



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας ΡΕΥΣΤΩΝ

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

# **Βελτιστοποίηση μορφής αυτοκινήτου με χρήση εξελικτικού αλγορίθμου και υπολογιστικής ρευστοδυναμικής**

Διπλωματική Εργασία

**Κωνσταντίνος Κοντογιάννης**

*Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ*

*Αθήνα, 2010*



## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας ΡΕΥΣΤΩΝ

# Βελτιστοποίηση μορφής αυτοκινήτου με χρήση εξελικτικού αλγορίθμου και υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Διπλωματική Εργασία του  
**Κοντογιάννη Κωνσταντίνου**

*Επιβλέπων: Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ*  
*Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών,*  
*Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ)*

### Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιείται και αυτοματοποιείται μια μέθοδος αεροδυναμικής ανάλυσης (με λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής) και, στη συνέχεια, μια διαδικασία βελτιστοποίησης (με λογισμικό εξελικτικών αλγορίθμων) μιας απλοποιημένης μορφής αυτοκινήτου. Πρόκειται για μια χαρακτηριστική περίπτωση-benchmark, ευρύτατα χρησιμοποιούμενη από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Η βελτιστοποίηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αεροδυναμικού συντελεστή αντίστασης του οχήματος. Παρά την απλοποιημένη γεωμετρία, το πρόβλημα της ανάλυσης και της βελτιστοποίησης (αλλά ακόμη και αυτό της γένεσης πλέγματος) παρουσιάζει αρκετή πολυπλοκότητα, ιδίως επειδή κατά τη βελτιστοποίηση απαιτείται να γίνονται οι διαδικασίες αυτόματα, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη-σχεδιαστή. Η εργασία παρουσιάζει με λεπτομέρειες όλα τα στάδια που απαιτούνται για την ανάλυση του προβλήματος ροής και τη βελτιστοποίηση.

Στην εργασία αυτή γίνεται, πρώτα, αξιολόγηση ενός νέου κώδικα γένεσης πλέγματος καθώς είναι μια από τις τελευταίες προσθήκες στο πακέτο λογισμικού ανοιχτού πηγαίου κώδικα OpenFOAM (Field Operation and Manipulation, ειδικό τμήμα του οποίου αναπτύσσεται πλέον από την ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ) το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης του σώματος. Μεταξύ άλλων, εντοπίζονται διαφορές στην πρόλεξη των ροϊκών φαινομένων από διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Πραγματοποιούνται και συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα για πιστοποίηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης υιοθετείται κατάλληλη παραμετροποίηση της μορφής του πίσω-κάτω μέρους του οχήματος, ώστε να προκύπτει μια απλοποιημένη μορφή διαχύτη, και αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές των έτσι οριζόμενων μεταβλητών σχεδιασμού με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY που έχει αναπτυχθεί από τη ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ.

ΑΘΗΝΑ 2010



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**

School of MECHANICAL ENGINEERING

Section of FLUIDS

# **Shape optimization of a simplified car geometry using evolutionary algorithms and computational fluid dynamics**

Diploma Thesis by  
**Kontogiannis Konstantinos**

*Advisor: K. C. Giannakoglou, Professor NTUA  
Laboratory of Thermal Turbomachines,  
Parallel Computational Fluid Dynamics & Optimization Unit (PCFD&O/NTUA)*

## Abstract

In this diploma thesis, an automatic process for the aerodynamic analysis (using CFD software) of a simplified car geometry is set up and, then, is also used for its shape optimization (by means of evolutionary algorithms). The problem studied is a popular benchmark case in car industries. The optimization task aims at minimizing the drag coefficient of the body. Despite the simplified shape of the body used, developing a quality mesh generation process and computing the characteristics of the flow is complex and computationally demanding, especially within an evolutionary optimization algorithm where all processes need to be automated and executed with no further human input. A complete presentation of all the necessary steps taken for the aerodynamic analysis and optimization process is given in this work.

Firstly, an evaluation of a relatively new mesh generation tool, included in the open source CFD software package OpenFOAM (Field Operation and Manipulation), takes place. OpenFOAM, part of which is co-developed by the PCFD&O/NTUA, is also used for solving the Navier-Stokes equations for the computation of the flow characteristics and drag coefficient of the body. Over and above, results using different turbulence models are compared with experimental data available. The design variables are defined so as to control the shape of a simplified diffuser formed at the rear-lower part of the vehicle. The EASY optimization software, developed by PCFD&O /NTUA, is used to seek their optimal values (yielding the optimal shape of the diffuser) for minimum drag.

ATHENS 2010

## Πρόλογος

Η δίψα για γνώση είναι το κύριο κίνητρο για τον πνευματικό και όχι μόνο, μόχθο των ανθρώπων. Η επιστημονική έρευνα αποτελεί μια από τις ποικίλες οδούς προς τη γνώση εν γένη, και φυσικά, απώτερος στόχος της εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας είναι η απόκτηση γνώσης. Είχα την μεγάλη τύχη το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας να είναι πάνω σε ένα αντικείμενο που με συνάρπαζε από μικρό, την αεροδυναμική αυτοκινήτων. Μάλιστα, μου δόθηκε η ευκαιρία να έρθω σε επαφή με όλα τα στάδια μιας αρκετά πολύπλοκης διαδικασίας η οποία μάλιστα, έστω και σε μια σχετικά απλοποιημένη μορφή, ήταν ολοκληρωμένη. Έτσι μέσα από την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής κατάφερα να αποκομίσω μια αίσθηση πληρότητας και ανταμοιβής για τον μόχθο που κατέβαλα.

Φυσικά όλα αυτά δεν θα ήταν δυνατά χωρίς τη βοήθεια και καθοδήγηση συγκεκριμένων ανθρώπων. Ανθρώπων υπεύθυνων και ευσυνείδητων που δεν δίστασαν να προσφέρουν τον προσωπικό τους χρόνο και την εργασία τους, προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μου όπως και της εργασίας άμεσα και έγκαιρα. Η αναφορά των ονομάτων τους και του έργου τους αποτελεί το ελάχιστο ευχαριστώ προς το πρόσωπό τους.

Θα ήθελα λοιπόν, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα: Τον καθηγητή κύριο Κυριάκο Χ. Γιαννάκογλου για την ιδέα του αντικειμένου της διπλωματικής, την υποστήριξη και καθοδήγηση του και το εξαιρετικό κλίμα επικοινωνίας. Τον Αλέξανδρο Ζυμάρη για την πολύτιμη βοήθεια του και τον χρόνο που μου αφιέρωσε, τόσο σε τεχνικά θέματα του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε όσο και στη σύνταξη του κειμένου. Την Βαρβάρα Ασούτη για την βοήθεια και τις πολύ χρήσιμες γνώσεις της σε σχέση με το λογισμικό βελτιστοποίησης που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο.

Υπομονετικοί και αταλάντευτοι υποστηρικτές σε όλες τις προσπάθειές μου για απόκτηση γνώσης και παιδείας εντός του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που ολοκληρώνονται με την παρούσα διπλωματική εργασία, υπήρξαν η μητέρα μου και οι δύο αδερφοί μου τους οποίους και ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου. Αφιερώνω την εργασία αυτή σε αυτούς και τον αγαπημένο μου πατέρα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b>	<b>3</b>
<b>Κεφάλαιο 2: Γένεση πλέγματος γύρω από απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου (Ahmed body)</b>	<b>7</b>
2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του Ahmed body	7
2.2 Περιγραφή μεθόδου γέννησης πλέγματος του κώδικα SnappyHexMesh	9
2.3 Δημιουργία πλέγματος για επίλυση ροής χρησιμοποιώντας μοντέλα τύρβης με συναρτήσεις τοίχου στο Ahmed body	14
<b>Κεφάλαιο 3: Επίλυση ροής και υπολογισμός συντελεστή αντίστασης του Ahmed body</b>	<b>27</b>
3.1 Χαρακτηριστικά ροής και οριακές συνθήκες	28
3.2 Επίλυση της ροής και σύγκριση μεταξύ δύο μοντέλων τύρβης	30
3.3 Μείωση του υπολογιστικού κόστους και επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης της ροής	37
<b>Κεφάλαιο 4: Βελτιστοποίηση μορφής προς μείωση του συντελεστή αντίστασης του Ahmed body</b>	<b>39</b>
4.1 Παραμετροποίηση στοιχείων γεωμετρίας του Ahmed body προς βελτιστοποίηση	39
4.2 Βελτιστοποίηση μορφής του Ahmed body με χρήση εξελικτικού αλγορίθμου	51
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – επίλογος</b>	<b>61</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>63</b>
<b>Παράρτημα Α – Αρχεία STL (stereolithography)</b>	<b>65</b>
<b>Παράρτημα Β – Αρχείο ρυθμίσεων κώδικα SnappyHexMesh</b>	<b>67</b>



# 1. Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια έχει καταστήσει τις υπολογιστικές μεθόδους επίλυσης επιστημονικών προβλημάτων αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας σχεδιασμού και ανάπτυξης νέων προϊόντων στη βιομηχανία, πέρα από την εξίσου σημαντική χρήση τους στον ερευνητικό τομέα μέσω του οποίου βελτιώνονται συνεχώς και οι ίδιες οι μέθοδοι. Ιδιαίτερα ο τομέας βελτιστοποίησης σχεδιασμού προϊόντων, που είναι κατά πολύ πιο απαιτητικός από την απλή επίλυση του επιστημονικού προβλήματος, μπορεί πλέον να εφαρμόζεται όχι μόνο σε απλά, αλλά και σε αρκετά πολύπλοκα προβλήματα. Ένας αρκετά χαρακτηριστικός τομέας στον οποίο χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μέθοδοι και μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι η αεροδυναμική οχημάτων. Η αεροδυναμική βελτιστοποίηση είναι κάτι που έχει απασχολήσει μηχανικούς αγωνιστικών ομάδων από τις αρχές ουσιαστικά του μηχανοκίνητου αθλητισμού, ενώ ειδικά τα τελευταία χρόνια έχει επηρεάσει σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό από ότι στο παρελθόν, και το σχεδιασμό του καθημερινού αυτοκινήτου στα πλαίσια πιο οικονομικών και “πράσινων” επιλογών.

Η υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από μορφές αυτοκινήτων έχει φτάσει σε αρκετά καλό επίπεδο και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας σχεδιασμού τους, όντας και αρκετά πιο οικονομικό από τις δοκιμές αποκλειστικά σε αεροσήραγγα (οι οποίες βέβαια είναι απαραίτητες). Ειδικότερα, αεροδυναμικά χαρακτηριστικά όπως ο συντελεστής αντίστασης, η παρουσία αρνητικής ή θετικής άντωσης αλλά και το κέντρο εφαρμογής αυτών των δυνάμεων επηρεάζουν σημαντικά τις επιλογές που γίνονται κατά το σχεδιασμό. Ο συντελεστής αντίστασης, στον οποίο παλαιότερα δινόταν περισσότερο βάση μόνο σε спор αυτοκίνητα για λόγους τελικής ταχύτητας, είναι πλέον πολύ σημαντικός σε όλα τα τροχοφόρα οχήματα στο πλαίσιο ενεργειών για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπής ρύπων στις οποίες έχει δώσει περισσότερη προσοχή η αυτοκινητοβιομηχανία κατά τη τελευταία δεκαετία. Όλα αυτά βέβαια είναι δυνατά λόγω της συνεχόμενης ανάπτυξης που παρατηρείται στα υπολογιστικά συστήματα, καθώς είναι δυνατό πλέον να λύνονται οι εξισώσεις Navier-Stokes για ροές μη-μόνιμες, και με αρκετά αξιόπιστα μοντέλα προσομοίωσης τύρβης γύρω από αρκετά πολύπλοκες γεωμετρίες και χρησιμοποιώντας πλέγματα

αποτελούμενα από αρκετά εκατομμύρια κελιά (πεπερασμένους όγκους). Αυτό έχει με τη σειρά του οδηγήσει στη δυνατότητα εφαρμογής αρκετά πιο απαιτητικών αυτοματοποιημένων μεθόδων βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, το μοναδικό υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ένας προσωπικός ηλεκτρονικός υπολογιστής, σχετικά τελευταίας τεχνολογίας αλλά η οποία είναι διαθέσιμη στην αγορά και ευρέως χρησιμοποιούμενη από κάθε είδους μέσους καταναλωτές. Φυσικά, η υπολογιστική ισχύς είναι αρκετά περιορισμένη σε σχέση με σύγχρονους υπερυπολογιστές ή δίκτυα που δίνουν τη δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας, και έτσι αντίστοιχα περιορίστηκε και η λεπτομέρεια και ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τα οποία παρόλα αυτά είναι σε πάρα πολύ ικανοποιητικό επίπεδο για την παρούσα εργασία.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης που θα βασίζεται στους εξελικτικούς αλγορίθμους. Η βελτιστοποίηση με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων είναι αρκετά πιο απλή στην εφαρμογή από ότι ντετερμινιστικές μέθοδοι (πχ gradient based) αλλά συνήθως πιο απαιτητικές υπολογιστικά. Τα τρία απαραίτητα βήματα για την εφαρμογή μιας τέτοιας μεθόδου είναι τα εξής: Αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί μια σειρά διαδικασιών που θα υπολογίζουν αυτόματα το μέγεθος ως προς το οποίο θα γίνει η βελτιστοποίηση (evaluation tool) ανάλογα με τις διαφορετικές κάθε φορά τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού. Το δεύτερο είναι ο καθορισμός αυτών των μεταβλητών ελέγχου και πώς αυτές επηρεάζουν στοιχεία του σχεδιασμού του αντικειμένου που βελτιστοποιείται. Τέλος, η ρύθμιση και εκτέλεση του εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης για να υπολογιστούν οι τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού για τις οποίες εμφανίζεται η βέλτιστη τιμή του μεγέθους-στόχου.

Ειδικότερα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αρχικά διερευνάται η διαδικασία γένεσης υπολογιστικού πλέγματος κατάλληλου για χρήση σε διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτό ίσως είναι και το πιο πολύπλοκο στάδιο της μεθόδου. Για να είναι δυνατή η επίλυση της ροής γύρω από ένα σώμα πρέπει το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιείται να πληροί ένα πλήθος από προϋποθέσεις. Η κατανομή της πυκνότητας του πλέγματος σε διάφορες περιοχές του και ειδικά κοντά στο σώμα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο αν και πόσο γρήγορα θα συγκλίνει ο αλγόριθμος επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes. Μάλιστα, για να είναι δυνατή η χρήση του λογισμικού γένεσης πλέγματος εντός ενός εξελικτικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης είναι απαραίτητο η διαδικασία αυτή να είναι αυτοματοποιημένη και να ολοκληρώνεται σε λογικά χρονικά πλαίσια. Στο 2ο κεφάλαιο της εργασίας αρχικά παρουσιάζεται η γεωμετρία του σώματος που επιλέχθηκε προς βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση και αξιολόγηση ενός νέου κώδικα γένεσης πλέγματος, και ερευνάται η δυνατότητα χρήσης του σε μία διαδικασία βελτιστοποίησης. Παρατίθενται τυχόν προβλήματα που παρουσίασε η διαδικασία γένεσης πλέγματος γύρω από την επιλεγμένη γεωμετρία (κυρίως λόγω έλλειψης εμπειρίας στη χρήση του συγκεκριμένου κώδικα) και πώς αυτά επιλύθηκαν, με στόχο τη διευκόλυνση του μελλοντικού-νέου χρήστη. Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ενέργειες που έγιναν με στόχο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της ροής για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης του σώματος, η ρύθμιση δηλαδή του κώδικα επίλυσης της ροής και ο καθορισμός των οριακών συνθηκών. Ταυτόχρονα φυσικά, τροποποιείται κατάλληλα και η διαδικασία



γένεσης πλέγματος ώστε να λαμβάνονται όσο πιο αξιόπιστα αποτελέσματα γίνεται από την επίλυση της ροής. Επίσης πραγματοποιείται και μια σύγκριση μεταξύ των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων τύρβης αλλά και σε σχέση με πειραματικά αποτελέσματα και επιλέγεται το καταλληλότερο για την συγκεκριμένη περίπτωση. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται και κάποιες ενέργειες που έγιναν για τη μείωση του χρόνου εκτέλεσης της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης. Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά η επιλογή των στοιχείων της γεωμετρίας του σώματος που αποφασίστηκε να μορφοποιηθούν προς βελτιστοποίηση με χρήση μεταβλητών ελέγχου ανάμεσα σε τρεις διαφορετικές πιθανές λύσεις και με κατάλληλη τεκμηρίωση, και στη συνέχεια η ρύθμιση και εκτέλεση του εξελικτικού αλγόριθμου και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Τέλος, γίνεται και μια σύγκριση κάποιων χαρακτηριστικών της ροής που παρουσιάζεται γύρω από το αρχικό σώμα και τη βέλτιστη λύση.

Το πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη γένεση πλέγματος και επίλυση της ροής είναι το OpenFOAM v1.6 και για τη διαδικασία βελτιστοποίησης το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY v2.0, χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στις δύο ενότητες που ακολουθούν.

### **Το λογισμικό OpenFOAM (Field Operation and Manipulation)**

Το OpenFOAM είναι ένα ανοιχτό πακέτο λογισμικού, ανεπτυγμένο από την OpenCFD, με δυνατότητα επίλυσης διαφόρων επιστημονικών προβλημάτων (μεταφοράς θερμότητας, μεταφοράς μάζας, ηλεκτρομαγνητικά κλπ), δίνοντας πολλές δυνατότητες και ελευθερία στο χρήστη. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για τυρβώδη μόνιμη ροή ασυμπίεστου συνεκτικού ρευστού, παρέχοντας επιπλέον δυνατότητες δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος, πληθώρα μοντέλων τύρβης αλλά και συμπεριλαμβανομένου λογισμικού για την απεικόνιση της λύσης σε 3D. Η χρήση του OpenFOAM είναι ελεύθερη για τον οποιονδήποτε, καθώς παρέχεται και μπορεί να ληφθεί ελεύθερα από το διαδίκτυο (<http://www.openfoam.com/>). Μάλιστα, είναι λογισμικό ανοιχτού πηγαίου κώδικα, δηλαδή ο χρήστης έχει πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα ολόκληρου του λογισμικού που είναι γραμμένος σε C++. Με τον τρόπο αυτό είναι αρχικά σε θέση, αν το επιθυμεί, να γνωρίζει με λεπτομέρειες όλες τις ενέργειες που γίνονται από τον κώδικα κατά την εκτέλεσή του. Επίσης δίνεται η δυνατότητα παρέμβασης στον κώδικα και πραγματοποίησης πιθανών επιθυμητών αλλαγών (λ.χ. πρόσθεση επιπλέον όρων σε εξισώσεις που επιλύονται η ακόμα και δημιουργία νέων, αλλαγές όρων πηγής στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο τύρβης κλπ). Πολύ πρόσφατα η ΜΠΥΡΒ (μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης) και το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του τομέα Ρευστών του ΕΜΠ, έχει αποκτήσει ενεργή συμμετοχή στον προγραμματισμό συζυγών τεχνικών για το συγκεκριμένο λογισμικό, που πολύ σύντομα θα διανέμονται μαζί με τον κώδικα επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes του OpenFOAM στο πλαίσιο συνεργασίας με αγγλική εταιρία που συμμετέχει στην ανάπτυξη και διάδοση του λογισμικού (συνεργασία στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων μέσω του Ειδικού Λογαριασμού

Έρευνας του ΕΜΠ). Εκ του θέματος, η παρούσα διπλωματική δεν σχετίζεται με τη τελευταία αυτή δραστηριότητα της ΜΠΥΡΒ καθώς δεν χρησιμοποιείται η συζυγής μέθοδος αλλά το προϋπάρχον ανοιχτό λογισμικό επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes του πακέτου OpenFOAM. Επίσης σημειώνεται, ότι η χρήση του OpenFOAM δε γίνεται μέσω κάποιου γραφικού περιβάλλοντος για το χρήστη αλλά αποκλειστικά δίνοντας τιμές σε μεταβλητές μέσω αρχείων ελέγχου, που είναι ουσιαστικά αρχεία κειμένου, και στη συνέχεια εκτελώντας χειροκίνητα τον κάθε κώδικα.

### **Το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY**

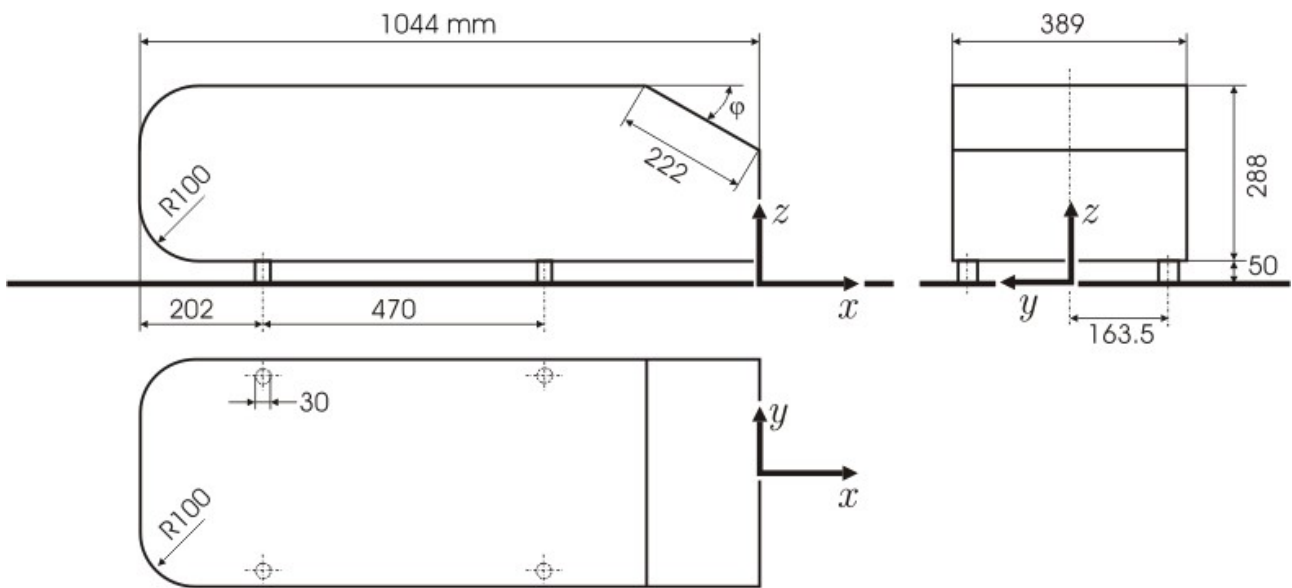
Ανεπτυγμένο από την μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης του ΕΜΠ, το EASY (Evolutionary Algorithm System) είναι ένα πλήρες λογισμικό βελτιστοποίησης γραμμένο σε C++ με περιβάλλον χρήσης προγραμματισμένο σε Java (<http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY>). Προσφέρει μια πληθώρα εργαλείων και επιλογών που δίνουν τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης ενός ή περισσότερων στόχων και με ή χωρίς συναρτήσεις περιορισμών. Παρά το όνομά του λογισμικού, οι δυνατότητές του δεν περιορίζονται μόνο σε επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης αποκλειστικά μέσω εξελικτικών αλγορίθμων, αλλά και σε μεθόδους που χρησιμοποιούν την παράγωγο της συνάρτησης κόστους του προβλήματος (gradient based). Είναι λογισμικό με πολύ εύκολο τρόπο χρήσης και επικοινωνίας με τα υπόλοιπα προγράμματα και κώδικες που εκτελούνται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Επίσης περιλαμβάνει πολλά εργαλεία των οποίων η χρήση μπορεί να μειώσει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, και φυσικά προσφέρει και τη δυνατότητα παράλληλης εκτέλεσης σε δίκτυα υπολογιστών.

## **2. Γένεση πλέγματος γύρω από απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου (Ahmed body)**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αρχικά τα χαρακτηριστικά του Ahmed body, το σώμα δηλαδή που επιλέχθηκε προς βελτιστοποίηση, η γεωμετρία του, καθώς και οι λόγοι που προτιμήθηκε αυτό. Επίσης στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η διαδικασία γένεσης υπολογιστικού πλέγματος για επίλυση ροής γύρω από τη γεωμετρία αυτή, που είναι και το πρώτο βήμα στο στήσιμο της μεθόδου βελτιστοποίησης που θα εφαρμοστεί. Η γένεση του πλέγματος θα γίνει με ένα από τα εργαλεία του λογισμικού OpenFOAM το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση της ροής. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται SnappyHexMesh και αρχικός σκοπός μας είναι η ερεύνηση των δυνατοτήτων του, η παρουσίαση των επιλογών που δίνονται στο χρήστη ως προς τη διαδικασία γένεσης του πλέγματος αλλά και η αξιολόγηση του πλέγματος που προκύπτει από αυτό.

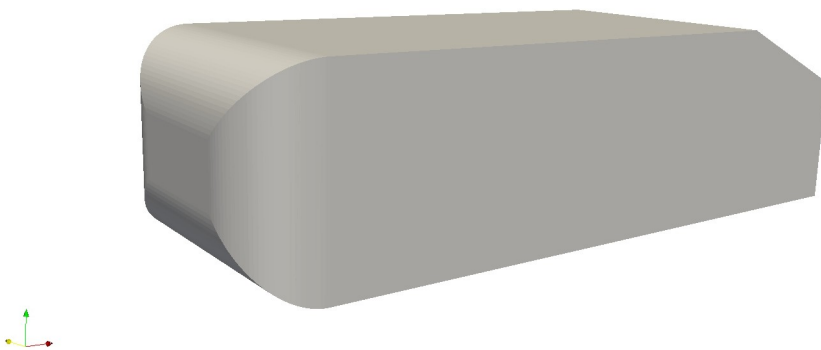
### **2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του Ahmed body**

Το Ahmed body είναι μια απλή μορφή αυτοκινήτου του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν προσδιοριστεί στην πειραματική εργασία του S.R. Ahmed [1] (σχ. 2.1). Για γωνίες του πίσω κεκλιμένου επιπέδου ( $\varphi$ )  $25^\circ$  και  $35^\circ$  υπάρχουν εκτενή πειραματικά αποτελέσματα από τους Becker, Lienhart και Stoots [2]. Συνεπώς, (α) η πολύ απλή γεωμετρία του η οποία διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος και γύρω από αυτό (β) η ύπαρξη πειραματικών αποτελεσμάτων και (γ) το γεγονός ότι η ροή που διαμορφώνεται είναι τυπική για σχεδόν οποιοδήποτε αυτοκίνητο, καθιστά το Ahmed body χαρακτηριστικό πρόβλημα (benchmark problem) για τη μελέτη της αεροδυναμικής αυτοκινήτων και την πιστοποίηση αποτελεσμάτων με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ). Οι παραπάνω είναι και οι κύριοι λόγοι που επιλέχθηκε ως το σώμα προς βελτιστοποίηση στην παρούσα εργασία.



Σχ 2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Ahmed body, διαστάσεις σε mm.

Το σώμα στα πειράματα είναι τοποθετημένο 50mm πάνω από το έδαφος, σε μια αεροσήραγγα ανοιχτή κατά τα  $\frac{3}{4}$  αυτής (μοναδική επιφάνεια αυτή του εδάφους). Τα 4 “ποδαράκια” που βλέπουμε στο σχήμα 2.1, στις θέσεις όπου σε κανονικό αυτοκίνητο θα βρίσκονταν οι ρόδες, υπάρχουν κυρίως για τη στήριξη του σώματος στην πειραματική διάταξη και μπορούν στην αριθμητική μέθοδο να αφαιρεθούν καθώς, ειδικά στη μόνιμη ροή, δεν επηρεάζουν σημαντικά. Αυτό απλοποιεί περαιτέρω τη διαδικασία γένεσης πλέγματος και αριθμητικής επίλυσης της ροής. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η 3Δ γεωμετρία που έχει δημιουργηθεί από πρόγραμμα CAD (SolidWorks) και χρησιμοποιείται ως είσοδος από το λογισμικό γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος για τη δημιουργία και διακριτοποίηση του επιφανειακού πλέγματος.

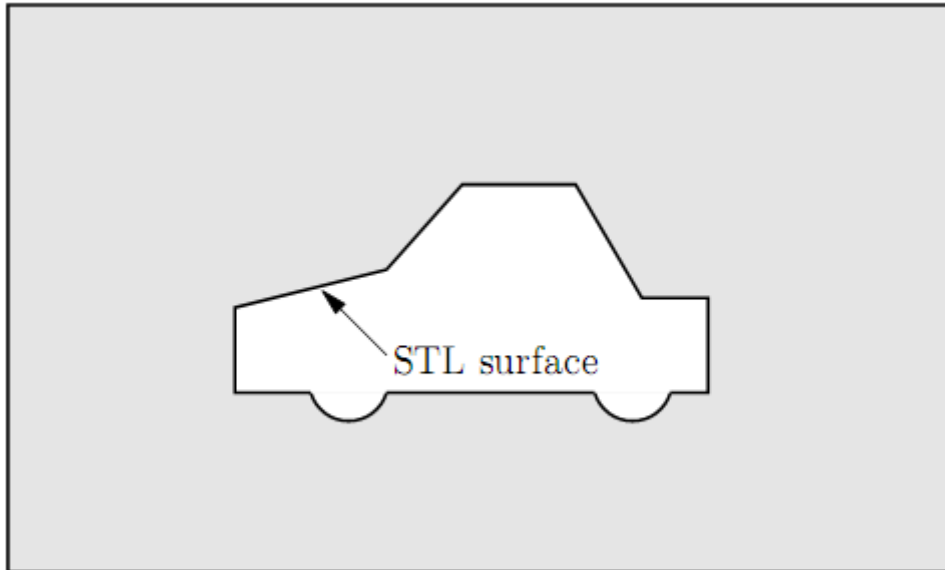


Σχ 2.2 Αναπαράσταση 3Δ μοντέλου του Ahmed body, αναπαράσταση αρχείου STL.

## 2.2 Περιγραφή μεθόδου γένεσης πλέγματος του κώδικα SnappyHexMesh

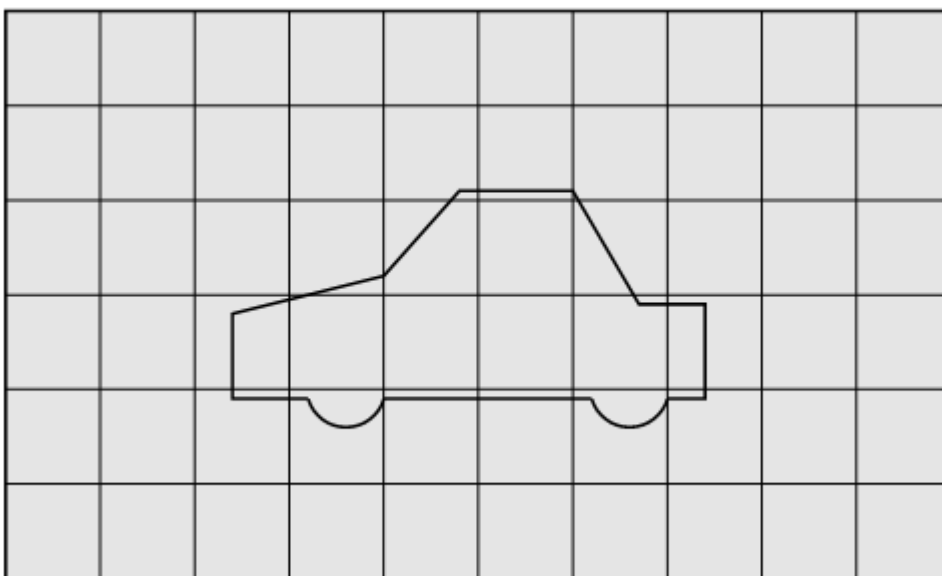
Το εργαλείο που διαθέτει το OpenFOAM για γένεση πλέγματος γύρω από πολύπλοκες 3D γεωμετρίες είναι το SnappyHexMesh, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλους κώδικες για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Το SnappyHexMesh είναι ένας κώδικας γένεσης πλέγματος που δημιουργεί 3D πλέγματα που περιέχουν εξάεδρα και τετράεδρα γύρω από και πάνω σε μια επιφάνεια διακριτοποιημένη με τριγωνικά στοιχεία που περιγράφει το σώμα και δίνεται σε μορφή αρχείου stereolithography (\*.stl) (Παράρτημα Α). Το τελικό πλέγμα πάνω στη γεωμετρία του σώματος προκύπτει μετά από τροποποιήσεις και μορφοποιήσεις ενός αρχικού πλέγματος εξάεδρων που καταλαμβάνει ολόκληρο το χωρίο επίλυσης, του οποίου, αρχικά τα κελιά διαιρούνται διαδοχικά ώστε να πυκνώσει σε προκαθορισμένες περιοχές, στη συνέχεια αφαιρούνται τα κελιά που βρίσκονται στο εσωτερικό του σώματος και στο τέλος μορφοποιείται ώστε να σέβεται την επιφάνεια του σώματος, διαδικασία η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια. Ένα τελικό προαιρετικό βήμα είναι η δημιουργία πιο λεπτών στρωμάτων κελιών πάνω στην επιφάνεια του σώματος. Γενικά, πέρα από κάποιους περιορισμούς που μπορεί να προκύπτουν λόγω της μεθόδου με την οποία γίνεται η γένεση του πλέγματος, που θα παρουσιάσουμε επίσης πιο αναλυτικά παρακάτω, αφήνεται στον χρήστη πλήρης ελευθερία ελέγχου της τελικής μορφής του πλέγματος. Όπως και οι υπόλοιποι κώδικες που περιλαμβάνονται στο λογισμικό OpenFOAM, η χρήση του γίνεται δίνοντας τιμές σε μεταβλητές και ορίζοντας αρχεία-εισόδους μέσω ενός αρχείου κειμένου που αποτελεί το αρχείο ρυθμίσεων (dictionary) του κώδικα (Παράρτημα Β).

Αρχικά είναι απαραίτητα: (α) ένα απλό πλέγμα το οποίο αποτελείται από εξάεδρα και καταλαμβάνει ολόκληρο το επιθυμητό υπολογιστικό χωρίο (που εύκολα κατασκευάζεται και με ένα άλλο εργαλείο του OpenFOAM, το BlockMesh), (β) η γεωμετρία του σώματος σε μορφή αρχείου STL και (γ) ένα αρχείο ρυθμίσεων (Παράρτημα Β) που ελέγχει τη διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (ή dictionary όπως αναφέρεται και στα εγχειρίδια του OpenFOAM). Πιο αναλυτικά, ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το πλέγμα σε ένα ορθογώνιο χωρίο που εμπεριέχει την επιθυμητή γεωμετρία είναι ο εξής (στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται απλοποιημένα σε 2 διαστάσεις, έστω και αν αναφερόμαστε σε 3D γεωμετρίες).



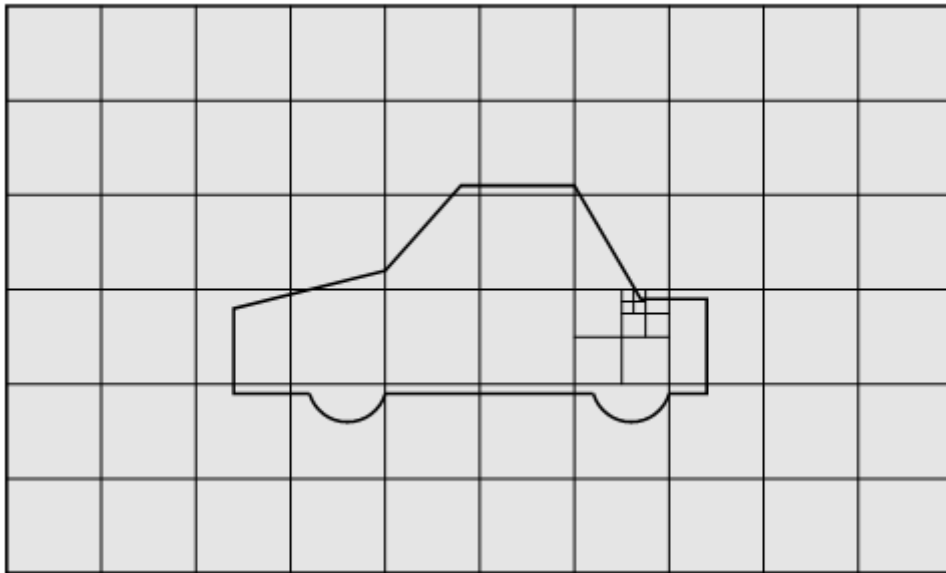
Σχ 2.3 Αναπαράσταση υπολογιστικού χωρίου σε 2Δ.

- Πριν εκτελεστεί το SnappyHexMesh πρέπει να υπάρχει ένα απλό πλέγμα-βάση από εξάεδρα που ουσιαστικά καθορίζει και το μέγεθος του χωρίου όπως φαίνεται και στο σχήμα Σχ 2.4. Τα κελιά του πρέπει να έχουν κατά προτίμηση τους λόγους ύψους προς μήκος και πλάτος κοντά στο 1, τουλάχιστον κοντά στην επιφάνεια του σώματος ώστε να διευκολύνεται στη συνέχεια το λογισμικό γένεσης του πλέγματος κατά το στάδιο της μορφοποίησης των κελιών για να ταιριάζουν στην επιφάνεια, καθώς σε ακραία περίπτωση αυτό το βήμα μπορεί να αποτύχει. Επίσης πρέπει τουλάχιστον μία ακμή οποιουδήποτε κελιού του αρχικού πλέγματος να τέμνει την επιφάνεια που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία ώστε να αναγνωριστεί αυτή από τον κώδικα.



Σχ 2.4 Αρχικό πλέγμα πριν την εκτέλεση του snappyHexMesh.

- Στη συνέχεια, η πρώτη διαδικασία που πραγματοποιείται όταν εκτελείται το SnappyHexMesh, είναι η διαίρεση των κελιών του πλέγματος που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια όπως έχει οριστεί στο αρχείο ρυθμίσεων. Το κάθε κελί διαιρείται σε 8 νέα στις 3 διαστάσεις (ισοδύναμο της διαίρεσης σε 4 νέα σε 2Δ όπως παρατηρούμε στα σχήματα 2.5 και 2.6). Το επίπεδο πυκνότητας (refinement level) που επιλέγεται καθορίζει το πόσες φορές θα διαιρεθούν διαδοχικά. Πρώτα γίνεται αυτή η διαδικασία στις λεπτομέρειες της γεωμετρίας πάνω στην επιφάνεια του σώματος (features) (Σχ 2.5) και στη συνέχεια στην υπόλοιπη επιφάνειά του (Σχ 2.6).

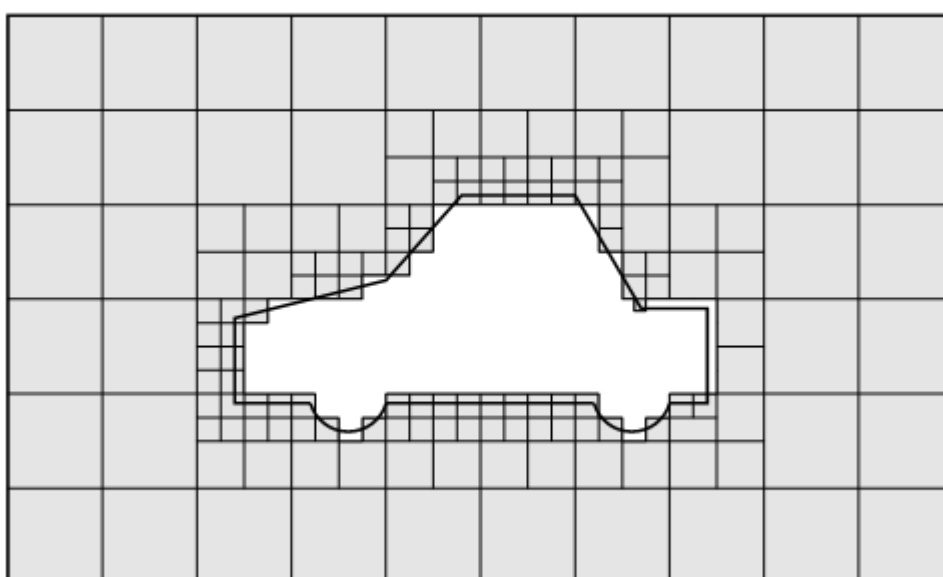


Σχ 2.5 Διαίρεση κελιών στις λεπτομέρειες του σώματος.



Σχ 2.6 Διαίρεση κελιών σε όλη την επιφάνεια του σώματος.

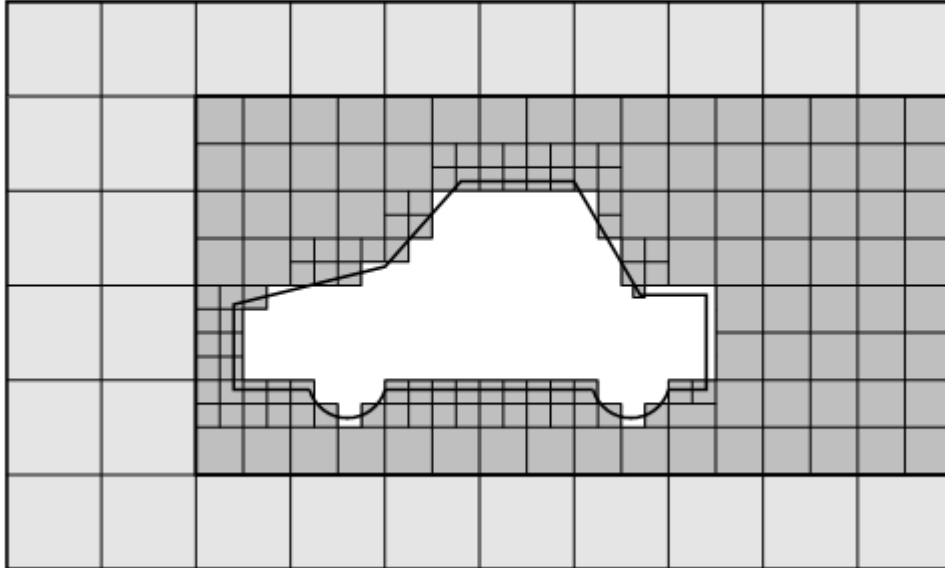
- Ακολουθεί η διαγραφή κελιών στο εσωτερικό του σώματος. Πρέπει η περιοχή στην οποία είναι επιθυμητό τα κελιά να διαγραφούν να εμπεριέχεται και να διαχωρίζεται πλήρως από το εξωτερικό πλέγμα με την επιφάνεια. Το ποια από τις δύο περιοχές θα κρατηθεί καθορίζεται από το σε ποια ανήκει το πέρας ενός διανύσματος που έχουμε ορίσει στο αρχείο ρυθμίσεων. Όσα κελιά έχουν ποσοστό του όγκου τους μεγαλύτερο του 50% μέσα στην περιοχή θα κρατηθεί δεν σβήνονται (Σχ 2.7).



Σχ 2.7 Αφαίρεση εσωτερικών κελιών.

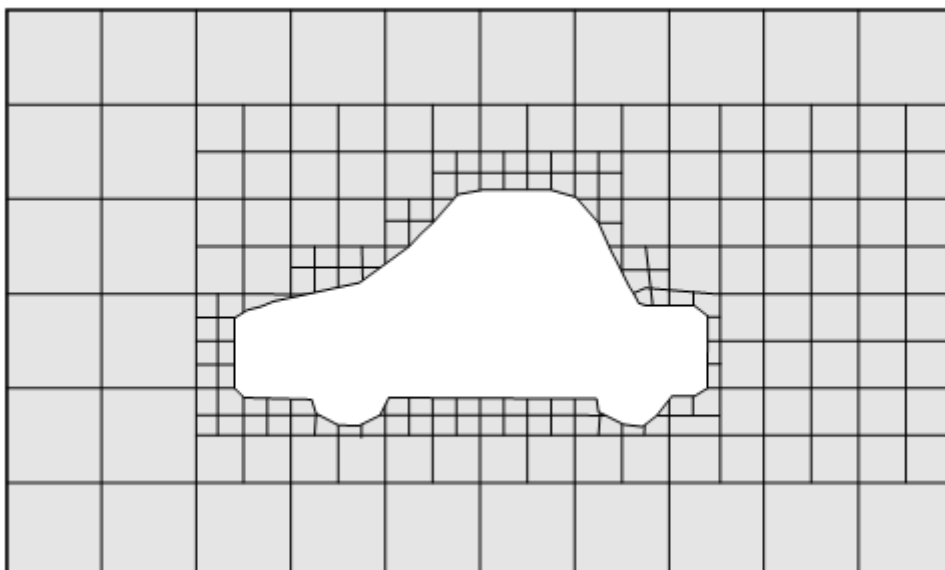


- Διαίρεση κελιών/πύκνωμα του πλέγματος σε προκαθορισμένες από το χρήστη περιοχές (Σχ 2.8) ώστε να υπάρχει καλύτερη ακρίβεια σε αυτές κατά την επίλυση και καλύτερη σύγκλιση του κώδικα επίλυσης της ροής.



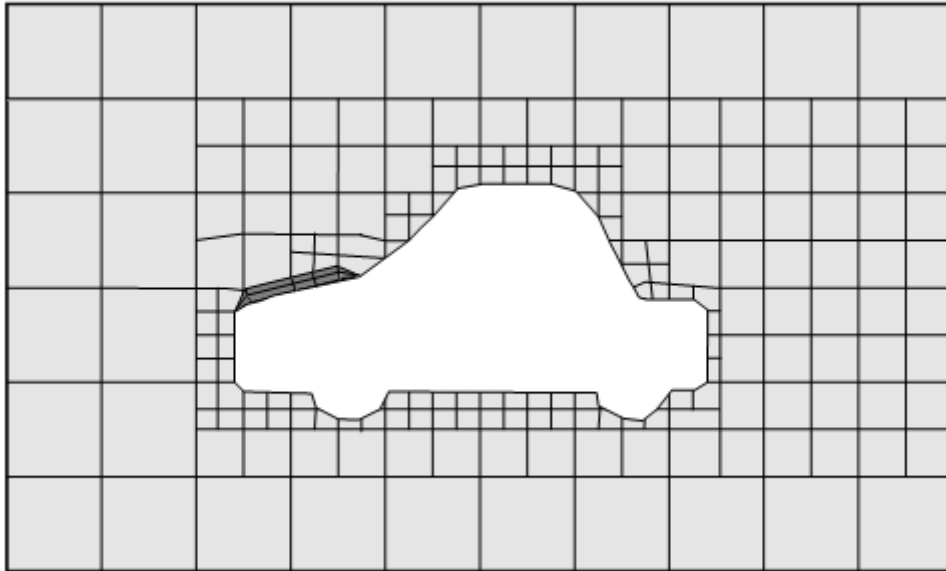
Σχ 2.8 Περαιτέρω πύκνωμα πλέγματος σε προκαθορισμένες περιοχές.

- Προσαρμογή του πλέγματος στην επιφάνεια με μορφοποίηση των κοντινών σε αυτή κελιών μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας του κώδικα (Σχ 2.9).



Σχ 2.9 Προσαρμογή πλέγματος στην επιφάνεια του σώματος.

- Τέλος, προαιρετική (προαιρετική για το λογισμικό, αλλά αναγκαία για τη δημιουργία σωστού πλέγματος) πρόσθεση στρωμάτων (layers) κελιών στην επιφάνεια. Αυτό πραγματοποιείται αρχικά με μορφοποίηση του πλέγματος ώστε τα κοντινά στην επιφάνεια κελιά του υπάρχοντος πλέγματος να μετατοπιστούν κατά σταθερή απόσταση μακριά από την επιφάνεια και στη συνέχεια γίνεται πρόσθεση επιπλέον στρωμάτων στην ενδιάμεση απόσταση που δημιουργήθηκε (Σχ 2.10).

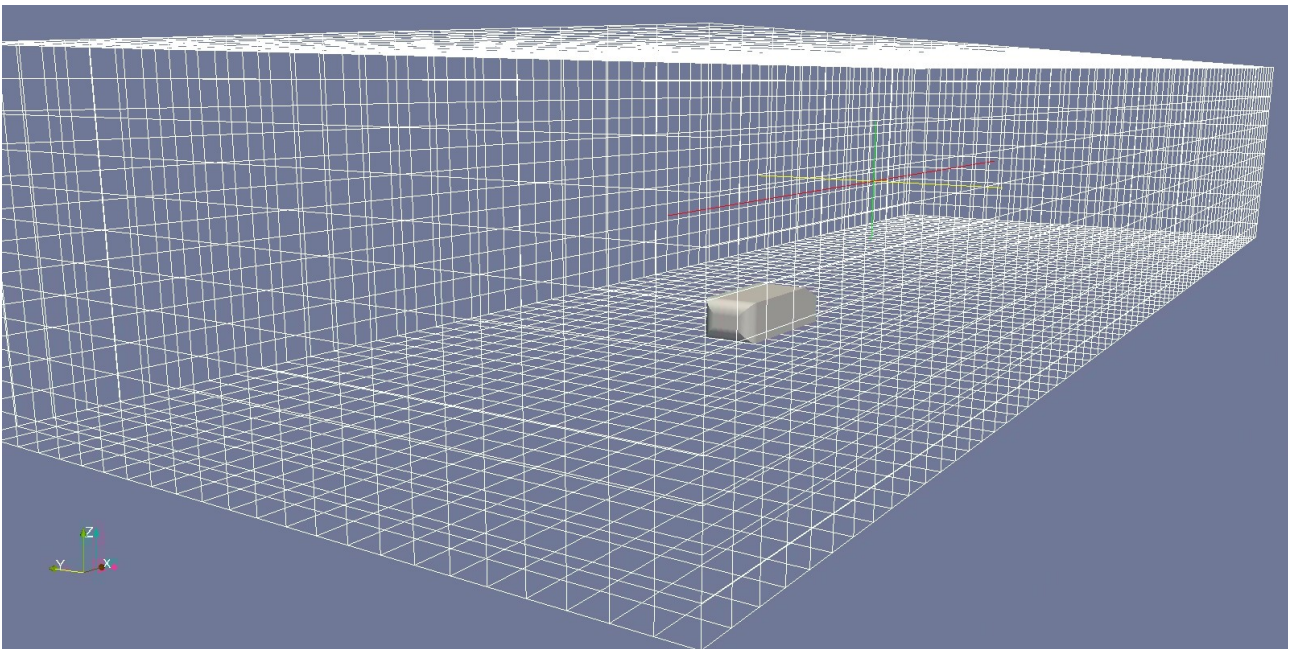


Σχ 2.10 Πρόσθεση λεπτότερων στρωμάτων κελιών.

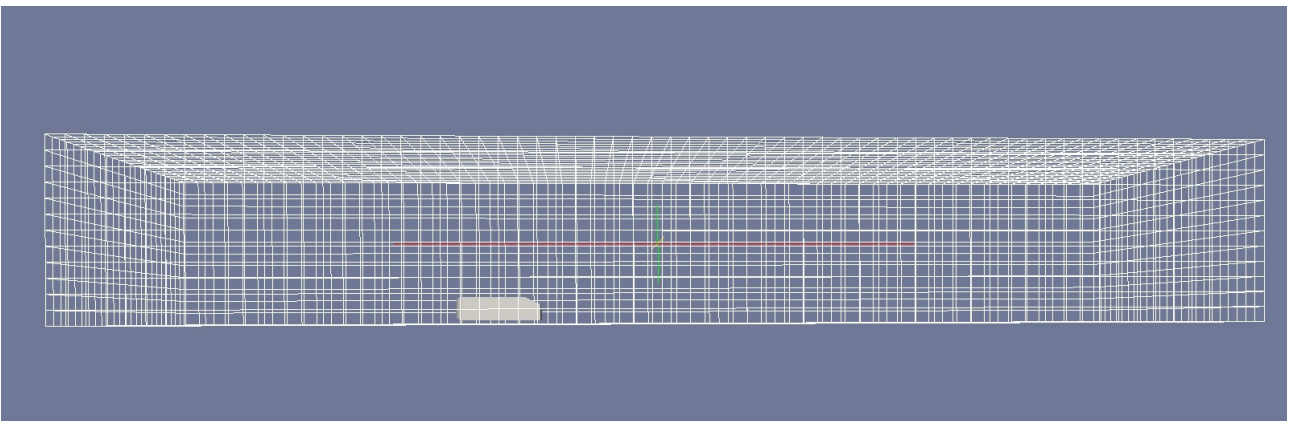
### 2.3 Δημιουργία πλέγματος για επίλυση ροής χρησιμοποιώντας μοντέλα τύρβης με συναρτήσεις τοίχου στο Ahmed body

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί βήμα – βήμα η διαδικασία που οδήγησε στο τελικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε. Πρέπει φυσικά να έχουμε συνεχώς υπόψη ότι ο κώδικας στο τέλος είναι αναγκαίο να μπορεί να φτιάξει πλέγμα αυτόματα, όχι μόνο για το αρχικό σώμα, αλλά και για ένα μορφοποιημένο ανάλογα με τα στοιχεία της γεωμετρίας του που θα αποφασιστεί να παραμετροποιηθούν πριν κάνουμε τη βελτιστοποίηση. Θα παρουσιαστεί εκτενώς ο έλεγχος που έχουμε πάνω στη διαδικασία γένεσης πλέγματος και τις αρχικές επιλογές και ρυθμίσεις που προτιμήθηκαν πριν αρχίσουμε να παίρνουμε αποτελέσματα από τον κώδικα επίλυσης της ροής. Φυσικά πρέπει να επισημάνουμε πως η δημιουργία πλέγματος είναι και κάτι που απαιτεί και εμπειρικές γνώσεις του χρήστη, ειδικά σε ένα εργαλείο που είναι πλήρως προσαρμόσιμο. Η αγγλική ορολογία χρησιμοποιείται σε αρκετές περιπτώσεις όπως είναι στα αρχεία του προγράμματος προς διευκόλυνση του αναγνώστη/μελλοντικού χρήστη του συγκεκριμένου λογισμικού, τη στιγμή που ο έλεγχος και οι ρυθμίσεις του γίνονται αποκλειστικά δίνοντας τιμές σε μεταβλητές μέσω ενός αρχείου ελέγχου (dictionary) (Παράρτημα Β).

Το μήκος του σώματός είναι  $L=1044\text{mm}$ . Το πρώτο που πρέπει να αποφασιστεί είναι το μέγεθος του χωρίου επίλυσης. Στη συνέχεια για να πιστοποιηθούν τα αποτελέσματα πρέπει να τα συγκριθούν με κάποια πειραματικά και έτσι, εφόσον αυτός ήταν και ένας από τους λόγους που επιλέχθηκε το Ahmed body, προσαρμόζεται το χωρίο ώστε να προσομοιάζει σε μια σήραγγα αντίστοιχη με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Επιλέγονται διαστάσεις για το υπολογιστικό χωρίο περίπου  $13L \times 4L \times 2L$  (μήκος  $\times$  πλάτος  $\times$  ύψος). Όπως αναφέρεται και στο 2.2 αυτό που καθορίζει το χωρίο είναι ένα αρχικό πλέγμα απλών ορθογωνίων εξαεδρικών κελιών. Στα σχήματα 2.11 και 2.12 βλέπουμε αυτό ακριβώς το αρχικό πλέγμα-βάση δημιουργημένο με το εργαλείο blockMesh του OpenFOAM, έχουμε τοποθετήσει και το 3D μοντέλο του Ahmed body για να έχουμε καλύτερη εικόνα του μεγέθους. Πρέπει να επισημανθεί πως αυτό το αρχικό πλέγμα είναι εντελώς ανεξάρτητο της γεωμετρίας του σώματος πέρα από τη θέση στην οποία θέλουμε να βρίσκεται αυτό στο τελικό πλέγμα. Αποτελεί ουσιαστικά βάση του πλέγματος που θα δημιουργήσει στη συνέχεια ο κώδικας SnappyHexMesh.



Σχ 2.11 Το αρχικό πλέγμα-βάση εξαεδρικών κελιών.



Σχ 2.12 Θέση του σώματος μέσα στο χωρίο.

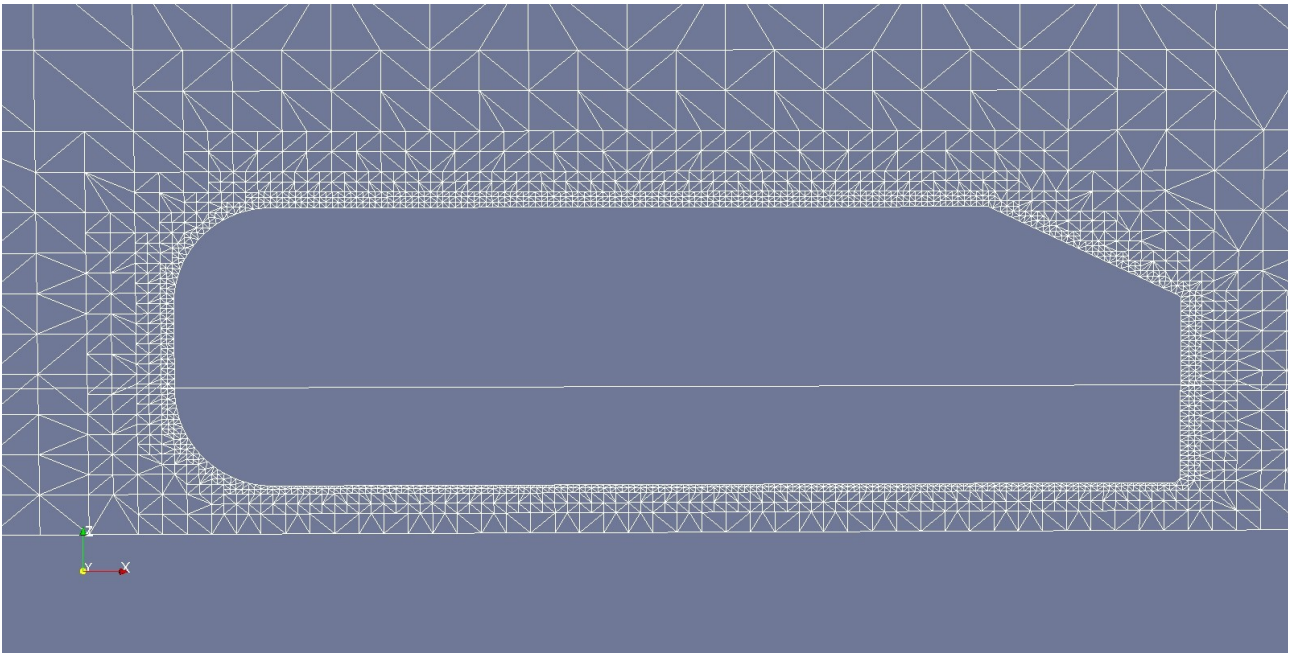
Το πλέγμα αυτό είναι 13m x 4.4m x 2m και αποτελείται από 64 x 24 x 12 ορθογωνικά εξαεργδικά κελιά. Η δημιουργία του με το BlockMesh γίνεται ορίζοντας τα όρια και το πλήθος των διαμερίσεων ανά διάσταση. Το σώμα έχει τοποθετηθεί πιο κοντά στην είσοδο από όπου έρχεται ο αέρας, δηλαδή ανάντι της ροής, καθώς θέλουμε να έχουμε αρκετά περισσότερο χώρο στην περιοχή του ομόρρου (4L από την είσοδο και 8L από την έξοδο). Η πυκνότητα πλέγματος που έχουμε εδώ θα είναι και η βασική πυκνότητα που θα χρησιμοποιήσει ο κώδικας για τη δημιουργία του τελικού πλέγματος (η αλλιώς το refinement level 0). Τέλος, από τη στιγμή που το κάθε κελί είναι αρκετά μικρότερο του σώματος, δεν υπάρχει περίπτωση η ακμή τουλάχιστον ενός κελιού να μην τέμνει την επιφάνεια του σώματος, κάτι που είναι αναγκαίο για να “αναγνωριστεί” αυτή από τον κώδικα γένεσης πλέγματος που ακολουθεί. Η μόνη περίπτωση που μπορεί να μην συμβαίνει αυτό είναι αν τα κελιά του αρχικού αυτού πλέγματος είναι αρκετά μεγάλα ώστε να χωράει όλο το σώμα μέσα σε ένα από αυτά.

Έχοντας το πλέγμα-βάση και το αρχείο που περιγράφει τη γεωμετρία του σώματός, πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες επιλογές στο αρχείο ρυθμίσεων του κώδικα γένεσης του πλέγματος τις σημαντικότερες των οποίων αναφέρουμε παρακάτω. Ολόκληρο το αρχείο ρυθμίσεων με σχόλια παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Αρχικά πρέπει να ρυθμιστεί ο κώδικας ώστε να διαβάσει την γεωμετρία του σώματος. Αυτό γίνεται στην περιοχή geometry του αρχείου ρυθμίσεων του SnappyHexMesh προσθέτοντας τα παρακάτω:

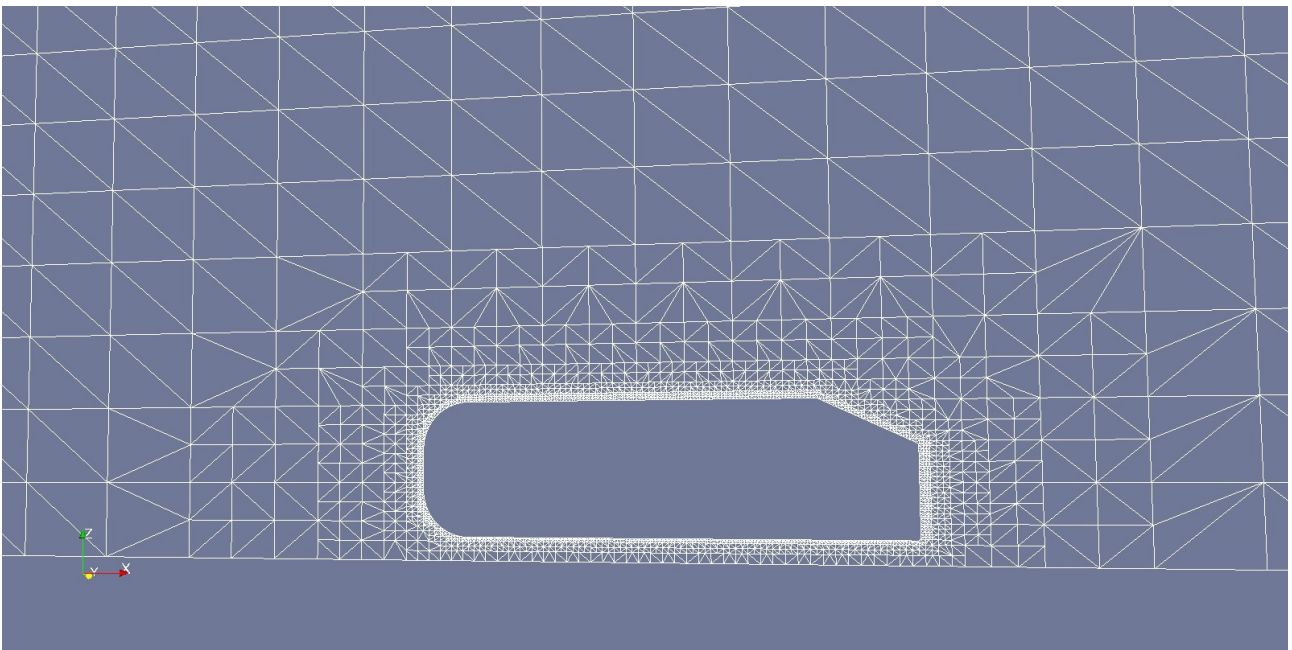
```
ahmedbody.stl
{
    type triSurfaceMesh;
    name ahmedbody;
}
```

Τα αρχεία .stl αναγνωρίζονται από τον κώδικα ως triSurfaceMesh και αυτό πρέπει να δηλωθεί στον τύπο, επίσης το όνομα που δίνουμε θα αντιστοιχεί στο όνομα του ορίου του πλέγματος (ή patch) που θα βρίσκεται πάνω στο σώμα στο τέλος της διαδικασίας. Στην περιοχή refinementSurfaces του αρχείου θέτουμε το επίπεδο refinement που θα αντιστοιχεί στην επιφάνεια, δηλαδή το πόσες φορές θα διαιρεθούν τα κελιά πάνω στην επιφάνεια (όπως εξηγείται και στο 2.2) άρα και το πόσο πυκνό θα είναι το πλέγμα εκεί. Έχουμε επιλογή να θέσουμε ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο, κάτι το οποίο θα εξηγηθεί αργότερα. Αρχικά θέτουμε επίπεδο 5 όπως φαίνεται παρακάτω για να δούμε τα πρώτα αποτελέσματα της διαδικασίας (refinement level 5 σημαίνει ότι τα κελιά θα διαιρεθούν 5 διαδοχικές φορές ώστε να πυκνώσει το πλέγμα, στο συγκεκριμένο σημείο αναφερόμαστε στα κελιά πάνω στην επιφάνεια του σώματος).

```
ahmedbody
{
    // Surface-wise min and max refinement level
    level (5 5);
}
```



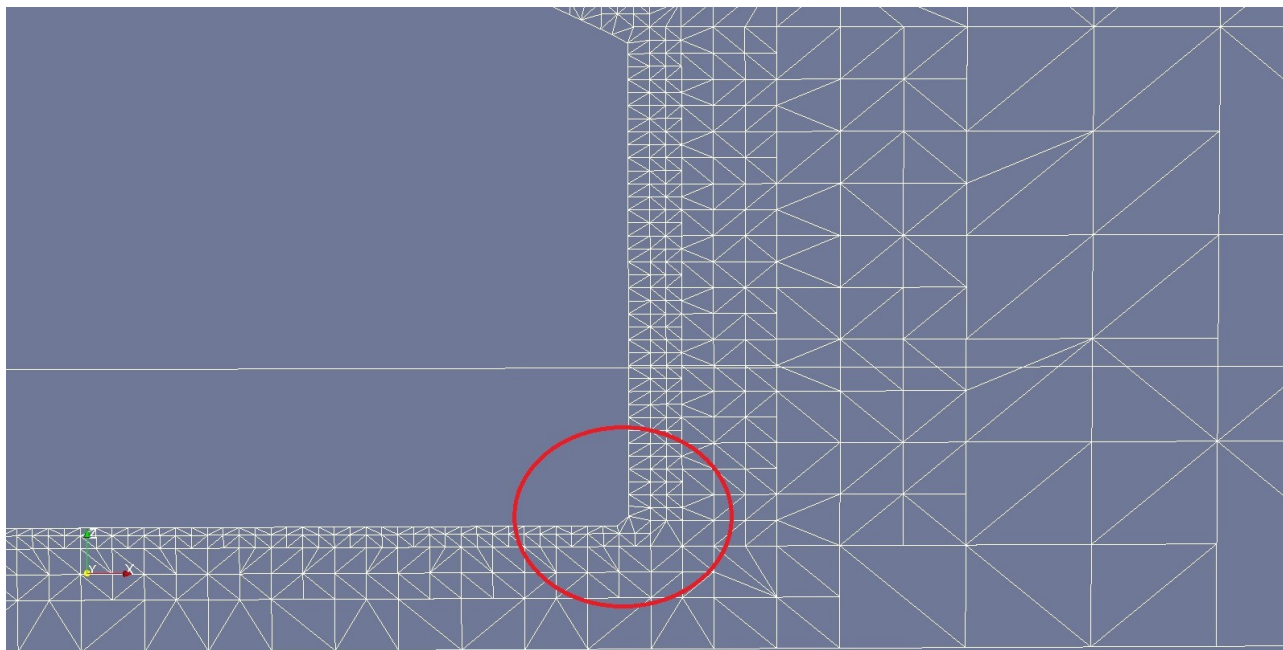
Σχ 2.13 Τομή του πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας, πυκνωμένο πλέγμα μόνο πάνω στο σώμα.



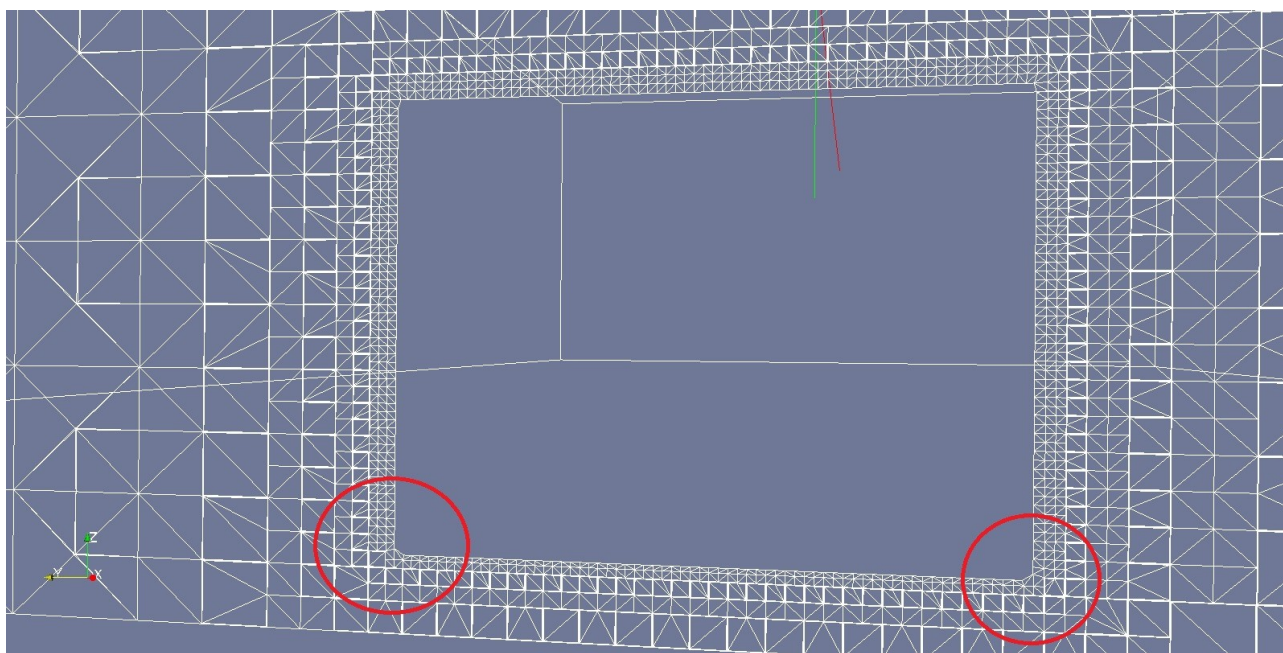
Σχ 2.14 Τομή του πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας, πυκνωμένο πλέγμα μόνο πάνω στο σώμα.

Στο σχήμα 2.13 και 2.14 βλέπουμε το πλέγμα που προέκυψε σε τομή επιπέδου κάθετο στον άξονα  $y$ , δηλαδή στο επίπεδο συμμετρίας του σώματος. Μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τα επίπεδα πυκνότητας, ειδικά στο σχήμα 2.14 όπου φαίνονται από το επίπεδο 0 στο εξωτερικό μέχρι το επίπεδο 5 πάνω στο σώμα. Αυτό το πρώτο πλέγμα δημιουργήθηκε για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του πάνω στην επιφάνεια. Όπως παρατηρούμε και στις εικόνες 2.15 (μεγέθυνση αντίστοιχης τομής) και 2.16 (τομή επιπέδου κάθετου στον άξονα  $x$ ) υπάρχουν ατέλειες. Δηλαδή σε κάποιες έντονες ακμές του σώματος τα κελιά που βρίσκονται

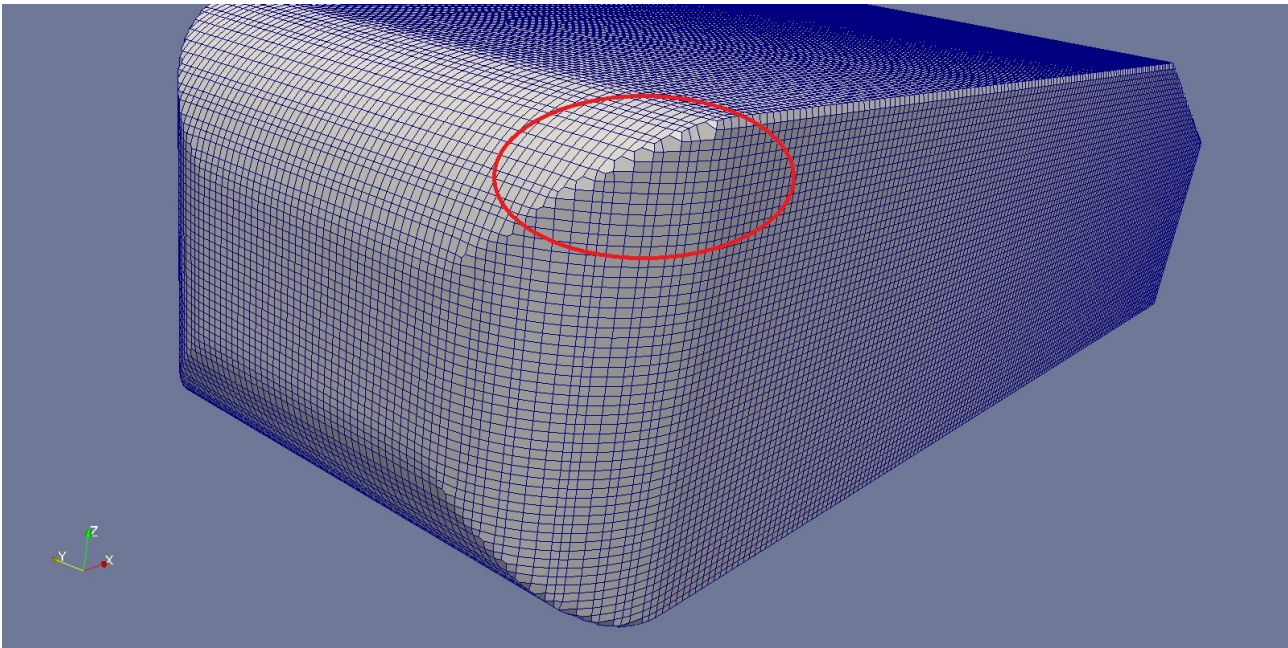
ακριβώς πάνω στην ακμή αποκτούν μια ενδιαμέση, σε σχέση με τα 2 τεμνόμενα επίπεδα, κλίση. Κάτι που φαίνεται και στο σχήμα 2.17 όπου βλέπουμε το όριο (patch) του πλέγματος πάνω στο σώμα. Το πλέγμα στις επίπεδες επιφάνειες και στις μπροστά καμπύλες επιφάνειες του σώματος ακολουθεί πιστά τη γεωμετρία, όσο φυσικά του επιτρέπει η ανάλυση/πυκνότητα του.



Σχ 2.15 Ατέλειες σε ακμή στο πίσω μέρος του σώματος, τομή στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ 2.16 Ατέλειες στις κατά μήκος του σώματος ακμές, τομή κάθετη στον άξονα x.

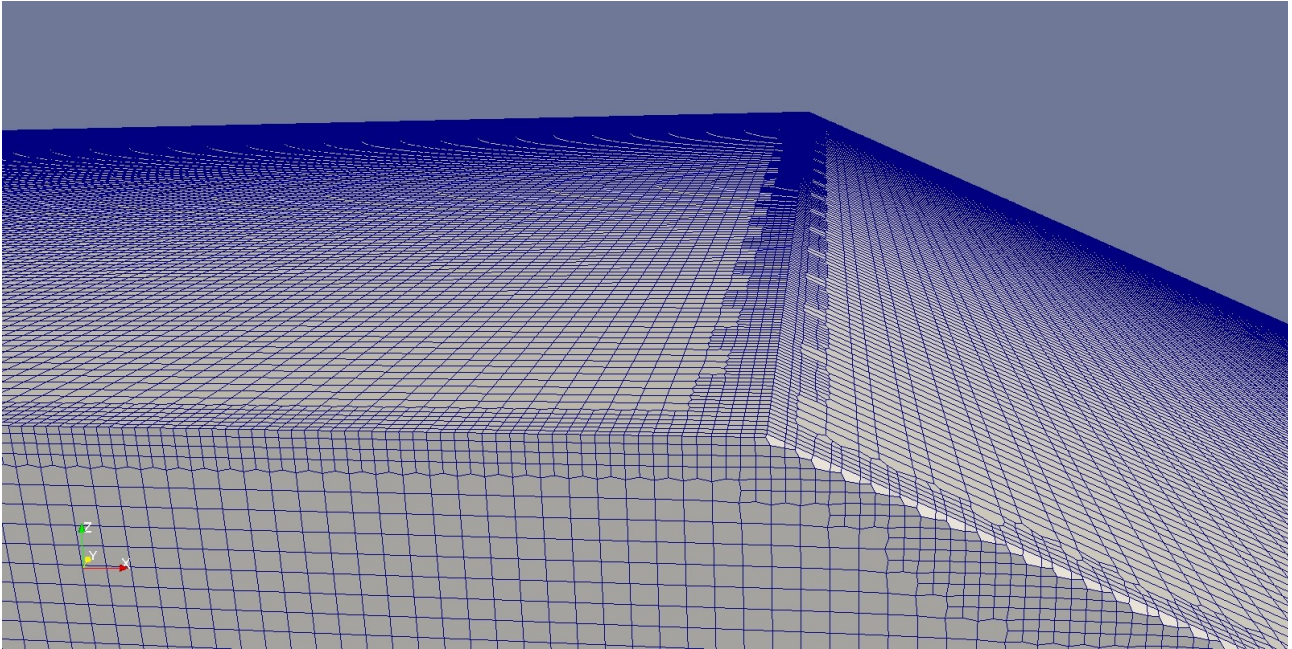


Σχ 2.17 Ατέλειες στις ακμές των καμπύλων επιφανειών.

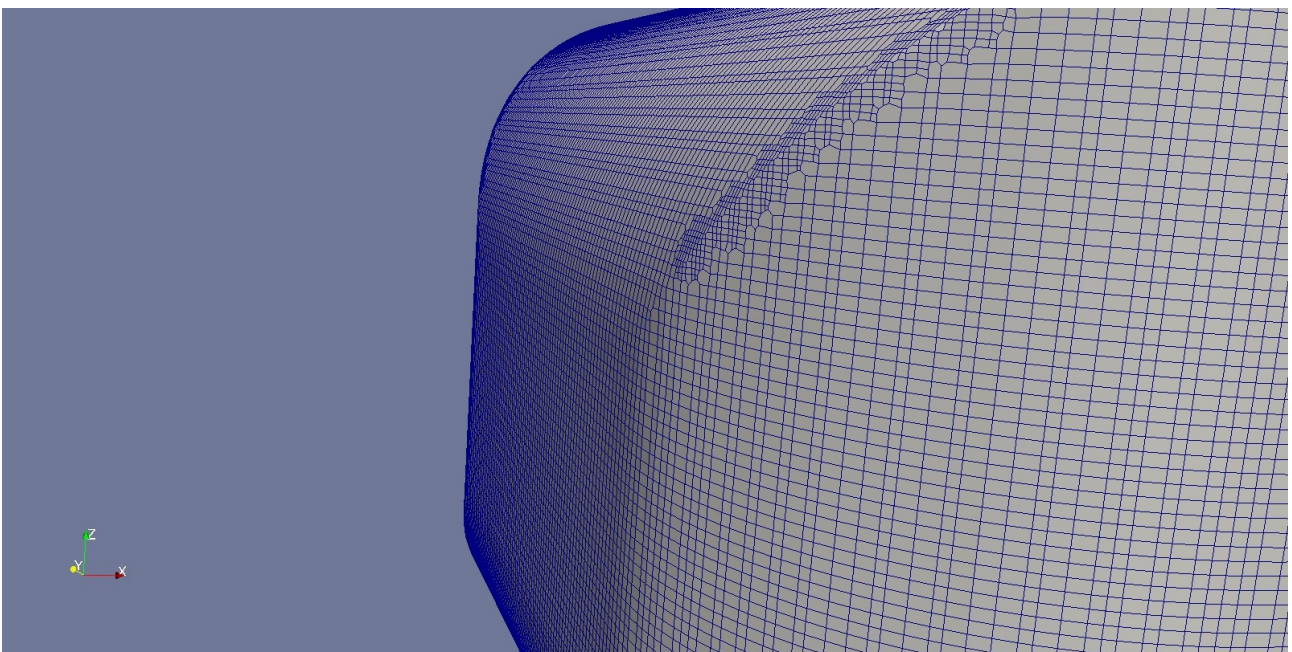
Αυτό καθώς ήταν και ένα πλέγμα που προέκυψε από τις πρώτες δοκιμές προφανώς δεν είναι ικανοποιητικό. Έχουμε στη διάθεσή μας μια σειρά επιλογών για να διορθωθεί η συμπεριφορά του πλέγματος στις έντονες ακμές όπου εντοπίζεται το πρόβλημα. Η πρώτη επιλογή είναι να αυξηθούν οι επαναλήψεις που κάνει ο κώδικας κατά το ταίριασμα του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια (ή snapping όπως αναφέρεται και στις ρυθμίσεις), κάτι που γίνεται στην περιοχή snapControls του αρχείου ρυθμίσεων. Είναι μια διαδικασία που καταναλώνει πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού χρόνου της διαδικασίας γένεσης του πλέγματος και έτσι δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης τη στιγμή που η βελτίωση που επέρχεται είναι παρατηρήσιμη.

Η δεύτερη επιλογή είναι να αυξηθεί η πυκνότητα του πλέγματος καθώς όσο μικρότερες είναι οι ακμές των κελιών που βρίσκονται πάνω στο σώμα τόσο καλύτερα θα ακολουθείται η γεωμετρία αυτού. Καθώς είναι προτιμότερο να υπάρχει γενικά πιο πυκνό πλέγμα πάνω στο σώμα, επιλέγεται ελάχιστο επίπεδο refinement 6. Μια άλλη πολύ χρήσιμη ρύθμιση που επιτρέπει το περαιτέρω πύκνωμα του πλέγματος μόνο σε περιοχές του σώματος με ακμές είναι το resolveFeatureAngle. Αυτό λειτουργεί ως εξής: ο κώδικας αναγνωρίζει τις περιοχές στην επιφάνεια του σώματος όπου υπάρχουν ακμές και σε περίπτωση που η γωνία που δημιουργείται από τα δύο τεμνόμενα επίπεδα στην ακμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την τιμή που θα δοθεί στο resolveFeatureAngle, το πλέγμα πυκνώνει ακόμα περισσότερο. Αυτό ελέγχεται θέτοντας την τιμή του μεγίστου επιπέδου refinement για την επιφάνεια σε 1 παραπάνω από το κανονικό/ελάχιστο (δηλαδή 7 στη συγκεκριμένη περίπτωση) και την τιμή του resolveFeatureAngle σε 20 μοίρες, ώστε να πυκνώσει το πλέγμα και στην ακμή που εμφανίζεται στο πίσω μέρος του σώματος που αρχίζει το κεκλιμένο επίπεδο

(slant) που γνωρίζουμε ότι είναι 25 μοίρες. Το περαιτέρω πύκνωμα του πλέγματος στις έντονες ακμές του σώματος, πέρα από μικρότερη πιθανότητα μη αντιστοίχησης του πλέγματος στην πραγματική επιφάνεια του σώματος, περιμένουμε να βοηθήσει αρκετά και τον κώδικα επίλυσης της ροής. Τα αποτελέσματα με τις νέες αυτές ρυθμίσεις τα παρατηρούμε στα σχήματα 2.18 – 2.22.

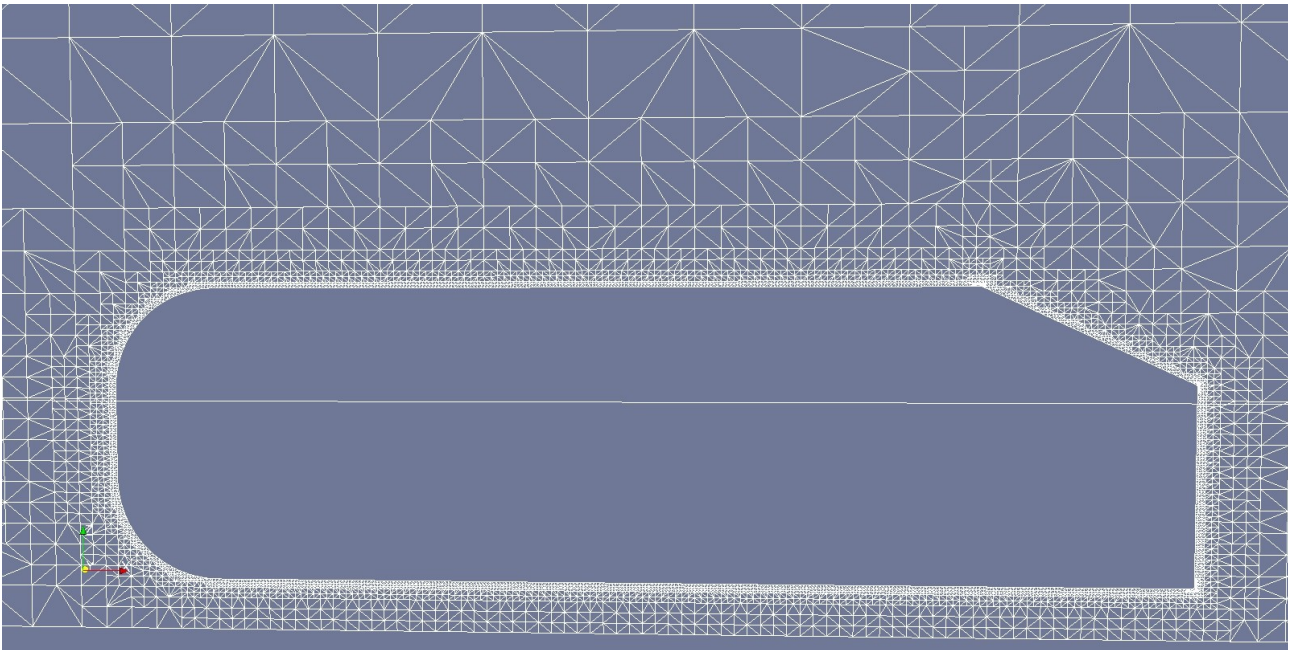


Σχ 2.18 Πυκνότερο πλέγμα στην ακμή στην αρχή του πίσω κεκλιμένου επιπέδου του σώματος.

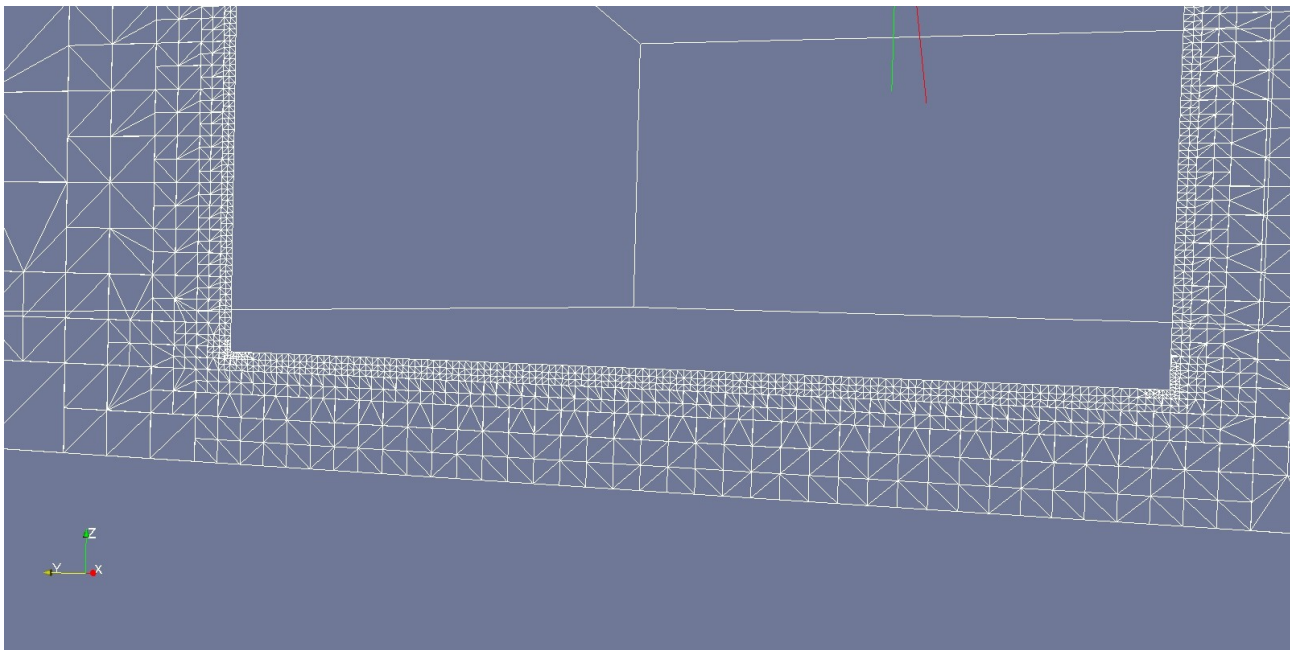


Σχ 2.19 Πυκνότερο πλέγμα στις ακμές των καμπύλων μπροστά επιφανειών.

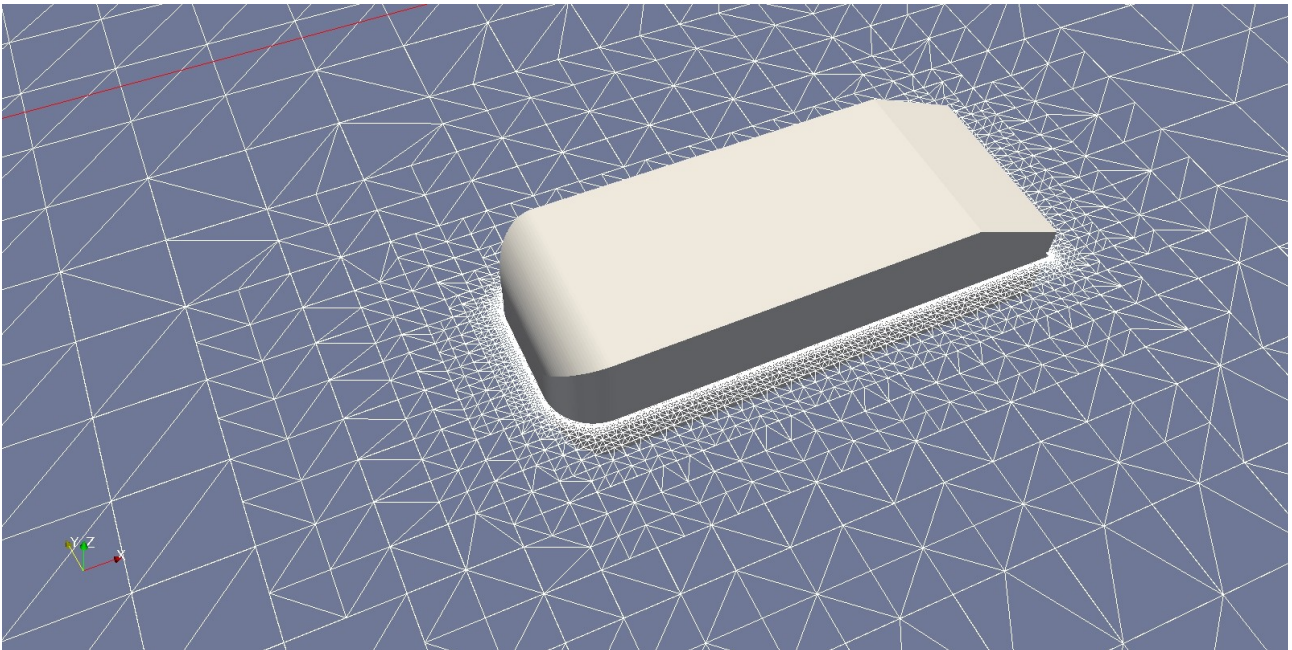




Σχ 2.20 Τομή πυκνότερου πλέγματος πάνω στην επιφάνεια του σώματος πλέγματος.



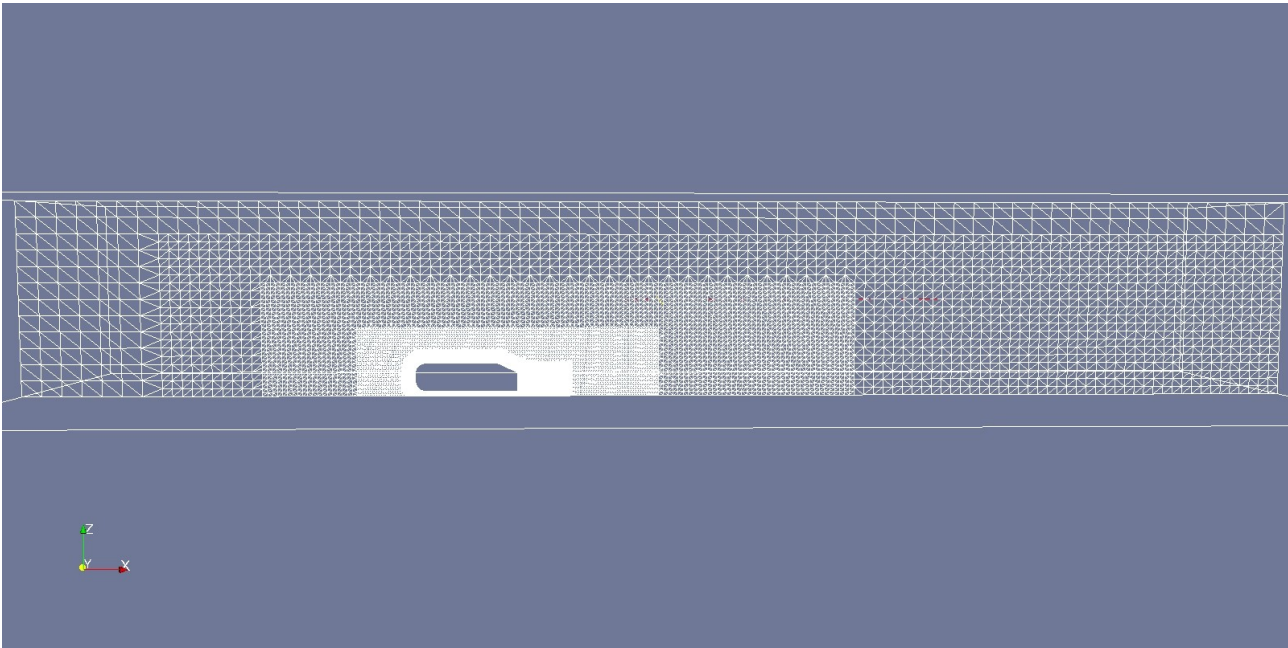
Σχ 2.21 Τομή πλέγματος σε επίπεδο κάθετο στον  $x$  για εντοπισμό τυχόν ατελειών στο πυκνότερο πλέγμα.



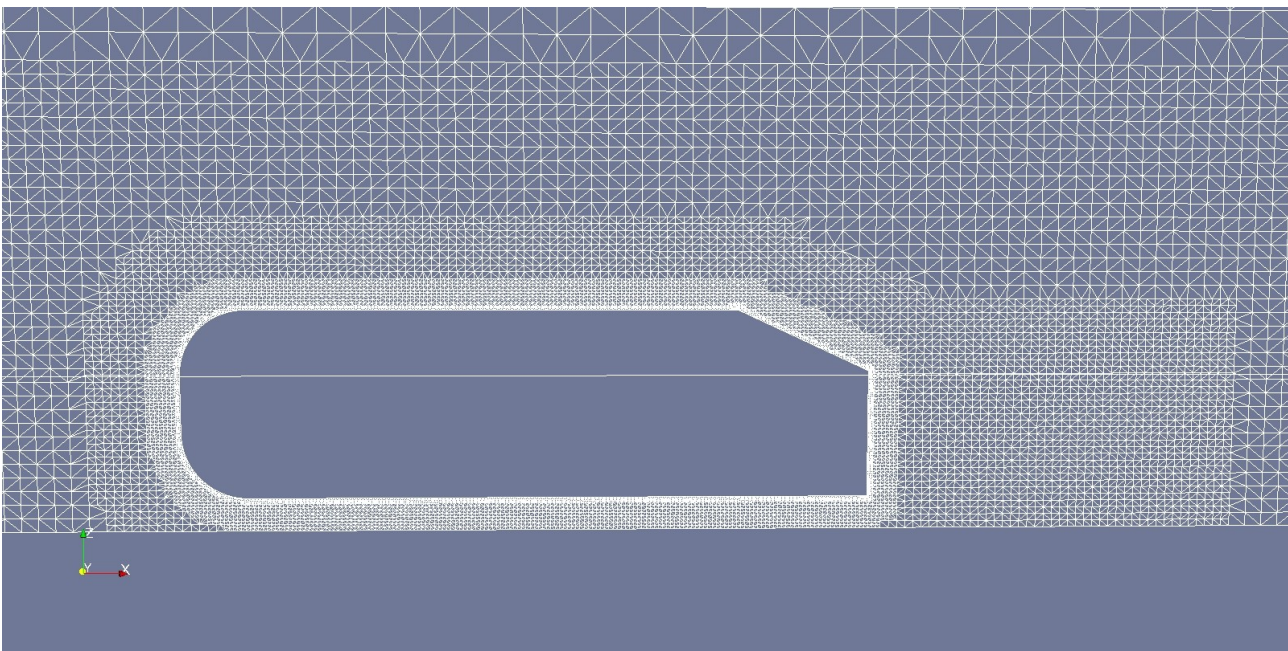
Σχ 2.22 Τομή του πλέγματος πυκνωμένου μόνο πάνω στην επιφάνεια μαζί με το 3D μοντέλο του σώματος.

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος δημιουργίας του πλέγματος εμφανίζεται στο ιστορικό η τιμή της μέγιστης απόκλισης του πλέγματος από την επιφάνεια, δηλαδή η μέγιστη απόσταση του επιφανειακού πλέγματος από την δοσμένη γεωμετρία. Αφού παρατηρείται ότι αυτή η τιμή είναι πλέον αμελητέα σε σχέση με την τάξη μεγέθους του σώματος, το νέο πλέγμα που προκύπτει πάνω στο σώμα είναι φαινομενικά τουλάχιστον αρκετά ικανοποιητικό.

Στη συνέχεια ακολουθεί το πύκνωμα του πλέγματος σε περιοχές γύρω από αυτό. Δίνεται η επιλογή να οριοθετηθούν σφαιρικές ή ορθογωνικές περιοχές και στη συνέχεια να εφαρμοστεί εντός, εκτός ή σε συγκεκριμένη απόσταση από αυτές το επιθυμητό επίπεδο refinement. Οι γεωμετρίες αυτές πρέπει να δηλωθούν στην περιοχή geometry του αρχείου. Χρησιμοποιήθηκαν 3 ορθογώνια τα οποία καθορίζονται από ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο για κάθε διάσταση, και τέθηκε εντός αυτών το επιθυμητό επίπεδο refinement στην περιοχή refinementRegions των ρυθμίσεων, ώστε υπάρχει μια ομαλή μετάβαση από το επίπεδο 0 του αρχικού πλέγματος στο επίπεδο 4, αλλά και πιο πυκνό πλέγμα στην περιοχή του ομόρρου. Επίσης τέθηκε σε διαδοχικές αποστάσεις 50mm και 150mm από την επιφάνεια του σώματος επίπεδο πυκνότητας πλέγματος 5 και 4 αντίστοιχα. Τέλος χρησιμοποιήθηκε άλλη μια ορθογώνια περιοχή με πιο πυκνό πλέγμα τοποθετημένη ακριβώς πίσω από το σώμα όπου θα εμφανιστεί η αρχή του ομόρρου του σώματος και όπου περιμένουμε ενδεχομένως και περιοχές έντονης αποκόλλησης και ανακυκλοφορίας της ροής. Παρατηρούμε το πλέγμα που προέκυψε με τα νέα δεδομένα στα σχήματα 2.23 και 2.24.



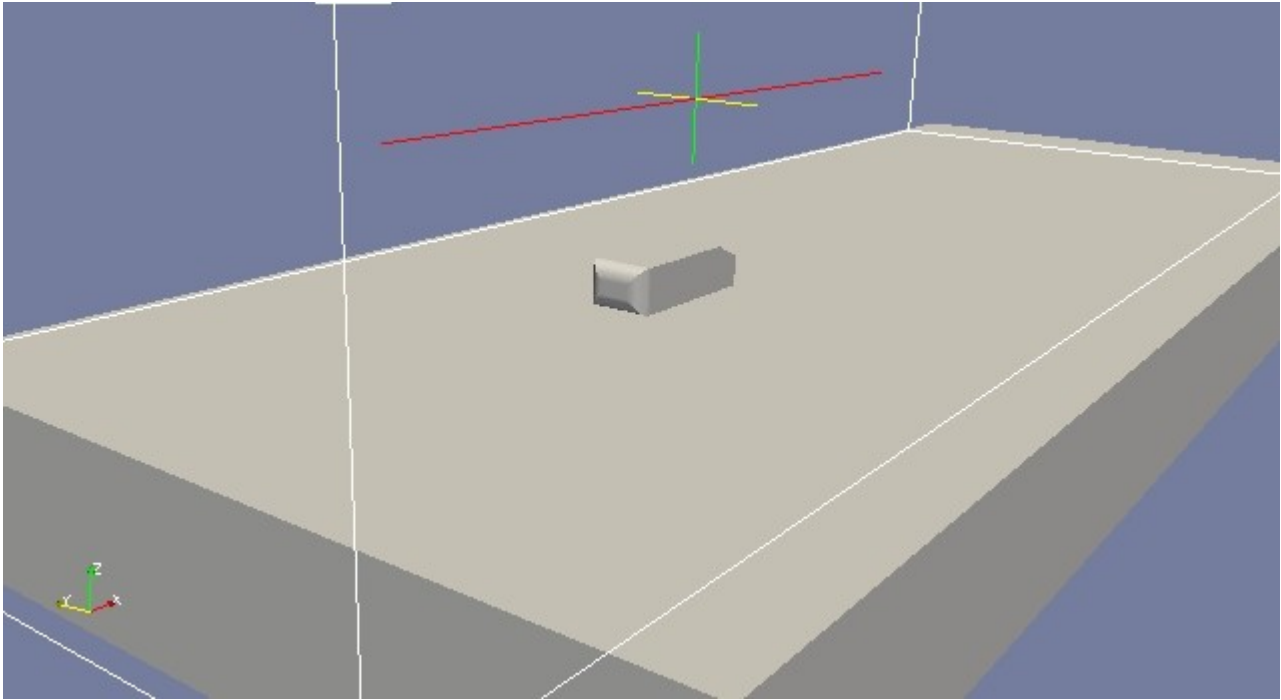
Σχ 2.23 Επίπεδα πυκνότητας σε τομή του πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ 2.24 Το πλέγμα κοντά στο σώμα, τομή στο επίπεδο συμμετρίας.

Το τελευταίο απαραίτητο βήμα για να προκύψει ένα ολοκληρωμένο πλέγμα είναι η πρόσθεση επιπλέον στρωμάτων κελιών (layers) πάνω στο σώμα και στο έδαφος, στις περιοχές δηλαδή που θα υπάρχει οριακό στρώμα που πρέπει να προλεχθεί με ακρίβεια. Για να προστεθούν οι διαστρωματώσεις κελιών στο έδαφος ήταν τελικά απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί άλλο ένα .stl αρχείο του οποίου μόνο μια επιφάνεια να βρίσκεται στα όρια του χωρίου, σε ύψος  $z = 0$  και παράλληλη στο επίπεδο  $x-y$ , όπως βλέπουμε και στο

σχήμα 2.25 οι υπόλοιπες διαστάσεις είναι αδιάφορες αρκεί η μία επιφάνεια να καλύπτει το  $z = 0$  επίπεδο του χωρίου, εκτός από ένα μικρό μέρος κοντά στην εισαγωγή για λόγους που θα εξηγήσουμε στο κεφάλαιο 3. Επίσης πριν προστεθούν στρώματα πρέπει να έχει πυκνώσει και το πλέγμα κοντά στο έδαφος ώστε να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά μεγέθους σε γειτονικά κελιά, έτσι τίθεται επίπεδο refinement 4 πάνω στην καινούρια αυτή επιφάνεια.



Σχ 2.25 3D μοντέλα του Ahmed body και της επιφάνειας που χρησιμοποιήθηκε για έδαφος.

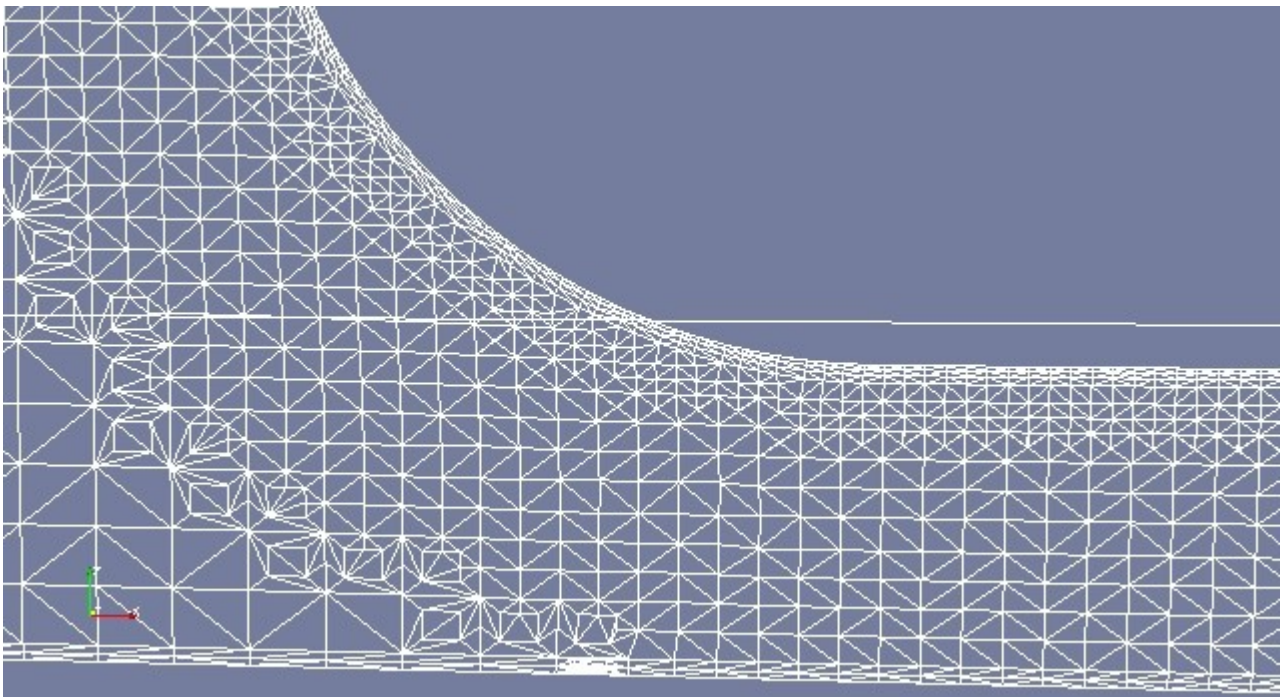
Η διαδικασία εισαγωγής στρωμάτων κελιών στο υπάρχον πλέγμα αποδείχθηκε αρκετά πιο δύσκολη και προβληματική για κάποιο νέο χρήστη του λογισμικού από ότι τα προηγούμενα βήματα. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η διαδικασία αυτή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα προβλήματα που εμφανίστηκαν και το πως επιλύθηκαν.

Το πρώτο πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν ότι κατά τη διαδικασία πρόσθεσης στρωμάτων ο κώδικας γινόταν πολύ αργός, και έκανε υπερβολικά πολλές επαναλήψεις. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί κατά την “εκτόπιση” του αρχικού πλέγματος μακριά από το σώμα, υπάρχουν περιοχές με κελιά που παραμορφώνονται πολύ, και με τους προεπιλεγμένους περιορισμούς όσον αφορά τη ποιότητα του πλέγματος, αυτά τα κελιά ήταν μη αποδεκτά. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να αρχίζει από την αρχή η διαδικασία και στις περιοχές αυτές να σταματάει η πρόσθεση στρωμάτων. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις ακμές του σώματος, αλλά πολλές φορές παρατηρείται ένα φαινόμενο “domino” και καθώς σταματούσε η πρόσθεση στρωμάτων σε μία περιοχή, αυτό οδηγούσε σε μη αποδεκτά κελιά στην αμέσως επόμενη.

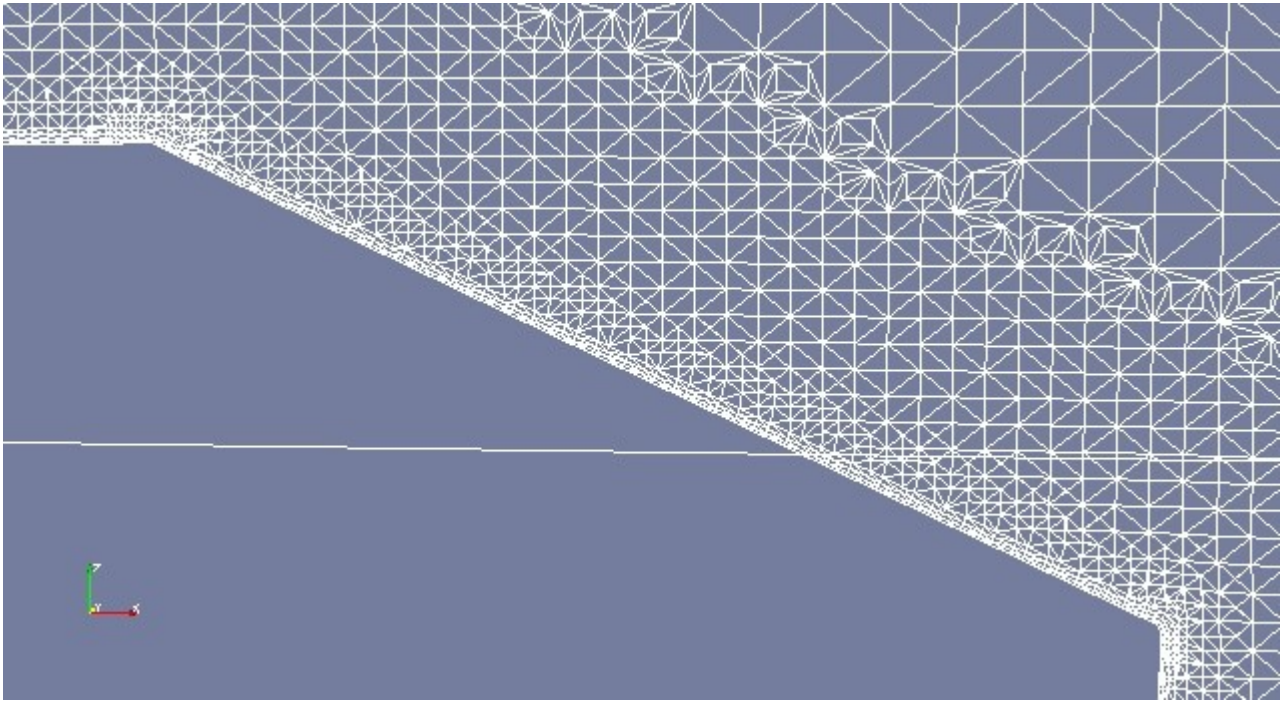
Το δεύτερο πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν στην περιοχή ανάμεσα στο Ahmed body και το έδαφος, όπου η απόσταση είναι μικρή και το υπάρχον πλέγμα “συμπιεζόταν” υπερβολικά και από τις δύο μεριές για να χωρέσουν τα επιπλέον στρώματα, κάτι που οδηγούσε πάλι σε μη αποδεκτά κελιά.

Τα παραπάνω αντιμετωπίστηκαν με 2 τρόπους. Αρχικά με την “χαλάρωση” των ρυθμίσεων ελέγχου της ποιότητας του πλέγματος που βρίσκονται στην περιοχή meshQualityControls του αρχείου ρυθμίσεων. Και τέλος με παραπάνω πύκνωμα του πλέγματος κοντά στο σώμα ώστε να έχουμε δυνατότητα να προσθέσουμε λιγότερα στρώματα που θα έχουν και πολύ μικρότερο συνολικό πάχος.

Τελικά, έχοντας υπόψη ότι θα χρησιμοποιήσουμε συναρτήσεις τοίχου (wall functions) κατά την επίλυση της ροής (μοντέλα τύρβης υψηλών αριθμών Reynolds), πάνω στο σώμα προτιμήθηκε η πρόσθεση 3 στρωμάτων και στον δρόμο 2 στην περιοχή addLayersControls του αρχείου ρυθμίσεων. Επιλέγεται expansionRatio 1.3 και πάχος του στρώματος που βρίσκεται πιο μακριά από την επιφάνεια, 0.12 για το Ahmed body και 0.15 για το δρόμο λαμβάνοντας υπόψη και το πάχος των κελιών του εξωτερικού πλέγματος που είναι σε επαφή με το τελευταίο στρώμα. Έτσι προκύπτει πραγματικό πάχος πρώτου στρώματος περίπου 0.5mm στο Ahmed body και 0.9mm στο έδαφος. Στα σχήματα 2.26 και 2.27 βλέπουμε εικόνες από το τελικό πλέγμα.



Σχ 2.26 Τομή πλέγματος με στρώματα κελιών στο σώμα και στο έδαφος στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ 2.27 Πλέγμα με στρώματα κελιών, τομή στο επίπεδο συμμετρίας.

Γενικά η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος ολοκληρώθηκε μέσω αρκετών δοκιμών και πειραματισμών από τη στιγμή που αντιμετωπιζόταν κάθε πρόβλημα με νέα εργαλεία/λογισμικό. Μέχρι το στάδιο πρόσθεσης στρωμάτων κελιών πάνω στις επιφάνειες το πρόγραμμα ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά, προβλέψιμα και με μικρούς χρόνους εκτέλεσης. Ένα μειονέκτημα του εργαλείου αυτού είναι η έντονη διακριτοποίηση που παρατηρούμε στο επίπεδο πυκνότητας του πλέγματος (δηλαδή το πλέγμα δεν πυκνώνει ομαλά), κάτι που προκύπτει φυσικά λόγω της μεθόδου που ακολουθείται για τη δημιουργία του και που ωστόσο δεν έχει σημαντική επίπτωση στη διαδικασία επίλυσης της ροής στη συνέχεια πέρα από ελάχιστα μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης που μπορεί να προκύψουν λόγω “βαρύτερου” πλέγματος. Η αντιστοίχιση του πλέγματος στη γεωμετρία μπορεί να εμφανίσει προβλήματα σε έντονες ακμές και γωνίες του σώματος σε περίπτωση που δεν έχουν γίνει κατάλληλες ρυθμίσεις και το πλέγμα δεν είναι αρκετά πυκνό, σε ομαλές και καμπύλες επιφάνειες δεν εντοπίζονται ατέλειες. Το τελικό πλέγμα αποτελείται από 4.000.000 κελιά και ολοκληρώνεται σε 20 περίπου λεπτά τρέχοντας σε 1 επεξεργαστή (2.8Ghz), και καταλαμβάνοντας μέχρι 6.5 περίπου Gbyte μνήμης RAM κατά την εκτέλεσή του.

### **3. Επίλυση ροής και υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης του Ahmed body.**

Για το πλέγμα που δημιουργήθηκε είναι πλέον δυνατό να εκτελεστεί ο αλγόριθμος αριθμητικής επίλυσης της ροής ώστε στη συνέχεια να υπολογίζεται ο συντελεστής αντίστασης του σώματος, που είναι το μέγεθος ως προς το οποίο θα γίνει βελτιστοποίηση. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αλλά και ο συνολικός χρόνος υπολογισμού να είναι σε λογικά πλαίσια, έχοντας υπόψη ότι κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης μέσω εξελικτικών αλγορίθμων θα είναι πολλαπλάσιος του χρόνου μίας εκτέλεσης. Οι ενέργειες αυτές για την ορθή προεργασία και εκτέλεση του κώδικα επίλυσης της ροής παρατίθενται με μια λογική σειρά, από τον καθορισμό των οριακών συνθηκών του πεδίου ροής, μέχρι και την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω σύγκρισης με αντίστοιχα πειραματικά αλλά και επιλογές που έγιναν με σκοπό την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους.

Για τον υπολογισμό των μεγεθών της ροής θα χρησιμοποιηθεί ένας κώδικας επίλυσης μόνιμης, ασυμπίεστης ροής συνεκτικού ρευστού με μοντελοποίηση τύρβης [9] [10] [11] [13]. Το υπολογιστικό κόστος θα ήταν απαγορευτικό για το σκοπό της παρούσας εργασίας σε περίπτωση που η ροή ήταν μη-μόνιμη και συμπιεστή. Για αυτό το λόγο δεν θα προτιμηθεί και κάποια τεχνική LES (Large Eddy Simulation), καθώς τη στιγμή που η περιοχή του ομόρρου είναι αρκετά σημαντική όταν αναφερόμαστε σε ροές γύρω από γεωμετρίες αυτοκινήτων, δεν υπάρχει λόγος να παρατηρηθούν λεπτομερέστερα τα φαινόμενα που εμφανίζονται σε αυτή. Ο κώδικας με αυτά τα χαρακτηριστικά που συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό OpenFOAM ονομάζεται simpleFoam.

### 3.1 Χαρακτηριστικά ροής και οριακές συνθήκες.

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

Κινηματική συνεκτικότητα ρευστού:  $15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

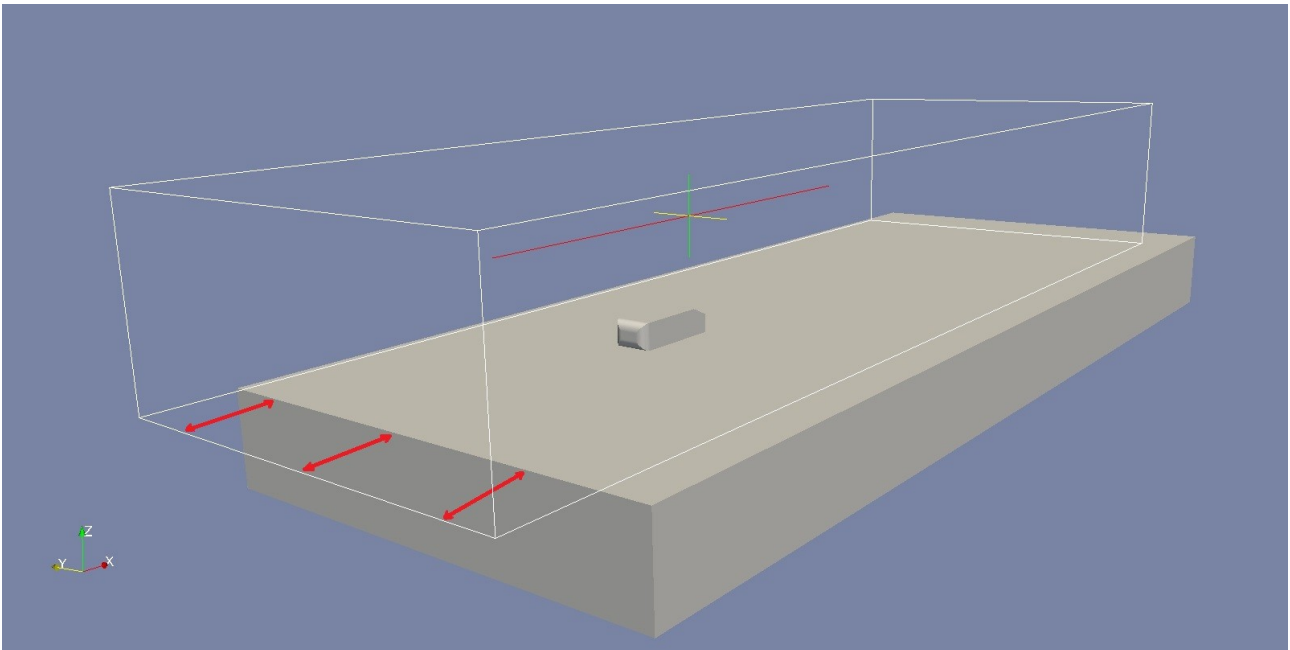
Πυκνότητα ρευστού (ασυμπίεστο ρευστό):  $1.2 \text{Kg}/\text{m}^3$

Ταχύτητα ροής:  $40 \text{m}/\text{s}$

Αριθμός Reynolds ροής (μήκος αναφοράς το ύψος του σώματος):  $Re=768,000$  (ή  $\sim 2.8 \times 10^6$  με μήκος αναφοράς το μήκος του σώματος)

Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για την επίλυση της ροής. Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει σε δύο από τις επιλογές που έγιναν. Πρώτα επιλέχθηκε κατά τη πιστοποίηση των αποτελεσμάτων του κώδικα το έδαφος να είναι ακίνητο σε σχέση με το σώμα, δηλαδή η οριακή συνθήκη της ταχύτητας σε αυτό να είναι μηδενική Dirichlet, ενώ κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης και αφού έχει επιβεβαιωθεί η λειτουργικότητα του πλέγματος και του κώδικα επίλυσης της ροής να έχουμε το έδαφος να κινείται σε σχέση με το σώμα, δηλαδή τιμή της ταχύτητας σε αυτό να είναι  $40 \text{m}/\text{s}$  και ίση με αυτή της ροής. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε κατά την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων να προσομοιωθεί η ροή σε σήραγγα αντίστοιχη με αυτή των πειραμάτων για τα οποία έχουμε δεδομένα, ενώ κατά τη βελτιστοποίηση να έχουμε συνθήκες που θα αντιπροσωπεύουν περισσότερο ένα πραγματικό αυτοκίνητο στο δρόμο ή αντίστοιχα ένα μοντέλο σε σήραγγα με ιμάντα στο έδαφος που “τρέχει” μαζί με τη ροή. Είναι κάτι που σε αριθμητική μέθοδο δεν έχει και επιπλέον κόστος και έτσι εφαρμόζεται. Μάλιστα με αυτή τη κίνηση παρατηρήθηκε στη συνέχεια και βελτίωση της σύγκλισης του κώδικα επίλυσης της ροής κατά τη βελτιστοποίηση, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς αφού η ταχύτητα στο όριο είναι ίση με αυτή της εισερχόμενης ροής, δεν υπάρχει σημαντική ανάπτυξη οριακού στρώματος στο έδαφος. Η δεύτερη επιλογή που επισημαίνεται είναι η τοποθέτηση της αρχής της επιφάνειας που αναπαριστά το έδαφος (όπου εφαρμόζονται συνθήκες μη ολίσθησης και χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοίχου)  $1 \text{m}$  μετά τη είσοδο της ροής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Αυτό έγινε για να υπάρχει μια περιοχή διαμόρφωσης της ροής και να ελεγχθεί η ανάπτυξη του οριακού στρώματος (ελέγχοντας ουσιαστικά το σημείο στο οποίο αρχίζει να δημιουργείται) χωρίς να επηρεάζεται η απόσταση του σώματος από την είσοδο του χωρίου που σε ασυμπίεστη ροή πρέπει να είναι ακόμα μεγαλύτερη.





Σχ. 3.1 Τοποθέτηση της επιφάνειας που αναπαριστά το έδαφος 1m μετά την είσοδο.

Οι οριακές συνθήκες για τα κύρια μεγέθη της ροής που εφαρμόστηκαν σε κάθε όριο του χωρίου όπως φαίνονται και στην αναπαράσταση του σχήματος 3.2 είναι οι εξής:

**Είσοδος/inlet:** Ταχύτητα κατά τον άξονα x: 40m/s Πίεση: μηδενική παράγωγος

**Έξοδος/outlet:** Ταχύτητα: μηδενική παράγωγος Πίεση: 0 (πίεση αναφοράς, ασυμπίεστο)

**Άνω και πλευρικά όρια:** Συνθήκες συμμετρίας για όλα τα μεγέθη

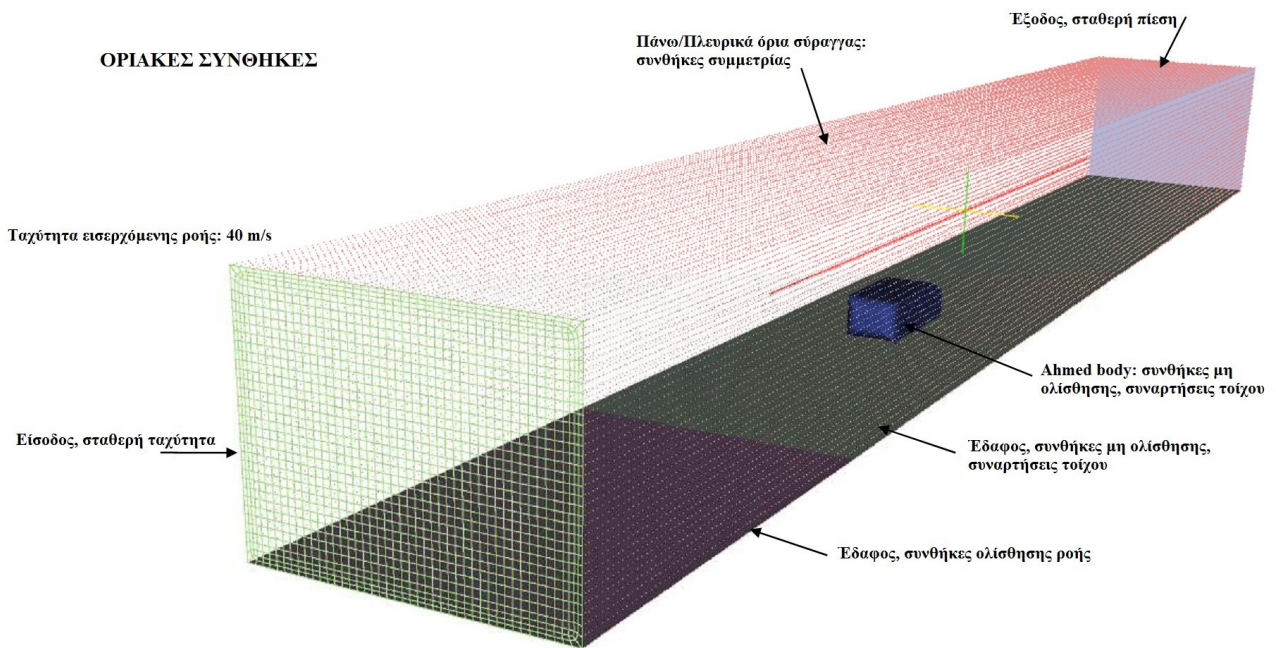
**Επιφάνεια εδάφους (εκτός του 1ου μέτρου από την είσοδο):**

Ταχύτητα: 0 Πίεση: μηδενική παράγωγος Χρήση συναρτήσεων τοίχου

**Κάτω επιφάνεια μέχρι και ένα μέτρο μετά την είσοδο:**

Ταχύτητα: Συνθήκη ολίσθησης Πίεση: μηδενική παράγωγος

**Ahmed body:** Ταχύτητα: 0 Χρήση συναρτήσεων τοίχου Πίεση: μηδενική παράγωγος



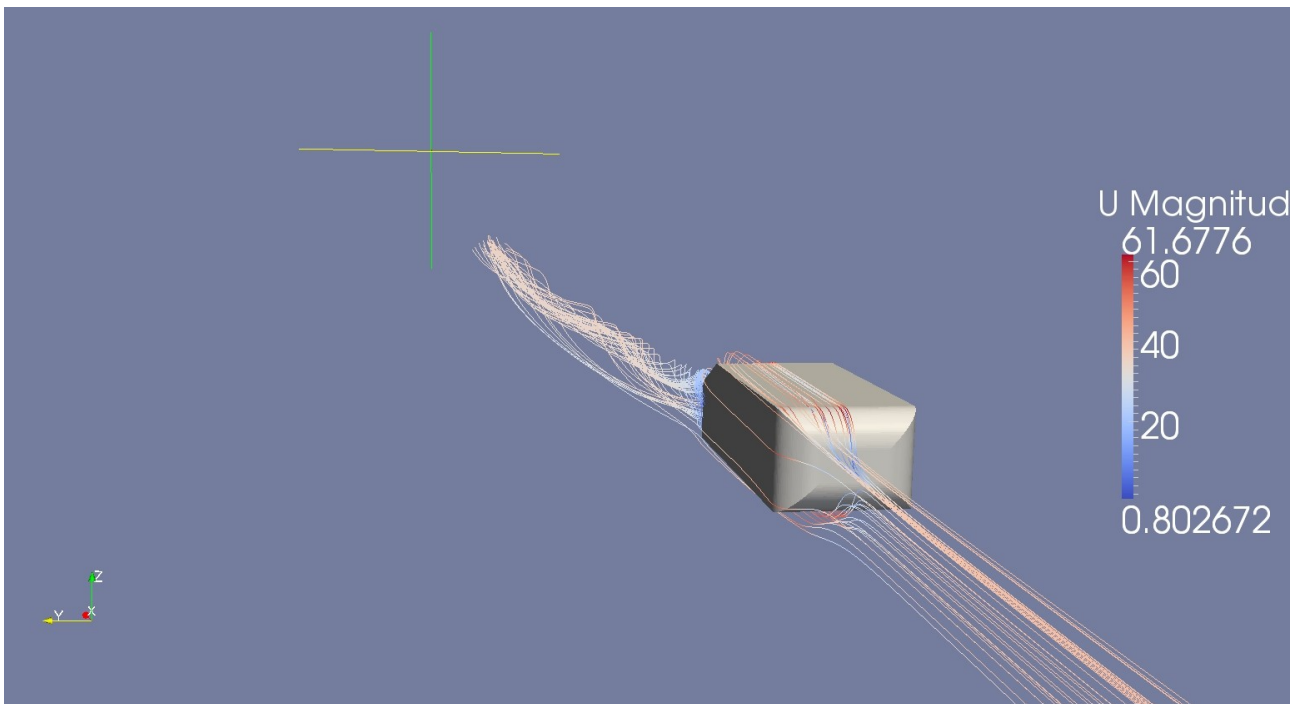
Σχ. 3.2 Οριακές συνθήκες στο χωρίο ροής.

### 3.2 Επίλυση της ροής και σύγκριση μεταξύ δύο μοντέλων τύρβης.

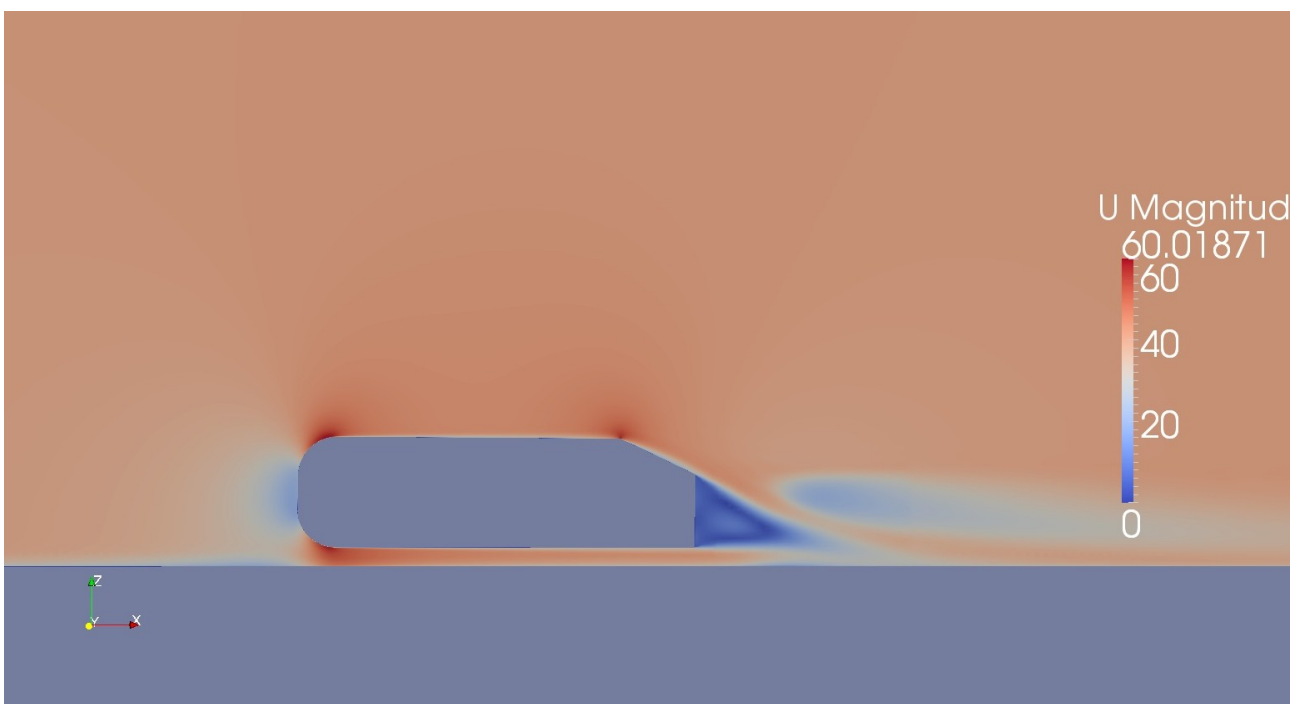
Έχοντας θέσει πλέον και τις οριακές συνθήκες για το πλέγμα που δημιουργήθηκε το τελευταίο βήμα πριν εκτελεστεί ο κώδικας επίλυσης της ροής είναι να επιλεγεί και το μοντέλο τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί. Τα μοντέλα των οποίων η συμπεριφορά στο συγκεκριμένο πρόβλημα δοκιμάστηκε και συγκρίθηκε είναι δύο, το Spallart Almaras και το k- $\omega$  SST. Το Spallart Almaras [4] είναι ένα μοντέλο τύρβης μιας εξίσωσης μέσω της οποίας υπολογίζεται και χρησιμοποιείται μια παρεμφερής της συνεκτικότητα μεταβλητή ( $\tilde{\nu}$ ). Ενώ το k- $\omega$  SST (shear stress transport) [5] είναι ένα μοντέλο 2 εξισώσεων που έχει τα χαρακτηριστικά ενός κλασικού k- $\omega$  κοντά σε τοίχους και ενός k- $\epsilon$  στην ελεύθερη ροή καθώς έχει παρατηρηθεί ότι το k- $\omega$  είναι πολύ ευαίσθητο στις συνθήκες τύρβης που καθορίζονται στην είσοδο. Είναι από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης και προτιμάται και για την καλή συμπεριφορά του σε αποκολλημένες ροές, που παρατηρούνται και σε αυτοκίνητα.

Για να γίνει η σύγκριση των δύο μοντέλων τύρβης ώστε να επιλεγεί το πιο αποτελεσματικό για το συγκεκριμένο πρόβλημα θα συγκρίνουμε τον συντελεστή αντίστασης που προκύπτει για διάφορες τιμές της γωνίας του πίσω κεκλιμένου επιπέδου του Ahmed body σε σχέση και με πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει. Το πρώτο βήμα είναι να επαληθευθεί ότι για το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί αρχικά για το Ahmed body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25 μοίρες, μπορεί να εκτελεστεί και να συγκλίνει ο κώδικας επίλυσης της ροής, αλλά και να παρατηρηθούν οι τιμές του  $y^+$  που προκύπτουν στο σώμα και στο έδαφος και έχουν άμεση σχέση με το πάχος των πρώτων στρωμάτων κελιών του πλέγματος που βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια. Ο κώδικας επίλυσης της ροής simpleFoam εκτελέστηκε και με τα 2 μοντέλα

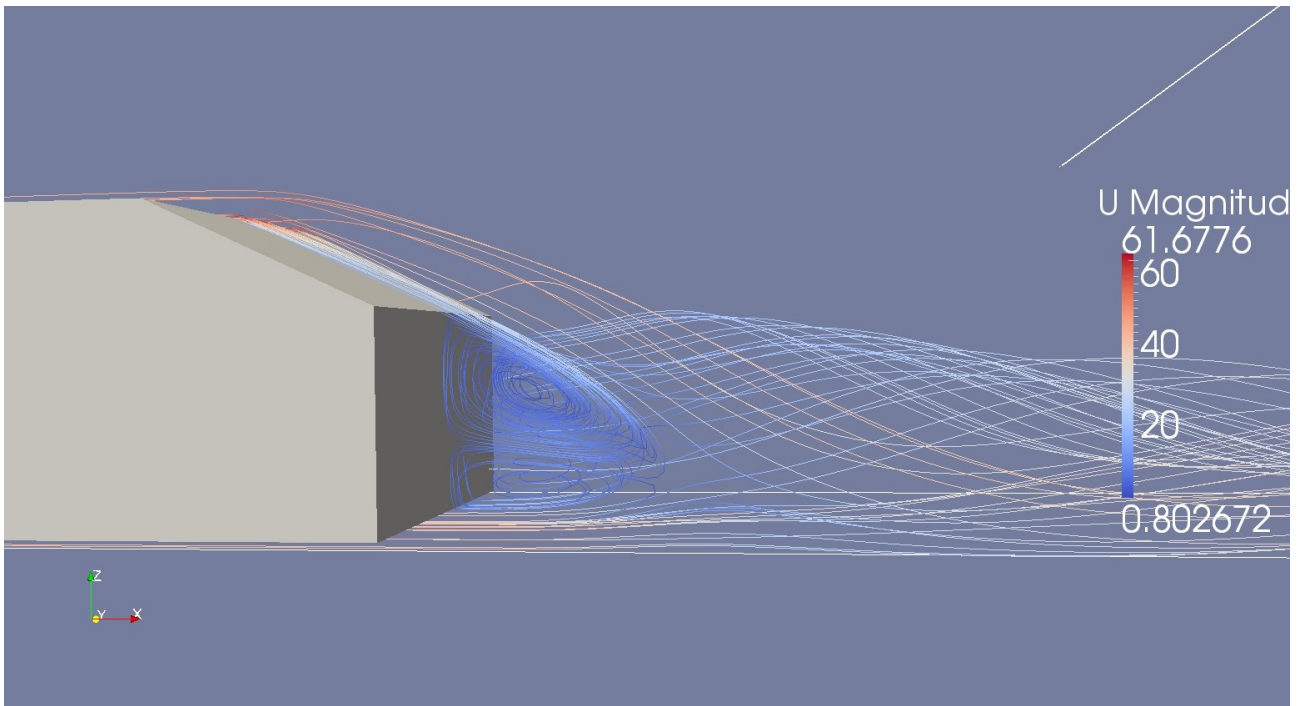
τύρβης, η σύγκλιση του ήταν ικανοποιητική και τα πρώτα αποτελέσματα που λήφθηκαν φαίνονται στα σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5.



Σχ 3.3 Γραμμές ροής, ταχύτητα σε m/s.

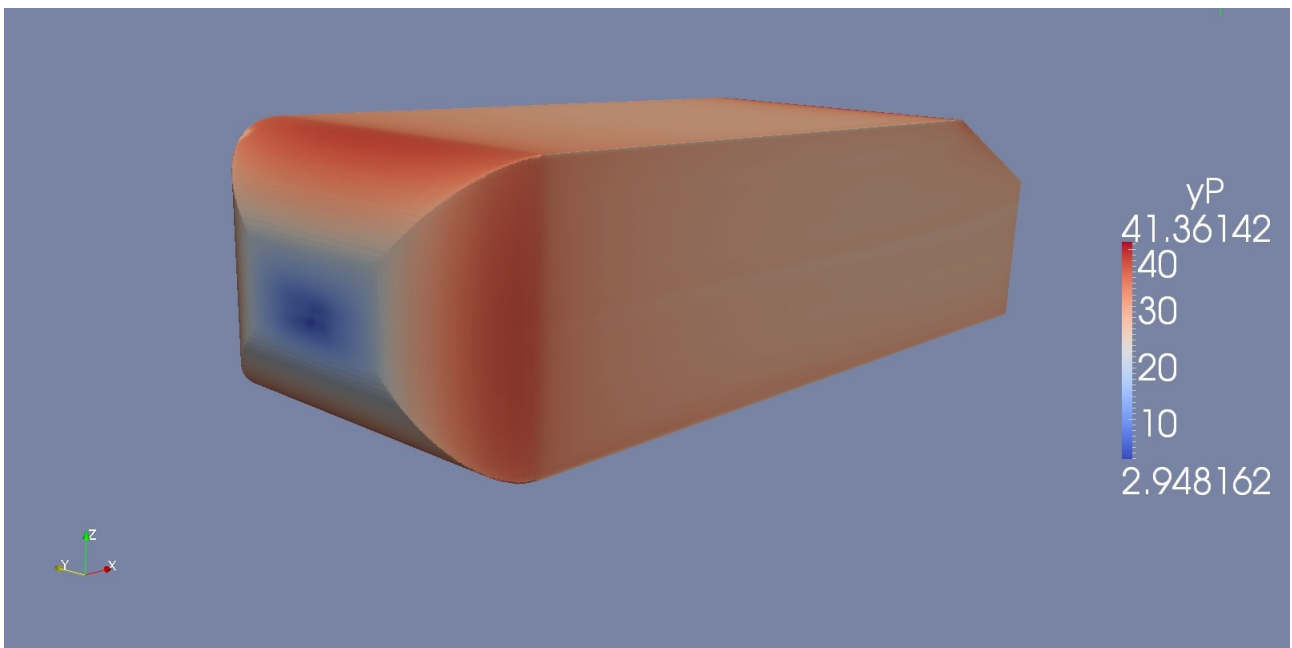


Σχ 3.4 Κατανομή ταχύτητας σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας ( $k-\omega$  SST), ταχύτητα σε m/s.

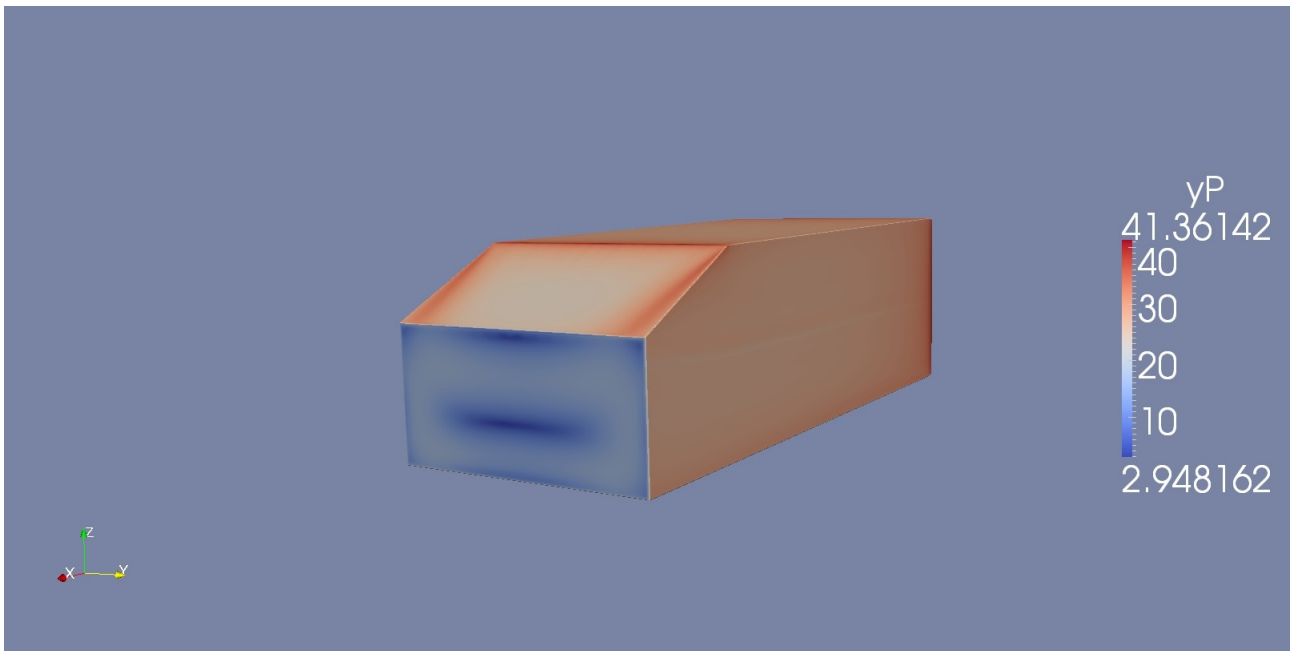


Σχ 3.5 Γραμμές ροής στο πίσω μέρος του σώματος, περιοχές έντονης ανακυκλοφορίας, ταχύτητα σε m/s.

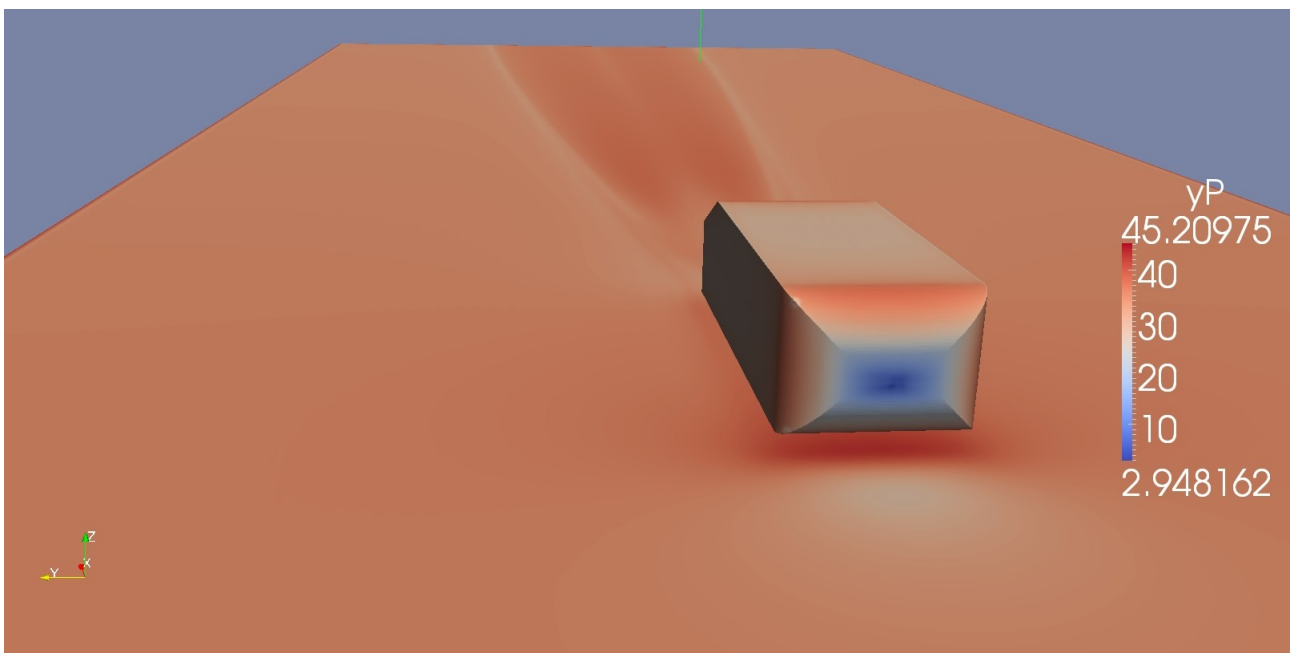
Μια πρώτη παρατήρηση που έγινε σε αυτό το σημείο είναι ότι η περιοχή που είχε πυκνώσει το πλέγμα στο πίσω μέρος του σώματος σταματούσε πιο κοντά στο σώμα από ότι θα ήταν επιθυμητό, σύμφωνα και με τις έντονες μεταβολές της ταχύτητας που παρατηρούνται και στο σχήμα 3.5, έτσι επεκτάθηκε κυρίως στη διάσταση προς τα πίσω του σώματος. Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός της τιμής της αδιάστατης απόστασης από το τοίχωμα  $y^+$ , που παρατηρούμε στα σχήματα 3.6, 3.7 και 3.8 (τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια και για τα 2 μοντέλα τύρβης).



Σχ 3.6 Τιμές  $y^+$  πάνω στην επιφάνεια του Ahmed body.



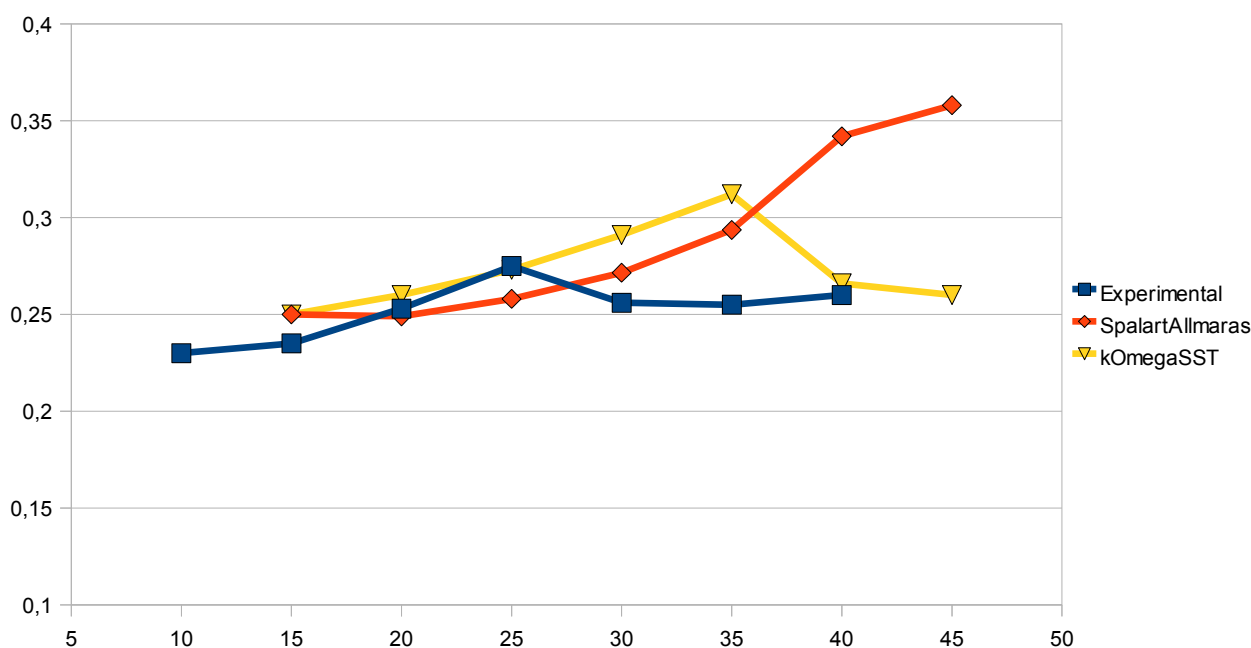
Σχ. 3.7 Τιμές  $y^+$  πάνω στην επιφάνεια του Ahmed body.



Σχ. 3.8 Τιμές  $y^+$  πάνω στην επιφάνειες του Ahmed body και του εδάφους.

Οι τιμές για το  $y^+$  που παρατηρούνται είναι αρκετά ικανοποιητικές, η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στην ακμή που βρίσκεται στην αρχή του πίσω κεκλιμένου επιπέδου όπου εμφανίζεται και αρκετά υψηλή ταχύτητα ροής. Οι αναζητούμενες τιμές  $y^+$  είναι μεταξύ 10 και 100, έτσι δεν γίνεται κάποια περαιτέρω μεταβολή στο πλέγμα εφόσον φαίνεται ότι οι διαστρωματώσεις κελιών πάνω στις επιφάνειες έχουν καλό πάχος για τη σωστή λειτουργία των μοντέλων τύρβης με συναρτήσεις τοίχου.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν με το solidWorks 7 μοντέλα του Ahmed body με γωνίες πίσω κεκλιμένου επιπέδου από 15 μέχρι και 45 μοίρες και επιλύθηκε η ροή και με τα 2 μοντέλα τύρβης για κάθε περίπτωση. Εδώ παρουσιάστηκε μια πρώτη ευκαιρία να δοκιμαστεί ο κώδικας γένεσης πλέγματος σε ελαφρώς διαφοροποιημένες γεωμετρίες του Ahmed body, η μορφή των πλεγμάτων που προέκυψαν ήταν η αναμενόμενη και έτσι συνεχίστηκε η διαδικασία. Στο σχήμα 3.9 παρατηρούμε την τιμή του συντελεστή αντίστασης που υπολογίστηκε με χρήση των 2 μοντέλων τύρβης σε σύγκριση και με πειραματικά [6] αποτελέσματα για τις διαφορετικές γωνίες πίσω κεκλιμένου επιπέδου του Ahmed body.

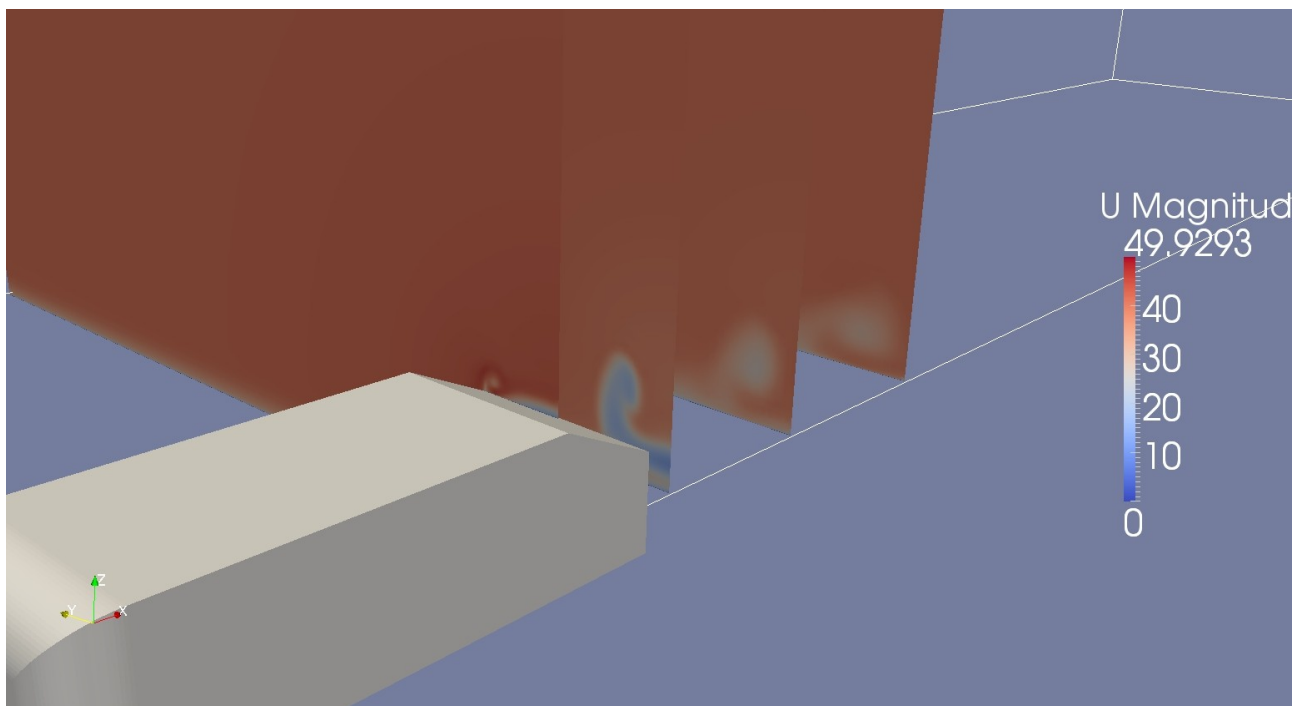


Σχ 3.9 Συντελεστής αντίστασης για διαφορετικές γωνίες πίσω κεκλιμένου επιπέδου του Ahmed body.

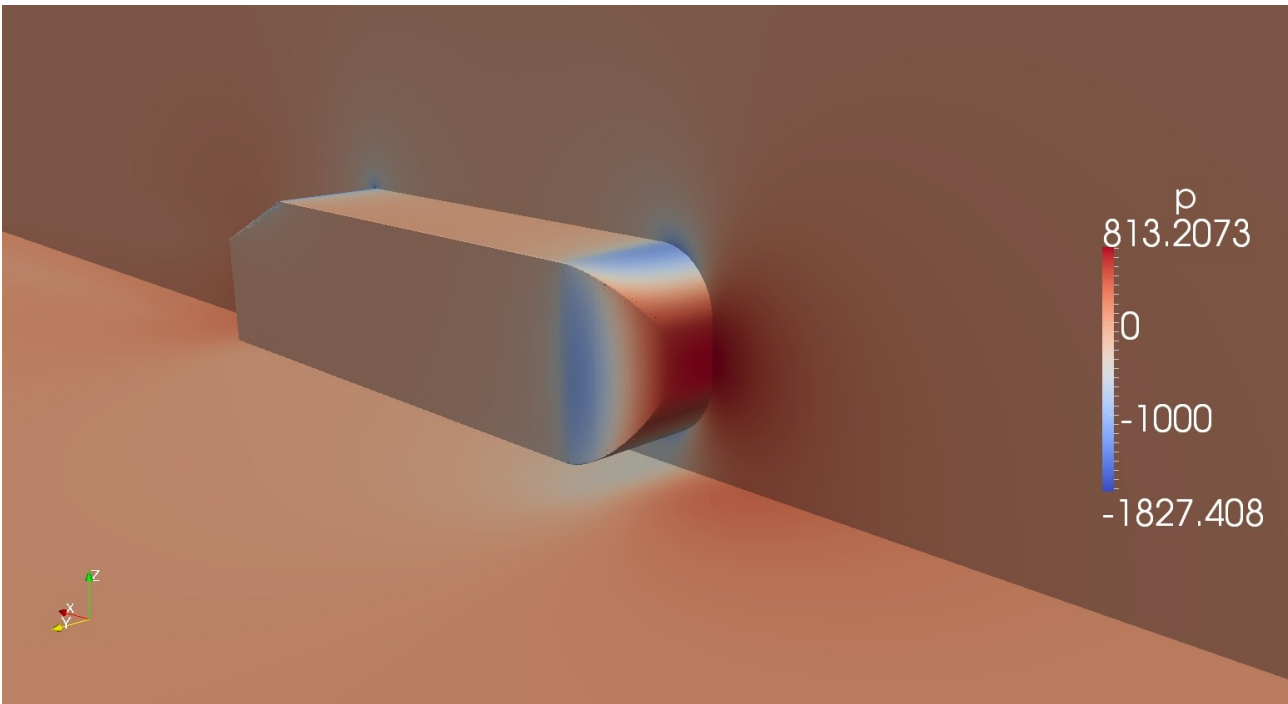
Από τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρούμε μία αύξηση του συντελεστή αντίστασης στην περιοχή των 25 μοιρών που είναι και η γωνία πέρα από την οποία η ροή αρχίζει να αποκολλάται από το πίσω κεκλιμένο επίπεδο. Ο μέγιστος συντελεστής αντίστασης του σώματος σύμφωνα και με τα πειραματικά αποτελέσματα για αυτή τη γωνία φτάνει το 0.275, και στη συνέχεια όσο η ροή αποκολλάται περισσότερο από την πίσω κεκλιμένη επιφάνεια πέφτει και μένει, μέχρι τις 45 μοίρες τουλάχιστον, κοντά στο 0.255. Με το μοντέλο τύρβης Spallart Allmaras παρατηρούνται τιμές του συντελεστή αντίστασης αρκετά κοντινές στα πειραματικά αποτελέσματα για γωνίες μέχρι και 30 μοίρες, ωστόσο στη συνέχεια ο συντελεστής αντίστασης συνεχίζει μέχρι και τις 45 μοίρες να αυξάνεται υπερβολικά μάλιστα. Με το μοντέλο τύρβης k- $\omega$  SST παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για γωνίες μέχρι 30 μοίρες είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά και στην περιοχή των 35 μοιρών βρίσκονται λίγο πιο μακριά καθώς ο συντελεστής αντίστασης συνεχίζει να αυξάνεται για ακόμα λίγο, αλλά στη συνέχεια εμφανίζεται το φαινόμενο που παρατηρείται και στα πειράματα, δηλαδή ο συντελεστής αντίστασης μετά από κάποια γωνία να μειωθεί απότομα. Επίσης στις 25 μοίρες η τιμή του

συντελεστή αντίστασης που υπολογίστηκε είναι ουσιαστικά ίδια με την πραγματική. Τελικά σύμφωνα και με τα παραπάνω αποφασίζεται να χρησιμοποιηθεί το k- $\omega$  SST καθώς το γεγονός ότι παρουσιάζεται και το φαινόμενο υπερβολικής αύξησης του συντελεστή αντίστασης για κάποια συγκεκριμένη γωνία σημαίνει ότι προσομοιώνει καλύτερα τη ροή, απλά λόγω κάποιων παραγόντων που μπορεί να είναι τα επίπεδα τύρβης στην είσοδο, η πυκνότητα του πλέγματος κλπ, εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο με “καθυστέρηση” 10 μοιρών ουσιαστικά. Πρέπει να αναφερθεί ότι στη παρούσα εργασία που έχει σαν σκοπό τη βελτιστοποίηση μας ενδιαφέρει περισσότερο οι σύγκριση των τιμών του συντελεστή αντίστασης για διαφορετικές μορφές μεταξύ τους παρά η καθαρή τιμή τους, οπότε η προσομοίωση της ροής που έχει επιτευχθεί σε αυτό το σημείο είναι ικανοποιητική.

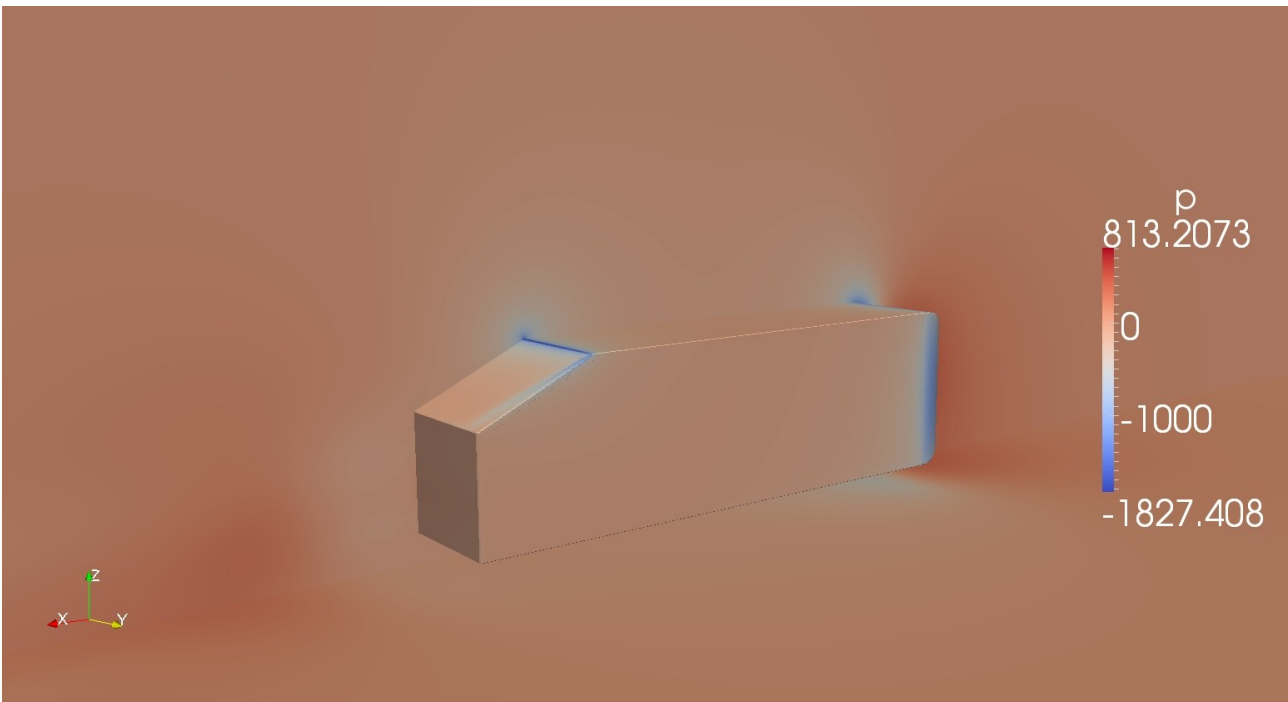
Στη συνέχεια θα πρέπει να αποφασιστεί τι είδους επεμβάσεις θα γίνουν στη γεωμετρία του σώματος για να εφαρμοστεί η μέθοδος βελτιστοποίησης. Αρχικά στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται και κάποιες περαιτέρω πληροφορίες για τη ροή γύρω από το Ahmed body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25 μοίρες. Εύκολα παρατηρούνται οι περιοχές ανακυκλοφορίας στο πίσω μέρος του σώματος (σχήμα 3.5) και οι χαρακτηριστικοί στρόβιλοι στον ομόρρου του (σχήμα 3.10), που είναι και αποτέλεσμα της άνωσης που προκύπτει για τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Η μέγιστη ταχύτητα ροής και ταυτόχρονα η ελάχιστη πίεση πάνω στο σώμα εμφανίζονται στην αρχή του πίσω κεκλιμένου επιπέδου και στις μπροστά καμπύλες επιφάνειες (σχήμα 3.4). Τέλος στα σχήματα 3.11 και 3.12 έχουμε την κατανομή πίεσης πάνω στο σώμα αλλά και σε τομή του επιπέδου συμμετρίας.



Σχ 3.10 Στρόβιλοι στον ομόρρου του σώματος όπως φαίνονται σε τομές με κατανομή ταχύτητας, ταχύτητα σε m/s.



Σχ 3.11 Κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του Ahmed body και στο επίπεδο συμμετρίας.



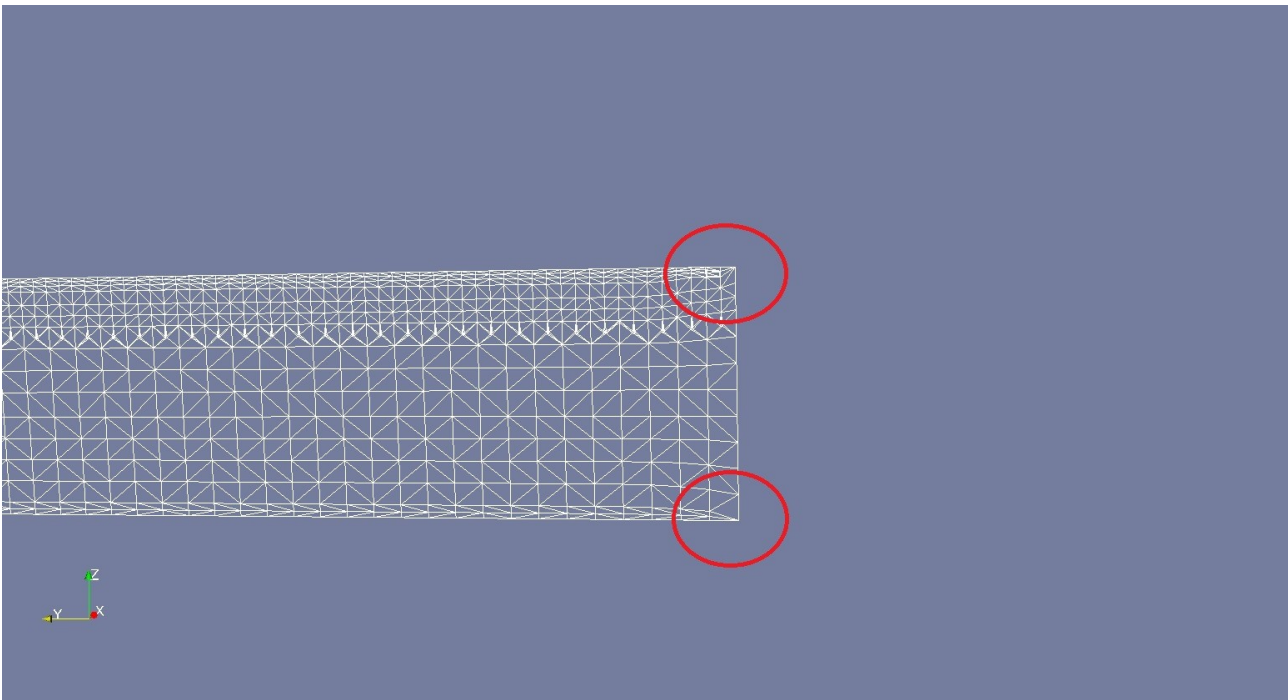
Σχ 3.12 Κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του Ahmed body και στο επίπεδο συμμετρίας.



### 3.3 Μείωση του υπολογιστικού κόστους και επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης της ροής.

Όπως αναφέρθηκε το τελευταίο που θα παρουσιαστεί σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι επιλογές που έγιναν ώστε να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα γένεσης πλέγματος και επίλυσης της ροής. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού υπολογιστή που διαθέτουμε είναι τα εξής: Επεξεργαστή Intel Core i5 CPU (4 πυρήνες στα 2.67GHz) και 6Gb DDR3 μνήμη RAM. Το λειτουργικό (Ubuntu 9.10) και το OpenFOAM είναι 64bit. Το OpenFOAM δίνει τη δυνατότητα να γίνει επίλυση της ροής παράλληλα σε παραπάνω του ενός επεξεργαστές. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίζοντας το υπολογιστικό χωρίο σε τμήματα και αναθέτοντας σε κάθε επεξεργαστή την επίλυση της ροής στο καθένα από αυτά. Αυτό είναι μια ενέργεια που είχε γίνει από την αρχή καθώς ο χρόνος επίλυσης μειώνεται στο 1/3 σε σχέση με απλή εκτέλεση σε 1 επεξεργαστή. Έτσι ο αρχικός χρόνος εκτέλεσης του λογισμικού επίλυσης της ροής χρησιμοποιώντας και τους 4 πυρήνες του επεξεργαστή για το πλέγμα των 4 εκατομμυρίων κελιών που έχει δημιουργηθεί είναι περίπου 5 ώρες.

Η επόμενη προφανής κίνηση είναι να γίνει εκμετάλλευση της συμμετρίας του Ahmed body. Έτσι χωρίζοντας το χωρίο στη μέση ουσιαστικά υποδιπλασιάζονται τα κελιά αυτού και αναμένεται να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος εκτέλεσης. Για να επιτευχθεί αυτό αρκεί το αρχικό πλέγμα-βάση που δημιουργείται πριν την εκτέλεση του SnappyHexMesh να διαιρεθεί στα δύο με το ένα νέο του όριο να βρίσκεται πάνω στο επίπεδο συμμετρίας του σώματος, χωρίς να αλλάξουμε καμία άλλη ρύθμιση. Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι στα τελευταία κελιά που βρίσκονται πάνω στο Ahmed body και στο επίπεδο συμμετρίας δεν πραγματοποιείται η διαδικασία πρόσθεσης στρωμάτων κελιών όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.13.



Σχ 3.13 Μη πρόσθεση στρωμάτων κελιών κοντά στο επίπεδο συμμετρίας, τομή σε επίπεδο κάθετο στη κατεύθυνση της ροής (y-z).

Για να δούμε τι επιπτώσεις έχει αυτό στο τελικό αποτέλεσμα έγινε επίλυση της ροής. Στις τιμές του  $y^+$  στην περιοχή αυτή και ιδιαίτερα στα οριακά κελιά δεν παρουσιάστηκε κάτι ιδιαίτερο πέρα από μια μικρή αύξηση εντός των λειτουργικών ορίων (10-100). Επίσης η τιμή του συντελεστή αντίστασης για το Ahmed body μεταξύ αυτού και του προηγούμενου ολόκληρου πλέγματος είχε διαφορές της τάξης του 0.3%, έμεινε ουσιαστικά αμετάβλητη καθώς τέτοιες διαφορές πιθανώς δεν οφείλονται καν σε αυτή την περιοχή του πλέγματος. Έτσι ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα επίλυσης της ροή έπεσε από τις 5 στις 3 ώρες και ο χρόνος γένεσης του πλέγματος από τα 20 σε 10 περίπου λεπτά.

Η τελευταία κίνηση που έγινε προς ελαχιστοποίηση του απαραίτητου χρόνου εκτέλεσης για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης ήταν ένας υπερχρονισμός της μνήμης και του επεξεργαστή του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο επεξεργαστής ρυθμίστηκε σε 2.8GHz και η μνήμη από 1333 σε 1866MHz. Ιδιαίτερα ο υπερχρονισμός της μνήμης φάνηκε να είναι αρκετά αποτελεσματικός και επήλθε τελικά μία περαιτέρω 15% περίπου μείωση στον συνολικό χρόνο εκτέλεσης. Τέλος παρουσιάζονται οι κώδικες και τα εργαλεία που εκτελούνται με τη σειρά για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης.

Όνομα κώδικα	Περιγραφή	Χρόνος εκτέλεσης
blockMesh	Δημιουργία αρχικού πλέγματος/βάση	1~2 sec
snappyHexMesh	Δημιουργία πλέγματος πάνω και γύρω από τη γεωμετρία του σώματος	~10 min
decomposePar	Διαίρεση του χωρίου σε 4 μέρη προς επίλυση σε 4 επεξεργαστές	~2 min
simpleFoam	Επίλυση της ροής	~2.7 h
reconstructPar	Επανένωση των 4 επιλυμένων πλέον κομματιών του χωρίου	~2 min
dragForce	Υπολογισμός των δυνάμεων στο σώμα και του συντελεστή αντίστασης αυτού	~2 min

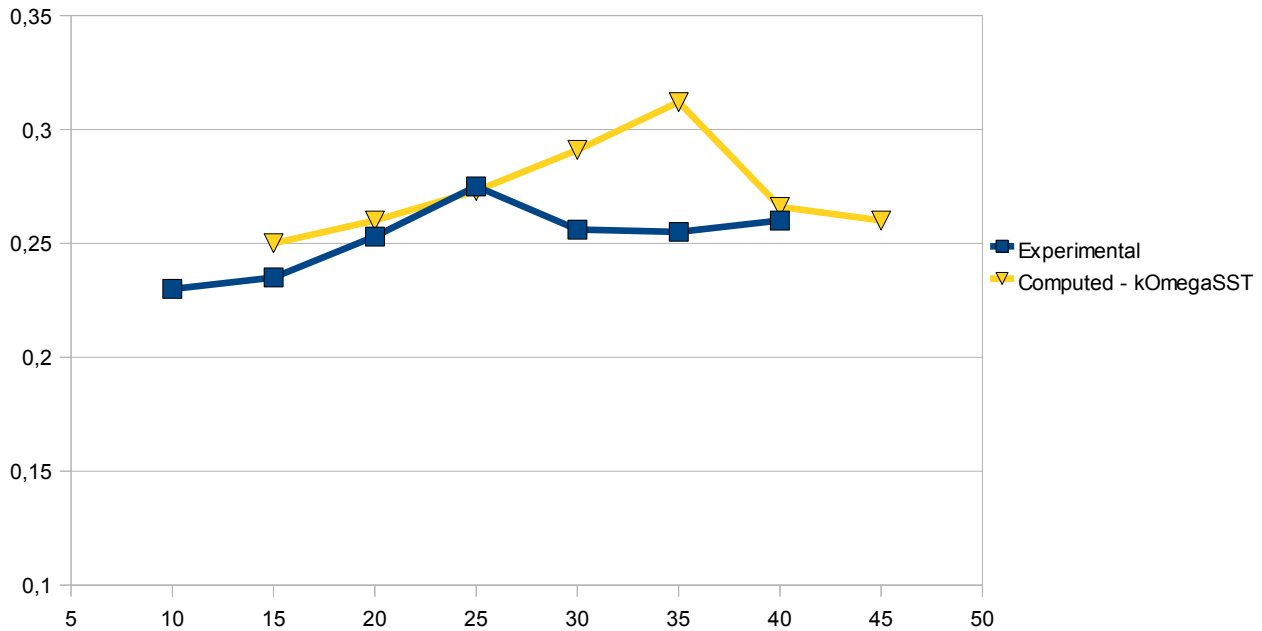
## **4. Βελτιστοποίηση μορφής προς μείωση του συντελεστή αντίστασης του Ahmed body.**

Έχοντας διαθέσιμη υπολογιστική διαδικασία για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης στο Ahmed body (μέσω επίλυσης των εξισώσεων ροής στον περιβάλλοντα χώρο) αλλά και σε παραλλαγές της γεωμετρίας αυτού, μπορεί πλέον να εφαρμοστεί κάποια τεχνική βελτιστοποίησης με εξελικτικό αλγόριθμο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα διερευνηθεί αρχικά το ποια στοιχεία της γεωμετρίας του Ahmed body θα μορφοποιήσουμε και το τι είδους παραμετροποίηση θα γίνει σε αυτά με σκοπό τη μείωση της οπισθέλκουσας και στη συνέχεια θα δοθούν κάποιες πληροφορίες για τον κώδικα που αναπτύχθηκε για τη δημιουργία του συμβατού με τον κώδικα γένεσης πλέγματος αρχείου γεωμετρίας του σώματος (STL). Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας το λογισμικό βελτιστοποίησης μέσω εξελικτικών αλγορίθμων EASY με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων τιμών αυτών των παραμέτρων ως προς τον συντελεστή αντίστασης. Η βελτιστοποίηση αποφασίστηκε να γίνει με βάση το Ahmed body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25 μοίρες για την οποία στα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται ένα μέγιστο του συντελεστή αντίστασης οπότε και αναμένεται να υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο βελτίωσης, αλλά και γιατί για αυτή τη γωνία ο συντελεστής αντίστασης που έχει υπολογιστεί από την αριθμητική μέθοδο είναι πιο κοντά στον πραγματικό που έχει μετρηθεί στα πειράματα.

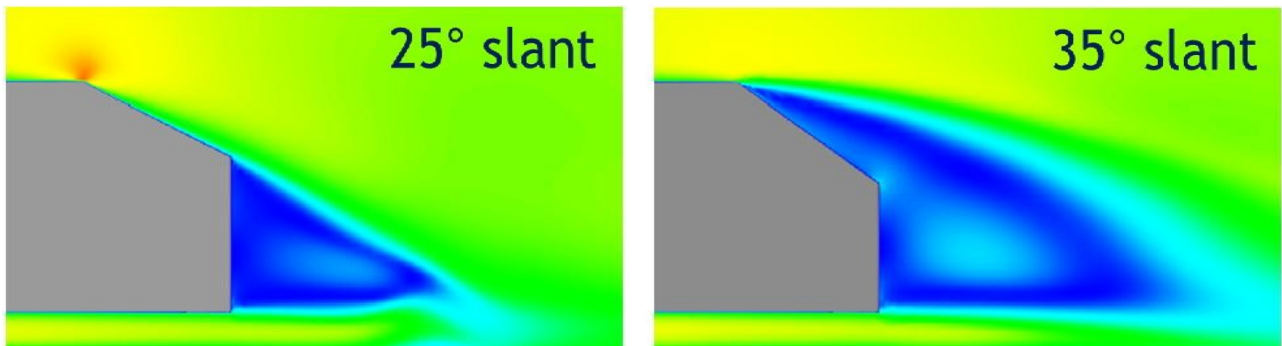
### **4.1 Παραμετροποίηση στοιχείων γεωμετρίας του Ahmed body προς βελτιστοποίηση.**

Αρχικά θα παρατηρηθεί η ροή που έχει ήδη επιλυθεί και βασιζόμενοι αναγκαστικά και σε εμπειρικές γνώσεις περί αεροδυναμικής οχημάτων θα επιλεγούν τα στοιχεία της γεωμετρίας του Ahmed body που θα παραμετροποιηθούν για να ακολουθήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης με εξελικτικό αλγόριθμο. Επισημαίνεται ακόμα μια φορά πως στη παρούσα εργασία στόχος είναι κυρίως η εφαρμογή και ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της συγκεκριμένης μεθόδου βελτιστοποίησης παρά το ίδιο το αποτέλεσμα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία της ροής γύρω από το Ahmed body που οδήγησαν σε 3 πιθανές τροποποιήσεις της γεωμετρίας του, εκ των οποίων θα υλοποιηθεί μια.

Παρατηρώντας το γεγονός ότι ο συντελεστής αντίστασης για γωνίες μεγαλύτερες των 25 μοιρών από κάποιο σημείο και μετά μειώνεται, τόσο στα πειράματα όσο και στα υπολογιστικά αποτελέσματα όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.1, θα γίνει μια διερεύνηση των διαφορών που παρατηρούνται στη ροή όσο η γωνία του πίσω κεκλιμένου επιπέδου αυξάνεται. Στο σχήμα 4.2 παρατηρείται η κατανομή ταχύτητας ρευστού στο επίπεδο συμμετρίας για δύο διαφορετικές γωνίες του πίσω κεκλιμένου επιπέδου.



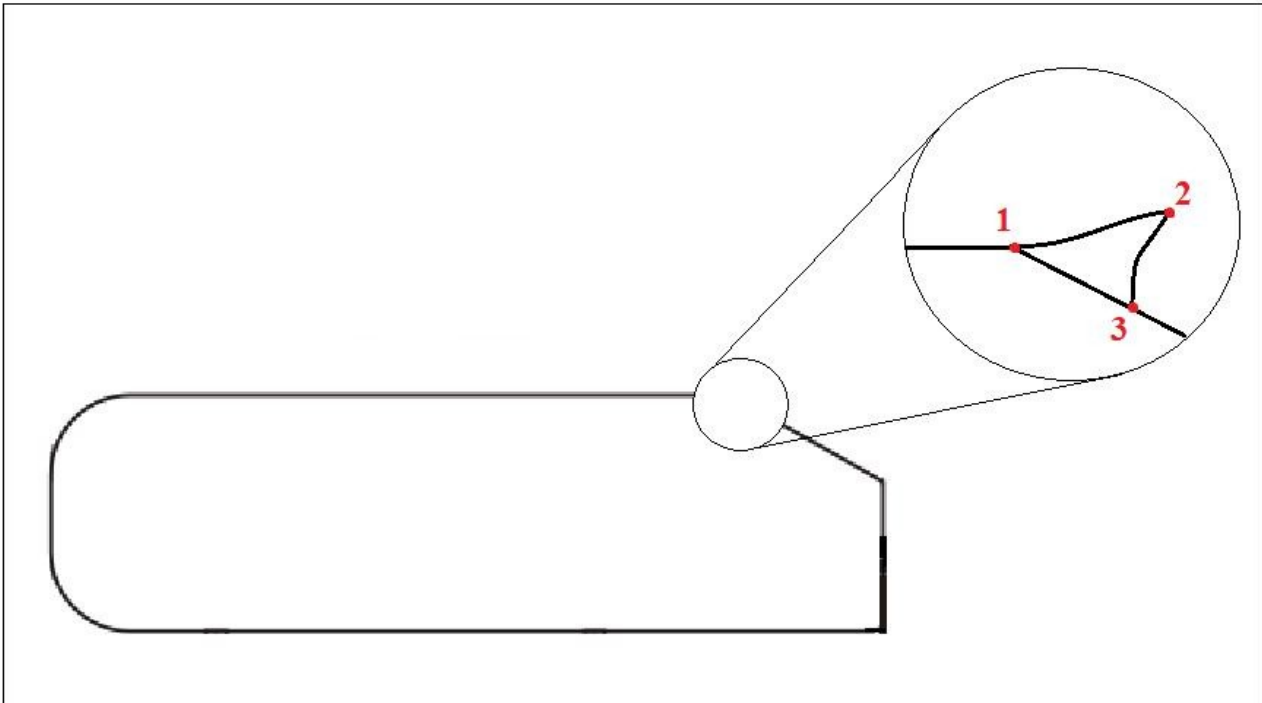
Σχ 4.1 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει γωνίας πίσω κεκλιμένου επιπέδου.



Σχ 4.2 Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας για δύο διαφορετικές γωνίες πίσω κεκλιμένου επιπέδου.

Από το σχήμα 4.2 είναι προφανές ότι η κύρια διαφορά που παρατηρείται στη ροή όσο αυξάνεται η γωνία του πίσω κεκλιμένου επιπέδου είναι η αποκόλληση της από αυτό. Μάλιστα η γωνία 25 μοιρών είναι η οριακή γωνία για την οποία η ροή μένει προσκολλημένη στα πειράματα αλλά και στην υπολογιστική μέθοδο. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα μία πρώτη ιδέα για να μειωθεί ο συντελεστής αντίστασης του Ahmed body με γωνία 25 μοιρών χωρίς αυτή να μεταβληθεί, είναι να προστεθεί μία διαμόρφωση στη σημείο που αρχίζει το κεκλιμένο επίπεδο, δηλαδή στο πίσω μέρος της οροφής του οχήματος ώστε να προκληθεί

αντίστοιχη αποκόλληση της ροής [16]. Μια υλοποίηση αυτού θα μπορούσε να είναι η διαμόρφωση του σχήματος 4.3.

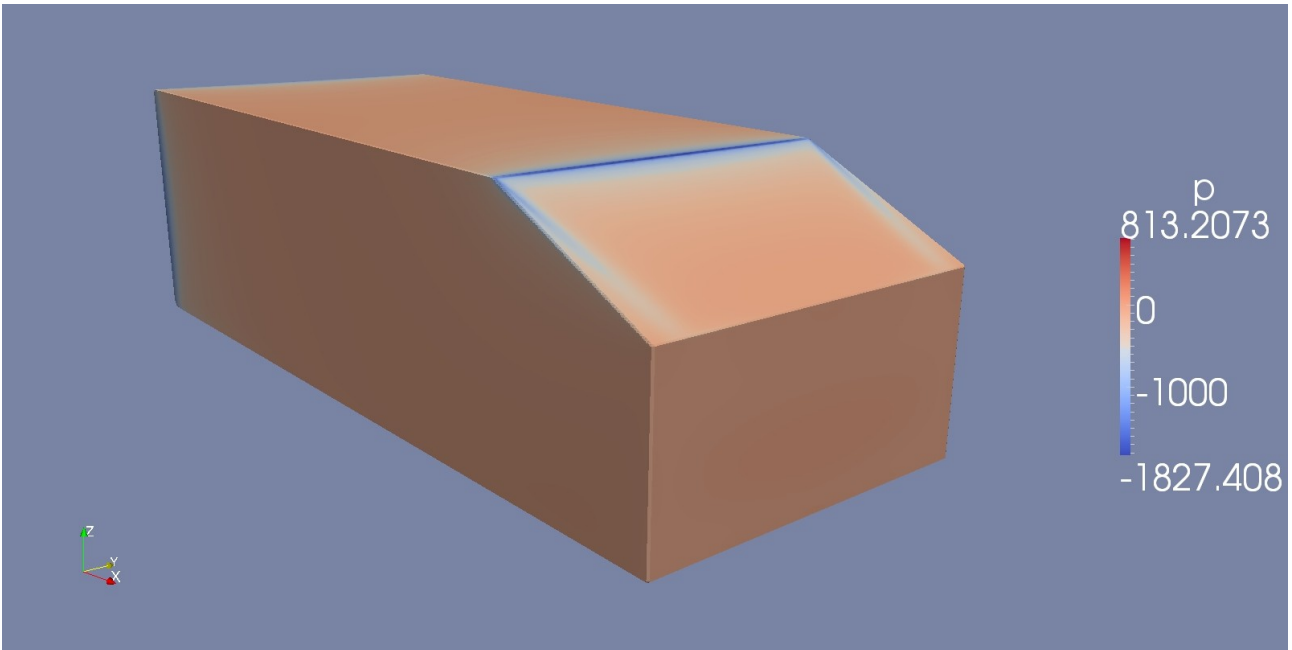


Σχ 4.3 Διαμόρφωση στο πίσω μέρος της οροφής του Ahmed body.

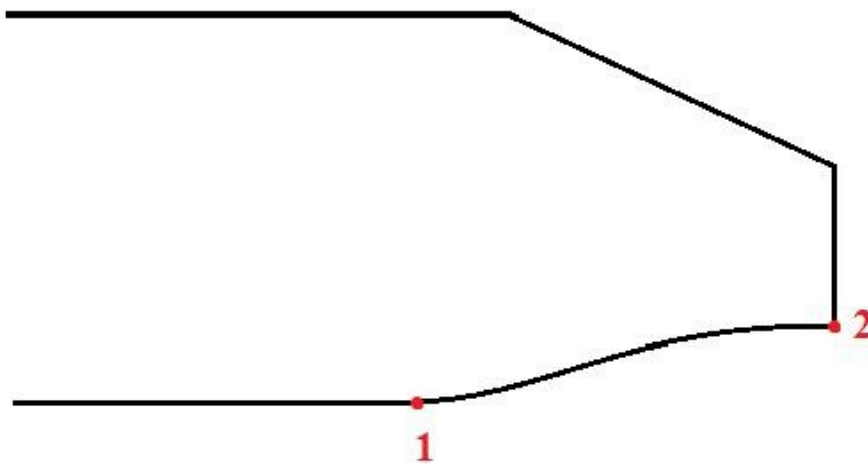
Η παραπάνω διαμόρφωση παρατηρείται πλέον στα περισσότερα αυτοκίνητα παραγωγής αν και δεν είναι τόσο εμφανής καθώς είναι αρκετά περιορισμένο το μέγεθός της και το σημείο 2 δεν ξεπερνά συνήθως σε ύψος το σημείο 1. Είναι μια διαμόρφωση που εξυπηρετεί και στην απομάκρυνση σταγονιδίων νερού σε περίπτωση βροχής από το πίσω παρμπρίζ. Η παραμετροποίηση της μπορεί να γίνει με 3-4 μεταβλητές ελέγχου, δύο για τον έλεγχο της θέσεως του σημείου 2 και ένα ή δύο ακόμα σημεία ελέγχου της μορφής της καμπύλης 1-2. Η θέση του σημείου 3 πιθανώς να μην επηρεάζει πολύ τη ροή αλλά θα μπορούσε να ελέγχεται και αυτή από μια ακόμα μεταβλητή, αντίστοιχα και η μορφή της καμπύλης 2-3. Αυτή η διαμόρφωση θα μπορούσε να προκαλέσει αποκόλληση της ροής αντίστοιχη με αυτή που παρατηρείται για μεγαλύτερες γωνίες του πίσω κεκλιμένου επιπέδου και πιθανώς και πτώση του συντελεστή αντίστασης.

Μια ακόμα προφανής αεροδυναμική βελτίωση είναι η μεταβολή της γεωμετρίας του πίσω-κάτω μέρους του σώματος που βρίσκεται κοντά στο έδαφος. Στο πίσω μέρος του Ahmed body εντοπίζεται μια αρκετά μεγάλη περιοχή υποπίεσης (back-pressure) η οποία θα μπορούσε να μειωθεί (σχήμα 4.4). Επίσης το σώμα για γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25 μοιρών παρουσιάζει σημαντική ανωστική δύναμη, κάτι που έχει σαν συνέπεια και μεγαλύτερων στροβίλων στον ομόρρου αυτού, οπότε μία διαμόρφωση που θα μείωνε την άνωση πιθανώς θα μείωνε ταυτόχρονα και την επαγόμενη αντίσταση. Τέτοιου είδους διαμορφώσεις είναι

οι διαχύτες που χρησιμοποιούνται σε οχήματα. Η υλοποίησή αυτής της λύσης στην περίπτωση του Ahmed body θα μπορούσε να είναι όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.5, με δύο μεταβλητές ελέγχου για τα σημεία 1 και 2 που είναι τα όρια του διαχύτη και κάποιες ακόμα για τον έλεγχο της μορφής της καμπύλης. Φυσικά, θα πρέπει να ληφθούν και περιορισμοί ως προς το μέρος του σώματος που ουσιαστικά αφαιρείται.

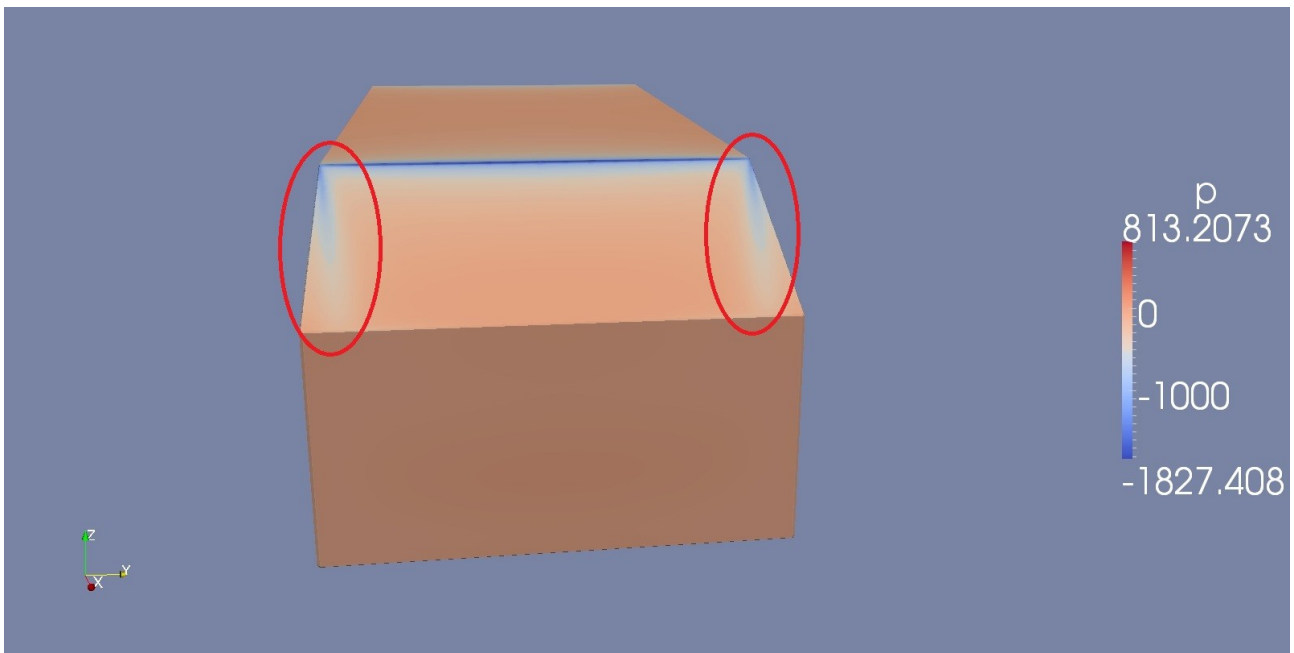


Σχ 4.4 Κατανομή πίεσης στο πίσω μέρος του σώματος.

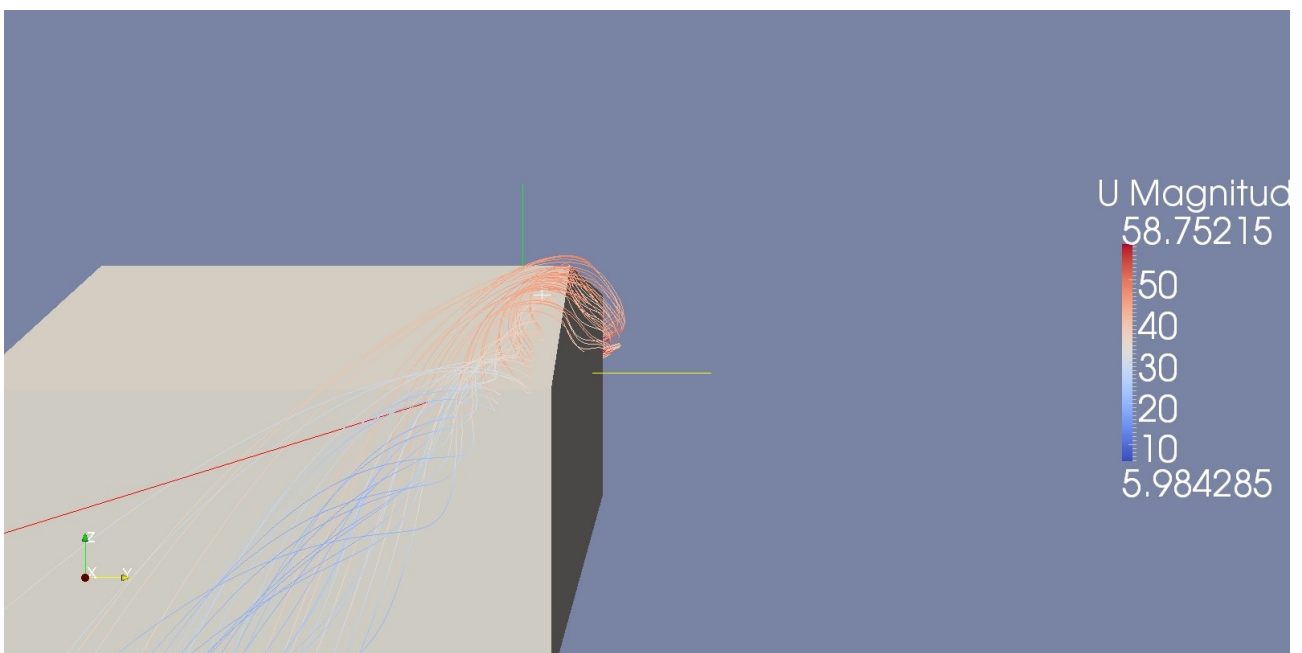


Σχ 4.5 Διαχύτης στο πίσω μέρος του Ahmed body.

Τέλος, στην κατανομή πίεσης στο πίσω μέρος του σώματος παρατηρούνται δύο περιοχές στο πίσω κεκλιμένο επίπεδο με πολύ χαμηλή πίεση (σχήμα 4.6) που προφανώς συμβάλλουν στην συνολική δύναμη αντίστασης. Η χαμηλή πίεση σε αυτά τα σημεία προκαλείται από τη ροή που καθώς μένει προσκολλημένη στην επιφάνεια επιταχύνεται αρκετά, ιδιαίτερα στις πλευρικές ακμές του κεκλιμένου επιπέδου όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.7.

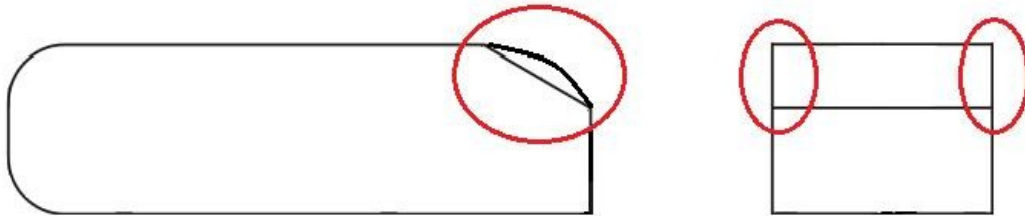


Σχ 4.6 Περιοχές χαμηλής πίεσης στο πίσω μέρος του Ahmed body.



Σχ 4.7 Γραμμές ροής στο πίσω μέρος του Ahmed body.

Για να προκληθεί αποκόλληση της ροής στις πλευρικές ακμές ώστε να μην εμφανιστούν τόσο μεγάλες ταχύτητες ροής αλλά να μειωθεί και το μέγεθος των στροβίλων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πτερύγια στηριγμένα κατά μήκος των ακμών αυτών όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Με μεταβλητές θα ελέγχεται το ύψος τους σε κάποια σημεία και πιθανώς και η γωνία σφήνωσής τους.

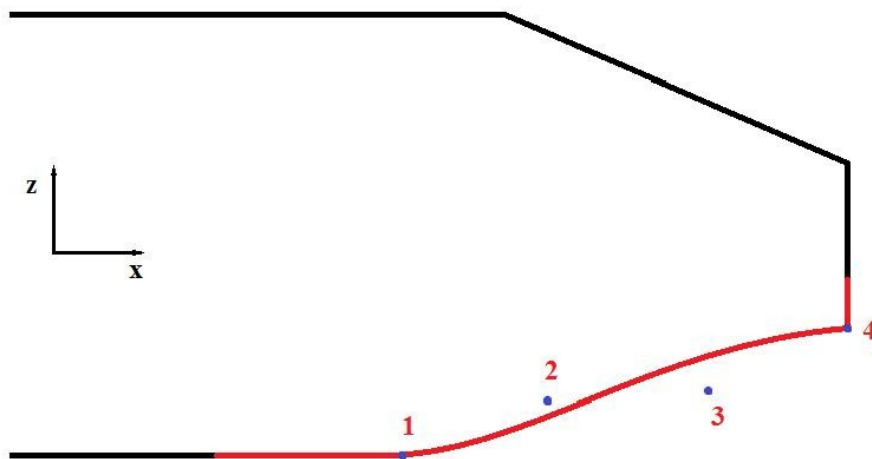


Σχ 4.8 Πτερύγια στις πλευρικές ακμές του πίσω κεκλιμένου επιπέδου του Ahmed body.

Από τις παραπάνω τροποποιήσεις στη γεωμετρία του Ahmed body τελικά προτιμήθηκε η δεύτερη, αυτή του διαχύτη καθώς είναι μια τροποποίηση που, εμπειρικά τουλάχιστον, έχει περισσότερες πιθανότητες να επιφέρει βελτίωση στο συντελεστή αντίστασης του σώματος.

Οι διαχύτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγωνιστικά και πολυτελή sport αυτοκίνητα καθώς η αρνητική άντωση που δημιουργείται λόγω της διαμόρφωσής τους αυξάνει την πρόσφυση και κάνει το όχημα πιο σταθερό σε αλλαγές πορείας. Οι μορφές τους ποικίλει και πολλές φορές είναι αρκετά πολύπλοκη με σχηματισμό καναλιών και πτερυγίων στο πίσω κάτω μέρος του οχήματος. Ωστόσο καθώς η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης μέσω επίλυσης των εξισώσεων ροής είναι αρκετά χρονοβόρα και η υπολογιστική ισχύς που διαθέτουμε είναι περιορισμένη θα προτιμηθεί μια αρκετά απλοποιημένη μορφή με χρήση τεσσάρων μεταβλητών ελέγχου για να ολοκληρωθεί ταχύτερα και η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Με την παραμετροποίηση που θα γίνει θα ελεγχθεί η μορφή του διαχύτη στις δύο διαστάσεις τη στιγμή που το πλήθος των μεταβλητών δεν επιτρέπει επιπλέον διαμορφώσεις στην τρίτη διάσταση. Στο σχήμα 4.9 παρατίθεται η μορφή που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.



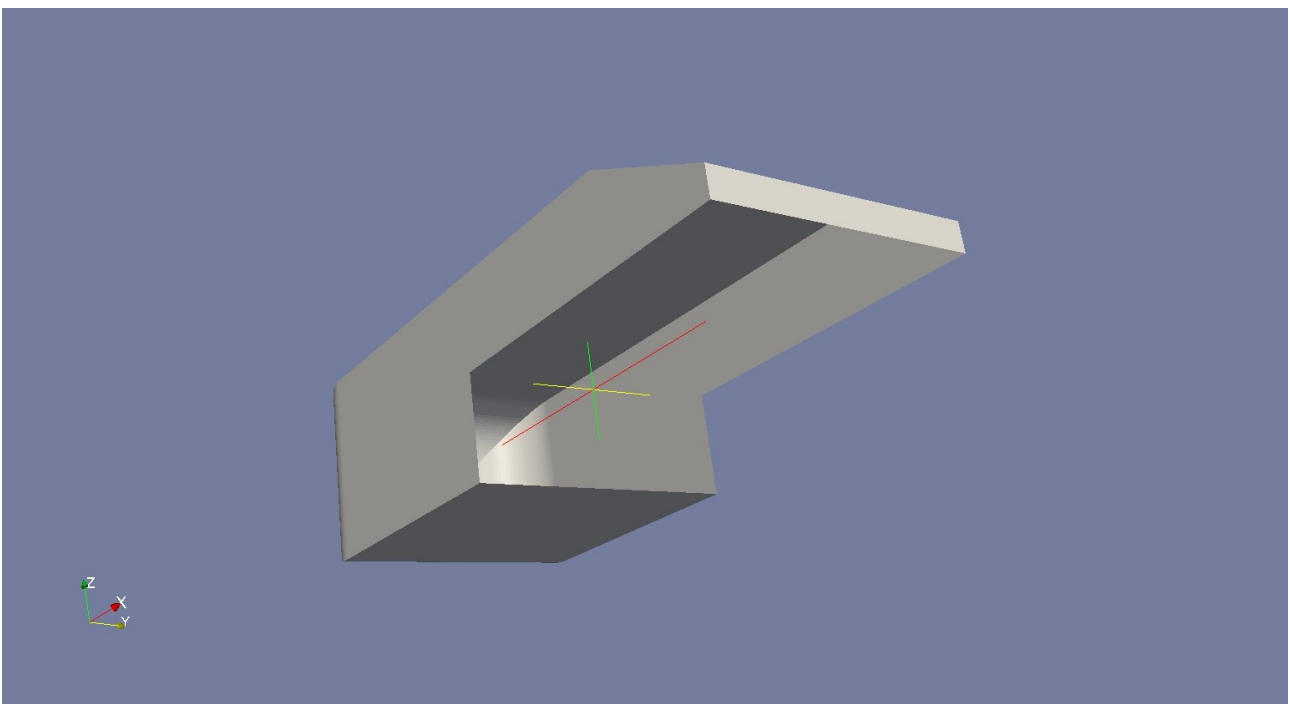


Σχ 4.9 Έλεγχος μορφής διαχύτη με πολυώνυμο Bezier.

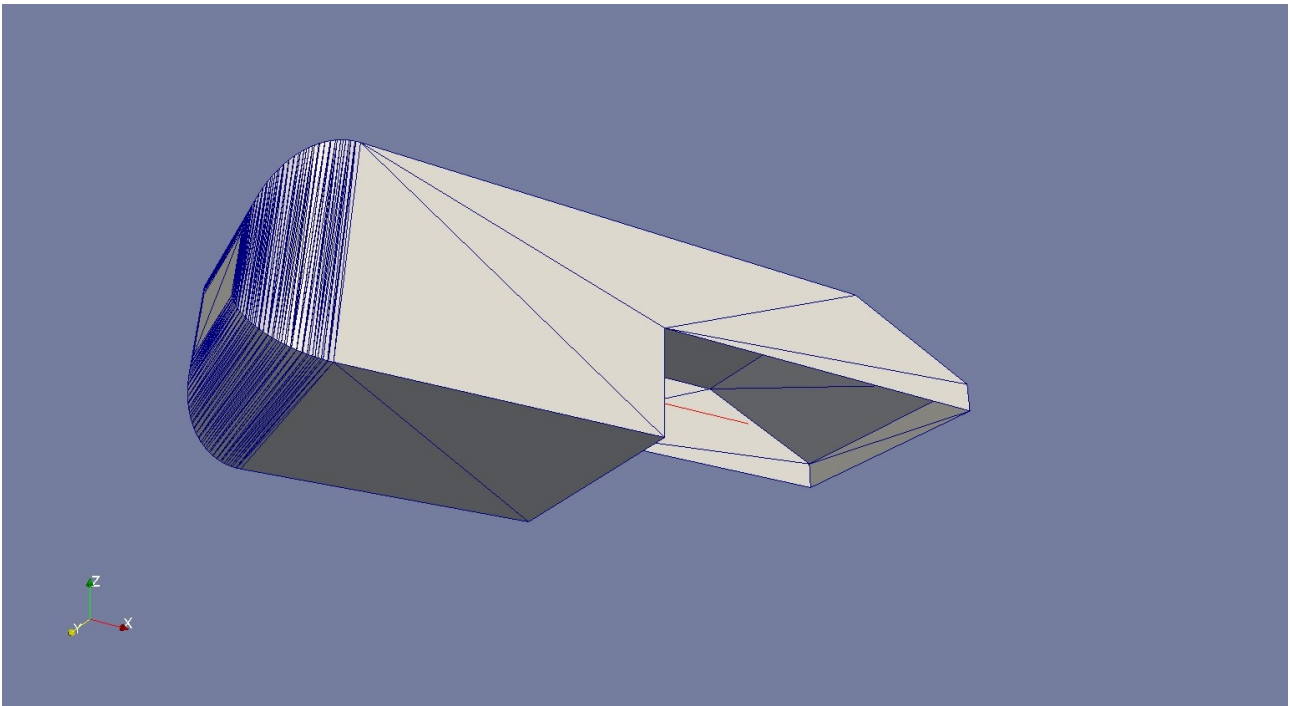
Τα σημεία 1 και 4 ελέγχουν την αρχή και το τέλος της διαμόρφωσης που έχει παραμετροποιηθεί με πολυώνυμο Bezier. Το σημείο 1 μπορεί να μετακινείται κατά μήκος του σώματος από το πίσω μέρος μέχρι και το 75% του μήκους του σώματος (δηλαδή στο τελευταίο  $\frac{1}{4}$  του μήκους του σώματος), καθώς είναι αναγκαίο να περιοριστεί το μέγεθος αυτής της διαμόρφωσης αφού ουσιαστικά αφαιρείται μέρος του οχήματος. Μέσω της θέσης του σημείου 1 ελέγχεται και η θέση κατά μήκος του σώματος των ενδιάμεσων σημείων ώστε όλα τα σημεία να ισαπέχουν κατά x. Το σημείο 4 μετακινείται κατά τον άξονα z και μπορεί να λάβει τιμές από 50mm που είναι το κάτω όριο του οχήματος μέχρι 120mm, περίπου δηλαδή το  $\frac{1}{4}$  του συνολικού ύψους του οχήματος για αντίστοιχους λόγους με το σημείο 1. Τα σημεία 2 και 3 ελέγχουν τη μορφή της καμπύλης και μέσω των μεταβλητών ελέγχου τους καθορίζεται το ύψος τους ως ποσοστό της απόστασης καθ ύψος μεταξύ του σημείου 1 και 4, 0 - ~110%. Αυτός ο περιορισμός έγινε για να διατηρείται η μορφή με αλλαγές μόνο του ύψους του σημείου 4 αλλά και να μην προκύψουν μορφές που είμαστε σχεδόν σίγουροι ότι δεν θα εξυπηρετούσαν την επίτευξη του στόχου. Τέλος για να μην εμφανίζεται γωνία στην αρχή του διαχύτη με την κάτω επιφάνεια του σώματος επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ένα επιπλέον σημείο για το πολυώνυμο Bezier μπροστά από το σημείο 1 το οποίο βρίσκεται σε σταθερή απόσταση από αυτό κατά x και η θέση του δεν ελέγχεται από κάποια επιπλέον μεταβλητή αλλά η ύπαρξή του εξομαλύνει την κλίση στην μετάβαση από την κάτω επιφάνεια που είναι οριζόντια στην καμπύλη του διαχύτη.

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση της παραμετροποίησης αυτής θα λαμβάνει τις 4 τιμές των μεταβλητών ελέγχου από τον εξελικτικό αλγόριθμο και πρέπει στη συνέχεια να εξάγει την αντίστοιχη γεωμετρία του σώματος στη συμβατή με τον κώδικα γένεσης πλέγματος (snappyHexMesh) μορφή αρχείου. Η μορφή αρχείου αυτή είναι η Stereolithography ή STL της οποίας η δομή εξηγείται αναλυτικά στο **Παράρτημα Α**. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούν οι παρακάτω ενέργειες που έγιναν κατά την υλοποίηση των παραπάνω. Αρχικά για να μην γραφτεί κώδικας που να σχηματίζει ολόκληρο το

Ahmed body μαζί με την καθορισμένη από τις μεταβλητές ελέγχου διαμόρφωση στο πίσω μέρος, τροποποιήθηκε το ήδη υπάρχον αρχείο γεωμετρίας του σώματος που χρησιμοποιήσαμε και νωρίτερα ώστε ο κώδικας να προσθέτει μόνο την παραμετροποιημένη διαμόρφωση κάθε φορά. Αυτό πραγματοποιείται τροποποιώντας αρχικά το αρχείο \*.stl που περιγράφει το σώμα με ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου, τη στιγμή που έχουμε το αρχείο σε μορφή ASCII. Εντοπίζονται τα σημεία που περιγράφουν τα τριγωνικά στοιχεία που αντιστοιχούν στο μέρος του σώματος που θέλουμε να μορφοποιήσουμε και τα διαγράφουμε. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις ακριβείς συντεταγμένες των κόμβων που μένουν ελεύθεροι ώστε ο κώδικας που θα γραφτεί στη συνέχεια να προσθέτει την καθορισμένη διαμόρφωση ακριβώς πάνω σε αυτούς. Η σειρά με την οποία υπάρχουν τα τριγωνικά στοιχεία στο αρχείο δεν έχει σημασία οπότε ο κώδικας μπορεί να προσθέτει τα επιπλέον αρχίζοντας από το τέλος του υπάρχοντος αρχείου, ωστόσο πρέπει να έχει διαγραφεί και η τελευταία γραμμή του υπάρχοντος αρχείου \*.stl που καθορίζει το τέλος του αρχείου και είναι η: endsolid name (η οποία προφανώς πρέπει να προστεθεί ξανά από τον κώδικα στο τέλος). Ας επισημανθεί ότι προς το παρόν το τροποποιημένο αυτό αρχείο \*.stl δεν έχει έγκυρη μορφή, καθώς η επιφάνεια που περιγράφει το σώμα διακόπτεται, δεν είναι συνεχόμενη και δεν είναι κλειστή. Αναπαράσταση του αρχείου αυτού παρατίθεται στα σχήματα 4.10 και 4.11.

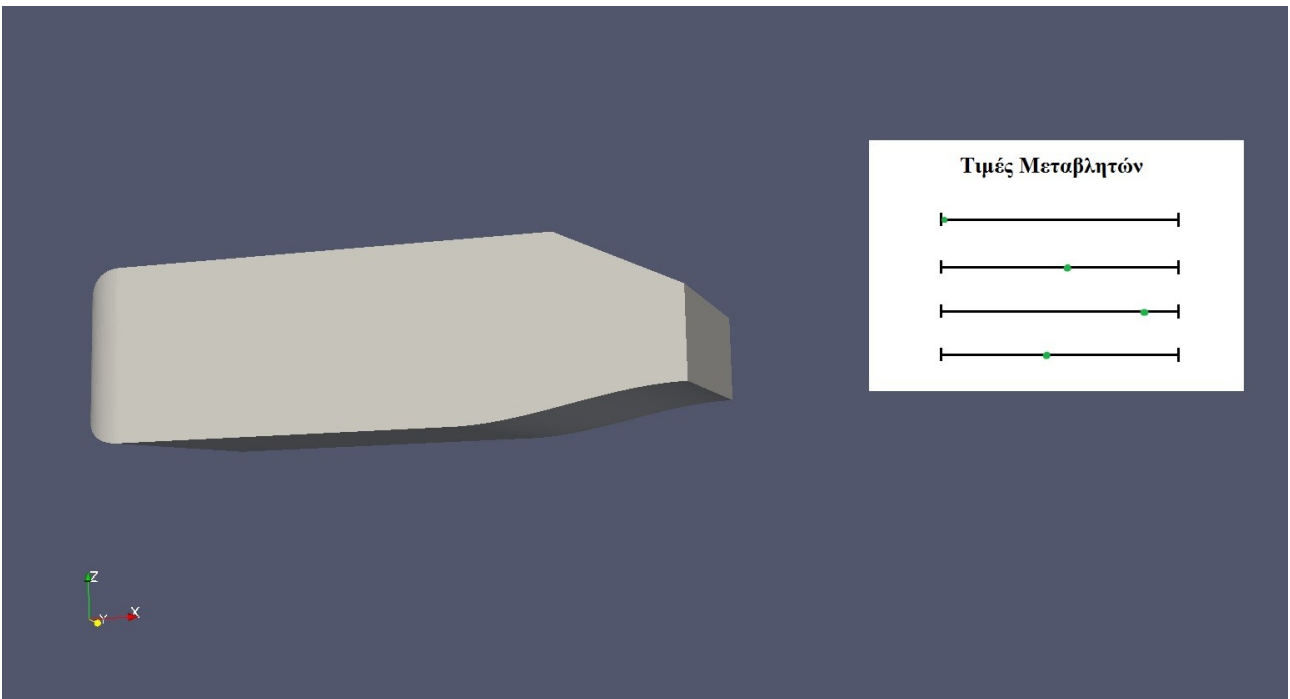


Σχ 4.10 Τροποποιημένο αρχείο γεωμετρίας του Ahmed body πάνω στο οποίο θα προστεθεί ο διαχύτης.

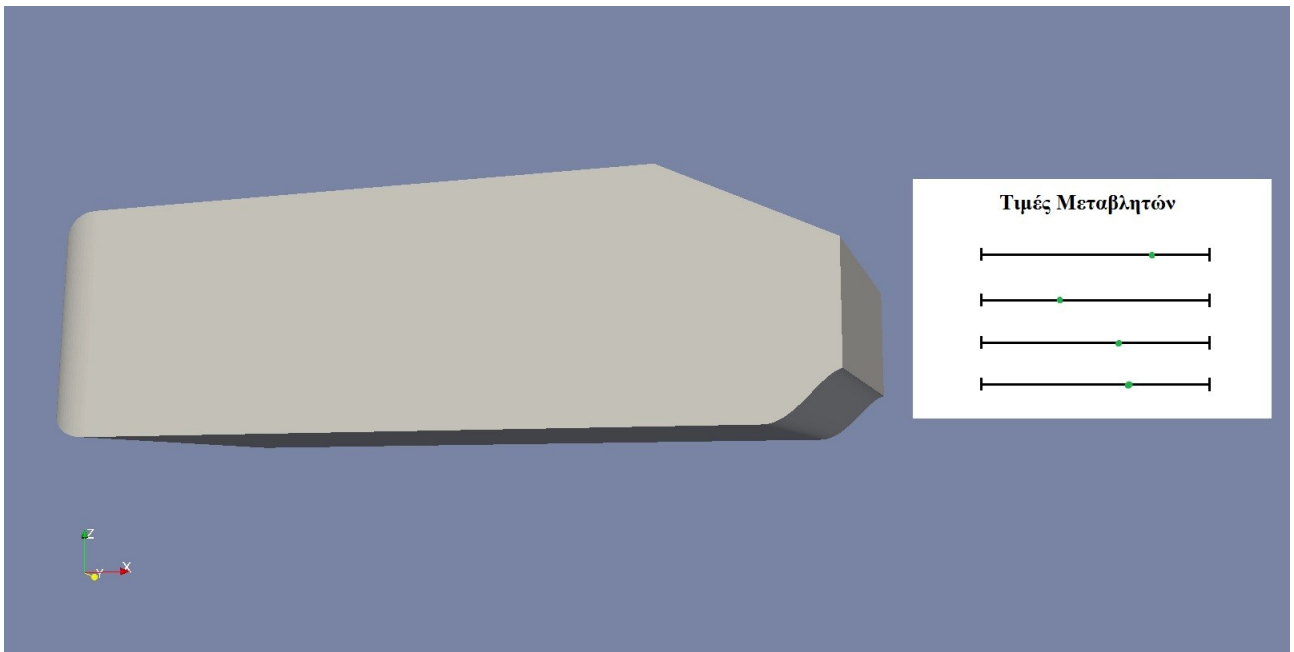


Σχ 4.11 Τροποποιημένο αρχείο γεωμετρίας του Ahmed body πάνω στο οποίο θα προστεθεί ο διαχύτης.

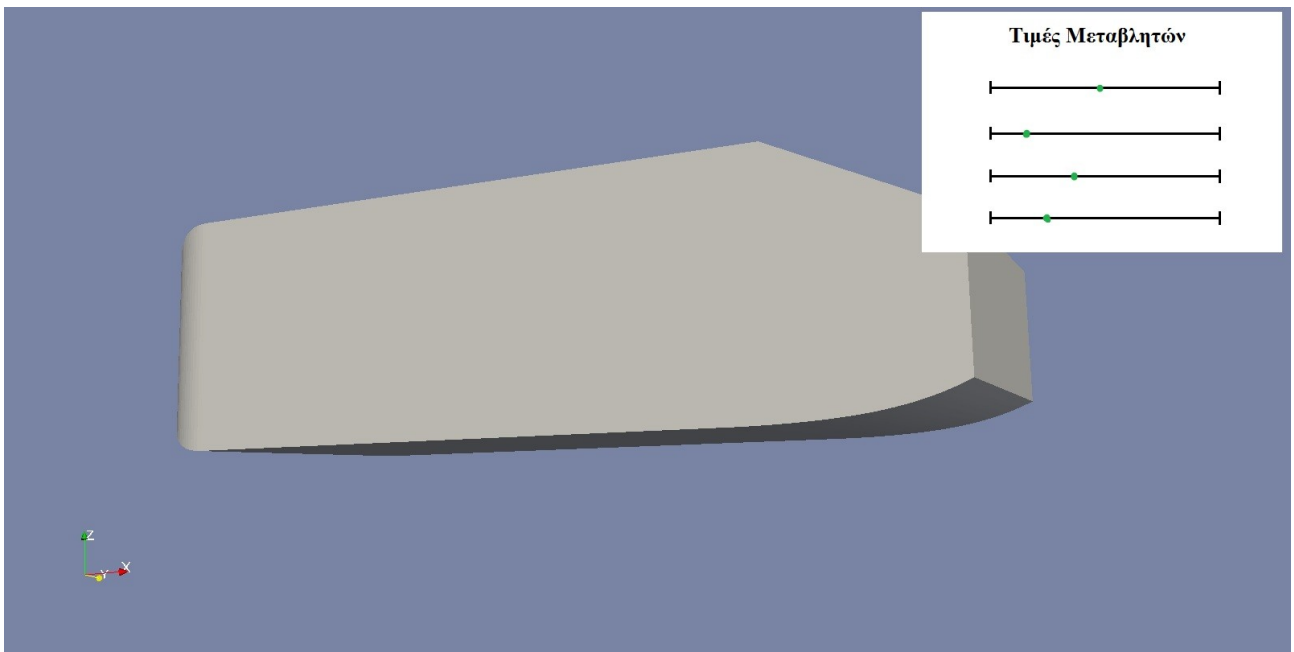
Η καμπύλη του διαχύτη διακριτοποιήθηκε σε 50 σημεία καθώς μεγαλύτερη ανάλυση δεν κρίθηκε απαραίτητη. Στα σχήματα 4.12-4.15 που ακολουθούν παρουσιάζονται αποτελέσματα του κώδικα που αναπτύχθηκε για την δημιουργία της 3Δ διαμόρφωσης του διαχύτη για το Ahmed body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25 μοιρών, οι γεωμετρίες αυτές είναι για τυχαίες τιμές των μεταβλητών ελέγχου εντός των επιτρεπτών ορίων. Στα σχήματα 4.16-4.18 φαίνονται και τα τριγωνικά στοιχεία που αποτελούν τη διαμόρφωση αυτή.



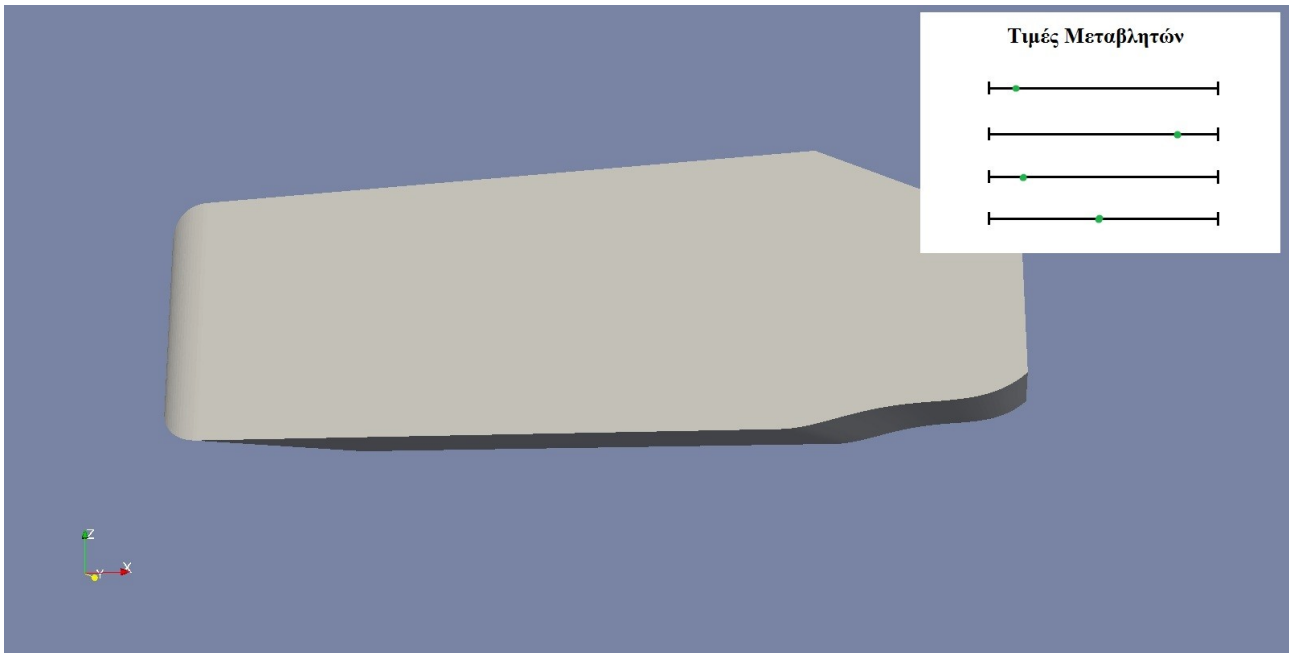
Σχ 4.12 Μορφή διαχύτη για τυχαίες τιμές μεταβλητών ελέγχου.



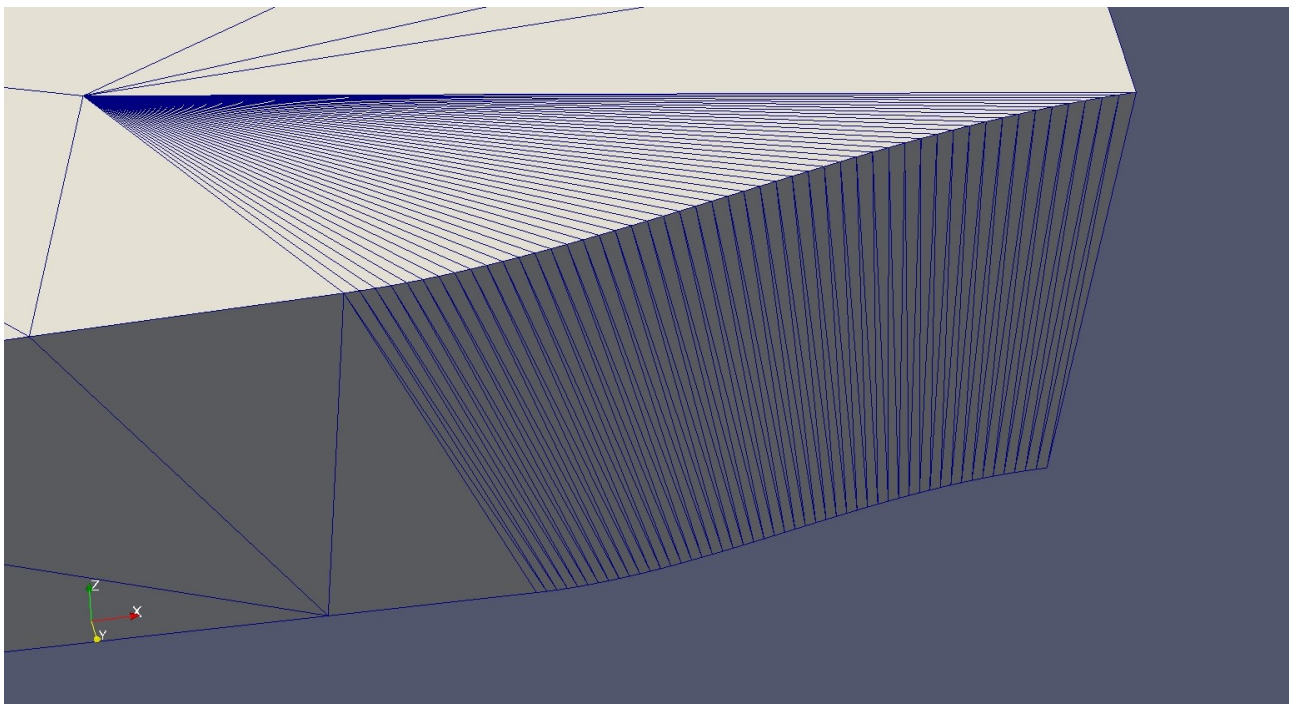
Σχ 4.13 Μορφή διαχύτη για τυχαίες τιμές μεταβλητών ελέγχου.



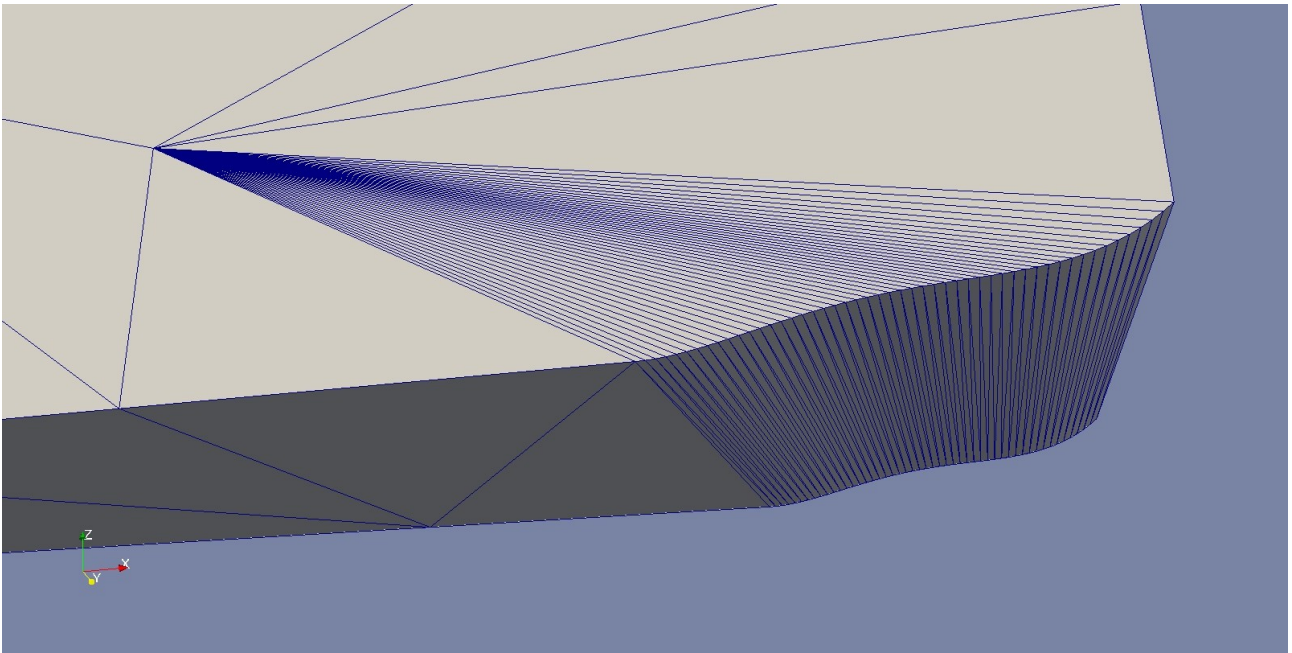
Σχ 4.14 Μορφή διαχύτη για τυχαίες τιμές μεταβλητών ελέγχου.



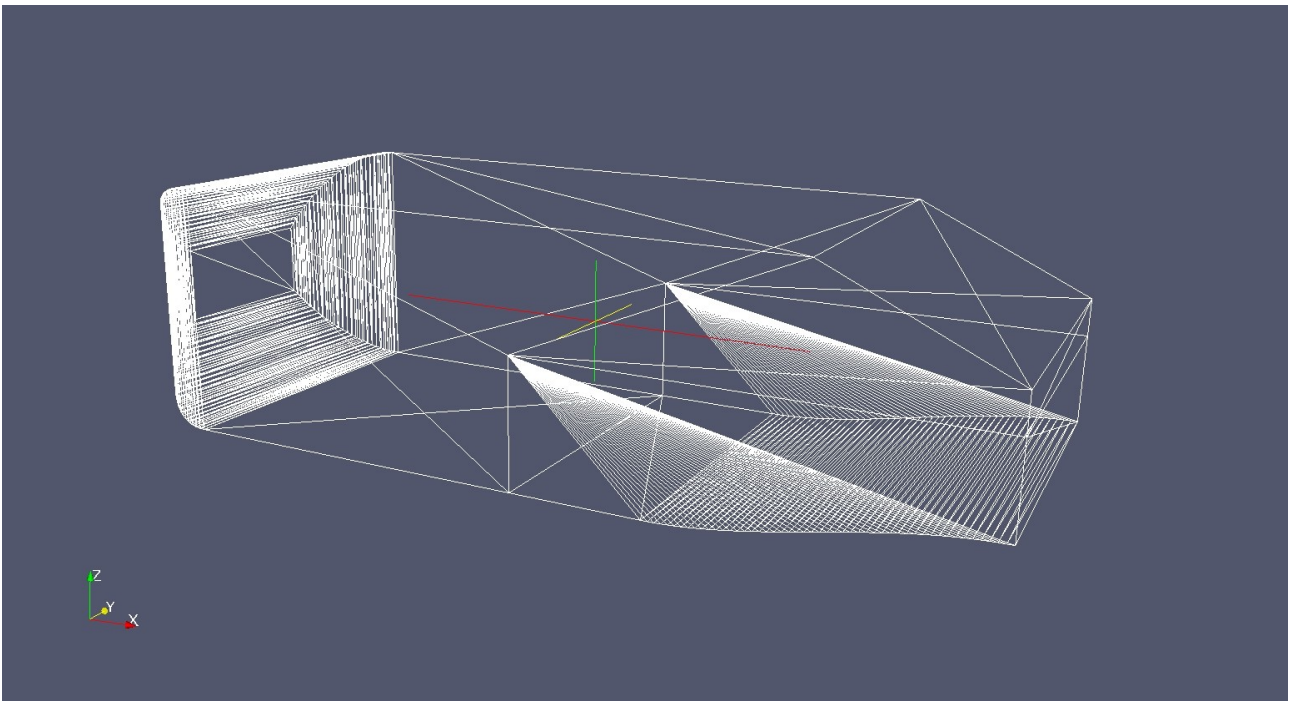
Σχ 4.15 Μορφή διαχύτη για τυχαίες τιμές μεταβλητών ελέγχου.



Σχ 4.16 Τριγωνικά στοιχεία του αρχείου STL που αποτελούν την επιφάνεια του διαχύτη.



Σχ 4.17 Τριγωνικά στοιχεία του αρχείου STL που αποτελούν την επιφάνεια του διαχύτη.

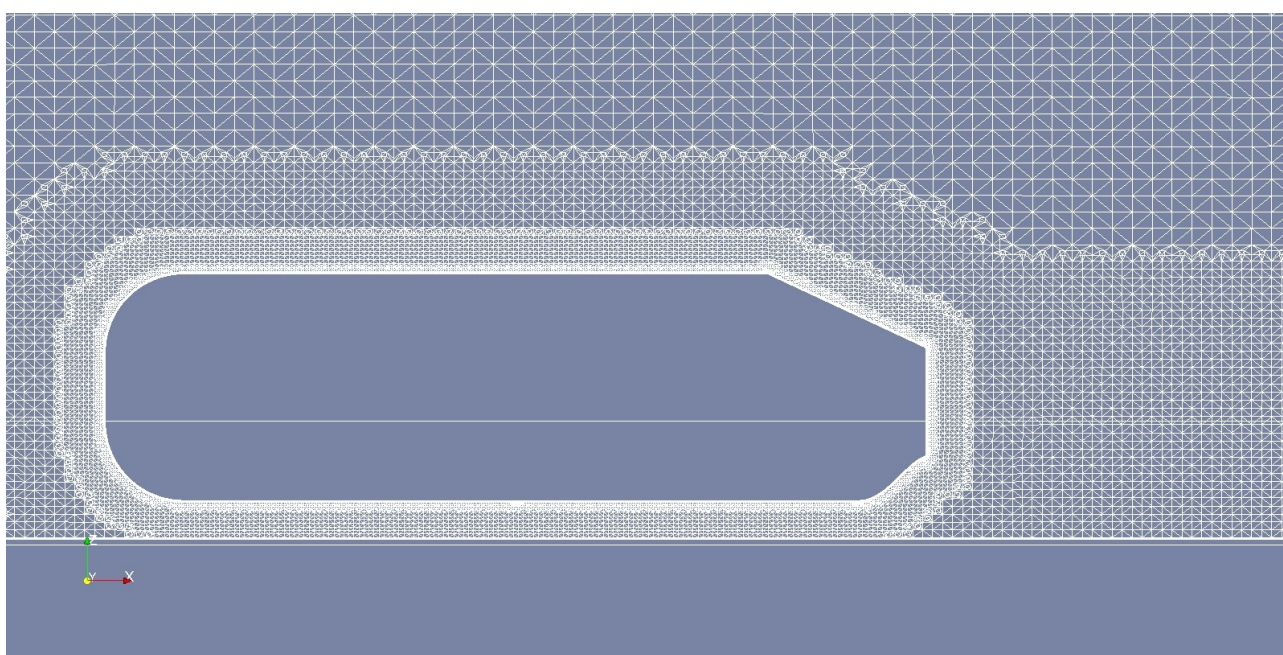


Σχ 4.18 Περίγραμμα τριγωνικών στοιχείων που αποτελούν την επιφάνεια του Ahmed body με διαχύτη.

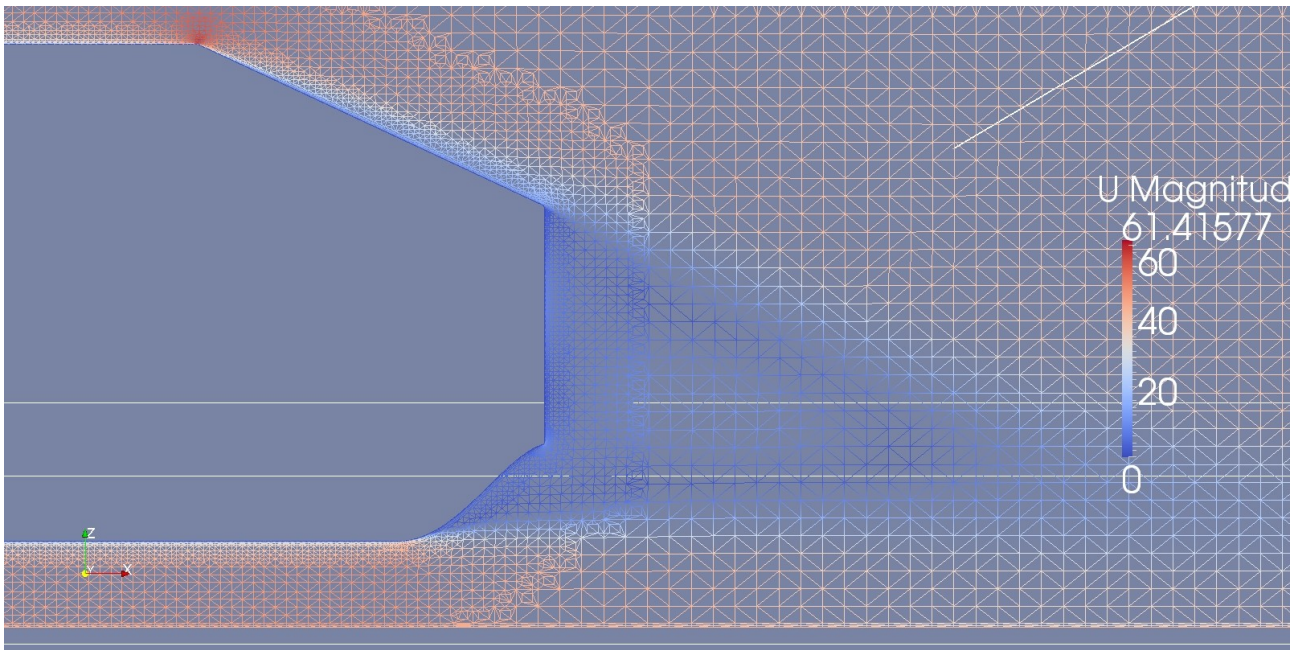
## 4.2 Βελτιστοποίηση μορφής του Ahmed body με χρήση εξελικτικού αλγορίθμου.

Πριν εκτελεστεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι απαραίτητο να δοκιμαστεί η γένεση πλέγματος και η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης σε τυχαίες γεωμετρίες που έχουν προκύψει από τον κώδικα που αναπτύχθηκε σύμφωνα με την παραμετροποίηση μορφής που αποφασίστηκε. Επίσης, όπως είχε αναφερθεί και στο δεύτερο κεφάλαιο, αφού έγινε η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής μεθόδου επίλυσης της ροής κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης θα εφαρμοστεί διαφορετική οριακή συνθήκη στην επιφάνεια του χωρίου που αναπαριστά το έδαφος. Δηλαδή το έδαφος θα έχει την ίδια ταχύτητα με τη ροή του αέρα, προσομοιάζοντας την κίνηση ενός πραγματικού αυτοκινήτου πάνω σε ακίνητο δρόμο, η ενός μοντέλου σε σήραγγα με ιμάντα στο έδαφος που “τρέχει” μαζί με τη ροή αντίστοιχα. Ιδιαίτερα από τη στιγμή που αποφασίστηκε να μορφοποιηθεί μέρος του σώματος που βρίσκεται κοντά στο έδαφος, αυτή η επιλογή αναμένεται να οδηγήσει σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής αντίστασης του Ahmed body με τη διαφορετική αυτή προσέγγιση, όπως είναι λογικό, μεταβάλλεται ελαφρώς. Από την τιμή 0.273 παίρνει την τιμή 0.263, ενώ όπως είχε αναφερθεί και στο δεύτερο κεφάλαιο έχουμε πλέον και καλύτερη σύγκλιση του κώδικα επίλυσης της ροής. Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε η αυτοματοποιημένη πλέον διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης για μία τυχαία γεωμετρία διαχύτη. Η εκτέλεση όλων των επιμέρους αλγορίθμων ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Ο συντελεστής αντίστασης που προέκυψε παρουσίασε ήδη μια πολύ αισθητή πτώση με τιμή 0.232. Στα σχήματα 4.19 και 4.20 παρουσιάζονται το πλέγμα του οποίου η συμπεριφορά μας ενδιαφέρει αρκετά στην μορφοποιημένη περιοχή του σώματος και η κατανομή ταχύτητας σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ 4.19 Το πλέγμα για τυχαία μορφή διαχύτη σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχ 4.20 Κατανομή ταχύτητας στο πλέγμα για τυχαία μορφή διαχύτη σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας.

Οι τελευταίες ενέργειες που πρέπει να γίνουν για να εκτελεστεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι η ρύθμιση των παραμέτρων του λογισμικού βελτιστοποίησης. Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις επιλογές που θα γίνουν είναι η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς, το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου του προβλήματος αλλά και το κατά πόσο είναι αναγκαίο να ληφθεί λύση όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικά βέλτιστη. Το λογισμικό βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί ονομάζεται EASY. Οι επιλογές που επηρεάζουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης και προσφέρονται στο χρήστη είναι πολλές και στη συνέχεια θα αναφερθούν μόνο οι πιο σημαντικές.

Ο στόχος είναι ένας, η ελαχιστοποίηση του συντελεστή αντίστασης, και περιορισμούς δεν έχουμε καθώς έχουν ληφθεί υπόψη στις τιμές που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές ελέγχου. Γνωρίζοντας ότι ο χρόνος υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης για μια παραλλαγή του σώματος είναι περίπου 3 ώρες στον τετραπύρρηνο επεξεργαστή που διατίθεται, είναι αναγκαίο να περιοριστούν και κάποια μεγέθη της εξελικτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης προς οικονομία χρόνου. Έτσι προτιμάται ένας πληθυσμός των 8 ατόμων. Ανάλογα με το μέγεθος του πληθυσμού επιλέγεται και το πλήθος των γονέων να είναι 4 και το κάθε νέο άτομο να προκύπτει από 3 γονείς. Το πλήθος των επιλέκτων επιλέγεται να είναι 3. Τέλος η πιθανότητα μετάλλαξης είναι 2.5%.

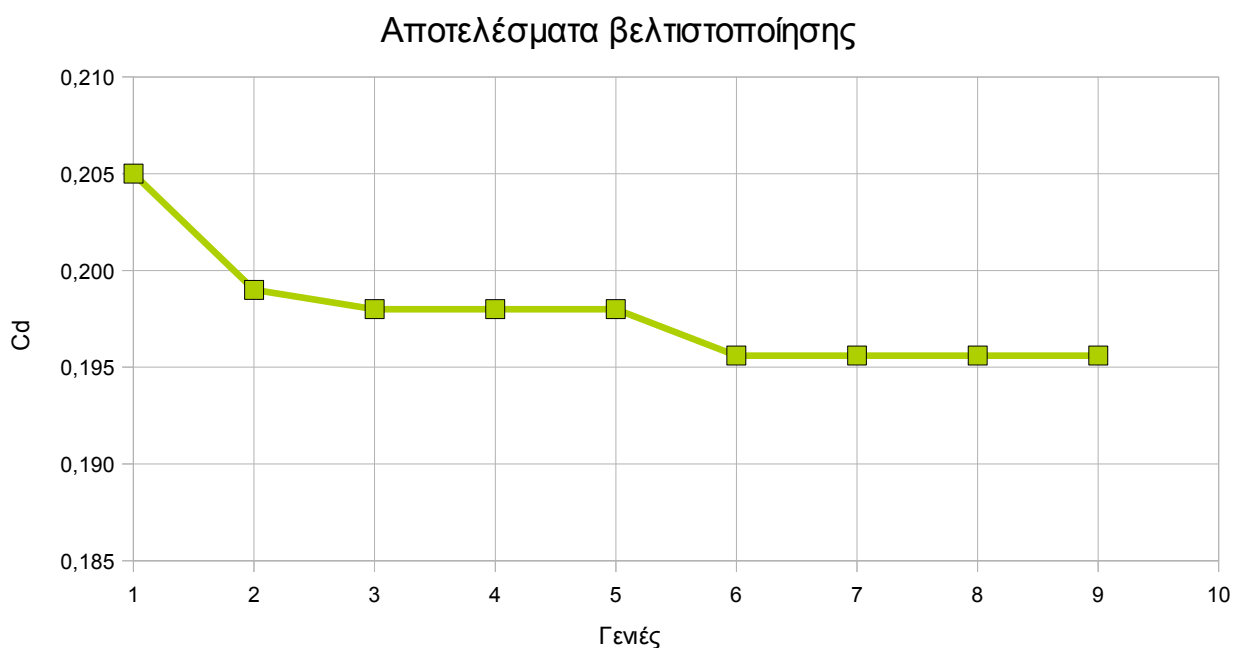
Οι μεταβλητές ελέγχου επιλέγεται να κωδικοποιούνται δυαδικά, καθεμία με 5bit, δηλαδή κάθε μεταβλητή να έχει τη δυνατότητα να πάρει 32 διαφορετικές τιμές στο εύρος που της αντιστοιχεί καθώς παρατηρείται ότι δεν έχει νόημα να έχουμε καλύτερη διακριτοποίηση εφόσον, αρχικά η υπολογιστική ισχύ που διατίθεται είναι περιορισμένη και θα προτιμηθεί να γίνει μια καλή προσέγγιση της βέλτιστης λύσης μέχρι το σημείο που θα εκτελεστεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης, αλλά και γιατί η γεωμετρία δεν



μεταβάλλεται αισθητά με μικρές μεταβολές των μεταβλητών και σε αντίθετη περίπτωση γεωμετρίες που είναι πρακτικά ίδιες (έχοντας ως μέτρο την ακρίβεια της λύσης που αναμένεται) θα αναγνωρίζονται ως διαφορετικές από τον εξελικτικό αλγόριθμο λόγω ασήμαντων διαφορών στις τιμές των μεταβλητών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην ύπαρξη ουσιαστικά ομοίων ατόμων σε ολόκληρο τον πληθυσμό των ελίτ η και των γονέων που λόγω μικρών διαφορών αναγνωρίζονται ως διαφορετικά, επίσης για αντίστοιχους λόγους θα περιορίζεται και η δυνατότητα του αλγορίθμου να χρησιμοποιεί τιμές της συνάρτησης στόχου για όμοια άτομα που έχουν επανεμφανιστεί στο παρελθόν, από τη βάση δεδομένων.

Τέλος αποφασίζεται μετά από 4 περίπου γενιές να χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο μεταπρότυπα για τον υπολογισμό της τιμής της συνάρτησης στόχου ώστε να εξοικονομηθεί κάποιος παραπάνω υπολογιστικός χρόνος προς το τέλος της διαδικασίας [12]. Επιλέγεται σε κάθε γενιά να υπολογίζεται ακριβώς η τιμή της συνάρτησης στόχου για 1 έως 3 άτομα.

Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε μέχρι τη στιγμή που είχαν ολοκληρωθεί 40 περίπου εκτελέσεις της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης. Τα αποτελέσματα και την βέλτιστη τιμή του συντελεστή αντίστασης για κάθε γενιά παρατηρούμε στο σχήμα 4.21.



*Σχ 4.21 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.*

Η τιμή του συντελεστή αντίστασης έπεσε πολύ από την πρώτη κιάλας γενιά. Από το 0.263 του Ahmed body χωρίς διαμόρφωση στο 0.205, που είναι και μια τιμή πολύ κοντά στην τελική βέλτιστη λύση με τιμή 0.1956. Αυτό εξηγείται από τον τρόπο με τον οποίο έγινε η παραμετροποίηση που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η γεωμετρία δεν επηρεαζόταν σημαντικά για μικρές αλλαγές των μεταβλητών. Έτσι στην πρώτη γενιά υπήρξε πιθανώς ένα άτομο με τιμές της πρώτης και τέταρτης μεταβλητής κοντά στα όρια και την κατάλληλη σχετική θέση των ενδιάμεσων μεταβλητών που καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης. Οι τιμές

των μεταβλητών της βέλτιστης λύσης είναι οι εξής:

1η μεταβλητή ελέγχου του 1ου σημείου της καμπύλης, θέση του σημείου στον άξονα x: 0.75m

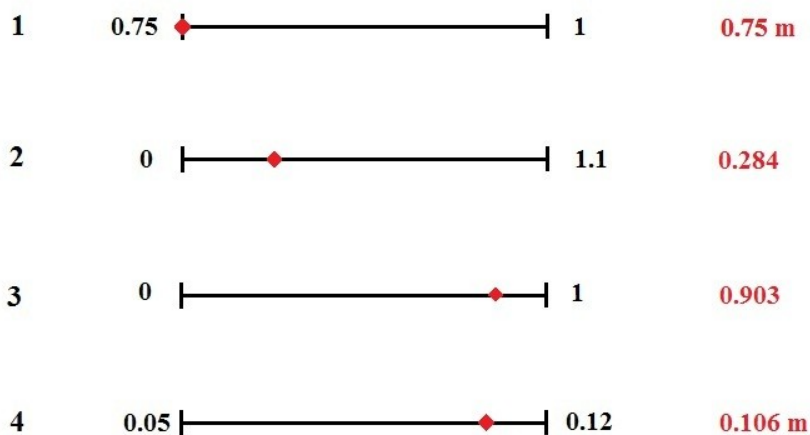
2η μεταβλητή ελέγχου του 2ου σημείου, ποσοστό ύψους μεταξύ 1ου και 4ου σημείου: 0.284

3η μεταβλητή ελέγχου του 3ου σημείου, ποσοστό ύψους μεταξύ 1ου και 4ου σημείου: 0.903

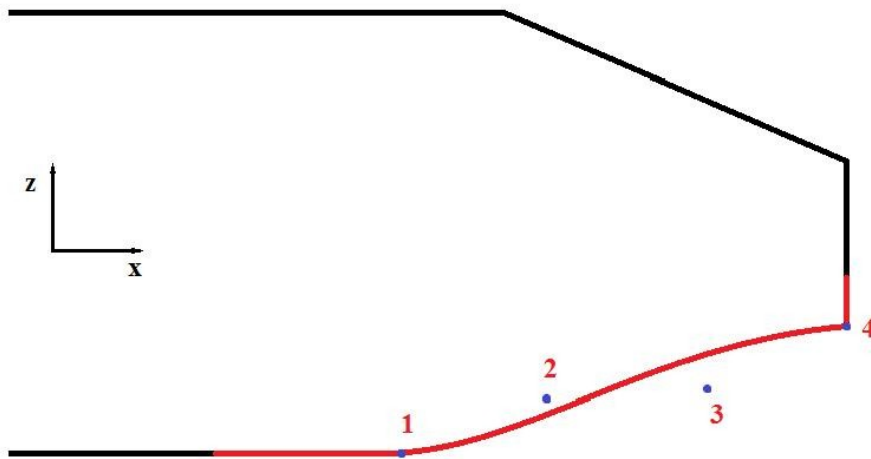
4η μεταβλητή ελέγχου του 4ου σημείου της καμπύλης, θέση του σημείου στον άξονα z: 0.106m

Παρατηρούμε ότι η πρώτη και τέταρτη μεταβλητή που καθορίζουν και τα όρια του διαχύτη έλαβαν τις οριακές σχεδόν τιμές τους (οριακή για την 1η και κοντά στο όριο για τη 4η) κάτι που ήταν αναμενόμενο. Στο σχήμα 4.22 υπάρχει μία γραφική απεικόνιση των τιμών των μεταβλητών της βέλτιστης λύσης και στα σχήματα 4.23 και 4.24 που ακολουθούν παρουσιάζεται η γεωμετρία για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν και που εμφανίζει τον ελάχιστο συντελεστή αντίστασης.

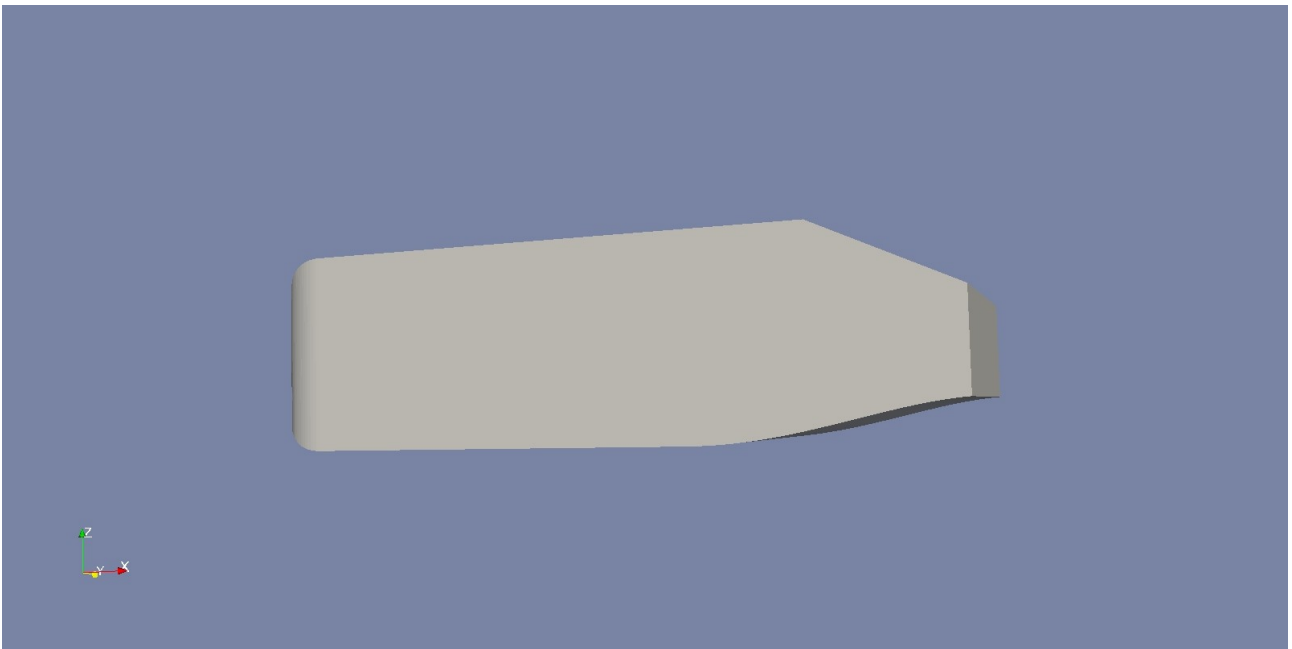
### Μεταβλητές



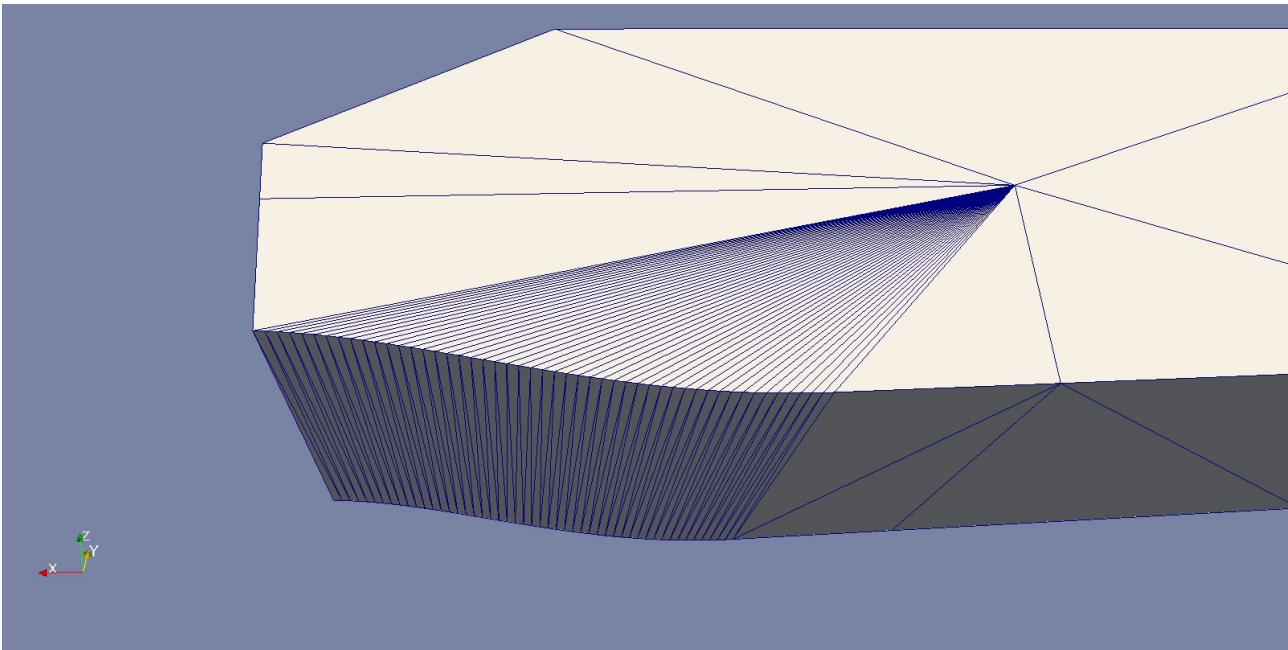
Σχ 4.22 Γραφική αναπαράσταση των τιμών των μεταβλητών της βέλτιστης λύσης.



Σχ 4.9 Έλεγχος μορφής διαχύτη με πολυώνυμο Bezier.

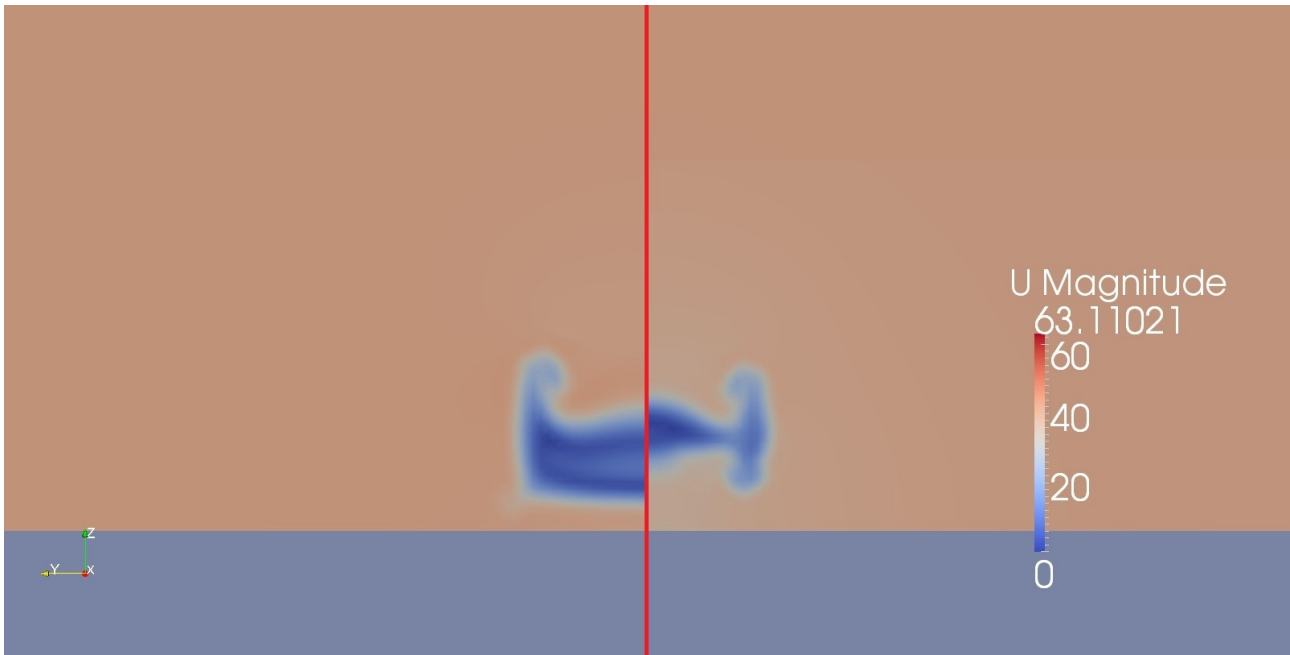


Σχ 4.23 Βέλτιστη μορφή διαχύτη για το Ahmed body ως προς το συντελεστή αντίστασης.

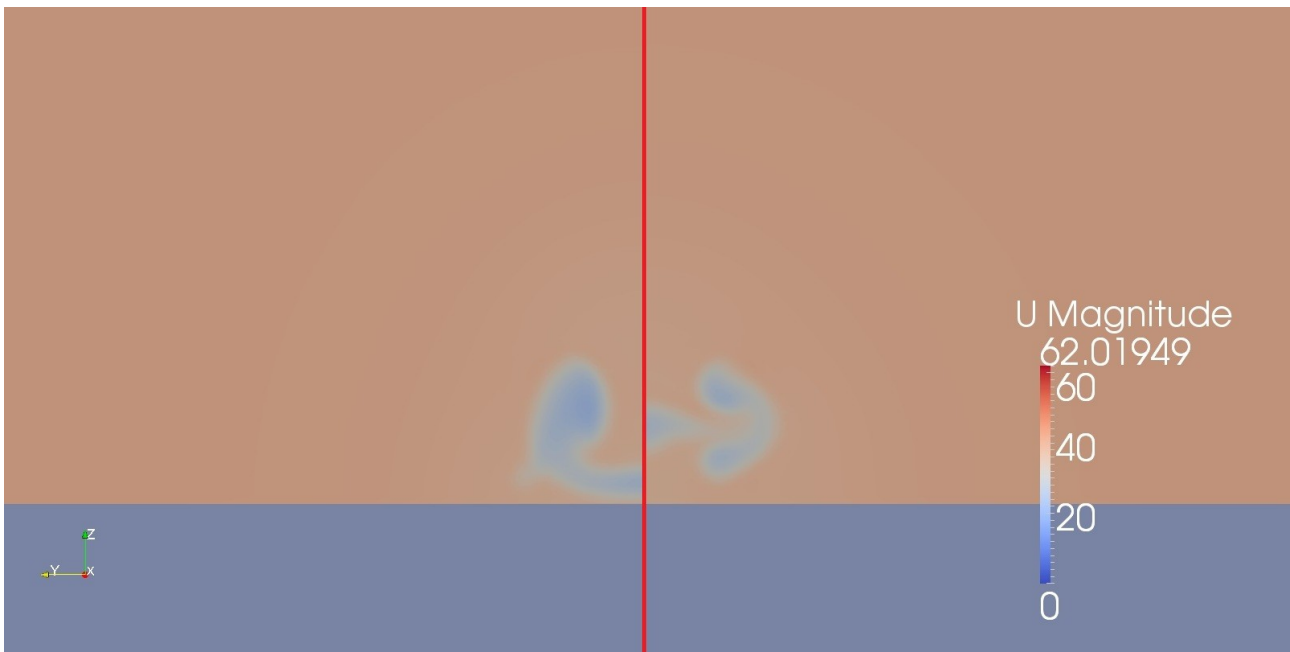


Σχ 4.24 Βέλτιστη μορφή διαχύτη για το Ahmed body ως προς το συντελεστή αντίστασης.

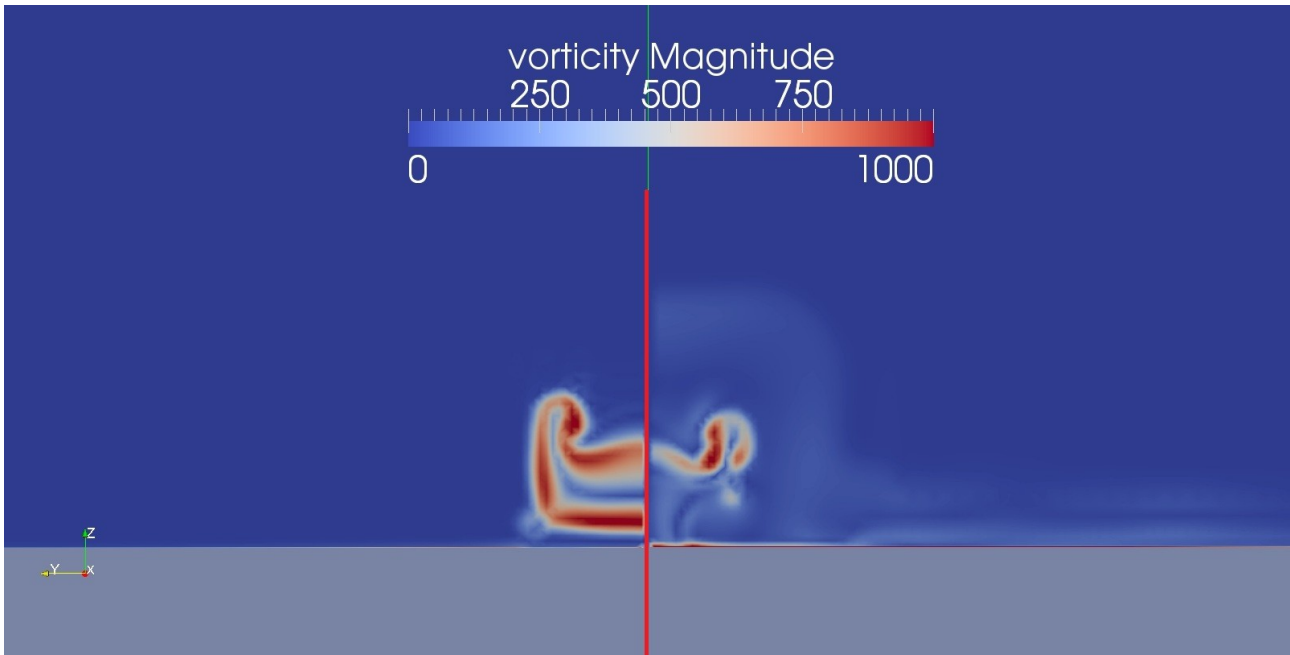
Κάποιες από τις διαφορές που παρατηρούνται στη ροή μεταξύ της αρχικής γεωμετρίας του Ahmed body και της διαμόρφωσης που αποτελεί και τη βέλτιστη λύση αξίζει να αναφερθούν. Αρχικά υπενθυμίζεται ότι η πτώση στον συντελεστή αντίστασης ήταν από 0.2633 σε 0.1956, δηλαδή πτώση κατά περίπου 25%, που είναι αρκετά σημαντική διαφορά. Επίσης το Ahmed body με γωνία πίσω κεκλιμένου επιπέδου 25 μοιρών παρουσιάζει σημαντική ανωστική δύναμη (23.9N), κάτι που γενικά για τροχοφόρα οχήματα που κινούνται στο έδαφος δεν είναι επιθυμητό. Στη βέλτιστη λύση που προέκυψε εμφανίζεται αντίθετα αρνητική άντωση (-22.1N) που γενικά βοηθάει αρκετά την κίνηση οχημάτων αυξάνοντας την πρόσφυση τους σε μεγάλες ταχύτητες και αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους της αεροδυναμικής αγωνιστικών οχημάτων. Μάλιστα είναι δυνατό και ρεαλιστικό να πραγματοποιηθεί μια βελτιστοποίηση με 2 στόχους, την αύξηση της αρνητικής άντωσης και την ελαχιστοποίηση του συντελεστή αντίστασης για διάφορες διαμορφώσεις όπως διαχύτες και αεροτομές σε οχήματα, ακολουθώντας τη διαδικασία που παρουσιάστηκε. Σημαντικές διαφορές παρατηρούνται και στον ομόρρο του σώματος. Οι στροβιλισμοί στον ομόρρο του σώματος με το διαχύτη είναι αρκετά πιο περιορισμένοι σε μέγεθος και ένταση και εξασθενούν πιο γρήγορα, σε αντίθεση με το αρχικό σώμα όπου είναι παρατηρήσιμοι μέχρι σχεδόν το τέλος του υπολογιστικού χωρίου. Στα σχήματα 4.25 - 4.27 παρατίθενται συγκριτικά η ταχύτητα και η στροβιλότητα του πεδίου ταχυτήτων σε τομές του χωρίου στον ομόρρο του σώματος για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες. Κάποια ακόμα μεγέθη της ροής παρατηρούνται στα σχήματα 4.28 και 4.29.



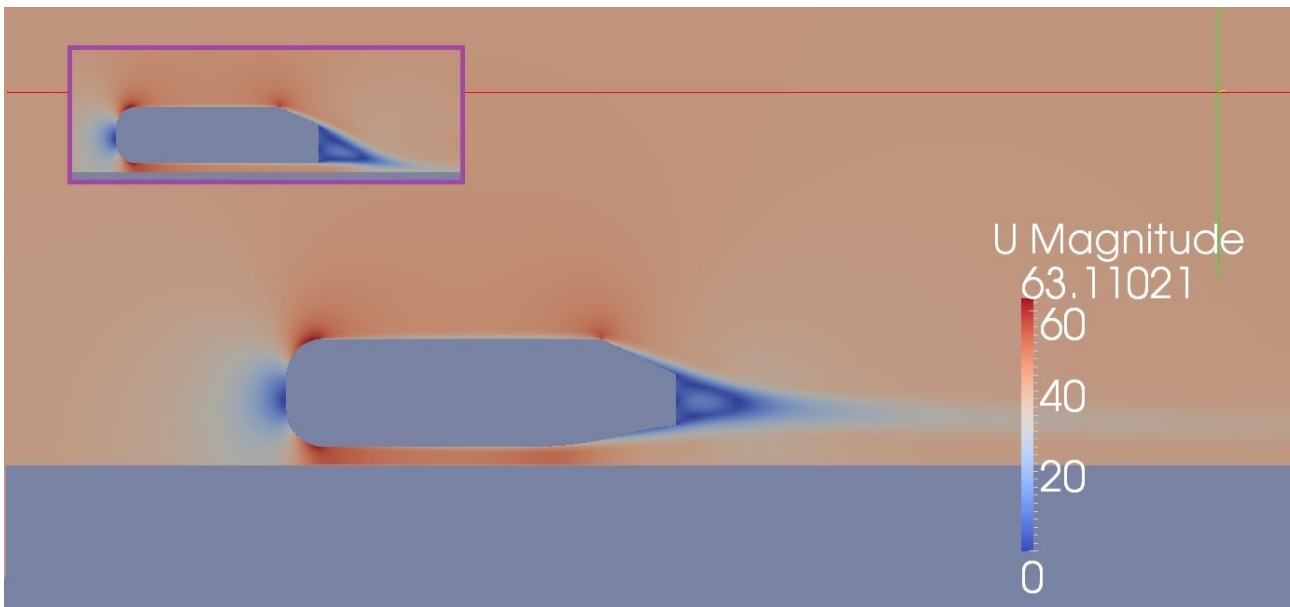
Σχ 4.25 Κατανομή ταχύτητας σε τομή του υπολογιστικού χωρίου στην περιοχή του ομόρρου **20cm** πίσω από το σώμα. Σύγκριση μεταξύ αρχικού *Ahmed body* (αριστερά) και βέλτιστης λύσης (δεξιά).



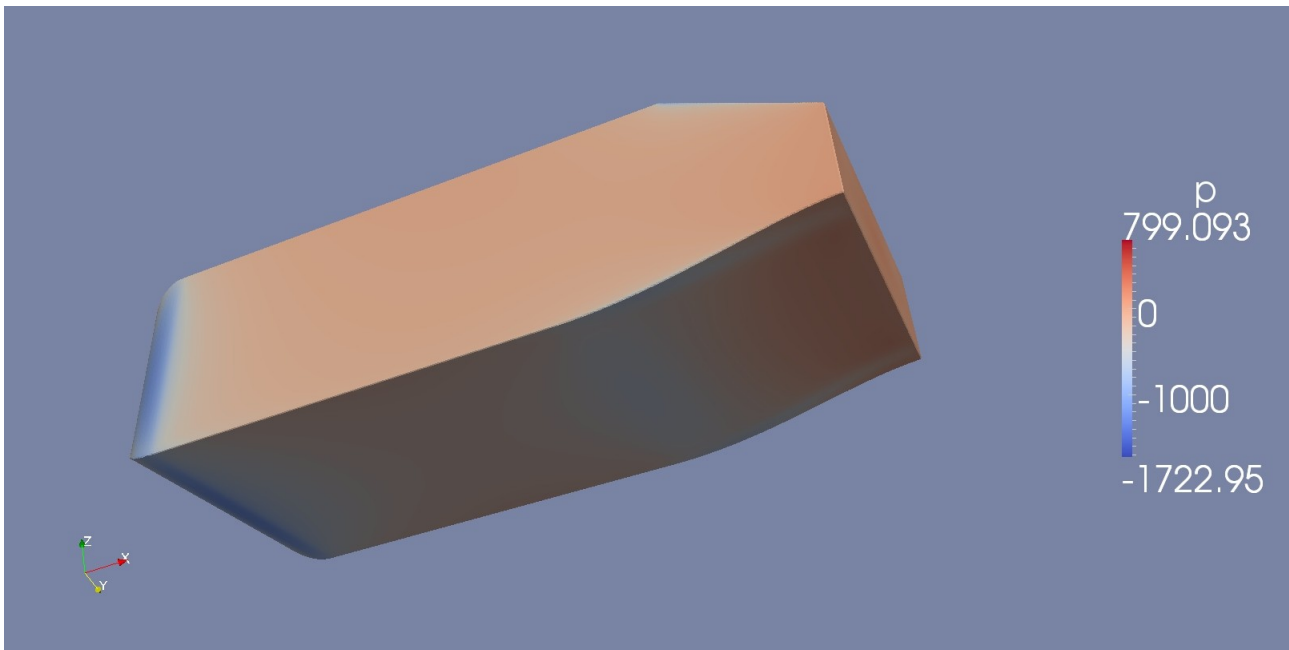
Σχ 4.26 Κατανομή ταχύτητας σε τομή του υπολογιστικού χωρίου στην περιοχή του ομόρρου **50cm** πίσω από το σώμα. Σύγκριση μεταξύ αρχικού *Ahmed body* (αριστερά) και βέλτιστης λύσης (δεξιά).



Σχ 4.27 Στροβιλότητα πεδίου στον ομόρρου του σώματος σε απόσταση 20cm από αυτό. Σύγκριση μεταξύ αρχικού *Ahmed body* (αριστερά) και βέλτιστης λύσης (δεξιά).



Σχ 4.28 Κατανομή ταχύτητας για το *Ahmed body* με τη διαμόρφωση σε τομή στο επίπεδο συμμετρίας. Αντίστοιχα για το *Ahmed body* χωρίς διαμόρφωση (πάνω αριστερά).



Σχ 4.29 Κατανομή πίεσης στην κάτω επιφάνεια του Ahmed body με τη διαμόρφωση.

Τέλος, αξίζει να παρουσιαστεί και ένας πιο ρεαλιστικός τρόπος εφαρμογής περιορισμών κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης που μάλιστα μπορεί να εφαρμοστεί με ιδιαίτερη ευκολία. Είναι μια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που αφαιρείται μέρος του οχήματος ή της οποιασδήποτε γεωμετρίας αλλά πρέπει με κάποιο τρόπο να οριοθετηθεί αυτή η αφαίρεση καθώς είναι προφανές ότι το κέλυφος και άρα και η αεροδυναμική διαμόρφωση οποιουδήποτε οχήματος πρέπει να καλύπτει τα απαραίτητα μηχανικά και άλλα λειτουργικά μέρη και δομές αυτού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του διαχύτη που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία σε ένα πραγματικό όχημα πρέπει να ληφθούν υπόψη το μέγεθος και η θέση του πίσω άξονα των τροχών και της δεξαμενής καυσίμου για παράδειγμα. Για να ελεγχθεί το πότε η παραμετροποιημένη γεωμετρία φτάνει σε σημείο να μην καλύπτει μέρη των απαραίτητων εσωτερικών δομών του σώματος θα μπορούσε να γίνουν τα εξής. Αρχικά να χρησιμοποιηθούν 3D STL αρχεία που να περιγράφουν αυτές τις δομές και να τοποθετηθούν στις κατάλληλες θέσεις στο εσωτερικό του σώματος. Στη συνέχεια ρυθμίζοντας κατάλληλα το λογισμικό γένεσης πλέγματος (snappyHexMesh) ώστε να αναγνωρίζει αυτές τις επιφάνειες και να δημιουργεί επιφανειακό πλέγμα πάνω σε αυτές είναι δυνατό να εντοπίζεται το πότε μέρη αυτών βρίσκονται εξωτερικά του κελύφους του οχήματος. Έτσι, υπό συνθήκες τήρησης των περιορισμών, δεν θα έχουμε κανένα κελί που να βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια αυτών των εσωτερικών δομών τη στιγμή που αυτές εμπεριέχονται στο εξωτερικό κέλυφος, εσωτερικά του οποίου όλα τα κελιά αφαιρούνται. Σε αντίθετη περίπτωση θα εντοπίζεται εύκολα η παραβίαση των γεωμετρικών περιορισμών στο ιστορικό του λογισμικού γένεσης πλέγματος καθώς θα έχουμε τουλάχιστον 1 κελί που θα ανήκει στο όριο (patch) που θα δημιουργεί το μέρος της δομής που βγαίνει έξω από το κέλυφος και έρχεται σε επαφή με το πλέγμα. Μάλιστα από το πλήθος αυτών των κελιών θα γίνεται κατανοητό και το μέγεθος της παραβίασης.





## 5. Συμπεράσματα – Επίλογος.

Στην αρχή της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είχαν τεθεί τρεις κύριοι στόχοι: α) Η αξιολόγηση ενός νέου κώδικα γένεσης πλέγματος για επίλυση ροής γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίας και η δημιουργία πλέγματος κατάλληλου για χρήση σε διαδικασία βελτιστοποίησης στη γεωμετρία του Ahmed body. β) Το “στήσιμο” ενός εργαλείου αξιολόγησης για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, δηλαδή η ρύθμιση και συνεργασία των κωδίκων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης του σώματος ώστε να λαμβάνονται αξιόπιστα αποτελέσματα. γ) Η παραμετροποίηση στοιχείων της γεωμετρίας του σώματος με στόχο την ελαχιστοποίηση του συντελεστή αντίστασης μέσω μεταβλητών ελέγχου και ο υπολογισμός των βέλτιστων τιμών τους με κριτήριο το συντελεστή αντίστασης του σώματος μέσω ενός εξελικτικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Επίσης, σημαντική είναι και η γενικότερη αξιολόγηση της μεθόδου βελτιστοποίησης και της αποτελεσματικότητάς της.

Όπως παρουσιάστηκε και στο 2ο κεφάλαιο, ο κώδικας SnappyHexMesh του πακέτου λογισμικού OpenFOAM είναι ένα αρκετά χρήσιμο εργαλείο, προσφέροντας την δυνατότητα γένεσης πλέγματος για επίλυση ροής γύρω από απλές μέχρι και αρκετά πολύπλοκες γεωμετρίες σωμάτων αλλά και δυνατότητα χρήσης του εντός μιας εξελικτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο βαθμός ελέγχου που έχει ο χρήστης πάνω στη μορφή του τελικού πλέγματος είναι πολύ ικανοποιητικός, κάτι που ωστόσο προϋποθέτει και κάποιο βαθμό εμπειρίας πάνω σε υπολογιστικά πλέγματα από τη μεριά του χρήστη, για να είναι αποτελεσματική η διαδικασία. Η ρύθμιση και ο καθορισμός εισόδων (γεωμετρίες σωμάτων κλπ) για τον κώδικα είναι αρκετά απλά, τη στιγμή που η λειτουργικότητα των περισσότερων μεταβλητών ελέγχου είναι αρκετά εμφανής ακόμα και για κάποιο νέο χρήστη. Επίσης ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα είναι πολύ ικανοποιητικός σε σύγκριση πάντα με τον χρόνο που χρειάζεται ο κώδικας επίλυσης της ροής στη συνέχεια για να συγκλίνει (~1/15). Ωστόσο, ένα μειονέκτημα στη μορφή του πλέγματος που προκύπτει από τον κώδικα αυτό και παρατηρήθηκε, εντοπίζεται στις περιοχές του πλέγματος που βρίσκονται σε έντονες ακμές της επιφάνειας του σώματος. Τα κελιά που βρίσκονται στην επιφάνεια του σώματος και ακριβώς πάνω σε ακμές, μπορεί να εμφανίσουν μια ενδιάμεση κλίση και να υπάρχει μια ελαφριά τοπική απόκλιση από τη γεωμετρία, κάτι που μπορεί να αντιμετωπιστεί σε κάποιο βαθμό αφού ο χρήστης έχει αποκτήσει κάποια περισσότερη εμπειρία στη χρήση του κώδικα και έχει πειραματιστεί με κάποιες από τις ρυθμίσεις. Σε αυτές

τις περιοχές υπάρχει και δυσκολία πρόσθεσης πολλών στρωμάτων κελιών, ώστε να προκύψει πλέγμα κατάλληλο για επίλυση ροής χωρίς συναρτήσεις τοίχου (low-Reynolds), καθώς η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει υπερβολικά πολύ ή ακόμα και να αποτύχει σε ορισμένες από αυτές τις περιοχές. Παρόλα αυτά, η ευκολία που προσφέρει ο κώδικας στην εισαγωγή της γεωμετρίας του σώματος μέσω των αρκετά εύχρηστων αρχείων STL που είναι ανεξάρτητα της επιθυμητής διακριτοποίησης του επιφανειακού πλέγματος, και ο εύκολος τρόπος διαχείρισης του πλέγματος σε περιοχές μακριά από το σώμα καθιστούν τη λειτουργία του κώδικα SnappyHexMesh αρκετά ικανοποιητική.

Η τελική μορφή του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη βελτιστοποίηση καθορίστηκε αφού έγιναν και κάποιες εκτελέσεις του κώδικα επίλυσης της ροής. Στη συνέχεια, μετά την επιλογή του μοντέλου τύρβης που έγινε με βάση και πειραματικά αποτελέσματα, η προσομοίωση της ροής και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκε ήταν αρκετά ικανοποιητική, δεδομένου και του διαθέσιμου χρόνου και της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Τα αντίστοιχα ισχύουν και για τη διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολούθησε, της οποίας η εφαρμογή ήταν αρκετά απλή αλλά και πολύ αποτελεσματική δεδομένης της γενικότερης συμπεριφοράς της συνάρτησης κόστους και της σημαντικής μείωσης του συντελεστή αντίστασης από το αρχικό σώμα στη βέλτιστη λύση (κάτι που δικαιώνει και την επιλογή της μορφοποίησης που έγινε στο σώμα).

Γενικότερα, η διαδικασία που παρουσιάστηκε φαίνεται ότι έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε αρκετά πιο πολύπλοκα και απαιτητικά προβλήματα χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία, με μοναδικό φραγμό τη διαθέσιμη σε κάθε περίπτωση, υπολογιστική ισχύ. Έτσι, η εφαρμογή μιας αντίστοιχης διαδικασίας σε πραγματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι δυνατή, τη στιγμή μάλιστα, που η δυνατότητα χρήσης πακέτων λογισμικού ανοιχτού κώδικα από τη βιομηχανία, και ειδικότερα και του OpenFOAM, είναι κάτι που έχει ερευνηθεί αρκετές φορές μέσω συγκρίσεων με λογισμικά πακέτα του εμπορίου, λόγω των ουσιαστικά απεριόριστων δυνατοτήτων που προσφέρει ένα τέτοιο λογισμικό στο χρήστη. Κάτι ακόμα που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η φαντασία του μηχανικού σε διαδικασίες βελτιστοποίησης συνεχίζει να παίζει καθοριστικό ρόλο, ιδιαίτερα στο τι είδους μορφοποίηση θα γίνει και πως θα παραμετροποιηθεί αυτή ώστε να είναι αποτελεσματική και οικονομική.

## 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] OpenFOAM v1.6 User Guide ([www.openfoam.com](http://www.openfoam.com))
- [4] Spalart, P. R. and Allmaras, S. R. (1992), A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 92-0439
- [5] Menter, F. R. (1993), Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906
- [6] Thévenin, Dominique; Janiga, Gábor (Eds.), Optimization and Computational Fluid Dynamics, (2008)
- [7] Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική, Αθήνα (2006)
- [8] EASY v2.0 User's Manual (<http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY>)
- [9] Franck, G., Nigro, N., Storti, M., d'Elia, J.: Numerical simulation of the Ahmed vehicle model near-wake. Int. J. Num. Meth. Fluids (in press) 2007
- [10] Gillieron, P., Chometro, F.: 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] Han, T.: Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity. AIAA Journal 27(9), 1213-1219 (1988)
- [12] Giannakoglou, K. C.: Acceleration of GA using neural networks, theoretical background. GA for optimization in aeronautics and turbomachinery. In: VKI Lecture Series (2000)
- [13] 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)

[14] Hirsch, C. : Numerical computation of external and internal flows, Vol.1: Fundamentals of numerical discretization. John Wiley & Sons, 1990.

[15] Hirsch, C. : Numerical computation of external and internal flows, Vol.2: Computational Methods for inviscid and viscous flows. John Wiley & Sons, 1990.

[16] Brunn, A., Nitsche, W.: 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)

## Παράρτημα Α

### Αρχεία STL

Τα αρχεία STL/Stereolithography είναι μία μορφή αρχείων αναπαράστασης 3Δ σωμάτων, τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα στον τομέα ταχείας παραγωγής πρωτοτύπων (rapid prototyping). Τα αρχεία STL περιγράφουν μόνο τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός 3Δ σώματος χωρίς να περιέχουν πληροφορίες για χρώμα, υφή ή άλλα χαρακτηριστικά που υπάρχουν σε άλλα συνηθισμένα μοντέλα CAD. Υπάρχουν σε ASCII και δυαδική μορφή, με πιο συνηθισμένη την δυαδική καθώς καταλαμβάνει λιγότερο αποθηκευτικό χώρο.

Ένα αρχείο STL περιγράφει μια επιφάνεια διακριτοποιημένη σε τριγωνικά στοιχεία, περιέχοντας πληροφορίες για το κάθετο σε κάθε στοιχείο διάνυσμα και τις συντεταγμένες των τριών σημείων που το ορίζουν σε ένα 3Δ καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Τα αρχεία STL αρχίζουν με τη γραμμή:

```
solid name
```

Όπου η χρήση κάποιου ονόματος είναι προαιρετική. Στη συνέχεια το αρχείο συνεχίζει με οποιονδήποτε αριθμό τριγωνικών στοιχείων με τον εξής τρόπο αναπαράστασης για το καθένα:

```
facet normal  $n_i$   $n_j$   $n_k$   
  outer loop  
    vertex  $v1_x$   $v1_y$   $v1_z$   
    vertex  $v2_x$   $v2_y$   $v2_z$   
    vertex  $v3_x$   $v3_y$   $v3_z$  '  
  endloop  
endfacet
```

Όπου  $n_i$  -  $n_k$  και  $v1_x$  -  $v3_z$  μεταβλητές κινητής υποδιαστολής. Το αρχείο τελειώνει με την εξής έκφραση:

```
endsolid name
```

Τα αρχεία STL είναι ευρέως διαδεδομένα και υποστηρίζονται από τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά CAD. Οποιαδήποτε μορφή αρχείου που περιγράφει ένα 3Δ σώμα μπορεί με ευκολία να μετατραπεί/αποθηκευτεί σε STL, ενώ είναι αρκετά εύκολο να αναπτυχθούν και κώδικες που να γράφουν αυτή τη μορφή αρχείου λόγω της απλότητάς της. Για αυτό το λόγω χρησιμοποιούνται ακόμα παρά το σχετικά μεγάλο τους μέγεθος (καθώς οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου εμφανίζονται πολλές φορές).



## Παράρτημα Β

### Αρχείο ρυθμίσεων του SnappyHexMesh

Το αρχείο ρυθμίσεων του εργαλείου γένεσης πλέγματος SnappyHexMesh είναι το μέσο με το οποίο ο χρήστης ελέγχει τις παραμέτρους και δίνει τις απαραίτητες εισόδους στον κώδικα γένεσης πλέγματος. Ονομάζεται snappyHexMeshDict και στην αρχική του μορφή περιλαμβάνει επεξηγήσεις για τη λειτουργία κάθε μεταβλητής που ουσιαστικά συμπληρώνουν το λιτό εγχειρίδιο χρήσης που το συνοδεύει. Παρακάτω παρατίθεται ένα αρχείο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία γένεσης υπολογιστικού πλέγματος για επίλυση ροής γύρω από το Ahmed body προς διευκόλυνση του αναγνώστη.

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

// Which of the steps to run
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers true; το βήμα πρόσθεσης στρωμάτων κελιών στην επιφάνεια 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
{
    ahmedbody.stl Δήλωση του αρχείου που περιλαμβάνει την γεωμετρία του σώματος
    {
        type triSurfaceMesh;
        name ahmedbody;
    }
    road.stl επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε ως έδαφος
    {
        type triSurfaceMesh;
        name road;
    }
    refinementBox Καθορισμός περιοχής εντός της οποίας στη συνέχεια θα πυκνώσουμε το πλέγμα
    {
        type searchableBox;
        min (-0.6 -0.3 0.0);
        max ( 2.5 0.7 0.7);
    }
};

// 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
(
);

// 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
{
    ahmedbody      Εδώ ελέγχεται η πυκνότητα του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια της γεωμετρίας, το
ελάχιστο επίπεδο χρησιμοποιείται παντού ενώ το μέγιστο σε λεπτομέρειες και ακμές της γεωμετρίας
    {
        // Surface-wise min and max refinement level
        level (6 7);
    }
    road           αντίστοιχα για την επιφάνεια που χρησιμοποιούμε ως έδαφος
    {
        // Surface-wise min and max refinement level
        level (4 5);
    }
}

// Resolve sharp angles Σε ακμές της επιφάνειας του σώματος που εμφανίζεται γωνία μεγαλύτερη
αυτής θα εφαρμόζεται το μέγιστο επίπεδο πυκνότητας που έχει καθοριστεί για την επιφάνεια
resolveFeatureAngle 20;

// 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.
Έλεγχος πυκνότητας πλέγματος σε περιοχές του χωρίου που έχουν δηλωθεί νωρίτερα στο geometry

```



```

refinementRegions
{
    refinementBox
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 3));
    }
    ahmedbody      πύκνωμα πλέγματος σε απόσταση από το σώμα ("απόσταση" "επίπεδο πυκνότητας")
    {
        mode distance;
        levels ((0.05 5) (0.15 4));
    }
}

// Mesh selection Το διάνυσμα locationInMesh καθορίζει το ποιιά περιοχή του πλέγματος θα
κρατηθεί, δηλαδή πρακτικά, αυτή εντός η εκτός της επιφάνειας που καθορίζει τη γεωμετρίας του σώματος
// ~~~~~

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

// Settings for the snapping. Αυτές οι μεταβλητές ελέγχουν τη διαδικασία προσαρμογής του πλέγματος
στην επιφάνεια, γενικά περισσότερες επαναλήψεις δεν αυξάνουν σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης τη στιγμή
που μπορεί να είναι αρκετά πιο αποτελεσματικά
snapControls
{
    //- Number of patch smoothing iterations before finding correspondence
    // to surface
    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.
addLayersControls
{
    relativeSizes false; Επιλογή που επηρεάζει τον τρόπο καθορισμού του πάχους του στρώματος κελιών
που βρίσκεται σε επαφή με το εξωτερικό πλέγμα, false: η τιμή που δίνεται παρακάτω είναι πραγματική
σε μέτρα, true: η τιμή που δίνεται παρακάτω είναι σχετική και ελέγχει το πάχος ως ποσοστό του πάχους
του πρώτου κελιού του εξωτερικού πλέγματος

    // Per final patch (so not geometry!) the layer information
    layers
    {
        road_road
        {
            nSurfaceLayers 2; Αριθμός στρωμάτων κελιών που προστίθενται
            finalLayerThickness 0.0015; Τιμές που δίνονται σε αυτή τη περιοχή που δηλώνεται και η
γεωμετρία στην οποία θα προστεθούν τα κελιά, υπερσχύουν αυτών που δίνονται παρακάτω
            expansionRatio 1.3; Λόγος πάχους μεταξύ των στρωμάτων κελιών
        }
        ahmedbody_ahmed25
        {
            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
nLayerIter 15;
}

// Generic mesh quality settings. At any undoable phase these determine
// where to undo. Πολύ σημαντικές ρυθμίσεις! Αν οι τιμές είναι πολύ "αυστηρές" ο κώδικας γένεσης
πλέγματος μπορεί να μην ολοκληρωθεί σωστά ή να επιβραδυνθεί σημαντικά, ειδικά κατά η διαδικασία
πρόσθεσης στρωμάτων κελιών, αντίθετα πολύ "χαλαρός" έλεγχος πλέγματος μπορεί να οδηγήσει σε πλέγμα
που θα δυσκολέψει πολύ τον κώδικα επίλυσης της ροής.
meshQualityControls
{
    //- Maximum non-orthogonality allowed. Set to 180 to disable.
    maxNonOrtho 65;

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

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

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

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

```

```

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

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

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

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

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

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

// Advanced

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

// Advanced

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

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

// ***** //

```