



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

Υπολογιστική διερεύνηση συμπεριφοράς υπεραντωτικής διάταξης με ενεργητικό έλεγχο ροής

Διπλωματική Εργασία

Λάμπρου Παναγιώτης

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2013

ευχαριστίες

σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κ. Γιαννάκογλου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα καθώς και για την καθοδήγηση που μου παρείχε. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την ερευνητική ομάδα της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ και ιδιαίτερα τον Δρ. Ξ. Τρομπούκη για το χρόνο που αφιέρωσε ώστε να μου παρέχει γνώσεις και συμβουλές, οι οποίες με βοήθησαν σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας.

Στην οικογένεια μου και στους φίλους μου.

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

**Υπολογιστική διερεύνηση συμπεριφοράς υπεραντωτικής διάταξης με
ενεργητικό έλεγχο ροής**

Διπλωματική Εργασία

Παναγιώτη Α. Λάμπρου

Επιβλέπων: Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η υπολογιστική μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς υπεραντωτικής διάταξης εφαρμόζοντας ενεργητικό έλεγχο της ροής και, συγκεκριμένα, την τεχνική της δέσμης συνεχούς αναρρόφησης, στο κύριο σώμα της. Με τη χρήση γενέτη πλέγματος, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο, κατασκευάζονται δομημένα πλέγματα σε περιοχές γύρω από κάθε στοιχείο της υπεραντωτικής διάταξης και μη-δομημένο πλέγμα στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο. Από το ταίριασμα των επιμέρους αυτών πλεγμάτων προκύπτει ένα υβριδικό πλέγμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Η επίλυση πραγματοποιείται κάνοντας χρήση λογισμικού του Εργαστηρίου, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής σε κάρτες γραφικών. Η χρήση καρτών γραφικών καθιστά δυνατή την επίλυση προβλημάτων με σχετικά μεγάλο υπολογιστικό κόστος, όπως το παρόν, καθώς επιταχύνει την επίλυση των εξισώσεων ροής πάνω από 40 φορές σε σχέση με την επίλυσή τους σε CPUs. Με μεταβλητές σχεδιασμού τη θέση της οπής της δέσμης και τη γωνία της δέσμης, προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων ροής οι τιμές των μεταβλητών αυτών, με τις οποίες, η υπεραντωτική διάταξη παρουσιάζει καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά. Παρατηρείται ότι η παρουσία της δέσμης αναρρόφησης εκτός από την αναμενόμενη αύξηση στον συντελεστή άνωσης, προκαλεί και μη αναμενόμενη αύξηση στο συντελεστή οπισθέλκουσας.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FLUIDS SECTION
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES
PARALLEL CFD & OPTIMIZATION UNIT

**Parametric Study of the Performance of a High-Lift Device with Active
Flow Control**

Diploma Thesis

Panagiotis A. Lamprou

Advisor: K. C. Giannakoglou, Professor NTUA

Athens, February 2013

In this diploma thesis, a parametric study of the performance of a high-lift device with active flow control, is performed. The type of active flow control which is being applied on the main body of the high-lift device is the steady suction technique. Structured grids around each element of the high-lift device along with an unstructured grid on the rest computational domain, are generated by using a grid generator, developed in the Lab. The matching of those individual grids results in a single hybrid grid, which is used for solving of the Navier-Stokes equations on NVIDIA GPUs, using a software developed in the Lab. The use of GPUs makes possible the solution of problems with a relatively high computational cost, as it accelerates the solution of the Navier-Stokes equations by more than 40 times compared the corresponding method running on CPUs. The variables used in this case are the slot position of the jet and the jet angle; the value sets result in better performance of the high-lift device are acquired by solving the governing equations. It is also mentioned that the suction jet results not only to an expected increase in the lift coefficient but also to an unexpected increase in the drag coefficient.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Έλεγχος ροής του ρευστού	2
1.2 Σκοπός της εργασίας	4
2. Γένεση Πλέγματος	5
2.1 Γένεση πλέγματος γύρω από υπεραντωτική διάταξη	5
2.2 Γένεση πλέγματος γύρω από υπεραντωτική διάταξη με μία δέσμη ελέγχου της ροής.	13
3. Εξισώσεις Navier Stokes και επίλυση τους σε κάρτες γραφικών (GPUs)	19
3.1 Εξισώσεις Navier-Stokes	19
3.2 Επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών	22
4. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επίλυσης του πεδίου ροής	25
4.1 Επίλυση εξισώσεων του πεδίου ροής χωρίς δέσμη ελέγχου	25
4.2 Επίλυση εξισώσεων του πεδίου ροής με δέσμη ελέγχου	30
5. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	59

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός αντικειμένων αποτελεί ένα από τα πλέον σύγχρονα αντικείμενα ενασχόλησης του μηχανολόγου μηχανικού στον τομέα της ρευστοδυναμικής. Πιο συγκεκριμένα, στην αεροναυπηγική ο σχεδιασμός των πτερυγίων των αεροσκαφών είναι μείζονος σημασίας ζήτημα, καθώς με την άνοση που προσδίδουν στον όχημα, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά το μήκος απογείωσης, το ρυθμό ανόδου αλλά και την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων [1]. Ευρύτατη εφαρμογή παρουσιάζουν στα αεροσκάφη οι αεροτομές τριών ή περισσότερων στοιχείων, οι οποίες αποτελούν περιπτώσεις πτερυγίων υψηλής άνοσης (high-lift devices) ή υπεραντωτικών διατάξεων. Αποτελούνται από ένα ακίνητο μέρος το οποίο αποτελεί το κύριο σώμα του πτερυγίου και από κινητά μέρη τα οποία βρίσκονται πίσω (flaps) ή/και μπροστά (slats) από το κύριο μέρος (Σχήμα 1.1). Τα flaps και τα slats κινούνται και παίρνουν κατάλληλες θέσεις ανάλογα τη φάση στην οποία βρίσκεται η πτήση (π.χ. προσγείωση). Τα flaps και τα slats κινούνται μέσω ενός μηχανισμού, ο οποίος διαφέρει ανάλογα το αεροσκάφος, και τα επιτρέπει συνήθως να κινούνται μπροστά, πίσω, πάνω ή κάτω, μειώνοντας ή αυξάνοντας έτσι το κενό μεταξύ των στοιχείων της αεροτομής, καθώς και να περιστρέφονται [2].



Σχήμα 1.1 Διάταξη των flap και slat σε μία πτέρυγα αεροσκάφους.

1.1 Έλεγχος ροής του ρευστού

Η απόδοση μιας αεροτομής όμως μειώνεται λόγω της αποκόλλησης της ροής, η οποία μειώνει την άνοση ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την οπισθέλκουσα του πτερυγίου. Για τη μείωση αυτού του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι ελέγχου της ροής, οι οποίες χωρίζονται σε ενεργητικές και παθητικές μεθόδους. Με τις σύγχρονες τεχνικές ελέγχου της ροής μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά της ροής με χαμηλά, όταν πρόκειται για ενεργητικό έλεγχο της ροής, ή και μηδενικά, όταν πρόκειται για παθητικό έλεγχο της ροής, επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας [3].

Η έρευνα σχετικά με τον έλεγχο της ροής ξεκίνησε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα την εποχή που ο Prandtl ανακάλυψε το οριακό στρώμα. Ο Prandtl ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε ενεργητικό έλεγχο στο οριακό στρώμα για να δείξει την επίδραση που είχε ένας τέτοιος έλεγχος στη συμπεριφορά της ροής. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησε την τεχνική της συνεχούς αναρρόφησης για να καθυστερήσει την αποκόλληση του οριακού στρώματος από την επιφάνεια ενός κυλίνδρου [4]. Στην περίοδο μέχρι και, αλλά και κατά τη διάρκεια, του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου καθώς επίσης και στη εποχή του ψυχρού πολέμου, μελετήθηκε εκτενώς και εφαρμόστηκε, κυρίως όμως σε στρατιωτικά συστήματα. Μια αναλυτή αναφορά και περιγραφή των μέχρι τότε μεθόδων έγινε από τον Lachman και πιο πρόσφατα από τους Gad-el-Hak et al. Η σκοπιμότητα της αύξησης της αποτελεσματικότητας και της απλούστευσης των συστημάτων που σχετίζονται με τη ροή του ρευστού (π.χ. πτερύγια αεροσκαφών) είναι πολύ ελκυστική, αν αναλογιστεί κανείς ότι η κατά 1 τοις εκατό εξοικονόμηση της παγκόσμιας κατανάλωσης καυσίμων θα έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση περίπου 1,25 εκατομμυρίων δολαρίων την ημέρα σε κόστη λειτουργίας (με βάση τα δεδομένα που ίσχυαν το 2002), καθώς επίσης θα έχει και περιβαλλοντικά οφέλη. Στην εποχή μας έχει παρατηρηθεί πρόοδος στον ενεργητικό έλεγχο της ροής, κυρίως λόγω της ανάπτυξης των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών (ταχύτητα επεξεργασίας, μέγεθος μνήμης και αποθήκευσης, παράλληλη επεξεργασία), η οποία προσπάθεια βέβαια συνοδεύτηκε από αντίστοιχη προσπάθεια των ερευνητών να επιλύσουν προβλήματα μοντελοποίησης των φαινομένων της ροής [5].

Σημαντικές εξελίξεις στην έρευνα του ελέγχου ροής επέφερε η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD), η οποία άρχισε να χρησιμοποιείται τη δεκαετία του 90 ως εργαλείο για την έρευνα στον τομέα του ενεργητικού ελέγχου της ροής. Σκοπός της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής είναι να επιλύσει αριθμητικά, με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή (πλέον πολυεπεξεργαστικού συστήματος), τις διαφορικές εξισώσεις που εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία ροής [6]. Διεξήχθησαν πολλά υπολογιστικά πειράματα και χρησιμοποιήθηκαν πολλές αριθμητικές προσομοιώσεις, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την

ανακάλυψη νέων πληροφοριών που αφορούν τη συμπεριφορά της τύρβης κοντά στα τοιχώματα.

Παθητικός έλεγχος ροής

Οι παθητικές διατάξεις ελέγχου της ροής επεμβαίνουν στη γεωμετρία ενός αεροδυναμικού σώματος και χρησιμοποιούνται για να επιταχύνουν τη μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ανάμιξη του ρευστού και η ανταλλαγή ενέργειας στις διάφορες ζώνες της ροής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα παθητικού ελέγχου της ροής είναι οι γεννήτριες στροβιλισμού (vortex generators). Τεχνικές παθητικού ελέγχου της ροής εφαρμόζονται ευρέως στην αεροναυπηγική βιομηχανία, επειδή η εφαρμογή τους είναι πιο απλή και η συντήρηση του ευκολότερη σε σχέση με τις ενεργητικές μεθόδους ελέγχου της ροής [3].

Ενεργητικός έλεγχος ροής

Ο ενεργητικός έλεγχος της ροής στοχεύει στην πρόσδοση ενέργειας στη ροή από κάποια εξωτερική πηγή (επενεργητή). Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με τεχνικές έγχυσης ή αναρρόφησης ρευστού με σκοπό τον περιορισμό ή ακόμα και την αναίρεση της αποκόλλησης της ροής, την ενίσχυση της επανακόλλησης της ροής ή την καθυστέρηση της μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Σε αντίθεση με τον παθητικό έλεγχο της ροής ο οποίος εφαρμόζεται για να επιταχύνει αυτή τη μετάβαση, στον ενεργητικό έλεγχο της ροής η καθυστέρηση της μετάβασης επιδιώκεται με σκοπό τη μείωση της επιφανειακής τριβής [3]. Ο ενεργητικός έλεγχος ροής έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με τον παθητικό, όσο αφορά τις επιδόσεις. Επίσης σε αντίθεση με τον παθητικό είναι καταλληλότερος για μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας καθώς μπορεί να απενεργοποιείται όποτε χρειάζεται. Επίσης το κόστος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τον παθητικό έλεγχο και λόγω του επενεργητή η εφαρμογή του πιο πολύπλοκη. Κοινό χαρακτηριστικό των τεχνικών ενεργητικού ελέγχου είναι η χρήση οπών στην επιφάνεια του σώματος για την έγχυση ή την αναρρόφηση ρευστού στη μορφή δεσμών [7]. Διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες ενεργητικού ελέγχου ροής, αυτή του χρονικά μόνιμου ελέγχου και αυτή του χρονικά μη-μόνιμου ελέγχου. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές συνεχούς έγχυσης (steady blowing) και συνεχούς αναρρόφησης (steady suction) ρευστού, οι οποίες μέσω των οπών επιτυγχάνουν τον έλεγχο του οριακού στρώματος είτε με την εισροή δέσμης ρευστού υψηλής ορμής (έγχυση) είτε με την αφαίρεση στρωμάτων ρευστού χαμηλής ορμής (αναρρόφηση). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι σύνθετες

και οι παλλόμενες δέσμες ρευστού, οι οποίες αποτελούν συνδυασμό των τεχνικών συνεχούς έγχυσης και αναρρόφησης. Για τη δημιουργία της σύνθετης δέσμης οι φάσεις της έγχυσης και την αναρρόφησης εναλλάσσονται περιοδικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη μιας μεμβράνης σε κοιλότητα ακολούθως της οπής, η ταλάντωση της οποίας προκαλεί την περιοδική συμπεριφορά της ροής. Η διαφορά της σύνθετης δέσμης με την παλλόμενη είναι ότι στη σύνθετη δέσμη η περιοδική εναλλαγή της έγχυσης και της αναρρόφησης γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η παροχή μάζας της δέσμης να είναι μηδενική ανά περίοδο, σε αντίθεση με την παλλόμενη δέσμη όπου η παροχή μάζας της δέσμης ανά περίοδο είναι μη μηδενική [8].

1.2 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μίας υπεραντωτικής διάταξης, εφαρμόζοντας ενεργητικό έλεγχο ροής στο κύριο σώμα της. Το είδος ενεργητικού ελέγχου ροής που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η δέσμη συνεχούς αναρρόφησης. Τοποθετώντας την οπή της δέσμης σε διάφορες θέσεις πάνω στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης μελετώνται η επίδραση της δέσμης στη ζώνη αποκόλλησης καθώς και οι μεταβολές στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας που προκύπτουν, ώστε να επιλεγθούν οι παράμετροι της δέσμης, με τις οποίες η υπεραντωτική διάταξη παρουσιάζει καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά. Αποφεύγεται η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης (όπως λ.χ. εξελικτικών αλγορίθμων) και, για την οικονομία του υπολογιστικού χρόνου, υποκαθίσταται από παραμετρικές μελέτες σε κβαντωμένες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού.

Κεφάλαιο 2

Γένεση Πλέγματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί ο τρόπος γένεσης υβριδικού πλέγματος γύρω από υπεραντωτική διάταξη για την μετέπειτα επίλυση των εξισώσεων ροής. Μελετώνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση παρουσιάζεται ο τρόπος της γένεσης πλέγματος γύρω από αεροτομή τριών στοιχείων (three element airfoil) (ή υπεραντωτική διάταξη) χωρίς την εφαρμογή ελέγχου της ροής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η γένεση του πλέγματος γύρω από την υπεραντωτική διάταξη της ίδιας γεωμετρίας πραγματοποιείται με την εφαρμογή ελέγχου της ροής με δέσμη αέρα σε ένα σημείο.

2.1 Γένεση πλέγματος γύρω από υπεραντωτική διάταξη

Ο γενέτης πλέγματος που χρησιμοποιείται έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών [9] για την περίπτωση μεμονωμένης αεροτομής και χρησιμοποιήθηκε κατάλληλα για τη δημιουργία του πλέγματος στη συγκεκριμένη περίπτωση. Το πλέγμα που προκύπτει είναι υβριδικό και αποτελείται από τετραπλευρικά και τριγωνικά στοιχεία. Τα υβριδικά πλέγματα εκμεταλλεύονται τα θετικά στοιχεία των δομημένων και μη-δομημένων πλεγμάτων και χρησιμοποιούν και τα δύο. Το πλεονέκτημα των μη-δομημένων πλεγμάτων είναι η ευκολία στη διακριτοποίηση χωρίων αρκετά συνθέτων γεωμετριών. Επίσης το γεγονός ότι είναι αρκετά αυτοματοποιημένα δεν απαιτούν από τον χρήστη πολύ προσπάθεια και χρόνο. Το γεγονός αυτό όμως έχει ως συνέπεια ο χρήστης να έχει περιορισμένες δυνατότητες σε ότι αφορά τον έλεγχο του πλέγματος, αφού στην ουσία η μόνη παρέμβαση που μπορεί να κάνει είναι στον καθορισμό των ορίων του πλέγματος με τον γενέτη πλέγματος να «γεμίζει» αυτόματα το εσωτερικό του. Για αυτόν το λόγο, σε μικρή απόσταση από τα τοιχώματα των στοιχείων της υπεραντωτικής διάταξης το πλέγμα που δημιουργείται είναι (ψευδο)δομημένο (ουσιαστικά αποτελείται από στρώσεις πλεγμάτων στοιχείων που μοιάζουν με ένα δομημένο πλέγμα), στο οποίο ο έλεγχος του χρήστη πάνω στο πλέγμα είναι σε αρκετά υψηλό βαθμό, ενώ το υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο αποτελείται από (καθαρά) μη-δομημένο πλέγμα.

Ο γενέτης πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε ακολουθεί τα εξής βήματα για την γένεση πλέγματος γύρω από μεμονωμένη αεροτομή:

1. Δημιουργία δομημένου πλέγματος σε μικρή απόσταση γύρω από τα τοιχώματα της αεροτομής.
2. Εκλέπτυνση (refinement) του δομημένου πλέγματος.
3. Δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος στην υπεραντωτική διάταξη ήταν τα εξής:

1. Πραγματοποιήθηκαν τα βήματα 1 και 2 για την περίπτωση της μεμονωμένης αεροτομής για κάθε στοιχείο της υπεραντωτικής διάταξης ξεχωριστά. Δημιουργήθηκαν δηλαδή τρία (3) διαφορετικά δομημένα πλέγματα.
2. Δημιουργήθηκε μη-δομημένο πλέγμα σε περιοχή γύρω από την υπεραντωτική διάταξη το οποίο περικλείει τα δομημένα πλέγματα που προέκυψαν από το προηγούμενο βήμα.
3. Δημιουργήθηκε μη-δομημένο πλέγμα στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο.
4. Πραγματοποιήθηκε ταίριασμα των επιμέρους πλεγμάτων ώστε να προκύψει το τελικό ενιαίο πλέγμα.

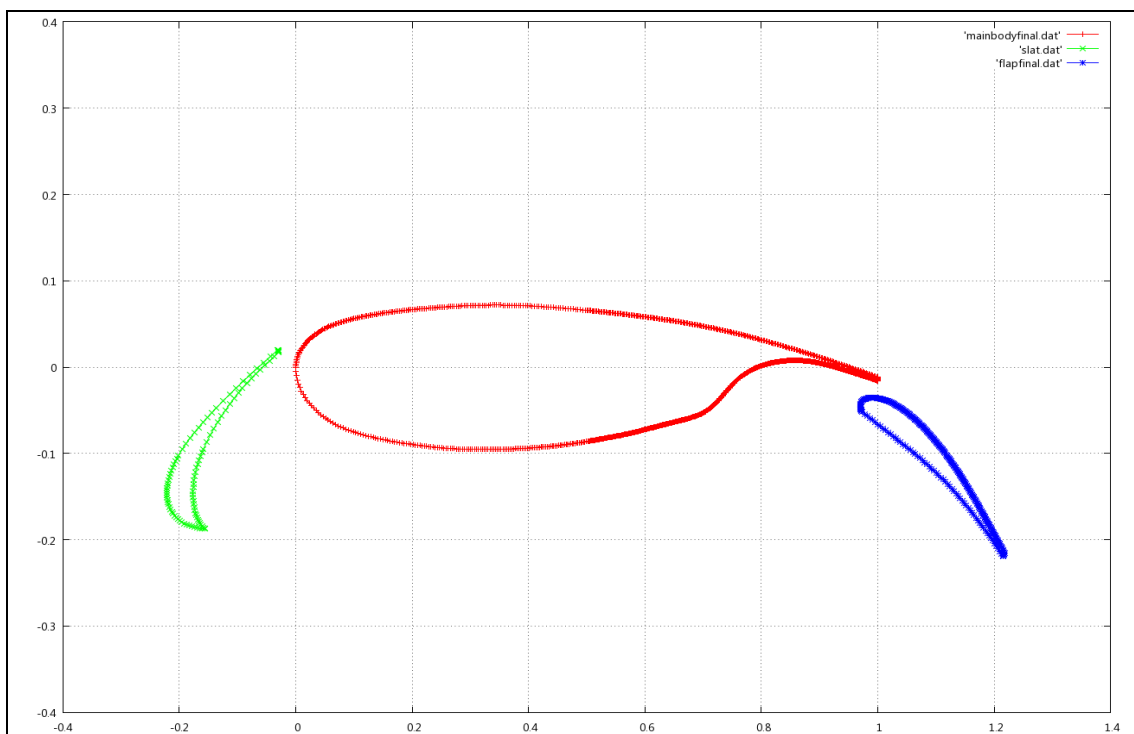
Να σημειωθεί επίσης ότι επειδή τα στοιχεία της υπεραντωτικής διάταξης βρίσκονται σε μικρή απόσταση το ένα με το άλλο υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος των επιμέρους δομημένων πλεγμάτων ώστε να μη συμπίπτουν μεταξύ τους.

Δημιουργία δομημένου πλέγματος σε μικρή απόσταση γύρω από τα τοιχώματα των στοιχείων της υπεραντωτικής διάταξης και εκλέπτυνση των δομημένων πλεγμάτων.

Κατασκευάζεται δομημένο πλέγμα γύρω από το κάθε στοιχείο της υπεραντωτικής διάταξης. Τα πλέγματα στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης και στο flap κατασκευάζονται σαφώς πυκνότερα από ότι στο slat καθώς εκεί αναμένεται να αποκολληθεί η ροή επομένως οι μεταβολές των μεγεθών στις περιοχές αυτές είναι μεγάλες και άρα απαιτείται πυκνότερο πλέγμα στην περιοχή αυτή ώστε να μπορέσει να καταγραφεί το φαινόμενο της αποκόλλησης και να αποδοθούν αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια. Η

πύκνωση των κόμβων στα τοιχώματα του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης και στο flap έγινε με τη χρήση κυβικών b-splines.

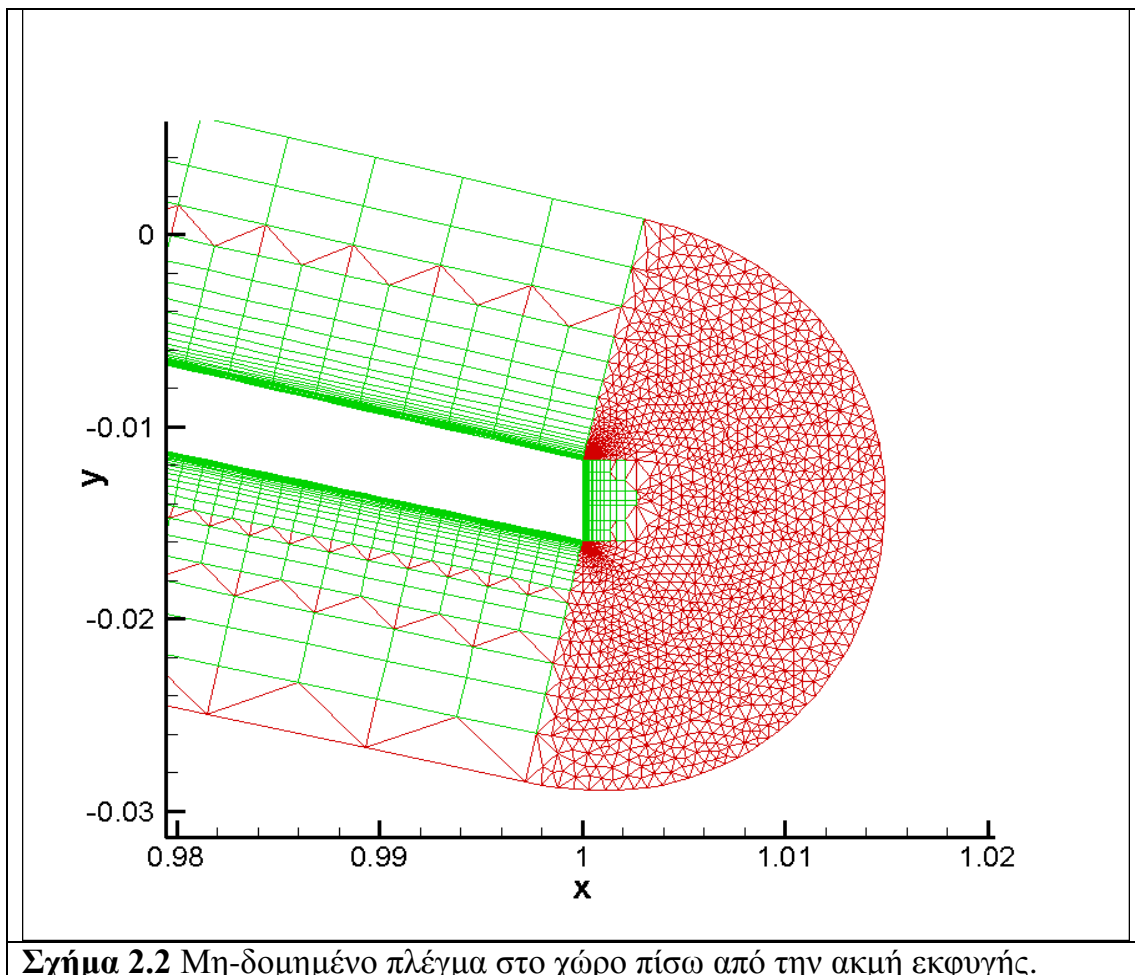
Σε κάθε στοιχείο της υπεραντωτικής διάταξης δημιουργείται δομημένο πλέγμα το οποίο ξεκινάει από τα σημεία του περιγράμματος του κάθε στοιχείου δημιουργώντας κάθετα στα τοιχώματα κόμβους η κάθετη απόσταση τους καθορίζεται από τον χρήστη με τον εξής τρόπο. Ο χρήστης καθορίζει την απόσταση του πρώτου κόμβου (κόμβος στο τοίχωμα του στοιχείου) με τον αμέσως επόμενο καθώς και τον αριθμό των στρωμάτων του δομημένου πλέγματος. Έπειτα η απόσταση δύο διαδοχικών κόμβων αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο, ο λόγος της οποίας καθορίζεται επίσης από τον χρήστη. Επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο πυκνότερο πλέγμα κοντά στα τοιχώματα κάτι το οποίο είναι επιθυμητό. Επομένως ο χρήστης με αυτόν τον τρόπο έμμεσα καθορίζει τον αριθμό των κόμβων των δομημένων πλεγμάτων. Η απόσταση του πρώτου κόμβου από το τοίχωμα τέθηκε ίση με $5 \cdot 10^{-6}$ του μήκους της χορδής της αεροτομής, όταν αυτό ισούται με 1. Ο αριθμός των στρωμάτων που επιλέχθηκε είναι 30 για το κύριο σώμα, 31 για το slat και 51 για το flap, ενώ οι λόγοι της γεωμετρικής προόδου ήταν 1.15, 1.25 και 1.1 για τα τρία στοιχεία της αεροτομής αντίστοιχα.



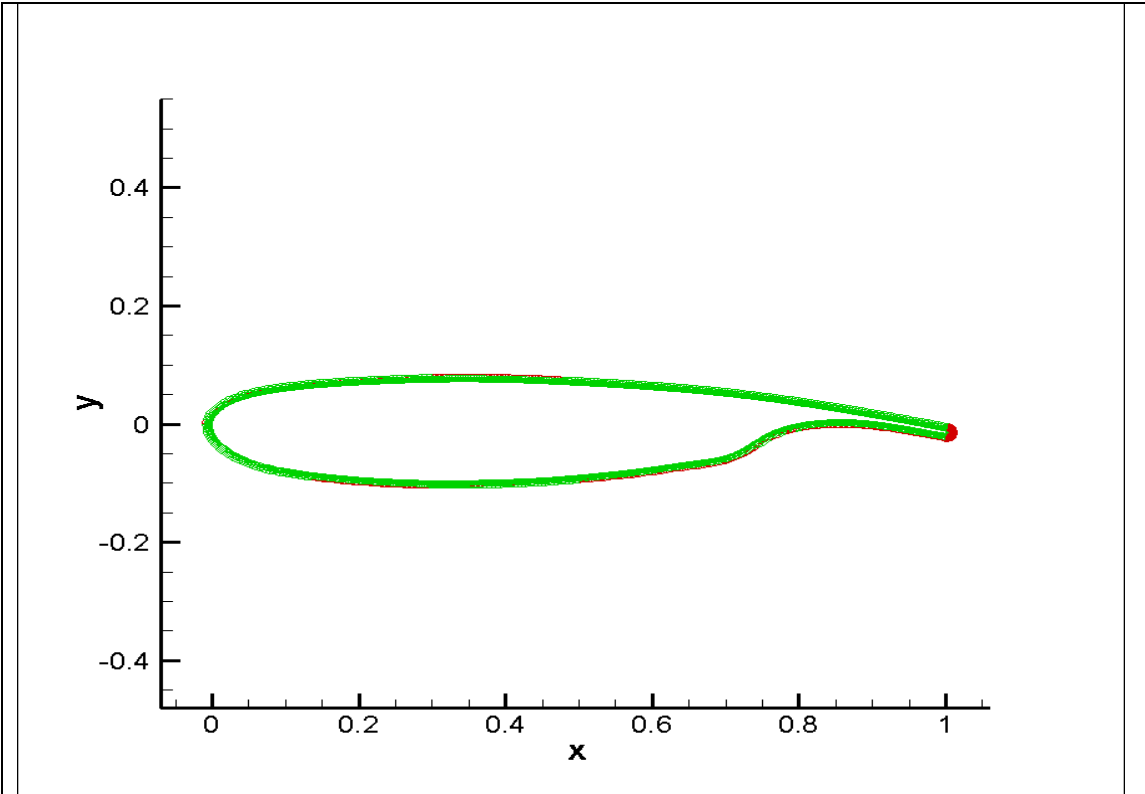
Σχήμα 2.1: Γεωμετρία της υπεραντωτικής διάταξης.

Στη συνέχεια γίνεται η εκλέπτυνση των δομημένων πλεγμάτων. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτή η διαδικασία είναι γιατί λόγω της γεωμετρικής προόδου το ύψος των τετραπλεύρων αυξάνεται περισσότερο από ότι το πλάτος τους καθώς απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα., με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τετράπλευρα με μεγάλο λόγο ύψους-πλάτους κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Η διαδικασία αυτή επομένως γίνεται με σκοπό τη βελτίωση του

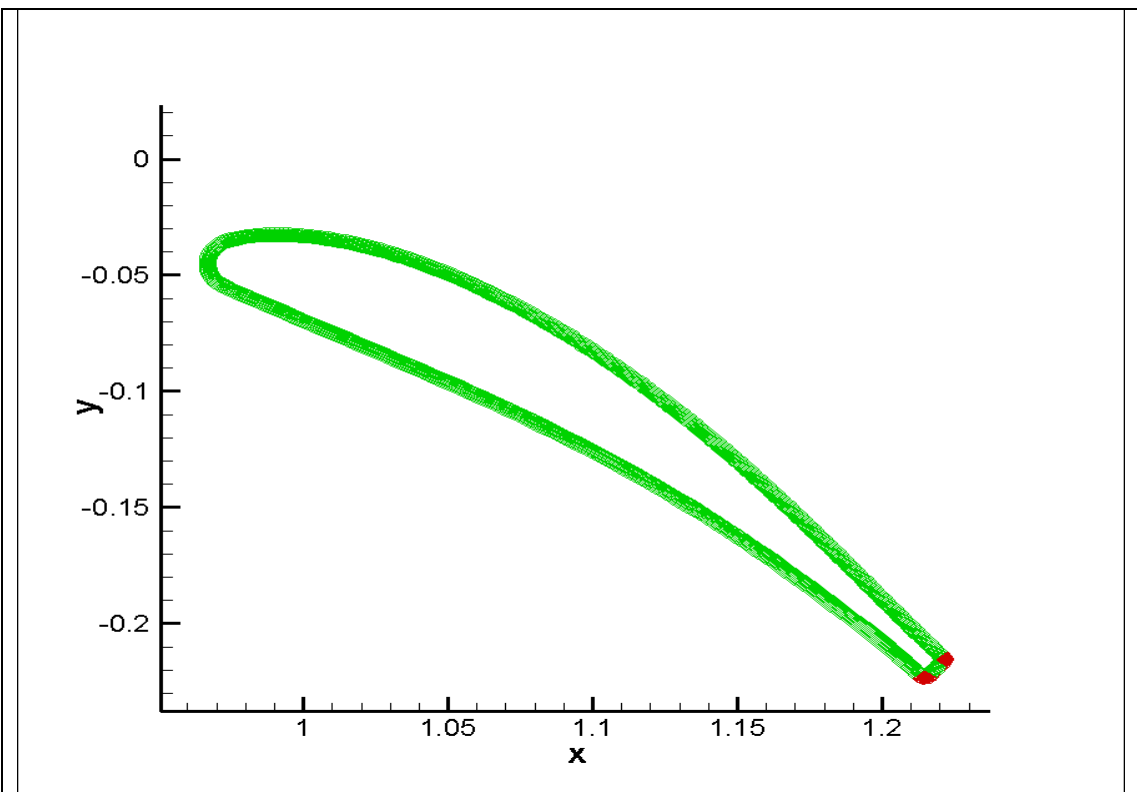
πλέγματος. Η εκλέπτυνση του δομημένου πλέγματος γίνεται με τον εξής τρόπο. Σαρώνονται όλα τα στοιχεία του πλέγματος και όπου εντοπιστούν τετράπλευρα με μεγάλο λόγο ύψους-πλάτους διαγράφονται κόμβοι και ενοποιούνται στοιχεία του ίδιου στρώματος έτσι ώστε ο λόγος αυτός στα τετράπλευρα που θα προκύψουν να είναι επιθυμητός. Παράλληλα διαγράφονται οι κόμβοι των επόμενων στρωμάτων που αντιστοιχούν στην ίδια κάθετο. Εξαιτίας αυτής της διαγραφής των κόμβων δημιουργούνται ορισμένα τριγωνικά στοιχεία σε περιοχές του δομημένου πλέγματος. Η εφαρμογή της εκλέπτυνσης σε όλο το δομημένο πλέγμα έχει ως αποτέλεσμα τα τετράπλευρα που θα προκύψουν να έχουν τον επιθυμητό λόγο ύψους-πλάτους. Τέλος, στο χώρο πίσω από την ακμή εκφυγής εκτελείται ένας αλγόριθμος ο οποίος κατασκευάζει ένα πυκνό μη-δομημένο πλέγμα στην περιοχή αυτή (Σχήμα 2.2). Το πυκνότερο πλέγμα στην περιοχή αυτή είναι επιθυμητό για την αριθμητική πρόλεξη της συμπεριφοράς της ροής με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα πλέγματα των στοιχείων της υπεραντωτικής διάταξης που προκύπτουν φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (σχήματα 2.3, 2.4, 2.5).



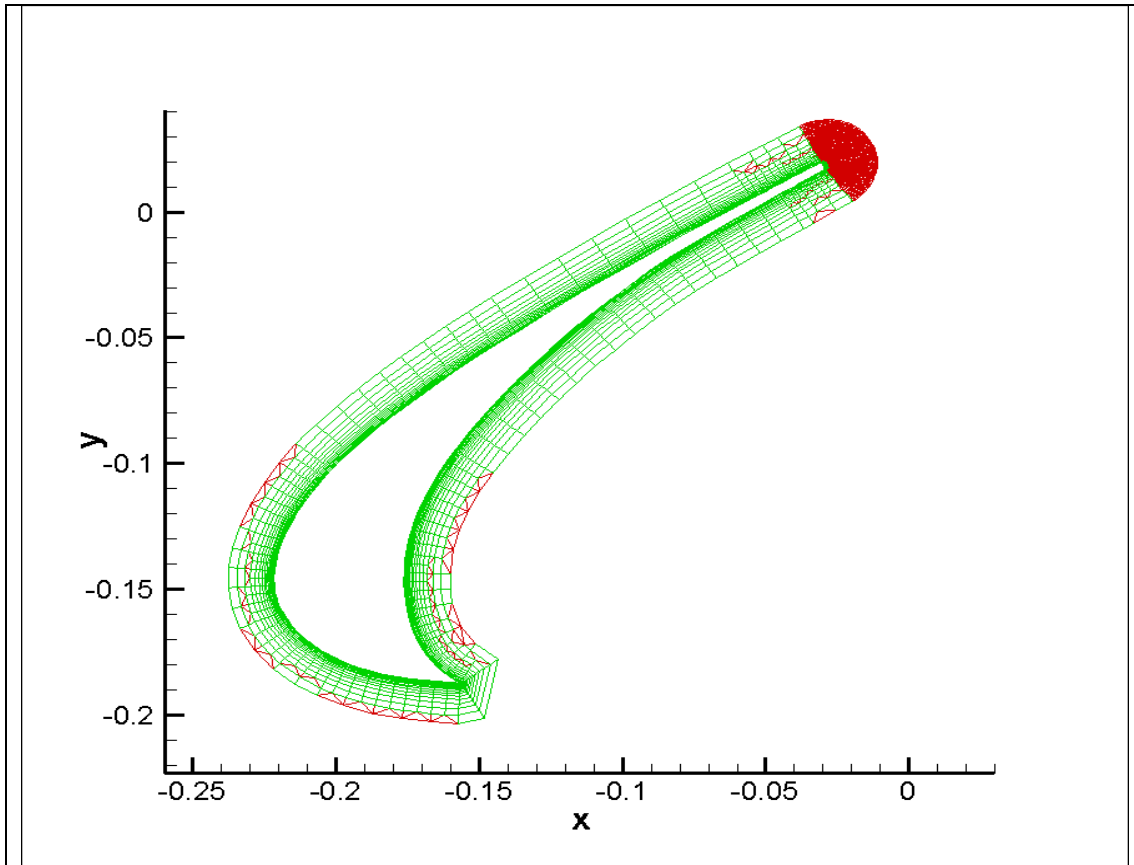
Παρατηρείται ότι το πλέγμα στο slat κατασκευάζεται σαφώς αραιότερο σε σχέση με τα άλλα δύο στοιχεία της υπεραντωτικής διάταξης για τους λόγους οι οποίοι αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 2.3 Δομημένο πλέγμα ύστερα από εκλέπτυνση του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης.



Σχήμα 2.4 Δομημένο πλέγμα ύστερα από εκλέπτυνση του flap της υπεραντωτικής διάταξης.



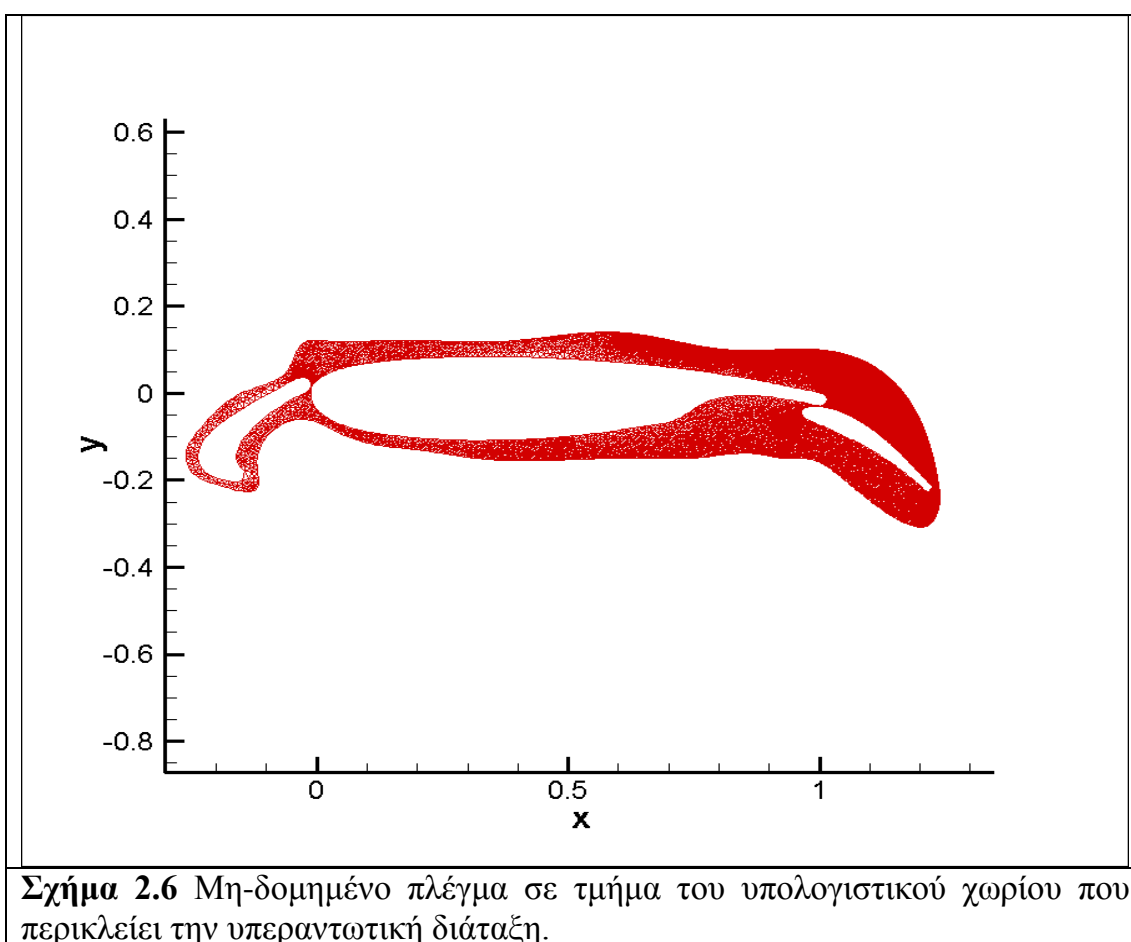
Σχήμα 2.5 Δομημένο πλέγμα ύστερα από εκλέπτυνση του slat της υπεραντωτικής διάταξης.

Δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος σε περιοχή γύρω από την υπεραντωτική διάταξη το οποίο περικλείει τα δομημένα πλέγματα που προέκυψαν.

Στο υπολογιστικό χωρίο γύρω από την υπεραντωτική διάταξη, τα όρια του οποίου θέτονται από τον χρήστη, κατασκευάζεται μη-δομημένο πλέγμα. Τα σημεία του ορίου είναι περισσότερα στην περιοχή που βρίσκεται πάνω το flap. Στόχος αυτής της κατανομής είναι η επίτευξη πυκνότερου πλέγματος στην περιοχή αυτή καθώς εκεί αναμένεται η ροή να έχει αποκολληθεί και να υπάρχει έντονη ανακυκλοφορία της ροής στην περιοχή αυτή. Επομένως υπάρχει η ανάγκη για πυκνό πλέγμα. Η κατασκευή του μη-δομημένου πλέγματος, τα εσωτερικά όρια του οποίου προκύπτουν από τα όρια των πλεγμάτων των στοιχείων της υπεραντωτικής διάταξης που κατασκευάστηκαν στο προηγούμενο βήμα, γίνεται με τη χρήση του προγράμματος Front. Πρόκειται για λογισμικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών το οποίο εφαρμόζει την τεχνική του προελαύνοντος μετώπου (advancing front technique), [10]. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται το πλέγμα που προέκυψε.

Δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο.

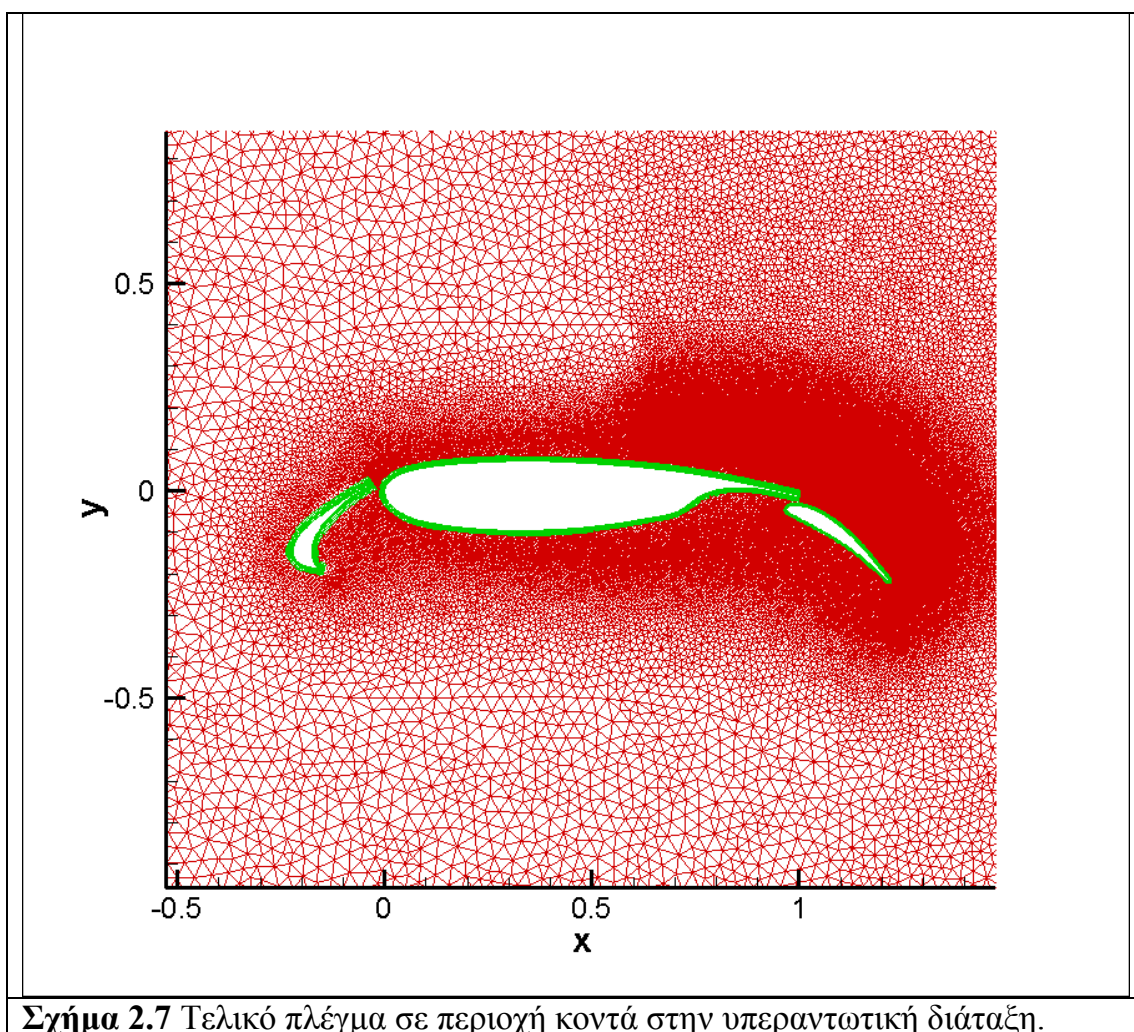
Το μη-δομημένο πλέγμα στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο κατασκευάζεται επίσης με το πρόγραμμα Front με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάστηκε το πλέγμα στο προηγούμενο βήμα. Το εσωτερικό όριο του πλέγματος είναι το εξωτερικό όριο του πλέγματος του προηγούμενου βήματος, ενώ το εξωτερικό όριο λαμβάνεται ένας κύκλος, στα όρια του οποίου η παρουσία της υπεραντωτικής διάταξης έχει μηδενική επίδραση στη ροή (άπειρο). Η ακτίνα του κύκλου αυτού είναι περίπου 10 φορές η χορδή του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης.



Ταίριασμα των επιμέρους πλεγμάτων.

Στο τελευταίο βήμα γίνεται το ταίριασμα (matching) των πλεγμάτων που κατασκευάστηκαν στα προηγούμενα βήματα ώστε να προκύψει το τελικό πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση της ροής. Το ταίριασμα γίνεται

ανάμεσα σε δύο πλέγματα, από τα οποία το ένα περιέχεται στο άλλο. Στην αρχή αναζητούνται και διαγράφονται οι διπλοί κόμβοι, έπειτα γίνεται επαναρίθμηση όλων των κόμβων και των στοιχείων και τέλος γίνεται η εγγραφή των δεδομένων σε ένα αρχείο για τη δημιουργία ενός πλέγματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στην περίπτωση αυτή τέσσερις φορές ώστε να προκύψει το τελικό πλέγμα, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2.7. Την πρώτη φορά γίνεται το ταίριασμα του μη-δομημένου πλέγματος που περικλείει την υπεραντωτική διάταξη (Σχήμα 2.6) με το δομημένο πλέγμα του flap της υπεραντωτικής διάταξης (Σχήμα 2.4), έπειτα γίνεται το ταίριασμα του υπολογιστικού πλέγματος που προκύπτει από την πρώτη εκτέλεση της διαδικασίας με το δομημένο πλέγμα του slat της υπεραντωτικής διάταξης (Σχήμα 2.5). Αντίστοιχα το επόμενο ταίριασμα γίνεται μεταξύ του υπολογιστικού πλέγματος που προέκυψε προηγουμένως με το δομημένο πλέγμα του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης (Σχήμα 2.3). Τέλος, γίνεται το ταίριασμα μεταξύ του πλέγματος που έχει προκύψει και του μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο. Το τελικό πλέγμα αποτελείται από 232.217 κόμβους και σχηματίζονται 373.101 τρίγωνα και 44.819 τετράπλευρα.



Σχήμα 2.7 Τελικό πλέγμα σε περιοχή κοντά στην υπεραντωτική διάταξη.

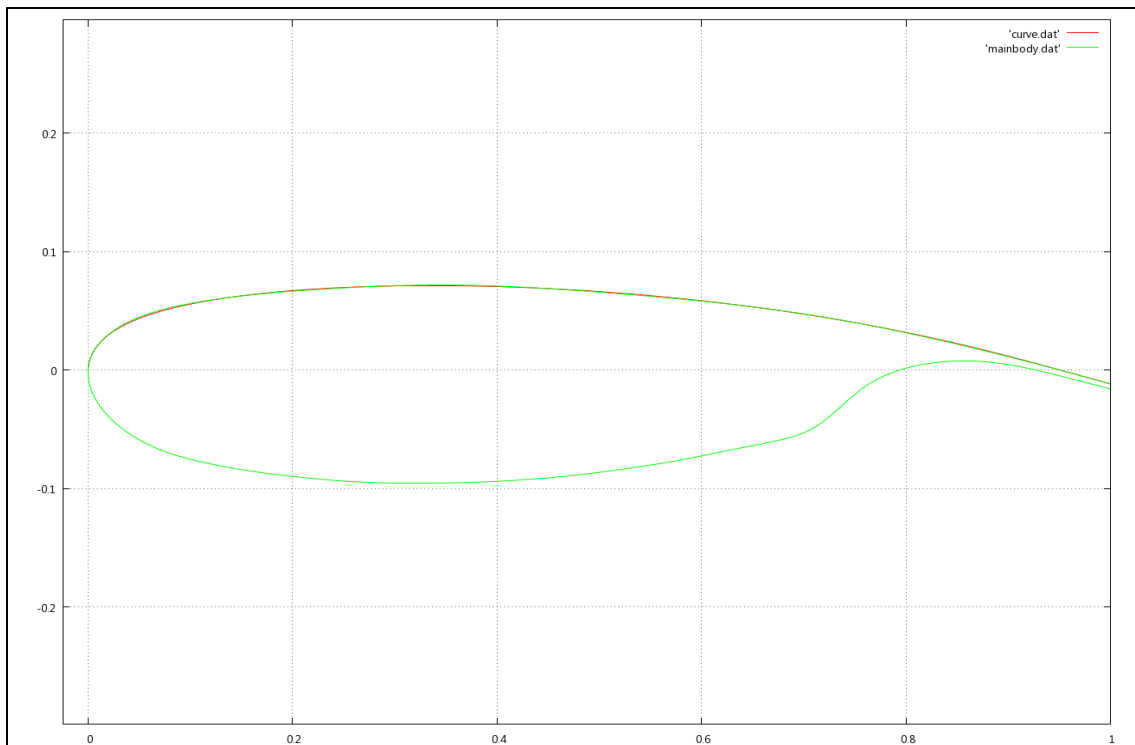
2.2 Γένεση πλέγματος γύρω από υπεραντωτική διάταξη με μία δέσμη ελέγχου της ροής.

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται η κατασκευή του πλέγματος γύρω από την υπεραντωτική διάταξη με την παρουσία ενεργητικής μεθόδου ελέγχου της ροής με δέσμη αέρα. Το μοντέλο της δέσμης του ρευστού προσομοιώνεται από μία οπή, η οποία δημιουργείται πάνω στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης και από την οποία το ρευστό εγχύεται ή αναρροφάται, και από μία κοιλότητα, η οποία ενώνεται με την οπή. Ο έλεγχος της ροής γίνεται στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης, επομένως οι αλλαγές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση περιορίζονται μόνο στην κατασκευή του δομημένου πλέγματος του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης. Τα υπόλοιπα πλέγματα δεν υφίστανται καμία αλλαγή στον τρόπο κατασκευής τους.

Καταρχήν, για την κατασκευή πλέγματος παρουσίας δέσμης ελέγχου είναι αναγκαία η προσέγγιση της αεροτομής με σημεία Bezier. Σε αυτήν την περίπτωση, προσεγγίστηκε μόνο η πλευρά υποπίεσης (suction side) του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης, καθώς πάνω σε αυτή την πλευρά θα εφαρμοστεί ο έλεγχος της ροής, ενώ επιλέχθηκε να μην προσεγγιστεί η πλευρά υπερπίεσης (pressure side) κυρίως λόγω της δυσκολίας στην προσέγγιση εξαιτίας της καμπυλότητας που παρουσιάζει. Υπήρξε επομένως τροποποίηση του κώδικα του γενέτη πλέγματος έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα να δέχεται ως είσοδο της συντεταγμένες της αεροτομής για την πλευρά υπερπίεσης και τα σημεία ελέγχου για την πλευρά υποπίεσης. Τα σημεία ελέγχου για την πλευρά υποπίεσης δίνονται στον πίνακα 2.1, ενώ στο σχήμα 2.8 φαίνεται η καμπύλη που δημιουργείται από τα σημεία ελέγχου σε σύγκριση με τις συντεταγμένες της αεροτομής. Η προσέγγιση της καμπύλης απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα ενώ πράσινο χρώμα έχει η αρχική αεροτομή.

x	y
0.0	0.0
0.003	0.042
0.064	0.0695
0.192	0.07
0.34	0.086
0.47	0.072
0.62	0.066
0.774	0.044
0.863	0.021
1.0	-0.0117292004

Πίνακας 2.1 Σημεία ελέγχου της πλευράς υποπίεσης του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης.



Σχήμα 2.8 Σύγκριση της προσέγγισης του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης με σημεία Bezier και του αρχικού σχήματος του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης.

Για την κατασκευή του πλέγματος σε αυτή την περίπτωση, ο γενέτης πλέγματος αφού κατασκευάσει το δομημένο πλέγμα και πραγματοποιηθεί η εκλέπτυνση του, πραγματοποιεί τα εξής βήματα:

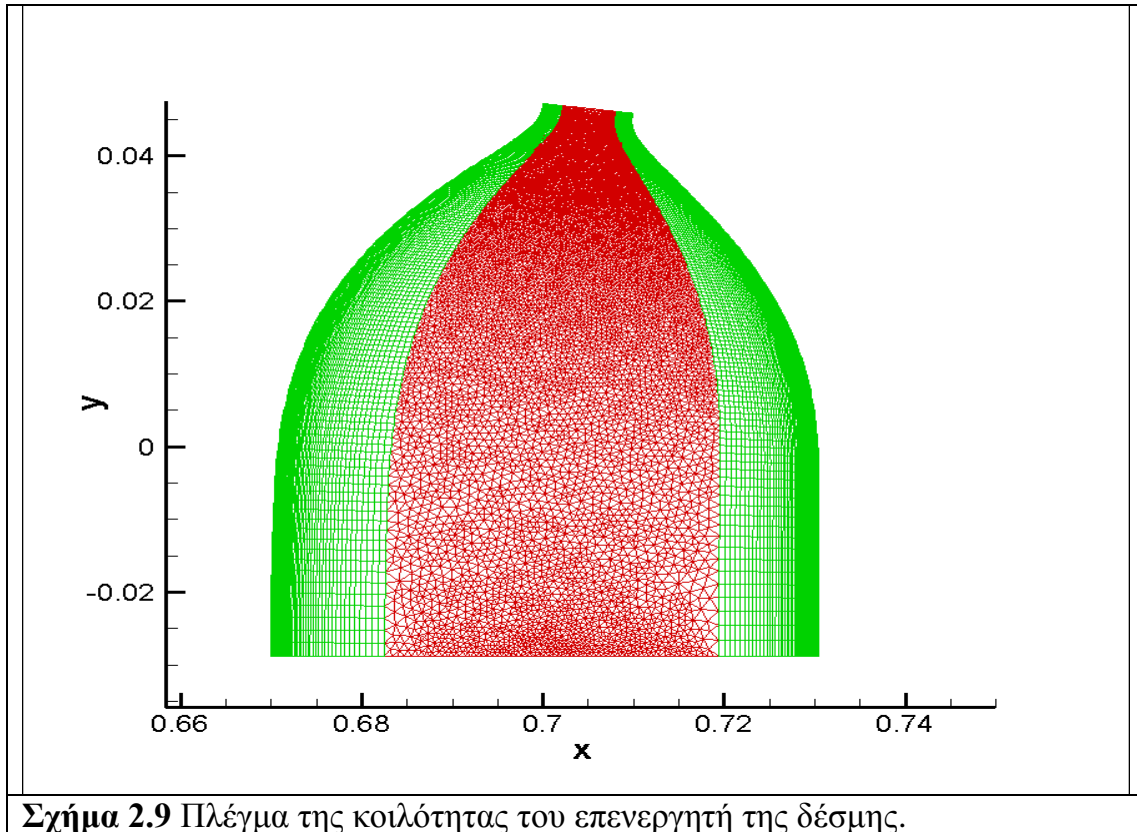
- Κατασκευή του πλέγματος της κοιλότητας της δέσμης
- Αφαίρεση του πλέγματος στην περιοχή γύρω από την οπή της δέσμης
- Πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή γύρω από την οπή της δέσμης

Το πρόγραμμα που εκτελεί τα παραπάνω βήματα έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών [9]. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα παραπάνω βήματα.

Κατασκευή του πλέγματος της κοιλότητας της δέσμης

Η γεωμετρία της κοιλότητας καθορίζεται από το χρήστη και ο γενέτης πλέγματος κατασκευάζει το αντίστοιχο πλέγμα. Σε αυτή την περίπτωση η κοιλότητα του επενεργητή της δέσμης έχει κωδωνοειδές σχήμα. Η κατασκευή του πλέγματος στην κοιλότητα γίνεται με τον ίδιο τρόπο που γίνεται και η

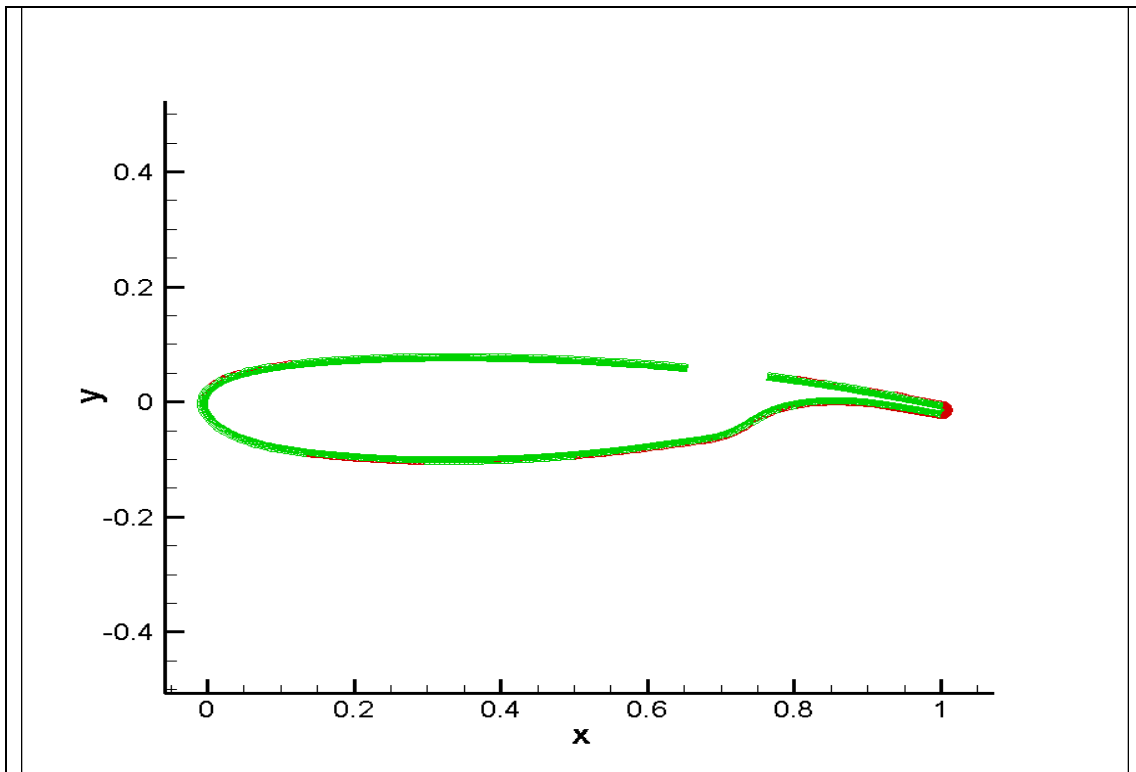
κατασκευή πλέγματος γύρω από αεροτομή. Στα τοιχώματα της κοιλότητας κατασκευάζεται δομημένο πλέγμα, το οποίο είναι πυκνότερο στα τοιχώματα και αραιώνει όσο πλησιάζει προς το κέντρο της κοιλότητας. Μετά την εκλέπτυνση κατασκευάζεται μη-δομημένο πλέγμα στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο της κοιλότητας. Το πλέγμα της κοιλότητας του επενεργητή της δέσμης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9.



Αφαίρεση του πλέγματος στην περιοχή γύρω από την οπή της δέσμης

Λόγω της παρουσίας της δέσμης ρευστού απαιτείται πυκνότερο πλέγμα στην περιοχή γύρω από την οπή. Η πυκνωση του πλέγματος σε αυτήν την περιοχή επιτυγχάνεται με την αφαίρεση τμήματος του πλέγματος γύρω από την οπή και αντικατάστασή του με πυκνότερο πλέγμα. Η αφαίρεση του πλέγματος γίνεται με τον εξής τρόπο. Αρχικά καθορίζεται η ζώνη αποκοπής από τον χρήστη. Συγκεκριμένα ο χρήστης καθορίζει τη θέση της οπής, το εύρος της (στη συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με το 5% του μήκους της χορδής) καθώς και το μήκος του τμήματος εκατέρωθεν της οπής βάσει του οποίου θα καθορισθεί η περιοχή της αποκοπής. Με βάση αυτά τα δεδομένα καθορίζονται δύο σημεία πάνω στην αεροτομή εκατέρωθεν της οπής, ενώ από τη μετακίνηση αυτών των σημείων κάθετα στην επιφάνεια της αεροτομής μέχρι το όριο του δομημένου

πλέγματος προκύπτουν άλλα δύο σημεία. Το τετράπλευρο που σχηματίζουν αυτά τα τέσσερα σημεία καθορίζει την περιοχή αποκοπής του πλέγματος. Στη συνέχεια όλοι οι κόμβοι του δομημένου πλέγματος ελέγχονται για το αν ανήκουν στο τετράπλευρο. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος αυτός γίνεται με τον εξής τρόπο. Από τα τέσσερα προκαθορισμένα σημεία βρίσκεται η ελάχιστη και η μέγιστη τετμημένη (x_{min}, x_{max}) και η ελάχιστη τεταγμένη (y_{min}). Επομένως αν για έναν κόμβο με συντεταγμένες (x, y) ισχύουν οι ανισότητες ($x_{min} < x < x_{max}$) και ($y > y_{min}$) σημαίνει ότι βρίσκεται εντός του τετραπλεύρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως λόγω της μεγάλης κλίσης και του μικρού πάχους της αεροτομής κοντά στην ακμή εκφυγής υπήρχαν περιπτώσεις κόμβων που ικανοποιούσαν τις παραπάνω ανισότητες, οι οποίοι δε βρίσκονται εντός του τετραπλεύρου αλλά στην πλευρά υπερπίεσης. Για το λόγο αυτό, έγινε μια μικρή παρέμβαση στον κώδικα του γενέτη πλέγματος, προστέθηκε μία επιπλέον ανισότητα κατά την οποία ο κάθε κόμβος που ικανοποιεί τις παραπάνω ανισότητες ελέγχεται αν βρίσκεται πάνω ή κάτω από την ευθεία που ορίζουν τα δύο προκαθορισμένα σημεία που βρίσκονται πάνω στην αεροτομή. Αν ο κόμβος βρίσκεται κάτω από την ευθεία σημαίνει ότι ανήκει στην πλευρά υπερπίεσης και δεν πρέπει να διαγραφεί. Στη συνέχεια, διαγράφονται όλοι οι κόμβοι που εντοπίζονται εντός του τετραπλεύρου καθώς και τα στοιχεία που σχηματίζουν. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης τμήματος του πλέγματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10.

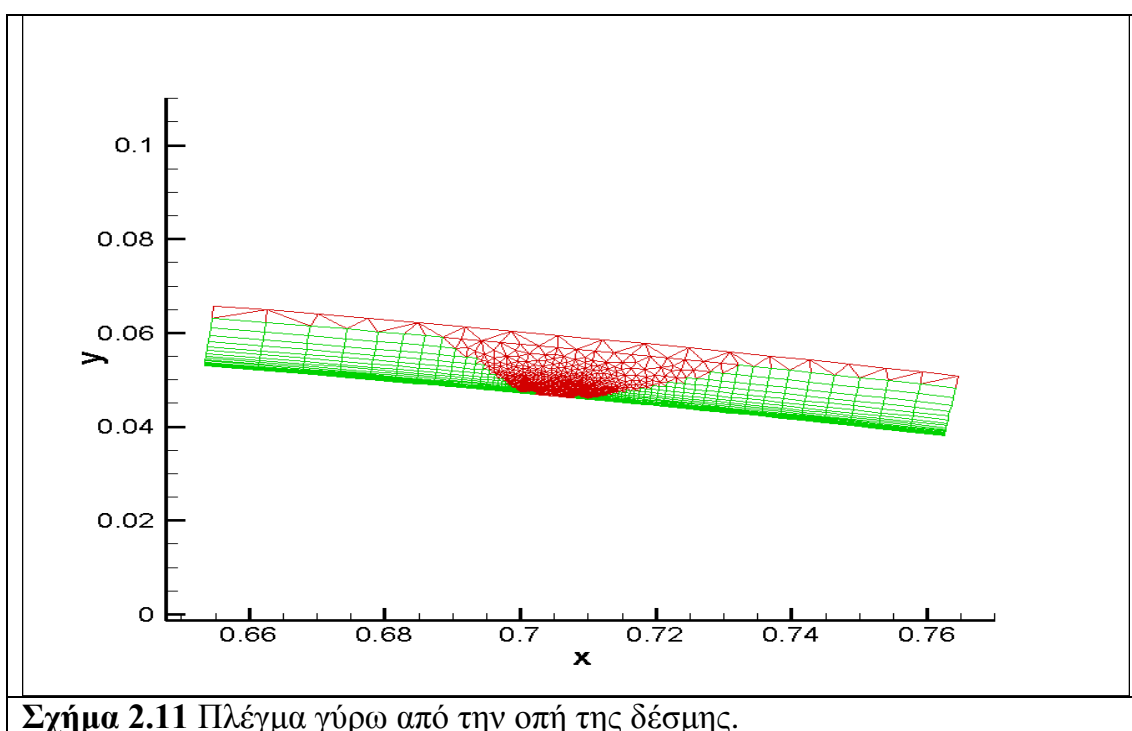


Σχήμα 2.10 Πλέγμα του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης μετά από την αφαίρεση πλέγματος γύρω από την οπή της δέσμης.

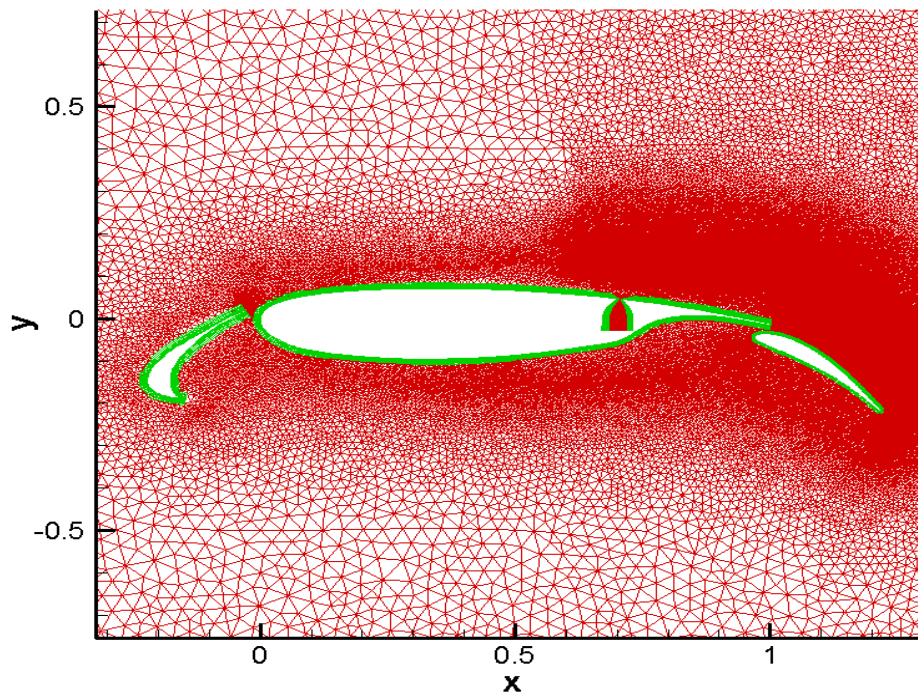
Πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή γύρω από την οπή της δέσμης

Το τμήμα του πλέγματος της αεροτομής που αφαιρέθηκε προηγουμένως αντικαθίσταται από πλέγμα μεγαλύτερης πυκνότητας, η γένεση του οποίου γίνεται με τον εξής τρόπο. Οι κόμβοι στην επιφάνεια του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης ανακατανέμονται με γεωμετρική πρόοδο έτσι ώστε η πυκνότητα των κόμβων να είναι μεγαλύτερη κοντά στην οπή. Στη συνέχεια κατασκευάζεται δομημένο πλέγμα ανάντι και κατάντι της οπής, το οποίο δεν κατασκευάζεται όμως σε όλο το χωρίο άλλα με έναν αλγόριθμο αποκοπής αφαιρούνται τα τετράπλευρα τα οποία δεν ικανοποιούν το λόγο ύψους-πλάτους που τίθεται από τον χρήστη ενώ στο υπόλοιπο χωρίο κατασκευάζεται μη-δομημένο πλέγμα. επίσης, στο δομημένο πλέγμα που κατασκευάζεται εφαρμόζεται ο αλγόριθμος εκλέπτυνσης που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα. Το πλέγμα που προκύπτει δίνεται στο σχήμα 2.11.

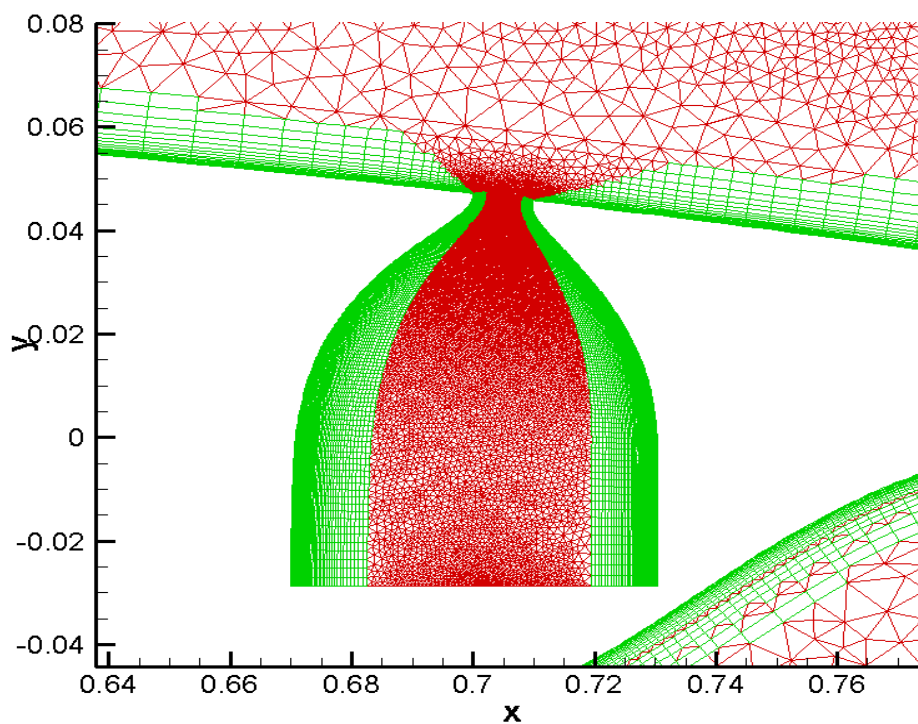
Στη συνέχεια γίνεται το ταίριασμα των επιμέρους πλεγμάτων, του πλέγματος της κοιλότητας της δέσμης, του πυκνομένου πλέγματος γύρω από την οπή της δέσμης και του πλέγματος του κύριου μέρους με την αποκομμένη περιοχή για την κατασκευή του ενιαίου πλέγματος του κύριου μέρους με δέσμη ελέγχου της ροής. Τέλος, γίνεται το ταίριασμα των πλεγμάτων του κύριου μέρους, του flap, του slat και των μη-δομημένων πλεγμάτων, με τον ίδιο τρόπο που έγινε και το ταίριασμα των πλεγμάτων στην περίπτωση που δεν υπάρχει δέσμη ελέγχου της ροής και περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, για να προκύψει το τελικό πλέγμα (σχήματα 2.11 και 2.12).



Σχήμα 2.11 Πλέγμα γύρω από την οπή της δέσμης.



Σχήμα 2.12 Τελικό πλέγμα με μία δέσμη ελέγχου της ροής σε περιοχή κοντά στην υπεραντωτική διάταξη.



Σχήμα 2.13 Τελικό πλέγμα με μία δέσμη ελέγχου της ροής σε περιοχή κοντά στην κοιλότητα του επενεργητή της δέσμης.

Κεφάλαιο 3

Εξισώσεις Navier Stokes και επίλυση τους σε κάρτες γραφικών (GPUs)

Το πεδίο ροής περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier Stokes, οι οποίες παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο μαζί με το μοντέλο τύρβης των Spalart-Allmaras [11]. Παρουσιάζεται επίσης η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε κάρτες γραφικών (GPUs) και γίνεται η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση τους σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPUs). Όπως φαίνεται παρακάτω με την επίλυση τους σε κάρτες γραφικών προκύπτουν τα αποτελέσματα έως και 60 φορές γρηγορότερα σε σύγκριση με τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας [12,13].

3.1 Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι χρονικά μη-μόνιμες εξισώσεις Navier-Stokes, για ροή συμπιεστού ρευστού όπως σε αυτήν την περίπτωση, είναι ένα μεικτό σύστημα παραβολικών και υπερβολικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη διαφορική διατύπωση της συνέχειας, της διατήρησης της ορμής κατά την x κατεύθυνση των καρτεσιανών συντεταγμένων, της διατήρησης της ορμής κατά y και της διατήρησης της ενέργειας. Οι εξισώσεις αυτές για διδιάστατη ροή, χωρίς εξωτερικές δυνάμεις ή πρόσδοση θερμότητας από εξωτερικές πηγές, σε καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y) σε συντηρητική διανυσματική μορφή γράφονται:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial y} = 0$$

Το διάνυσμα \vec{U} σε κάθε θέση του πεδίου ροής αποτελείται από τις εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος, το οποίο για τη συντηρητική γραφή των εξισώσεων γράφεται:

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E_t \end{bmatrix}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, (u,v) οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας στο καρτεσιανό σύστημα κατά x και κατά y αντίστοιχα και E_t αποτελεί την ολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$E_t = \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right)$$

όπου V είναι το μέτρο της ταχύτητας και e είναι η εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας, η οποία συνδέεται με τη θερμοκρασία μέσω του σταθερού συντελεστή θερμοχωρητικότητας υπό σταθερό όγκο με τη σχέση:

$$e = c_v T = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}$$

επίσης, η ολική ενθαλπία h_t αποτελεί χαρακτηριστικό ενεργειακό μέγεθος του πεδίου ροής και συνδέεται με την ολική ενέργεια E_t μέσω της σχέσης:

$$E_t = \rho h_t - p$$

Τα διανύσματα \vec{F} και \vec{G} δίνονται από τις σχέσεις:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ (E_t + p)u - u\tau_{xx} - v\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix}, \quad \vec{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ (E_t + p)v - u\tau_{xy} - v\tau_{yy} + q_y \end{bmatrix}$$

όπου τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} αποτελούν τις συνιστώσες του τανυστή των τάσεων μεταξύ των στοιχείων του ρευστού, ενώ \bar{q} είναι το διάνυσμα της ροής θερμότητας από το ρευστό προς το περιβάλλον. Οι τάσεις προκύπτουν από τη γενική έκφραση:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right], \quad i, j = 1, 2$$

όπου ο δείκτης k αποτελεί επαναλαμβανόμενο δείκτη και το δ_{ij} είναι το δέλτα του Kronecker.

Το διάνυσμα της ροής θερμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{q} = -k \nabla T,$$

με συνιστώσες :

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}$$

όπου k είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Μοντέλο τύρβης μίας εξίσωσης Spalart-Allmaras

Το μοντέλο τύρβης των Spalart-Allmaras [11] είναι ένα μοντέλο μίας εξίσωσης το οποίο επιλύει μία επιπλέον διαφορική εξίσωση μεταφοράς για τη μεταβλητή $\tilde{\nu}$. Μέσω αυτής της μεταβλητής υπολογίζεται, σε κάθε κόμβο του πλέγματος, η τυρβώδης συνεκτικότητα από τη σχέση:

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{\nu 1}$$

όπου: $f_{\nu 1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{\nu 1}^3}$ και ρ είναι η τοπική πυκνότητα.

Για συμπιεστή ροή η εξίσωση του μοντέλου είναι:

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{v} u_j) = C_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{v} + \frac{1}{\sigma} \left\{ \nabla[(v + \tilde{v}) \nabla \tilde{v}] + C_{b2} |\nabla v|^2 \right\} - \left[C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } \tilde{S} &\equiv S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, & f_{v2} &= 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, & S &= |\vec{\omega}|, & f_w &= g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right], \\ g &= r + C_{w2} (r^6 - r), & r &\equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}, & f_{t1} &= C_{t1} g_t \exp \left(-C_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} [d^2 + g_t^2 d_t^2] \right), \\ f_{t2} &= C_{t3} \exp(-C_{t4} \chi^2) \end{aligned}$$

όπου d είναι η απόσταση η απόσταση από την πλησιέστερη επιφάνεια.

Τέλος, οι σταθερές του μοντέλου τύρβης είναι:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2}{3}, & C_{b1} &= 0.1355, & C_{b2} &= 0.622, & \kappa &= 0.41, & C_{w1} &= \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma}, \\ C_{w2} &= 0.3, & C_{w3} &= 2, & C_{v1} &= 7.1, & C_{t1} &= 1, & C_{t2} &= 2, & C_{t3} &= 1.1, & C_{t4} &= 2 \end{aligned}$$

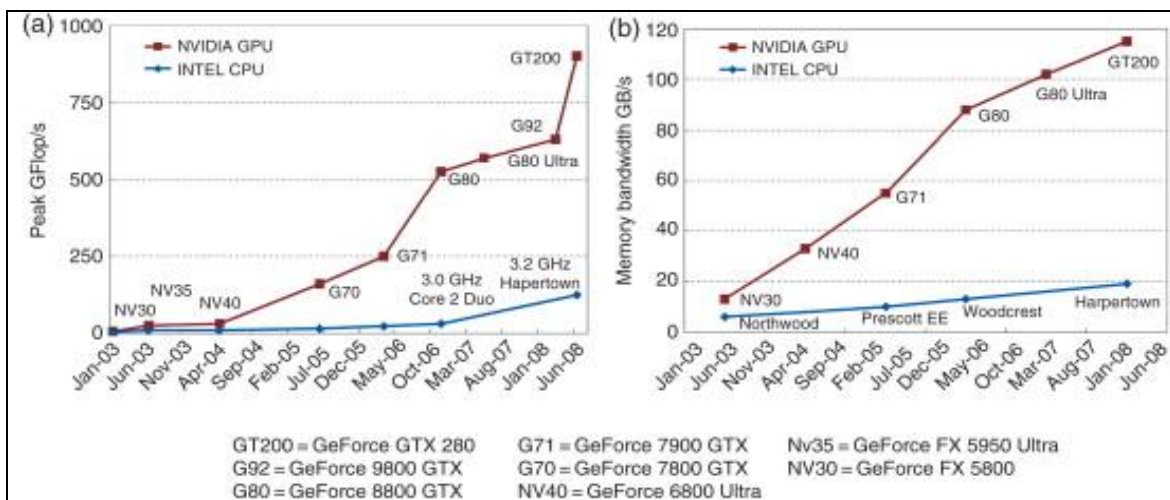
3.2 Επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών.

Εξέλιξη των GPUs

Την τελευταία δεκαετία οι σχεδιαστές των CPUs έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη πολυπύρηνων αρχιτεκτονικών αντί να αυξήσουν τη συχνότητα ρολογιού. Οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών εκτελούν απαιτητικούς και παράλληλους υπολογισμούς για τη δημιουργία γραφικών. Για αυτό το λόγο στο σχεδιασμό των GPUs έχει υιοθετηθεί η πολυπύρηνη στρατηγική από πολύ νωρίς και σχεδιάζονται έτσι ώστε περισσότερα τρανζίστορ να ασχολούνται με την επεξεργασία δεδομένων και όχι για την προσωρινή αποθήκευσή τους και τον έλεγχο της ροής. Αυτό συμβαίνει διότι οι GPUs είναι κατάλληλες για τη διαχείριση προβλημάτων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα ανάλυσης τους σε

παράλληλους υπολογισμούς δεδομένων με μεγάλο λόγο αριθμητικών πράξεων προς αριθμό προσπελάσεων μνήμης. Το ίδιο πρόγραμμα εκτελείται για κάθε πακέτο δεδομένων, επομένως υπάρχει μικρότερη απαίτηση για έξυπνη διαχείριση του ελέγχου ροής των δεδομένων. επίσης, επειδή το πρόγραμμα εκτελείται σε πολλά πακέτα δεδομένων ταυτόχρονα, εκτελώντας πολλές περισσότερες αριθμητικές πράξεις έναντι διαχειρίσεων μνήμης, η προσπέλαση στη λανθάνουσα μνήμη μπορεί να παραληφθεί εκτελώντας υπολογισμούς αντί προσωρινών αποθηκεύσεων.

Οι σύγχρονες GPUs παρέχουν επιδόσεις όσο αφορά την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων και τις πράξεις κινητής υποδιαστολής, οι οποίες είναι περίπου μία τάξη μεγέθους καλύτερες από ότι σε μία τυπική CPU, κάτι το οποίο φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Το σχήμα 3.1 απεικονίζει την εξέλιξη της υπολογιστικής δυνατότητας των CPUs και των GPUs στο χρόνο, η οποία μετράται σε αριθμό πράξεων κινητής υποδιαστολής ανά δευτερόλεπτο (GFlops, Floating Operations per Second), καθώς και την εξέλιξη της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων. Παρατηρείται ότι οι GPUs γνώρισαν μεγάλη αύξηση στις επιδόσεις τους τα τελευταία χρόνια, ενώ αρχικά είχαν παρόμοιες επιδόσεις με τις CPUs.



Σχήμα 3.1 (a) Εξέλιξη της υπολογιστικής δυνατότητας των CPUs και των GPUs στο χρόνο (b) Εξέλιξη της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων των CPUs και των GPUs στο χρόνο.

Μέχρι πρόσφατα η χρήση των GPUs για εφαρμογές γενικής χρήσης ήταν μια περίπλοκη διαδικασία, καθώς απαιτούνταν καλή γνώση σε προγραμματισμό γραφικών. Η ανάπτυξη νέων μοντέλων προγραμματισμού, τα οποία υποστηρίζονται από GPUs και προσπαθούν να βρουν τη σωστή ισορροπία ανάμεσα στη χαμηλή πρόσβαση στο υλικό και στον προγραμματισμό υψηλού επιπέδου, έχει ως αποτέλεσμα την εξέλιξη της μονάδας επεξεργασίας γραφικών σε ισχυρή προγραμματιστική μηχανή τα τελευταία χρόνια.

Ο προγραμματισμός σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών γίνεται μέσω κατάλληλων γλωσσών προγραμματισμού, όπως είναι η OpenCL, η Brooke, η

CG και η Cuda, με χρήση της οποίας έγινε και η επίλυση των εξισώσεων ροής του πεδίου στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η γλώσσα προγραμματισμού Cuda της Nvidia υποστηρίζει εντολές των γλωσσών προγραμματισμού C, C++ και Fortran [14]. Επομένως υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας απευθείας στην GPU χωρίς να υπάρχει η ανάγκη χρήσης γλώσσας μηχανής. Υπάρχει ορισμένες φορές βέβαια η ανάγκη μετατροπής του κώδικα ώστε να αξιοποιεί με βέλτιστο τρόπο την υπολογιστική ισχύ των σύγχρονων GPUs.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του προγραμματισμού σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών είναι ότι υπάρχει μεγάλος λόγος απόδοσης-κόστους. Οι GPUs έχουν πολύ μεγάλη απόδοση εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας εκτέλεσης πράξεων σε παράλληλο επίπεδο ενώ παράλληλα έχει μικρό κόστος επένδυσης καθώς η εγκατάστασή της μπορεί να γίνει σε έναν οποιονδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes

Για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes χρησιμοποιήθηκε CFD κώδικας που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών [12,13] και εκτελείται σε σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας γραφικών. Ο επιλύτης χρησιμοποιεί για την επίλυση της ροής μη-δομημένα πλέγματα, τα οποία αποτελούνται από τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία σε διδιάστατες εφαρμογές, ενώ σε τριδιάστατες εφαρμογές αποτελούνται από τετράεδρα, εξάεδρα, πυραμίδες ή πρίσματα. Το λογισμικό χρησιμοποιείται για την επίλυση μόνιμων και μη ροών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε εφαρμογή του 2D κώδικα σε μόνιμη ροή. Επίσης ο κώδικας χρησιμοποιεί τη κεντροκομβική διατύπωση της τεχνικής των πεπερασμένων όγκων.

Το συγκεκριμένο σχήμα των πεπερασμένων όγκων δίνει χωρική ακρίβεια δεύτερης τάξης και οι γραμμικοποιημένες διακριτοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται επαναληπτικά με τη μέθοδο Jacobi. Η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιήθηκαν στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών. Πιο συγκεκριμένα, οι κάρτες γραφικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επίλυση του GPU-κώδικα είναι οι GeForce GTX 280 και 285 της Nvidia [15,16], οι οποίες αποτελούν μονάδες παράλληλης επεξεργασίας υψηλής υπολογιστικής ισχύος, ικανές να επιταχύνουν τη πρόλεξη των αποτελεσμάτων της ροής έως και 40 φορές σε σχέση με αντίστοιχο CFD κώδικα που εκτελείται σε έναν πυρήνα μίας σύγχρονης CPU. Παρόλα αυτά, επισημαίνεται ότι οι κάρτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα «παλαιά μοντέλα» καρτών γραφικών της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης, τα οποία σήμερα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά κατά την εκπόνηση διπλωματικών εργασιών, όπως η παρούσα. Θα ήταν δυνατό να

επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη παράλληλη επιτάχυνση στα νέα μοντέλα καρτών που διαθέτει η Μονάδα.

Κεφάλαιο 4

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επίλυσης του πεδίου ροής

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε ο τρόπος δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος γύρω από την επιλεγμένη υπεραντωτική διάταξη, χωρίς και με δέσμη ελέγχου της ροής, και επίσης παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής και ο τρόπος επίλυσης τους σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή του κώδικα επίλυσης για τον υπολογισμό των ροϊκών μεγεθών επί των υπολογιστικών πλεγμάτων, με ή χωρίς τη χρήση ελέγχου της ροής. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην ίδια υπεραντωτική διάταξη με τιμή του αριθμού Reynolds (Re) του πεδίου ροής ίση με 1.000.000 και με αριθμό Mach της επ'άπειρο ροής (M_∞) ίσο με 0.1.

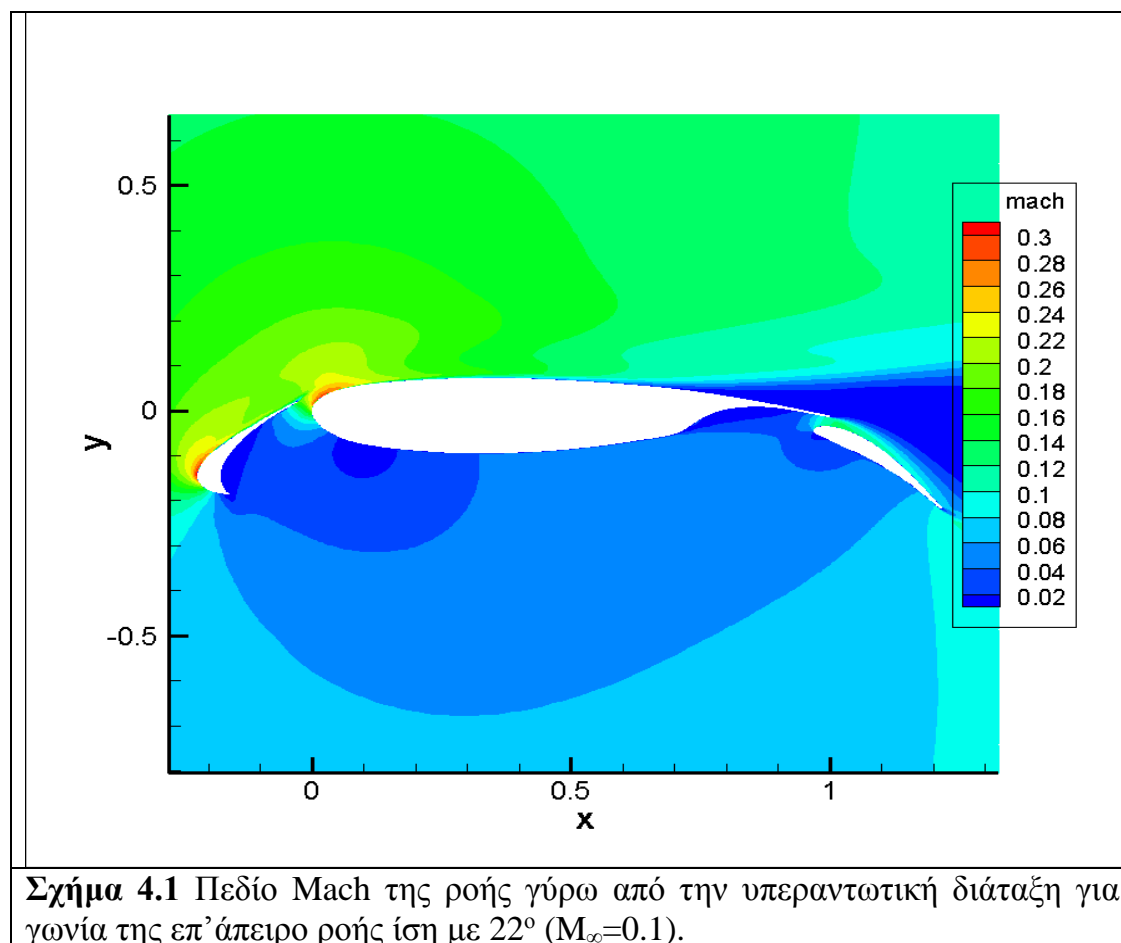
4.1 Επίλυση εξισώσεων του πεδίου ροής χωρίς δέσμη ελέγχου

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επίλυσης των εξισώσεων του πεδίου ροής στην περίπτωση της υπεραντωτικής διάταξης, χωρίς την εφαρμογή δέσμης ελέγχου της ροής. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα θα γίνει η σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής της δέσμης. Έγιναν δοκιμές με διάφορες τιμές της γωνίας της επ'άπειρο ροής με σκοπό να βρεθεί σε ποια γωνία η ροή αρχίζει να παρουσιάζει αποκόλληση, καθώς δεν υπάρχει λόγος να εφαρμοστεί έλεγχος της ροής σε περίπτωση όπου δεν παρουσιάζεται αποκόλληση. Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για δύο διακριτές περιπτώσεις με γωνία της επ'άπειρο ροής 22° και 26°, όπου, και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρείται το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής.

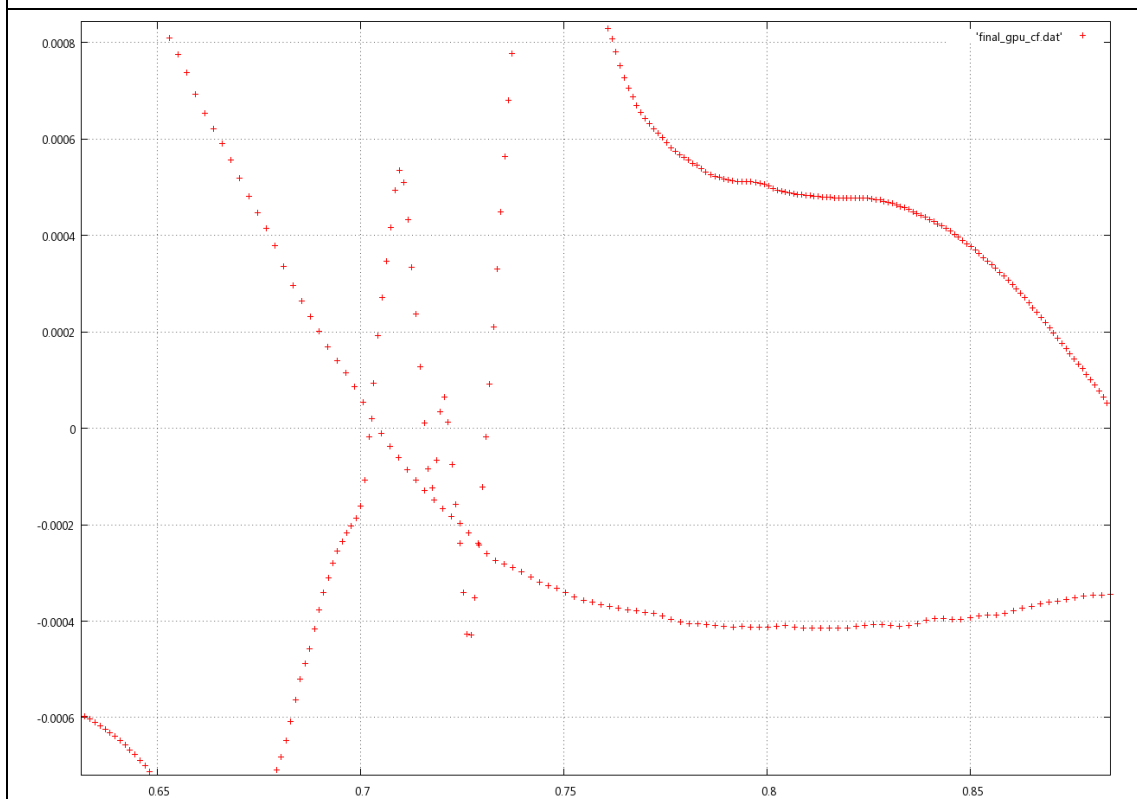
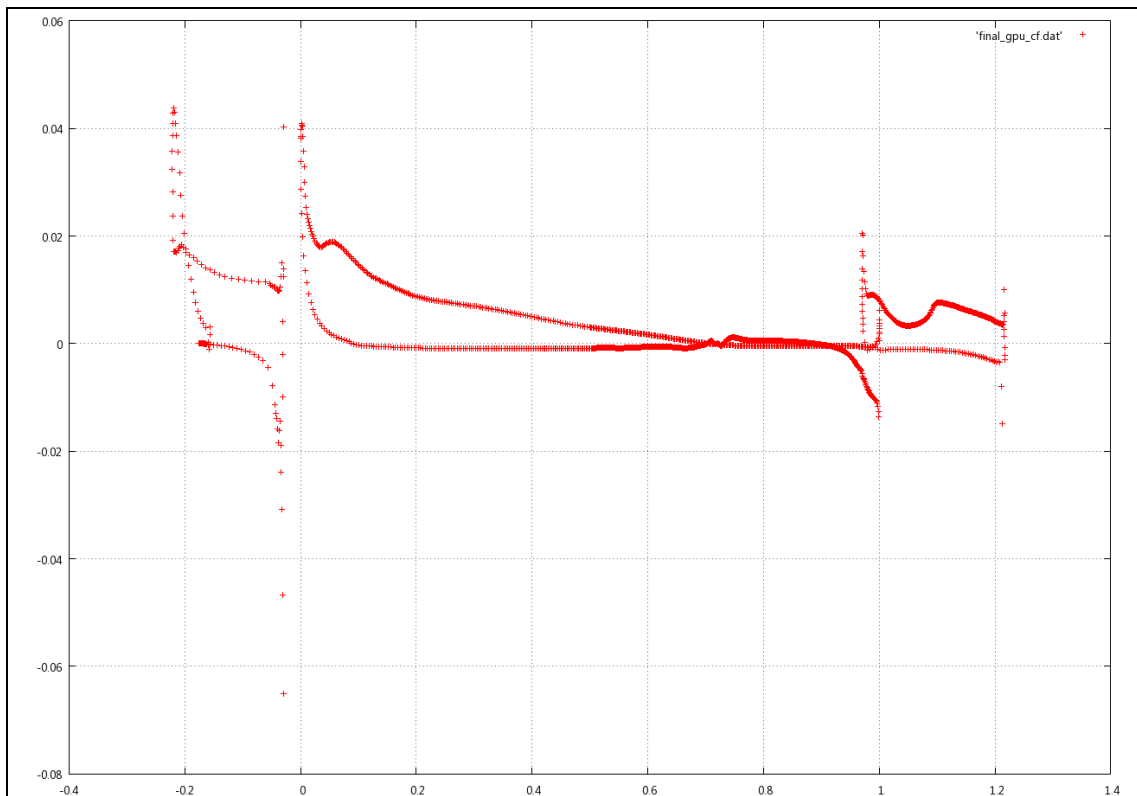
Αποτελέσματα για γωνία $\alpha=22^\circ$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων ροής για τη συγκεκριμένη γωνία είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L= 3.991$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D= 0.243$
- Θέση αποκόλλησης 0.705 (της χορδής).



Παρατηρείται ότι για τη συγκεκριμένη γωνία της επ'άπειρο ροής η ροή παρουσιάζει μόνιμο χαρακτήρα, ενώ παρατηρείται μόνιμη αποκόλληση της ροής. Η ροή δεν επανακολλάται ενώ παρατηρείται μία μεγάλη ζώνη ανακυκλοφορίας της ροής, η οποία επεκτείνεται σε μία περιοχή πάνω από το flap. Πάνω στα τοιχώματα του flap δεν παρατηρείται αποκόλληση καθώς το κενό ανάμεσα στο κύριο μέρος και το flap λειτουργεί ως jet. Η θέση της αποκόλλησης βρίσκεται από την τιμή του συντελεστή τριβής C_f (σχήμα 4.2). Όταν το πρόσημο της τοπικής τιμής αυτού του συντελεστή αλλάζει από θετικό σε αρνητικό σημαίνει ότι έχουμε αποκόλληση της ροής. Αντίστοιχα όταν το πρόσημο από αρνητικό γίνεται θετικό σημαίνει ότι έχουμε επανακόλληση της ροής.

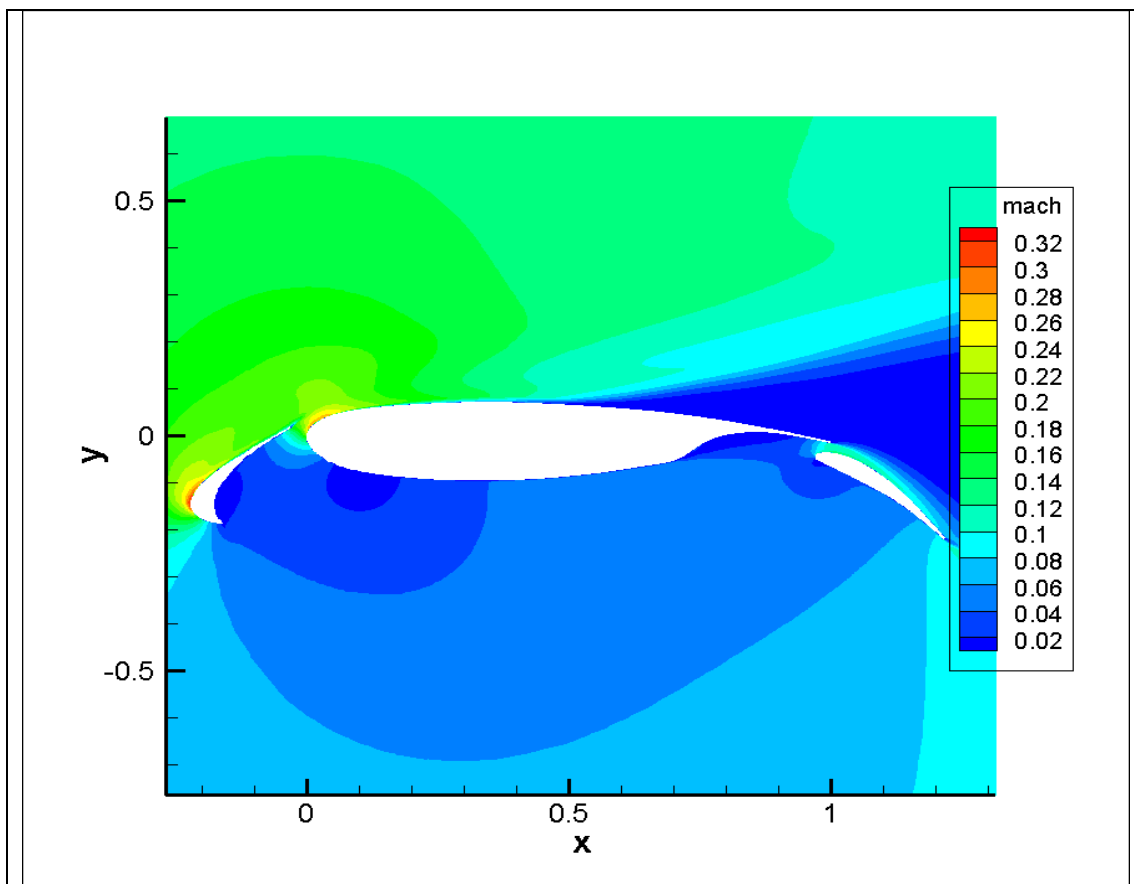


Σχήμα 4.2 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης, το C_f γίνεται αρνητικό στη ζώνη αποκόλλησης. Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής.

Αποτελέσματα για γωνία $\alpha_{\infty}=26^{\circ}$

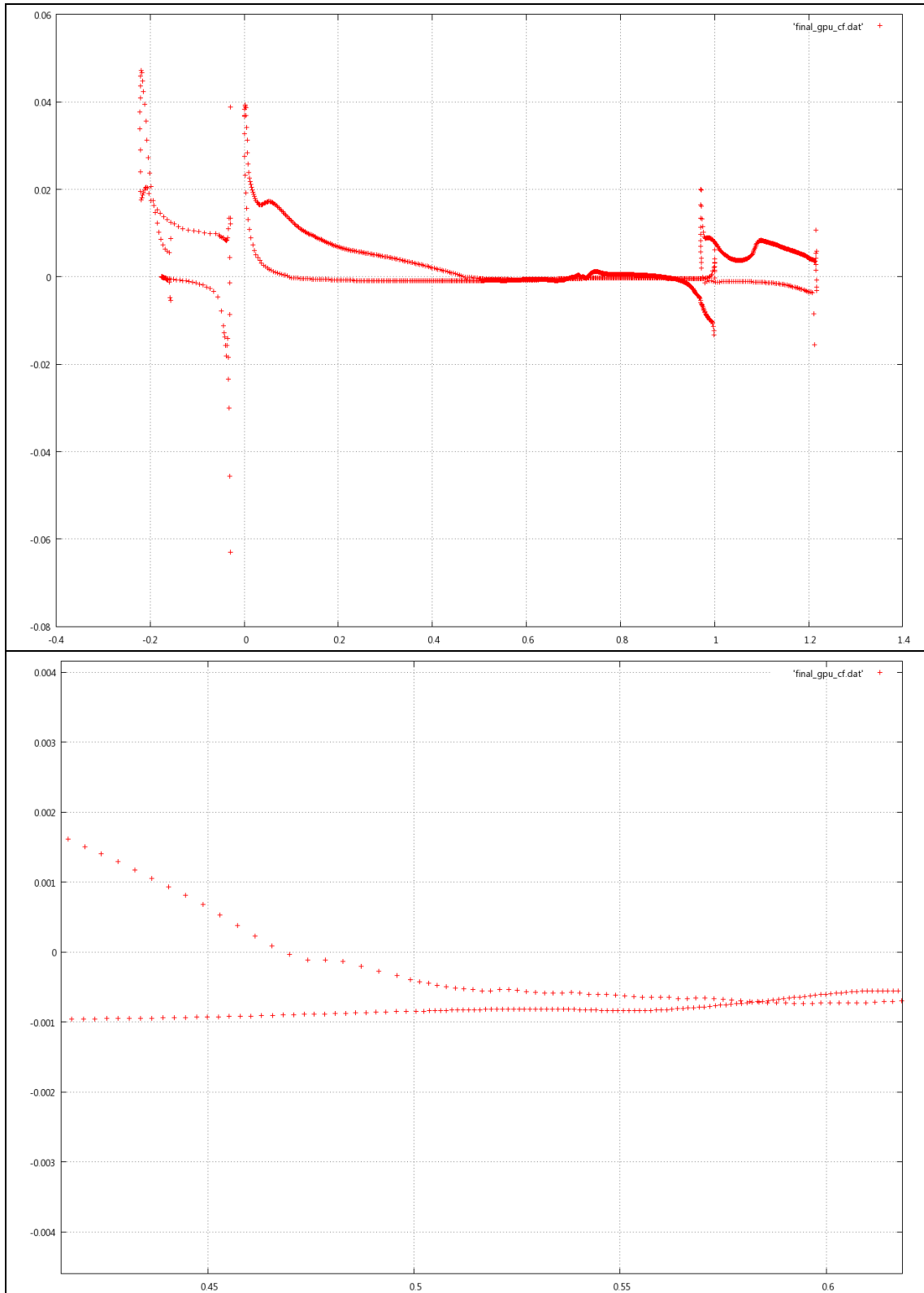
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων ροής για τη συγκεκριμένη γωνία είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L= 3.629$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D= 0.314$
- Θέση αποκόλλησης 0.47 (της χορδής).



Σχήμα 4.3 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 26° ($M_{\infty}=0.1$).

Στην περίπτωση αυτή ο κώδικας CFD εμφανίζει αστάθεια καθώς οι συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας δεν συγκλίνουν σε μία συγκεκριμένη τιμή και παρατηρείται ταλάντωση των τιμών τους γύρω από ένα μικρό εύρος τιμών τους (συγκεκριμένα από 3.63 έως 3.71 περίπου για τον C_L και από 0.3 έως 0.32 περίπου για τον C_D). Η αποκόλληση επίσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση και αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι η ζώνη ανακυκλοφορίας που δημιουργείται.



Σχήμα 4.4 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης. Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής.

4.2 Επίλυση εξισώσεων του πεδίου ροής με δέσμη ελέγχου

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επίλυσης των εξισώσεων του πεδίου ροής στην περίπτωση της υπεραντωτικής διάταξης, με την εφαρμογή μίας δέσμης ελέγχου της ροής και παρατηρείται η επίδραση των παραμέτρων της δέσμης στον έλεγχο της ροής.

4.2.1 Παράμετροι της δέσμης ελέγχου της ροής

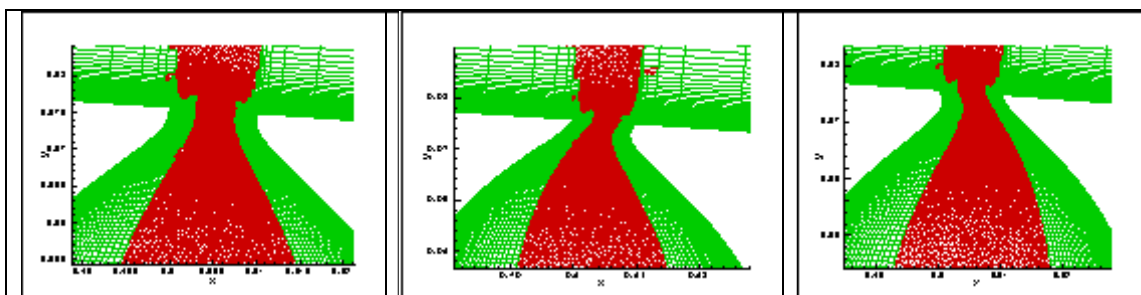
Ο έλεγχος της ροής στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόζεται με την τεχνική της συνεχούς αναρρόφησης ρευστού από την πλευρά υποπίεσης του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης. Η μοντελοποίηση του φαινομένου γίνεται με την κατασκευή κοιλότητας επενεργητή της δέσμης όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Παρακάτω αναφέρονται οι παράμετροι της δέσμης ελέγχου της ροής και ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται η κάθε παράμετρος.

- **Θέση της οπής της δέσμης (x_{slot}).**

Ορίζεται από το σημείο στο οποίο βρίσκεται η αρχή της οπής του επενεργητή της δέσμης επί του στερεού τοιχώματος του κύριου μέρους της υπεραντωτικής διάταξης. Είναι αδιαστατοποιημένο μέγεθος με το μήκος c της χορδής του κύριου μέρους της υπεραντωτικής διάταξης.

- **Γωνία της δέσμης (θ_{jet}).**

Η γωνία της δέσμης καθορίζεται από τη γωνία που σχηματίζουν τα τοιχώματα της κοιλότητας με το στερεό τοίχωμα του κύριου μέρους της υπεραντωτικής διάταξης στη θέση της οπής της δέσμης. Όταν αναφέρεται ότι η γωνία της δέσμης είναι 0° σημαίνει ότι τα τοιχώματα της κοιλότητας είναι κάθετα στο στερεό τοίχωμα της αεροτομής στη θέση αυτή. Αντίστοιχα γωνία 90° σημαίνει ότι τα τοιχώματα της κοιλότητας και το στερεό τοίχωμα της υπεραντωτικής διάταξης εφάπτονται. επίσης, όταν τα τοιχώματα της κοιλότητας ‘στρέφονται’ ωρολογιακά σε σχέση με τη θέση που έχουν για γωνία της δέσμης 0° τότε η γωνία της δέσμης παίρνει θετικές τιμές. Στην αντίθετη περίπτωση που ‘στρέφονται’ αντι-ωρολογιακά τότε η γωνία της δέσμης παίρνει αρνητικές τιμές (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 (α) Μηδενική γωνία της δέσμης, (β) Θετική τιμή της γωνίας της δέσμης (30 μοίρες), (γ) αρνητική τιμή της γωνίας της δέσμης (-30 μοίρες). Η ροή κατευθύνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά.

- **Εύρος της οπής (SlotWidth).**

Ορίζεται από το μήκος της οπής στην επιφάνεια της υπεραντωτικής διάταξης. Είναι αδιαστατοποιημένο με το μήκος c .

- **Παροχή αναρρόφησης της δέσμης (Q_{jet}).**

Η παροχή αναρρόφησης ορίζεται από το γινόμενο της ταχύτητας της δέσμης με την πυκνότητα (ρU_{jet}) στο κάτω μέρος της κοιλότητας του επενεργητή, το οποίο γινόμενο τίθεται ως οριακή συνθήκη. Η παροχή αναρρόφησης δίνεται από την παραπάνω ποσότητα πολλαπλασιασμένη με το μήκος του κάτω μέρους της κοιλότητας. Η παροχή είναι αδιαστατοποιημένη με το γινόμενο του μήκους c , της πυκνότητας και της ταχύτητας στην επ' άπειρο ροή.

4.2.2 Αποτελέσματα της επίλυσης των εξισώσεων της ροής με μία δέσμη ελέγχου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων της ροής με την εφαρμογή δέσμης ελέγχου της ροής. Η εφαρμογή της δέσμης ελέγχου της ροής πραγματοποιήθηκε για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 22° . Οι αριθμοί Mach και Reynolds παρέμειναν ίδιοι με την περίπτωση της μη εφαρμογής δέσμης ελέγχου ($M_\infty=0.1$, $Re=1.000.000$). Παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις για θέσεις της οπής της δέσμης $x_{slot} = 0.70$ και $x_{slot} = 0.81$.

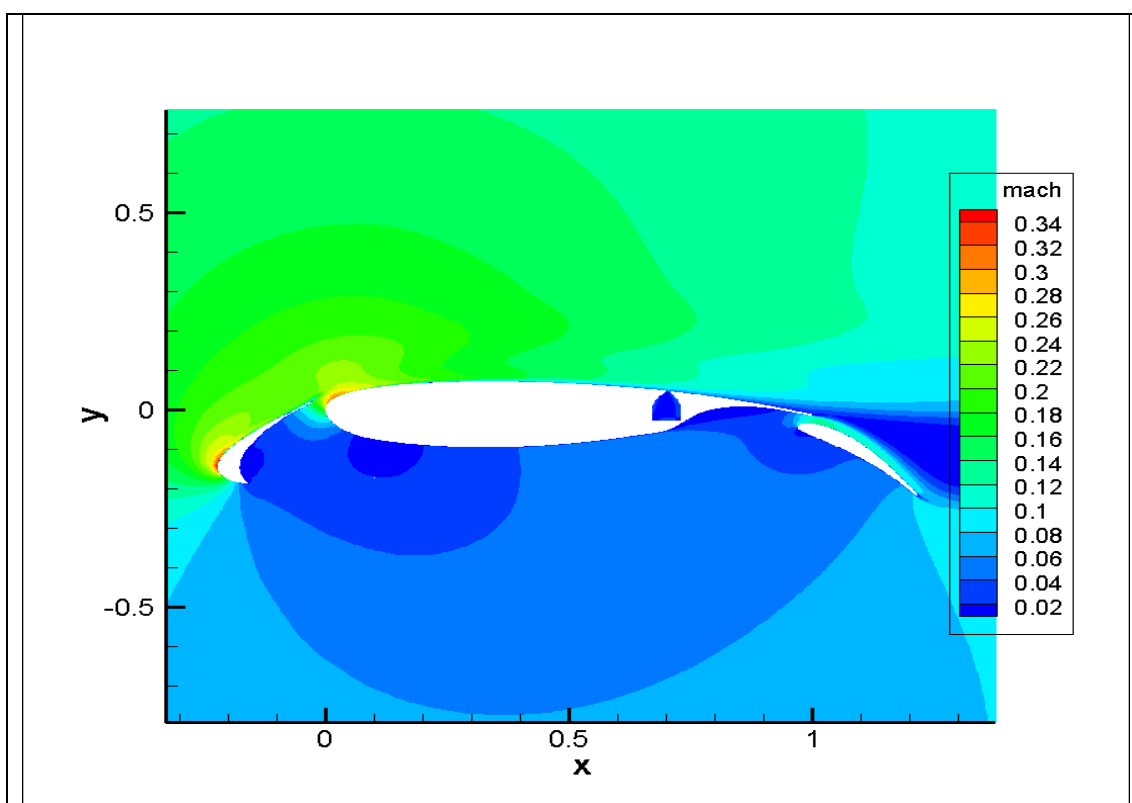
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.70$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

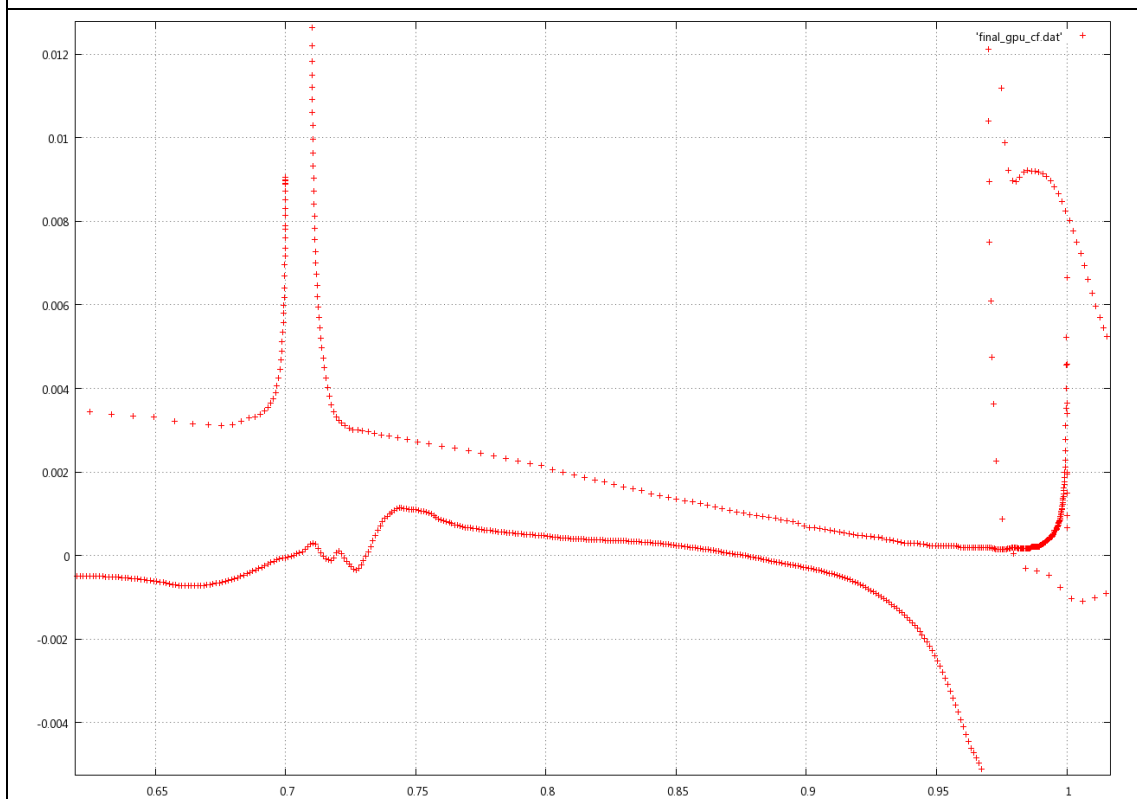
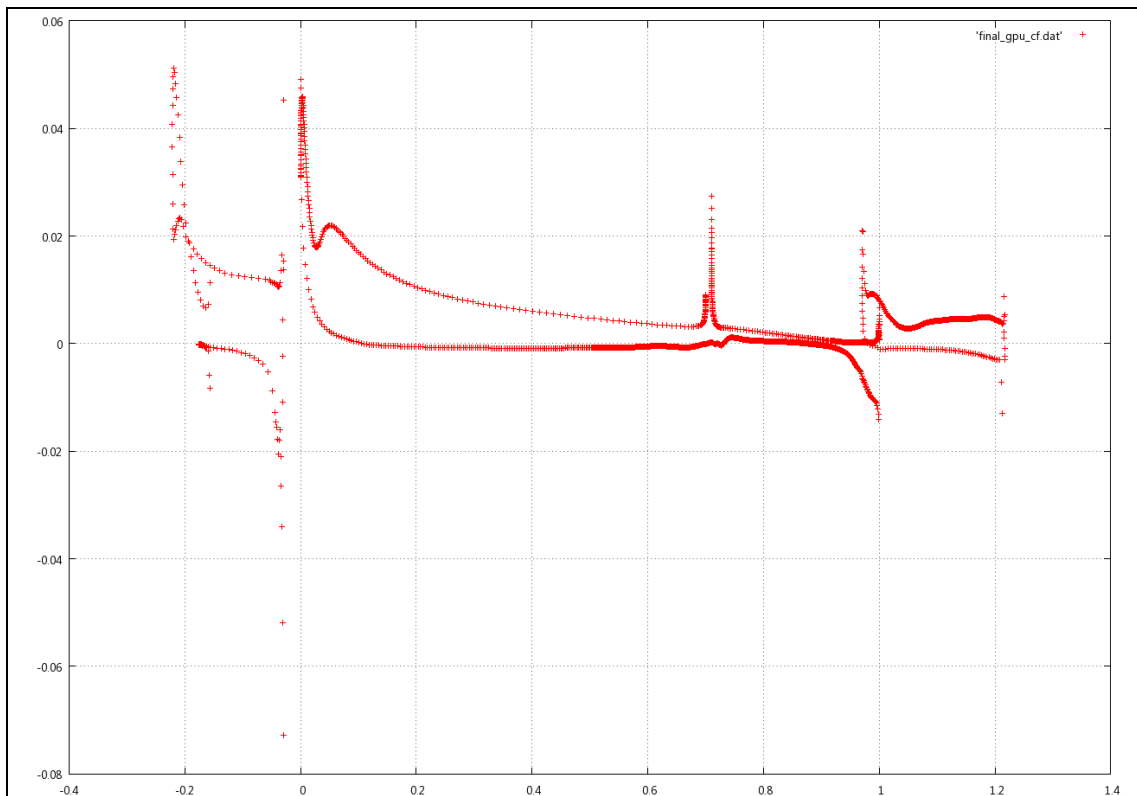
- $x_{slot} = 0.70$
- $\theta_{jet} = 0^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Η αποκόλληση της ροής στην περίπτωση μη εφαρμογής της δέσμης ελέγχου παρουσιάστηκε για $x=0.70$ και με βάση αυτό το γεγονός επιλέχθηκε η θέση της οπής της δέσμης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.885$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.909$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο μέρος της υπεραντωτικής διάταξης.



Σχήμα 4.6 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 22° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.70.



Σχήμα 4.7 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.70$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή δέσμης ελέγχου της ροής στη συγκεκριμένη θέση δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο μέρος της υπεραντωτικής διάταξης ενώ υπάρχει και μία αναμενόμενη αύξηση της τιμής του συντελεστή άνωσης. **Ταυτόχρονα όμως παρατηρείται και μία μη αναμενόμενη αύξηση στον συντελεστή οπισθέλκουσας, ο οποίος αναμέναμε να μειώνεται αντί να αυξάνεται.**

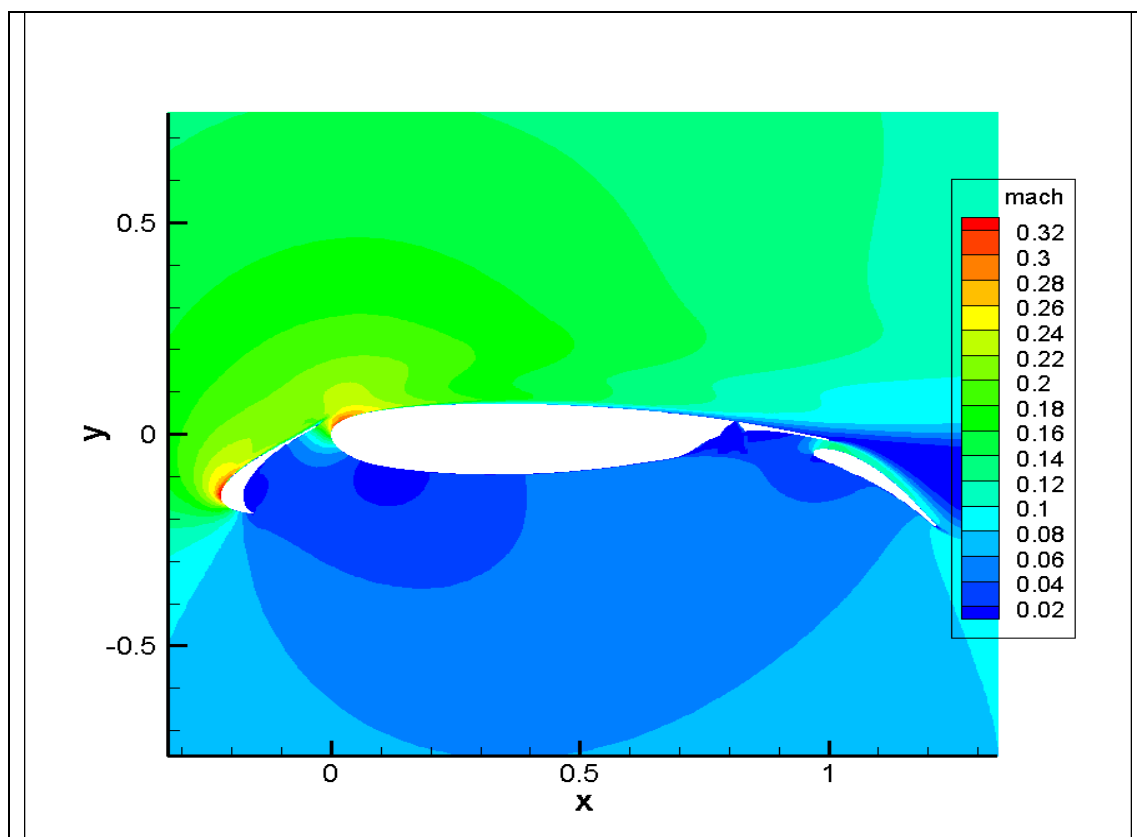
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.81$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

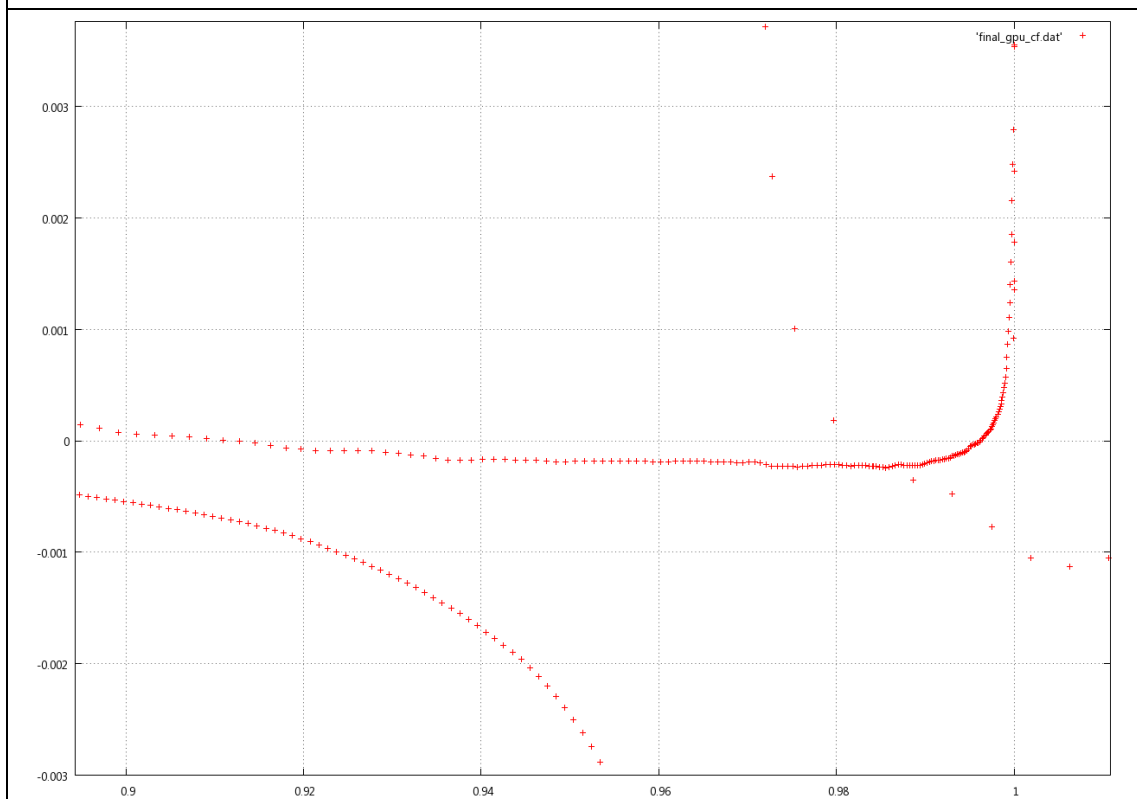
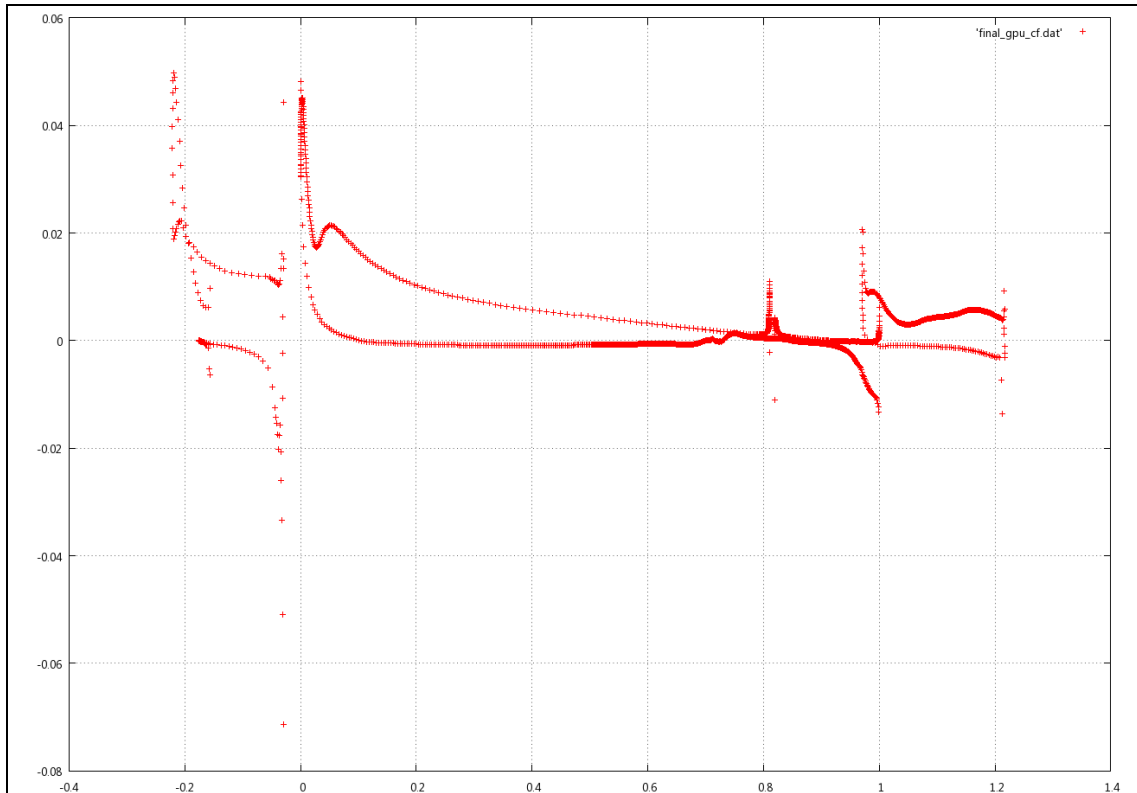
- $x_{slot} = 0.81$
- $\theta_{jet} = 0^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.726$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.978$
- Θέση αποκόλλησης 0.913 (της χορδής)



Σχήμα 4.8 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ'άπειρο ροής ίση με 22° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.81.



Σχήμα 4.9 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.81$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής.

Τα αποτελέσματα σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν κάπως χειρότερα σε σχέση με την προηγούμενη. Ο συντελεστής άνωσης προκύπτει μικρότερος ενώ αντίστοιχα ο συντελεστής οπισθέλκουσας μεγαλύτερος. Παράλληλα εντοπίζεται μια μικρή ζώνη αποκόλλησης της ροής του ρευστού, η οποία επανακολλάται πριν την ακμή εκφυγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να συγκλίνουν τα αποτελέσματα χρειάστηκαν οι διπλάσιες επαναλήψεις, συνεπώς και ο **διπλάσιος χρόνος**, σε σχέση με την περίπτωση στην οποία η οπή της δέσμης βρισκόταν στη θέση 0.70.

Αφού πραγματοποιήθηκε αρχικά η επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής με την εφαρμογή μίας δέσμης ελέγχου της ροής και προέκυψαν τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν μετέπειτα επιπλέον επιλύσεις των εξισώσεων του πεδίου με διαφορετικές παραμέτρους ώστε να βρεθεί για ποιες τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται καλύτερες τιμές στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας. Οι μεταβλητές παράμετροι στην επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής ήταν η θέση της οπής της δέσμης και η γωνία της δέσμης ενώ το εύρος της οπής καθώς και η παροχή αναρρόφησης της παρέμειναν σταθερές. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε η επίλυση των εξισώσεων στις θέσεις $x_{slot} = 0.50, 0.60, 0.70$ και 0.81 , για γωνίες της δέσμης $\theta_{jet} = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ$ και 30° . Στις σταθερές παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι τιμές: $SlotWidth = 0.01$, $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$. Η γωνία της επ' άπειρο ροής είναι 22° μοίρες και οι αριθμοί Mach και Reynolds: $M_\infty=0.1$, $Re=1.000.000$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συνοπτικά στους πίνακες 4.1 και 4.2.

	-30°	-15°	0°	15°	30°
0.50	5.89129	5.89153	5.89004	5.88764	5.88502
0.60	5.89286	5.89254	5.89145	5.88971	5.88751
0.70	5.88755	5.88642	5.88529	5.8842	5.88269
0.81	5.80698	5.80576	5.80474	5.80375	5.80204

Πίνακας 4.1 Οι συντελεστές άνωσης που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής. Στην πρώτη στήλη αναγράφονται οι θέσεις της οπής της δέσμης x_{slot} και στην πρώτη σειρά οι γωνίες της δέσμης θ_{jet} . Η μεγαλύτερη τιμή σημειώνεται με έντονα ψηφία (bold).

	-30°	-15°	0°	15°	30°
0.50	0.815613	0.816069	0.817668	0.817877	0.818123
0.60	0.861289	0.861828	0.861911	0.86207	0.862281
0.70	0.909292	0.909378	0.909476	0.909588	0.909746
0.81	0.972357	0.972438	0.972516	0.972603	0.972751

Πίνακας 4.2 Οι συντελεστές οπισθέλκουσας που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής. Στην πρώτη στήλη αναγράφονται οι θέσεις της οπής της δέσμης x_{slot} και στην πρώτη σειρά οι γωνίες της δέσμης θ_{jet} . Η μικρότερη τιμή σημειώνεται με έντονα ψηφία (bold).

Όπως φαίνεται στους πίνακες 4.1 και 4.2 οι μεγαλύτεροι συντελεστές άνωσης και οι μικρότεροι συντελεστές οπισθέλκουσας σε κάθε θέση της οπής της δέσμης παρουσιάζονται για γωνία της δέσμης $\theta_{jet}=-30^\circ$. Για αυτόν το λόγο οι περιπτώσεις αυτές θα παρουσιασθούν αναλυτικά παρακάτω.

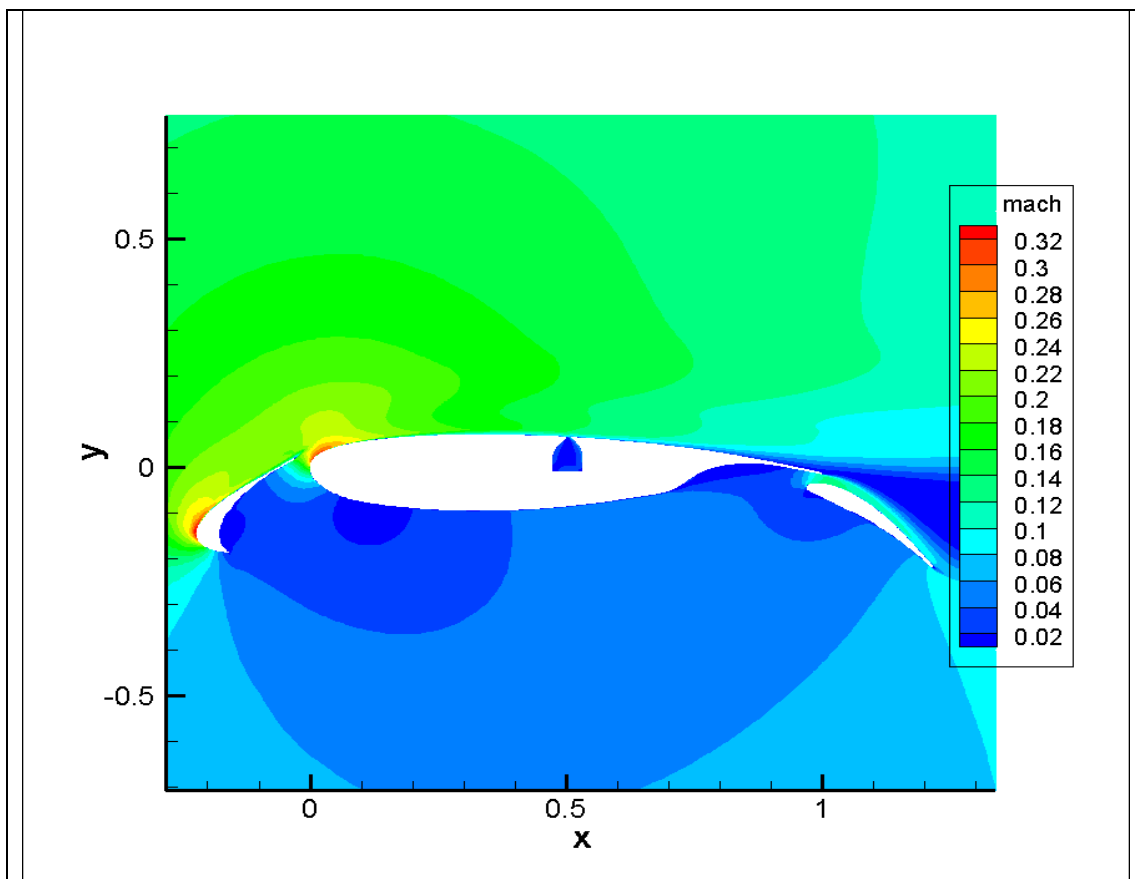
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.50$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

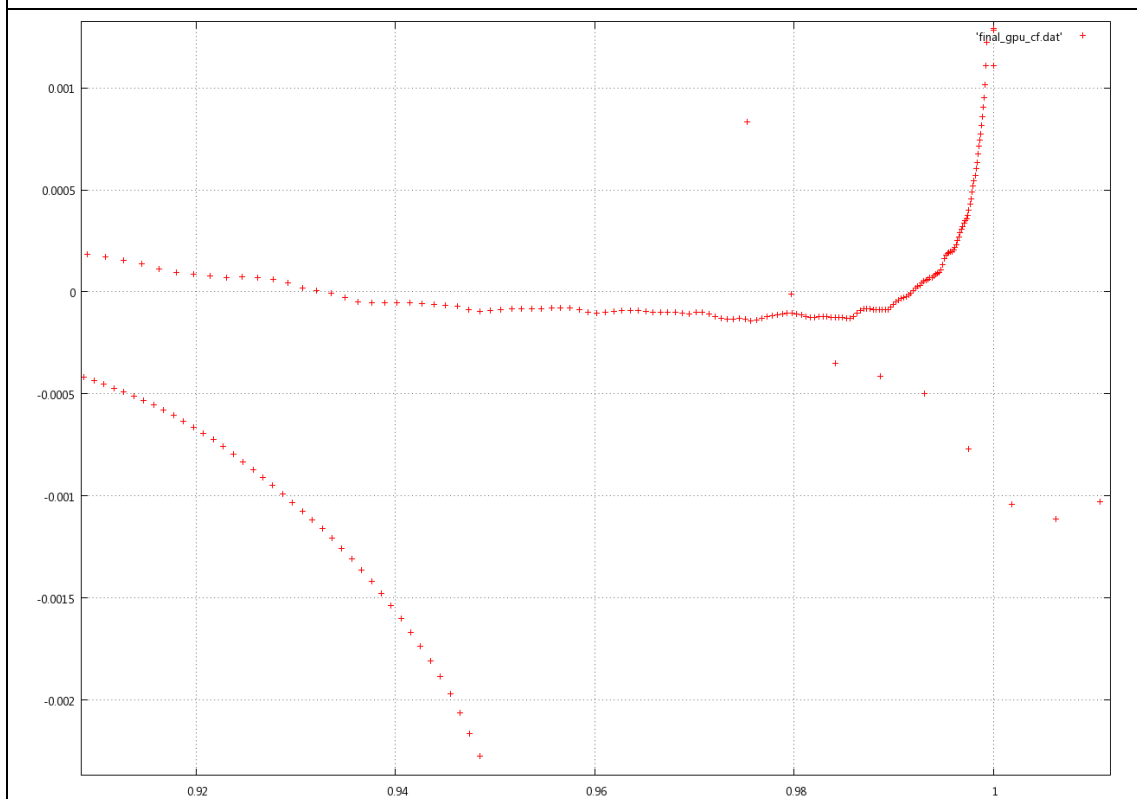
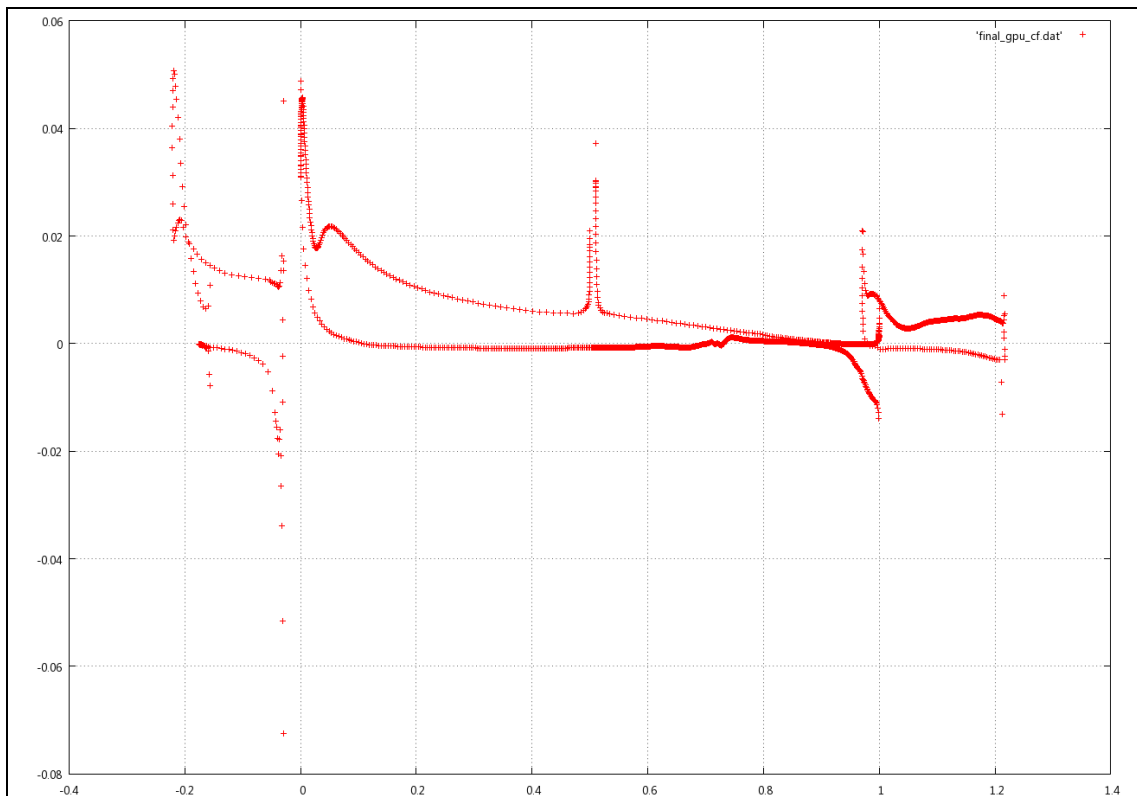
- $x_{slot} = 0.50$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L= 5.891$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D= 0.816$
- Θέση αποκόλλησης 0.934 (της χορδής)



Σχήμα 4.10 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 22° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.50.



Σχήμα 4.11 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{\text{slot}}=0.50$, $\theta_{\text{jet}}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής.

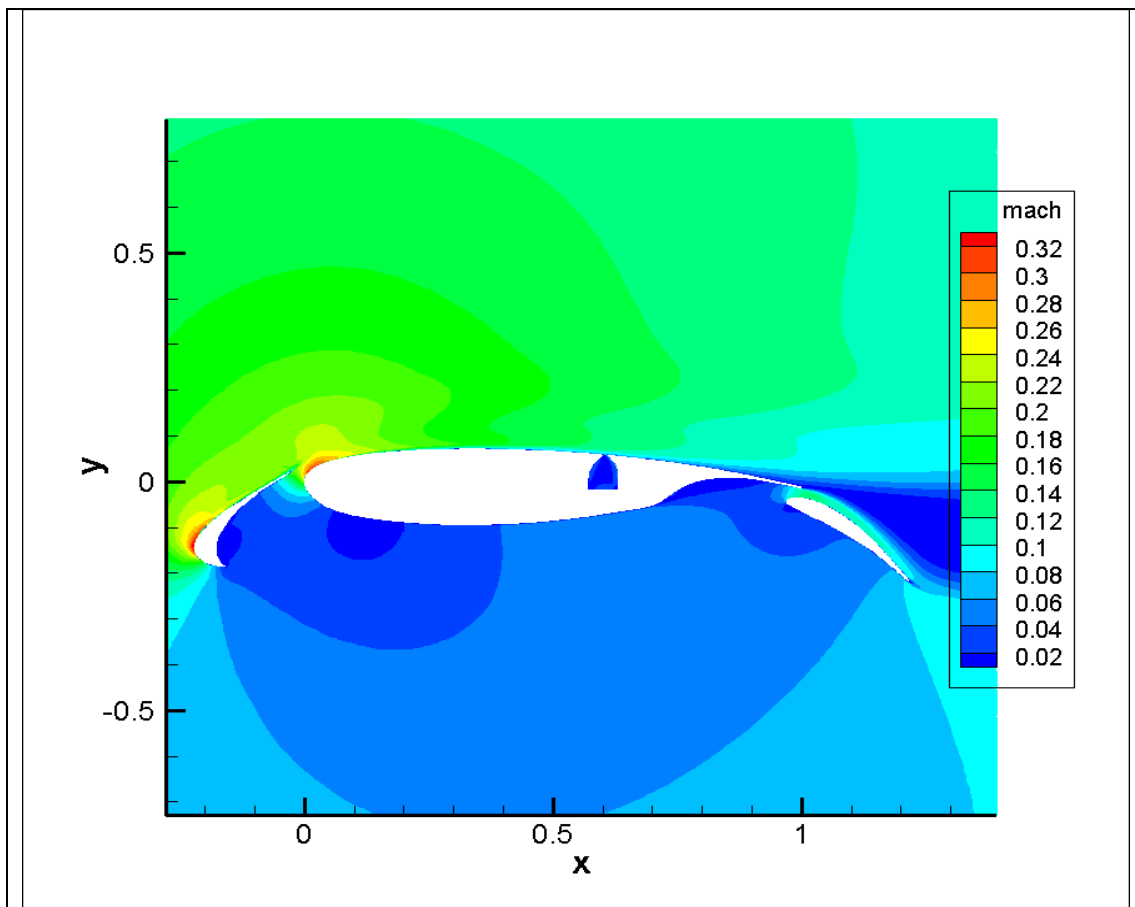
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.60$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

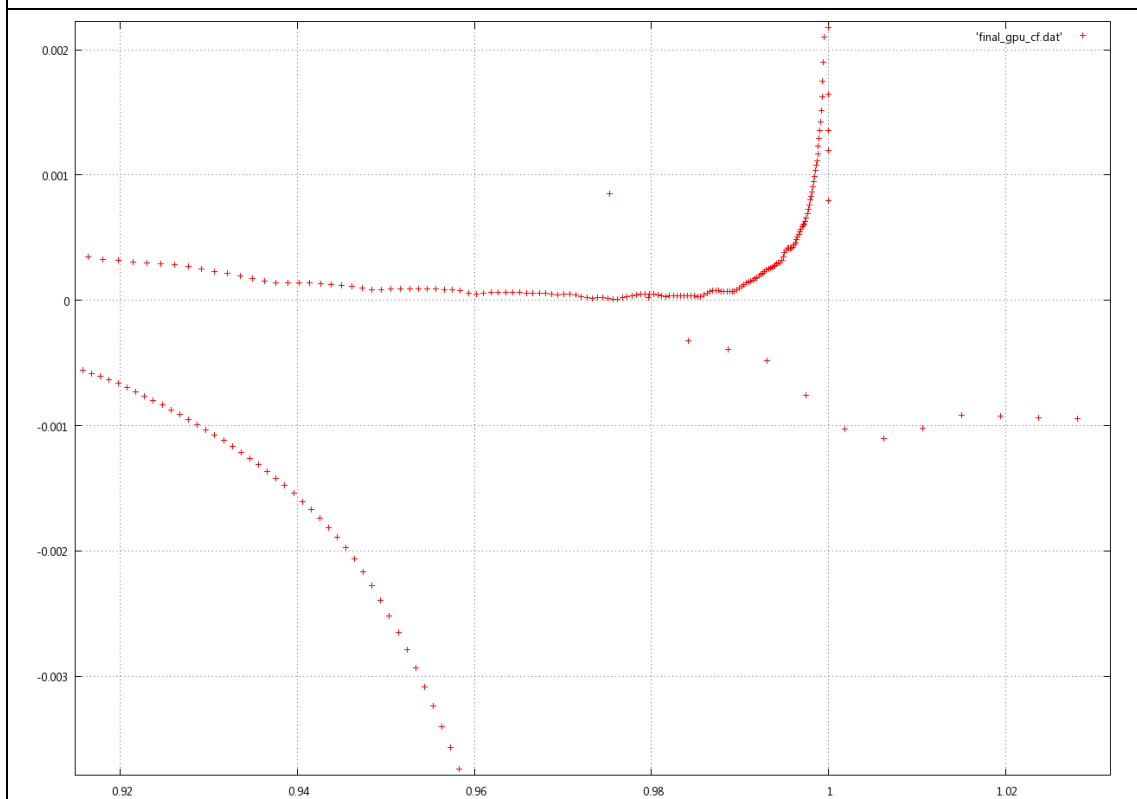
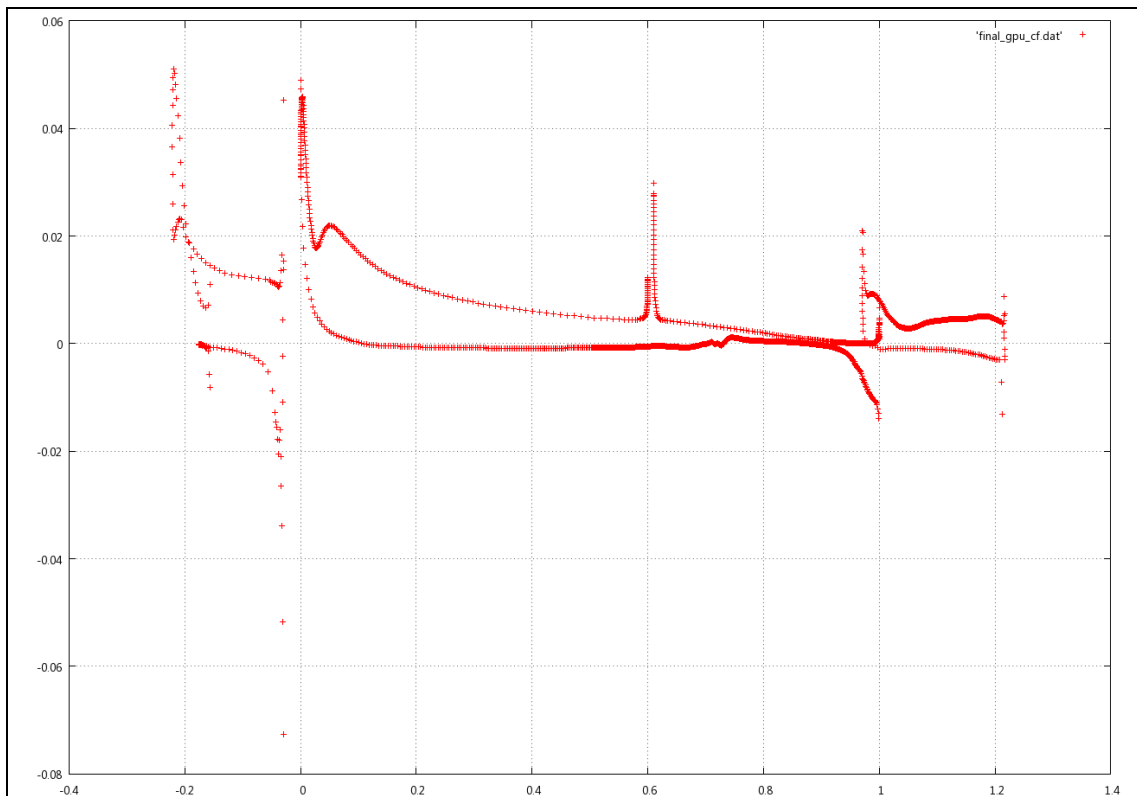
- $x_{slot} = 0.60$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.893$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.861$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης



Σχήμα 4.12 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ'απειρο ροής ίση με 22° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.60.



Σχήμα 4.13 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.60$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

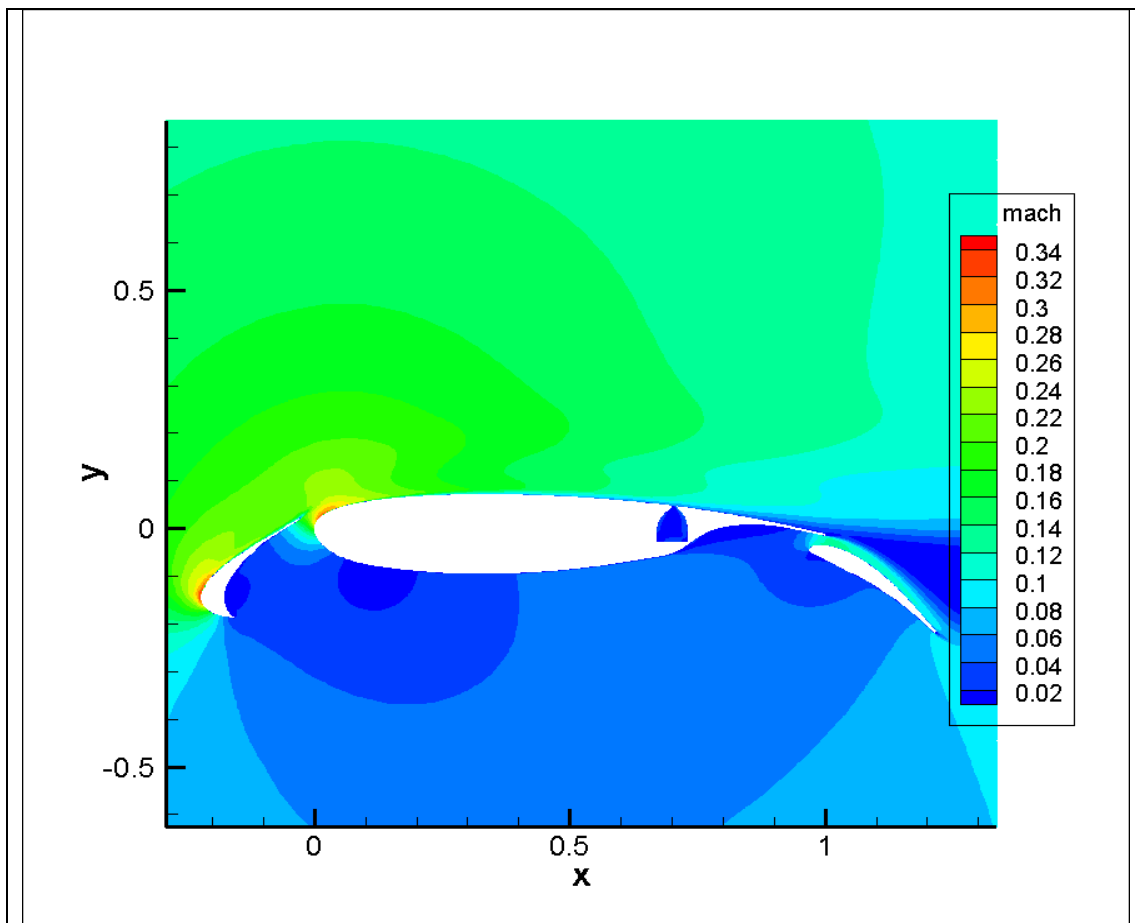
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.70$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

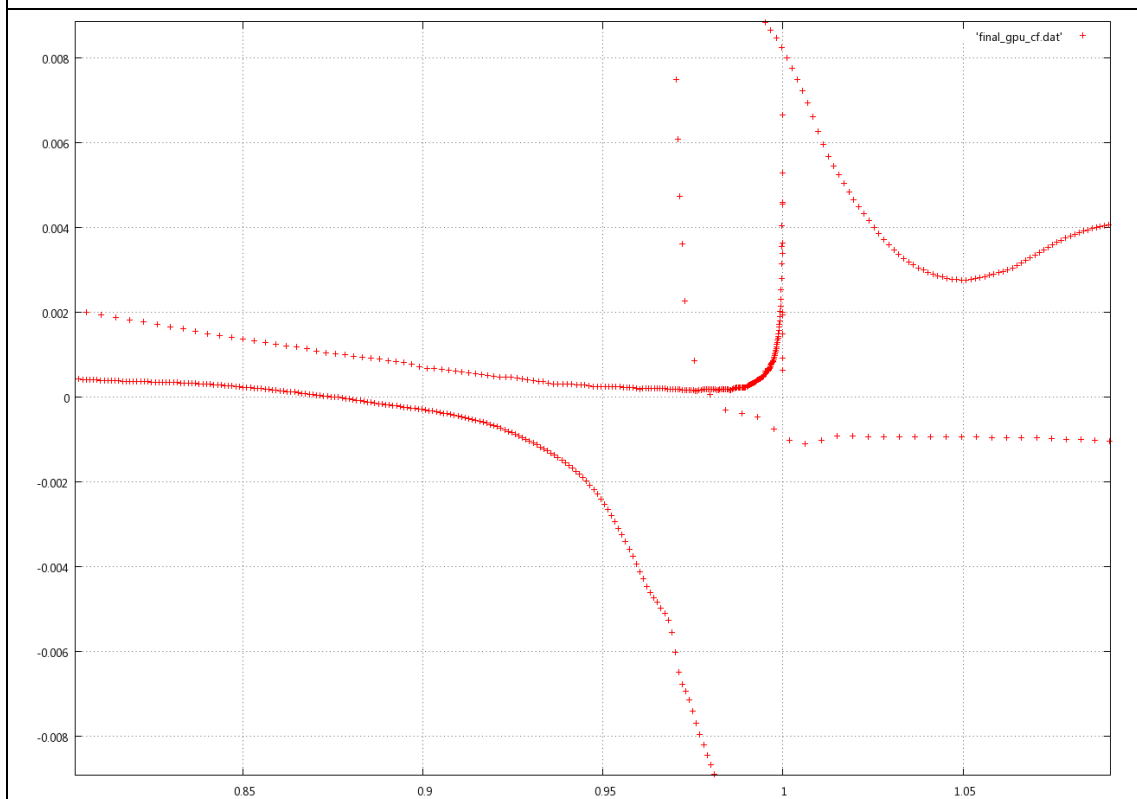
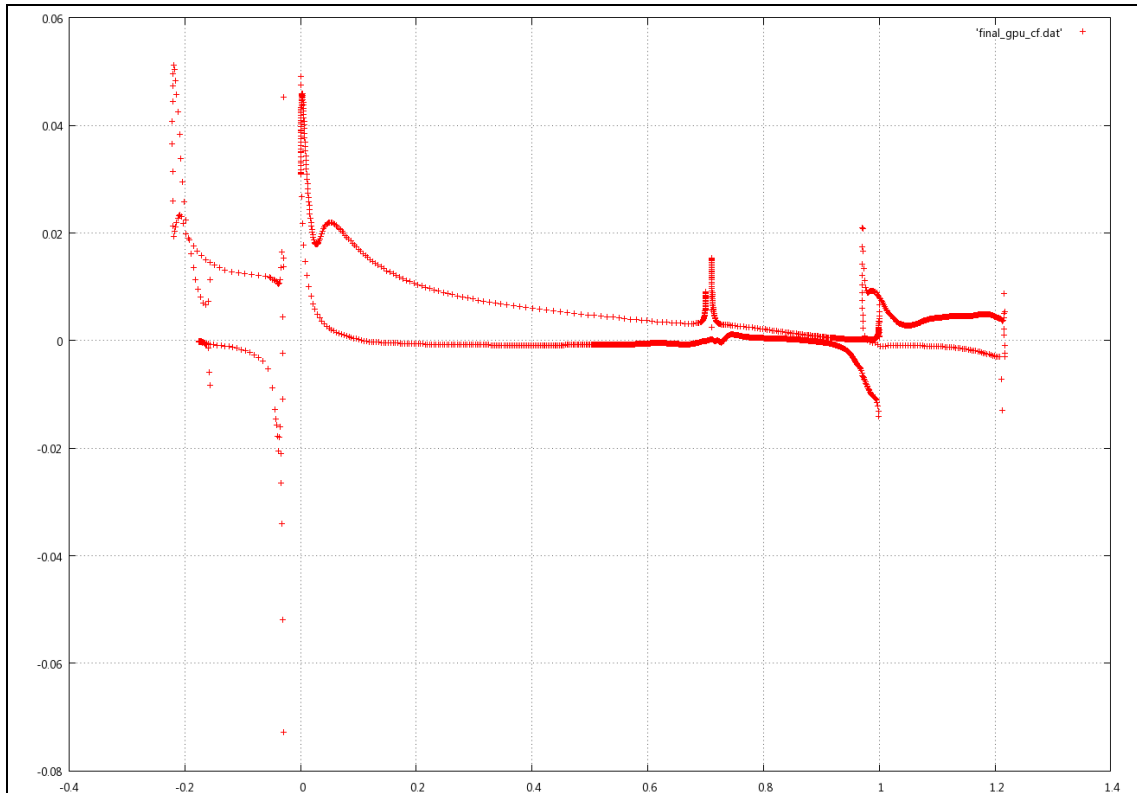
- $x_{slot} = 0.70$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.888$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.909$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης



Σχήμα 4.14 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 22° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.70.



Σχήμα 4.15 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.70$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

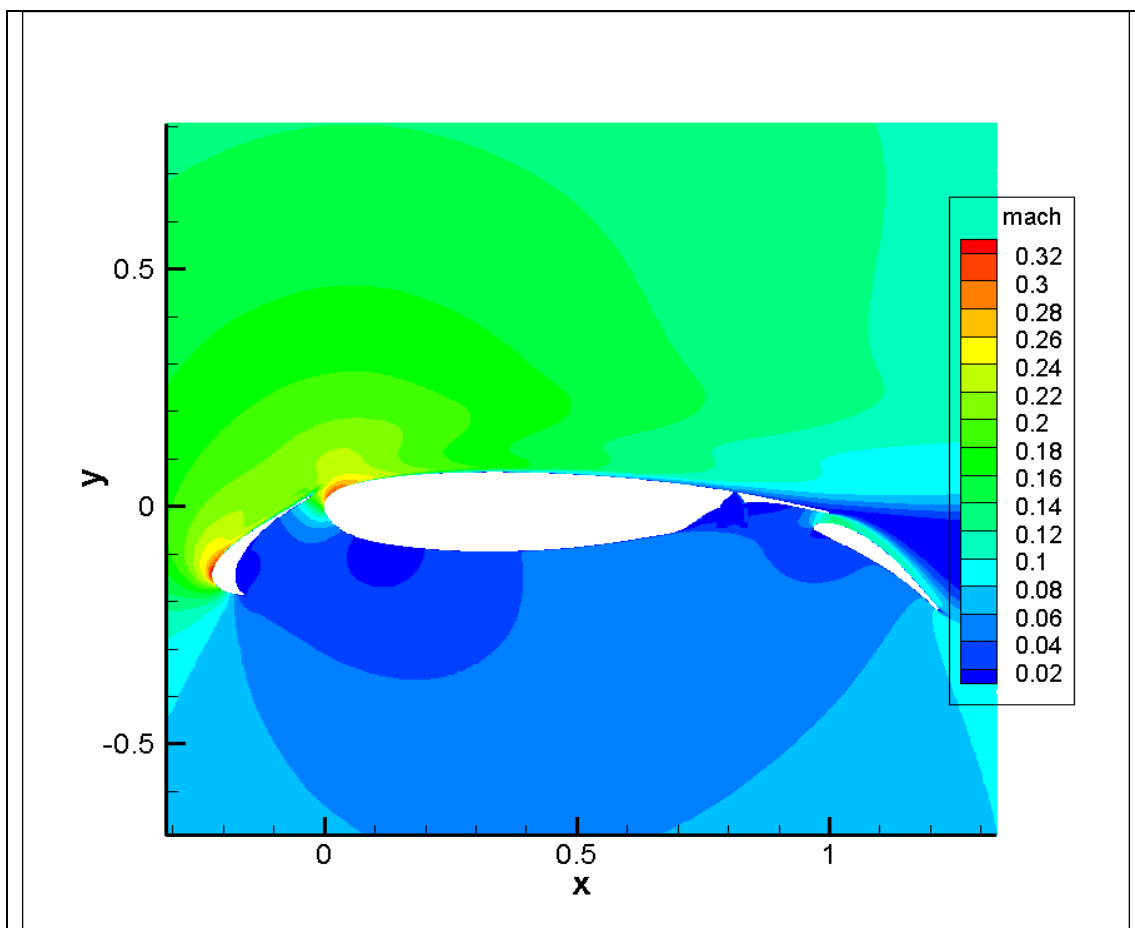
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.81$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

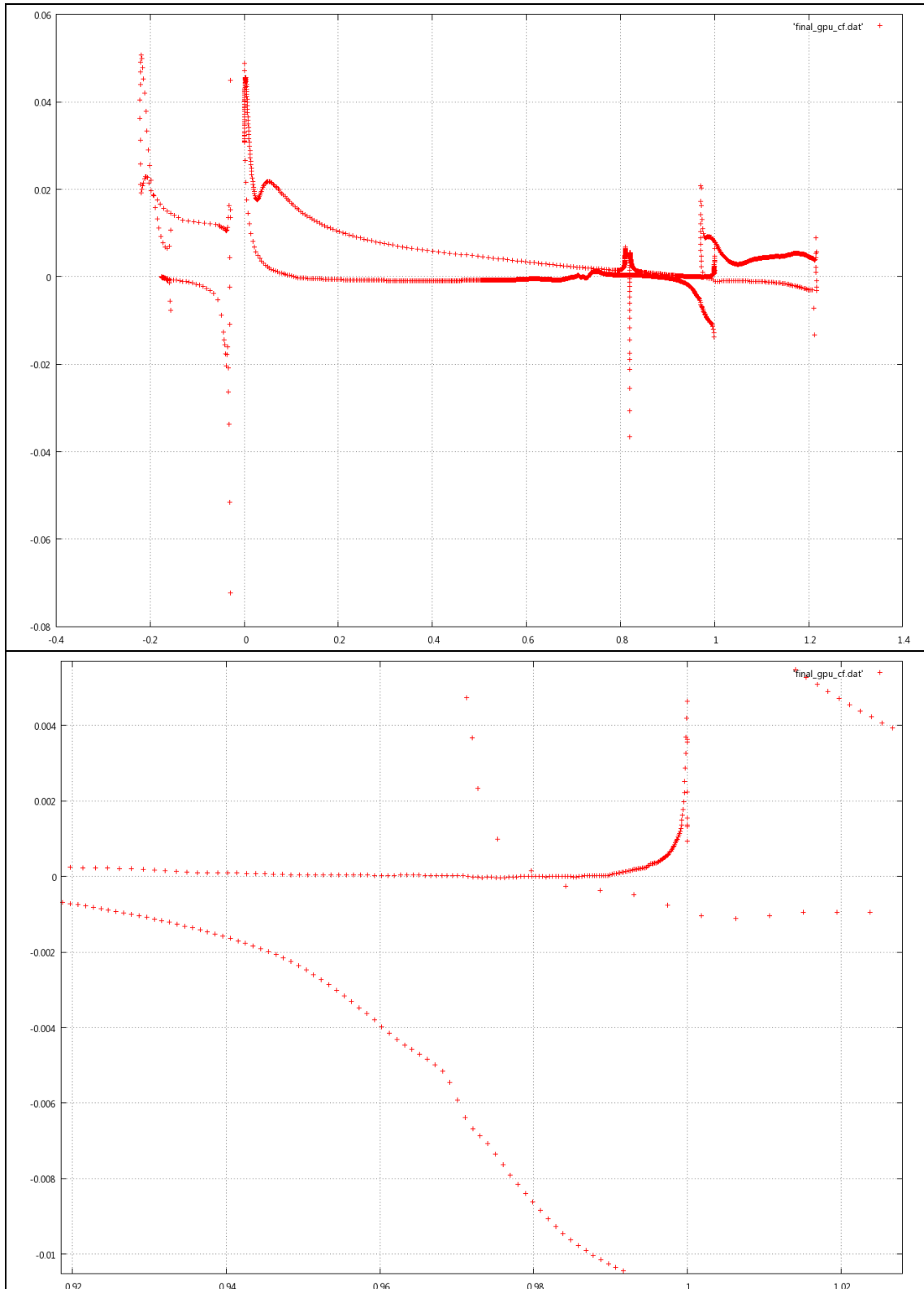
- $x_{slot} = 0.81$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.807$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.972$
- Θέση αποκόλλησης 0.972 (της χορδής)



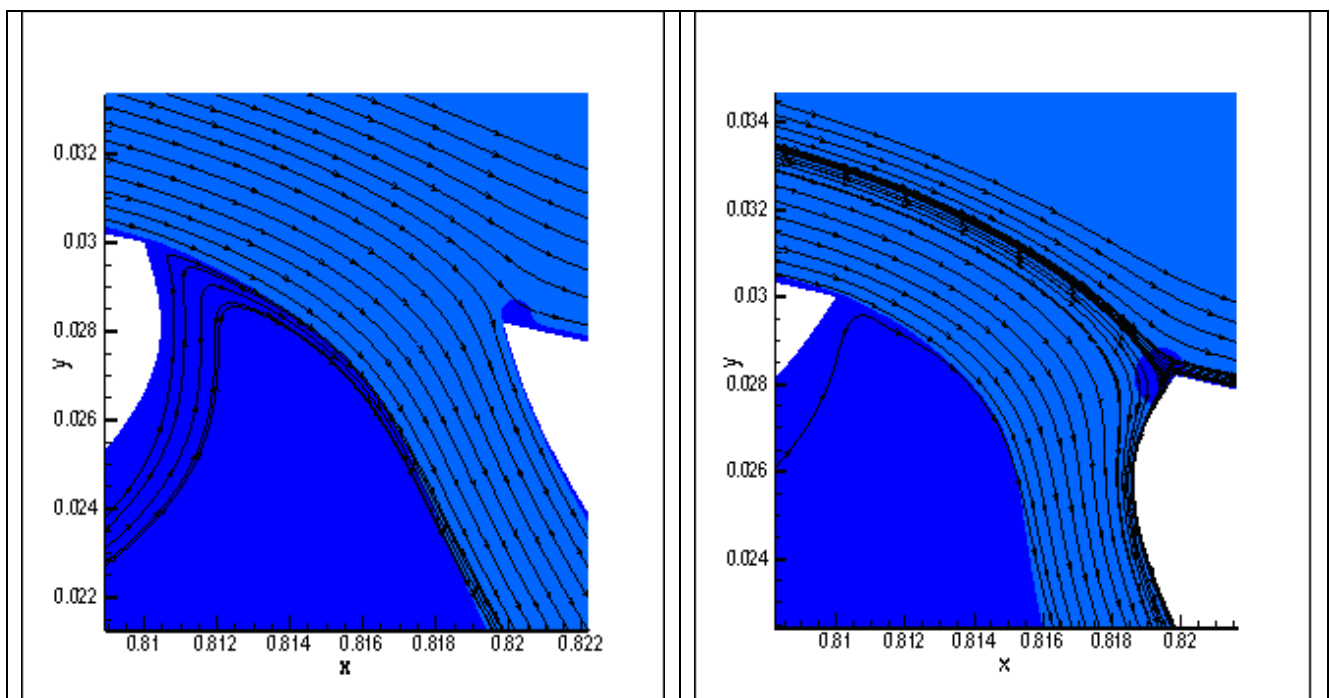
Σχήμα 4.16 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 22° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.81.



Σχήμα 4.17 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.81$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής.

Από την παραπάνω επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν για τις θέσεις της οπής της δέσμης $x_{slot}=0.50$ ($C_L= 5.891$ $C_D= 0.816$) και $x_{slot}=0.60$ ($C_L= 5.893$ $C_D= 0.861$) ενώ σε όλες τις περιπτώσεις είτε δεν παρατηρείται ζώνη αποκόλλησης είτε η ζώνη αποκόλλησης που παρατηρείται είναι πολύ μικρή. Ο μέγιστος συντελεστής άνωσης εμφανίζεται στη θέση $x_{slot}=0.60$ και ο ελάχιστος συντελεστής οπισθέλκουσας στην θέση $x_{slot}=0.50$. Από αυτές τις δύο θέσεις της οπής της δέσμης προτιμότερη είναι η θέση $x_{slot}=0.50$ επειδή η αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας από τη θέση $x_{slot}=0.50$, στη θέση $x_{slot}=0.60$ είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αντίστοιχη αύξηση του συντελεστή άνωσης.

Το γεγονός ότι σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν καλύτερα για γωνία της δέσμης $\theta_{jet}=-30^\circ$ μπορεί να κατανοηθεί ευκολότερα με τη βοήθεια του σχήματος 4.18, στο οποίο παρουσιάζονται οι γραμμές της ροής στην οπή της δέσμης για γωνίες της δέσμης $\theta_{jet}=-30^\circ$ και $\theta_{jet}=30^\circ$. Στην πρώτη περίπτωση για γωνία $\theta_{jet}=-30^\circ$ το αναρροφώμενο ρευστό εισέρχεται εφαπτομενικά στα τοιχώματα της δέσμης ενώ στη δεύτερη για γωνία $\theta_{jet}=30^\circ$ μέρος σε μια περιοχή το ρευστό εισέρχεται κάθετα στα τοιχώματα της και για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα στην περίπτωση όπου $\theta_{jet}=-30^\circ$ είναι καλύτερα.



Σχήμα 4.18 Γραμμές ροής ρευστού στην περιοχή της οπής της δέσμης για γωνία α) $\theta_{jet}=-30^\circ$ και β) $\theta_{jet}=30^\circ$.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ένα ακόμα σενάριο υπολογισμών με την τιμή της γωνίας της επ'άπειρο ροής να είναι ίση με $\alpha_\infty=20^\circ$. Σε αυτήν την περίπτωση ακόμα και χωρίς την ύπαρξη της δέσμης αναρρόφησης παρουσιάζεται μία πολύ μικρή ζώνη αποκόλλησης. Η επίλυση της ροής έγινε για να μελετηθεί η συμπεριφορά της ροής και οι μεταβολές που υφίστανται τα αεροδυναμικά

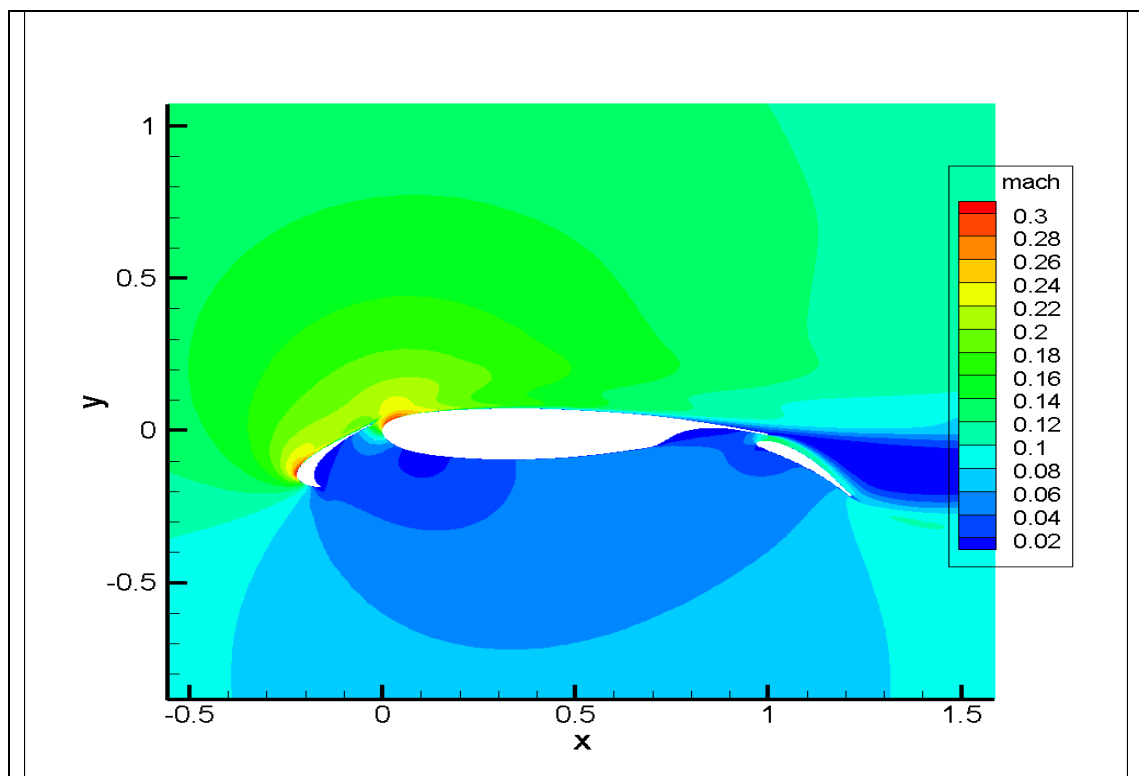
χαρακτηριστικά της υπεραντωτικής διάταξης στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου δεν παρατηρείται σημαντική αποκόλληση της ροής κατά μήκος της υπεραντωτικής διάταξης. Και σε αυτήν την περίπτωση οι αριθμοί Mach και Reynolds είναι: $M_\infty=0.1$, $Re=1.000.000$.

Στη συνέχεια έγινε η επίλυση της ροής με την παρουσία δέσμης αναρρόφησης. Όπως και στο προηγούμενο σετ υπολογισμών η επίλυση έγινε για θέσεις οπής της δέσμης $x_{slot} = 0.50, 0.60, 0.70$ και 0.81 . Σε αυτήν την περίπτωση όμως η γωνία της δέσμης παρέμεινε σταθερή και ίση με $\theta_{jet} = -30^\circ$, αφού στο προηγούμενο σετ υπολογισμών παρατηρήθηκε ότι για τη συγκεκριμένη γωνία προκύπτουν οι καλύτεροι συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας σε κάθε θέση της οπής της δέσμης. Στις υπόλοιπες σταθερές παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι τιμές: $SlotWidth = 0.01$, $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

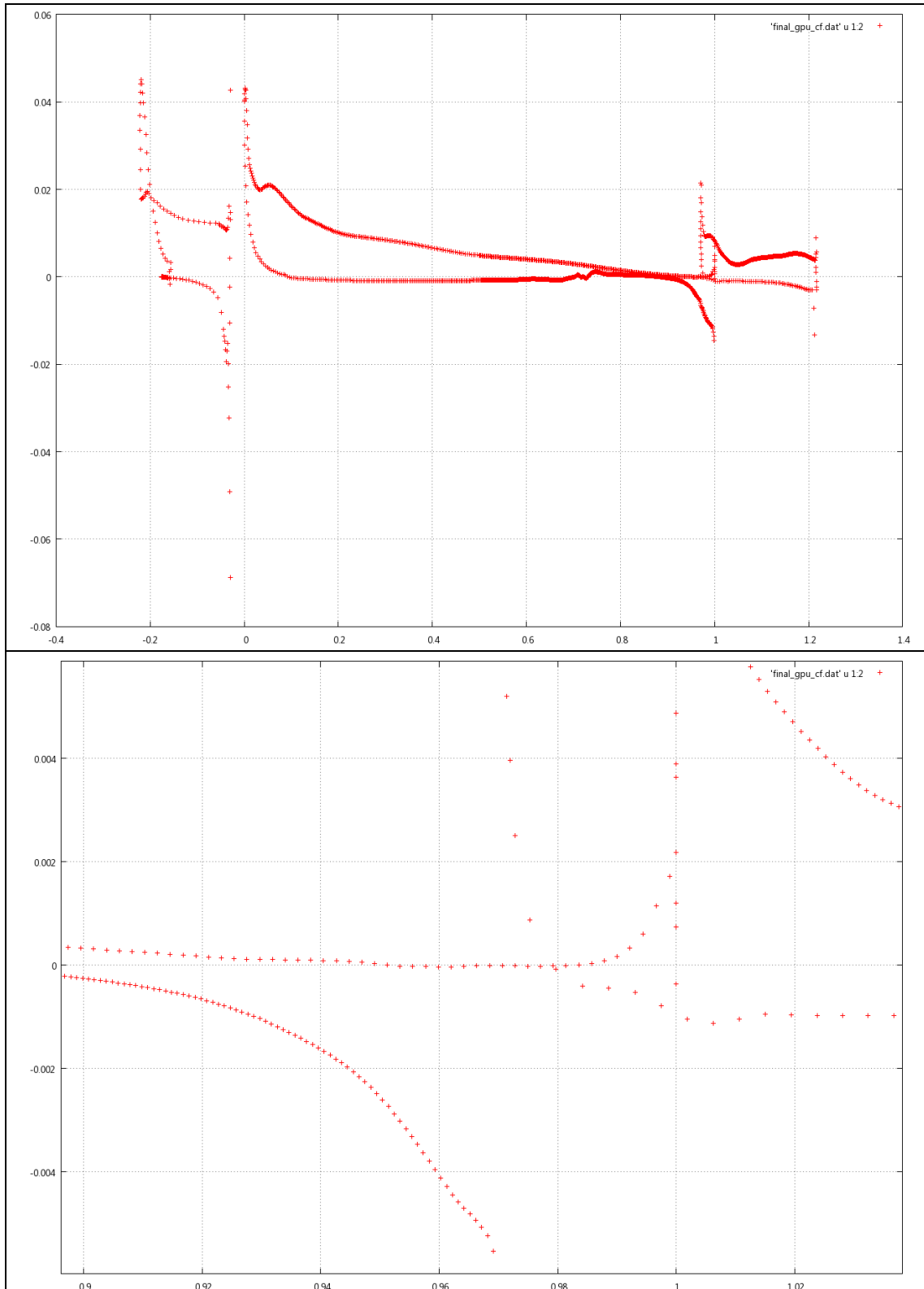
Αποτελέσματα για γωνία $\alpha = 20^\circ$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων ροής για τη συγκεκριμένη γωνία είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 4.458$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.196$
- Θέση αποκόλλησης 0.953 (της χορδής)



Σχήμα 4.19 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 20° ($M_\infty=0.1$).



Σχήμα 4.20 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης. Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής.

Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται ελάχιστη αποκόλληση της ροής, καθώς από το σχήμα 4.20 παρατηρείται ότι ο συντελεστής τριβής γίνεται οριακά αρνητικός στο διάστημα 0.953-0.984 της χορδής.

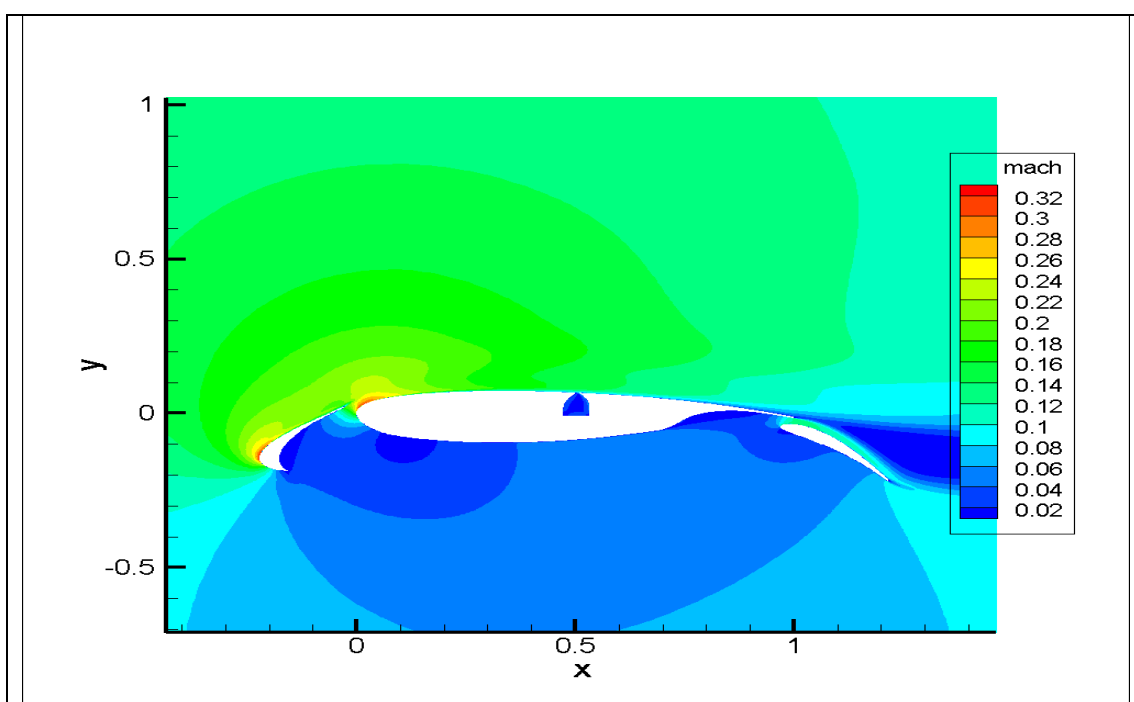
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.50$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

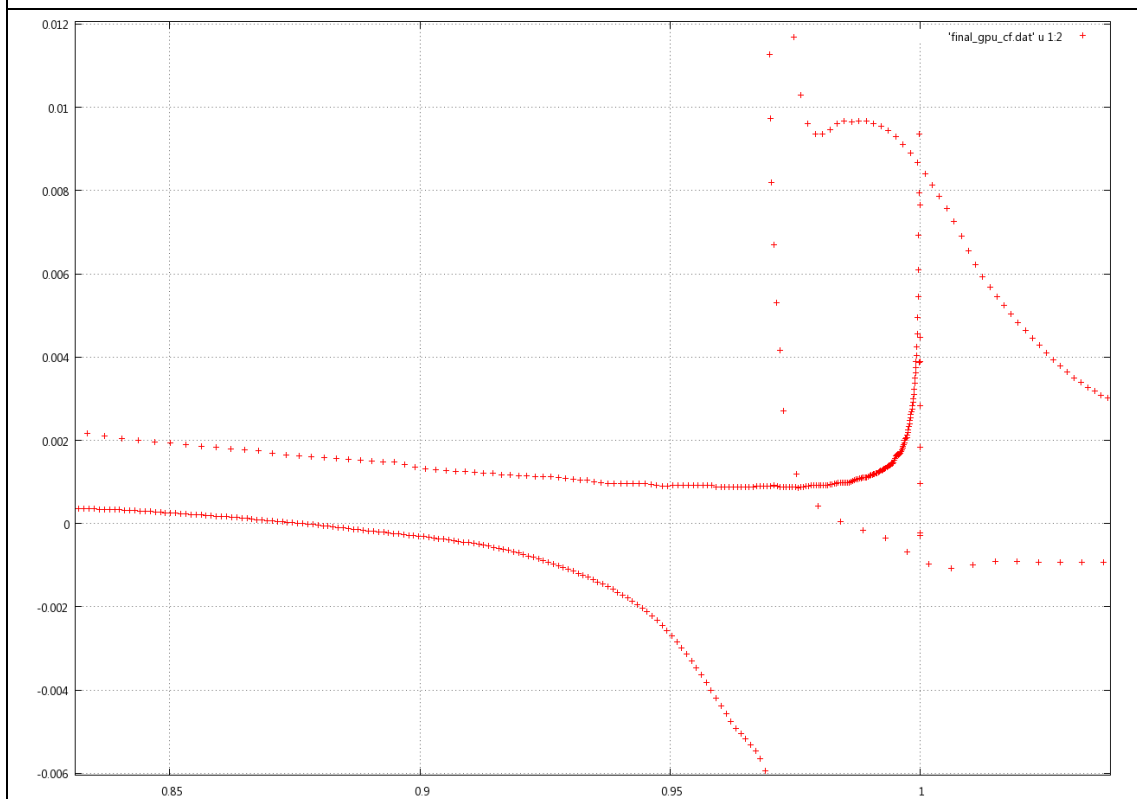
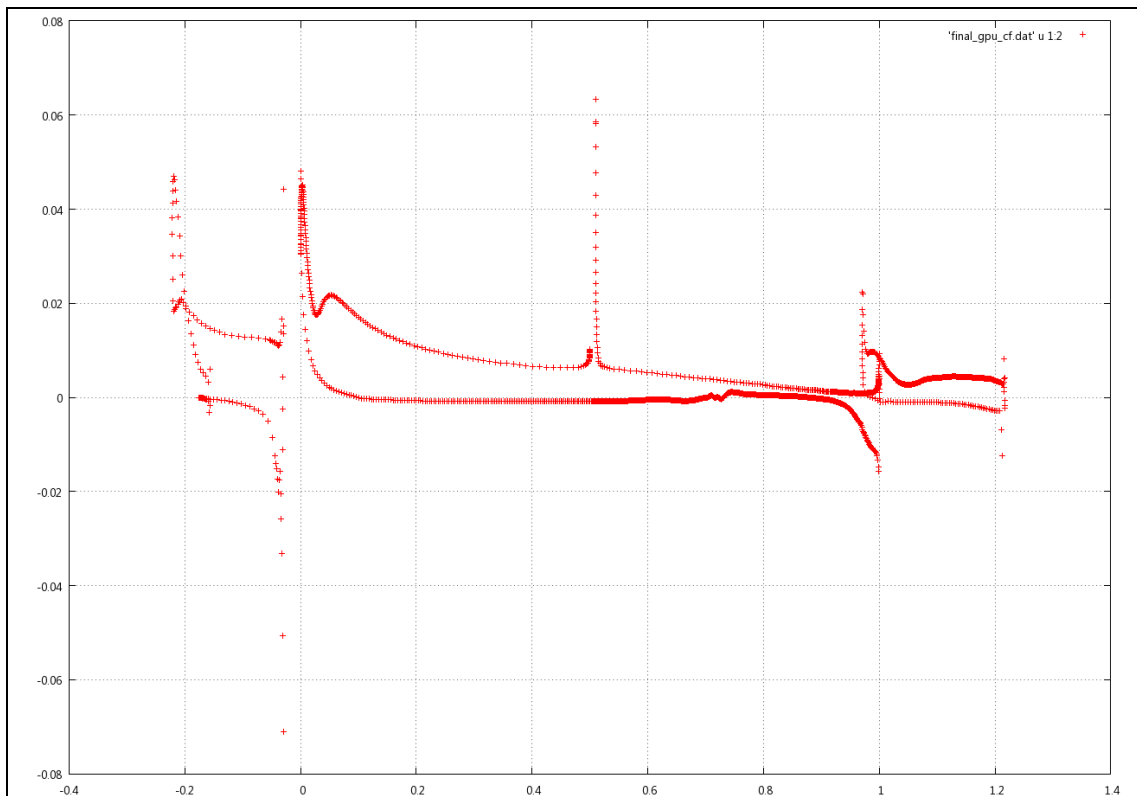
- $x_{slot} = 0.50$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.931$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.752$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης



Σχήμα 4.21 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 20° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.50.



Σχήμα 4.22 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.50$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

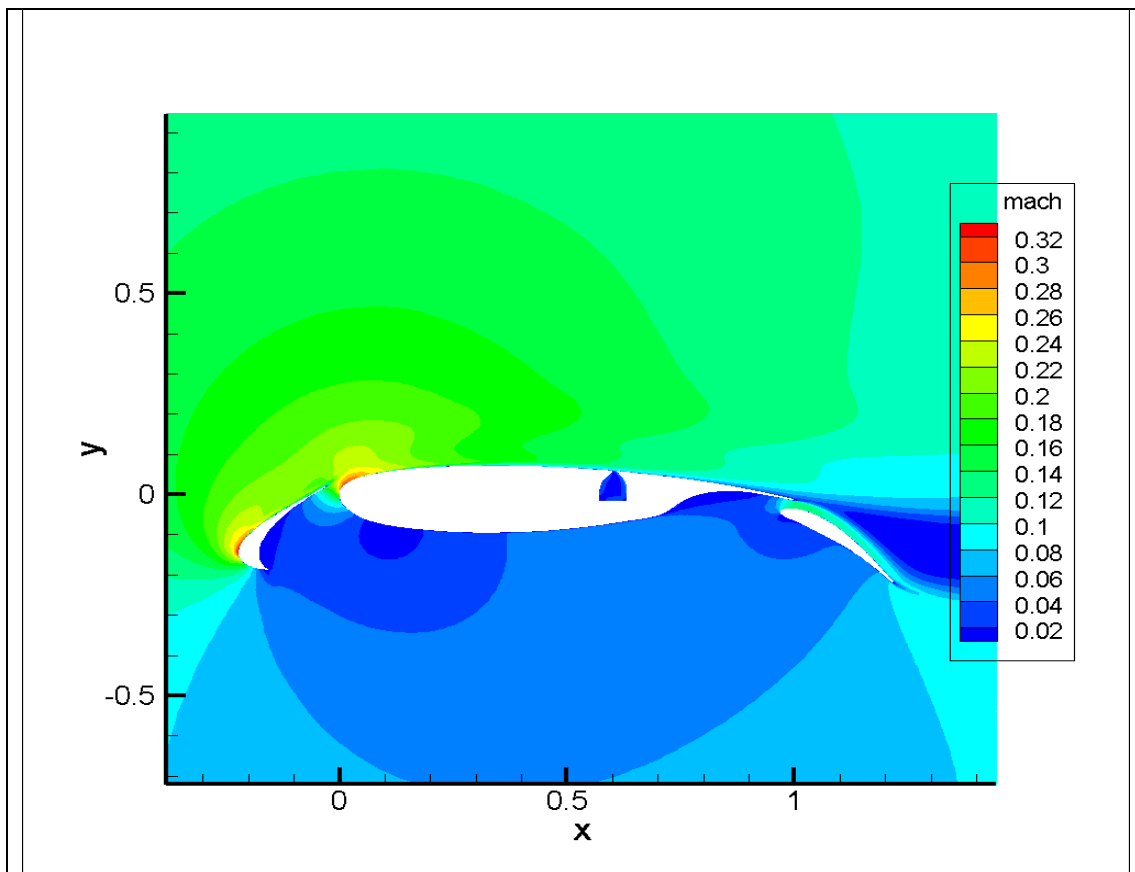
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.60$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

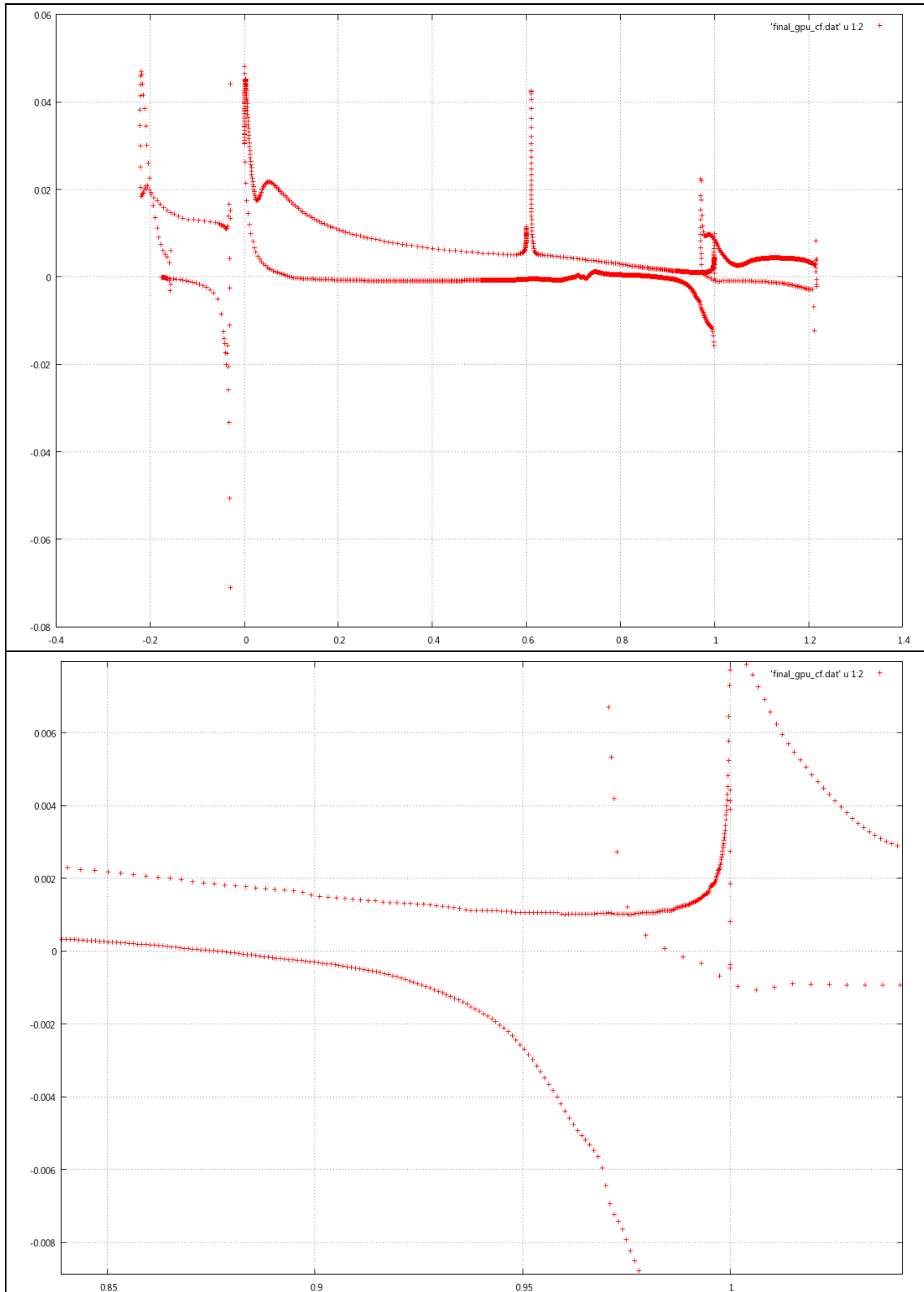
- $x_{slot} = 0.60$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.917$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.796$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης



Σχήμα 4.23 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 20° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.60.



Σχήμα 4.24 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.60$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

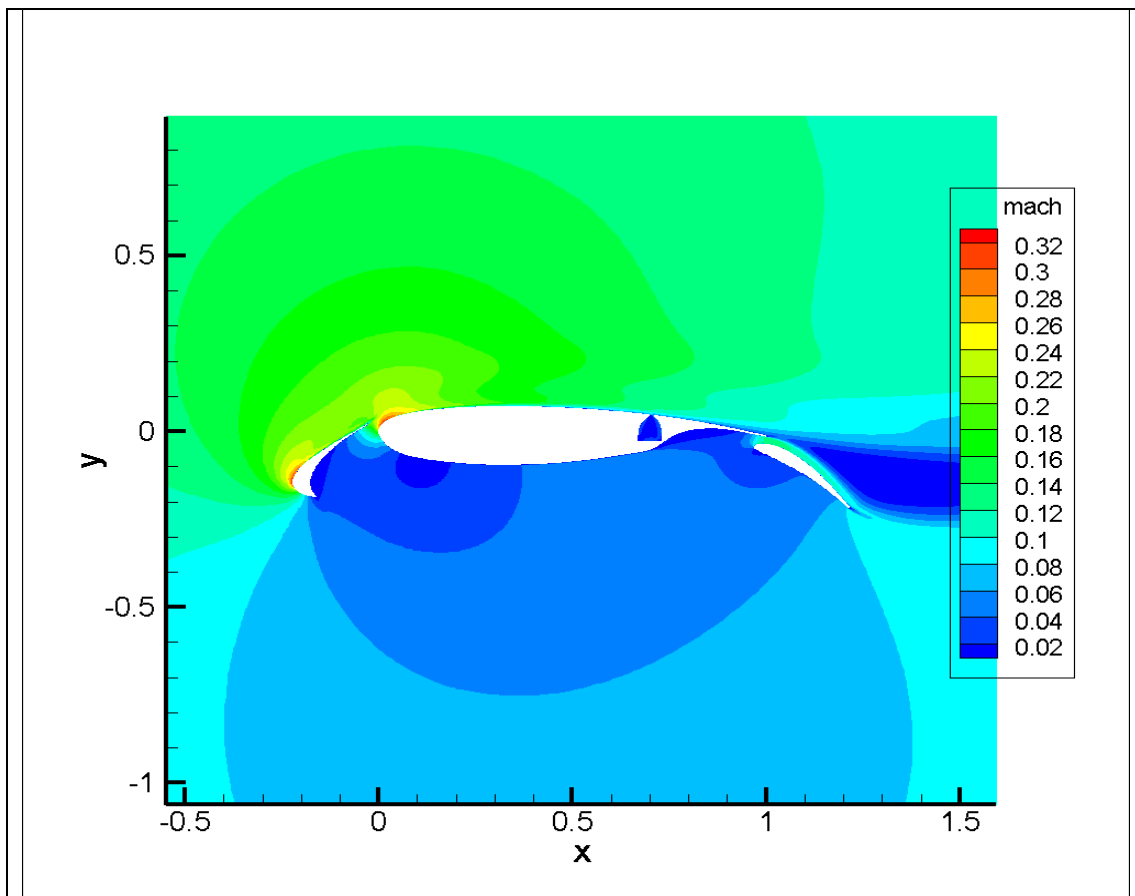
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.70$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

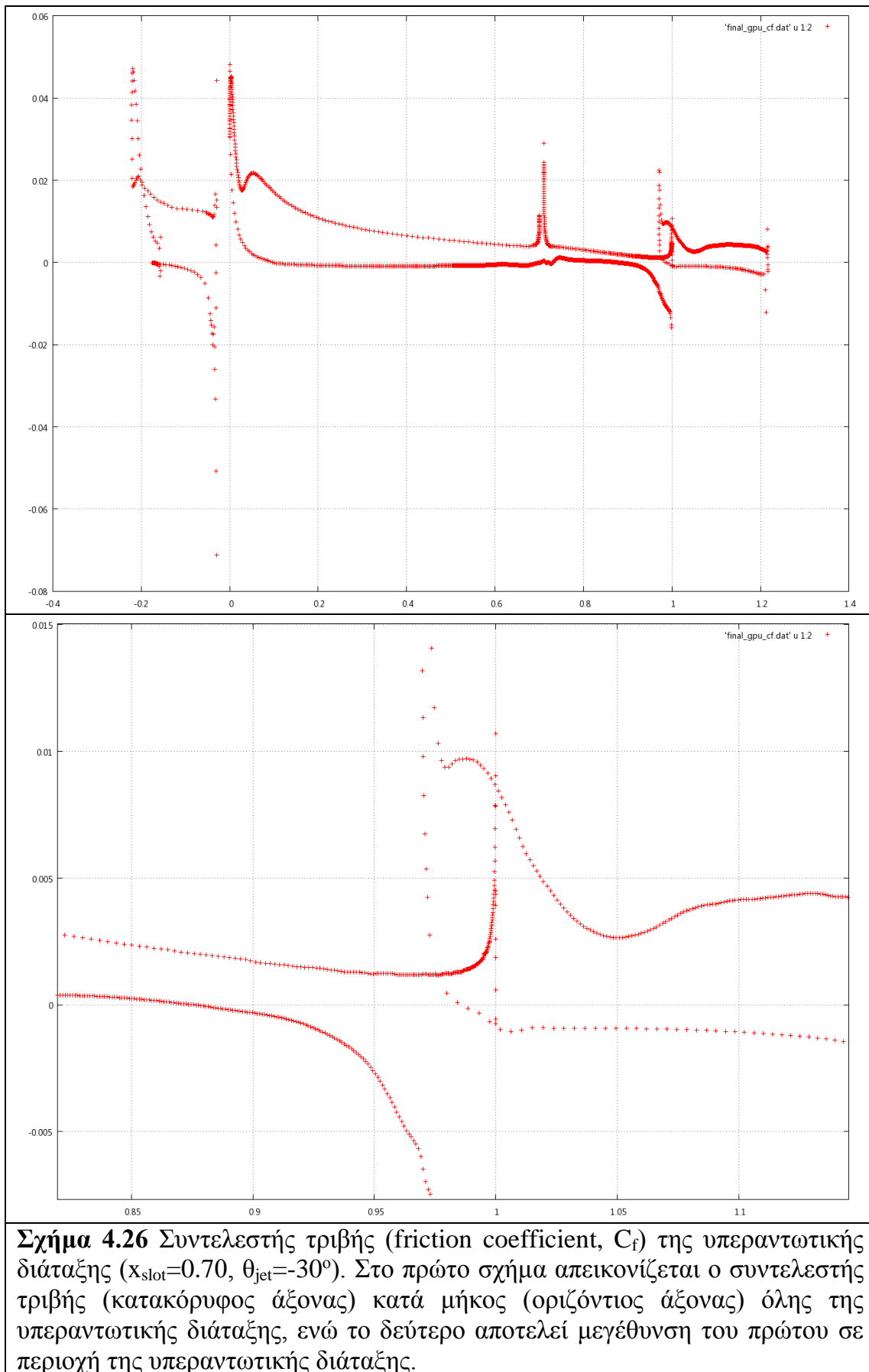
- $x_{slot} = 0.70$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.911$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.844$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης



Σχήμα 4.25 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ'άπειρο ροής ίση με 20° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.70.



Σχήμα 4.26 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.70$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

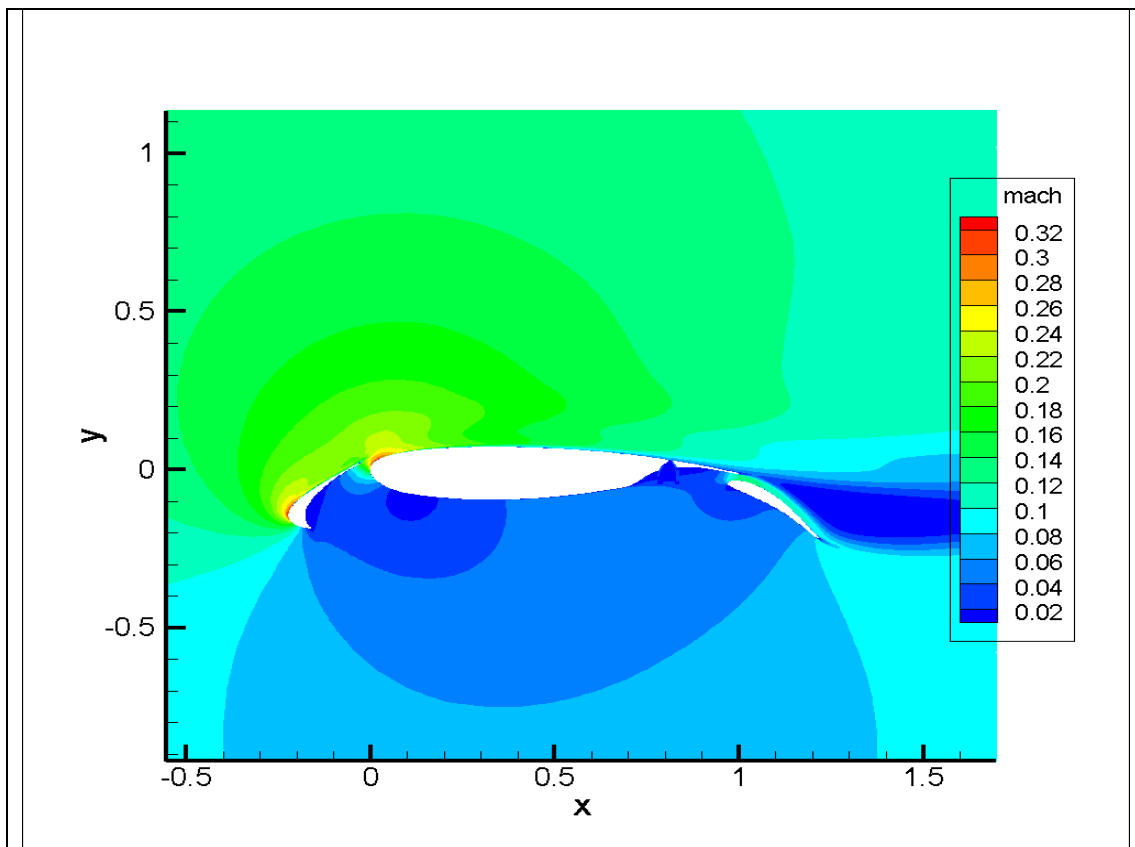
Αποτελέσματα για $x_{slot}=0.81$

Στις παραμέτρους της δέσμης δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

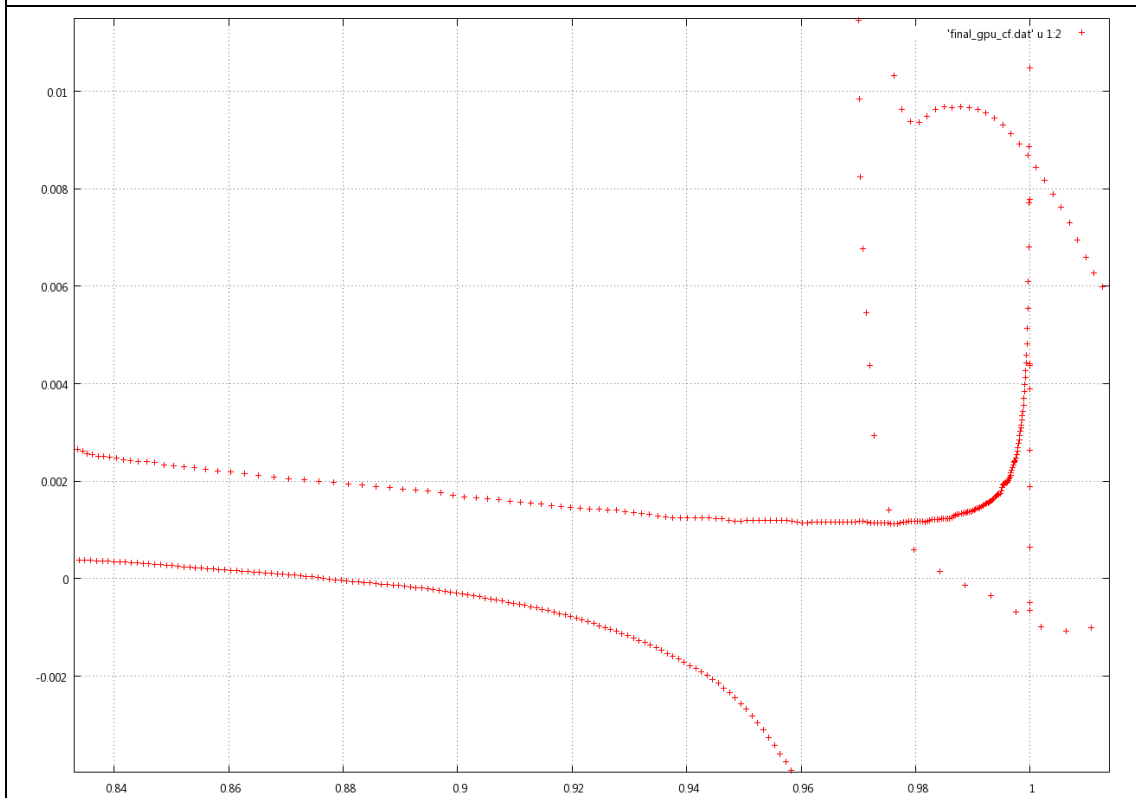
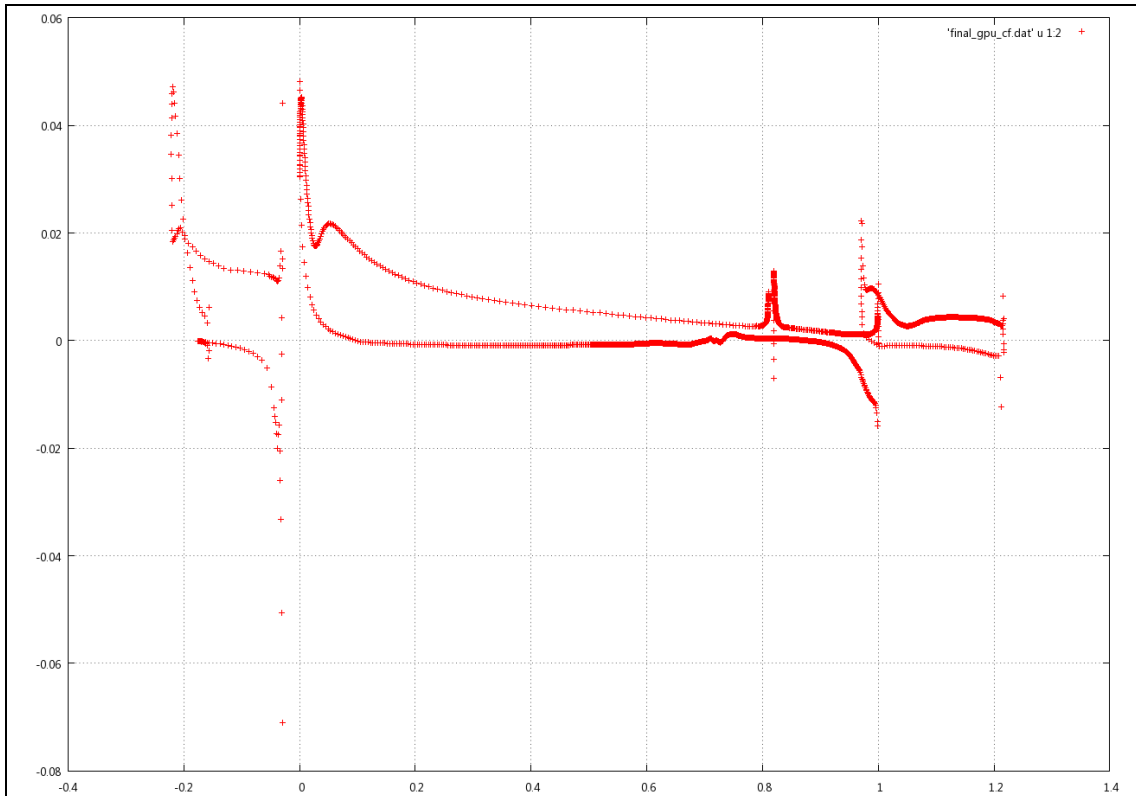
- $x_{slot} = 0.81$
- $\theta_{jet} = -30^\circ$
- $SlotWidth = 0.01$
- $\rho U_{jet,x} = 0.001$, $\rho U_{jet,y} = 0.02$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

- Συντελεστής Άνωσης $C_L = 5.873$
- Συντελεστής Οπισθέλκουσας $C_D = 0.906$
- Δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκόλληση στο κύριο σώμα της υπεραντωτικής διάταξης



Σχήμα 4.27 Πεδίο Mach της ροής γύρω από την υπεραντωτική διάταξη για γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με 20° ($M_\infty=0.1$) και θέση οπής της δέσμης 0.81.



Σχήμα 4.28 Συντελεστής τριβής (friction coefficient, C_f) της υπεραντωτικής διάταξης ($x_{slot}=0.81$, $\theta_{jet}=-30^\circ$). Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται ο συντελεστής τριβής (κατακόρυφος άξονας) κατά μήκος (οριζόντιος άξονας) όλης της υπεραντωτικής διάταξης, ενώ το δεύτερο αποτελεί μεγέθυνση του πρώτου σε περιοχή της υπεραντωτικής διάταξης.

Από τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω στους πίνακες 4.3 και 4.4 προκύπτει ότι, και σε αυτήν την περίπτωση, η προτιμότερη θέση για την τοποθέτηση της οπής της δέσμης είναι η $x_{slot}=0.50$. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μία μη αναμενόμενη αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας με την παρουσία της δέσμης αναρρόφησης.

x_{slot}	-	0.50	0.60	0.70	0.81
C_L	4.458	5.931	5.917	5.911	5.873

Πίνακας 4.3 Οι συντελεστές άνωσης που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής. Στην πρώτη σειρά αναγράφονται οι θέσεις της οπής της δέσμης x_{slot} . Η μεγαλύτερη τιμή σημειώνεται με έντονα ψηφία (bold).

x_{slot}	-	0.50	0.60	0.70	0.81
C_D	0.196	0.752	0.796	0.844	0.906

Πίνακας 4.4 Οι συντελεστές οπισθέλκουσας που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής. Στην πρώτη σειρά αναγράφονται οι θέσεις της οπής της δέσμης x_{slot} . Η μικρότερη τιμή σημειώνεται με έντονα ψηφία (bold).

4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τις επιλύσεις των εξισώσεων της ροής που προηγήθηκαν προέκυψε ότι η καταλληλότερη θέση για την τοποθέτηση της δέσμης αναρρόφησης όταν οι γωνίες της επ'άπειρο ροής είναι ίσες με 20° και 22° μοίρες, είναι η $x_{slot}=0.50$ του μήκους της χορδής και ότι η καταλληλότερη γωνία της δέσμης είναι η $\theta_{jet}=-30^\circ$. Παρατηρείται επίσης ότι στην περίπτωση όπου η γωνία της επ'άπειρο ροής είναι 22° μοίρες η βελτίωση που παρουσιάζεται στον συντελεστή άνωσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη βελτίωση η οποία παρατηρείται στην περίπτωση των 20° μοιρών. Σε αντίθεση με τον συντελεστή οπισθέλκουσας του οποίου η αύξηση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα και στις δύο περιπτώσεις. Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόδοση της δέσμης αναρρόφησης είναι καλύτερη σε περιπτώσεις όπως η πρώτη ($\alpha_\infty=22^\circ$), όπου παρουσιάζεται μία αρκετά μεγάλη ζώνη αποκόλλησης, σε αντίθεση με τη δεύτερη ($\alpha_\infty=20^\circ$), όπου η ροή παρουσιάζει σχεδόν μηδενική αποκόλληση.

Κεφάλαιο 5

Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

5.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια σειρά μελετών που βασίστηκαν σε επιλύσεις των πεδίων ροής μίας διδιάστατης υπεραντωτικής διάταξης εφαρμόζοντας μέθοδο ενεργητικού ελέγχου της ροής (δέσμη αναρρόφησης, σε διάφορες παραλλαγές εφαρμογής), ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά της ροής υπό την επίδραση του. Οι υπεραντωτικές διατάξεις χαρακτηρίζονται από υψηλή άνωση (εξ ου και η ονομασία τους) και για αυτό παρουσιάζουν ευρύτατη εφαρμογή στα αεροσκάφη. Όμως το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροή που παρατηρείται στα τοιχώματα της διάταξης προκαλεί μείωση του συντελεστή άνωσης. Επομένως σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι με την εφαρμογή ελέγχου της ροής να μειωθεί ή ακόμα και να εξαλειφθεί η ζώνη αποκόλλησης κατά μήκος της υπεραντωτικής διάταξης και να μελετηθεί η επίδραση του ελέγχου αυτού στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας.

Πρώτο και κυριότερο τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η γένεση του υπολογιστικού πλέγματος. Ο γενέτης πλέγματος, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία δομημένων πλεγμάτων γύρω από τα τρία στοιχεία της υπεραντωτικής διάταξης και το πρόγραμμα Front, επίσης ανεπτυγμένο στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών και το οποίο εφαρμόζει την τεχνική του προελαύνοντος μετώπου (advancing front technique), χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε το ταίριασμα των επιμέρους πλεγμάτων ώστε να προκύψει ένα ενιαίο υβριδικό υπολογιστικό πλέγμα. Για την κατασκευή πλέγματος με δέσμη αναρρόφησης χρειάζεται οι πλευρές του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης να προσεγγιστούν κάνοντας χρήση πολυωνύμων Bezier. Λόγω όμως της δυσκολίας που υπήρχε στην προσέγγιση της πλευράς υπερπίεσης (pressure side) εξαιτίας της γεωμετρίας της, τροποποιήθηκε ο κώδικας του γενέτη πλέγματος ώστε να έχει τη δυνατότητα να προσεγγίζει την πλευρά υποπίεσης (suction side) κάνοντας χρήση πολυωνύμων Bezier, ενώ για την πλευρά υπερπίεσης να δέχεται τις συντεταγμένες των κόμβων της.

Η ποιότητα του πλέγματος σε τέτοιες εφαρμογές παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή του. Ένα πλέγμα, το οποίο δεν είναι αρκετά πυκνό ιδιαίτερα σε περιοχές κοντά στα τοιχώματα της

υπεραντωτικής διάταξης όπου αναμένεται να υπάρχει αποκόλληση της ροής, οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα κατά την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής. Αποτελεί επομένως ανάγκη το πλέγμα το οποίο κατασκευάζεται να είναι αρκετά πυκνό ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να απεικονίζουν τη ροή με ικανοποιητική ακρίβεια. Αντιθέτως ένα υπερβολικά πυκνό πλέγμα αυξάνει το υπολογιστικό κόστος και το χρόνο που χρειάζεται για την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής σε τέτοιο βαθμό, ώστε η επίλυση να καθίσταται ασύμφορη. Επομένως το υπολογιστικό πλέγμα που κατασκευάζεται πρέπει να είναι ικανό να αποδίδει ακριβή αποτελέσματα από την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής καθώς επίσης η επίλυση των εξισώσεων να εκτελείται μέσα σε λογικά χρονικά πλαίσια. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, στην παρούσα διπλωματική εργασία δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην κατασκευή του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος.

Το δεύτερο τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής που διέπουν την υπεραντωτική διάταξη. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών και πραγματοποιεί την επίλυση των εξισώσεων (RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes με το μοντέλο τύρβης μίας μερικής διαφορικής εξίσωσης των Spalart – Allmaras) σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPUs). Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με την παρουσία μίας δέσμης αναρρόφησης μεταβάλλοντας τη θέση της οπής της δέσμης καθώς και τη γωνία αναρρόφησης, ώστε να μελετηθεί σε κάθε περίπτωση η επίδραση της δέσμης αναρρόφησης στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της υπεραντωτικής διάταξης.

Το γεγονός ότι η επίλυση των εξισώσεων ροής πραγματοποιείται σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα καθώς η χρήση των GPUs επιταχύνει την επίλυση περίπου 40 φορές σε σχέση με τις CPUs. Επιπλέον το χαμηλό κόστος επένδυσης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων, τα οποία λόγω του μεγάλου υπολογιστικού τους κόστους ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα να επιλυθούν με τη χρήση των CPUs.

5.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Αρχικά πραγματοποιήθηκε επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής με γωνία της επ' άπειρο ροής ίση με $\alpha_\infty=22^\circ$. Η δέσμη αναρρόφησης τοποθετήθηκε στις θέσεις $x_{slot} = 0.50, 0.60, 0.70$ και 0.81 και για κάθε θέση της οπής της δέσμης οι εξισώσεις της ροής επιλύθηκαν για γωνίες της δέσμης $\theta_{jet} = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$. Από τα αποτελέσματα φάνηκε, ότι σε όλες τις θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκε η οπή της δέσμης, μεγαλύτερος συντελεστής άνωσης και μικρότερος συντελεστής οπισθέλκουσας, σε κάθε περίπτωση, προκύπτει όταν

η γωνία της δέσμης είναι $\theta_{jet} = -30^\circ$. Με βάση αυτό το συμπέρασμα η επόμενη επίλυση των εξισώσεων της ροής για γωνία της επ'άπειρο ροής ίση με $\alpha_\infty=20^\circ$ πραγματοποιήθηκε με σταθερή τιμή της γωνίας της δέσμης ($\theta_{jet} = -30^\circ$) με μεταβλητή μόνο τη θέση της οπής της δέσμης, στην οποία δόθηκαν οι ίδιες τιμές με την προηγούμενη περίπτωση. Συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 και 5.2.

	$\alpha_\infty=22^\circ$		$\alpha_\infty=20^\circ$	
x_{slot}	C_L	Κέρδος	C_L	Κέρδος
-	3.991	-	4.458	-
0.50	5.891	1.9	5.931	1.473
0.60	5.893	1.902	5.917	1.459
0.70	5.888	1.897	5.911	1.453
0.81	5.807	1.816	5.873	1.415

Πίνακας 5.1 Συντελεστές άνωσης που προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το πεδίο ροής ($\theta_{jet}=-30^\circ$).

	$\alpha_\infty=22^\circ$		$\alpha_\infty=20^\circ$	
x_{slot}	C_D	Κέρδος	C_D	Κέρδος
-	0.243	-	0.196	-
0.50	0.816	-0.573	0.752	-0.556
0.60	0.861	-0.618	0.796	-0.6
0.70	0.909	-0.666	0.844	-0.648
0.81	0.972	-0.73	0.906	-0.71

Πίνακας 5.2 Συντελεστές οπισθέλκουσας που προέκυψαν από την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το πεδίο ροής ($\theta_{jet}=-30^\circ$).

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις η καταλληλότερη, για την τοποθέτηση της δέσμης αναρρόφησης, θέση είναι η $x_{slot} = 0.50$ της χόρδης του κύριου σώματος της υπεραντωτικής διάταξης. Επιπλέον παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή άνωσης όταν $\alpha_\infty=22^\circ$ είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση όπου $\alpha_\infty=20^\circ$, ενώ η αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας και στις δύο περιπτώσεις είναι περίπου ίδια. Προκύπτει επομένως ότι σε περιπτώσεις με μεγάλη ζώνη αποκόλλησης η απόδοση της δέσμης αναρρόφησης είναι καλύτερη σε σχέση με περιπτώσεις όπου η ροή παρουσιάζει σχεδόν μηδενική αποκόλληση.

5.3 Μελλοντική εργασία

Κλείνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρονται θέματα τα οποία αφορούν τις υπεραντωτικές διατάξεις και τα οποία θα μπορούσαν να διερευνηθούν στο μέλλον. Θα μπορούσε να ερευνηθεί η επίδραση της κίνησης των flap και slat στη συμπεριφορά των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της υπεραντωτικής διάταξης. Επίσης αντίστοιχη μελέτη θα μπορούσε να γίνει στην περίπτωση τριδιάστατης υπεραντωτικής διάταξης. Η επιτάχυνση στην πρόλεξη των αποτελεσμάτων από τη χρήση των μονάδων επεξεργασίας γραφικών για την επίλυση εξισώσεων που διέπουν πεδία ροής, έχει δώσει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με αυξημένο υπολογιστικό κόστος, όπως αυτό της τριδιάστατης υπεραντωτικής διάταξης.

Βιβλιογραφία

- [1] J.J. Thibert, J. Reneaux, F. Moens, J. Priest. ONERA activities on high lift devices for transport aircraft. *Aeronautical Journal*, 99:395-411, 1995.
- [2] C. Walker. How Airplane Flaps Work.
<http://www.mademan.com/mm/how-airplane-flaps-work.html> , 2010.
- [3] Γ. Ρήγας. Προσομοίωση και χαμηλού κόστους βελτιστοποίηση του ενεργητικού ελέγχου ροής ρευστού γύρω από αεροτομή, σε κάρτες γραφικών. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2010
- [4] M. Gad-el-Hak. *Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge University Press, 2000.
- [5] S. Collis, R. Joslin, A. Seifert, V. Theofilis. Issues in active flow control: theory, control, simulation, and experiment. *Progress in Aerospace Sciences* 40 (2004) 237–289, 2004.
- [6] Γ. Μπεργελές. *Υπολογιστική Ρευστομηχανική*. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2006.
- [7] Γ. Δημητρακόπουλος. Η συνεχής συζηγής μέθοδος για το βέλτιστο έλεγχο ροής με δέσμες ρευστού – Εφαρμογές εσωτερικής και εξωτερικής αεροδυναμικής. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2012.
- [8] L. Kral. *Active flow control technology*. Washington University, St. Louis, Missouri.
- [9] Ξ. Τρομπούκης. Υπολογιστική ανάλυση και παραμετρική διερεύνηση της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης για τον έλεγχο οριακών στρωμάτων. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2007.
- [10] Σ.Ε. Τιτάκης-Καρτσωνάκης. Προγραμματισμός και πιστοποίηση μεθόδου προελαύνοντος μετώπου για τη γένεση διδιάστατων μη-δομημένων πλεγμάτων σε πτερυγώσεις στροβιλομηχανών. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 1998
- [11] P. Spalart, S. Allmaras. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *La Recherche Aerospaciale*, 1:5-21, 1994.

- [12] I.C. Kampolis, X.S. Trompoukis, V.G. Asouti, K.C. Giannakoglou. CFD-based Analysis and Two-level Aerodynamic Optimization on Graphics Processing Units. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 199, No. 9-12, pp. 712-722, 2010.
- [13] V.G. Asouti, X.S. Trompoukis, I.C. Kampolis, K.C. Giannakoglou. Unsteady CFD Computations Using Vertex-Centered Finite Volumes for Unstructured Grids on Graphics Processing Units. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2011.
- [14] http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html
- [15] <http://www.geforce.com/hardware/desktop-gpus/geforce-gtx-280>
- [16] <http://www.geforce.com/hardware/desktop-gpus/geforce-gtx-285>