



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής
& Βελτιστοποίησης

Βελτιστοποίηση Μορφής Αγωγού Κλιματισμού Αυτοκινήτου με Χρήση της Συνεχούς Συζυγούς Μεθόδου

Εκτενής Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

ΛΕΥΚΗ Α. ΓΕΡΜΑΝΟΥ

Επιβλέπων
Κυριάκος Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής
& Βελτιστοποίησης

Βελτιστοποίηση Μορφής Αγωγού Κλιματισμού Αυτοκινήτου με Χρήση της Συνεχούς Συζυγούς Μεθόδου

Εκτενής Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

ΛΕΥΚΗ ΓΕΡΜΑΝΟΥ

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τη χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου, που αναπτύχθηκε από τη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης του Τομέα Ρευστών του ΕΜΠ, στο περιβάλλον του λογισμικού OpenFOAM, για την βελτιστοποίηση μορφής ενός αγωγού κλιματισμού, ενός επιβατικού οχήματος, συμπεριλαμβανομένων πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην Toyota Motor Europe (TME). Ο συγκεκριμένος αγωγός κλιματισμού (αγωγός αποπαγοποίησης) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία αποπαγοποίησης-αποθάμβωσης του ανεμοθώρακα (παρμπρίζ), φυσώντας προς αυτόν δεσμίδες θερμού αέρα υψηλής ταχύτητας, ο οποίος παρέχεται από την μονάδα κλιματισμού HVAC – heating, ventilation and air conditioning του οχήματος.

Εφόσον οι βασικές απαιτήσεις απόδοσης, με κριτήρια αποπαγοποίησης-αποθάμβωσης, για έναν αγωγό κλιματισμού είναι η ικανοποιητική ταχύτητα και η ομοιομορφία του μοτίβου καθαρισμού του παρμπρίζ, ο χρόνος που απαιτείται για την εξάλειψη συμπυκνώματος ή πάγου στην εσωτερική και εξωτερική του επιφάνεια αντίστοιχα πρέπει να είναι σε λογικά πλαίσια και ο αγωγός να έχει την ικανότητα ομοιόμορφης αποπαγοποίησης σε όλη την επιφάνεια του παρμπρίζ, ώστε να καθαρίζει χωρίς να αφήνει ‘κοιλίδες’ συμπυκνώματος. Με βάση τα παραπάνω, μία ενδεδειγμένη αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το ολοκλήρωμα της διαφοράς της ταχύτητας του αέρα από

μία ταχύτητα στόχο (την επιθυμητή) σε έναν λεπτό όγκο που έχει οριστεί κατάλληλα κοντά στο παμπρίζ, εσωτερικά της καμπίνας του αυτοκινήτου.

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, η γεωμετρία του υπάρχοντος αγωγού κλιματισμού μορφοποιείται χρησιμοποιώντας λογισμικό που βασίζεται τις ογκικές NURBS και έχει αναπτυχθεί από το ΕΜΠ. Το εργαλείο αυτό παραμετροποιεί τόσο το επιφανειακό όσο και το χωρικό κομμάτι του πλέγματος και τα παραμορφώνει ταυτόχρονα, σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης. Η ρευστοδυναμική ανάλυση υλοποιείται μέσω της αριθμητικής επίλυσης των RANS εξισώσεων μαζί με το $k-\epsilon$ μοντέλο τύρβης. Κατά την βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου των ογκικών NURBS, που υπολογίζεται με χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου.

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας του αέρα στην εσωτερική πλευρά του ανεμοθώρακα περιλαμβάνουν μετρήσεις της ταχύτητας μέσω ενός ανεμομέτρου hot-wire. Παρουσιάζεται μία πειστική σύγκριση μεταξύ της ανάλυσης μέσω CFD και των μετρήσεων. Τελικά, η βελτιωμένη απόδοση κατά τη διαδικασία αποπαγοποίησης, της νέας γεωμετρίας, που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση με τη συζυγή μέθοδο, επιβεβαιώνεται και πειραματικά μετά από κατασκευή του σχεδιασθέντος αγωγού κλιματισμού με διαδικασία ταχείας προτυποποίησης (rapid prototyping), με χρήση 3D εκτυπωτή.

Μεγάλο τμήμα της διπλωματική εργασίας εκπονήθηκε στις εγκαταστάσεις της Toyota Motor Europe, στο Βέλγιο, υπό την εκεί επίβλεψη του μηχανικού κ. A. Delacroix.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που με στήριξαν, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με την διπλωματική μου εργασία, αλλά και καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο ΕΜΠ. Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Κ. Γιαννάκογλου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το πρωτότυπο, ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα. Επίσης, τον ευχαριστώ ολόψυχα για τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις του, αλλά και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Ένα μεγάλο τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εκπονήθηκε στις εγκαταστάσεις της Toyota Motor Europe, στο τμήμα ‘Vehicle Performance Engineering’. Με την ευκαιρία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. A. Delacroix για την καθοδήγησή και την επιμονή του κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Όλους αυτούς τους μήνες, μου έδινε κίνητρο με τον ενθουσιασμό του και σε κάθε ευκαιρία, μοιραζόταν μαζί μου τις γνώσεις και την εμπειρία του σχετικά με την αυτοκινητοβιομηχανία. Επιπλέον, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κ. N. Yokoyama για τα ενθαρρυντικά του σχόλια αλλά κυρίως για την πίστη του σε μένα και στο θέμα που ερευνήθηκε. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες μου στον Δρ. Κ. Γκάγκα, για την προθυμία του να προσφέρει την βοήθειά του όποτε την χρειαζόμουν.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον κ. Β. Σκαπέρδα και τον κ. Γ. Φωτιάδη, μηχανικούς της BETA CAE Systems για την συμβολή τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης για την προθυμία τους να επιλύσουν οποιαδήποτε απορία. Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον Δρ. Ε. Παπουτσή-Κιαχαγιά, για τον χρόνο που μου διέθεσε, την άμεση ανταπόκρισή του και τη βοήθεια που μου προσέφερε απλόχερα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένειά μου, για την στήριξη και την υπομονή τους όλα τα χρόνια της φοίτησής μου.

Ακρωνύμια

ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΕΘΣ	Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
ΜΠΥΡ&Β	Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης
ΥΡΔ	Υπολογιστική Ρευστοδυναμική
ΜΔΕ	Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις

NTUA	National Technical University of Athens
PCopt	Parallel CFD & Optimization Unit
TME	Toyota Motor Europe
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Computer Aided Design
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
OpenFOAM	Open Field Operation And Manipulation

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	HVAC–Αγωγός Αποπαγοποίησης	1
1.2	Βελτιστοποίηση μέσω CFD	3
1.2.1	Μέθοδοι Βελτιστοποίησης	4
1.2.2	Η Συζυγής Μέθοδος	5
1.2.3	Μέθοδοι Μορφοποίησης Γεωμετρίας	6
1.3	Στόχος και Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	7
2	Η Συνεχής Συζυγής Μέθοδος για Ασυμπίεστη, Μόνιμη Ροή	9
2.1	Εξισώσεις της Ροής	9
2.2	Οριακές Συνθήκες	10
2.3	Αντικειμενική Συνάρτηση	10
2.4	Συζυγείς Εξισώσεις	13
2.5	Συζυγείς Οριακές Συνθήκες	13
2.6	Παράγωγοι Ευαισθησίας	14
2.7	Διακριτοποίηση και Επίλυση των Εξισώσεων	14
3	Μορφοποίηση της Γεωμετρίας	17
3.1	Εισαγωγή στον Μορφοποιητή Πλέγματος	17
3.2	Μαθηματικό Υπόβαθρο	17
3.2.1	Καμπύλες B–splines	18
3.2.2	Ογκικές B–splines	19
3.3	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης	19
4	Μελέτη και Πειραματική Πιστοποίηση του Πλήρους Μοντέλου– Αγωγός Αποπαγοποίησης & Καμπίνα	23
4.1	Διαδικασία της Μέτρησης και Αποτελέσματα	23
4.2	Πλεγματοποίηση και Υπολογισμός	24
4.3	Σύγκριση των Κατανομών Ταχύτητας μέσω Μέτρησης και CFD	26
5	Βελτιστοποίηση του Αγωγού Αποπαγοποίησης	35
5.1	Επίλυση των Συζυγών Εξισώσεων και Χάρτης Ευαισθησίας	35

5.2	Βελτιστοποίηση–Επιλογή Τελικής Γεωμετρίας	36
6	Ανακεφαλαίωση–Συμπεράσματα	43

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση μορφής, με βάση ρευστοδυναμικά ή αεροδυναμικά κριτήρια, χρησιμοποιείται ευρέως για αεροναυπηγικές εφαρμογές και, σταδιακά όλο και περισσότερο, και σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Δεδομένης της σημαντικής προσόδου της βελτιστοποίησης μορφής με χρήση της συζυγούς μεθόδου, επιλέγεται η χρήση της για την επίλυση ενός ενδιαφέροντος προβλήματος σχετικού με το σύστημα κλιματισμού ενός επιβατικού οχήματος. Στόχος είναι η βελτίωση των επιδόσεων αποπαγοποίησης–αποθάμβωσης του ανεμοθώρακα (παρμπρίζ) ενός επιβατικού αυτοκινήτου, μορφοποιώντας τη γεωμετρία του υπεύθυνου αγωγού κλιματισμού, του αγωγού αποπαγοποίησης (defroster nozzle).

1.1 HVAC–Αγωγός Αποπαγοποίησης

Η ασφάλεια και η αίσθηση άνεσης των επιβατών λόγω της κατάλληλης θερμοκρασίας αέρα της καμπίνας του αυτοκινήτου είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για τον σχεδιασμό του συστήματος κλιματισμού των οχημάτων Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system, [11]. Το σύστημα κλιματισμού, είναι υπεύθυνο για την αποθάμβωση (demisting) και την αποπαγοποίηση (defrosting) των τζαμιών του αυτοκινήτου αλλά και τη δημιουργία και διατήρηση ευχάριστου κλίματος στο εσωτερικό της καμπίνας, μέσω του ελέγχου της υγρασίας και της θερμοκρασίας του αέρα.

Ο αγωγός αποπαγοποίησης, defroster nozzle, ως τμήμα του συστήματος κλιματισμού οχημάτων, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποπαγοποίηση/αποθάμβωση του παρμπρίζ. Η αποθάμβωση αναφέρεται στη λειτουργία της αφαίρεσης του θολώματος, ενός λεπτού στρώματος συμπυκνώματος νερού στην εσωτερική πλευρά του ανεμοθώρακα (παρμπρίζ), ενώ η αποπαγοποίηση αναφέρεται στην εξάλειψη του πάγου στην εξωτερική του πλευρά. Η μονάδα HVAC παρέχει θερμό αέρα στον αγωγό αποπαγοποίησης ο οποίος, με τη σειρά του, παρέχει αυτόν τον αέρα με αυξημένη ταχύτητα στο παρμπρίζ.

Η απόδοση της λειτουργίας αποπαγοποίησης και αποθάμβωσης του παρμπρίζ ε-

ίναι πολύ σημαντικός παράγοντας αξιολόγησης του συστήματος κλιματισμού, αλλά και ταυτόχρονα είναι και υποχρεωτικός έλεγχος σύμφωνα με την εθνική και παγκόσμια νομοθεσία, λόγω της σημασίας της με την ασφάλεια κατά την οδήγηση.

Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός πάγου στο παμπρίζ και στα μπροστινά παράθυρα κατά τη χειμερινή περίοδο μπορεί να αποδειχτεί επικίνδυνος, μιας και εμποδίζει την ορατότητα του οδηγού και ενοχλεί κατά την οδήγηση. Συνεπώς, η απόδοση αποπαγοποίησης λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό του συστήματος κλιματισμού για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των επιβατών.

Για την επίτευξη λοιπόν αποδεκτής απόδοσης αποπαγοποίησης σε ένα όχημα, το σύστημα κλιματισμού πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια [2]. Αυτά είναι κυρίως τα εξής ακόλουθα:

1. Ταχεία απόδοση καθαρισμού: Ο χρόνος που απαιτείται για τη διάλυση του συμπυκνώματος ή του πάγου στο παμπρίζ να είναι μέσα σε 'λογικά' πλαίσια.
2. Απόδοση μοτίβου καθαρισμού: Η ικανότητα ομοιόμορφης αποπαγοποίησης, ιδανικά σε όλην την επιφάνεια του παμπρίζ, αποφεύγοντας τον τμηματικό του καθαρισμό, αφήνοντας θαμπά τμήματα.

Η ταχεία απόδοση καθαρισμού μπορεί να βελτιωθεί ως ένα βαθμό με την αύξηση της παροχής αέρα του ανεμιστήρα ή της δυνατότητας συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη (και κατά συνέπεια, της θερμοκρασίας του αέρα που στοχεύει το παμπρίζ). Για τη βελτίωση της απόδοσης μοτίβου καθαρισμού συνηθίζεται η εκτέλεση πολλών πειραμάτων με διαφορετικές πρόχειρες γεωμετρίες αγωγών αποπαγοποίησης (δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις σημαντικές περιοχές των εσωτερικών οδηγών πτερυγίων και της περιοχής της εξόδου) για την επιλογή αυτής που έχει αποδεκτή απόδοση. Έως τώρα, η απόδοση του αγωγού εξαρτιόταν κυρίως από την εμπειρία των τεχνικών [2], [10].

Ωστόσο, η περίπλοκη δομή του αγωγού καθιστά δύσκολο τον σχεδιασμό, ενώ η πραγματοποίηση πολλών πειραματικών δοκιμών κοστίζει πολύ σε χρόνο και χρήμα. Ως αποτέλεσμα, τα χρονοβόρα πειράματα που γενικά απαιτούνται για την επίτευξη βελτιωμένης γεωμετρίας με καλύτερη απόδοση σταδιακά αντικαθιστούνται από υπολογιστικές προσομοιώσεις και αυτόματες διαδικασίες βελτιστοποίησης.

Ταυτόχρονα, είναι γνωστό πως το μοτίβο καθαρισμού συνδέεται με την κατανομή της ταχύτητας του αέρα στον ανεμοθώρακα, όπως αναφέρεται στα [2], [10]. Τελευταία, η κατανομή της ταχύτητας στην επιφάνεια του παμπρίζ έχει ερευνηθεί με ποικίλες προσομοιώσεις και έχει συσχετισθεί με την απόδοση αποπαγοποίησης, καταλήγοντας στο ότι η πρώτη αρκεί για να προσδιορίσει τη δεύτερη ως έναν βαθμό. Ο αγωγός αποπαγοποίησης πρέπει λοιπόν, να σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να αποδίδει τη βέλτιστη κατανομή ταχύτητας του αέρα σε μια περιοχή κοντά στο παμπρίζ. Με βάση αυτό το συμπέρασμα, ορίζεται αυτή ως στόχος της βελτιστοποίησης, με άλλα λόγια μεταφράζεται κατάλληλα για να εκφρασθεί ως συνάρτηση στόχος.

Με βάση προηγούμενες έρευνες [4], [10] συμπεραίνεται ότι το CFD μπορεί να διεκπεραιώσει την πλειονότητα της σχεδιαστικής διαδικασίας, όχι μόνο για τον αγωγό αποπαγοποίησης αλλά και για άλλους αγωγούς ή τμήματα του συστήματος κλιματισμού. Παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για τον μηχανικό σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές, βασισμένες στη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος (trial and error) οι οποίες βασίζονται κατά πολύ στην εμπειρία. Ένα από αυτά είναι το ότι δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της ροής, οδηγώντας στη βαθύτερη κατανόησή της, με αποτέλεσμα να ευνοείται ο καθορισμός της πηγής διαφόρων προβλημάτων. Ένα άλλο όφελος είναι το ότι δεν απαιτείται η χρήση του πραγματικού οχήματος ή τμημάτων του σε πρωτότυπη μορφή. Κατά συνέπεια, η διαδικασία της αξιολόγησης μπορεί να εξελιχθεί παράλληλα με τον σχεδιασμό. Το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθόλη τη διάρκεια του κύκλου σχεδιασμού και της αξιολόγησης, αφήνοντας τις πειραματικές δοκιμές για το τέλος, πριν το στάδιο της έγκρισης του αγωγού. Έτσι η δοκιμή αποπαγοποίησης πραγματοποιείται στο τελευταίο τεστ έχοντας ως στόχο την αξιολόγηση απόδοσης με βάση τη νομοθεσία. Για τους παραπάνω λόγους, ούτως ώστε να σχεδιαστεί ένας νέος αγωγός που να αποδίδει βελτιωμένη κατανομή ταχύτητας στο παμπρίζ, προτιμάται η βελτιστοποίησή του με βάση το CFD. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, γίνεται χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου (continuous adjoint method) για τον απαιτούμενο υπολογισμό της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού, οι οποίες ορίζουν την μορφή του αγωγού αποπαγοποίησης.

1.2 Βελτιστοποίηση μέσω CFD

Τα συστατικά που απαιτούνται για την εκτέλεση μίας αυτόματης διαδικασίας βελτιστοποίησης μορφής περιλαμβάνουν τον επιλύτη της ροής (CFD solver), την παραμετροποίηση της γεωμετρίας (της οποίας οι παράμετροι επιδρούν ως μεταβλητές σχεδιασμού), μία μέθοδο βελτιστοποίησης ικανή να υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού και έναν τρόπο προσαρμογής (ή επαναγένεσης) του υπολογιστικού πλέγματος σε κάθε υποψήφια λύση.

Κατά τη βελτιστοποίηση με CFD, το σχήμα της γεωμετρίας υπό εξέταση ελέγχεται από έναν αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού. Για παράδειγμα, αυτές μπορεί να είναι οι συντελεστές των πολυωνύμων Bezier–Bernstein που παραμετροποιούν το σώμα υπό σχεδιασμό. Η ποιότητα (καταλληλότητα) του παραχθέντος σχήματος αξιολογείται υπολογίζοντας μία ποσότητα (συνήθως ένα ολοκλήρωμα), γνωστό και ως συνάρτηση στόχος ή συνάρτηση κόστους του προβλήματος βελτιστοποίησης. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση αεροδυναμικού σχεδιασμού μίας αεροτομής (το οποίο είναι και το συνήθες πρόβλημα που χρησιμοποιείται για την επικύρωση των σχετικών μεθόδων) αυτή θα μπορούσε να είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας ή άνωσης της αεροτομής. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης εξαρτάται από τις τιμές των μεταβλητών ροής, αποκτηθείσες από την επίλυση των εξισώσεων ροής που προσομοιώνουν τη ροή εσωτε-

ρικά (εσωτερική αεροδυναμική) ή γύρω (εξωτερική αεροδυναμική) από το υπό εξέταση σχήμα. Οι εξισώσεις της ροής μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης και μπορεί να περιλαμβάνουν την επίλυση των εξισώσεων για συμπίεστη ή ασυμπίεστη, μόνιμη ή μη-μόνιμη ροή, με μικρό ή μεγάλο ιξώδες. Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) υπολογίζοντας τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού. Τα προβλήματα μεγιστοποίησης μπορούν εύκολα να μετασχηματιστούν σε ελαχιστοποίησης και, συνεπώς, να αντιμετωπιστούν με τη χρήση των προτεινόμενων μεθόδων.

1.2.1 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν στις εξής δύο κατηγορίες: τις αιτιοκρατικές και τις στοχαστικές μεθόδους. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι απαιτούν τον υπολογισμό των πρώτων (συχνά και δεύτερων) παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης. Για την εύρεση των νέων τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος της απότομης καθόδου βασιζόμενος στις υπολογισθείσες παραγώγους. Από την άλλη μεριά, οι στοχαστικές μέθοδοι δεν απαιτούν επιπλέον πληροφορία πέραν της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι, [30], [31], [32], αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των οποίων είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (ΕΑ), έχουν το πλεονέκτημα του ότι είναι μάλλον απίθανο να παγιδευτούν σε τοπικό ελάχιστο λόγω του τυχαματικού τρόπου εύρεσης υποψηφίων λύσεων. Ωστόσο, πολλές φορές στα προβλήματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, απαιτείται μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων πριν ο αλγόριθμος εντοπίσει τη βέλτιστη λύση, αυξάνοντας έτσι κατά πολύ το υπολογιστικό κόστος.

Οι αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι είναι πολύ ευάλωτοι στην πιθανότητα παγίδευσής τους σε τοπικό ελάχιστο, καθώς η λύση αυτή μπορεί να θεωρηθεί λανθασμένα ως η βέλτιστη, ενώ είναι μόνο βελτιωμένη σε σύγκριση με τις γειτονικές της. Παρόλα αυτά, εφόσον η κατεύθυνση ανανέωσης της τιμής των μεταβλητών σχεδιασμού εντοπίζεται με βάση τις παραγώγους ευαισθησίας και όχι με έναν τυχαίο ή έστω τυχαματικό τρόπο, σε κάθε κύκλο ο αλγόριθμος αποδίδει ένα βελτιωμένο αποτέλεσμα, σχηματίζοντας εν γένει μία αυτοματοποιημένη διαδικασία που απαιτεί πολύ λιγότερους κύκλους από αυτούς που απαιτούν οι ΕΑ.

Αν και στόχος, ιδανικά, είναι η απόκτηση της βέλτιστης λύσης, ειδικά στις βιομηχανικές εφαρμογές, βελτιωμένες (σε σύγκριση με την εν χρήσει διάταξη) λύσεις είναι εξίσου ευπρόσδεχτες. Για αυτούς τους λόγους, σε αυτήν την εφαρμογή, προτιμούνται οι αιτιοκρατικές μέθοδοι, αρκεί ασφαλώς το συνολικό κόστος υπολογισμού τους να είναι αποδεκτό.

1.2.2 Η Συζυγής Μέθοδος

Η συζυγής μέθοδος είναι ένα μαθηματικό εργαλείο υπολογισμού της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού που λαμβάνει υπόψη (στην προκειμένη περίπτωση) το ότι κάθε λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης πρέπει να ικανοποιεί τις εξισώσεις ροής (Navier–Stokes).

Έστω F η αντικειμενική συνάρτηση που γενικά εκφράζεται ως

$$F = F(\vec{U}(\vec{b}), \vec{b}) \quad (1.1)$$

όπου \vec{U} είναι το διάνυσμα των μεταβλητών της ροής και \vec{b} το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού, οι οποίες στην περίπτωση της βελτιστοποίησης μορφής, ορίζουν, για παράδειγμα, το σχήμα μίας αεροτομής. Πρακτικά, κάθε αλλαγή στις τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού \vec{b} , τροποποιεί το σχήμα της αεροτομής, δίνοντας έτσι ένα νέο πεδίο ροής \vec{U} γύρω της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία νέα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Συνεπώς, η μεταβολή της F ως προς το \vec{b} είναι

$$\frac{dF}{d\vec{b}} = \frac{\partial F}{\partial \vec{b}} + \frac{\partial F}{\partial \vec{U}} \frac{d\vec{U}}{d\vec{b}} \quad (1.2)$$

Εισάγεται η επαυξημένη αντικειμενική συνάρτηση

$$F_{aug} = F + \vec{\psi}^T \vec{R} \quad (1.3)$$

όπου $\vec{\psi}$ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange που συχνά αποκαλούνται ως συζυγείς μεταβλητές. Το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφουν το φυσικό πρόβλημα γράφονται με συμβολική χρήση του τελεστή $\vec{R} = \vec{R}(\vec{U}, \vec{b})$. Εφόσον $\vec{R} = 0$, τότε $F = F_{aug}$. Κατά συνέπεια, η ελαχιστοποίηση της F ισοδυναμεί με ελαχιστοποίηση της F_{aug} .

$$\frac{dF_{aug}}{d\vec{b}} = \frac{dF}{d\vec{b}} + \vec{\psi}^T \frac{d\vec{R}}{d\vec{b}} \quad (1.4)$$

$$\frac{d\vec{R}}{d\vec{b}} = \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{b}} + \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{U}} \frac{d\vec{U}}{d\vec{b}} = 0 \quad (1.5)$$

Η εξίσωση 1.4, χρησιμοποιώντας την 1.2 και 1.5 μετατρέπεται σε

$$\begin{aligned} \frac{dF_{aug}}{d\vec{b}} &= \frac{\partial F}{\partial \vec{b}} + \frac{\partial F}{\partial \vec{U}} \frac{d\vec{U}}{d\vec{b}} + \vec{\psi}^T \left(\frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{b}} + \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{U}} \frac{d\vec{U}}{d\vec{b}} \right) \\ &= \left(\frac{\partial F}{\partial \vec{U}} + \vec{\psi}^T \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{U}} \right) \frac{d\vec{U}}{d\vec{b}} + \left(\frac{\partial F}{\partial \vec{b}} + \vec{\psi}^T \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{b}} \right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Το μητρώο $\frac{d\vec{U}}{d\vec{b}}$ έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος και είναι επιθυμητό να αποφευχθεί ο υπολογισμός του. Συνεπώς, οι πολλαπλασιαστές $\vec{\psi}$ υπολογίζονται αντί αυτού, με τρόπο ώστε να μηδενιστεί ο συντελεστής του μητρώου αυτού στην εξίσωση 1.6. Μετά τον υπολογισμό του $\vec{\psi}$ οι πολλαπλασιαστές Lagrange χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας σύμφωνα με

$$\frac{dF}{d\vec{b}} = \frac{dF_{aug}}{d\vec{b}} = \frac{\partial F}{\partial \vec{b}} + \vec{\psi}^T \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{b}} \quad (1.7)$$

Ο υπολογισμός των παραγώγων ευαισθησίας μέσω της εξίσωσης 1.7 απαιτεί την επίλυση μόνο ενός γραμμικού συστήματος για τον υπολογισμό του $\vec{\psi}$ ενώ ο υπολογισμός μέσω της 1.2 απαιτεί την επίλυση N συστημάτων (N ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού αφού $(b_n, n \in [1, N])$), $\frac{d\vec{R}}{d\vec{b}}$ για τον υπολογισμό του μητρώου $\frac{d\vec{U}}{d\vec{b}}$.

Η συζυγής μέθοδος έχει δύο υποκατηγορίες: τη διακριτή [36], [37], [38] και τη συνεχή, [34], [35], [39]. Η διακριτή συζυγής μέθοδος περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση των εξισώσεων του διανύσματος $\vec{R} = 0$ και, έπειτα, την ενσωμάτωσή τους στις εξισώσεις 1.6 και 1.7, [26]. Οι συζυγείς μεταβλητές είναι επίσης σε διακριτή μορφή. Αντιθέτως, σύμφωνα με τη συνεχή συζυγή μέθοδο, οι εξισώσεις της ροής πρώτα διαφορίζονται και οι συζυγείς ΜΔΕ προκύπτουν ως κλειστό σύστημα. Αυτές έπειτα διακριτοποιούνται και επιλύονται αριθμητικά.

Με άλλα λόγια, η διακριτή συζυγής μέθοδος λειτουργεί με αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν από την διακριτοποίηση των αρχικών εξισώσεων ρευστοδυναμικής ενώ, στη συνεχή συζυγή μέθοδο, οι συζυγείς ΜΔΕ σχηματίζονται και έπειτα διακριτοποιούνται και επιλύονται. Σε αυτήν την περίπτωση, ο επιλύτης του συζυγούς προβλήματος που χρησιμοποιείται και αναπτύχθηκε από την ΜΠΥΡ&Β/ΕΜΠ στο περιβάλλον του OpenFOAM, χρησιμοποιεί τη συνεχή συζυγή μέθοδο.

Οι παραπάνω εξισώσεις που περιέγραφαν το συζυγές πρόβλημα γενικά, στην πραγματικότητα αναφέρονται στη διακριτή συζυγή μέθοδο. Αυτή η προσέγγιση προτιμάται σε αυτό το σημείο καθώς θεωρείται ως πιο απλή για την εξοικείωση του αναγνώστη με τη συζυγή μέθοδο και τα πλεονεκτήματά της. Αργότερα, η συνεχής συζυγής μέθοδος αναλύεται εκτενώς, προσαρμοζόμενη στο πρόβλημα που εξετάζεται στο κεφάλαιο 2.

1.2.3 Μέθοδοι Μορφοποίησης Γεωμετρίας

Οι παράγωγοι ευαισθησίας που έχουν υπολογισθεί από τον επιλύτη του συζυγούς προβλήματος μεταφράζονται σε μετατοπίσεις των σημείων ελέγχου με τη χρήση της απότομης καθόδου. Πέραν της απότομης καθόδου, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης βασισμένες στην κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς και στον υπολογισμό του Εσσιανού πίνακα, όπως οι Μέθοδοι Newton, η μέθοδος των Συζυγών Κλίσεων (Conjugate Gradient), κλπ [24], [29], [13]. Στη βελτιστοποίηση μορφής μέσω CFD, οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορεί να είναι οι κόμβοι του επιφανειακού πλέγματος

τος ή συνηθέστερα, σημεία ελέγχου (control points) που παραμετροποιούν την υπό μελέτη γεωμετρία. Συνεπώς, η αυτοματοποιημένη διαδικασία χρησιμοποιεί την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τα σημεία ελέγχου, η οποία έχει υπολογισθεί με τη συνεχή συζυγή μέθοδο και ύστερα, αφού μεταφραστούν οι παράγωγοι σε μετατοπίσεις των σημείων ελέγχου, ένα εργαλείο (λογισμικό) μορφοποίησης μεταβάλλει την επιφάνεια σύμφωνα με τις μετακινήσεις των σημείων ελέγχου.

Γενικά, υπάρχουν αρκετές τεχνικές παραμετροποίησης γεωμετρίας [7], ωστόσο μία από τις επικρατέστερες, η μέθοδος ελεύθερης μορφοποίησης ή καλύτερα free-form deformation (FFD) επιλέγεται στην παρούσα διπλωματική εργασία λόγω της ευχρηστίας και της καταλληλότητάς της για την παρούσα εφαρμογή. Η τεχνική FFD έχει το σημαντικό πλεονέκτημα του ότι παραμετροποιεί και παραμορφώνει ταυτόχρονα και το επιφανειακό αλλά και το ογκικό πλέγμα. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφει την ανάγκη χρήσης ενός επιπρόσθετου εργαλείου για την κατάλληλη παραμόρφωση του ογκικού πλέγματος μετά την ανανέωση του επιφανειακού. Επιπλέον, διατηρεί την τοπολογία του πλέγματος και, έτσι, αποφεύγεται η επαναπλεγματοποίησή του, ενώ ταυτόχρονα, επιτρέπει την αρχικοποίηση της ροής από τις λύσεις που έχουν προκύψει από τον προηγούμενο κύκλο. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται αξιοσημείωτη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Η μέθοδος μορφοποίησης πλέγματος γίνεται συνήθως με χρήση ογκικών B-splines, NURBS ή Radial Basis Functions (RBFs). Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται ένας μορφοποιητής πλέγματος που παραμετροποιεί τον επιθυμητό 3D χώρο μέσω κυβικών B-splines, ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα της ΜΠΥΡ&B/ΕΜΠ..

1.3 Στόχος και Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης μορφής, με χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου, στον αγωγό αποπαγοποίησης ενός αυτοκινήτου Toyota. Σκοπός της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η επίτευξη βελτιωμένης απόδοσης αποπαγοποίησης για το όχημα. Για τον λόγο αυτό, πρωτίστως, σχηματίζεται μία κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση που περιγράφει ικανοποιητικά τον προαναφερθέντα στόχο. Η συζυγής μέθοδος παρέχει τις παραγωγούς ευαισθησίας που δίνουν ποιοτικές οδηγίες/πληροφορίες για την προτεινόμενη μορφοποίηση του αγωγού. Έπειτα, ο συνεργαζόμενος με τον επιλύτη μορφοποιητής μεταφράζει αυτήν την πληροφορία κατάλληλα για να παράξει μία νέα γεωμετρία του αγωγού, δίνοντας έτσι καλύτερο αποτέλεσμα αποπαγοποίησης από το αρχικό. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται επαναληπτικά μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

- Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται οι εξισώσεις της ροής, καθώς και η συνεχής

συζυγής μέθοδος για ασυμπίεστη, μόνιμη ροή. Εκφράζεται η αντικειμενική συνάρτηση, οι συζυγείς εξισώσεις με τις οριακές τους συνθήκες και οι παράγωγοι ευαισθησίας.

- Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται ο μορφοποιητής πλέγματος και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης.
- Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται το εκτελεσθέν πείραμα για τη μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας του αέρα κοντά στο παρμπρίζ καθώς και η υπολογισθείσα ροή αέρα στην καμπίνα. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης και του CFD.
- Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αυτοματοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης.
- Στο κεφάλαιο 6, γίνεται ανακεφαλαίωση και παρουσιάζονται τα εξαγόμενα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2

Η Συνεχής Συζυγής Μέθοδος για Ασυμπίεστη, Μόνιμη Ροή

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος του παρόντος προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η βελτίωση της απόδοσης αποπαγοποίησης και αποθάμβωσης, του υπεύθυνου για τη λειτουργία αυτή αγωγού κλιματισμού αυτοκινήτου. Το CFD μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά την απόδοση αποπαγοποίησης, και μάλιστα είναι επαρκής η μελέτη της κατανομής της ταχύτητας του αέρα κοντά στο παμπρίζ, αμελώντας τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, σύμφωνα με τα [2], [4]. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί και να γίνει η μελέτη του με χρήση μόνιμης προσομοίωσης, χωρίς την επίλυση της εξίσωσης ενέργειας, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα και το υπολογιστικό κόστος.

Οι περιπτώσεις ροής που επιλύονται στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας διέπονται από τις εξισώσεις Reynolds Averaged Navier–Stokes για μόνιμη, ασυμπίεστη ροή, συζευγμένες με το μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$. Οι ΜΔΕ της μέσης ροής, αυτές του μοντέλου τύρβης και οι οριακές του συνθήκες καλούνται ως οι εξισώσεις του πρωτεύοντος (primal) προβλήματος της βελτιστοποίησης.

2.1 Εξισώσεις της Ροής

Οι εξισώσεις της μέσης ροής [21],[6],[28], η εξίσωση συνέχειας και οι εξισώσεις ορμής αντίστοιχα, γράφονται ως

$$R^p = -\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.1)$$

$$R_i^v = v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

όπου v_i είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας, p η πίεση διαιρεμένη με τη σταθερή πυκνότητα ρ , ν η κινηματική συνεκτικότητα και ν_t η τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα η οποία προκύπτει από τη λύση των ΜΔΕ του μοντέλου τύρβης

Οι εξισώσεις του k - ϵ [23], [21], [28] δίνονται από

$$R^k = v_i \frac{\partial k}{\partial x_i} - \left(\nu + \frac{\nu_t}{P_{r_k}} \right) \frac{\partial^2 k}{\partial x_i^2} - P + \epsilon = 0 \quad (2.3)$$

$$R^\epsilon = v_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} - \left(\nu + \frac{\nu_t}{P_{r_\epsilon}} \right) \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} - C_1 \frac{\epsilon}{k} P + C_2 \frac{\epsilon^2}{k} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.5)$$

όπου k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια, ϵ είναι ο όρος καταστροφής αυτής της κινητικής ενέργειας ενώ το P αναφέρεται στην παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

Οι σταθεροί συντελεστές του μοντέλου δίνονται ως: $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ και οι τυρβώδεις αριθμοί Prandtl $P_{r_\epsilon} = 1.3$, $P_{r_k} = 1.0$

2.2 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που ‘κλείνουν’ το πρωτεύον πρόβλημα είναι:

- Συνθήκη Dirichlet για το v_i και για τις μεταβλητές του μοντέλου τύρβης (k, ϵ) και μηδενική συνθήκη Neumann για το p στην είσοδο S_I .
- Μηδενική συνθήκη Neumann για το v_i και για τις μεταβλητές του μοντέλου τύρβης (k, ϵ) και μηδενική συνθήκη Dirichlet για το p στην έξοδο S_O .
- Μηδενική συνθήκη Dirichlet για το v_i (συνθήκη μη ολίσθησης στον τοίχο). Εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση των συνεκτικών τάσεων στον τοίχο (συναρτήσεις τοίχου–wall functions [23], [21]) για τις μεταβλητές του μοντέλου τύρβης (k, ϵ) και μηδενική συνθήκη Neumann για το p στους τοίχους S_W .

Το υπολογιστικό χωρίο του μοντέλου που θα μελετηθεί στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1. Οι λεπτομέρειες του μοντέλου εξηγούνται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

2.3 Αντικειμενική Συνάρτηση

Συνήθως, στα αεροδυναμικά προβλήματα η αντικειμενική συνάρτηση είναι ένα βαθμωτό μέγεθος όπως ο συντελεστής άνωσης ή οπισθέλκουσας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην περίπτωση μας επιθυμείται η κατανομή ταχύτητας του αέρα κοντά στο παρμπίζ (και όχι πάνω σε αυτό λόγω της συνθήκης μη-ολίσθησης) να πληροί κάποια κριτήρια

(όπως ειπώθησαν στην παράγραφο 1.1) τα οποία μεταφράζονται στην ανάγκη επίτευξης ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας του αέρα αλλά και αύξησής της, κυρίως στο πάνω μέρος του παρμπρίζ που συνήθως η ταχύτητα είναι μικρότερη. Αυτός ο στόχος εκφράζεται μαθηματικά ως

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \int_{\Omega_{tar}} (v_i^2 - v_{tar}^2)^2 d\Omega_{tar} \quad (2.7)$$

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει την επιθυμία εξαναγκασμού του μέτρου της ταχύτητας, σε έναν λεπτό όγκο Ω_{tar} , βλ. σχ. 5.1 όπου και υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση, να φτάσει μία ορισμένη σταθερή ταχύτητα, ή κατανομή.

Πρωτεύον χαρακτηριστικό του συζυγούς προβλήματος είναι η χρήση της επαυξημένης αντικειμενικής συνάρτησης F_{aug} αντί απευθείας της F , βλ. παράγραφο 1.2.2 και [6]. Έτσι η F_{aug} ορίζεται ως

$$F_{aug} = F + \int_{\Omega} u_i R_i^v d\Omega + \int_{\Omega} q R^p d\Omega \quad (2.8)$$

όπου το Ω είναι το υπολογιστικό χωρίο, u_i οι συνιστώσες της συζυγούς ταχύτητας και q η συζυγής πίεση. Εφόσον οι εξισώσεις του πρωτεύοντος προβλήματος 2.1, 2.2 ικανοποιούνται, οι F και F_{aug} είναι ισοδύναμες.

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, κατά την ακόλουθη ανάλυση των εξισώσεων αμελείται η διαφορίση των εξισώσεων του μοντέλου τύρβης για λόγους απλότητας. Συνεπώς, κατά την εφαρμογή της συνεχούς συζυγούς μεθόδου εφαρμόζεται η προσέγγιση της ‘παγωμένης τύρβης’. Οι αναγνώστες που ενδιαφέρονται για τις διαφορές που θα μπορούσαν να προκύψουν με τη διαφορίση της τύρβης μπορούν ανατρέξουν στα κάτωθι: [6], [13], [15],[14],[16],[18],[17],[19].

Διαφορίζοντας την επαυξημένη συνάρτηση προκύπτει

$$\frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = \frac{\delta F}{\delta b_n} + \frac{\delta}{\delta b_n} \int_{\Omega} u_i R_i^v d\Omega + \frac{\delta}{\delta b_n} \int_{\Omega} q R^p d\Omega \quad (2.9)$$

Με βάση το θεώρημα Leibniz που χρησιμοποιείται για τη διαφορίση των ογκικών ολοκληρωμάτων με μεταβλητά όρια προκύπτει

$$\frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = \frac{\delta F}{\delta b_n} + \int_{\Omega} u_i \frac{\partial R_i^v}{\partial b_n} d\Omega + \int_{\Omega} q \frac{\partial R^p}{\partial b_n} d\Omega + \int_S (u_i R_i^v + q R^p) \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS \quad (2.10)$$

όπου S το σύνορο του υπολογιστικού χωρίου το οποίο αναλύεται ως $S = S_I \cup S_O \cup S_W \cup S_{W_P}$. Τα όρια S_I , S_O , S_W και S_{W_P} αφορούν την είσοδο, την έξοδο, τα σταθερά και τα παραμετροποιημένα σύνορα του χωρίου, αντίστοιχα. Ωστόσο μόνο τα παραμετροποιημένα μετακινούνται ($\frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k$ αντιστοιχεί στην ταχύτητα παραμόρφωσης της επιφάνειας

κατά την κάθετη διεύθυνση) οπότε

$$\frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = \frac{\delta F}{\delta b_n} + \int_{\Omega} u_i \frac{\partial R_i^v}{\partial b_n} d\Omega + \int_{\Omega} q \frac{\partial R^p}{\partial b_n} d\Omega + \int_{S_{WP}} (u_i R_i^v + q R^p) \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS \quad (2.11)$$

Όπως έχει προαναφερθεί, $F = F_{aug}$ και, συνεπώς, $\frac{\delta F}{\delta b_n} = \frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n}$.

Για να εκφραστεί η $\frac{\delta F}{\delta b_n}$ και να σχηματιστούν οι συζυγείς εξισώσεις με τις οριακές τους συνθήκες, η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται σε γενική μορφή ως [6]

$$F = \int_{\Omega_{tar}} F_{\Omega_{tar}} d\Omega_{tar} \quad (2.12)$$

Η διαφορίση της F ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού δίνει

$$\frac{\delta F}{\delta b_n} = \frac{\delta}{\delta b_n} \int_{\Omega_{tar}} F_{\Omega_{tar}} d\Omega_{tar} \quad (2.13)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Leibniz προκύπτει

$$\frac{\delta}{\delta b_n} \int_{\Omega_{tar}} F_{\Omega_{tar}} d\Omega_{tar} = \int_{\Omega_{tar}} \frac{\partial F_{\Omega_{tar}}}{\partial b_n} d\Omega_{tar} \quad (2.14)$$

καθώς τα όρια του όγκου Ω_{tar} στον οποίο υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση δεν μετακινούνται άρα η ταχύτητα του ορίου $\frac{\delta x_k}{\delta b_n}$ είναι στην περίπτωση αυτή είναι μηδενική.

Εφόσον η αντικειμενική συνάρτηση από την εξίσωση 2.7 περιλαμβάνει μόνο όρους ταχύτητας, η χρήση του κανόνα της αλυσίδας για το $\int_{\Omega_{tar}} \frac{\partial F_{\Omega_{tar}}}{\partial b_n} d\Omega_{tar}$ ως προς το v_i δίνει

$$\int_{\Omega_{tar}} \frac{\partial F_{\Omega_{tar}}}{\partial b_n} d\Omega_{tar} = \int_{\Omega_{tar}} \dot{F}_{\Omega_{tar},i}^v \frac{\partial v_i}{\partial b_n} d\Omega_{tar} \quad (2.15)$$

όπου $\dot{F}_{\Omega_{tar},i}^v$ είναι ίσο με $\frac{\partial F}{\partial v_i}$ το οποίο, στη περίπτωση της αντικειμενικής συνάρτησης 2.7 είναι

$$\dot{F}_{\Omega_{tar},i}^v = \frac{\partial F}{\partial v_i} = 2(v_k^2 - v_{tar}^2)v_i \quad (2.16)$$

Συνεπώς, η παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης 2.15 είναι

$$\frac{\delta F_{obj}}{\delta b_n} = 2 \int_{\Omega_{tar}} \left(v_k^2 - v_{tar}^2 \right) v_i \frac{\partial v_i}{\partial b_n} d\Omega_{tar} \quad (2.17)$$

και, στη γενική του μορφή, με χρήση των εξισώσεων 2.13, 2.14 και 2.15, τελικά

$$\frac{\delta F}{\delta b_n} = \int_{\Omega_{tar}} \dot{F}_{\Omega_{tar},i}^v \frac{\partial v_i}{\partial b_n} d\Omega_{tar} \quad (2.18)$$

2.4 Συζυγείς Εξισώσεις

Με χρήση της 2.11 και κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία που αναλύεται στο [6] προκύπτει η έκφραση της παραγώγου της επαυξημένης συνάρτησης. Είναι επιθυμητή η αποφυγή υπολογισμού των όρων $\frac{\partial v_i}{\partial b_n}$ και $\frac{\partial p}{\partial b_n}$ μιας και απαιτούν την επίλυση N συστημάτων. Για να επιτευχθεί αυτό, μηδενίζονται οι συντελεστές τους, καταλήγοντας έτσι στις αποκαλούμενες συζυγείς εξισώσεις μέσης ροής

$$R^q = -\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.19)$$

$$R_i^u = u_j \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial(v_j u_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial q}{\partial x_i} + \dot{F}_{\Omega_{tar},i}^v = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.20)$$

2.5 Συζυγείς Οριακές Συνθήκες

Οι συζυγείς οριακές συνθήκες προκύπτουν από τον μηδενισμό κάποιων από τα εναπομείναντα επιφανειακά ολοκληρώματα της παραγώγου της επαυξημένης συνάρτησης, που δεν μηδενίστηκαν για την παραγωγή των συζυγών εξισώσεων, βλ. [6]. Εφόσον η αντικειμενική συνάρτηση επί του προκειμένου εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα v_i , το αποτέλεσμα συνοπτικά είναι οι εξής οριακές συνθήκες:

- Μηδενική συνθήκη Dirichlet για την u_i και μηδενική Neumann για την q στην είσοδο.
- Συνθήκη Robin για τις εφαπτομενικές συνιστώσες της συζυγούς ταχύτητας, μηδενική Neumann οριακή συνθήκη για την κάθετη συνιστώσα της συζυγούς ταχύτητας και Dirichlet οριακή συνθήκη για την q , στην έξοδο.

Η οριακή συνθήκη Robin για την εφαπτομενικές συνιστώσες της συζυγούς ταχύτητας, με τα εφαπτομενικά στην επιφάνεια μοναδιαία διανύσματα να είναι $t_i^l, l = 1, 2$, εκφράζεται ως

$$v_{\langle n \rangle} u_{\langle t \rangle}^l + (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_{\langle t \rangle}^l}{\partial n} + \frac{\partial u_{\langle n \rangle}}{\partial t^l} \right) = 0 \quad (2.21)$$

Η οριακή συνθήκη Dirichlet για την q δίνεται από

$$q = u_{\langle n \rangle} v_{\langle n \rangle} + 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial u_{\langle n \rangle}}{\partial n} = 0 \quad (2.22)$$

- Μηδενική οριακή συνθήκη Dirichlet για την u_i και μηδενική Neumann οριακή συνθήκη για την q στα σταθερά και τα παραμετροποιημένα τοιχώματα.

2.6 Παράγωγοι Ευαισθησίας

Αφού ικανοποιηθούν οι συζυγείς εξισώσεις και οι οριακές τους συνθήκες, προκύπτουν οι συζυγείς μεταβλητές από τον επιλύτη του συζυγούς προβλήματος. Τότε, είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραγώγων ευαισθησίας από την ακόλουθη έκφραση

$$\begin{aligned} \frac{\delta F_{aug}}{\delta b_n} = & - \int_{S_{WP}} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) n_j - q n_i \right] \frac{\partial v_i}{\partial x_k} n_k \frac{\delta x_m}{\delta b_n} n_m dS \\ & + \int_{S_{WP}} (u_i R_i^v + q R^p) \frac{\delta x_k}{\delta b_n} n_k dS \end{aligned} \quad (2.23)$$

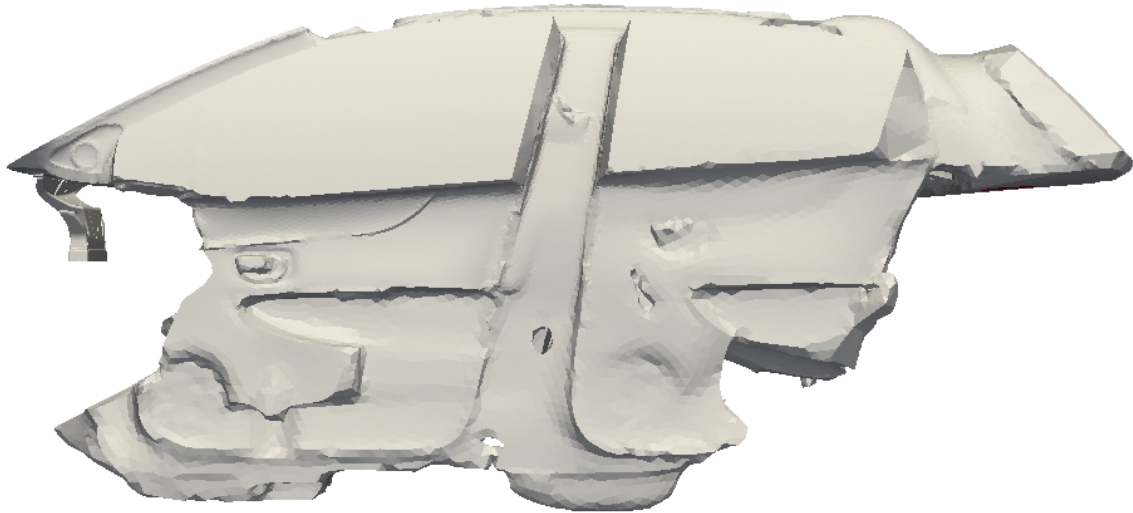
όπου στον πρώτο όρο, μέσα στις αγκύλες βρίσκονται μόνο πρωτεύουσες και συζυγείς μεταβλητές, ενώ το εξωτερικό του τμήμα προκύπτει από τη διαφορίση της γεωμετρίας, η οποία προκύπτει από τον μορφοποιητή του πλέγματος.

2.7 Διακριτοποίηση και Επίλυση των Εξισώσεων

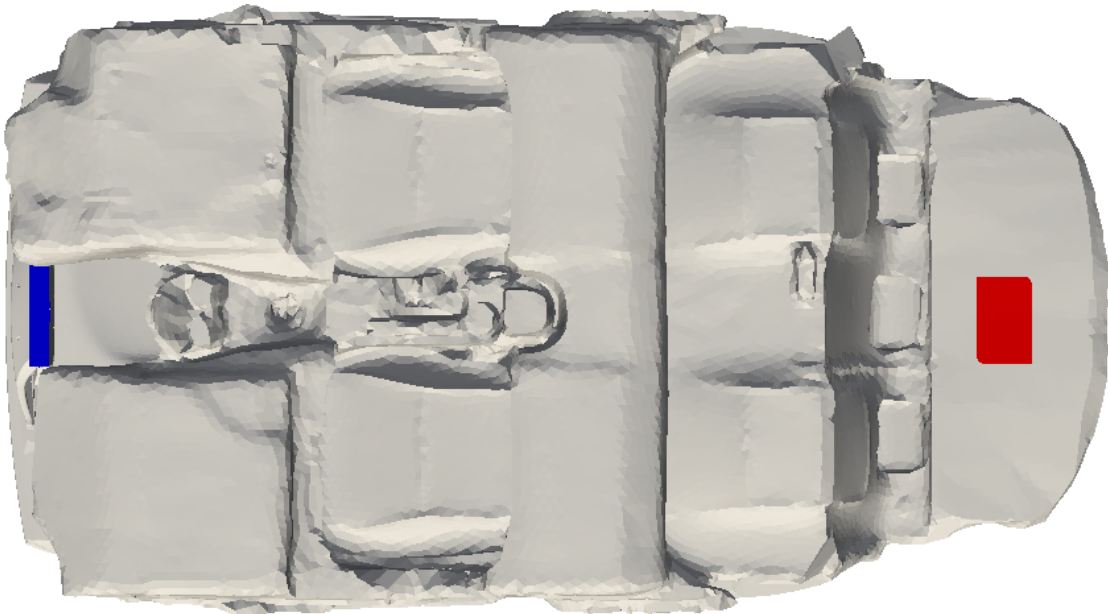
Τα συστήματα των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων (ΜΔΕ) του πρωτεύοντος (εξ. 2.1, 2.2) και του συζυγούς (εξ. 2.19, 2.20) προβλήματος πρέπει να διακριτοποιηθούν ώστε να μετασχηματιστούν σε αντίστοιχο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων και να επιλυθούν αριθμητικά, [6].

Οι εξισώσεις ασυμπίεστης, μόνιμης και τυρβώδους ροής δίνονται από τις εξ. 2.1, 2.2. Με σκοπό να κλείσει το σύστημα των εξισώσεων πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μοντέλο τύρβης για τον υπολογισμό της ν_t . Στον αλγόριθμο SIMPLE, που χρησιμοποιείται, οι εξισώσεις του μοντέλου τύρβης επιλύονται απεμπλεγμένα από τις εξισώσεις μέσης ροής.

Ο επιλύτης του πρωτεύοντος (που υπήρχε ήδη στο OpenFOAM CFD toolbox) και του συζυγούς προβλήματος (που αναπτύχθηκε από τη ΜΠΥΡ&Β/ΕΜΠ) είναι προγραμματισμένοι σε περιβάλλον OpenFOAM και επιλύουν τις εξισώσεις ροής εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) χρησιμοποιώντας κεντροκυβελική διατύπωση και διακριτοποίηση πεπερασμένων όγκων, σε μη δομημένα πλέγματα. Για τους όρους μεταφοράς χρησιμοποιήθηκαν σχήματα δεύτερης τάξης ανάντι (πρωτεύον) και κατάντι (συζυγές) διακριτοποίησης. Οι χωρικές παράγωγοι υπολογίζονται με χρήση του θεωρήματος Green-Gauss και χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή των εμπλεκόμενων ροικών μεγεθών. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα σχήματα διακριτοποίησης και τον αλγόριθμο SIMPLE ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα [25], [28] και [6].

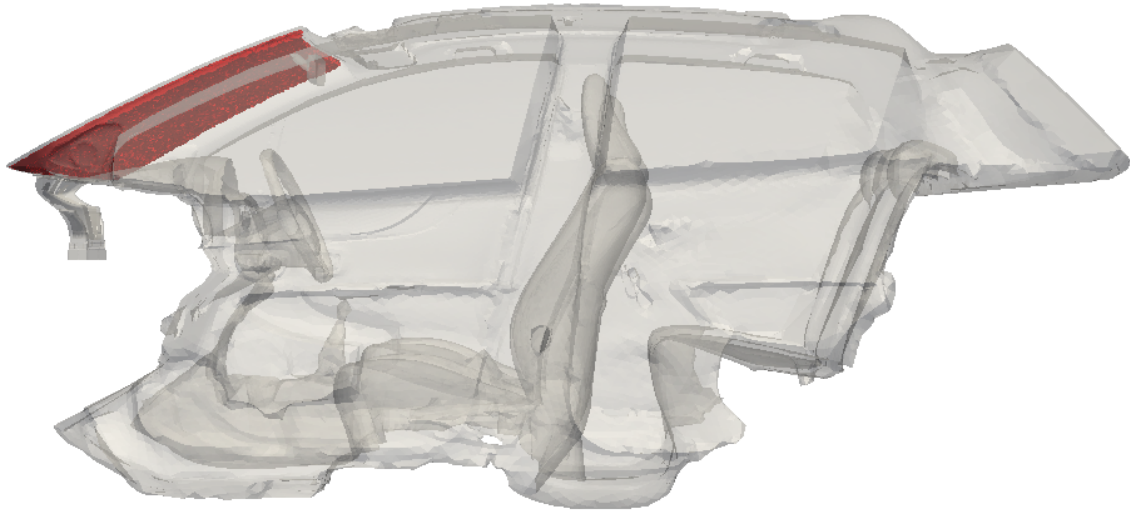


(α') Το υπολογιστικό χωρίο Ω του μοντέλου που μελετάται. Πλάγια όψη.

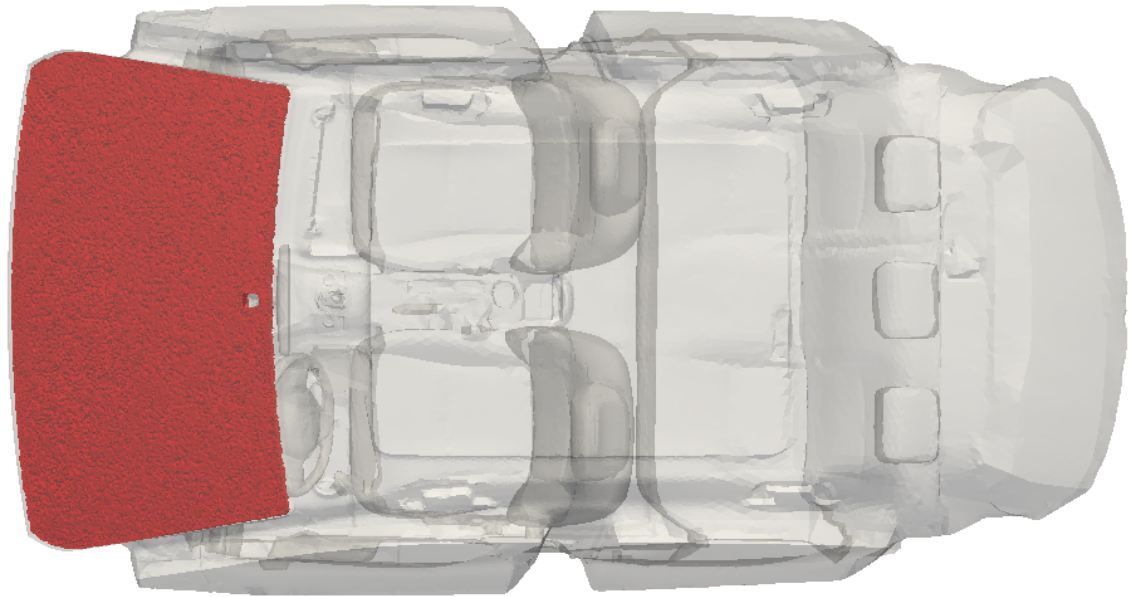


(β') Άνοψη του υπολογιστικού χωρίου. Η είσοδος S_I σημειώνεται με μπλέ χρώμα και ταυτίζεται με την είσοδο του αγωγού αποπαγοποίησης. Η έξοδος της ροής S_O σημειώνεται με κοκκινο χρώμα και βρίσκεται στο πίσω μέρος της καμπίνας, κοντά στον χώρο αποσκευών. Ως τοίχος S_W λαμβάνονται οι υπόλοιπες επιφάνειες της καμπίνας.

Σχήμα 2.1: Υπολογιστικό χωρίο του μοντέλου που εξετάζεται. Ορισμός της εισόδου και της εξόδου της ροής.



(α') Το υπολογιστικό χωρίο Ω και ο όγκος στόχου Ω_{tar} σε πλάγια όψη.



(β') Το υπολογιστικό χωρίο Ω και ο όγκος στόχου Ω_{tar} σε κάτοψη.

Σχήμα 2.2: Ο λεπτός όγκος στόχο Ω_{tar} όπου υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση σημειώνεται με κόκκινο χρώμα.

Κεφάλαιο 3

Μορφοποίηση της Γεωμετρίας

3.1 Εισαγωγή στον Μορφοποιητή Πλέγματος

Όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο 1, απαιτείται μία στρατηγική παραμετροποίησης και μετακίνησης του πλέγματος για την εκτέλεση αυτοματοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης. Στην προκειμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση με τη μέθοδο των ογκικών B-splines για την τοπική παραμετροποίηση του πλέγματος. Ο μορφοποιητής πλέγματος έχει αναπτυχθεί από την ΜΠΥΡ&B/ΕΜΠ [20].

Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα ακόλουθα:

- Ορίζεται ο $3D$ χώρος που εμπεριέχει το τμήμα της γεωμετρίας προς βελτιστοποίηση. Παράγεται ένα δομημένο πλέγμα σημείων ελέγχου ογκικών καμπυλών B-splines. Τα σημεία ελέγχου θα αποτελέσουν και τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος βελτιστοποίησης.
- Τα σημεία του CFD πλέγματος που περιλαμβάνονται στον παραπάνω χώρο παραμετροποιούνται με βάση τα σημεία ελέγχου.
- Η μετατόπιση των σημείων ελέγχου για κάθε κύκλο βελτιστοποίησης αντιστοιχεί σε μετατόπιση των επιφανειακών αλλά και των ογκικών κόμβων του πλέγματος.

3.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο

Το λογισμικό, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα του ΜΠΥΡ&B [20], είναι βασισμένο στη θεωρία των ογκικών καμπυλών B-splines. Το μαθηματικό υπόβαθρο των καμπυλών αυτών παρουσιάζεται λεπτομερώς στα [22], [12], [20].

3.2.1 Καμπύλες B-splines

Μία καμπύλη B-spline $x(u)$ ορίζεται ως γραμμικός συνδιασμός $b_i \in [0, n]$ σημείων ελέγχου και συναρτήσεων βάσης $U_{i,p}(u)$ βαθμού p . Η καμπύλη περιγράφεται ως

$$x(u) = \sum_{i=0}^n U_{i,p}(u)b_i \quad (3.1)$$

Η εξίσωση 3.1 μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των $y(z)$ συντεταγμένων της μονοπαραμετρικής καμπύλης στις 2(, 3) διαστάσεις. Η καμπύλη που δίνεται από την εξ. 3.1 είναι μία τμηματικά πολυωνυμική καμπύλη, όπου το κάθε τμήμα είναι το πολύ βαθμού p . Για τον ορισμό των συναρτήσεων βάσης $U_{i,p}$, ορίζεται το διάνυσμα κόμβων $\xi_i, i \in [0, m], m = n + p + 1$ το οποίο περιλαμβάνει κόμβους σε αύξουσα σειρά, καθέννας από τους οποίους μπορεί να έχει πολλαπλότητα μεγαλύτερη τους ενός, δηλαδή να εμφανίζονται πολλές φορές στο διάνυσμα. Με σκοπό να προκύψουν καμπύλες που να διέρχονται από το πρώτο και το τελευταίο εκ των σημείων ελέγχου, το διάνυσμα κόμβων παίρνει την ομοιόμορφη μορφή:

$$\xi = [\underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \frac{1}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1}] \quad (3.2)$$

όπου $N = n - p + 1$. Τα σημεία ελέγχου πρέπει να είναι τουλάχιστον κατά ένα περισσότερα του βαθμού της καμπύλης, δηλαδή $n \geq p$.

Η συνάρτηση βάσης μηδενικής τάξης δίνεται από

$$U_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_i \leq u < \xi_{i+1} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$U_{i,p}(u) = \frac{u - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} U_{i,p-1}(u) + \frac{\xi_{i+p+1} - u}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+p}} U_{i+1,p-1}(u) \quad (3.4)$$

Εάν κατά τον υπολογισμό των τιμών των συναρτήσεων βάσης προκύψει ο λόγος $\frac{0}{0}$ ορίζεται ότι η τιμή του είναι 0. Ο βαθμός p καθορίζει το εύρος της επιρροής του ελέγχου των σημείων ελέγχου. Με άλλα λόγια, κάθε συνάρτηση βάσης και, άρα, κάθε σημείο ελέγχου, επηρεάζει σημεία με παραμετρικές συντεταγμένες σε εύρος κόμβων $p + 1$, δηλαδή που βρίσκονται στο διάστημα $[\xi_i, \xi_{i+p+1})$. Αυτό δίνει στις καμπύλες B-splines τη δυνατότητα της τοπικής υποστήριξης, δηλαδή μπορεί επιλεκτικά ένα τμήμα της καμπύλης να μεταβληθεί, αφήνοντας την υπόλοιπη ανέγγιχτη. Το εύρος αυτού του τοπικού χαρακτήρα ελέγχεται με το βαθμό p της καμπύλης, όπου όσο πιο μικρός αυτός ο βαθμός, τόσο πιο έντονα έλκεται η καμπύλη από τα σημεία ελέγχου. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και με τη βοήθεια του σχήματος 3.1.

3.2.2 Ογκικές B-splines

Οι ογκικές B-splines ομοιάζουν ως προς τον ορισμό και τις ιδιότητές τους με τις μονοπαραμετρικές καμπύλες που αναλύθηκαν παραπάνω, ωστόσο εδώ οι παράμετροι είναι τρεις u, v, w .

Οι καρτεσιανές συντεταγμένες $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [x, y, z]^T$ ενός σημείου του υπολογιστικού πλέγματος που τίθεται υπό παραμετροποίηση, που σημαίνει ότι βρίσκεται εντός του χώρου του πλέγματος των σημείων ελέγχου, δίδονται από

$$x_m(u, v, w) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K U_{i,pu}(u) V_{j,pv}(v) W_{k,pw}(w) b_m^{ijk} \quad (3.5)$$

όπου $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T = [u, v, w]^T$ είναι οι παραμετρικές συντεταγμένες του σημείου, U, V, W είναι οι συναρτήσεις βάσης των B-splines και pu, pv, pw οι βαθμοί τους αντίστοιχα. $b_m^{ijk}, m \in [1, 3], i \in [0, I], j \in [0, J], k \in [0, K]$, είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του ijk -οστού σημείου ελέγχου του 3D πλέγματος ελέγχου, όπου I, J και K είναι ο αριθμός των σημείων ελέγχου ανά κατεύθυνση.

Εφόσον οι παραμετρικές συντεταγμένες \mathbf{u} των σημείων του πλέγματος είναι γνωστές, ο υπολογισμός των καρτεσιανών είναι ευθύς, με πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Αυτές μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια, με απεικόνιση του $\mathbb{R}^3(u, v, w)$ στο $\mathbb{R}^3(x, y, z)$.

Με δεδομένες τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου, των διανυσμάτων κόμβου και των βαθμών των συναρτήσεων βάσης, οι παραμετρικές συντεταγμένες (u, v, w) ενός σημείου με καρτεσιανές συντεταγμένες $\mathbf{r} = [x_r, y_r, z_r]^T$ μπορούν να υπολογισθούν επιλύοντας το σύστημα

$$\mathbf{R}(u, v, w) = \begin{bmatrix} x(u, v, w) - x_r = 0 \\ y(u, v, w) - y_r = 0 \\ z(u, v, w) - z_r = 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

όπου $x_m(u, v, w)$ υπολογίζονται από την εξ. 3.5 με βάση τις τιμές των \mathbf{b} . Το 3×3 σύστημα των εξ. 3.6 λύνεται ανεξάρτητα για κάθε παραμετροποιημένο σημείο το πλέγματος, με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson, αφού υπολογισθεί και αντιστραφεί το ιακωβιανό μητρώο $\frac{\partial x_m}{\partial u_j}, m, j \in [1, 3]$. Το μητρώο αυτό υπολογίζεται αναλυτικά με διαφορίση της εξ. 3.5 ως προς τις συνιστώσες του \mathbf{u} .

3.3 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Για την εκτέλεση μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης μορφής, χρησιμοποιείται ο επιλύτης του συζυγούς προβλήματος μαζί με το λογισμικό μορφοποίησης [20]. Τα βήματα με τα οποία πραγματοποιείται μία τέτοια διαδικασία είναι:

1. Ορίζεται ο χώρος που εμπεριέχει τη γεωμετρία υπό βελτιστοποίηση. Ορίζεται το πλήθος των σημείων ελέγχου και ο βαθμός των συναρτήσεων βάσης με βάση τα παραπάνω. Έτσι δημιουργείται το δομημένο πλέγμα των σημείων ελέγχου.
2. Βρίσκονται τα σημεία του υπολογιστικού πλέγματος που εμπεριέχονται στο πλέγμα των σημείων ελέγχου. Για αυτά τα σημεία υπολογίζονται οι παραμετρικές συντεταγμένες.
3. Υπολογίζονται οι παραμετρικές συντεταγμένες των σημείων που βρέθηκαν κατά το βήμα 2. Το υπολογιστικό κόστος του βήματος αυξάνεται με την αύξηση των σημείων ελέγχου ή των σημείων που παραμετροποιούνται.
4. Επίλύονται οι εξισώσεις ροής.
5. Υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και εφαρμόζεται το κριτήριο τερματισμού.
6. Επίλύονται οι συζυγείς εξισώσεις.
7. Υπολογίζεται η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τους επιφανειακούς κόμβους τους πλέγματος $\frac{\delta F}{\delta x_m}$ (surface sensitivities).
8. Προβάλλονται αυτές οι παράγωγοι στα σημεία ελέγχου με σκοπό τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας ως προς αυτά

$$\frac{\delta F}{\delta b_i} = \sum_{j=1}^{n_p} \sum_{m=1}^3 \frac{\delta F}{\delta x_m^j} \frac{\delta x_m^j}{\delta b_i} \quad (3.7)$$

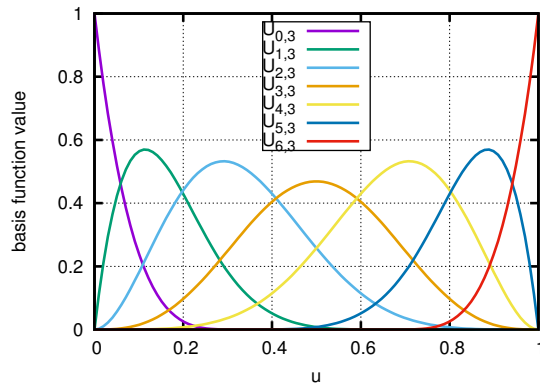
όπου n_p ο αριθμός των σημείων ελέγχου του πλέγματος που θα μετατοπιστούν. Η ποσότητα $\frac{\delta x_m^j}{\delta b_i}$ υπολογίζεται αναλυτικά με διαφορίση της εξ. 3.5 ως προς b_i .

9. Ανανεώνονται οι θέσεις των σημείων ελέγχου. Στην με τη μέθοδο της απότομης καθόδου

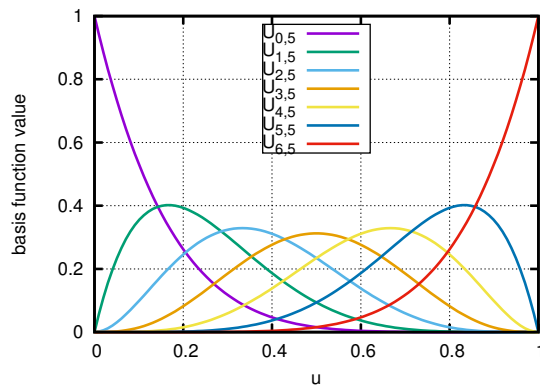
$$b_i^l = b_i^{l-1} - \eta \left. \frac{\delta F}{\delta b_i} \right|_{l-1} \quad (3.8)$$

όπου η ένας θετικός αριθμός που ορίζει το βήμα της καθόδου και l η τρέχουσα επανάληψη. Αν υπάρχουν περιοχές του πλέγματος που δεν παραμετροποιούνται, συνήθως τα εξωτερικά σημεία του πλέγματος ελέγχου παραμένουν ακίνητα, ώστε να μην υπάρξει επικάλυψη παραμετροποιημένων περιοχών και μη.

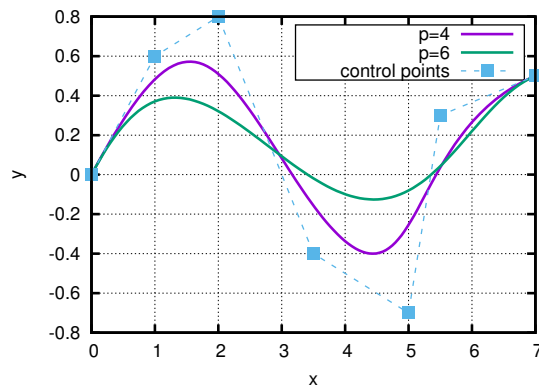
10. Υπολογίζονται οι νέες θέσεις των επιφανειακών και ογκικών κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος, χρησιμοποιώντας τις ήδη υπολογισμένες παραμετρικές τους συντεταγμένες.
11. Επιστροφή στο βήμα 4.



(α') Τιμές συναρτήσεων βάσης για βαθμό $p = 4$ και διάνυσμα κόμβων $\xi = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{3} \ \frac{2}{3} \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$.



(β') Τιμές συναρτήσεων βάσης για βαθμό $p = 6$ και διάνυσμα κόμβων $\xi = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$.



(γ') Καμπύλες B -splines που έχουν δημιουργηθεί με τις συναρτήσεις βάσης των δύο παραπάνω σχημάτων, για τα σημεία ελέγχου που φαίνονται στο σχήμα.

Σχήμα 3.1: Για τα πρώτα δύο σχήματα, για κάθε u , το άθροισμα των συναρτήσεων βάσεις ισούται με τη μονάδα. Στο τρίτο σχήμα, παράγονται δύο καμπύλες B -splines πολλαπλασιάζοντας τις παραπάνω συναρτήσεις βάσεις με τα σημεία ελέγχου που φαίνονται στο σχήμα. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες της καμπύλης υπολογίζονται μέσω της εξ. 3.1, για το διάνυσμα των σημείων ελέγχου $b^i = [b_x^i, b_y^i]^T, 2D$. όπως είναι εμφανές, η καμπύλη με μικρότερο βαθμό p έλκεται πιο έντονα από τα σημεία ελέγχου.

Κεφάλαιο 4

Μελέτη και Πειραματική Πιστοποίηση του Πλήρους Μοντέλου–Αγωγός Αποπαγοποίησης & Καμπίνα

Ο κύριος στόχος του εγχειρήματος είναι η βελτίωση της απόδοσης αποπαγοποίησης και αποθάμβωσης ενός οχήματος. Όστόσο πριν το βήμα της βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητη η επίλυση του πρωτεύοντος προβλήματος για την προσομοίωση της ροής υπό μελέτη. Η μονάδα HVAC του αυτοκινήτου παρέχει θερμό αέρα στον αγωγό αποπαγοποίησης, ο οποίος έπειτα τον διοχετεύει στην περιοχή του ανεμοθώρακα, υπό τη μορφή δεσμών αέρα υψηλής ταχύτητας. Έπειτα, ο αέρας ρέει στην καμπίνα του αυτοκινήτου και εξέρχεται από το πίσω της μέρος. Αυτό λοιπόν, είναι και το υπολογιστικό μοντέλο που πρέπει να κατασκευασθεί και να προσομοιωθεί σε αυτό η ροή.

4.1 Διαδικασία της Μέτρησης και Αποτελέσματα

Αρχικά, είναι σημαντική η σύγκριση πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης για να χτιστεί εμπιστοσύνη στη εφαρμοζόμενη μέθοδο [9]. Το σημείο ενδιαφέροντος είναι η ροή κοντά στο παρμπρίζ, οπότε επιθυμείται η εξασφάλιση υψηλής ακρίβειας υπολογισμού της κατανομής της ταχύτητας σε αυτήν την περιοχή.

Για αυτόν τον λόγο, πραγματοποιείται μέτρηση με ανεμόμετρο hot-wire, για τον πειραματικό καθορισμό του πεδίου της ταχύτητας στην γειτνίαση με την εσωτερική πλευρά του ανεμοθώρακα [8], [9]. Η χρήση του συγκεκριμένου μετρητικού οργάνου ενδείκνυται για την ποσοτικοποίηση της ταχύτητας της ροής κοντά στο παρμπρίζ και την επικύρωση υπολογιστικών προσομοιώσεων σύμφωνα με τα [9], [5]. Για τη μέτρηση

δημιουργείται πλέγμα με διάστημα $100mm$ στην επιφάνεια του παμπρίζ [8], σχ. 4.1α'. Η παροχή της μονάδας HVAC ελέγχεται με εξωτερική πηγή τάσης ώστε να παραμένει σταθερή η παροχή στον αγωγό αποπαγοποίησης κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η ταχύτητα μετράται για κάθε σημείο του πλέγματος με το ανεμόμετρο βλ. σχ. 4.1β', όχι ακριβώς στην επιφάνεια του ανεμοθώρακα, όπου η ταχύτητα είναι μηδέν λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης, αλλά σε κάθετη απόσταση $7mm$. Η απόσταση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι το όργανο, κατά τη μέτρηση, κείται στην εσωτερική επιφάνεια του ανεμοθώρακα με τρόπο ώστε η άκρη του να είναι σε απόσταση $7mm$ από την επιφάνεια. Αυτό είναι και το ενδεδειγμένο βάθος για τέτοιου είδους μετρήσεις σύμφωνα με το [8].

Η μετρηθείσα κατανομή ταχύτητας όπως φαίνεται στο σχ. 4.8β' δεν είναι συμμετρική, καθώς το ταμπλό του αυτοκινήτου δεν είναι συμμετρικό. Στην πλευρά του οδηγού, το ταχύμετρο πίσω από το τιμόνι δημιουργεί αυτήν την ασυμμετρία, η οποία επηρεάζει την ροή που εξέρχεται από τον αγωγό αποπαγοποίησης προς τον ανεμοθώρακα. Επιπροσθέτως, αν και στην προσομοίωση θεωρούμε ότι η μονάδα HVAC παρέχει ομοιόμορφη ροή στην έξοδο, που είναι η ιδανική υπόθεση, αυτό δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, θα έπρεπε να είχε συμπεριληφθεί ολόκληρη η μονάδα HVAC στο υπολογιστικό μοντέλο [27] ωστόσο αυτό θα είχε μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, μία ακόμη αιτία που τα δύο συγκρινόμενα μοτίβα είναι ανόμοια είναι εξαιτίας του σφάλματος του μετρητικού οργάνου που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και εξαιτίας της διαταραχής στη ροή που προκαλείται από την τοποθέτηση του οργάνου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1β'. Επίσης, κατά τη μέτρηση, οι πλευρικές εξόδους του αγωγού αποπαγοποίησης σφραγίστηκαν με κολλητική ταινία, οπότε η στεγανότητα δεν είναι πλήρως εξασφαλισμένη. Τέλος, σε ένα πραγματικό αυτοκίνητο, υπάρχει μικρή διαρροή αέρα (δεν είναι απόλυτα στεγανό) από τις πόρτες και από άλλα τμήματα, οπότε η παροχή αέρα που τελικά διοχετεύεται στον ανεμοθώρακα από τον αγωγό είναι μικρότερη από αυτήν που παρέχει η μονάδα κλιματισμού. Για τους παραπάνω λόγους λοιπόν αναμένεται η κατανομή ταχύτητας που θα προκύψει από την CFD ανάλυση να είναι λίγο διαφορετική από τη μετρηθείσα, δίνοντας μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας του αέρα, όντας πιο συμμετρική. Ωστόσο, αναμένεται η εικόνα να είναι ποιοτικά παρόμοια.

4.2 Πλεγματοποίηση και Υπολογισμός

Για τον ακριβή υπολογισμό της ροής μέσω CFD η δημιουργία καλής ποιότητας πλέγματος είναι ζωτικής σημασίας. Ένα καλό πλέγμα συνεπάγεται ακριβή περιγραφή των σημαντικών τουλάχιστον γεωμετριών που εμπεριέχονται. Επίσης θα πρέπει να συνάδει με κάποια ποιοτικά κριτήρια, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τον επιλύτη της ροής που χρησιμοποιείται.

Στην τρέχουσα περίπτωση, για την επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του υπολογιστικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα CAD μόνο για τα τμήματα που απαιτείται υψηλή ακρίβεια (αγωγός αποπαγοποίησης, ανεμοθώρακας, ταμπλό κοντά στην

έξοδο του αγωγού, καθρέπτης) σχ. 4.2. Για τα υπόλοιπα τμήματα του εσωτερικού του αυτοκινήτου, χρησιμοποιήθηκαν ήδη διαθέσιμα δεδομένα που προήλθαν από σκανάρισμα με λέιζερ της επιφάνειας του εσωτερικού της καμπίνας. Αυτή η διαδικασία προτιμήθηκε γιατί η συγκέντρωση και η διαχείριση των δεκάδων τμημάτων CAD που απαρτίζουν το εσωτερικό του αυτοκινήτου είναι μία πολύ χρονοβόρα διαδικασία. Επιπλέον, αν είχαν χρησιμοποιηθεί τα δεδομένα CAD θα έπρεπε πρώτα να απομονωθεί η εσωτερική τους μόνο επιφάνεια πρώτου δημιουργηθεί το πλέγμα, μία διαδικασία επίσης χρονοβόρα. Τέλος, καθώς σύμφωνα με το [4] η εσωτερική επιφάνεια του οχήματος μπορεί να απλοποιηθεί για να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού ενώ παράλληλα διατηρείται η ακρίβεια στα επιθυμητά επίπεδα, η παραπάνω διαδικασία ευσταθεί.

Μετά την εκκαθάριση της γεωμετρίας, τα δεδομένα CAD ενώθηκαν προσεκτικά με τα δεδομένα STL που προήλθαν από το σκανάρισμα με λέιζερ. Καθορίστηκαν ζώνες πύκνωσης του πλέγματος για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας υπολογισμών στο εμπροσθεν τμήμα της καμπίνας και παράλληλα εφαρμόστηκε πιο αραιό πλέγμα στο πίσω μέρος της, ώστε να κρατηθεί το υπολογιστικό κόστος σε λογικά επίπεδα [27].

Στο υπολογιστικό μοντέλο η είσοδος της ροής βρίσκεται στην είσοδο του αγωγού αποπαγοποίησης, και ως έξοδος ορίστηκε μία ορθογωνική μικρή επιφάνεια κοντά στο πορτμπαγκάζ του αυτοκινήτου. Το τελικό πλέγμα έχει 8399341 κελιά (cells) από τα οποία 2435602 είναι πρίσματα, 7958 είναι πυραμίδες και τα υπόλοιπα 5955781 είναι τετράεδρα σχ. 4.3β'. Το επιφανειακό πλέγμα αποτελείται από 624470 κελιά. Το πλέγμα δημιουργήθηκε από την BETA CAE Systems για την TME.

Η οριακή συνθήκη για την ταχύτητα στην είσοδο υπαγορεύεται από την αντίστοιχη παροχή αέρα που επιβλήθηκε κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Ο αριθμός Reynolds της ροής ήταν περίπου 20000 με βάση την υδραυλική διάμετρο στην είσοδο. Οι οριακές συνθήκες στον τοίχο για το k και ϵ προέκυψαν από εφαρμογή των συναρτήσεων τοίχου που εμπεριέχονται στο περιβάλλον του OpenFOAM.

Η λύση συγκλίνει μετά από 40000 επαναλήψεις όπου έχουν ικανοποιηθεί τα κριτήρια σύγκλισης. Εκτός από την σύγκλιση των υπολοίπων των εξισώσεων, παρακολουθείται και το μέτρο της ταχύτητας σε ένα από τα σημεία του πλέγματος στα οποία έγινε η αντίστοιχη μέτρηση (το πλέγμα φαίνεται στο σχ. 4.1γ'). Τα αντίστοιχα γραφήματα παρουσιάζονται στο σχ. 4.4.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία για οπτικοποίηση της ροής στην καμπίνα κυρίως στην περιοχή ενδιαφέροντος, κοντά στον ανεμοθώρακα. Οι γραμμές ροής κοντά στον ανεμοθώρακα φαίνονται στο σχ.4.5. Τα πεδία ροής σε τομή παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6. Οι ψηλότερες τιμές ταχύτητας και πίεσης βρίσκονται μέσα στον αγωγό αποπαγοποίησης και κοντά στον ανεμοθώρακα. Στο υπόλοιπο της καμπίνας δεν εμφανίζονται έντονα φαινόμενα ροής, όπως αναμενόταν.

Οπτικοποιείται επίσης η κατανομή της ταχύτητας κοντά στον ανεμοθώρακα με σκοπό την αξιολόγησή της και την εύρεση κατάλληλης έκφρασης της αντικειμενικής συνάρτησης που θα την βελτιώνει. Όπως είναι εμφανές από το σχ. 4.7, στην τρέχουσα

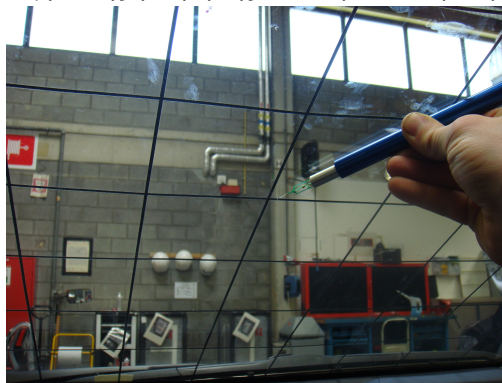
κατανομή, χαμηλή ταχύτητα αέρα φθάνει το άνω τμήμα της, μη ευνοώντας την διαδικασία αποπαγοποίησης.

4.3 Σύγκριση των Κατανομών Ταχύτητας μέσω Μέτρησης και CFD

Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία για να απομονωθεί η τιμή του μέτρου της ταχύτητας για σημεία που αντιστοιχούν στα σημεία του πλέγματος για τα οποία λήφθηκαν οι μετρήσεις [27]. Οι προκύπτουσες διδιάστατες κατανομές παρουσιάζονται στο σχ. 4.8 η σύγκρισή μεταξύ των πειραματικών και των CFD αποτελεσμάτων κρίνεται ως ικανοποιητική, δεδομένων των προαναφερθέντων προβλημάτων ασυμμετρίας, διαρροής, σφαλμάτων κατά τη μέτρηση και διαταραχών στη ροή που πηγάζουν από την στήριξη του μετρητικού οργάνου με το χέρι. Οι κατανομές συγκρινόμενες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, δίνοντας την ίδια ποιοτική εικόνα και δημιουργώντας έτσι εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα, τα οποία μπορούμε και να χρησιμοποιήσουμε πλέον για την επίλυση του συζυγούς προβλήματος.



(α') Πλέγμα της μέτρησης από την εσωτερική πλευρά.



(β') Μέτρηση με ανεμόμετρο hot-wire.

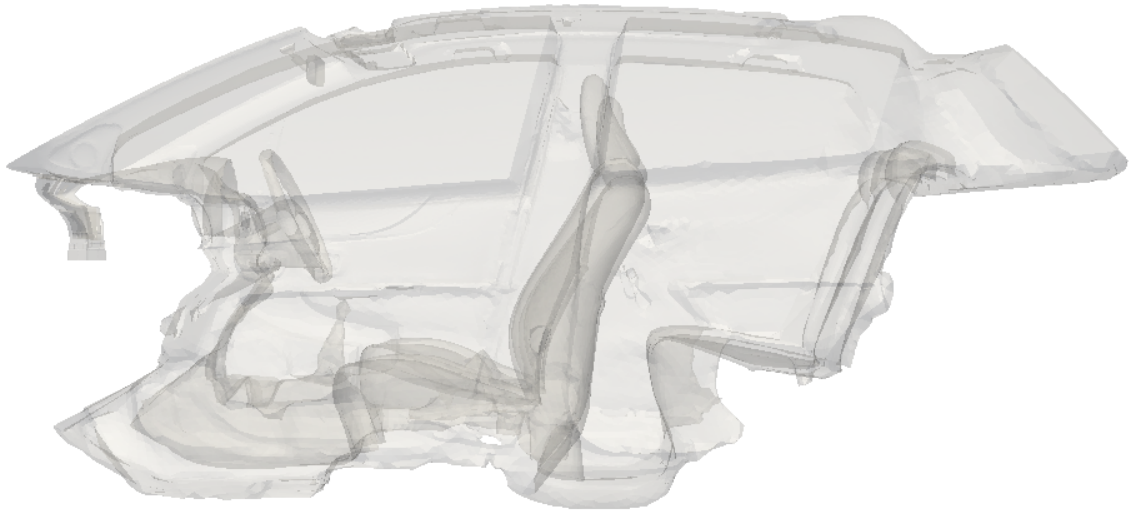


(γ') Πλέγμα της μέτρησης από την εξωτερική πλευρά.

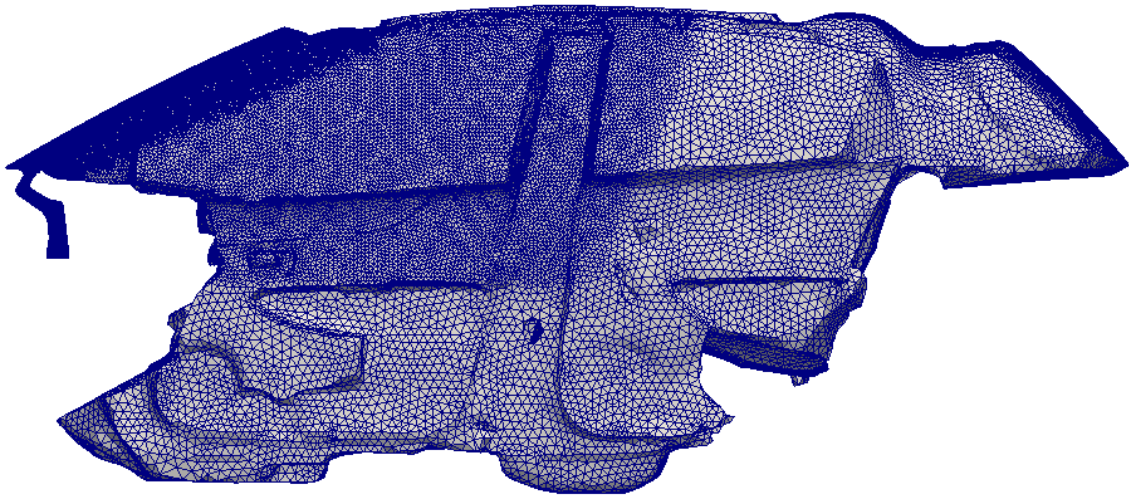
Σχήμα 4.1: Ρύθμιση της μέτρησης κατανομής ταχύτητας.



Σχήμα 4.2: Δεδομένα CAD για τα σημαντικά μέρη του μοντέλου: αγωγός αποπαγοποίησης, ανεμοθώρακας, ταμπλό κοντά στην έξοδο του αγωγού, καθρέπτης.

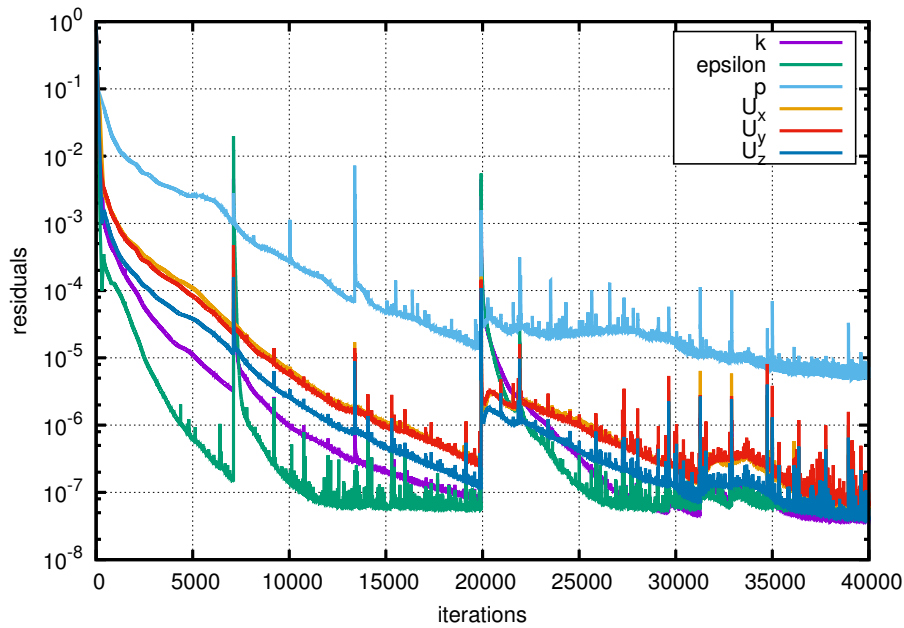


(α') Μοντέλο-υπολογιστικό χωρίο.

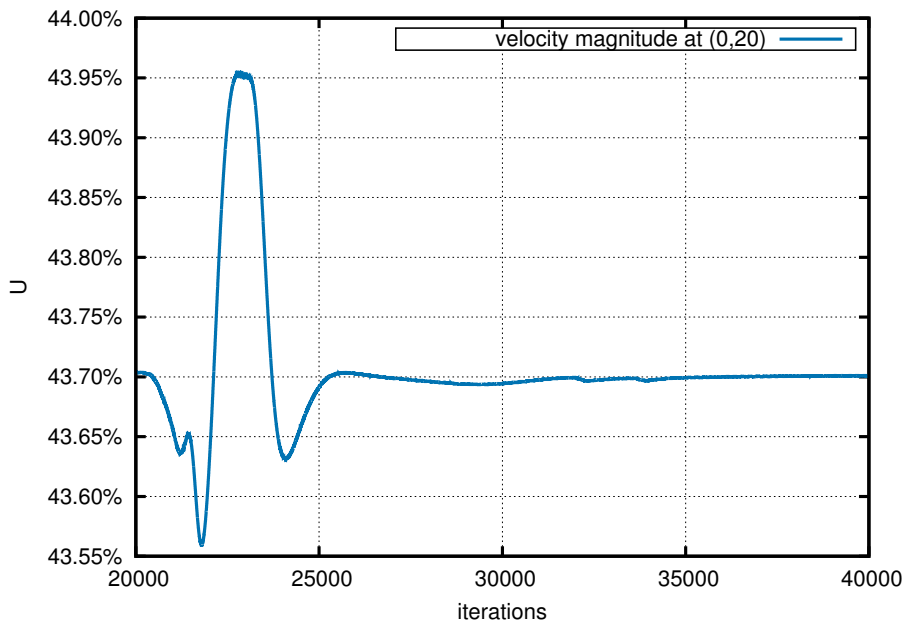


(β') Το υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου έχει περίπου 9 εκατομμύρια κελιά. Οι πιο σκούρες περιοχές αντιστοιχούν σε περιοχές με πιο πυκνό πλέγμα, καθώς εκεί απαιτείται υψηλή ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ζωνών πύκνωσης.

Σχήμα 4.3: CFD μοντέλο και πλέγμα.

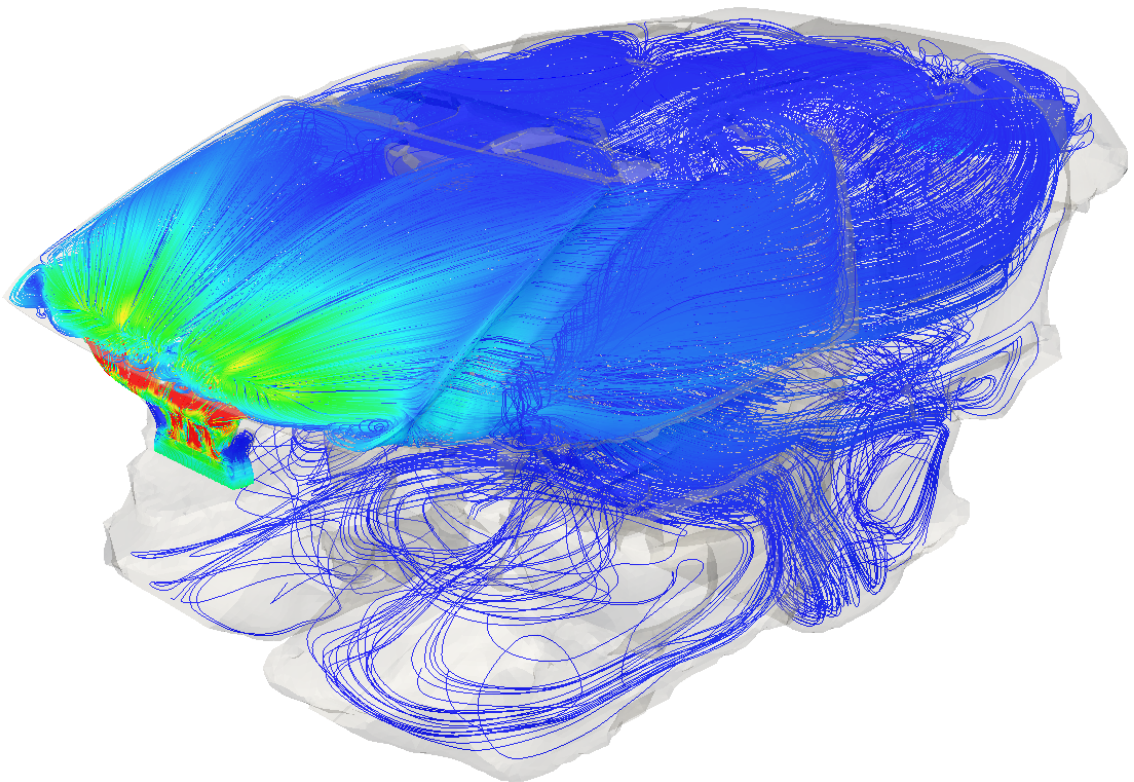


(α') Τα αδιαστατοποιημένα υπόλοιπα των εξισώσεων μειώνονται κατά 5 τάξεις μεγέθους τουλάχιστον. Οι ταλαντώσεις τους οφείλονται στη χρήση επιλύτη μόνιμης ροής (για λόγους μείωσης του υπολογιστικού κόστους), αν και παρουσιάζεται τοπικά μη-μονιμότητα της ροής.



(β') Μέτρο της ταχύτητας σε ένα από τα αντίστοιχα σημεία του πλέγματος κοντά στο παμπρίζ που δημιουργήθηκαν κατά τη μέτρηση. Το γράφημα εστιάζει στις τελευταίες χιλιάδες επαναλήψεων όπου φαίνεται ότι η περιοχή κοντά στο παμπρίζ έχει φτάσει στη μόνιμη λύση. Το μέτρο της ταχύτητας στον y -άξονα είναι αδιαστατοποιημένο, διαιρούμενο με τη μέγιστη τιμή του μεγέθους που παρουσιάζεται κατά το τρέξιμο.

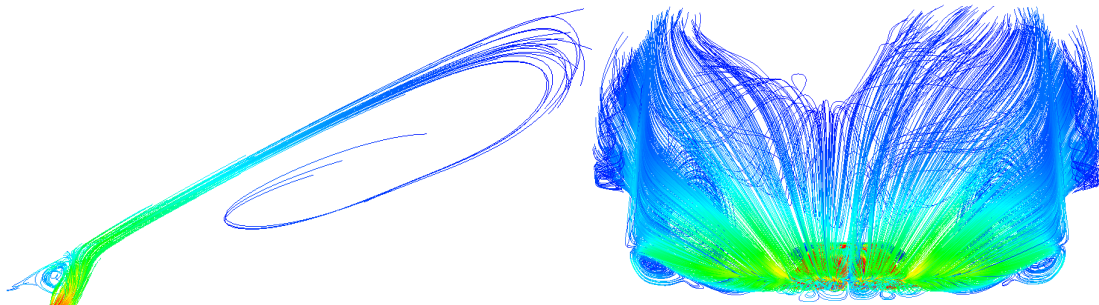
Σχήμα 4.4: Σύγκλιση του πρωτεύοντος προβλήματος. Τα υπόλοιπα των εξισώσεων και η σύγκλιση του μέτρου της ταχύτητας είναι ικανοποιητικά.



U Magnitude



(α') Γραμμές ροής από την είσοδο προς την έξοδο.



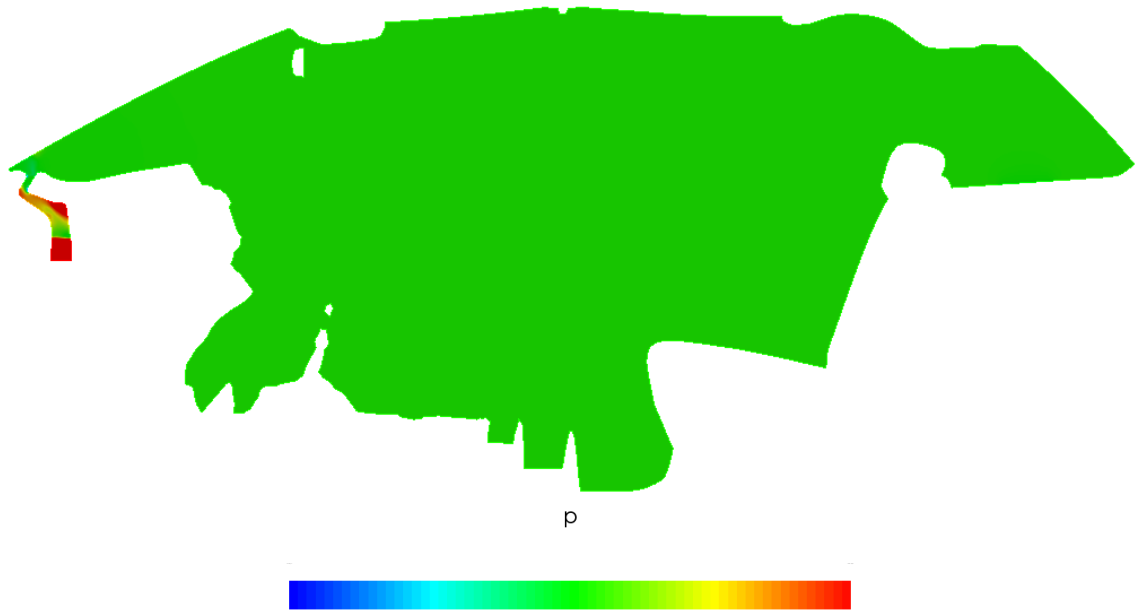
U Magnitude

U Magnitude



(β') Γραμμές ροής κοντά στον ανεμοθώρακα. (γ') Γραμμές ροής στον ανεμοθώρακα.

Σχήμα 4.5: Οι γραμμές ροής που στα παραπάνω σχήματα, αρχίζουν από την είσοδο του αγωγού και υποδεικνύουν την παρουσία μικρών στροβιλισμών χαμηλής ταχύτητας στο κάτω μέρος του ανεμοθώρακα, πριν το σημείο όπου η δέσμη που εξέρχεται από τον αγωγό προσκολλάται στο τζάμι. Η δέσμη παραμένει προσκολλημένη σχεδόν μέχρι το επίπεδο του καθρέπτη, όπου και αρχίζει πάλι να ανακυκλοφορεί.

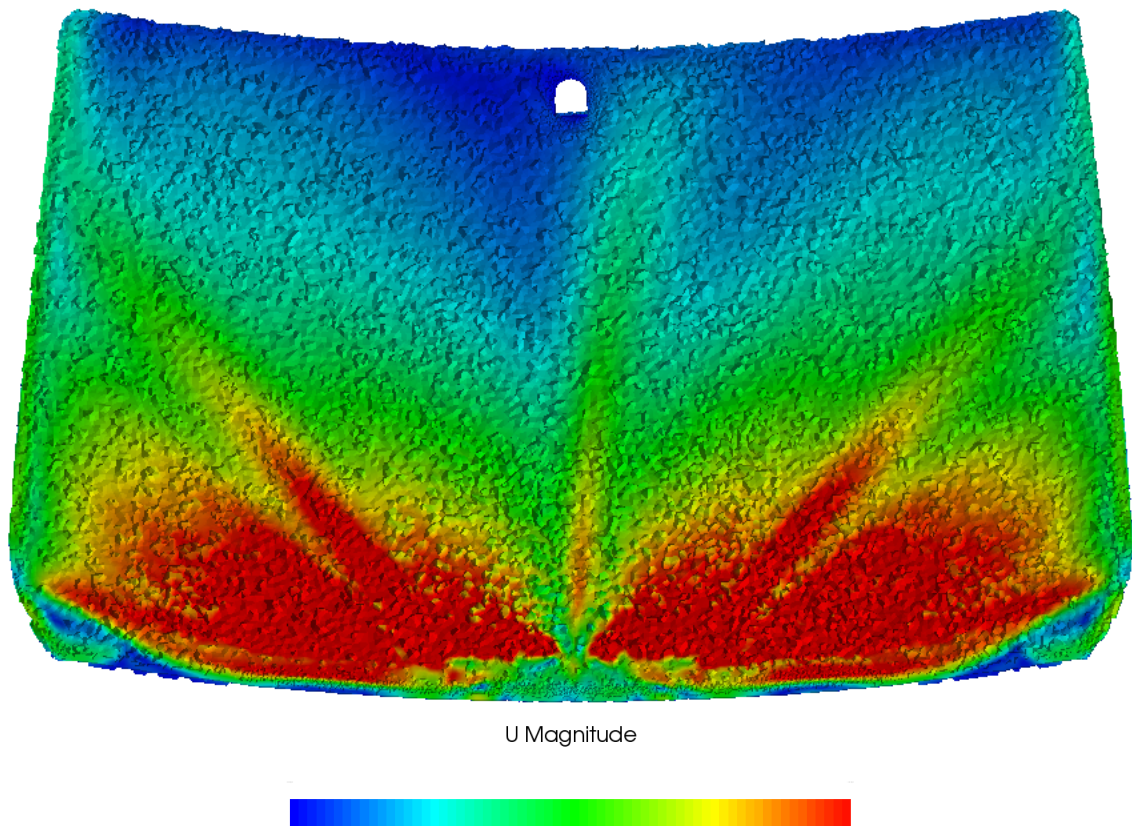


(α') Κατανομή της πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας. Στο εσωτερικό της καμπίνας, η πίεση είναι σχεδόν ομοιόμορφη ενώ στον αγωγό λαμβάνει μεγάλες αρνητικές τιμές σε κάποιες περιοχές και μεγάλες θετικές τιμές σε κάποιες άλλες.

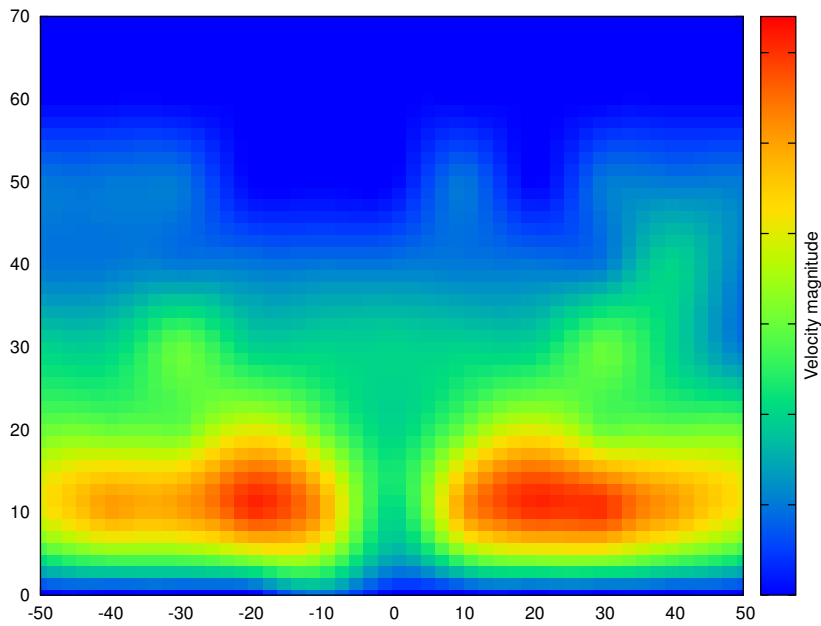


(β') Κατανομή του μέτρου της ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας. Εσωτερικά της καμπίνας, το μέτρο της ταχύτητας είναι σχεδόν μηδενικό ενώ στον αγωγό και κοντά στον ανεμοθώρακα λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές.

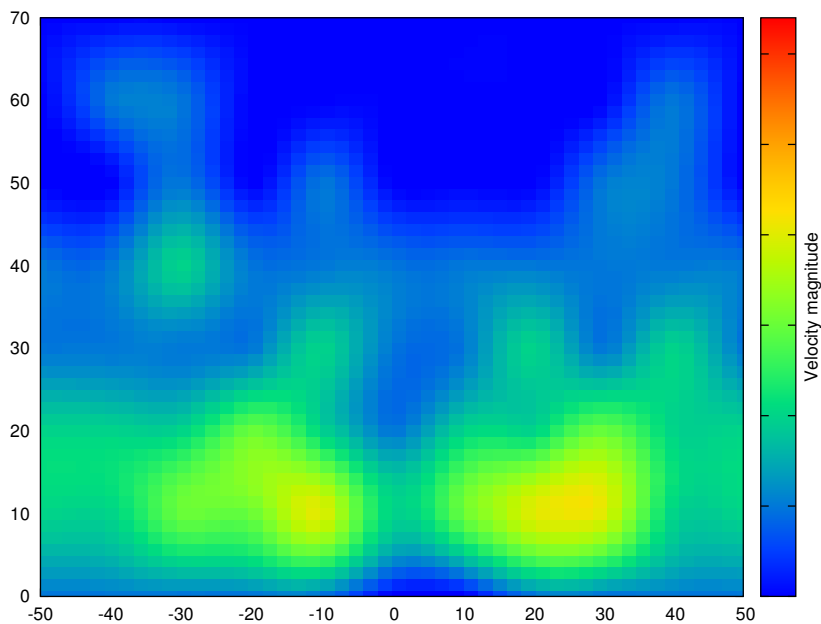
Σχήμα 4.6: Κατανομές των πεδίων ροής στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχήμα 4.7: Η κατανομή της ταχύτητας κοντά στον ανεμοθώρακα που προέκυψε από την προσομοίωση CFD. Η προβολή της κατανομής γίνεται όχι ακριβώς πάνω στο τζάμι που η ταχύτητα είναι μηδενική, αλλά σε εσωτερική απόσταση 7mm. Είναι εμφανές ότι ο ανεμοθώρακας στο άνω μισό τμήμα του καλύπτεται από αέρα χαμηλής ταχύτητας ενώ στο κατώτερο τμήμα, κοντά στην έξοδο του αγωγού αποπαγοποίησης, η ταχύτητα είναι αρκετά υψηλή.



(α') 2D κατανομή της ταχύτητας από τα αποτελέσματα του CFD, με εξαγωγή του μέτρου της ταχύτητας μόνο στα σημεία που αντιστοιχούν σε αυτά της μέτρησης.



(β') 2D κατανομή ταχύτητας από τη μέτρηση.

Σχήμα 4.8: Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του CFD και της μέτρησης για την κατανομή της ταχύτητας κοντά στον ανεμοθώρακα. Οι άξονες υποδηλώνουν τη θέση στο 2-διάστατο πλέγμα που δημιουργήθηκε κατά τη μέτρηση, (βλ. σχ. 4.1). Με βάση τις τιμές που συλλέχθηκαν έχει γίνει παρεμβολή για πιο ρεαλιστική οπτικοποίηση. Τα δύο σχήματα διαφέρουν, ωστόσο ποιοτικά υποδηλώνουν την ίδια κατανομή της ταχύτητας του αέρα.

Κεφάλαιο 5

Βελτιστοποίηση του Αγωγού Αποπαγοποίησης

5.1 Επίλυση των Συζυγών Εξισώσεων και Χάρτης Ευαισθησίας

Η κατανομή της ταχύτητας κοντά στον ανεμοθώρακα, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αντικατοπτρίζει τις αδυναμίες του τρέχοντος μοτίβου αποπαγοποίησης (του τρόπου με τον οποίο εξαλείφεται το στρώμα πάγου του παρμπρίζ). Όπως είναι λογικό, και όπως προτείνεται και από δημοσιεύσεις όπως [10], ιδανικά η κατανομή της ταχύτητας του αέρα πρέπει να είναι ομοιόμορφη για να ευνοεί την αποπαγοποίηση. Επίσης, η τμηματική αποπαγοποίηση που αφήνει κοιλίδες δεν είναι κάτι το ευχάριστο για τους επιβάτες. Οπότε ως στόχος τίθεται μία σταθερή ταχύτητα σε όλη την επιφάνεια του ανεμοθώρακα για να ευνοηθεί η ομοιομορφία. Επιπλέον, το γεγονός ότι στο άνω τμήμα του ανεμοθώρακα φθάνει αέρας χαμηλής ταχύτητας, αποτελεί μειονέκτημα για την απόδοση αποπαγοποίησης-αποθάμβωσης.

Συνεπώς, για να επιτευχθεί βελτίωση του μοτίβου αρχικά τίθεται ως ταχύτητα στόχος μία σταθερή ταχύτητα v_{tar} και ως όγκος στόχου, βλ. σχ. 5.1 (όγκος στον οποίο υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση) ένας λεπτός όγκος με το σχήμα του ανεμοθώρακα και πάχος 20mm, σε απόσταση 7mm από την εσωτερική επιφάνεια του ανεμοθώρακα.

Μετά τον ορισμό της ταχύτητας στόχου και του όγκου στόχου επιλύονται οι συζυγείς εξισώσεις και προκύπτει ο χάρτης ευαισθησίας. Ο επιλύτης του συζυγούς προβλήματος επιλύει τις εξισώσεις για μερικές χιλιάδες επαναλήψεις, ώσπου τα υπόλοιπα των εξισώσεων είναι ικανοποιητικά μικρά (κάτω από 10^{-7}) και τα συζυγή πεδία έχουν σταθεροποιηθεί, βλ. σχ. 5.3. Έπειτα υπολογίζονται οι παράγωγοι ευαισθησίας για τον αγωγό αποπαγοποίησης, την περιοχή που επιθυμείται να μορφοποιηθεί.

Ο προκύπτων χάρτης ευαισθησίας παρουσιάζεται στο σχ. 5.2. Με μπλέ χρώμα σημειώνονται οι περιοχές (κελιά) που πρέπει να τραβηχθούν προς τα έξω, ενώ με κόκ-



(α') Πλάγια όψη του όγκου στόχου.

(β') Κάτοψη του όγκου στόχου.

Σχήμα 5.1: Ο όγκος στόχου είναι όγκος με το σχήμα της επιφάνειας του ανεμοθώρακα, πάχους 20mm, σε απόσταση 7mm από το τζάμι. Περιλαμβάνει 660104 κελιά του υπολογιστικού χωρίου. Η ταχύτητα στόχος v_{tar} είναι σταθερή σε όλη την έκταση του όγκου αυτού.

κίνο οι περιοχές που πρέπει να σπρωχθούν προς τα μέσα, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή ταχύτητας στον ανεμοθώρακα.

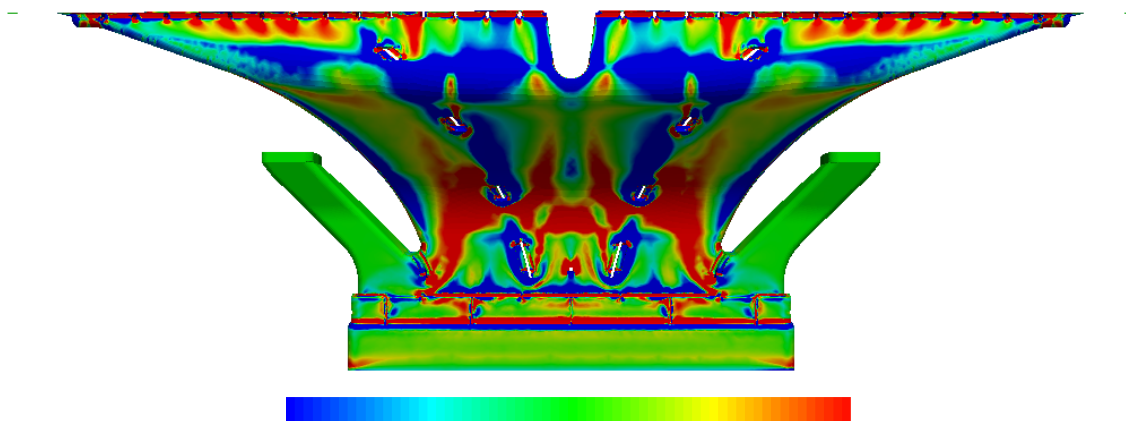
Οι χάρτες ευαισθησίας χρησιμοποιούνται γενικά για να υποδηλώσουν περιοχές όπου η αλλαγή στην γεωμετρία θα επιφέρει βελτίωση στη ροή. Ωστόσο η πληροφορία που παρέχουν δεν χρησιμοποιείται αυτούσια καθώς περιέχει αρκετό θόρυβο. Ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

5.2 Βελτιστοποίηση—Επιλογή Τελικής Γεωμετρίας

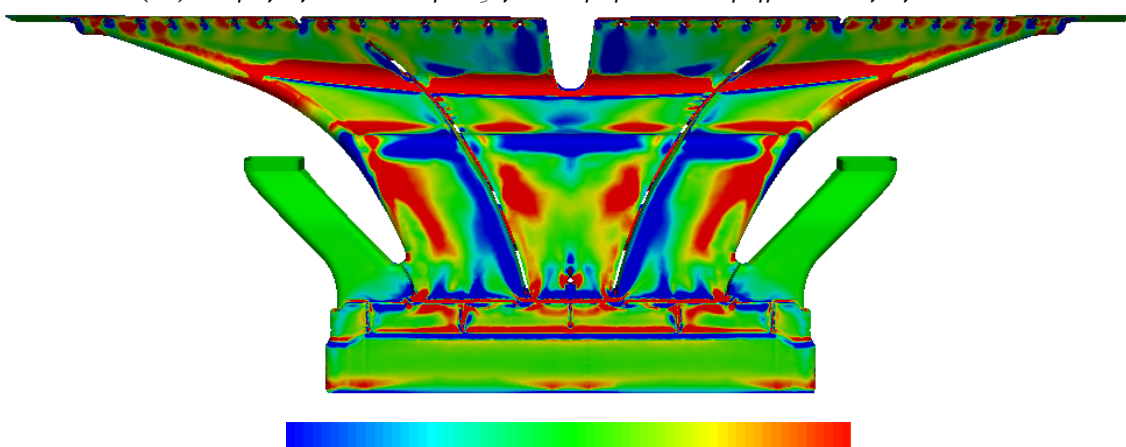
Για την πραγματοποίηση αυτοματοποιημένων διαδικασιών βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται επιλύτης του συζυγούς προβλήματος σε συνεργασία με μορφοποιητή πλέγματος βασισμένο στις ογκικές B-Splines, λογισμικά που αναπτύχθηκαν από τη ΜΠΥΡ&Β/ΕΜΠ, σε περιβάλλον OpenFOAM, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων βελτιστοποίησης και του επιλύτη, η διαδικασία τρέχει μέχρι την εκπλήρωση του κριτηρίου τερματισμού (πχ. μέχρι τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων) ή μέχρι να παραχθεί ένα μη-αποδεκτό πλέγμα.

Πραγματοποιήθηκαν αρκετά τέτοια τρεξίματα έως ότου επιλέχθηκε κατάλληλο νέο σχήμα αγωγού αποπαγοποίησης. Τα τρεξίματα διαφέρουν ως προς την παραμετροποίησή τους, την παραμετροποιημένη περιοχή και τον όγκο στόχου. Η ανάγκη αυτή για πολλά τρεξίματα αντί για ένα, προκύπτει από το γεγονός ότι κατασκευαστικοί και τοπολογικοί περιορισμοί δεν συμπεριλήφθηκαν στη βελτιστοποίηση. Στο τέλος λοιπόν κάθε αυτοματοποιημένου τρεξίματος, οι περιορισμοί αυτοί λαμβάνονται υπόψη, καθώς ο νέος αγωγός εκτός από το να συμβάλει στην καλύτερη απόδοση αποπαγοποίησης, πρέπει να είναι κατασκευάσιμος και να χωρά και στη διάταξη που απαρτίζουν ο αγωγός με τα γειτονικά του μέρη.

Ο αγωγός που επιλέχθηκε από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζει 43% πτώση της αντικειμενικής συνάρτησης (εξ.2.7), γεγονός που εκφράζει το ότι ο στόχος προ-



(α') Παράγωγοι ευαισθησίας για το μπροστινό τμήμα του αγωγού.



(β') Παράγωγοι ευαισθησίας για το οπίσθιο τμήμα του αγωγού.

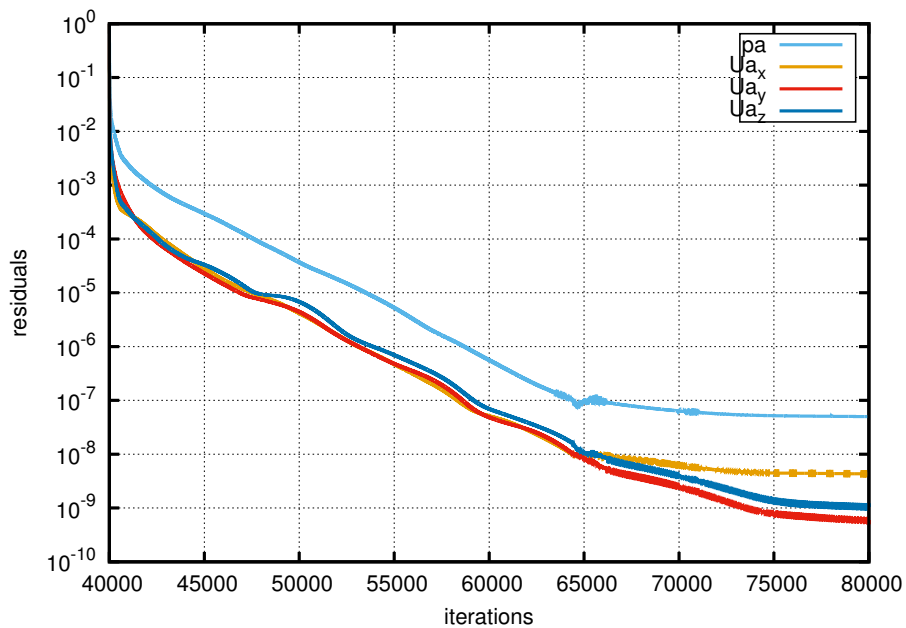
Σχήμα 5.2: Οι παράγωγοι ευαισθησίας υποδηλώνουν την αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση F λόγω κάθετης μετατόπισης των κελιών στην επιφάνεια της γεωμετρίας, στην περίπτωση αυτή, των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού αποπαγοποίησης ($\frac{\delta F}{\delta n_i}$). Με μπλέ χρώμα σημειώνονται οι περιοχές που πρέπει να τραβηχθούν προς τα έξω, ενώ με κόκκινο οι περιοχές που πρέπει να σπρωχθούν προς τα μέσα, ώστε να μειωθεί η αντικειμενική συνάρτηση και άρα να προκύψει βελτιωμένη κατανομή της ταχύτητας.

σεγγίσθηκε ικανοποιητικά.

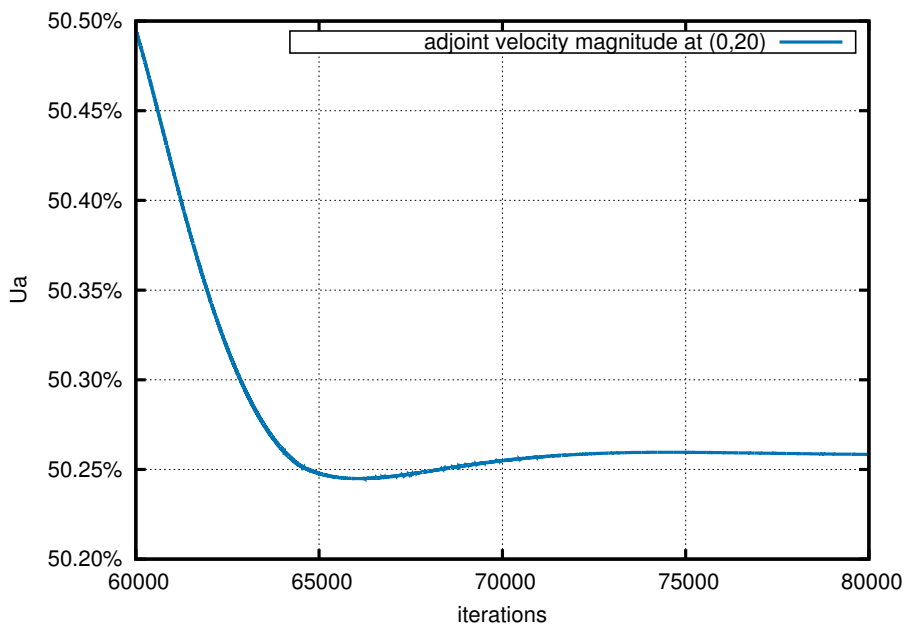
Η περιοχή του αγωγού που παραμετροποιήθηκε σε συνδιασμό με το πλέγμα των σημείων ελέγχου που επιλέχθηκε παρουσιάζονται στο σχ. 5.5. Το πλέγμα ελέγχου αποτελείται από $3 \times 7 \times 9$ σημεία ελέγχου με βαθμό συναρτήσεων βάσης $p_u = 2, p_v = 3, p_w = 3$ αντίστοιχα. Το πλέγμα ελέγχου περιλαμβάνει 526157 κόμβους του πλέγματος. Η κίνηση των σημείων ελέγχου έχει επιλεχθεί να επιτρέπεται μόνο κατά την X κατεύθυνση.

Τα σημεία ελέγχου, επίσης, επιτρέπεται να μετακινούνται κατά τον μέσο όρο της μετατόπισης που υποδηλώνει για αυτά η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ανά iso-επιφάνεια (iso-plane). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή λείων επιφανειών, πράγμα που ευνοεί την κατασκευαστική διαδικασία. Το παραχθέν σχήμα σε σύγκριση

με το αρχικό του αγωγού, αλλά και το πεδία $v - v_{tar}$ στον όγκο στόχου παρουσιάζονται στο σχ. 5.6.

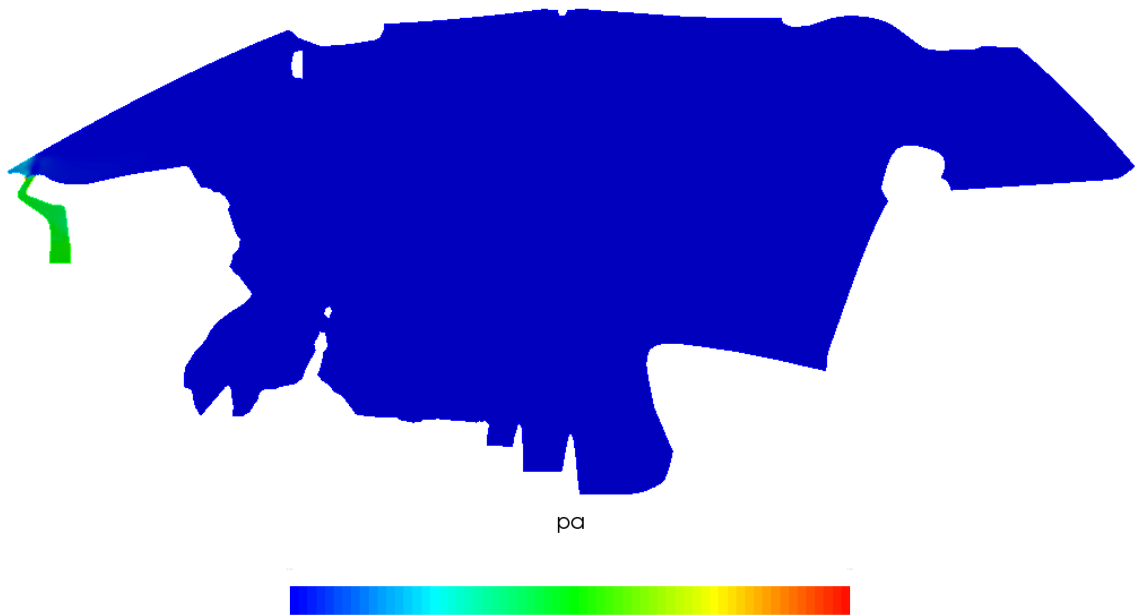


(α') Τα αδιαστατοποιημένα υπόλοιπα των εξισώσεων μειώνονται κατά 5 τάξεις μεγέθους τουλάχιστον.

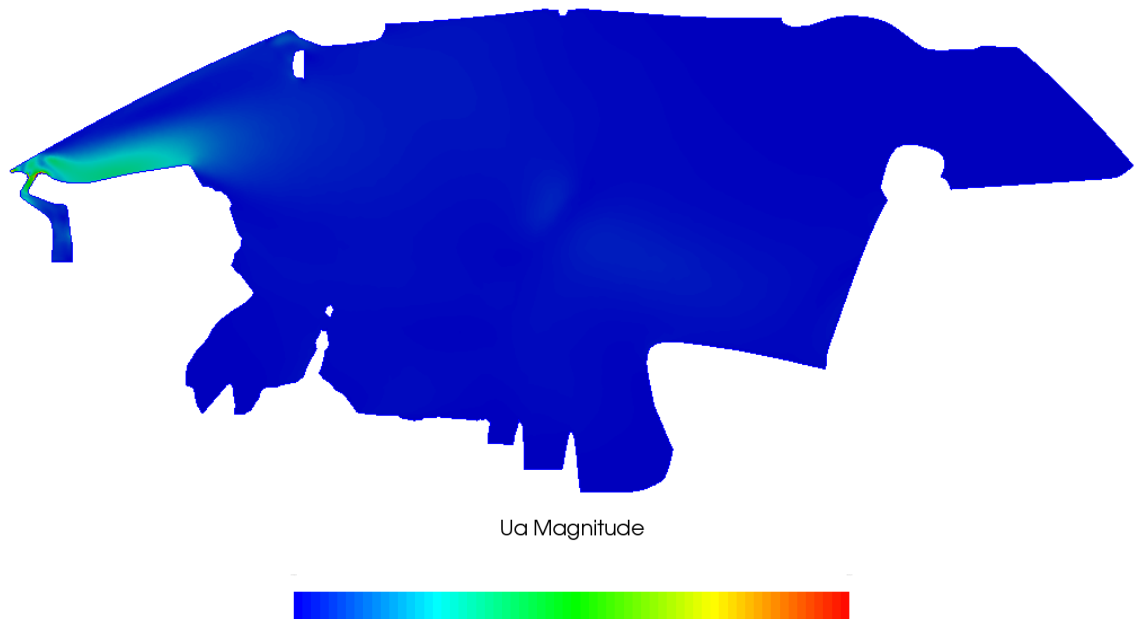


(β') Μέτρο της συζυγούς ταχύτητας σε ένα από τα αντίστοιχα σημεία του πλέγματος κοντά στο παμπρίζ που δημιουργήθηκαν κατά τη μέτρηση. Το γράφημα εστιάζει στις τελευταίες χιλιάδες επαναλήψεων όπου φαίνεται ότι η περιοχή κοντά στο παμπρίζ έχει φτάσει στη μόνιμη λύση. Το μέτρο της ταχύτητας στον y -άξονα είναι αδιαστατοποιημένο, διαιρούμενο με τη μέγιστη τιμή του μεγέθους που παρουσιάζεται κατά το τρέξιμο.

Σχήμα 5.3: Σύγκλιση του συζυγούς προβλήματος. Τα υπόλοιπα των εξισώσεων και η σύγκλιση του μέτρου της συζυγούς ταχύτητας είναι ικανοποιητικά.

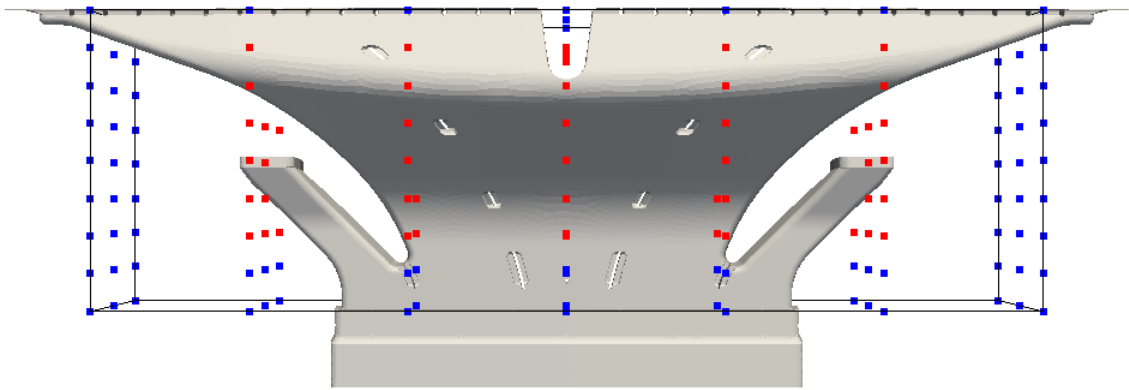


(α') Κατανομή της συζυγούς πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας.

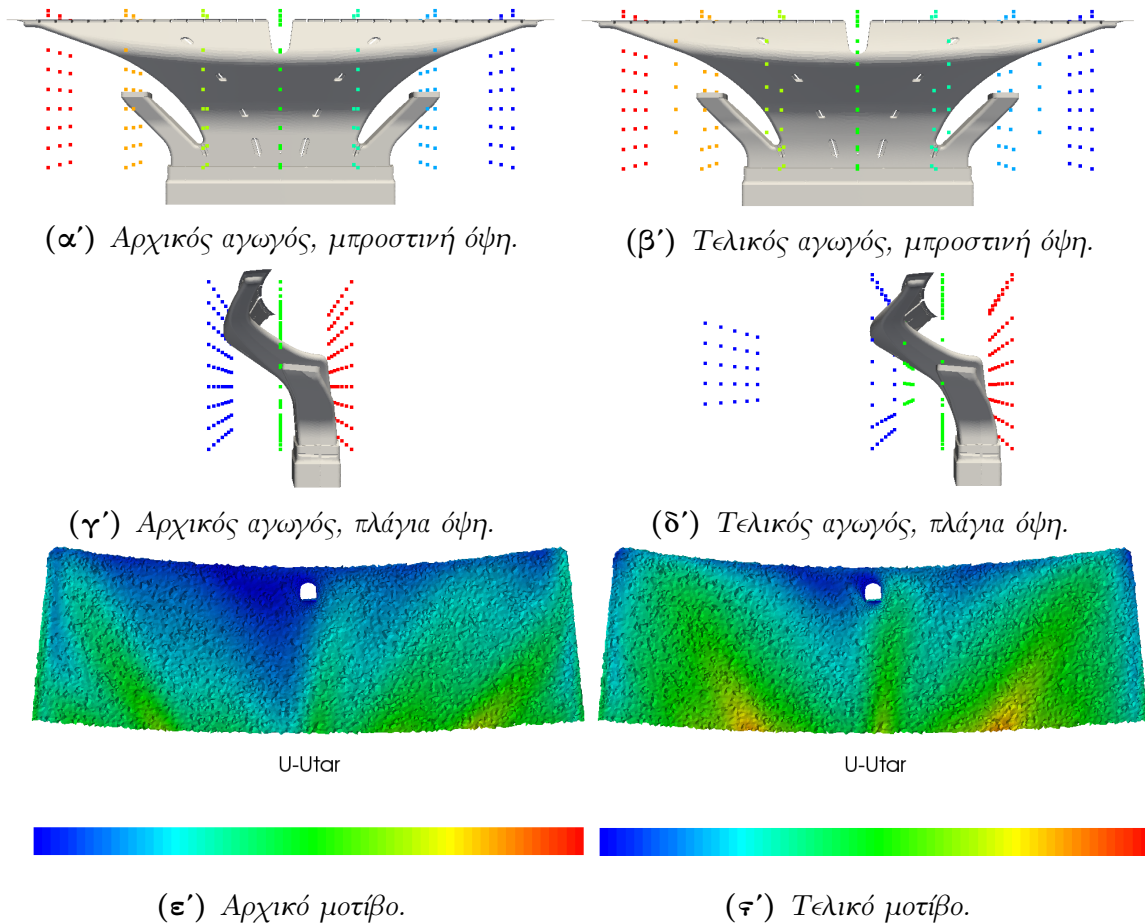


(β') Κατανομή του μέτρου της συζυγούς ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας.

Σχήμα 5.4: Κατανομές των συζυγών πεδίων στο επίπεδο συμμετρίας. Οι συζυγείς μεταβλητές είναι σχεδόν μηδενικές στο εσωτερικό της καμπίνας, αλλά στην περιοχή του αγωγού και του ανεμοθώρακα λαμβάνουν υψηλότερες τιμές, καθώς αυτές οι περιοχές έχουν μεγαλύτερη επιρροή στη ροή στον όγκο στόχου.



Σχήμα 5.5: Ορισμός της περιοχής που παραμετροποιείται και μορφοποιείται. Με κόκκινο σημειώνονται τα ενεργά σημεία ελέγχου ενώ με μπλέ τα ακινητοποιημένα. Τα ακινητοποιημένα σημεία ελέγχου στα όρια του κουτιού φροντίζουν για την αποφυγή επικάλυψης του παραμετροποιημένου με το μη-παραμετροποιημένο πλέγμα.



Σχήμα 5.6: Στην πρώτη σειρά, οι κόμβοι του πλέγματος ελέγχου είναι χρωματισμένη με βάση την v παραμετρική συντεταγμένη ενώ στη δεύτερη με βάση την u . Το τελικό σχήμα είναι πολύ λείο λόγω της μετατόπισης των σημείων ελέγχου κατά των μέσο όρο της υπολογισθείσας ανά ισο-επιφάνεια. Το πεδίο που φαίνεται πάνω στον όγκο στόχου, το $v - v_{tar}$ υποδηλώνει με πράσινο χρώμα τις περιοχές που ο αέρας έχει ταχύτητα ίση με τον στόχο, με μπλέ τις περιοχές που έχει μικρότερη, και με κόκκινο τις περιοχές που έχει μεγαλύτερη ταχύτητα. Συνεπώς, βλέποντας την τελευταία σειρά, η σύγκριση μεταξύ των δύο μοτίβων δείχνει ότι ο στόχος της κάλυψης του άνω τμήματος του παρμπρίζ με αέρα υψηλότερης ταχύτητας έχει εκπληρωθεί για το μεγαλύτερο τμήμα του.

Κεφάλαιο 6

Ανακεφαλαίωση—Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε βελτιστοποίηση μορφής με χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου, που έχει αναπτυχθεί από τη ΜΠΥΡ&Β του ΕΜΠ, στον αγωγό αποπαγοποίησης της μονάδας κλιματισμού, ενός επιβατικού οχήματος Toyota. Το γεγονός ότι η γεωμετρία του αγωγού αυτού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση αποπαγοποίησης και αποθάμβωσης του ανεμοθώρακα, οδήγησε στη διερεύνηση της προοπτικής βελτιστοποίησής του, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση αυτής της ζωτικής λειτουργίας για το όχημα.

Αρχικά, οι απαιτήσεις απόδοσης του συστήματος κλιματισμού όσον αφορά στη διάλυση του συμπυκνώματος και του πάγου στον ανεμοθώρακα, μέσα σε λογικό χρονικό πλαίσιο και με ομοιόμορφο τρόπο σε όλη του την επιφάνεια, εκφράστηκαν κατάλληλα υπό τη μορφή αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση. Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση είναι το ολοκλήρωμα της διαφοράς της ταχύτητας του αέρα από μία ταχύτητα στόχο, σε έναν λεπτό όγκο κοντά στον ανεμοθώρακα, στην εσωτερική μεριά της καμπίνας. Έπειτα, παρουσιάστηκε μαθηματικά η συνεχής συζυγής μέθοδος για ασυμπίεστη μόνιμη ροή και το εργαλείο παραμετροποίησης και μορφοποίησης (που αναπτύχθηκε από τη ΜΠΥΡ&Β/ΕΜΠ) που βασίζεται στις ογκικές B-Splines.

Ο κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας, η βελτιστοποίηση μορφής του αγωγού αποπαγοποίησης, απαιτεί την προσομοίωση της ροής του αέρα που διαρρέει τον αγωγό προς την καμπίνα του αυτοκινήτου και εξέρχεται από το πίσω του μέρος. Για αυτόν τον λόγο, δημιουργήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο που παρουσιάστηκε, με 8.4 εκατομμύρια κελιά. Η ανάλυση της ροής μέσω CFD έδωσε τα πεδία της ροής που απαιτούνται για την επίλυση του συζυγούς προβλήματος, αλλά και ακριβή εικόνα της τρέχουσας κατανομής ταχύτητας κοντά στον ανεμοθώρακα. Αυτή η κατανομή ταχύτητας συγκρίθηκε με την αντίστοιχη πειραματική, που αποκτήθηκε από μέτρηση με ανεμόμετρο hot-wire σε σημεία πλέγματος με απόσταση 10cm, στα 7mm από τον ανεμοθώρακα. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν καλή συμφωνία μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, προσδίδοντας αξιοπιστία στην υπολογισθείσα ροή.

Τέλος, επιλύθηκαν οι συζυγείς εξισώσεις και εκτελέστηκαν αυτοματοποιημένες

διαδικασίες βελτιστοποίησης για να παραχθούν νέες υποψήφια γεωμετρίες του αγωγού αποπαγοποίησης. Ο επιλύτης της συζυγούς ροής έδωσε τον χάρτη ευαισθησίας που υποδεικνύει το πως πρέπει να παραμορφωθούν οι περιοχές του αγωγού (για να ελαχιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση). Έπειτα, εκτελέστηκαν μερικά τρεξίματα αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης από τα οποία επιλέχθηκε η νέα υποψήφια γεωμετρία που προσφέρει βελτίωση στην απόδοση αποπαγοποίησης του ανεμοθώρακα, αλλά ταυτόχρονα είναι κατασκευάσιμη και χωρά να τοποθετηθεί στο αυτοκίνητο, στη θέση του αρχικού αγωγού.

Πρωτότυπο της νέας αυτής γεωμετρίας του αγωγού κατασκευάστηκε με χρήση 3D εκτυπωτή και υποβλήθηκε σε πειραματικές δοκιμές που πιστοποίησαν την βελτίωση της απόδοσης αποπαγοποίησης που προέκυψε. Στο πλήρες κείμενο της διπλωματικής εργασίας, ο αναγνώστης μπορεί να βρει λεπτομέρειες της πειραματικής αυτής πιστοποίησης.

Βιβλιογραφία

- [1] M. B. Giles, N. A. Pierce, *An Introduction to the Adjoint Approach to Design.*, 1999.
- [2] T. Kohnotou, Y. Iwamoto, K. Hoshiawa, M. Nagataki, *Optimum Design of Defroster Nozzle.*, SAE Technical Paper, 1992.
- [3] C. Othmer, *CFD Topology and Shape Optimization with Adjoint Methods.*, 2006.
- [4] A. F. Skea, R. D. Harrison, A. J. Baxendale, D. Fletcher, *Comparison of CFD Simulation Methods and Thermal Imaging with Windscreen Defrost Pattern.* Fluids Group, MIRA, SAE Technical Paper, 2001-01-1720, 2001.
- [5] K. J. Nasr, B. S. AbdulNour, G. C. Wiklund, *State of Knowledge and Current Challenges in Defrosting Automotive Windshields.* SAE Technical Paper, 980293, 1998.
- [6] E.M. Papoutsis–Kiachagias, *Adjoint Methods for Turbulent Flows, Applied to Shape or Topology Optimization and Robust Design.* PhD Thesis, NTUA, 2013.
- [7] J. A. Samareh, *Aerodynamic Shape Optimization Based on Free–Form Deformation.* Multidisciplinary Optimization Branch, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 2004.
- [8] B. S. AbdulNour, *Hot–Wire Velocity Measurements of Defroster and Windshield Flow.* Ford Motor Company, SAE Technical Paper, 970109, 1997.
- [9] B. S. AbdulNour, *CFD Prediction of Automotive Windshield Defrost Pattern.* Ford Motor Company, SAE Technical Paper, 1999-01-1203, 1999.
- [10] W. Yang, W. Shi, F. Guo, W. Yang, *Flow Field Simulation and Performance Analysis of HVAC Defrosting Duct.* 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT–2012), China, 2012.
- [11] J. Park and C. Kim, *Parametric Study on Automotive Windshield Defrost Pattern using CFD.* Hyundai MOBIS, SAE Technical Paper, 2003-01-1078, 2003.

- [12] M. Samuelčík *Bézier and B-spline volumes Project of Dissertation*. Comenius University, Bratislava, 2005.
- [13] K.C. Giannakoglou, D.I. Papadimitriou, E.M. Papoutsis–Kiachagias, C. Othmer, *Adjoint methods in CFD-based optimization - Gradient computation & beyond*. ECCOMAS 2012–European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, pp. 8523-8539, 2012.
- [14] E.M. Papoutsis–Kiachagias, K.C. Giannakoglou, C. Othmer, *Adjoint wall functions: Validation and application to vehicle aerodynamics Authors of Document..* 11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014, 5th European Conference on Computational Mechanics, ECCM 2014 and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECFD 2014, pp. 7593-7604, 2014.
- [15] Giannakoglou, K.C., Papadimitriou, D.I., Papoutsis–Kiachagias, E.M., Kavvadias, I.S., *Adjoint methods for shape optimization and robust design in fluid mechanics*. OPT-i 2014–1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings, pp. 2252-2265, 2014.
- [16] E.M. Papoutsis–Kiachagias, K.C. Giannakoglou, *Continuous Adjoint Methods for Turbulent Flows, Applied to Shape and Topology Optimization: Industrial Applications*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2014.
- [17] E.M. Papoutsis–Kiachagias, A.S. Zymaris, I.S. Kavvadias, D.I. Papadimitriou, , K.C. Giannakoglou *The continuous adjoint approach to the k - ϵ Turbulence model for shape optimization and optimal active control of turbulent flows*. Engineering Optimization, 47 (3), pp. 370-389, 2015.
- [18] I.S. Kavvadias, E.M. Papoutsis-Kiachagias, G. Dimitrakopoulos, K.C. Giannakoglou, *The continuous adjoint approach to the k - ω SST turbulence model with applications in shape optimization*. Engineering Optimization, 47 (11), pp. 1523-1542, 2015.
- [19] E.M. Papoutsis–Kiachagias, N. Magoulas, J. Mueller, C. Othmer, K.C. Giannakoglou, *Noise reduction in car aerodynamics using a surrogate objective function and the continuous adjoint method with wall functions*. Computers and Fluids, 122, pp. 223-232, 2015.
- [20] E.M. Papoutsis–Kiachagias, K.C. Giannakoglou, *A parameterization and mesh movement strategy based on volumetric B-splines. Applications to shape optimization*. NTUA/PCOpt/2015/01 REPORT, Athens, Greece, 2015.
- [21] J. R. Bull, *Turbulence Models with Adaptive Meshing for Industrial CFD*. PhD Thesis, Imperial College London, 2013.

- [22] L. Piegl, W. Tiller, *The NURBS book*. Springer, 1997.
- [23] B.E. Launder, D.B. Spalding, *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3 (2): 269-289, 1974.
- [24] S.G. Nash, J. Nocedal, *A Numerical Study of the Limited Memory BFGS Method and the truncated-Newton Method for Large Scale Optimization*. SIAM Journal on Optimization, 1(3):358–372, 1991.
- [25] J. H. Ferziger, M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Edition. Springer, 2001.
- [26] Giles, MB., MC. Duta, JD. Muller, and NA. Pierce, *Algorithm developments for discrete adjoint methods*. AIAA Journal, 41(2), 2003.
- [27] I. Goldasteh, S. Chang, S. Maaita, G. Mathur, *Numerical Simulation of Airflow Distribution on the Automobile Windshield in Defrost Mode*. SAE Technical Paper 2015-01-0330, doi:10.4271/2015-01-0330, 2015.
- [28] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*. 1995.
- [29] J. Nocedal, S. J. Wright, *Numerical Optimization.*, Springer, 1999.
- [30] N. Marco, S. Lanteri, *A two-level parallelization strategy for Genetic Algorithms applied to optimum shape design*. Parallel Computing 26 377-397, 2000.
- [31] K.C. Giannakoglou, *Design of optimal aerodynamic shapes using stochastic optimization methods and computational intelligence*. Progress in Aerospace Sciences 38 43–76, 2002.
- [32] K.C. Giannakoglou, D.I. Papadimitriou, I.C. Kampolis, *Aerodynamic shape design using evolutionary algorithms and new gradient-assisted metamodels*. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195 6312–6329, 2006.
- [33] B. Mohammadi, O. Pironneau, *Applied Shape Optimization for Fluids.*, Oxford University Press, 2001.
- [34] O. Pironneau, *Optimal Shape Design for Elliptic Systems.*, Springer-Verlag, New York, 1984.
- [35] A. Jameson, *Aerodynamic design via control theory.*, J. Scientific Computing 3 233–260, 1988.
- [36] G. Burgreen, O. Baysal, *Three-dimensional aerodynamic shape optimization using discrete sensitivity analysis.*, AIAA J. 34 (9) 1761–1770, 1996.

- [37] J. Elliot, J. Peraire, *Aerodynamic design using unstructured meshes.*, AIAA Paper 19 (41), 1996.
- [38] M. Giles, N. Pierce, *Adjoint equations in CFD: duality, boundary conditions and solution behaviour.*, AIAA Paper 18 (50), 1997.
- [39] W. Anderson, V. Venkatakrisnan, *Aerodynamic design optimization on unstructured grids with a continuous adjoint formulation.*, AIAA Paper 06 (43), 1997.
- [40] S.Patankar, D.Spalding, *Calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows.*, Int.J.Heat Mass Transfer 15 1787–1806, 1972.