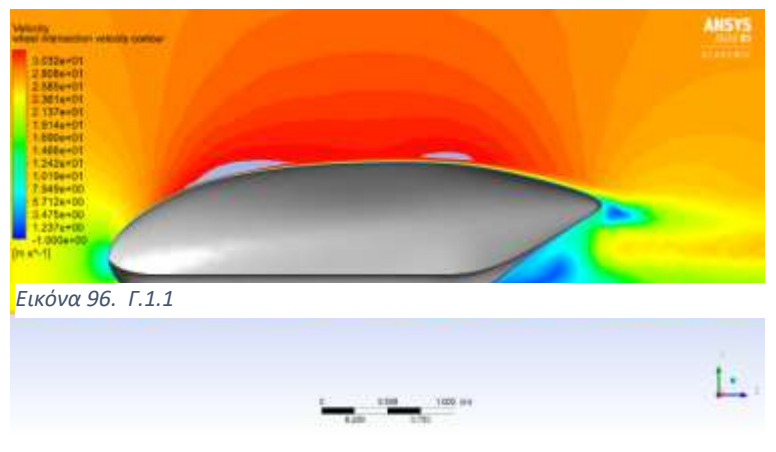
Εικόνα 93. B.1



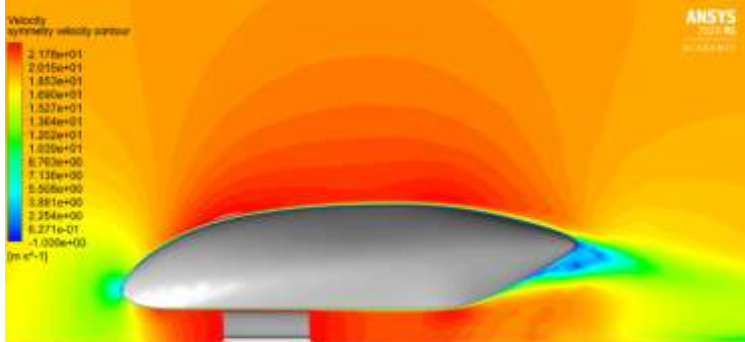
Εικόνα 94. B.1.1



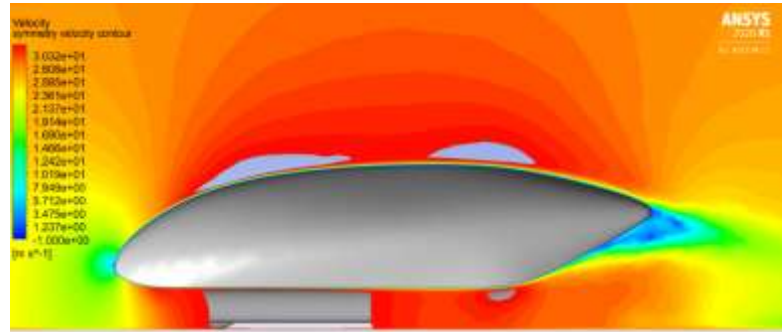
Εικόνα 95. Γ.1



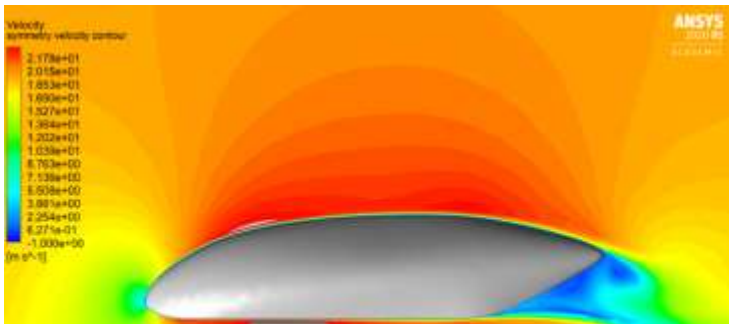
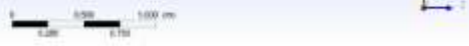
Εικόνα 96. Γ.1.1



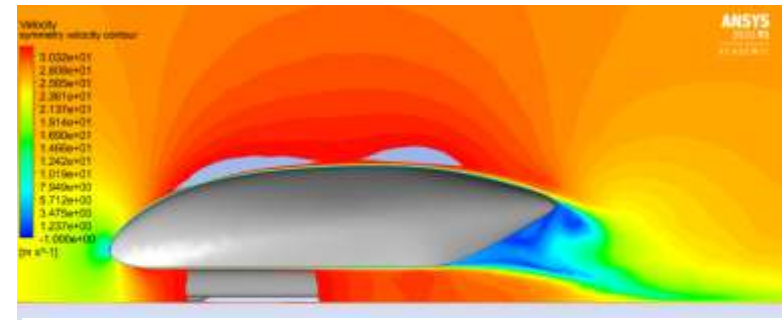
Εικόνα 97. A.1



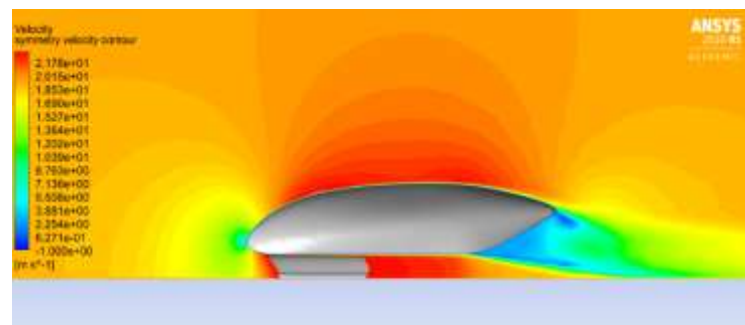
Εικόνα 98. A.1.1



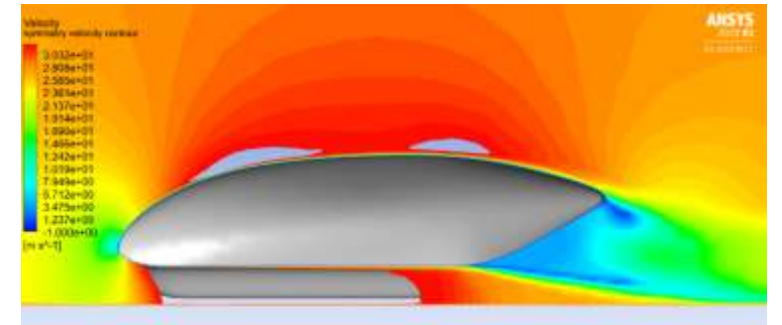
Εικόνα 99. B.1



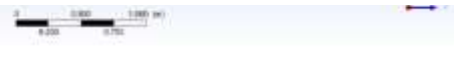
Εικόνα 100. B.1.1



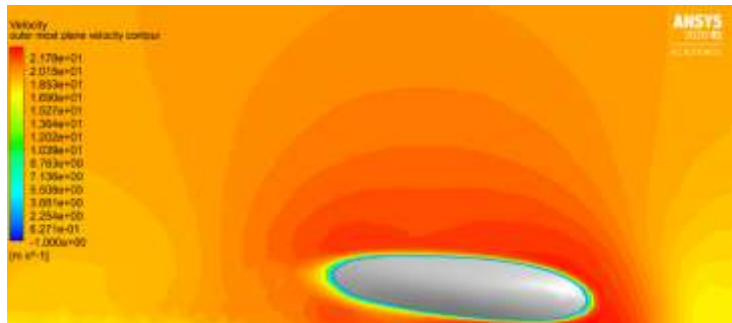
Εικόνα 101. Γ.1



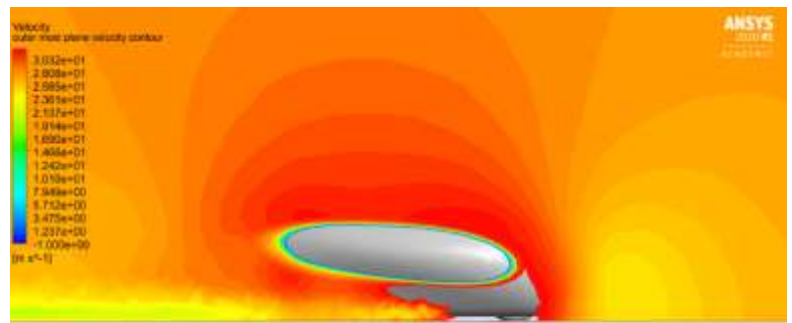
Εικόνα 102. Γ.1.1



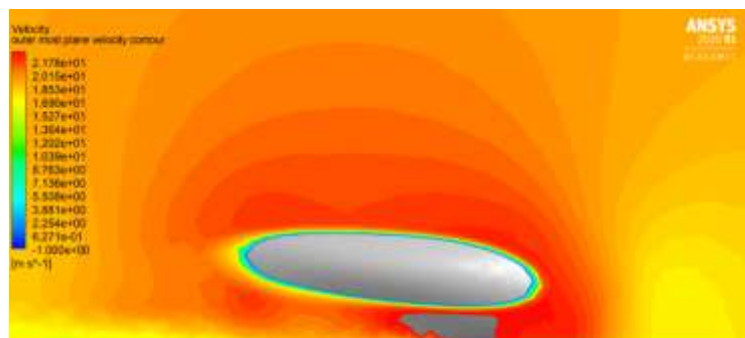
Τέρμα έξω τομή (πράσινη)



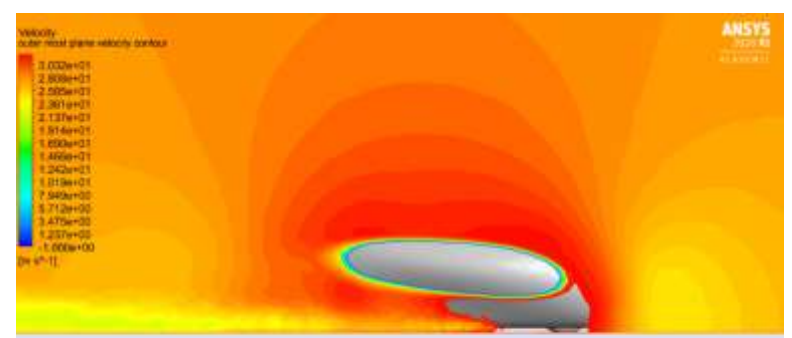
Εικόνα 103. Α.1



Εικόνα 104. Α.1.1



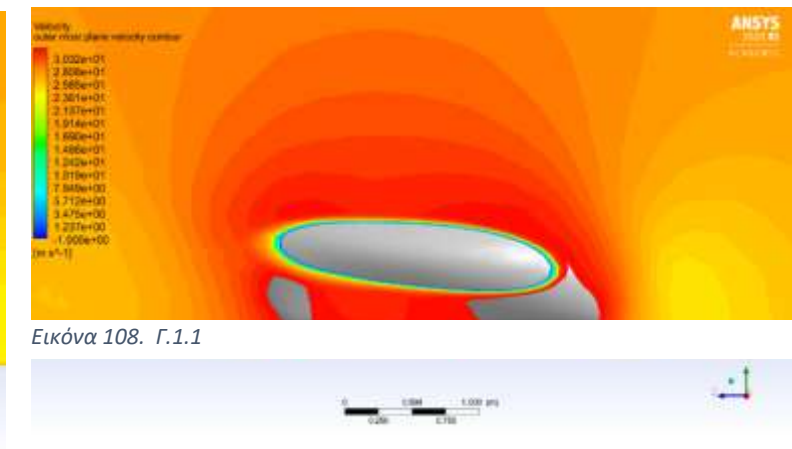
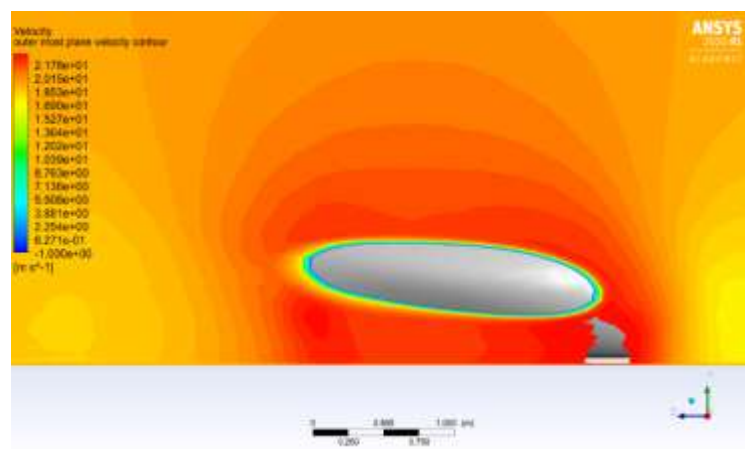
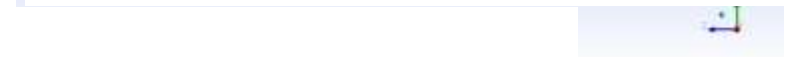
Εικόνα 105. Β.1



Εικόνα 106. Β.1.1



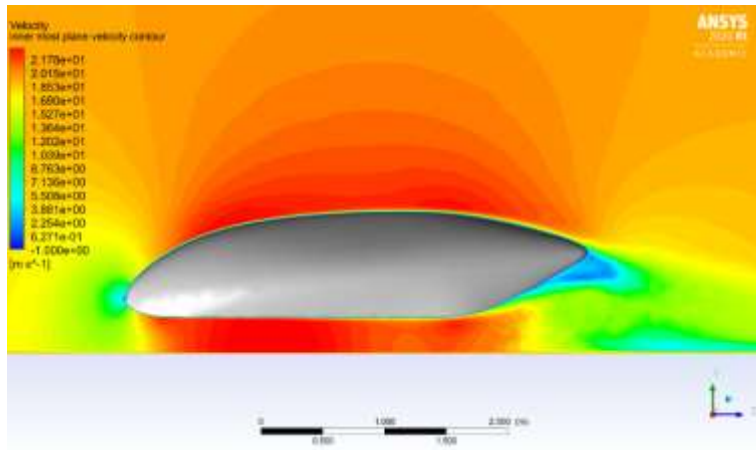
Εικόνα 107. Γ.1



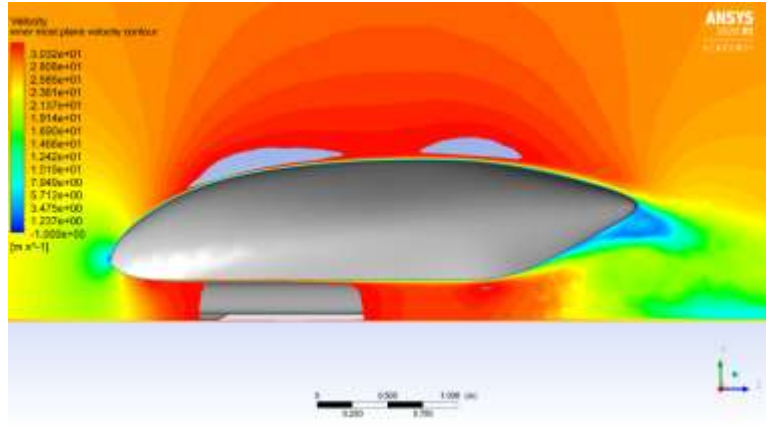
Εικόνα 108. Γ.1.1



Τέρμα μέσα τομή (μωβ)



Εικόνα 109. A.1



Εικόνα 110A.1.1

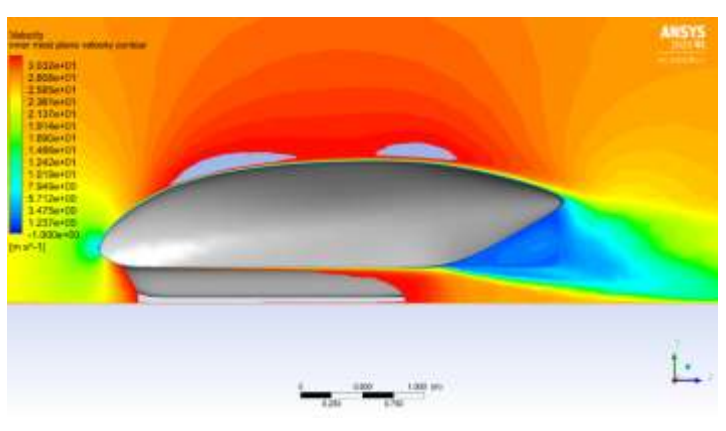
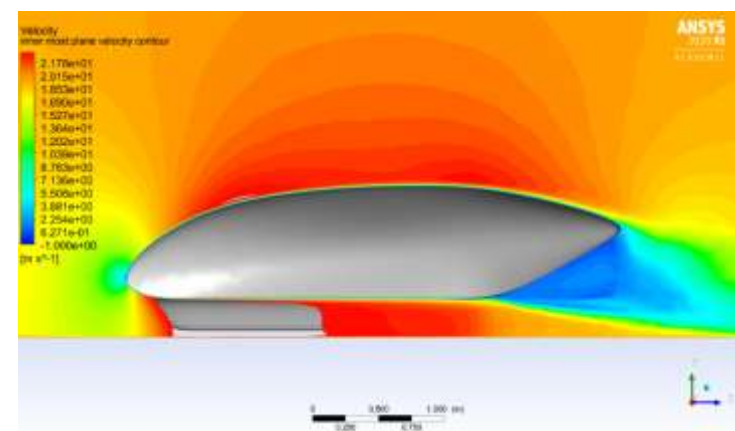
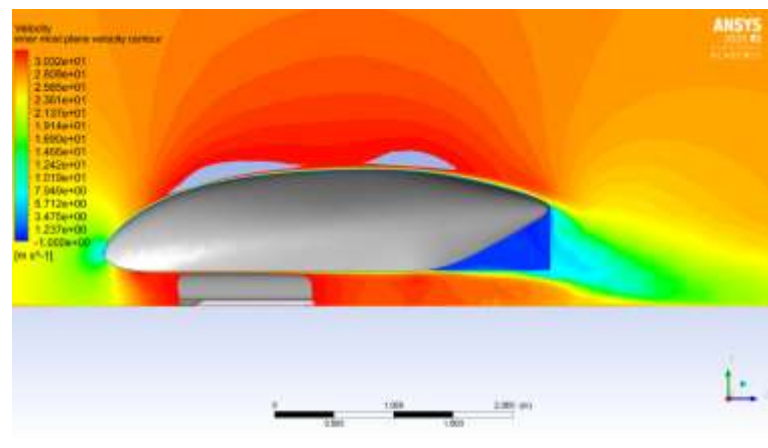
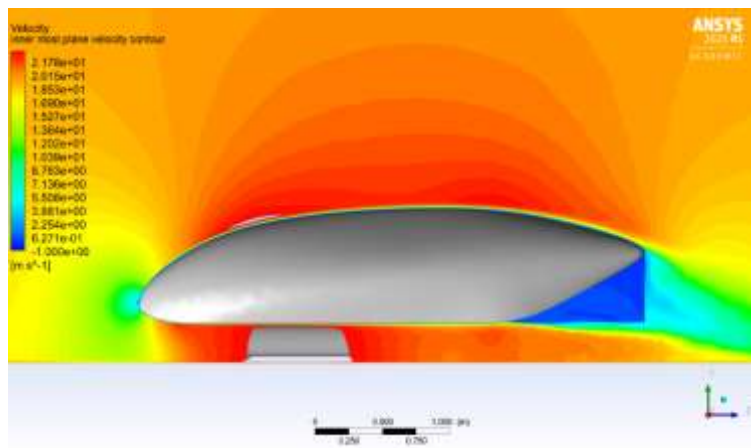
Εικόνα 111. B.1

Εικόνα 112B.1.1

Τομή εσωτερικά της ρόδας (κίτρινη)

Εικόνα 113Γ.1

Εικόνα 114. Γ.1.1

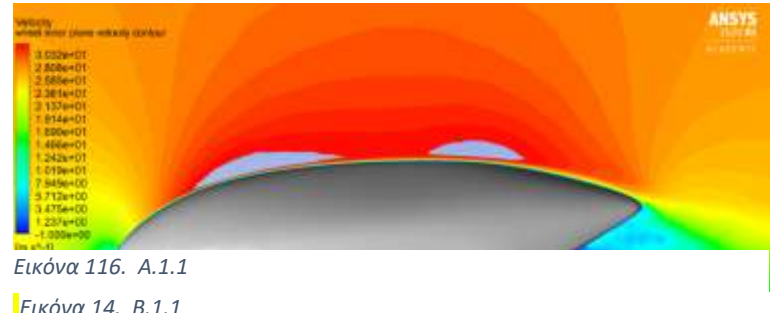




Εικόνα 115. A.1



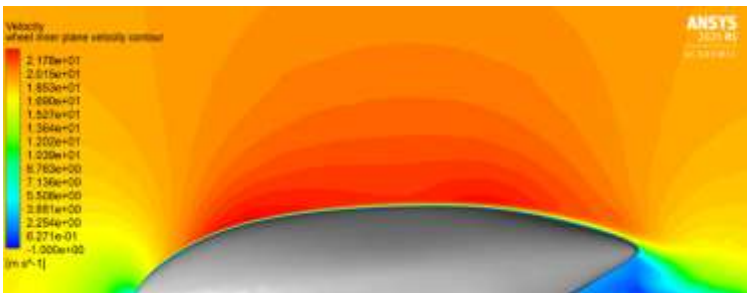
Εικόνα 117. B.1



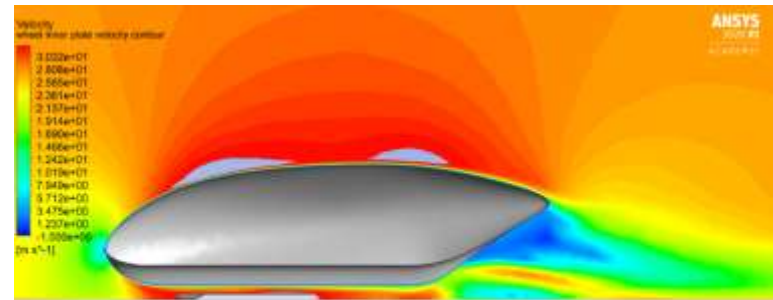
Εικόνα 116. A.1.1



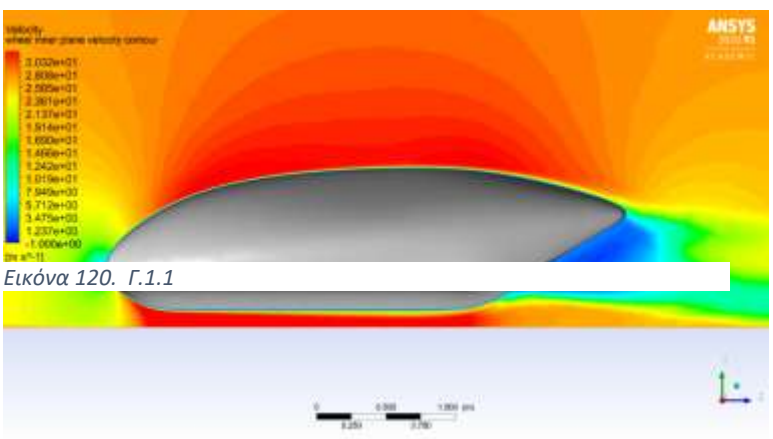
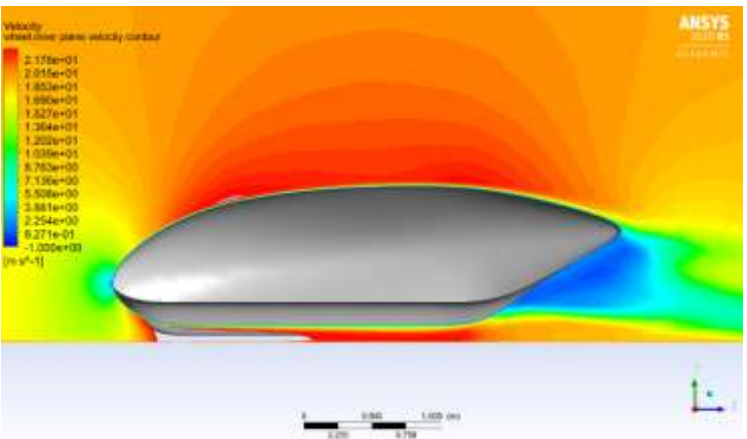
Εικόνα 14. B.1.1



Εικόνα 119. Γ.1



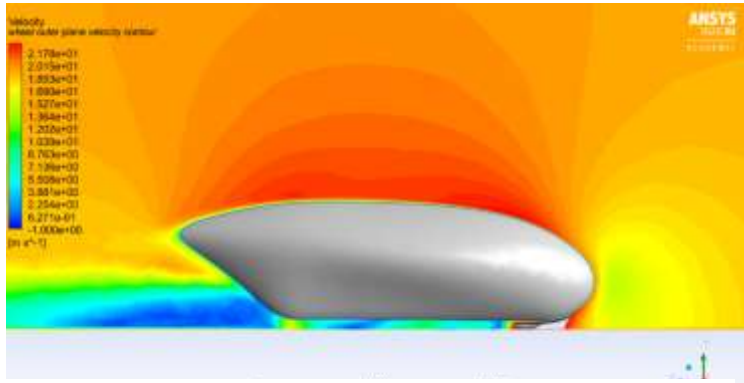
Εικόνα 120. Γ.1.1



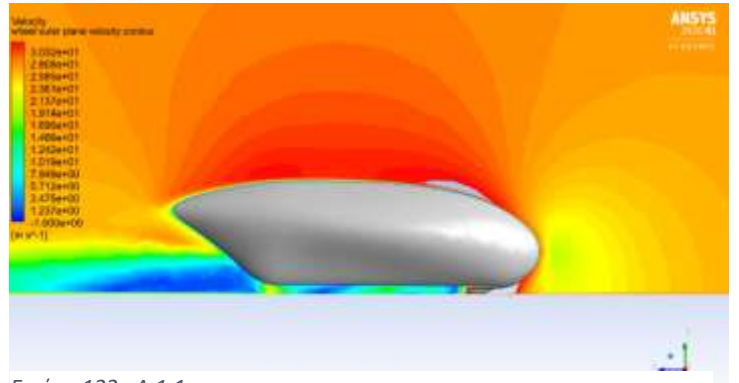
Εικόνα 120. Γ.1.1



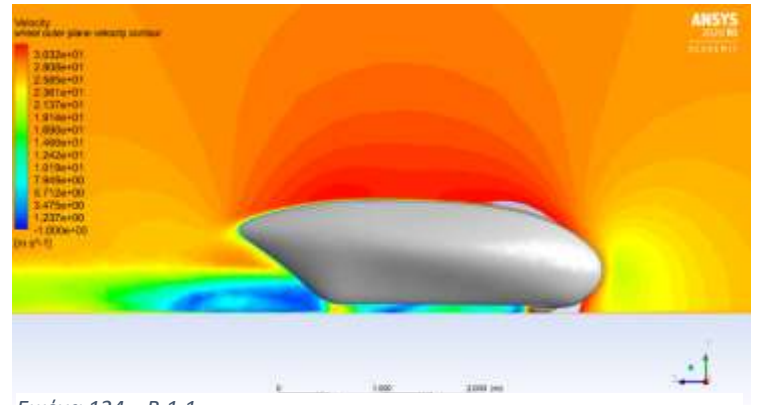
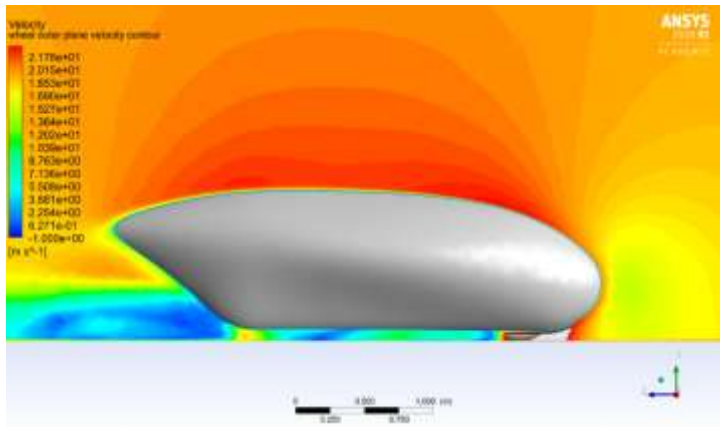
Τομή εξωτερικά της ρόδας(κόκκινο)



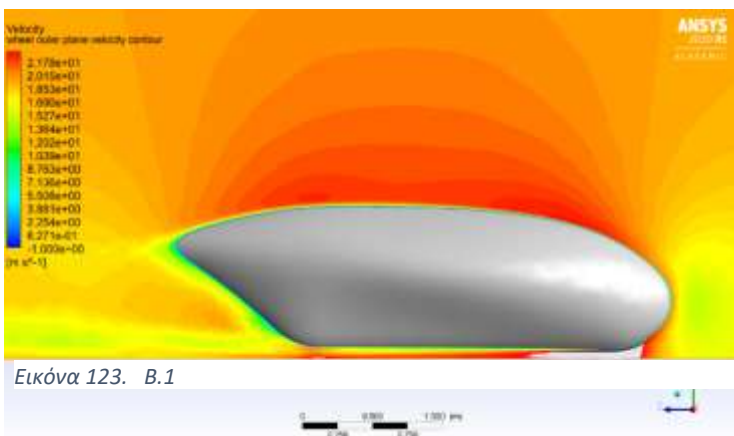
Εικόνα 121. A.1



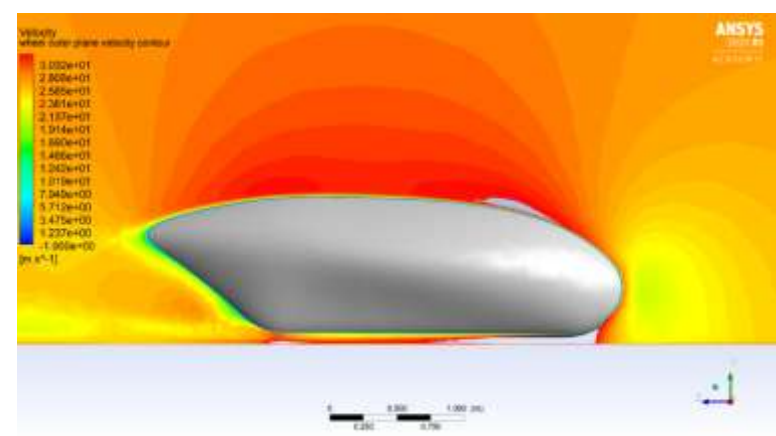
Εικόνα 122. A.1.1



Εικόνα 124. B.1.1



Εικόνα 123. B.1



Εικόνα 126. Γ.1.1

## Πηγες

1. ANSYS "ANSYS User's Guide 17.0 Release".
2. Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch, Alric P. Rothmayer "Fundamentals of fluid mechanics 7th edition".
3. H. K. Versteeg, W. Malalasekera "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, 2<sup>nd</sup> edition".
4. S. Wordley, J. Saunders "Aerodynamics for Formula SAE: Initial design and performance prediction", SAE International, 2005.
5. W. Seibert, "CFD in Aerodynamic Design Process of Road and Race Cars", European Automotive Congress, Slovakia, 2001.
6. Dodegowda, Bychkovsky, "Use of computational fluid Dynamics for the design of formula SAE race car aerodynamics", SAE Technical Paper, 2006.
7. J. Katz, "Race Car Aerodynamics Designing for Speed, Bentley Publishers 1995.
8. J. Katz, "New Directions in Race Car Aerodynamics", Bentley Publishers 2006.
9. World Solar Challenge, "Bridgestone World Solar Challenge Rules", 2019.
10. I. Oxyzoglou, "Design and Development of an Aerodynamic Package for A FSAE Race Car", 2017.

11. P. Pacheco, D. Garrido, N. Moraga, A. Abarcia, "Aerodynamic Design of Solar Energy Car for Australian and Chilean Race Competitions",