



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας ΡΕΥΣΤΩΝ

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

Βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μοντέλου αυτοκινήτου μέσω τοποθέτησης αεροτομής – Μελέτη με χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Διπλωματική Εργασία

Λάππας Θεόδωρος

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2011

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας ΡΕΥΣΤΩΝ

Βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μοντέλου αυτοκινήτου μέσω τοποθέτησης αεροτομής – Μελέτη με χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Διπλωματική Εργασία του

Λάππα Θεόδωρου

Επιβλέπων: Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών,

Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ)

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως στόχο την αριθμητική επίλυση της ροής γύρω από απλοποιημένη μορφή αυτοκινήτου (γνωστής ως Ahmed Body) καθώς και τη βελτίωση της, τοποθετώντας σε αυτή αεροτομή (spoiler). Η μορφή αυτή του αυτοκινήτου, χρησιμοποιείται ευρύτατα από τις αυτοκινητοβιομηχανίες στα αρχικά στάδια των ερευνών τους για την πιστοποίηση του λογισμικού που αναπτύσσουν ή χρησιμοποιούν. Αν και είναι απλή γεωμετρία, η προκαλούμενη απόκλιση είναι ισχυρή και, ως εκ τούτου, αποτελεί καλό πεδίο δοκιμής κωδίκων πρόλεξης της ροής. Η βελτίωση στοχεύει στη μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή αντίστασης του αυτοκινήτου καθώς και, κυρίως, στη μείωση του συντελεστή άνωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της βελτίωσης της ροής θα γίνει με δοκιμές και συνεχή τρεξίματα και δεν θα εφαρμοστεί κάποια μέθοδος βελτιστοποίησης. Κύρια αιτία για τον τρόπο αντιμετώπισης που επιλέχθηκε είναι η οικονομία σε υπολογιστικό χρόνο. Για το λόγο αυτό, ο τίτλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφέρεται σε «βελτίωση» και όχι σε «βελτιστοποίηση». Ενδεχόμενη βελτιστοποίηση θα είχε, προφανώς, πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος αλλά θα εντόπιζε το καθολικό βέλτιστο.

Στην εργασία αυτή, η οποία αποτελεί συνέχεια της διπλωματικής εργασίας του Κ.Κοντογιάννη [15], χρησιμοποιείται ένας κώδικας γένεσης πλέγματος (το SnappyHexMesh τμήμα του OperFOAM), και ο ανοιχτός πηγαίος κώδικας OpenFOAM (Field Operation and Manipulation) για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes καθώς και για τον υπολογισμό των συντελεστών αντίστασης και άνωσης του οχήματος. Πρόκειται για το ίδιο λογισμικό για το οποίο έχει αναπτυχθεί, στο πλαίσιο ολοκληρωθεισών διδακτορικών διατριβών, η συνεχής συζυγής μέθοδος ώστε να υπολογίζονται χάρτες παραγώγων ευαισθησίας για κατάλληλα συναρτησιακά που εκφράζουν ποιότητα αεροδυναμικής συμπεριφοράς.

Η βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση αεροτομής σε αυτό. Δημιουργούνται δύο τύποι αεροτομών που τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία. Ο πρώτος τοποθετείται στο Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25° στο τέλος του προαναφερθέντος επιπέδου, ενώ ο δεύτερος τοποθετείται στο Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 35° στο σημείο όπου ενώνεται το πάνω με το πίσω κεκλιμένο επίπεδο. Τα σημεία αυτά είχαν επισημανθεί από το λογισμικό συζυγών μεθόδων, καθώς σε αυτές τις θέσεις οι παράγωγοι ευαισθησίας ήταν αρκετά μεγάλες κατά απόλυτη τιμή. Η διπλωματική εργασία εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο ένας μηχανικός-σχεδιαστής μπορεί να σχεδιάσει και να τοποθετήσει τις αεροτομές στο μοντέλο αυτοκινήτου που μελετάται, να δημιουργήσει αποδεκτό υπολογιστικό πλέγμα γύρω από το όχημα που φέρει και την αεροτομή, να προβεί στην αριθμητική επίλυση της ροής (διάφορες περιπτώσεις) και, στο τέλος, να καταλήξει σε συγκριτικά ποσοτικά συμπεράσματα ως προς την επίπτωση που η αεροτομή-spoiler έχει στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας του αυτοκινήτου.

ΑΘΗΝΑ 2011

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of MECHANICAL ENGINEERING

Section of FLUIDS

Improvement of the Aerodynamic Performance of a Car Model through the use of α Spoiler – CFD-based Study.

Diploma Thesis by

Lappas Theodoros

Advisor: K. C. Giannakoglou, Professor NTUA

Laboratory of Thermal Turbomachines,

Parallel Computational Fluid Dynamics & Optimization Unit (PCFD&O/NTUA)

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the aerodynamic analysis and improvement of a simplified car geometry, which is usually referred to as Ahmed Body through the use of a spoiler. This simplified car geometry is widely used by car industries in the preliminary stages of their research as well as for the authentication of their software. The aerodynamic improvement is concerned with the drag and lift coefficients of the body. The improvement process will be based on a number of trial runs without resorting to a time-consuming optimization method. Thus, the obtained-recommended configurations may, generally, differ from the global optimal one. The main reason for selecting this search approach was to save computational cost. On those grounds and in the sake of fairness, the term “improvement” was preferred over “optimization”.

In this diploma thesis, which (in a certain sense) is a sequel to K. Kontogiannis’ diploma thesis [15], the mesh generation tool SnappyHexMesh, which is part of the open source CFD package OpenFOAM (Field Operation and Manipulation), is used. OpenFOAM is used to numerically solve the Navier-Stokes equations for calculating the drag and lift coefficients. It is the same CFD software based on which *PCFD&O/NTUA* has developed the continuous adjoint method for computing sensitivity maps around the body, indicating the role of each part of its geometry on the aerodynamic performance.

The improvement of the aerodynamic performance of the Ahmed Body is achieved by the placement of spoilers. Two different types of spoilers are created and placed in different parts of the Ahmed Body. The first one is positioned in the Ahmed Body with a slant angle 25° and the second one with a slant angle 35° . The use of the continuous adjoint method for appropriate objective functions has recommended these positions beforehand but correctly interpreting the computed sensitivity maps. The present diploma thesis

focuses on the way the designer may design and place the spoiler onto the car model, generate an appropriate computational grid around the vehicle, including the spoiler, compute the corresponding flow using OpenFOAM (several cases) and, finally, conclude on (quantify) the effect of the spoiler on the lift and drag coefficients.

Athens 2011

Πρόλογος

Στόχος μιας διπλωματικής εργασίας είναι η απόκτηση της γνώσης, η τριβή με τη φύση των δυσκολιών που αντιμετωπίζει ο μηχανικός, μια πρώτη δηλαδή ολοκληρωμένη επαφή με το επάγγελμα που θα ακολουθήσουμε στη μετέπειτα ζωή μας. Θέλησα λοιπόν μέσα από την εκπόνηση της διπλωματικής να επιτύχω αυτόν το στόχο. Έτσι ανάμεσα σε πολλά προτεινόμενα θέματα διάλεξα εκείνο που μου άρεσε περισσότερο. Το θέμα αυτό ήταν η αεροδυναμική των αυτοκινήτων ένας τομέας πολύ συναρπαστικός με συνεχή και αδιάκοπη εξέλιξη.

Νιώθω την υποχρέωση να αναφέρω τους ανθρώπους που με βοήθησαν και με καθοδήγησαν στο να εκπονηθεί αυτή η διπλωματική εργασία. Άνθρωποι οι οποίοι θυσίασαν πολλές φορές τον προσωπικό τους χρόνο και εργασία προκειμένου να απαντήσουν έγκαιρα και άμεσα σε όλα τα ερωτήματα και προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της δημιουργίας αυτής της εργασίας. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κυριάκο Χ. Γιαννάκογλου για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη που έδειξε καθώς και για το πραγματικά εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας μας. Το Βαγγέλη Παπουτσή και τον Δρ. Αλέξανδρο Ζυμάρη, μέλη της ίδιας ερευνητικής ομάδας, για τις συμβουλές και για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν σε τεχνικά κυρίως θέματα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη συμπαράσταση και την κατανόηση που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ευχαριστώ επίσης τους δύο φίλους μου και συναδέλφους Ν. Ευαγγελόπουλο και Β. Κρασσά καθώς και τη φίλη μου Αντωνία για την κατανόηση και την υπομονή που έδειξαν όλον αυτό τον καιρό. Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη σε όλους αυτούς που με πίστεψαν και με βοήθησαν να επιτύχω τους στόχους μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Το λογισμικό OpenFoam	8
Κεφάλαιο 2: Δημιουργία πλέγματος γύρω από απλοποιημένο μοντέλο Αυτοκινήτου (Ahmed body)	9
2.1 Γεωμετρία του Ahmed body	9
2.2 Περιγραφή μεθόδου δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος	11
2.2.1 Χρήση του κώδικα SnappyHexMesh	11
2.2.2 Χρήση του κώδικα SnapEdge	16
2.3 Δημιουργία πλέγματος για επίλυση ροής με συναρτήσεις τοίχου (wall-fuctions) στο Ahmed Body	22
Κεφάλαιο 3: Επίλυση ροής και υπολογισμός των συντελεστών αντίστασης και άνωσης του Ahmed Body	35
3.1 Χαρακτηριστικά ροής και οριακές συνθήκες	35
3.2 Επιλογές για μείωση του υπολογιστικού χρόνου	38
3.3 Επίλυση της ροής και συλλογή αποτελεσμάτων	40
3.3.1 Πρώτη μελετούμενη περίπτωση: Ahmed25	41
3.3.2 Δεύτερη μελετούμενη περίπτωση: Ahmed35	47
Κεφάλαιο 4: Βελτίωση της ροής με χρήση αεροτομής (Spoiler)	51
4.1 Δημιουργία και τοποθέτηση δύο διαφορετικών ειδών αεροτομής	51
4.2 Δημιουργία πλέγματος και επίλυση της ροής	56
4.2.1 Τοποθέτηση αεροτομής στο Ahmed25	56
4.2.2 Τοποθέτηση αεροτομής στο Ahmed35	70
Κεφάλαιο 5: Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	85
Βιβλιογραφία	87
Παράρτημα Α - Αρχεία STL (stereolithography)	89
Παράρτημα Β - Αρχείο ρυθμίσεων κώδικα BlockMesh	90
Παράρτημα Γ - Αρχείο ρυθμίσεων κώδικα SnappyHexMesh	92
Παράρτημα Δ – Αρχείο ρυθμίσεων κώδικα SnapEdge & Control Dict	100
Παράρτημα Ε – Εξισώσεις του υπολογιστικού μοντέλου SST k-omega	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουμε έρθει αντιμέτωποι με ένα πολύ σοβαρό παγκόσμιο πρόβλημα, την υπερθέρμανση του πλανήτη. Βασική αιτία αυτού του προβλήματος είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή η πολύ μεγάλη αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Το αέριο αυτό δημιουργεί ένα στρώμα στην ατμόσφαιρα της γης το οποίο εγκλωβίζει μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας του ήλιου, γεγονός που προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται κατά κύριο λόγο από την καύση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, βενζίνη, φυσικό αέριο κλπ.). Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η όλο και λιγότερη χρήση των καυσίμων αυτών συνεπάγεται μείωση της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες αναγνωρίζοντας την τρομακτική αύξηση των τροχοφόρων οχημάτων κατευθύνονται προς την εύρεση καινούριων λύσεων που περιορίζουν τη χρήση των ορυκτών καυσίμων ή ακόμα καλύτερα προχωρούν στη δημιουργία οχημάτων που χρησιμοποιούν για την κίνησή τους άλλες μορφές ενέργειας (ηλεκτρικά οχήματα) ή καθαρότερα καύσιμα (υδρογόνο). Επειδή όμως τα οχήματα αυτά δεν είναι ακόμα διαθέσιμα για μαζική παραγωγή, η τιμή τους κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Προκειμένου λοιπόν οι εταιρίες να παράγουν «καθαρότερα» οχήματα, οχήματα δηλαδή με μικρότερη κατανάλωση το οποίο αυτόματα σημαίνει και μικρότερες εκπομπές ρύπων, επιδιώκουν και στη βελτίωση των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία αποδοτικότερων κινητήρων, με τη χρήση ηλεκτροκινητήρων μαζί με την ταυτόχρονη χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης (υβριδικά οχήματα) , με τη βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων ή με τη χρήση όλων των παραπάνω μαζί.

Η αντίσταση που δέχονται τα οχήματα από τον αέρα κατά την κίνηση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μείωσή της επιφέρει και μικρότερη κατανάλωση καυσίμου καθώς θα χρειάζονται λιγότερη ενέργεια προκειμένου να την υπερνικήσουν. Η μείωση της αντίστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους, όπως η χρήση διαχυτών, πλευρικών πτερυγίων, με τη χρήση αεροτομής (spoiler) ή με συνδυασμό των παραπάνω [15].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία αποτελεί συνέχεια προγενέστερης διπλωματικής εργασίας [15], τίθενται δύο στόχοι. Αρχικά γίνεται χρήση και αξιολόγηση ενός νέου λογισμικού πακέτου (SnapEdge) που χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση της ροής σε συνεργασία με το λογισμικό OpenFoam και, στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση της αεροτομής στη αεροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος. Παράλληλα με τη μείωση του συντελεστή αντίστασης έχει τεθεί ως στόχος και η μείωση του συντελεστή άνωσης. Κατά την κίνηση του οχήματος δημιουργείται μια δύναμη άνωσης η οποία τείνει να ανυψώσει το αυτοκίνητο από το έδαφος. Η χρήση λοιπόν της αεροτομής αποσκοπεί στη μείωση των φαινομένων αυτών ώστε το όχημα να γίνει πιο σταθερό και πιο ασφαλές, αποκτώντας την απαραίτητη πρόσφυση με την επιφάνεια του δρόμου.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται προσομοίωση της ροής γύρω από ένα απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου αρχικά χωρίς αεροτομή και, στη συνέχεια, με τοποθέτηση αεροτομής με σκοπό τη βελτίωσή της. Στο κεφάλαιο 2 δίνεται η περιγραφή του σώματος που θα μελετηθεί καθώς επίσης περιγράφονται και δοκιμάζονται οι δύο κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του απαραίτητου υπολογιστικού πλέγματος ώστε να επιλυθεί αριθμητικά η ροή. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι αριθμητικές προλέξεις των χαρακτηριστικών της ροής καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση της τα οποία θα χρειαστούν προκειμένου να γίνουν οι μετέπειτα συγκρίσεις ώστε να διαπιστωθούν οι επιδράσεις της αεροτομής στη συμπεριφορά του οχήματος. Στο κεφάλαιο 4, τοποθετούνται, δοκιμάζονται και αξιολογούνται αεροτομές με διαφορετικές γωνίες κλίσης σε δύο διαφορετικά είδη οχημάτων. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα ενώ ακολουθούν και τα απαραίτητα παραρτήματα τα οποία βοηθούν τον αναγνώστη στην κατανόηση της λειτουργίας του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε (OpenFoam).

1.1 Το λογισμικό OpenFOAM (Field Operation and Manipulation)

Το λογισμικό OpenFoam [23],[24] είναι ένας ανοιχτός πηγαίος κώδικας CFD (υπολογιστικής ρευστοδυναμικής) ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία OpenCFD.Ltd. Ο χρήστης μπορεί να το «κατεβάσει» ελεύθερα από το διαδίκτυο (<http://www.openfoam.com>) και να έχει πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα του λογισμικού ο οποίος είναι γραμμένος σε C++.

Έτσι μπορεί, αν βέβαια το επιθυμεί και γνωρίζει, να προβεί στις απαραίτητες αλλαγές ώστε να φέρει εις πέρας το ερευνητικό του έργο με επιτυχία. Το πλήθος των αλλαγών ποικίλει, από την πρόσθεση όρων σε εξισώσεις, αλλαγές όρων πηγής στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο τύρβης , τροποποίηση των οριακών συνθηκών για το εκάστοτε φυσικό πρόβλημα, κλπ.

Ένα πλεονέκτημα του λογισμικού OpenFoam είναι η δυνατότητα επίλυσης με αυτό διαφόρων επιστημονικών προβλημάτων (μεταφορά θερμότητας, μεταφορά μάζας, ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα κλπ). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για τυρβώδη μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος και συμπεριλαμβάνεται ειδικό λογισμικό (paraFoam) για την απεικόνιση των λύσεων σε τρεις διαστάσεις (3D).

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του συγκεκριμένου πακέτου δεν έγινε με την βοήθεια κάποιου γραφικού περιβάλλοντος, αν και δίνεται αυτή η δυνατότητα, αλλά με την πρόσδοση τιμών σε μεταβλητές χρησιμοποιώντας αρχεία κειμένου τα οποία λειτουργούν ως αρχεία εισόδου δεδομένων στο λογισμικό που τρέχει. Αυτό δίνει τη δυνατότητα, αν και δεν υιοθετήθηκε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία ως ιδιαίτερα δαπανηρό, να υπάρξει συνεργασία του λογισμικού αυτού με ένα λογισμικό βελτιστοποίησης όπως είναι ο EASY [17],[18], ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ).

2. Δημιουργία πλέγματος γύρω από απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου (Ahmed Body)

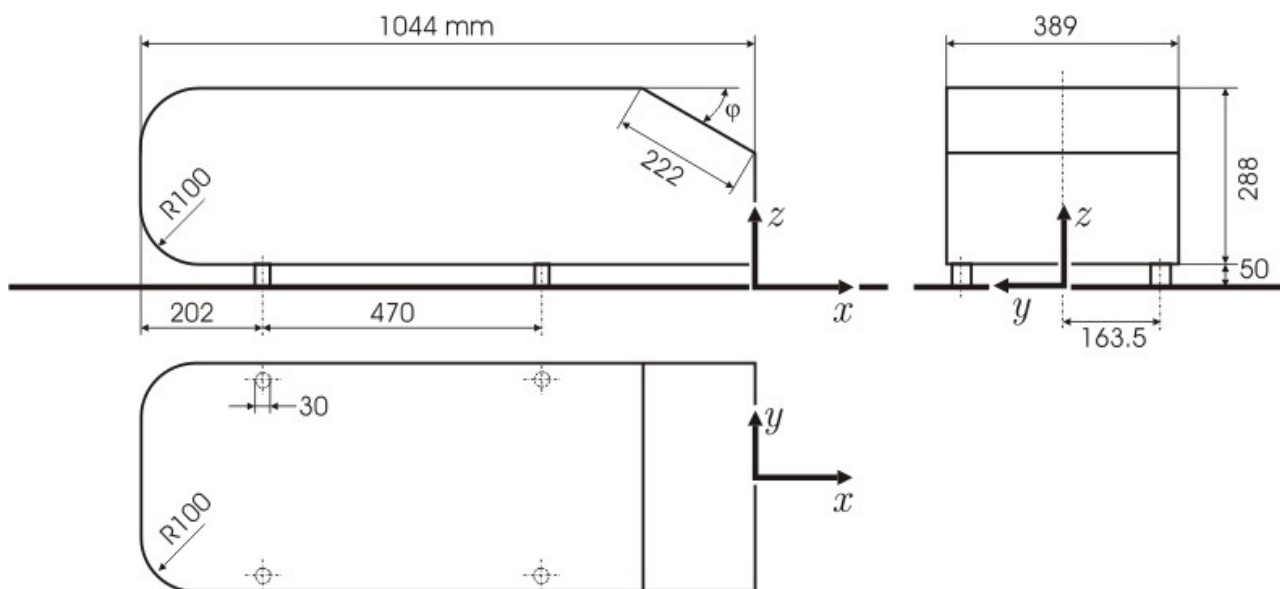
Σκοπός του κεφαλαίου αυτού, είναι αρχικά, να παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά, η γεωμετρία και οι λόγοι που επιλέχθηκε για την παρούσα μελέτη το απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου, γνωστό και ως Ahmed Body [1]. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί ο τρόπος δημιουργίας του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος για την αριθμητική επίλυση της ροής γύρω από το επιλεγμένο σώμα. Αυτό είναι και το πρώτο σημαντικό βήμα για να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα, η γένεση του πλέγματος γίνεται με ένα εργαλείο του OpenFoam, το οποίο ονομάζεται SnappyHexMesh, και τελειοποιείται με τη βοήθεια ενός πρόσφατου συμπληρώματός του που αναφέρεται ως SnapEdge. Μεταξύ άλλων, σκοπός μας είναι η δημιουργία και η αξιολόγηση ενός πλέγματος που προκύπτει από τον συνδυασμό των παραπάνω εργαλείων καθώς το SnapEdge είναι ένα νέο λογισμικό πακέτο το οποίο χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

2.1 Γεωμετρία του Ahmed Body

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες απαιτούν αξιόπιστες αλλά και γρήγορες υπολογιστικές μέθοδοι, οι οποίες να είναι ικανές να προσομοιώνουν, όσο γίνεται καλύτερα, το πολύπλοκο πρόβλημα της τυρβώδους ροής, παρουσία αποκολλήσεων, γύρω από τα οχήματα. Προκειμένου να ελέγξουν αν αυτοί οι κώδικες είναι αξιόπιστοι τους χρησιμοποιούν, μεταξύ άλλων, επιλύοντας την ροή γύρω από το Ahmed Body για το οποίο υπάρχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα [2],[3],[4] ή και άλλα αντίστοιχα απλοποιημένα μοντέλα αυτοκινήτων και, στη συνέχεια, αν τα αποτελέσματα σε μια τέτοια περίπτωση επιβεβαιώνουν τα πειραματικά γίνεται χρήση τους και σε αληθινά αυτοκίνητα, για την ανάλυση ή το σχεδιασμό τους.

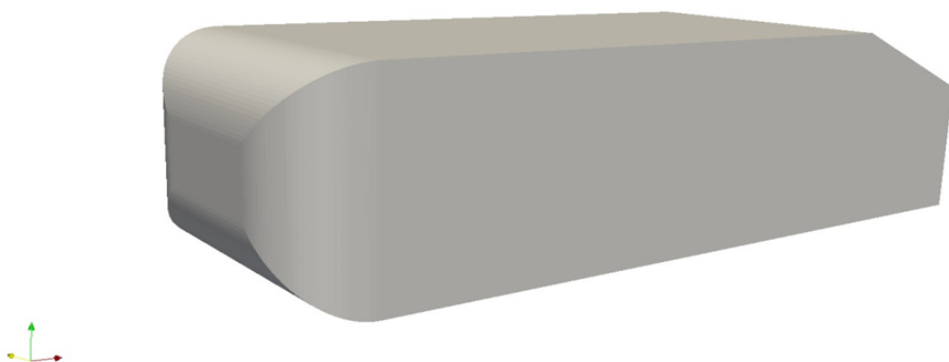
Το Ahmed Body είναι μια πολύ απλή μορφή αυτοκινήτου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου έχουν προσδιοριστεί πειραματικά από τον S.R Ahmed [1]. Η γεωμετρία του σώματος φαίνεται στα σχήματα (2.1 & 2.2). Το χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει στο Ahmed Body είναι η γωνία του πίσω κεκλιμένου επιπέδου (ϕ) (slant angle), η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα αποκόλλησης και ανακυκλοφορίας της ροής. Οι λόγοι που καθιστούν το Ahmed Body ένα συνηθισμένο χαρακτηριστικό πρόβλημα (benchmark problem) για τη μελέτη της αεροδυναμικής αυτοκινήτου με τη χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορούν να συνοψιστούν ως εξής :

- i. Απλή γεωμετρία, η οποία διευκολύνει τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος τόσο πάνω στην επιφάνειά του σώματος όσο και γύρω από αυτό.
- ii. Ύπαρξη πειραματικών αποτελεσμάτων για σύγκριση
- iii. Η ροή γύρω από το Ahmed Body διατηρεί τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής (αποκόλληση της ροής, δημιουργία δινών) γύρω από πραγματικά αυτοκίνητα.



Σχ. 2.1 Όψεις του Ahmed Body, οι διαστάσεις είναι σε mm.

Για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιείται μια συγκεκριμένη διαδικασία η οποία περιγράφεται στη συνέχεια. Το σώμα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι τοποθετημένο σε μια αεροσήραγγα η οποία είναι ανοιχτή κατά τα $\frac{3}{4}$, δηλαδή η μοναδική επιφάνεια είναι αυτή του εδάφους. Η απόσταση του Ahmed Body από το έδαφος είναι 50mm, ενώ τα 4 «ποδαράκια» που φαίνονται στο σχήμα 2.1 αντιπροσωπεύουν τους τροχούς του αυτοκινήτου και χρησιμοποιούνται για την στήριξη του σώματος στην πειραματική διάταξη. Πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τη αριθμητική επίλυση της ροής αυτά τα στηρίγματα μπορούν να αγνοηθούν, κάτι που συμβαίνει και στην παρούσα εργασία, καθώς δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα ειδικά σε συνθήκες μόνιμης ροής που εδώ εξετάζονται. Η 3D γεωμετρία του σώματος, σχήμα 2.2, η οποία χρησιμοποιείται ως είσοδος από το λογισμικό γένεσης υπολογιστικού πλέγματος, έχει σχεδιαστεί σε πρόγραμμα CAD.



Σχ. 2.2 Προοπτική απεικόνιση μελετούμενου απλοποιημένου αυτοκινήτου (Ahmed Body).

2.2 Περιγραφή μεθόδου δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος

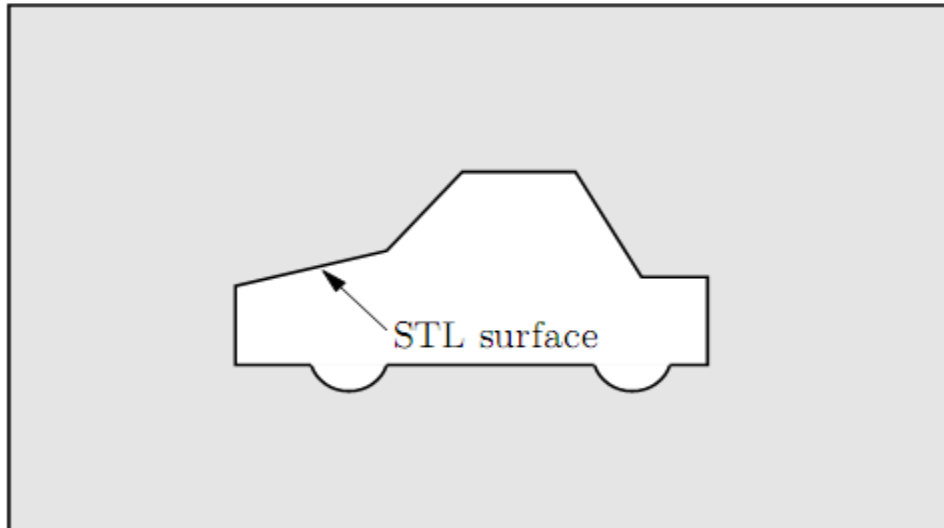
Η δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος γύρω από πολύπλοκες 3D γεωμετρίες στο OpenFoam γίνεται με ένα βασικό εργαλείο το οποίο ονομάζεται SnappyHexMesh. Ο κώδικας αυτός, μπορεί να δημιουργεί, γενικά, καλής ποιότητας πλέγματα. Επίσης είναι σχετικά εύχρηστος και το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργείται αρκετά γρήγορα. Όμως δεν παύει να έχει και κάποια μειονεκτήματα. Δύο σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει κανείς στη χρήση του παραπάνω κώδικα είναι η αδυναμία του πλέγματος να ακολουθήσει πιστά τη γεωμετρία του σώματος στις καμπύλες επιφάνειες του και στις ενώσεις των εδρών του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την ακρίβεια της γεωμετρικής περιγραφής και την τελειοποίηση του πλέγματος έχει χρησιμοποιηθεί και ένας άλλος κώδικας ο οποίος ονομάζεται SnapEdge και αναλύεται ξεχωριστά παρακάτω τόσο ο τρόπος λειτουργίας του όσο και τα οφέλη που κερδίζει κανείς από τη χρήση του. Το SnappyHexMesh είναι ένας κώδικας γένεσης πλέγματος που δημιουργεί εξάεδρα και τετράεδρα γύρω από μία επιφάνεια, η οποία είναι διακριτοποιημένη με τριγωνικά στοιχεία που παρέχονται σε μορφή αρχείου *.stl (stereolithography), (Παράρτημα Α). Το τελικό πλέγμα προκύπτει μετά από τροποποιήσεις και μορφοποιήσεις του αρχικού χωρίου επίλυσης καθώς και τη χρησιμοποίηση του κώδικα SnapEdge ο οποίος “αναγκάζει” το πλέγμα να σέβεται καλύτερα τη γεωμετρία του σώματος ειδικά κοντά και πάνω στην επιφάνειά του. Η όλη διαδικασία δημιουργίας μορφοποίησης και τροποποίησης του υπολογιστικού πλέγματος αναλύεται διεξοδικά παρακάτω. Επίσης, στο τέλος της εργασίας, σε μορφή παραρτήματος, παρουσιάζονται τα αρχεία ελέγχου των παραπάνω προγραμμάτων καθώς και το αρχείο σε μορφή stereolithography του σώματος (Ahmed Body) γύρω από το οποίο δημιουργείται το πλέγμα.

2.2.1 Χρήση του κώδικα SnappyHexMesh

Η περιγραφή της δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος θα γίνει με βοήθεια εικόνων για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας. Αν και το υπολογιστικό πλέγμα που τελικά δημιουργείται είναι 3D για ευκολότερη περιγραφή της διαδικασίας και μεγαλύτερη κατανόηση στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η γεωμετρία στις δύο διαστάσεις.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να «τρέξει» κανείς τον κώδικα SnappyHexMesh ώστε να δημιουργηθεί το απαραίτητο υπολογιστικό πλέγμα είναι τα παρακάτω:

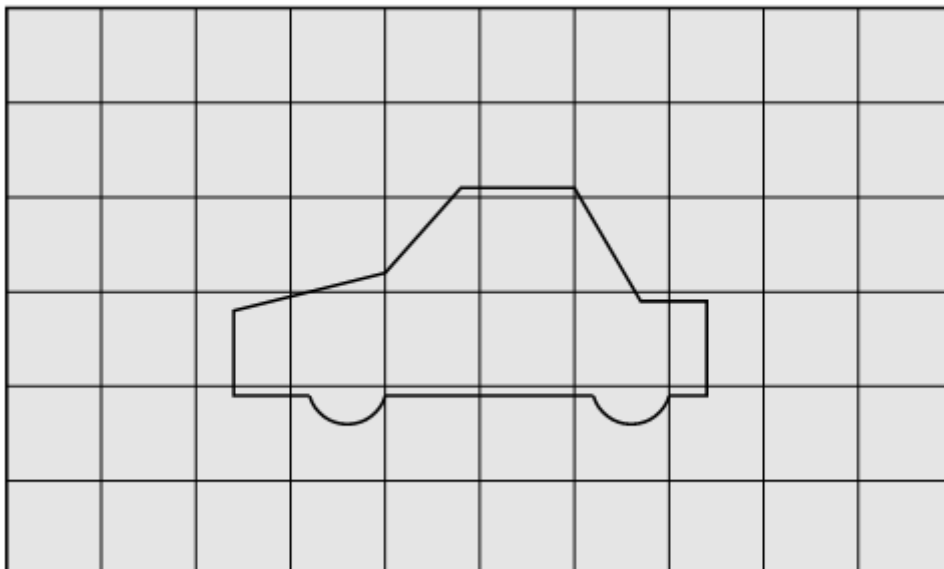
- i. Η γεωμετρία του σώματος σε μορφή *.stl (STL).
- ii. Ένα πρωταρχικό απλό πλέγμα το οποίο αποτελείται από εξάεδρα και καταλαμβάνει όλο το επιθυμητό υπολογιστικό χωρίο, αγνοώντας ουσιαστικά την ύπαρξη του στερεού σώματος που βρίσκεται μέσα σε αυτό. Αυτό το πλέγμα κατασκευάζεται, πολύ εύκολα, με τη βοήθεια ενός άλλου εργαλείου του OpenFoam το BlockMesh (Παράρτημα Β).
- iii. Ένα αρχείο ρυθμίσεων, ή αλλιώς dictionary, το οποίο ελέγχει τη διαδικασία δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος.



Σχ. 2.3 Αναπαράσταση του χωρίου σε 2D.

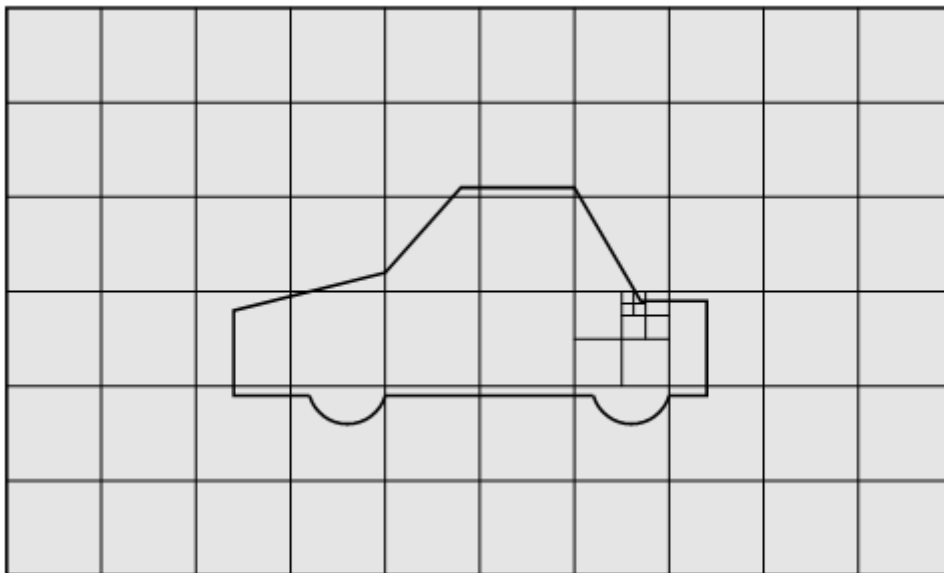
Πριν εκτελεστεί το SnappyHexMesh πρέπει ο χρήστης να έχει δημιουργήσει ένα πλέγμα βάσης που καθορίζει το μέγεθος του χωρίου και το οποίο λειτουργεί ως βάση στην οποία θα σχηματιστεί, στη συνέχεια, το τελικό υπολογιστικό πλέγμα. Προκειμένου να δημιουργηθεί σωστά αυτό το πλέγμα είναι απαραίτητο να πληρούνται τα παρακάτω κριτήρια:

- 1) Το πλέγμα βάσης πρέπει να αποτελείται αποκλειστικά από εξάεδρα.
- 2) Τα κελιά πρέπει να έχουν, κατά προτίμηση, τους λόγους ύψους προς μήκος, μήκους προς πλάτος και ύψους προς πλάτος περίπου 1, τουλάχιστον κοντά στην επιφάνεια του σώματος, καθώς έτσι το λογισμικό διευκολύνεται, στο στάδιο της μορφοποίησης των κελιών, και αποκλείεται έτσι η ακραία περίπτωση αποτυχίας της διαδικασίας.
- 3) Τέλος, πρέπει τουλάχιστον μία ακμή κελιού του πλέγματος- βάσης να τέμνει την επιθυμητή επιφάνεια έτσι ώστε να μπορεί η τελευταία να αναγνωριστεί από τον κώδικα.

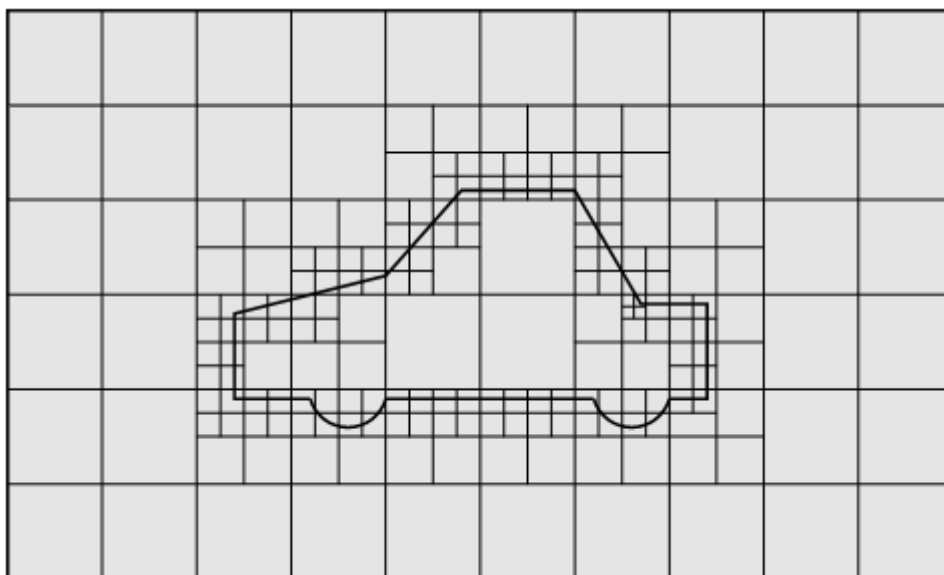


Σχ. 2.4 Πλέγμα βάσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του τελικού υπολογιστικού πλέγματος.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.5 & 2.6 η πρώτη διαδικασία που πραγματοποιείται από το SnappyHexMesh είναι η διαίρεση των κελιών του πλέγματος όπως αυτό έχει οριστεί από το χρήστη στο αρχείο ρυθμίσεων. Πρώτα διαιρούνται τα κελιά στις λεπτομέρειες της γεωμετρίας πάνω στην επιφάνεια του σώματος και στη συνέχεια στην υπόλοιπη επιφάνεια του. Το κάθε κελί διαιρείται σε 8 νέα κελιά στις 3 διαστάσεις, αντίστοιχα με τη διαίρεση σε 4 νέα κελιά στα 2Δ παραδείγματα, ενώ το επίπεδο πυκνότητας (refinement level), το οποίο επιλέγει ο χρήστης, καθορίζει το αριθμό των διαδοχικών διαιρέσεων. Η διαδικασία αυτή σταματά όταν επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο πυκνότητας.



Σχ. 2.5 Διαίρεση κελιών στις λεπτομέρειες του σώματος.

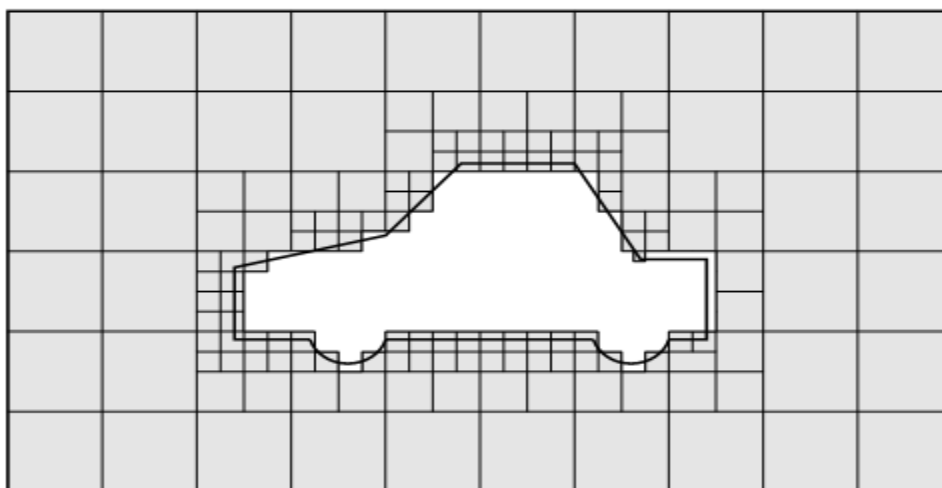


Σχ. 2.6 Διαίρεση κελιών σε όλο το σώμα.

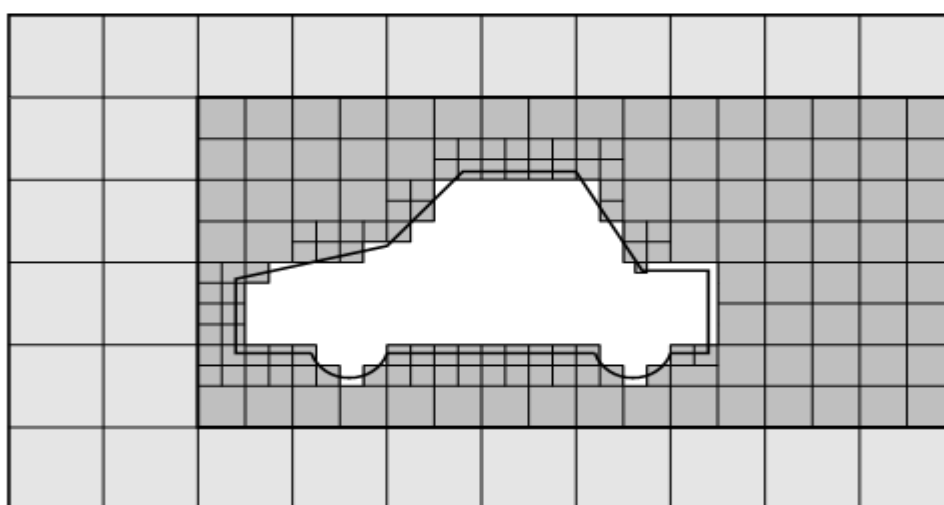
Επόμενο βήμα είναι η αφαίρεση των κελιών από το εσωτερικό του σώματος, καθώς δεν χρειάζεται να υπάρχει υπολογιστικό πλέγμα μέσα στο στερεό σώμα. Η διαδικασία αυτή γίνεται ακολουθώντας τους παρακάτω κανόνες:

Αρχικά πρέπει η περιοχή που θέλουμε να αφαιρεθούν τα κελιά να διαχωρίζεται πλήρως από το εξωτερικό πλέγμα με την επιφάνεια του σώματος. Επειδή υπάρχουν δύο περιοχές με κελιά, η εσωτερική (ανεπιθύμητη) και η εξωτερική (επιθυμητή), πρέπει να δώσουμε εμείς εντολή για το ποια θα κρατηθεί. Αυτό γίνεται ανάλογα με το που ανήκει, δηλαδή σε ποια από τις δύο περιοχές, το πέρας ενός διανύσματος το οποίο έχουμε ορίσει κατάλληλα στο αρχείο ελέγχου (Παράρτημα Γ). Αυτόματα, στη συνέχεια, ο κώδικας διατηρεί όσα κελιά έχουν ποσοστό του όγκου τους μεγαλύτερο από 50% στην περιοχή που τελικά επιλέξαμε να διατηρήσουμε, (Σχ. 2.7) ενώ όλα τα υπόλοιπα κελιά σβήνονται.

Ακολουθεί το πύκνωμα του εναπομείναντος πλέγματος από το χρήση σε προκαθορισμένες περιοχές, οι οποίες καθορίζονται από κατάλληλες ρυθμίσεις στο αρχείο ελέγχου (Παράρτημα Γ). Αυτό είναι απαραίτητο για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια σε αυτές τις περιοχές έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη σύγκλιση του κώδικα και σωστότερη επίλυση της ροής. (Σχ. 2.8)

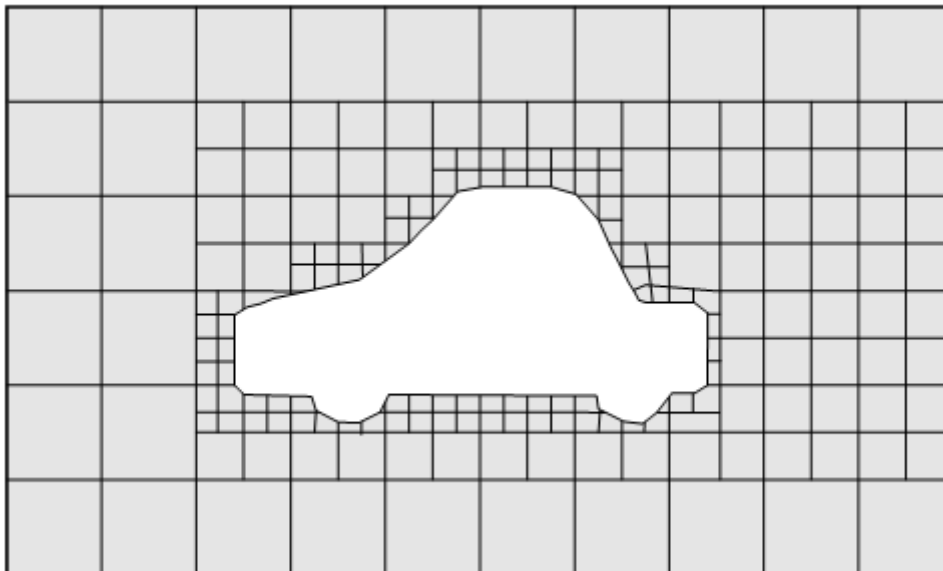


Σχ. 2.7 Διαγραφή εσωτερικών κελιών.



Σχ. 2.8 Πύκνωμα του πλέγματος σε προκαθορισμένες από το χρήστη περιοχές. Παρατηρούνται επίσης και οι ατέλειες του υπολογιστικού πλέγματος να ακολουθήσει πιστά τη γεωμετρία του σώματος.

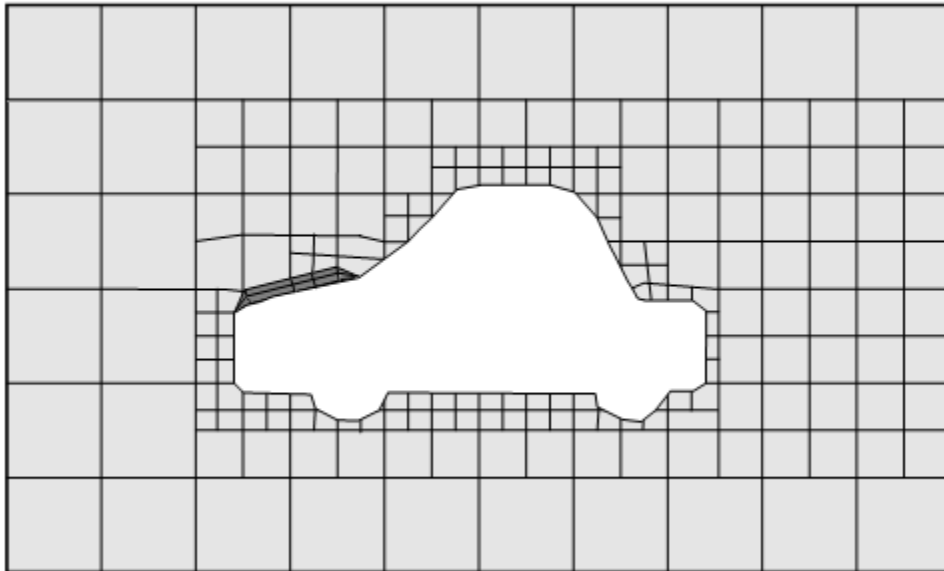
Έπειτα, γίνεται η απαραίτητη προσαρμογή του πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας του κώδικα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπογραμμίσουμε το γεγονός ότι υπήρχαν κάποιες ατέλειες στην δημιουργία του πλέγματος που είχαν ως αποτέλεσμα να μην γίνεται απόλυτα σεβαστή η γεωμετρία του σώματος. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με τη χρήση ενός άλλου καινούριου εργαλείου που συνεργάζεται με το OpenFoam, το SnapEdge . Η περιγραφή της λειτουργίας του SnapEdge θα γίνει σε επόμενη ενότητα.



Σχ. 2.9 Προσαρμογή πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος.

Το τελευταίο βήμα που εκτελεί ο κώδικας SnappyHexMesh είναι η πρόσθεση “στρωμάτων”, τα λεγόμενα layers, κοντά στην επιφάνεια του σώματος. Πρέπει να επισημάνουμε ότι η προσθήκη αυτή δεν είναι απαραίτητη για τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος από το λογισμικό αλλά είναι αναγκαία για τη δημιουργία σωστού πλέγματος για την επίλυση της συνεκτικής ροής γύρω από το σώμα με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, λόγω του ότι εξασφαλίζει ακριβέστερη πρόλεξη των συνεκτικών στρωμάτων που αναπτύσσονται κοντά στα στερεά τοιχώματα αλλά και στον ομόρρου. Η διαδικασία που εκτελεί ο κώδικας έτσι ώστε να δημιουργήσει τις πλεγματικές διαστρωματώσεις είναι η παρακάτω:

Αρχικά πραγματοποιεί μια μορφοποίηση του πλέγματος με σκοπό να μετακινηθούν τα κελιά που ήδη υπάρχουν κοντά στην επιφάνεια κατά μια συγκεκριμένη απόσταση πιο μακριά από το όριο του σώματος. Η απόσταση αυτή επιλέγεται από τον χρήστη στο αρχείο ελέγχου. Στην συνέχεια γίνεται πλήρωση του κενού που δημιουργήθηκε με την πρόσθεση επιπλέον στρωμάτων κελιών (Σχ. 2.10). Έπειτα γίνεται αυτόματα έλεγχος του υπολογιστικού πλέγματος από το λογισμικό και στην περίπτωση που αυτός αποτύχει δεν γίνεται η τοποθέτηση των πλεγματικών διαστρωματώσεων. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα η “χαλαρότητα” της ποιότητας του κώδικα γένεσης υπολογιστικού πλέγματος (Παράρτημα Γ).



Σχ. 2.10 Δημιουργία στρωμάτων κελιών (layers).

2.2.2 Χρήση του κώδικα SnapEdge

Το SnapEdge [25] είναι ένα πρόσθετο εργαλείο του OpenFoam το οποίο είναι διαθέσιμο ελεύθερα στο διαδίκτυο (<http://openfoam.nequam.se/cases/snapEdge.tgz>), ξεχωριστά από το υπόλοιπο λογισμικό πακέτο του OpenFoam. Δημιουργήθηκε από μια ομάδα χρηστών ώστε να διορθωθούν κάποια λάθη στη γένεση του υπολογιστικού πλέγματος από το SnappyHexMesh. Προκειμένου να λειτουργήσει το καινούριο αυτό λογισμικό πρέπει να εκτελεστούν τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά ο χρήστης πρέπει να «κατεβάσει» από την παραπάνω διεύθυνση το συμπιεσμένο αρχείο.
2. Αποσυμπίεση του αρχείου με την κατάλληλη εντολή (`tar xzfv snapEdge.tgz`).
3. Τοποθέτηση του καταλόγου SnapEdge που δημιουργείται, στον κατάλογο `preProcessing` που βρίσκεται μέσα στο φάκελο του OpenFoam.
4. Τέλος, απαιτείται η πληκτρολόγηση της εντολής `./Allwmake`.

Μετά την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων ο κώδικας μας είναι έτοιμος να χρησιμοποιηθεί από τον χρήστη.

Ο κώδικας αυτός πρέπει να εκτελεστεί πριν προστεθούν τα επιπλέον στρώματα κελιών (layers), καθώς σε άλλη περίπτωση δεν θα λειτουργήσει. Αφού λοιπόν ρυθμίσουμε κατάλληλα το αρχείο ελέγχου του SnappyHexMesh ώστε να μην δημιουργήσει τα layers, αλλά να σταματήσει μόλις κάνει την τελική μορφοποίηση των κελιών πάνω στην επιφάνεια του σώματος, τρέχουμε το SnapEdge απλά πληκτρολογώντας την εντολή `snapEdge`. Μετά την εκτέλεση του προγράμματος δημιουργείται ένα αρχείο όπου περιέχονται τα σημεία που έχουν μετατοπιστεί κατάλληλα ώστε να διορθωθεί το πρόβλημά μας. Το επόμενο βήμα είναι να μεταφέρουμε τα σημεία αυτά στον κατάλογο όπου υπάρχουν αποθηκευμένα τα στοιχεία του πλέγματός. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί πρέπει να αντικατασταθούν τα παλιά σημεία με τα νέα ώστε τελικά να δημιουργηθεί το σωστό υπολογιστικό πλέγμα για να επιλύσουμε τη ροή. Ο τρόπος που μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για το συγκεκριμένο κώδικα είναι μέσω ενός αρχείου ελέγχου παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιούμε για τον κώδικα SnappyHexMesh (Παράρτημα Δ). Αναγκαία προϋπόθεση για να λειτουργήσει ο κώδικας είναι να δημιουργήσει ο χρήστης μια «συμβολική» σύνδεση (symbolic link) που να οδηγεί στο κατάλογο που είναι αποθηκευμένο το αρχείο `*.stl` του σώματος

που έχουμε επιλέξει. Αυτό σε συστήματα linux/unix γίνεται χρησιμοποιώντας την εντολή `ln -s` και ,στη συνέχεια, τη διεύθυνση όπου βρίσκεται το αρχείο. Τέλος αφού ολοκληρώσει τη εργασία του ο παραπάνω κώδικας, ρυθμίζουμε το αρχείο ελέγχου του `SnappyHexMesh` να δημιουργήσει τα επιπλέον στρώματα κελιών που είναι απαραίτητα για την τελική διαμόρφωση του υπολογιστικού μας πλέγματος. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο προγραμμάτων είναι μια απλή διαδικασία. Αρχικά επιλέγονται οι παρακάτω ρυθμίσεις και έπειτα εκτελείται ο κώδικας `SnapEdge`, πληκτρολογώντας την κατάλληλη εντολή.

`// Which of the steps to run`

```
castellatedMesh true;      Οι δυνατές επιλογές είναι true, για να πραγματοποιηθεί η εντολή και false για να μην πραγματοποιηθεί.
snap                true;
addLayers           false; Αρχικά ρυθμίζεται σε false ώστε να μπορεί να εκτελεστεί ο κώδικας SnapEdge.
```

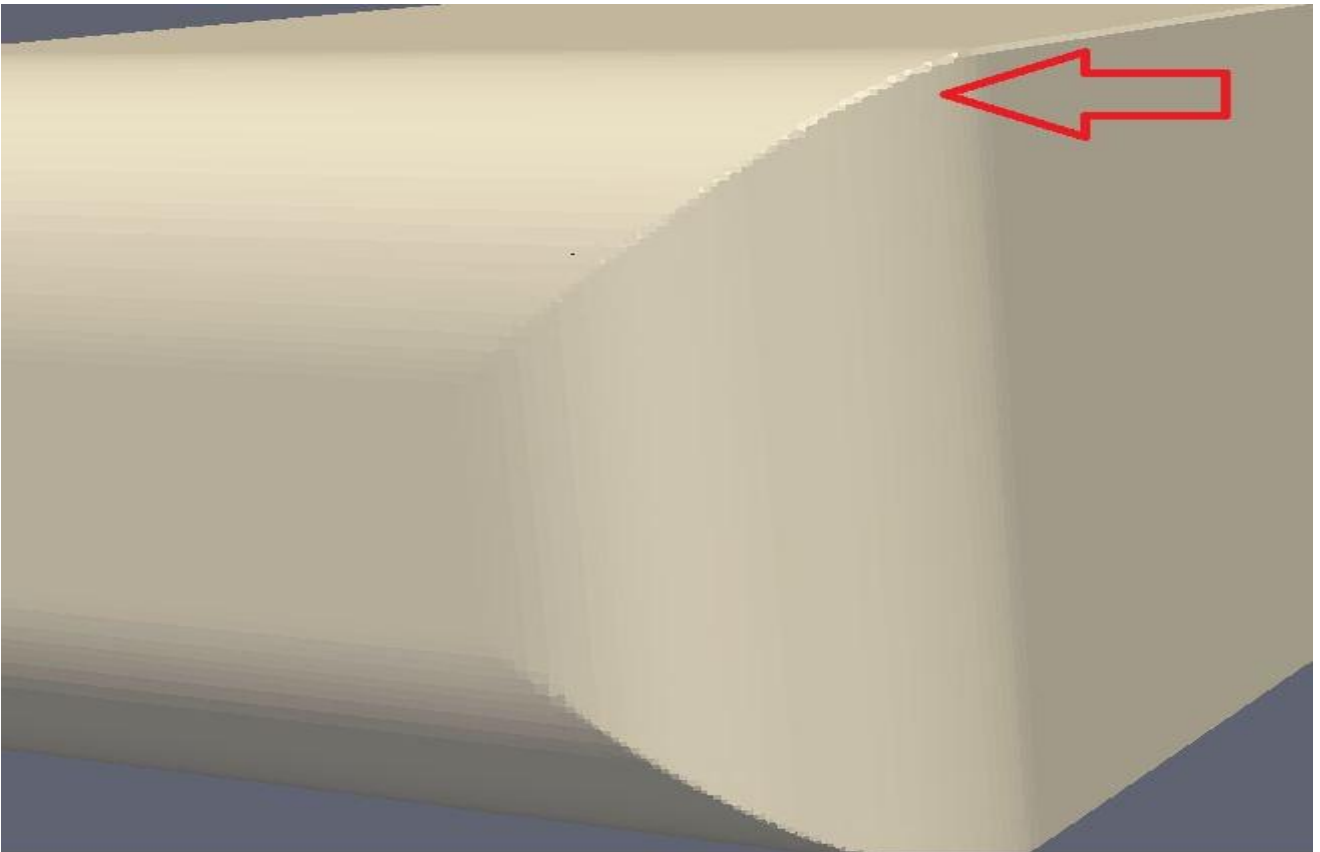
Αφού λοιπόν έχει εκτελεστεί και ο κώδικας `SnapEdge` γίνεται ρύθμιση ώστε να δημιουργηθούν οι πλεγματικές διαστρωματώσεις. Η ρύθμιση αυτή φαίνεται στο παρακάτω απόσπασμα από το αρχείο ρυθμίσεων του `SnappyHexMesh`.

`// Which of the steps to run`

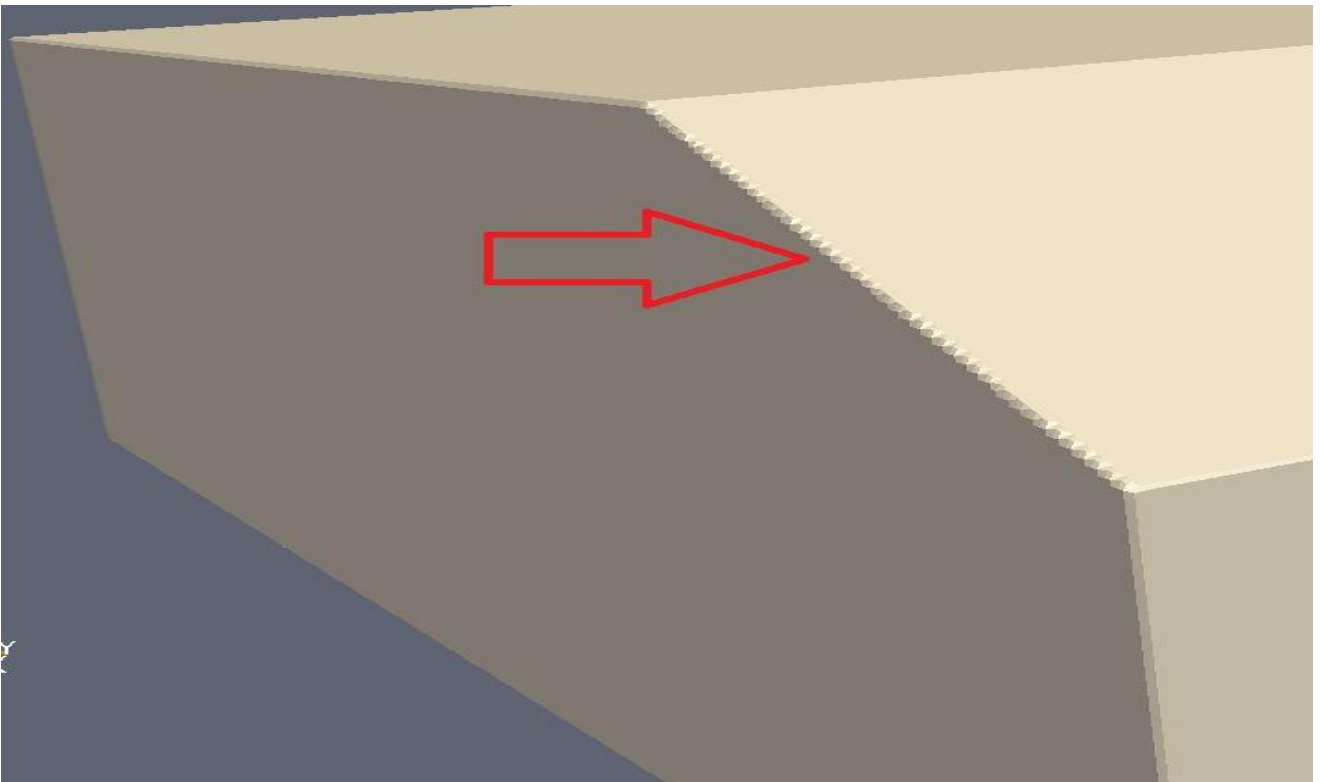
```
castellatedMesh false; Ρυθμίζονται σε false για να μην επαναληφθεί η ίδια διαδικασία για δεύτερη φορά
snap                false;
addLayers           true;  Ρυθμίζεται σε true ώστε να δημιουργηθούν τα επιπλέον διαστρωματώσεις των κελιών.
```

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και αντιμετωπίστηκαν ήταν οι ανωμαλίες που δημιουργούνταν στο υπολογιστικό πλέγμα, ιδιαίτερα στις έντονες ακμές και καμπύλες του σώματος. Αυτές οι «διαταραχές» στο πλέγμα προέρχονται από την αδυναμία του κώδικα `SnappyHexMesh` να δημιουργήσει ένα πλέγμα που να σέβεται τη γεωμετρία του σώματος. Αυτό συμβαίνει στο βήμα όπου ο κώδικας καλείται να αφαιρέσει τα κελιά που βρίσκονται μέσα στο σώμα και να μορφοποιήσει τα υπόλοιπα ώστε να ακολουθούν την επιφάνειά του. Ο νέος κώδικας (`SnapEdge`) έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει καλύτερα τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας του σώματος και καθοδηγεί το υπολογιστικό πλέγμα έτσι ώστε να προσαρμόζεται σε αυτές. Έτσι μέσα από διαδοχικές μετατοπίσεις του πλέγματος, των αριθμό των οποίων το επιλέγει ο χρήστης, πετυχαίνουμε καλύτερη ταύτιση του σώματος με το πλέγμα.

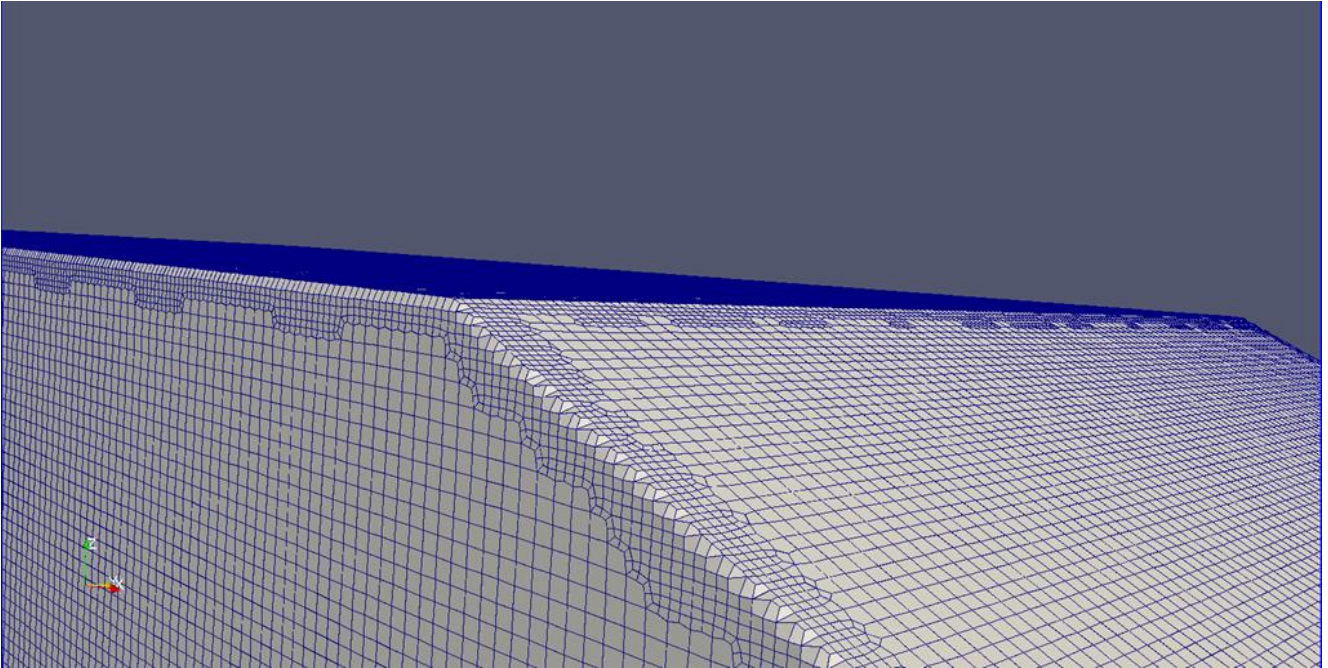
Επομένως, μέσα από όλη αυτήν τη διαδικασία, επιτυγχάνουμε ένα υπολογιστικό πλέγμα στη σωστή γεωμετρία, γεγονός που θα μας βοηθήσει πολύ στη σωστότερη αριθμητική επίλυση της ροής στην ακριβή γεωμετρία του σώματος. Στις εικόνες 2.1 έως 2.8 φαίνονται τόσο τα προβλήματα που υπήρξαν όσο και η διόρθωση αυτών.



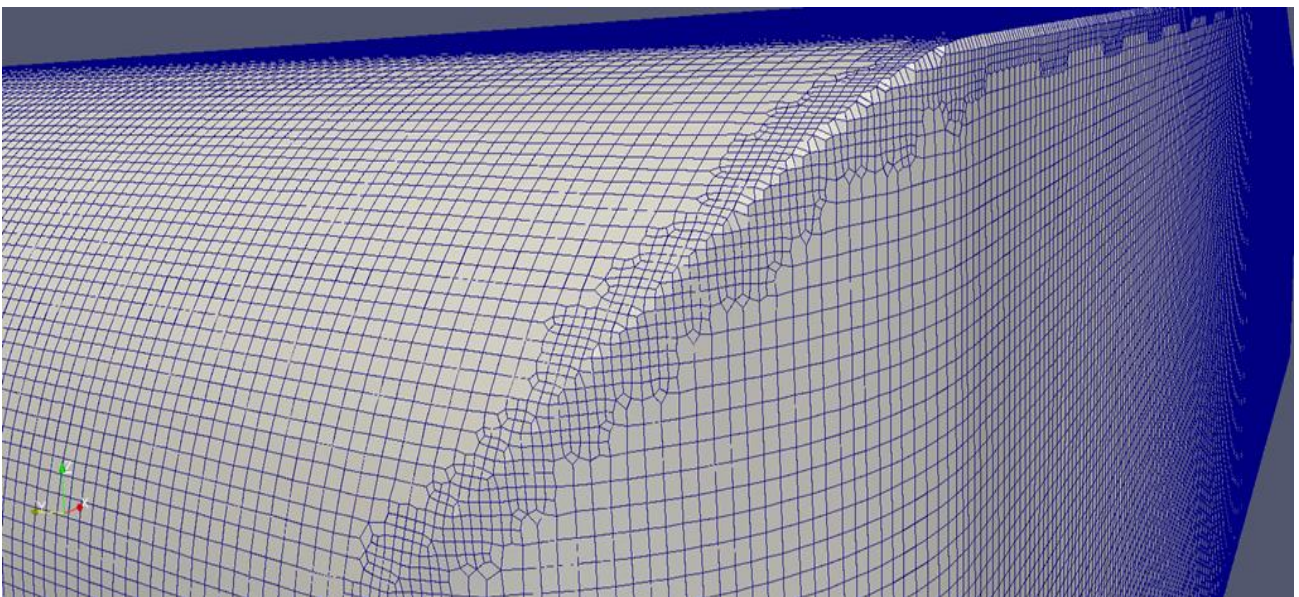
Εικόνα 2.1 Ατέλειες στις εμπρός καμπύλες επιφάνειες του σώματος



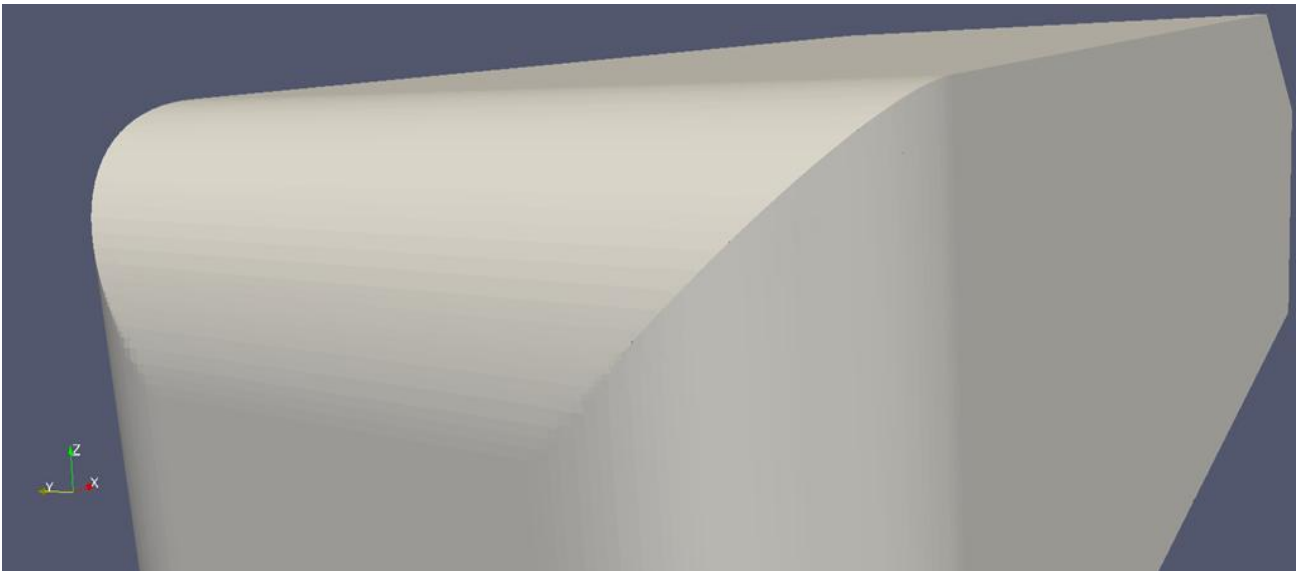
Εικόνα 2.2 Ατέλειες στις ακμές του σώματος.



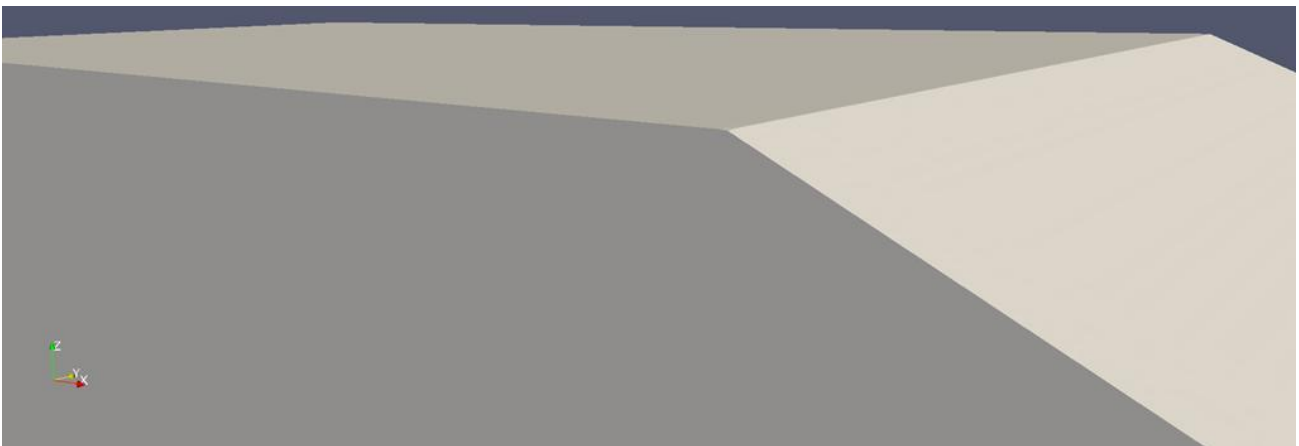
Εικόνα 2.3 Ατέλειες στο πλέγμα πάνω στην επιφάνεια του σώματος.



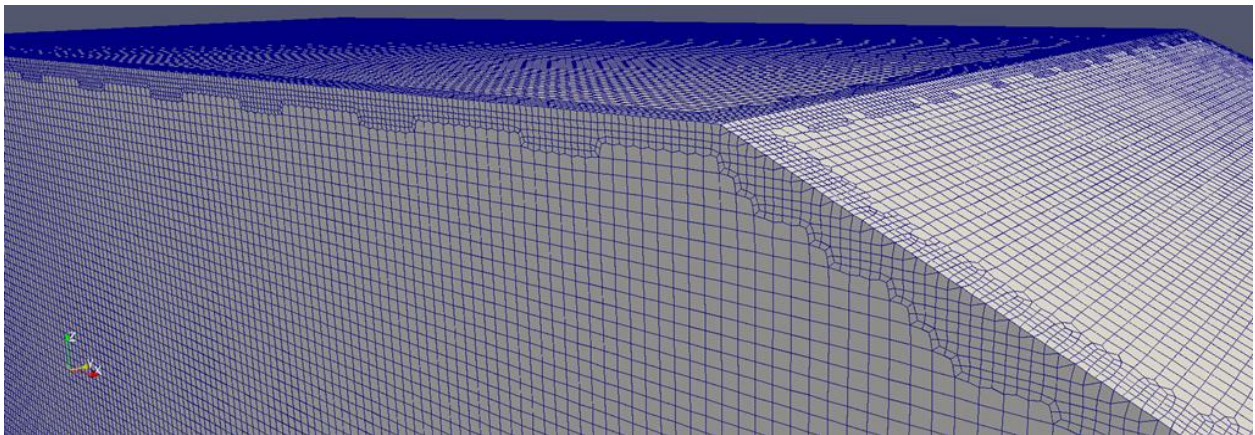
Εικόνα 2.4 Ατέλειες στο πλέγμα στις καμπύλες επιφάνειες του σώματος.



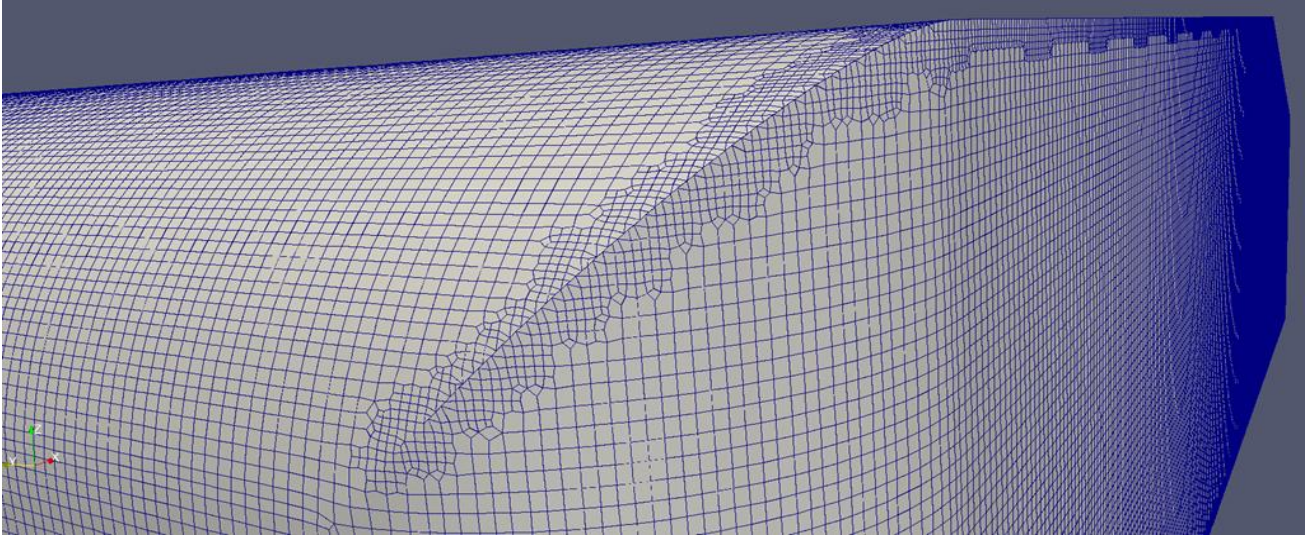
Εικόνα 2.5 Το πρόβλημα στις καμπύλες εξαλείφθηκε με τη χρήση του SnapEdge.



Εικόνα 2.6 Διόρθωση του προβλήματος στις ευθείες ακμές με τη χρήση του SnapEdge.

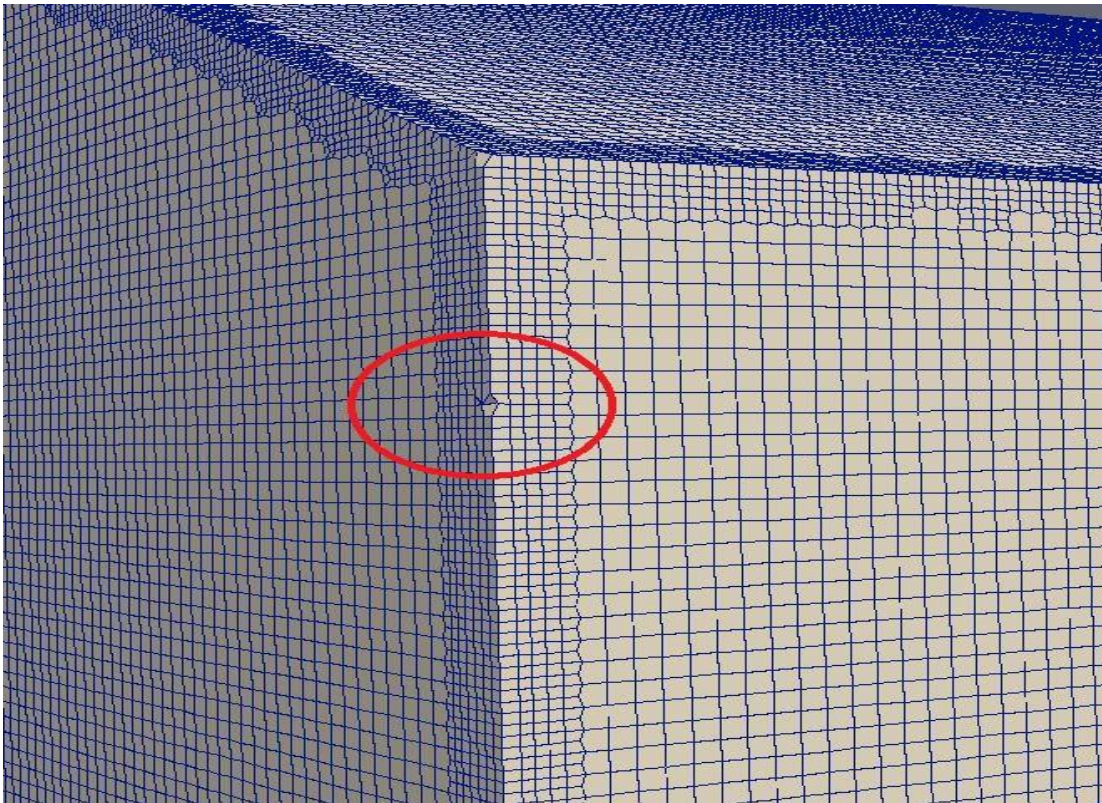


Εικόνα 2.7 Διόρθωση του προβλήματος στις ακμές με χρήση SnapEdge.



Εικόνα 2.8 Το πρόβλημα στις καμπύλες εξαλείφθηκε με χρήση του SnapEdge.

Όπως φαίνεται και από τις εικόνες (2.1 -2.8) τα προβλήματα αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία. Βέβαια πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι ο κώδικας SnapEdge δεν είναι σε θέση να λύσει όλα μας τα προβλήματα αλλά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό από αυτά. Στην εικόνα 2.9 φαίνονται κάποια από τα «λάθη» του πλέγματος τα οποία δεν διορθώθηκαν. Το γεγονός όμως αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά, οπότε και μπορεί να αγνοηθεί, τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος και, κατά επέκταση, την επίλυση της ροής.

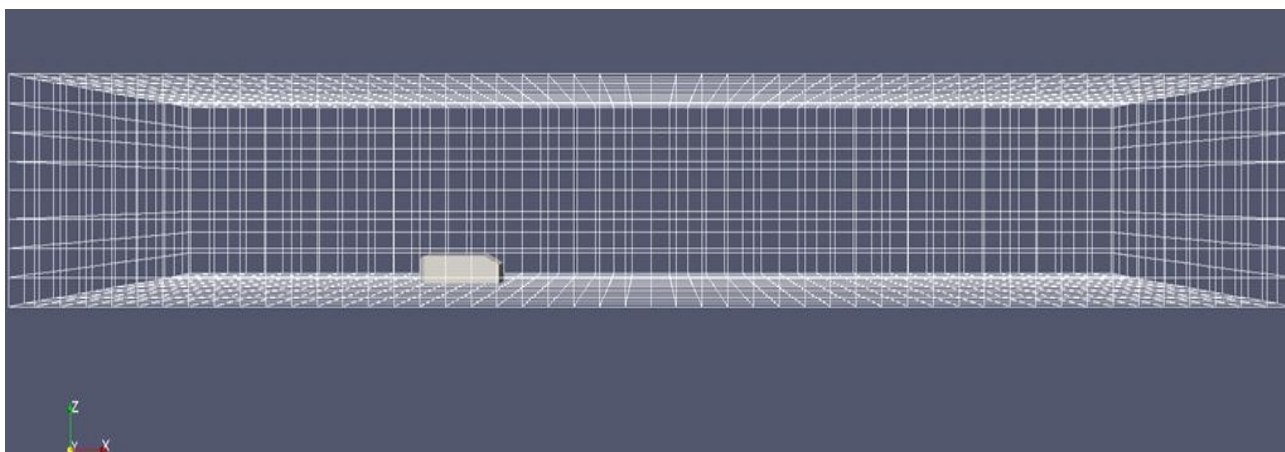


Εικόνα 2.9 Ελάχιστες ατέλειες που παρέμειναν στο επιφανειακό πλέγμα τετραπλεύρων.

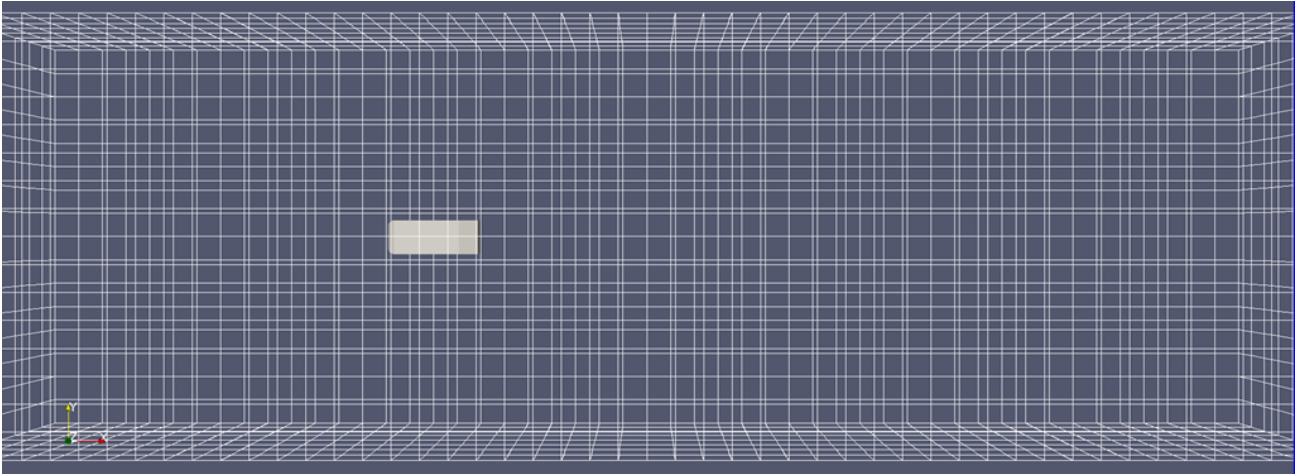
2.3 Δημιουργία πλέγματος για επίλυση ροής με συναρτήσεις τοίχου (wall-fuctions) στο Ahmed Body

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί αναλυτικά ολόκληρη η διαδικασία που οδήγησε τελικά στη γένεση του υπολογιστικού πλέγματος γύρω από το Ahmed Body. Πρέπει να επισημάνουμε ότι η δημιουργία ενός υπολογιστικού πλέγματος είναι μια δύσκολη διαδικασία γιατί αφενός απαιτούνται πολλές δοκιμές μέχρι να φτάσει στην τελική του μορφή το πλέγμα και αφετέρου απαιτείται από το χρήστη να έχει εμπειρία, ειδικά σε τέτοιου είδους εργαλεία τα οποία είναι πλήρως προσαρμόσιμα. Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από εξαεδρικά κελιά. Προκειμένου λοιπόν, να γίνει απόλυτα κατανοητή η όλη διαδικασία, καθώς και για να μπορεί ο αναγνώστης της διπλωματικής εργασίας να διευκολυνθεί, θα παρουσιαστεί εκτενώς ο έλεγχος που έχουμε πάνω στη διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος, οι επιλογές που έγιναν μέχρι το πλέγμα να φτάσει στην τελική του μορφή, καθώς και οι ρυθμίσεις των μεταβλητών των αρχείων ελέγχου (dictionary) των κωδίκων SnapEdge (Παράρτημα Δ) και SnappyHexMesh (Παράρτημα Γ).

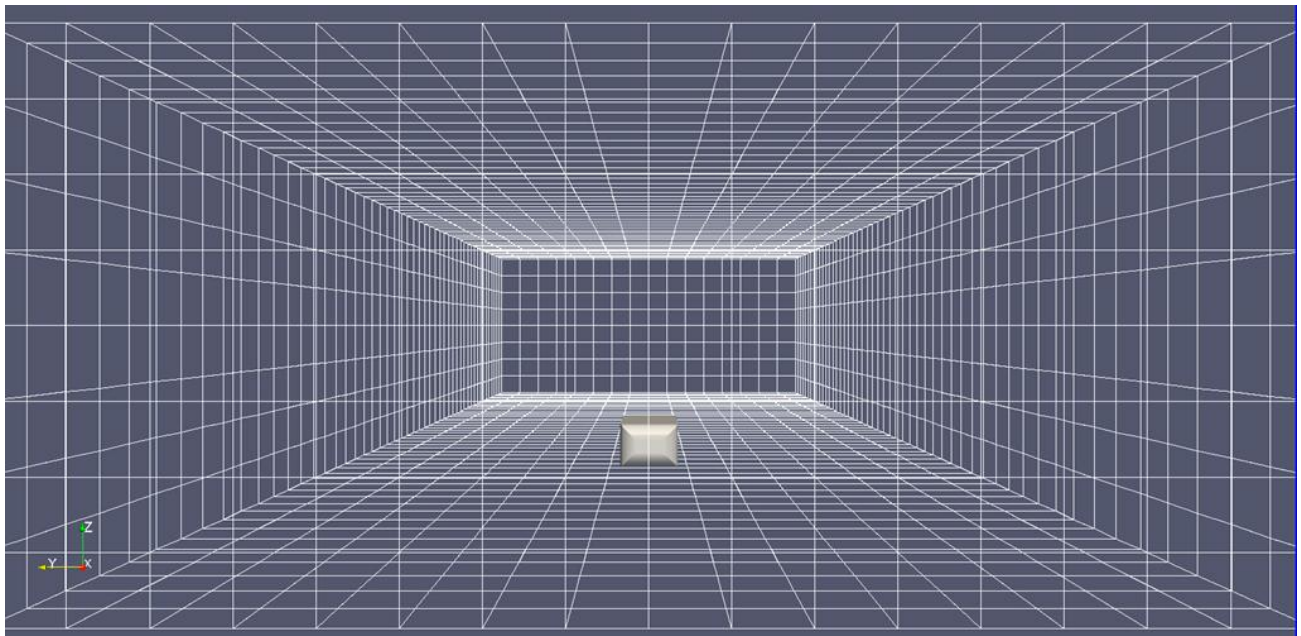
Αρχικά, αυτό που πρέπει να αποφασιστεί είναι το μέγεθος του χωρίου επίλυσης. Το χωρίο αυτό προσαρμόζεται έτσι ώστε να προσομοιάζει σε σήραγγα αντίστοιχη με εκείνη που έχει χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων της ροής γύρω από το Ahmed Body. Αυτό γίνεται για να υπάρχει πιστοποίηση της αριθμητικής λύσης της ροής με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα. Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 2.2.1 το χωρίο αυτό καθορίζεται από ένα αρχικό πλέγμα εξαεδρικών ορθογωνικών κελιών και δημιουργείται από ένα εργαλείο του OpenFoam, το BlockMesh (Παράρτημα Β). Το απλό αυτό πλέγμα που δημιουργείται είναι ανεξάρτητο από τη γεωμετρία του σώματος και λειτουργεί ως βάση πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το υπολογιστικό πλέγμα μας. Στα σχήματα 2.11 έως 2.14 φαίνεται το αρχικό πλέγμα-βάση καθώς επίσης και το 3D μοντέλο του σώματος για καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση του μεγέθους.



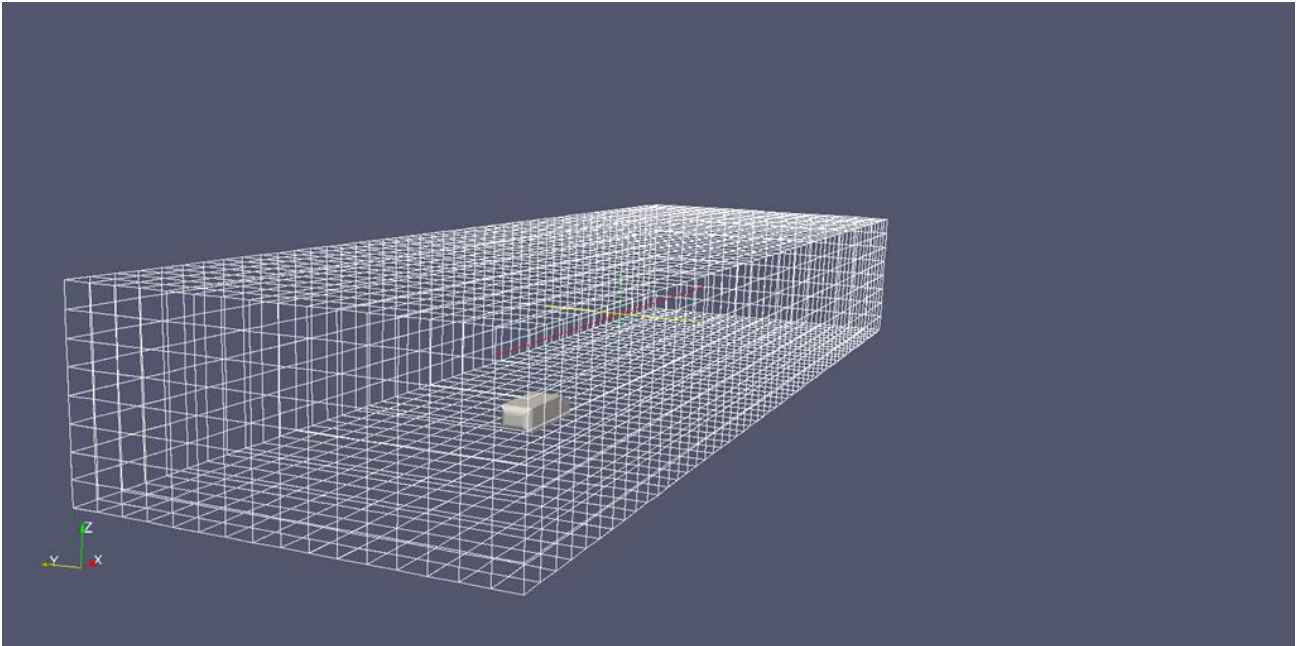
Σχ. 2.11 Θέση του Ahmed Body στο χωρίο.



Σχ. 2.12 Κάτοψη του πλέγματος-βάσης.



Σχ. 2.13 Εμπρός του πλέγματος- βάσης .



Σχ. 2.14 Το αρχικό πλέγμα-βάση.

Το μήκος του σώματος (Ahmed Body) είναι $L=1044\text{mm}$, ενώ οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου είναι $14L \times 4.4L \times 2L$ (μήκος \times πλάτος \times ύψος), δηλαδή $14.616\text{m} \times 4.5936\text{m} \times 2.088\text{m}$ και αποτελείται από $50 \times 16 \times 8$ ορθογωνικά εξαεδρικά κελιά. Η δημιουργία του είναι μία πολύ απλή διαδικασία καθώς γίνεται ορίζοντας τα όρια και το πλήθος των διαμερίσεων ανά διάσταση.

Το σώμα, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς και από τα σχήματα 2.11-2.14, τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν αρκετά μήκη σώματος απόσταση μέχρι την έξοδο έτσι ώστε να είναι δυνατή η ορθή πρόλεξη των φαινομένων που δημιουργούνται από τον ομόρρο του αυτοκινήτου. Συγκεκριμένα, το Ahmed Body έχει τοποθετηθεί σε απόσταση τεσσάρων (4) μηκών σώματος από την είσοδο της ροής και εννέα (9) μηκών αντίστοιχα από την έξοδό της.

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι ρύθμιση των επιλογών του αρχείου ελέγχου του κώδικα γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος. Το αρχείο αυτό παρατίθεται με όλα τα απαραίτητα σχόλια στο παράρτημα Γ. Όπως έχει προαναφερθεί η γεωμετρία του σώματος περιγράφεται από ένα αρχείο stereolithography (*.stl). Τα αρχεία αυτά είναι πολύ διαδεδομένα καθώς μπορούν να δημιουργηθούν εύκολα με οποιοδήποτε πρόγραμμα CAD. Η περιγραφή της γεωμετρίας του σώματος γίνεται με διακριτοποίησή της με τριγωνικά στοιχεία. Τα αρχεία αυτού του τύπου αναγνωρίζονται από τον κώδικα SnappyHexMesh, στην περιοχή geometry του αρχείου ελέγχου, ως triSurfaceMesh. Η δήλωση αυτή είναι αναγκαία προκειμένου να υπάρξει αναγνώριση από τον κώδικα, όπως επίσης και το όνομα του ορίου (patch) του πλέγματος που θα βρίσκεται πάνω στο σώμα, μετά το πέρας της διαδικασίας. Σημαντική λεπτομέρεια για να δημιουργηθεί με επιτυχία το υπολογιστικό πλέγμα είναι να ρυθμιστεί ο κώδικας SnappyHexMesh να μην προσθέσει τα επιπλέον στρώματα κελιών (layers), καθώς πρέπει πρώτα να εκτελεστεί ο κώδικας SnapEdge και, στη συνέχεια να γίνει η κατασκευή τους. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τις παρακάτω ρυθμίσεις:

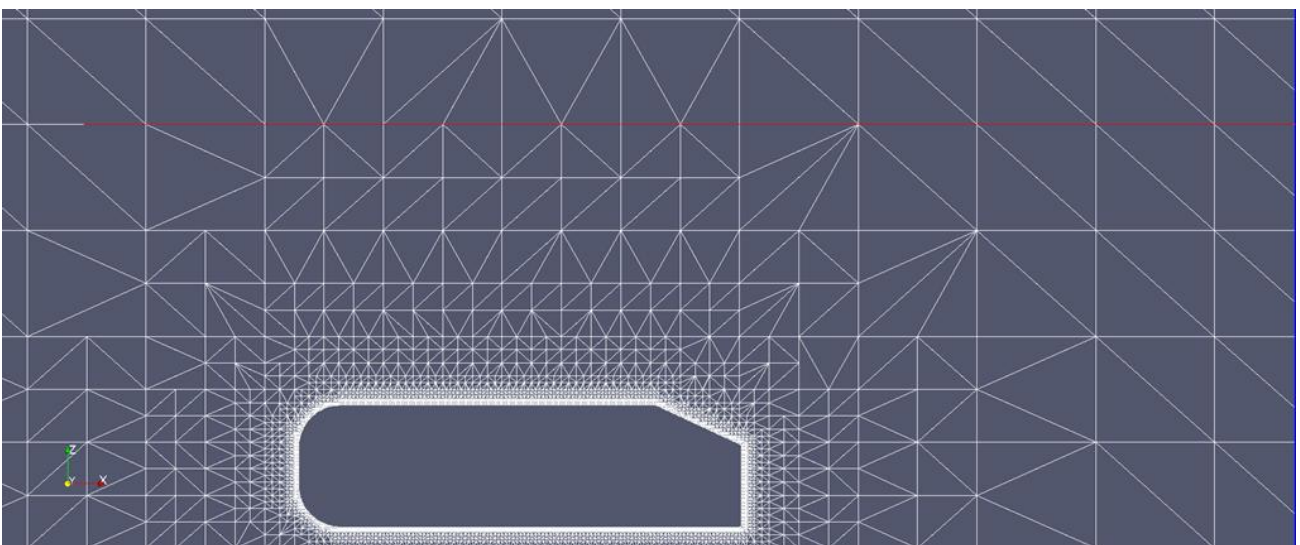
// Which of the steps to run

```
castellatedMesh true;      Οι δυνατές επιλογές είναι true, για να πραγματοποιηθεί η εντολή και false για να μην πραγματοποιηθεί.  
snap true;  
addLayers false;        Αρχικά ρυθμίζεται σε false ώστε να μπορεί να εκτελεστεί ο κώδικας Snappedge.
```

Επόμενη ρύθμιση που πραγματοποιήθηκε είναι στην περιοχή του αρχείου ελέγχου που ονομάζεται `refinementSurfaces` όπου επιλέγουμε το επίπεδο του `refinement`, δηλαδή το πόσες φορές θα διαιρεθούν τα κελιά πάνω στην επιφάνεια του σώματος (2.2.1). Επομένως με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζουμε το πόσο πυκνό θα είναι το πλέγμα σε αυτές τις περιοχές. Έχοντας λοιπόν τις γνώσεις που αποκτήθηκαν από την εκπόνηση προγενέστερης διπλωματικής εργασίας [15] ήταν γνωστό ότι για να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο υπολογιστικό πλέγμα, έπρεπε να επιλεγεί ένα αρκετά μεγάλο επίπεδο `refinement`. Αρχικά λοιπόν ρυθμίστηκε το αρχείο ελέγχου του κώδικα ώστε να δημιουργεί `refinement` επιπέδου 6. Αυτό σημαίνει ότι τα κελιά τα οποία βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του σώματος διαιρούνται έξι (6) φορές. Εδώ καλό είναι να σημειώσουμε το γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο επίπεδο πυκνότητας.

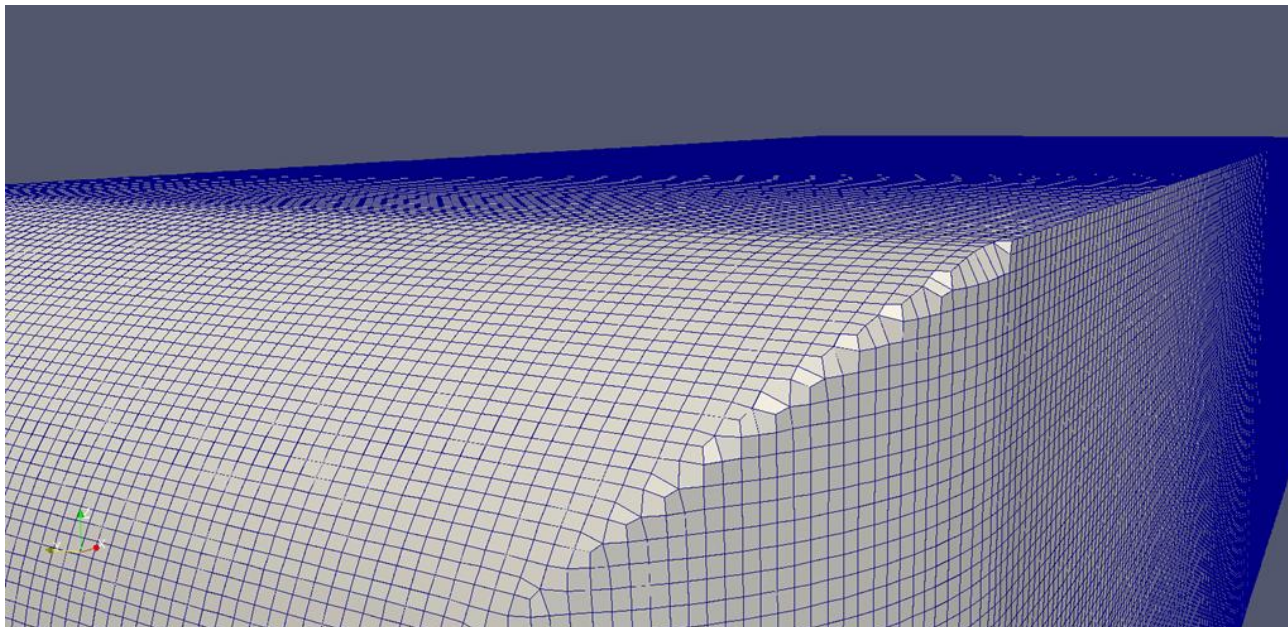
`refinementSurfaces` Στη περιοχή αυτή γίνεται ο καθορισμός του επιπέδου πυκνότητας του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια των σωμάτων. Το ελάχιστο γίνεται παντού ενώ το μέγιστο στις λεπτομέρειες και στις ακμές της γεωμετρίας του σώματος. Το κριτήριο για το που θα χρησιμοποιηθεί το ελάχιστο και που το μέγιστο επίπεδο πυκνότητας είναι ο ορισμός της τιμής της γωνίας `resolveFeatureAngle`.

```
{  
  ahmedbody  
  {  
    // Surface-wise min and max refinement level  
    level (6 6);      Ορισμός ελαχίστου και μέγιστου επιπέδου πυκνότητας.  
  }  
}
```

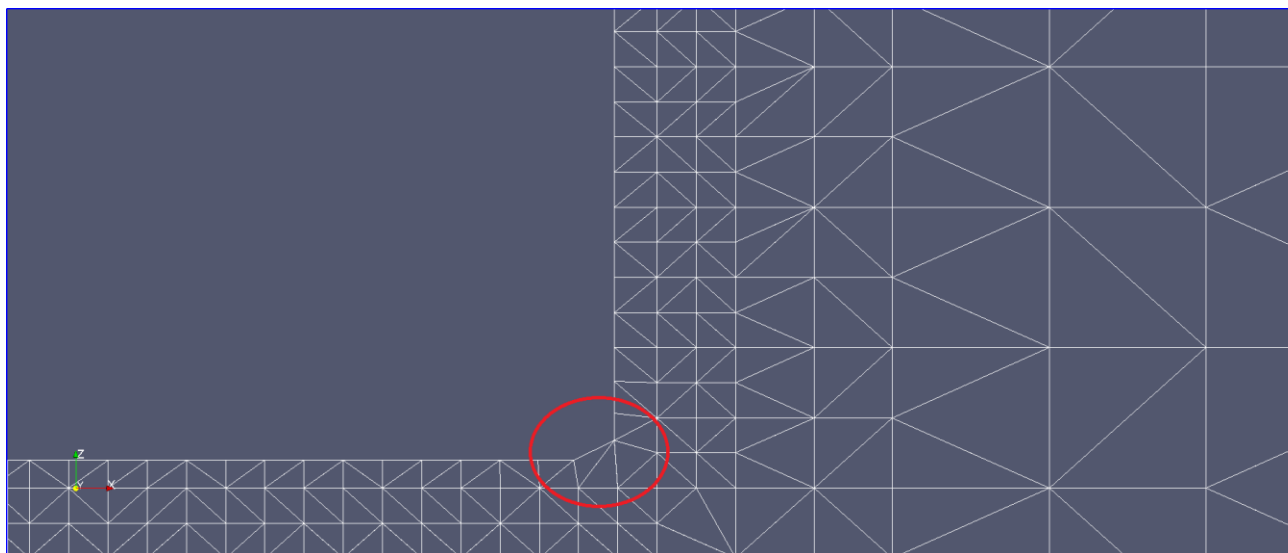


Σχ. 2.15 Τομή του πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας, πυκνωμένο πλέγμα μόνο πάνω στο σώμα.

Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζονται τα διάφορα επίπεδα πυκνότητας από το επίπεδο 0 στο εξωτερικό ως το επίπεδο 6 στην επιφάνεια του σώματος. Αυτή η απότομη αλλαγή πυκνότητας του πλέγματος μπορεί να εξαλειφθεί με διάφορες ρυθμίσεις που θα αναλυθούν παρακάτω καθώς είναι ανεπιθύμητη αφού δημιουργεί προβλήματα στην ακρίβεια επίλυσης της ροής.



Σχ. 2.16 Ατέλειες στις ακμές των καμπύλων επιφανειών.



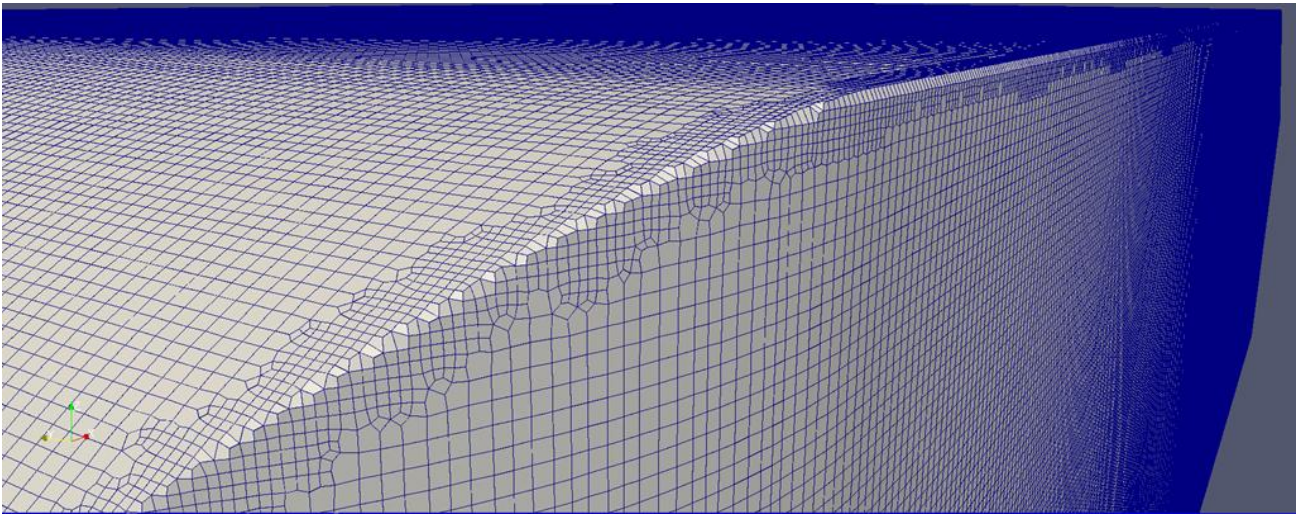
Σχ. 2.17 Ατέλειες σε ακμή στο πίσω μέρος του σώματος, τομή στο επίπεδο συμμετρίας.

Όπως φαίνεται και από τις εικόνες 2.16 & 2.17 υπάρχουν κάποιες ατέλειες στο πλέγμα στις καμπύλες επιφάνειες και στις έντονες ακμές του σώματος, αλλά και στην ορθή περιγραφή της επιφάνειας οπότε η επόμενη ρύθμιση που έγινε ήταν να αυξηθεί το επίπεδο πυκνότητας των κελιών με σκοπό να δημιουργηθούν κελιά με μικρότερο μέγεθος τα οποία θα ακολουθούν καλύτερα την επιφάνεια του σώματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18 το πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν καλύτερο αλλά κάποιες ατέλειες εξακολουθούσαν να υφίστανται. Παρατίθενται και οι καινούριες ρυθμίσεις στην περιοχή refinementSurfaces.

```

ahmedbody
{
  // Surface-wise min and max refinement level
  level (7 8);
}

```



Σχ. 2.18 Ατέλειες στις ακμές των καμπύλων επιφανειών.

Επόμενη λογική σκέψη θα ήταν να αυξηθεί επιπλέον το επίπεδο πυκνότητας. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των κελιών, ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο αριθμός των κελιών τετραπλασιάστηκε μόνο με την πρώτη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε. Ένας τόσο μεγάλος αριθμός κελιών είναι υπολογιστικά ασύμφορος καθώς υποχρεώνει τον κώδικα να αργεί να φτάσει στην σύγκλιση και αχρείαστος αφού σε προβλήματα χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης που υποστηρίζεται από συναρτήσεις τοίχου μπορούμε να φτάσουμε σε αξιόπιστη λύση με πολύ λιγότερο αριθμό κελιών.

Για να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό έχουμε στην διάθεση μας πολλές επιλογές ρυθμίσεων του κώδικα, ώστε να προσαρμοστεί το πλέγμα όσο γίνεται καλύτερα πάνω στη γεωμετρία της επιφάνειας του σώματος χωρίς να αυξηθεί παράλογα ο αριθμός των κελιών. Καταρχήν επιλέχτηκε να διατηρηθεί το επίπεδο πυκνότητας του σώματος στο level 6. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε μία πολύ χρήσιμη ρύθμιση που επιτρέπει το επιπλέον πύκνωμα του πλέγματος μόνο σε περιοχές όπου εμφανίζονται ακμές. Η ρύθμιση αυτή ονομάζεται `resolveFeatureAngle` και λειτουργεί ως εξής: Ο κώδικας 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 την τιμή της δοσμένης γωνίας, τότε το πλέγμα πυκνώνει ακόμα περισσότερο. Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε το μέγιστο επίπεδο πυκνότητας να αυξηθεί κατά ένα, δηλαδή να φτάσει στο level 7, και το `resolveFeatureAngle` να ρυθμιστεί στην τιμή 20° καθώς θέλουμε να υπάρξει πύκνωμα του πλέγματος και στην ακμή που εμφανίζεται στο πίσω μέρος του σώματος όπου αρχίζει το κεκλιμένο επίπεδο (τα δύο Ahmed Bodies που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είχαν αντίστοιχα 25° και 35° γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου).

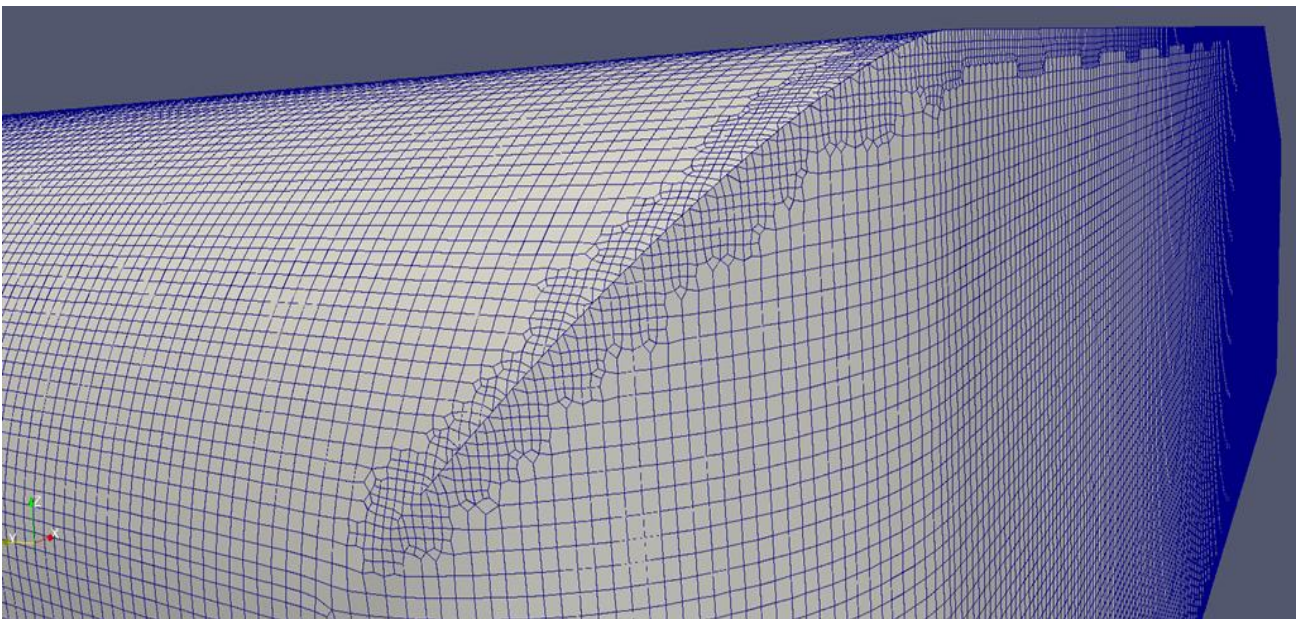
```

ahmedbody
{
  // Surface-wise min and max refinement level
  level (6 7);
}

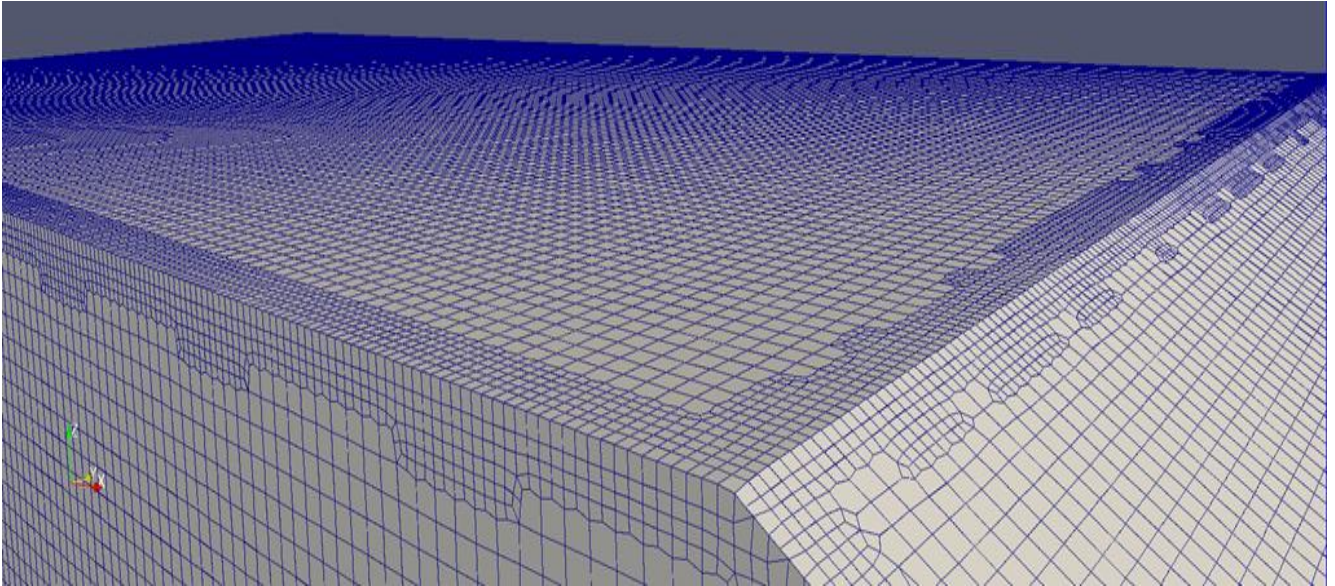
```

`// Resolve sharp angles` Η τιμή αυτής της γωνίας καθορίζει τα σημεία που θα πυκνωθεί η επιφάνεια με το ελάχιστο ή το μέγιστο επίπεδο πυκνότητας. Σε περιοχές που η γωνία παίρνει τιμές μεγαλύτερες από αυτή που δίνει ο χρήστης εφαρμόζεται το μέγιστο επίπεδο πυκνότητας.
`resolveFeatureAngle 20;`

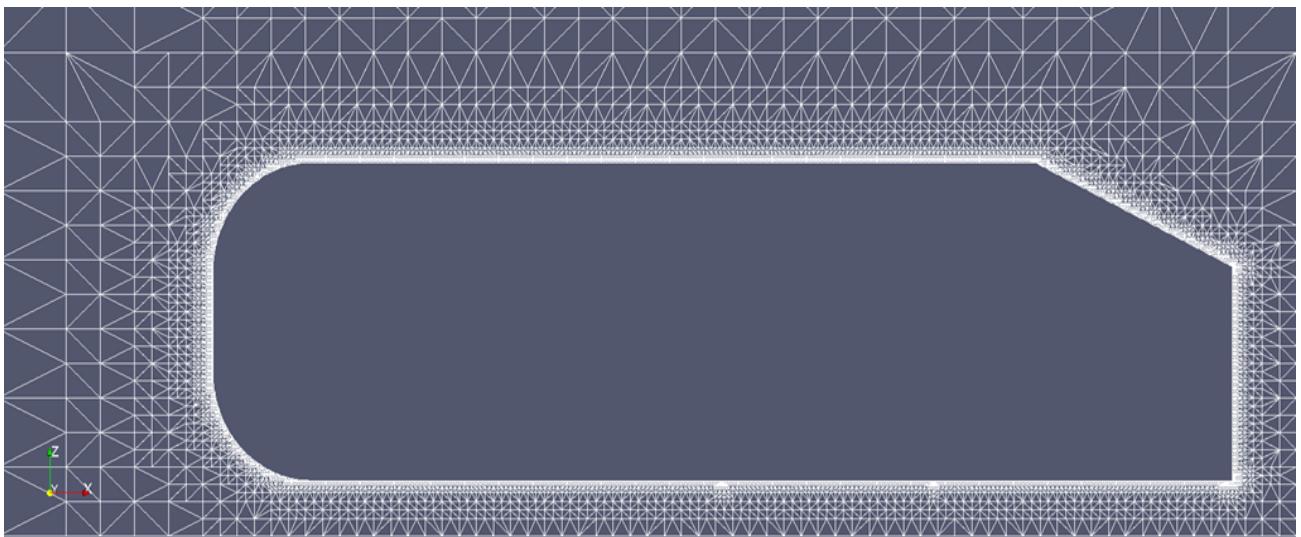
Ο κώδικας SnappyHexMesh κατά τη διάρκεια του ταιριάσματος του υπολογιστικού πλέγματος με την επιφάνεια του σώματος εκτελεί κάποιες επαναλήψεις (iterations) ο αριθμός των οποίων επιλέγεται από τον χρήστη. Περισσότερες επαναλήψεις σημαίνουν καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος στην επιφάνεια ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζουν τον υπολογιστικό κόστος. Επόμενη κίνηση ήταν να ρυθμιστεί κατάλληλα ο κώδικας ώστε να εκτελεί περισσότερες επαναλήψεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του ταιριάσματος του πλέγματος με την επιφάνεια του σώματος, ή αλλιώς snapping, κάτι που γίνεται στην περιοχή SnapControls του αρχείου ελέγχου του κώδικα. Τέλος, καταλυτικό ρόλο τόσο στις παραπάνω επιλογές όσο και στη λύση των προβλημάτων μας ήταν η χρήση του κώδικα SnapEdge (παράγραφος 2.2.2), ο οποίος έδωσε τη δυνατότητα να επιτευχθεί ένα υπολογιστικό πλέγμα που σέβεται τη γεωμετρία του σώματος ενώ παράλληλα μας επιτρέπει να κρατήσουμε το μέγεθος του σε λογικά πλαίσια.



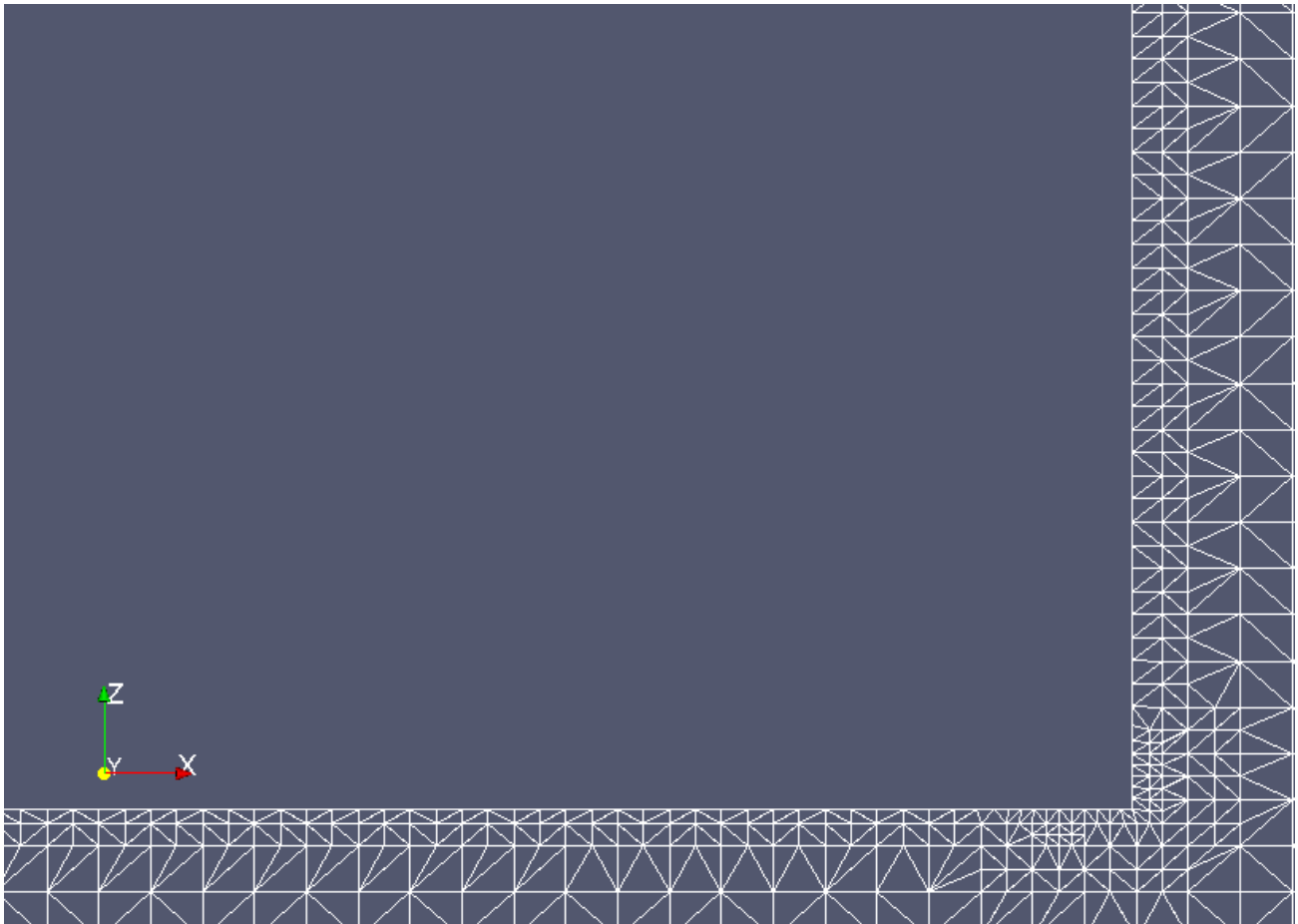
Σχ. 2.19 Πυκνότερο πλέγμα στις ακμές των καμπύλων επιφανειών και χρήση του SnapEdge.



Σχ. 2.20 Πυκνότερο πλέγμα στην ακμή στην αρχή του slant μέρους του Ahmed Body και χρήση του SnapEdge.



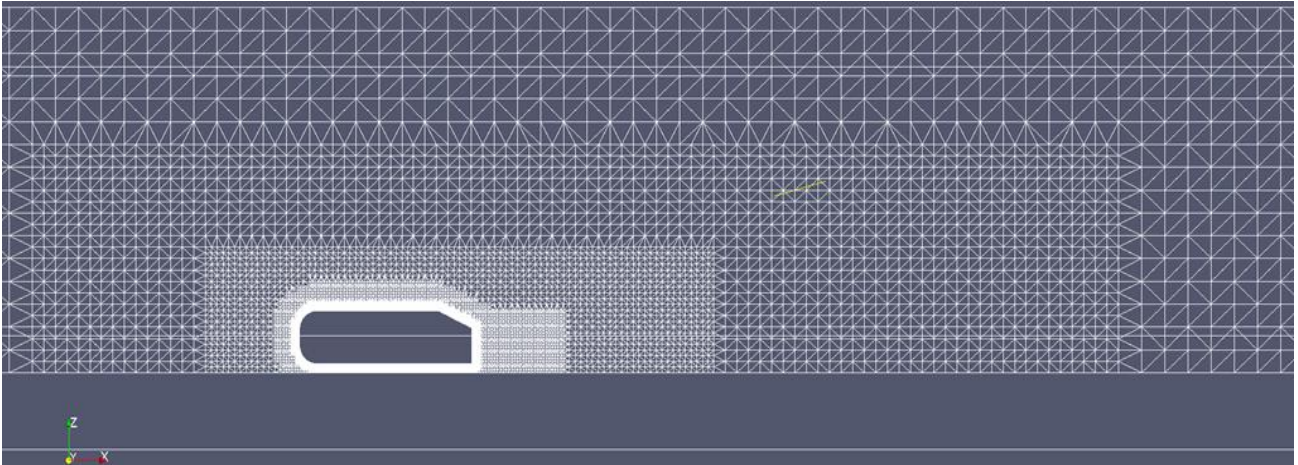
Σχ. 2.21 Τομή στον άξονα συμμετρίας του πυκνότερου πλέγματος στην επιφάνεια του Ahmed Body.



Σχ. 2.22 Μεγαλύτερο επίπεδο πυκνότητας στις ακμές, τομή στον άξονα συμμετρίας. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται καλύτερη ταύτιση του πλέγματος με την επιφάνεια του σώματος.

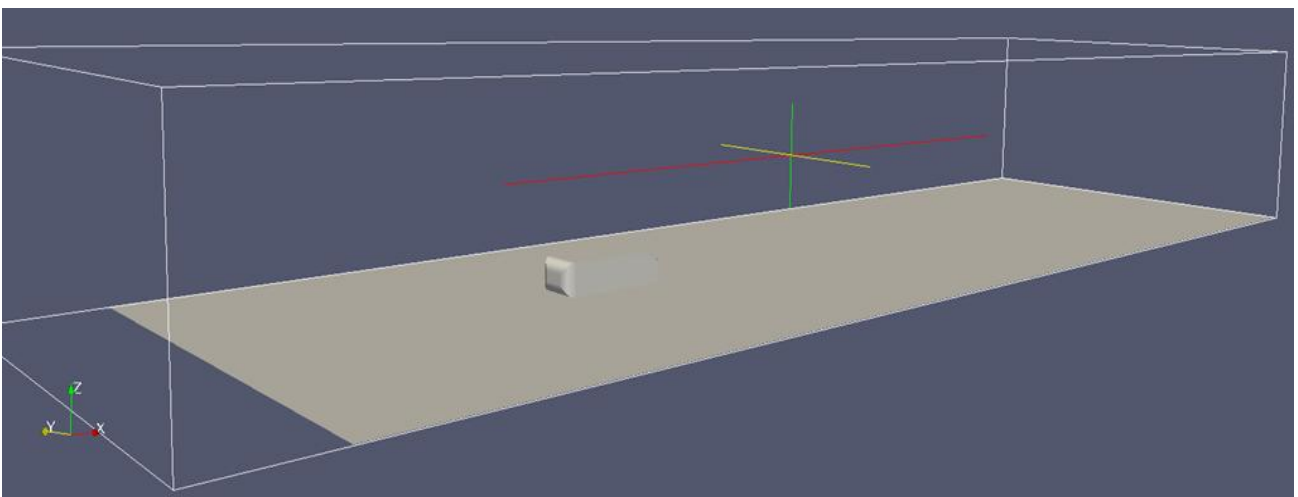
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το επόμενο πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν η απότομη αλλαγή του επιπέδου πυκνότητας, από το αρχικό επίπεδο (level 0) του πλέγματος-βάσης ως το τελικό επίπεδο (level 7) στις ακμές της επιφάνειας του σώματος. Προκειμένου να λυθεί αυτό το ζήτημα οριοθετήθηκαν κάποιες περιοχές γύρω από το σώμα και, στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν σε αυτές τα επιθυμητά επίπεδα πυκνώματος του πλέγματος (refinement level) ώστε να υπάρχει μια βαθμιαία αλλαγή στη πυκνότητα του πλέγματος από το επίπεδο 0 στο επίπεδο 7. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής του σχήματος των περιοχών (ορθογωνικές ή σφαιρικές) καθώς και το που ακριβώς θα εφαρμοστεί το πύκνωμα του πλέγματος (εντός, εκτός ή σε συγκεκριμένη απόσταση από την οριοθετημένη περιοχή). Βασική προϋπόθεση για να δημιουργηθούν αυτές οι περιοχές είναι να δηλωθούν στην ενότητα geometry του αρχείου ελέγχου του κώδικα.

Εδώ χρησιμοποιήθηκαν τρία ορθογώνια τα οποία καθορίζονται δίνοντας τις συντεταγμένες δύο σημείων, του πίσω και κάτω αριστερά και του πάνω και εμπρός δεξιά. Εντός κάθε τέτοιας περιοχής ορίστηκε και το επιθυμητό επίπεδο πυκνότητας, ώστε να υπάρχει μία ομαλή μετάβαση από το αρχικό στο τελικό επίπεδο. Η ρύθμιση αυτή γίνεται στην περιοχή refinementRegions του αρχείου ελέγχου. Επίσης δημιουργείται μια επιπλέον ορθογωνική περιοχή που τοποθετείται ακριβώς πίσω από το αυτοκίνητο (Ahmed Body) για να δημιουργηθεί ένα πιο πυκνό πλέγμα στην περιοχή του ομόρρου, όπου εκεί εμφανίζονται έντονα φαινόμενα ανακυκλοφορίας και αποκόλλησης της ροής. Στο σχήμα 2.23 παρουσιάζεται η εικόνα του υπολογιστικού πλέγματος μετά τις τελευταίες προσθήκες.



Σχ. 2.23 Επίπεδα πυκνότητας σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας .

Το τελικό βήμα για να ολοκληρωθεί το υπολογιστικό πλέγμα ήταν η πρόσθεση των επιπλέον στρωμάτων κελιών (layers). Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε άλλο ένα αρχείο *.stl το οποίο προσομοιάζει την επιφάνεια του δρόμου πάνω στον οποίο κινείται το όχημα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.24 μόνο μία επιφάνεια βρίσκεται στα όρια του χωρίου, $z=0$, και παράλληλη στην επίπεδο $x-y$. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μόνη διάσταση που μας απασχολεί είναι αυτή του επιπέδου $z=0$, όπου πρέπει να καλύπτεται από τη μία επιφάνεια του δρόμου εκτός από ένα πολύ μικρό κομμάτι στην αρχή του χωρίου για λόγους που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Πριν εφαρμοστεί η διαδικασία πρόσθεσης των επιπλέον κελιών επιλέγεται για το δρόμο επίπεδο πυκνότητας 4 (ελάχιστο) με 5 (μέγιστο) έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά μεγέθους σε γειτονικά κελιά.



Σχ. 2.24 Τα 3D μοντέλα των σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως αυτοκίνητο και ως δρόμος.

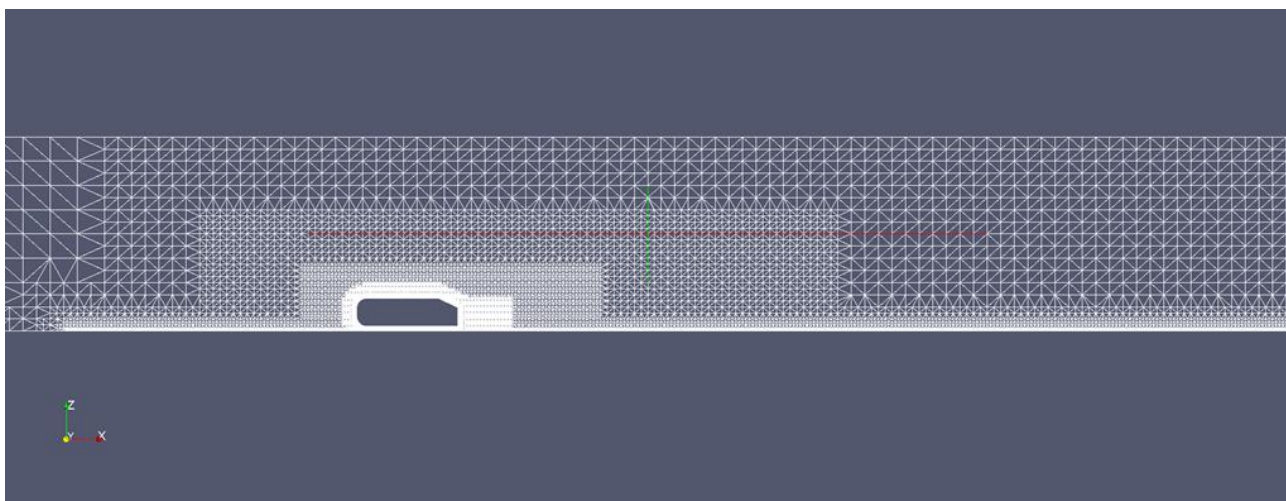
Η διαδικασία πρόσθεσης επιπλέον στρωμάτων κελιών είναι πιο δύσκολη από τα προηγούμενα βήματα για κάποιο νέο χρήστη του λογισμικού καθώς απαιτεί εμπειρία στη δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων. Έχοντας ως βάση προγενέστερη διπλωματική εργασία [15], τα προβλήματα που υπήρξαν αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία.

Αρχικά πρέπει να εξηγηθεί ότι τα προβλήματα αυτά οφείλονται κυρίως στην διαδικασία που ακολουθεί το λογισμικό για τη δημιουργία των επιπλέον στρωμάτων, καθώς παρατηρείται το φαινόμενο της έντονης παραμόρφωσης κάποιων περιοχών με κελιά, λόγω της αναγκαστικής εκτόπισης του πλέγματος που γίνεται για να υπάρξει ο κατάλληλος χώρος προκειμένου το λογισμικό να δημιουργήσει τις πλεγματικές διαστρωματώσεις.

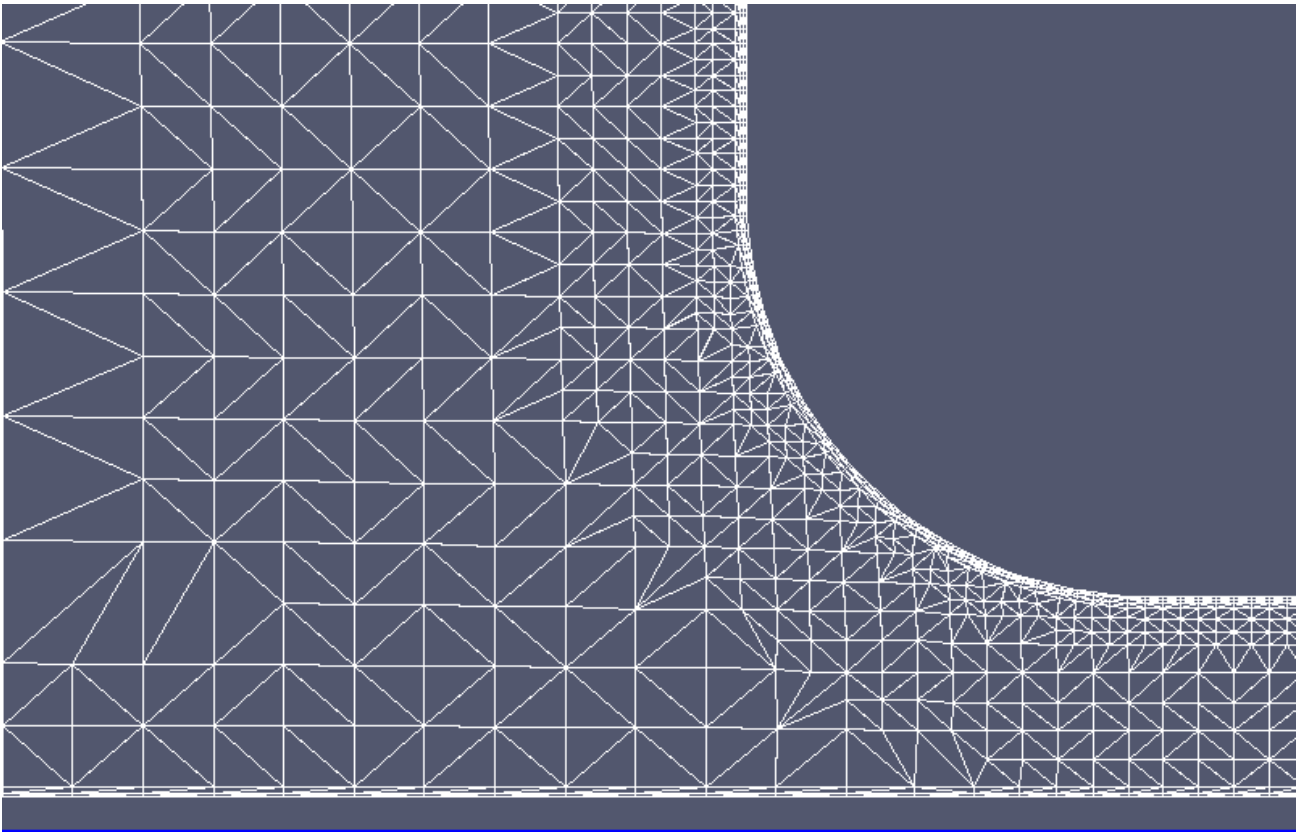
Αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα να κάνει τον κώδικα πιο αργό κάνοντας ταυτόχρονα περισσότερες επαναλήψεις, καταναλώνοντας έτσι όλη την φυσική μνήμη του υπολογιστικού συστήματος. Αυτό οδηγεί στον απότομο τερματισμό της διαδικασίας και ,συνεπώς, στην αδυναμία γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος.

Οι τρόποι αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος ήταν δύο. Αφενός έγινε προσπάθεια σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής του πλέγματος να κρατηθεί ο αριθμός των κελιών κοντά στα 2.000.000 ώστε να μη δημιουργηθεί ένα πολύ “βαρύ” πλέγμα. Αφετέρου ρυθμίστηκε από το meshQualityControls του αρχείου ελέγχου (SnappyHexMesh) η “χαλάρωση” της ποιότητας του πλέγματος. Ο κώδικας SnappyHexMesh δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει πόσο “αυστηρό” θα είναι το πρόγραμμα κατά τη διαδικασία γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος σε ότι αφορά την ποιότητα των παραγόμενων πλεγματικών στοιχείων. Αυστηρές ρυθμίσεις ποιότητας του πλέγματος ενδέχεται να οδηγήσουν σε αυξημένο υπολογιστικό κόστος ενώ λιγότερο αυστηρές ρυθμίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε κακής ποιότητας υπολογιστικό πλέγμα που θα δυσκολέψει πολύ τον κώδικα αριθμητικής επίλυσης της ροής.

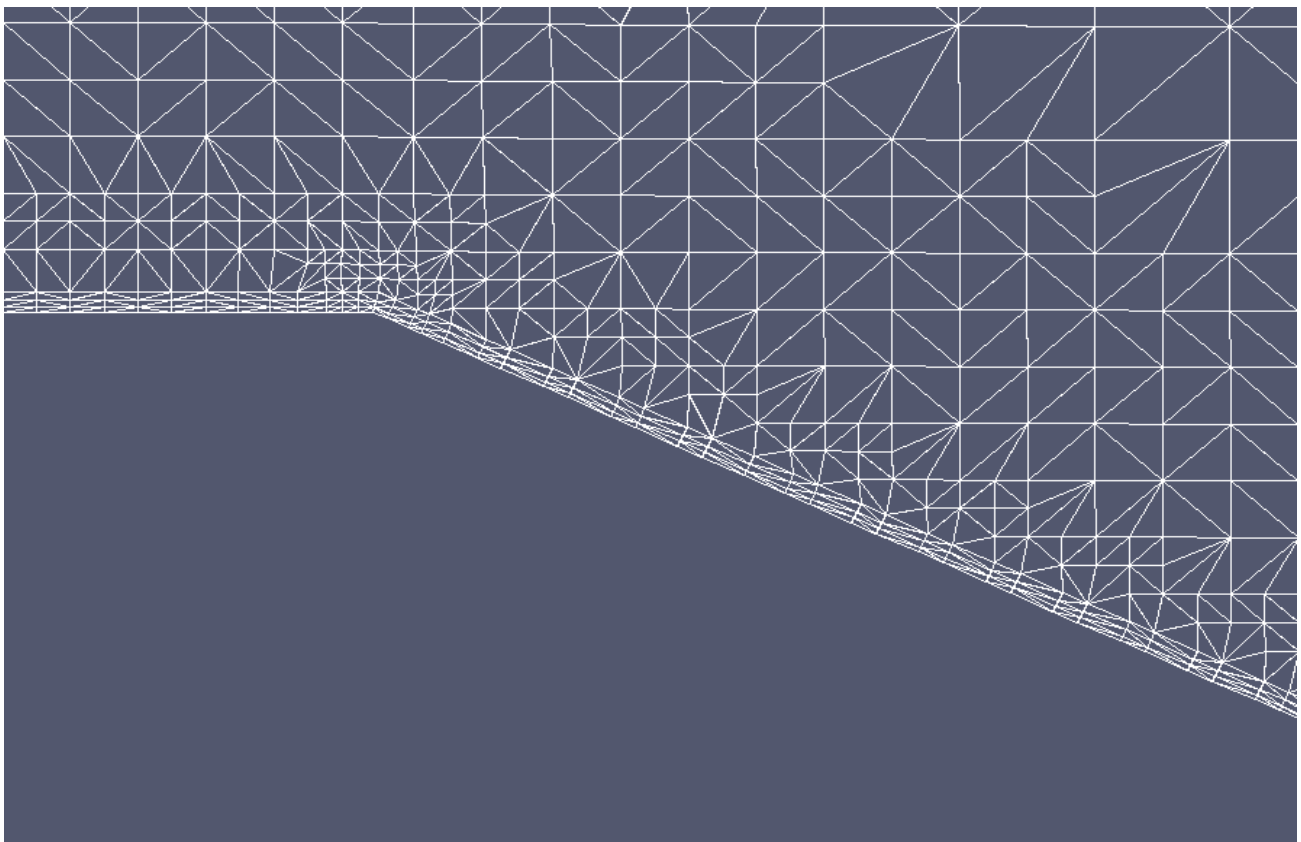
Τελικά, γνωρίζοντας ότι θα χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις τοίχου για την επίλυση της ροής προτιμήθηκε να δημιουργηθούν 3 επιπλέον στρώματα κελιών πάνω στο σώμα και 2 για το δρόμο αντίστοιχα. Η ρύθμιση αυτή γίνεται στη περιοχή addLayersControls του αρχείου ελέγχου.



Σχ. 2.25 Επίπεδα πυκνότητας πλέγματος αυτοκινήτου και δρόμου, τομή ως προς τον άξονα συμμετρίας.



Σχ. 2.26 Πλέγμα με στρώματα κελιών, δρόμος και αυτοκίνητο, τομή στον άξονα συμμετρίας.



Σχ. 2.27 Πλέγμα με επιπλέον στρώματα κελιών πάνω στο πίσω κεκλιμένο επίπεδο του Ahmed Body, τομή στο άξονα συμμετρίας.

Ολοκληρώνοντας πρέπει προστεθεί ότι η ολοκλήρωση του υπολογιστικού πλέγματος έγινε έπειτα από πολλές δοκιμές και προσπάθειες . Αυτό είναι αναγκαίο αφού για να αντιμετωπιστεί κάθε πρόβλημα έπρεπε να δοκιμαστούν διάφορες ρυθμίσεις τόσο στο SnapEdge όσο και στο SnappyHexMesh. Το λογισμικό SnappyHexMesh είναι ικανό να δημιουργήσει ένα πολύ καλό υπολογιστικό πλέγμα ωστόσο υπήρχαν κάποια προβλήματα. Το πρώτο που παρατηρήθηκε είναι η αδυναμία του κώδικα να σεβαστεί την γεωμετρία του σώματος ιδιαίτερα στις έντονες ακμές και στις καμπύλες επιφάνειες του. Αυτό ξεπεράστηκε τόσο με ρυθμίσεις του ίδιου του λογισμικού αλλά καταλυτικό ρόλο είχε η χρήση του SnapEdge, το οποίο έδωσε τη δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα πλέγμα με αρκετά μικρότερο μέγεθος που να σέβεται όμως απόλυτα την γεωμετρία της επιφάνειας του σώματος. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι η έντονη διακριτοποίηση που παρατηρείται στην πυκνότητα του πλέγματος, ανομοιόμορφο πύκνωμα του πλέγματος, κάτι που προκύπτει από τη διαδικασία με την οποία ο κώδικας δημιουργεί το πλέγμα. Αυτό διορθώνεται με την κατασκευή περιοχών στις οποίες επιβάλλει ο χρήστης περαιτέρω πύκνωμα του πλέγματος, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Το τελικό πλέγμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από εξάεδρα κελιά και απαρτίζεται από 2.000.000 κελιά περίπου. Η δημιουργία του απαιτεί 15 περίπου λεπτά τρέχοντας σε ένα επεξεργαστή και καταναλώνοντας 6Gb RAM.

3. Επίλυση ροής και υπολογισμός των συντελεστών αντίστασης και άνωσης του Ahmed Body.

Αφού πλέον έχει δημιουργηθεί το υπολογιστικό πλέγμα είναι δυνατό να εκτελεστεί ο αλγόριθμος αριθμητικής επίλυσης της ροής ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές αντίστασης και άνωσης, καθώς αυτά αποτελούν τους αεροδυναμικούς δείχτες ποιότητας κάθε τέτοιου οχήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αλλά και ο χρόνος εκτέλεσης των υπολογισμών να βρίσκεται εντός λογικών πλαισίων. Οι ενέργειες αυτές παρατίθενται με μια λογική σειρά από τον καθορισμό των οριακών συνθηκών του πεδίου ροής ως τη συλλογή και πιστοποίηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με αντίστοιχα πειραματικά.

Προκειμένου να υπολογιστούν τα μεγέθη της ροής χρησιμοποιείται ένας κώδικας επίλυσης μόνιμης, ασυμπίεστης ροής συνεκτικού ρευστού. Πρέπει να σημειωθεί ότι το υπολογιστικό κόστος για το σκοπό της παρούσας εργασίας της επίλυσης μη -μόνιμης και συμπιεστής ροής θα ήταν ασύμφορο.

Ο κώδικας λοιπόν που πληρεί τα παραπάνω χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό του OpenFoam και ονομάζεται simpleFoam. Στο κώδικα αυτό προστέθηκε μία ρουτίνα μετεπεξεργασίας (Παράρτημα Δ) έτσι ώστε να υπολογίζει σε κάθε επανάληψη τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης του οχήματος. Αυτή η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε για να υπάρχει αμεσότερη και καλύτερη επίβλεψη στη σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης της ροής.

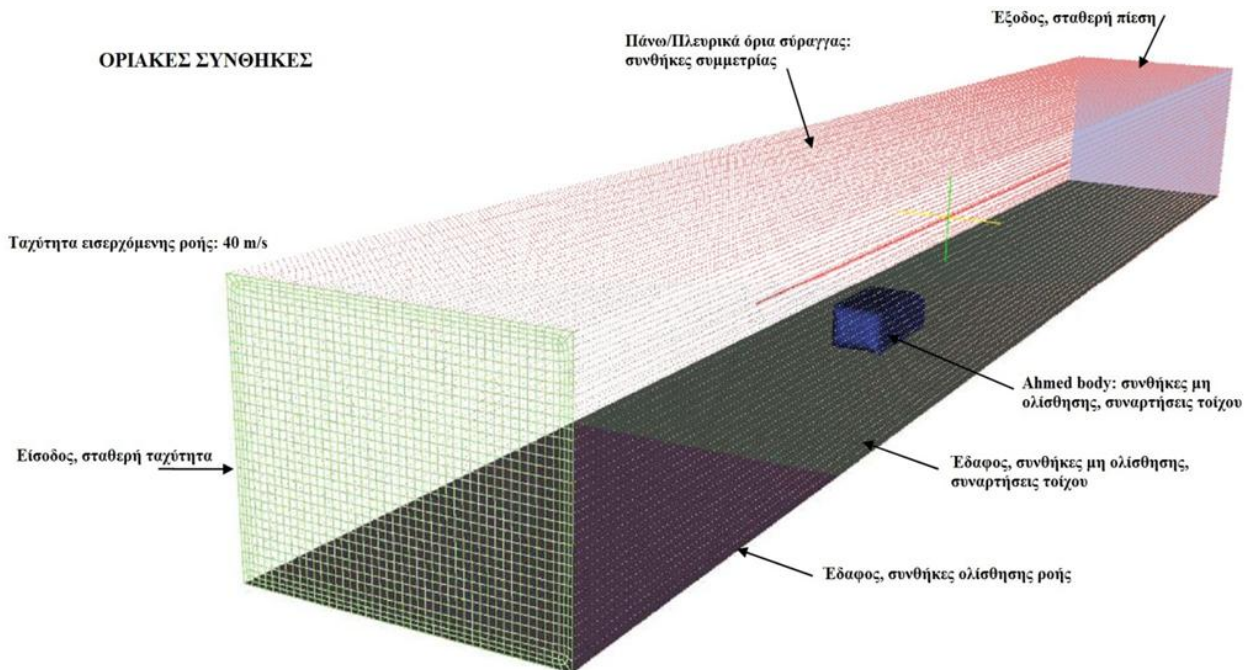
3.1 Χαρακτηριστικά ροής και οριακές συνθήκες

Τα χαρακτηριστικά της ροής (Πίνακας 3.1) καθορίζονται από τα πειράματα που θα προσομοιωθούν, ώστε να μπορεί να γίνει στη συνέχεια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Κινηματική συνεκτικότητα ρευστού	$15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Πυκνότητα ρευστού (ασυμπίεστη ροή)	1.2 kg/m^3
Ταχύτητα αδιατάρακτης ροής	40 m/s
Αριθμός Reynolds (μήκος αναφοράς το μήκος του σώματος)	$Re = 2.8 \times 10^6$
Αριθμός Reynolds (μήκος αναφοράς το ύψος του σώματος)	$Re = 768,000$

Πίνακας 3.1 Βασικά δεδομένα για τον υπολογισμό του πεδίου ροής.

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για την επίλυση της ροής παρουσιάζονται στη συνέχεια. Άξιες αναφοράς είναι δύο από τις επιλογές που υλοποιήθηκαν. Η πρώτη επιλογή που επισημαίνεται είναι η τοποθέτηση της επιφάνειας που παίζει το ρόλο του εδάφους, όπου εφαρμόζονται συνθήκες μη ολίσθησης και χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοίχου, 1m μετά την είσοδο της ροής (Σχ. 3.2). Πριν από το 1m υπάρχουν οριακές συνθήκες μη εισχώρησης. Αυτό γίνεται για να υπάρχει μια περιοχή διαμόρφωσης της ροής και ταυτόχρονα για 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 την είσοδο του χωρίου. Η δεύτερη επιλογή που έγινε ήταν η οριακή συνθήκη της ταχύτητας στο έδαφος να έχει την τιμή 40 m/sec ίση δηλαδή με αυτή της ροής. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε για να υπάρχει η δυνατότητα πιστοποίησης των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης της ροής με τα πειραματικά δεδομένα από τη ροή σε σήραγγα.

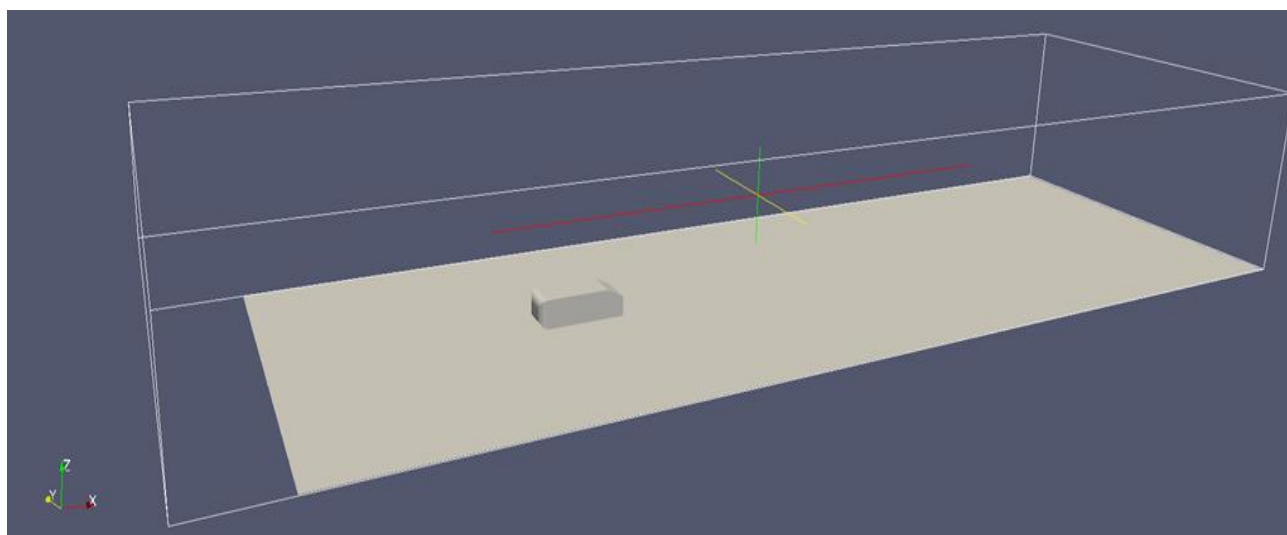


Σχ.3.1 Οριακές συνθήκες του χωρίου ροής.

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται όλες οι κύριες οριακές συνθήκες (Σχ.3.1) που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της ροής.

	Ταχύτητα (x,y,z) m/sec	Πίεση
Είσοδος/inlet	40,0,0	Μηδενική Παράγωγος
Έξοδος/outlet	Μηδενική Παράγωγος	0 (πίεση αναφοράς)
Άνω και πλευρικά όρια	Συνθήκες Συμμετρίας	Συνθήκες Συμμετρίας
Κάτω επιφάνεια μέχρι και 1m μετά την είσοδο (floor)	Συνθήκες μη εισχώρησης	Μηδενική Παράγωγος
Έδαφος, εκτός του 1ου μέτρου από την είσοδο (road), κινούμενος δρόμος	40,0,0	Μηδενική Παράγωγος
Τοίχωμα του Ahmed Body	0,0,0 και συναρτήσεις τοίχου	Μηδενική Παράγωγος

Πίνακας 3.2 Οριακές Συνθήκες για το πρόβλημα ροής.



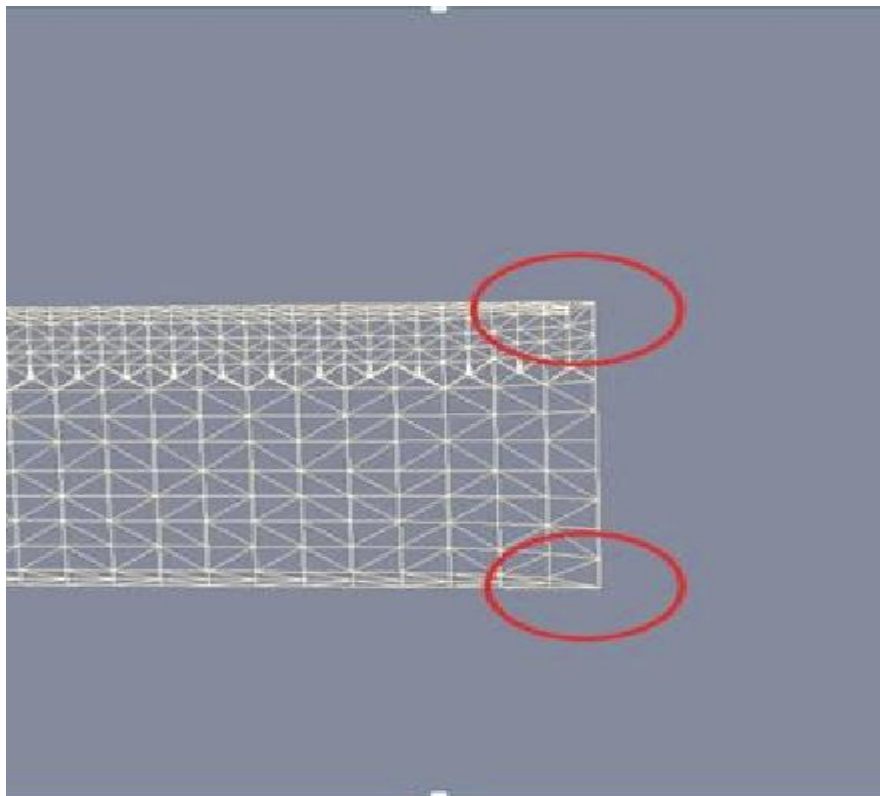
Σχ.3.2 Αναπαράσταση του χωρίου επίλυσης.

3.2 Επιλογές για μείωση του υπολογιστικού χρόνου

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι επιλογές που έγιναν προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης της επίλυσης της ροής. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και υπήρχε δυνατότητα να επιλυθεί αριθμητικά η ροή στα υπολογιστικά συστήματα που διαθέτει το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ) προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί ένας προσωπικός υπολογιστής τελευταίας γενιάς. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού υπολογιστή στον οποίο πραγματοποιήθηκε τόσο η γένεση του υπολογιστικού πλέγματος όσο και η επίλυση της ροής είναι τα ακόλουθα:

- Επεξεργαστής : Intel Core i7 CPU (8 πυρήνες στα 1.76Ghz)
- Μνήμη RAM : 6 Gb DDR3
- Λειτουργικό Σύστημα : Ubuntu 10.4, 64bit
- Λογισμικό Πακέτο : OpenFoam , 64bit

Μια πρώτη λογική σκέψη ήταν να γίνει εκμετάλλευση της συμμετρίας που παρουσιάζει το σώμα (Ahmed Body) και η ροή (απουσία πλευρικών ανέμων) κατά τον άξονα γ'γ. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να "κόψουμε" το χωρίο στη μέση, δηλαδή πάνω στον άξονα συμμετρίας του σώματος, ώστε κατά την αριθμητική επίλυση της ροής ο κώδικας να διαχειρίζεται τα μισά κελιά από ότι πριν. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι δεν πραγματοποιείται σωστά η διαδικασία πρόσθεσης στρωμάτων κελιών ιδιαίτερα στα τελευταία κελιά πάνω στο Ahmed Body [15] (σχήμα 3.23) . Επομένως προτιμήθηκε να μη χρησιμοποιηθεί αυτή η επιλογή, καθώς υπήρξε η δυνατότητα να περιορίσουμε τον αριθμό των κελιών αυξάνοντας ταυτόχρονα και την αξιοπιστία του πλέγματος. Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας το νέο λογισμικό Snap Edge (ενότητα 2.2.2).



Σχ 3.23 Ατέλειες του πλέγματος κοντά στο επίπεδο συμμετρίας . Δεν γίνεται η πρόσθεση των πλεγματικών διαστρωματώσεων.

Επόμενη λογική ρύθμιση ήταν να γίνει εκμετάλλευση της δυνατότητας που παρέχει το λογισμικό OpenFoam να πραγματοποιείται η επίλυση παράλληλα σε περισσότερους του ενός επεξεργαστές. Εν προκειμένω το υπολογιστικό πλέγμα χωρίζεται σε 8 υποχωρία έτσι ώστε κάθε ένας από τους διαθέσιμους επεξεργαστές να επιλύει τη ροή στο χωρίο που του αντιστοιχεί. Μετά το τέλος αυτής της διαδικασίας γίνεται επανένωση των διαμερισμένων χωρίων του υπολογιστικού πλέγματος για τη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων και για την παραγωγή των απαραίτητων γραφημάτων. Η ρύθμιση αυτή εξοικονόμησε χρόνο καθώς ο αλγόριθμος έφτανε σε λύση περίπου στο 1/6 του αντίστοιχου χρόνου που θα πραγματοποιούσε εάν χρησιμοποιούσε ένα μόνο επεξεργαστή. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκτέλεσης όλων των βημάτων που έγιναν ώστε να ολοκληρωθεί μία αριθμητική επίλυση της ροής.

Όνομα κώδικα	Περιγραφή Διαδικασίας	Υπολογιστικός Χρόνος
blockMesh	Δημιουργία πλέγματος-βάσης	2 sec
SnappyHexMesh & SnapEdge	Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος πάνω και γύρω από το σώμα	15 min
decomposePar	Διαμερισμός του πλέγματος σε 8 υποχωρία προς επίλυση σε 8 επεξεργαστές	1 min
simpleFoam	Επίλυση της ροής (στους 8 επεξεργαστές) και υπολογισμός των συντελεστών άνωσης και αντίστασης.	6,5 h
reconstructPar	Επανένωση των 8 επιλυμένων μερών του πλέγματος	1 min

Πίνακας 3.4 Περιγραφή Διαδικασίας και χρονική διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου επίλυσης της ροής.

3.3 Επίλυση της ροής και συλλογή αποτελεσμάτων

Έχοντας πλέον δημιουργήσει το υπολογιστικό πλέγμα και θέσει τις απαραίτητες οριακές συνθήκες, το μόνο βήμα που πρέπει να εκτελεστεί πριν ξεκινήσει την επίλυση της ροής είναι να γίνει επιλογή του μοντέλου τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί. Τα προς επιλογή μοντέλα ήταν δύο, το Spalart Allmaras [7] (για υψηλούς αριθμούς Reynolds), που χρησιμοποιεί μία διαφορική εξίσωση μέσω της οποίας υπολογίζεται και χρησιμοποιείται μια μεταβλητή παρόμοια με τη κινηματική συνεκτικότητα που συνήθως συμβολίζεται ($\tilde{\nu}$) και το υψηλών αριθμών Reynolds $k-\omega$ SST (shear stress transport) (Παράρτημα Ε) [8],[16], το οποίο είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, ενός κλασικού $k-\omega$ κοντά στα στερεά τοιχώματα και του $k-\epsilon$ στην ελεύθερη ροή. Γνωρίζοντας ήδη από προηγούμενη εργασία [15] τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός, προτιμήθηκε το δεύτερο από τα δύο ($k-\omega$ SST), καθώς 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 [8] είναι για τα k και ω οι ακόλουθες:

- $k=0$
- $\omega = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 y^2}$

Αρχικά επιλύθηκε η ροή και υπολογίστηκαν οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης του Ahmed Body με γωνία του πίσω κεκλιμένου επιπέδου ίση με 25° και στη συνέχεια για γωνία 35° . Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα ώστε να επαληθευτεί εάν το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε είναι αρκετά αξιόπιστο. Αφού διαπιστωθεί η αξιοπιστία τους, τα αποτελέσματα αυτά θα χρησιμοποιηθούν, στη συνέχεια, ως μέτρο σύγκρισης προκειμένου να φανούν οι αλλαγές που επιφέρει η τοποθέτηση αεροτομής (spoiler) στο Ahmed Body. Η αξιοπιστία του πλέγματος επαληθεύτηκε αρχικά με την εύρυθμη λειτουργία και εκτέλεση του κώδικα, με τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση της ροής καθώς και με τη σύγκρισή τους με τα πειραματικά δεδομένα (Πίνακας 3.3). Επίσης καταγράφηκαν οι τιμές του $\gamma+$ που προκύπτουν τόσο στην επιφάνεια του οχήματος όσο και του εδάφους, αφού έχουν άμεση σχέση με το πάχος των πρώτων στρωμάτων κελιών του πλέγματος τα οποία βρίσκονται σε επαφή με τις παραπάνω επιφάνειες αντίστοιχα.

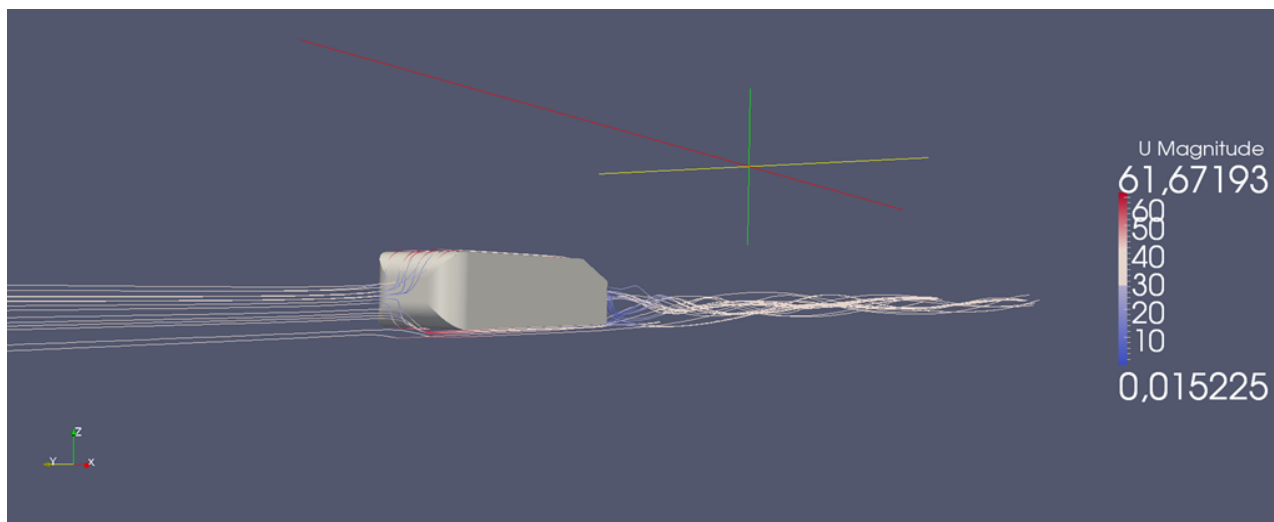
Ο simpleFoam υπολογίζει τα κινηματικά χαρακτηριστικά της ροής (ταχύτητα και πίεση) αλλά και τις μεταβλητές του μοντέλου τύρβης, συγκεκριμένα το $k-\omega$, σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας επίλυσης της ροής. Τον αριθμό των επαναλήψεων το επιλέγει ο χρήστης μέσω ενός αρχείου ελέγχου που ονομάζεται controlDict. Στο συγκεκριμένο αρχείο προστέθηκαν κάποιες βιβλιοθήκες οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίζονται ανά επανάληψη οι τιμές των συντελεστών αντίστασης και άνωσης καθώς επίσης και οι αντίστοιχες δυνάμεις (οπισθέλκουσας και άνωσης) (Παράρτημα Δ).

Πρώτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για το Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου (slant) 25° (Ahmed25) και έπειτα αυτά για γωνία 35° (Ahmed35).

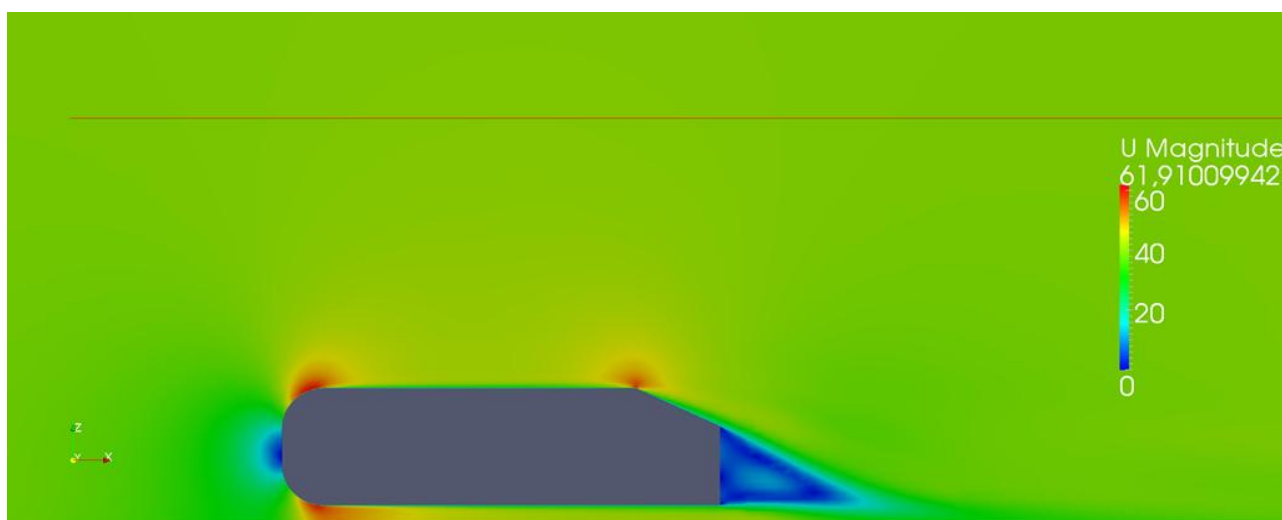
Συνομογραφία	Γωνία slant σε μοίρες	Πειραματικές Μετρήσεις	Αριθμητικές Προλέξεις
Ahmed25	25	0.275	0.273
Ahmed35	35	0.26	0.297

Πίνακας 3.3 Αριθμητικά και Πειραματικά αποτελέσματα του συντελεστή οπισθέλκουσας για διάφορες γωνίες slant.

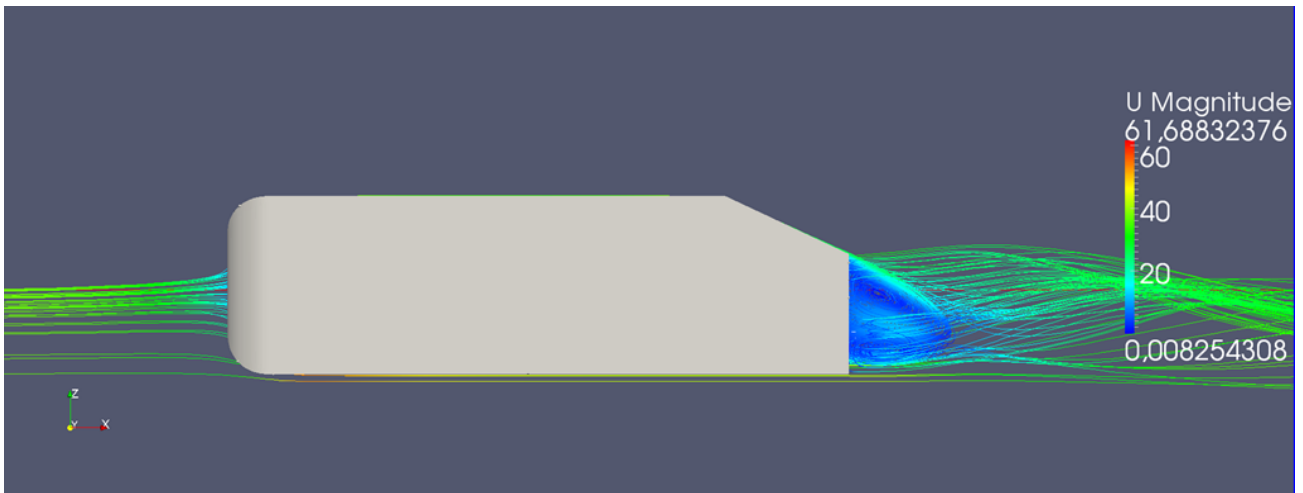
3.3.1 Πρώτη Μελετούμενη Περίπτωση: Ahmed25



Σχ. 3.3 Ahmed25: Γραμμές ροής, ταχύτητα σε m/sec.

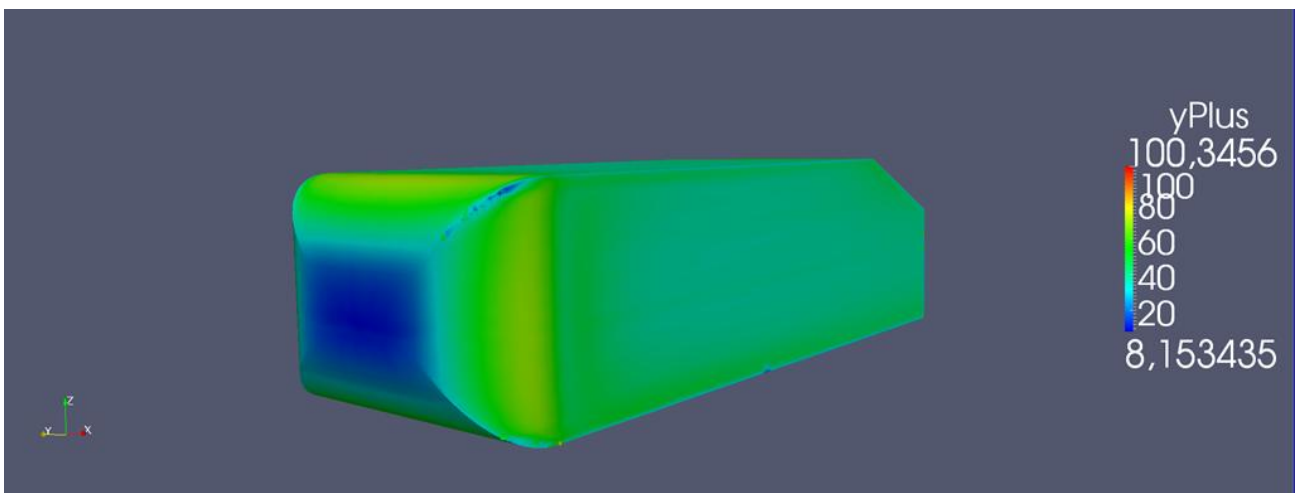


Σχ 3.4 Ahmed25: Κατανομή της ταχύτητας σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας (Ahmed Body)

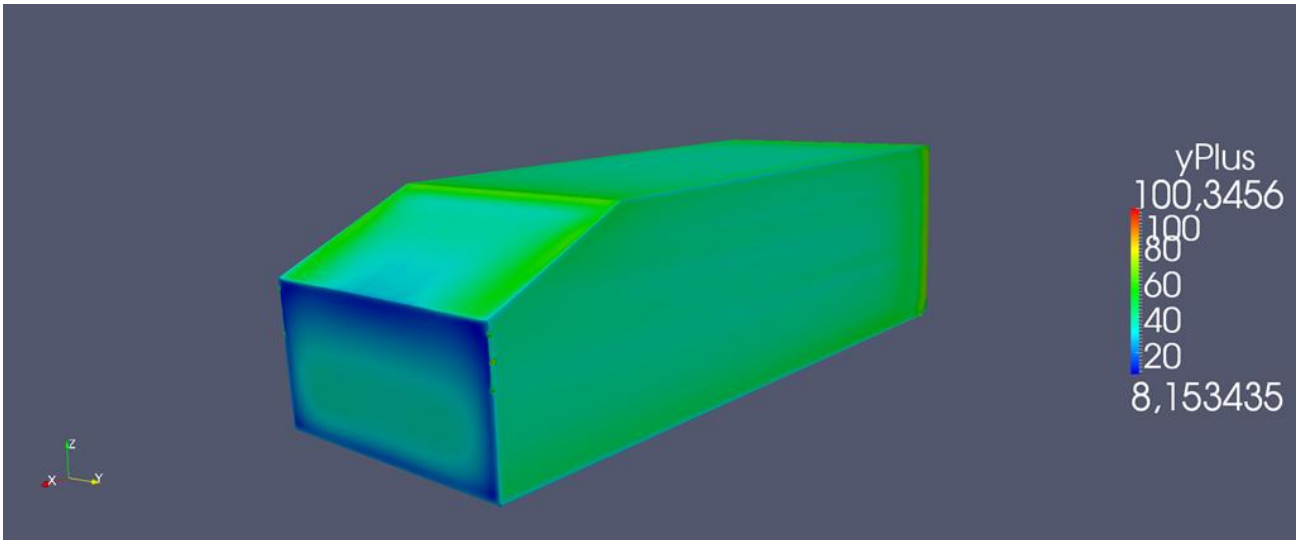


Σχ 3.5 Ahmed25: Γραμμές ροής στο πίσω μέρος του οχήματος. Έντονη ανακυκλοφορία της ροής.

Στο σχήμα 3.3 φαίνονται οι γραμμές ροής γύρω από το σώμα (Ahmed Body), ενώ στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας ως προς τον άξονα συμμετρίας του οχήματος (y') όπου η χαμηλότερη τιμή της παρατηρείται στην περιοχή στην οποία υπάρχει έντονη ανακυκλοφορία της ροής (σχήμα 3.5). Επόμενο βήμα ήταν ο έλεγχος των τιμών της αδιάστατης απόστασης από τον τοίχο y^+ (σχήματα 3.6 & 3.7). Οι τιμές που παρατηρούνται βρίσκονται εντός των ορίων, 8 – 100, γεγονός που δείχνει ότι οι διαστρωματώσεις των κελιών πάνω στις επιφάνειες των σωμάτων έχουν καλό πάχος για την ομαλή λειτουργία του μοντέλου τύρβης ($k-\omega$ SST) με συναρτήσεις τοίχου.

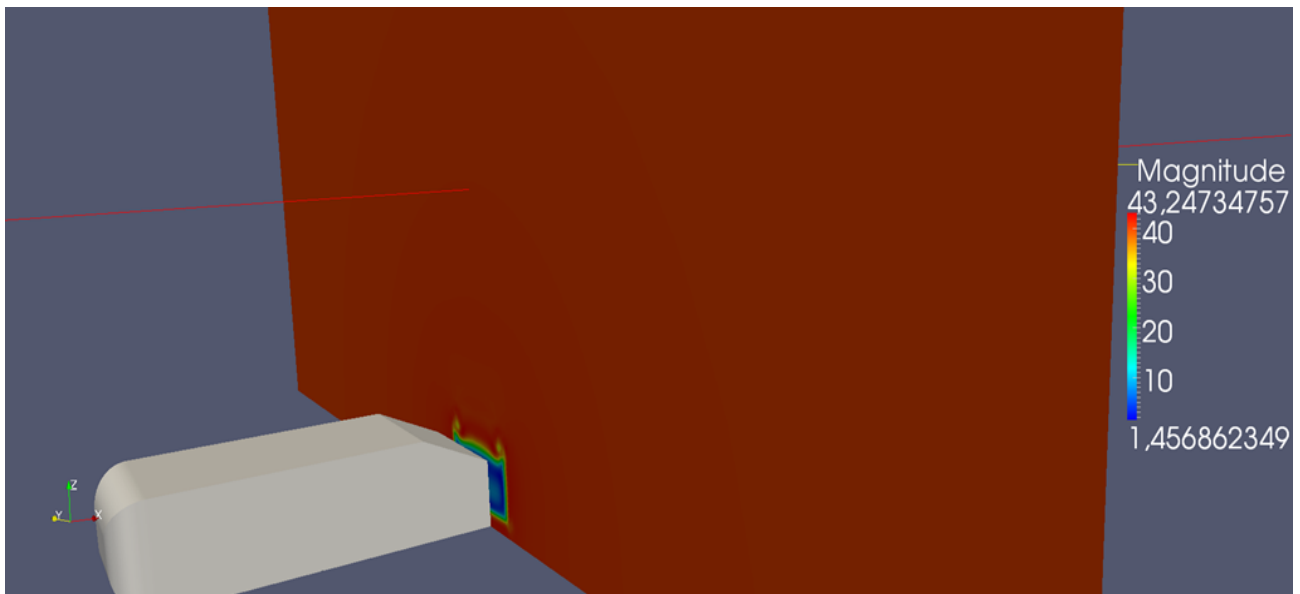


Σχ 3.6 Ahmed25: Οι τιμές y^+ στην επιφάνεια του.

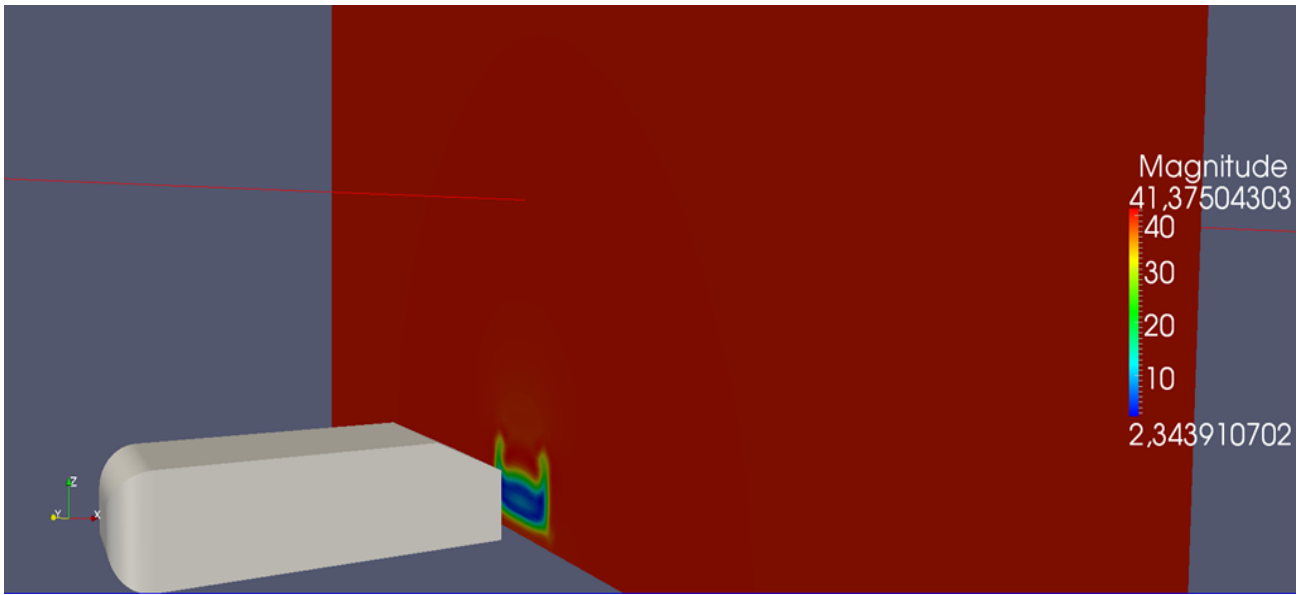


Σχ 3.7 Ahmed25: Οι τιμές y^+ στην επιφάνεια το, πίσω όψη.

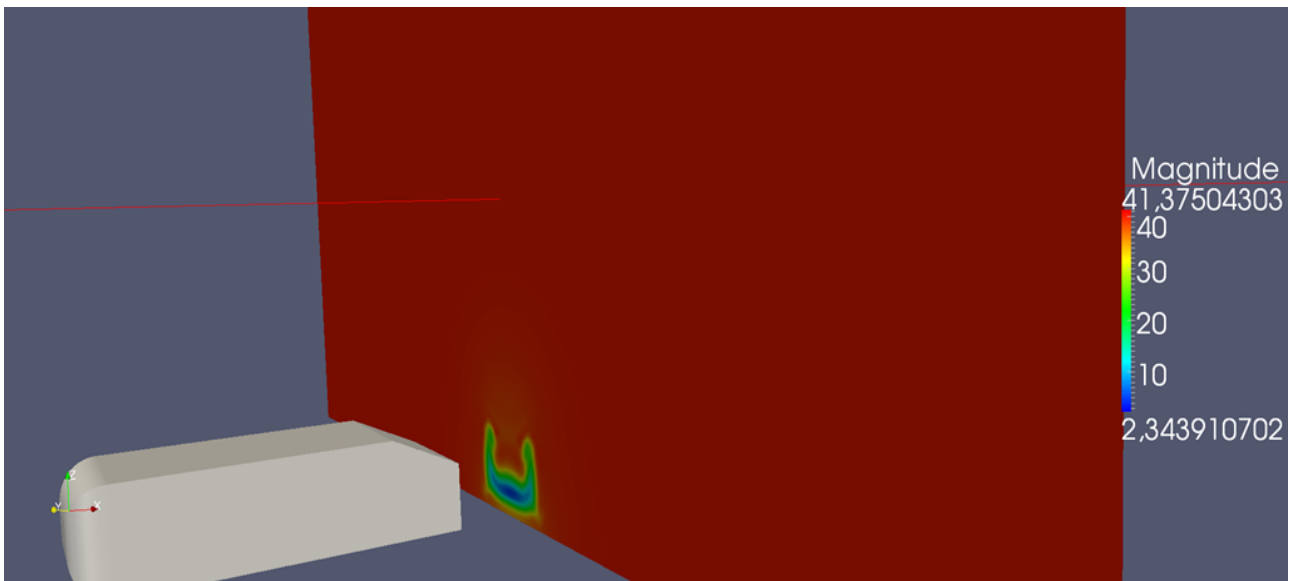
Στα σχήματα 3.8 έως 3.11 παρατηρούνται εύκολα οι περιοχές ανακυκλοφορίας στο πίσω μέρος του οχήματος καθώς επίσης και οι χαρακτηριστικοί στρόβιλοι του ομόρρου του. Οι τομές είναι σε διάφορες αποστάσεις (από 10 έως και 40 cm) από το πίσω μέρος του Ahmed Body έτσι ώστε να γίνεται αντιληπτός ο ρυθμός εξασθένισης του φαινομένου.



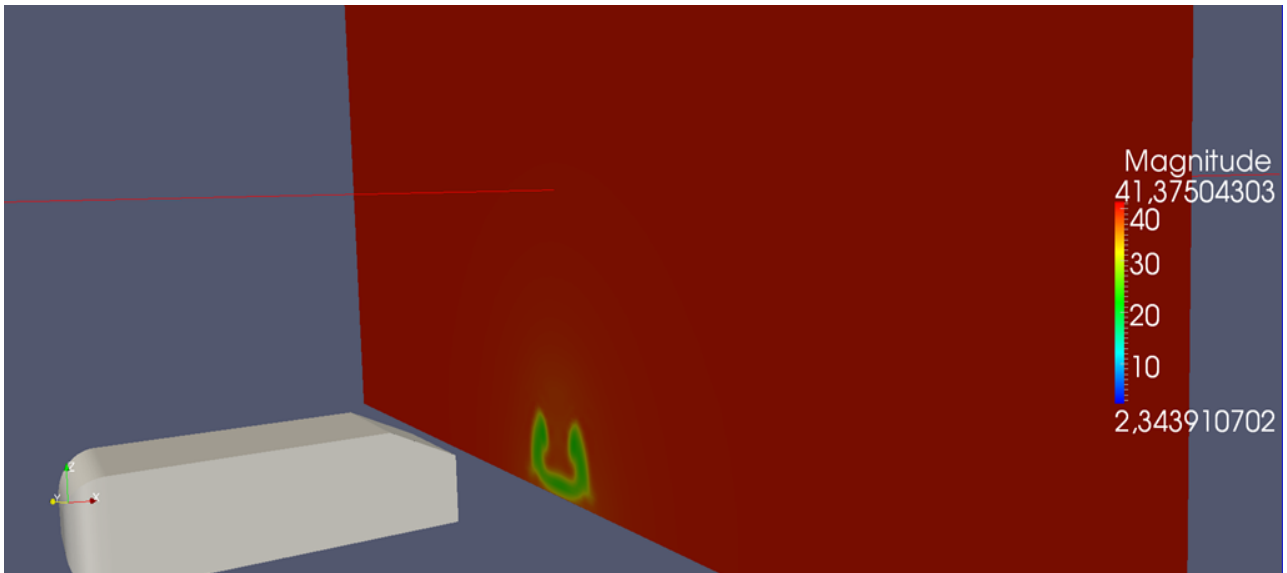
Σχ 3.8 Ahmed25: Ίχνος των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα $x'x$.



Σχ 3.9 Ahmed25: Ίχνος των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.

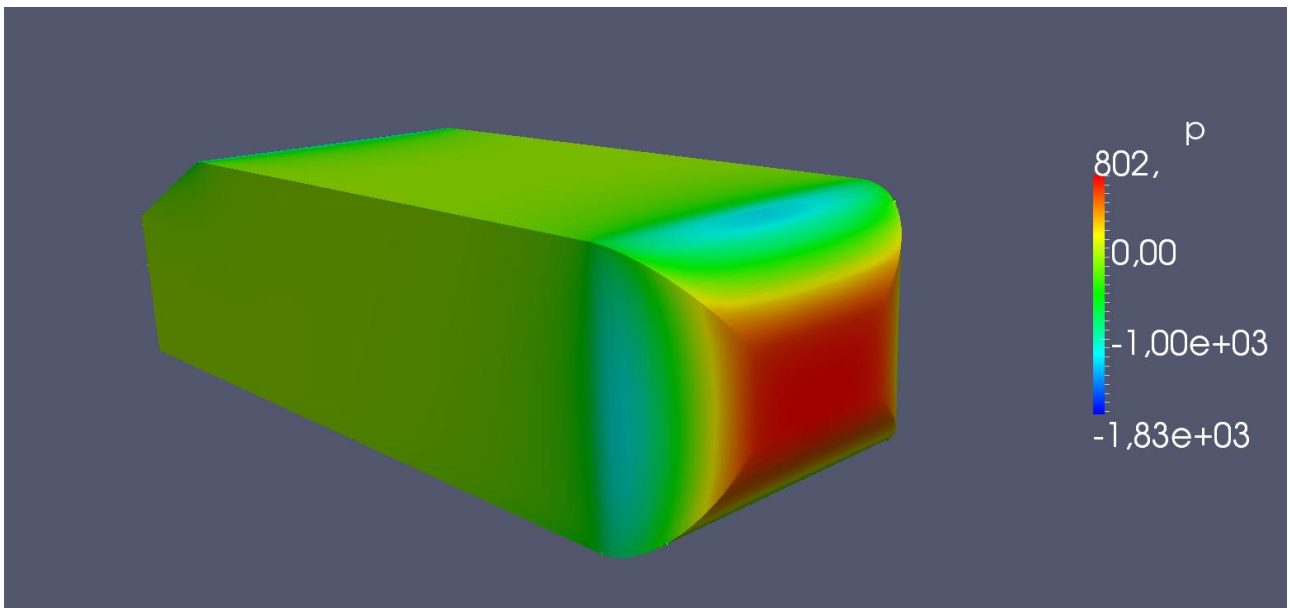


Σχ 3.10 Ahmed25: Ίχνος των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.

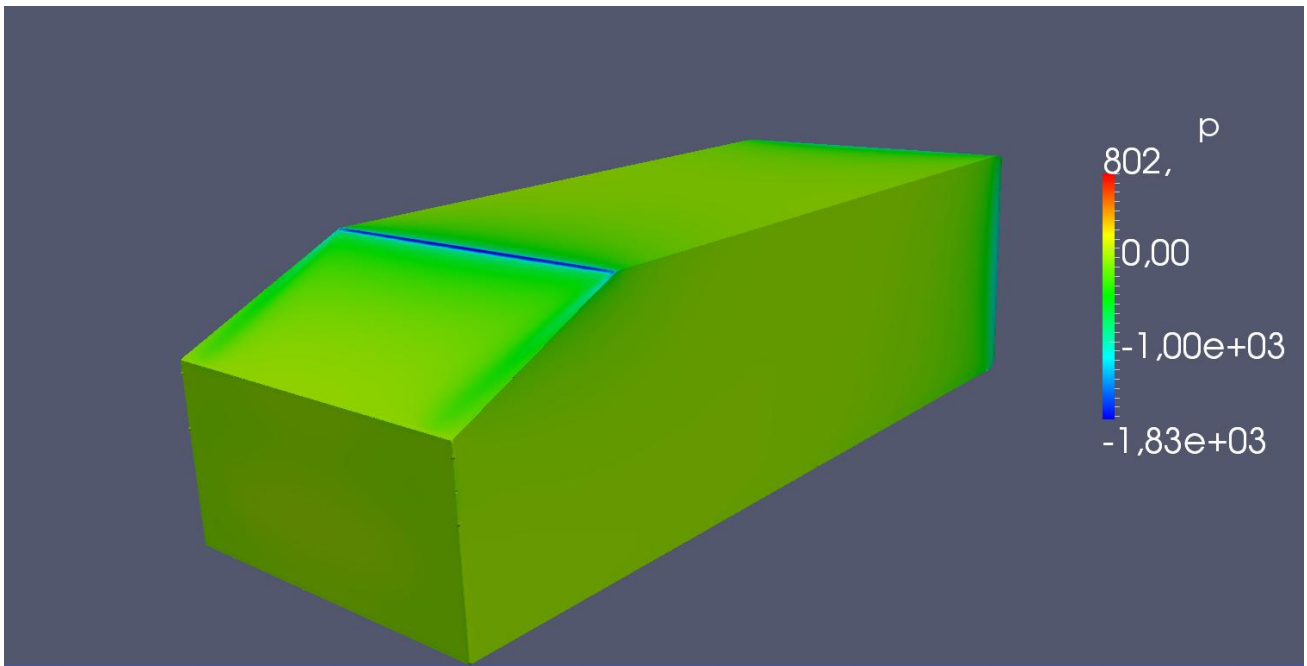


Σχ 3.11 Ahmed25: Ίχνος των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.

Τέλος, στα σχήματα 3.12 και 3.13 φαίνεται η κατανομή της πίεσης πάνω στην επιφάνεια του σώματος. Οι μικρότερες τιμές τις εμφανίζονται στο σημείο όπου παρατηρείται και η υψηλότερη ταχύτητα, δηλαδή στις μπροστά καμπύλες επιφάνειες και στην αρχή του πίσω κεκλιμένου επιπέδου.

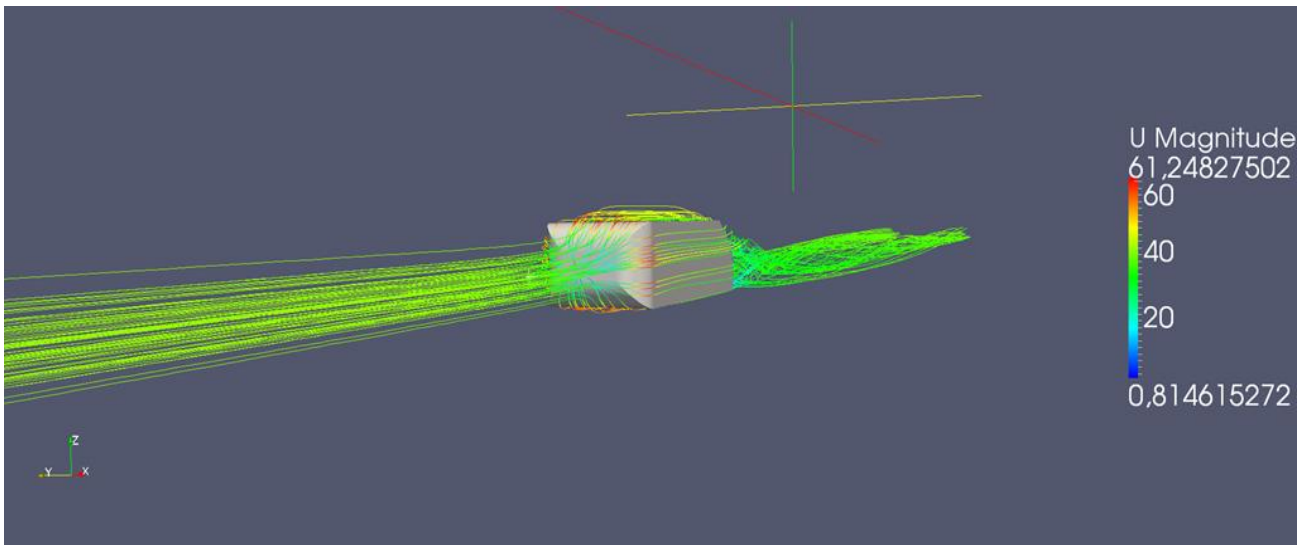


Σχ 3.12 Ahmed25: Κατανομή πίεσης στην επιφάνειά του, εμπρός όψη.

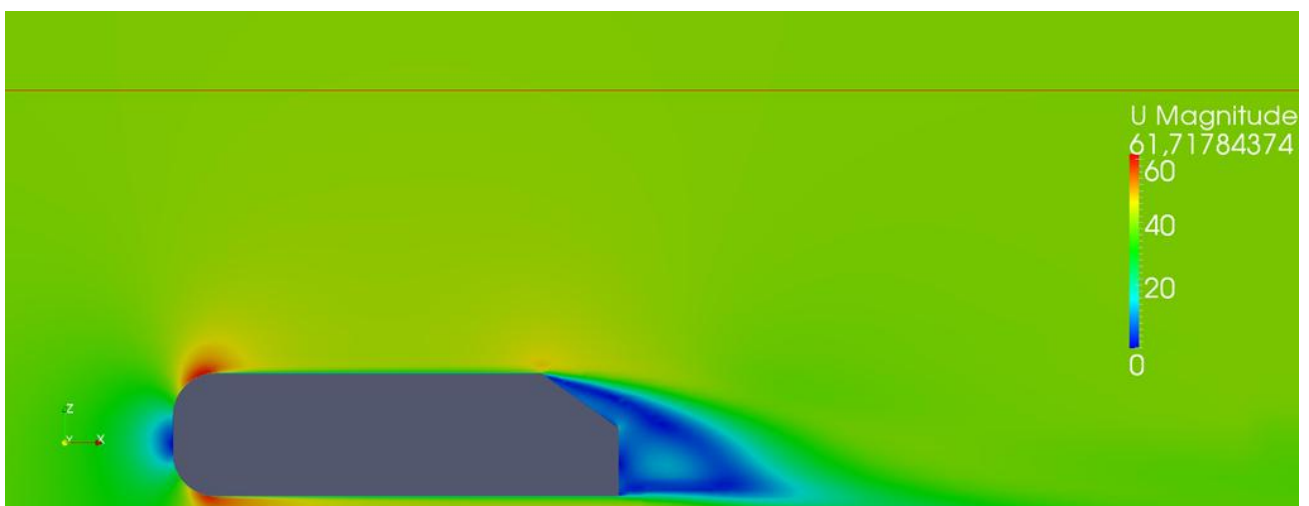


Σχ 3.13 Ahmed25: Κατανομή πίεσης στην επιφάνειά του, πίσω όψη .

3.3.2 Δεύτερη Μελετούμενη Περίπτωση: Ahmed35

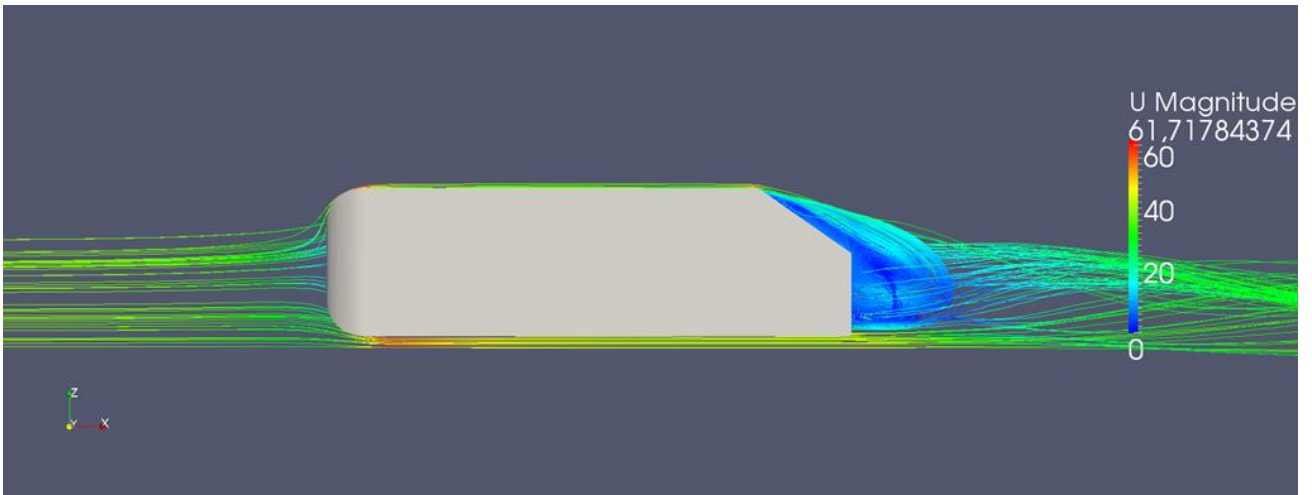


Σχ. 3.14 Ahmed35: Γραμμές ροής, ταχύτητα σε m/sec.

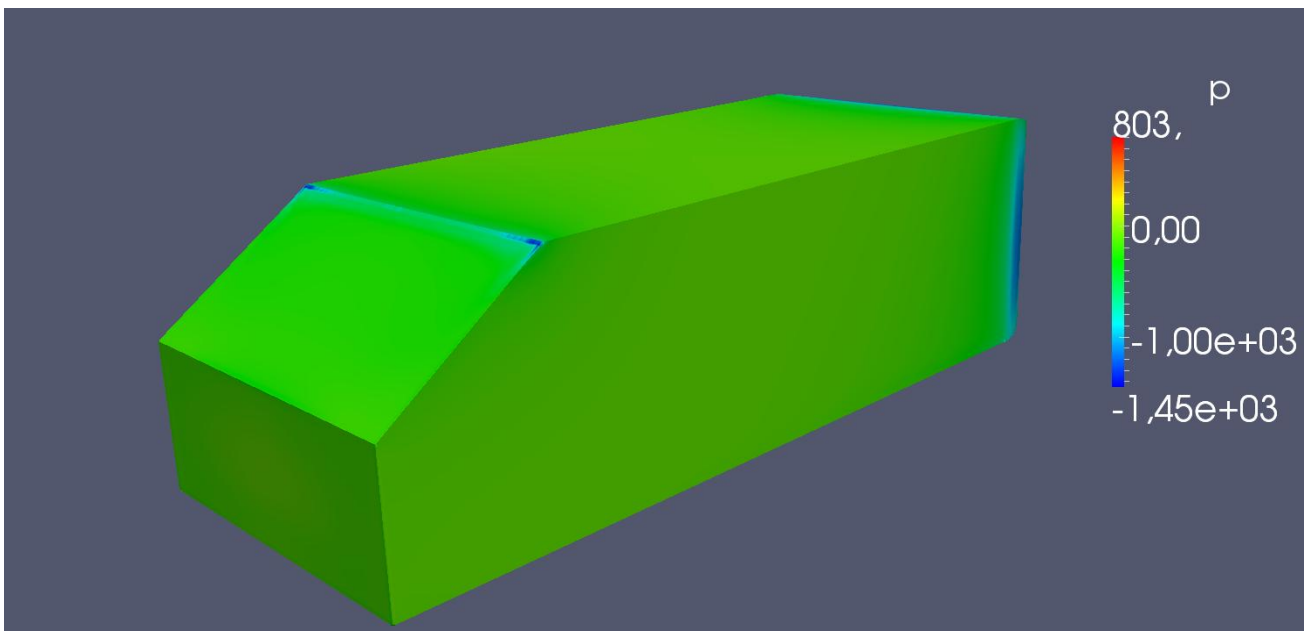


Σχ 3.15 Ahmed35: Κατανομή της ταχύτητας σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας (Ahmed Body).

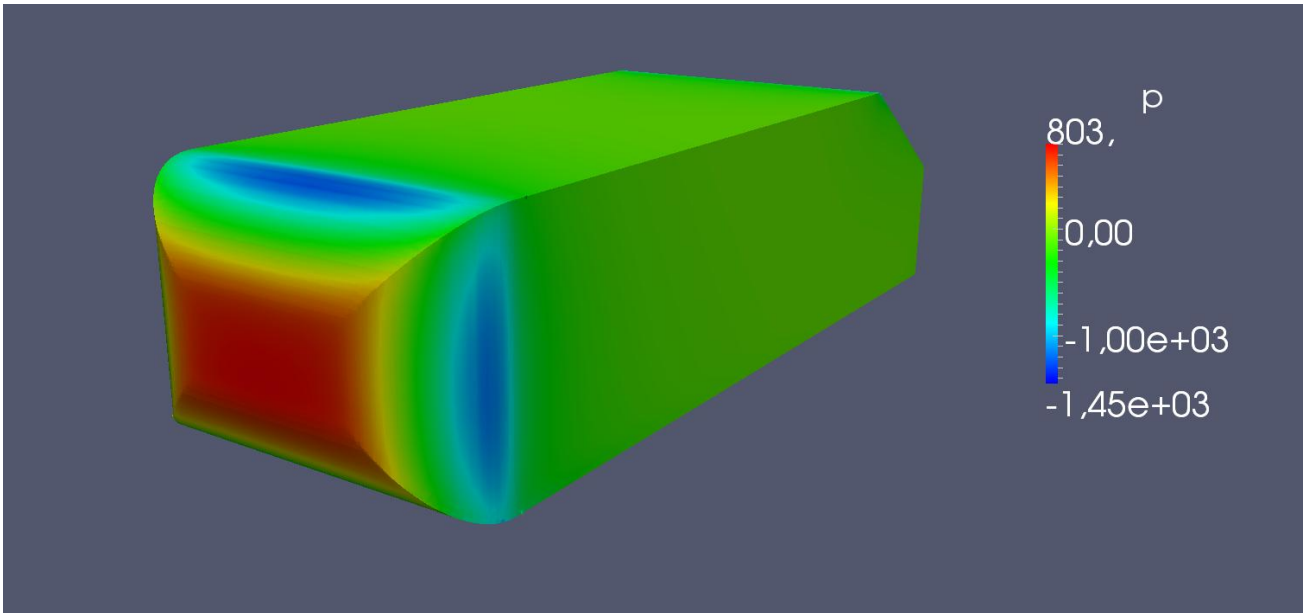
Αυτό που μπορεί να παρατηρήσει κανείς είναι ότι στο όχημα με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 35 μοιρών τα φαινόμενα αποκόλλησης και ανακυκλοφορίας της ροής είναι πολύ πιο έντονα σε σχέση με τα αντίστοιχα που παρατηρούνται στο Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25° (σχήματα 3.4 & 3.15).



Σχ 3.16 Ahmed35: Γραμμές ροής στο πίσω μέρος του οχήματος. Έντονη ανακυκλοφορία της ροής.

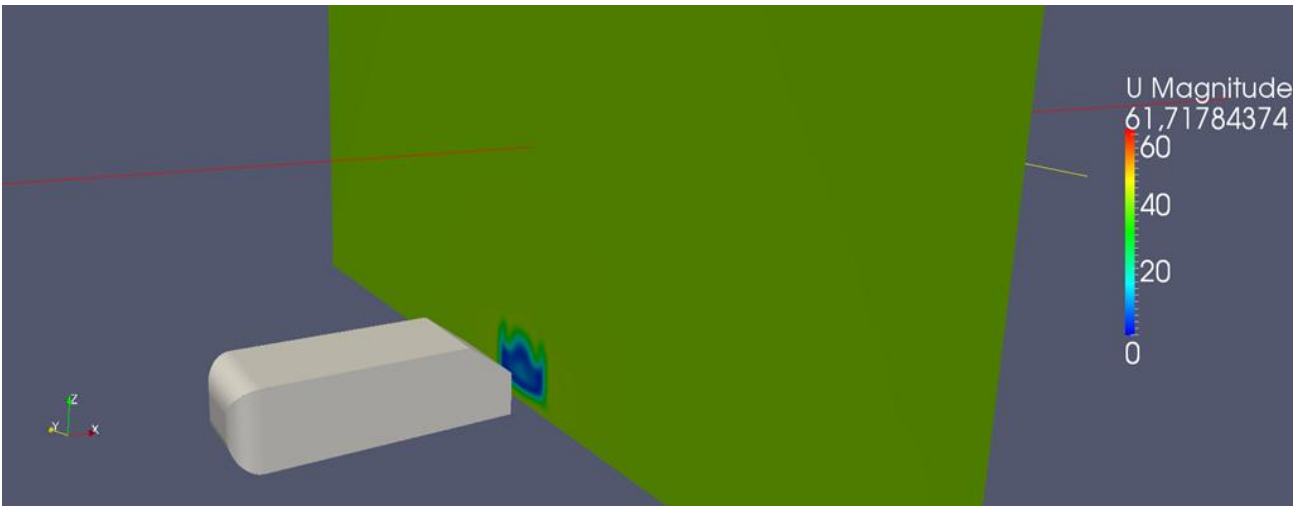


Σχ 3.17 Ahmed35: Κατανομή πίεσης στην επιφάνειά του, πίσω όψη.

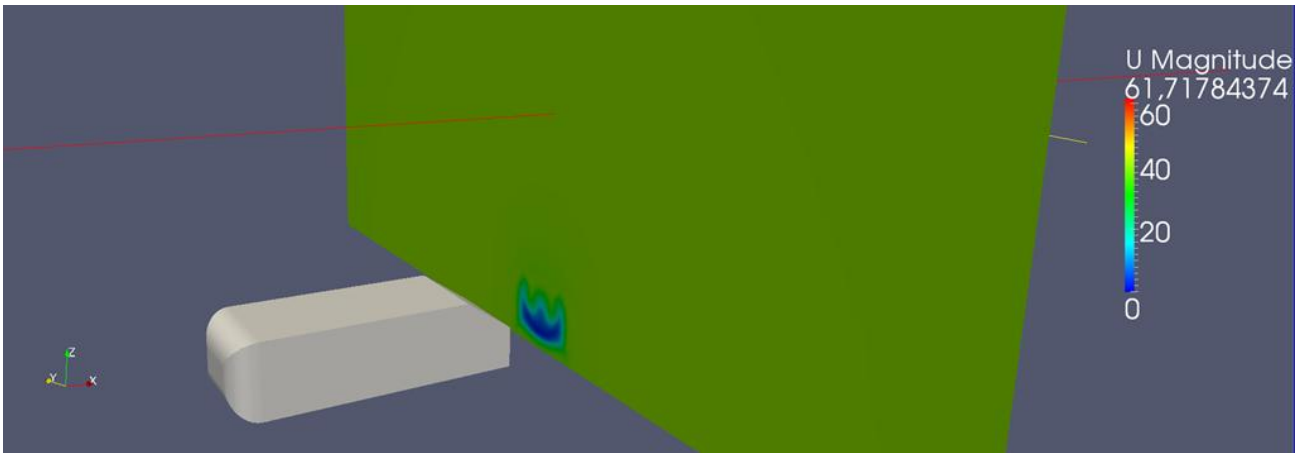


3.18 Ahmed35: Κατανομή πίεσης στην επιφάνειά του, εμπρός όψη.

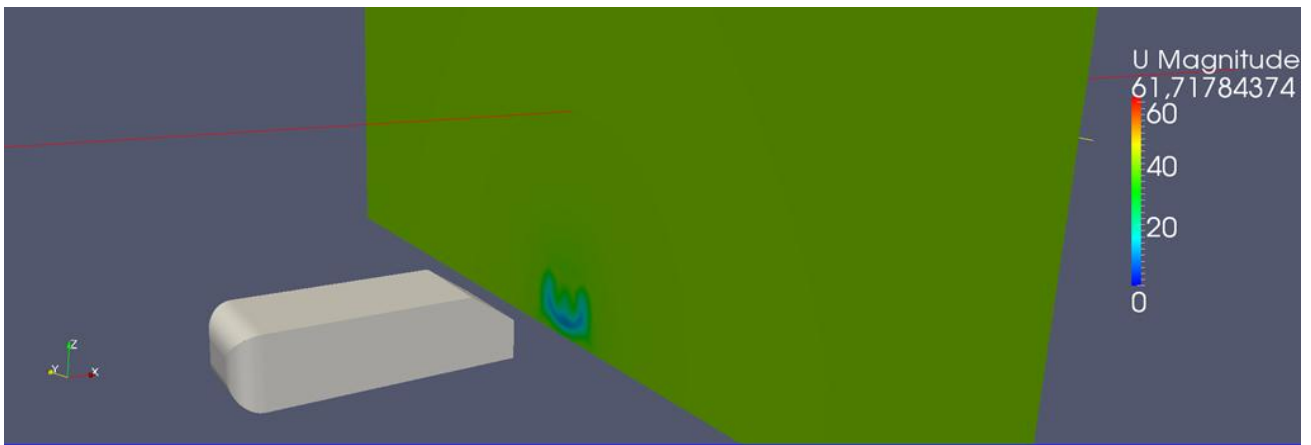
Στα σχήματα 3.19 έως 3.22 φαίνονται σε τομή οι στρόβιλοι του ομόρρου καθώς και ο ρυθμός εξασθένισης τους, ενώ στα σχήματα 3.17 & 3.18 παρατηρείται η κατανομή πίεσης πάνω στο απλοποιημένο μοντέλο του αυτοκινήτου. Τέλος η ανακυκλοφορία της ροής είναι αρκετά έντονη (σχήμα 3.16) και βλέπουμε ότι το φαινόμενο αυτό ξεκινά σχεδόν από την αρχή του πίσω κεκλιμένου επιπέδου.



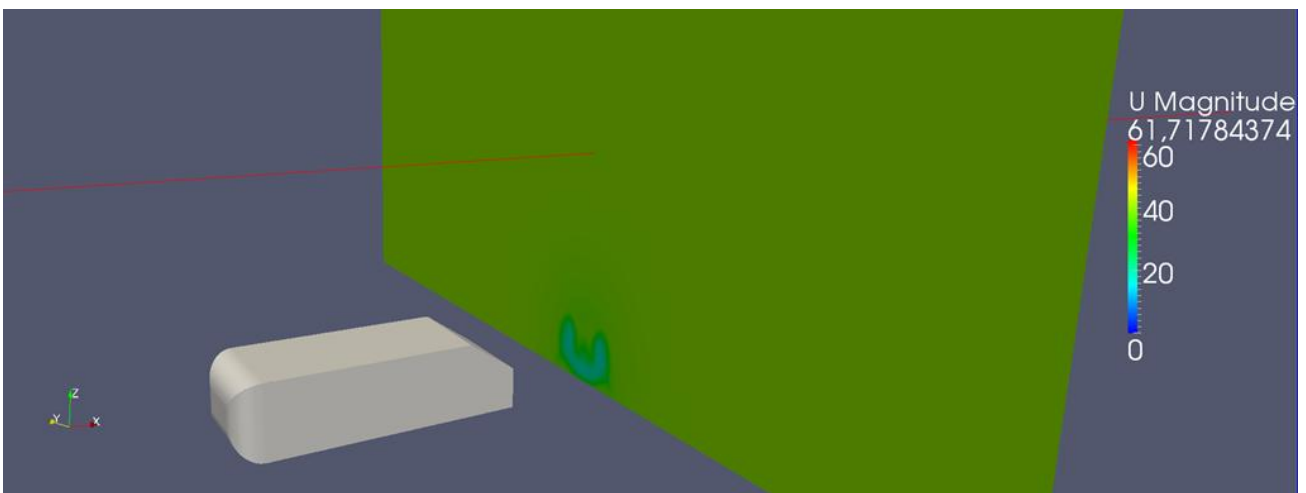
Σχ 3.19 Ίχνη των στρόβιλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.



Σχ 3.20 Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.



Σχ 3.21 Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.



Σχ 3.22 Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου σε τομές κατά τον άξονα x'x.

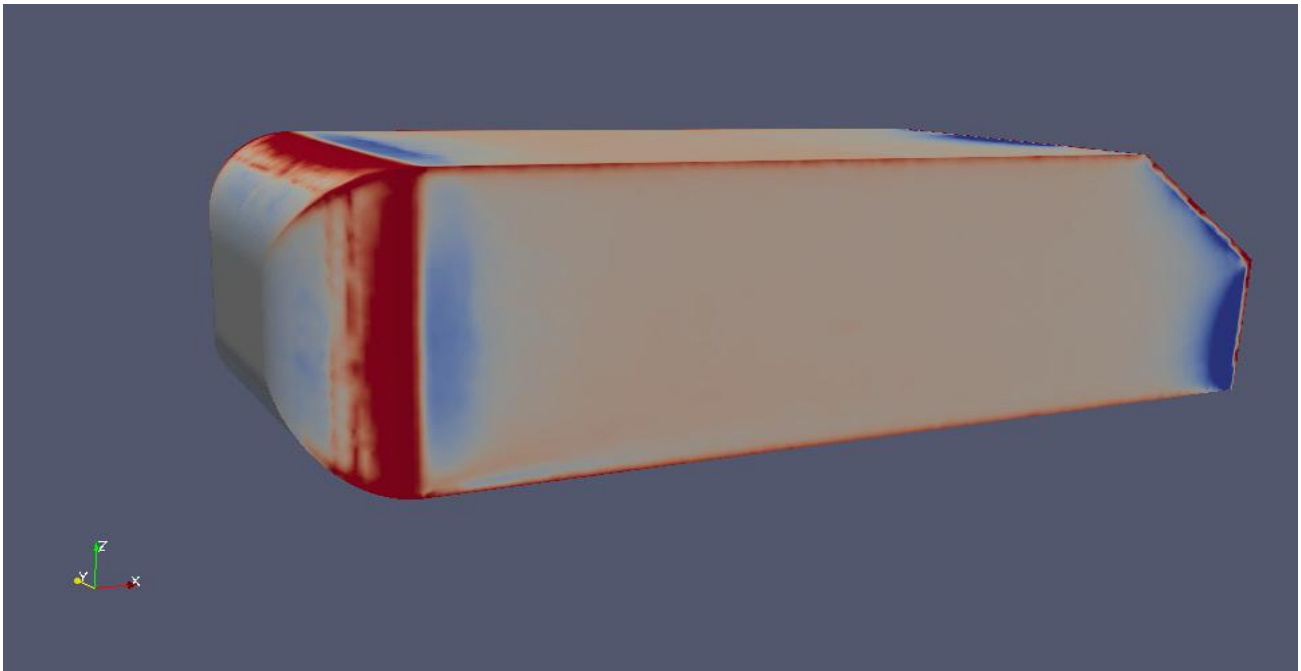
4. Βελτίωση της ροής με χρήση αεροτομής (Spoiler)

4.1 Δημιουργία και τοποθέτηση δύο διαφορετικών ειδών αεροτομής

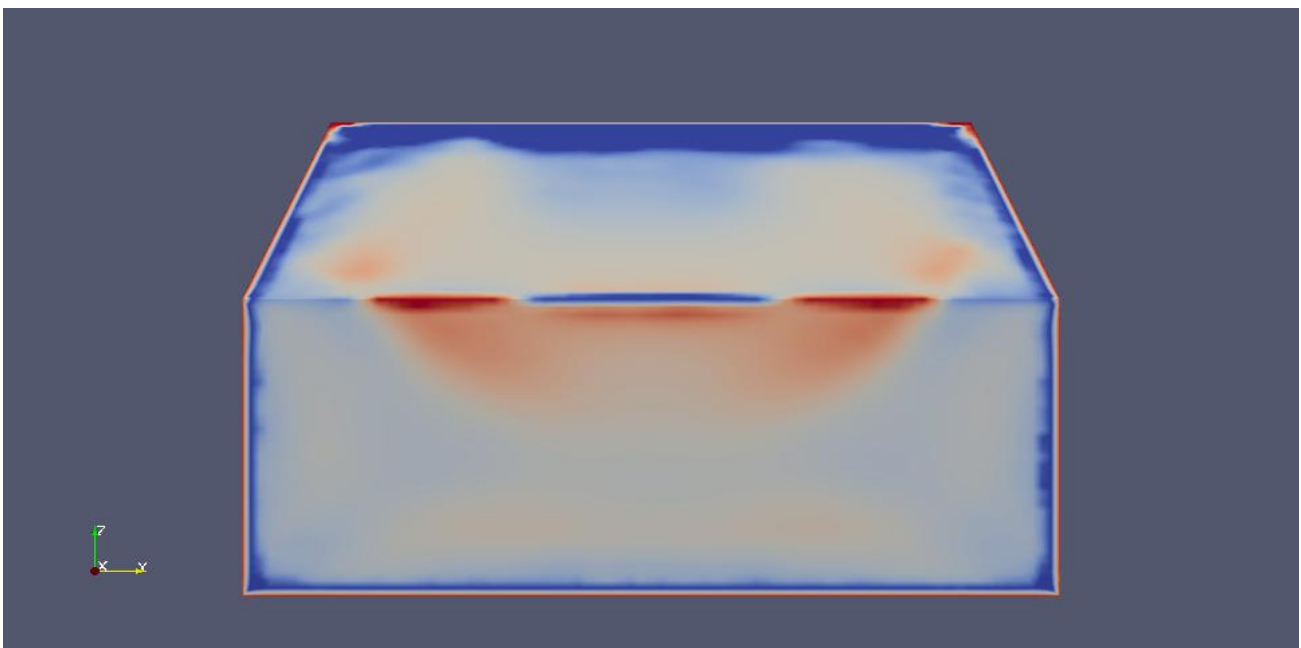
Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί η επίδραση αεροτομής (Spoiler) στην αεροδυναμική συμπεριφορά του Ahmed Body. Πρακτικά αυτό σημαίνει να παρατηρηθεί αφενός μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας και αφετέρου αύξηση της πρόσφυσης του αυτοκινήτου, δηλαδή μείωση της άνωσης.

Για την επίτευξη αυτού δημιουργήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές περιοχές του οχήματος δύο διαφορετικοί τύποι αεροτομών. Οι περιοχές αυτές έχουν προσδιοριστεί με τη χρήση λογισμικού επίλυσης των συνεχών συζυγών εξισώσεων [19],[20],[21],[22] που έχει αναπτυχθεί από τη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ). Το λογισμικό υπολογίζει τις παραγώγους ευαισθησίας συναρτησιακών που εκφράζουν ποιότητα αεροδυναμικής συμπεριφοράς μιας αεροδυναμικής μορφής (σ.σ. Ahmed body) ως προς κάθε ένα σημείο της επιφάνειας του σώματος (χάρτης παραγώγων ευαισθησίας, sensitivity map [22]). Συγκεκριμένα το κριτήριο επιλογής των περιοχών, είναι οι παράγωγοι ευαισθησίας να εμφανίζουν εκεί υψηλές κατά απόλυτη τιμή τιμές. Στις εικόνες 4.1 έως και 4.4 παρατίθεται ο χάρτης ευαισθησίας για το Ahmed Body. Τα θερμά χρώματα υποδηλώνουν ότι μια μετατόπιση της επιφάνειας του Ahmed Body στη συγκεκριμένη θέση κατά το κάθετο προς τα μέσα διάνυσμα οδηγεί σε μείωση της δύναμης αντίστασης, ενώ οι ψυχρές αποχρώσεις δηλώνουν το αντίθετο.

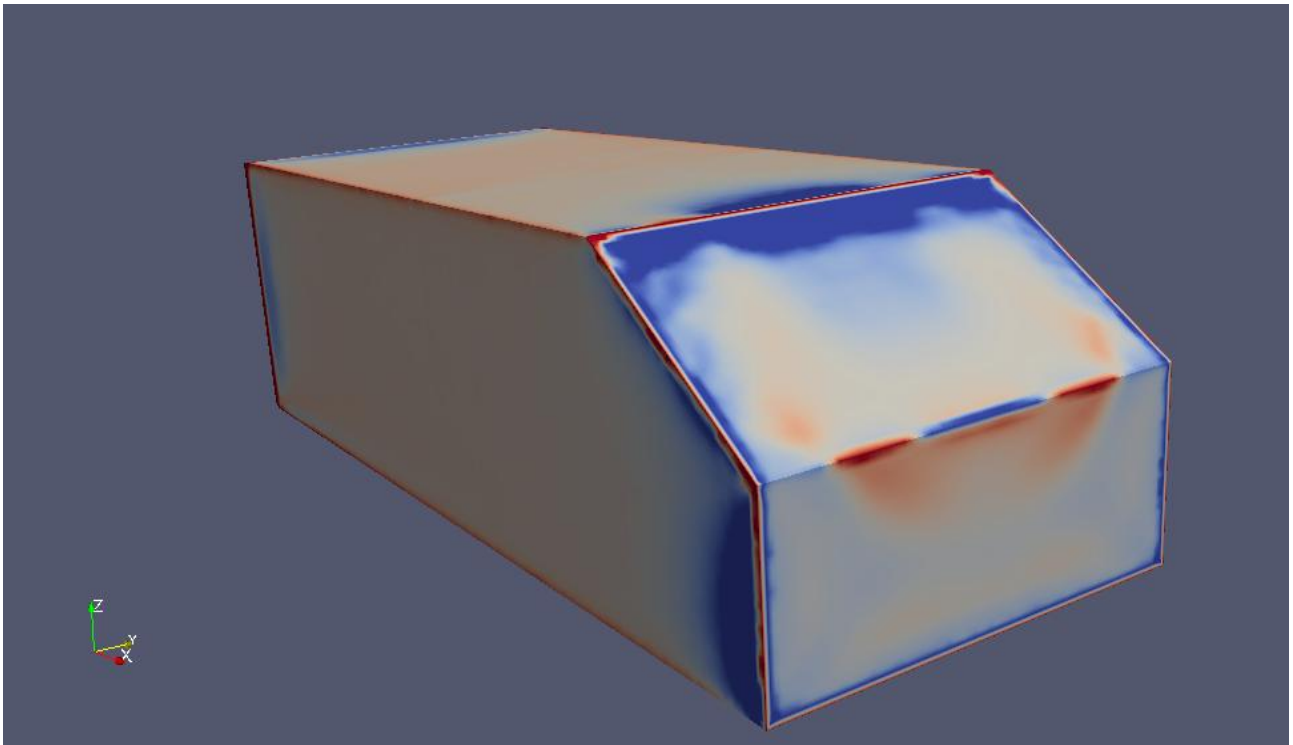
Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία αυτή δεν αποτελεί βελτιστοποίηση, δηλαδή εντοπισμός καθολικού βέλτιστου, αλλά διαδικασία βελτίωσης της ροής καθώς σε αντίθετη περίπτωση το υπολογιστικό κόστος θα ήταν πολύ μεγάλο. Προτιμήθηκε λοιπόν η δημιουργία αεροτομών με διαφορετική γωνία κλίσης (ϕ) (Σχ. 4.1α & 4.1β) και η τοποθέτηση τους τόσο στο Ahmed Body με γωνία κεκλιμένου επιπέδου 25° , Ahmed25, όσο και γωνία 35° , Ahmed35. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης μια καλής λύσης μέσα από δοκιμές, αλλά και καλύτερης κατανόησης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του σώματος ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Στο Ahmed25 η αεροτομή τοποθετήθηκε κοντά στο τέλος του πίσω κεκλιμένου επιπέδου, ενώ στο Ahmed35 η τοποθέτηση έγινε στο τέλος του ουρανού του οχήματος, στην ακμή δηλαδή όπου ενώνονται το κεκλιμένο με το πάνω επίπεδο (Σχ. 4.2α & 4.2β). Ο σχεδιασμός των δύο τύπων αεροτομών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πρόγραμμα CAD. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4.1 δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αεροτομές για κάθε τύπο οχήματος.



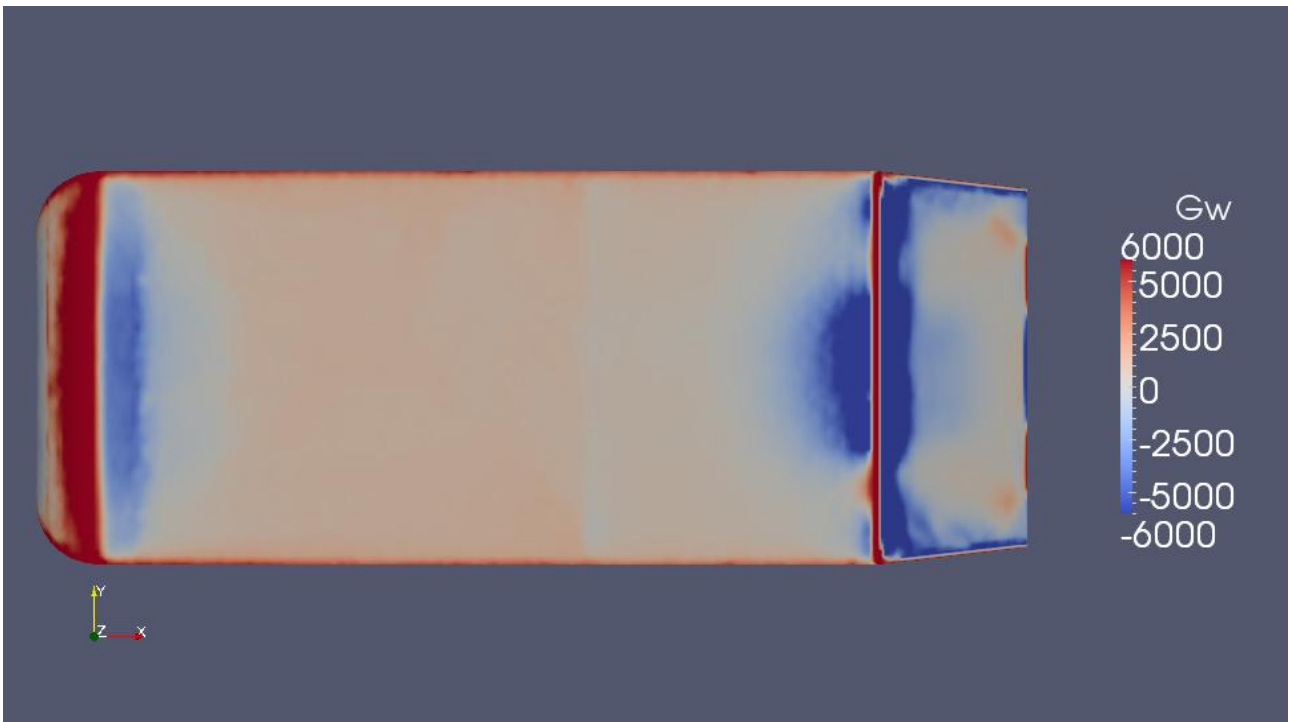
Εικόνα 4.1 Χάρτης ευαισθησίας παραγώγων Ahmed Body, εμπρός αριστερή όψη.



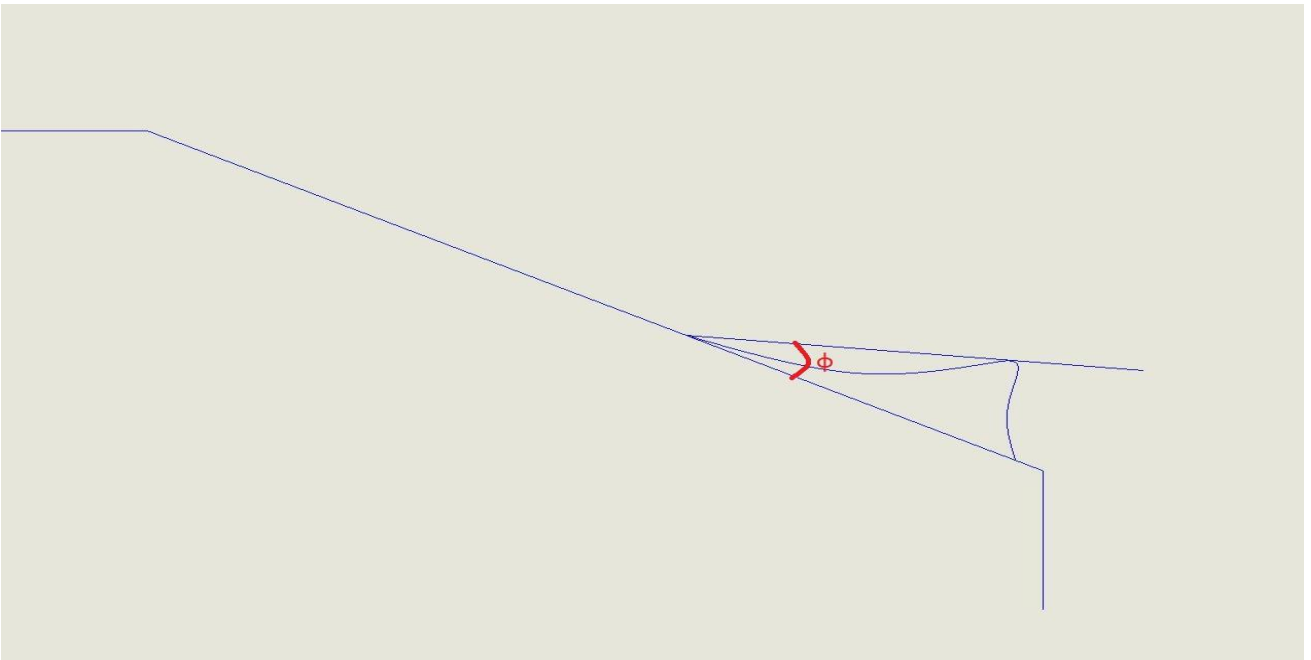
Εικόνα 4.2 Χάρτης ευαισθησίας παραγώγων Ahmed Body, πίσω όψη.



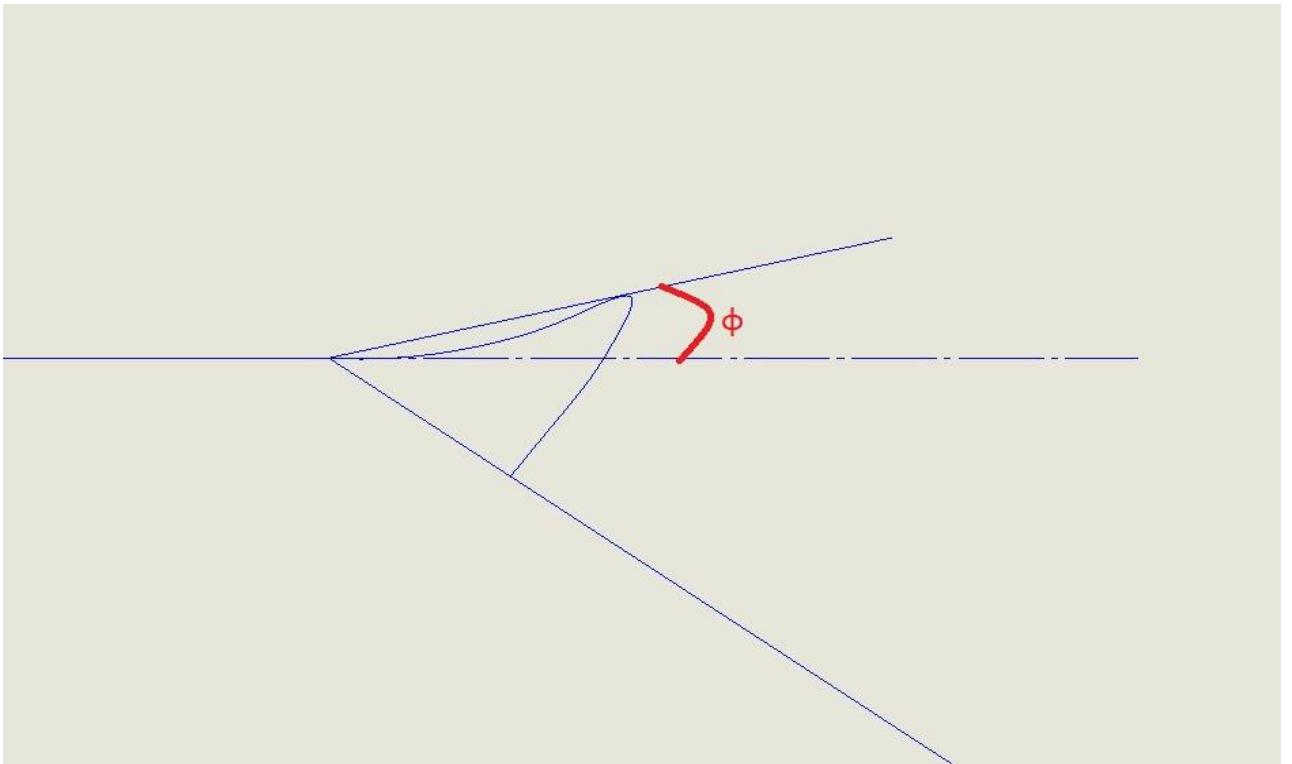
Εικόνα 4.3 Χάρτης ευαισθησίας παραγώγων Ahmed Body, πίσω αριστερή όψη.



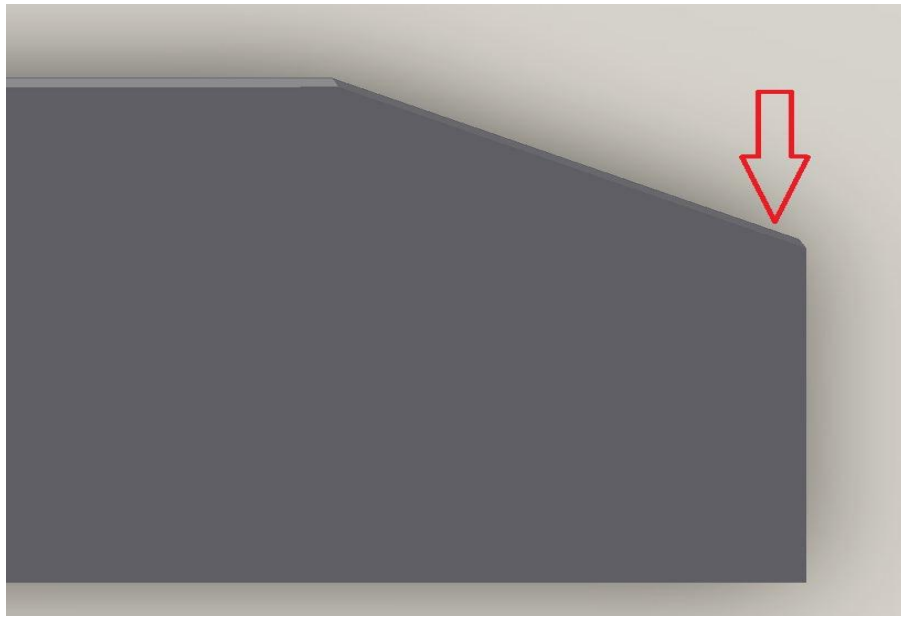
Εικόνα 4.4 Χάρτης ευαισθησίας παραγώγων Ahmed Body, κάτοψη.



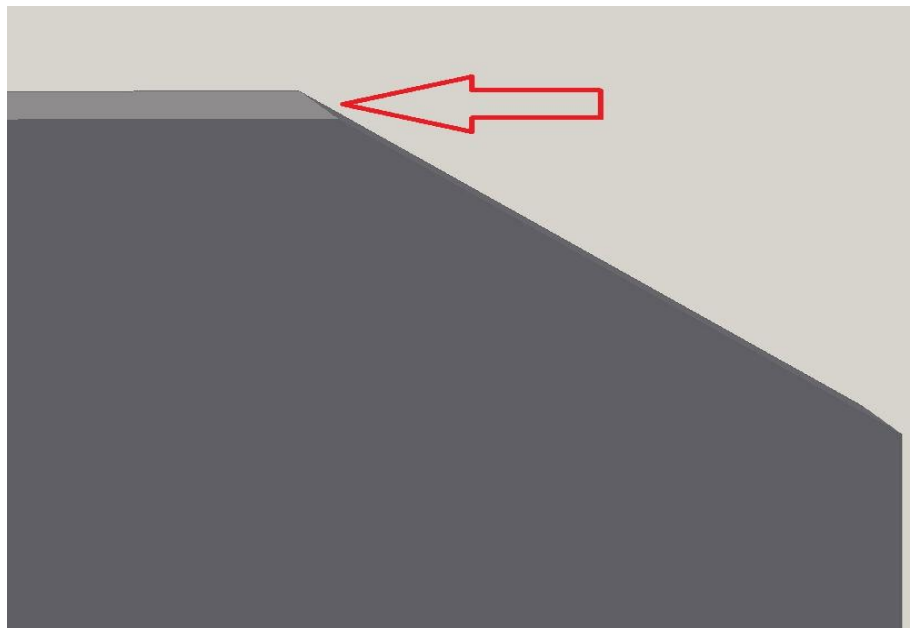
Σχ. 4 .1α Γωνία κλίσης αεροτομής, γωνία ϕ (Ahmed 25)



Σχ. 4 .1b Γωνία κλίση αεροτομής, γωνία ϕ (Ahmed 35).



Σχ. 4.2α Σημείο όπου τοποθετήθηκε η αεροτομή στο Ahmed 25.



Σχ. 4.2β Σημείο όπου τοποθετήθηκε η αεροτομή στο Ahmed 35.

Γωνία κλίσης αεροτομής ϕ σε μοίρες

ϕ	0	10	15	20	27
Ahmed 25 Rear Spoiler	-	✓	✓	✓	✓
Ahmed 35 Roof Spoiler	✓	✓	✓	✓	-

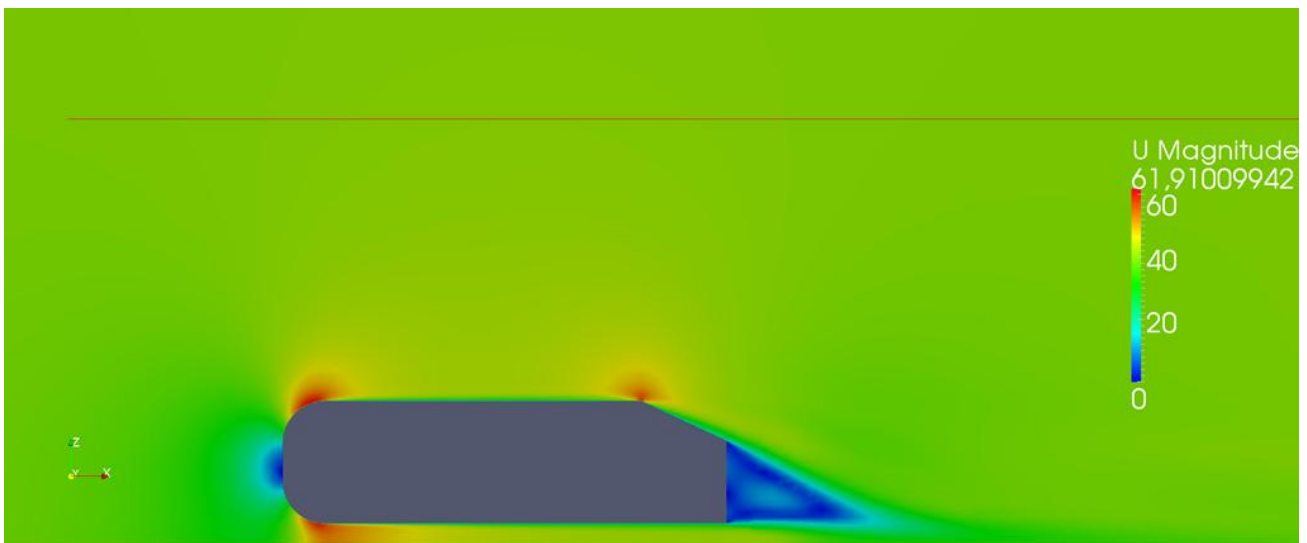
Πίνακας 4.1 Περιπτώσεις που μελετήθηκαν στη παρούσα διπλωματική.

4.2 Δημιουργία πλέγματος και επίλυση της ροής

Προκειμένου να επιλυθεί η ροή γύρω από το μοντέλο αυτοκινήτου το οποίο φέρει και την εκάστοτε αεροτομή έπρεπε να δημιουργηθεί το κατάλληλο πλέγμα. Για κάθε μία περίπτωση δημιουργείται εξαρχής το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα. Όπως και στην επίλυση της ροής χωρίς αεροτομή έτσι και τώρα το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το OpenFoam (SnappyHexMesh και SnapEdge). Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν ώστε να προσαρμοστεί το υπολογιστικό πλέγμα σε κάθε διαφορετική περίπτωση περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια για κάθε αεροτομή ξεχωριστά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της θέσης των αεροτομών έγινε έπειτα από αρκετές δοκιμές, οι οποίες δεν θα παρουσιαστούν στη παρούσα εργασία, δοκιμάστηκαν δηλαδή οι αεροτομές και στις δύο θέσεις και στα δύο οχήματα. Η τελική επιλογή έγινε με βάση τα αποτελέσματα τα οποία έδειξαν για κάθε όχημα σε ποια θέση πρέπει να τοποθετήσουμε την αεροτομή για να υπάρξει βελτίωση της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς.

4.2.1 Τοποθέτηση αεροτομής στο Ahmed25

Από τις προαναφερθείσες δοκιμές προέκυψε ότι στο Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25° είναι καλύτερο η αεροτομή να τοποθετηθεί στο τέλος του κεκλιμένου επιπέδου (slant) (Σχ. 4.2α). Άλλο ένα στοιχείο το οποίο οδήγησε σε αυτήν την επιλογή ήταν ότι η αποκόλληση της ροής, στο συγκεκριμένο σώμα, δημιουργείται προς το τέλος του κεκλιμένου επιπέδου (Σχ. 4.3).



Σχ 4.3 Ahmed25: Αποκόλληση της ροής στο τέλος του slant μέρους.

Για το Ahmed 25 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αεροτομές, οι οποίες θα αναφέρονται στη συνέχεια ως εξής:

- Rear Spoiler 10 γωνία κλίσης 10° όπως ορίστηκε στο σχ. 4.1α
- Rear Spoiler 15 γωνία κλίσης 15°
- Rear Spoiler 20 γωνία κλίσης 20°
- Rear Spoiler 27 γωνία κλίσης 27°

Όπως υποδηλώνεται και από το όνομά τους όλες είναι τοποθετημένες στο τέλος του οχήματος (rear).

Αρχικά ήταν απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο υπολογιστικό πλέγμα. Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με τις ρυθμίσεις που είχαν γίνει κατά τη διάρκεια της γένεσης του πλέγματος γύρω από το απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου ήταν λίγες αλλά απαραίτητες (ενότητα 2.3). Είναι βασικό να τονιστεί ότι η διαδικασία παραμένει ίδια, δηλαδή πρώτα δημιουργείται ένα αρχικό πλέγμα-βάση (blockMesh), το οποίο παραμένει ίδιο με πριν καθώς δεν εξαρτάται από τη γεωμετρία των σωμάτων που βρίσκονται μέσα στο επιλεγμένο χωρίο, στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο κώδικας SnappyHexMesh στον οποίο αρχικά δεν επιλέγεται η πρόσθεση επιπλέον στρωμάτων κελιών, έπειτα ο κώδικας SnapEdge ώστε το πλέγμα που δημιουργείται να αναπαριστά πιστά τη γεωμετρία του Ahmed Body και, τέλος, δημιουργούνται τα επιπλέον στρώματα κελιών (layers) με τη χρήση του κώδικα SnappyHexMesh.

Βασική προϋπόθεση ώστε να μπορεί ο κώδικας SnappyHexMesh να αναγνωρίζει την κάθε αεροτομή είναι η δήλωση της αρχικά στην περιοχή geometry του αρχείου ρυθμίσεων όπου δηλώνεται το αρχείο που περιλαμβάνει τη γεωμετρία του σώματος, έπειτα στην περιοχή refinementSurface όπου γίνεται το επιπλέον πύκνωμα του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια του σώματος και τέλος στην περιοχή addLayersControls όπου επιλέγονται τα επιπλέον στρώματα κελιών που θα προστεθούν στην επιφάνεια του σώματος. Παρόμοια διαδικασία χρειάζεται και για τον κώδικα SnapEdge (Παράρτημα Γ & Δ). Αφού λοιπόν δημιουργηθεί το κατάλληλο υπολογιστικό πλέγμα και πριν επιλυθεί η ροή είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι νέες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες που δηλώνονται για το όχημα (Ahmed Body) πρέπει να ισχύουν και για την αεροτομή καθώς το σύστημα αυτοκίνητο-αεροτομή είναι αδιαίρετο.

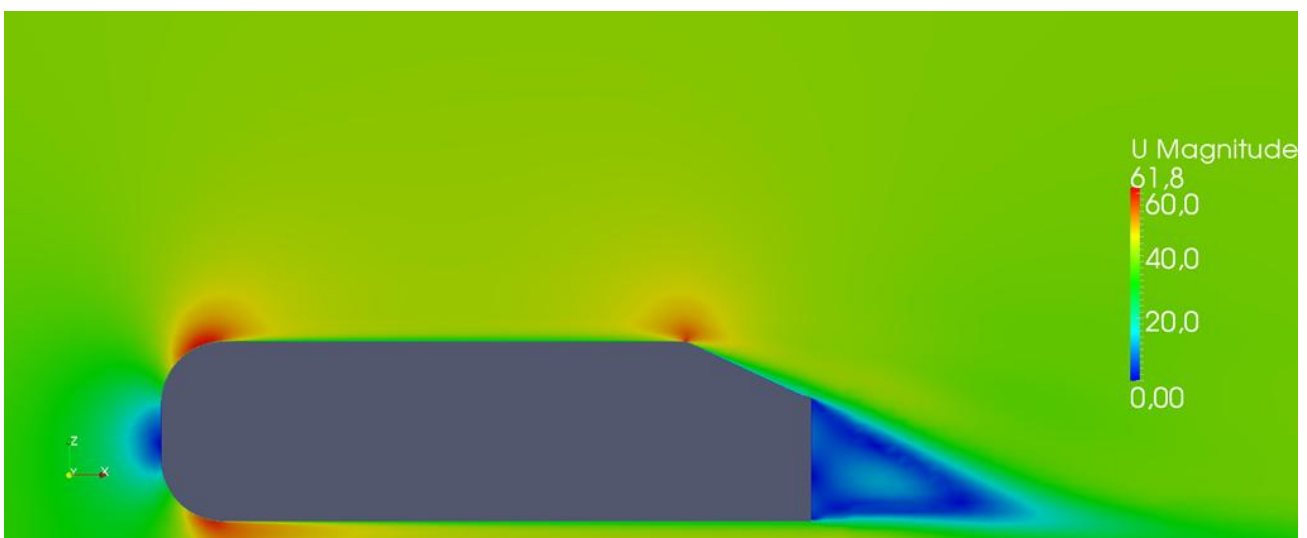
Ahmed25 Rear Spoiler 10

Για το μοντέλο αυτοκινήτου οι ρυθμίσεις που είχαν επιλεγεί δεν τροποποιήθηκαν καθόλου. Προστέθηκαν μόνο αυτές που αφορούσαν την αεροτομή οι οποίες είναι οι εξής:

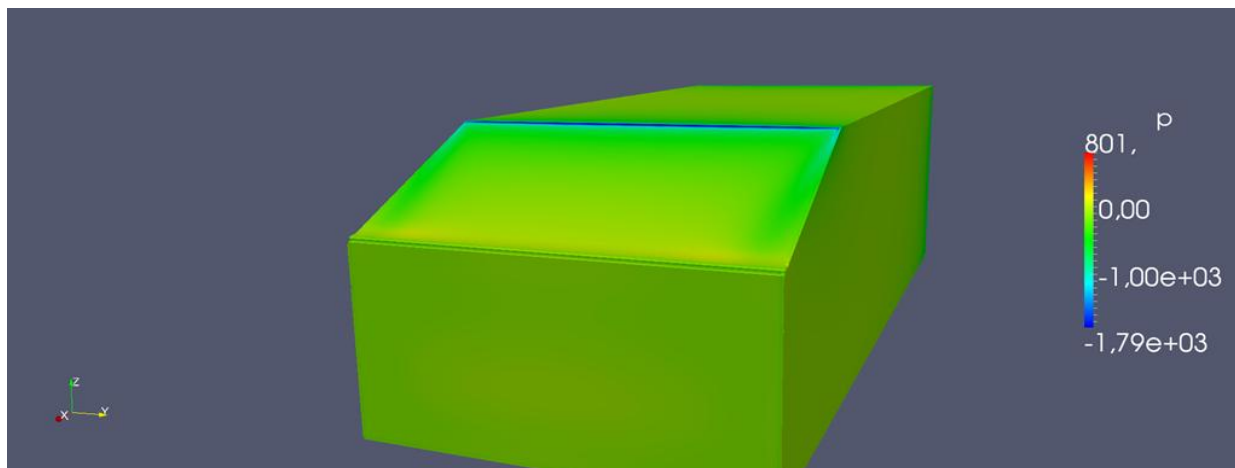
- Επιλέχθηκε το επίπεδο πυκνότητας (refinement level) της αεροτομής να είναι μεταξύ του επιπέδου 6 και του επιπέδου 7.
- Έγινε επιλογή να προστεθούν τρεις πλεγματικές διαστρωματώσεις γύρω από την αεροτομή.
- Προτιμήθηκε να μη χρησιμοποιηθεί ο κώδικας SnapEdge για την αεροτομή παρά μόνο για το Ahmed Body, καθώς το πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν αποδεκτό.
- Το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από 1.850.000 εξαεδρικά κελιά και η αριθμητική επίλυση της ροής ολοκληρώθηκε σε 7,3h στον ηλεκτρονικό υπολογιστή που περιγράφεται στην ενότητα 3.2 .



Σχ 4.4 Ahmed25 Rear Spoiler 10: Τριδιάστατη αναπαράσταση της αεροτομής .



Σχ 4.5 Ahmed25 Rear Spoiler 10: Τομή κατά τον άξονα συμμετρίας, κατανομή της ταχύτητας.

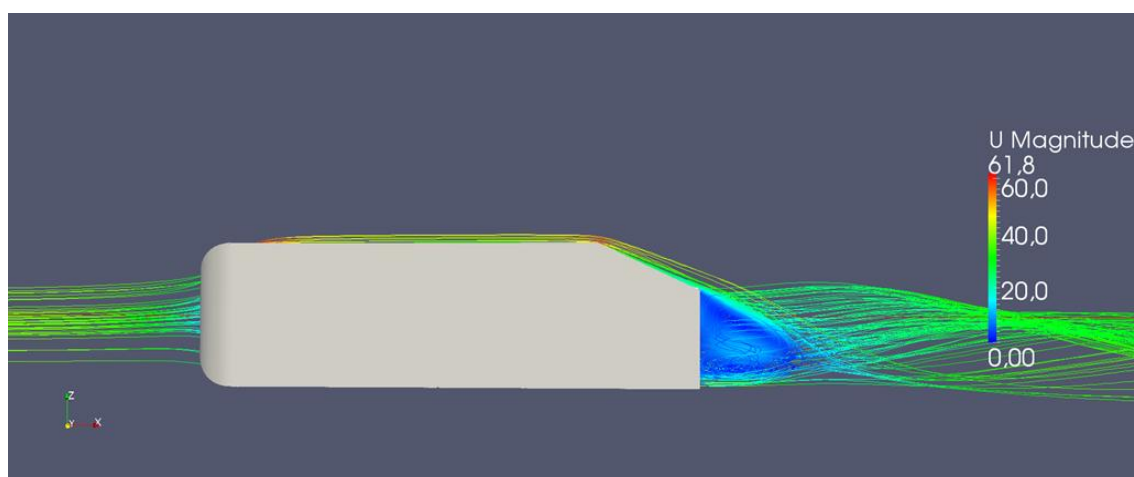


Σχ 4.6 Ahmed25 Rear Spoiler 10: Κατανομή της πίεσης πάνω στην επιφάνεια του σώματος.

Συγκρίνοντας την κατανομή της ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας (Σχ. 4.3 & 4.5) μεταξύ του Ahmed Body με αεροτομή κλίσης 10° και αυτού χωρίς αεροτομή δεν διακρίνονται ιδιαίτερες διαφορές, συμπέρασμα που προκύπτει επίσης και από τη αναπαράσταση των γραμμών ροής γύρω από το μοντέλο αυτοκινήτου (Σχ . 4.7) όπου η ανακυκλοφορία της ροής είναι ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη περίπτωση στην οποία δεν χρησιμοποιείται αεροτομή (Σχ. 3.5). Η ροή γύρω από το τροποποιημένο πλέον μοντέλο αυτοκινήτου βελτιώθηκε, αφού η τοποθέτηση της αεροτομής μείωσε και τον συντελεστή αντίστασης αλλά και βοήθησε στην ελάττωση της παραγόμενης άνωσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στο πίνακα 4.2.

	Ahmed25	Ahmed25 Rear Spoiler 10
Cd	0.273	0.267
Cl	0.299	0.259
Drag Force (N)	29.46	28.72
Lift Force (N)	32.16	27.07

Πίνακας 4.2 Ahmed25/Rear Spoiler 10: Πίνακας αποτελεσμάτων .

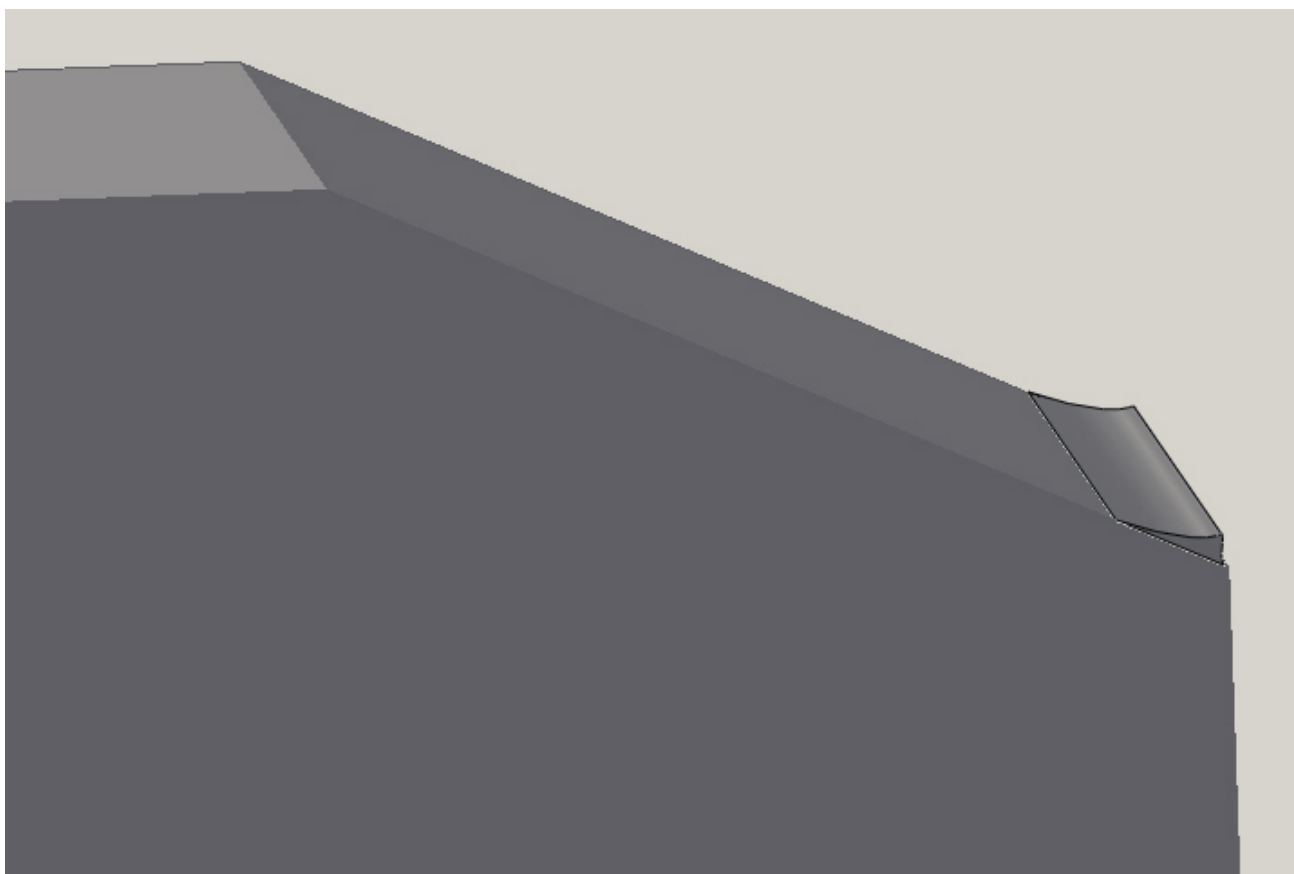


Σχ 4.7 Ahmed25 Rear Spoiler 10: Περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής .

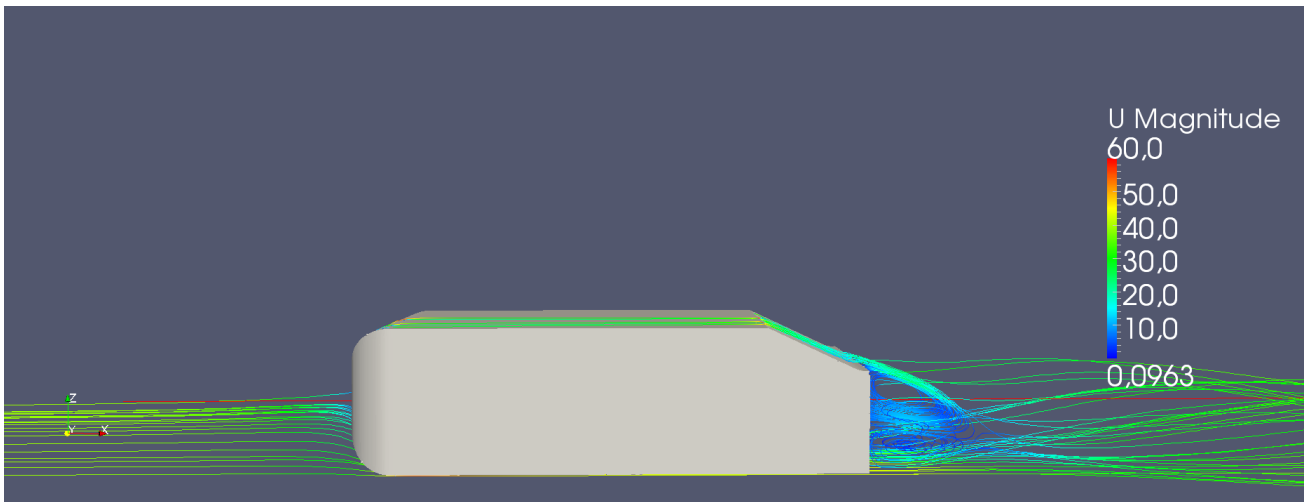
Ahmed25 Rear Spoiler 15

Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν εδώ είναι λίγο διαφορετικές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

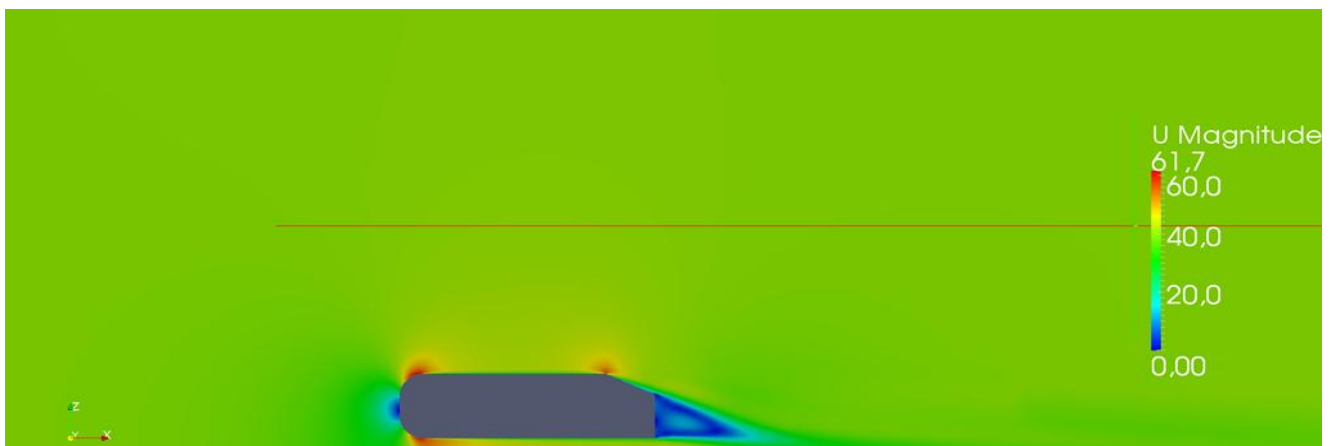
- Επιλέχθηκε μεγαλύτερο επίπεδο πυκνότητας στην αεροτομή προκειμένου να μειωθούν οι ατέλειες του πλέγματος στις έντονες ακμές της. Συγκεκριμένα το ελάχιστο επίπεδο πυκνότητας ρυθμίστηκε στο επίπεδο 7 ενώ το μεγαλύτερο σε 8. Οι ατέλειες αυτές δημιουργήθηκαν καθώς η αεροτομή αυτή είχε πιο έντονες ακμές με αποτέλεσμα να χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν μικρότερα σε διαστάσεις κελιά.
- Στην περιοχή SnapControls του αρχείου ελέγχου του κώδικα SnappyHexMesh αυξήθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων από 6 σε 8 με σκοπό να γίνει καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος στις επιφάνειες του οχήματος και της αεροτομής.
- Όπως και προηγουμένως τα επιπρόσθετα στρώματα κελιών ρυθμίστηκαν σε τρία (3).
- Έγινε χρήση του κώδικα SnapEdge μόνο στο κύριο σώμα και όχι στην αεροτομή.
- Το υπολογιστικό πλέγμα είχε μέγεθος 1.960.000 κελιών και η ροή επιλύθηκε σε 9.21h στον ίδιο ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχ 4.8 Ahmed25 Rear Spoiler 15: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της αεροτομής .



Σχ 4.9 Ahmed25 Rear Spoiler 15: Περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής.



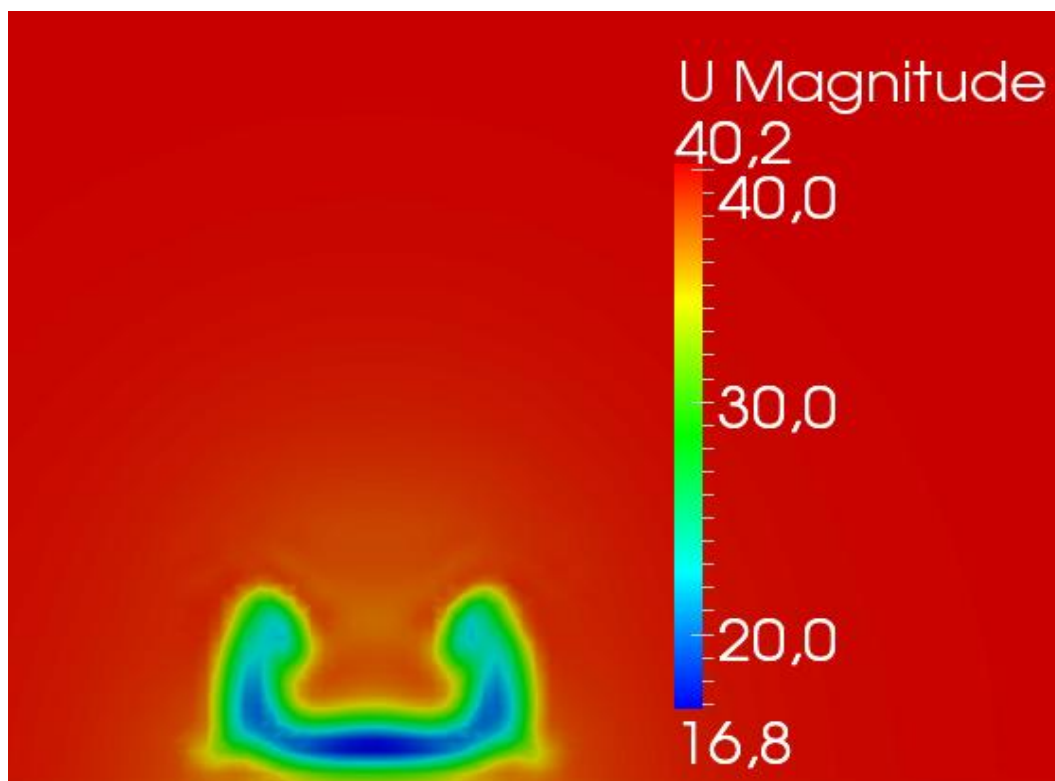
Σχ 4.10 Ahmed25 Rear Spoiler 15: Κατανομή της ταχύτητας, τομή κατά τον άξονα συμμετρίας.

Παρατηρώντας με προσοχή τα σχήματα 4.9 & 4.10 διακρίνεται μια ελάττωση του φαινομένου της ανακυκλοφορίας της ροής σε σχέση με τα προηγούμενα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την αριθμητική επίλυση της ροής (Πίνακας 4.3). Ο συντελεστής αντίστασης και η δύναμη οπισθέλκουσας μειώθηκαν, γεγονός που είναι επιθυμητό. Επίσης μειώθηκαν αντίστοιχα τόσο ο συντελεστής άνωσης όσο και η δύναμη άνωσης. Με αυτό τον τρόπο βελτιώθηκε η αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου, μικρότερη αντίσταση από την τριβή της επιφάνειάς του με τον αέρα, αλλά και η οδηγική του συμπεριφορά καθώς αυξήθηκε η πρόσφυση του οχήματος με το δρόμο λόγω της μείωσης της δύναμης άνωσης.

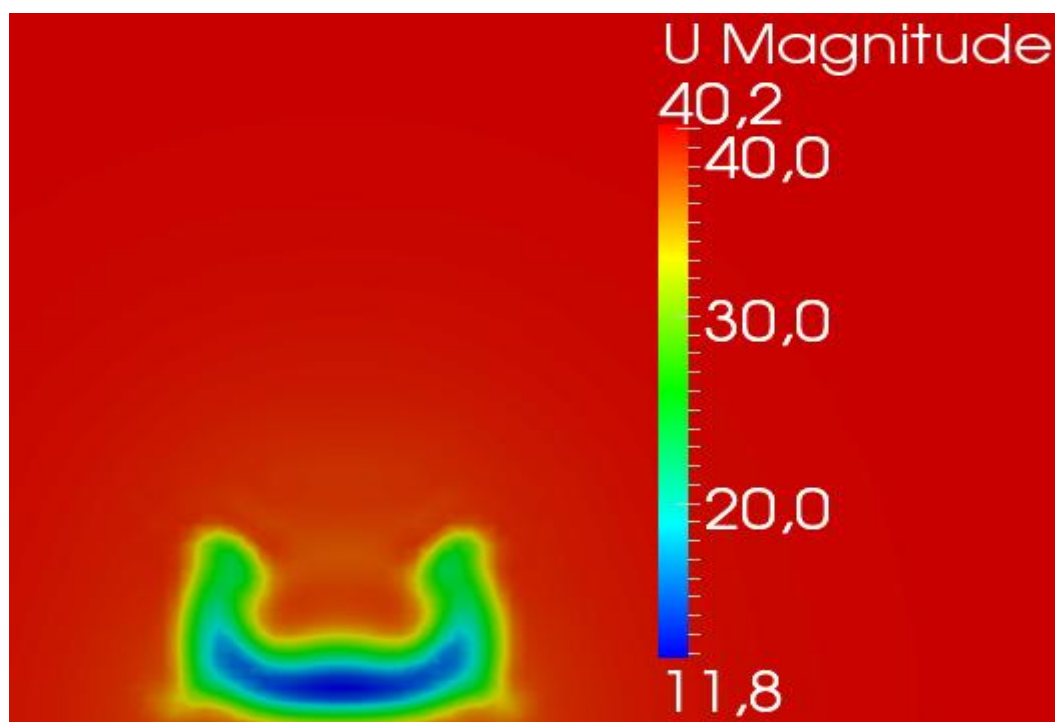
	Ahmed25	Ahmed25 Rear Spoiler 15
Cd	0.273	0.2615
Cl	0.299	0.196
Drag Force (N)	29.46	28.12
Lift Force (N)	32.16	21.13

Πίνακας 4.3 Ahmed25 Rear Spoiler 15: Πίνακας αποτελεσμάτων .

Στα σχήματα 4.11α & 4.11β φαίνεται ο ομόρρους της ροής, σε απόσταση 40cm από το σώμα. Μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι στρόβιλοι που δημιουργούνται είναι λιγότερο έντονοι και έχουν την τάση να εξασθενούν πιο γρήγορα.



Σχ 4.11α Ahmed25: Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου σε απόσταση 40cm, τομή κατά τον άξονα x'x.

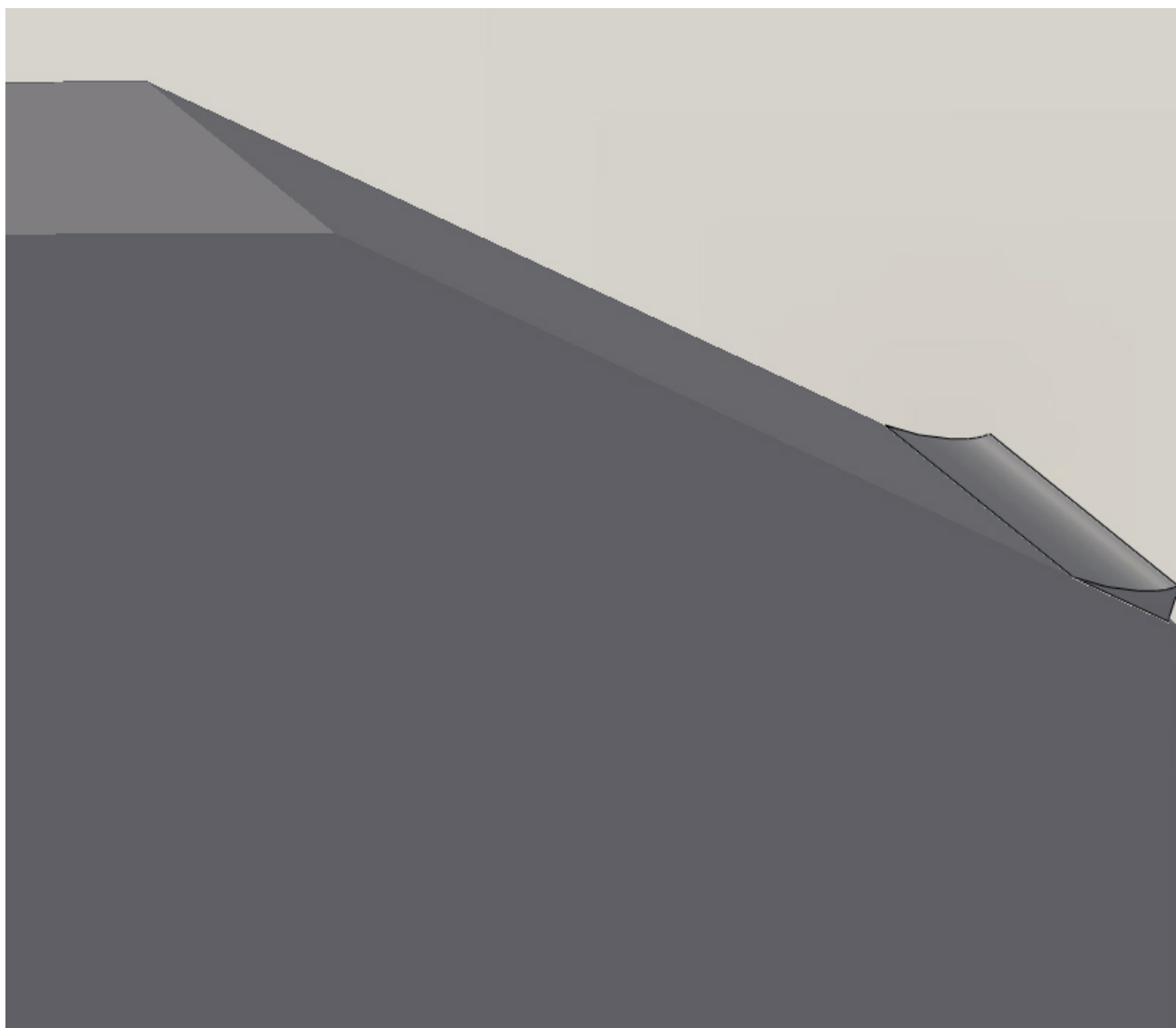


Σχ 4.11β Ahmed25 Rear Spoiler 15: Με Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου σε απόσταση 40cm, τομή κατά τον άξονα x'x.

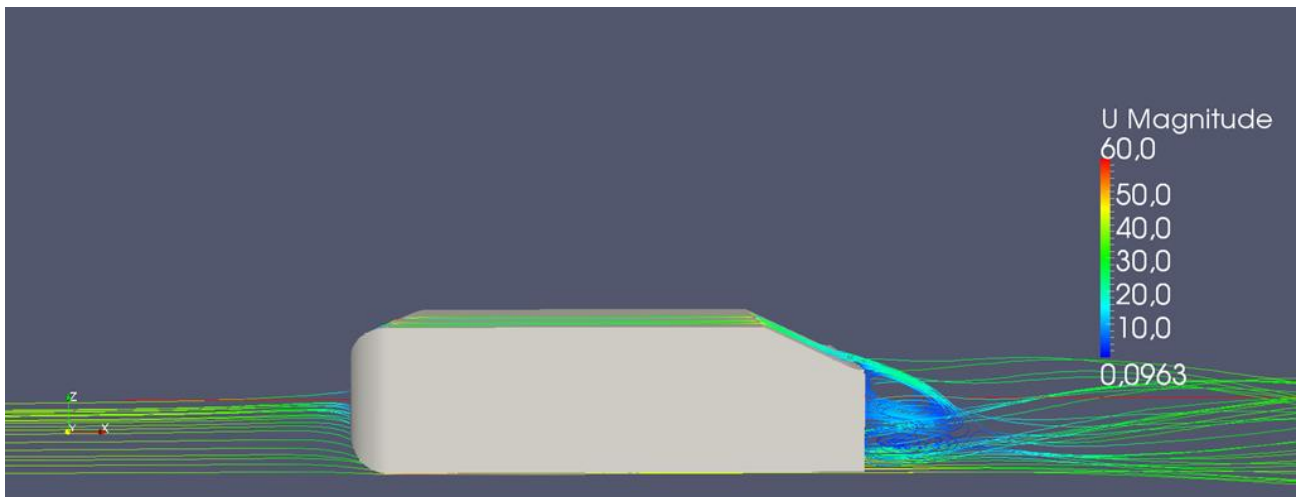
Ahmed25 Rear Spoiler 20

Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

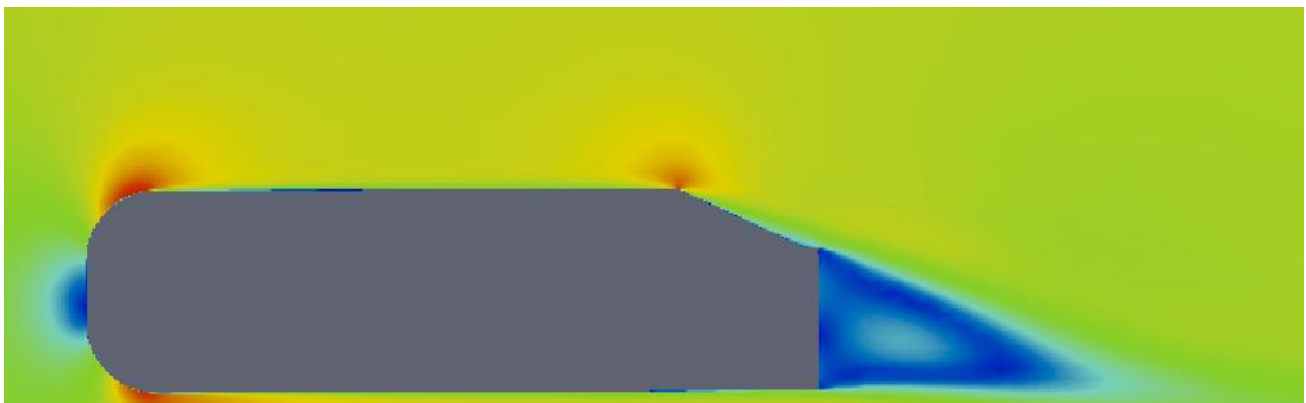
- Το επίπεδο πυκνότητας του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής ρυθμίστηκε να κυμαίνεται από το 5, ελάχιστο, έως 6, μέγιστο.
- Οι πλεγματικές διαστρωματώσεις γύρω από την αεροτομή επιλέχθηκαν και εδώ να είναι τρία (3).
- Ο κώδικας SnapEdge χρησιμοποιήθηκε και για το κύριο σώμα και για την αεροτομή προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο και σωστό πλέγμα.
- Το υπολογιστικό πλέγμα είχε μέγεθος 1.845.000 κελιά και ο χρόνος επίλυσης της ροής ήταν 7.78 h.



Σχ 4.12 Ahmed25 Rear Spoiler 20: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της αεροτομής .



Σχ. 4.13 Ahmed25 Rear Spoiler 20: Γραμμές ροής, μειωμένη ανακυκλοφορία της ροής.



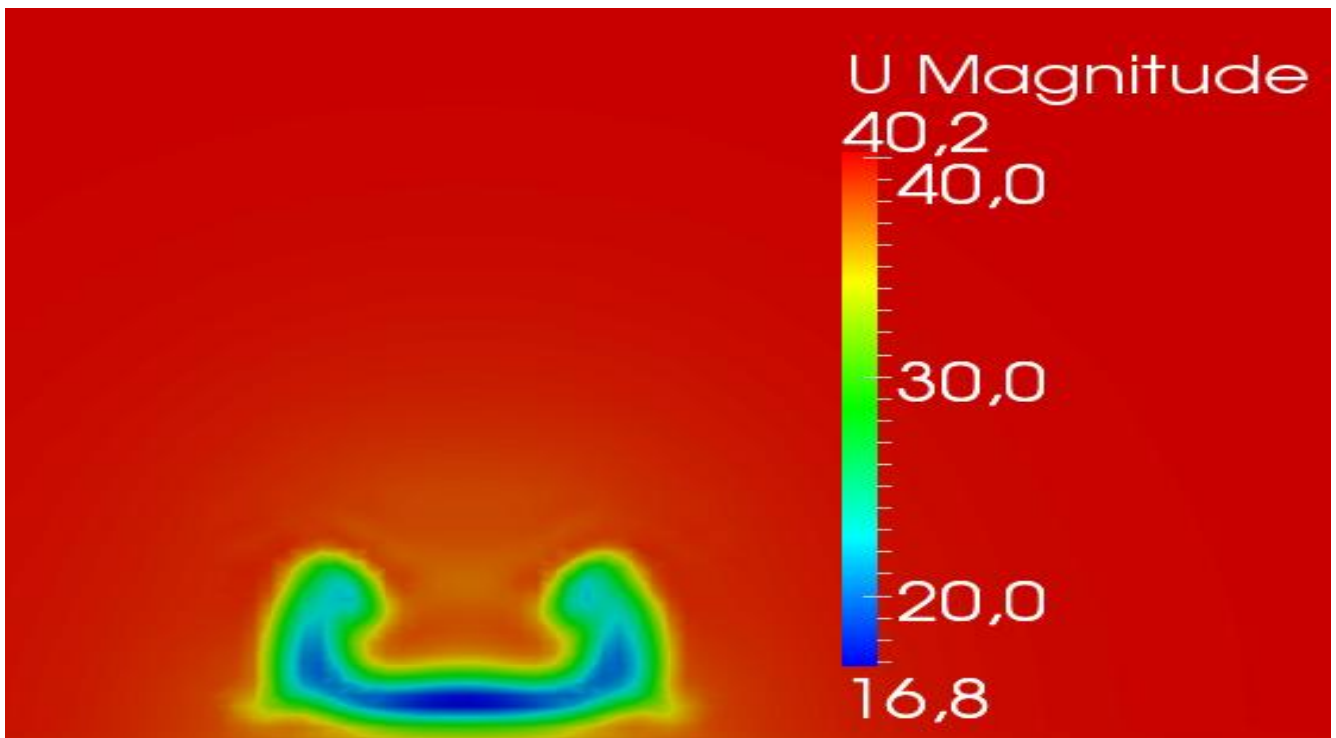
Σχ. 4.14 Ahmed25 Rear Spoiler 20: Τομή στο επίπεδο συμμετρίας, κατανομή της ταχύτητας.

Στα σχήματα 4.15 και 4.16 απεικονίζεται η στροβιλότητα του πεδίου σε απόσταση 40cm από το σώμα πριν και μετά την τοποθέτηση της αεροτομής (rear spoiler 20) όπου φαίνεται η εξασθένηση του φαινομένου, γεγονός που οφείλεται στη χρήση του spoiler.

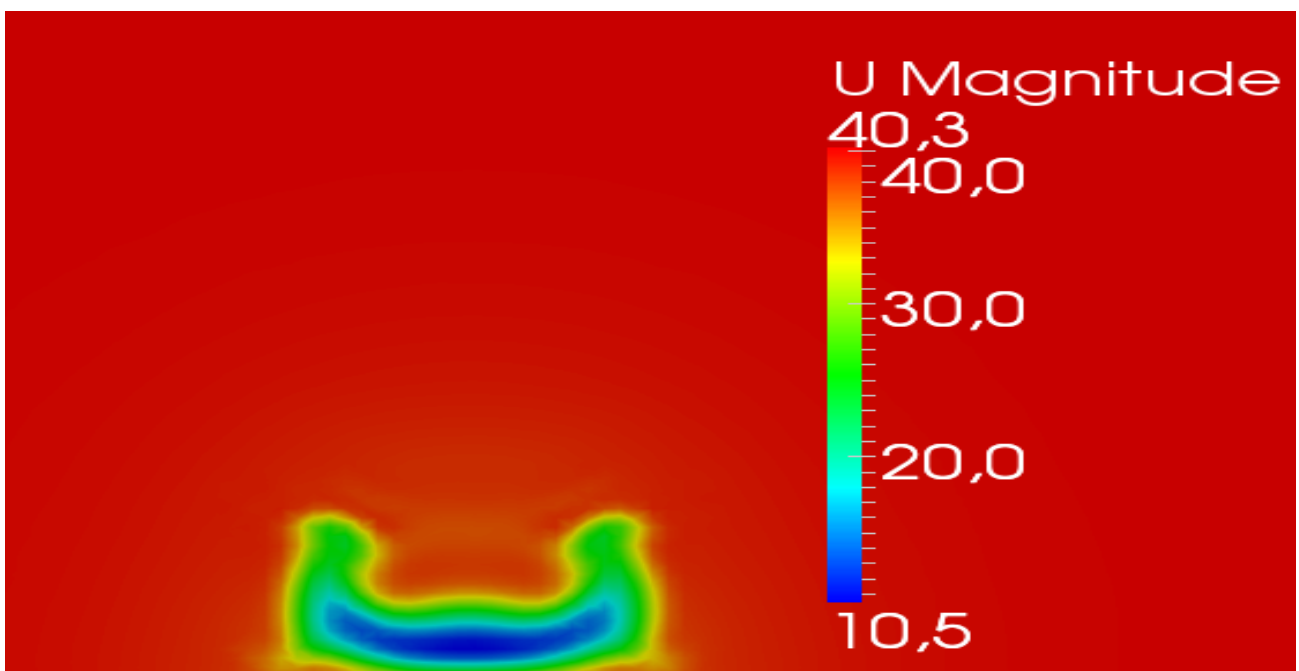
Τα αποτελέσματα από την επίλυση της ροής έδειξαν ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή άνωσης και αντίστασης (Πίνακας 4.4).

	Ahmed25	Rear Spoiler 20
Cd	0.273	0.258
Cl	0.299	0.172
Drag Force (N)	29.46	27.78
Lift Force (N)	32.16	18.5

Πίνακας 4.4 Ahmed25 Rear Spoiler 20: Πίνακας αποτελεσμάτων.



Σχ. 4.15 Ahmed25: Στροβιλότητα του πεδίου, απόσταση 40 cm από το σώμα.

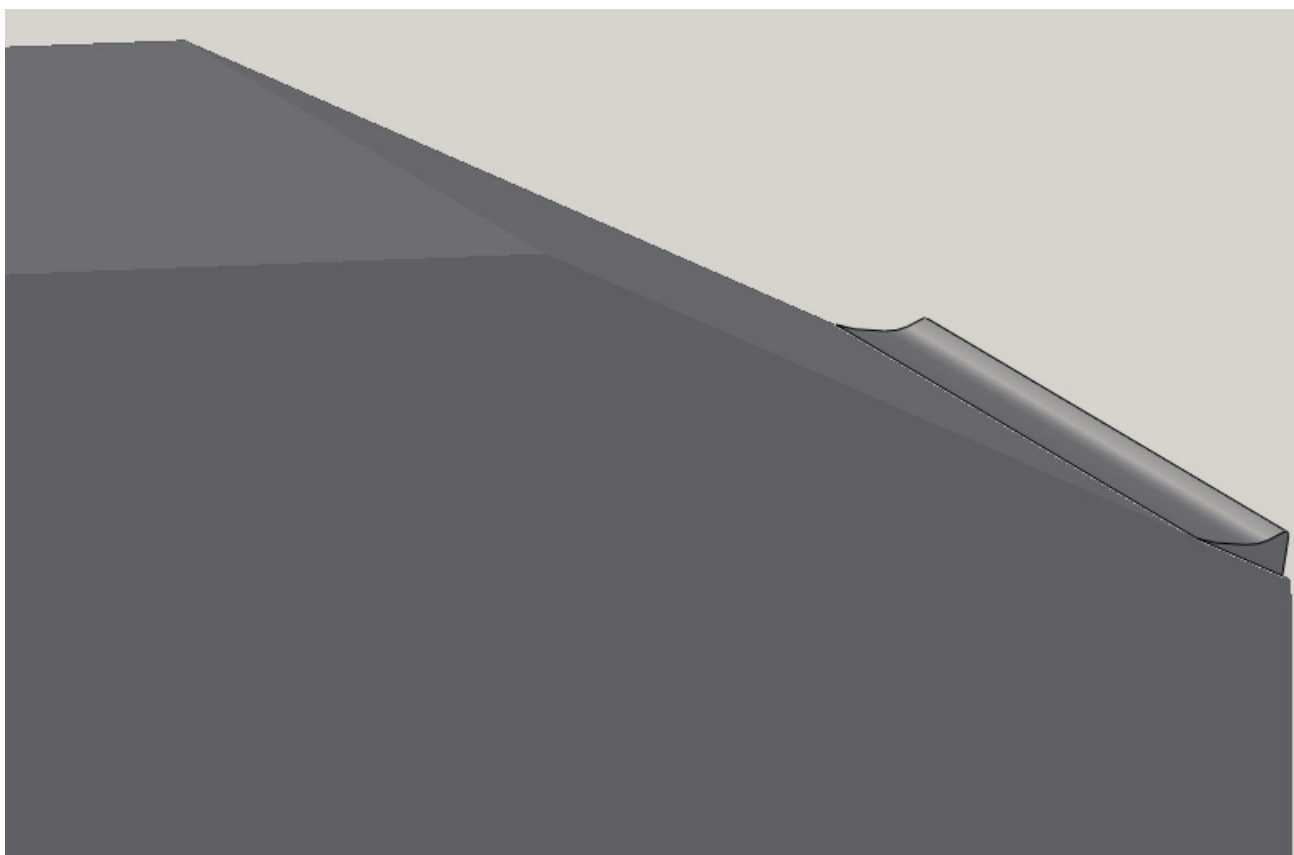


Σχ. 4.16 Ahmed25 Rear Spoiler 20: Στροβιλότητα του πεδίου, απόσταση 40cm από το σώμα.

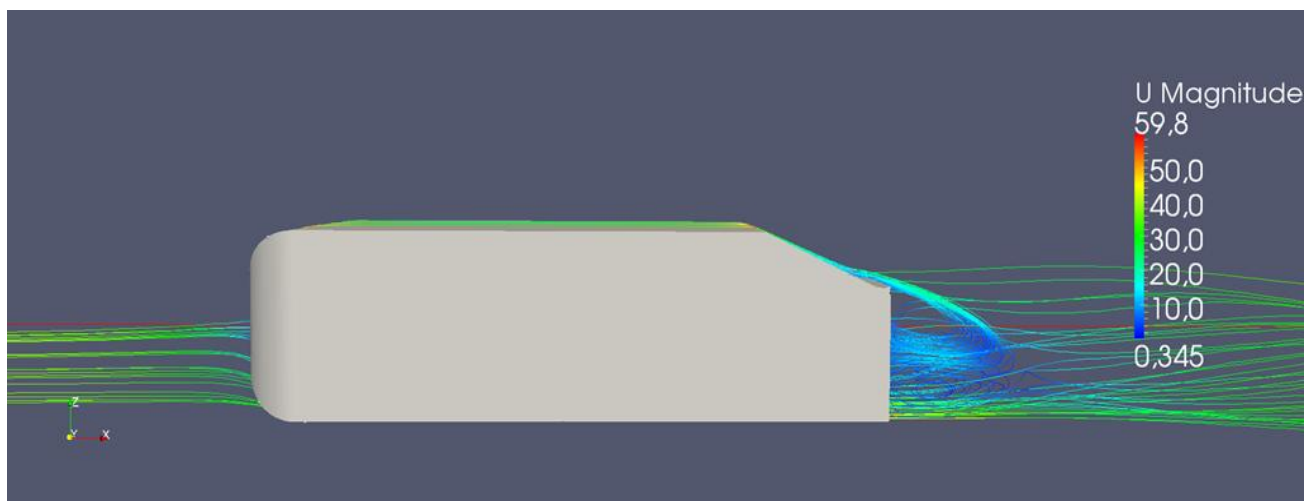
Ahmed25 Rear Spoiler 27

Η τελευταία αεροτομή που τοποθετήθηκε στο συγκεκριμένο σώμα ήταν ένα spoiler με γωνία κλίσης 27° . Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν ώστε να δημιουργηθεί ένα πλέγμα προκειμένου να λυθεί με ακρίβεια η ροή είναι οι ακόλουθες:

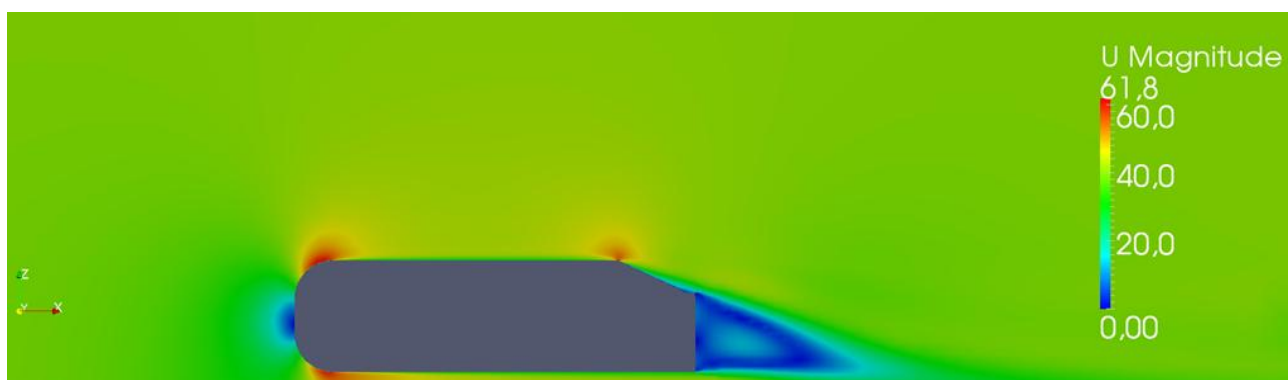
- Το επίπεδο πυκνότητας στην επιφάνεια της αεροτομής ήταν 5, το ελάχιστο, και 6 το μέγιστο.
- Ρυθμίστηκε να δημιουργούνται 3 πλεγματικές διαστρωματώσεις γύρω από την αεροτομή.
- Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας SnapEdge για να μειωθούν στο ελάχιστο τυχόν ατέλειες του πλέγματος.
- Στην περίπτωση αυτή το πλέγμα είχε μέγεθος 1.842.500 κελιά και η αριθμητική επίλυση της ροής ολοκληρώθηκε σε 6.97 h.



Σχ 4.17 Ahmed25 Rear Spoiler 27: Τριδιάστατη αναπαράσταση της αεροτομής .



Σχ. 4.18 Ahmed25 Rear Spoiler 27: Γραμμές ροής, μειωμένη ανακυκλοφορία της ροής

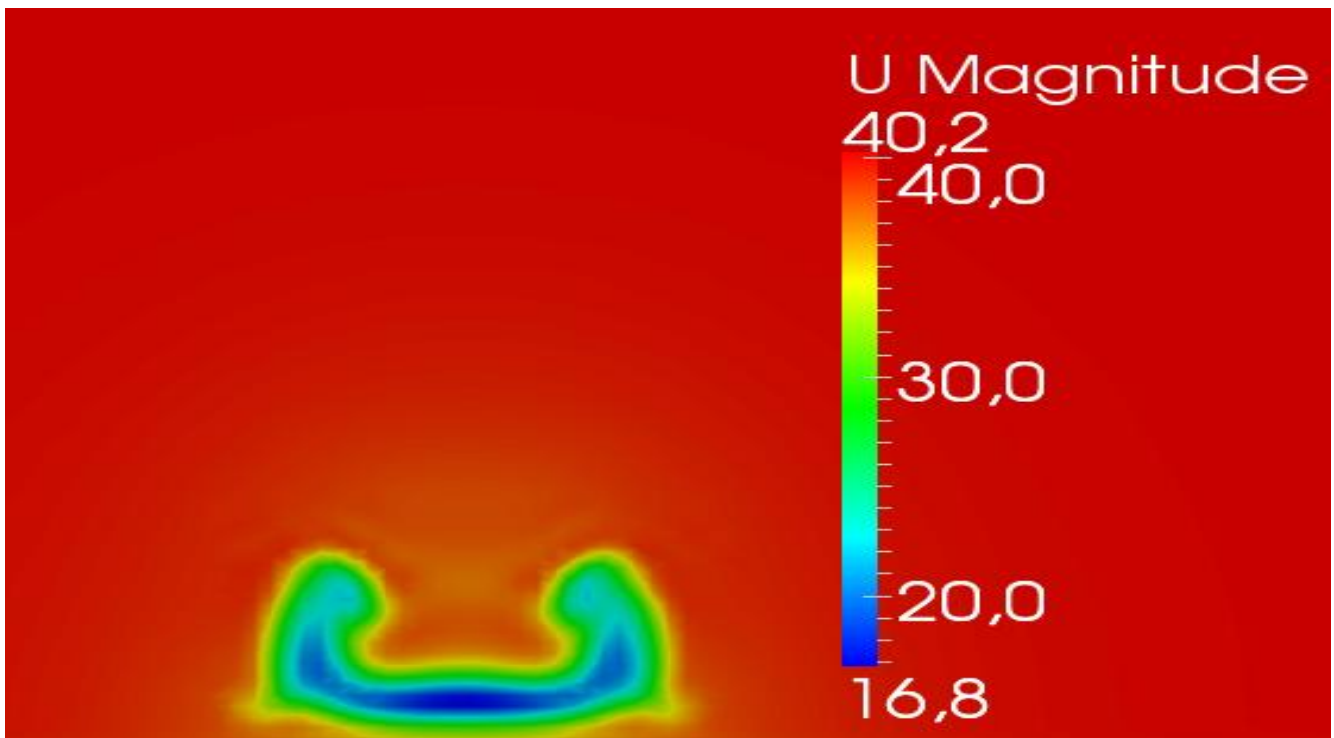


Σχ. 4.19 Ahmed25 Rear Spoiler 27: Κατανομή της αξονικής ταχύτητας, τομή στο επίπεδο συμμετρίας.

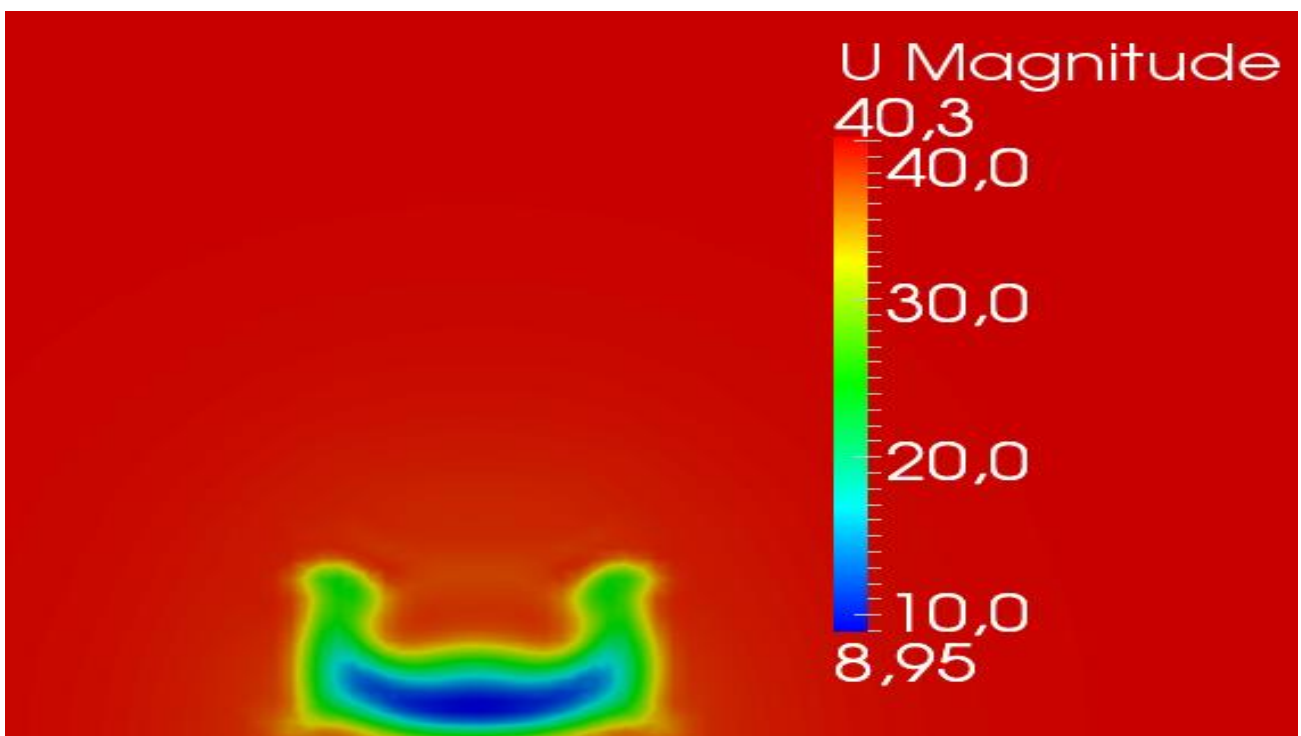
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα (Πίνακας 4.5) από την επίλυση της ροής συμπεραίνουμε ότι η αεροδυναμική συμπεριφορά του σώματος βελτιώθηκε ακόμα περισσότερο, καθώς υπήρχε ακόμα μεγαλύτερη μείωση των συντελεστών αντίστασης και άνωσης και κατ'επέκταση και των αντίστοιχων δυνάμεων, τριβής, λόγω αντίστασης του αέρα, και άνωσης.

	Ahmed25	Rear Spoiler 27
Cd	0.273	0.249
Cl	0.299	0.150
Drag Force (N)	29.46	26.80
Lift Force (N)	32.16	16.12

Πίνακας 4.5 Ahmed25 Rear Spoiler 27: Πίνακας αποτελεσμάτων.



Σχ. 4.20 Ahmed25: Στροβιλότητα του πεδίου, απόσταση 40 cm από το σώμα .



Σχ. 4.21 Ahmed25 Rear Spoiler 27: Στροβιλότητα του πεδίου, απόσταση 40 cm από το σώμα.

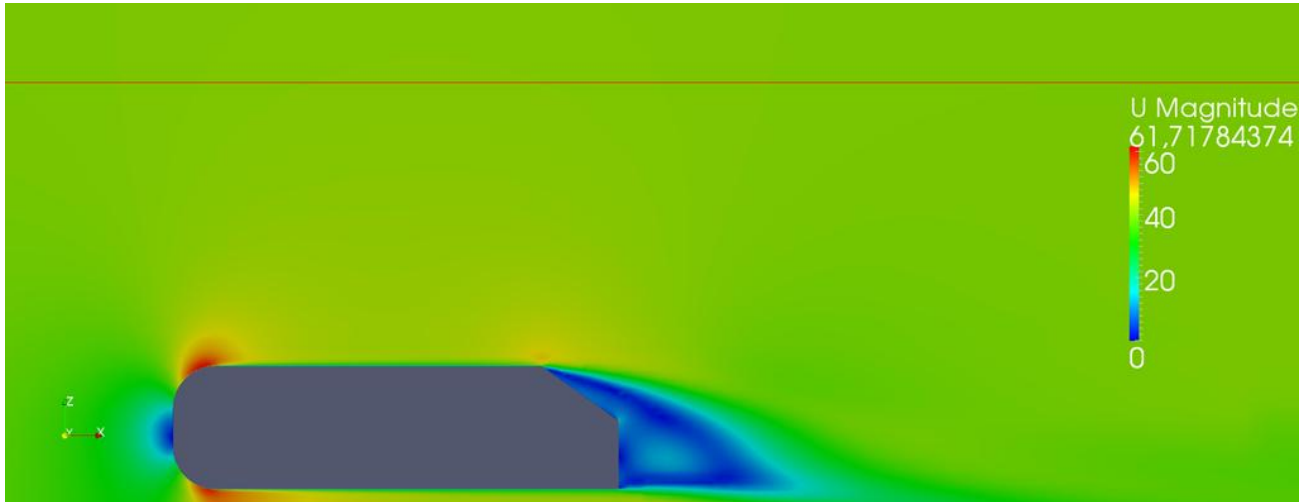
Έχοντας πλέον συγκεντρώσει (Πίνακας 4.6) όλα τα αποτελέσματα από τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις, φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση της αεροτομής (Sproiler) λειτούργησε ευεργετικά στη βελτίωση της αεροδυναμικής του οχήματος, καθώς υπήρχε ταυτόχρονη μείωση και των δύο συντελεστών, άνωσης & αντίστασης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι όσο μεγάλωνε η γωνία κλίσης της αεροτομής (ϕ) τόσο πιο μεγάλη ήταν και η μείωση στις δυνάμεις οπισθέλκουσας και άνωσης. Αυτό το φαινόμενο είναι απόλυτα λογικό γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία ϕ τόσο πιο μεγάλη κάθετη δύναμη με φορά προς το δρόμο ασκείται στο αυτοκίνητο με αποτέλεσμα να μειώνονται τα ανεπιθύμητα ανωστικά φαινόμενα, αυξάνει δηλαδή η επιφάνεια του αυτοκινήτου στο πίσω μέρος αυτού όπου η πίεση είναι μεγαλύτερη από ότι μπροστά. Ταυτόχρονα η τοποθέτηση της αεροτομής μειώνει τη στροβιλότητα του πεδίου ροής πίσω από το αυτοκίνητο με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρότερα φαινόμενα ανακυκλοφορίας και αποκόλλησης της ροής.

	Cd	Cl	Drag Force (N)	Lift Force (N)
Ahmed25	0.273	0.299	29.46	32.16
Rear Spoiler 10	0.267	0.259	28.72	27.07
Rear Spoiler 15	0.2615	0.196	28.12	21.13
Rear Spoiler 20	0.258	0.172	27.78	18.5
Rear Spoiler 27	0.249	0.15	26.80	16.12

Πίνακας 4.6 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για Ahmed με γωνία *slant* 25° .

4.2.2 Τοποθέτηση Αεροτομής στο Ahmed35

Ο δεύτερος αυτός τύπος αεροτομής χρησιμοποιήθηκε στο Ahmed Body με πίσω κεκλιμένο επίπεδο γωνίας 35° . Ο συγκεκριμένος τύπος αεροτομής τοποθετήθηκε στην αρχή του κεκλιμένου επιπέδου (Σχ. 4.2β) καθώς η αποκόλληση της ροής φαίνεται ότι αρχίζει να παρουσιάζεται από αυτό ακριβώς το σημείο (Σχ. 4.22).



Σχ. 4.22 Ahmed35: Αποκόλληση της ροής στην αρχή του slant μέρους του οχήματος .

Για τη βελτίωση της ροής γύρω από το Ahmed35 δημιουργήθηκαν και τοποθετήθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικές αεροτομές, οι οποίες είναι οι εξής:

- Roof Spoiler 0 γωνία κλίσης 0° όπως αυτή ορίστηκε στο σχήμα 4.1b
- Roof Spoiler 10 γωνία κλίσης 10°
- Roof Spoiler 15 γωνία κλίσης 15°
- Roof Spoiler 20 γωνία κλίσης 20°

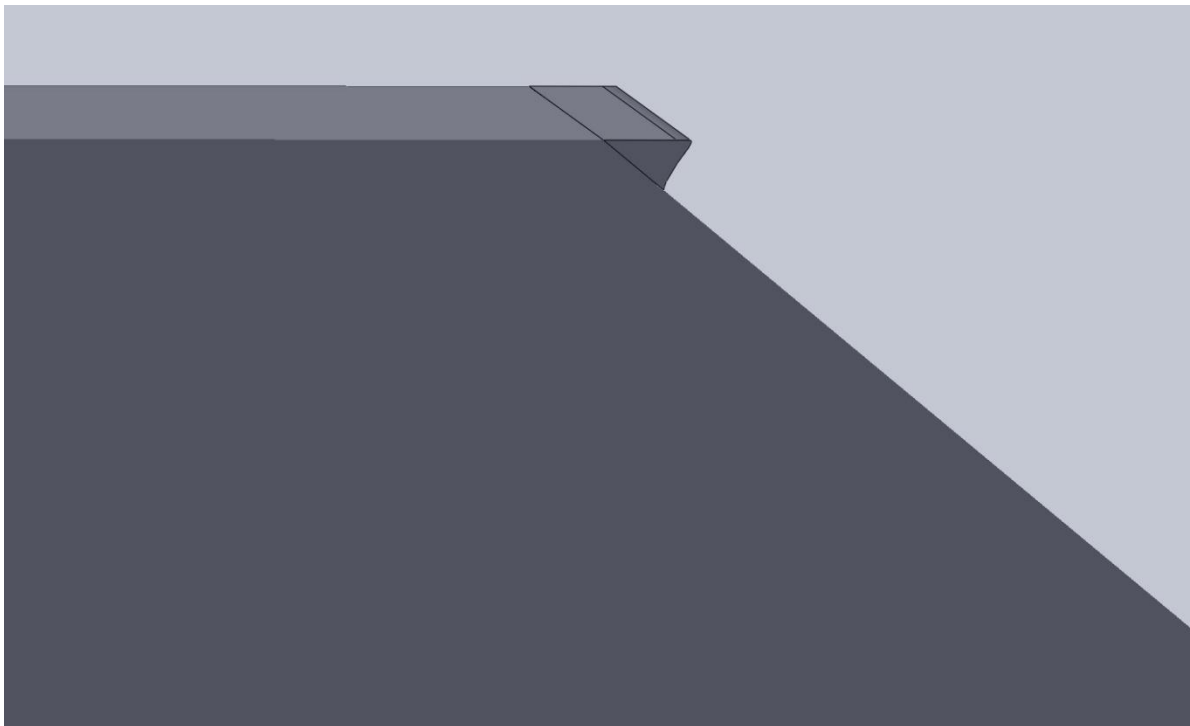
Οι τέσσερις αεροτομές τοποθετούνται, όπως φαίνεται και από το όνομα τους, στην αρχή του πίσω κεκλιμένου επιπέδου η οποία συμπίπτει με το τέλος της οροφής του οχήματος.

Αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό πλέγμα ώστε να είναι δυνατή η αριθμητική επίλυση της ροής. Οι πρώτες απαραίτητες ενέργειες (δήλωση γεωμετρίας της αεροτομής, ορισμός οριακών συνθηκών κ.ο) που χρειάστηκαν να γίνουν για τη γένεση του πλέγματος είναι ίδιες με αυτά που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα (4.2.1) οπότε θα επισημανθούν μόνο οι κυριότερες ρυθμίσεις που υιοθετήθηκαν για την εκάστοτε αεροτομή.

Ahmed 35 Roof Spoiler 0

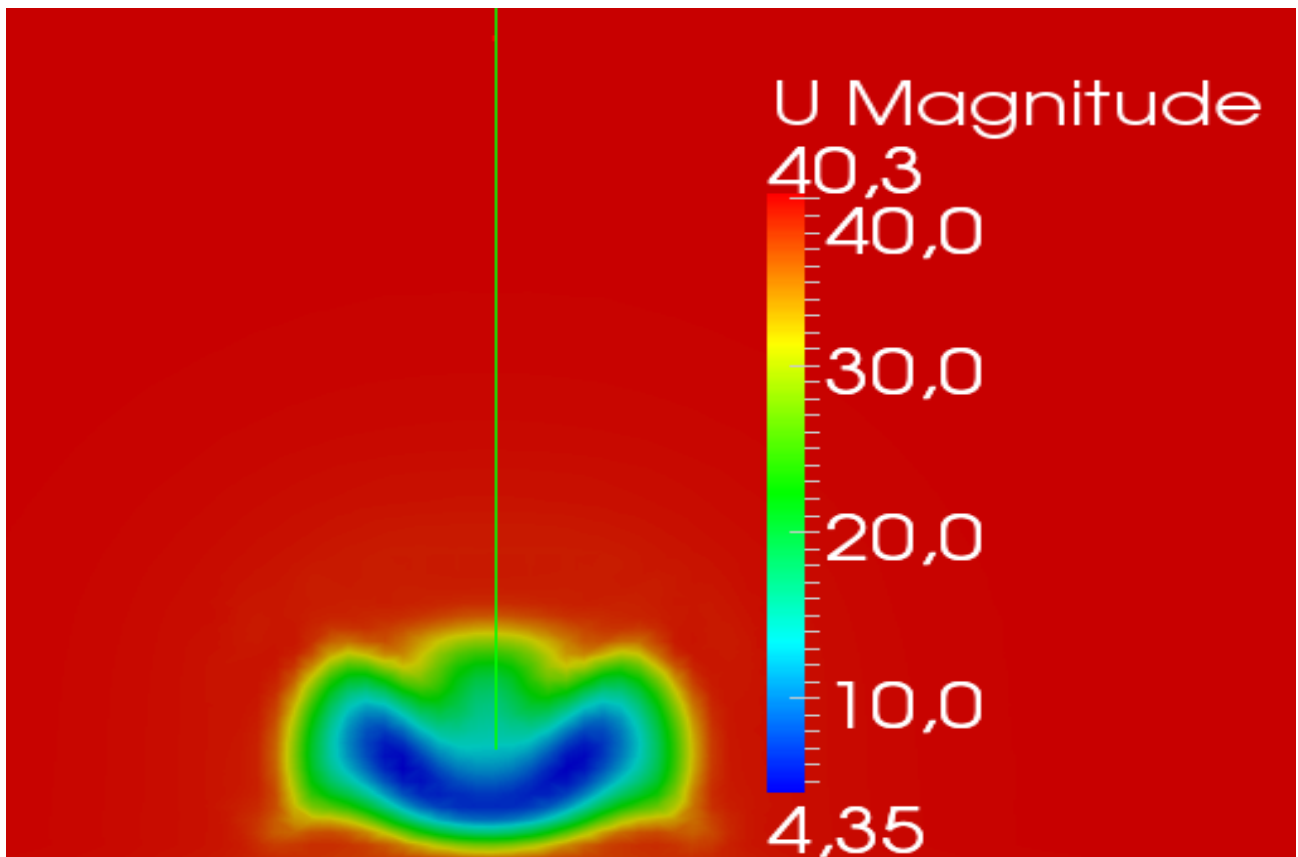
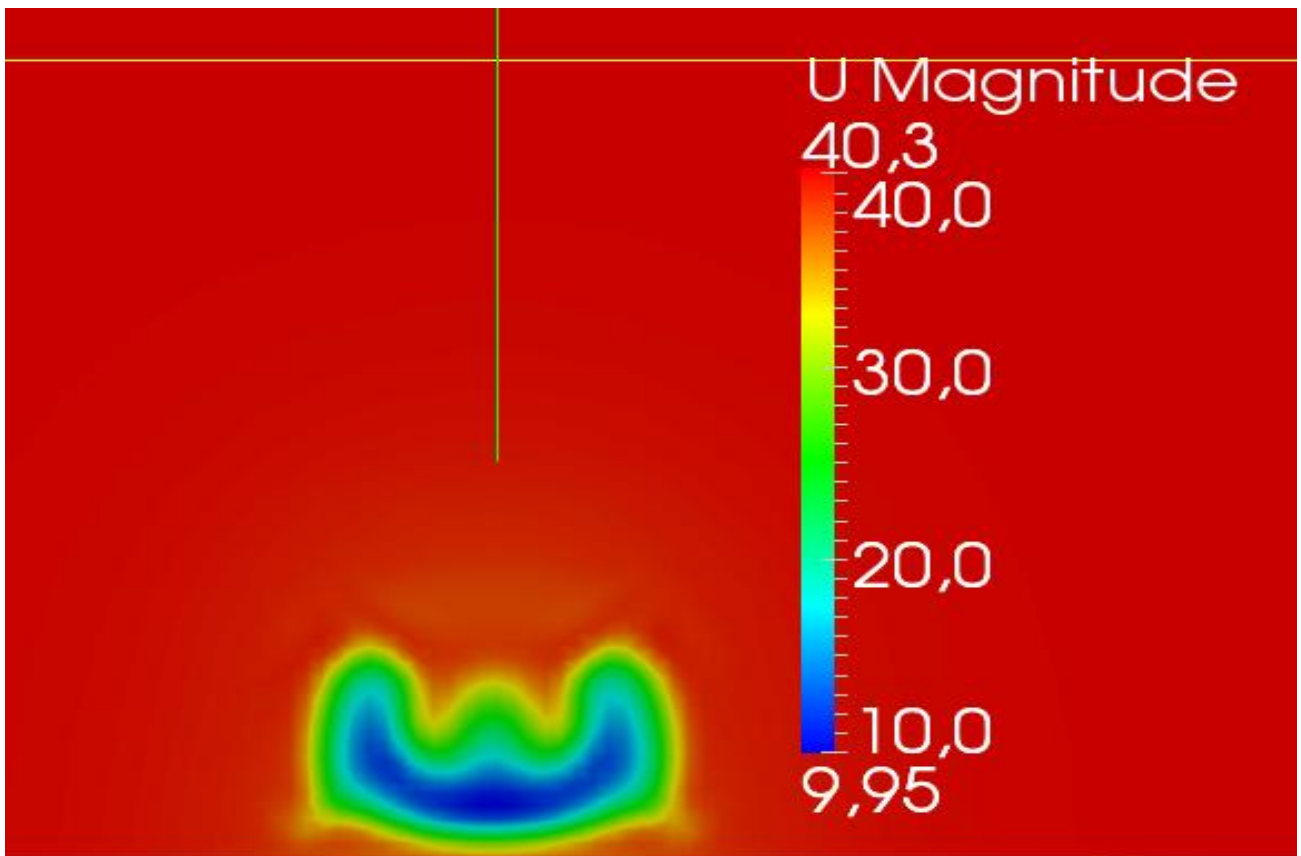
Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη δημιουργία πλέγματος γύρω από τη αεροτομή είναι οι ακόλουθες:

- Το επίπεδο πυκνότητας του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής ρυθμίστηκε να κυμαίνεται μεταξύ 7 και 8.
- Αυξήθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων από 6 σε 8 στην περιοχή SnapControl του κώδικα SnappyHexMesh, ώστε να γίνει σωστότερη προσαρμογή του πλέγματος στις επιφάνειες του οχήματος και τις αεροτομές.
- Οι πλεγματικές διαστρωματώσεις που δημιουργήθηκαν γύρω από την αεροτομή ρυθμίστηκαν σε τρεις (3).
- Ο κώδικας SnapEdge χρησιμοποιήθηκε μόνο για το κύριο σώμα και όχι για την αεροτομή καθώς δεν υπήρχαν ατέλειες στο πλέγμα που δημιουργήθηκε.
- Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελούνταν από 1.892.000 εξαεδρικά κελιά και ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάστηκε ο κώδικας για να επιλύσει την ροή ανέρχεται 7.52h.

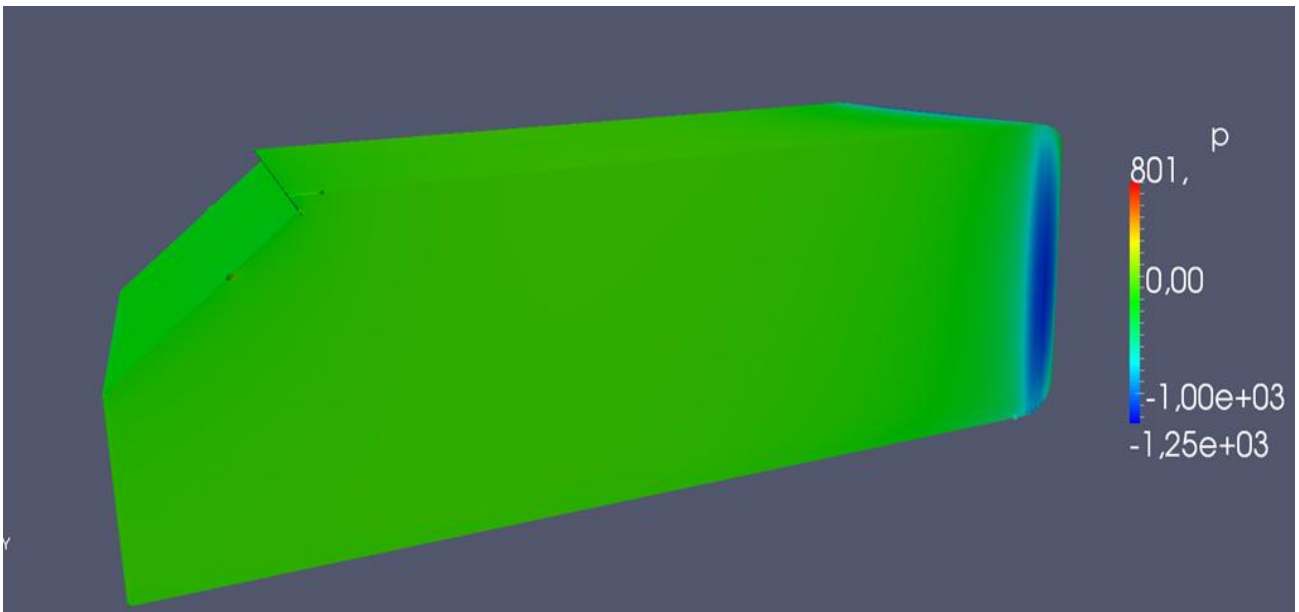


Σχ. 4.23 Ahmed35 Roof Spoiler 0: Απεικόνιση της αεροτομής και του οχήματος σε 3Δ.

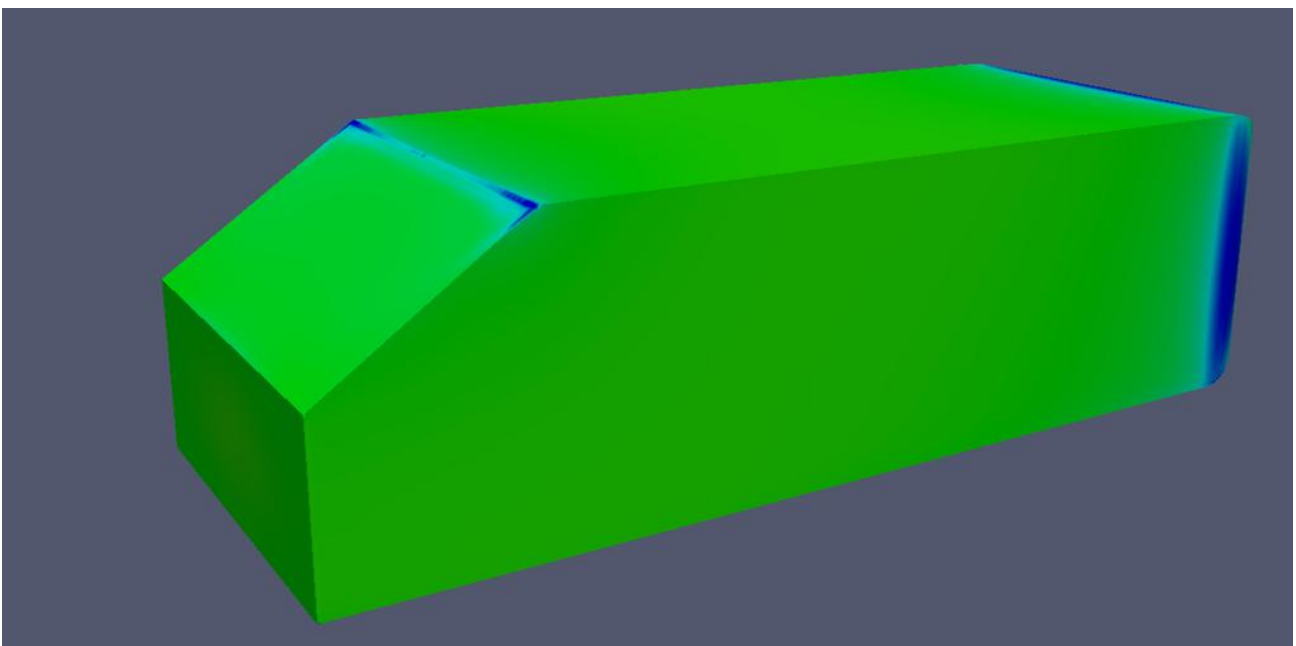
Στο σχήμα 4.24 απεικονίζονται οι στρόβιλοι που δημιουργούνται σε απόσταση 40 cm από το πίσω μέρος του οχήματος. Η χρήση της αεροτομής βοήθησε στη πιο γρήγορη εξασθένηση του φαινομένου καθώς και στη μείωση της έντασής του.



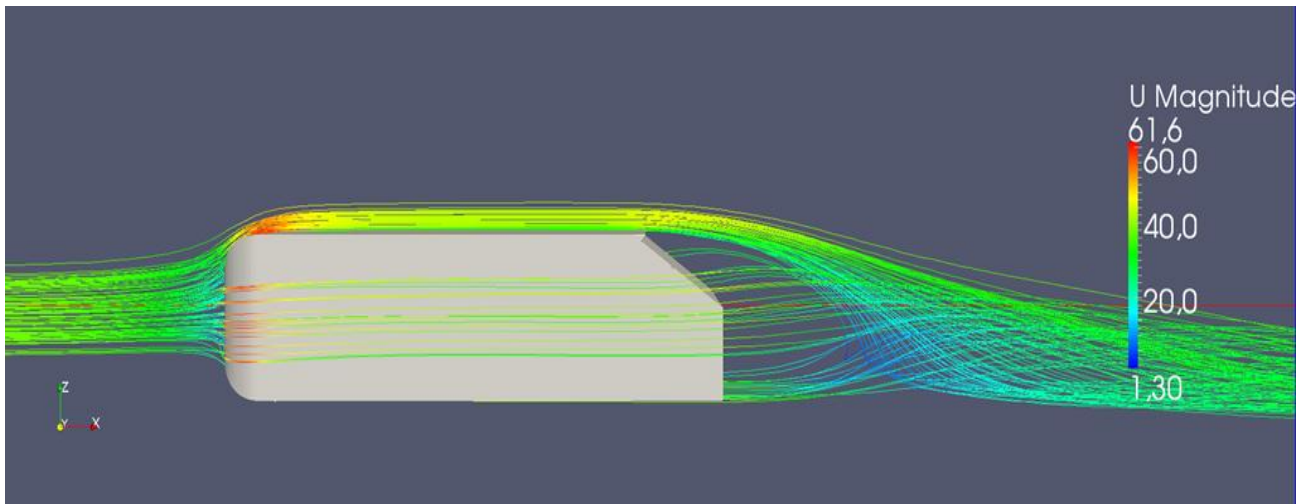
Σχ. 4.24 Ahmed35: Ο ομόρρους της ροής σε απόσταση 40 cm από το σώμα. Αρχικά χωρίς αεροτομή και έπειτα με τη τοποθέτηση του Roof Spoiler.



Σχ. 4.25 Ahmed35 Roof Spoiler 0: Κατανομή πίεσης πάνω στο μοντέλο του αυτοκινήτου με αεροτομή.



Σχ. 4.26 Ahmed35 Roof Spoiler 0: Κατανομή πίεσης πάνω στο μοντέλο του αυτοκινήτου χωρίς αεροτομή.



Σχ. 4.27 Ahmed35 Roof Spoiler 0: Γραμμές ροής γύρω από το σώμα.

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.25 και 4.26 συμπεραίνουμε ότι με την τοποθέτηση της αεροτομής διορθώθηκε το πρόβλημα της έντονης υποπίεσης που δημιουργούνταν στην ακμή όπου ενώνεται το πάνω επίπεδο με το πίσω κεκλιμένο του σώματος, στο σημείο δηλαδή όπου βρίσκεται η αεροτομή. Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ροής, όπου φαίνεται να υπάρχει μία πολύ μικρή μείωση του συντελεστή αντίστασης. Αντιθέτως ο συντελεστής άνωσης μειώνεται αρκετά και μάλιστα παίρνει αρνητικές τιμές γεγονός που κάνει το όχημα σταθερότερο.

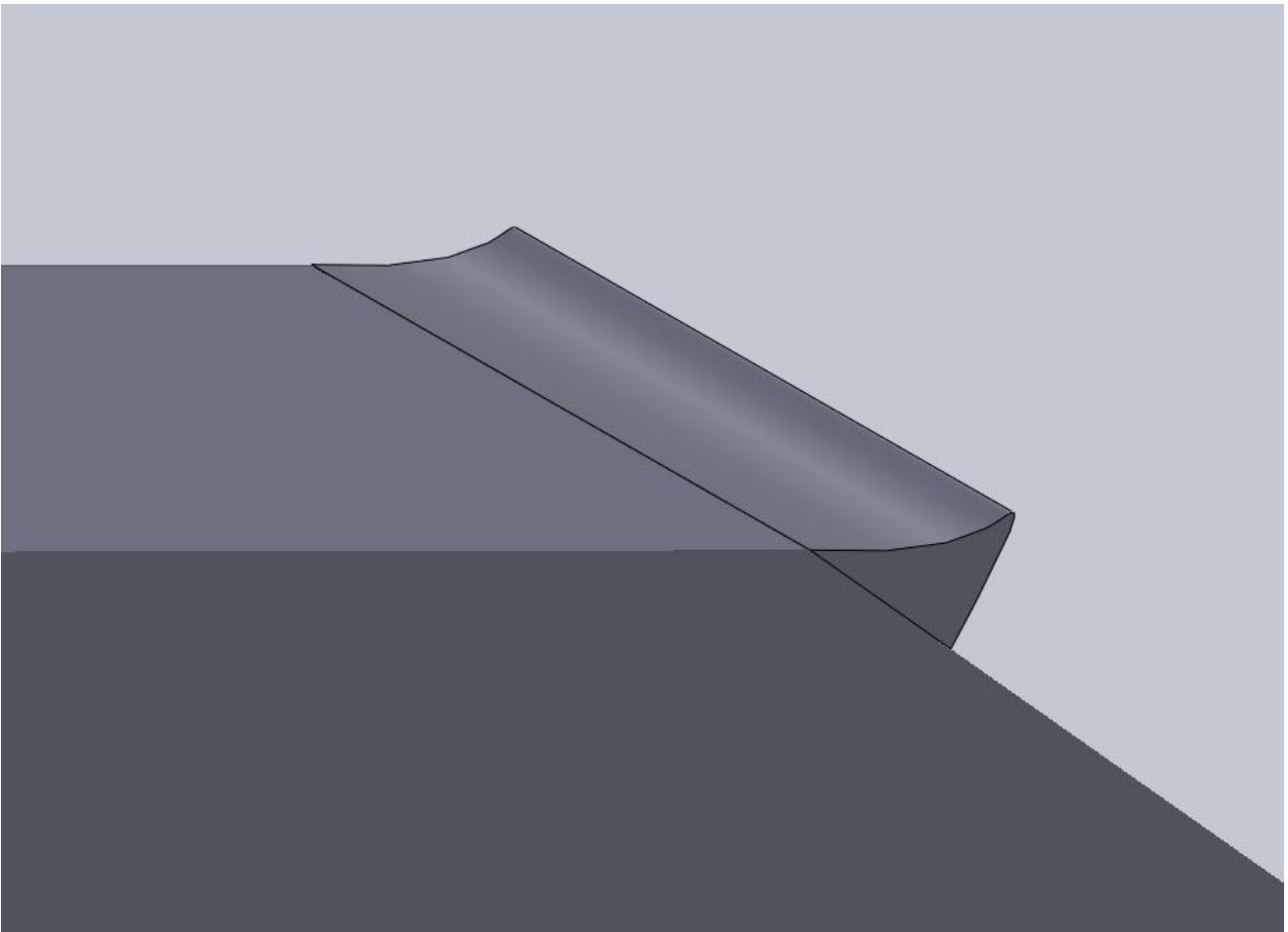
	Ahmed35	Roof Spoiler 0
Cd	0.30	0.296
Cl	0.112	-0.024
Drag Force (N)	32.28	31.92
Lift Force (N)	12.09	-2.563

Πίνακας 4.7 Ahmed35 Roof Spoiler 0: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων .

Ahmed 35 Roof Spoiler 10

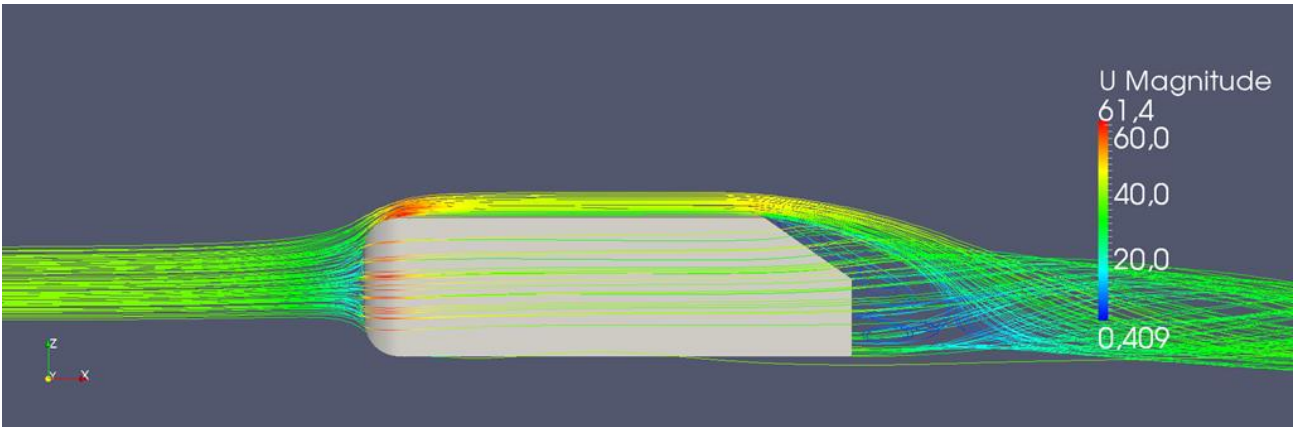
Για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος για τη συγκεκριμένη περίπτωση έγιναν οι επιπλέον ρυθμίσεις:

- Το επίπεδο πυκνότητας του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής ρυθμίστηκε σε 7, ελάχιστο, και σε 8, μέγιστο.
- Στον κώδικα SnappyHexMesh και ειδικότερα στην περιοχή SnapControls έγινε επιλογή να αυξηθούν οι επαναλήψεις από έξι (6) σε οχτώ (8), έτσι ώστε να γίνει καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος πάνω στις επιφάνειες των σωμάτων,
- Οι πλεγματικές διαστρωματώσεις γύρω από την αεροτομή ρυθμίστηκαν σε τρεις (3).
- Ο κώδικας SnapEdge χρησιμοποιήθηκε μόνο για το κυρίως σώμα και όχι για την αεροτομή, καθώς δεν κρίθηκε απαραίτητο λόγω του ότι το πλέγμα πάνω και γύρω από αυτή ήταν το επιθυμητό.
- Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από 1.879.000 κελιά ενώ η αριθμητική επίλυση της ροής ολοκληρώθηκε σε 7.75 h.

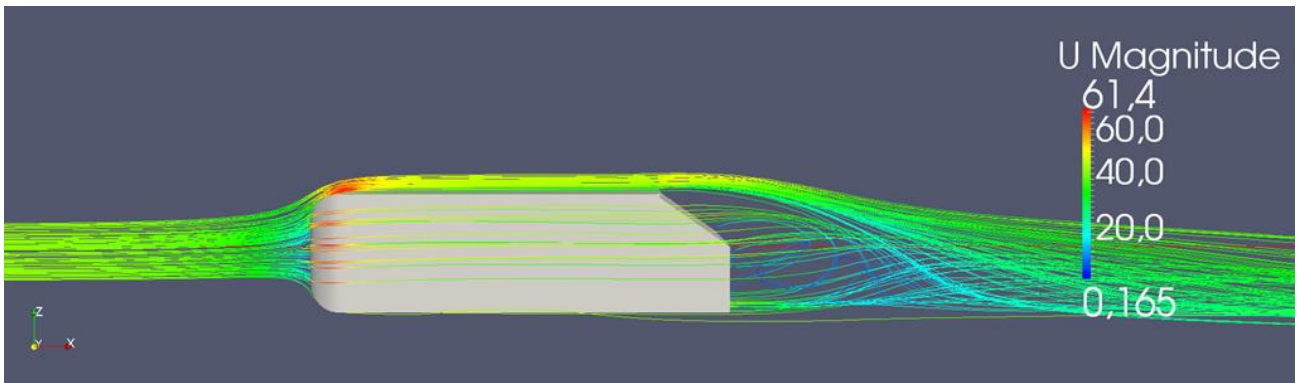


Σχ. 4.28 Ahmed35 Roof Spoiler 10: Τριδιάστατη αναπαράσταση του οχήματος με τη μελετούμενη αεροτομή.

Στα σχήματα 4.29 & 4.30 φαίνεται η μείωση του φαινομένου της ανακυκλοφορίας της ροής γεγονός που οφείλεται στην εξομάλυνση της ροής από τη χρήση της αεροτομής.



Σχ. 4.29 Ahmed35: Γραμμές ροής γύρω από το σώμα.

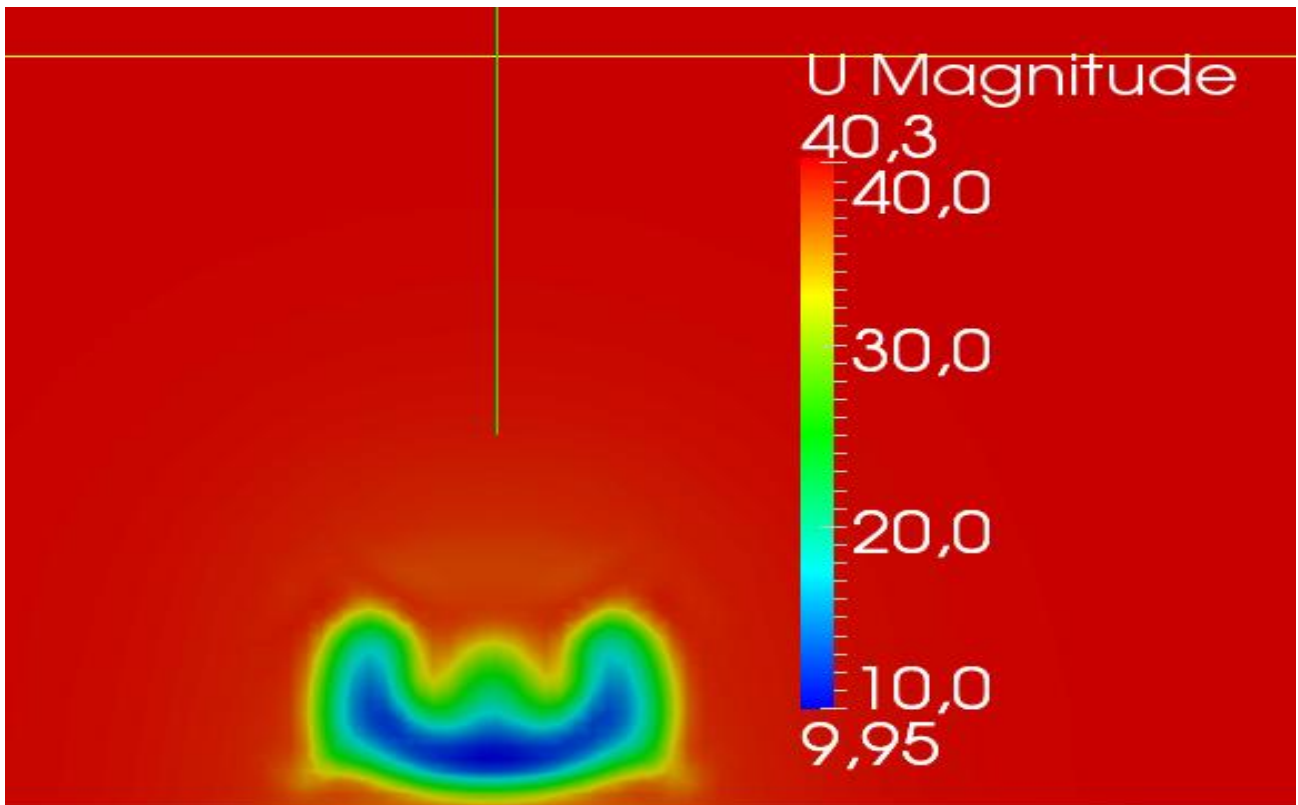


Σχ. 4.30 Ahmed35 Roof Spoiler 10: Γραμμές ροής γύρω από το σώμα.

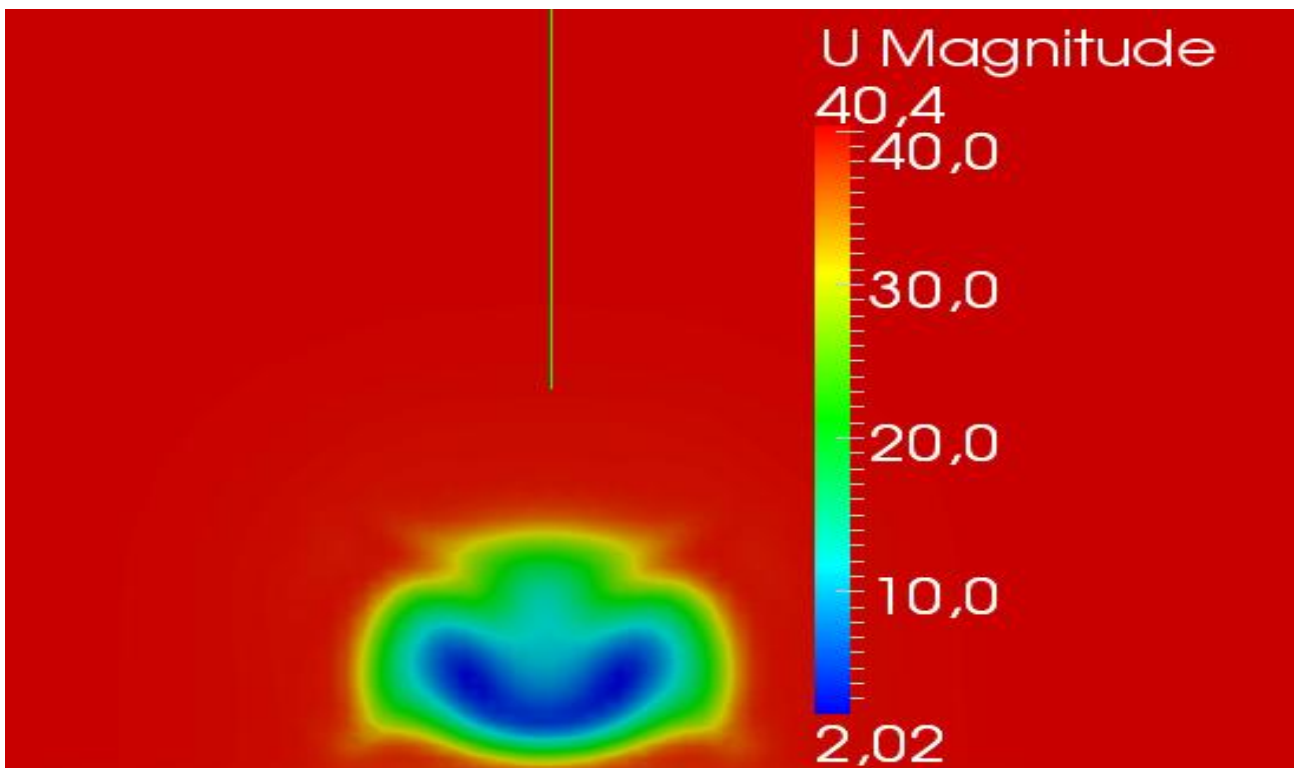
Παρατηρώντας τα σχήματα 4.31 και 4.32 φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι οι στρόβιλοι που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του οχήματος είναι αισθητά πιο μικροί και σε ένταση και σε μέγεθος. Επιπλέον βλέποντας και τα αποτελέσματα (πίνακας 4.8) που προκύπτουν από την επίλυση της ροής, καταλαβαίνουμε ότι η χρήση της αεροτομής επηρεάζει πολύ περισσότερο τον συντελεστή άνωσης από τον αντίστοιχο της οπισθέλκουσας. Πρακτικά η αντίσταση που δέχεται το σώμα από τον αέρα κατά την κίνησή του παραμένει σχεδόν ίδια όμως η δύναμη αρνητικής άνωσης αυξάνει πολύ με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ευστάθεια του αυτοκινήτου.

	Ahmed35	Ahmed35 Roof Spoiler 10
Cd	0.30	0.305
Cl	0.112	-0.099
Drag Force (N)	32.28	32.87
Lift Force (N)	12.09	-10.71

Πίνακας 4.8 Ahmed35 Roof Spoiler 10: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων .



Σχ. 4.31 Ahmed35: Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου της ροής, απόσταση 40 cm από το σώμα.

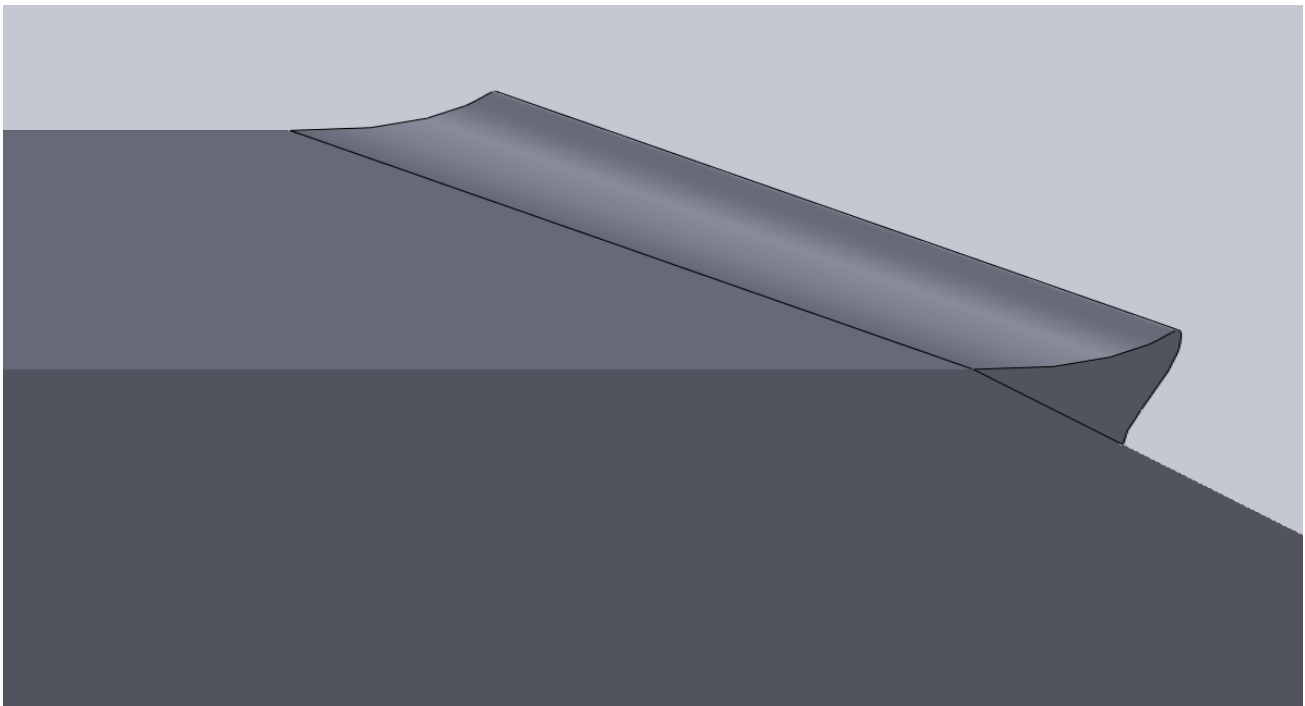


Σχ. 4.32 Ahmed35 Roof Spoiler 10: Ίχνη των στροβίλων του ομόρρου της ροής, απόσταση 40 cm από το σώμα.

Ahmed 35 Roof Spoiler 15

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και σε αυτή εδώ έγιναν κάποιες επιπλέον ρυθμίσεις προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο υπολογιστικό πλέγμα για την επίλυση της ροής. Εκτός λοιπόν από τις συνηθισμένες ρυθμίσεις έγιναν και κάποιες άλλες ώστε να γίνει καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος στη νέα γεωμετρία,

- Αρχικά αυξήθηκαν τα όρια του refinement level (επίπεδο πυκνότητας πλέγματος) στην επιφάνεια της αεροτομής σε 7, ελάχιστο, και 8, μέγιστο. Η αρχική ρύθμιση ήταν 5 και 6 αντίστοιχα.
- Οι επαναλήψεις του κώδικα SnappyHexMesh που ελέγχουν την προσαρμογή του πλέγματος στις επιφάνειες των 2 σωμάτων αυξήθηκαν από 6 σε 8.
- Οι πλεγματικές διαστρωματώσεις που δημιουργήθηκαν γύρω από την αεροτομή ορίστηκαν σε τρεις 3.
- Δεν έγινε χρήση του κώδικα SnapEdge για την αεροτομή αλλά μόνο για το κύριο σώμα.
- Η επίλυση της ροής ολοκληρώθηκε σε 7,18 h ενώ το μέγεθος του πλέγματος ήταν 1.888.000 κελιά.

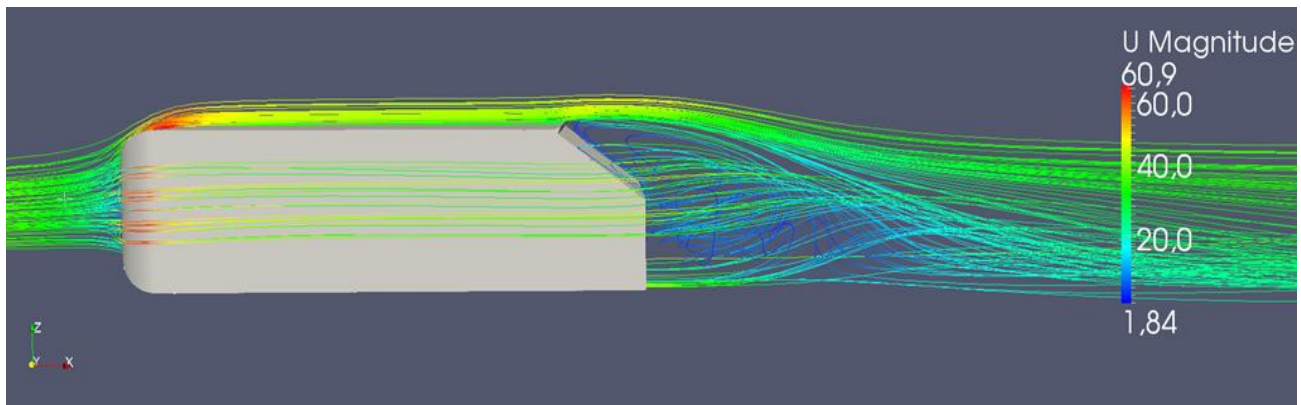


Σχ. 4.33 Ahmed35 Roof Spoiler 15: Τριδιάστατη αναπαράσταση του οχήματος με τη μελετούμενη αεροτομή.

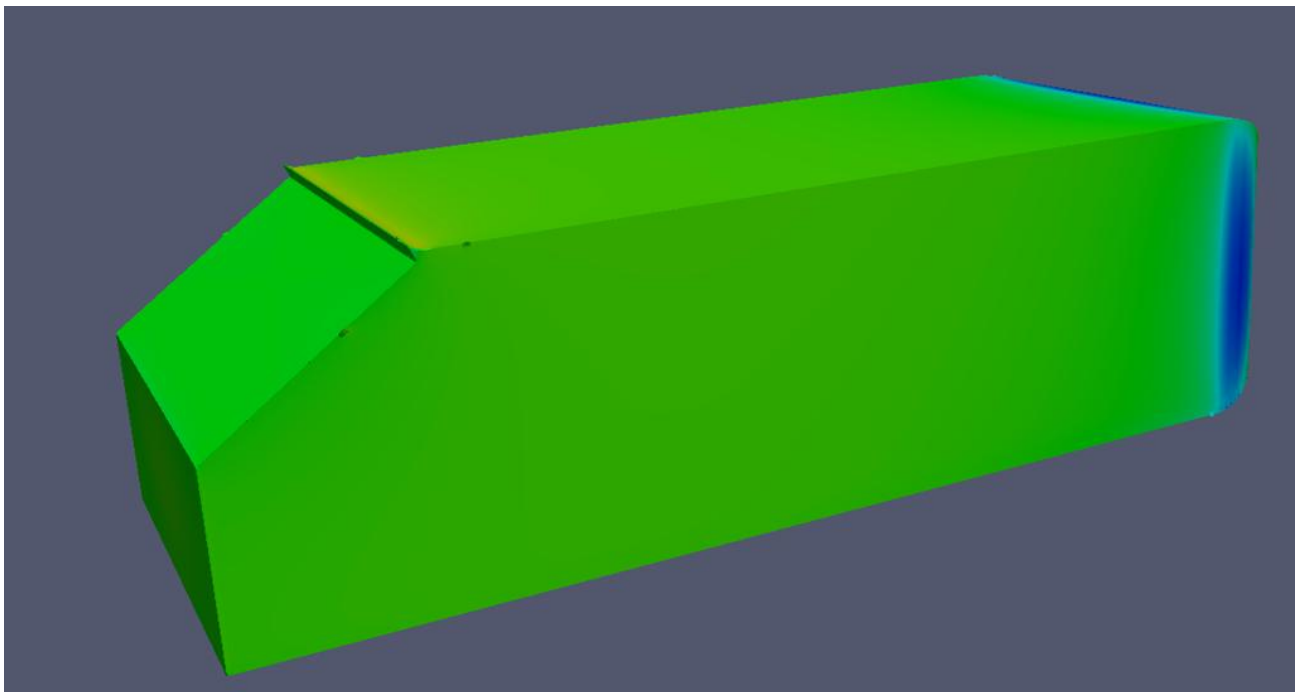
Τα αποτελέσματα (πίνακας 4.9) που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση της ροής ήταν αναμενόμενα. Διαπιστώθηκε μία πολύ μικρή αύξηση του συντελεστή αντίστασης που οφείλεται στο γεγονός ότι αυξήθηκε η επιφάνεια του σώματος που συναντά κάθετα η ροή του αέρα. Επίσης ο συντελεστής άνωσης μειώθηκε ακόμα περισσότερο με αποτέλεσμα να έχει αρνητικές τιμές. Επομένως στην περίπτωση αυτή έχουμε μία πολύ μικρή αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας αλλά και μία αρκετά μεγάλη μείωση του συντελεστή άνωσης, γεγονός που κρίνει την χρήση της αεροτομής επιτυχή καθώς τα πλεονεκτήματα υπερτερούν των μειονεκτημάτων.

	Ahmed35	Ahmed35 Roof Spoiler 15
Cd	0.30	0.315
Cl	0.112	-0.138
Drag Force (N)	32.28	33.95
Lift Force (N)	12.09	-14.86

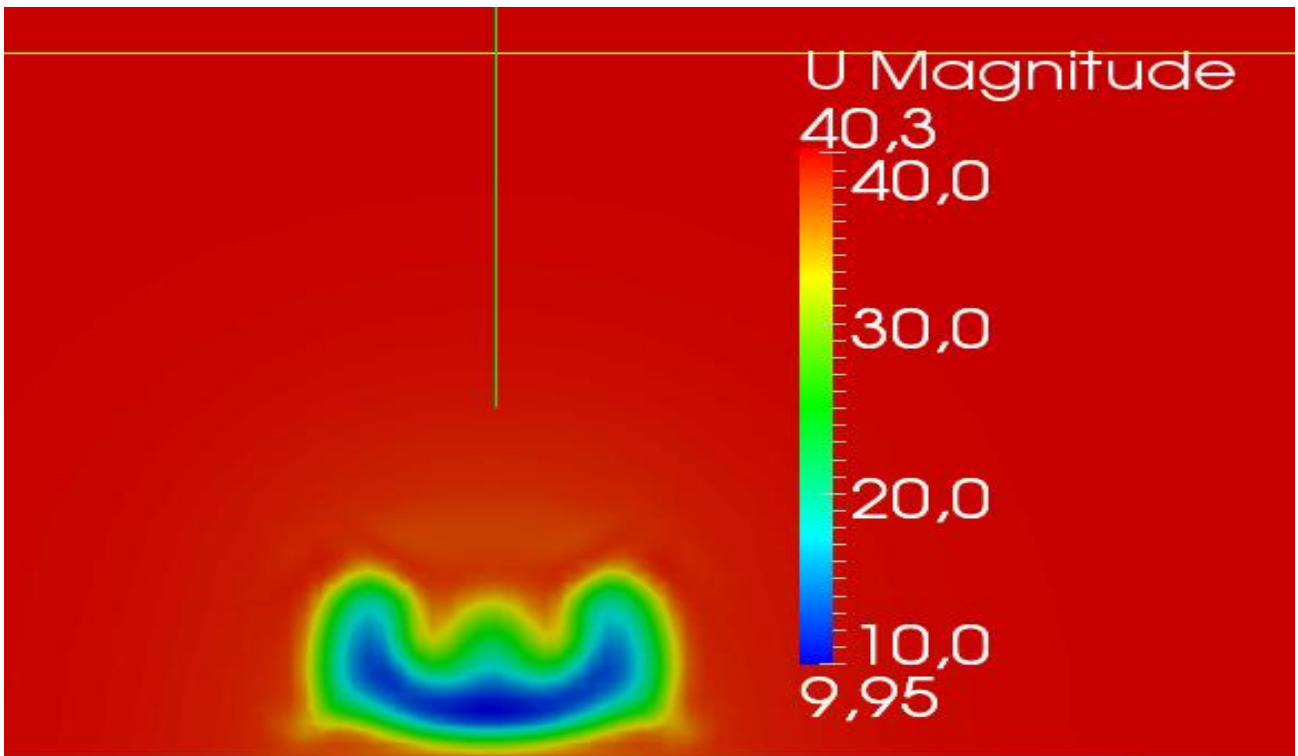
Πίνακας 4.9 Ahmed35 Roof Spoiler 15: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων.



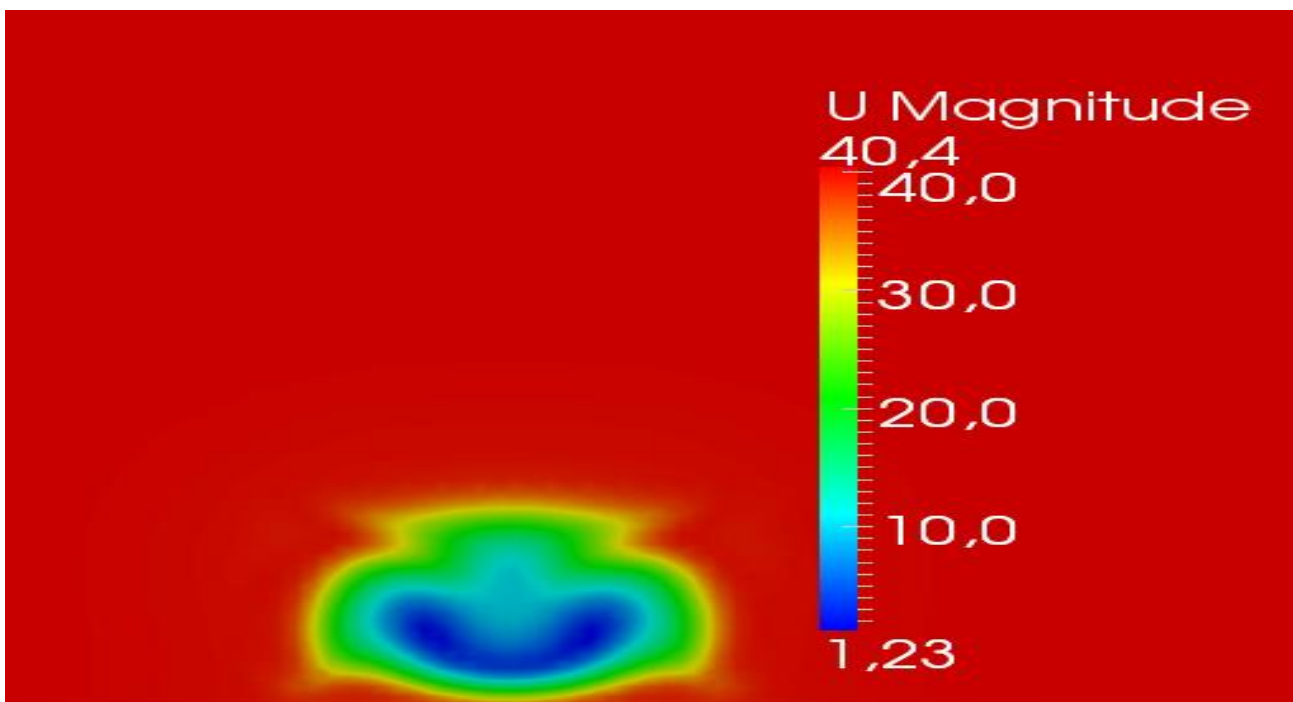
Σχ. 4.34 Ahmed35 Roof Spoiler 15: Γραμμές ροής γύρω από το σώμα.



Σχ. 4.35 Ahmed35 Roof Spoiler 15: Κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια του μελετούμενου μοντέλου.



Σχ. 4.36 Ahmed35: Στροβιλότητα του πεδίου ροής, απόσταση 40 cm από το σώμα.



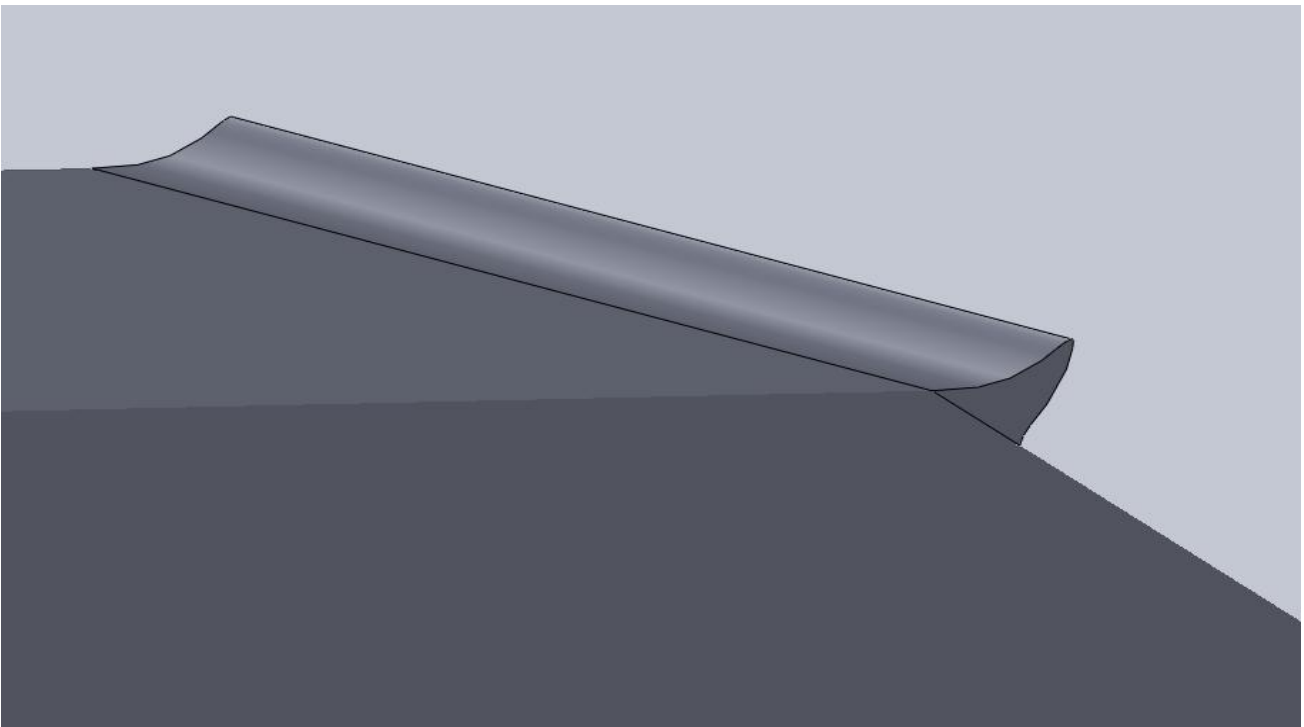
Σχ. 4.37 Ahmed35 Roof Spoiler 15: Στροβιλότητα του πεδίου ροής, απόσταση 40 cm από το σώμα.

Από το σχήμα 4.35 βλέπουμε ότι δεν υπάρχουν φαινόμενα υποπίεσης στην ακμή όπου τοποθετείται η αεροτομή ενώ στα σχήματα 4.36 & 4.37 φαίνεται η διαφορά στον ομόρρου της ροής σε απόσταση 40 cm από το σώμα, όπου οι στρόβιλοι έχουν μικρότερη ένταση και έκταση.

Ahmed 35 Roof Spoiler 20

Η τελευταία αεροτομή που δοκιμάστηκε στο Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 35° είχε γωνία κλίσης $\phi = 20^\circ$. Οι ρυθμίσεις που έγιναν σε αυτή την περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

- Το επίπεδο πυκνότητας του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής ρυθμίστηκε να κυμαίνεται μεταξύ του επιπέδου 5 και του επιπέδου 6.
- Οι πλεγματικές διαστρωματώσεις που δημιουργήθηκαν γύρω από την αεροτομή ρυθμίστηκαν σε τρεις (3).
- Ο κώδικας SnapEdge χρησιμοποιήθηκε για να ελαχιστοποιήσει τις ατέλειες του πλέγματος τόσο στην επιφάνεια της αεροτομής όσο και στην αντίστοιχη του μοντέλου αυτοκινήτου.
- Το πλέγμα αποτελείται από 1.823.500 εξαεδρικά κελιά και το υπολογιστικό κόστος για την επίλυση της ροής ανέρχεται σε 7,15 h.

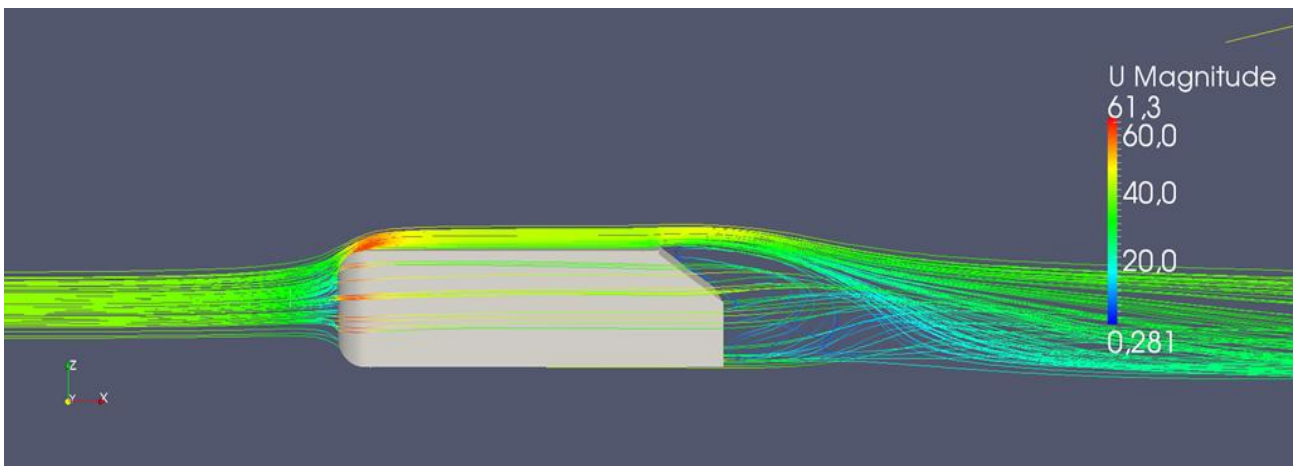


Σχ. 4.38 Ahmed35 Roof Spoiler20: Αναπαράσταση της μελετούμενης αεροτομής.

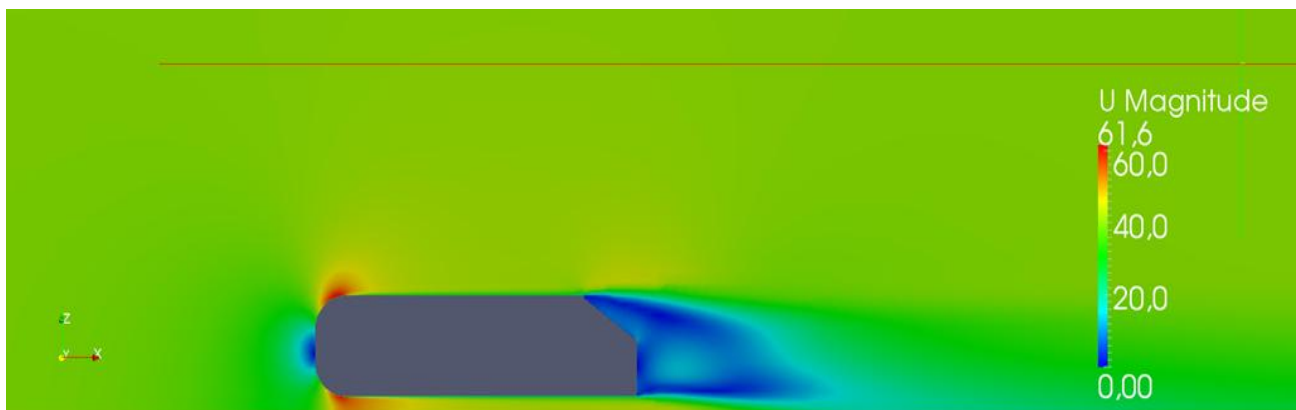
Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση της ροής. Ο συντελεστής αντίστασης είναι ελαφρώς αυξημένος σε σχέση με αυτόν του οχήματος χωρίς αεροτομή, ενώ ο συντελεστής άνωσης είναι κατά πολύ μειωμένος. Η αρνητική τιμή που λαμβάνει δείχνει ότι τα ανωστικά φαινόμενα έχουν πλέον εξαλειφθεί και η αεροτομή έχει προσδώσει αληθινά σταθερότητα στο όχημα. Λόγω αυτού του γεγονότος και επειδή η αύξηση της οπισθέλκουσας είναι ιδιαίτερα μικρή η χρήση της αεροτομής κρίνεται επιτυχημένη.

	Ahmed35	Ahmed35 Roof Spoiler 20
Cd	0.30	0.31
Cl	0.112	-0.119
Drag Force (N)	32.28	33.42
Lift Force (N)	12.09	-12.76

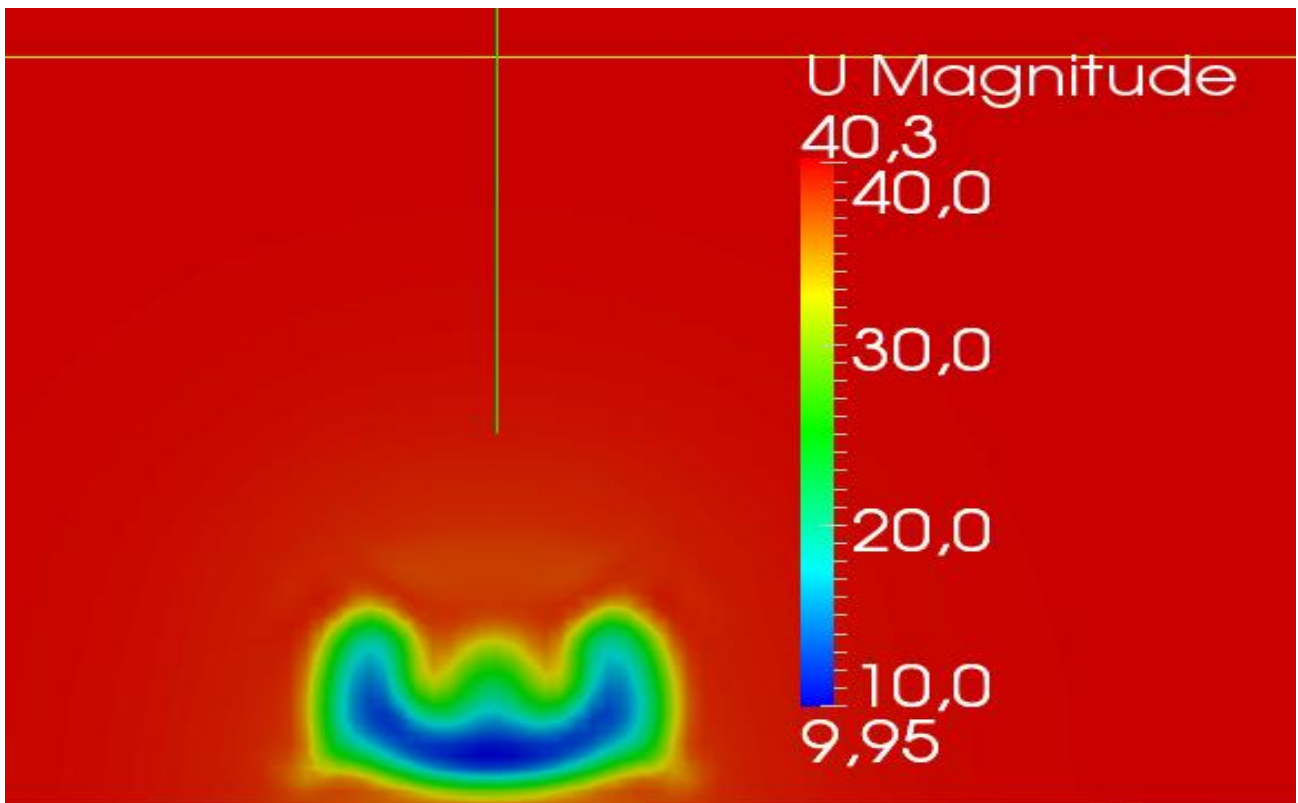
Πίνακας 4.10 Ahmed35 Roof Spoiler20: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων .



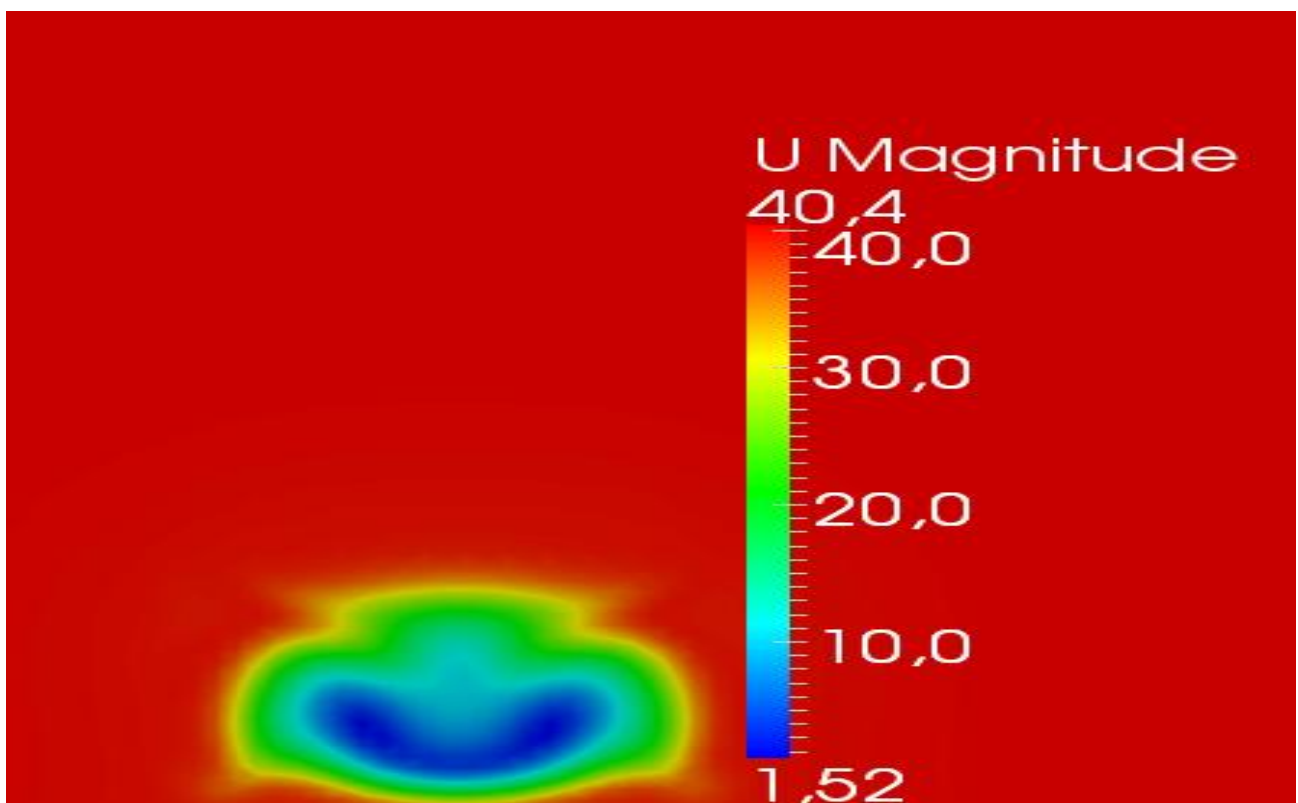
Σχ. 4.39 Ahmed35 Roof Spoiler20: Γραμμές ροής γύρω από το σώμα.



Σχ. 4.40 Ahmed35 Roof Spoiler20: Κατανομή της ταχύτητας, τομή στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ. 4.41 Ahmed35: : Ίχνη του πεδίου στρωβιλισμού στο επίπεδο x'x, απόσταση 40 cm από το σώμα.



Σχ. 4.42 Ahmed35 Roof Spoiler20: Ίχνη του πεδίου στρωβιλισμού στο επίπεδο x'x, απόσταση 40 cm από το σώμα.

Στον επόμενο πίνακα (πίνακας 4.11) βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα από τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Παρατηρείται αρχικά ότι ο συντελεστής αντίστασης παραμένει ουσιαστικά σταθερός, έχει μικρές διακυμάνσεις σε σχέση με την αρχική περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται αεροτομή, ενώ ο συντελεστής άνωσης μειώνεται πάρα πολύ. Ουσιαστικά λοιπόν στο Ahmed Body με πίσω κεκλιμένο επίπεδο 35° η χρήση της αεροτομής δεν επηρεάζει σημαντικά τη δύναμη οπισθέλκουσας αλλά τη δύναμη άνωσης, μειώνοντας δραστικά τα ανωσικά φαινόμενα και προσδίδοντας την απαιτούμενη πρόσφυση με το έδαφος, βελτιώνοντας κατά πολύ την σταθερότητα του αυτοκινήτου.

	Cd	Cl	Drag Force (N)	Lift Force (N)
Ahmed35	0.30	0.112	32.28	12.09
Roof Spoiler 0	0.296	-0.024	31.92	-2.563
Roof Spoiler 10	0.305	-0.099	32.87	-10.71
Roof Spoiler 15	0.315	-0.138	33.95	-14.86
Roof Spoiler 20	0.31	-0.119	33.42	-12.76

Πίνακας 4.11 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για Ahmed με γωνία slant 35°.

5. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Πρώτος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία και η αξιολόγηση ενός υπολογιστικού πλέγματος γύρω από πολύπλοκες τριδιάστατες γεωμετρίες. Το υπολογιστικό αυτό πλέγμα δημιουργήθηκε με τη χρήση δύο εργαλείων του SnappyHexMesh του πλεγματοποιητή δηλαδή του OpenFoam, και του SnapEdge ενός νέου κώδικα που δεν ανήκει στο λογισμικό πακέτο του OpenFoam αλλά με δυνατότητα συνεργασίας με αυτό. Όπως έχει αναφερθεί και στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας ο κώδικας SnappyHexMesh έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα αρκετά ικανοποιητικό πλέγμα γύρω από 3D γεωμετρίες. Στα πλεονεκτήματα του είναι ότι είναι αρκετά εύχρηστος, ακόμα και για κάποιον νέο χρήστη, παρόλα αυτά η εμπειρία στη δημιουργία πλεγμάτων είναι ένας παράγοντας που χρειάζεται για την επίτευξη ενός αξιόπιστου πλέγματος. Ο βαθμός ελέγχου του κώδικα από το χρήστη είναι αρκετά ικανοποιητικός, καθώς επίσης και η ταχύτητα εκτέλεσης του κώδικα είναι αρκετά μεγάλη, αφού η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος γύρω από το Ahmed Body, το οποίο αποτελείται από 2.000.000 κελιά περίπου, διαρκούσε 15 λεπτά.

Ωστόσο, παρουσιάζονται και κάποια μειονεκτήματα στη μορφή του πλέγματος που προκύπτουν από τη χρήση του. Παρατηρείται μια απόκλιση από τη γεωμετρία του σώματος ιδιαίτερα στις περιοχές όπου υπάρχουν έντονες ακμές ή καμπύλες επιφάνειες. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κελιά που βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια του σώματος στις συγκεκριμένες περιοχές εμφανίζουν μία ενδιάμεση κλίση διαφορετική από αυτήν της επιφάνειας.

Αυτό ακριβώς το πρόβλημα καλείται να λύσει ο κώδικας SnapEdge, ο οποίος εξαφανίζει την διαφορετική κλίση που παρατηρείται στα προβληματικά κελιά με αποτέλεσμα να γίνεται σεβαστή η γεωμετρία του σώματος. Έτσι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των ανεπιθύμητων ανωμαλιών και ανομοιομορφιών του πλέγματος εξαλείφεται. Τα κατάλοιπα της διαδικασίας αυτής είναι ελάχιστα, αφού προκύπτουν κατά κύριο λόγο 3 με 4 ανωμαλίες σε ένα πλέγμα που αγγίζει τα 2.000.000 κελιά, που μπορούν να αγνοηθούν καθώς δεν επηρεάζουν τη αριθμητική επίλυση της ροής. Αφού λοιπόν διαπιστώθηκε ότι η ταυτόχρονη χρήση τους επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα από ότι η μεμονωμένη χρήση του SnappyHexMesh αποφασίστηκε να γίνει μία ακόμα έρευνα-στόχος.

Ο δεύτερος αυτός στόχος ήταν η προσπάθεια βελτίωσης της ροής γύρω από ένα απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου (Ahmed Body) με τη χρήση αεροτομής. Πρέπει να τονιστεί ότι δεν έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης, λ.χ. με έναν εξελικτικό αλγόριθμο παρόλο όλα τα σχετικά εργαλεία ήταν διαθέσιμα, καθώς κρίθηκε ασύμφορη για το σκοπό αυτής της εργασίας. Για την εύρεση μιας καλής λύσης και για καλύτερη αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων έγιναν δοκιμές με διαφορετικές αεροτομές. Ως παράγοντες βελτίωσης της ροής είχαν τεθεί η μείωση των συντελεστών άνωσης και αντίστασης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση αεροτομών οδήγησε σε μείωση της αντίστασης και της άνωσης στις περισσότερες από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, πίνακες 4.6 & 4.11. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του Ahmed Body με γωνία του πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25° , όπου η αεροτομή τοποθετήθηκε στο τέλος του συγκεκριμένου τμήματος, υπήρξε ταυτόχρονη μείωση των συντελεστών αντίστασης και άνωσης. Μάλιστα δε, στην περίπτωση όπου τοποθετήθηκε η αεροτομή με γωνία κλίσης 27° παρατηρήθηκε και η μεγαλύτερη βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής αντίστασης μειώθηκε κατά 8.8 % ενώ αντίστοιχα ο συντελεστής άνωσης μειώθηκε κατά 49.8 %.

Όπως έχει αναφερθεί, για τη βελτίωση της ροής γύρω από το Ahmed Body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 35° , η αεροτομή τοποθετήθηκε στην ακμή όπου ενώνεται το πάνω με το πίσω κεκλιμένο επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή κατά κύριο λόγο υπήρξε μικρή αύξηση του συντελεστή αντίστασης με ταυτόχρονα μεγάλη μείωση του συντελεστή άνωσης. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ο τελευταίος παίρνει αρνητικές τιμές. Συγκεκριμένα στη περίπτωση όπου τοποθετήθηκε η αεροτομή με γωνία κλίσης 15° υπήρξε η μεγαλύτερη αύξηση στο συντελεστή αντίστασης, περίπου 5 %, και η μεγαλύτερη μείωση αντίστοιχα στο συντελεστή άνωσης, περίπου 223%.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση της αεροτομής βελτίωσε την αεροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος καθώς σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν το όχημα απέκτησε καλύτερη πρόσφυση και μεγαλύτερη ευστάθεια λόγω μείωσης του συντελεστή άνωσης. Επίσης στις περισσότερες των περιπτώσεων υπήρξε και ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή αντίστασης, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση καυσίμου του οχήματος. Γενικά λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι η χρήση της αεροτομής κρίνεται επιτυχημένη.

Τελειώνοντας μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία που παρουσιάστηκε είναι άμεσα εφαρμόσιμη και σε πολυπλοκότερες γεωμετρίες αυτοκινήτων από αυτή που χρησιμοποιήθηκε εδώ χωρίς να αντιμετωπίσει κανείς ιδιαίτερη δυσκολία. Συνοψίζοντας, τονίζεται ότι η συνεργασία των δύο εργαλείων δεν αποτελεί πανάκεια αλλά έλυσε σε πολύ μεγάλο βαθμό τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι μοναδικός φραγμός, πέραν του υπολογιστικού κόστους, στη διαδικασία λύσης των προβλημάτων είναι ουσιαστικά η φαντασία και η θέληση του ίδιου του μηχανικού που καλείται να τα λύσει.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S.R. Ahmed, G. Ramm, Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, SAE-Paper 840300, (1984)
- [2] H. Lienhart, C. Stoots, S. Becker, Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model), DGLR Fach Symp. der AG STAB, Stuttgart University, 15-17 Nov., (2000)
- [3] Yunlong Liu, Alfred Moser, Numerical modeling of airflow over the Ahmed body (http://www.icaen.uiowa.edu/~me_160/Lab/CFDEFDahmed.pdf)
- [4] R. Strachan, K. Knowles and N. Lawson, Comparisons between CFD and experimental results for a simplified car model in wall proximity, Department of Aerospace, Power and Sensors Cranfield University, RMCS, Shrivenham,
- [5] OpenFOAM v1.7 User Guide (www.openfoam.com)
- [6] SnapEdge Installer (<http://openfoam.nequam.se/cases/snapEdge.tgz>)
- [7] Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 92-0439, (1992)
- [8] F. R. Menter., Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906 (1993)
- [9] Dominique Thevenin, Gabor Janiga, (Eds.): Optimization and Computational Fluid Dynamics, (2008)
- [10] P. Gillieron, F. Chometro : Modeling of stationary three dimensional separated flows around an Ahmed reference model. In: ESAIM Proceedings. Third International Work-shop on Vortex Flows and Related Numerical Methods, vol. 7, pp. 173-182 (1999)
- [11] G. Franck, N. Nigro, M. Storti, J. d'Elia : Numerical simulation of the Ahmed vehicle model near-wake. Int. J. Num. Meth. Fluids (in press) 2007
- [12] 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)
- [13] T. Han : Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity. AIAA Journal 27(9), 1213-1219 (1988)
- [14] 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)
- [15] Κωνσταντίνος Κοντογιάννης : Βελτιστοποίηση μορφής αυτοκινήτου με χρήση εξελικτικού αλγορίθμου και υπολογιστικής ρευστοδυναμικής , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2010)
- [16] F. R. Menter: "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, vol. 32, pp. 269-289. (1994)
- [17] Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική, Αθήνα (2006)
- [18] EASY v2.0 User's Manual (<http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY>)

- [19] Anderson, W.K. and Venkatakrishnan, V.: Aerodynamic design optimization on unstructured grids with a continuous adjoint formulation. AIAA Paper 1997-0643, 1997.
- [20] A.S Zymaris, D.I. Papadimitriou, K.C. Giannakoglou and C. Othmer : Adjoint wall functions: A new concept for use in aerodynamic shape optimization. Journal of Computational Physics, 229(13):5228 – 5245, 2010.
- [21] A. Jameson: Aerodynamic design via control theory. Journal of Scientific Computing,3:233–260, 1988.
- [22] Αλέξανδρος Ζυμάρης : Συζυγείς μέθοδοι για το σχεδιασμό μορφών με βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά σε στρωτές και τυρβώδεις ροές, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2010
- [23] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby : A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, 1998.
- [24] Eugene de Villiers : The Potential of Large Eddy Simulation for the Modeling of Wall Bounded Flows, 2006
- [25] OpenFoam wiki (forum): http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib_snapEdge

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αρχείο Ρυθμίσεων του BlockMesh

Το BlockMesh είναι ένα εργαλείο του OpenFoam το οποίο χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί το αρχικό πλέγμα-βάση πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί το τελικό υπολογιστικό πλέγμα. Το χωρίο αυτό λοιπόν είναι ανεξάρτητο από την γεωμετρία των σωμάτων που βρίσκονται μέσα σε αυτό, η δημιουργία του είναι πολύ εύκολη και πραγματοποιείται με την εντολή blockMesh. Παρακάτω παρατίθεται το αρχείο ρυθμίσεων που χρησιμοποιήθηκε μαζί με κάποιες απαραίτητες διευκρινήσεις.

```
/*-----*\
|=====|
| \\ / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration  | Version: 1.6                          |
| \\ / A nd        | Web:   http://www.openfoam.org         |
|  \\ V  M anipulation  |                                  |
\*-----*/
```

FoamFile

```
{
  version    2.0;
  format     ascii;

  root       "";
  case       "";
  instance   "";
  local      "";

  class      dictionary;
  object     blockMeshDict;
}
```

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

convertToMeters 1;

vertices // Ορισμός των συντεταγμένων των κορυφών του αρχικού ορθογωνικού χωρίου.

```
(
  (-4 -2 0) // Κορυφή 0 όπως ορίζονται στο σχήμα 1
  (10 -2 0) // Κορυφή 1
  (10 2.4 0) // Κορυφή 2
  (-4 2.4 0) // Κορυφή 3
  (-4 -2 2) // Κορυφή 4
  (10 -2 2) // Κορυφή 5
  (10 2.4 2) // Κορυφή 6
  (-4 2.4 2) // Κορυφή 7
);
```

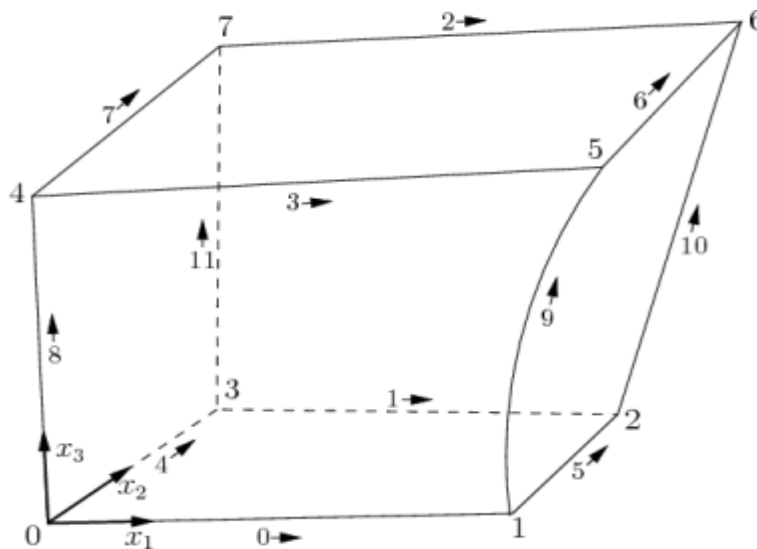
blocks

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

```
edges
(
);
```

```
patches // Ορισμός των διαφορετικών περιοχών του χωρίου, σχήμα 1.
(
  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)
  )
  patch floor // Περιοχή που αντιστοιχεί στο έδαφος.
  (
    (0 3 2 1)
  )
  symmetryPlane roof // Περιοχή που αναπαριστά πάνω όριο του χωρίου.
  (
    (4 5 6 7)
  )
);
```

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



Σχ.1 Γεωμετρία ενός κελιού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Αρχείο ρυθμίσεων του SnappyHexMesh

Το εργαλείο του OpenFoam που χρησιμοποιείται για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος ονομάζεται SnappyHexMesh ενώ το αρχείου ρυθμίσεών του είναι το snappyHexMeshDict. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται από το χρήστη ώστε να ελέγχει τις παραμέτρους και να καθορίζει τις απαραίτητες εισόδους του κώδικα γένεσης του πλέγματος εξαέδρων. Παρακάτω παρατίθεται ένα τέτοιο αρχείο ρυθμίσεων που χρησιμοποιήθηκε στη δημιουργία του πλέγματος στην περίπτωση που είχε τοποθετηθεί στο σώμα η αεροτομή με κλίση 27°, μαζί με κάποια απαραίτητα σχόλια για την καλύτερη κατανόηση των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν.

```
/*-----* 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 (Οι δυνατές επιλογές είναι true, για να πραγματοποιηθεί η εντολή και false για να μην πραγματοποιηθεί)

```
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers true; // Προσθέτει τα επιπλέον στρώματα κελιών, είναι προαιρετικό.
```

```
// 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                                     // Στην περιοχή αυτή προσδιορίζονται όλες οι επιφάνειες.
{
  ahmedbody.stl                             // Το προς μελέτη μοντέλο αυτοκινήτου.
  {
    type triSurfaceMesh;
    name ahmedbody;
  }
  road.stl                                  // Η επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε ως δρόμος.
  {
    type triSurfaceMesh;
    name road;
  }
  rearSpoiler.stl                          // Η μελετούμενη αεροτομή.
  {
    type triSurfaceMesh;
    name rearSpoiler;
  }
  refinementBox3                           // Καθορισμός των περιοχών όπου έγινε περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος. Έχουν
  {                                         οριστεί τέσσερις περιοχές. Ο ορισμός τους γίνεται δίνοντας τις συντεταγμένες 2
    type searchableBox;                   σημείων, ενός ελαχίστου και ενός μεγίστου.
    min (-2.5 -1.5 0.0);
    max ( 10  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);
  }
};

```

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

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

```
// Resolve sharp angles // Επιλέγεται η γωνία πέραν της οποίας χρησιμοποιείται το μέγιστο επίπεδο
resolveFeatureAngle 20; 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 από πριν περιοχές.
{
  refinementBox // Στο χωρίο αυτό επιλέγεται επίπεδο 3.
  {
    mode inside;
    levels ((1E15 3));
  }
}
```



```

    refinementBox2      // Στο χωρίο αυτό επιλέγεται επίπεδο πυκνότητας 2.
    {
    mode inside;
    levels ((1E15 2));
    }
    refinementBox3      // Στο χωρίο αυτό επιλέγεται επίπεδο πυκνότητας 1.
    {
    mode inside;
    levels ((1E15 1));
    }
    wakeBox              // Στο χωρίο αυτό επιλέγεται επίπεδο πυκνότητας 4.
    {
    mode inside;
    levels ((1E15 4));
    }
    ahmedbody           // Σε απόσταση 0.15m από το σώμα επιλέγεται επίπεδο 4 ενώ σε απόσταση 0.05m επίπεδο
    πυκνότητας 4.
    {
    mode distance;
    levels ((0.05 5) (0.15 4));
    }
}

// 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); // Το διάνυσμα αυτό καθορίζει ποια περιοχή, εντός η εκτός του σώματος, του
πλέγματος θα κρατηθεί ανάλογα με το που βρίσκεται το πέρας του.
}

// Settings for the snapping. Εδώ ελέγχονται οι ρυθμίσεις 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 υπολο-
    γιστικό πλέγμα στις επιφάνειες των σωμάτων.
    nSmoothPatch 6;

    //- 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 το 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 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; // Οι τιμές που δίνονται σε αυτή την περιοχή υπερισχύουν των
            // τιμών που δίνονται παρακάτω.
            expansionRatio 1.3; // Λόγος πάχους των στρωμάτων κελιών.
        }
        ahmedbody_ahmed25
        {
            nSurfaceLayers 3; // Αριθμός επιπλέον στρωμάτων κελιών.
        }
        rearSpoiler_rearSpoiler
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
    }

    // 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 επαναλήψεων κατά τη διάρκεια τοποθέ-
της των πλεγματικών διαστρωματώσεων.
nLayerIter 15;
}

```

// Generic mesh quality settings. At any undoable phase these determine // 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.

```

// where to undo.
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 SnapEdge

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται ένα υπόδειγμα αρχείου ρυθμίσεων του κώδικα SnapEdge που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιήθηκε για να εξαλειφθούν τα προβλήματα που παρουσιάζονται στο υπολογιστικό πλέγμα μετά την εκτέλεση του SnappyHexMesh. Στο αρχείο ρυθμίσεων του SnapEdge υπάρχουν ήδη αρκετές επεξηγήσεις για κάθε πιθανή επιλογή του χρήστη και απλά επισημαίνονται οι πιο σημαντικές.

```
/*-----* 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; // Στοιχεία του αρχείου, όπως η μορφή του, η έκδοσή του κλπ.
    format ascii;
    class dictionary;
    location "constant";
    object snapEdgeDict;
}

snapPatches // Ορίζονται τα σώματα που θα επεξεργαστούν από το κώδικα, εδώ το μοντέλο αυτοκινή-
του και η αεροτομή.

(
    ahmedbody_ahmed25 // Το απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου.
    rearSpoiler_rearSpoiler // Η αεροτομή.
);

snapZones
(
);

// must reside in the case directory (just create a soft-link to the stl in constant/triSurface)
stlFileNames
(
    ahmedbody.stl // Ορίζονται τα ονόματα των συμβολικών συνδέσεων των αρχείων *.stl των σωμάτων τα οποία θα
χρησιμοποιηθούν από τον κώδικα.
    rearSpoiler.stl
);

// only move those points that are closer to the features than the tolerance*| edge length | Καθορισμός των σημείων
τα οποία θα μεταφερθούν.
tolerance 1.0;

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

```

// number of iterations to move points towards edge // Αριθμός των επαναλήψεων που καθορίζει πόσες φορές θα
// γίνει μεταφορά των σημείων.
nIterations 2;

// 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;

```

Υπολογισμός των συντελεστών αντίστασης και άνωσης μέσω του OpenFoam

Το OpenFoam δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζονται σε κάθε χρονική επανάληψη οι δυνάμεις αντίστασης και άνωσης καθώς και οι αντίστοιχοι αδιάστατοι συντελεστές (Cd, Cl). Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης "libForces.so". Η βιβλιοθήκη αυτή μπορεί να κληθεί μέσω του αρχείου controlDict, στο οποίο επίσης δίνονται από το χρήστη σχετικές ρυθμίσεις με την επίλυση της ροής, με τον παρακάτω τρόπο.

```
/*-----*. C++ *-----*\
|=====|
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 1.6 |
| \\ / A nd | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \\ \V M anipulation |
\*-----*/
```

```
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  object controlDict;
}
// ***** //

application simpleFoam; // Ο κώδικας επίλυσης της ροής.

startFrom latestTime;

startTime 0;

stopAt endTime;

endTime 2500; // Αριθμός επαναλήψεων.

deltaT 1;

writeControl timeStep;

writeInterval 500; // Ο αριθμός αυτός δηλώνει κάθε πόσες επαναλήψεις θα αποθηκεύονται τα αποτελέσματα.

purgeWrite 2;

writeFormat ascii; // Δηλώνεται η μορφή του αρχείου.

writePrecision 6; // Η ακρίβεια στα αποτελέσματα.

writeCompression compressed;

timeFormat general;

timePrecision 6;
```

```

runTimeModifiable yes;
functions
{
forces
{
type forces;
functionObjectLibs ( "libforces.so" ); // lib to load
outputControl timeStep;
outputInterval 1;
patches
// Εισάγονται τα αρχεία των σωμάτων.
(
ahmedbody_ahmed25 // change to your patch name
//rearSpoiler_rearSpoiler
);
// name of fields
//ρName p;
//UName U;
log true; // dump to file
rhoInf 1.2; // Πυκνότητα του αέρα.
rhoName rhoInf;
CofR ( 0 0 0 );
}

forcesCoeffs
{
type forceCoeffs;
functionObjectLibs ( "libforces.so" ); // lib to load
outputControl timeStep;
outputInterval 1;
patches
(
ahmedbody_ahmed25 // change to your patch name
//rearSpoiler_rearSpoiler
);
// name of fields
//ρName p;
//UName U;
log true; // dump to file
rhoInf 1.2;
rhoName rhoInf;
CofR ( 0 0 0 );
liftDir ( 0 0 1 ); // Κατεύθυνση της δύναμης άνωσης
dragDir ( 1 0 0 ); // Κατεύθυνση της δύναμης αντίστασης.
pitchAxis ( 0 0 0 );
magUInf 40; // Ταχύτητα εισόδου, είναι η ταχύτητα της ροής.
lRef 1.044; // Μήκος αναφοράς ή αλλιώς το μήκος του σώματος (Ahmed Body).
Aref 0.112032; // Εμβαδόν της μετωπικής επιφάνειας του σώματος.

}
}

// ***** //

```


Παράρτημα Ε

Εξισώσεις του μοντέλου τύρβης SST k-omega

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται οι εξισώσεις του μοντέλου τύρβης δύο εξισώσεων SST (shear – stress transport) k-ω [8],[16] που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική επίλυση της ροής από το λογισμικό πακέτο OpenFoam. Το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης είναι συνδυασμός δύο διαφορετικών μοντέλων τύρβης.

- του k-ω για την εσωτερική περιοχή του οριακού στρώματος
- και του k-ε για οπουδήποτε αλλού.

Το k είναι η τυρβώδης κινητική (kinetic energy) ενέργεια ενώ το ω είναι η ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (turbulent frequency).

Οι εξισώσεις του μοντέλου είναι οι παρακάτω:

$$1) \quad \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k * v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$2) \quad \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{vt} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega * v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Οι σταθερές του μοντέλου υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2 \quad \text{όπου η ποσότητα } \varphi_1 \text{ αντιστοιχεί στην εκάστοτε σταθερά του k-}\omega$$

και η ποσότητα φ_2 στις αντίστοιχες του k-ε

Επίσης ισχύουν και τα παρακάτω για τις σταθερές για το k -ω:

$$\sigma_{\kappa 1} = 0.85$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0.5$$

$$\beta_1 = 0.0750$$

$$\alpha_1 = 0.31$$

$$\beta^* = 0.09$$

$$\kappa = 0.41$$

$$\gamma_1 = \beta_1 / \beta^* - \sigma_{\omega 1} \kappa^2 / \beta^*$$

Για την τυρβώδη συνεκτικότητα ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)}, \quad \text{όπου } F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad \text{και} \quad \arg_2^2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 v}{y^2 \omega}\right)$$

Ενώ για το κ-ε ισχύουν τα παρακάτω:

$$\sigma_{k2} = 1.0$$

$$\sigma_{\omega 2} = 0.856$$

$$\beta_2 = 0.0828$$

$$\beta^* = 0.09$$

$$\kappa = 0.41$$

$$\gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega 2} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*}$$

Ενώ η συνάρτηση F_1 ορίζεται ως εξής:

$$F_1 = \tan(\arg_1^4) \quad \arg_1 = \min(\max(\frac{\sqrt{\kappa}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega}); \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2})$$

Όπου y είναι η απόσταση από την επόμενη επιφάνεια και το CD ισούται με :

$$CD_{k\omega} = \max(2\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20})$$

και τέλος η τυρβώδης συνεκτικότητα :

$$\nu_t = \frac{k}{\omega}$$

Επίσης ισχύει:

$$\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \approx \frac{1}{2} \nu_t \left(\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right)^2$$