



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ &  
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

# Υπολογιστική Μελέτη Αεροδυναμικής Συμπεριφοράς Απλοποιημένου Μοντέλου Αυτοκινήτου με Χρήση Γεννητριών Στροβιλισμού

*Διπλωματική Εργασία*

**Χρυσόστομος-Αλέξανδρος Μ. Μπεκάκος**

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Οκτώβριος 2011

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ  
ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

## Υπολογιστική Μελέτη Αεροδυναμικής Συμπεριφοράς Απλοποιημένου Μοντέλου Αυτοκινήτου με Χρήση Γεννητριών Στροβιλισμού

Διπλωματική Εργασία  
Χρυσόστομος-Αλέξανδρος Μ. Μπεκάκος

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

### Περίληψη

Η Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης ασχολείται με μεθόδους και λογισμικό πρόλεξης της ροής και βελτιστοποίησης της συμπεριφοράς αεροδυναμικών μορφών. Σε αυτό το πλαίσιο, σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες μελετήθηκε η συμπεριφορά απλοποιημένου μοντέλου αυτοκινήτου (Ahmed body) με την προσθήκη διαχύτη και αεροτομής. Παρότι πρόκειται για μία σχετικά απλή γεωμετρία τα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής είναι ισχυρά, γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη γεωμετρία ένα καλό πεδίο δοκιμής πρόλεξης της ροής.

Η παρούσα διπλωματική αποτελεί επέκταση των δύο προηγούμενων διπλωματικών εργασιών, προσθέτοντας στη βασική γεωμετρία του μοντέλου γεννήτριες στροβιλισμού (vortex generators) και μελετώντας την επίπτωση τους στην αεροδυναμική συμπεριφορά του. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση των γεννητριών στροβιλισμού στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας του μοντέλου.

Για την ανάλυση της ροής και τη δημιουργία του πλέγματος χρησιμοποιείται το πακέτο ανοικτού κώδικα OpenFOAM. Οι προς μελέτη γεωμετρίες δημιουργούνται με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks. Στη συνέχεια,

δημιουργείται πλέγμα με τα εργαλεία του OpenFOAM και επιλύονται οι εξισώσεις για ασυμπίεστες συνεκτικές ροές.

Μελετώνται τρεις διαφορετικές γεωμετρίες γεννητριών στροβιλισμού για δεδομένο αριθμό και στη συνέχεια επιλέγεται μία εξ αυτών και διερευνάται η επίδραση της αύξησης του αριθμού τους.

Τέλος, εξετάζονται δύο παραλλαγές του Ahmed body με γωνίες slant του πίσω κεκλιμένου επιπέδου  $25^\circ$  και  $35^\circ$ , αντίστοιχα. Με την προσθήκη γεννητριών στροβιλισμού επιτυγχάνεται βελτίωση των συντελεστών αντίστασης και άνωσης, συγκριτικά με αυτών της βασικής γεωμετρίας, και από τα υπολογιστικά πειράματα που εκτελέστηκαν παρατηρήθηκε βέλτιστη λύση για το Ahmed  $25^\circ$ , με την αύξηση του αριθμού των γεννητριών στροβιλισμού, ενώ για το Ahmed  $35^\circ$  με παραμετροποίηση της γεωμετρίας της γεννήτριας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία βελτίωσης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς επιτυγχάνεται με δοκιμές και συνεχείς εκτελέσεις του αντίστοιχου λογισμικού, αφού ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς και όχι η βελτιστοποίησή της. Μια τέτοια βελτιστοποίηση θα οδηγούσε σε καλύτερο αποτέλεσμα, αλλά επίσης θα αύξανε σημαντικά και το υπολογιστικό κόστος.

Οκτώβριος 2011

**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
FLUID SECTION  
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES  
PARALLEL CFD & OPTIMIZATION UNIT

***Computational Aerodynamic Analysis of a Simplified Car  
Model using Vortex Generators***

Diploma Thesis  
Chrisostomos – Alexandros M.Mpekakos

Advisor: K.C. Giannakoglou, Professor NTUA

Abstract

The Parallel CFD & Optimization Unit of the School of Mech. Eng. NTUA is developing methods and software for the numerical prediction of flow fields and the solution of aerodynamic shape optimization problems. In two recent diploma theses, the behavior of a simplified model car (Ahmed body) has been studied using adjoint which guided the optimal use of diffusers and spoilers. Although Ahmed body has a simple geometrical shape, flow separation dominates and this makes it an appealing test problem for those developing tools for the automotive industry.

This diploma thesis is a sequel to the aforementioned diploma theses and aims at optimally adding vortex generators to the base line geometry and studying their effect on the aerodynamic performance. In specific, this thesis focuses on the effect of vortex generators on the drag and lift coefficients of the body under consideration.

In order to create the computational mesh and numerically solve the flow equations, an open source code called OpenFOAM is used. The geometrical shapes to be studied are created through SolidWorks. Moreover, the mesh is generated using the corresponding tools of OpenFOAM. The Navier-Stokes equations for incompressible turbulent flow are solved.

Three different geometrical shapes of vortex generators are used, in a fixed number configuration and, then, one of them is chosen in order to further study the effect of modifying their number.

Two different shapes of Ahmed body are studied, one with slant  $25^\circ$  and the other with  $35^\circ$ . By adding vortex generators the optimization of the drag and lift coefficients is achieved, in comparison to the results which obtained from the base line geometry. In conclusion, the optimal solution for Ahmed 25 corresponds to an increased number of vortex generators, whereas, on the other hand, in Ahmed 35, the improvement resulted from changing the vortex generator geometry.

October 2011

## Ευχαριστίες

Επιθυμώ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κυριάκο Γιαννάκογλου για την ιδέα του αντικειμένου της διπλωματικής, καθώς και για την επίβλεψη και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Αλέξανδρο Ζυμάρη, τον υποψήφιο διδάκτορα Βαγγέλη Παπουτσή και τον Δρ. Δημήτρη Παπαδημητρίου, μέλη της ερευνητικής ομάδας, για τις συμβουλές και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν σε τεχνικά κυρίως θέματα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη που μου έδειξαν τόσα χρόνια και μου παρείχαν τη δυνατότητα να είμαι σε θέση να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

*Αφιερώνω  
την εργασία αυτή  
στο μέλλοντα ανηψιό μου*

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	7
<b>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή .....</b>	<b>9</b>
1.1 Το λογισμικό Open Foam .....	13
<b>Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή γένεσης πλέγματος γύρω από απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου (Ahmed body) .....</b>	<b>15</b>
2.1 Γεωμετρία Ahmed body .....	16
2.2 Περιγραφή μεθόδου δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος .....	18
2.2.1 Χρήση του κώδικα SnappyHexMesh .....	19
2.2.2 Χρήση του κώδικα SnapEdge .....	25
2.3 Δημιουργία Πλέγματος για επίλυση της ροής χρησιμοποιώντας μοντέλα τύρβης με συναρτήσεις τοίχου στο Ahmed body .....	28
<b>Κεφάλαιο 3 : Επίλυση της ροής στη βασική γεωμετρία του Ahmed body και υπολογισμός συντελεστών αντίστασης και άνωσης .....</b>	<b>41</b>
3.1 Χαρακτηριστικά ροής και οριακές συνθήκες .....	41
3.2 Επιλογή μοντέλου τύρβης και επίλυση της ροής .....	43
3.3 Μελετηθείσες Περιπτώσεις .....	45
3.3.1 Ahmed 25° .....	45
3.3.2 Ahmed 35° .....	48
<b>Κεφάλαιο 4 : Βελτίωση της ροής με χρήση γεννητριών στροβιλισμού .....</b>	<b>51</b>
4.1 Περιγραφή δημιουργίας υπό μελέτη περιπτώσεων .....	51
4.2 Παραμετροποίηση γεννητριών στροβιλισμού .....	55



4.3 Περιπτώσεις υπολογισμού της ροής και των συντελεστών αντίστασης και άνωσης για το Ahmed 25 .....	58
4.3.1 Πέντε γεννήτριες στροβιλισμού 1 .....	58
4.3.2 Πέντε γεννήτριες στροβιλισμού 2 .....	62
4.3.3 Πέντε γεννήτριες στροβιλισμού 3 .....	65
4.3.4 Περιπτώσεις μεταβολής του αριθμού των γεννητριών στροβιλισμού .....	67
4.3.5 Τοποθέτηση 6 γεννητριών στροβιλισμού υπό γωνία .....	72
4.3.6 Τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 .....	74
4.4 Περιπτώσεις υπολογισμού της ροής και των συντελεστών αντίστασης και άνωσης για το Ahmed 35 .....	77
4.4.1 Ahmed 35 με προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 1 .....	77
4.4.2 Ahmed 35 με προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 2 .....	79
4.4.3 Προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 στο Ahmed 35 .....	82
4.4.4 Περιπτώσεις εναλλαγής του αριθμού των γεννητριών .....	84
4.4.5 Τοποθέτηση γεννητριών στροβιλισμού υπό γωνία $75^\circ$ .....	89
4.4.6 Τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 στα άκρα .....	91
<b>Κεφάλαιο 5 : Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα .....</b>	<b>95</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>102</b>
<b>Παράρτημα Α – Αρχεία STL (stereolithography) .....</b>	<b>103</b>
<b>Παράρτημα Β – Αρχείο ρυθμίσεων του BlockMesh .....</b>	<b>104</b>
<b>Παράρτημα Γ – Αρχείο ρυθμίσεων του SnappyHexMesh .....</b>	<b>106</b>
<b>Παράρτημα Δ – Αρχείο ρυθμίσεων του SnapEdge .....</b>	<b>115</b>

# 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια ο όρος “Αεροδυναμική” έχει εισχωρήσει βαθιά στη ζωή και στις σχεδιαστικές σκέψεις και εμπνεύσεις ανθρώπων και αυτοκινητοβιομηχανιών.

Από το πρώτο μηχανοκίνητο όχημα του Siegfried Marcus το 1770, την πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης του Karl Benz το 1885, μέχρι και σήμερα, στόχο στο χώρο των αυτοκινητοβιομηχανιών αποτελούσε η βελτιστοποίηση των οχημάτων τους. Αυτή η βελτιστοποίηση αναφέρεται κυρίως σε τρεις επιμέρους τομείς. Πρώτον, την αύξηση της υποδύναμης, όπου λέγοντας υποδύναμη ενός ίππου εννοούμε τη δύναμη που δίνει ένα άλογο για να σηκώσει ένα βάρος 75 κιλών σε ύψος 1 μέτρου. Δεύτερον, στη βελτίωση της αεροδυναμικής του οχήματος με στόχο την αύξηση των επιδόσεων, όπου λέγοντας αεροδυναμική εννοούμε το κλάδο της μηχανικής που ασχολείται με τη βελτίωση της ροής γύρω ή μέσα από ένα σώμα και τέλος, την όσο το δυνατόν λιγότερο επιβλαβή λειτουργία του οχήματος για το περιβάλλον από πλευράς εκπομπής CO<sub>2</sub>. Το τελευταίο οφείλεται στο ότι η αντίσταση που δέχονται τα οχήματα κατά την κίνησή τους είναι πολύ σημαντική, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μείωσή της θα επιφέρει και λιγότερη κατανάλωση καυσίμου, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε μικρότερες εκπομπές καυσαερίων.

Καθημερινά η αύξηση της ζήτησης οχημάτων από τις σύγχρονες και αναπτυσσόμενες κοινωνίες επιφέρει διόγκωση του οικολογικού αυτού προβλήματος. Έτσι δημιουργείται μια άμεση και επιτακτική ανάγκη για ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας και εύρεση νέων μορφών ενέργειας. Εκτός από την εξέλιξη και ανάπτυξη καθαρότερων κινητήρων η τεχνολογία στράφηκε και προς τον τομέα της αεροδυναμικής. Ένα όχημα κατά την κίνησή του δέχεται δυνάμεις και αντιστάσεις αντίθετες στην κίνησή του, κυρίως λόγω της ολίσθησης (αυτές αναφέρονται και ως *αντιστάσεις τριβής*), καθώς και λόγω της αντίστασης του αέρα. Η αντίσταση λόγω ολίσθησης είναι αξιοσημείωτη για μικρές κυρίως ταχύτητες, δηλαδή για  $U < 60$  km, μολονότι, για  $U > 60$  km, οι αντιστάσεις οφείλονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στην αντίσταση του αέρα.

Η αντίσταση του αέρα δημιουργεί κυρίως δύο δυνάμεις. Την *οπισθέλκουσα* (Drag) και την *άνωση* (Lift). Η οπισθέλκουσα είναι αυτή η οποία αντιστέκεται στην κίνηση του οχήματος και ουσιαστικά αυξάνει την κατανάλωση του καυσίμου και η άνωση είναι η δύναμη η οποία τείνει να ανυψώσει το αυτοκίνητο από το έδαφος ή να το προσκολλήσει σε αυτό σε περίπτωση που η τιμή που λάβει είναι αρνητική. Η πρώτη οφείλεται κυρίως στην αντίσταση που δημιουργείται από τον αέρα κατά την κίνηση του οχήματος και είναι ιδιαίτερα σημαντική, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μείωσή της επιφέρει και μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Η άνωση αφορά κυρίως στην ευστάθεια του αυτοκινήτου στο οδόστρωμα.

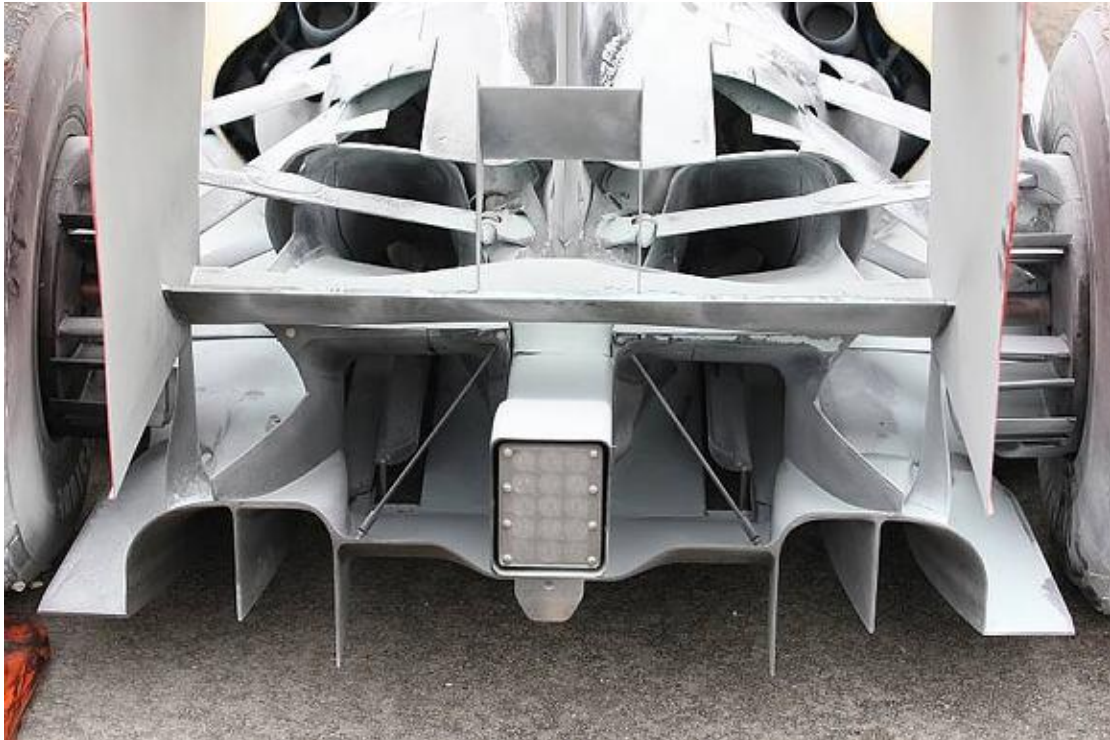
Πολλοί ήταν οι ερευνητές και οι επιστήμονες οι οποίοι ξεκίνησαν να ασχολούνται με το θέμα της βελτίωσης της αεροδυναμικής του αυτοκινήτου και συνεπώς τη μείωση αλλά και δημιουργία αρνητικών τιμών των συντελεστών οπισθέλκουσας και άνωσης. Αρκετές πρωτοποριακές λύσεις εμφανίστηκαν με επικρατέστερες αυτές της αεροτομής, διαχυτών, πλευρικών πτερυγίων, των γεννητριών στροβιλισμού (Vortex generators) και του ενεργητικού ελέγχου της ροής (active flow control) συνήθως με μόνιμες ή παλλόμενες δέσμες αέρα.

Η αεροτομή (spoiler) Σχ.1 αποτέλεσε βασικό εργαλείο της αεροδυναμικής για την εξομάλυνση και βελτίωση της συμπεριφοράς του οχήματος στο δρόμο. Στόχος της αεροτομής είναι η εξομάλυνση της ροής, καθώς και ο έλεγχος του σημείου εκφυγής της. Κύρια σημεία τοποθέτησης της αεροτομής είναι όλα τα πιθανά σημεία αποκόλλησης της ροής με επικρατέστερα αυτά του πίσω κεκλιμένου επιπέδου του αυτοκινήτου.



Σχ.1. Παράδειγμα βιομηχανικού spoiler.

Μία από τις πιο παραγωγικές συσκευές δημιουργίας κάθετης δύναμης είναι ο διαχύτης. Η συσκευή αυτή μπορεί να τοποθετηθεί σε αρκετές θέσεις πάνω στο όχημα ανάλογα με το αποτέλεσμα που επιθυμούμε να έχουμε. Μία από αυτές τις θέσεις είναι στο πίσω τελείωμα ενός σκελετού F1 Σχ.2. Ουσιαστικά ο διαχύτης αποτελεί ένα σχήμα που επεκτείνεται στην κατεύθυνση της ροής και την αναγκάζει να κινηθεί δια μέσω αυτού χωρίς όμως να μειώνει την πίεση της ροής, αλλά αντιθέτως καθώς επιβραδύνεται η ροή να αυξάνεται η πίεση. Η επίδρασή του είναι τόσο μεγάλη στην αεροδυναμική συμπεριφορά ενός οχήματος ώστε στο χώρο της F1 να χρησιμοποιείται υπό περιορισμούς.



Σχ.2. Διπλός διαχύτης στο πίσω τελείωμα ενός σκελετού F1.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία η οποία αποτελεί συνέχεια προγενέστερων διπλωματικών εργασιών, των Λάππα [1] και Κοντογιάννη [2], θα ασχοληθούμε με τη μελέτη και τοποθέτηση γεννητριών στροβιλισμού, όπως αυτές του Σχ.3, στην επιφάνεια του αυτοκινήτου. Η γεωμετρία τους είναι ποικιλόμορφη και διαφέρει, όμως, απώτερός τους σκοπός είναι να μπορούμε να ελέγχουμε το σημείο στο οποίο θα αποκολληθεί η ροή.



Σχ.3. Γεννήτριες Στροβιλισμού σε ενιαίο σώμα.

Το ενιαίο σώμα των γεννητριών στροβιλισμού τοποθετείται στο πλείστο των περιπτώσεων στην οροφή του οχήματος και πριν το πίσω κεκλιμένο επίπεδο όπως φαίνεται στο Σχ.4.



Σχ4. Γεννήτριες Στροβιλισμού τοποθετημένες πάνω σε όχημα.

Τα τελευταία χρόνια συνδυασμοί των παραπάνω αεροδυναμικών λύσεων έχουν εμφανιστεί με επικρατέστερη αυτή της “αεροτομή- γεννήτριες στροβιλισμού” (βλ. Σχ.5).



Σχ5. Συνδυασμός αεροτομής με γεννήτριες στροβιλισμού.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται χρήση και αξιολόγηση ενός σχετικά νέου λογισμικού πακέτου, του SnapEdge, που σε συνεργασία με το λογισμικό OpenFoam, ενός ανοιχτού πηγαίου κώδικα, επιλύουν τη ροή και, στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση των γεννητριών στροβιλισμού στην αεροδυναμική συμπεριφορά του σώματος Ahmed. Πρόκειται για μια πολύ απλή γεωμετρία σώματος και αυτό αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά του. Επίσης, η ύπαρξη πειραματικών μετρήσεων και υπολογιστικών πλεγμάτων [8,9], το καθιέρωσαν ως benchmark problem για τις μεθόδους της αεροδυναμικής με εφαρμογή στη βιομηχανία του αυτοκινήτου. Αρχικά γίνεται προσομοίωση της ροής γύρω από το όχημα του Ahmed χωρίς γεννήτριες στροβιλισμού και, στη συνέχεια, με την τοποθέτηση αυτών σε διάφορες θέσεις με σκοπό τη βελτίωσή της.

## **1.1 Το λογισμικό OpenFoam (Field Operation and Manipulation)**

Το λογισμικό OpenFoam δημιουργήθηκε από την εταιρεία OpenCfd.Ltd και ο στόχος αυτής είναι καθαρά μη κερδοσκοπικός και αναφέρεται στην εξέλιξη και βελτίωση του ανοιχτού πηγαίου κώδικα που η ίδια δημιούργησε.

Πρόκειται για ένα λογισμικό που ασχολείται με την υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD). Προτέρημα αυτού έναντι άλλων CFD προγραμμάτων αποτελεί το γεγονός ότι πρόκειται για έναν ανοιχτό κώδικα, κάτι το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει και να αλλάξει τον πηγαίο κώδικα και να τον προσαρμόσει κατάλληλα στα δικά του προβλήματα.

Έτσι, κάποιος με γνώσεις C++ έχει τη δυνατότητα να επέμβει στον κώδικα του προγράμματος και να επιφέρει τις αλλαγές που χρειάζονται, ώστε να δημιουργήσει την κατάλληλη παραλλαγή που τον ενδιαφέρει. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να αφορούν πλήθος πραγμάτων, όπως στην αλλαγή των όρων πηγής του χρησιμοποιούμενου μοντέλου τύρβης, την τροποποίηση των οριακών συνθηκών, την πρόσθεση ή αφαίρεση όρων σε διάφορες εξισώσεις, κλπ.

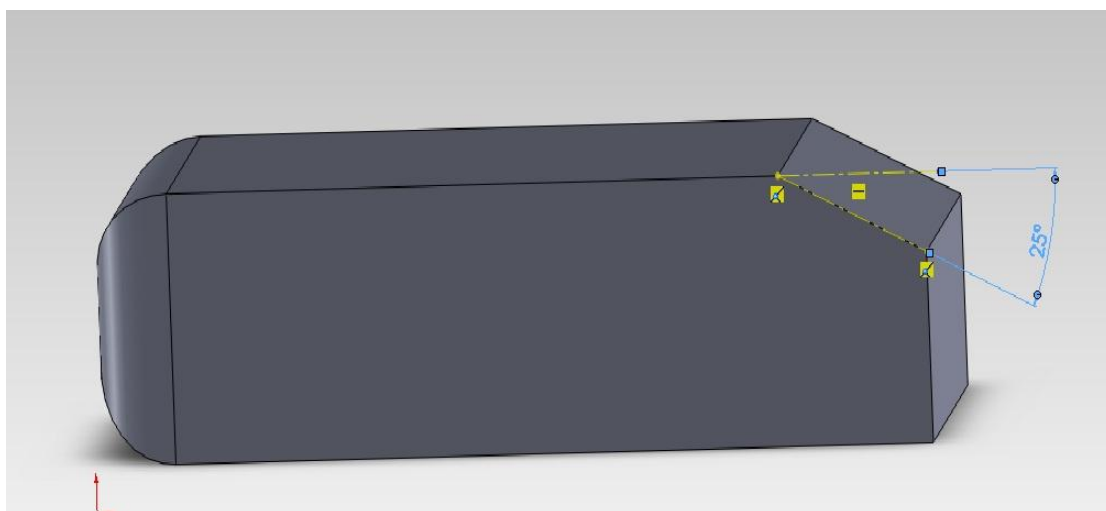
Στη παρούσα διπλωματική εργασία το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων Navier Stokes για τυρβώδη μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του συγκεκριμένου πακέτου δεν έγινε με τη βοήθεια κάποιου γραφικού περιβάλλοντος, αν και δίνεται η δυνατότητα αυτή αλλά με την πρόσδοση τιμών σε μεταβλητές χρησιμοποιώντας αρχεία κειμένου τα οποία λειτουργούν ως αρχεία δεδομένων εισόδου του λογισμικού. Αυτό δίνει τη δυνατότητα, αν και δεν υιοθετήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία,

ως ιδιαίτερα δαπανηρό, να υπάρξει συνεργασία του λογισμικού αυτού με ένα λογισμικό βελτιστοποίησης, όπως είναι ο EASY, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης του ΕΜΠ (ΜΠΤΡΒ/ΕΜΠ).

Το OpenFoam μπορεί κάποιος να το βρει και να το κατεβάσει από την επίσημη ιστοσελίδα <http://www.openfoam.com>.

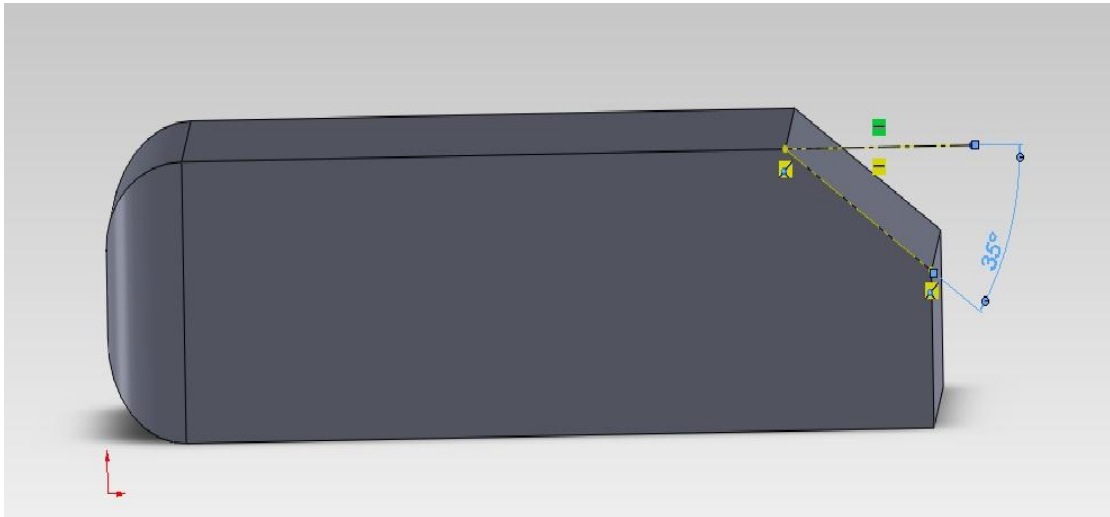
## 2. Περιγραφή Γένεσης πλέγματος γύρω από απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου (Ahmed Body)

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή της γεωμετρίας και της δομής του απλοποιημένου μοντέλου αυτοκινήτου με το οποίο θα ασχοληθούμε, καθώς και τον τρόπο γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος γύρω από αυτό. Αρχικά σημειώνεται η ύπαρξη στη βιβλιογραφία δύο παραλλαγών του Ahmed Body [5], [6], [7], μιας με πίσω κεκλιμένη γωνία  $25^\circ$  και μιας με  $35^\circ$  (Σχ.1 και Σχ.2). Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος δημιουργίας του πλέγματος γύρω από το Ahmed body με χρήση ενός εργαλείου του OpenFoam, το SnappyHexMesh. Έπειτα αναφέρεται και αναλύεται η βελτίωση του ήδη υπάρχοντος πλέγματος με ένα σχετικά νέο εργαλείο του ανοιχτού πηγαίου κώδικα, το SnapEdge, το οποίο τείνει να βελτιώσει το πλέγμα μας. Τέλος, ουσιαστικό στόχο της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε ο κατάλληλος συνδυασμός των δύο ανωτέρων εργαλείων, καθώς και η αντιμετώπιση και η αναγνώριση των προβλημάτων τα οποία προκύπτουν κατά τη δημιουργία του επιθυμητού πλέγματος.



Σχ.6. Ahmed25 με εμφανή τη μέτρηση της πίσω κεκλιμένης γωνίας





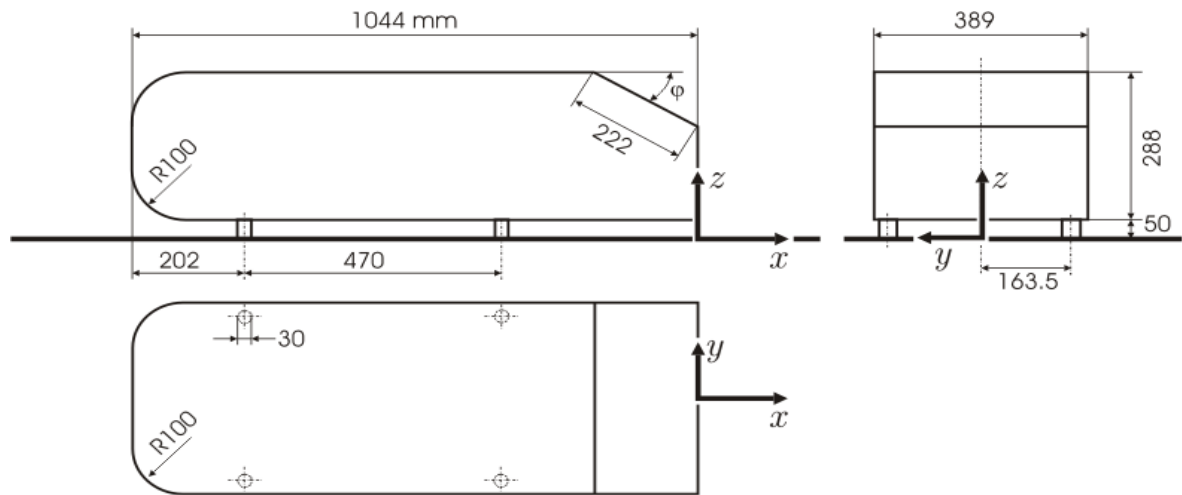
Σχ.7. Ahmed35 με εμφανή τη μέτρηση της πίσω κεκλιμένης γωνίας.

## 2.1 Γεωμετρία Ahmed Body

Το Ahmed body αποτελεί ένα απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου το οποίο δημιουργήθηκε σε ένα πρόγραμμα σχεδίασης και το οποίο ουσιαστικά αποτελείται από δύο παράλληλες ευθείες, μία κυβική spline που τις ενώνει και μία διαμόρφωση στο πίσω μέρος του μοντέλου ανάλογα για το σε ποιο από τα δύο Ahmed αναφερόμαστε. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια extrude διαμόρφωση του αυτοκινήτου στον z άξονα και προκύπτει το τελικό σχήμα. Τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά έχουν καθοριστεί από τον ίδιο του το δημιουργό S.R. Ahmed και φαίνονται στο Σχ.2.1.

Ταυτόχρονα με την εξέλιξη της αεροδυναμικής το Ahmed body αποτέλεσε benchmark problem για τους εξής λόγους :

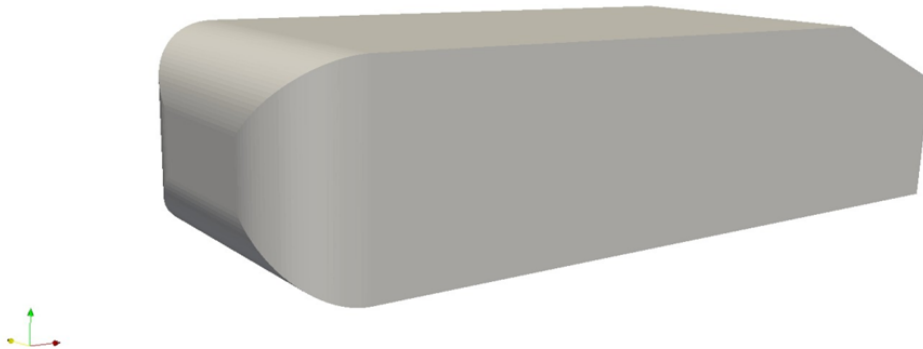
1. Έχει δημιουργηθεί με βασικά εργαλεία σχεδίασης χωρίς πολυπλοκότητες κατά τη δημιουργία του, κάτι που καθιστά εύκολη την τροποποίηση του ήδη υπάρχοντος σχήματος.
2. Λόγω της απλής γεωμετρίας του διευκολύνεται η δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος, τόσο πάνω στην επιφάνεια του σώματος, όσο και γύρω από αυτή.
3. Ύπαρξη πειραματικών αποτελεσμάτων για σύγκριση.
4. Η ροή γύρω από το Ahmed body διατηρεί τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής γύρω από πραγματικά αυτοκίνητα.



Σχ.2.1. Όψεις του ahmed body, οι διαστάσεις είναι σε mm.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι τρεις όψεις του Ahmed body. Οι τέσσερις κύκλοι που φαίνονται στη κάτωψη του σχήματος με διάμετρο 30mm αντιπροσωπεύουν τους τροχούς του αυτοκινήτου και έχουν ύψος 50mm, το οποίο καθορίζει την απόσταση του αυτοκινήτου από το έδαφος. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι, κατά την αριθμητική επίλυση της ροής τα 4 αυτά στηρίγματα μπορούν να αγνοηθούν, κάτι που συμβαίνει και στη παρούσα εργασία, καθώς δεν επηρεάζεται σημαντικά το αποτέλεσμα ειδικά σε συνθήκες μόνιμης ροής που εδώ εξετάζονται.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, ως αρχεία εισόδου για την 3D γεωμετρία του Ahmed body (Σχ.2.2), αλλά και του οδοστρώματος, χρησιμοποιούνται αρχεία .Stl (stereolithography) (Παράρτημα Α), τα οποία έχουν γίνει export από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks και ουσιαστικά περιέχουν τη γεωμετρία του σχήματος και του περιβάλλοντα χώρου διακριτοποιημένη με τριγωνικά στοιχεία.



Σχ.2.2 Προοπτική απεικόνιση υπό μελέτη απλοποιημένου μοντέλου αυτοκινήτου (Ahmed Body).

## 2.2 Περιγραφή μεθόδου δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος

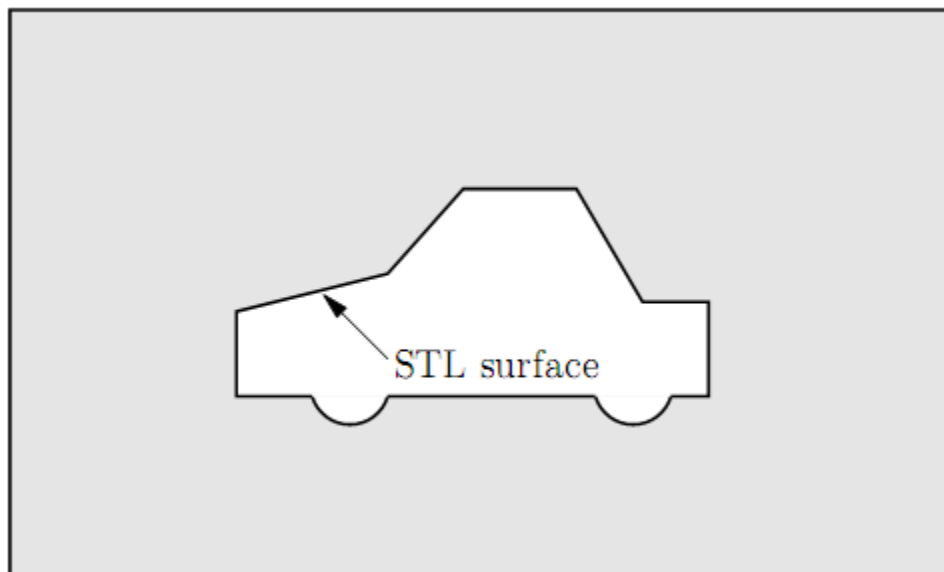
Βασικό εργαλείο δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος γύρω από 3D γεωμετρίες του OpenFoam, αποτελεί το SnappyHexMesh. Το εργαλείο αυτό δημιουργεί καλής ποιότητας πλέγμα και σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο αδυνατεί να ακολουθήσει πιστά τη γεωμετρία πολύπλοκων γεωμετριών, δημιουργώντας έτσι αρκετά προβλήματα σε καμπύλες επιφάνειες και σε ενώσεις εδρών. Το πρόβλημα αυτό είχε αντιμετωπιστεί και σε προηγούμενη διπλωματική εργασία (βλ. Λάμπας [1]). Αυτό διορθώνεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό με ένα σχετικά καινούργιο εργαλείο του OpenFoam, το SnapEdge, και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε αυτό παρακάτω όπου και αναλύονται συνοπτικά τα προτερήματα και τα μειονεκτήματά του. Το SnappyHexMesh είναι ένας κώδικας γένεσης πλέγματος που δημιουργεί τετράεδρα και εξάεδρα γύρω από μία επιφάνεια η οποία δίνεται με μορφή αρχείου Stl (stereolithography) (Παράρτημα Α). Το τελικό πλέγμα προκύπτει μετά από τροποποιήσεις και μορφοποιήσεις του αρχικού χωρίου επίλυσης, καθώς και μετά την επέμβαση του εργαλείου SnapEdge το οποίο βοηθά στο να ακολουθεί πιστά το πλέγμα την τυχόν δύσκολη γεωμετρία του σώματος, ειδικά κοντά στην επιφάνειά του και στις ακμές του.

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος θα χρησιμοποιηθούν εικόνες, και παρότι το υπολογιστικό πλέγμα που

τελικά δημιουργείται και χρησιμοποιείται στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι 3D, προς αποφυγή προβληματισμών τα σχήματα που ακολουθούν είναι 2D.

### 2.2.1 Χρήση του κώδικα SnappyHexMesh

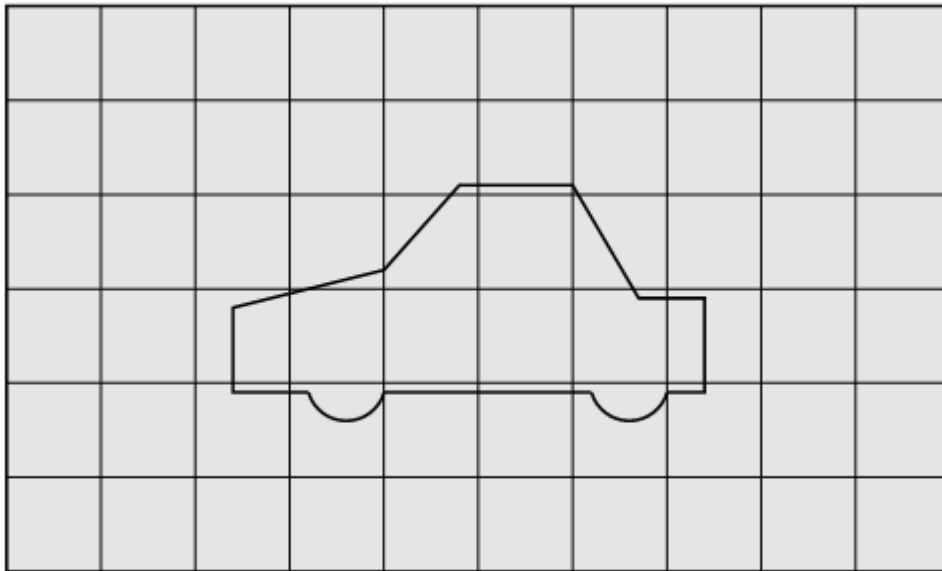
Το εργαλείο αυτό προκειμένου να μπορέσει να λειτουργήσει και να παράγει ένα οποιοδήποτε πλέγμα χρειάζεται ένα αρχείο stl στο οποίο θα περιλαμβάνεται η γεωμετρία του υπό μελέτη σώματος. Απαιτείται η δημιουργία αρχικού πλέγματος το οποίο θα περιλαμβάνει όλο το επιθυμητό υπολογιστικό χωρίο. Η γένεση αυτού ουσιαστικά γίνεται μέσα από ένα άλλο εργαλείο του OpenFoam, το Block Mesh, όπου η εισαγωγή δεδομένων σε αυτό γίνεται μέσω του αντίστοιχου αρχείου εισόδου ονόματι Block Mesh Dict (Παράρτημα Β). Τέλος, απαιτείται ένα dictionary αρχείο το οποίο θα ρυθμίζει και θα ελέγχει κατάλληλα τη διαδικασία δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος.



Σχ.2.3. Όρια πρωταρχικού πλέγματος, αγνοώντας την ύπαρξη του stl αρχείου [13].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος αποτελεί αρχικά η οριοθέτηση του υπό μελέτη χωρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Αυτό γίνεται μέσω του αρχείου Block Mesh Dict και απαραίτητες προϋποθέσεις για τη σωστή λειτουργία αυτού είναι:

- i) Ένα απλό πλέγμα βάσης που να αποτελείται από εξάεδρα και να καταλαμβάνει ολόκληρο το επιθυμητό υπολογιστικό χωρίο (αυτό εύκολα κατασκευάζεται με ένα εργαλείο του OpenFoam, το BlockMesh).
- ii) Τα κελιά πρέπει να έχουν τους λόγους, ύψος προς μήκος, μήκος προς πλάτος και ύψος προς πλάτος, περίπου 1, καθώς έτσι στο λογισμικό διευκολύνεται η μορφοποίηση των κελιών και αποκλείεται η ακραία περίπτωση αποτυχίας της διαδικασίας.
- iii) Τουλάχιστον μια ακμή κελιού βάσης πρέπει να τέμνει την επιθυμητή επιφάνεια ώστε να μπορεί η τελευταία να αναγνωριστεί από τον κώδικα.



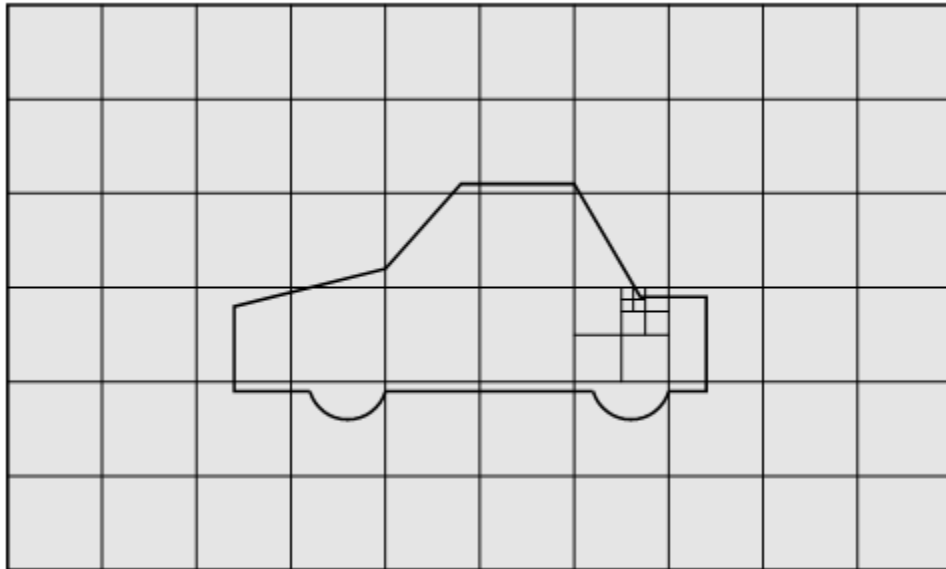
Σχ.2.4. Πλέγμα βάσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του τελικού υπολογιστικού πλέγματος [13].

Το εργαλείο SnappyHexMesh περιέχει τρεις δυνατές επιλογές εκτέλεσής του, ανάλογα με το τι πλέγμα επιθυμούμε να δημιουργήσουμε κάθε φορά:

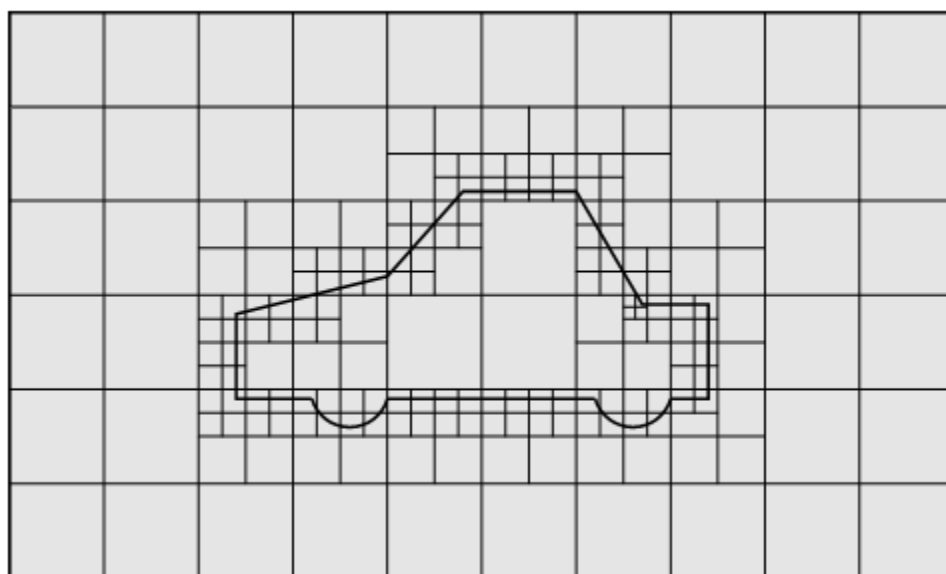
Which of the steps to run (Οι δυνατές επιλογές είναι true, για να πραγματοποιηθεί και false για να μην πραγματοποιηθεί)

```
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers true;
```

Στο castellatedMesh γίνεται η διαίρεση των κελιών, όπως αυτό έχει οριστεί από το αρχείο ρυθμίσεων. Το κάθε κελί διαιρείται σε 8 νέα στις 3 διαστάσεις και το επίπεδο πυκνότητας που επιλέγεται καθορίζει το πόσες φορές θα διαιρεθούν διαδοχικά. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται πρώτα στις λεπτομέρειες της γεωμετρίας πάνω στην επιφάνεια του σώματος Σχ.2.5 και στη συνέχεια στην υπόλοιπη επιφάνεια του Σχ.2.6.

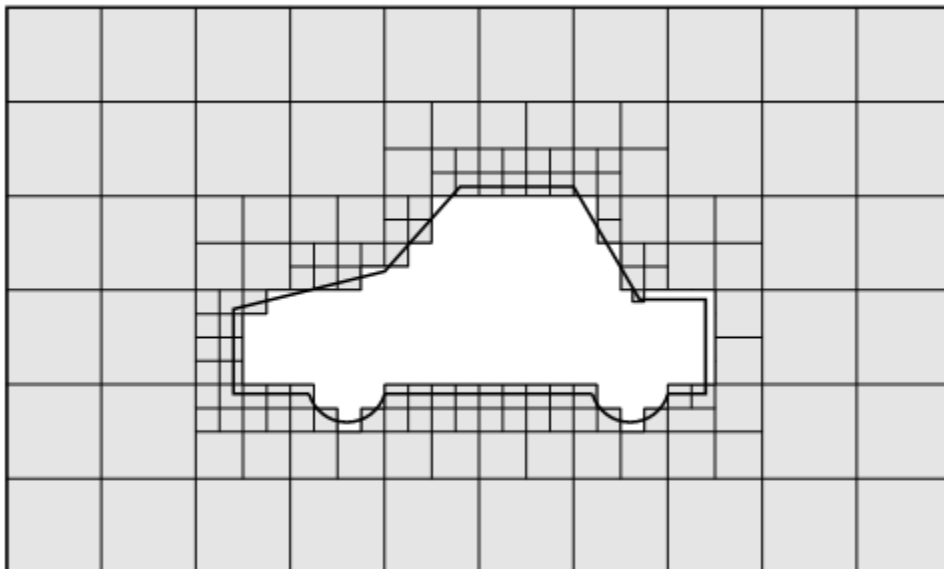


Σχ.2.5. Διαίρεση κελιών στις λεπτομέρειες της γεωμετρίας της επιφάνειας του σώματος [13].

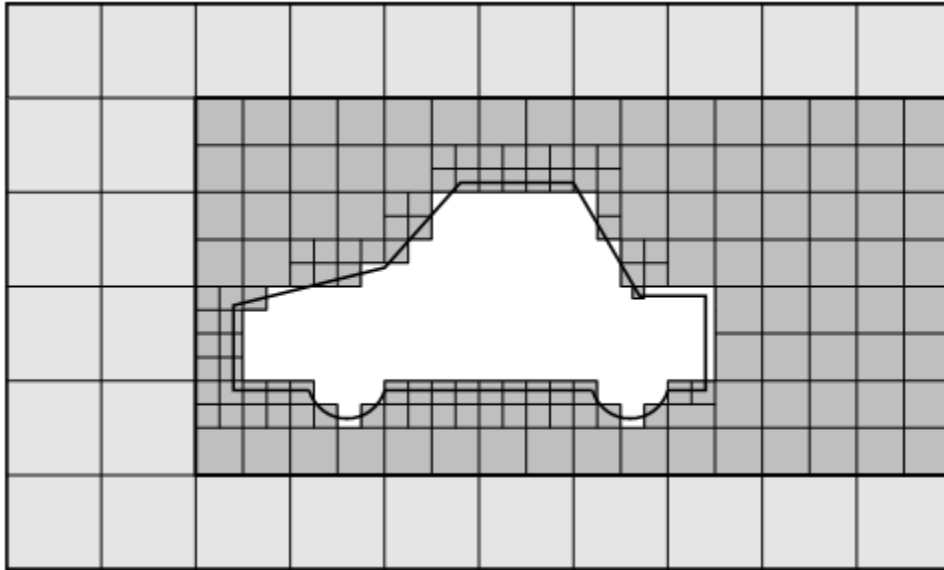


Σχ.2.6. Διαίρεση κελιών σε όλη την επιφάνεια του σώματος [13].

Επόμενο βήμα της διαδικασίας δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος είναι η διαγραφή των κελιών στο εσωτερικό του σώματος (snap), καθώς δεν χρειάζεται να υπάρχει υπολογιστικό πλέγμα μέσα στο σώμα. Επειδή υπάρχουν δύο περιοχές με κελιά, η εσωτερική και η εξωτερική, πρέπει να δώσουμε εμείς εντολή για το ποιά θα κρατηθεί. Αυτό γίνεται ανάλογα με το που έχουμε ορίσει το πέρασ ενός διανύσματος το οποίο έχουμε ορίσει κατάλληλα στο αρχείο ελέγχου (Παράρτημα Γ). Έτσι, όσα κελιά έχουν ποσοστό του όγκου τους μεγαλύτερο του 50% θα κρατηθούν. Στη συνέχεια, ακολουθεί η πυκνωση του πλέγματος κάτι το οποίο είναι αναγκαίο προκειμένου να έχουμε καλύτερη σύγκλιση του κώδικα και σωστότερη επίλυση της ροής.



Σχ.2.7. Αφαίρεση εσωτερικών κελιών [13].



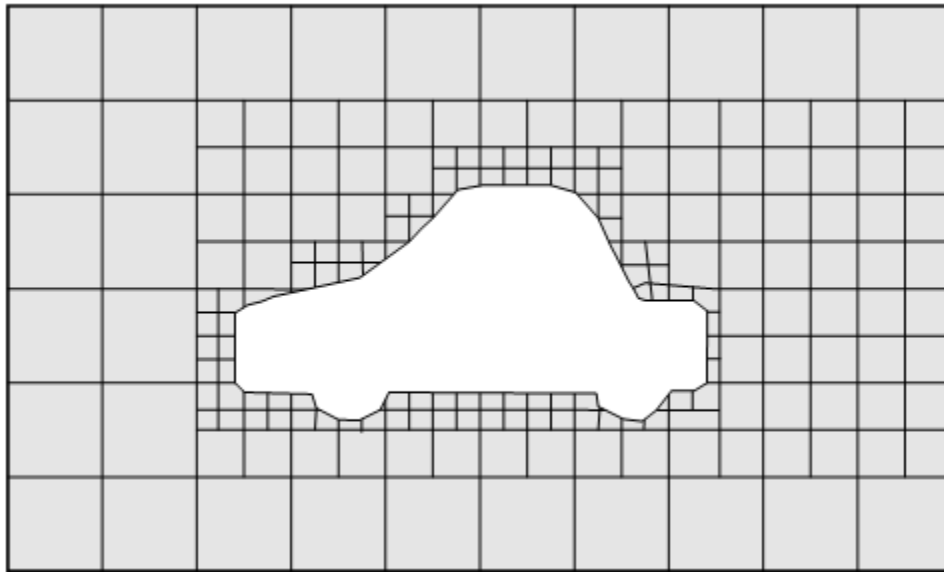
Σχ.2.8. Κατάλληλη πύκνωση του εναπομείναντος πλέγματος [13].

Εύκολα διακρίνονται στο Σχ.2.8 οι αρκετές επιφανειακές ατέλειες που δημιουργήθηκαν κατά την πύκνωση του πλέγματος, κάτι το οποίο αποτελεί και ένα από τα ελαττώματα του SnappyHexMesh. Βοήθεια σε αυτό και ουσιαστικά μια καλύτερη προσέγγιση του πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος έρχεται να δώσει το SnapEdge. Περιγραφή της διαδικασίας λειτουργίας του κώδικα SnapEdge θα γίνει σε παρακάτω ενότητα. Ωστόσο σημαντικό είναι να αναφερθεί το γεγονός ότι το εργαλείο SnapEdge χρησιμοποιείται στο πλέγμα που έχει δημιουργηθεί πριν την επιπλέον διαστρωμάτωση των δομημένων κυψέλων γύρω από τα στερεά τοιχώματα (layers), δηλαδή το αρχείο ρυθμίσεων του SnappyHexMesh πρέπει να έχει ως εξής:

Which of the steps to run (Οι δυνατές επιλογές είναι true, για να πραγματοποιηθεί και false για να μην πραγματοποιηθεί)

```
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers false;!!!!!!!
```





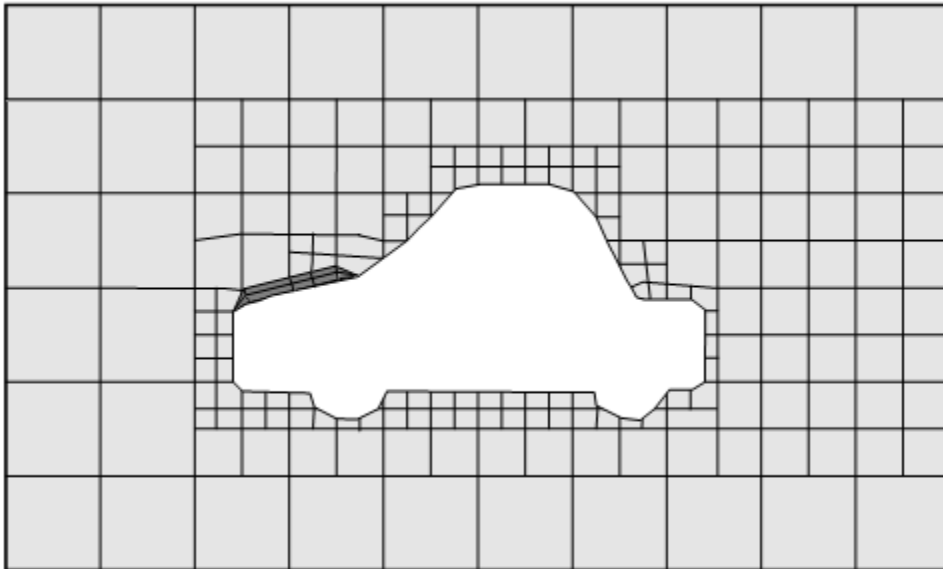
Σχ.2.9. Προσαρμογή πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος [13].

Τελευταίο βήμα (`addLayers`) για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος είναι η προσθήκη των `layers`, η πρόσθεση στρωμάτων δηλαδή κοντά στην επιφάνεια του σώματος. Το υπολογιστικό πλέγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση της ροής και χωρίς την προσθήκη των στρωμάτων. Ωστόσο είναι αναγκαία αυτή η προσθήκη λόγω της μέγιστης δυνατής ακρίβειας της επίλυσης της συνεκτικής ροής γύρω από το σώμα, διότι έτσι εξασφαλίζεται μια ακριβέστερη πρόλεξη των συνεκτικών στρωμάτων που αναπτύσσονται κοντά στα στερεά τοιχώματα, αλλά και στον ομόρρου.

Η διαδικασία δημιουργίας πλεγματικών διαστρωματώσεων αποτελείται ουσιαστικά από τρία βήματα:

- i) Μορφοποίηση του πλέγματος ώστε τα κοντινά στην επιφάνεια κελιά του υπάρχοντος πλέγματος να μετατοπιστούν κατά σταθερή απόσταση μακριά από την επιφάνεια.
- ii) Πρόσθεση επιπλέον στρωμάτων στην ενδιάμεση απόσταση που δημιουργήθηκε.
- iii) Γίνεται έλεγχος του υπολογιστικού πλέγματος από το λογισμικό και σε περίπτωση που αυτός αποτύχει δεν γίνεται η τοποθέτηση των πλεγματικών διαστρωματώσεων.

- Προς αποφυγήν του τελευταίου προβλήματος ρυθμίζεται κατάλληλα η χαλαρότητα της ποιότητας του κώδικα γένεσης υπολογιστικού πλέγματος (Παράρτημα Γ).



Σχ.2.10 Πρόσθεση λεπτότερων στρωμάτων κελιών [13].

### 2.2.2 Χρήση του κώδικα Snapedge

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα σχετικά νέο εργαλείο του OpenFoam που αποσκοπεί στη βελτίωση του πλέγματος που δημιουργήθηκε από το SnappyHexMesh γύρω από καμπύλες επιφάνειες και δύσκολες γεωμετρικές σωμάτων. Ο χρήστης μπορεί να το προμηθευτεί ελεύθερα από το διαδίκτυο (<http://openfoam.nequam.se/cases/snapEdge.tgz>), και απαιτεί ξεχωριστή εγκατάσταση από το υπόλοιπο λογισμικό πακέτου του OpenFoam. Για την εγκατάσταση και λειτουργία του χρειαζόμαστε αρχικά να το «κατεβάσουμε» από το παραπάνω site, στη συνέχεια χρειάζεται να γίνει αποσυμπίεση του παραπάνω αρχείου, και τοποθέτηση του καταλόγου που δημιουργείται στο κατάλογο preprocessing που βρίσκεται μέσα στο φάκελο του OpenFoam. Έπειτα απαιτείται η πληκτρολόγηση της εντολής ./Allwmake και ο κώδικάς μας είναι έτοιμος να χρησιμοποιηθεί.

Προκειμένου να μπορεί να εκτελεστεί ο κώδικας snapEdge (Παράρτημα Δ) απαιτείται η ύπαρξη ενός αρχείου που θα αποτελεί μια συμβολική σύνδεση που θα οδηγεί στον κατάλογο που είναι αποθηκευμένο το αρχείο .stl του σώματος. Αυτό γίνεται με την πληκτρολόγηση της εντολής ln-s για το συγκεκριμένο stl που θέλουμε.

Το στάδιο εκτέλεσης του εργαλείου αυτού είναι αμέσως πριν την προσθήκη των στρωμάτων, για true δηλαδή τα δύο πρώτα βήματα και false το addLayers. Έτσι δημιουργείται ένα καινούργιο αρχείο points το οποίο πρέπει να αντικαταστήσει το παλαιό points που βρίσκεται μέσα στο φάκελο constant/polyMesh/points.

Ένα από τα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά τη διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής είναι η ύπαρξη πολλών μη-ορθογωνικών επιφανειών κυψελών (non orthogonal faces), ανωμαλίες και διαταραχές δηλαδή που είναι εμφανείς ιδιαίτερα στις έντονες ακμές και καμπύλες του σώματος, κάτι το οποίο εμπόδιζε και την αποτελεσματική επίλυση της ροής. Η δημιουργία αυτών των ανωμαλιών προκαλείται όταν καλείται ο κώδικας να αφαιρέσει τα εσωτερικά κελιά από ένα σώμα και να μορφοποιήσει τα υπόλοιπα ώστε να ακολουθούν την επιφάνειά του. Μια λύση που βρέθηκε και χρησιμοποιήθηκε μέχρι το πέρας της διπλωματικής εργασίας, προήλθε μέσα από τροποποίηση του κώδικα του snapEdge (Παράρτημα Δ) και συγκεκριμένα μέσα από το tolerance, τον καθορισμό δηλαδή των σημείων που θα μετακινηθούν, όπου χρησιμοποιήθηκε tolerance 0.6. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

- Συνοπτικά τα βήματα αποτελεσματικής λειτουργίας του εργαλείου snapEdge είναι:

1) Εκτέλεση του κώδικα snappyHexMesh με τις παρακάτω ρυθμίσεις :

Which of the steps to run (Οι δυνατές επιλογές είναι true, για να πραγματοποιηθεί και false για να μην πραγματοποιηθεί)

```
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers false;!!!!!!!
```

- Μέχρι εδώ έχει δημιουργηθεί ένας φάκελος polyMesh με points από το εργαλείο snappyHexMesh.
- 2) Εκτέλεση του κώδικα snapEdge με κατάλληλες ρυθμίσεις για την ελαχιστοποίηση της ύπαρξης non orthogonal faces.
- Δημιουργία καινούργιου αρχείου points και αντικατάσταση αυτού με το παλιό ./constant/polyMesh/points.

3) Εκτέλεση του κώδικα `snappyHexMesh` για την προσθήκη των επιθυμητών `layers`.

Which of the steps to run (Οι δυνατές επιλογές είναι `true`, για να πραγματοποιηθεί και `false` για να μην πραγματοποιηθεί)

```
castellatedMesh  false;  
snap             false;  
addLayers       true;!!!!!!!
```

- Δημιουργία τελικού `polyMesh`.

Συνεπώς μέσα από όλη αυτή τη διαδικασία δημιουργούμε ένα ορθότερο υπολογιστικό πλέγμα το οποίο θα μας βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη αριθμητική επίλυση της ροής.

## 2.3 Δημιουργία Πλέγματος για επίλυση ροής χρησιμοποιώντας μοντέλα τύρβης με συναρτήσεις τοίχου στο Ahmed Body

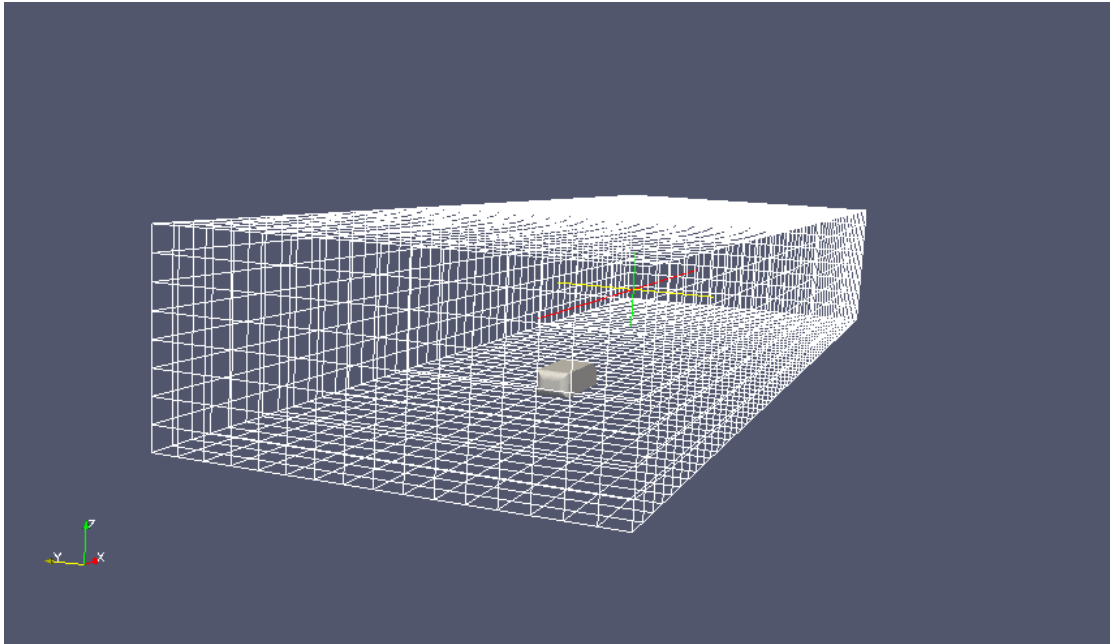
Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας δημιουργίας του υπολογιστικού χωρίου. Πρόκειται για μια αρκετά δύσκολη διαδικασία και προς διευκόλυνση του αναγνώστη θα γίνει εκτενής περιγραφή των αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα των πλεγματοποιητών. Αρχικά, πριν ξεκινήσει η ανάλυση του σώματος και της ροή γύρω από αυτό, πρέπει να ορίσουμε το μέγεθος του χωρίου επίλυσης. Αυτό γίνεται μέσω του BlockMesh το οποίο ουσιαστικά δημιουργεί ένα χωρίο το οποίο αποτελείται από εξαεδρικά κελιά και περιλαμβάνει το υπό μελέτη σώμα αλλά και ένα περιβάλλοντα συμμετρικό χώρο γύρω από αυτό. Δημιουργείται έτσι ένα ορθογωνικό χωρίο το οποίο προσομοιάζεται με μία αεροσήραγγα. Το απλό αυτό πλέγμα είναι ανεξάρτητο από τη γεωμετρία του σώματος και λειτουργεί ως βάση πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το υπολογιστικό μας πλέγμα.

Η δημιουργία του αρχικού πλέγματος-βάσης γίνεται μέσω ενός Dictionary που ονομάζεται BlockMeshDict (Παράρτημα Β) και ουσιαστικά μέσα σε αυτό ορίζουμε τις συντεταγμένες των κορυφών του αρχικού ορθογωνικού χωρίου. Οι συντεταγμένες αυτές εμφανίζονται με την εξής μορφή :

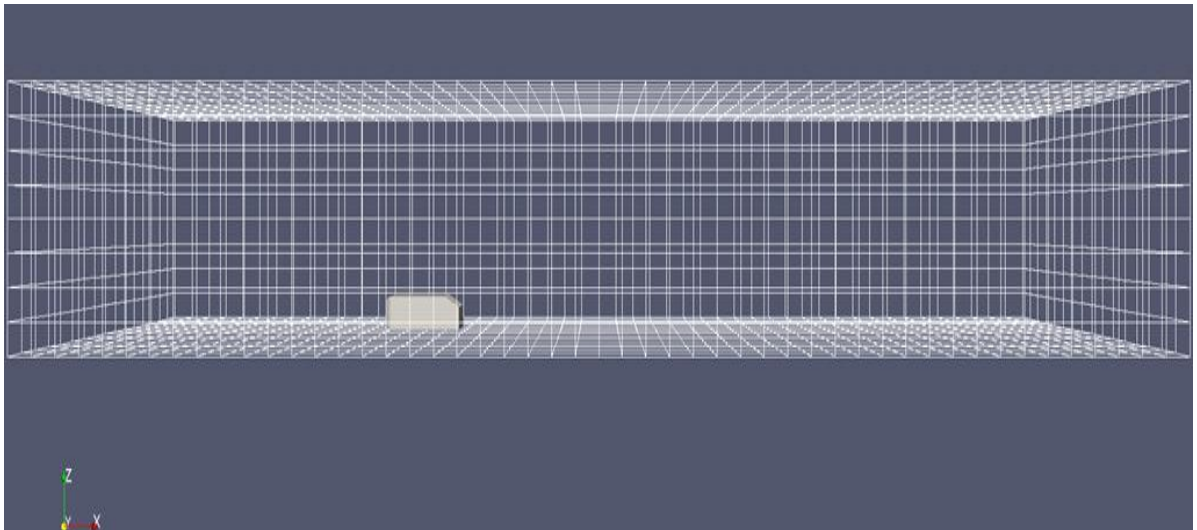
```
(-4 -2.011 0) // Κορυφή 0
(9 -2.011 0) // Κορυφή 1
(9 2.4 0) // Κορυφή 2
(-4 2.4 0) // Κορυφή 3
(-4 -2.011 2) // Κορυφή 4
(9 -2.011 2) // Κορυφή 5
(9 2.4 2) // Κορυφή 6
(-4 2.4 2) // Κορυφή 7
```

Ακόμα μέσα σε αυτό το dictionary ορίζονται και οι μικρότερες υποδιαιρέσεις καθώς και η πύκνωση του. Καλό είναι για τη διαδικασία δημιουργίας του υπολογιστικού χωρίου να θεωρηθεί καθολικά μια δεξιόστροφη φορά αρίθμησης των ακμών του.

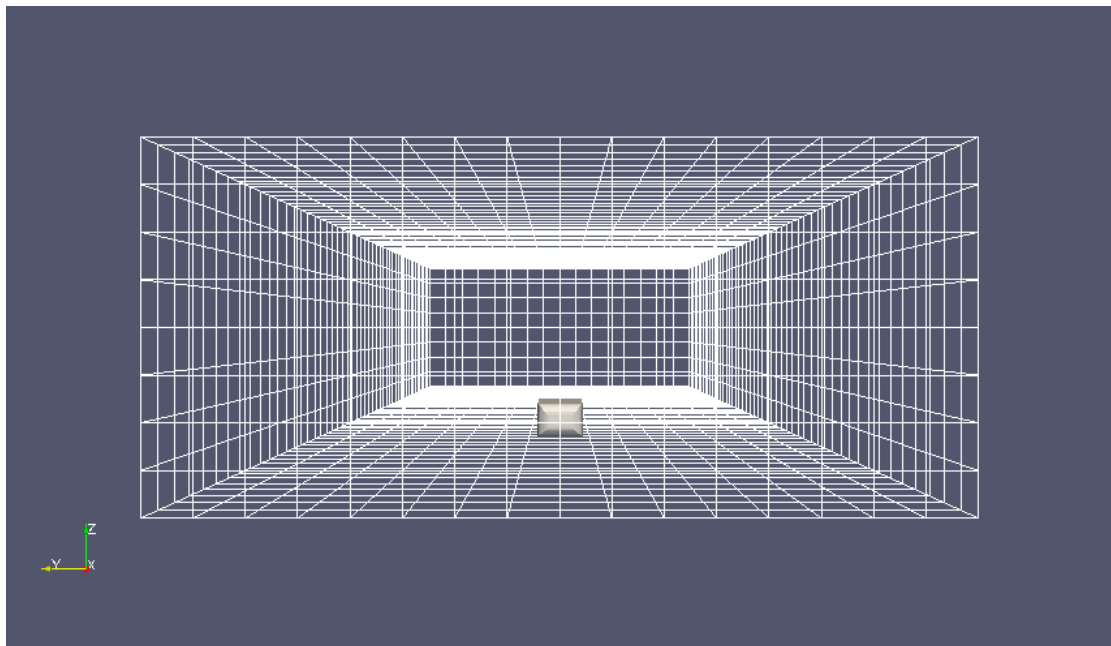
```
blocks
(
hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (50 16 8) simpleGrading (1 1 1) //Ορισμός αριθμών κελιών ανά άξονα.
```



Σχ.2.11. Το αρχικό πλέγμα βάσης εξαεδρικών κελιών.



Σχ2.12. Θέση του Ahmed body μέσα στο χωρίο.

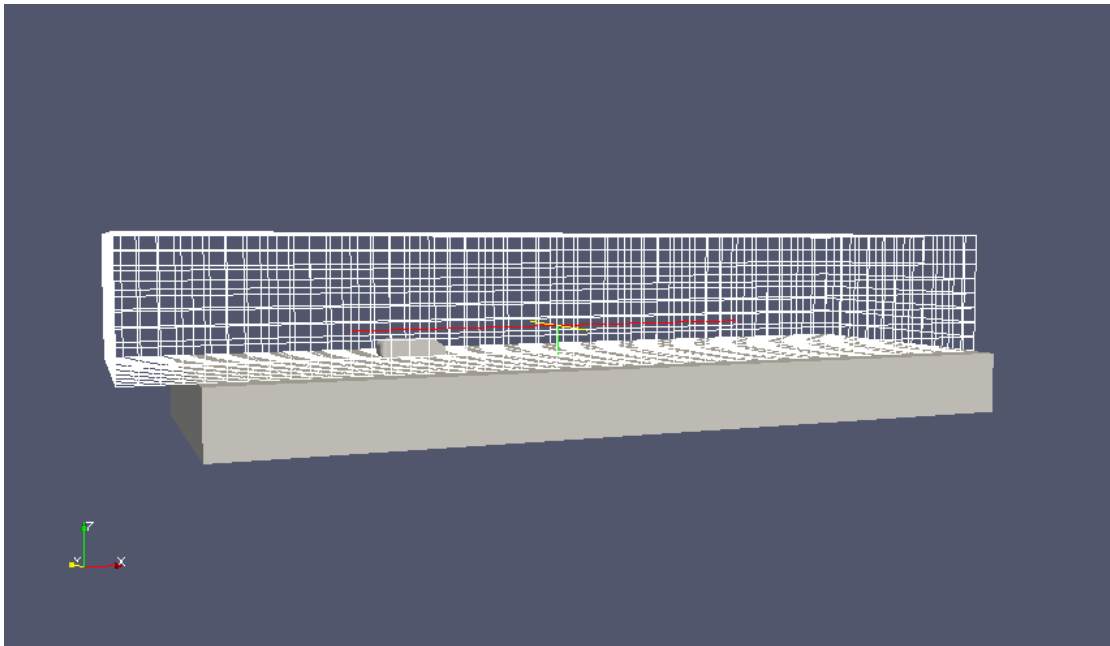


Σχ.2.13. Εμπρόσθια όψη του πλέγματος βάσης.

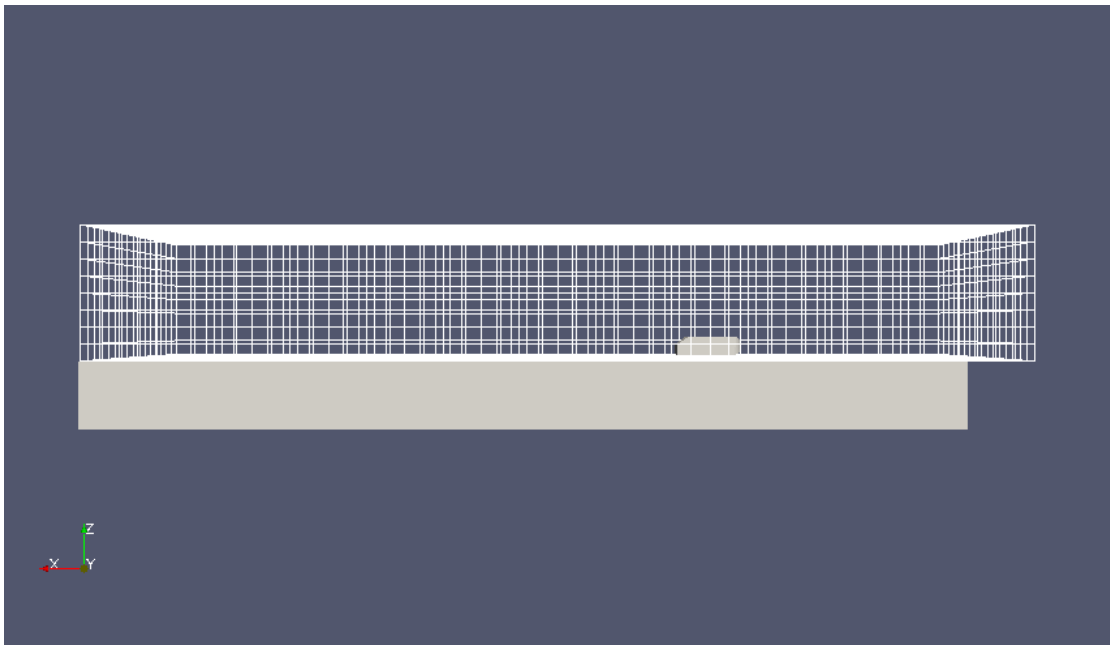
Επόμενο βήμα για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος είναι η τοποθέτηση σε κατάλληλη θέση των .stl αρχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Η θέση αυτή είναι μέσα στο κατάλογο triSurface όπου εκεί δίνονται :

- i) .stl του σώματος ahmed body, με ή χωρίς τις απαραίτητες τροποποιήσεις για την εκάστοτε case που εξετάζουμε.
- ii) .stl του οδοστρώματος το οποίο είναι σταθερό για όλες τις cases.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρότι θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό χωρίο στα όρια του οδοστρώματος, του δόθηκε περισσότερη έκταση κατά τον άξονα x, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ορθή πρόλεξη των φαινομένων που δημιουργούνται από τον ομόρρου του αυτοκινήτου. Συγκεκριμένα, το Ahmed body έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 4 μηκών σώματος από την είσοδο της ροής και 9 μηκών αντίστοιχα απόσταση από την έξοδο της.



Σχ.2.14. Πλέγμα-σώμα-δρόμος. Εμφανές περιθώριο πλέγματος δρόμου.



Σχ.2.15. Από άλλη οπτική γωνία το περιθώριο που αφήσαμε ανάμεσα στο δρόμο και το πλέγμα.



Στη συνέχεια ρυθμίζεται και εκτελείται το εργαλείο SnappyHexMesh (Παράρτημα Γ). Σημαντικό για την ορθή δημιουργία του υπολογιστικού χωρίου είναι να μην ξεχάσουμε να ρυθμίσουμε σε false την επιλογή της προσθήκης των layers καθώς πρέπει πρώτα να εκτελεστεί ο κώδικας snarEdge και στη συνέχεια να προστεθούν τα layers.

Κατά τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος δημιουργήθηκαν προβλήματα αδυναμίας του πλέγματος να ακολουθήσει την επιφάνεια του σώματος προκαλώντας έτσι διαταραχές εμφανής και στα αριθμητικά αποτελέσματα της ροής αλλά και εμφανή στην οπτική απεικόνιση του σώματος. Αυτά ήταν ιδιαίτερα εμφανή γύρω από τις καμπύλες του σώματος, τις ακμές του αλλά και κυρίως γύρω από μικρές επιφάνειες όπως είναι οι γεννήτριες στροβιλισμού οι οποίες σε κάθε πρόβλημα έχουν και διαφορετική γεωμετρία. Προς αποφυγήν αυτού του προβλήματος δημιουργήθηκαν κάποια refinement box στα οποία γίνεται περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος προκειμένου να μπορεί να «σέβεται» καλύτερα την επιφάνεια που δίνεται.

Τα Boxes αυτά δίνονται αρχικά με μορφή συντεταγμένων όπου ορίζουμε τις δύο αντιδιαμετρικές κορυφές του ορθογωνίου. Ένας τρόπος εύρεσης των σημείων αυτών είναι μέσα από την οπτική απεικόνιση του πλέγματος, όπου γύρω από το ahmed body μπορούμε χρησιμοποιώντας το γράμμα p να βλέπουμε κάθε φορά τις συντεταγμένες του σημείου στις τρεις διαστάσεις :

- refinementBox\_vortex  

```
type searchableBox;  
min (0.8336 -0.0049 0.3335);  
max (0.8645 0.42 0.356);
```

Επόμενη ρύθμιση που έγινε είναι στο refinement regions όπου επιλέγεται το επίπεδο πυκνότητας των παραπάνω περιοχών:

- refinementRegions  

```
refinementBox  
  
mode inside;  
levels ((1E15 3));
```

Στη συνέχεια ρυθμίζουμε το refinement surfaces, όπου εκεί γίνεται επιλογή του επιπέδου του refinement, δηλαδή το πόσες φορές θα διαιρεθούν τα κελιά πάνω στην επιφάνεια του σώματος. Έτσι ανάλογα με το refinement το οποίο επιλέγεται,

ρυθμίζεται και το πόσες φορές θα γίνει υποδιαίρεση σε κάθε κελί που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια του σώματος.

- refinementSurfaces

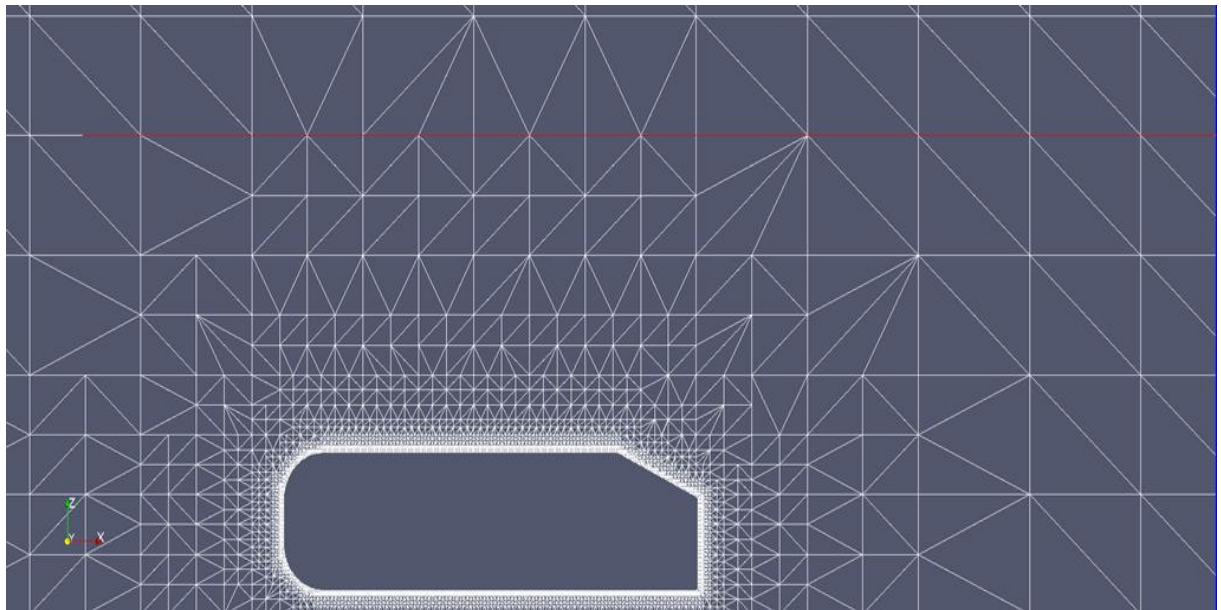
```
ahmedbody
```

```
// Surface-wise min and max refinement level  
level (6 7);
```

```
road
```

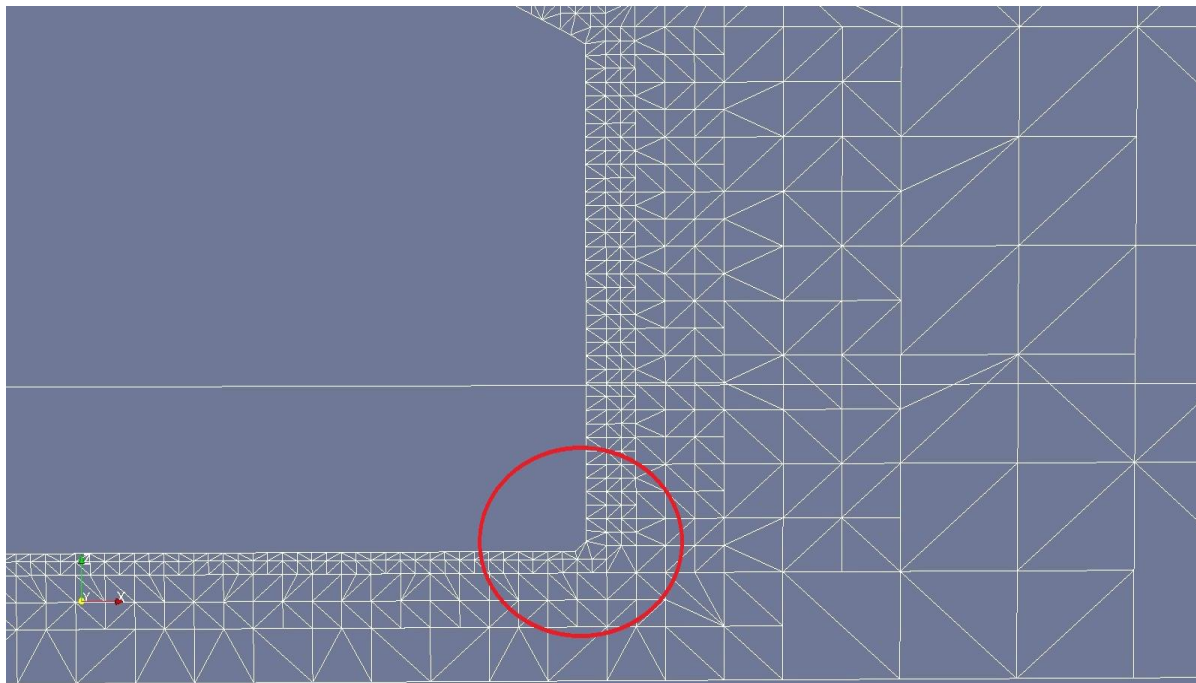
```
// Surface-wise min and max refinement level  
level (4 5);
```

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι για το επίπεδο πυκνότητας των κελιών της επιφάνειας του σώματος ζητούνται δύο αριθμοί. Ο πρώτος που είναι και το ελάχιστο επίπεδο πυκνότητας χρησιμοποιείται παντού ενώ ο δεύτερος που είναι και ο μέγιστος χρησιμοποιείται μόνο σε λεπτομέρειες και ακμές της γεωμετρίας.

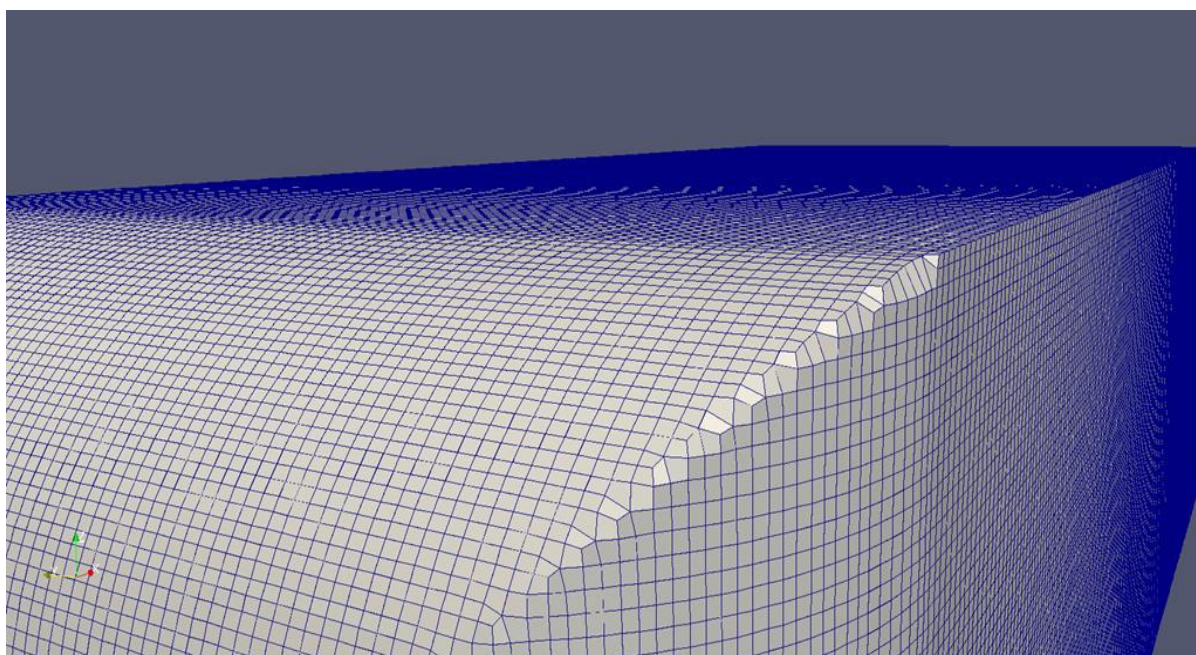


Σχ.2.16. Τομή του πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας, πύκνωση του πλέγματος μόνο πάνω στο σώμα.

- Στη συνέχεια παρατηρήσαμε ότι δημιουργούνται αρκετά προβλήματα και ατέλειες στις επιφάνειες του σώματος Σχ2.17 και Σχ2.18.



Σχ.2.17. Ατέλειες σε ακμή στο πίσω μέρος του σώματος. Τομή κάθετη στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ.2.18. Ατέλειες στις ακμές των καμπύλων επιφανειών.

Μια πρώτη επιλογή για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος θα ήταν να αυξηθούν οι επαναλήψεις που κάνει ο κώδικας κατά το ταίριασμα του πλέγματος, πράγμα υπολογιστικά μη χρονοβόρο και συνεπώς πολύ μικρό ποσοστό του υπολογιστικού χρόνου, ειδικά τη στιγμή που τα αποτελέσματα θα είναι εμφανή.

Μια δεύτερη επιλογή είναι με την αύξηση του επιπέδου πυκνότητας του πλέγματος, καθώς όσο μικρότερες είναι οι ακμές των κελιών που βρίσκονται πάνω στο σώμα τόσο καλύτερα θα ακολουθείται η γεωμετρία της επιφάνειας του σώματος.

- ahmedbody

```
// Surface-wise min and max refinement level  
level (7 8);
```

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα βελτιώνονται αλλά ορισμένες ατέλειες εξακολουθούν να υφίστανται. Έτσι μια αρχική σκέψη θα ήταν η συνέχεια της αύξησης της πυκνωσης του πλέγματος, πράγμα υπολογιστικά ασύμφορο και τρομερά χρονοβόρο αν σκεφτούμε το γεγονός ότι με αύξηση της πυκνωσης κατά ένα, ο αριθμός των κελιών τετραπλασιάστηκε.

Βάση πειραματικών αποτελεσμάτων που υπάρχουν από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες πάνω σε παρόμοιο πρόβλημα αποφασίστηκε να ακολουθηθεί μία άλλη ρύθμιση η οποία μας επιτρέπει την περαιτέρω ρύθμιση του πλέγματος μόνο σε περιοχές με ακμές. Αυτή η ρύθμιση είναι το `resolve FeatureAngle`. Ουσιαστικά στη ρύθμιση αυτή επιτρέπεται στο κώδικα να αναγνωρίζει αυτόματα τις περιοχές στη γεωμετρία του σώματος που παρουσιάζονται ακμές και στην περίπτωση που η γωνία η οποία δημιουργείται από τα δύο τεμνόμενα επίπεδα είναι μεγαλύτερη από τη τιμή της δοσμένης γωνίας τότε το πλέγμα πυκνώνει ακόμα περισσότερο. Το `resolve feature angle` που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι 20, καθώς θέλουμε να υπάρξει πυκνωμα του πλέγματος και στην ακμή που εμφανίζεται στο πίσω μέρος του σώματος όπου αρχίζει το κεκλιμένο επίπεδο.

- // Resolve sharp angles

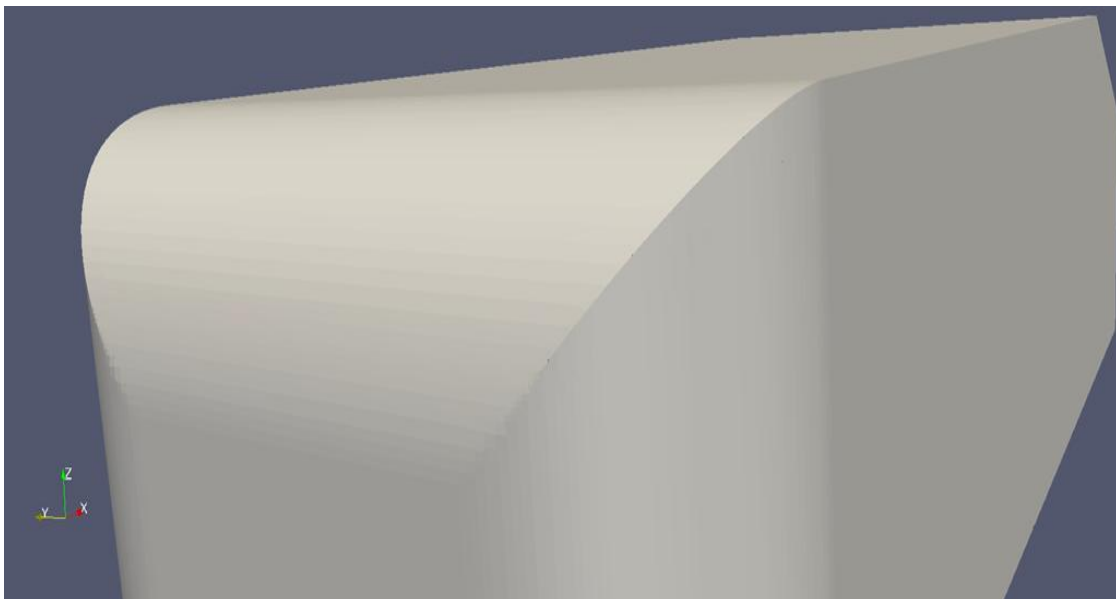
```
resolveFeatureAngle 20;
```

Επόμενο βήμα ήταν η κατάλληλη ρύθμιση του κώδικα ώστε να εκτελεί περισσότερες επαναλήψεις κατά τη διαδικασία ταίριασματος του πλέγματος με την

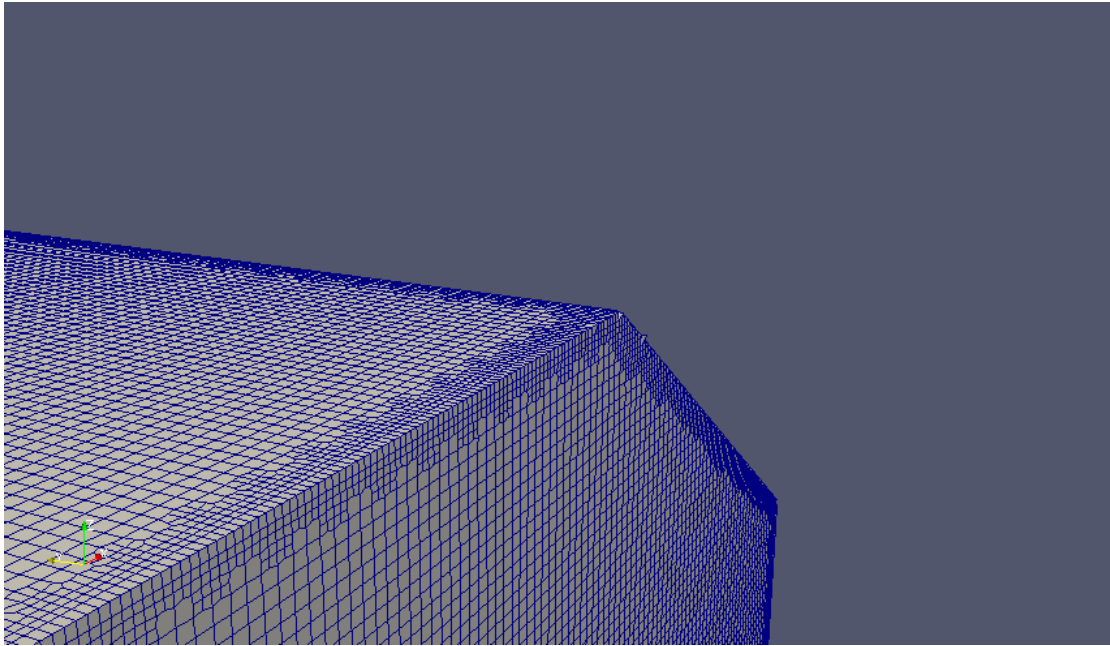
επιφάνεια του σώματος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται μέσα από το SnapControl που βρίσκεται μέσα στο αρχείο ελέγχου. Τέλος, ουσιαστικό παράγοντα στη βελτίωση και εξομάλυνση των παραπάνω διαταραχών αποτέλεσε η χρήση του εργαλείου snapEdge, το οποίο μας βοηθάει στην βελτίωση του πλέγματος κρατώντας το μέγεθος του σε λογικά πλαίσια.

Τέλος, βοήθεια στη βελτίωση του πλέγματος θα μπορούσε να δώσει ο αριθμός των επαναλήψεων (iterations), όπου ουσιαστικά ο αριθμός των επαναλήψεων καθορίζει την προσαρμογή του πλέγματος στην επιφάνεια και συνεπώς με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων γίνεται καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος ενώ ταυτόχρονα δεν αυξάνει το υπολογιστικό κόστος.

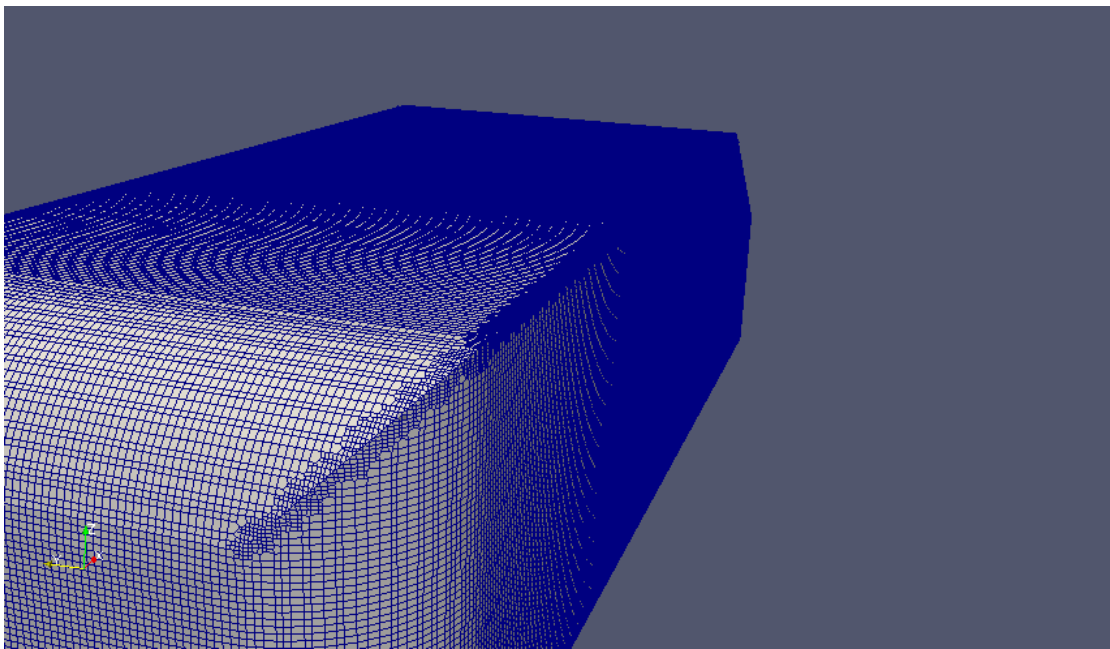
Συνεπώς, μετά την χρήση των παραπάνω εργαλείων και των αλλαγών των παραμέτρων τους, παρατηρείται ότι έχει δημιουργηθεί ένα αρκετά καλύτερο και πολύ πιο αξιόπιστο πλέγμα που σέβεται και τηρεί την επιφάνεια του σώματος Σχ.2.18-2.21.



Σχ.2.18. Εμφανή βελτιωμένα αποτελέσματα στις καμπύλες του Ahmed body.

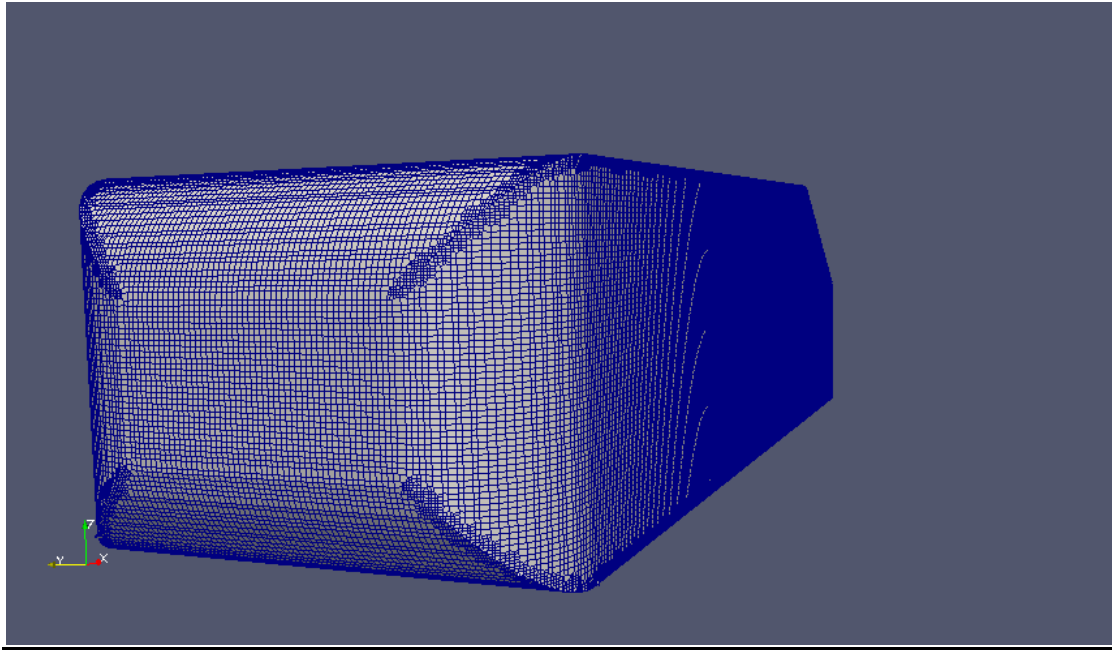


Σχ.2.19. Το πλέγμα σέβεται τις γωνίες του αυτοκινήτου.



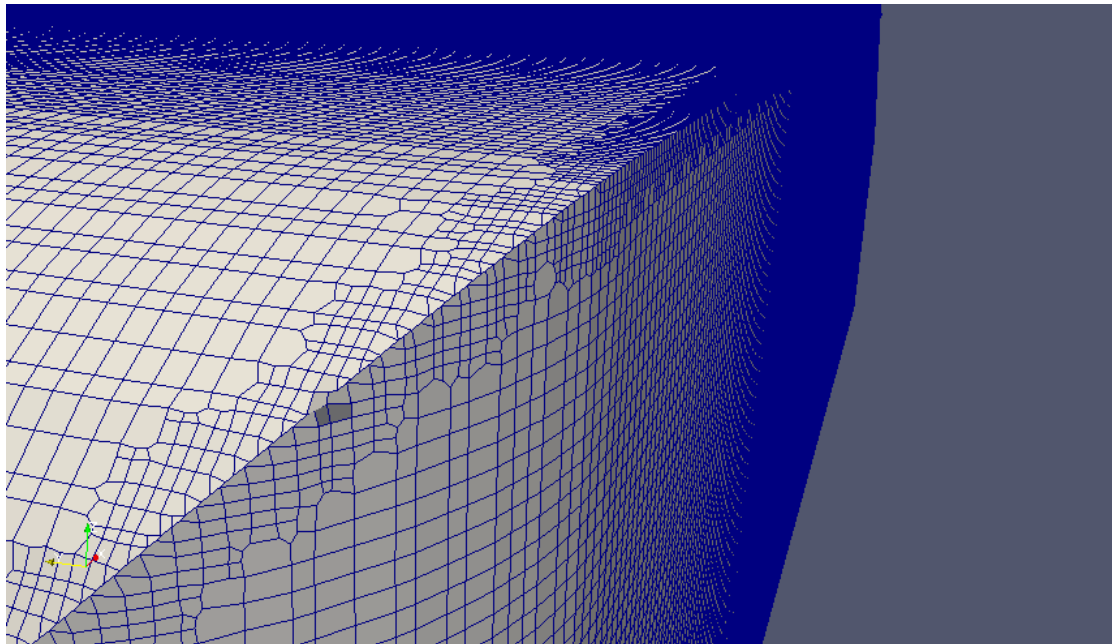
Σχ.2.20. Οι καμπύλες του αυτοκινήτου δεν παρουσιάζουν ατέλειες πλέον.



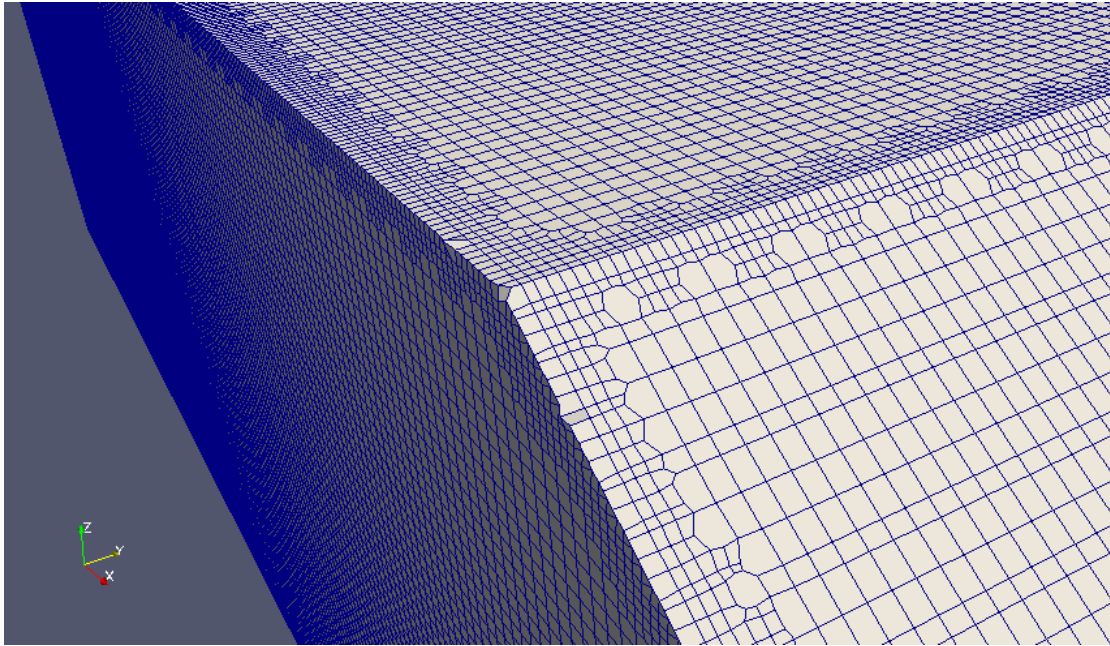


Σχ.2.21. Σαφώς βελτιωμένη εικόνα των διαταραχών του ahmed έπειτα από χρήση των παραπάνω εργαλείων.

Ωστόσο ακόμα και μετά την εκτέλεση των παραπάνω εργαλείων παρουσιάζονται ατέλειες στο πλέγμα Σχ.2.22 και Σχ.2.23.



Σχ.2.22. Ατέλεια στο πλέγμα στις καμπύλες.



Σχ.2.23. Ατέλεια στο πλέγμα στις πίσω γωνίες του Ahmed.

Στη συνέχεια, το επόμενο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν ο απότομος τρόπος μετάβασης από το επίπεδο πυκνότητας 0 του πλέγματος-βάσης στο επίπεδο 7 που υπάρχει γύρω από τις ακμές της επιφάνειας του σώματος. Λύση σε αυτό έδωσε η οριοθέτηση κάποιων περιοχών γύρω από το σώμα όπου εφαρμόστηκαν σε αυτά τα επιθυμητά επίπεδα πύκνωσης του πλέγματος ώστε να υπάρχει βαθμιαία αλλαγή του πυκνώματος.

Έτσι στην ενότητα geometry δηλώθηκαν τέσσερα ορθογώνια στα οποία έγινε βαθμιαία πύκνωση του πλέγματος (τα πιο αποτελεσματικά ορθογώνια ήταν της διπλωματικής εργασίας του Κοντογιάννη [2]). Ορισμός αυτών έγινε ορίζοντας δύο σημεία, το πίσω και κάτω αριστερά και το εμπρός και πάνω δεξιά. Εντός κάθε τέτοιου ορθογωνίου ορίζεται και η πύκνωση του μέσα από το refinementregions του αρχείου ελέγχου.

Τέλος δημιουργείται και μία επιπλέον ορθογωνική περιοχή στο πίσω μέρος του Ahmed body και επιτυγχάνεται έτσι ένα πιο πυκνό πλέγμα στην περιοχή του ομόρρου όπου εκεί έχουμε και φαινόμενα ανακυκλοφορίας και αποκόλλησης της ροής.

Μετά από αυτά τα βήματα και τις ρυθμίσεις εκτελείται το snapedge και έτσι δημιουργείται ένας καινούργιος κατάλογος στον οποίο έχουν προστεθεί τα διορθωμένα σημεία (points). Στη συνέχεια, το μόνο το οποίο απομένει να γίνει για την ολοκλήρωση της διαδικασίας γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος είναι η προσθήκη των επιπλέον στρωμάτων κελιών (layers). Προκειμένου να προστεθούν οι διαστρωματώσεις κελιών στο έδαφος χρησιμοποιείται άλλο ένα αρχείο .stl το



οποίου μόνο η μία πλευρά ήταν εντός του χωρίου (road.stl) και τοποθετείται και αυτό μαζί με το .stl του αρχείου ahmed body μέσα στο ./constant/triSurface.

Κατά τη διαδικασία δημιουργίας των layers δημιουργούνται προβλήματα υπολογιστικά και χρονοβόρα καθώς σε αρκετές περιπτώσεις δεν φτάνει ακόμα και η μνήμη ενός τετραπύρηνου υπολογιστή τελευταίας τεχνολογίας με αποτέλεσμα να υστερεί αρκετά η δημιουργία του πλέγματος ή ακόμα και να αποτυγχάνει η διαδικασία.

Συνοψίζοντας, γνωρίζοντας ότι θα χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις τοίχου για την επίλυση της ροής, όπου έχουμε μοντέλα τύρβης με υψηλό αριθμό Reynolds, στην περιοχή addLayersControl του αρχείου ρυθμίσεων, επιλέχθηκε να γίνει προσθήκη 3 στρωμάτων στο σώμα και 2 στο δρόμο.

### 3. Επίλυση της ροής στη βασική γεωμετρία του Ahmed body και υπολογισμός συντελεστών αντίστασης και άνωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν προκειμένου να γίνει επίλυση της ροής και να υπολογιστούν οι συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα και με όσο το δυνατόν λιγότερο υπολογιστικό κόστος. Μέχρι εδώ, με τα εργαλεία που περιγράφηκαν στα παραπάνω κεφάλαια, έχει δημιουργηθεί ένα επαρκώς καλό πλέγμα που μπορεί με ακρίβεια να μας οδηγήσει σε αριθμητικά αποτελέσματα.

Τα παραπάνω βήματα πραγματοποιούνται με μία λογική σειρά, από τον καθορισμό των οριακών συνθηκών [10], [11], [12] την πιστοποίηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά αλλά και επιλογές που έγιναν με σκοπό την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους.

Για την επίλυση των μεγεθών της ροής χρησιμοποιείται κώδικας επίλυσης μόνιμης ασυμπίεστης ροής συνεκτικού ρευστού. Ο κώδικας με τα παραπάνω χαρακτηριστικά περιλαμβάνεται στο OpenFoam και ονομάζεται SimpleFoam. Στο κώδικα αυτό και συγκεκριμένα στο controlDict αρχείο προστέθηκε μία ρουτίνα ώστε σε κάθε επανάληψη να υπολογίζονται οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης του οχήματος, καθώς και οι αντίστοιχες δυνάμεις τους.

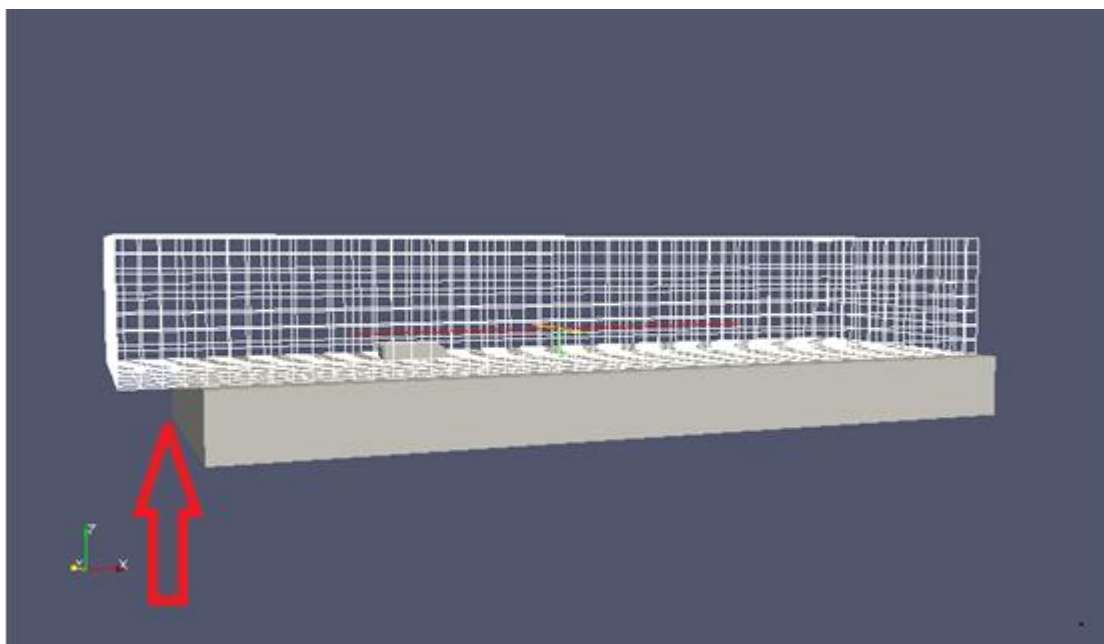
#### 3.1 Χαρακτηριστικά ροής και οριακές συνθήκες

Οι συνθήκες ροής καθορίζονται από τα πειράματα που θα προσομοιωθούν ώστε να γίνει πιστοποίηση των αποτελεσμάτων στη συνέχεια και είναι τα εξής :

- a) Κινηματική συνεκτικότητα ρευστού (αέρας):  $15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
- b) Πυκνότητα ρευστού (ασυμπίεστο ρευστό) :  $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$
- c) Ταχύτητα αδιατάρακτης ροής :  $40 \text{m}/\text{s}$
- d) Αριθμός Reynolds ροής :
  - i) (μήκος αναφοράς το ύψος του σώματος) :  $Re=768,000$
  - ii) (μήκος αναφοράς το μήκος του σώματος) :  $Re=2.8 \times 10^6$

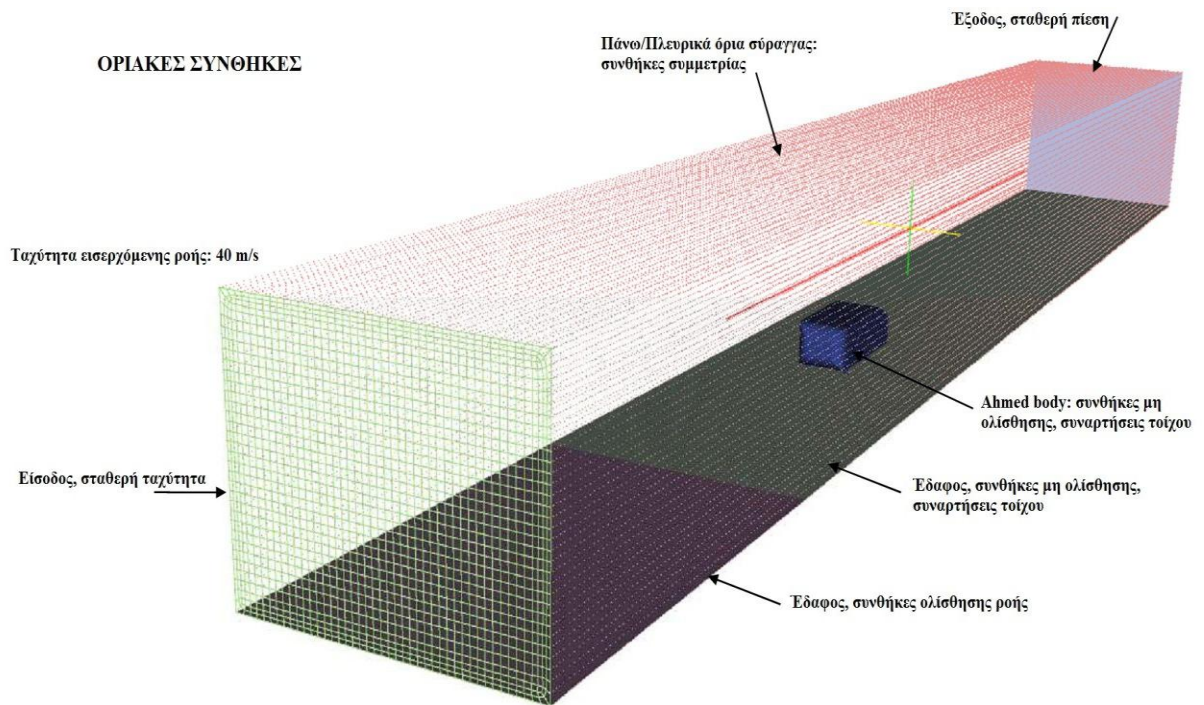
Όπως έχει προαναφερθεί, αφέθηκε περιθώριο ενός μέτρου από την είσοδο της ροής έτσι ώστε να μπορεί να υπάρχει μια περιοχή διαμόρφωσης της ροής και να είναι δυνατός ο έλεγχος της ανάπτυξης του οριακού στρώματος, ουσιαστικά

ρυθμίζοντας το σημείο στο οποίο αρχίζει να δημιουργείται, χωρίς να επηρεάζεται η απόσταση του σώματος από το χωρίο Σχ.3.1.



Σχ.3.1. Περιθώριο ενός μέτρου από την είσοδο της ροής.

Ακόμα έγινε επιλογή η οριακή συνθήκη της ταχύτητας στο έδαφος να έχει την τιμή 40 m/s, ίση δηλαδή με αυτή της ροής, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα πιστοποίησης των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης της ροής με τα πειραματικά δεδομένα από τη ροή σε σήραγγα. Συνεπώς στην είσοδο έχουμε ταχύτητα 40 m/s και μηδενική παράγωγο πίεσης. Στην έξοδο μηδενική παράγωγο ταχύτητας και στην έξοδο μηδέν πίεση (πίεση αναφοράς). Στα άνω και πλευρικά όρια έχουμε συνθήκες συμμετρίας και για την ταχύτητα και για την πίεση. Στην κάτω επιφάνεια, μέχρι και ένα μέτρο μετά την είσοδο έχουμε συνθήκες μη εισχώρησης για την ταχύτητα και μηδενική κάθετη παράγωγο για την πίεση. Στο έδαφος και στο κινούμενο δρόμο, εξαιρουμένου του ενός μέτρου, έχουμε 40 m/s για την ταχύτητα και μηδενική κάθετη παράγωγο για την πίεση. Τέλος στο τοίχωμα του Ahmed body έχουμε ταχύτητα (0,0,0) και συναρτήσεις τοίχου και μηδενική κάθετη παράγωγο στη πίεση. Συνολικά οι οριακές συνθήκες της ροής φαίνονται στο Σχ.3.2.



Σχ.3.2. Οριακές συνθήκες στο χωρίο ροής.

### 3.2 Επιλογή μοντέλου τύρβης και επίλυση της ροής

Τα προς επιλογή μοντέλα τύρβης ήταν δύο. Το ένα ήταν το Spalart Allmaras [4], για υψηλούς αριθμούς Reynolds, το οποίο χρησιμοποιεί μια διαφορική εξίσωση μέσω της οποίας υπολογίζεται και χρησιμοποιείται μια παρεμφερής της συνεκτικότητας μεταβλητή ( $\nu$ ) και το άλλο ήταν το k- $\omega$  SST υψηλών αριθμών Reynolds, το οποίο αποτελεί ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, ενός κλασσικού k- $\omega$  κοντά στα στερεά τοιχώματα και του k- $\epsilon$  στην ελεύθερη ροή. Γνωρίζοντας αποτελέσματα και για τα δύο αυτά μοντέλα τύρβης από τις διπλωματικές εργασίες των Λάππα [1] και Κοντογιάννη [2] επιλέχθηκε το δεύτερο μοντέλο τύρβης το οποίο έχει παρατηρηθεί ότι είναι πολύ ευαίσθητο στις συνθήκες τύρβης που καθορίζονται στην είσοδο και έχει καλή συμπεριφορά σε αποκολλημένες ροές που παρατηρούνται σε αυτοκίνητα.

- Οι οριακές συνθήκες στα τοιχώματα είναι:  $k=0$  και  $\omega=10\frac{6\nu}{\beta_1 y^2}$ .

Η διαδικασία περισυλλογής πειραματικών αποτελεσμάτων της ροής ξεκίνησε με την επίλυση των Ahmed 25 και Ahmed 35, δηλαδή για γωνίες κλίσης  $25^\circ$  και  $35^\circ$  αντίστοιχα της πίσω κεκλιμένης επιφάνειας. Στους πίνακες που παρουσιάζονται

παρακάτω έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα και έτσι διαπιστώθηκε η αξιοπιστία του πλέγματος για την συνέχεια της διαδικασίας επίλυσης της ροής.

Εξαιτίας της τροποποίησης της πύκνωσης του πλέγματος εμφανίστηκαν αποτελέσματα, των οποίων η απόλυτη τιμή της διαφοράς από τα πειραματικά ήταν μεγαλύτερη από αυτή των προηγούμενων διπλωματικών εργασιών. Ωστόσο η απόκλιση αυτή της τιμής δεν συνεπάγεται λάθος του πλέγματος. Η αύξηση της πύκνωσης στο SnappyHexMesh και η επιμέρους διαφοροποίηση του tolerance του SnapEdge δημιούργησαν την απόκλιση των τιμών των συντελεστών αντίστασης και άνωσης συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα Πίνακες 3.1 και 3.2.

Παράγοντα απόκλισης της τιμής της διαφοράς αποτέλεσε και το επιπλέον refinement box το οποίο προστέθηκε με την επιμέρους αύξησης της πυκνότητας του προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του πλέγματος στις καμπύλες και τις ακμές της επιφάνειας του Ahmed. Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός και πρέπει να τονιστεί, ότι όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια γύρω από την οποία καλείται ο πλεγματοποιητής SnappyHexMesh να δημιουργήσει πλέγμα, τόσο πιο δύσκολο του είναι να σεβαστεί την εκάστοτε δοσμένη επιφάνεια.

### 3.3. Μελετηθείσες Περιπτώσεις

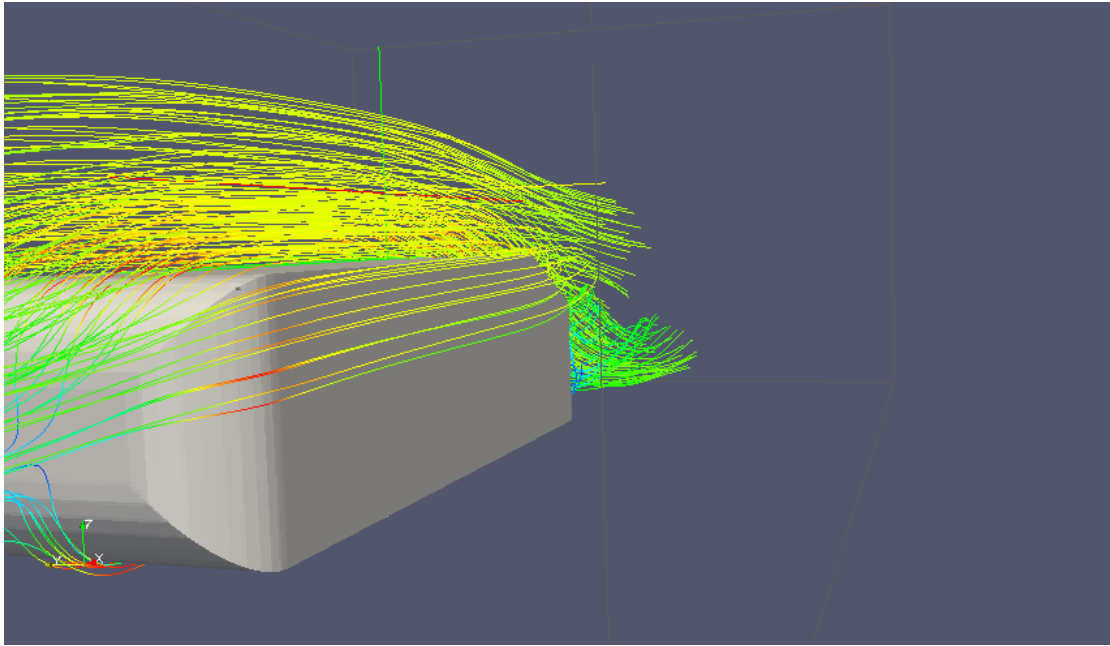
Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας θα πραγματοποιηθεί προσπάθεια βελτίωσης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του πρότυπου μοντέλου αυτοκινήτου Ahmed. Θα γίνει μελέτη του Ahmed 25 και του Ahmed 35. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα βάση των οποίων έγινε σύγκριση και έπειτα προσπάθεια μείωσης των συντελεστών αντίστασης και άνωσης προέκυψαν από την επίλυση του υπολογιστικού πλέγματος και παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 3.3.1. Ahmed 25°

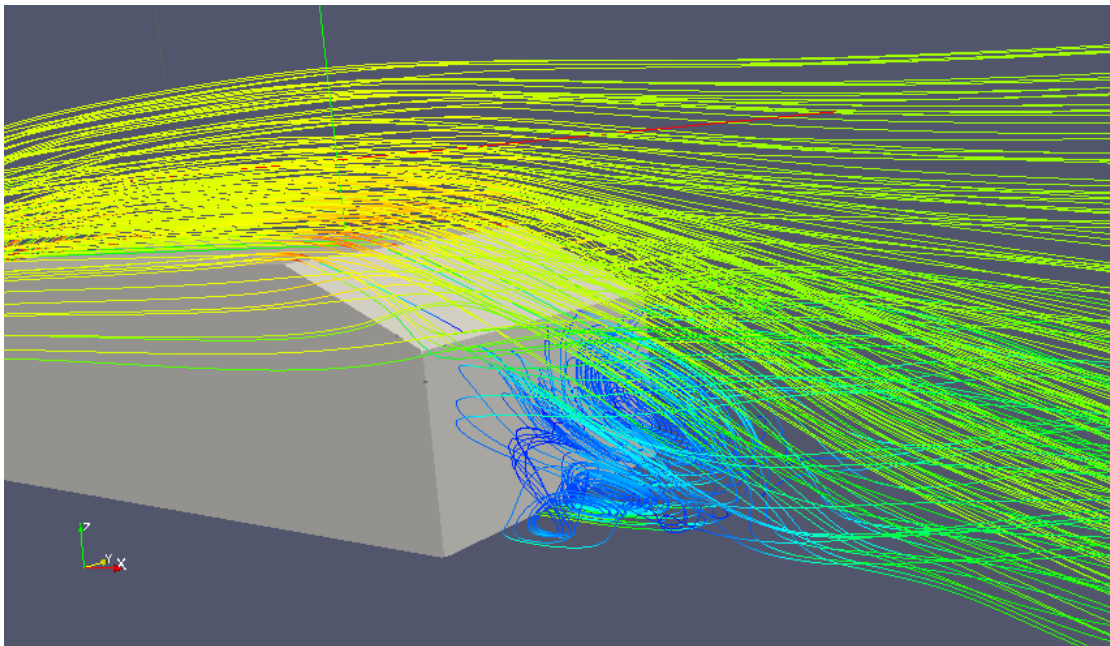
Χρησιμοποιώντας την ανωτέρω διαδικασία γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος όπως περιγράφηκε παραπάνω και επιλέγοντας τις οριακές συνθήκες που αναφέρθηκαν, τα αποτελέσματα της επίλυσης της ροής φαίνονται στο Πίνακα 3.1 και στα Σχ.3.2 έως και 3.5. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν των συντελεστών αντίστασης και άνωσης παρουσιάζονται μειωμένα για τη κυρίως γεωμετρία του Ahmed αυτοκινήτου συγκριτικά με παλαιότερες διπλωματικές εργασίες που έχουν ολοκληρωθεί. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαφορετική πυκνωση που ρυθμίστηκε για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος, προκειμένου ο πλεγματοποιητής SnappyHexMesh να ακολουθεί καλύτερα την γεωμετρία του αυτοκινήτου. Ακόμα χρειάστηκε πυκνότερο πλέγμα προκειμένου να σέβονται καλύτερα οι μικρές και καμπύλες γεωμετρίες των γεννητριών στροβιλισμού.

	Ahmed25
Cd	0,2709
Cl	0,2591
Drag(N)	28,2
Lift(N)	27,87

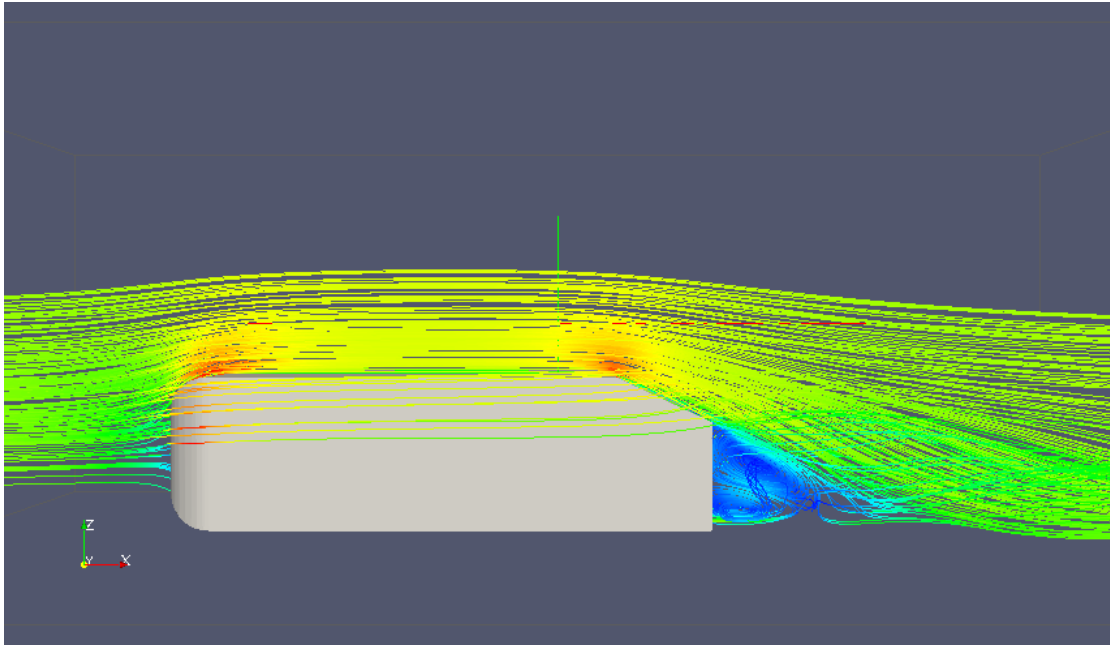
Πίνακας 3.1. Υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν για το Ahmed25.



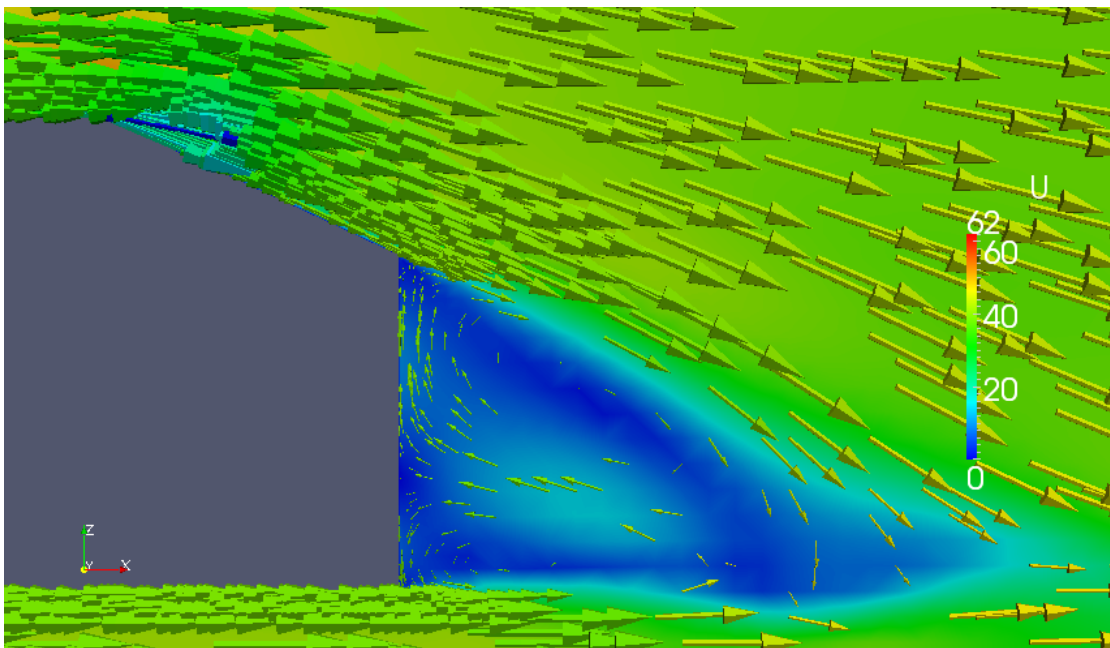
Σχ3.2. Ahmed25. Γραμμές Ροής γύρω από την απλή γεωμετρία του αυτοκινήτου.



Σχ.3.3. Ahmed25. Από άλλη όψη οι Γραμμές Ροής.



Σχ.3.4. Ahmed25. Έντονη ανακυκλοφορία της ροής στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου.



Σχ.3.5. Ahmed25. Παρουσίαση της πορείας που τείνει να ακολουθήσει η ροή.

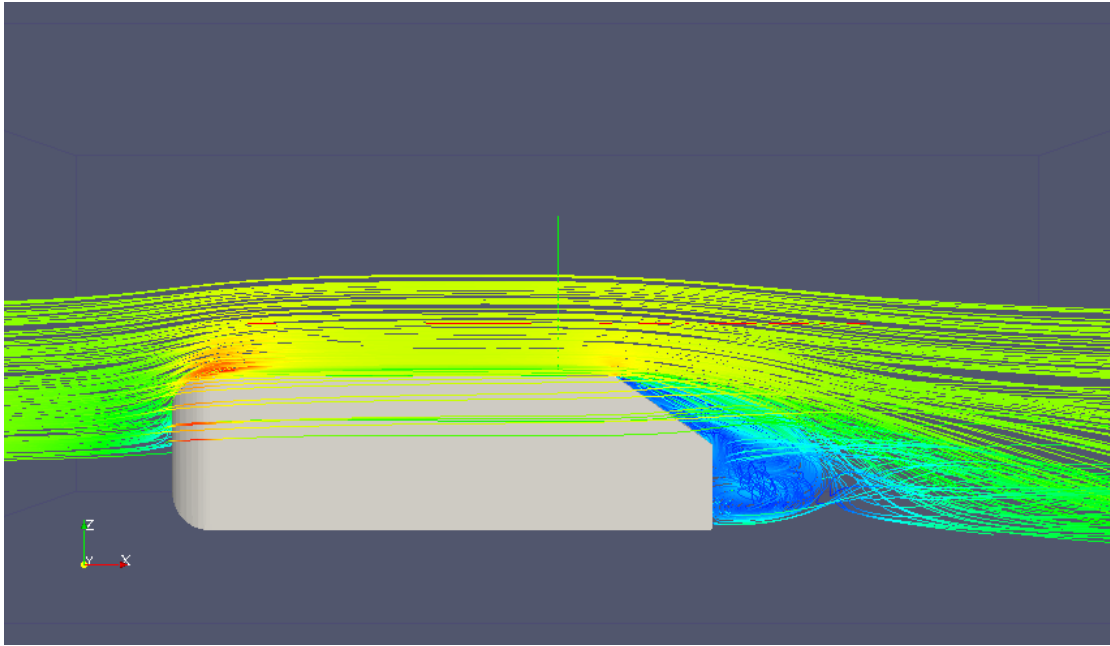


### 3.3.2 Ahmed 35°

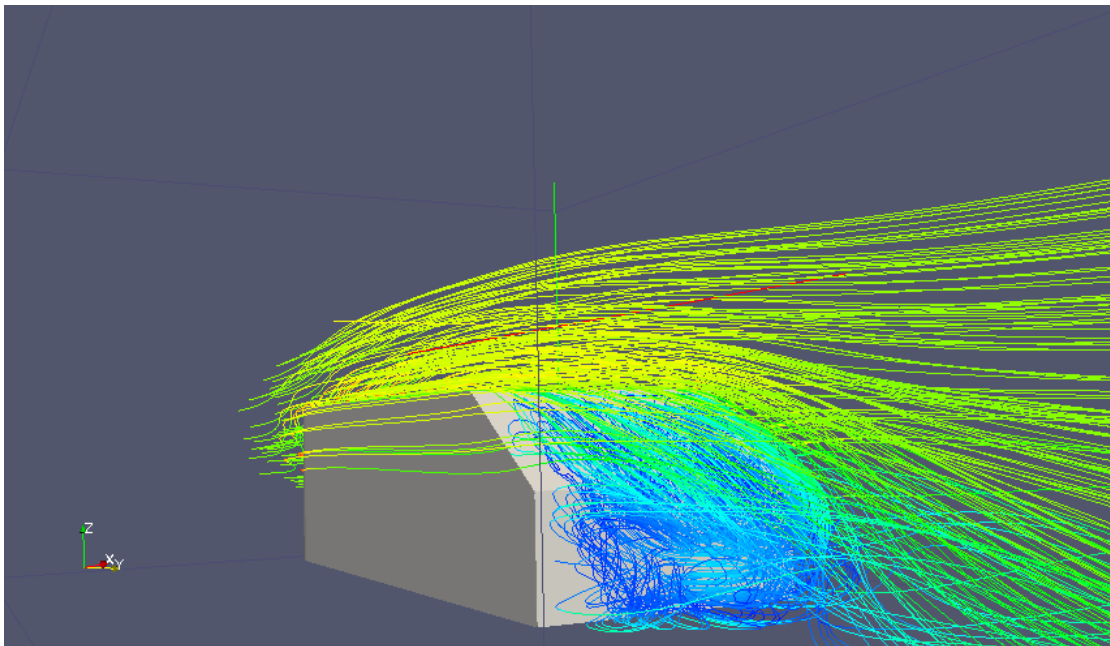
Όμοια με το Ahmed 25 έτσι και εδώ τα αποτελέσματα των συντελεστών αντίστασης και άνωσης βάση των οποίων θα συγκριθεί και θα μελετηθεί η αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου προέκυψαν από επίλυση της ροής με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, γύρω από την απλή γεωμετρία του Ahmed 35. Ακόμα οι τιμές των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν διαφέρουν από τα αποτελέσματα των διπλωματικών κ. Κοντογιάννη και κ. Λάππα, καθώς όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε διαφορετική πύκνωση του μοντέλου πράγμα που προκάλεσε και την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της ροής δίνονται στο πίνακα 3.2 και στα Σχ.3.6 έως 3.9.

	Ahmed35
Cd	0,304
Cl	0,0608
Drag(N)	32,78
Lift(N)	6,53

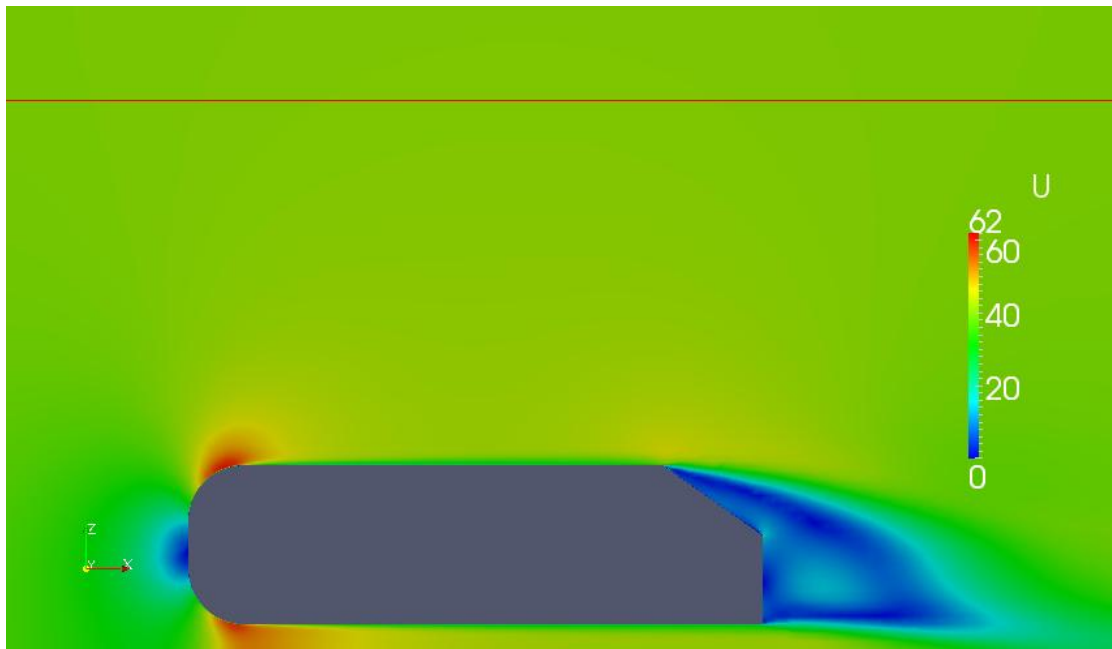
Πίνακας 3.2 Υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν για το Ahmed 35.



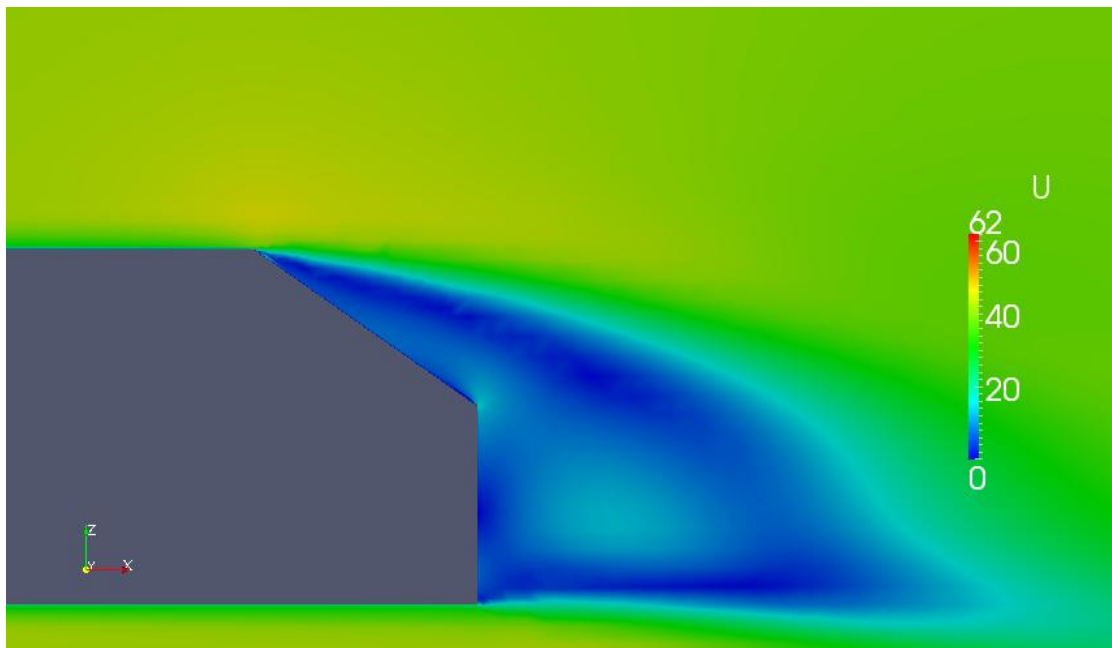
Σχ.3.6. Γραμμές Ροής γύρω από το Ahmed 35.



Σχ.3.7. Ahmed 35. Άλλη όψη των γραμμών ροής.



Σχ.3.8. Αποκόλληση της ροής στο Ahmed 35.



Σχ.3.9. Ahmed 35. Κοντινότερη όψη αποκόλλησης της ροής.

## 4. Βελτίωση της ροής με χρήση γεννητριών στροβιλισμού

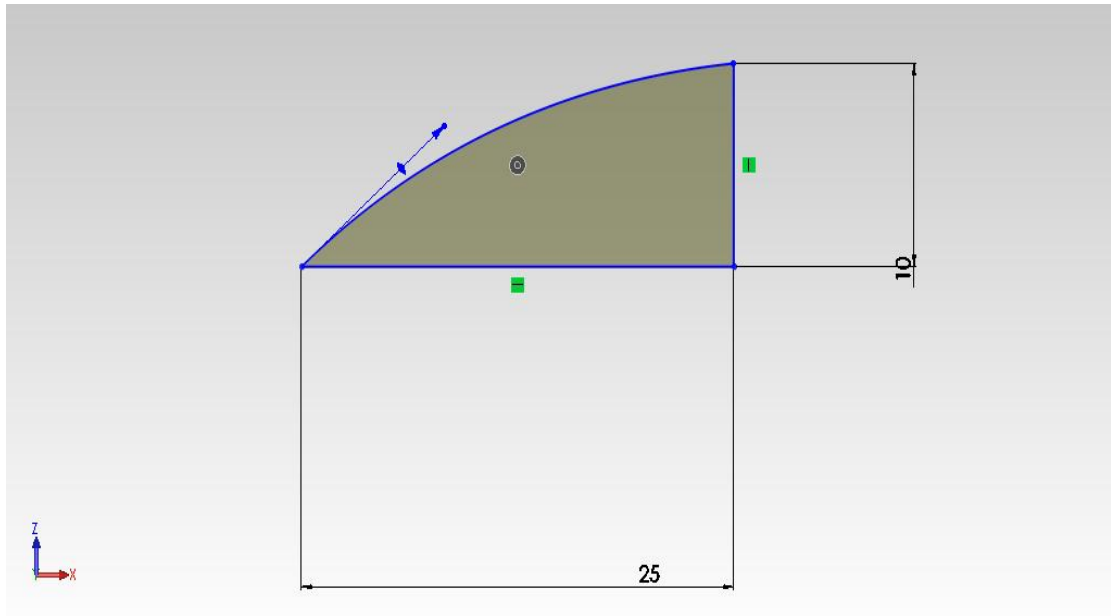
### 4.1 Περιγραφή των υπό μελέτη περιπτώσεων

Πειραματικά έχει βρεθεί από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες [1],[2] ότι και για το Ahmed 25, αλλά και για το Ahmed 35, η αποκόλληση της ροής δημιουργείται προς το τέλος του κεκλιμένου επιπέδου. Εκεί είναι και το σημείο πάνω στο οποίο θα βασιστούμε και θα δημιουργήσουμε τις διαφορετικές μας περιπτώσεις με τις γεννήτριες στροβιλισμού.

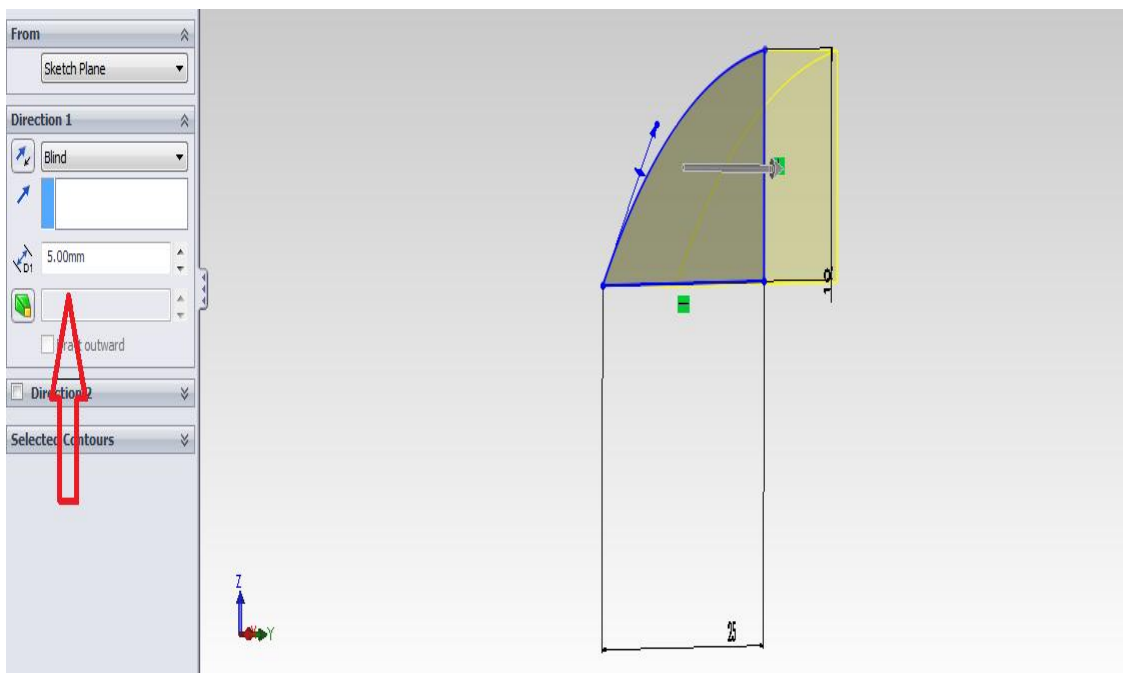
Οι κατασκευαστές και οι σχεδιαστές αναφέρουν χαρακτηριστικά για το θέμα των γεννητριών στροβιλισμού ότι η αεροδυναμική συμπεριφορά ενός αυτοκινήτου βελτιώνεται αναλογικά με την αύξηση του αριθμού των γεννητριών στροβιλισμού μέχρι ένα συγκεκριμένο αριθμό ενώ με την υπέρβαση του τα αποτελέσματα αλλοιώνονται. Το αν αυτή η πρόταση είναι αληθής αποτελεί και έναν από τους στόχους διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω μία γεννήτρια στροβιλισμού Σχ.4.1 επιλέχθηκε να σχεδιαστεί με απλή γεωμετρία δύο ευθειών, μίας καμπύλης spline διαφορετικής γωνίας με την εφαπτόμενη της ευθείας κάθε φορά και ένα offset 5mm Σχ.4.2. Αυτή η απλή γεωμετρία επιλέχθηκε προκειμένου να μπορούμε να γνωρίζουμε πως η διαφοροποίηση της γεωμετρίας της γεννήτριας στροβιλισμού θα επιφέρει και τις αντίστοιχες αλλαγές στα πειραματικά αποτελέσματα της ροής. Στη συνέχεια, εξετάζονται διαφορετικές γεωμετρίες των γεννητριών στροβιλισμού επιθυμώντας έτσι να βρεθεί ένα βέλτιστο σχήμα γεωμετρίας.

Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος στο αν μία γεννήτρια στροβιλισμού τοποθετημένη με κλίση ως προς την αξονοσυμμετρική της επιφάνειας δημιουργεί καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου [8],[9] έναντι της απλής συμμετρικής και ευθείας διάταξης της. Αρκετές είναι οι εταιρείες οι οποίες ασχολούνται με την μελέτη της εύρεσης ενός βέλτιστου σχήματος γεννήτριας η οποία, τοποθετημένη με κλίση πάνω στην επιφάνεια θα επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

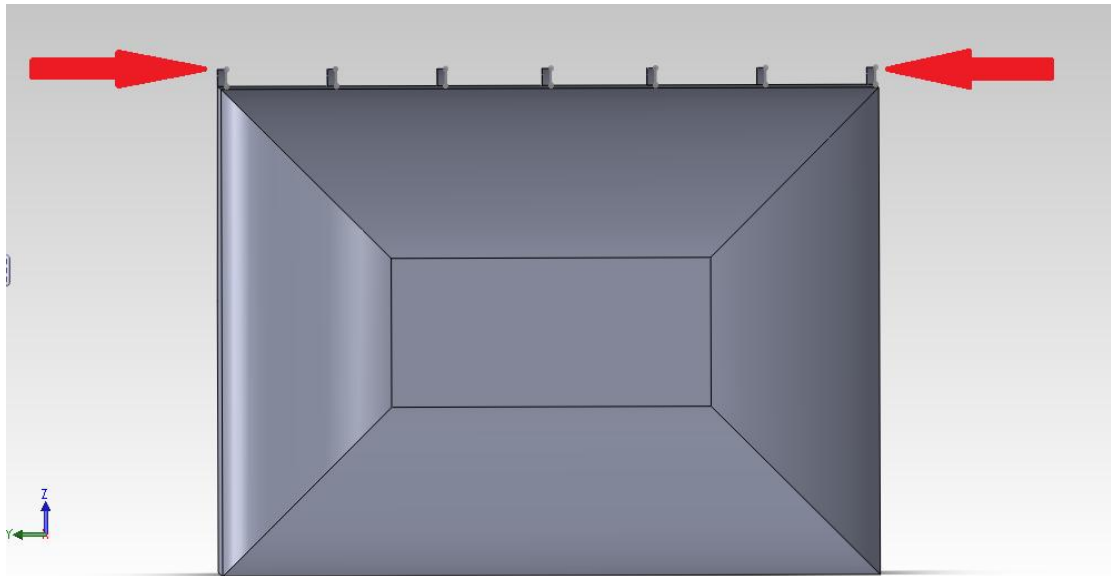


Σχ.4.1. Μία από τις υπό μελέτη γεννήτριες στροβιλισμού.

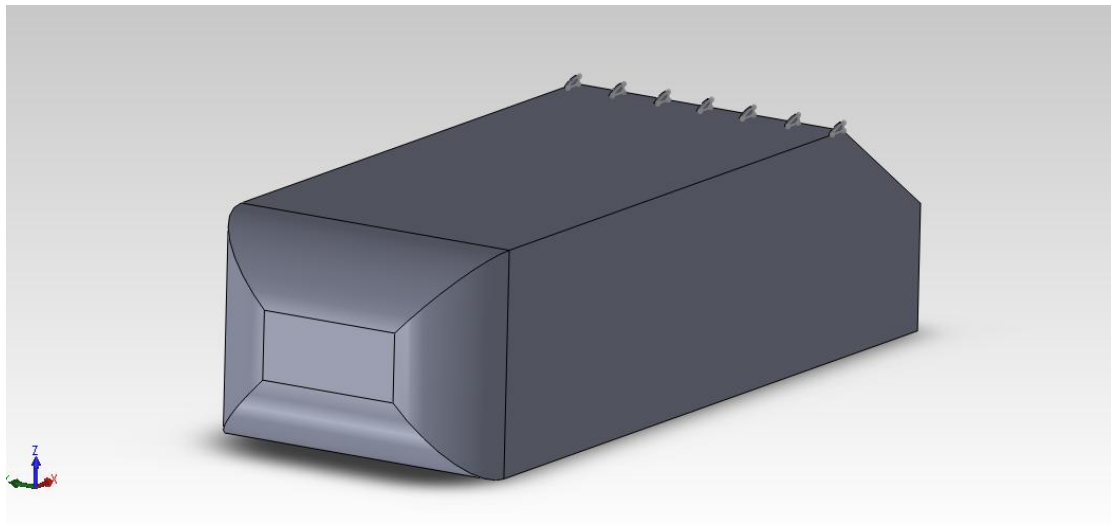


Σχ.4.2. Γεννήτριες στροβιλισμού με extrude 5mm.

Μία ακόμα καθολική άποψη για τις γεννήτριες στροβιλισμού αποτελεί το γεγονός ότι στα περισσότερα εργοστασιακά βελτιωμένα αυτοκίνητα, τοποθετούνται δυο γεννήτριες εκατέρωθεν στα άκρα των επιφανειών Σχ4.3 και Σχ4.4 προκειμένου να ελέγχουν το σημείο αποκόλλησης της ροής από τους δύο πλάγιους στροβίλους που αναπτύσσονται.



Σχ.4.3. Εμπρόσθια όψη του Ahmed Body με γεννήτριες στροβιλισμού στα άκρα.



Σχ.4.4. Από άλλη όψη το Ahmed body με γεννήτριες στα άκρα.

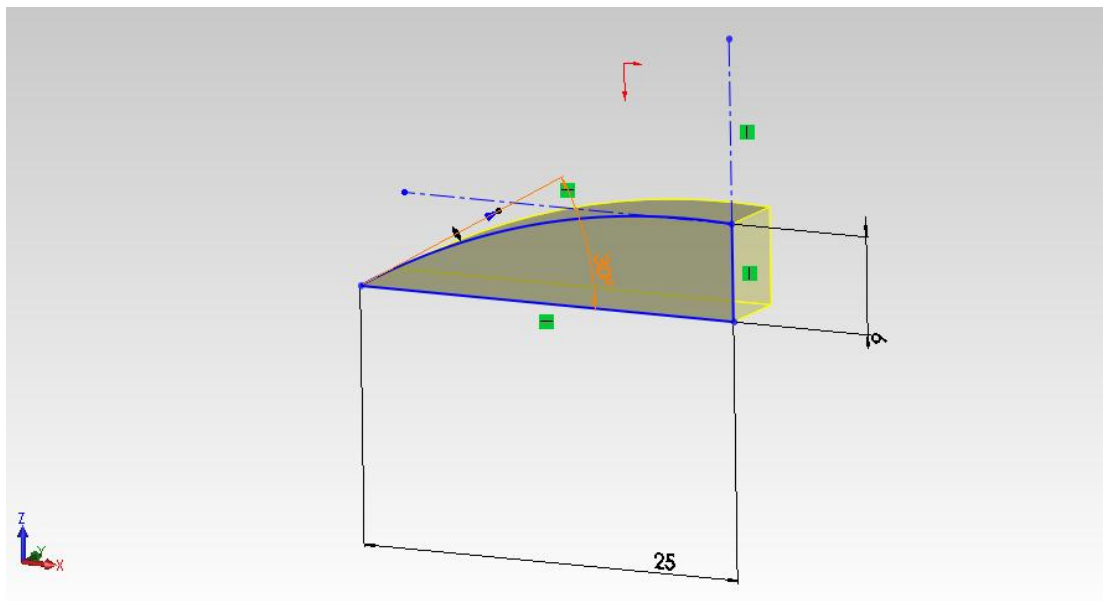
Τα βασικά εργαλεία γένεσης του πλέγματος έχουν αναπτυχθεί παραπάνω και σύμφωνα με τις κατάλληλες ρυθμίσεις τους και τροποποιήσεις τους θα εφαρμοστούν εδώ σε όλες τις περιπτώσεις.

Παρακάτω θα εξεταστούν οι ίδιες γεωμετρίες γεννητριών στροβιλισμού και για τα δύο Ahmed body. Συνοψίζοντας, το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με τη γεωμετρία της γεννήτριας και, στη συνέχεια, με το βέλτιστο πλήθος των γεννητριών στροβιλισμού πάνω σε μία επιφάνεια αυτοκινήτου.

Το σύνολο των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος που δημιουργήθηκε είναι περίπου 4.000.000 κελιά. Εξαιτίας του DecomposePar μας δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε παράλληλα τρεξίματα σε πολλούς επεξεργαστές με σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους. Για την ολοκλήρωση της ροής σε 32 επεξεργαστές, όπου κάθε επεξεργαστής είναι τεχνολογίας Intel Xeon 2.40 GHz (12288kb διάσταση cache) χρειάστηκαν 2 ώρες.

## 4.2 Παραμετροποίηση γεννητριών στροβιλισμού

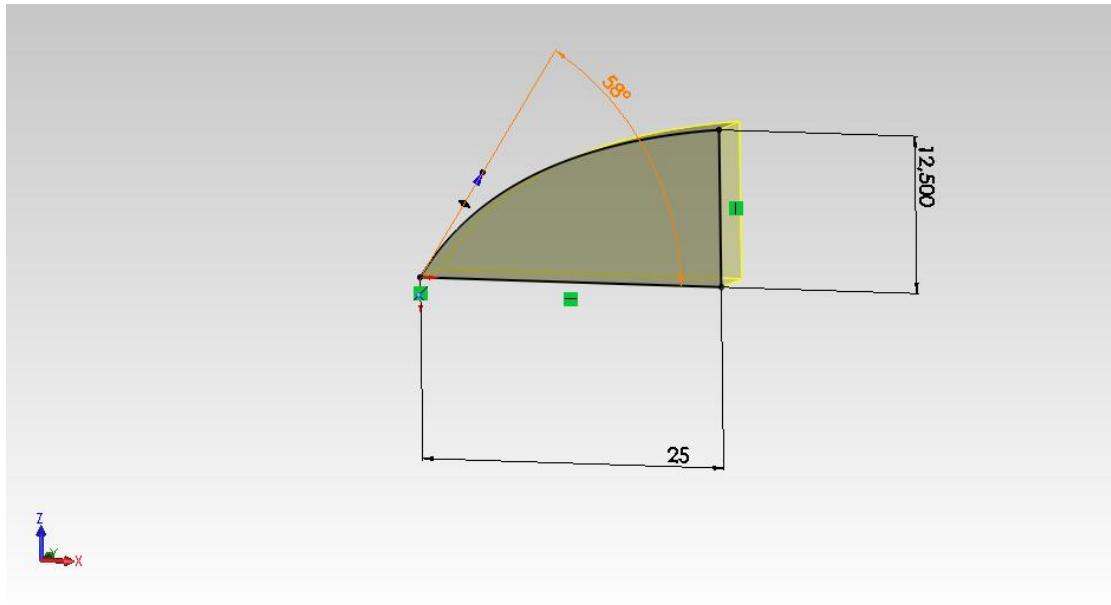
Όπως προαναφέρθηκε η γεωμετρία των γεννητριών στροβιλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση της ροής γύρω από τα Ahmed ποικίλει. Αρχικά δημιουργήθηκε μία πρότυπη γεωμετρία γεννήτριας με  $30^\circ$  γωνία ανάμεσα στην εφαπτόμενη και την spline Σχ4.5. Οι διαστάσεις αυτής είναι 25 mm μήκος κατά τον άξονα  $x'$ , 6 mm ύψος κατά τον άξονα  $z'$  και 5 mm extrude κατά τον άξονα  $y'$ .



Σχ.4.8. Γεννήτρια Στροβιλισμού 1 με γωνία  $30^\circ$

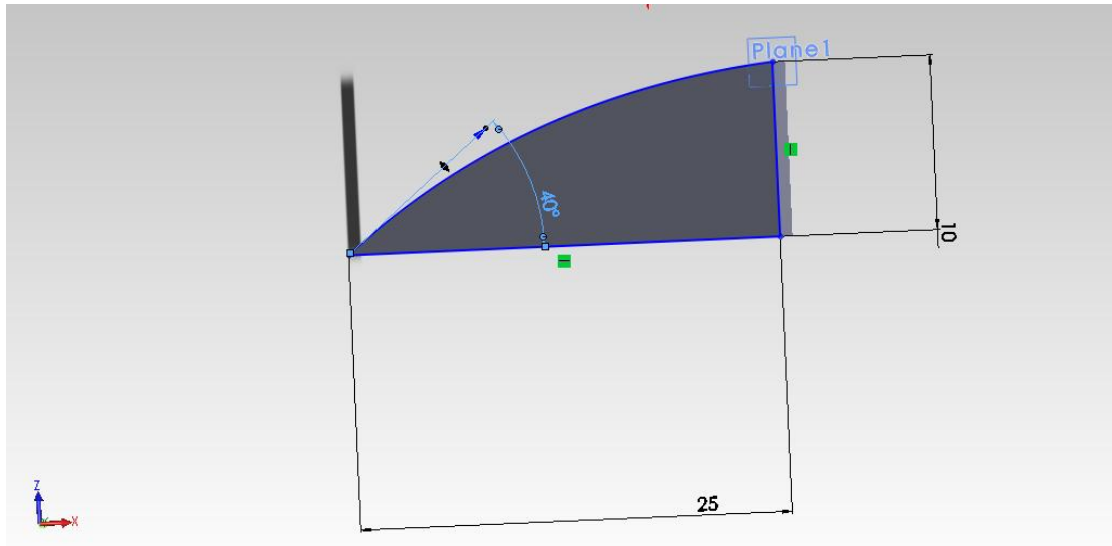
Στη συνέχεια βάση των αποτελεσμάτων της παραπάνω ροής επιλέχθηκε να αυξηθεί το ύψος της γεννήτριας στροβιλισμού και να κρατήσουμε σταθερό το μήκος της Σχ.4.6. Η γεωμετρία της εν λόγω γεννήτριας είναι 12,5 mm ύψος στον  $z'$ , 25 mm στον άξονα  $x'$ , 5mm extrude στον  $z'$  και  $58^\circ$  γωνία ανάμεσα στην spline και την εφαπτομένη.



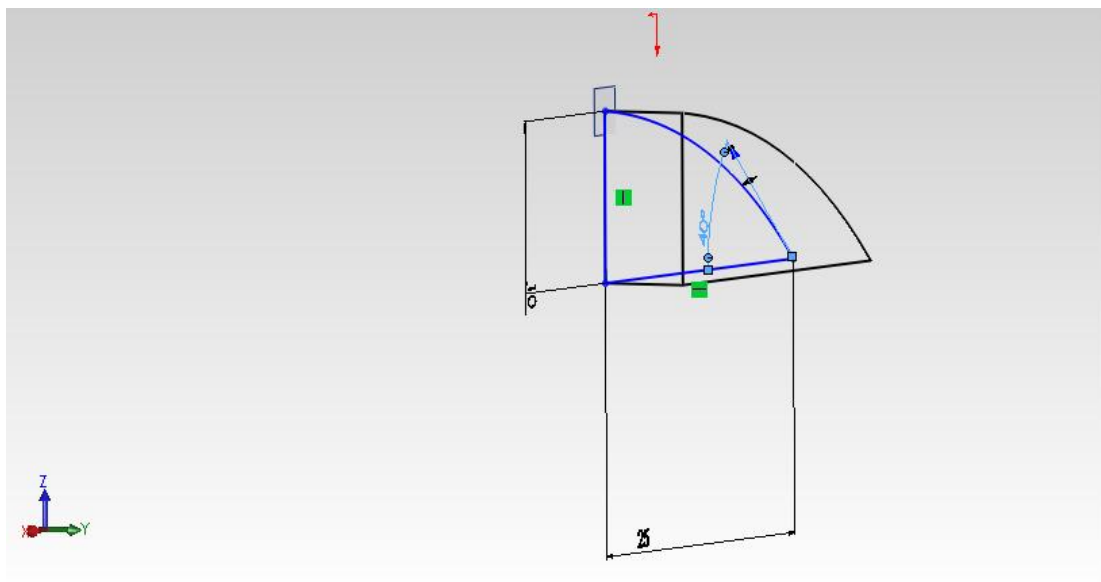


Σχ.4.6. Γεννήτρια Στροβιλισμού 2 με γωνία  $58^\circ$ .

Τέλος χρησιμοποιήθηκε μία ενδιάμεση γεωμετρία γεννήτριας με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς της τυχαίας αυτής γεωμετρίας στην αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Η γεωμετρία αυτή έχει ενδιάμεσο ύψος από τις γεννήτριες στροβιλισμού 1 και 2, το ύψος της συνεπώς είναι 10 mm, το μήκος της διατηρήθηκε ίδιο στα 25 mm, το extrude στα 5 mm και η γωνία της spline καμπύλης στις  $40^\circ$  όπως φαίνεται στα Σχ.4.7 και Σχ.4.8.



Σχ.4.7. Γεννήτρια Στροβιλισμού 3 με  $40^\circ$  γωνία.



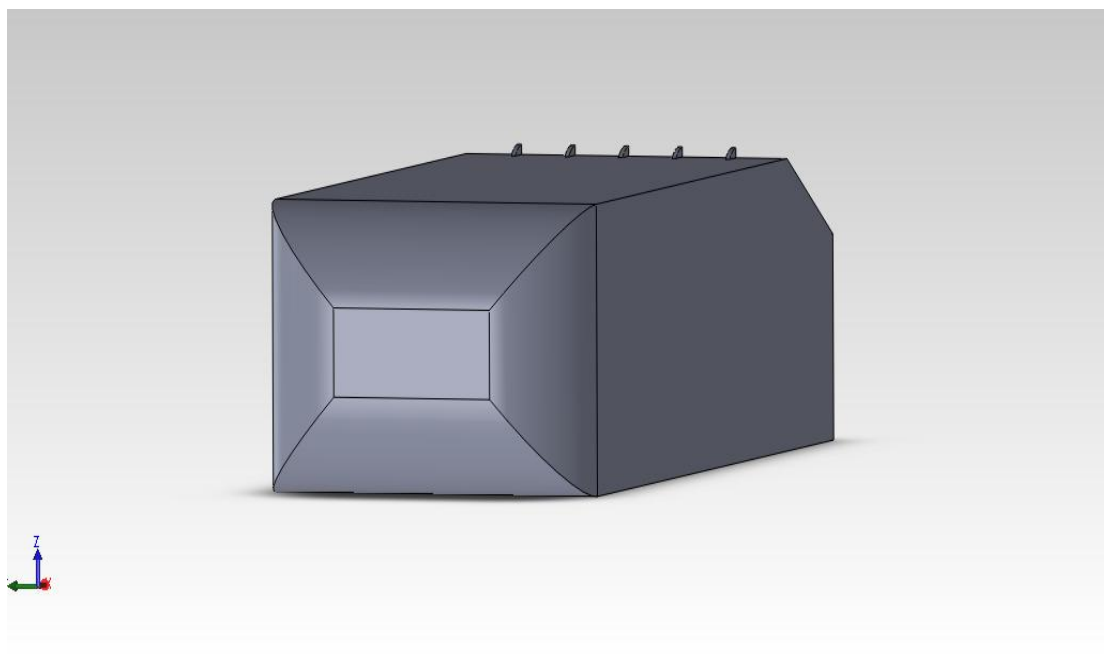
Σχ4.8. Άλλη όψη της γεννήτριας στροβιλισμού 3 των  $40^\circ$ .

### 4.3 Περιπτώσεις υπολογισμού της ροής και των συντελεστών αντίστασης και άνωσης για το Ahmed 25

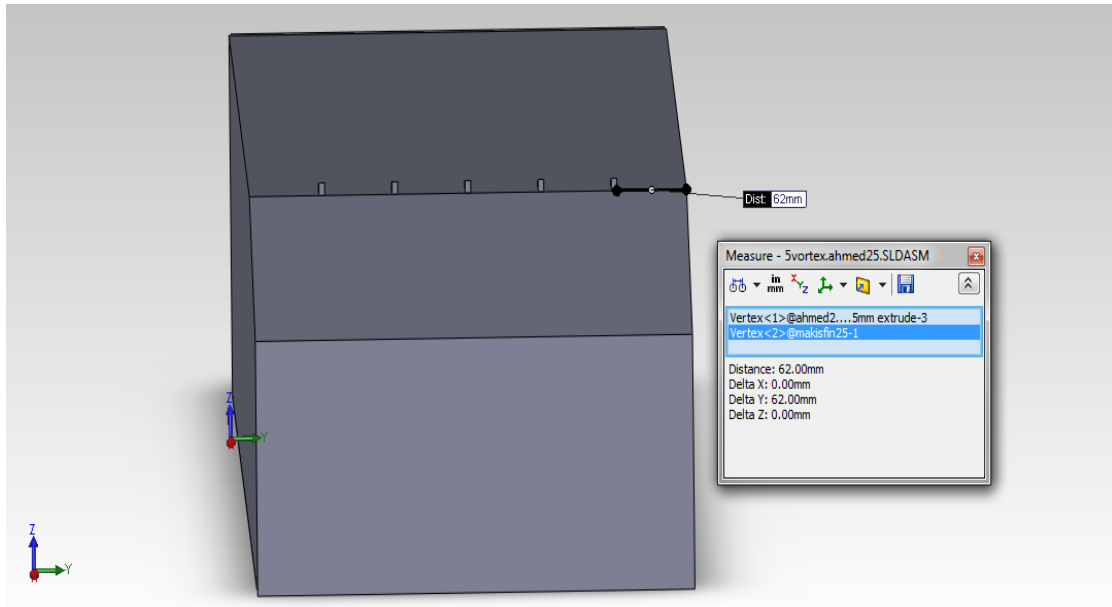
#### 4.3.1. Πέντε γεννήτριες στροβιλισμού 1 Σχ.4.9

Στο μοντέλο αυτοκινήτου προστέθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις:

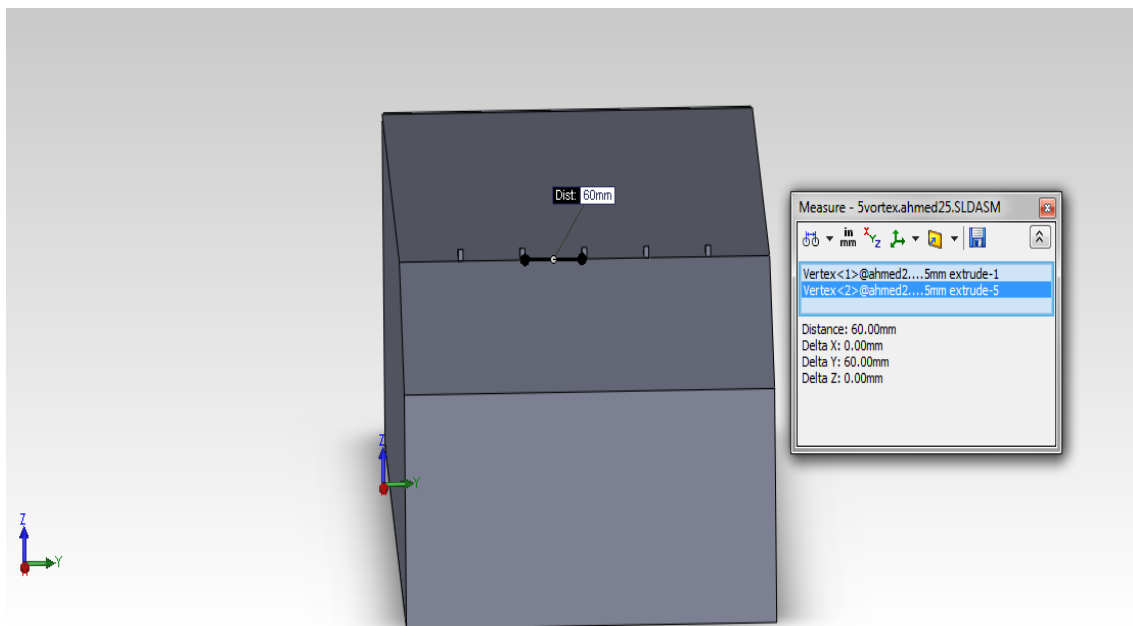
- i) Ενσωμάτωση του πλήθους των γεννητριών στροβιλισμού στο stl του Ahmed και τοποθέτηση τους ως ενιαίο αρχείο στον φάκελο ./constant/triSurface.
- ii) Επιλογή του επιπέδου πυκνότητας του ενιαίου .stl του Ahmed body σε ελάχιστο 6 και μέγιστο 7.
- iii) Προσθήκη πλεγματικής διαστρωμάτωσης γύρω από τις γεννήτριες στροβιλισμού με πυκνότητα 3.
- iv) Τοποθέτηση 5 γεννητριών στροβιλισμού σε αποστάσεις όπως φαίνονται στα Σχ.4.10 και Σχ.4.11.
- v) Επιλογή εκτέλεσης του αρχείου Snappedge για το ενιαίο .stl. με tolerance 0.6.



Σχ.4.9 . Όψη του Ahmed body 25 με 5 γεννήτριες στροβιλισμού 1.

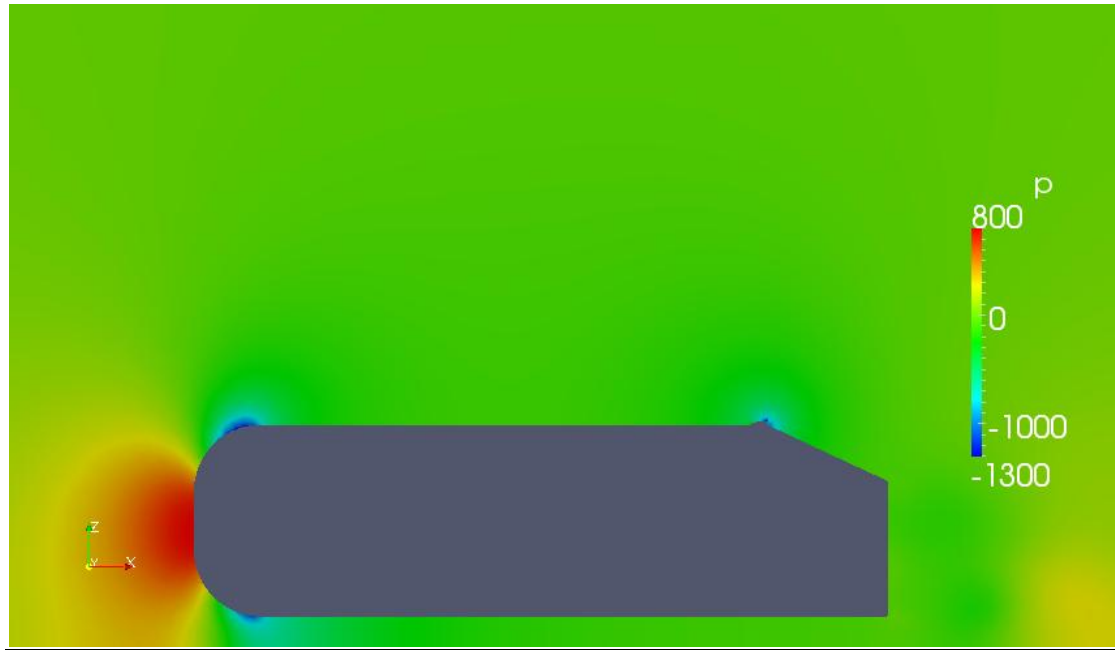


Σχ.4.10. Απόσταση της ακριανής γεννήτριας 62 mm από την γωνία της επιφάνειας του Ahmed.

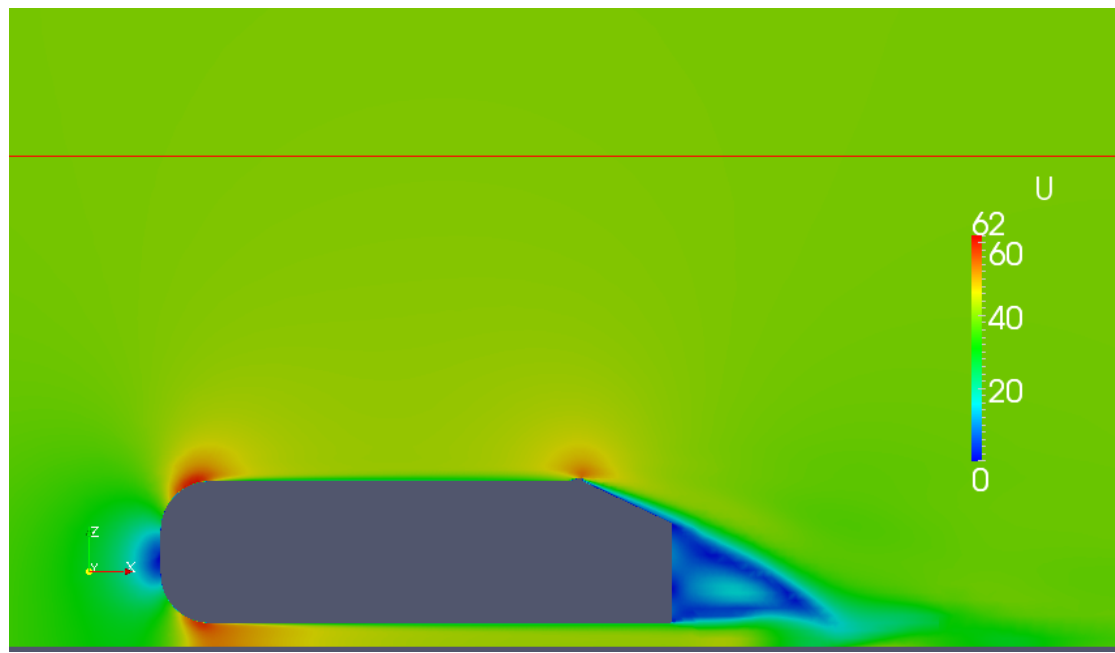


Σχ.4.11. Απόσταση 60 mm ανάμεσα στις γειτονικές γεννήτριες στροβιλισμού 1.

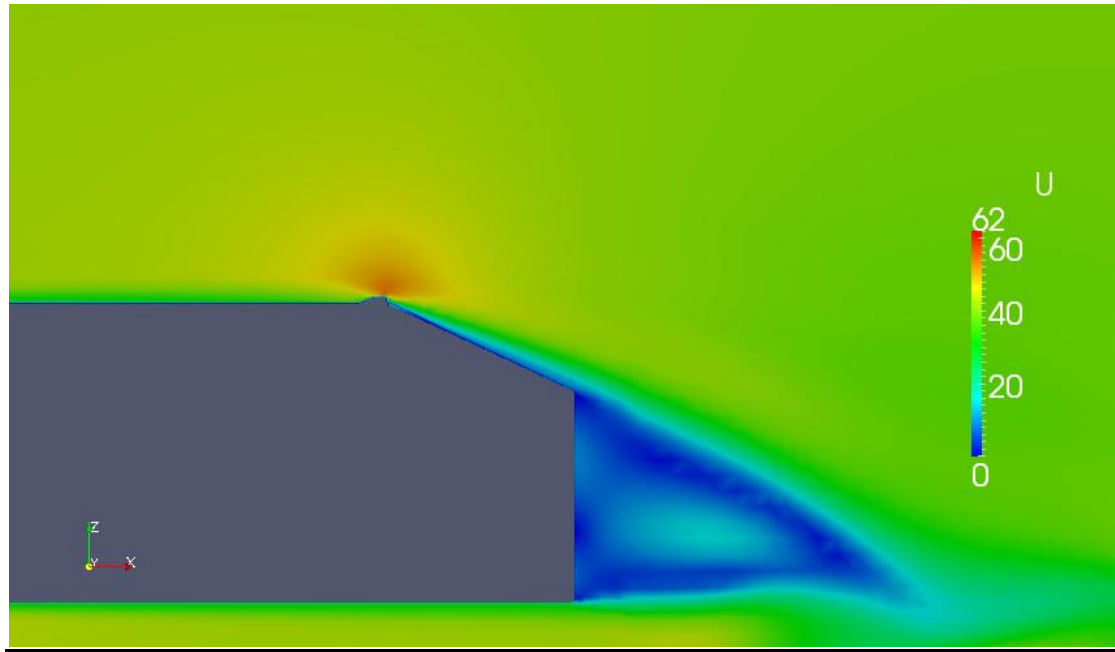
- Στα Σχ.4.12-4.14 παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο οι γεννήτριες στροβιλισμού επηρεάζουν το σημείο αποκόλλησης της ροής.



Σχ.4.12. Κατανομή της πίεσης στο Ahmed 25 με 5 γεννήτριες τύπου 1.



Σχ.4.13. Αποκόλληση της ροής στο Ahmed 25.



Σχ.4.14. Τοποθέτηση γεννήτριας για έλεγχο αποκόλλησης της ροής στο Ahmed 25.

Η ροή γύρω από το τροποποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου βελτιώθηκε αφού η τοποθέτηση της γεννήτριας στροβιλισμού μείωσε και το συντελεστή αντίστασης αλλά βοήθησε και στην ελάττωση της παραγόμενης άνωσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στο πίνακα 4.1.

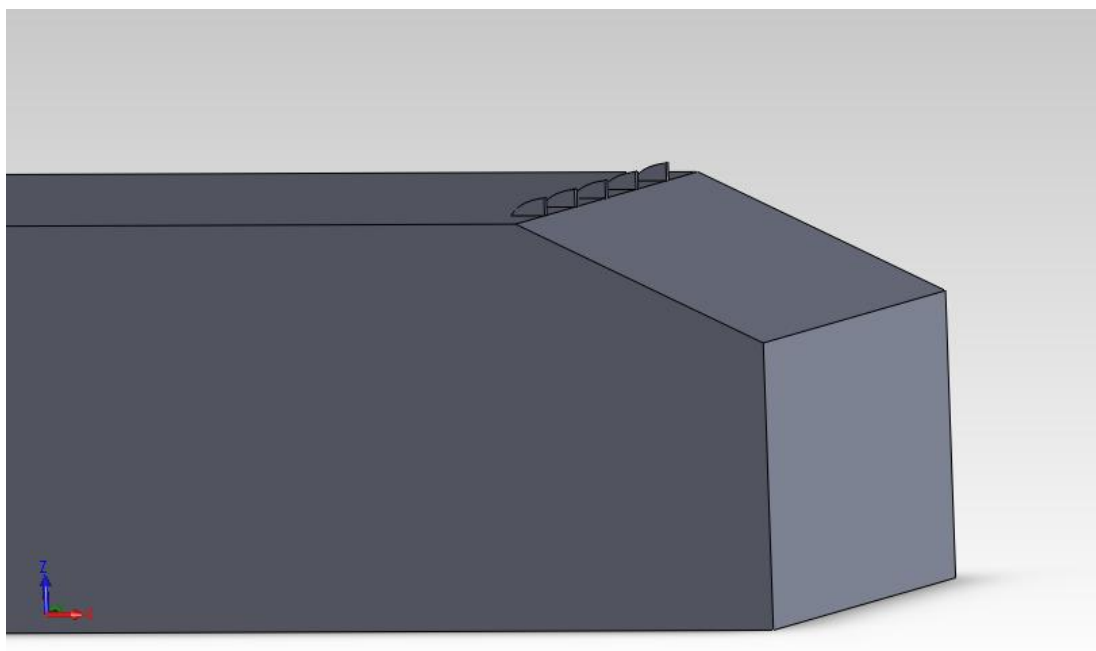
	Ahmed 25		Ahmed 25 5vortex1	
Cd	0,2709		0,2580	
Cl	0,2591		0,2361	
Drag Force N	28,2		27,6	
Lift Force N	27,87		25,39	

Πίνακας 4.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Ahmed 25, 5 γεννήτριες τύπου 1.

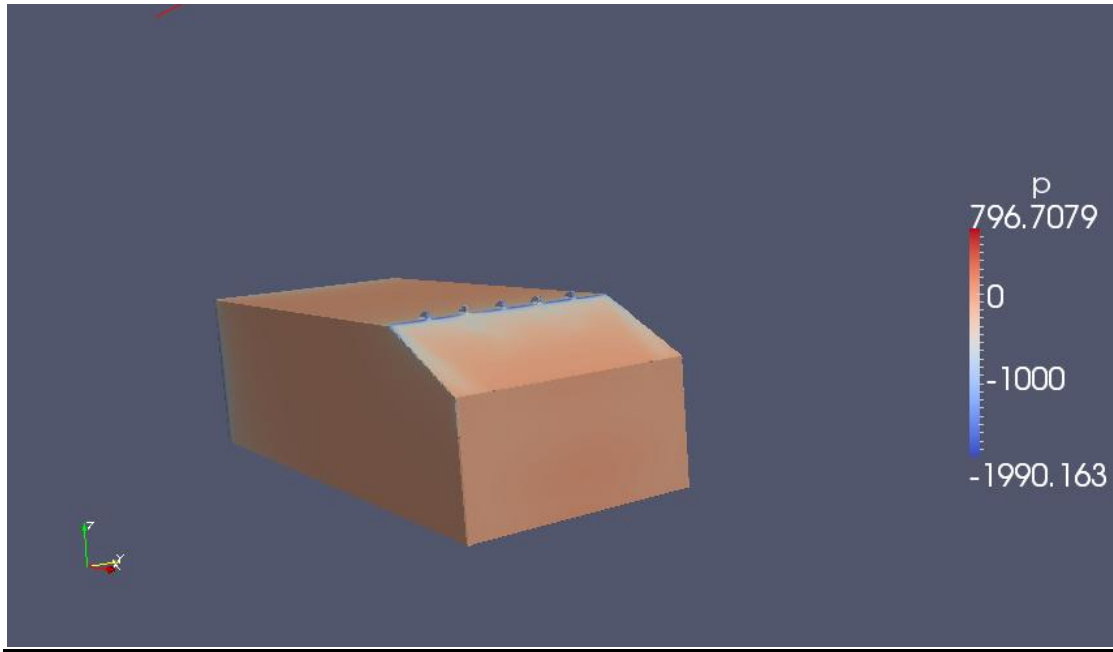
### 4.3.2 Πέντε γεννήτριες Στροβιλισμού 2

Στη συνέχεια επιλέχθηκε να αλλάξει η γεωμετρία της γεννήτριας και να αυξηθεί το ύψος της Σχ4.6. Αυτό έγινε προκειμένου να αυξήσουμε την αντίσταση που θα δέχεται το αμάξι αλλά ταυτόχρονα να μειώσουμε την άνωση του, καθότι απόλυτα λογικό όσο μεγαλώνουμε την επιφάνεια του αυτοκινήτου τόσο μεγαλύτερη αντίσταση θα δέχεται κατά την κίνηση του από τον αέρα αλλά και τόσο μικρότερη άνωση θα δημιουργείται. Το ύψος της γεννήτριας επιλέχθηκε να υπερδιπλασιαστεί και τα υπόλοιπα μεγέθη της γεωμετρίας να κρατηθούν ίδια, έτσι ώστε να ελεγχθεί το κατά πόσο επηρεάζει το ύψος της γεννήτριας την αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Οι θέσεις τοποθέτησης των γεννητριών στροβιλισμού πάνω στο αυτοκίνητο διατηρήθηκαν ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση Σχ.4.15.

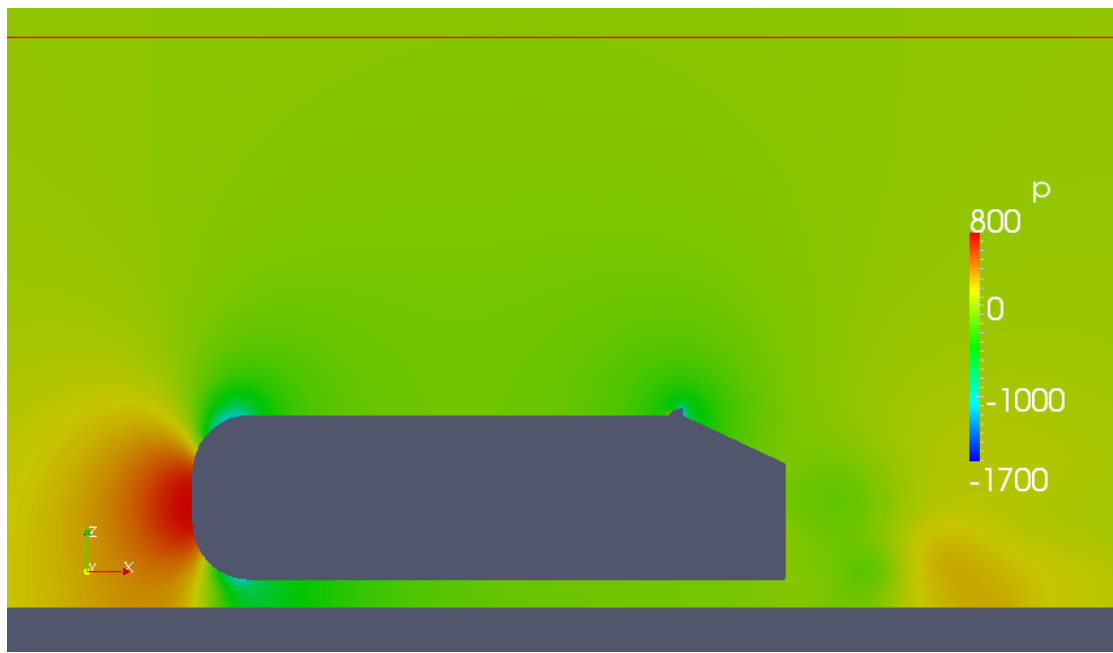
Τα χαρακτηριστικά επίλυσης του πλέγματος διατηρήθηκαν ίδια. Η πυκνωση της πρόσθετης πλεγματικής διαστρωμάτωσης γύρω από τις γεννήτριες στροβιλισμού επιλέχθηκε επιπέδου 3 για την παρούσα περίπτωση. Το tolerance του αρχείου SnapEdge επιλέχθηκε 0.6 και το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε είχε περίπου 4.000.000 κελιά.



Σχ.4.15. Θέσεις γεννητριών 2 πάνω στο αυτοκίνητο.

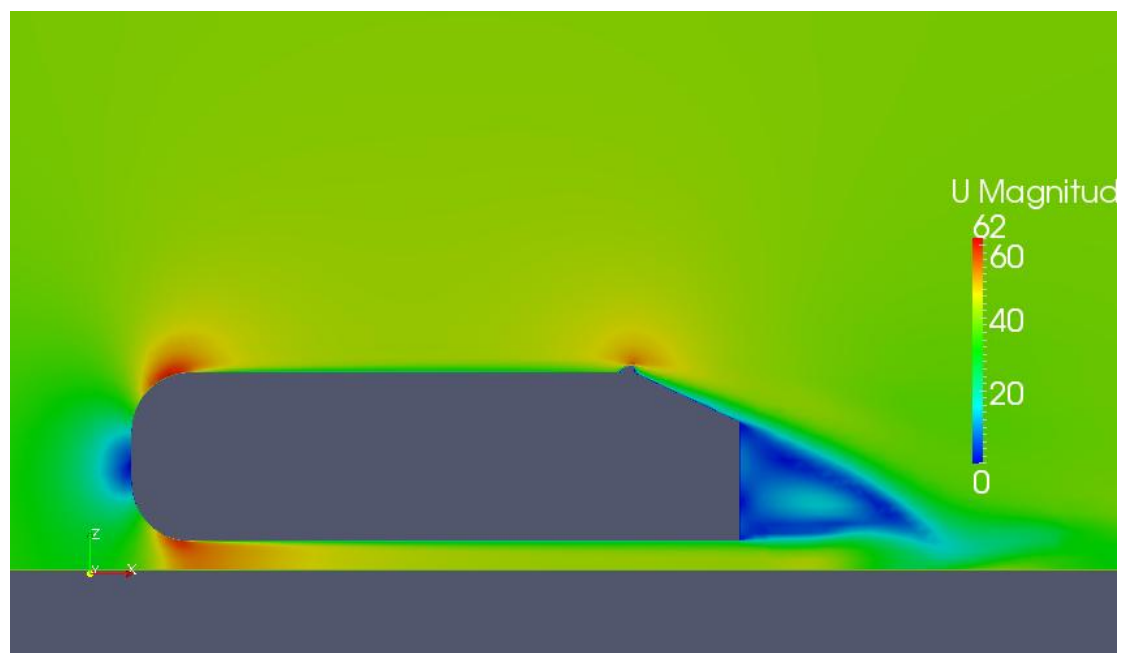


Σχ4.16. Κατανομή της πίεσης πάνω στο Ahmed 25.



Σχ4.17. Κατανομή της πίεσης πάνω στο Ahmed 25.





Σχ4.18. Αποκόλληση της ροής στο Ahmed 25.

Σύμφωνα και με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2 παρατηρούμε ακριβή την αρχική μας τοποθέτηση, ότι αυξάνοντας το ύψος της γεωμετρίας της γεννήτριας στροβιλισμού αυξάνεται και η αντίσταση του αέρα Σχ.4.16 και 4.17 αλλά μειώνεται η άνωση. Αυτή τη νοοτροπία κατασκευής γεννητριών ακολουθούν αρκετές εταιρείες στο χώρο της βελτιστοποίησης των αυτοκινήτων προκειμένου να προσφέρουν καλύτερη ευστάθεια στο αυτοκίνητο, λόγω της μείωσης ή και δημιουργία αρνητικής άνωσης όπως θα δούμε παρακάτω. Χαρακτηριστική είναι η αποκόλληση της ροής στο Σχ.4.18.

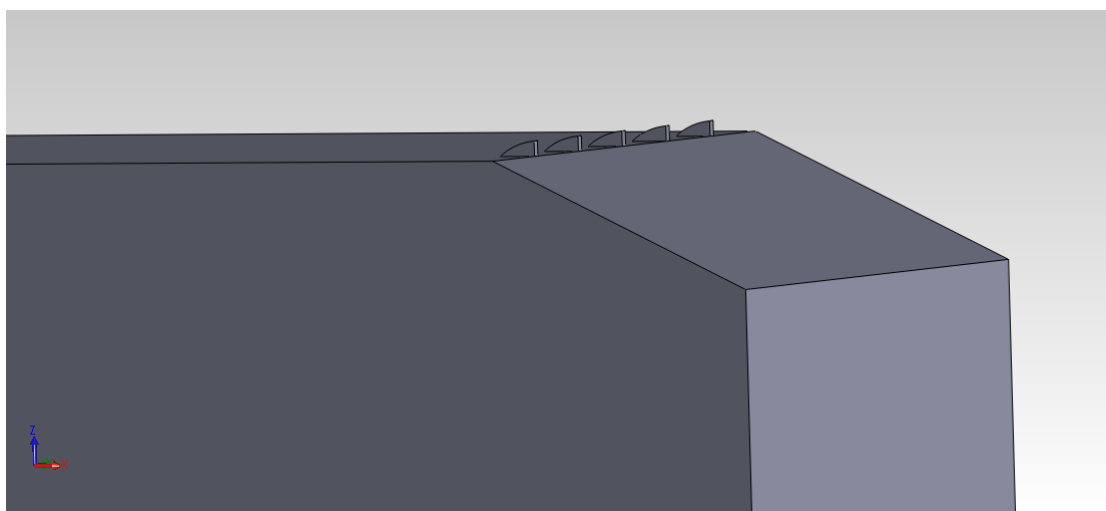
	Ahmed 25		Ahmed 25 5vortex2	
Cd	0,2709		0,2591	
Cl	0,2591		0,2343	
Drag Force N	28,2		27,8	
Lift Force N	27,87		25,19	

Πίνακας 4.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Ahmed 25, 5 γεννήτριες τύπου 2.

Συνεπώς παρατηρούμε ότι η γεννήτρια στροβιλισμού βελτίωσε την αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου συγκριτικά με το απλό Ahmed 25, ωστόσο συγκριτικά με τη γεννήτρια στροβιλισμού 1, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας και συνεπώς και η δύναμη αντίστασης αυξάνονται, ενώ ο συντελεστής άνωσης και η αντίστοιχη δύναμη μειώνονται. Σχετικά διαγράμματα, σχολιασμοί και συγκρίσεις των περιπτώσεων μεταξύ του παραθέτονται σε επόμενο κεφάλαιο.

### 4.3.3. Πέντε γεννήτριες στροβιλισμού 3

Στη συνέχεια επιλέχθηκε μία ενδιάμεση γεωμετρία γεννήτριας στροβιλισμού με σκοπό την δημιουργία κάποιων πειραματικών αποτελεσμάτων και την σύγκριση τους με την απλή γεωμετρία του αυτοκινήτου Ahmed 25. Αυτό έγινε προκειμένου στην συνέχεια να πραγματοποιηθούν πειράματα με διαφορετικό αριθμό των γεννητριών στροβιλισμού και να γίνει έτσι καλύτερη κατανόηση της επίδρασης τους στην αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Τοποθετήθηκαν έτσι 5 γεννήτριες στροβιλισμού τύπου 3 πάνω στο αυτοκίνητο Σχ.4.19.

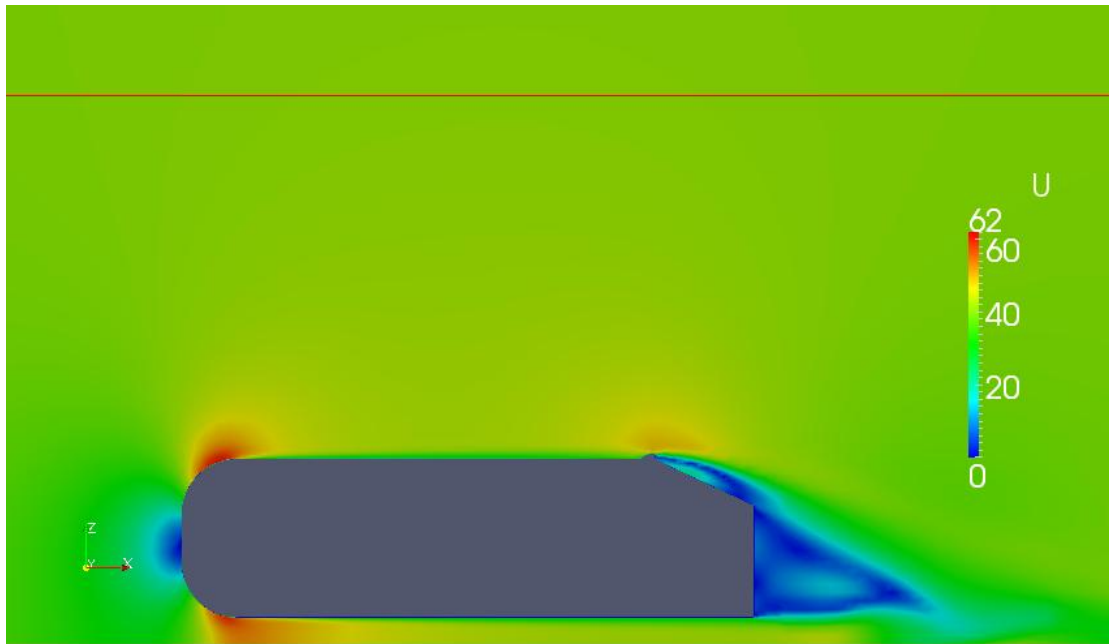


Σχ.4.19. Ahmed 25 με προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3.

Για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος στην συγκεκριμένη περίπτωση έγιναν οι επιπλέον ρυθμίσεις :

- i) Το tolerance στο αρχείο SnapEdge ρυθμίστηκε στο 0.6.
- ii) Η περιοχή SnapControls του αρχείου SnappyHexMesh ρυθμίστηκε να κάνει 8 επαναλήψεις αντί για 6 που υπήρχε μέχρι τώρα, έτσι ώστε να

γίνει καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος πάνω στις επιφάνειες των σωμάτων.



Σχ.4.20. Αποκόλληση της ροής.

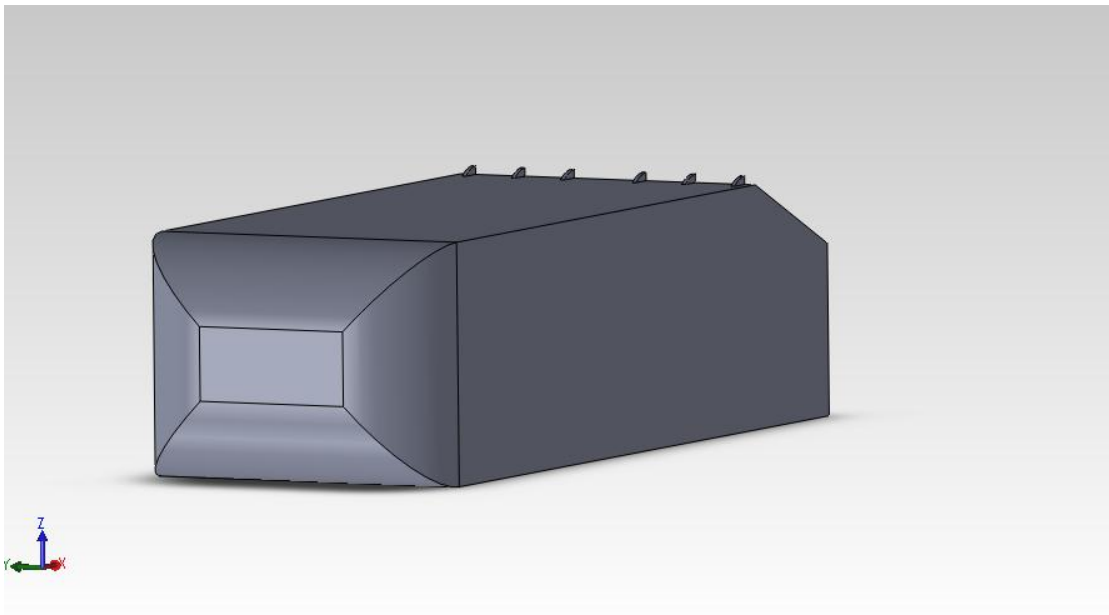
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης περίπτωσης Σχ.4.20 παρουσιάζονται στο πίνακα 4.3 όπου παρατηρείται ότι αυξήθηκε ο συντελεστής αντίστασης και ο συντελεστής άνωσης συγκριτικά με το απλό Ahmed 25 και οδηγώντας μας έτσι στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία των γεννητριών στροβιλισμού επιδρά αρνητικά στην αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου.

	Ahmed 25		Ahmed 25 5vortex3	
Cd	0,2709		0,2763	
Cl	0,2591		0,2760	
Drag Force N	28,2		28,7	
Lift Force N	27,87		29,67	

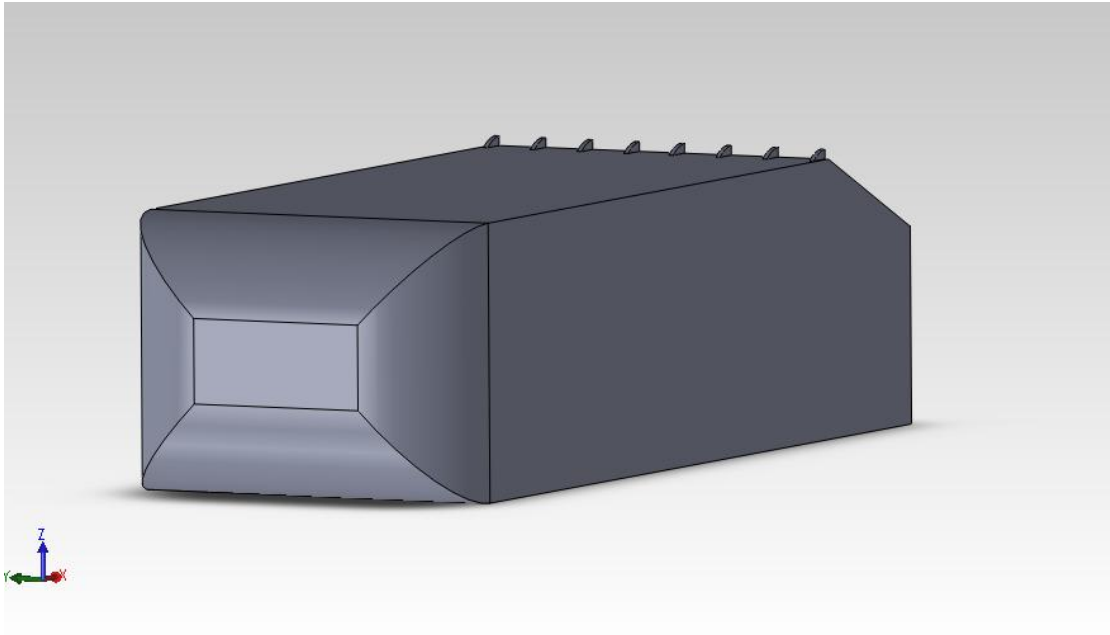
Πίνακας 4.3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3.

#### 4.3.4 Περιπτώσεις μεταβολής του αριθμού των γεννητριών στροβιλισμού

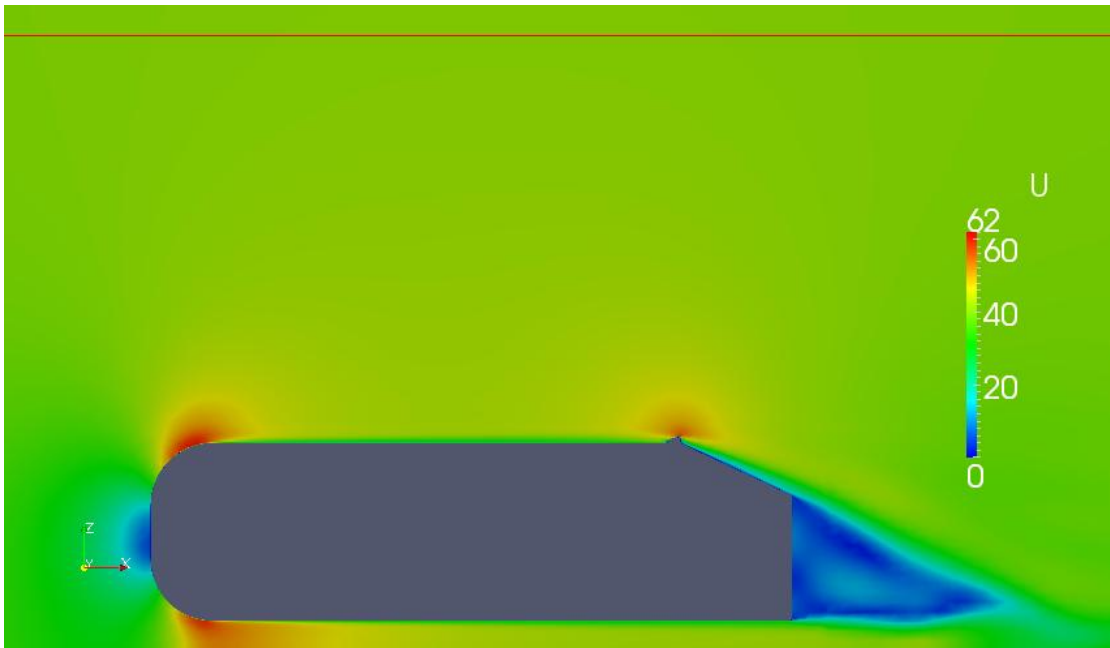
Στην ενότητα αυτή του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στην επίδραση του αριθμού των γεννητριών στροβιλισμού στην αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Μία πρώτη σκέψη αποτέλεσε το γεγονός ότι με πολύ μεγάλη αύξηση του αριθμού των γεννητριών, η μία δίπλα στην άλλη (στην ίδια ευθεία) ουσιαστικά δημιουργείται μία αεροτομή, όπου ο αριθμός των γεννητριών δεν θα έπρεπε να ξεπερνούσε τις 8. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται παρακάτω είναι για 6 και 8 γεννήτριες στροβιλισμού τοποθετημένες κατάλληλα πάνω στην επιφάνεια του Ahmed 25 Σχ.4.21 και Σχ.4.22.



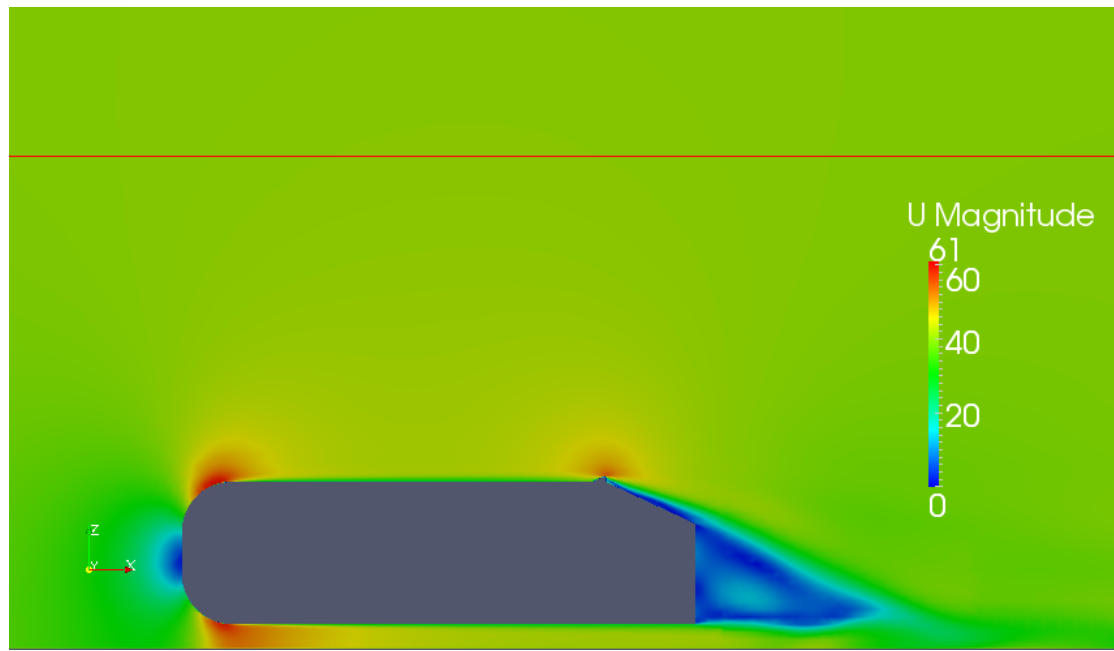
Σχ.4.21. Ahmed 25 με προσθήκη 6 γεννητριών τύπου 3.



Σχ4.22. Ahmed 25 με προσθήκη 8 γεννητριών τύπου 3.



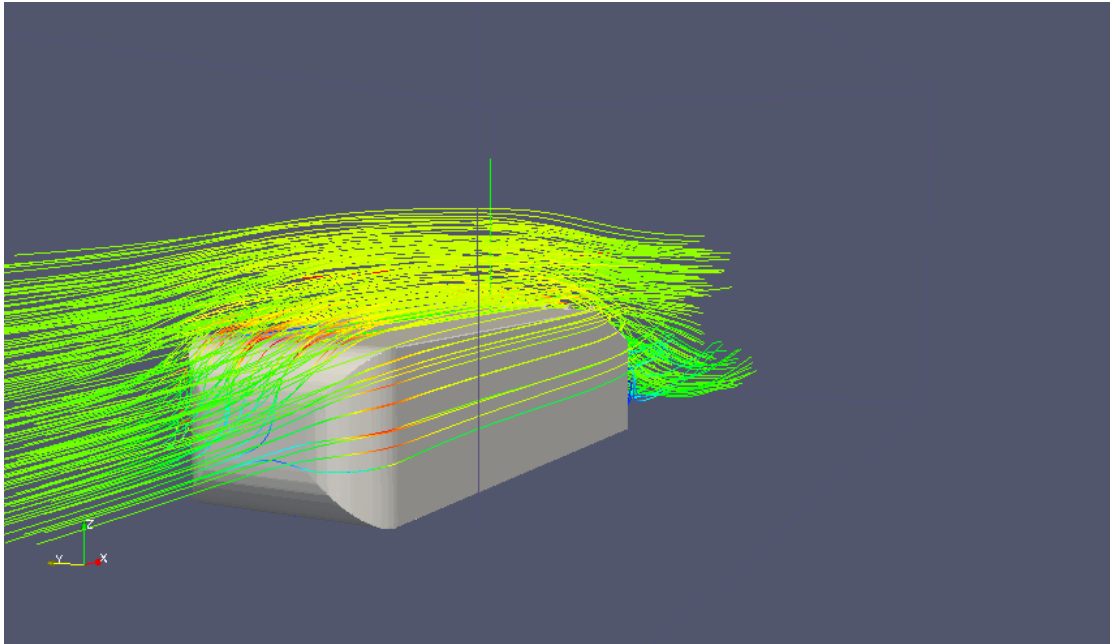
Σχ.4.23. Αποκόλληση της ροής για τις 6 γεννήτριες στροβιλισμού στο Ahmed 25.



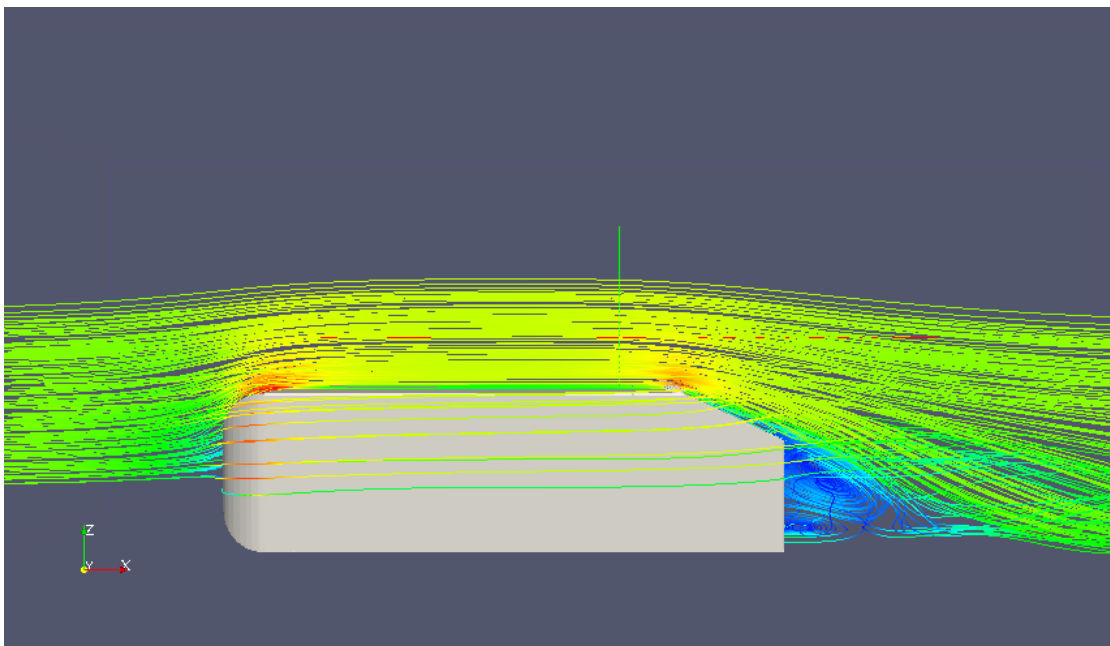
Σχ.4.24. Αποκόλληση της ροής για τις 8 γεννήτριες στροβιλισμού τύπου 3.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ροών των Σχ.4.23 και 4.24 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6. Παρατηρείται ότι ενώ αρχικά τα αποτελέσματα για προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 στην επιφάνεια του αυτοκινήτου αλλοιώνουν την καλή αεροδυναμική συμπεριφορά του Ahmed 25, για αύξηση του αριθμού τους σε 6 και 8 υπάρχει εμφανής βελτίωση τόσο του συντελεστή αντίστασης όσο και του συντελεστή άνωσης Πίνακες 4.4 και 4.5. Σε μία μεταξύ τους σύγκριση παρατηρούμε ότι για 6 γεννήτριες στροβιλισμού έχουμε καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου ως προς την αντίσταση που δέχεται από τον αέρα συγκριτικά με εκείνη των 8 γεννητριών, ενώ αντίθετα καλύτερα αποτελέσματα στον συντελεστή άνωσης έχουμε στην δεύτερη περίπτωση, όπου στην περίπτωση των 8 γεννητριών φαίνεται να υπάρχει αρκετά μικρότερη δύναμη άνωσης.

Η περίπτωση τοποθέτησης των 8 γεννητριών στροβιλισμού απέδωσε και την βέλτιστη λύση και στα Σχ.4.25 και 4.26 φαίνεται και η ανακυκλοφορία της ροής.



Σχ.4.25. Γραμμές Ροής στο Ahmed 25 με τις 6 γεννήτριες στροβιλισμού.



Σχ.4.26. Περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής για το Ahmed 25 με τις 6 γεννήτριες στροβιλισμού.

	Ahmed 25	Ahmed 25 6vortex3
Cd	0,2709	0,2548
Cl	0,2591	0,2258
Drag Force N	28,2	27,3
Lift Force N	27,87	24,27

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα 6 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3.

	Ahmed 25	Ahmed 25 8vortex3
Cd	0,2709	0,2554
Cl	0,2591	0,1965
Drag Force N	28,2	27,4
Lift Force N	27,87	21,13

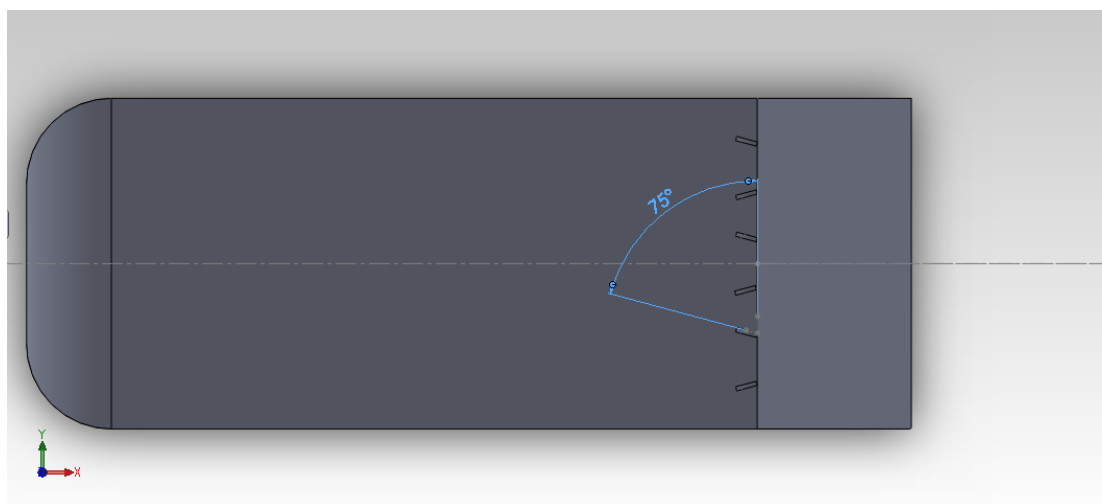
Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα 8 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3.

	Ahmed 25 6vortex3	Ahmed 25 8vortex3
Cd	0,2548	0,2554
Cl	0,2258	0,1965
Drag Force N	27,3	27,4
Lift Force N	24,27	21,13

Πίνακας 4.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων 6 και 8 γεννητριών.



#### 4.3.5 Τοποθέτηση 6 γεννητριών στροβιλισμού υπό γωνία Σχ.4.27



Σχ.4.27. Κάτοψη Ahmed 25 με τοποθετημένες 6 γεννήτριες στροβιλισμού με κλίση 75°.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω τροποποιήσεις στην διαδικασία δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος:

- i) Αύξηση του επιπέδου πυκνότητας της πρόσθετης πλεγματικής διαστρωμάτωσης σε 4 καθώς αδυνατούσε το πλέγμα να σεβαστεί την γωνία της γεννήτριας με την επιφάνεια του σώματος, πράγμα καθοριστικό για την συγκεκριμένη περίπτωση.
- ii) Εκτέλεση του εργαλείου SnapEdge με tolerance 0.6.
- iii) Κατάλληλη τροποποίηση του φακέλου DecomposeParDict για παράλληλο run 16 επεξεργαστών τεχνολογίας Intel Xeon 2.40 GHz.
- iv) Μέγεθος πλέγματος 4.000.000 κελιά περίπου και υπολογιστικό χρόνο 4 ωρών.

Παρατηρούμε ότι για το Ahmed 25 η τοποθέτηση των γεννητριών με κλίση επιφέρει ένα από τα βέλτιστα αποτελέσματα για το συντελεστή άνωσης από όλες τις περιπτώσεις που έχουν εκτελεστεί. Ωστόσο παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του συντελεστή αντίστασης του αέρα αλλοιώνονται καθώς όχι μόνο αποκλίνουν από αυτά της απλής τοποθέτησης των 6 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3, αλλά και από αυτά της αεροδυναμικής του Ahmed 25 χωρίς την προσθήκη γεννητριών.

Στο Πίνακα 4.7 αναφέρονται τα αποτελέσματα συγκριτικά με την αεροδυναμική και του συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης του απλού Ahmed 25. Παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση των γεννητριών υπό γωνία επιφέρει αλλοίωση του συντελεστή οπισθέλκουσας ενώ ο συντελεστής άνωσης επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις.

	Ahmed 25	Ahmed 25 6vortex75°
Cd	0,2709	0,2744
Cl	0,2591	0,1987
Drag Force N	28,2	29,4
Lift Force N	27,87	21,36

Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 6 γεννητριών με κλίση.

Στη συνέχεια στον Πίνακα 4.8 υπάρχει σύγκριση ανάμεσα στην απλή τοποθέτηση των γεννητριών χωρίς γωνία και σε αυτή με κλίση 75°. Παρατηρούμε και εδώ ότι μικρότερο συντελεστή αντίστασης του αέρα έχουμε στην απλή τοποθέτηση των γεννητριών, ενώ μικρότερο συντελεστή άνωσης στη περίπτωση όπου οι γεννήτριες τοποθετήθηκαν με γωνία ως προς την αξονική του κεκλιμένου επιπέδου.

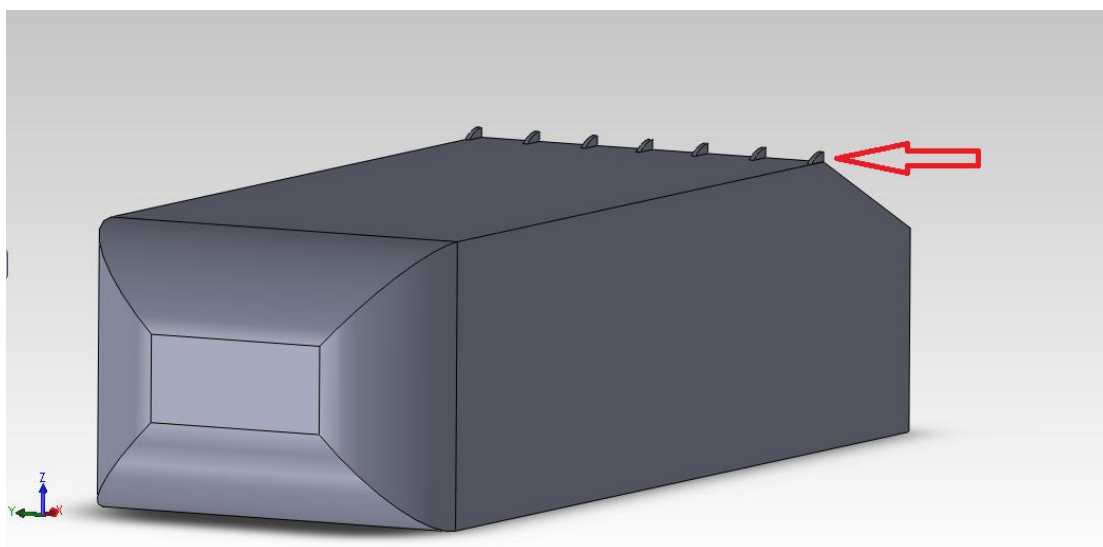
Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μία ίσως μεγαλύτερη γωνία τοποθέτησης των γεννητριών στην επιφάνεια του αυτοκινήτου να επέφερε τα βέλτιστα αποτελέσματα.

	Ahmed 25 6vortex	Ahmed 25 6vortex75°
Cd	0,2548	0,2744
Cl	0,2258	0,1987
Drag Force N	27,3	29,4
Lift Force N	24,27	21,36

Πίνακας 4.8. Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων.

#### 4.3.6 Τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3

Μια τελευταία περίπτωση ελέγχου της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του Ahmed 25 δημιουργήθηκε με την τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 2 σε συγκεκριμένες αποστάσεις έτσι ώστε οι δύο ακριανές γεννήτριες να βρίσκονται στις άκρες τις επιφάνειας του αυτοκινήτου Σχ4.28. Επίσης δημιουργήθηκε και μία περίπτωση επίλυσης της ροής όπου τοποθετούμε 7 γεννήτριες στροβιλισμού σε διαφορετικές όμως αποστάσεις από πριν έτσι ώστε να μην έχουμε γεννήτριες στα άκρα Σχ.4.27.



Σχ.4.28. Περίπτωση 7 γεννητριών στροβιλισμού, 2 εκ των οποίων τοποθετημένες στα άκρα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ρυθμίσεις που έγιναν είναι οι εξής :

- i) Οι πλεγματικές διαστρωμάτωσεις που δημιουργήθηκαν γύρω από τις γεννήτριες ρυθμίστηκε να είναι 4.
- ii) Αύξηση του επιπέδου πυκνότητας της πρόσθετης πλεγματικής διαστρωμάτωσης σε 4.
- iii) Ρύθμιση του tolerance του εργαλείου SnapEdge σε 0.6.
- iv) Το αρχείο DecomposeParDict ρυθμίστηκε για παράλληλο run σε 32 επεξεργαστές τεχνολογίας Intel Xeon 2.40 GHz με συνολικό υπολογιστικό χρόνο να ανέρχεται στις 2 ώρες.

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση της ροής. Παρατηρούνται οι συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης μειωμένοι συγκριτικά με αυτούς του οχήματος χωρίς την προσθήκη γεννητριών. Αντίθετα στο Πίνακα 4.10 παρατηρούμε ότι ο συντελεστής άνωσης είναι μικρότερος στην περίπτωση που οι γεννήτριες στροβιλισμού δεν τοποθετούνται στα άκρα, ενώ ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι μικρότερος στην περίπτωση που οι γεννήτριες είναι τοποθετημένες στα άκρα.

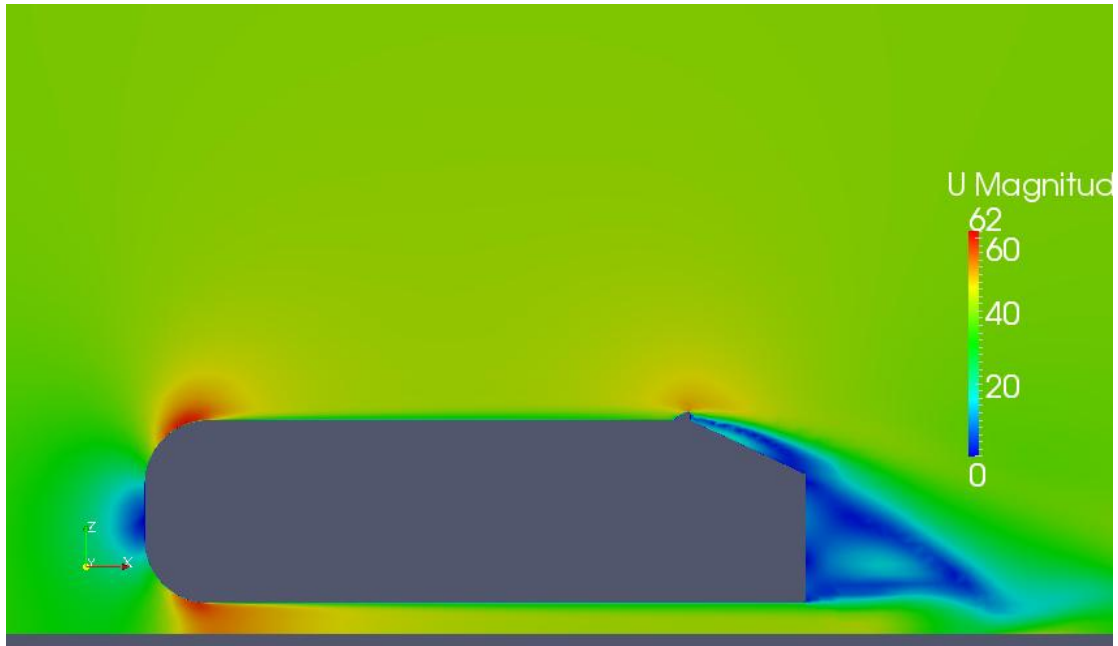
	Ahmed 25	Ahmed 25 7vortex/edge
Cd	0,2709	0,2561
Cl	0,2591	0,2238
Drag Force N	28,2	27,4
Lift Force N	27,87	24,06

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα επίλυσης της ροής με γεννήτριες στα άκρα.

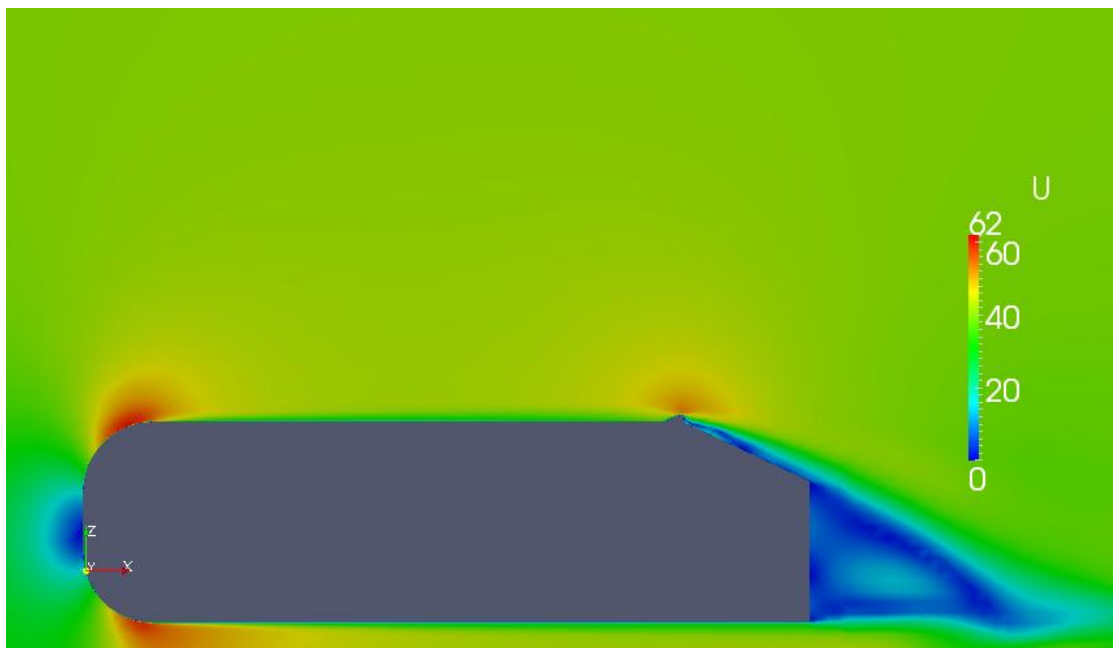
	Ahmed 25 7vortex/noedge	Ahmed 25 7vortex/edge
Cd	0,2653	0,2561
Cl	0,2212	0,2238
Drag Force N	28,4	27,4
Lift Force N	23,79	24,06

Πίνακας 4.10. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δύο περιπτώσεων.

Τα αποτελέσματα επίλυσης της ροής και η γραφική τους αναπαράσταση φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Χαρακτηριστική είναι επίσης και η διαφορά που προκαλούν στην ανακυκλοφορία της ροής Σχ.4.29 και Σχ.4.30 και παρατηρούμε την μεγάλη διαφορά που προκαλεί η τοποθέτηση της γεννήτριας στις άκρες του σώματος καθώς ελέγχει καλύτερα το σημείο αποκόλλησης των δύο πλάγιων στροβίλων που αναπτύσσονται.



Σχ.4.29. 7 Γεννήτριες στροβιλισμού τοποθετημένες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους στο Ahmed 25.



Σχ.4.30. 7 γεννήτριες τοποθετημένες στα άκρα στο Ahmed 25.

#### **4.4 Περιπτώσεις υπολογισμού της ροής και των συντελεστών αντίστασης και άνωσης για το Ahmed 35**

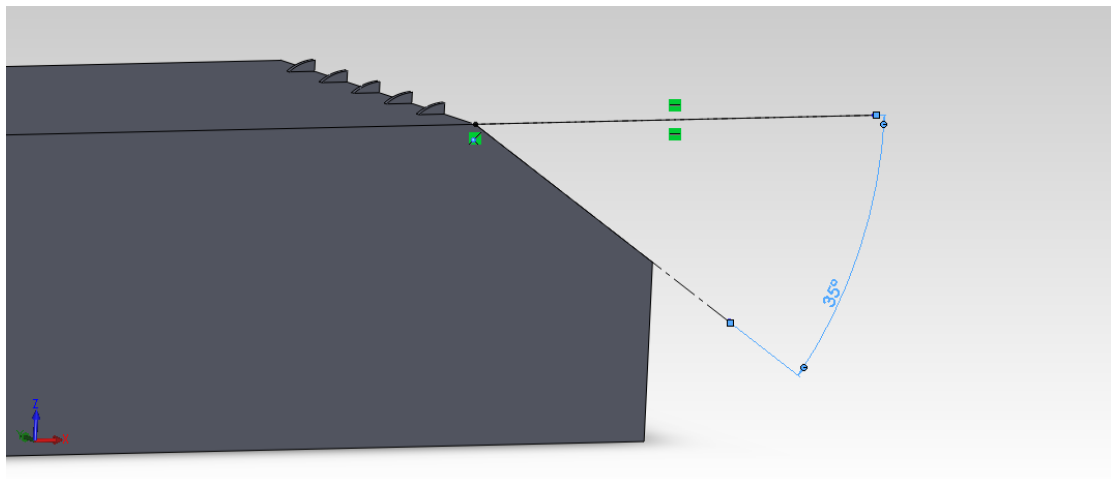
Στη συγκεκριμένη ενότητα ως πρότυπο αυτοκίνητο σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε το Ahmed 35. Πάνω σε αυτό τοποθετήθηκαν διαφορετικές γεωμετρίες γεννητριών στροβιλισμού και διαφορετικός αριθμός αυτών των γεωμετριών και προέκυψαν κάποια πειραματικά δεδομένα. Αξιολόγηση και σχολιασμός αυτών ακολουθεί.

##### **4.4.1. Ahmed 35 με προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 1**

Για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση έγιναν οι παρακάτω ρυθμίσεις :

- i) Ενσωμάτωση των γεννητριών στροβιλισμού στο .stl αρχείο του Ahmed 35.
- ii) Αλλαγές και κατάλληλη μορφοποίηση στο φάκελο του SnappyHexMesh προκειμένου να μπορεί να δέχεται το ενιαίο .stl.
- iii) Ρύθμιση των πλεγματικών διαστρωματώσεων σε 4 με επίπεδο πυκνότητας 3.
- iv) Τοποθέτηση των γεννητριών σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και ισαπέχουσες από τα άκρα.
- v) Ρύθμιση του tolerance του SnapEdge σε 0.6.
- vi) Εκτέλεση του SnapEdge στο ενιαίο .stl για την βελτίωση του πλέγματος.

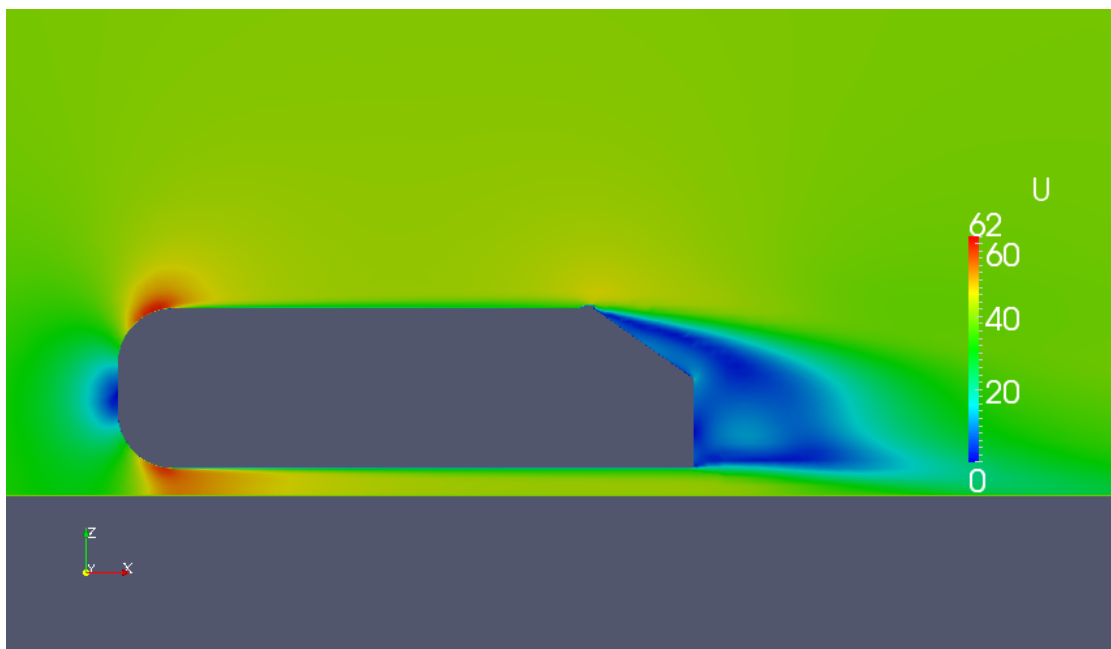
Στο πίνακα 4.11 φαίνονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ροής Σχ.4.32 γύρω από το σώμα του Σχ.4.31. Παρατηρούμε ότι παρότι στο Ahmed 25 η γεννήτρια στροβιλισμού τύπου 1 επέφερε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, στη συγκεκριμένη περίπτωση αλλοιώνει τον συντελεστή άνωσης και τείνει να τον μεγαλώσει συγκριτικά με τον μέτρο που θα είχε χωρίς την προσθήκη των γεννητριών. Αντίθετα ο συντελεστής οπισθέλκουσας και συνεπώς και η δύναμη Drag βελτιώνονται με την προσθήκη των γεννητριών. Η πολύ μικρή όμως βελτίωση της οπισθέλκουσας συγκριτικά με τη μεγάλη αστοχία που υπήρξε στη βελτίωση της άνωσης κρίνει την χρήση του συγκεκριμένου τύπου γεννήτριας ανεπιτυχή.



Σχ.4.31. Ahmed 35 με την προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 1.

	Ahmed 35		Ahmed 35 5vortex1	
Cd	0,304		0,2988	
Cl	0,0608		0,0802	
Drag Force N	32,78		32,1	
Lift Force N	6,53		8,6	

Πίνακας 4.11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα περίπτωσης 5 γεννητριών τύπου 1.



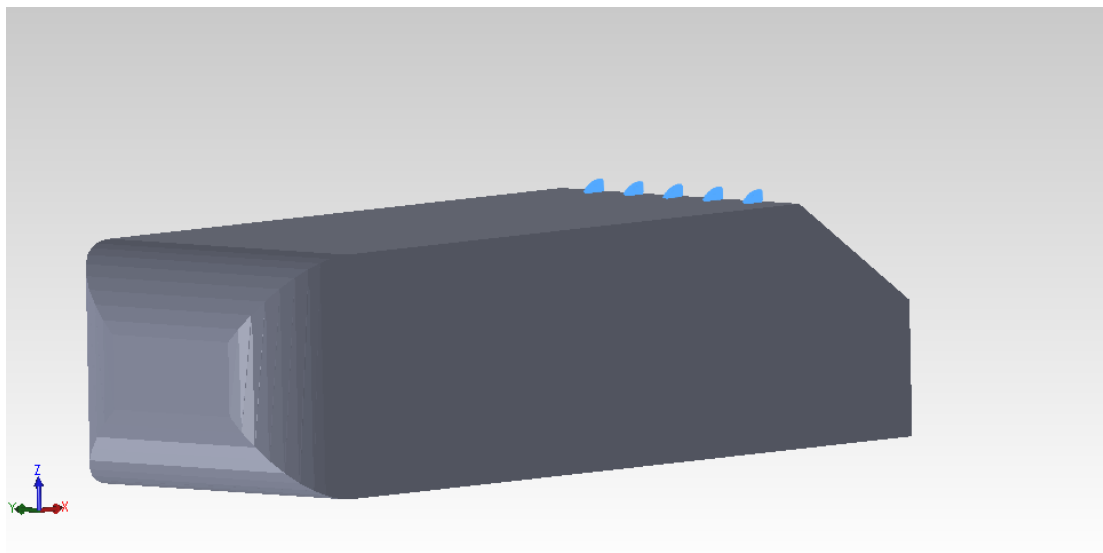
Σχ.4.32. Αποκόλληση της ροής γύρω από το Ahmed 35 με 5 γεννήτριες τύπου 1.

#### 4.4.2. Ahmed 35 με προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 2

Στη συγκεκριμένη περίπτωση Σχ.4.33 προέκυψαν τα βέλτιστα αποτελέσματα από τις τρεις γεωμετρίες των γεννητριών. Εδώ χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια στροβιλισμού τύπου 2 όπου ουσιαστικά το ύψος κατά z'z είναι 12.5 mm και η γωνία της spline 58°.

Για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος επιλέχθηκε να κρατηθούν οι ίδιες ρυθμίσεις με αυτές της ενότητας 4.4.2 μολονότι το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν αρκετά ικανοποιητικό.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση της ροής Σχ.4.34 για αυτήν την περίπτωση Πίνακας4.12, είναι εντυπωσιακά διότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας μειώθηκε ικανοποιητικά αλλά και κυρίως εξαιτίας του ότι δημιουργήθηκε αρνητική τιμή συντελεστή άνωσης. Συνεπώς η προσθήκη των γεννητριών τύπου 2 κρίνεται επιτυχής και βελτιώνεται έτσι η αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου και η ευστάθεια του στο δρόμο. Τέλος η ανακυκλοφορία των γραμμών ροής στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου είναι ιδιαίτερα εμφανής Σχ.4.35 και Σχ.4.36.

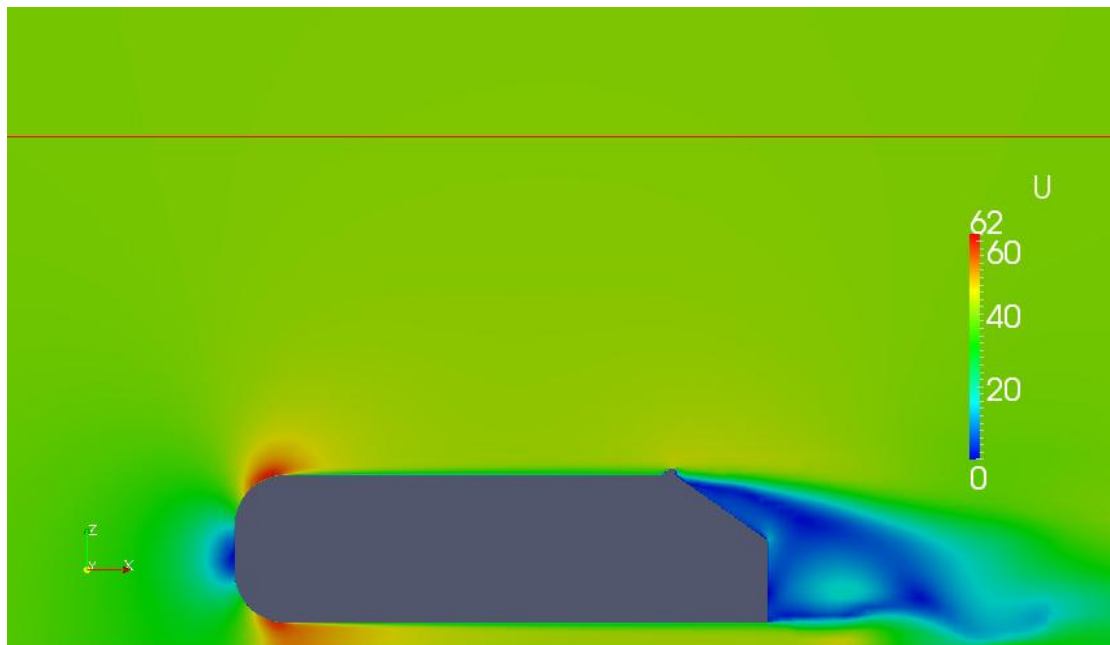


Σχ.4.33. Ahmed 35 με προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 2.

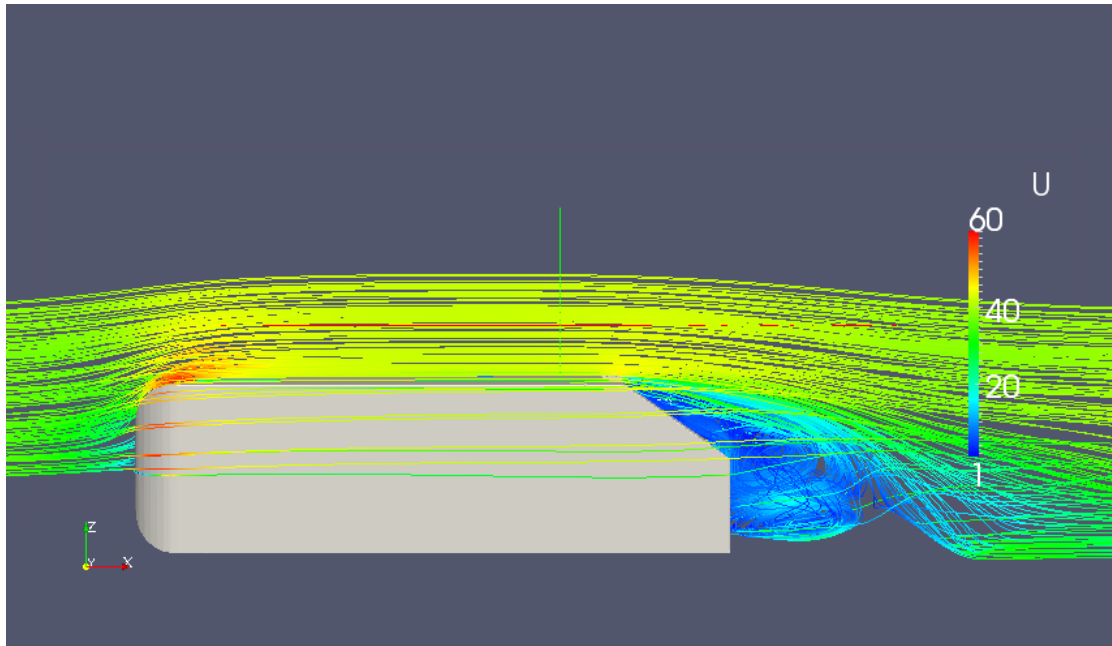


	Ahmed 35	Ahmed 35 5vortex2
Cd	0,304	0,272
Cl	0,0608	-0,035
Drag Force N	32,78	29,3
Lift Force N	6,53	-3,87

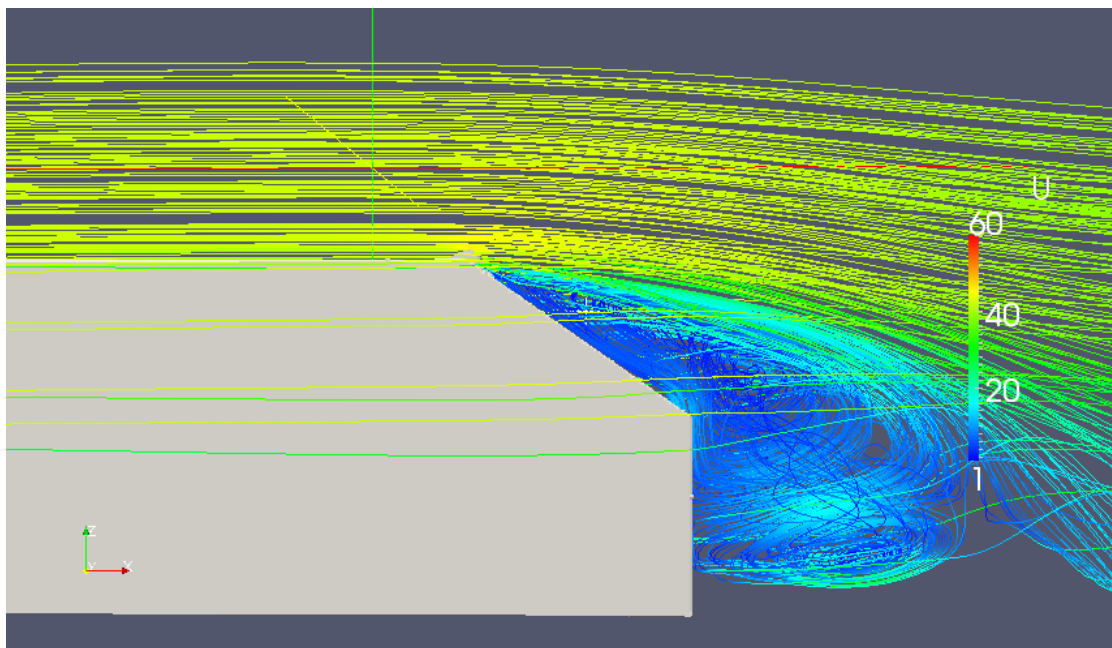
Πίνακας 4.12. Συγκεντρικά αποτελέσματα Ahmed 35/ 5 vortex 2.



Σχ.4.34. Γεωμετρία με τα βέλτιστα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά στο Ahmed 35.



Σχ.4.35. Γραμμές Ροής Ahmed 35.

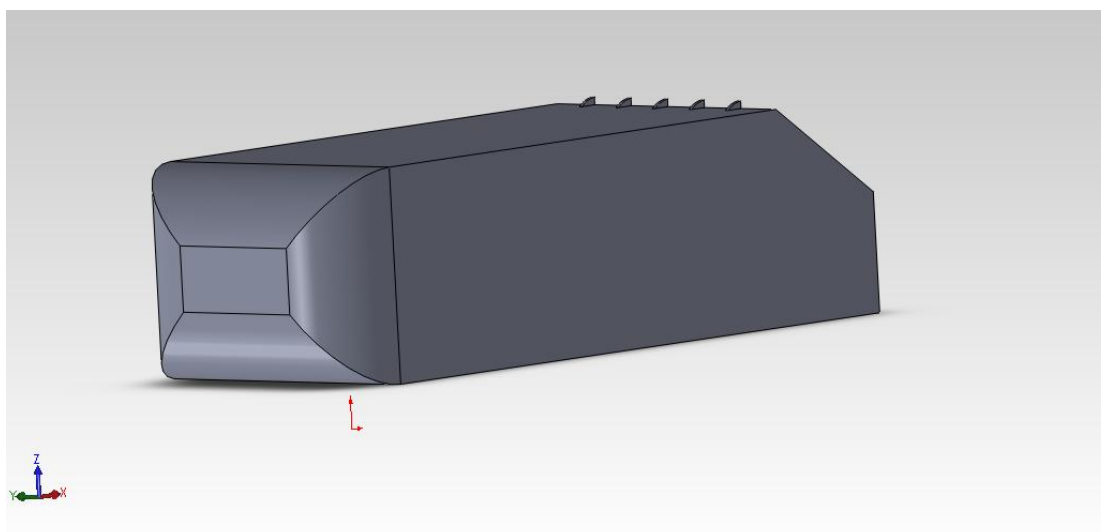


Σχ.4.36. Ανακυκλοφορία της ροής στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου Ahmed 35.

#### 4.4.3 Προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 στο Ahmed 35

Η προσθήκη αυτού του τύπου των γεννητριών στο Ahmed 25 τέθηκε ανεπιτυχής καθώς αλλοιώνεται η αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου αφού μεγαλώνουν οι δύο συντελεστές αντίστασης και άνωσης. Ωστόσο στο Ahmed 35 Σχ.4.37 πρόκειται για μία εντελώς διαφορετική κατάσταση διότι υπάρχει πολύ καλή βελτίωση σε αυτούς του δύο συντελεστές και τις αντίστοιχες δυνάμεις τους.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ρυθμίστηκε το tolerance του αρχείου Snappedge σε 0.6 και τέθηκαν 4 περιοχές πλεγματικών διαστρωματώσεων με επίπεδο πυκνότητας 3.

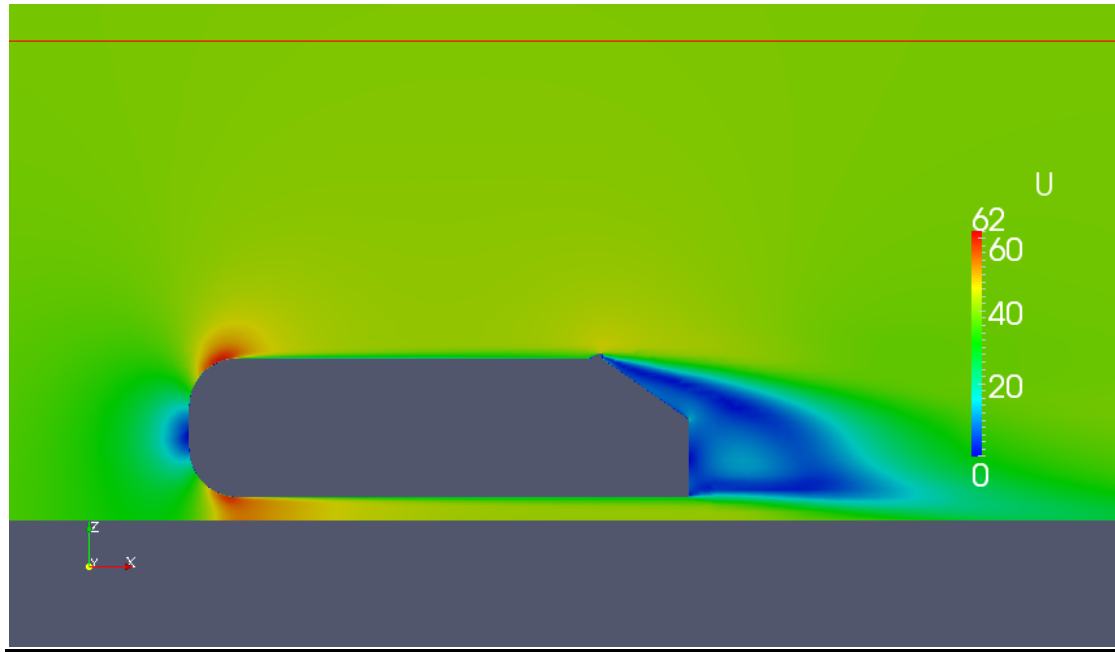


Σχ.4.37. Ahmed 35 με την προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3.

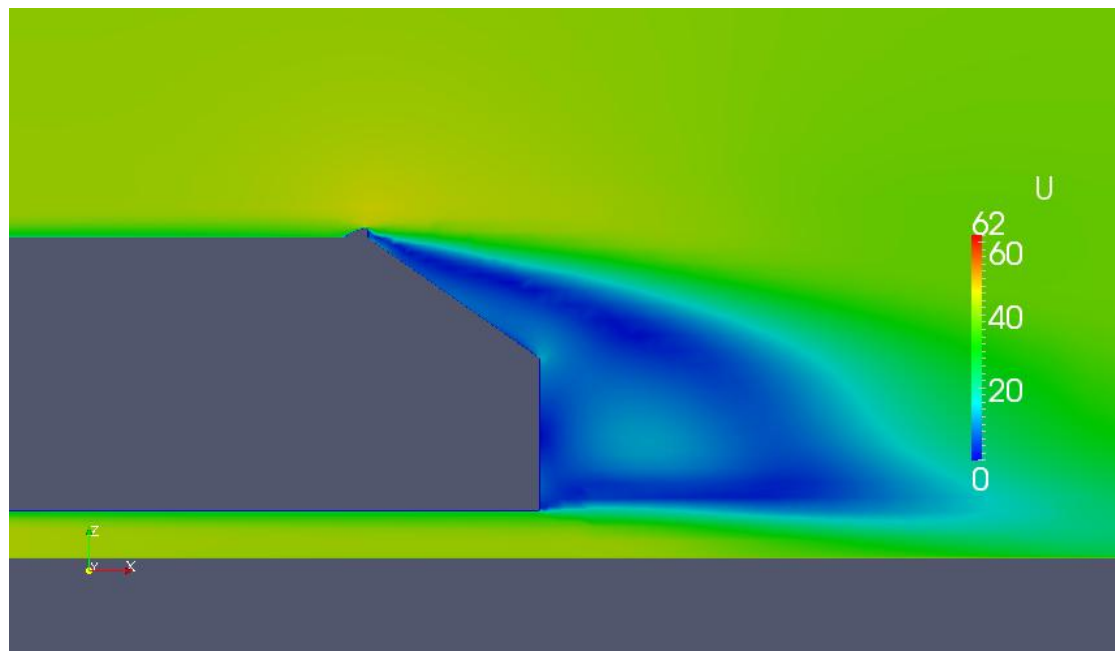
Στο πίνακα 4.12 εμφανίζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι υπάρχει ικανοποιητική μείωση του συντελεστή αντίστασης και αρκετά μεγάλη μείωση στο συντελεστή άνωσης συγκριτικά με τα αντίστοιχα μεγέθη του Ahmed 35 χωρίς την προσθήκη γεννητριών. Συνεπώς κρίνεται επιτυχής η προσθήκη 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3. Στα Σχ.4.38 και 4.39 παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο αποκολλάται η ροή.

	Ahmed 35	Ahmed 35 5vortex3
Cd	0,304	0,2973
Cl	0,0608	0,049
Drag Force N	32,78	31,9
Lift Force N	6,53	5,32

Πίνακας 4.12. Αποτελέσματα επίλυσης της ροής με 5 γεννήτριες τύπου 3.



Σχ.4.38. Αποκόλληση της ροής Ahmed 35.



Σχ.4.39. Από πλησιέστερη όψη στο Ahmed 35 η αποκόλληση της ροής.

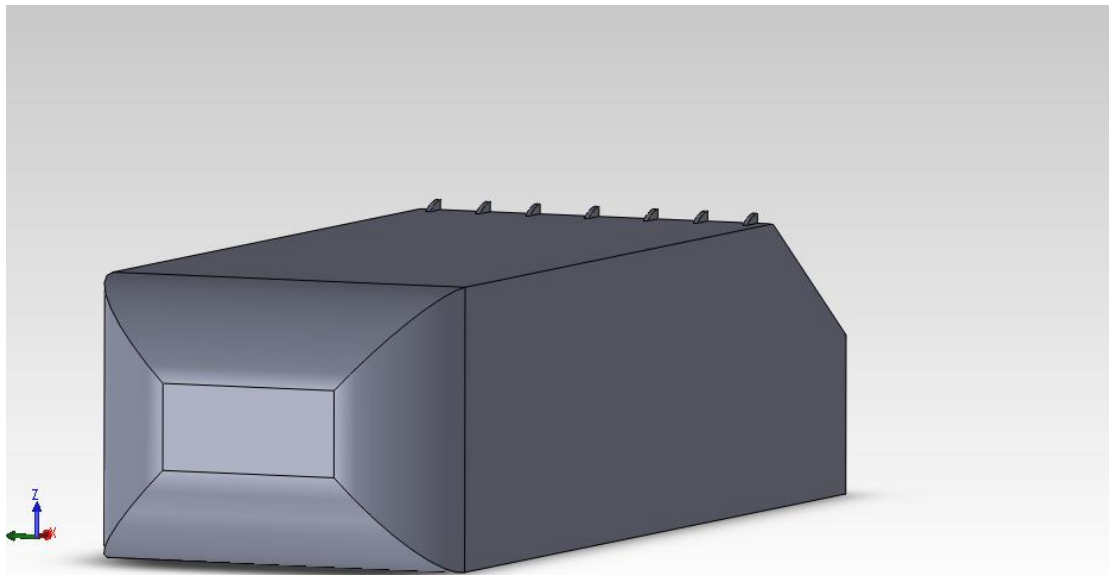
#### 4.4.4. Περιπτώσεις εναλλαγής του αριθμού των γεννητριών

Η ενότητα του κεφαλαίου αυτού ασχολείται με τις γεννήτριες στροβιλισμού τύπου 3. Επιλέγοντας έτσι αυτό τον τύπο έχουμε τα πειραματικά δεδομένα της ενότητας 4.4.3 που μόλις αναφέρθηκε για την αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου στην προσθήκη 5 γεννητριών και θα ασχοληθούμε με την αύξηση του αριθμού των γεννητριών.

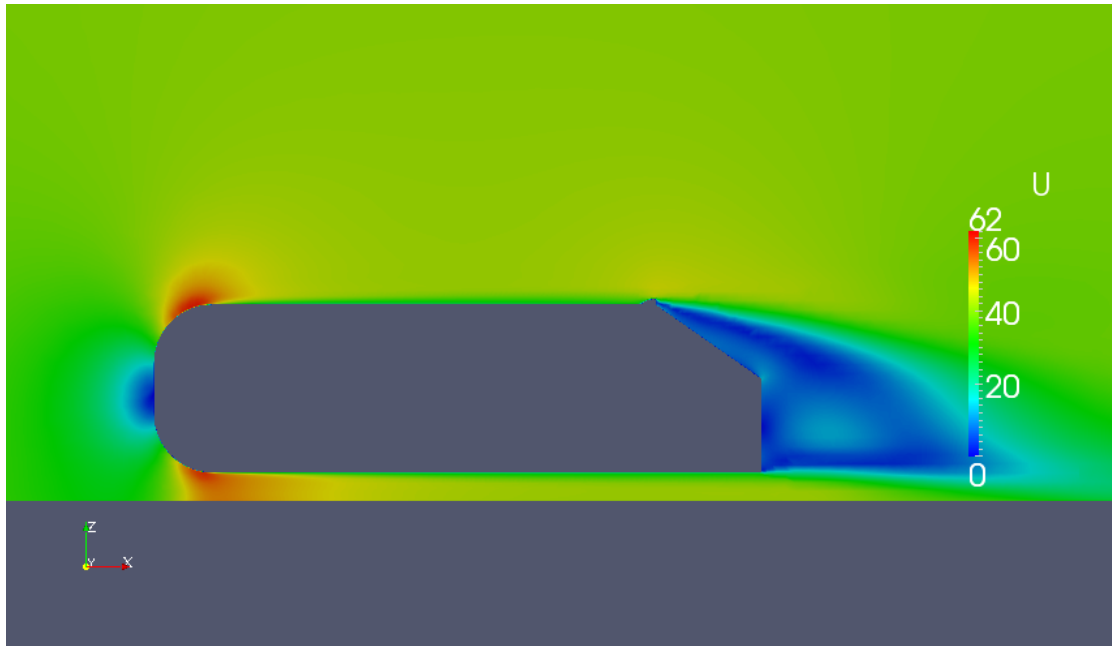
Οι περιπτώσεις που εξετάζονται περιέχουν 6,7 και 8 γεννήτριες στροβιλισμού Σχ.4.40 και Σχ.4.42, αντίστοιχα τοποθετημένες σε κατάλληλη θέση κάθε φορά. Στους πίνακες 4.13, 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα συγκριτικά με το απλό Ahmed 35 και στη συνέχεια στο πίνακα 4.16 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα.

Οι ρυθμίσεις που έγιναν για τη δημιουργία αυτών των υπολογιστικών πλεγμάτων είναι οι εξής :

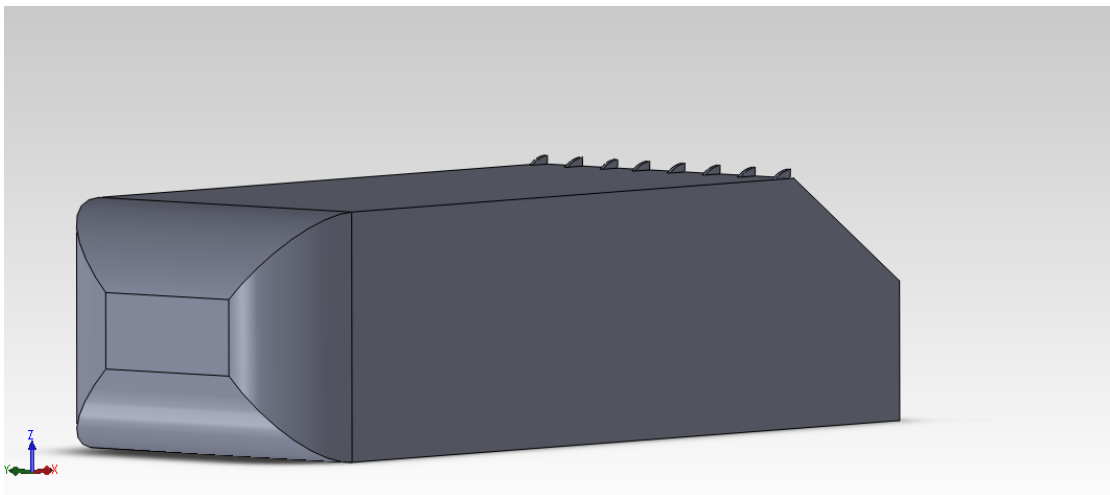
- i) Αύξηση του αριθμού πυκνότητας της πλεγματικής διαστρωμάτωσης `refinement_vortex` σε 5 από 4 που ήταν.
- ii) Ρύθμιση του `tolerance` του `SnapEdge` σε 0.6.
- iii) Οι επαναλήψεις του κώδικα `SnappyHexMesh` που ελέγχουν την προσαρμογή του πλέγματος στις δύο επιφάνειες ρυθμίστηκαν στο 15.



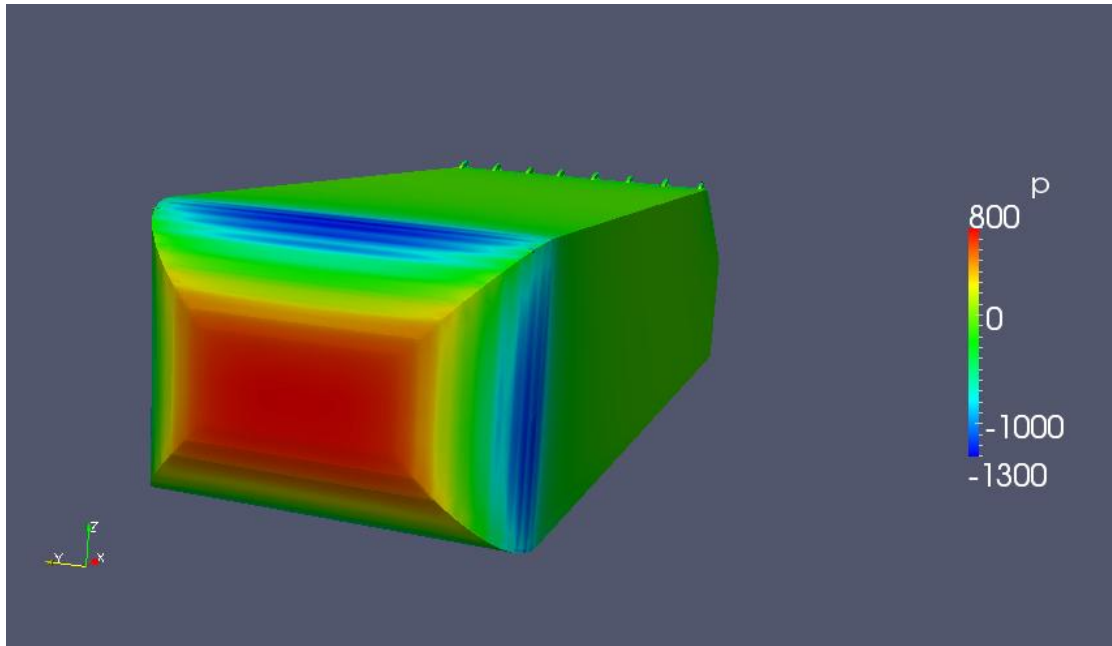
Σχ.4.40. 7 γεννήτριες στροβιλισμού τοποθετημένες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους.



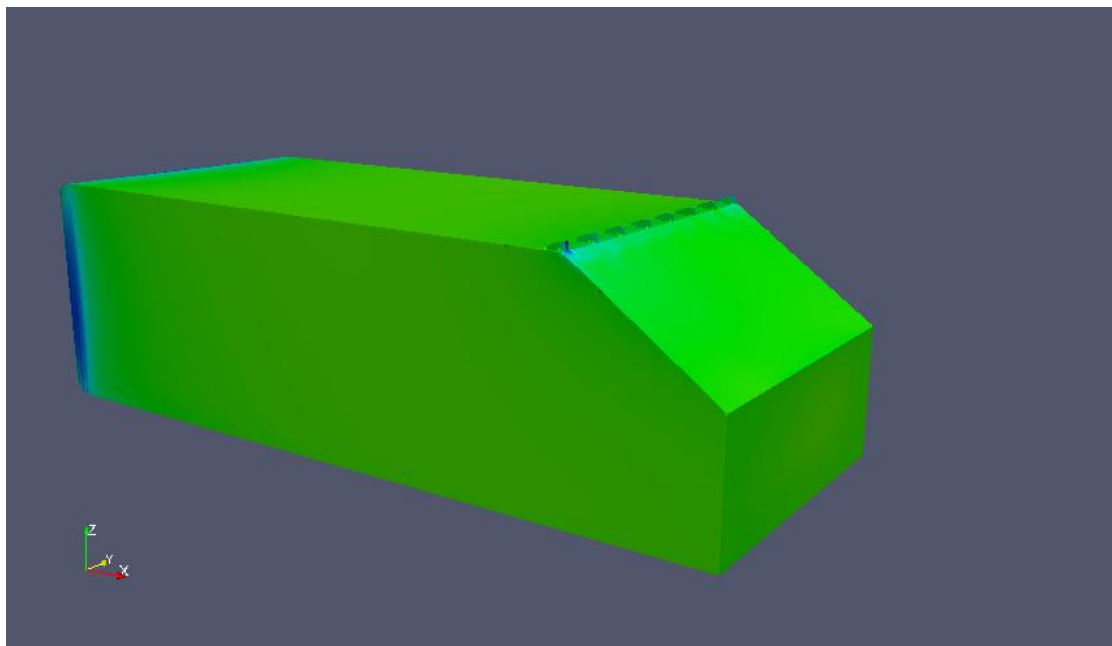
Σχ.4.41. Σημείο αποκόλλησης της ροής για 7 γεννήτριες στο Ahmed 35.



Σχ.4.42. 8 γεννήτριες στροβιλισμού τύπου 3.



Σχ.4.43. Κατανομή πίεσης πάνω στο Ahmed 35 με 8 γεννήτριες στροβιλισμού.



Σχ.4.44. Κατανομή πίεσης από άλλη όψη.

Στην περίπτωση προσθήκης 6 γεννητριών στροβιλισμού και στην επίλυση της ροής Σχ.4.41 παρατηρούμε μικρή μείωση στο συντελεστή αντίστασης και λίγο μεγαλύτερη μείωση στον συντελεστή άνωσης συγκριτικά με τα αποτελέσματα της ροής χωρίς γεννήτριες γεγονός που κρίνει την προσθήκη των γεννητριών στο σώμα επιτυχή.

	Ahmed 35	Ahmed 35 6vortex3
Cd	0,304	0,3019
Cl	0,0608	0,0484
Drag Force N	32,78	32,4
Lift Force N	6,53	5,2

Πίνακας 4.13. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Ahmed 35 με 6 γεννήτριες τύπου 3.

Με την προσθήκη των 7 γεννητριών στροβιλισμού παρατηρούμε ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση στη συμπεριφορά των αεροδυναμικών δεικτών του αυτοκινήτου καθώς υπάρχει μεγαλύτερη πτώση του συντελεστή αντίστασης συγκριτικά και με το απλό Ahmed 35 αλλά και με τις 6 γεννήτριες. Επίσης μεγαλύτερη πτώση υπάρχει και στο συντελεστή άνωσης του αυτοκινήτου καθώς γίνεται περίπου το 1/6 της αρχικής του τιμής και το 1/3 της τιμής που καταλαμβάνει με τις 6 γεννήτριες.

	Ahmed 35	Ahmed 35 7vortex3
Cd	0,304	0,2939
Cl	0,0608	0,0196
Drag Force N	32,78	30,5
Lift Force N	6,53	3,01

Πίνακας 4.14. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Ahmed 35 με 7 γεννήτριες τύπου 3.

Στη συνέχεια επιλέγεται να τοποθετηθούν 8 γεννήτριες τύπου 3. Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα Πίνακας 4.15, ότι οι γεννήτριες βελτίωσαν την αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου συγκριτικά με τους συντελεστές αντίστασης και άνωσης που υπάρχουν στο απλό Ahmed 35 ωστόσο τα αποτελέσματα συγκριτικά με



της παραπάνω περίπτωσης αλλοιωθήκαν οπότε κρίθηκε σκόπιμο να μην πραγματοποιηθεί περαιτέρω αύξηση του αριθμού των γεννητριών. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.16 και η κατανομή πίεσης γύρω από το Ahmed με 8 γεννήτριες φαίνεται στα Σχ4.43 και 4.44.

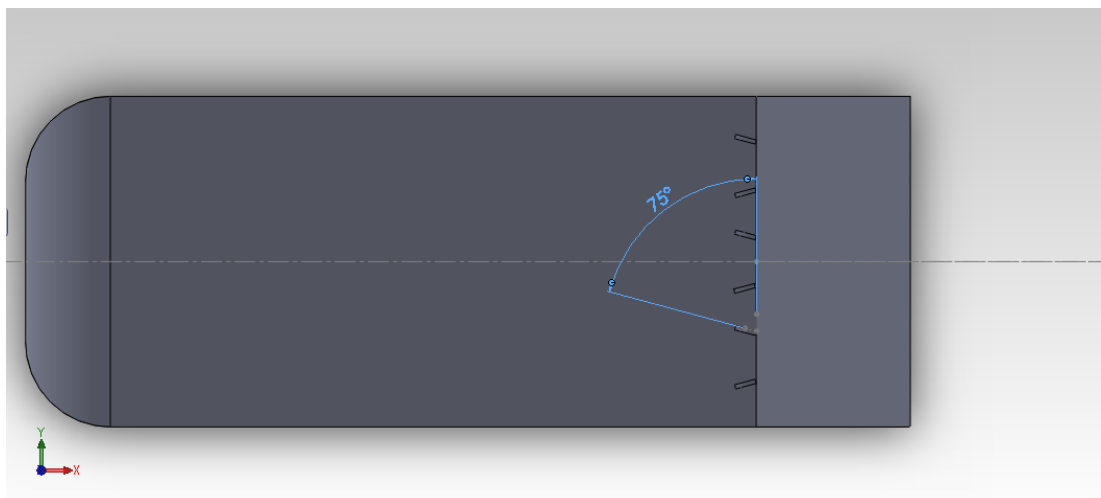
	Ahmed 35	Ahmed 35 8vortex3
Cd	0,304	0,3016
Cl	0,0608	0,056
Drag Force N	32,78	31,4
Lift Force N	6,53	6,05

Πίνακας 4.15. Αποτελέσματα επίλυσης της ροής με 8 γεννήτριες στροβιλισμού.

	Cd	Cl	Drag	Lift
ahmed35	0,0304	0,0608	32,78	6,53
6vortex	0,3019	0,0484	32,4	5,2
7vortex	0,2939	0,0196	30,5	3,01
8vortex	0,3016	0,056	31,4	6,05

Πίνακας 4.16. Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων.

#### 4.4.5 Τοποθέτηση γεννητριών στροβιλισμού υπό γωνία $75^\circ$



Σχ. 4.45. Τοποθέτηση γεννητριών στροβιλισμού υπό γωνία  $75^\circ$  μοιρών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ρυθμίσεις για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος διατηρήθηκαν ίδιες με της προηγούμενης ενότητας. Διαφοροποίηση επήλθε στη θέση τοποθέτησης των γεννητριών. Επιλέχθηκε η περίπτωση των 6 γεννητριών στροβιλισμού για σύγκριση. Η γωνία που επιλέχθηκε ανάμεσα στις γεννήτριες και την αξονική είναι  $75^\circ$  Σχ.4.45.

Σύγκριση πραγματοποιείται:

- i) ανάμεσα στη περίπτωση του απλού Ahmed 35 και της προσθήκης των 6 γεννητριών υπό γωνία  $75^\circ$ . Πίνακας 4.17.
- ii) Στην περίπτωση τοποθέτησης των 6 γεννητριών με και χωρίς γωνία ως προς την επιφάνεια του σώματος. Πίνακας 4.18.

Παρατηρούμε στον Πίνακα 4.17 όπου καταγράφονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ροής για τις 6 γεννήτριες με γωνία  $75^\circ$ , ότι οι συντελεστές αντίστασης και άνωσης αλλοιώνονται και συνεπώς η προσθήκη του συγκεκριμένου τύπου γεννητριών και υπό την συγκεκριμένη γωνία δεν επιφέρουν βελτίωση στην αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Συνεπώς, θεωρείται ανεπιτυχής η προσθήκη των 6 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 υπό γωνία  $75^\circ$ , χωρίς όμως αυτό να είναι καθολικό και να υποδηλώνει ότι δεν μπορεί να βρεθεί μία χρυσή τομή ανάμεσα στη γεωμετρία του σώματος και την γωνία, η οποία θα επιφέρει τα βέλτιστα θετικά αποτελέσματα για την αεροδυναμική του αυτοκινήτου και, συνεπώς, τη μείωση των συντελεστών αντίστασης και άνωσης.

	Ahmed 35		Ahmed 35 6vortex75°	
Cd	0,304		0,3214	
Cl	0,0608		0,1389	
Drag Force N	32,78		34,5	
Lift Force N	6,53		14,9	

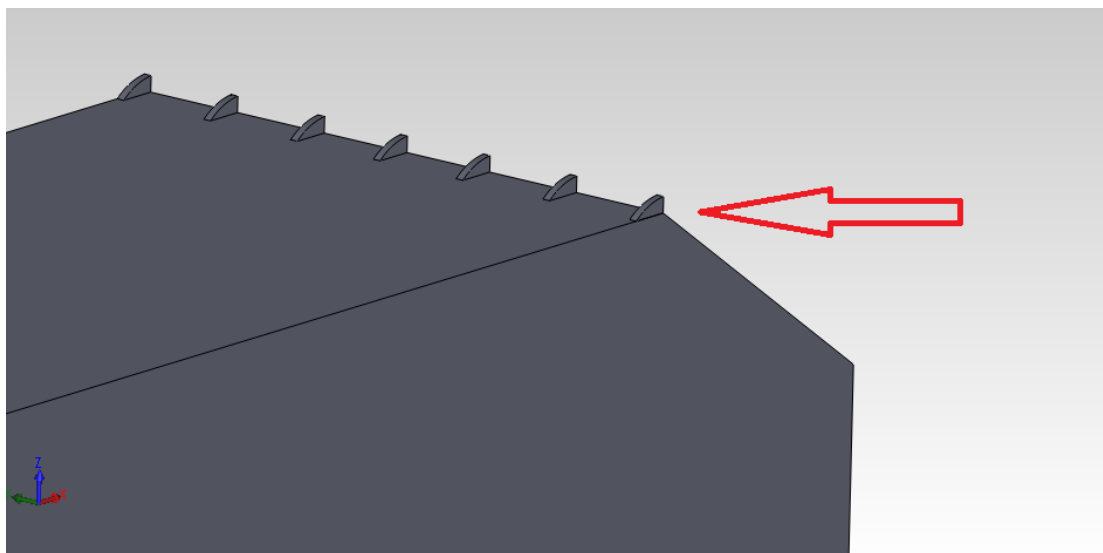
Πίνακας 4.17. Αποτελέσματα επίλυσης της ροής για τις 6 γεννήτριες υπό γωνία 75°.

	Ahmed 35 6vortex		Ahmed 35 6vortex75°	
Cd	0,3019		0,3214	
Cl	0,0484		0,1389	
Drag Force N	32,4		34,5	
Lift Force N	5,2		14,9	

Πίνακας 4.18. Συγκεντρικός Πίνακας αποτελεσμάτων.

#### 4.4.6 Τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 στα άκρα

Όμοια με το Ahmed 25 έτσι και εδώ θα εξεταστεί μία τελευταία περίπτωση επίλυσης της ροής όπου θα τοποθετηθούν 7 γεννήτριες στροβιλισμού σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο όμως, ώστε οι δύο ακραίες γεννήτριες στροβιλισμού να βρίσκονται στις άκρες της επιφάνειας του αυτοκινήτου όπως φαίνεται στο Σχ.4.46.



Σχ4.46. Γεννήτριες στροβιλισμού τοποθετημένες στα άκρα του αυτοκινήτου.

Για την επίλυση της συγκεκριμένης περίπτωσης οι αλλαγές και οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

- i) Δημιουργία ενιαίου .stl σώματος και γεννήτριας στροβιλισμού.
- ii) Καθορισμός tolerance αρχείου SnapEdge στο 0.8.
- iii) Επιλογή πύκνωσης refinement\_vortex στο επίπεδο 4 καθώς μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά του πλέγματος στις ακμές όπου ενώνεται το σώμα με τις γεννήτριες στα άκρα.
- iv) Ρύθμιση επαναλήψεων του κώδικα SnappyHexMesh στο 15 για την καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος.
- v) Ρύθμιση του DecomposeParDict για επίλυση της ροής σε 32 επεξεργαστές τεχνολογίας Intel Xeon 2.40 GHz.

Στον Πίνακα 4.19 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της επίλυσης της ροής Σχ.4.47 και Σχ.4.48. Παρατηρείται βελτίωση στην αεροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος συγκριτικά με το απλό Ahmed 35 και ειδικότερα οι συντελεστές αντίστασης και άνωσης μειώνονται. Ωστόσο η τοποθέτηση των γεννητριών στα άκρα δεν επιφέρει μεγαλύτερες βελτιώσεις από αυτές που επιφέρει

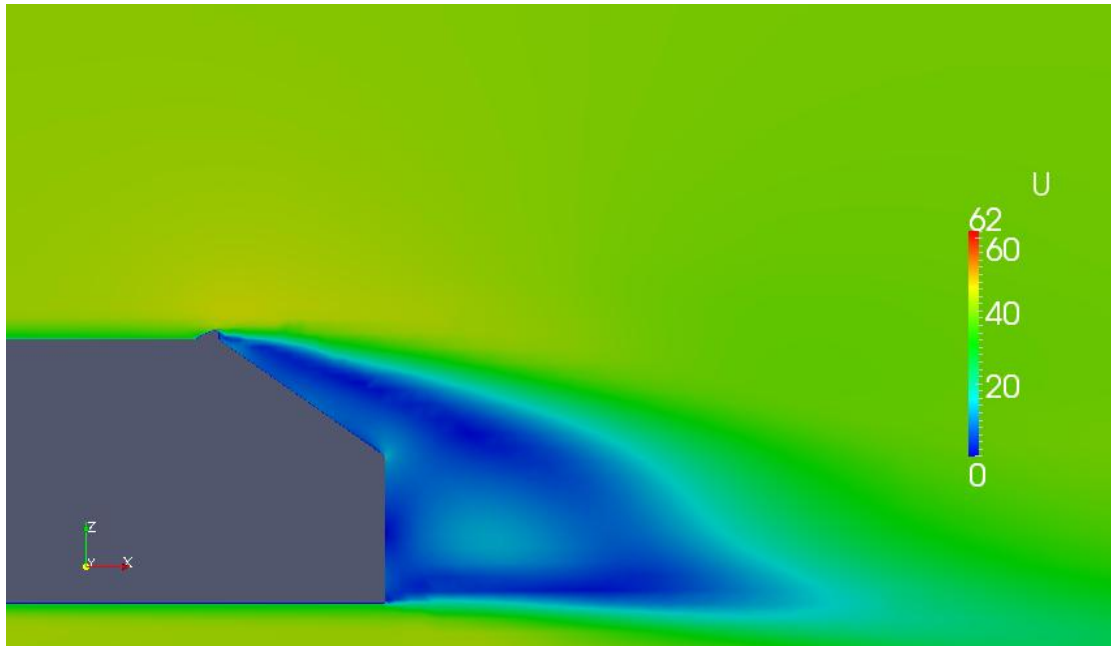
η τοποθέτηση των γεννητριών στροβιλισμού σε ίσες αποστάσεις όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.20. Συνεπώς, η τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού στα άκρα για βελτίωση της αεροδυναμικής κρίνεται ανεπιτυχής.

	Ahmed 35		Ahmed 35 7vortexedge	
Cd	0,304		0,2956	
Cl	0,0608		0,0358	
Drag Force N	32,78		31,7	
Lift Force N	6,53		5,03	

Πίνακας 4.19. Αποτελέσματα επίλυσης της ροής.

	Ahmed 35 7vortex		Ahmed 35 7vortex.edge	
Cd	0,2939		0,2956	
Cl	0,0196		0,0385	
Drag Force N	30,5		31,7	
Lift Force N	3,01		5,03	

Πίνακας 4.20. Συγκεντρικά αποτελέσματα γεννητριών σε ίσες αποστάσεις και στα άκρα.

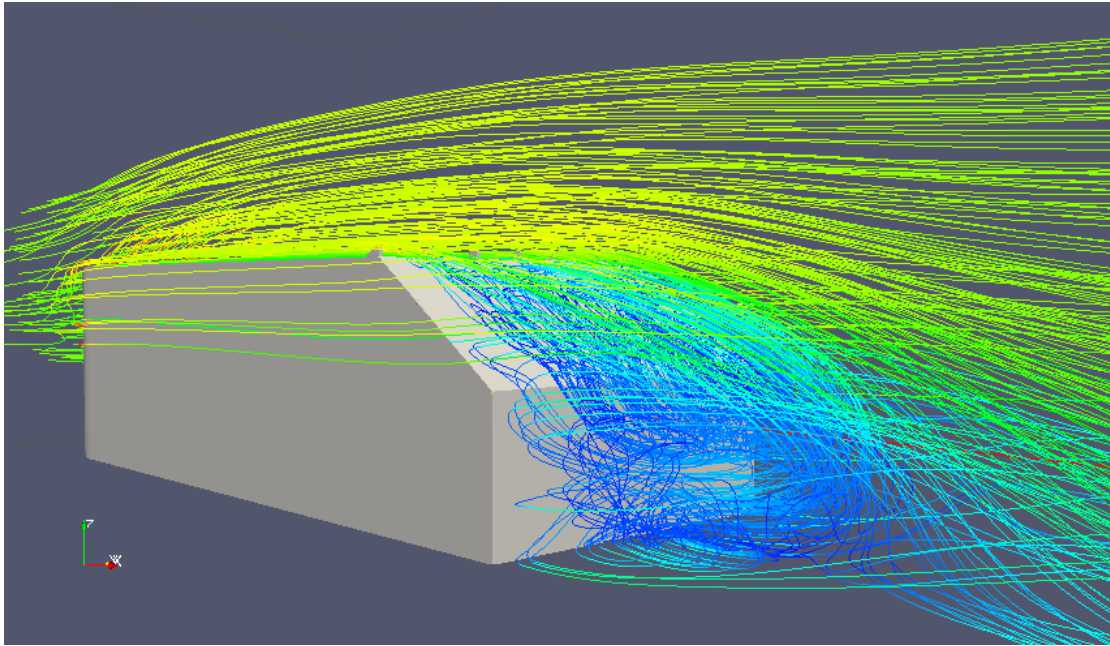


Σχ.4.47. Αποκόλληση της ροής.

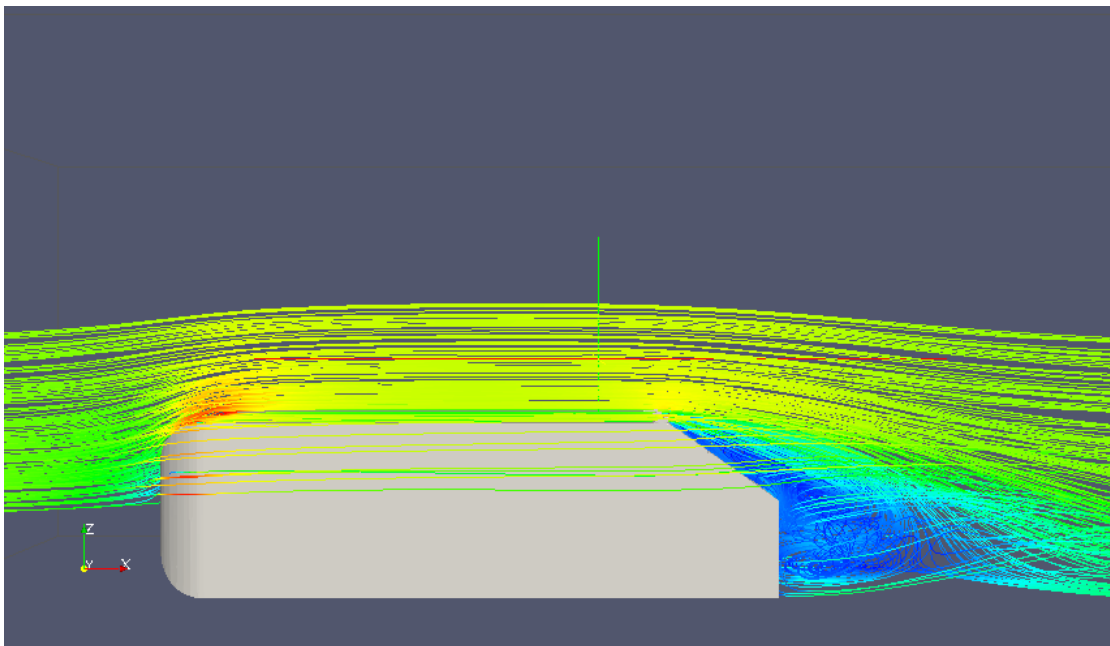


Σχ.4.48. Κατανομή της πίεσης πάνω στο Ahmed 35 με 7 γεννήτριες στα άκρα.

Τέλος, χαρακτηριστικά είναι τα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής για την περίπτωση των γεννητριών στα άκρα καθώς επιταχύνουν το σημείο αποκόλλησης των δύο πλάγιων στροβίλων που αναπτύσσονται Σχ.4.49 και Σχ.4.50.



Σχ.4.49. Γραμμές Ροής στο Ahmed 35.



Σχ.4.50. Ανακυκλοφορία στο πίσω μέρος του Ahmed 35.

## 5. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της χρήσης γεννητριών στροβιλισμού στο πίσω κεκλιμένο επίπεδο του Ahmed body, στη συνολική αεροδυναμική του επίδοση. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε κατάλληλο υπολογιστικό πλέγμα με χρήση εργαλείων και πλεγματοποιητών όπως το SnappyHexMesh και SnapEdge. Ένα από τα πλεονεκτήματα του κώδικα SnappyHexMesh αποτελεί το γεγονός ότι είναι αρκετά εύχρηστος και προσιτός για νέους χρήστες. Ωστόσο ένα από τα μειονεκτήματα του κώδικα αποτελεί το γεγονός ότι αδυνατεί να ακολουθήσει πιστά δύσκολες γεωμετρίες και καμπύλες επιφανειών όπως αυτές των γεννητριών στροβιλισμού, διαταραχές που, ευτυχώς, με τη σειρά του έρχεται να διορθώσει το SnapEdge. Έτσι, μέσα από κατάλληλες τροποποιήσεις των αρχείων εισόδου και τη δημιουργία κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος, μελετήθηκε η επίδραση της τοποθέτησης γεννητριών στροβιλισμού στην αεροδυναμική του αυτοκινήτου.

Κριτήριο βελτίωσης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς αποτέλεσε η μείωση των συντελεστών αντίστασης και άωσης συγκριτικά με τις αρχικές τιμές που υπολογίζονται για την απλή γεωμετρία. Η διεργασία αυτή δεν πραγματοποιήθηκε με εξελικτικό αλγόριθμο, αλλά μέσω σειριακών δοκιμών με διαφορετικές γεωμετρίες γεννητριών στροβιλισμού και σε διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης πάνω στο πίσω κεκλιμένο επίπεδο. Συνοψίζοντας, πραγματοποιήθηκε επίλυση της ροής (ασυμπίεστου ρευστού) σε υπολογιστικό πλέγμα περίπου 4.000.000 κελιών. Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε είναι k- $\omega$  SST και ο χρόνος επίλυσης της ροής χρησιμοποιώντας 32 επεξεργαστές Intel Xeon 2.4 GHz ανήλθε, κατά μέσο όρο, σε 4 ώρες. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του κεφαλαίου 4 μπορούν να δοθούν με μορφή διαγραμμάτων Σχ.5.1-5.8. Οι τιμές για τη δημιουργία των παρακάτω διαγραμμάτων είναι οι εξής :

Case	Cd	Ahmed 25		
		Cl	Drag	Lift
1	0,2709	0,2591	28,2	27,87
2	0,2763	0,276	28,7	29,67
3	0,2591	0,2343	27,8	25,19
4	0,258	0,2361	27,6	25,39
5	0,2548	0,2258	27,3	24,27
6	0,2744	0,1987	29,4	21,36
7	0,2561	0,2238	27,4	24,06
8	0,2653	0,2212	28,4	23,79
9	0,2554	0,1965	27,4	21,13

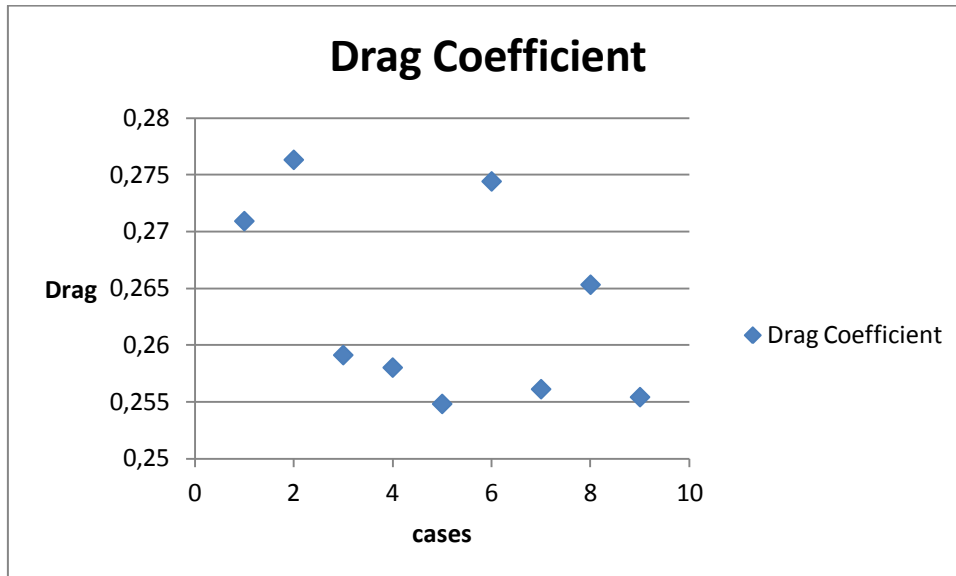


	Ahmed 35			
Case	Cd	Cl	Drag	Lift
1	0,304	0,0608	32,78	6,53
2	0,2973	0,049	31,9	5,32
3	0,2727	-0,035	29,3	-3,87
4	0,2988	0,0802	32,1	8,6
5	0,3019	0,0484	32,4	5,2
6	0,3214	0,1389	34,5	14,9
7	0,2956	0,0385	31,7	5,03
8	0,2939	0,0196	30,5	3,01
9	0,3016	0,056	31,4	6,05

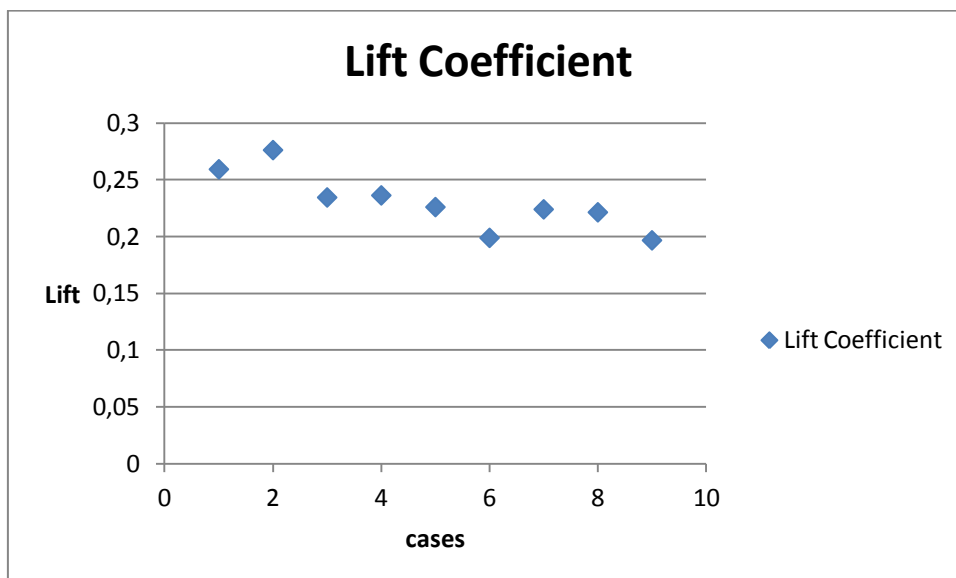
- Με 1,...,9 συμβολίζονται οι Περιπτώσεις για το Ahmed (25° και 35° αντίστοιχα):

- 1) Το απλό μοντέλο του Ahmed (25° ή 35°) χωρίς εξωτερική επίδραση αεροδυναμικής βελτιστοποίησης.
- 2) Το παραπάνω μοντέλο με την τοποθέτηση 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 (βλ. 4.3.3, 4.4.3).
- 3) Το Ahmed με 5 γεννήτριες στροβιλισμού τύπου 2 (βλ. 4.3.2, 4.4.2).
- 4) Τοποθέτηση 5 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 1 (βλ. 4.3.1, 4.4.1).
- 5) Τοποθέτηση 6 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3.
- 6) Τοποθέτηση των ανωτέρω 6 γεννητριών στροβιλισμού υπό γωνία ως προς την πίσω κεκλιμένη πλευρά του Ahmed 75°.
- 7) Τοποθέτηση 7 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 στα άκρα του Ahmed 35.
- 8) Επαναπροσδιορισμός των θέσεων των γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 και απομάκρυνση των 2 από τις άκρες αυτού.
- 9) Τοποθέτηση 8 γεννητριών στροβιλισμού τύπου 3 σε ίσες αποστάσεις από την κεντρική αξονοσυμμετρική γραμμή.

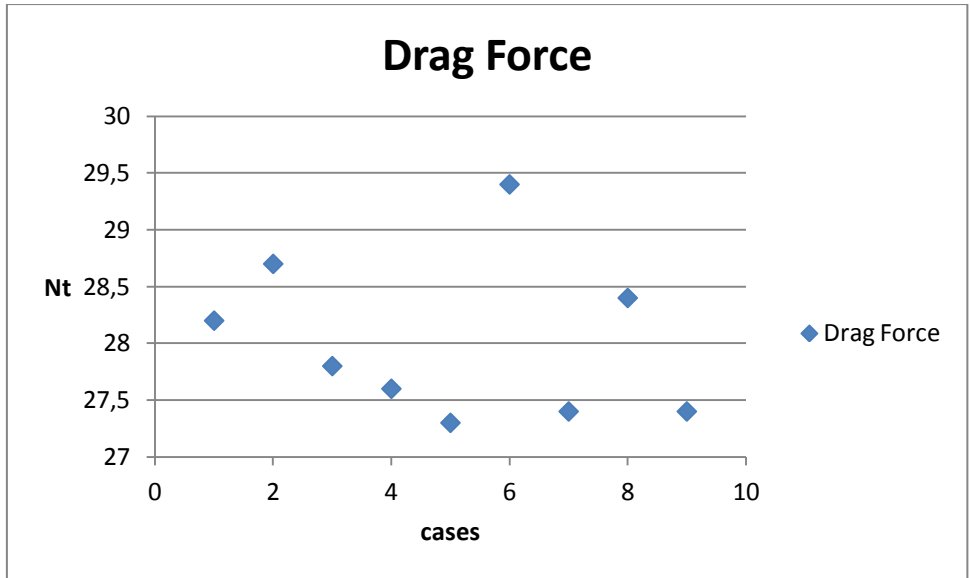
- **Ahmed 25**



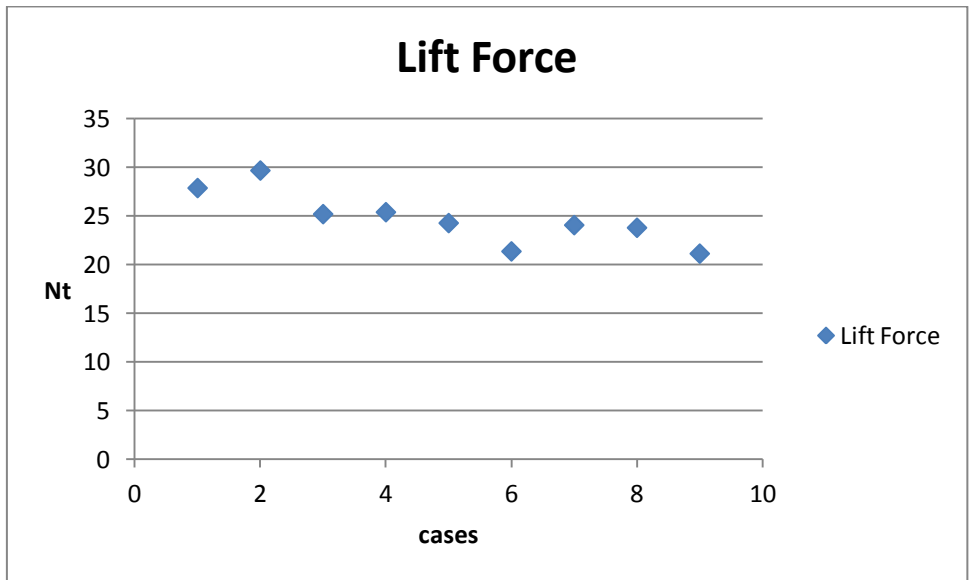
Σχ.5.1. Ahmed 25: Τιμές του συντελεστή οπισθέλκουσας για διάφορες περιπτώσεις.



Σχ.5.2. Ahmed 25 : Τιμές του συντελεστή άνωσης για διάφορες περιπτώσεις.

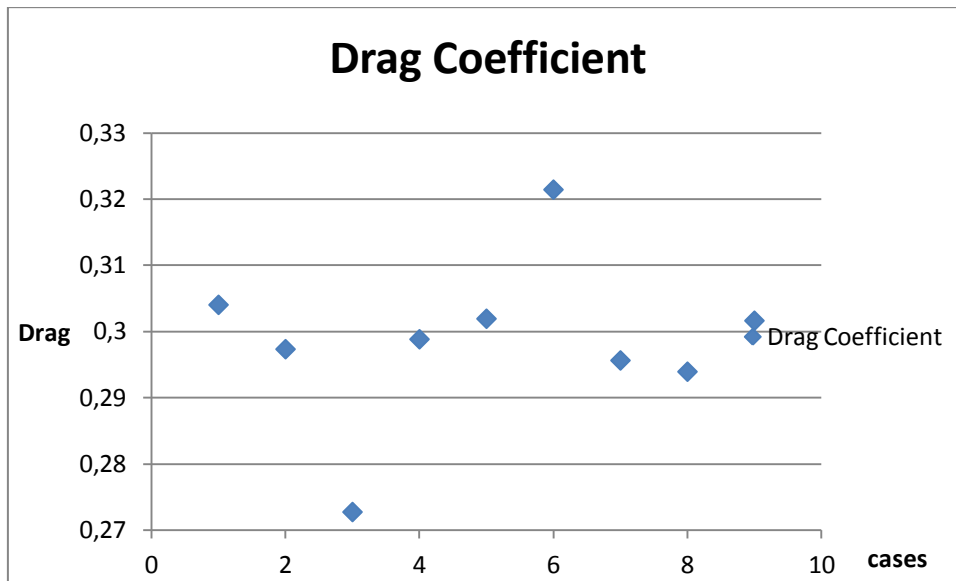


Σχ.5.3. Ahmed 25: Δύναμη Drag.



Σχ.5.4. Ahmed 25 : Δύναμη Lift.

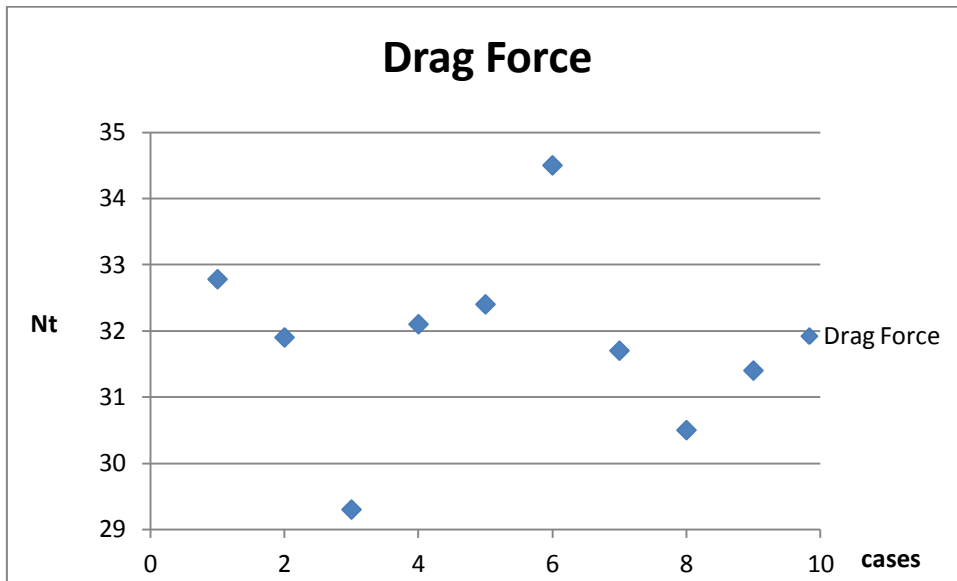
- **Ahmed 35**



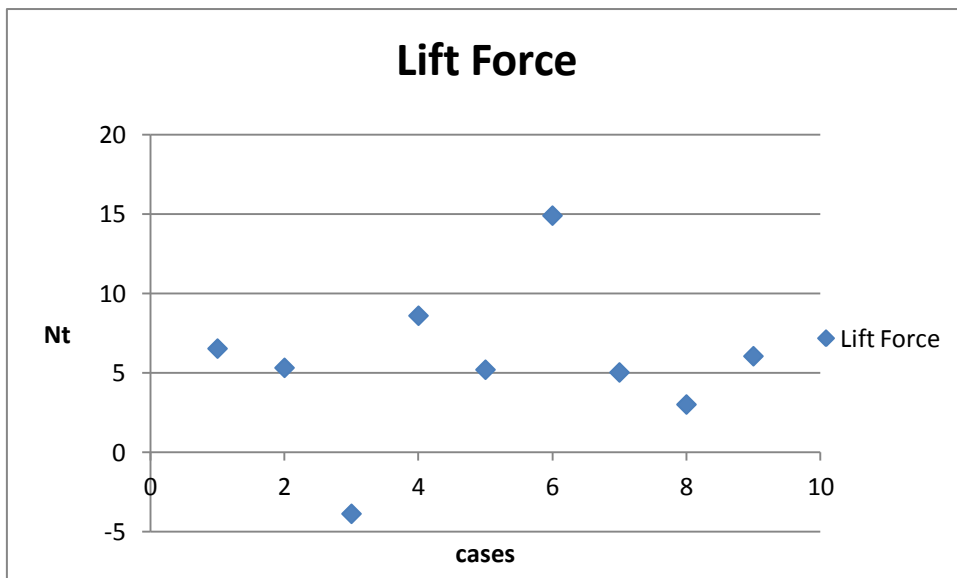
Σχ.5.5. Ahmed 35 : Τιμές του συντελεστή οπισθέλκουσας για διάφορες περιπτώσεις.



Σχ.5.6. Ahmed 35 : Τιμές του συντελεστή άνωσης για διάφορες περιπτώσεις



Σχ.5.7. Ahmed 35 : Δύναμη Drag.



Σχ.5.8. Ahmed 35 : Δύναμη Lift

Συνοψίζοντας, από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε, για την περίπτωση του Ahmed 35, ότι μεγαλύτερη βελτίωση στην αεροδυναμική συμπεριφορά επέρχεται με χρήση της γεννήτριας στροβιλισμού τύπου 2, ενώ δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας η αύξηση του αριθμού τους. Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν φάνηκε ότι οι μικρότερες τιμές των συντελεστών αντίστασης και άνωσης παρατηρούνται στην περίπτωση των 5 γεννητριών στροβιλισμού με τη γεννήτρια τύπου 2 (case 3). Αντίθετα, στο Ahmed 25, η μεγαλύτερη αεροδυναμική βελτίωση προέκυψε όταν χρησιμοποιήθηκαν 8 γεννήτριες στροβιλισμού τύπου 3 (case 9). Ακόμα, η διαδικασία που παρουσιάστηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να εφαρμοστεί και σε δυσκολότερες γεωμετρίες από αυτήν του απλοποιημένου μοντέλου αυτοκινήτου Ahmed. Επίσης, η διαδικασία βελτίωσης της αεροδυναμικής του Ahmed θα μπορούσε να έχει πραγματοποιηθεί με εξελικτικό αλγόριθμο [3] σε αντίθεση με τη διαδικασία δοκιμών που πραγματοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία, με μειονέκτημα ωστόσο το μεγάλο υπολογιστικό κόστος που θα προέκυπτε. Τέλος, ως μελλοντική εργασία προτείνεται η μοντελοποίηση γεννητριών στροβιλισμού μέσω όρων πηγής, όπως προτάθηκε στην εργασία [14]. Με αυτόν τον τρόπο θα ήταν ευκολότερη η χρήση λ.χ. εξελικτικού αλγόριθμου, αφού αλλάζοντας τη θέση τοποθέτησης της γεννήτριας στροβιλισμού το πλέγμα θα έμενε ίδιο και απλά θα χρησιμοποιούνταν όροι πηγής σε διαφορετικούς κόμβους.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Θ. Λάμπας : Βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μοντέλου αυτοκινήτου μέσω τοποθέτησης αεροτομής. Μελέτη με χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2011).
- [2] Κ. Κοντογιάννης : Βελτιστοποίηση μορφής αυτοκινήτου με χρήση εξελικτικού αλγόριθμου και υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2010).
- [3] Κ.Χ. Γιαννάκογλου : Μέθοδοι βελτιστοποίησης στην αεροδυναμική, Εκδόσεις ΕΜΠ (2006).
- [4] Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 92-0439, (1992).
- [5] G. Franck, N. Nigro, M.A. Storti and J. D'Elia : Numerical Simulation of the flow around the Ahmed vehicle model.
- [6] G. Martinat, R. Bourguet, Y. Hoarau, F. Dehaeze<sup>1</sup>, B. Jorez, and M. Braza : Numerical Simulation of the flow in the Wake of Ahmed Body Using Detached Eddy Simulation and URANS Modeling.
- [7] A. Brunn, W. Nitsche : Drag Reduction of an Ahmed Car Model by Means of Active Separation Control at the Rear Vehicle Slant, Institute of Aeronautics and Astronautics Technical University Berlin, (2006).
- [8] T. Han : Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity. AIAA Journal 27(9), 1213-1219 (1988).
- [9] Makowski, F.T., S.-E., K.: Advances in external-aero simulation of ground vehicles using the steady RANS equations. SAE Paper 2000-01-0484 (2000).
- [10] H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker : Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)
- [11] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby : A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, 1998.
- [12] Eugene de Villiers : The Potential of Large Eddy Simulation for the Modeling of Wall Bounded Flows, 2006
- [13] OpenFOAM v1.7 User Guide ([www.openfoam.com](http://www.openfoam.com))
- [14] Global Optimization Of Vortex Generators Parameters For Drag Reduction Of Ground Vehicles, T.Rouillon, F.Harambat, L.Mathelin και C.Tenaud.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Αρχεία STL (stereolithography)

Τα αρχεία .stl εμπεριέχουν την γεωμετρία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου σώματος. Προκύπτουν από σχεδιαστικά προγράμματα όπως το Solid Works και γίνεται μέσω της επιλογής να αποθηκευτεί το υπό σχεδίαση σώμα σε μορφή .stl. Υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης του αρχείου αυτού σε ASCII μορφή ή σε δυαδική μορφή. Επιλέγεται ο πρώτος τρόπος αποθήκευσης όπου η περιγραφή της γεωμετρίας του σώματος γίνεται με διακριτοποίηση της σε τριγωνικά στοιχεία τα οποία περιέχουν πληροφορίες για το κάθετο σε κάθε σημείο διάνυσμα μαζί με τις συντεταγμένες των τριών σημείων που το ορίζουν στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα.

Μία μορφή αρχείου .stl σε μορφή ASCII που χρησιμοποιήθηκε για τις 5 γεννήτριες στροβιλισμού στο Ahmed 35 είναι η ακόλουθη :

```
solid ahmed35                                     // Επιλογή ονόματος αρχείου.

facet normal -6.269636e-001 0.000000e+000 7.790485e-001 // Καρτεσιανό σύστημα.

  outer loop

    vertex 8.371483e-001 1.970000e-001 3.380000e-001

    vertex 8.371483e-001 1.920000e-001 3.380000e-001

    vertex 8.385146e-001 1.920000e-001 3.390996e-001

  endloop

endfacet

.

.

.

.

.

.endfacet

Endsolid                                         // Τέλος του αρχείου .stl.
```



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### Αρχείο Ρυθμίσεων του BlockMesh

Με τη βοήθεια του αρχείου BlockMesh δημιουργείται το αρχικό πλέγμα-βάση πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί το τελικό υπολογιστικό πλέγμα.

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\\ / F ield | OpenFOAM Extend Project: Open Source CFD |
| \\ / O peration | Version: 1.6-ext |
| \\ / A nd | Web: www.extend-project.de |
| \\ \\ M anipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object blockMeshDict;
}
// ***** //

convertToMeters 1;

vertices
(

    (-4 -2.011 0) // Κορυφές του αρχικού ορθογωνικού χωρίου
    (9 -2.011 0)
    (9 2.4 0)
    (-4 2.4 0)
    (-4 -2.011 2)
    (9 -2.011 2)
    (9 2.4 2)
    (-4 2.4 2)

);

blocks
(
```

```

    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (50 16 8) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);

patches
(
    symmetryPlane sides
    (
        (3 7 6 2)
        (1 5 4 0)
    )
    patch inlet // Είσοδος της ροής.
    (
        (0 4 7 3)
    )
    patch outlet // Έξοδος της ροής.
    (
        (2 6 5 1)
    )
    symmetryPlane floor // Περιοχή που αντιστοιχεί στο έδαφος.
    (
        (0 3 2 1)
    )
    symmetryPlane roof // Άνω όριο του χωρίου.
    (
        (4 5 6 7)
    )
);

//
*****
**** //

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### Αρχείο ρυθμίσεων του SnappyHexMesh

Το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργείται μέσω ενός εργαλείου του Open Foam που ονομάζεται SnappyHexMesh και οι απαιτούμενες ρυθμίσεις του υπολογιστικού χωρίου δημιουργούνται μέσω του αντίστοιχου αρχείου εισόδου που ονομάζεται SnappyHexMeshDict. Παράδειγμα τέτοιου αρχείου που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση των 6 γεννητριών στροβιλισμού για το Ahmed 25 δίνεται παρακάτω.

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ \ / O p e r a t i o n | Version: 1.6 |
|\ \ / A n d | Web: http://www.OpenFOAM.org |
|\ \ M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object snappyHexMeshDict;
}
// ***** //

// Which of the steps to run
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers true;

// Geometry. Definition of all surfaces. All surfaces are of class
// searchableSurface.
// Surfaces are used
// - to specify refinement for any mesh cell intersecting it
// - to specify refinement for any mesh cell inside/outside/near
// - to 'snap' the mesh boundary to the surface

geometry // Προσδιορίζονται όλες οι επιφάνειες.
{
    ahmed25.stl // Υπό μελέτη μοντέλο αυτοκινήτου.
    {
        type triSurfaceMesh;
        name ahmed25;
    }
    road.stl //Η επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε ως δρόμος.
```

```

{
    type triSurfaceMesh;
    name road;
}

refinementBox3 // Καθορισμός των περιοχών όπου έγινε περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος.

{
    type searchableBox;
    min (-2.5 -1.5 0.0);
    max (9 2 2);
}
refinementBox2
{
    type searchableBox;
    min (-1.6 -0.75 0.0);
    max ( 5 1.1 1.2);
}
refinementBox
{
    type searchableBox;
    min (-0.6 -0.3 0.0);
    max ( 2.5 0.7 0.7);
}
wakeBox
{
    type searchableBox;
    min (0.7 -0.05 0.0);
    max ( 1.6 0.45 0.35);
}
refinementBox_vortex //Επιφάνεια πύκνωσης γύρω από τις γεννήτριες στροβιλισμού.
{
    type searchableBox;
    min (0.8336 -0.0049 0.3335);
    max (0.8645 0.42 0.356);
}
};

```

// Settings for the castellatedMesh generation.

castellatedMeshControls

```
{
```

```
// Refinement parameters
```

```
// ~~~~~
```

```
// While refining maximum number of cells per processor. This is basically
```

```
// the number of cells that fit on a processor. If you choose this too small
```

```
// it will do just more refinement iterations to obtain a similar mesh.
```

```

maxLocalCells 2000000;

// Overall cell limit (approximately). Refinement will stop immediately
// upon reaching this number so a refinement level might not complete.
// Note that this is the number of cells before removing the part which
// is not 'visible' from the keepPoint. The final number of cells might
// actually be a lot less.
maxGlobalCells 4000000;

// The surface refinement loop might spend lots of iterations refining just a
// few cells. This setting will cause refinement to stop if <= minimumRefine
// are selected for refinement. Note: it will at least do one iteration
// (unless the number of cells to refine is 0)
minRefinementCells 10;

// Number of buffer layers between different levels.
// 1 means normal 2:1 refinement restriction, larger means slower
// refinement.
nCellsBetweenLevels 2;

// Explicit feature edge refinement
// ~~~~~

// Specifies a level for any cell intersected by its edges.
// This is a featureEdgeMesh, read from constant/triSurface for now.
features
(
    //{
    //  file "someLine.eMesh";
    //  level 2;
    //}
);

// Surface based refinement
// ~~~~~

// Specifies two levels for every surface. The first is the minimum level,
// every cell intersecting a surface gets refined up to the minimum level.
// The second level is the maximum level. Cells that 'see' multiple
// intersections where the intersections make an
// angle > resolveFeatureAngle get refined up to the maximum level.

```

refinementSurfaces //Στη περιοχή αυτή γίνεται καθορισμός του επιπέδου πυκνότητας του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια των σωμάτων. Το ελάχιστο γίνεται παντού ενώ το μέγιστο στις λεπτομέρειες της γεωμετρίας του σώματος.

```
{
  ahmed25
  {
    // Surface-wise min and max refinement level
    level (6 7);
  }
  road
  {
    // Surface-wise min and max refinement level
    level (4 5);
  }
}
```

// Resolve sharp angles //Επιλέγεται η γωνία πέραν της οποίας χρησιμοποιείται το μέγιστο.  
resolveFeatureAngle 20; επίπεδο πυκνότητας

// Region-wise refinement  
// ~~~~~

// Specifies refinement level for cells in relation to a surface. One of  
// three modes  
// - distance. 'levels' specifies per distance to the surface the  
// wanted refinement level. The distances need to be specified in  
// descending order.  
// - inside. 'levels' is only one entry and only the level is used. All  
// cells inside the surface get refined up to the level. The surface  
// needs to be closed for this to be possible.  
// - outside. Same but cells outside.

refinementRegions //Επιλέγεται το επίπεδο πυκνότητας στις προκαθορισμένες περιοχές.

```
{
  refinementBox
  {
    mode inside;
    levels ((1E15 3));
  }
  refinementBox2
  {
    mode inside;
    levels ((1E15 2));
  }
  refinementBox3
  {
    mode inside;
    levels ((1E15 1));
  }
}
```

```

    }
    wakeBox
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 4));
    }
    ahmed25 //Σε απόσταση 0.15 επιλέγεται επίπεδο πυκνότητας 4 και σε απόσταση 0.05
    επίπεδο πυκνότητας 5.

```

```

    {
        mode distance;
        levels ((0.05 5) (0.15 4));
    }
    refinementBox_vortex //Επιλέγεται επίπεδο πυκνότητας 6
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 6));
    }
}

```

```

// Mesh selection
// ~~~~~

```

```

// After refinement patches get added for all refinementSurfaces and
// all cells intersecting the surfaces get put into these patches. The
// section reachable from the locationInMesh is kept.
// NOTE: This point should never be on a face, always inside a cell, even
// after refinement.
locationInMesh (0.5 0.2 0.43);
}

```

// Settings for the snapping. Έλεγχος των ρυθμίσεων που καθορίζουν τις επαναλήψεις που πραγματοποιεί ο κώδικας προκειμένου να γίνει καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος στις επιφάνειες των σωμάτων.

```

snapControls
{
    //- Number of patch smoothing iterations before finding correspondence
    // to surface //Αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποιεί ο κώδικας έτσι ώστε να
    προσαρμοστεί το υπολογιστικό πλέγμα στις επιφάνειες των σωμάτων.

```

```

    nSmoothPatch 8;
    //- Relative distance for points to be attracted by surface feature point
    // or edge. True distance is this factor times local
    // maximum edge length.
    tolerance 8.0;

```

```

    //- Number of mesh displacement relaxation iterations.

```

```

nSolveIter 30;

//- Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
// before upon reaching a correct mesh.
nRelaxIter 7;
}

// Settings for the layer addition. Εδώ ελέγχονται οι ρυθμίσεις για την πρόσθεση των επιπλέον
στρωμάτων κελιών.

addLayersControls
{
    relativeSizes false; // Επηρεάζει τον τρόπο καθορισμού του πάχους του στρώματος των κελιών
που βρίσκονται σε επαφή με το εξωτερικό πλέγμα. Η επιλογή true καθορίζει ότι η τιμή είναι σχετική
και το πάχος των κελιών ελέγχεται ως ποσοστό του πάχους του πρώτου κελιού του εξωτερικού
πλέγματος, ενώ η επιλογή false ότι η τιμή που δίνεται είναι η πραγματική σε μέτρα.

    // Per final patch (so not geometry!) the layer information
    layers
    {
        road_road
        {
            nSurfaceLayers 2;
            finalLayerThickness 0.0015;
            expansionRatio 1.3;
        }
        ahmed25_ahmed25
        {
            nSurfaceLayers 3; //Αριθμός επιπλέον στρωμάτων κελιών.
        }
    }
}

// Expansion factor for layer mesh
expansionRatio 1.3;

//- Wanted thickness of final added cell layer. If multiple layers
// is the
// thickness of the layer furthest away from the wall.
// Relative to undistorted size of cell outside layer.
finalLayerThickness 0.0012;

//- Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
// cannot be above minThickness do not add layer.
// Relative to undistorted size of cell outside layer.
minThickness 0.001;

//- If points get not extruded do nGrow layers of connected faces that are
// also not grown. This helps convergence of the layer addition process

```



```

// close to features.
nGrow 0;

// Advanced settings

//- When not to extrude surface. 0 is flat surface, 90 is when two faces
// make straight angle.
featureAngle 100;

//- Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
// before upon reaching a correct mesh.
nRelaxIter 3;

// Number of smoothing iterations of surface normals
nSmoothSurfaceNormals 1;

// Number of smoothing iterations of interior mesh movement direction
nSmoothNormals 3;

// Smooth layer thickness over surface patches
nSmoothThickness 10;

// Stop layer growth on highly warped cells
maxFaceThicknessRatio 0.5;

// Reduce layer growth where ratio thickness to medial
// distance is large
maxThicknessToMedialRatio 0.3;

// Angle used to pick up medial axis points
minMedianAxisAngle 130;

// Create buffer region for new layer terminations
nBufferCellsNoExtrude 0;

// Overall max number of layer addition iterations // Μέγιστος αριθμός επαναλήψων
κατά τη διάρκεια τοποθέτησης των πλεγματικών διαστρωματώσεων.

nLayerIter 15;
}

// Generic mesh quality settings. At any undoable phase these determine
// where to undo. Οι ρυθμίσεις αυτές ελέγχουν τη χαλαρότητα του κώδικα γέννησης του
πλέγματος. Αυστηρές ρυθμίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρο τερματισμό της διαδικασίας ενώ
αντιθέτως πολύ "χαλαρές" ενδέχεται να δυσκολέψουν πολύ τη σύγκλιση του κώδικα αριθμητικής
επίλυσης της ροής.

```

```

meshQualityControls
{
  //- Maximum non-orthogonality allowed. Set to 180 to disable.
  maxNonOrtho 65;

  //- Max skewness allowed. Set to <0 to disable.
  maxBoundarySkewness 20;
  maxInternalSkewness 4;

  //- Max concaveness allowed. Is angle (in degrees) below which concavity
  // is allowed. 0 is straight face, <0 would be convex face.
  // Set to 180 to disable.
  maxConcave 80;

  //- Minimum projected area v.s. actual area. Set to -1 to disable.
  minFlatness 0.5;

  //- Minimum pyramid volume. Is absolute volume of cell pyramid.
  // Set to very negative number (e.g. -1E30) to disable.
  minVol 1e-15;

  //- Minimum face area. Set to <0 to disable.
  minArea -1;

  //- Minimum face twist. Set to <-1 to disable. dot product of face normal
  //- and face centre triangles normal
  minTwist 0.02;

  //- minimum normalised cell determinant
  //- 1 = hex, <= 0 = folded or flattened illegal cell
  minDeterminant 0.001;

  //- minFaceWeight (0 -> 0.5)
  minFaceWeight 0.02;

  //- minVolRatio (0 -> 1)
  minVolRatio 0.01;

  //-must be >0 for Fluent compatibility
  minTriangleTwist -1;

  // Advanced

  //- Number of error distribution iterations
  nSmoothScale 4;
  //- amount to scale back displacement at error points
  errorReduction 0.75;
}

```

```
// Advanced

// Flags for optional output
// 0 : only write final meshes
// 1 : write intermediate meshes
// 2 : write volScalarField with cellLevel for postprocessing
// 4 : write current intersections as .obj files
debug 0;

// Merge tolerance. Is fraction of overall bounding box of initial mesh.
// Note: the write tolerance needs to be higher than this.
mergeTolerance 1E-6;

//
*****
**** //
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

### Αρχείο ρυθμίσεων του SnapEdge

Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιήθηκε για την εξάλειψη των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στο υπολογιστικό πλέγμα μετά την εκτέλεση του SnappyHexMesh.

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 1.6 |
| \\ / A nd | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \\ \\ M anipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "constant";
    object snapEdgeDict;
}

snapPatches
(
    ahmed25_ahmed25
);

snapZones
(
);

// must reside in the case directory (just create a soft-link to the stl in
// constant/triSurface)
stlFileNames
(
    ahmed25.stl
);

// only move those points that are closer to the features than the tolerance*| edge
// length |
tolerance 0.6;

// 1.0 = move the points to the edge, 0 = dont move the point
```

```

relaxation .1;

// number of iterations to move points towards edge
nIterations 15;

// set to yes if edges inside a patch should be included
// set to no if only the edges of the patch should be moved
includeInterior yes;

// the smoother tries to create faces with only orthogonal edges
// = 1, moves the point to the point which creates two orthogonal edges, =0 dont move
point
smootherRelaxation 0.1;

// number of smoothing iterations
//nSmootherIterations 3;
nSmootherIterations 0;

// resolve all features with greater angle than this
featureAngle 30.0;

// do not snap edges with an angle greater than this to the feature line
excludeEdgeAngle 100;

// used when selecting between multiple edges to map to the same position
// if the angle is above this value
// the choice will be based on which edge has the smallest angle to feature line
// otherwise
// the choice will be based on which edge is closest
parallelAngle 91.0;

// disallow edges to shrink below overlapFactor * smallest edge length
overlapFactor 0.1;

// allow for small overlap when fitting the edges to feature lines
fitFactor 1.0e-2;

// perturb edges in a straight line outwards with distance from face center to edge
times this
// (only for preventing bad faces and will move points off edge if the face has 3
consecutive points on a straight line)
//straightEdgePerturbation 0.2;
straightEdgePerturbation 0.0;

```