



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Προσομοίωση και χαμηλού κόστους  
βελτιστοποίηση του ενεργητικού ελέγχου ροής  
ρευστού γύρω από αεροτομή, σε κάρτες γραφικών

Διπλωματική Εργασία  
Γεωργίου Δ. Ρήγα

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2010



## Ευχαριστίες

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Κ. Γιαννάκογλου, Καθηγητή ΕΜΠ, για την καθοδήγησή του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ξ. Τρομπούκη για την βοήθεια, τις γνώσεις και την εμπειρία που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης εργασίας αλλά και την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ για την πολύ χρήσιμη υποστήριξή τους.



Στους φίλους μου



Προσομοίωση και χαμηλού κόστους βελτιστοποίηση του ενεργητικού ελέγχου ροής ρευστού γύρω από αεροτομή, σε κάρτες γραφικών

## Διπλωματική Εργασία Γεωργίου Δ. Ρήγα

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2010

Στη διπλωματική αυτή εργασία αναπτύσσεται μια αριθμητική μέθοδος ενεργού ελέγχου της ροής γύρω από μεμονωμένη αεροτομή με εφαρμογή της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης. Παράλληλα, εφαρμόζεται μια μέθοδος βελτιστοποίησης των παραμέτρων της παραπάνω τεχνικής σε αεροτομή με μια ή περισσότερες οπές αναρρόφησης. Βασικό τμήμα και συνεισφορά της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μιας πλήρους και αυτοματοποιημένης διαδικασίας δημιουργίας οπών δεσμών αναρρόφησης ή έγχυσης ρευστού, αριθμητικής προσομοίωσης της μεθόδου και βελτιστοποίησης των αντίστοιχων παραμέτρων σε αεροτομές. Η διαδικασία εφαρμόζεται και επιδεικνύεται σε αεροτομή τύπου NACA 4415. Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της δέσμης, κατασκευάζεται μη-δομημένο υπολογιστικό πλέγμα γύρω από την αεροτομή και ακολουθεί η αριθμητική επίλυση της ροής με λογισμικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε κάρτες γραφικών Nvidia). Η χρήση καρτών γραφικών έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της επίλυσης των εξισώσεων ροής περίπου 40 φορές σε σχέση με την επίλυση τους σε επεξεργαστή μονού πυρήνα. Η γένεση της γεωμετρίας και του υπολογιστικού πλέγματος είναι πλήρως αυτοματοποιημένη δίνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμου βελτιστοποίησης με παραμέτρους σχεδιασμού τα χαρακτηριστικά της δέσμης. Αυτά είναι η θέση της οπής αναρρόφησης, η γωνία της δέσμης με το τοίχωμα της αεροτομής, το μέγεθος του ανοίγματος της οπής και η παροχή αναρρόφησης. Για την εύρεση των προαναφερθεισών βέλτιστων τιμών χρησιμοποιείται λογισμικό βελτιστοποίησης του ΕΘΣ (EASY) βασισμένο σε εξελικτικούς αλγόριθμους. Τα αποτελέσματα της εργασίας είναι αρκετά ενθαρρυντικά αφού για τη συγκεκριμένη αεροτομή και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ροής υπολογίστηκε αύξηση του συντελεστή άνωσης και μείωση του συντελεστή αντίστασης 59% και 75%, αντίστοιχα.





**National Technical University of Athens**  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FLUIDS SECTION  
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES

## Simulation and low-budget optimization of the active control of flows around airfoils - Solution on GPUs

Diploma Thesis  
Georgios D. Rigas

Advisor: K.C. Giannakoglou

*July 2010*

In this diploma thesis a numerical method of active flow control around isolated airfoil, using steady suction technique, is developed. Furthermore, an optimization procedure is applied on the aforementioned technique for an airfoil with one or more suction slots. The main contribution of this thesis is the development of a fully automated procedure of designing slots with blowing or suction jets, numerical simulation of the method and optimization of the control variables, around airfoils. The procedure is applied on a NACA 4415 airfoil. Given the design parameters of the jet, an unstructured grid is generated around the airfoil and the Navier-Stokes equations are solved on Nvidia GPUs using software developed in the Laboratory of Thermal Turbomachines (LTT). The use of GPUs results in accelerating the solving of Navier-Stokes equations around 40 times compared with the solving of the equations on a single core CPU. The geometry building and grid generation are fully automated, which enables the use of optimization algorithm taking as design variables the jet attributes. These are the position of the suction slot, the angle between jet and airfoil surface, the width of the slot and the suction mass flow. The optimal values of these design variables are found using optimization software of LTT (EASY) based on evolutionary algorithms. The results of the work done are extremely positive since, for the specific airfoil and under specific flow conditions, the lift coefficient increased and the drag coefficient decreased 59% and 75%, respectively.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1-1</b>
1.1	Ενεργητικός Έλεγχος Ροής . . . . .	1-1
1.2	Επισκόπηση Σχετικής Βιβλιογραφίας . . . . .	1-3
1.3	Σχετική Έρευνα στο ΕΘΣ . . . . .	1-17
<b>2</b>	<b>Γένεση πλέγματος</b>	<b>2-1</b>
2.1	Γένεση πλέγματος γύρω από μεμονωμένη αεροτομή . . . . .	2-1
2.2	Γένεση πλέγματος γύρω από μεμονωμένη αεροτομή με μία δέσμη ελέγχου	2-6
2.3	Γένεση πλέγματος γύρω από απομονωμένη αεροτομή με δύο δέσμες ε- λέγχου . . . . .	2-13
2.4	Κατασκευή καμπυλώσεων στις ενώσεις κοιλότητας επενεργητή και αε- ροτομής . . . . .	2-14
<b>3</b>	<b>Εξισώσεις Navier Stokes πεδίου ροής και επίλυσή τους σε μο- νάδες επεξεργασίας γραφικών (GPUs)</b>	<b>3-1</b>
3.1	Εξισώσεις Navier Stokes . . . . .	3-1
3.2	Επίλυση των εξισώσεων Navier Stokes σε GPUs . . . . .	3-4
<b>4</b>	<b>Παρουσίαση και κριτική αριθμητικών προλέξεων των πεδίων ροής</b>	<b>4-1</b>
4.1	Επίλυση εξισώσεων πεδίου ροής χωρίς δέσμη ελέγχου . . . . .	4-1
4.2	Επίλυση εξισώσεων πεδίου ροής με μια δέσμη ελέγχου . . . . .	4-4
4.2.1	Καθορισμός παραμέτρων της δέσμης . . . . .	4-4
4.2.2	Διερεύνηση του φαινομένου του ελέγχου ροής με αναρρόφηση ρευστού . . . . .	4-5
4.2.3	Διερεύνηση των χαρακτηριστικών της δέσμης . . . . .	4-6
<b>5</b>	<b>Βελτιστοποίηση με Εξελικτικούς Αλγόριθμους</b>	<b>5-1</b>
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης</b>	<b>6-1</b>
6.1	Περίπτωση 1 <sup>η</sup> : 1 ΔΕ, $a_\infty = 12^\circ$ . . . . .	6-2
6.2	Περίπτωση 2 <sup>η</sup> : 1 ΔΕ, $a_\infty = 18^\circ$ . . . . .	6-9
6.3	Περίπτωση 3 <sup>η</sup> : 2 ΔΕ, $a_\infty = 18^\circ$ . . . . .	6-15
<b>7</b>	<b>Ανακεφαλαίωση - Συζήτηση - Συμπεράσματα</b>	<b>7-1</b>



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η σχεδιασμός της πτέρυγας του αεροσκάφους επιδρά σημαντικά στο μήκος απογείωσης, στην ταχύτητα προσέγγισης, στον ρυθμό ανόδου, στην κατανάλωση καυσίμου αλλά και στα εκπεμπόμενα επίπεδα θορύβου και ρύπων του αεροσκάφους καθώς ένα αποδοτικό ανωστικό σύστημα μειώνει την απαιτούμενη ώση [1]. Η απόδοση της πτέρυγας συχνά μειώνεται λόγω της αποκόλλησης της ροής, η οποία αυξάνει την αντίσταση και παράλληλα μειώνει την άνωση. Για την καθυστέρηση ή ακόμη και την αναίρεση της αποκόλλησης μια συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η εφαρμογή μεθόδων ενεργητικού ή παθητικού ελέγχου της ροής (active-passive flow control). Παθητικές διατάξεις ελέγχου, για παράδειγμα, γεννήτριες δινών (vortex generators)[2], αποδείχτηκαν να είναι αποτελεσματικές στην καθυστέρηση της αποκόλλησης ροής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Παρόλα αυτά, δύναται να επιφέρουν αύξηση της αντίστασης όταν η ροή δεν αποκολλάται. Τις τελευταίες δεκαετίες, ποικίλες διατάξεις ενεργητικού ελέγχου έχουν προταθεί για την αύξηση της αποτελεσματικότητας και της ευστάθειας των ανωστικών συστημάτων. Πολλές από αυτές τις τεχνικές συμπεριλαμβάνουν την αναρρόφηση ή/και την έγχυση ρευστού, οι οποίες επιφέρουν αποτελεσματικό έλεγχο της ροής. Οι δυσκολίες εφαρμογής τους σε πραγματικές εφαρμογές, κυρίως εξαιτίας κατασκευαστικών λόγων, τείνουν πλέον να εξαλειφθούν και πλέον εφαρμόζονται σε ερευνητικές αλλά και εμπορικές κατασκευές.

### 1.1 Ενεργητικός Έλεγχος Ροής

Ο ενεργητικός έλεγχος ροής στοχεύει στον περιορισμό ή την αναίρεση της αποκόλλησης της ροής από την επιφάνεια αεροδυναμικών σωμάτων. Ο όρος *ενεργητικός* υποδεικνύει την ύπαρξη εξωτερικής πηγής ενέργειας που απαιτείται για την εφαρμογή του. Αντιθέτως, ο παθητικός έλεγχος ροής εφαρμόζεται για τον ίδιο σκοπό αλλά η αρχή στην οποία στηρίζεται είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα, οι παθητικές διατάξεις τείνουν να επιταχύνουν την μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη και να αυξήσουν την ανάμιξη με σκοπό την ανταλλαγή ενέργειας στις διάφορες ζώνες της ροής χωρίς δαπάνη ενέργειας για τον έλεγχο αυτό καθαυτό. Παραδείγματα της τελευταίας τεχνικής ελέγχου συναντώνται από τις μπάλες του γκόλφ με την τραχεία επιφάνειά

τους μέχρι τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη όπου οι γεννήτριες δινών (vortex generators) βελτιώνουν την ανάμιξη με την γένεση ισχυρών στροβίλων. Από την άλλη πλευρά, οι ενεργητικές διατάξεις βασίζονται κυρίως στην αναρρόφηση ή έγχυση ρευστού για τη μεταβολή των πεδίων πίεσης και ταχύτητας με αποτέλεσμα την ενίσχυση της επανακόλλησης στρωμάτων ρευστού ή την αποφυγή αποκόλλησης ή την καθυστέρηση της μετάβασης σε τυρβώδη ροή με σκοπό τη μείωση της επιφανειακής τριβής. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές ενεργητικού ελέγχου συνοψίζονται ως εξής:

- **Συνεχής αναρρόφηση ή έγχυση ρευστού (Steady suction or blowing)**

Επιτυγχάνεται μέσω οπών στην επιφάνεια αεροδυναμικών σωμάτων και τη συνεχή αναρρόφηση/έγχυση ρευστού διαμέσου αυτών. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο του οριακού στρώματος με την αφαίρεση στρωμάτων ρευστού χαμηλής ορμής (αναρρόφηση) ή την εισροή στρωμάτων υψηλής ορμής (έγχυση).

- **Περιοδική αναρρόφηση και έγχυση - σύνθετες δέσμες (Periodic suction and blowing - synthetic jets)**

Η περιοδική αναρρόφηση και έγχυση ρευστού μέσω οπών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στροβίλων, οι οποίοι προσδίδουν/αφαιρούν ορμή στο/από το οριακό στρώμα με σκοπό τη σταθεροποίησή του. Ο μηχανισμός που παράγει τους στροβίλους συνήθως αποτελείται από μια κοιλότητα με οπή, η οποία προσαρμόζεται στην επιφάνεια του σώματος, και ένα κινούμενο τοίχωμα (μεμβράνη), το οποίο διεγείρεται από έναν επενεργητή (σχήμα 1.1).

- **Ακουστική διέγερση (Acoustic excitation)**

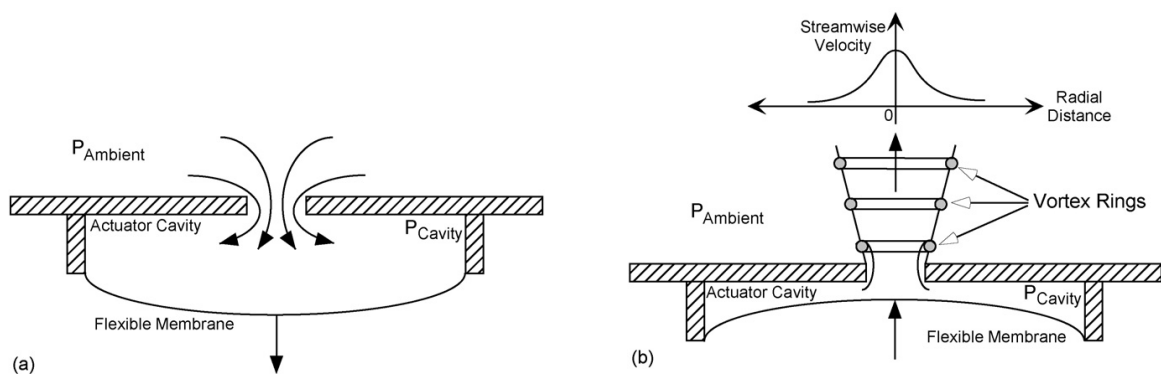
Η συγκεκριμένη τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι ήχος συγκεκριμένης έντασης και συχνότητας έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ανταλλαγή ορμής σε ένα οριακό στρώμα και συνεπώς να αλλάξει τη θέση μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη και συνεπώς την συμπεριφορά του οριακού στρώματος. Συνήθως, ηχητικά κύματα εκπέμπονται στο στερεό τοίχωμα από πηγή εκτός του οριακού στρώματος [3].

- **Επενεργητής πλάσμα (Plasma actuator)**

Οι επενεργητές πλάσμα προκαλούν ιονισμό στο κύριο ρεύμα του ρευστού πάνω από την επιφάνεια του σώματος και αυξάνουν τοπικά την ορμή του ρευστού μέσω συγκρούσεων των μεταφερόμενων φορτισμένων σωματιδίων με τα ουδέτερα μόρια του ρευστού. Πλεονέκτημά τους είναι ο μικρός χρόνος απόκρισής τους και η απουσία κινούμενων μερών [4].

- **Προσαρμογή σχήματος (Adaptive shape)**

Περιλαμβάνει αλλαγή της γεωμετρίας ενός αεροδυναμικού σώματος για τη ρύθμιση της κλίσης της πίεσης στην επιφάνεια του σώματος. Η εφαρμογή της μεθόδου ευνοεί την ανάπτυξη στρωτών οριακών στρωμάτων.



Σχήμα 1.1: Παραγωγή σύνθετης δέσμης

## 1.2 Επισκόπηση Σχετικής Βιβλιογραφίας

Η έναρξη της έρευνας επί των μεθόδων ελέγχου ροής τοποθετείται χρονικά σχεδόν από την ανακάλυψη του οριακού στρώματος από τον Prandtl [5] στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Ο Prandtl ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με τη συγκεκριμένη μέθοδο προσπαθώντας να καθυστερήσει την αποκόλληση σε ένα κύλινδρο χρησιμοποιώντας συνεχή αναρρόφηση. Αργότερα, ο Glauert [6] προσπάθησε το ίδιο, χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική, αυτή τη φορά σε λεπτή αεροτομή. Στην περίοδο που μεσολάβησε μέχρι και κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου, η θεωρία του ελέγχου ροής μελετήθηκε εκτενώς και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε στρατιωτικά συστήματα. Αναλυτική αναφορά και περιγραφή των μέχρι τότε μεθόδων έγινε από τον Lachman [7] και πιο πρόσφατα από τους Gad-el-Hak et al. [8]. Ο ενεργός έλεγχος ροής σε αεροτομές έχει περάσει από αρκετές φάσεις εξέλιξης τα τελευταία χρόνια. Παρακάτω συνοψίζονται μερικές από τις εργασίες στις οποίες έγινε χρήση των τεχνικών της συνεχούς αναρρόφησης ή έγχυσης ρευστού και των σύνθετων δεσμών καθώς σχετίζονται άμεσα με το θέμα της παρούσης εργασίας. Προφανώς, οι εργασίες στις οποίες αναφερόμαστε είναι ενδεικτικές, λόγω της πληθώρας των σχετικών εργασιών.

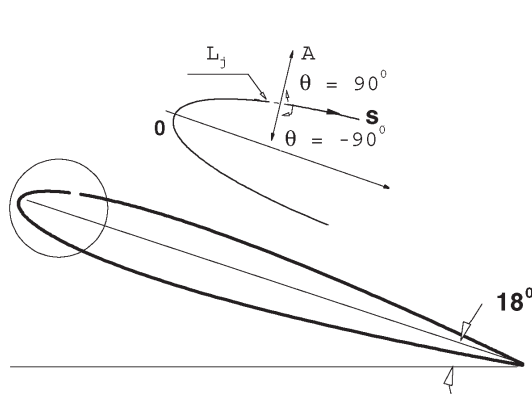
### Εφαρμογές συνεχούς αναρρόφησης ή έγχυσης ρευστού

Οι Huang κ.α. [9, 10] με τη βοήθεια μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής προσπάθησαν να ελέγξουν, με μεθόδους συνεχούς αναρρόφησης και έγχυσης, το οριακό στρώμα γύρω από μία αεροτομή NACA 0012. Στην πρώτη εργασία τους με μια παραμετρική ανάλυση των χαρακτηριστικών της δέσμης προσπαθούν να κατανοήσουν τους μηχανισμούς που κρύβονται πίσω από την αναρρόφηση και την έγχυση ρευστού ενώ στη δεύτερη υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων με χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Ο αριθμός *Reynolds* της ροής ισούταν με 500.000 και η γωνία πρόσπτωσης ήταν 18°.

Οι παράμετροι του προβλήματος για τη μελέτη ευαισθησίας κατά την αναρρόφηση

ή έγχυση ρευστού ήταν:

- Η θέση  $L_j$  τοποθέτησης της δέσμης κατά μήκος της χορδής  $c$  της αεροτομής.
- Ο λόγος  $A$  της ταχύτητας της δέσμης ως προς την επί άπειρο ταχύτητα.
- Η γωνία  $\theta$  που σχηματίζει η δέσμη με το τοίχωμα της αεροτομής.

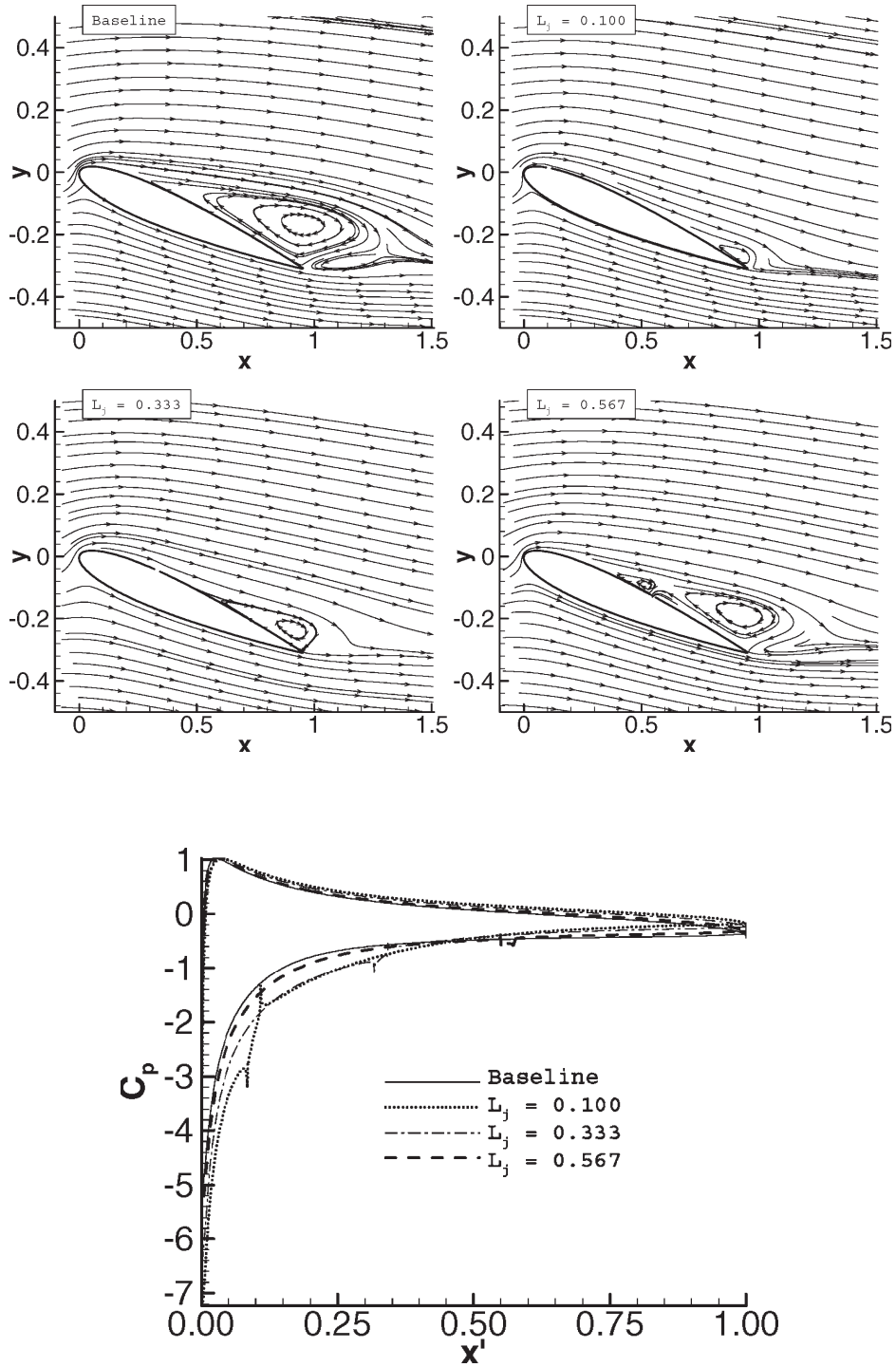


Σχήμα 1.2: Η θέση  $L_j$  τοποθέτησης της δέσμης και η γωνία  $\theta$  που σχηματίζει η δέσμη με το τοίχωμα της αεροτομής [9].

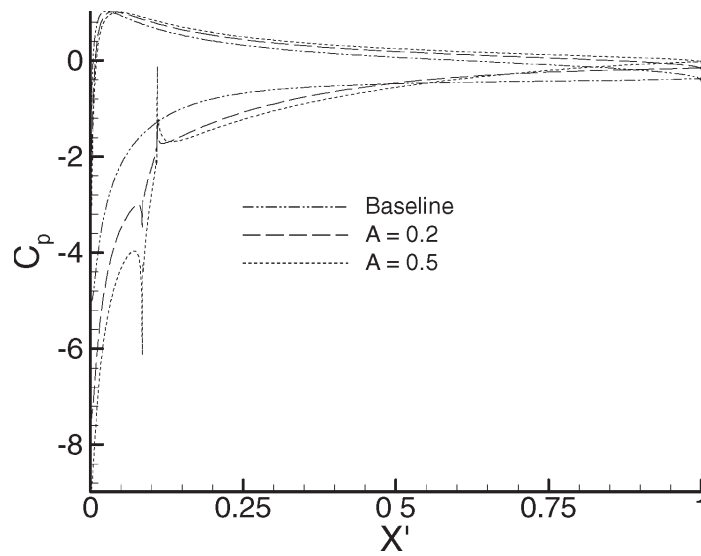
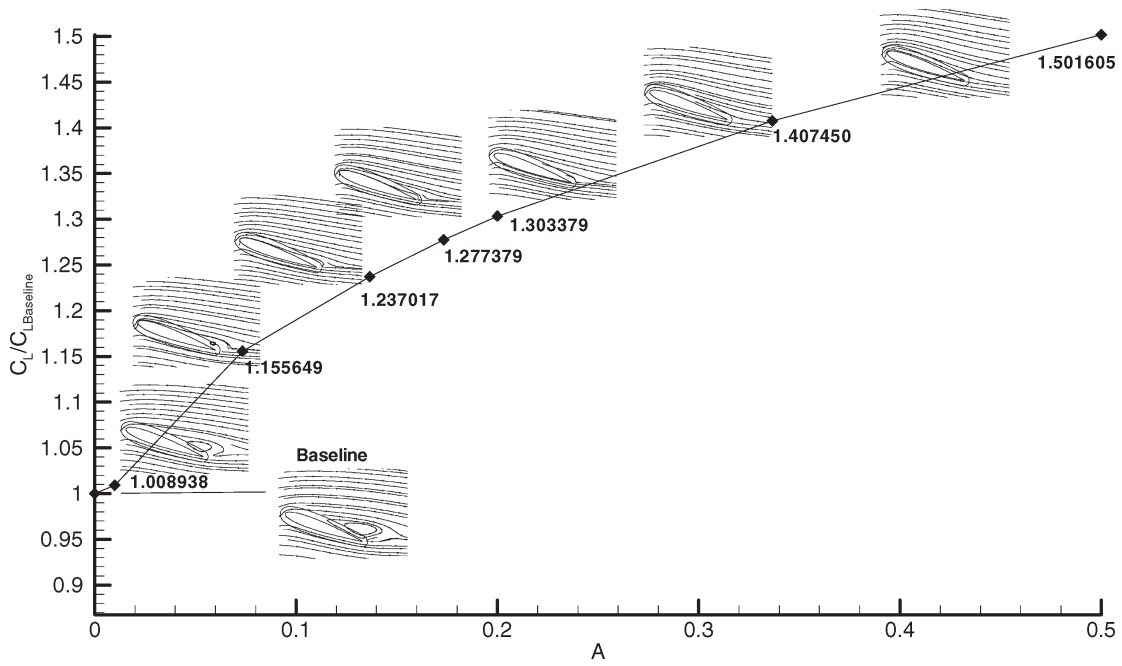
Επίσης το μέγεθος του ανοίγματος της κάθε οπής ισούταν με το 2.5% της χορδής, όπως υπαγορεύει η εργασία του *Dannenberg* [11], σύμφωνα με την οποία αύξηση του ανοίγματος της οπής πέρα του 2.5% του μήκους της χορδής δεν προξενεί σημαντική αύξηση της άνωσης της αεροτομής. Αναφορικά με την περίπτωση της αναρρόφησης, η παραμετρική ανάλυση έδειξε ότι στην περίπτωση που είναι κάθετη στο τοίχωμα της αεροτομής παρουσιάζει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του συντελεστή άνωσης. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας [9] για την κάθετη δέσμη αναρρόφησης.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του σχήματος 1.5 υποδεικνύει ότι η αναρρόφηση στη θέση  $L_j = 0.1$  παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα έναντι των άλλων θέσεων για αυτή τη μεγάλη γωνία πρόσπτωσης όπου εκ των πραγμάτων η αποκόλληση αναμένεται να αρχίσει αρκετά μπροστά. Επιπλέον, η άνωση αυξάνει καθώς ο λόγος  $A$  της ταχύτητας αναρρόφησης με την επί άπειρο ταχύτητα παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0.01. Κάτω από την οριακή τιμή αυτή, η ροή δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την αναρρόφηση. Χαρακτηριστικά να αναφέρουμε ότι για ρευστό αναρροφώμενο με ταχύτητα ίση με το μισό της επί άπειρο ταχύτητας ( $A = 0.5$ ) σε θέση κοντά στην ακμή πρόσπτωσης ( $L_j = 0.1$ ) προκαλείται αύξηση στο συντελεστή άνωσης της αεροτομής κατά 50% και μείωση του συντελεστή αντίστασης κατά 30%.

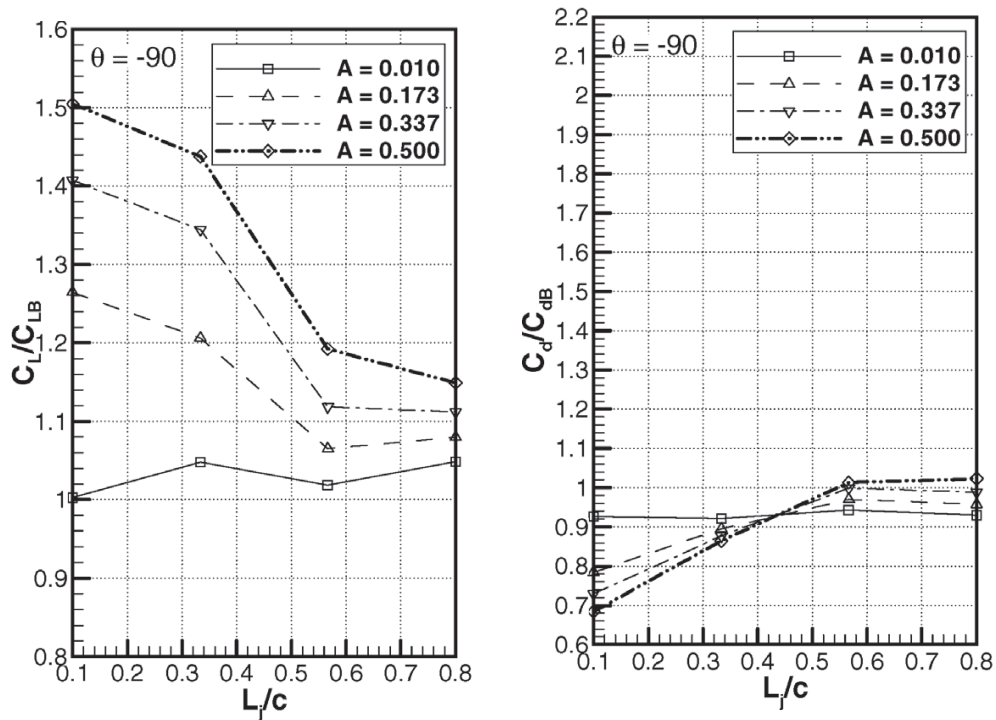




Σχήμα 1.3: Αποτελέσματα του ελέγχου με αναρρόφηση σε διαφορετικές θέσεις για  $A = 0.173$  και  $\theta = -90^\circ$  [9]. Απεικονίζεται και η κατάσταση αναφοράς (baseline), δηλαδή η κατάσταση χωρίς την εφαρμογή δέσμης ελέγχου.

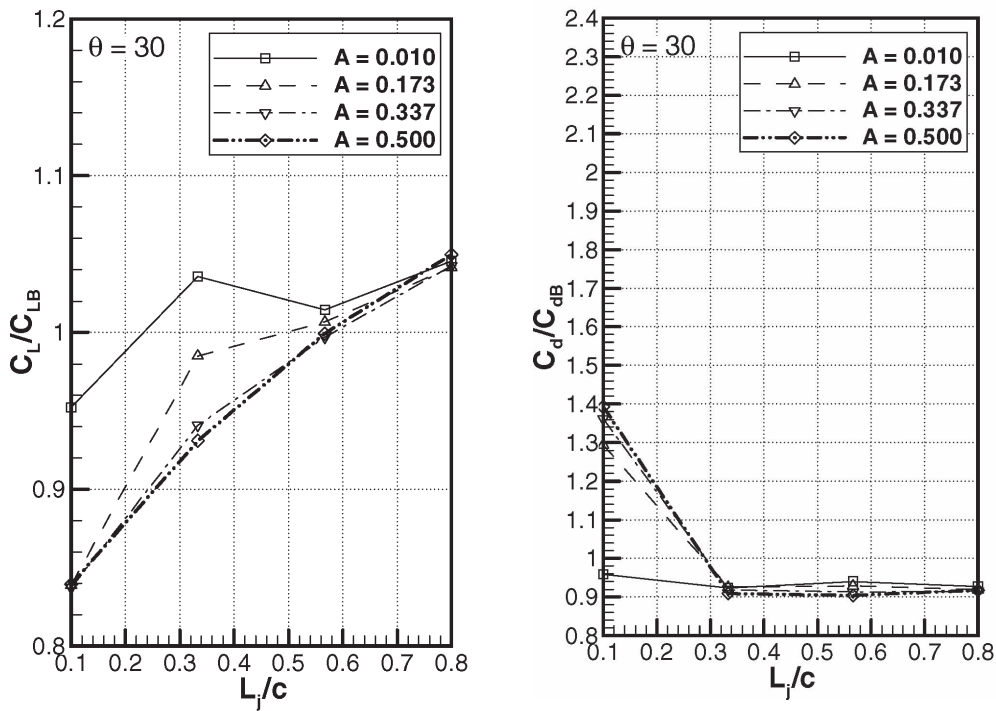


Σχήμα 1.4: Αποτελέσματα του ελέγχου με αναρρόφηση για διαφορετικές ταχύτητες αναρρόφησης για  $L_j = 0.1$  και  $\theta = -90^\circ$  [9]. Απεικονίζεται και η κατάσταση αναφοράς (baseline), δηλαδή η κατάσταση χωρίς την εφαρμογή δέσμης ελέγχου.



Σχήμα 1.5: Αποτελέσματα ελέγχου με αναρρόφηση και γωνία δέσμης  $\theta = -90^\circ$  (δηλ. με κάθετη δέσμη ενώ το αρνητικό πρόσημο σημαίνει αναρρόφηση) [9]. Αριστερά: συντελεστής άνωσης  $C_L$  συναρτήσει της θέσης της δέσμης  $L_j$  αδιαστατοποιημένος με την τιμή αναφοράς  $C_{LB}$  (δηλαδή χωρίς δέσμη ελέγχου όπου  $C_{LB} = 0.875$ ). Δεξιά: συντελεστής αντίστασης  $C_d$  συναρτήσει της θέσης της δέσμης  $L_j$  αδιαστατοποιημένος με την τιμή αναφοράς  $C_{dB}$  (δηλαδή χωρίς δέσμη ελέγχου όπου  $C_{dB} = 0.1662$ ).

Αναφορικά με την περίπτωση έγχυσης ρευστού, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η επίδραση της συγκεκριμένης τεχνικής είναι μάλλον αναποτελεσματική μιας και, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι τιμές της άνωσης και αντίστασης προκύπτουν χειρότερες από αυτές της περίπτωσης χωρίς έλεγχο. Η τιμή της γωνίας  $\theta$  που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι  $30^\circ$  (το θετικό πρόσημο υποδεικνύει έγχυση) και για αυτήν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο σχήμα 1.6. Η μόνη περίπτωση που βελτιώνονται ελάχιστα οι προηγούμενες τιμές είναι κατά την έγχυση ρευστού με μικρές ταχύτητες κοντά στην ακμή εκφυγής. Η έγχυση ρευστού στην περιοχή της ακμής πρόσπτωσης αυξάνει επίσης την άνωση αυξάνοντας την κυκλοφορία γύρω από τη φουσαλίδα αποκόλλησης και γύρω από την αεροτομή, αλλά με αντίκτυπο τη μεγάλη αύξηση της πίεσης στην περιοχή αυτή. Για το λόγο αυτό η ροή παρουσιάζει μεγαλύτερη αποκόλληση και η αντίσταση αυξάνεται. Υπενθυμίζεται ότι ο αριθμός *Reynolds* της ροής ισούταν με 500.000 και η γωνία πρόσπτωσης ήταν  $18^\circ$ .



Σχήμα 1.6: Αποτελέσματα ελέγχου με έγχυση για  $\theta = 30^\circ$  [9]. Αριστερά: συντελεστής άνωσης συναρτήσει της θέσης της δέσμης. Δεξιά: συντελεστής αντίστασης συναρτήσει της θέσης της δέσμης. Και οι δύο συντελεστές ανήχθησαν ως προς τους αντίστοιχους της περίπτωσης χωρίς δέσμη ( $C_{LB} = 0.875, C_{dB} = 0.1662$ ).

Επόμενο βήμα και θέμα της δεύτερης εργασίας των Huang κ.α., μετά την παραμετρική ανάλυση του ελέγχου της ροής και κατανόηση των φαινομένων που συνδέονται με αυτόν ήταν η βελτιστοποίηση των αντίστοιχων παραμέτρων σε διαφορετικές περιπτώσεις ελέγχου. Πρώτη περίπτωση βελτιστοποίησης αποτέλεσε η ύπαρξη δύο δεσμών ταυτόχρονα, η μία για αναρρόφηση και η άλλη για έγχυση ρευστού. Συνολικά οι με-

ταβλητές της βελτιστοποίησης ήταν πέντε, τα όρια των οποίων δίνονται παρακάτω. Η ταχύτητα αναρρόφησης τέθηκε σταθερή και ίση με 0.03. Κατά σειρά φαίνονται τα όρια της θέσης της δέσμης αναρρόφησης εκφρασμένα σε ποσοστά του μήκους της χορδής, της γωνίας αναρρόφησης εκφρασμένα ως προς την επιφάνεια της αεροτομής και με αρνητικό πρόσημο (αντίστοιχα θετικό για τη γωνία έγχυσης), της θέσης της δέσμης έγχυσης εκφρασμένα όμοια με εκείνα της δέσμης αναρρόφησης, της γωνίας έγχυσης όμοια με εκείνα της αναρρόφησης και του μέτρου της ταχύτητας του ρευστού στην οπή έγχυσης εκφρασμένα ως προς την ταχύτητα του επί άπειρον ρεύματος. Τα εν λόγω όρια καθορίστηκαν από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης (οι δείκτες  $S$  και  $B$  χαρακτηρίζουν την αναρρόφηση (*suction*) και την έγχυση (*blowing*), αντίστοιχα).

$$\begin{aligned} 0.05 &\leq L_{jS} \leq 0.8 \\ -90^\circ &\leq \vartheta_S \leq 0^\circ \\ 0.05 &\leq L_{jB} \leq 0.8 \\ 0^\circ &\leq \vartheta_B \leq 90^\circ \\ 0 &\leq A_B \leq 0.02 \end{aligned}$$

Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν της μορφής (πρόβλημα μεγιστοποίησης):

$$F = a \cdot C_l/C_{lB} + b \cdot C_{dB}/C_d$$

με τους συντελεστές βαρύτητας  $a$ ,  $b$  να ισούνται με τη μονάδα, ενώ οι συντελεστές  $C_{lB}$ ,  $C_{dB}$  να αντιστοιχούν στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας της αεροτομής χωρίς την παρουσία κάποιου ελέγχου. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης συνηγορούν στη τοποθέτηση της δέσμης αναρρόφησης στην περιοχή 10 - 15% της χορδής και με γωνία εισροής του ρευστού κοντά στις  $90^\circ$ , δηλαδή κάθετα στο τοίχωμα. Αντίθετα, βέλτιστη θέση της δέσμης έγχυσης είναι στο 74 - 80% της χορδής, με γωνία εξαγωγής ρευστού ως προς την επιφάνεια της αεροτομής  $45^\circ$  με  $55^\circ$  και με μέτρο ταχύτητας ρευστού το μέγιστο δυνατό σύμφωνα με τα όρια που έχουν εισαχθεί.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ταυτόχρονη παρουσία και των δύο ελέγχων, με αποτελέσματα από προηγούμενους υπολογισμούς που συμπεριλάμβαναν μόνο ένα είδος ενεργητικού ελέγχου δείχνουν ταύτιση αυτών. Επίσης από τους υπολογισμούς που έλαβαν χώρα φαίνεται ότι σημαντικότερος παράγοντας είναι η θέση από τη γωνία αναρρόφησης. Παράλληλα, συνέπεια της εφαρμογής του ελέγχου αναρρόφησης είναι η μείωση της αποκολλημένης ζώνης και η διολίσθηση της κατανομής του συντελεστή πίεσης ( $C_p$ ) στην πλευρά υποπίεσης της αεροτομής προς μικρότερες τιμές. Τα παραπάνω συνεπάγονται αύξηση της άνωσης της αεροτομής και ταυτόχρονη μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης.

Όμοια, αποτελέσματα από υπολογισμούς παρουσίας μόνο έγχυσης μάζας ρευστού συμφωνούν με τη θέση εισαγωγής ρευστού στο χωρίο ροής, που υπολογίστηκε από τον γενετικό αλγόριθμο και δόθηκε λίγο παραπάνω. Αντίθετα, τρεξίματα που έγιναν με μόνο έλεγχο έγχυσης ρευστού υποδεικνύουν ότι για την επίτευξη μέγιστης αύξησης της άνωσης της αεροτομής χρειάζεται σχεδόν εφαιπτομενική στην αεροτομή εξαγωγή

ρευστού, με σχετικά μικρού μέτρου ταχύτητα. Αντίθετα, εξαγωγή ρευστού σε κατεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της αεροτομής, με σχετικά μεγάλου μέτρου ταχύτητα, οδηγεί σε ελάχιστη οπισθέλκουσα. Φαίνεται, λοιπόν, το γιατί προέκυψε από το γενετικό αλγόριθμο γωνία έγχυσης  $45^\circ$  με  $55^\circ$  και με το μέγιστο δυνατό μέτρο ταχύτητας καθώς στην ουσία έγινε ένας συμβιβασμός μεταξύ των δύο με σκοπό τη μεγαλύτερη αύξηση της συνάρτησης κόστους.

Τελικά μπορούμε να πούμε ότι η χρήση ενός ελέγχου με δύο δέσμες συνεχούς αναρρόφησης και έγχυσης ρευστού σε μια αεροτομή είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της συμβολής μιας δέσμης συνεχούς αναρρόφησης και μίας δέσμης συνεχούς έγχυσης, με τον έλεγχο αναρρόφησης να διαδραματίζει τον πρωταρχικό ρόλο ακόμα και όταν η παροχή μάζας που εξέρχεται από την οπή έγχυσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την παροχή μάζας που εισέρχεται στην οπή αναρρόφησης (στην εργασία [10] ο σχετικός λόγος είναι μεγαλύτερος του 6). Η παρουσία του ελέγχου αναρρόφησης συνεπάγεται τη μείωση της αποκολλημένης περιοχής αλλά και του συντελεστή πίεσης στην πλευρά υποπίεσης της αεροτομής, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή άνωσης της αεροτομής και την πτώση του συντελεστή οπισθέλκουσας. Η ταυτόχρονη παρουσία όμως του ελέγχου έγχυσης συνέβαλε στην ακόμα μεγαλύτερη πτώση του συντελεστή αντίστασης (βέβαια η πτώση αυτή είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή που προκαλεί η 'βέλτιστη' αναρρόφηση), αλλά και τη μείωση του συντελεστή άνωσης, με τελικό αποτέλεσμα όμως θετικό για την συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, αποτέλεσμα της μείωσης της άνωσης της αεροτομής είναι η μετακίνηση της κατανομής του συντελεστή πίεσης στην πλευρά υποπίεσης της αεροτομής σε λίγο υψηλότερες τιμές σε σχέση με την καμπύλη που θα πρόσδιδε η παρουσία μόνο ενός ελέγχου αναρρόφησης.

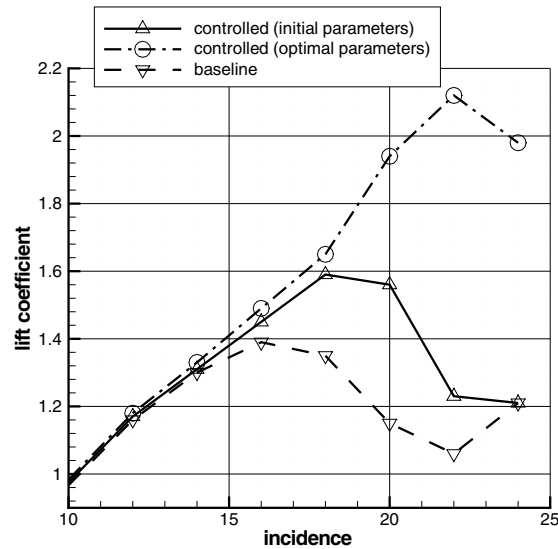
Κλείνοντας την αναφορά στην εν λόγω εργασία να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή των βέλτιστων συνθηκών στη συνύπαρξη των δύο μοντέλων ενεργητικού ελέγχου της ροής, συμβάλλει στην αύξηση του συντελεστή άνωσης κατά 4%, και μείωση του συντελεστή αντίστασης κατά περίπου 12%. Τα ποσοστά αυτά εκφράζονται πάντα σε σχέση με την εφαρμογή απουσίας κάποιας τεχνικής ελέγχου.

## Εφαρμογές σύνθετων δεσμών

Το 2005 οι Duvigneau, Visonneau [12] δοκίμασαν υπολογιστικά να αυξήσουν τον συντελεστή άνωσης μίας αεροτομής *NACA* 0015. Η δέσμη ‘τοποθετήθηκε’ σε απόσταση ίση με το 12% του μήκους της χορδής από την ακμή προσβολής, ενώ ο αριθμός *Reynolds* της επ’ άπειρον ροής ήταν  $8.96 \cdot 10^5$ . Συγκεκριμένα έγινε προσπάθεια υπολογισμού των βέλτιστων παραμέτρων της δέσμης για γωνίες της επ’ άπειρο ταχύτητας της ροής μεταξύ  $12^\circ$  και  $24^\circ$ . Οι παράμετροι της δέσμης που λήφθηκαν υπόψη ήταν: η συχνότητα και η γωνία κλίσης ως προς το τοίχωμα της αεροτομής της δέσμης, όπως επίσης και η μέγιστη ταχύτητα που εμφανίζει η κατανομή αυτής στο επίπεδο της οπής. Για την υλοποίηση των παραπάνω επιλύθηκαν αριθμητικά οι μη-μόνιμες *Reynolds averaged* εξισώσεις *Navier Stokes* για ασυμπίεστο ρευστό, σε συνεργασία με το μοντέλο τύρβης *k- $\omega$*  (*Menter* [13]) και έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης που δεν απαιτεί τον υπολογισμό κάποιας παραγώγου.

Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η εξέλιξη του συντελεστή άνωσης της αεροτομής με την γωνία προσβολής. Καθεμιά από τις τρεις καμπύλες αντιπροσωπεύει αντίστοιχα τις περιπτώσεις χωρίς έλεγχο, με έλεγχο όπου οι παράμετροι της δέσμης παίρνουν τις αρχικές τιμές τους κατά την επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης αυτών, και με έλεγχο όπου οι ενδιαφερόμενοι παράμετροι παίρνουν τις βέλτιστες τιμές τους. Επισημαίνεται εδώ ότι οι τιμές του ‘μηδενικού’ βήματος της διαδικασίας βελτιστοποίησης προήλθαν από την εργαστηριακή μελέτη της ερευνητικής ομάδας του *Gilarranz* [14]. Από το σχήμα 1.7 είναι εμφανές ότι ήδη οι αρχικές τιμές των παραμέτρων της δέσμης αυξάνουν το μέγιστο εμφανιζόμενο συντελεστή άνωσης 16% σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο. Ενώ η εμφάνιση απώλειας στήριξης έχει καθυστερήσει κατά  $3^\circ$  (από τις  $16^\circ$  που εμφάνιζε απώλεια στήριξης η αεροτομή χωρίς έλεγχο της ροής, στις  $19^\circ$ ). Τα αποτελέσματα όμως που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση δίνουν ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στη τιμή του μέγιστου συντελεστή άνωσης (η οποία εμφανίζεται στις  $22^\circ$ ), αφού σημειώνεται αύξηση κατά 52% σε σχέση με την περίπτωση απουσίας ελέγχου. Ακόμη, απώλεια στήριξης εμφανίζεται για γωνίες μεγαλύτερες των  $22^\circ$  σε αντίθεση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο όπου η αεροτομή λειτουργεί ‘επιθυμητά’ για γωνίες προσβολής μέχρι  $16^\circ$ .

Στο σχήμα 1.8 εκτός του συντελεστή άνωσης φαίνεται και ο συντελεστής οπισθέλκουσας για κάθε γωνία προσβολής, τόσο για τις περιπτώσεις με έλεγχο (βέλτιστες και αρχικές τιμές παραμέτρων), όσο και απουσίας ελέγχου. Τονίζεται εδώ ότι η βελτιστοποίηση που προηγήθηκε έγινε με γνώμονα την αύξηση του συντελεστή άνωσης και μόνο, δηλαδή στη διαδικασία βελτιστοποίησης δεν λήφθηκε υπόψη ο συντελεστής οπισθέλκουσας. Για το λόγο αυτό, για μερικές γωνίες προσβολής ο συντελεστής οπισθέλκουσας των βέλτιστων παραμέτρων έχει μεγαλύτερη τιμή από εκείνον που προκύπτει όταν οι παράμετροι της δέσμης παίρνουν τις αρχικές τιμές τους, ή ακόμα και σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο. Περαιτέρω μελέτη του εν λόγω σχήματος μας δείχνει ότι οι τρεις καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται μέχρι τις  $16^\circ$ . Για γωνίες προσβολής  $18^\circ$  και  $20^\circ$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας των περιπτώσεων παρουσίας ελέγχου είναι κατά τι μεγαλύτερος από εκείνον χωρίς έλεγχο. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι στις συγκεκριμένες γωνίες η αεροτομή (χωρίς έλεγχο)

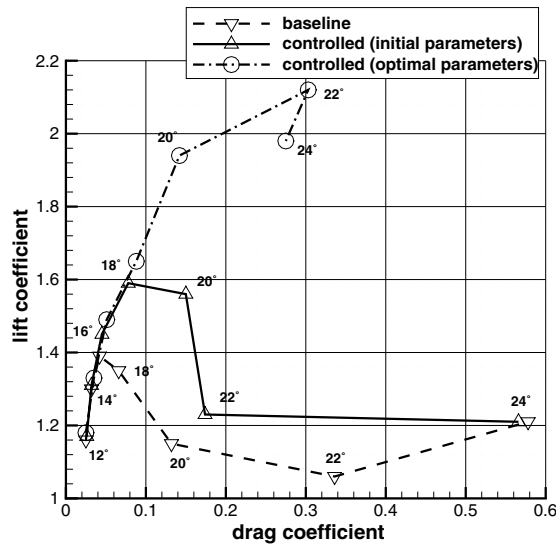


Σχήμα 1.7: Εξέλιξη του συντελεστή άνωσης με τη γωνία προσβολής [12].

χο) δεν συνοδεύεται από τη δημιουργία δινών στην πλευρά υποπίεσης. Αντίθετα, η ροή γύρω από αυτήν χαρακτηρίζεται ως μόνιμη με συνεχώς αυξανόμενη αποκολλημένη περιοχή καθώς αυξάνει και η γωνία προσβολής. Από την άλλη πλευρά, είναι γνωστό ότι η παρουσία μίας σύνθετης δέσμης συνοδεύεται από την περιοδική έκλυση δινών. Στις 22° κάνει την εμφάνιση του ότι περιγράψαμε στην αρχή της παραγράφου σχετικά με το σκοπό της βελτιστοποίησης που έλαβε χώρα. Βλέπουμε ότι θέτοντας τις εξεταζόμενες παραμέτρους ίσες με τις αρχικές τιμές τους ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με την περίπτωση εφαρμογής των βέλτιστων παραμέτρων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της γένεσης δινών μεγάλης έκτασης σε αντίθεση με τις δίνες που προκαλεί ο έλεγχος με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων. Όσον αφορά τη ροή γύρω από την αεροτομή χωρίς την παρουσία ελέγχου, αυτή έχει γίνει μη μόνιμη και χαρακτηρίζεται από δίνες μεγάλης έκτασης. Οι γραμμές ροής των παραπάνω ροών (δηλαδή παρουσία ελέγχου και απουσία αυτού) φαίνονται στα σχήματα 1.10, 1.11 1.13. Τέλος, στις 24° ο έλεγχος σύμφωνα με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων δεν προκαλεί κάποια αλλαγή στη συμπεριφορά της αεροτομής καθώς οι συντελεστής άνωσης και οπισθέλκουσας δεν μεταβάλλονται. Αντίθετα ο έλεγχος με τις βέλτιστες παραμέτρους για γωνία της επ' άπειρο ταχύτητας της ροής ίση με 24° έχει σαφώς πιο επιθυμητά αποτελέσματα τόσο για τον συντελεστή άνωσης (αύξηση) όσο και για τον συντελεστή οπισθέλκουσας (μείωση).

Επειδή όμως πρακτικά είναι δύσκολο να μεταβάλλονται οι παράμετροι της δέσμης με τη γωνία προσβολής οι R. Duvigneau, M. Visonneau έκαναν τους παραπάνω υπολογισμούς διατηρώντας σταθερές τις τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων. Διάλεξαν δύο τριάδες προς δοκιμή. Η πρώτη τριάδα αποτέλεσε τον αριθμητικό μέσο των βέλτιστων τιμών που υπολογίστηκαν προηγουμένως, ενώ η δεύτερη τριάδα ήταν η βέλτιστη τριάδα που προέκυψε για γωνία προσβολής ίση με 22°. Το σχήμα 1.7 δείχνει την εξέλιξη του συντελεστή άνωσης με τη γωνία προσβολής. Η χρήση των μέσων τιμών των βέλτι-



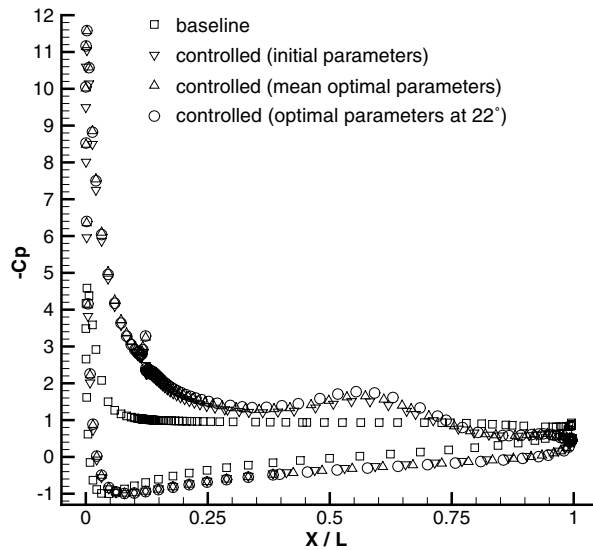


Σχήμα 1.8: Εξέλιξη των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας με τη γωνία προσβολής [12].

στων παραμέτρων οδήγησε σε ακόμα μεγαλύτερη καθυστέρηση εμφάνισης απώλειας στήριξης, καθώς ο συντελεστής άνωσης αυξάνεται μέχρι και τις 24°. Η μέγιστη τιμή αυτού, παρόλο που είναι αισθητά μεγαλύτερη της περίπτωσης χωρίς έλεγχο (41% μεγαλύτερη), είναι εμφανώς μικρότερη της αντίστοιχης τιμής των βέλτιστων παραμέτρων (υπενθυμίζεται ότι εφαρμόζοντας σε κάθε γωνία προσβολής τη βέλτιστη τριάδα τιμών για τις παραμέτρους, ο μέγιστος συντελεστής άνωσης που προέκυψε είναι κατά 52% μεγαλύτερος συγκρινόμενος με την αντίστοιχη τιμή από την εφαρμογή χωρίς έλεγχο). Από την άλλη πλευρά, φαίνεται ότι η καμπύλη που προκύπτει εφαρμόζοντας σταθερά τις βέλτιστες τιμές που προέκυψαν για γωνία προσβολής 22°, είναι πιο κοντά σε εκείνη των εκάστοτε βέλτιστων παραμέτρων, έχοντας αύξουσα κατεύθυνση για γωνίες προσβολής μικρότερες των 22°. Αρνητικό μιας τέτοιας εφαρμογής είναι η συγκριτικά πιο απότομη πτώση του συντελεστή άνωσης για γωνία της επ' άπειρο ταχύτητας της ροής μεγαλύτερη των 22°.

Τέλος, στο σχήμα 1.9 φαίνονται οι κατανομές πίεσης (στη μορφή του συντελεστή πίεσης  $C_p$ ) στην επιφάνεια της αεροτομής για γωνία προσβολής 22° έπειτα της εφαρμογής ελέγχου (αρχικές τιμές παραμέτρων, αριθμητικά μέσων τιμών των βέλτιστων και βέλτιστες παράμετροι για γωνία προσβολής 22°) και χωρίς. Φαίνεται ότι η εφαρμογή των βέλτιστων τιμών για τις 22° υπερέρχει ελαφρώς από τους άλλους δύο ελέγχους. Σίγουρα πάντως η διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες με έλεγχο και στην καμπύλη χωρίς έλεγχο είναι αρκετά εμφανής, δικαιολογώντας και την αύξηση του συντελεστή άνωσης της αεροτομής.

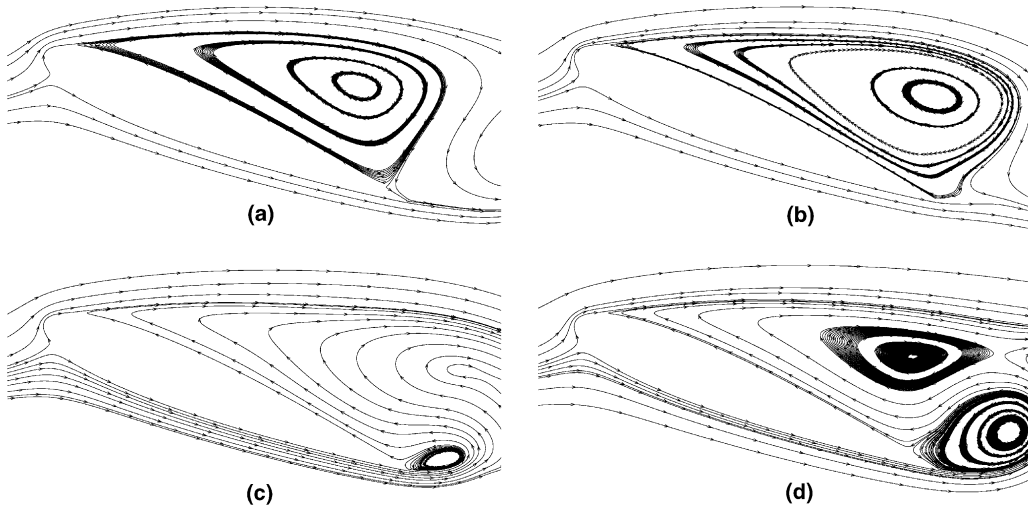
Στα σχήματα 1.10, 1.11, 1.12 και 1.13 φαίνονται οι γραμμές ροής γύρω από την αεροτομή χωρίς έλεγχο και με έλεγχο αντίστοιχα. Κατά σειρά εικονίζονται οι γραμμές ροής υπό έλεγχο εφαρμόζοντας τις αρχικές τιμές των παραμέτρων, τις αριθμητικά μέσες τιμές των βέλτιστων τιμών και τις βέλτιστες για τις 22°. Όλες οι εικόνες αυτές έχουν



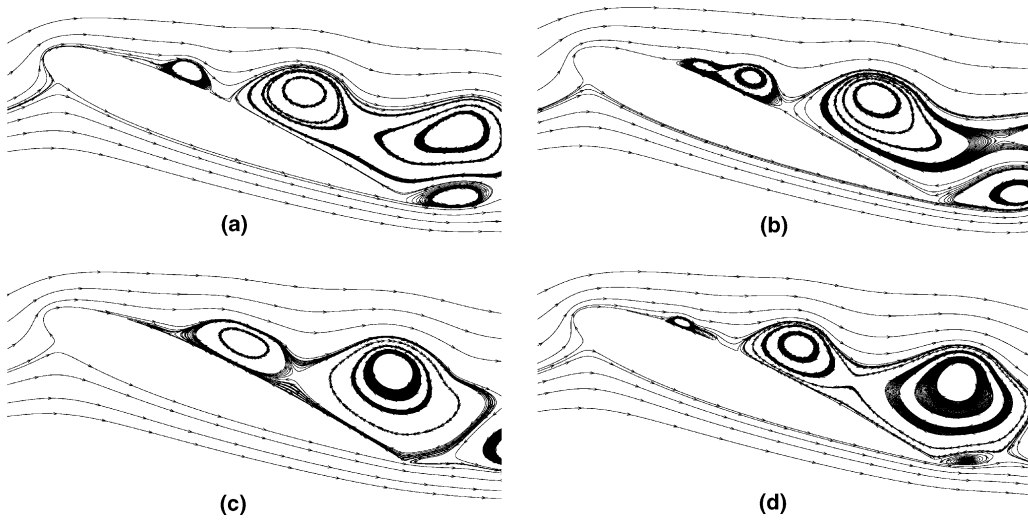
Σχήμα 1.9: Κατανομή πίεσης στην περιφέρεια της αεροτομής [12].

προκύψει για γωνία προσβολής ίση με  $22^\circ$ . Η ροή γύρω από την αεροτομή χωρίς την παρουσία ελέγχου όπως έχει προαναφερθεί για τη συγκεκριμένη γωνία της επ' άπειρο ταχύτητας (προφανώς και για μεγαλύτερες) χαρακτηρίζεται ως μη-μόνιμη. Συγκεκριμένα, έχει περιοδικό χαρακτήρα και μάλιστα ένας σχεδιασμός των διαδοχικών τιμών του συντελεστή άνωσης με το χρόνο θα έδινε μία καμπύλη ημιτονοειδούς μορφής. Όμοια περιοδικό χαρακτήρα εμφανίζει και η ροή υπό έλεγχο. Η αιτία της περιοδικότητας στις περιπτώσεις αυτές είναι η παρουσία της δέσμης. Οπότε η ροή εμφανίζει περιοδικότητα με συχνότητα ίση με τη συχνότητα αυτής. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι όλες η καμπύλες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως αφορούν χρονικά μέσα μεγέθη. Δηλαδή όπου έχει γίνει αναφορά σε συντελεστή άνωσης, οπισθέλκουσας, ή πίεσης πρόκειται στην ουσία για τη χρονικά μέση τιμή αυτών καθώς οι αντίστοιχες ροές είναι μη-μόνιμες. Μόνιμες είναι μόνο οι ροές χωρίς έλεγχο για γωνίες προσβολής μικρότερες των  $20^\circ$ , όπου δημιουργείται μία αποκολλημένη περιοχή στην πάνω πλευρά της αεροτομής σταθερής έκτασης. Στα σχήματα 1.10, 1.11, 1.12 και 1.13 λοιπόν φαίνονται τέσσερις χρονικές στιγμές κάθε περιόδου. Στα τρία τελευταία, οι πρώτες εικόνες ( $\Phi = 0$ ) αντιστοιχούν στη στιγμή με μηδενική εισροή/εκροή ρευστού από την οπή. Αντίστοιχα οι δεύτερες ( $\Phi = \pi/2$ ) στη στιγμή με μέγιστη έγχυση, οι τρίτες ( $\Phi = \pi$ ) στη στιγμή επίσης με μηδενική εισροή-εκροή ρευστού από την οπή, ενώ οι τέταρτες ( $\Phi = 3 \cdot \pi/2$ ) στη στιγμή με μέγιστη εισροή.

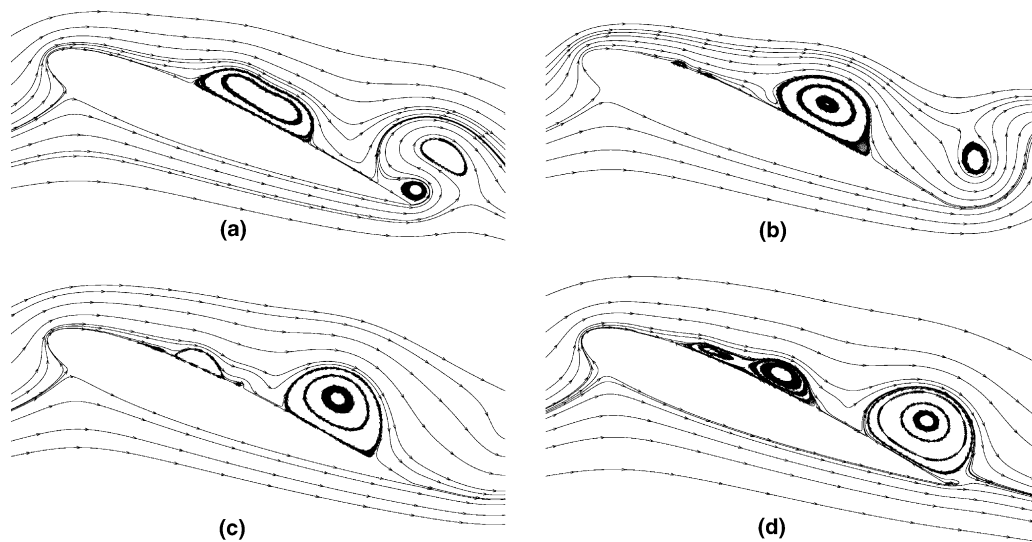
Παρόμοιες εργασίες με χρήση της τεχνικής των σύνθετων δεσμών έγιναν από τους You, Moin [15] και τους Deng, Jiang, Liu [16].



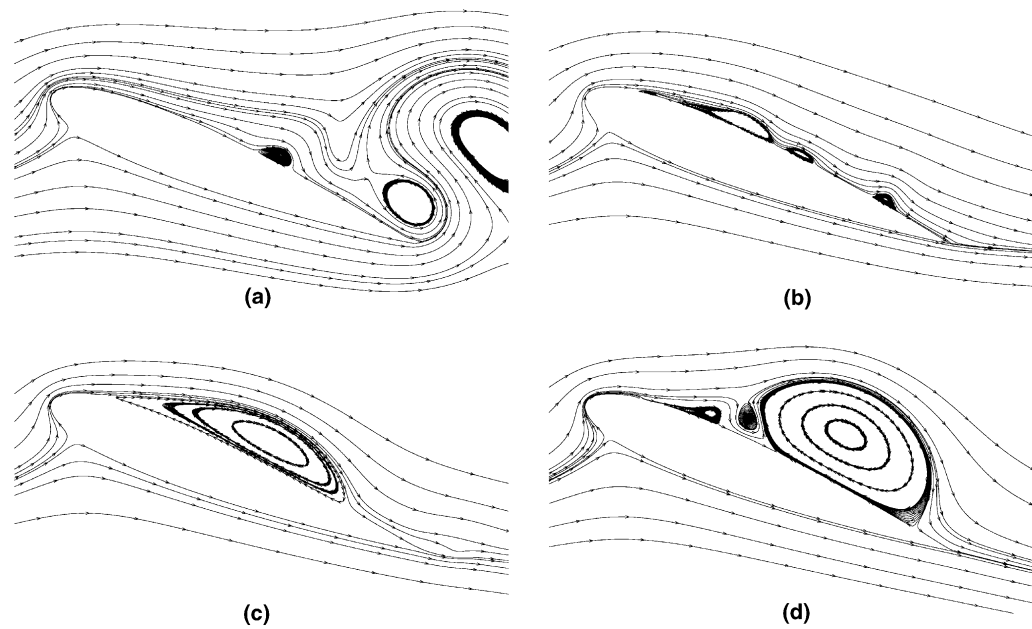
Σχήμα 1.10: Γραμμές ροής χωρίς έλεγχο [12].



Σχήμα 1.11: Γραμμές ροής παρουσία ελέγχου με βάση τις αρχικές τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων [12].



Σχήμα 1.12: Γραμμές ροής παρουσία ελέγχου με βάση τις μέσες τιμές των βέλτιστων των παραμέτρων [12].



Σχήμα 1.13: Γραμμές ροής παρουσία ελέγχου με βάση τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για γωνία προσβολής  $22^\circ$  [12].

### 1.3 Σχετική Έρευνα στο ΕΘΣ

Στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) υπάρχει η δυνατότητα σχεδίασης αεροδυναμικών σωμάτων με βέλτιστη συμπεριφορά. Στις ερευνητικές δραστηριότητες του συγκαταλέγεται και ο έλεγχος της ροής γύρω από τέτοια σώματα. Οι δύο κυριότερες εργασίες που έχουν εκπονηθεί αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου σε καμπύλες διαμορφώσεις.

Ο υποψήφιος διδάκτορας Ξ. Τρομπούκης [17] ανέπτυξε μια ολοκληρωμένη διαδικασία για τη δημιουργία οπών σύνθετων δεσμών. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε σε ένα συμμετρικό αγωγό άπειρου πλάτους που φέρει καμπύλη διαμόρφωση στα πλευρικά του τοιχώματα. Τμήμα της εργασίας του ήταν η δημιουργία λογισμικού για την κατασκευή του πλέγματος της κοιλότητας του επενεργητή και της πύκνωσης της περιοχής πάνω από την οπή της δέσμης ρευστού, στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν (αφού προσαρμόστηκαν κατάλληλα και εξελίχθηκαν - εμπλουτίστηκαν όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο) και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Παράλληλα, χρησιμοποιώντας τεχνικές και λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που έχει αναπτυχθεί στο ΕΘΣ (in-house software) μελέτησε την τεχνική των σύνθετων δεσμών και, συγκεκριμένα την παραλλαγή της συνεχούς αναρρόφησης, για τον έλεγχο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος. Συγκεκριμένα, μελέτησε παραμετρικά την επίδραση του ελέγχου με παραμέτρους τη θέση της οπής αναρρόφησης, τη γωνία πρόσδεσης της κοιλότητας που ακολουθεί την οπή με το τοίχωμα του αγωγού, το μέγεθος του ανοίγματος της οπής και την παροχή αναρρόφησης του ρευστού δια μέσου της οπής.

Στη διδακτορική διατριβή [18], αναπτύχθηκαν συζυγείς μέθοδοι για τον προσδιορισμό παραγώγων συναρτήσεων κόστους ως προς τις ταχύτητες δεσμών αναρρόφησης/έγχυσης ρευστού,  $lvecu_m$ , στις διάφορες θέσεις  $m$  του διακριτοποιημένου ορίου της γεωμετρίας (κόμβοι επιφανειακού πλέγματος). Οι παραπάνω παράγωγοι ευαισθησίας μπορούν να αποτελέσουν εργαλείο προσδιορισμού των πλέον σημαντικών θέσεων στις οποίες ενδείκνυται η τοποθέτηση δεσμών αναρρόφησης/έγχυσης ρευστού. Οι παράγωγοι ευαισθησίας  $\frac{\delta F}{\delta \vec{v}_m}$  ( $F$  είναι η συνάρτηση κόστους), υπολογίζονται για την περίπτωση όπου  $\vec{v}_m = 0$ , δηλαδή για την περίπτωση χωρίς δέσμη-ες ελέγχου ροής. Συνεπώς, στην κατηγορία αυτών των προβλημάτων, οι παράμετροι ελέγχου δεν είναι μεταβλητές σχεδιασμού που καθορίζουν τη γεωμετρία της αεροδυναμικής/υδροδυναμικής μορφής αλλά οι ίδιες οι οριακές συνθήκες στα (στερεά) όρια της μορφής. Οι ροές οι οποίες παρουσιάζονται αφορούν ροές σε αγωγούς. Υπολογιστικά, ο έλεγχος της ροής επιβάλλεται μέσω επιβολής διαφορετικής οριακής συνθήκης πάνω στο όριο χωρίς να τροποποιείται η γεωμετρία. Η συζυγής μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές των ποσοτήτων της τύρβης μέσω της εισαγωγής στο συζυγές πρόβλημα (α) επιπλέον συζυγών εξισώσεων και οριακών συνθηκών, αυτές του συζυγούς μοντέλου της τύρβης και (β) επιπλέον όρων στις συζυγείς οριακές συνθήκες της συζυγούς μέσης ροής.



# Κεφάλαιο 2

## Γένεση πλέγματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας του περιγράμματος της μελετούμενης γεωμετρίας, με ή χωρίς την παρουσία δεσμών ελέγχου της ροής, και ο τρόπος γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος για την επίλυση των εξισώσεων ροής. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Πρώτη περίπτωση αποτελεί η γένεση πλέγματος γύρω από μεμονωμένη αεροτομή δεδομένης γεωμετρίας χωρίς την εφαρμογή ελέγχου. Η δεύτερη και τρίτη περίπτωση αφορούν τη γένεση πλέγματος γύρω από την ίδια αεροτομή όταν εφαρμόζεται έλεγχος με δέσμη ρευστού σε ένα ή περισσότερα σημεία. Επίσης, γίνεται περιγραφή του τρόπου βελτίωσης της γεωμετρίας με την κατασκευή καμπύλης διαμόρφωσης ('ράδιο') σε περιοχή του πλέγματος με οξεία γωνία. Η γεωμετρία της αεροτομής που επιλέχθηκε για την προσομοίωση και μελέτη του ελέγχου της ροής στην παρούσα εργασία αποτελεί προσέγγιση της γεωμετρίας της αεροτομής NACA 4415.

### 2.1 Γένεση πλέγματος γύρω από μεμονωμένη αεροτομή

Ο γενέτης πλέγματος, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της απομονωμένης αεροτομής, έχει αναπτυχθεί στο παρελθόν από ερευνητές του ΕΘΣ. Το πλέγμα που προκύπτει είναι μη-δομημένο και χαρακτηρίζεται ως υβριδικό, αφού αποτελείται από τριγωνικά και τετραεδρικά στοιχεία. Στα πλεονεκτήματα των μη-δομημένων πλεγμάτων, σε αντίθεση με τα δομημένα, ανήκει η ευελιξία ως προς τη γεωμετρία του χωρίου καθώς μπορούμε να διακρίτοποιήσουμε χωρία αρκετά σύνθετων γεωμετριών. Επιπλέον ορισμένες φορές είναι απαραίτητη η επέμβαση στο πλέγμα με σκοπό την πύκνωση κάποιας περιοχής αυτού, μία διαδικασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί αρκετά πιο εύκολα σε ένα μη-δομημένο πλέγμα. Μειονέκτημα αυτών αποτελεί ο υπολογισμός της απόστασης των γειτονικών κόμβων στο τοίχωμα από τους κόμβους του τοιχώματος, κάτι που απαιτείται από πολλά μοντέλα τύρβης.

Ο συγκεκριμένος γενέτης πλέγματος ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία δομημένου πλέγματος σε μικρή απόσταση γύρω από την αεροτομή.
2. Εκλέπτυνση του δομημένου πλέγματος (Refinement).
3. Δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο.

### Βήμα 1: Δημιουργία δομημένου πλέγματος σε μικρή απόσταση γύρω από την αεροτομή

Γύρω από την αεροτομή κατασκευάζεται δομημένο πλέγμα μεγάλης πυκνότητας. Η μεγάλη πυκνότητα είναι απαραίτητη για τη σωστή πρόλεξη της συμπεριφοράς του οριακού στρώματος και της εξωτερικής ζώνης κοντά στο στερεό τοίχωμα της αεροτομής (δηλαδή τη συνεκτική ζώνη).

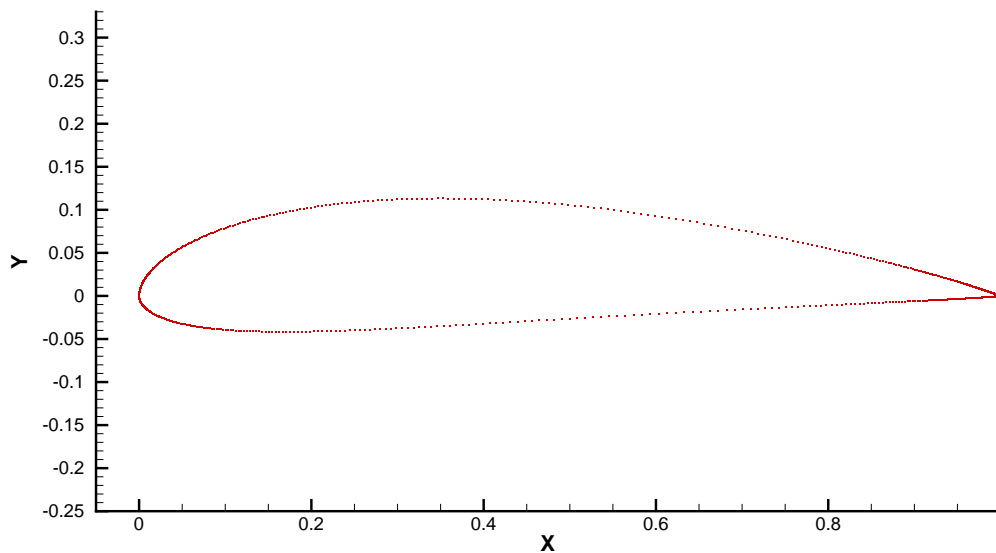
Η γεωμετρία της αεροτομής που επιλέχθηκε για την προσομοίωση και μελέτη του ελέγχου της ροής στην παρούσα εργασία αποτελεί προσέγγιση της γεωμετρίας της αεροτομής NACA 4415. Η συγκεκριμένη αεροτομή προσεγγίστηκε μέσω καμπύλης *Bezier*, με 8 σημεία ελέγχου για την πλευρά υποπίεσης (suction side) και 8 για την πλευρά υπερπίεσης (pressure side). Στο εξής, η αεροτομή που προσεγγίστηκε με τα παρακάτω σημεία ελέγχου της καμπύλης *Bezier* (πίνακας 2.1) θα αναφέρεται ως 'NACA 4415'.

Σημείο Ελέγχου	Πλευρά Υπερπίεσης		Πλευρά Υποπίεσης	
	X	Υ	X	Υ
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.00000	-0.03774	0.00000	0.05129
3	0.12097	-0.08129	0.12387	0.13645
4	0.33968	-0.01355	0.35516	0.15484
5	0.58161	-0.03000	0.60581	0.09871
6	0.76452	-0.00774	0.71903	0.07548
7	0.93871	-0.00677	0.89323	0.03968
8	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000

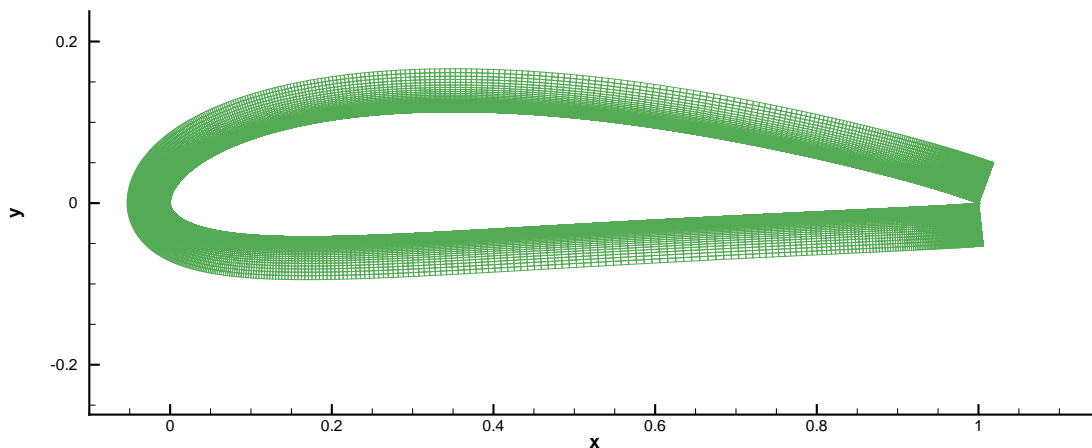
Πίνακας 2.1: Σημεία ελέγχου της καμπύλης *Bezier* για την προσέγγιση της γεωμετρίας της αεροτομής NACA 4415. Η γεωμετρία που προκύπτει από τα σημεία αυτά αναφέρεται ως 'NACA 4415'.

Στην κάθε πλευρά ισοκατανέμονται, με βάση τα σημεία *Bezier*, 501 και 551 κόμβοι αντίστοιχα για την κατασκευή του περιγράμματος της αεροτομής 'NACA 4415'. Επιπλέον, γίνεται πύκνωση των σημείων στην περιοχή κοντά στις αιχμές πρόσπτωσης και εκφυγής με τη βοήθεια μιας γεωμετρικής κατανομής τύπου *Robertson*. Ως γνωστόν οι μεταβολές των υπολογιζόμενων ροϊκών μεγεθών στις περιοχές αυτές είναι αρκετά μεγάλες και η πύκνωση των σημείων, και συνεπώς του πλέγματος προς κατασκευή,





Σχήμα 2.1: Σημεία του περιγράμματος της αεροτομής 'NACA 4415'.



Σχήμα 2.2: Δομημένο πλέγμα γύρω από την αεροτομή.

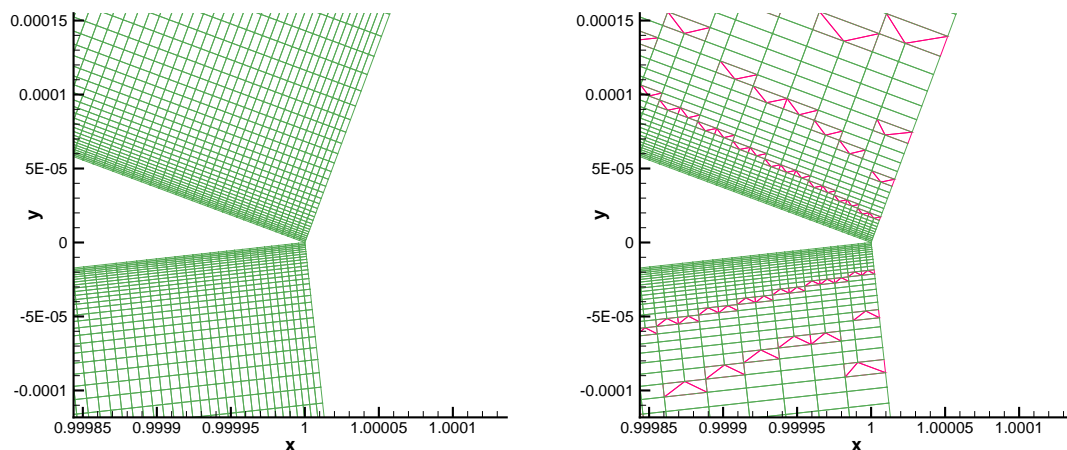
δίνει αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα σημεία που προκύπτουν και αποτελούν το περίγραμμα της αεροτομής φαίνονται στο σχήμα 2.1.

Αφού καθορίστηκε η γεωμετρία της αεροτομής με τα αντίστοιχα σημεία επί του περιγράμματος της, δημιουργείται το δομημένο πλέγμα γύρω από αυτή αποτελούμενο από τετράπλευρα (Σχήμα 2.2). Κάθετα στο περίγραμμα της αεροτομής, ξεκινώντας από τα σημεία του περιγράμματος, τοποθετούνται σημεία τα οποία αποτελούν τους κόμβους του πλέγματος. Ο αριθμός των κόμβων του δομημένου πλέγματος που θα προκύψει

καθορίζεται έμμεσα από το χρήστη με καθορισμό των επιπέδων δομημένου πλέγματος προς κατασκευή. Παράλληλα, η κατάλληλη σύνδεση των κόμβων ανά τέσσερις έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό των τετραπλεύρων. Για την επίτευξη αρκετά πυκνού πλέγματος κοντά στο τοίχωμα και την αραίωση του κατά την απομάκρυνση από αυτό, η κάθετη τοποθέτηση των σημείων έγινε βάση γεωμετρικής προόδου. Ο λόγος δύο αποστάσεων διαδοχικών κόμβων κατά την απομάκρυνση από το τοίχωμα τέθηκε 1.1 με αποτέλεσμα την αραίωση κατά την απομάκρυνση, η πρώτη απόσταση κόμβου από το τοίχωμα ίση με  $10^{-6}$  του μήκους της χορδής της αεροτομής ενώ αποφασίστηκε να σχηματιστούν 91 στρώματα δομημένου πλέγματος γύρω από την αεροτομή. Το συνολικό ύψος του είναι ίσο με 5.84% του μήκους της αεροτομής.

## **Βήμα 2: Εκλέπτυνση του δομημένου πλέγματος (Refinement)**

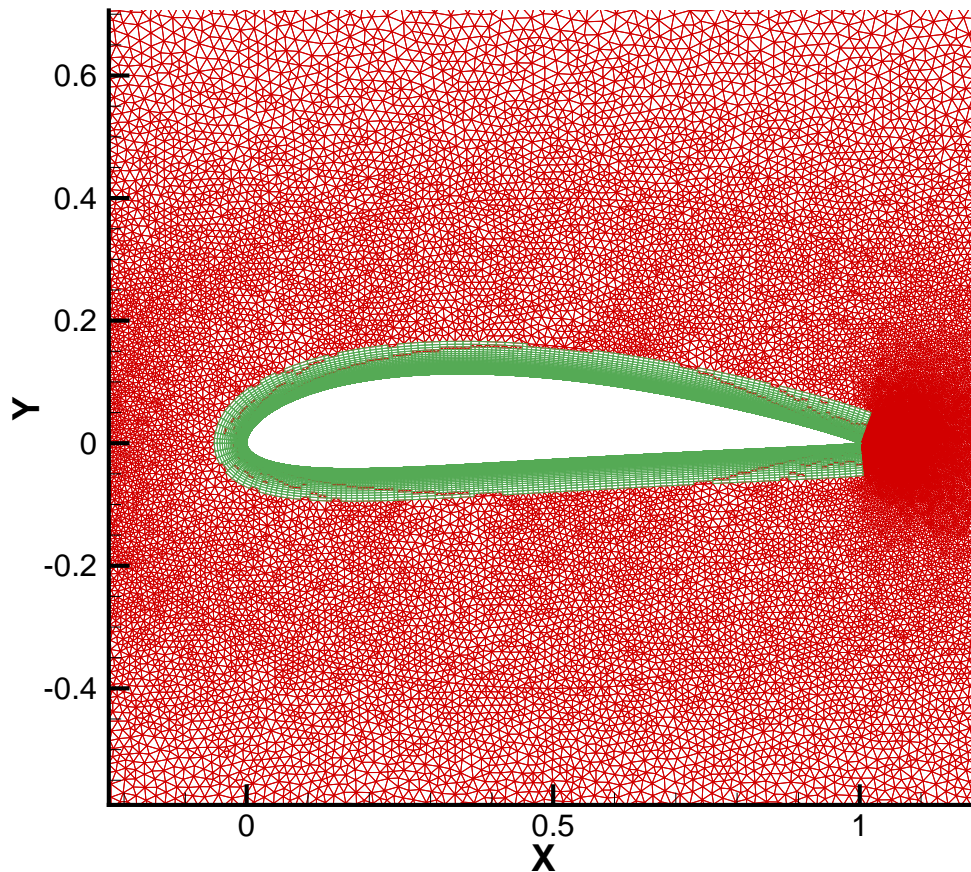
Στόχος του συγκεκριμένου βήματος είναι η βελτίωση του δομημένου πλέγματος που κατασκευάστηκε στο προηγούμενο στάδιο με την εφαρμογή αλγορίθμου εκλέπτυνσης (refinement). Καθώς απομακρυνόμαστε από το στερεό τοίχωμα, η αύξηση του πλάτους των τετράπλευρων στοιχείων είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με την αύξηση του αντίστοιχου ύψους τους λόγω της γεωμετρικής προόδου που εφαρμόστηκε κατά την κατασκευή του πλέγματος στο προηγούμενο στάδιο. Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι η δημιουργία στοιχείων με πολύ μεγαλύτερο ύψος ως προς πλάτος, γεγονός το οποίο δεν συνίσταται στην κατασκευή πλεγμάτων. Λύση σε αυτό δίνει ο αλγόριθμος εκλέπτυνσης που εφαρμόζεται, ο οποίος σαρώνει τα στοιχεία, ξεκινώντας από το στρώμα του τοίχωματος, και επεμβαίνει στο πλέγμα, όταν εντοπιστούν στοιχεία μη επιθυμητού λόγου διαστάσεων, διαγράφοντας κατάλληλα κόμβους προς ενοποίηση στοιχείων του ίδιου στρώματος. Η διαγραφή δεν περιορίζεται μόνο στο στοιχείο που εντοπίστηκε αλλά επεκτείνεται και στα υπόλοιπα της ίδιας στήλης που ακολουθούν καθ' ύψος καθώς αναμένεται να παρουσιάζουν μη επιθυμητό λόγο διαστάσεων λόγω της αύξησης του ύψους τους με γεωμετρική πρόοδο. Έτσι, γειτονικά στοιχεία του ίδιου στρώματος ενοποιούνται, με τα τελικά στοιχεία να έχουν τον επιθυμητό λόγο ύψους προς πλάτος. Λόγω του τρόπου της διαγραφής των κόμβων, είναι απαραίτητη η σύνδεση των κόμβων ανά τρεις και η δημιουργία τριγωνικών στοιχείων σε ορισμένες περιοχές. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται στα στοιχεία από τα οποία ξεκινά κάθε φορά η διαγραφή των κόμβων και συνεχίζει καθ' ύψος. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε όλα τα στρώματα του δομημένου πλέγματος. Καθοριστική είναι η συνεισφορά του στην ακμή εκφυγής (σχήμα 2.3) και πρόσπτωσης όπου εφαρμόστηκε πυκνώση των σημείων του περιγράμματος της αεροτομής και συνεπώς και των κόμβων του δομημένου πλέγματος. Η μη εφαρμογή του θα είχε ως αποτέλεσμα τετράπλευρα μη επιθυμητών διαστάσεων, στα οποία η καθ' ύψος διάσταση θα ήταν μεγαλύτερη της κατά πλάτους κατά ένα μη επιθυμητό λόγο.



Σχήμα 2.3: Εστίαση στην ακμή εκφυγής. Αριστερά: πριν την εκλέπτυνση. Δεξιά: μετά την εκλέπτυνση του πλέγματος κατά τόπους.

### Βήμα 3: Δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο

Το υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο, στο οποίο κατασκευάζεται το μη-δομημένο πλέγμα, οριοθετείται από την οριακή γραμμή του πλέγματος που κατασκευάστηκε μέχρι τώρα σε μια ζώνη γύρω από την αεροτομή και έναν εξωτερικό κύκλο (επ' άπειρο όριο) που το περικλείει με ακτίνα περίπου 10 φορές τη χορδή της αεροτομής. Ένας εσωτερικός κύκλος στο χωρίο αυτό κατασκευάζεται για τη ρύθμιση της πυκνότητας του πλέγματος, ενώ ισοκατανέμονται σημεία και στους δύο κύκλους. Η κατασκευή του μη-δομημένου πλέγματος γίνεται με τη μέθοδο του προελαύνοντος μετώπου (advancing front) με χρήση του προγράμματος Front σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα κατασκευάζεται το πλέγμα μεταξύ της οριακής γραμμής και του εσωτερικού κύκλου ενώ στο δεύτερο βήμα κατασκευάζεται το πλέγμα του υπόλοιπου χωρίου μεταξύ των δύο κύκλων (εσωτερικού και εξωτερικού). Προφανώς, ο αριθμός των σημείων των κύκλων καθορίζουν την πυκνότητα του πλέγματος. Τα σημεία αυτά και τα σημεία της οριακής γραμμής αποτελούν είσοδο στο πρόγραμμα Front. Ο αριθμός των κόμβων του τελικού πλέγματος είναι περίπου 165.000 και σχηματίζονται 190.000 τρίγωνα και 67.000 τετράπλευρα. Αναφέρεται ότι ο αριθμός αυτός προέκυψε μετά από έλεγχο ανεξαρτησίας του πλέγματος. Στο σχήμα 2.4 που ακολουθεί απεικονίζεται μια άποψη κοντά στην αεροτομή, και όχι ολόκληρο το χωρίο που κατασκευάστηκε, για να είναι ευδιάκριτη η περιοχή γύρω από αυτή.



Σχήμα 2.4: Άποψη του τελικού πλέγματος κοντά στην αεροτομή.

## 2.2 Γένεση πλέγματος γύρω από μεμονωμένη αεροτομή με μία δέσμη ελέγχου

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής του πλέγματος στην περίπτωση εφαρμογής ελέγχου με μία δέσμη ρευστού. Η μοντελοποίηση της δέσμης γίνεται με την κατασκευή κοιλότητας κωδωνοειδούς γεωμετρίας, της οποίας το πάνω μέρος ενώνεται με την αεροτομή στην οπή. Η έξοδος (ή είσοδος ανάλογα με την επιβολή των οριακών συνθηκών) της ροής γίνεται από την βάση της κοιλότητας και με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται η επιθυμητή δέσμη ελέγχου στην οπή, ως αποτέλεσμα επίλυσης. Διαφορετική προσέγγιση αποτελεί η απευθείας επιβολή των οριακών συνθηκών της δέσμης ελέγχου στην οπή της αεροτομής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την κατασκευή του νέου πλέγματος αποτέλεσε η τροποποίηση του παραπάνω γενέτη πλέγματος με την προσθήκη νέων τμημάτων (γραφή σε bold) για τη μοντελοποίηση της δέσμης ελέγχου

με βάση την πρώτη προσέγγιση που αναφέρθηκε.

Ο νέος γενέτης πλέγματος εκτελεί τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία δομημένου πλέγματος σε μικρή απόσταση γύρω από την αεροτομή
2. Εκλέπτυνση του δομημένου πλέγματος - Refinement
3. Αφαίρεση της περιοχής γύρω από την οπή της δέσμης
4. Πύκνωση της περιοχής γύρω από την οπή της δέσμης
5. Κατασκευή ορίου και πλέγματος της κοιλότητας της δέσμης
6. Δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο

Τα βήματα 1,2,6 της παραπάνω διαδικασίας συμπίπτουν με αυτά της προηγούμενης ενότητας και δεν θα γίνει εκ νέου αναφορά σε αυτά. Τα βήματα 3,4 και 5 αποτελούν κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης ενότητας και ειδικότερα ο τρόπος προσαρμογής τους στον γενέτη πλέγματος για τη μοντελοποίηση της δέσμης ελέγχου (δημιουργία οπής - κοιλότητας). Αναφέρουμε ότι τα προγράμματα που εκτελούν την πύκνωση της περιοχής γύρω από την οπή και την κατασκευή της κοιλότητας προϋπήρχαν στο ΕΘΣ από προγενέστερη εργασία [17].

### **Βήμα 3: Αφαίρεση της περιοχής γύρω από την οπή της δέσμης**

Η τοποθέτηση της δέσμης του ρευστού απαιτεί την πύκνωση της περιοχής γύρω από την οπή αναρρόφησης ή έγχυσης του ρευστού στην πλευρά αναρρόφησης της αεροτομής. Για το λόγο αυτό, μετά την βελτίωση του δομημένου πλέγματος γύρω από την αεροτομή, αποκόπτεται μια περιοχή πλέγματος κοντά στην οπή και αντικαθίσταται από ένα τοπικά πιο πυκνό πλέγμα. Έτσι, στο συγκεκριμένο βήμα, η παρέμβαση στον γενέτη πλέγματος γίνεται με την ανάπτυξη και προσθήκη του αλγορίθμου αποκοπής της περιοχής προς αφαίρεση.

Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο καθορισμός της ζώνης που πρόκειται να αποκοπεί γύρω από την οπή. Τα μεγέθη με τα οποία ορίζεται η ζώνη είναι η θέση της οπής της δέσμης και το εύρος της, τα οποία είναι δεδομένα, και ένα προκαθορισμένο από το χρήστη μήκος εκατέρωθεν της οπής βάσει του οποίου θα γίνει η αποκοπή του πλέγματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ίσο με 0.05 του μήκους της χορδής). Με δεδομένα τα παραπάνω, υπολογίζονται τα δύο σημεία πάνω στην αεροτομή που ορίζουν τη βάση του χωρίου αποκοπής ενώ με κάθετη μετακίνηση τους (στο περίγραμμα της αεροτομής) μέχρι το άνω οριακό περίγραμμα υπολογίζονται δύο νέα σημεία. Προφανώς, το μήκος της βάσης του χωρίου θα ισούται με το εύρος της οπής και το διπλάσιο του προκαθορισμένου μήκους εκατέρωθεν της οπής. Το χωρίο που περικλείεται από το τετράπλευρο που ορίζουν τα τέσσερα σημεία αποτελεί το χωρίο αποκοπής.

Η δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά την αφαίρεση των κόμβων γύρω από την οπή, έχοντας ήδη προκαθορίσει το χωρίο αποκοπής, έγκειται στην τυχαία αρίθμηση των

κόμβων του πλέγματος στο συγκεκριμένο στάδιο. Η αρίθμηση του δομημένου πλέγματος του πρώτου βήματος έχει αλλάξει λόγω εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτίωσης του δομημένου πλέγματος και η αρίθμηση τους είναι πλέον τυχαία. Μια πρώτη σκέψη θα ήταν η σχετικά εύκολη αφαίρεση τους αμέσως μετά την ολοκλήρωση του πρώτου βήματος (δημιουργία δομημένου πλέγματος) είτε η μη κατασκευή πλέγματος εντός του προκαθορισμένου χωρίου. Στην περίπτωση αυτή, οι επεμβάσεις στους αλγορίθμους γένεσης και βελτίωσης του δομημένου πλέγματος θα ήταν αρκετά μεγάλες. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη ενός νέου αλγορίθμου αποκοπής.

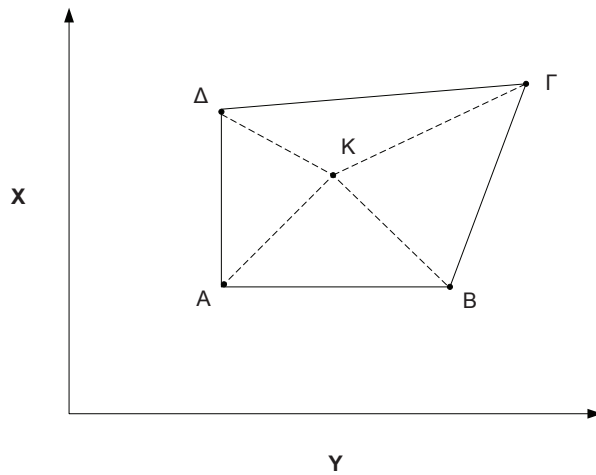
Η ιδέα του αλγορίθμου αποκοπής της συγκεκριμένης περιοχής, η οποία γενικεύεται στην αποκοπή οποιουδήποτε χωρίου, βασίζεται στις ιδιότητες του εξωτερικού γινομένου δύο διανυσμάτων. Πρώτος στόχος του αλγορίθμου είναι η ανίχνευση και η προσημείωση των σημείων που βρίσκονται εντός του χωρίου προς αφαίρεση. Συγκεκριμένα, έστω τέσσερα σημεία A, B, Γ, Δ του επιπέδου XY, που αποτελούν κορυφές τετραπλεύρου και ένα τυχαίο σημείο K (σχήμα 2.5). Όταν το σημείο K βρίσκεται δεξιά της ευθείας που διέρχεται από τα σημεία A, Δ, το εξωτερικό γινόμενο  $\vec{O1}$  των διανυσμάτων  $\vec{AD}$  και  $\vec{AK}$  είναι θετική ποσότητα, ενώ όταν βρίσκεται αριστερά είναι αρνητικό. Συνολικά, όταν βρίσκεται το σημείο K εντός του τετραπλεύρου πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα οι παρακάτω ανισότητες:

$$\begin{aligned}\vec{O1} &= \vec{AK} \times \vec{AD} > 0 \text{ (K δεξιά της AB)} \\ \vec{O2} &= \vec{BK} \times \vec{BG} < 0 \text{ (K αριστερά της BG)} \\ \vec{O3} &= \vec{AK} \times \vec{AB} < 0 \text{ (K πάνω της AB)} \\ \vec{O4} &= \vec{GK} \times \vec{GD} < 0 \text{ (K κάτω της GD)}\end{aligned}$$

Εξ' ορισμού, για δύο διανύσματα  $\vec{a} = (a1, a2)$  και  $\vec{b} = (b1, b2)$  του επιπέδου XY, το εξωτερικό γινόμενο τους  $\vec{O}$  ισούται με:

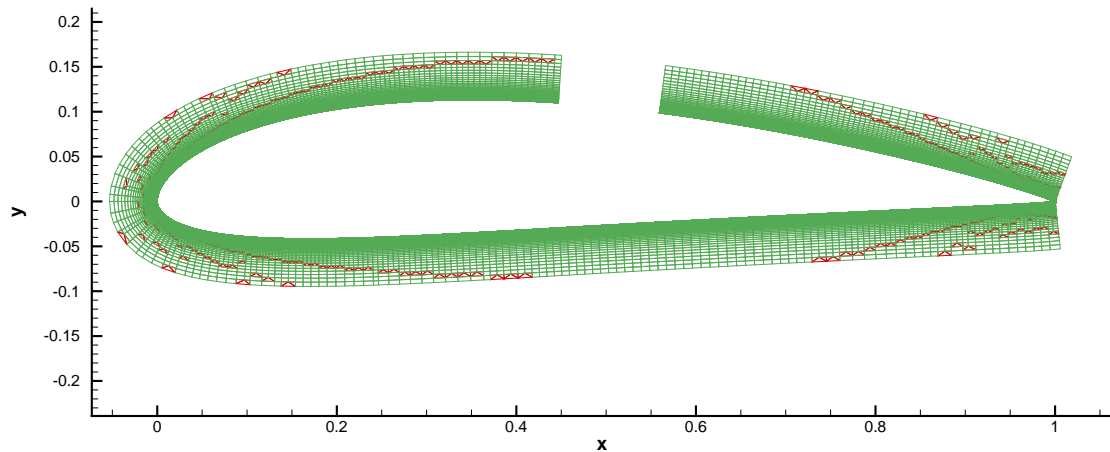
$$\vec{O} = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a1 & a2 & 0 \\ b1 & b2 & 0 \end{vmatrix} = (a1 \cdot b2 - b1 \cdot a2) \vec{k},$$

όπου  $\vec{k}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο στο οποίο βρίσκονται τα διανύσματα  $\vec{a}$  και  $\vec{b}$ .



Σχήμα 2.5: Τετράπλευρο ABΓΔ και τυχαίο σημείο σημείο K του επιπέδου XY.

Στην περίπτωση που κάποια από τις παραπάνω ανισότητες δεν επαληθεύεται, τότε το υπόψη σημείο K δεν βρίσκεται εντός του τετραπλεύρου. Ακολουθούμε την παραπάνω μεθοδολογία για όλους τους κόμβους του πλέγματος με σκοπό την αναγνώριση αυτών που βρίσκονται στην προκαθορισμένη περιοχή που θέλουμε να αφαιρέσουμε και το κατάλληλο μαρκάρισμα τους. Ειδικότερα, στον συγκεκριμένο τύπο πλέγματος ελέγχουμε μόνο τις δύο πρώτες ανισότητες ώστε να μειώσουμε τις αριθμητικές πράξεις και τους αντίστοιχους ελέγχους εισάγοντας έναν τρίτο πιο απλό έλεγχο. Κατά τον έλεγχο αυτό, συγκρίνεται η τεταγμένη του τυχαίου σημείου K με την ελάχιστη τεταγμένη των σημείων A και B. Όταν αυτή αυτή είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης, και ισχύουν και οι δύο πρώτες ανισότητες, το σημείο ελέγχου βρίσκεται στη ζώνη αποκοπής που επιθυμούμε και προσημειώνεται. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται μιας και πάνω από τη ζώνη δεν βρίσκονται κόμβοι ενώ κάτω από τη ζώνη οι επόμενοι κόμβοι βρίσκονται στην πλευρά υπερπίεσης. Ακολουθεί η αφαίρεση των κόμβων που εντοπίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία και των τετράπλευρων ή τριγώνων στα οποία ανήκουν. Επίσης, προσημειώνονται κατάλληλα οι οριακοί κόμβοι του χωρίου που αφαιρέθηκαν, ώστε να είναι πιο εύκολη και γρήγορη η σύνδεση του πλέγματος που θα δημιουργηθεί και θα τοποθετηθεί στην περιοχή αυτή. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου δίνει το πλέγμα του σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.6: Αφαίρεση της προκαθορισμένης ζώνης πλέγματος γύρω από την οπή της δέσμης.

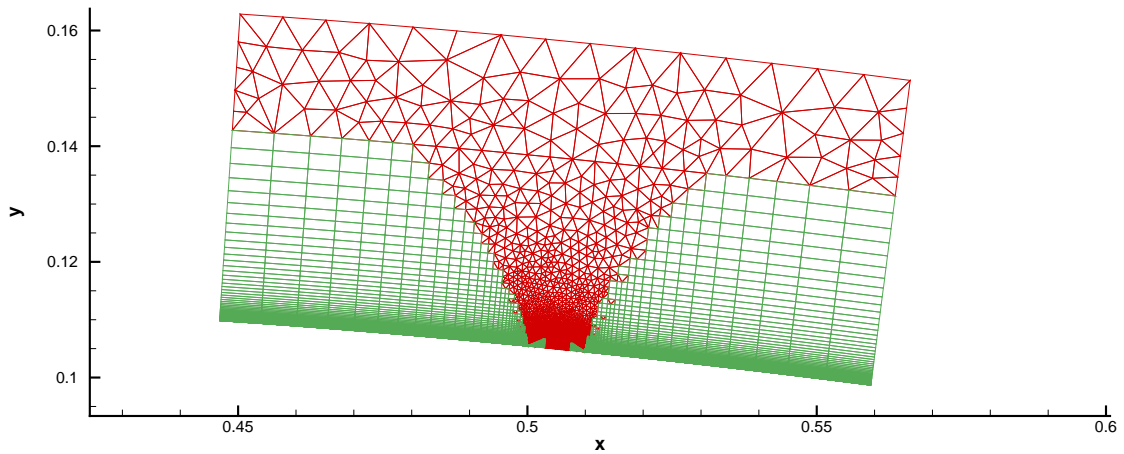
#### Βήμα 4: Πύκνωση της περιοχής γύρω από την οπή της δέσμης

Στο βήμα αυτό, το τμήμα του πλέγματος που αφαιρέθηκε συμπληρώνεται με ένα πιο πυκνό πλέγμα λόγω της ύπαρξης της δέσμης ελέγχου στην περιοχή αυτή. Η κατασκευή του νέου πλέγματος γίνεται σταδιακά. Το πλέγμα που κατασκευάζεται από τον αντίστοιχο αλγόριθμο φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Η διαδικασία κατασκευής του έχει ως εξής. Αρχικά ανακατανέμονται οι κόμβοι στο περίγραμμα της αεροτομής βάσει γεωμετρικής προόδου για την αύξηση της πυκνότητας των κόμβων μέχρι την οπή καθώς πλησιάζουμε σε αυτή. Με το πρόγραμμα γένεσης δομημένου πλέγματος κατασκευάζονται τα αντίστοιχα πλέγματα για το ανάντι και κατόντι τμήμα της αεροτομής σε σχέση με την οπή, δηλαδή από τα σημεία αποκοπής του πλέγματος μέχρι και την οπή. Η κατασκευή του δομημένου πλέγματος δεν γίνεται σε όλο το ύψος του χωρίου, αλλά σε ένα ποσοστό του, ώστε το υπόλοιπο τμήμα να καλυφθεί με μη-δομημένο πλέγμα. Επί των πλεγμάτων αυτών εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος αποκοπής, στόχος του οποίου είναι η αφαίρεση των εξωτερικών τετραπλεύρων που δεν ικανοποιούν τα όρια του λόγου μήκους και πλάτους των πλευρών των τετραπλεύρων που τέθηκαν από το χρήστη. Επίσης, στα δομημένα πλέγματα που προέκυψαν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτίωσης (*refinement*) που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες ενότητες μετά τη δημιουργία δομημένων πλεγμάτων. Τελικό βήμα στην κατασκευή του νέου πυκνωμένου πλέγματος αποτελεί η συμπλήρωση του υπολειπόμενου χωρίου με μη δομημένο πλέγμα.

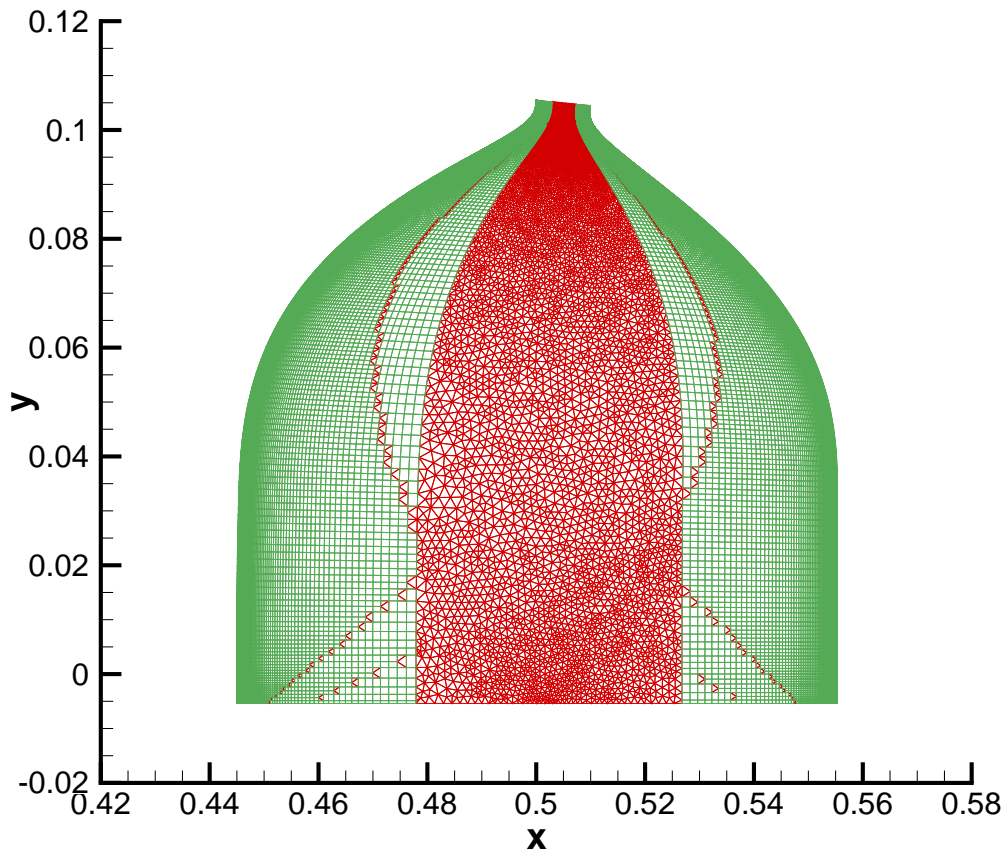
#### Βήμα 5: Κατασκευή ορίου και πλέγματος της κοιλότητας της δέσμης





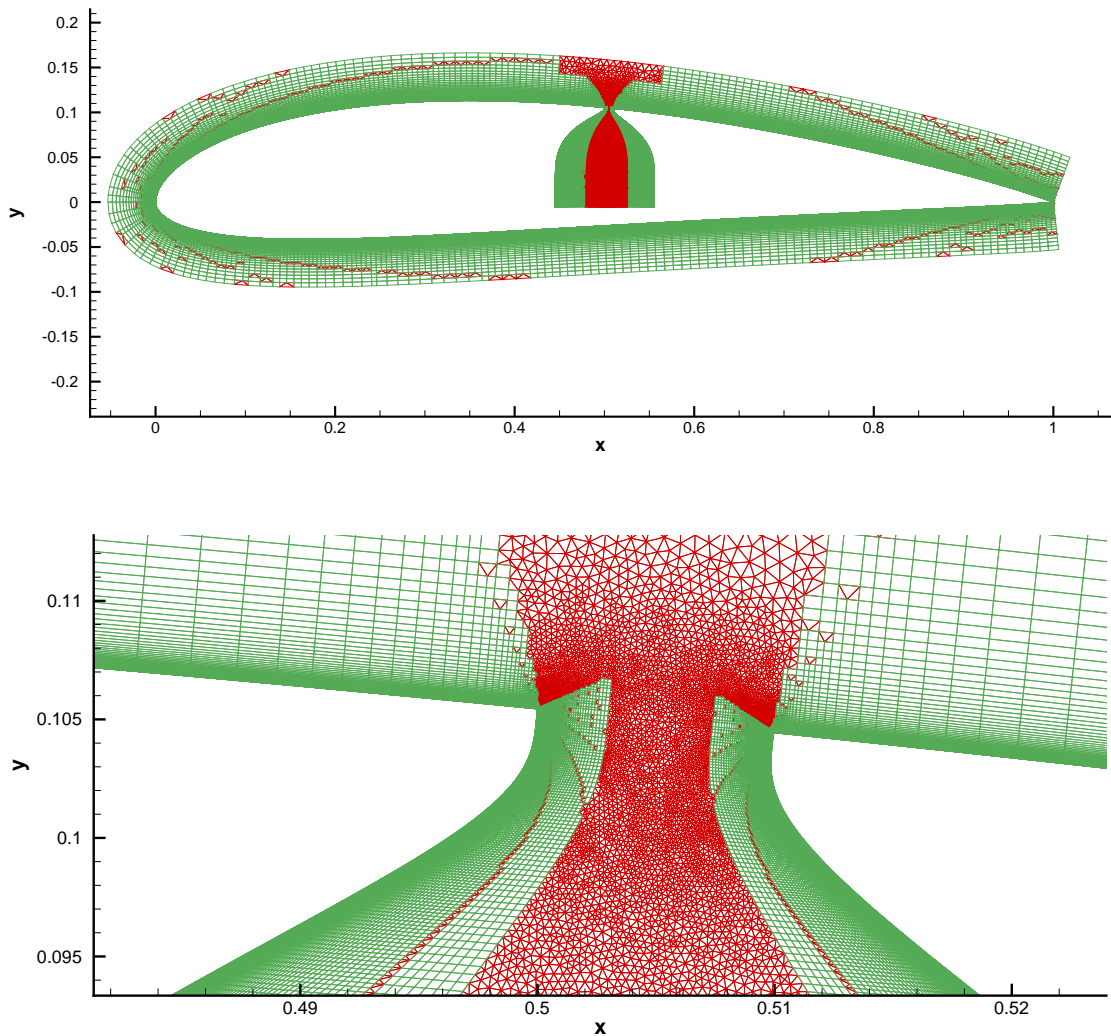
Σχήμα 2.7: Πλέγμα γύρω από την οπή της δέσμης.

Αφού καθοριστεί η γεωμετρία της κοιλότητας του επενεργητή της δέσμης, κατασκευάζεται το αντίστοιχο πλέγμα. Η κατασκευή του συγκεκριμένου περιλαμβάνει τα ίδια στάδια με την κατασκευή του πλέγματος γύρω από την αεροτομή χωρίς έλεγχο. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη στερεών τοιχωμάτων επιβάλλει τη δημιουργία πολύ πυκνού τοιχώματος κοντά σε αυτά με χρήση του ίδιου αλγόριθμου γένεσης δομημένου πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στην αεροτομή χωρίς έλεγχο. Έχοντας ολοκληρώσει την κατασκευή των πλεγμάτων κοντά στο τοίχωμα, χρησιμοποιώντας τον κώδικα δόμησης μη-δομημένων πλεγμάτων χτίζεται ένα ανάλογο πλέγμα στο υπολειπόμενο χωρίο, το περίγραμμα του οποίου αποτελείται από τους εσωτερικούς κόμβους του περιγράμματος των πλεγμάτων του τοιχώματος και από εκείνους που συμπληρώνουν την πάνω και κάτω πλευρά. Οι τελευταίοι κόμβοι ακολουθούν ένα 'συνταίριασμα' δύο γεωμετρικών προόδων, ώστε στο κέντρο της εκάστοτε πλευράς η κατανομή να είναι αραιότερη σε σχέση με τα άκρα αυτής. Προφανώς, κάθε πρόοδος έχει υπολογιστεί ώστε να εξασφαλίζεται συνέχεια στην αλληλουχία των κόμβων πάνω στην πλευρά της οπής και την κάτω της κοιλότητας, καθώς έχουν ήδη τοποθετηθεί κάποιοι κόμβοι στις εν λόγω πλευρές από το σχηματισμό των πλεγμάτων κοντά στο τοίχωμα. Σύνδεση λοιπόν των τριών πλεγμάτων συνεπάγεται και την ολοκλήρωση της δόμησης του πλέγματος της κοιλότητας του επενεργητή 2.8.



Σχήμα 2.8: Πλέγμα κοιλότητας επενεργητή της δέσμης

Ακόλουθη ενέργεια αποτελεί η ένωση των πλεγμάτων που κατασκευάστηκαν στα παραπάνω βήματα. Στο σχήμα 2.9 αποτυπώνεται το αποτέλεσμα της ένωσης. Τελικό βήμα μετά την ένωση αποτελεί η γένεση μη-δομημένου πλέγματος στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο. Το υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο, στο οποίο κατασκευάζεται το μη-δομημένο πλέγμα, ταυτίζεται με αυτό της αεροτομής χωρίς έλεγχο και οριοθετείται από την οριακή γραμμή της ζώνης πλέγματος του προηγούμενου βήματος και τον κύκλο (επ' άπειρο όριο) που το περικλείει με ακτίνα περίπου 10 φορές τη χορδή της αεροτομής.

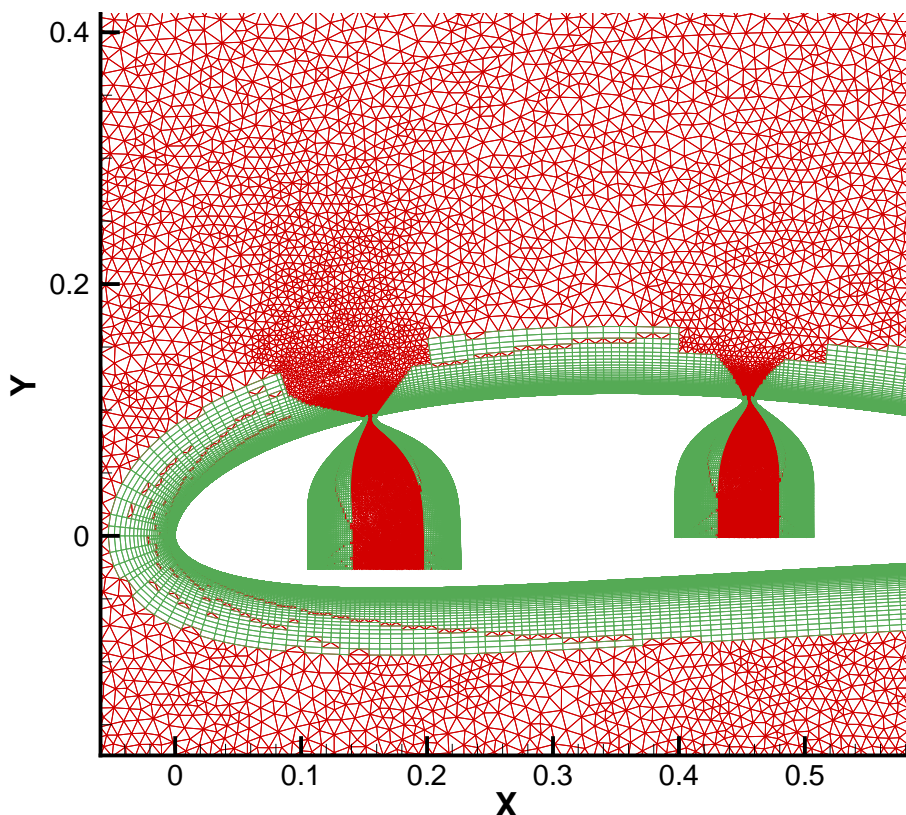


Σχήμα 2.9: Ένωση των πλεγμάτων των βημάτων 2,3,4

### 2.3 Γένεση πλέγματος γύρω από απομονωμένη αεροτομή με δύο δέσμες ελέγχου

Η κατασκευή του πλέγματος της συγκεκριμένης περίπτωσης βασίζεται στα βήματα κατασκευής του πλέγματος με μία δέσμη ελέγχου. Η διαφοροποίηση έγκειται στην επανάληψη των βημάτων 3,4,5 της ενότητας 2 που είναι υπεύθυνα για την κατασκευή των αντίστοιχων πλεγμάτων της περίπτωσης μιας δέσμης. Τα συγκεκριμένα βήματα εντάχτηκαν σε βρόχο επανάληψης, ο οποίος εκτελέστηκε δύο φορές. Γίνεται άμεσα

κατανοητό ότι υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών οπών ανάλογα με τον αριθμό εκτελέσεων του βρόχου.

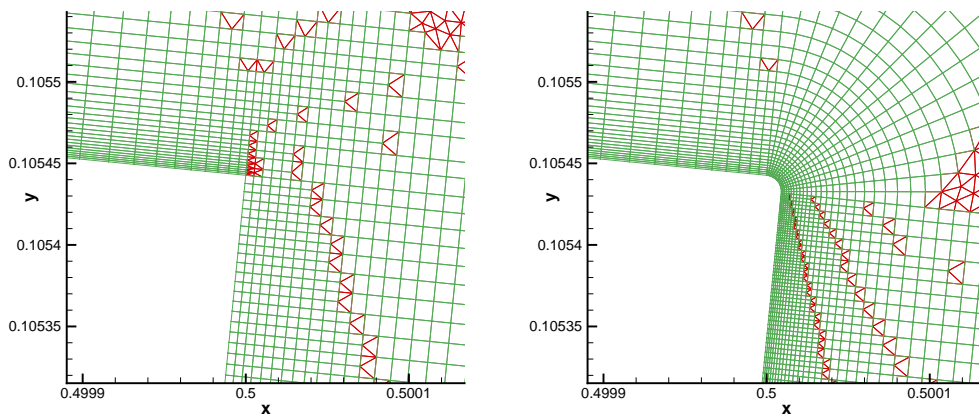


Σχήμα 2.10: Πλέγμα αεροτομής με 2 δέσμες ελέγχου. Η μια είναι τοποθετημένη στη θέση 0.15 και η δεύτερη στη θέση 0.45 ως προς τη χορδή.

## 2.4 Κατασκευή καμπυλώσεων στις ενώσεις κοι- λότητας επενεργητή και αεροτομής

Ο τρόπος κατασκευής του πλέγματος πάνω και κάτω από την οπή που περιγράψαμε μέχρι τώρα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οξείας ακμής στην περιοχή της ένωσης του τοιχώματος της αεροτομής και του τοιχώματος της κοιλότητας του επενεργητή (αρχή και τέλος οπής). Η οξεία αυτή ακμή διακρίνεται στην αριστερή εικόνα του σχήματος 2.11 ενώ αντίστοιχη δημιουργείται στη δεξιά περιοχή της ένωσης. Αν υποθέσουμε εξωτερική ροή ρευστού, η ύπαρξη της ακμής αναγκάζει τη ροή να αποκολληθεί στο σημείο

αυτό, συνεχίζοντας μετά την ακμή εφαπτομενικά ως προς την επιφάνεια της αεροτομής. Το μέτρο της ταχύτητας στην ακμή εκφυγής γίνεται πολύ μεγάλο (θεωρητικά άπειρο) μιας και η ακτίνα καμπυλότητας στην εξέχουσα ακμή είναι μηδέν. Η αντίστοιχη κλίση της ταχύτητας γίνεται αρνητική αμέσως μετά την ακμή και η ανακυκλοφορία είναι αναπόφευκτη. Η δίνη που σχηματίζεται απωθεί τη ροή του ρευστού μακριά από το τοίχωμα. Η συγκεκριμένη ανάλυση μας παροτρύνει στην εξομάλυνση της ακμής και την εμφάνιση μη-μηδενικής καμπυλότητας.

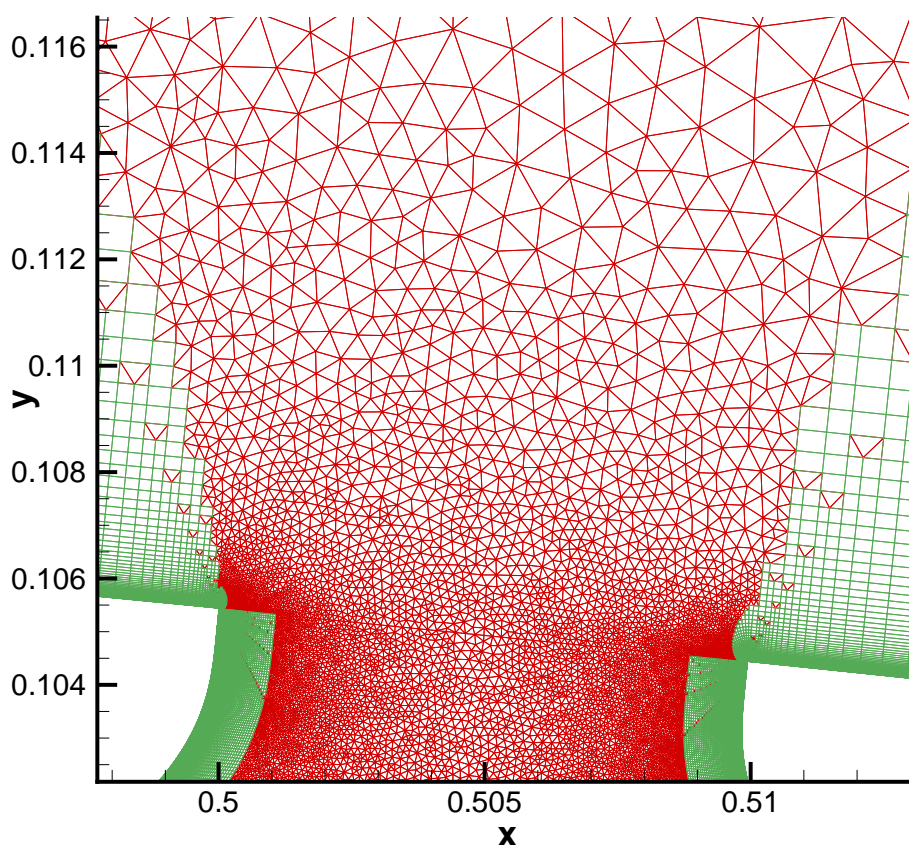


Σχήμα 2.11: Η περιοχή της ένωσης κοιλότητας επενεργητή και αεροτομής ανάντι της οπής. Αριστερά: χωρίς καμπύλωση (με οξεία ακμή). Δεξιά: με καμπύλη διαμόρφωση.

Για την κατασκευή της καμπύλωσης απαιτείται η παρέμβαση στον γενέτη πλέγματος της παραπάνω ενότητας. Η παρέμβαση αφορά την κατασκευή του πυκνωμένου πλέγματος γύρω από την οπή της δέσμης. Τα υπόλοιπα βήματα παραμένουν τα ίδια με αυτά της ενότητας 2. Συγκεκριμένα δημιουργείται εξαρχής νέο πρόγραμμα που αναλαμβάνει τη δημιουργία του νέου πλέγματος γύρω από την οπή, στην περίπτωση που έχει ενεργοποιηθεί η επιλογή κατασκευής της ένωσης με καμπύλη, και ενσωματώνεται στο κύριο πρόγραμμα. Η διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια.

Μετά την αφαίρεση της προκαθορισμένης περιοχής γύρω από την οπή της δέσμης (Βήμα 3 της προηγούμενης ενότητας) ακολουθεί η δημιουργία του νέου πυκνωμένου πλέγματος. Η διαδικασία έχει ως εξής. Αρχικά ανακατανέμονται οι κόμβοι στο περίγραμμα της αεροτομής βάση γεωμετρικής προόδου για την αύξηση της πυκνότητας μέχρι την οπή καθώς πλησιάζουμε σε αυτή. Στη συνέχεια, προσαρμόζονται κυκλικά τόξα στην οπή και κατανέμονται σημεία πάνω σε αυτά. Με το πρόγραμμα γένεσης δομημένου πλέγματος κατασκευάζονται σε δύο βήματα τα αντίστοιχα πλέγματα για το ανάντι και κατάντι τμήμα της αεροτομής σε σχέση με την οπή. Στο πρώτο βήμα κατασκευάζεται το πλέγμα επί της αεροτομής από το σημείο αποκοπής του πλέγματος μέχρι και την οπή, δηλαδή την αρχή του κυκλικού τόξου. Στο δεύτερο, κατασκευάζεται το πλέγμα επί του κυκλικού τόξου και ακολουθεί ένωση τους. Στα πλέγματα αυτά εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος αποκοπής, στόχος του οποίου είναι η αφαίρεση των

εξωτερικών τετραπλεύρων που δεν ικανοποιούν τα όρια του λόγου μήκους και πλάτους των πλευρών των τετραπλεύρων που τέθηκαν από το χρήστη. Επίσης, στα δομημένα πλέγματα που προέκυψαν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτίωσης (*Refinement*) που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες ενότητες μετά τη δημιουργία δομημένων πλεγμάτων. Τελικό βήμα κατά την κατασκευή του νέου πυκνωμένου πλέγματος αποτελεί η συμπλήρωση του υπολειπόμενου χωρίου με μη δομημένο πλέγμα.



Σχήμα 2.12: Η περιοχή της ένωσης κοιλότητας επενεργητή και αεροτομής.

Στο σχήμα 2.12 γίνεται εστίαση στην περιοχή της οπής της δέσμης. Διακρίνονται τα ‘σκαλοπάτια’ που δημιουργεί ο αλγόριθμος αποκοπής στο δομημένο πλέγμα πάνω από το κυκλικό τόξο και τμήμα του μη-δομημένου πλέγματος. Δεν απεικονίζεται ολόκληρο το χωρίο που κατασκευάστηκε για να είναι πιο ευδιάκριτη η περιοχή με τις σημαντικότερες αλλαγές, καθώς η υψηλή πυκνότητα του πλέγματος θα μείωνε σημαντικά την ευκρίνεια. Για το υπόλοιπο του χωρίου ο αναγνώστης καλείται να φανταστεί τη συνέχεια του πλέγματος καθώς ο τρόπος κατασκευής του συμπίπτει με αυτό της ενότητας 2 για την πυκνωση της περιοχής γύρω από την οπή.

# Κεφάλαιο 3

## Εξισώσεις Navier Stokes πεδίου ροής και επίλυσή τους σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών (*GPUs*)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής (Reynolds Averaged Navier Stokes με ένα μοντέλο τύρβης μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης, αυτό των *Spalart – Allmaras* [19]), οι οποίες αποτελούν τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της συνεκτικής ροής συμπιεστού ρευστού. Στη συνέχεια περιγράφεται εν συντομία η επίλυση τους σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών (κοινώς κάρτες γραφικών) αντί της συμβατικής μεθοδολογίας που αναφέρεται σε μία η περισσότερες κεντρικές μονάδες επεξεργασίας. Η εφαρμογή του παραπάνω προσφέρει επιτάχυνση στην επίλυση των εξισώσεων έως και 60 φορές ως προς μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας με ένα πυρήνα.

### 3.1 Εξισώσεις Navier Stokes

Η συμπιεστή ροή συνεκτικού ρευστού μοντελοποιείται μέσω των εξισώσεων Navier Stokes (*NS*) οι οποίες εκφράζουν σε διαφορική μορφή τη διατήρηση της συνέχειας, της ορμής και της ενέργειας. Για διδιάστατα προβλήματα και στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ( $x, y$ ), οι εξισώσεις αυτές σε συντηρητική διανυσματική μορφή γράφονται:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}^{inv}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}^{inv}}{\partial y} - \frac{\partial \vec{F}^{vis}}{\partial x} - \frac{\partial \vec{G}^{vis}}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Το διάνυσμα των συντηρητικών μεταβλητών  $\vec{W}$  έχει συνιστώσες:

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

με  $\rho$  να αποτελεί τη πυκνότητα του ρευστού,  $u$ ,  $v$  τις καρτεσιανές συνιστώσες της ταχύτητας  $\vec{U}$  του ρευστού, και  $E$  την ολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου που δίνεται από την σχέση:

$$E = \rho e + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \quad (3.3)$$

Τα διανύσματα ροής  $\vec{F}$  και  $\vec{G}$ , αντίστοιχα κατά τις κατευθύνσεις  $x$  και  $y$ , χωρίζονται στο συνεκτικό μέρος και στο μη-συνεκτικό. Ο εκθέτης *vis* αντιπροσωπεύει το συνεκτικό μέρος (*viscous*), ενώ αντίθετα ο εκθέτης *inv* αντιπροσωπεύει το μη-συνεκτικό μέρος (*inviscid*). Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι από τις εξισώσεις 3.1 με μηδενισμό των συνεκτικών όρων προκύπτουν οι εξισώσεις *Euler*. Φυσικά το κλείσιμο των τελευταίων εξισώσεων διαφέρει από το κλείσιμο των *Navier Stokes* ως προς τις οριακές συνθήκες της ροής πάνω σε στερεά τοιχώματα. Οι συνιστώσες των παραπάνω διανυσμάτων φαίνονται παρακάτω.

$$\vec{F}^{inv} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p) u \end{bmatrix}, \quad \vec{G}^{inv} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p) v \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\vec{F}^{vis} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix}, \quad \vec{F}^{vis} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + q_y \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

με  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yy}$  να αντιπροσωπεύουν τις τάσεις μεταξύ των στοιχείων του ρευστού εξαιτίας του συνεκτικού του χαρακτήρα, ενώ η μεταφορά θερμότητας από έναν στοιχειώδη όγκο του ρευστού προς το περιβάλλον του συμβολίζεται με το διάνυσμα  $\vec{q} = [q_x \ q_y]^T$ .

Οι τάσεις παραμόρφωσης σε ένα ισότροπο, νευτώνιο (γραμμικό - δηλαδή η σχέση του ρυθμού παραμόρφωσης με την ασκούμενη τάση είναι γραμμική) ρευστό δίνονται από την ακόλουθη σχέση, με τον δείκτη  $k$  να αποτελεί επαναλαμβανόμενο δείκτη (δηλαδή υποδηλώνει άθροιση) και το σύμβολο ' $\delta_{ij}$ ' να αντιπροσωπεύει το δέλτα του *Kronecker*.

$$\tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3.6)$$

### Μοντέλο τύρβης μιας εξίσωσης *Spalart – Allmaras*

Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε είναι εκείνο των *Spalart – Allmaras* [19], το οποίο ανήκει στην κατηγορία μοντέλων μίας εξίσωσης (δηλαδή προσθέτει μία ακόμα διαφορική εξίσωση στις ήδη υπάρχουσες για τη ροή). Επιλύει μια διαφορική



εξίσωση για τη μεταβλητή  $\tilde{\nu}$ , από την οποία υπολογίζεται η τυρβώδης συνεκτικότητα μέσω της σχέσης:

$$\mu = \tilde{\mu} f_{\nu 1} \quad (3.7)$$

όπου

$$\tilde{\mu} = \varrho \tilde{\nu}, \quad f_{\nu 1} = \frac{x^3}{x^3 + c_{\nu 1}^3} \quad (3.8)$$

Η εξίσωση του μοντέλου για συμπιεστές ροές είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varrho \tilde{\mu}}{\partial t} + \frac{\partial(\varrho u_i \tilde{\mu})}{\partial x_i} = & \frac{1}{\sigma} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \tilde{\mu}) \frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial x_i} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\mu}^2}{\partial x_i} \right] + c_{b1} (1 - f_{t2}) \tilde{S} \rho \tilde{\mu} \\ & - (c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{k^2} f_{t2}) \left( \frac{\tilde{\mu}}{d} \right)^2 + \varrho^2 f_{t1} \Delta u^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

με τους διάφορους όρους να ορίζονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \tilde{S} = S + \frac{\tilde{\mu}}{y^2 k^2} f_{\nu 2}, \quad S = |\vec{\omega}|, \quad f_{\nu 2} = 1 - \frac{x}{1 + x f_{\nu 1}}, \quad f_w = g \left( \frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right)^{1/6}, \\ g = r + c_{w2} (r^6 - r), \quad r = \frac{\tilde{\mu}}{\tilde{S} \rho k^2 y^2} \end{aligned}$$

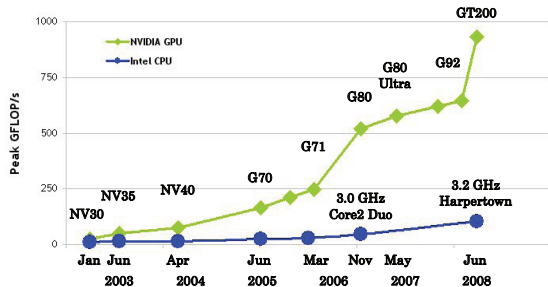
με  $|\vec{\omega}|$  το μέτρο του στροβιλισμού του πεδίου ταχύτητας και  $y$  την απόσταση κάθε κόμβου από το πλησιέστερο τοίχωμα. Για το συντε Η χρήση του μοντέλου τύρβης των *Spalart – Allmaras* επέβαλε τη δημιουργία αρκετά πυκνού τοιχώματος κοντά στο τοίχωμα ώστε η ποσότητα  $y^+$  να ισούται περίπου με τη μονάδα. Τέλος οι τιμές των σταθερών του μοντέλου δίνονται ακολούθως:

$$\begin{aligned} \sigma = \frac{2}{3}, \quad k = 0.41, \quad c_{\nu 1} = 7.1, \quad c_{b1} = 0.1355, \quad c_{b2} = 0.622 \\ c_{w1} = \frac{c_{b1}}{k} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma}, \quad c_{w2} = 0.3, \quad c_{w3} = 2, \quad , \quad Pr_t = 0.9 \end{aligned}$$

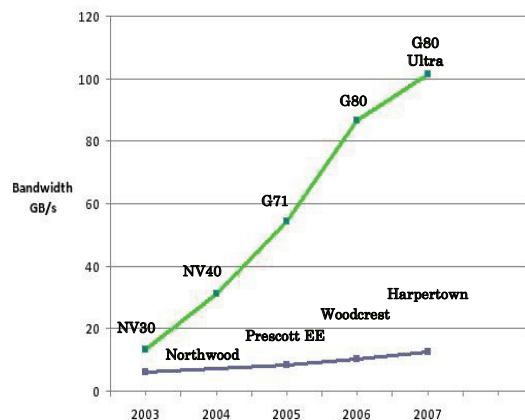
## 3.2 Επίλυση των εξισώσεων Navier Stokes σε GPUs

### Εξέλιξη των GPUs

Ωθούμενη από τις απαιτήσεις της αγοράς για τριδιάστατα γραφικά υψηλής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, η μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU) έχει εξελιχθεί σε πολυπύρρηνο, παράλληλο επεξεργαστή, υψηλής υπολογιστικής ισχύος και προσπέλασης μνήμης, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2, ικανή για επιστημονική χρήση.



Σχήμα 3.1: Εξέλιξη στο χρόνο της υπολογιστικής δυνατότητας των GPUs και των CPUs



Σχήμα 3.2: Εξέλιξη στο χρόνο της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων των GPUs και των CPUs

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η εξέλιξη στο χρόνο της υπολογιστικής δυνατότητας των GPUs και των μονάδων επεξεργασίας του υπολογιστή (CPUs), μετρούμενη σε GFlops, δηλαδή αριθμό πράξεων κινητής υποδιαστολής ανά δευτερόλεπτο (Floating Point Operations per Second). Άμεση παρατήρηση είναι η ραγδαία αύξηση της επίδοσης των GPUs έναντι των CPUs τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, ενώ αρχικά η επίδοση τους βρισκόνταν στα ίδια επίπεδα, το 2008 κατέληξαν οι πρώτες να υπερτερούν σε απόδοση περίπου μία τάξη μεγέθους έναντι των δεύτερων. Παρόμοια τάση παρατηρούμε και στο σχήμα 3.2 όπου εικονίζεται η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων.

Ο λόγος στον οποίο οφείλεται η διαφορά στην ικανότητα εκτέλεσης πράξεων κινητής υποδιαστολής μεταξύ της μονάδας επεξεργασίας του υπολογιστή και της μονάδας επεξεργασίας των γραφικών είναι το γεγονός ότι η τελευταία ειδικεύεται σε απαιτητικούς, παράλληλους υπολογισμούς, αυτό που απαιτεί δηλαδή ή δημιουργία γραφικών, και για το λόγο αυτό σχεδιάζεται έτσι ώστε περισσότερα τρανζίστορ να αφιερώνονται στην επεξεργασία δεδομένων παρά στην προσωρινή αποθήκευση αυτών και τον έλεγχο ροής.

Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών είναι κατάλληλες να διαχειρίζονται προβλήματα που μπορούν να αναλυθούν σε παράλληλους υπολογισμούς δεδομένων με μεγάλο λόγο αριθμητικών πράξεων προς τον αριθμό προσπελάσεων μνήμης.

Επειδή το ίδιο πρόγραμμα εκτελείται για το κάθε πακέτο δεδομένων, υπάρχει μικρότερη απαίτηση για έξυπνη διαχείριση του ελέγχου ροής. Και επειδή εκτελείται ταυτόχρονα σε πολλά πακέτα δεδομένων, εκτελώντας πολλές περισσότερες αριθμητικές πράξεις έναντι διαχειρίσεων μνήμης, η προσπέλαση στη λανθάνουσα μνήμη μπορεί να παραλειφθεί εκτελώντας υπολογισμούς αντί προσωρινών αποθηκεύσεων.

Ο προγραμματισμός σε *GPUs* γίνεται μέσω κατάλληλων γλωσσών προγραμματισμού. Οι πιο διαδεδομένες είναι η *Cuda*, η *OpenCL*, η *Brooke* και η *CG*. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η επίλυση των εξισώσεων ροής του πεδίου έγινε με χρήση της πρώτης. Η γλώσσα *Cuda* [20, 21] της *Nvidia* υποστηρίζει εντολές της γλώσσας *C* και ορισμένα χαρακτηριστικά της *C++*. Πρόσφατα, νέα έκδοση της γλώσσας υποστηρίζει εντολές γλώσσας *Fortran* ενώ η αρχιτεκτονική των νέων καρτών δίνει τη δυνατότητα πλήρους υποστήριξης εντολών γλώσσας *C++*. Για περισσότερες λεπτομέρεις επί του τρόπου προγραμματισμού, ο αναγνώστης παραπέμπεται στις αντίστοιχες αναφορές.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του προγραμματισμού σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών βασίζεται στον μεγάλο λόγο απόδοσης - κόστους. Από τη μία πλευρά, λόγω της υψηλής ταχύτητας εκτέλεσης πράξεων σε παράλληλο επίπεδο, η απόδοσή τους είναι εξαιρετικά μεγάλη, όπως θα γίνει καλύτερα αντιληπτό στην επόμενη παράγραφο κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά από τη *CPU*. Από την άλλη πλευρά, το αρχικό κόστος επένδυσης διατηρείται χαμηλό μιας και η εγκατάστασή της μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή ανεξαρτήτως χαρακτηριστικών. Απαραίτητη και μοναδική προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη αντίστοιχης υποδοχής στη μητρική κάρτα του υπολογιστή, με αυτή της κάρτας γραφικών.

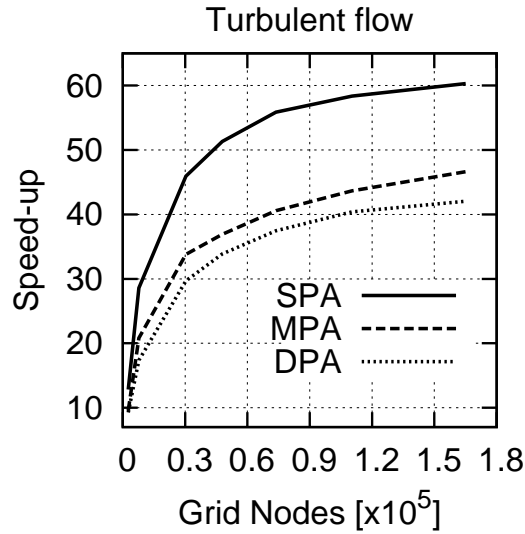
## Επίλυση των εξισώσεων Navier Stokes

Στο ΕΘΣ έχει αναπτυχθεί επιλύτης των εξισώσεων NS (εξισώσεις 3.1) σε τελευταίας γενιάς κάρτες γραφικών της *NVIDIA* [22, 23]. Ο εν λόγω επιλύτης κάνει χρήση μη-δομημένων πλεγμάτων, αποτελούμενων από τριγωνικά ή τετράπλευρα στοιχεία σε 2Δ εφαρμογές ή τετράεδρων, πυραμίδων, πρισμάτων, ή εξάεδρων σε 3Δ εφαρμογές. Το ίδιο λογισμικό δίνει τη δυνατότητα πρόλεξης χρονικά μόνιμων αλλά και μη ροών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του 2Δ κώδικα.

Η χρήση μη-δομημένων πλεγμάτων απαιτεί προσεκτική διαχείριση της μνήμης της *GPU* με σκοπό τη μέγιστη δυνατή απόδοση αυτής. Επιπλέον η ολοκλήρωση των εξισώσεων της ροής γίνεται σύμφωνα με την τεχνική των πεπερασμένων όγκων γύρω από τους κόμβους του πλέγματος (κεντροκομβική διατύπωση). Το τελευταίο αποτελεί μία ακόμα τροχοπέδη στην απόδοση του *GPU*-κώδικα καθώς σε μη-δομημένα πλέγματα ο αριθμός των ακμών στις οποίες ανήκει κάθε κόμβος είναι μεταβλητός, σε σχέση με τα δομημένα πλέγματα που είναι σταθερός και εκ προοιμίου γνωστός (ίσος με 4 σε 2Δ εφαρμογές, με εξαίρεση τους οριακούς κόμβους).

Το σχήμα πεπερασμένων όγκων που χρησιμοποιήθηκε δίνει χωρική ακρίβεια δεύτερης τάξης στον επιλύτη. Οι γραμμικοποιημένες, διακριτοποιημένες εξισώσεις *NS* επιλύονται επαναληπτικά με την μέθοδο *Jacobi*. Η συνάρτηση περιορισμού (limiter) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι η μονοδιάστατη συνάρτηση πε-

ριορισμού των Van Leer & Albada).



Σχήμα 3.3: Επιτάχυνση GPU-κώδικα στην πρόλεξη 2Δ τυρβώδους ροής γύρω από μία αεροτομή σε σχέση με τον CPU-κώδικα. Ο οριζόντιος άξονας δηλώνει τον αριθμό των κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος [23].

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η επιτάχυνση που έχουν καταγράψει τρεις διαφορετικές εκδόσεις του εν λόγω κώδικα στην πρόλεξη 2Δ τυρβώδους ροής γύρω από μία αεροτομή σε σχέση με τον CPU-κώδικα. Οι διαφορετικές εκδόσεις έχουν να κάνουν με την αριθμητική ακρίβεια του σχήματος η οποία μπορεί να είναι απλής (SPA), διπλής (DPA) ή μικτής (MPA) τάξης.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων αναφέρουμε ότι ο CPU-κώδικας εκτελείται σε έναν πυρήνα ενός επεξεργαστή Intel Xeon 2xQuad core (2.00 GHz, 4096 KB cache size) και έχει μεταφραστεί με τον GNU Fortran compiler v4.1.2. Επιπλέον, ο CPU-κώδικας έχει διπλής ακρίβειας αριθμητική και είναι η βάση για τη μέτρηση των επιταχύνσεων. Ο GPU-κώδικας εκτελείται σε μονάδα επεξεργασίας γραφικών NVIDIA Ge-Force GTX 285.

Η διαφορά στην απόδοση του σχήματος διπλής ακρίβειας σε σχέση με το λιγότερο ακριβές (αλλά πιο γρήγορο) απλής ακρίβειας σχήμα οδήγησε στην ανάπτυξη ενός μικτής ακρίβειας σχήματος. Το τελευταίο χρησιμοποιεί διπλής ακρίβειας μεταβλητές για την αποθήκευση του δεξιού μέλους των διακριτοποιημένων εξισώσεων Navier Stokes και απλής για τους συντελεστές του αριστερού. Αυτό οδηγεί σε λιγότερες προσπελάσεις της μνήμης της GPU αυξάνοντας την απόδοση του λογισμικού, διατηρώντας ταυτόχρονα την ίδια ακρίβεια με το διπλής ακρίβειας σχήμα.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του σχήματος διπλής ακρίβειας. Αυτό επιβάλλεται από το ίδιο το πρόβλημα προς επίλυση καθώς αναπτύσσονται φαινόμενα αποκόλλησης της ροής. Επιπλέον, η χρήση του μοντέλου τύρβης των Spalart – Allmaras

επέβαλε τη δημιουργία αρκετά πυκνού τοιχώματος κοντά στο τοίχωμα, δημιουργώντας εξαιρετικά μικρές αποστάσεις, οι οποίες διαφέρουν κατά αρκετές τάξεις μεγέθους έναντι των υπόλοιπων αποστάσεων.

Η χρονομέτρηση της επίλυσης των εξισώσεων ροής για συγκεκριμένο πλέγμα (228.000 κόμβοι περίπου) του προβλήματος του ελέγχου της ροής επαληθεύεται από το σχήμα 3.3. Συγκεκριμένα, η επιτάχυνση που προσφέρει ο κώδικας επίλυσης των εξισώσεων ροής σε μία *GPU* είναι της τάξης του 40 σε σχέση με την επίλυση του ίδιου προβλήματος στον πυρήνα ενός επεξεργαστή. Και οι δύο κώδικες (*CPU* και *GPU*) χρησιμοποιούν σχήματα αριθμητικής ακρίβειας δεύτερης τάξης.



## Κεφάλαιο 4

# Παρουσίαση και κριτική αριθμητικών προλέξεων των πεδίων ροής

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν έγινε αναφορά στη δημιουργία των υπολογιστικών πλεγμάτων για την απομονωμένη αεροτομή, χωρίς και με δέσμη ελέγχου, και παράλληλα παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής και ο γρήγορος τρόπος επίλυσης τους με χρήση καρτών γραφικών. Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζεται ο κώδικας επίλυσης για τον υπολογισμό των ροικών μεγεθών επί των υπολογιστικών πλεγμάτων με ή χωρίς τη χρήση ελέγχου. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια για προσέγγιση του φυσικού φαινομένου κατά τον έλεγχο με την τεχνική συνεχούς αναρρόφησης και ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων σχεδιασμού επί των αποτελεσμάτων. Όλα τα αποτελέσματα των αριθμητικών προλέξεων των πεδίων ροής αναφέρονται στην ίδια αεροτομή “NACA 4415”, σε αδιάστατη τιμή *Reynolds* (*Re*) του πεδίου ροής ίση με 500.000 και αριθμό *Mach* της επ’ άπειρον ροής ( $M_\infty$ ) ίσο με 0.3.

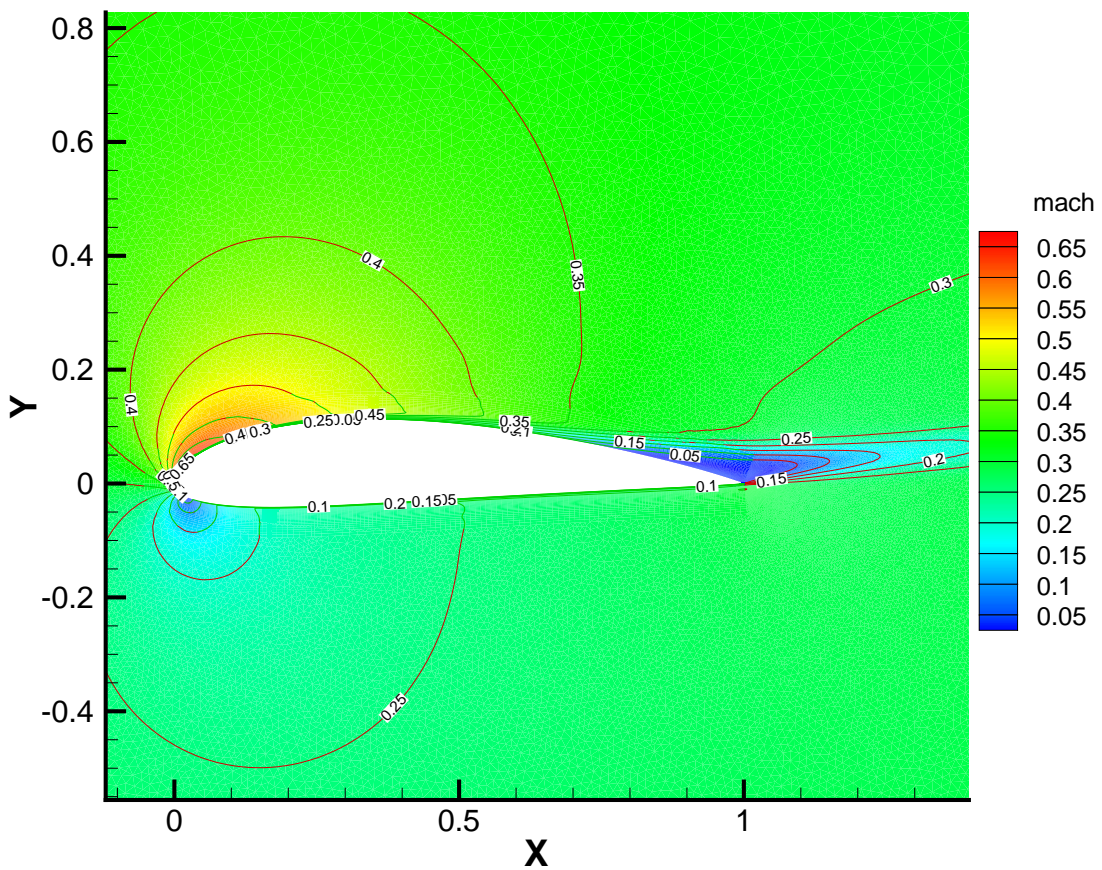
### 4.1 Επίλυση εξισώσεων πεδίου ροής χωρίς δέσμη ελέγχου

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των εξισώσεων του πεδίου ροής στην περίπτωση της απομονωμένης πτέρυγας χωρίς την εφαρμογή δέσμης ελέγχου. Τα αποτελέσματα αυτά θα αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στην περίπτωση εφαρμογής δέσμης ελέγχου. Οι δύο διακριτές περιπτώσεις που επιλύονται είναι αυτές που αντιστοιχούν σε γωνία της επ’ άπειρον ροής  $12^\circ$  και  $18^\circ$  ( $Re=500.000$ ,  $M_\infty=0.3$ ) τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στις δύο επόμενες παραγράφους.

Αποτελέσματα για γωνία  $a_\infty = 12^\circ$

Για τη συγκεκριμένη γωνία ροής, η επίλυση των των εξισώσεων του πεδίου ροής και η μετεπεξεργασία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Συντελεστής άνωσης  $C_L = 1.489$
- Συντελεστής αντίστασης  $C_D = 0.0387$
- Θέση αποκόλλησης  $x_{sep} = 0.75$  ή Μήκος αποκόλλησης  $L_{sep} = 0.25$



Σχήμα 4.1: Πεδίο *Mach* και ισογραμμές *Mach* της ροής γύρω από την αεροτομή για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  ( $M_\infty=0.3$ ).

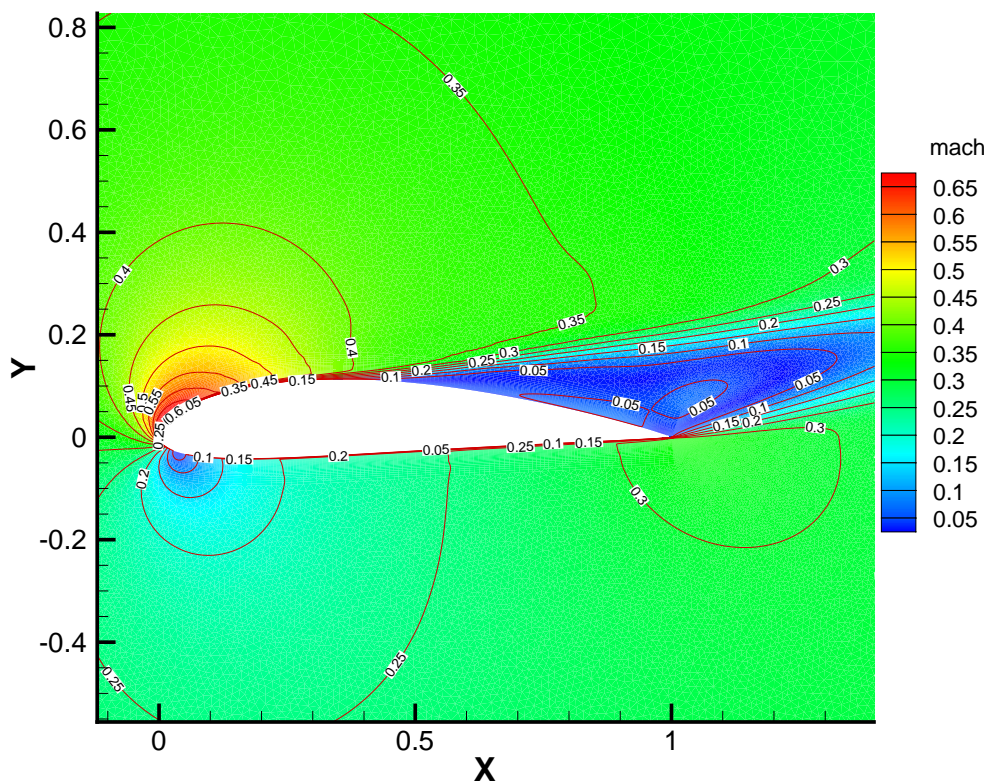
Η ροή για τη συγκεκριμένη  $a_\infty$  παρουσιάζει μόνιμο χαρακτήρα. Παρατηρείται ολική αποκόλληση, δηλαδή η ροή δεν επανακολλάται του τοιχώματος της αεροτομής, και δημιουργία της αντίστοιχης φουσαλίδας στην πλευρά υποπίεσης στην περιοχή της ακμής



εκφυγής. Η τιμή της θέσης αποκόλλησης υπολογίζεται από το πρόσημο του συντελεστή τριβής  $C_f$ , για το οποίο κατά την αποκόλληση παρατηρείται αλλαγή από θετικό σε αρνητικό και κατ' αναλογία αντίστροφη εναλλαγή προσήμου κατά την επανακόλληση. Το γεγονός αυτό αιτιολογείται καθώς η τάση που αναπτύσσεται στο τοίχωμα είναι ανάλογη της κλίσης της μέσης ταχύτητας καθ' ύψος, άρα στη θέση έναρξης της αποκόλλησης και στο τέλος αυτής η διατμητική τάση επί του τοιχώματος μηδενίζεται, δηλαδή μηδενίζεται και ο συντελεστής τριβής στη θέση αυτή. Η αποκόλληση αυτή διακρίνεται και στην απεικόνιση του πεδίου  $Mach$  της ροής του σχήματος 4.1.

### Αποτελέσματα για $\alpha_\infty = 18^\circ$

Για τη συγκεκριμένη γωνία της επ' άπειρον ροής, η επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και η μετεπεξεργασία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:



Σχήμα 4.2: Πεδίο  $Mach$  και ισογραμμές  $Mach$  της ροής γύρω από την αεροτομή για γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  ( $M_\infty=0.3$ ).

- Συντελεστής άνωσης  $C_L = 1.501$
- Συντελεστής αντίστασης  $C_D = 0.1017$
- Σημείο αποκόλλησης  $x_{sep} = 0.40$

Η ροή είναι και στην περίπτωση αυτή μόνιμη. Παρατηρείται μαζική αποκόλληση (*stall*) μεγαλύτερης κλίμακας σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, και δημιουργία της αντίστοιχης φυσαλίδας στην πλευρά υποπίεσης στην περιοχή της ακμής εκφυγής. Η αποκόλληση αυτή διακρίνεται και στην απεικόνιση του πεδίου *Mach* της ροής του σχήματος 4.2.

## 4.2 Επίλυση εξισώσεων πεδίου ροής με μια δέσμη ελέγχου

Στόχος της συγκεκριμένης ενότητας είναι η επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής με μία δέσμη ελέγχου μέσω συνεχούς αναρρόφησης επί του υπολογιστικού πλέγματος που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2 και η ανάλυση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Παράλληλα αναφέρονται προβλήματα που ήρθαν στην επιφάνεια κατά την παραπάνω επίλυση και ο τρόπος αντιμετώπισής τους. Τέλος, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της δέσμης στον έλεγχο της ροής, όπως αυτές θα καθοριστούν στη συνέχεια. Η διερεύνηση αυτή είναι απαραίτητη για το καθορισμό των μεταβλητών σχεδιασμού της δέσμης και των αντίστοιχων ορίων τους που θα επιλεγούν με σκοπό τη βελτιστοποίησή τους μέσω εξελικτικών αλγορίθμων σε επόμενο κεφάλαιο. Τα εξαγόμενα όρια καθιστούν ένα εύρος πιθανών λύσεων μικρότερο από ένα αντίστοιχο εύρος αν επιχειρούσε κάποιος μία απευθείας αναζήτηση της βέλτιστης λύσης μέσω εξελικτικών αλγορίθμων, χωρίς να γνωρίζει ακριβώς το φαινόμενο. Ως γνωστόν μικρότερο εύρος πιθανών λύσεων σημαίνει και μικρότερος χρόνος υπολογιστή, μία αρκετά σημαντική παράμετρος στους εξελικτικούς αλγόριθμους.

### 4.2.1 Καθορισμός παραμέτρων της δέσμης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τεχνική που εφαρμόζεται για τον έλεγχο ροής είναι αυτή της **συνεχούς αναρρόφησης ρευστού από την πλευρά υποπίεσης της αεροτομής**. Η διαδικασία αυτή μοντελοποιείται υπολογιστικά με την κατασκευή της κοιλότητας του επενεργητή και την κατάλληλη προσαρμογή της στην πλευρά υποπίεσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή και ανάλυση του ελέγχου αποτελεί ο καθορισμός των παραμέτρων της δέσμης μέσω της διαμόρφωσης της κοιλότητας του επενεργητή. Με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές (βλέπε κεφάλαιο 1) για το συγκεκριμένο τύπο ελέγχου, οι μεταβλητές που επιδρούν στον έλεγχο της ροής είναι:

1. **Η θέση της οπής της δέσμης ( $x_{slot}$ ).**

Καθορίζεται από το σημείο που θα τοποθετηθεί η αρχή της οπής της κοιλότητας του επενεργητή επί του στερεού τοιχώματος της αεροτομής. Έχει αδιαστατοποιηθεί με το μήκος της χορδής  $c$  της αεροτομής.

2. **Το εύρος της οπής (SlotWidth).**

Καθορίζεται από το μήκος της οπής επί της επιφάνειας της αεροτομής. Έχει αδιαστατοποιηθεί με το μήκος της χορδής  $c$  της αεροτομής.

3. **Η γωνία της δέσμης ( $\theta_{jet}$ ).**

Καθορίζεται από την γωνία των τοιχωμάτων της κοιλότητας στην ένωση με την αεροτομή με την κάθετη διεύθυνση στην οπή της δέσμης. Δηλαδή η κάθετη δέσμη στο τοίχωμα της αεροτομής σχηματίζει γωνία ίση με  $0^\circ$  ενώ η εφαπτόμενη δέσμη  $90^\circ$ .

4. **Η παροχή αναρρόφησης της δέσμης ( $Q_{jet}$ ).**

Καθορίζεται από το γινόμενο ταχύτητας της δέσμης και της πυκνότητας  $\rho U_{jet}$  που τίθεται ως οριακή συνθήκη στο κάτω μέρος ( κόμβους βάσης) της κοιλότητας του επενεργητή. Το γινόμενο της παραπάνω ποσότητας με το μήκος βάσης του κάτω μέρους της κοιλότητας, που διατηρείται σταθερό, δίνει την παροχή αναρρόφησης ανά μονάδα βάθους πεδίου της ροής. Η τιμή της παροχής έχει αδιαστατοποιηθεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{jet} = \frac{(\rho V)_{base} b}{\rho_\infty U_\infty c}$$

όπου  $(\rho V)_{base}$  είναι το γινόμενο της πυκνότητας και της κάθετης ταχύτητας στη βάση της κοιλότητας της δέσμης,  $b$  το μήκος της βάσης της κοιλότητας ως προς το μήκος της χορδής  $c$  και  $\rho_\infty, U_\infty$  η πυκνότητα και η ταχύτητα της επί άπειρον ροής.

Στη βιβλιογραφία, σε μερικές περιπτώσεις, χρησιμοποιείται αντί της παροχής αναρρόφησης ένα διαφορετικό μέγεθος, που καθορίζει την ορμή της δέσμης. Αυτός είναι ο αδιάστατος συντελεστής της ορμής  $c_\mu$  και ορίζεται ως:

$$c_\mu = \frac{h \rho U_{jet}^2 \cos \theta}{\rho U_\infty^2}$$

όπου  $h$  και  $\theta$  είναι το εύρος της οπής και η γωνία της δέσμης σε σχέση με την εφαπτόμενη στο τοίχωμα της αεροτομής αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση, καθορίζεται έμμεσα η παροχή της δέσμης μέσω του γινομένου  $h \rho U_{jet} \cos \theta$ . Η τελευταία ποσότητα δεν θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή.

#### 4.2.2 Διερεύνηση του φαινομένου του ελέγχου ροής με αναρρόφηση ρευστού

Έχοντας καθορίσει τις παραμέτρους σχεδιασμού της δέσμης είμαστε σε θέση, επιλέγοντας συγκεκριμένες τιμές αυτών, να προσομοιάσουμε αριθμητικά το πρόβλημα του

ελέγχου ροής επιλύωντας τις εξισώσεις ροής του πεδίου (κεφάλαιο 3). Με βάση την αναφορά που έγινε σε παλαιότερες εργασίες (κεφάλαιο 1) αλλά και βασιζόμενοι στη φυσική ερμηνεία του προβλήματος μπορούμε να υποθέσουμε τιμές των παραμέτρων ώστε να περιορίσουμε την αποκόλληση της ροής. Η παρακάτω ανάλυση αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της φυσικής ερμηνείας του ελέγχου ροής με αναρρόφηση.

Η πρώτη παράμετρος της δέσμης, δηλαδή η θέση της οπής της δέσμης, αναμένουμε να έχει σημαντικότερη επίδραση στην μείωση της αποκόλλησης της ροής όταν βρίσκεται κοντά στην περιοχή έναρξης της αποκόλλησης (της περίπτωσης αναφοράς, δηλαδή χωρίς χρήση ελέγχου) παρά όταν απομακρύνεται από αυτή. Η λογική με την οποία δικαιολογείται η παραπάνω απόψη έγκειται στο γεγονός ότι, όταν η αναρρόφηση θα γίνεται κοντά στην αποκολλημένη ζώνη, στρώματα ρευστού από τη ζώνη αυτή θα 'έλκονται' προς το τοίχωμα της αεροτομής και θα τείνουν να προσκολληθούν ανάλογα με την ένταση της δέσμης ενώ όλο περισσότερα στρώματα ρευστού χαμηλής ορμής, τα οποία τείνουν να αποκολληθούν, θα αφαιρούνται.

Με τη παραπάνω διατύπωση εξηγείται και η επίδραση της παροχής της δέσμης (έντασης) καθώς αύξηση της τιμής της μας προϋποθέτει ότι θα επιφέρει αύξηση του μήκους της προσκολλημένης ζώνης στο τοίχωμα. Η εξήγηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τις αριθμητικές προσομοιώσεις του Huang [9] (σχήμα 1.4). Το εύρος των τιμών της συνηθίζεται να είναι τέτοιο ώστε η ταχύτητα της δέσμης στην οπή να ισούται περίπου με την ταχύτητα της επ' άπειρου ροής ή τουλάχιστον να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή. Η οριοθέτηση αυτή γίνεται κυρίως λόγω κατασκευαστικών περιορισμών του επενεργητή αλλά και συνολικής απόδοσης της όλης διάταξης ώστε να μην γίνεται ασύμφορη η χρήση της.

Η επιλογή του εύρους της οπής γίνεται με βάση το γεγονός ότι αύξηση του ανοίγματος της οπής πέρα του 2.5% του μήκους της χορδής δεν προξενεί σημαντική αύξηση της άνωσης της αεροτομής, όπως υπαγορεύει η εργασία του Dannenberg [11]. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας προήλθαν από πειράματα σε συμμετρική αεροτομή πάχους 10.51% της χορδής.

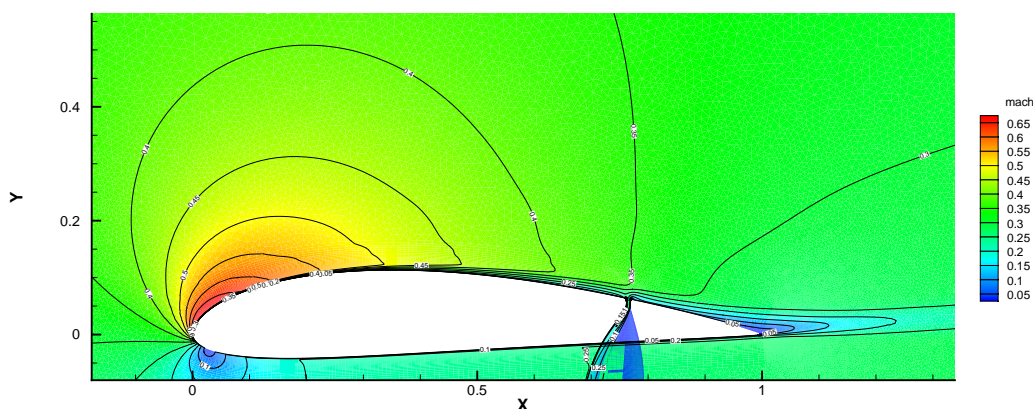
Η συμπεριφορά της γωνίας της δέσμης, δηλαδή της γωνίας των τοιχωμάτων της κοιλότητας στην ένωση με την αεροτομή, όπως και του ανοίγματος της οπής, περιγράφεται από πιο σύνθετα φυσικά φαινόμενα. Για την κατανόηση αυτών, παραπέμπουμε των αναγνώστη σε αντίστοιχες εργασίες για ροή ρευστού πάνω από κοιλότητες. Επιπλέον, μπορούμε να κάνουμε μια πρώτη εκτίμηση βασιζόμενοι στα αποτελέσματα της μελέτης του Huang [9, 10] κατά τα οποία σε διαφορετική γεωμετρία υπολόγισε ως βέλτιστη γωνία αναρρόφησης την κάθετη στο τοίχωμα της αεροτομής.

### 4.2.3 Διερεύνηση των χαρακτηριστικών της δέσμης

Η παραπάνω ανάλυση μας έδωσε μια πρώτη ιδέα για την κατανόηση του μηχανισμού αναρρόφησης αλλά και τα όρια των αντίστοιχων παραμέτρων που αναμένεται θετική επίδρασή των. Έτσι, με βάση όσα αναφέρθηκαν, γίνονται οι πρώτες αριθμητικές προσομοιώσεις και ο σχολιασμός των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Μετά από έρευνα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας επί των μεθόδων ελέγχου ροής με εφαρμογή της τεχνικής

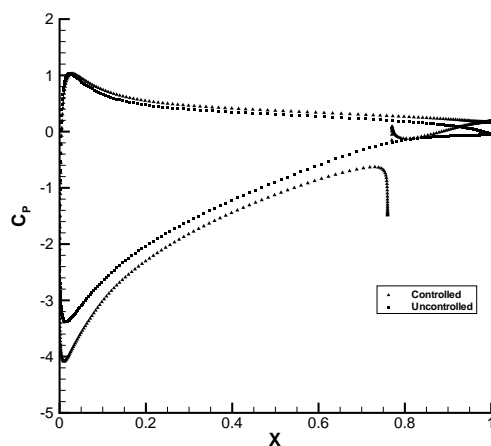
συνεχούς αναρρόφησης στη συγκεκριμένη γεωμετρία αεροτομής (NACA 4415), αποδείχτηκε ότι δεν υπάρχουν αντίστοιχες μελέτες. Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατή η πιστοποίηση της μεθόδου με βάση άλλες ολοκληρωμένες εργασίες. Παρόλα αυτά είναι δυνατή η ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες εργασίες, που έχουν προκύψει μέχρι τώρα, σε διαφορετικές γεωμετρίες. Υπενθυμίζεται ότι η διερεύνηση έγινε για τιμή ( $Re$ ) του πεδίου ροής ίση με 500.000 και αριθμό ( $M_\infty$ ) ίσο με 0.3.

Η πρώτη αριθμητική προσομοίωση του πεδίου ροής που έγινε αναφέρεται για θέση οπής της δέσμης  $x_{slot} = 0.75$  της χορδής της αεροτομής, γωνία δέσμης  $\theta_{jet} = 0^\circ$  ως προς την κάθετη διεύθυνση στην οπή, άνοιγμα οπής  $SlotWidth = 0.01$  της χορδής και παροχή αναρρόφησης  $Q_{jet} = 0.0045$ . Οι τιμές αυτές επιλέχτηκαν ενδεικτικά με βάση τη διερεύνηση της παραπάνω υποεπινότητας ώστε η θέση της οπής να βρίσκεται κοντά στη θέση αποκόλλησης της ροής χωρίς έλεγχο ( $x_{sep} = 0.75$ ), η γωνία της δέσμης να είναι κάθετη στην οπή, το εύρος της οπής μικρότερο από 0.025 της χορδής και η ταχύτητα της δέσμης περίπου ίση με το μισό της ταχύτητας της επ' άπειρου ροής. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδωσε συντελεστή άνωσης  $C_L = 1.772$  και συντελεστή αντίστασης  $C_D = 0.036$  για την αεροτομή. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων πάνω στη αεροτομή (και συνεπώς των συντελεστών αντίστασης και άνωσης) η οπή θεωρήθηκε στερεό τοίχωμα. Η πίεση που ασκείται στην οπή ισούται με την ολική πίεση της δέσμης στην οπή. Η έναρξη της θέσης αποκόλλησης μετατοπίστηκε στη θέση  $x_{sep} = 0.93$  της χορδής, δηλαδή το μήκος αποκόλλησης έγινε  $L_{sep} = 0.07$  της χορδής. Η αναγωγή των αποτελεσμάτων στα μεγέθη αναφοράς, δηλαδή αυτά που υπολογίστηκαν στην ενότητα 1 για την αεροτομή χωρίς έλεγχο δίνει τις τιμές 1.19, 0,93 και 0.28 (η τελευταία τιμή



Σχήμα 4.3: Πεδίο  $Mach$  και ισογραμμές  $Mach$  της ροής γύρω από την αεροτομή με έλεγχο για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$ . Ο έλεγχος αναφέρεται σε θέση οπής της δέσμης  $x_{slot} = 0.76$  της χορδής της αεροτομής, γωνία δέσμης  $\theta_{jet} = 0^\circ$  ως προς την κάθετη διεύθυνση στην οπή, άνοιγμα οπής  $SlotWidth = 0.01$  της χορδής και παροχή αναρρόφησης  $Q_{jet} = 0.0045$ .

αναφέρεται στο μήκος της αποκόλλησης). Η επίδραση του ελέγχου είναι άμεσα εμφανής με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της αεροτομής. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στον περιορισμό της αποκόλλησης κατά 72% που επέφερε αντίστοιχα αύξηση 21% στον συντελεστή άνωσης και μείωση 7% του συντελεστή αντίστασης.



Σχήμα 4.4: Συντελεστής πίεσης της αεροτομής για την περίπτωση αναφοράς χωρίς έλεγχο (*uncontrolled*) και την περίπτωση με έλεγχο (*controlled*) του σχήματος 4.3.

### Προσομοίωση της ροής με καμπύλωση στις ενώσεις κοιλότητας και αεροτομής

Με βάση τα χαρακτηριστικά της δέσμης κατά την πρώτη προσομοίωση έγινε κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος με καμπύλη διαμόρφωση (‘ράδιο’) στις ενώσεις κοιλότητας και αεροτομής, δηλαδή στα άκρα της οπής. Η ακτίνα του ραδίου που κατασκευάστηκε ήταν της τάξης του  $10^{-5}$  του μήκους της χορδής. Η ιδέα της συγκεκριμένης κατασκευής αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα 2.4. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν αμελητέα επίδραση της συγκεκριμένης κατασκευής στα ροϊκά μεγέθη και, συνεπώς, στους συντελεστές άνωσης και αντίστασης της αεροτομής. Το γεγονός αυτό πιθανώς να δικαιολογείται λόγω της μικρής ακτίνας με βάση την οποία κατασκευάστηκε η διαμόρφωση. Παρόλα αυτά, μεγαλύτερο μήκος ακτίνας θα επέφερε σημαντική μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου και οι συγκρίσεις δεν θα ήταν πλέον αξιόπιστες. Περαιτέρω προσομοιώσεις με διαφορετικές ακτίνες επέφεραν πάλι αμελητέα επίδραση, με την τελευταία να κυμαίνεται στα όρια του σφάλματος. Για το λόγο αυτό κρίθηκε μη αναγκαία η υιοθέτηση της συγκεκριμένης διαμόρφωσης στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.

### Προσομοίωση της ροής για μηδενική παροχή αναρρόφησης $Q_{jet}$

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε επιπλέον προσομοίωση της ροής για μηδενική παροχή αναρρόφησης  $Q_{jet} = 0$  με παρουσία όμως της κοιλότητας της δέσμης. Ο σκοπός της συγκεκριμένης απόφασης ήταν για την αξιολόγηση της επίδρασης της κοιλότητας στην αεροτομή όταν ο έλεγχος μέσω της δέσμης δεν είναι ενεργοποιημένος. Τα αποτελέσματα έδωσαν ανηγμένους συντελεστές άνωσης και αντίστασης 0.99 και 1.01 αντίστοιχα, γεγονός που επιβεβαιώνει την ποιοτική προσέγγιση του συγκεκριμένου φαινομένου. Άλλωστε, ήταν αναμενόμενο η ύπαρξη της κοιλότητας στη ροή να επιφέρει μικρή αύξηση στην αντίσταση της αεροτομής και, ταυτόχρονα, ανάλογη μείωση του συντελεστή άνωσης.

### Επίδραση θέσης της δέσμης αναρρόφησης και της αντίστοιχης παροχής

Όπως έγινε αντιληπτό κατά την διερεύνηση του ελέγχου ροής με συνεχή αναρρόφηση (υποενότητα 4.2.2) η θέση της δέσμης αναρρόφησης και η αντίστοιχη παροχή ασκούν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα του ελέγχου με αναμενόμενο τρόπο. Από την άλλη πλευρά, η διατομή της οπής και η γωνία της δέσμης ασκούν μικρότερη επίδραση με κύριο χαρακτηριστικό τη μη προβλέψιμη συμπεριφορά τους με άμεσο τρόπο. Θετικό σημείο στην βελτιστοποίηση των δύο προαναφερθέντων μεταβλητών είναι τα περιορισμένα και εύκολα διακριτά όρια τους, όπως αυτά αναλύθηκαν στην ίδια υποενότητα.

Με βάση όσα ειπώθηκαν, αποκτά νόημα η μελέτη της θέσης της οπής ( $x_{slot}$ ) για διακριτές τιμές της. Οι τιμές που εξετάζονται είναι 0.65, 0.70, 0.80, 0.85. Οι υπόλοιπες παράμετροι της δέσμης παραμένουν ίδιες με αυτές της πρώτης προσομοίωσης που αντιστοιχούν στη θέση 0.76. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

$x_{slot}$	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
$C_L$	1.763	1.768	1.772	1.770	1.762
$C_D$	0.0327	0.0341	0.0360	0.0374	0.0399

Πίνακας 4.1: Συντελεστές άνωσης και αντίστασης για διαφορετικές θέσεις οπής αναρρόφησης ( $Q_{jet} = 0.0045$ ,  $SlotWidth=0.01$ ,  $\theta_{jet} = 0^\circ$ ).

Με μία πρώτη ματιά παρατηρούμε ότι μετακίνηση της οπής πιο αριστερά από τη θέση έναρξης της αποκόλλησης χωρίς έλεγχο, δηλαδή για  $x_{slot} < 0.75$ , παρατηρείται μείωση του συντελεστή άνωσης και ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή αντίστασης (σε σχέση με την περίπτωση ελέγχου στη θέση  $x_{slot} = 0.75$ ). Κατά την αντίθετη μετακίνηση της οπής και οι δύο συντελεστές μειώνονται. Συμπέρασμα της παρούσης διαδικασίας είναι το γεγονός ότι ο έλεγχος παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα όταν η οπή τοποθετείται ανάντι της θέσης αποκόλλησης της περίπτωσης χωρίς έλεγχο.

Τελικά, με αντίστοιχες προσομοιώσεις επιβεβαιώνεται και η αναμενόμενη συμπεριφορά της παροχής αναρρόφησης. Αύξηση της παροχής αναρρόφησης - εντός 'λογικών' ορίων - συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή άνωσης (οι μεταβολές γίνονται σχεδόν με αναλογικό τρόπο). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 που ακολουθεί.

$Q_{jet}$	0.00450	0.00675	0.00900
$C_L$	1.772	1.8596	1.9364
$C_D$	0.0360	0.0364	0.0373

Πίνακας 4.2: Συντελεστές άνωσης και αντίστασης για διαφορετικές παροχές αναρρόφησης της δέσμης ( $x_{slot} = 0.75$ ,  $SlotWidth=0.01$ ,  $\theta_{jet} = 0^\circ$ ).





## Κεφάλαιο 5

# Βελτιστοποίηση με Εξελικτικούς Αλγόριθμους

Σε προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 4) καθορίστηκαν οι μεταβλητές του προβλήματος ελέγχου της ροής γύρω από την αεροτομή, δηλαδή οι ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης. Δείχτηκε, μέσω τυχαίων δοκιμών, ότι κατάλληλη επιλογή αυτών μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στους συντελεστές άνωσης και αντίστασης της αεροτομής (κεφάλαιο 5). Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων μέσω χρήσης εξελικτικών. Παράλληλα περιγράφονται τεχνικές επιτάχυνσης της μεθόδου με χρήση παράλληλης επεξεργασίας και μεταμοντέλων, που εφαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο πρόβλημα μέσω του λογισμικού βελτιστοποίησης *EASY* ;;. Η εφαρμογή των τελευταίων, σε συνδυασμό με την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής σε *GPUs*, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας μεθόδου βελτιστοποίησης του προβλήματος ελέγχου ροής γύρω από αεροτομή, με αποδεκτό χρόνο αναμονής του μηχανικού.

### Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι

Βασική είναι η διάκριση των μεθόδων βελτιστοποίησης σε αιτιοκρατικές (deterministic) και στοχαστικές (stochastic). Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι χρησιμοποιούν την παράγωγο της συνάρτησης στόχου για να προσδιορίσουν την κατεύθυνση αναζήτησης του ακρότατου, στο οποίο οδηγούνται με αυστηρά καθορισμένο τρόπο και γρήγορο ρυθμό σύγκλισης. Η θεωρητική τους θεμελίωση αποδεικνύει ότι η αλγοριθμική εφαρμογή αιτιοκρατικών μεθόδων έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση ενός ακροτάτου της συνάρτησης στόχου, για το οποίο όμως δεν υπάρχει καμία ένδειξη εάν είναι το καθολικό. Η δυσκολία χρήσης αιτιοκρατικών μεθόδων έγκειται στον ανάγκη υπολογισμού των παραγώγων της συνάρτησης στόχου ως προς τις παραμέτρους σχεδίασης και ο προγραμματισμός σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στον αντίποδα βρίσκονται οι στοχαστικές μέθοδοι οι οποίες σαρώνουν τον χώρο των λύσεων με οργανωμένα 'τυχηματικό' τρόπο με σκοπό να εντοπίσουν το καθολικό ακρότατο. Η τυχειότητα του αλγορίθμου εγγυάται τον απεγκλωβισμό από τοπικά ακρότατα. Η εφαρμογή τους σε οποιοδήποτε πρόβλημα είναι άμεση χωρίς να απαιτείται κάποια αλγοριθμική παρέμβαση στη διαδικασία αξιολόγησης

(όπως στις αιτιοκρατικές, όπου απαιτείται ο προσδιορισμός της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης) και χωρίς καμία απαίτηση συνέχειας ή λειότητας της συνάρτησης στόχου. Στα μειονεκτήματα των στοχαστικών μεθόδων εντοπίζεται το μεγάλο υπολογιστικό κόστος και η απουσία θεωρητικής απόδειξης για σύγκλιση σε πεπερασμένο χρόνο.

Βασικότερος εκπρόσωπος των στοχαστικών μεθόδων είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (*EA*), οι οποίοι διαχειρίζονται πληθυσμούς υποψηφίων λύσεων του προβλήματος και με χρήση των αρχών της εξέλιξης των ειδών [24] σαρώνεται κατάλληλα ο χώρος των λύσεων με σκοπό τον εντοπισμό των ακροτάτων της αντικειμενικής συνάρτησης. Κάθε άτομο του πληθυσμού καθορίζεται μονοσήμαντα από ένα μοναδικό σύνολο τιμών των παραμέτρων του προβλήματος. Κατά την εξέλιξη ένας πληθυσμός  $\mu$  υποψηφίων λύσεων (γονείς, κατά τη γενετική ορολογία) εξελίσσεται στον πληθυσμό των  $\lambda$  απογόνων (αναπαραγωγή). Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις, που προκύπτουν από τους  $\mu$  γονείς, έχοντας ενδεχομένως καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους  $\lambda$  απογόνους, με κριτήριο την καταλληλότητά τους, επιλέγονται οι  $\mu$  γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται, γενιά με γενιά, μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου σύγκλισης. Η 'οργανωμένη τυχαιότητα' των *EA* έγκειται στην αντιστοίχιση μεγαλύτερης πιθανότητας επιβίωσης και αναπαραγωγής στις υποψήφιες λύσεις εκείνες με καλύτερη τιμή καταλληλότητας. Η παρούσα εργασία δεν θα επεκταθεί σε περισσότερες λεπτομέρειες αφού αυτές υπάρχουν στις βιβλιογραφικές αναφορές [25, 26, 27].

Βασικό στοιχείο που οδήγησε στη γρήγορη και ευρεία επικράτησή τους ήταν αφενός το ενδιαφέρον, μη-μαθηματικό υπόβαθρό τους, η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης και, κυρίως, η δυνατότητά τους (ως στοχαστική μέθοδος) να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό των *EA* είναι η εύκολη παραλληλοποίησή τους. Κάθε μέλος του πληθυσμού μπορεί να αξιολογείται ταυτόχρονα και ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα σε έναν παράλληλο υπολογιστή ή σε ένα συγκρότημα υπολογιστών σε δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι ο συνήθως μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων που απαιτείται για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης. Άμεση συνέπεια του τελευταίου είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για την εφαρμογή των *EA* ως μεθόδου βελτιστοποίησης, κυρίως όταν η αξιολόγηση γίνεται με απαιτητικά λογισμικά.

Στη συγκεκριμένη εργασία, το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης προϋποθέτει τη χρονοβόρο επίλυση των εξισώσεων *Navier – Stokes*. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση της κάθε λύσης για το πρόβλημα του ελέγχου της ροής πραγματοποιείται σε δύο βήματα, όπως αυτά περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Πρώτο βήμα είναι η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος και δεύτερο η επίλυση των εξισώσεων ροής (εξισώσεις *Navier – Stokes*) επί του πλέγματος. Το υπολογιστικό κόστος του πρώτου πρακτικά θεωρείται αμελητέο έναντι του δεύτερου και για το λόγο αυτό, το υπολογιστικό κόστος κάθε αξιολόγησης συμπίπτει ουσιαστικά με το υπολογιστικό κόστος της επίλυσης των εξισώσεων ροής.

## Προσεγγιστική προ-αξιολόγηση με μεταπρότυπο αξιολόγησης

Η αντιστάθμιση του μειονεκτήματος των εξελικτικών αλγορίθμων αναφορικά με τον μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων γίνεται με τη χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης των υποψηφίων λύσεων [28, 29]. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένα προσεγγιστικό μοντέλο αξιολόγησης (μεταπρότυπο, *metamodel*) μικρών απαιτήσεων σε υπολογιστικό κόστος (αντί του χρονοβόρου επιλύτη ροής) για μία πρώτη αξιολόγηση ολόκληρου του πληθυσμού. Κατόπιν ένα ποσοστό των καλύτερων λύσεων, βάσει του προσεγγιστικού μεταπρότυπου, επανααξιολογούνται με το ακριβές πρότυπο αξιολόγησης (επίλυση του πεδίου ροής). Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους. Για να είναι δυνατή η χρήση του ίδιου προσεγγιστικού μοντέλου σε μεγάλο εύρος εφαρμογών επιλέγεται ως μεταπρότυπο αξιολόγησης τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ΤΝΔ - Artificial Neural Network-ANN) [30].

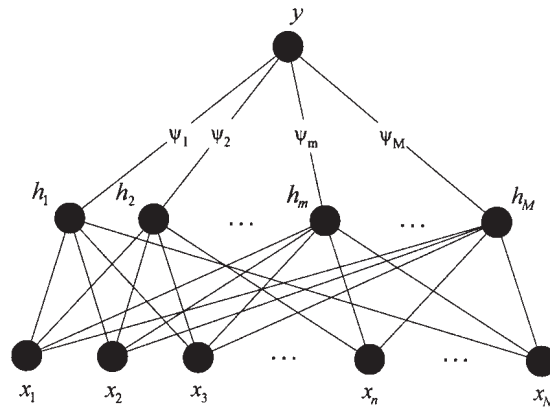
Στην παρούσα εργασία το ΤΝΔ, που χρησιμοποιήθηκε ήταν δίκτυο συναρτήσεων ακτινικής βάσης (Radial Basis Function Network - RBFN). Ένα τυπικό δίκτυο RBF είναι ένα δίκτυο τριών επιπέδων: το επίπεδο εισόδου, το κρυμμένο επίπεδο και το επίπεδο εξόδου (σχήμα 5.1). Ο κάθε νευρώνας του κρυμμένου επιπέδου αντιστοιχίζεται με ένα διάνυμα διαστάσεως ίσης με την διάσταση του επιπέδου εισόδου, το κέντρο της συνάρτησης ακτινικής βάσης. Ο μη-γραμμικός μετασχηματισμός (συνάρτηση ενεργοποίησης) που συνδέει το επίπεδο εισόδου με το κρυμμένο επίπεδο συναρτάται της Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του δείγματος που έχει παρουσιαστεί στο επίπεδο εισόδου και του κέντρου ακτινικής βάσης του αντίστοιχου νευρώνα και της ρυθμιστικής ποσότητας  $r$ . Η απόκριση του δικτύου παράγεται από το γραμμικό μετασχηματισμό που συνδέει το κρυμμένο επίπεδο με το επίπεδο εξόδου. Τελικά, η απόκριση του δικτύου σχετικά με το δείγμα  $\xi$  που έχει παρουσιαστεί στο επίπεδο εισόδου δίνεται από την σχέση:

$$y = \sum \psi_i f(\|x - c_i\|, r_i) \quad (5.1)$$

Οι άγνωστοι σε αυτήν την σχέση είναι οι συντελεστές  $\psi_i$  του γραμμικού μετασχηματισμού, οι οποίοι προσδιορίζονται κατά την εκπαίδευση του δικτύου με τον εξής τρόπο: Για κάθε διαθέσιμο δείγμα εκπαίδευσης του οποίου προφανώς γνωρίζουμε την απόκριση που επιθυμούμε ακριβώς να αναπαραχθεί γράφεται η πιο πάνω εξίσωση και κατόπιν επιλύεται ένα γραμμικό σύστημα από το οποίο προκύπτουν οι συντελεστές  $\psi_i$ . Η τυπική μορφή της συνάρτησης ενεργοποίησης είναι:

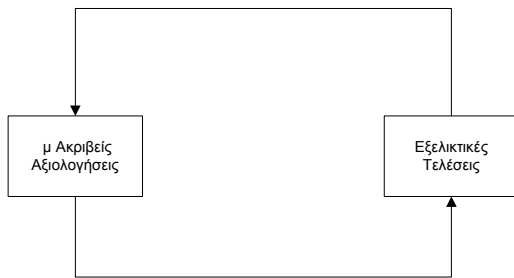
$$f(u, r) = \exp\left(-\frac{u^2}{r^2}\right) \quad (5.2)$$

Πριν την χρήση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου αξιολογείται με το ακριβές πρότυπο αξιολόγησης ένας ελάχιστος αριθμός υποψηφίων λύσεων, από τις οποίες θα χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες κάθε φορά για την εκπαίδευση του μεταπρότυπου αξιολόγησης. Οι αξιολογήσεις αυτές δεν είναι άλλες από τις ακριβείς αξιολογήσεις που

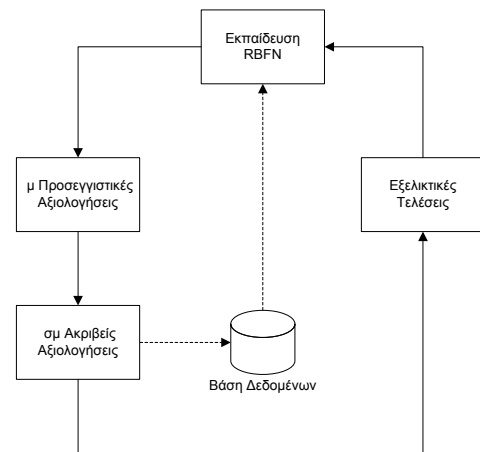


Σχήμα 5.1: Τυπικό δίκτυο *RBF*.

έγιναν μέχρι εκείνη τη στιγμή στον *EA*, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από τον χρήστη. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη βελτιστοποίηση με *EA* και χρήση μεταπροτύπων αξιολόγησης περιγράφεται στο σχήμα 5.3. Κατά την πρώτη φάση, ένας αρχικός πληθυσμός, με  $\mu$  άτομα, δημιουργείται με τυχαίο τρόπο. Ο πληθυσμός αυτός εξελίσσεται για συγκεκριμένο αριθμό γενιών και κάθε μέλος του αξιολογείται με το ακριβές πρότυπο αξιολόγησης. Τα παραμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε μέλους και η τιμή καταλληλότητάς τους αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Η αρχική αυτή φάση συμπίπτει με τη συμβατική διαδικασία βελτιστοποίησης με *EA* (σχήμα 5.2). Μετά το πέρας της ακολουθεί η δεύτερη φάση. Συγκεκριμένα κατά τις επόμενες γενιές και για κάθε μέλος της, αν το μέλος δεν υπάρχει στη βάση δεδομένων, ένα τοπικό *RBFN* εκπαιδεύεται για αυτό. Σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα ανακτώνται τα δεδομένα από τη βάση δεδομένων του *EA*. Το τοπικό δίκτυο χρησιμοποιείται για την προσεγγιστική προ-αξιολόγηση της υποψήφιας λύσης. Τα αποτελέσματα των  $\mu$  προσεγγιστικών αξιολογήσεων κατατάσσονται σε σειρά και ένα μικρό ποσοστό των καλύτερων αξιολογήσεων επιλέγονται (συνολικά επιλέγονται οι  $\sigma\mu$  καλύτερες αξιολογήσεις). Τα μέλη που αντιστοιχούν στις επιλεγμένες αξιολογήσεις αξιολογούνται με το ακριβές πρότυπο αξιολόγησης και εμπλουτίζεται η βάση δεδομένων με τα νέα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, οι εξελικτικοί συντελεστές εφαρμόζονται σε ολόκληρο τον πληθυσμό (ακριβή και προσεγγιστικά αποτελέσματα) και διαμορφώνονται  $\mu$  απόγονοι. Η δεύτερη φάση επαναλαμβάνεται για κάθε γενιά μέχρι τη σύγκλιση του αλγορίθμου.



Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση των συμβατικών *EA* [28].

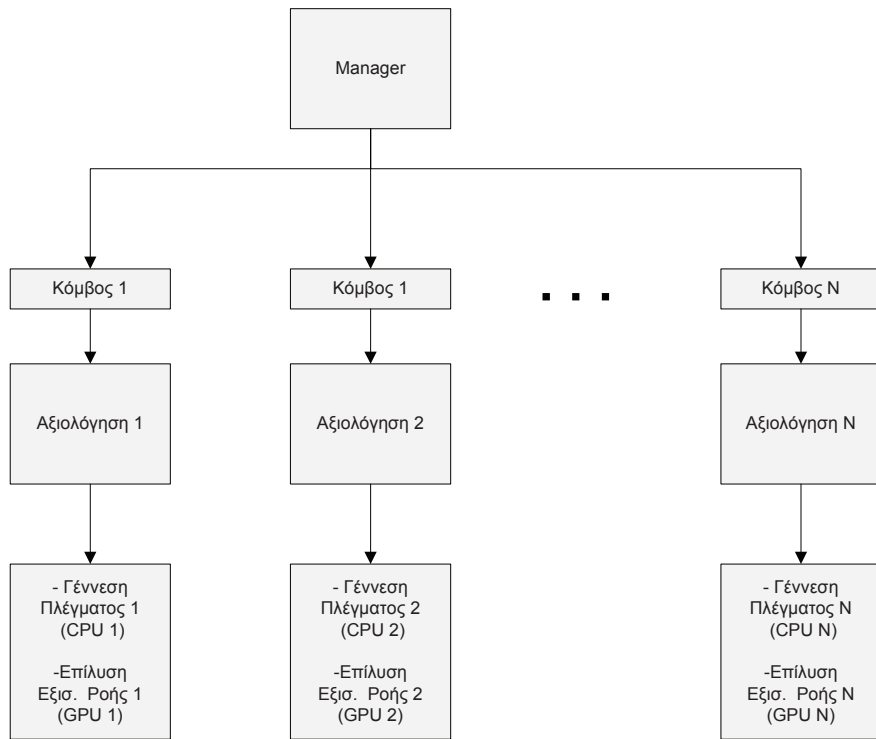


Σχήμα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση των *EA* με χρήση μεταπροτύπων αξιολόγησης [28].

### Παράλληλη αξιολόγηση υποψήφιων λύσεων

Στόχος της παράλληλης αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων είναι η μείωση του συνολικού υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τη εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Η χρήση εξελικτικών αλγορίθμων επιτρέπει τον καταμερισμό της εκτέλεσης των υπολογισμών σε ένα πλέγμα υπολογιστών, έτσι ώστε κάθε υπολογιστική μονάδα να αναλαμβάνει την εκτέλεση των αξιολογήσεων που αντιστοιχούν σε ένα αριθμό μελών της κάθε γενιάς, επιταχύνοντας με τον τρόπο αυτό τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, το κύριο πρόγραμμα που διαχειρίζεται τον αλγόριθμο (*manager*) αναλαμβάνει τη διαμέριση των αξιολογήσεων των μελών  $\lambda$  της κάθε γενιάς και την ανάθεση τους προς εκτέλεση σε έναν αριθμό  $N$  κόμβων του πλέγματος των υπολογιστών (Σχήμα 5.4). Υπενθυμίζεται ότι κάθε αξιολόγηση περιλαμβάνει τη διαδικασία γένεσης υπολογιστικού πλέγματος και την επίλυση των εξισώσεων ροής πάνω σε αυτό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δύο κόμβοι με τον κάθε κόμβο να αποτελείται από έναν επεξεργαστή (*CPU*-αναλαμβάνει τη γένεση πλέγματος) και μια κάρτα γραφικών (*GPU*-αναλαμβάνει τη γρήγορη επίλυση των εξ. ροής). Τα χαρακτηριστικά των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 5. Είναι φανερό ότι κάθε κόμβος εκτελεί σειριακά περισσότερες της μίας αξιολόγησης ανά γενιά, όταν ο αριθμός των κόμβων είναι μικρότερος από τα μέλη της εκάστοτε γενιάς. Καθοριστικό ρόλο στην επιτάχυνση διαδραματίζει ο αριθμός των υπολογιστικών μονάδων και η ανάθεση των αξιολογήσεων σε κάθε μια, με το τελευταίο να επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της παραλληλίας. Η επιλογή του αριθμού των μελών της κάθε γενιάς που θα αξιολογήσει η κάθε υπολογιστική μονάδα αποτελεί σύνθετη διαδικασία, ιδίως όταν το

πλέγμα αποτελείται από υπολογιστικές μονάδες διαφορετικών χαρακτηριστικών και όταν οι αξιολογήσεις των υποψήφιων λύσεων παρουσιάζουν άνισο υπολογιστικό κόστος. Τότε απαιτείται η εφαρμογή τεχνικών για την βέλτιστη αξιοποίηση της κάθε μονάδας. Η εφαρμογή της παραλληλίας στο συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη απόδοση, χωρίς να απαιτείται 'έξυπνη' διαχείριση των αξιολογήσεων, μιας και οι υπολογιστικές μονάδες που χρησιμοποιούνται έχουν κοινά χαρακτηριστικά ενώ το υπολογιστικό κόστος της κάθε αξιολόγησης είναι περίπου ίδιο.



Σχήμα 5.4: Παράλληλη αξιολόγηση υποψήφιων λύσεων σε  $N$  κόμβους ( $N \geq 2$ ).

Κόμβος	Χαρακτηριστικά	
	<i>CPU</i>	<i>GPU</i>
1	Intel Pentium D 3.00GHz	Nvidia Ge-Force GTX 280
2	Intel Pentium D 3.00GHz	Nvidia Ge-Force GTX 285

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των κόμβων ( $N = 2$ ) που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης για την αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων.

## Το λογισμικό *EASY*

Το λογισμικό *EASY* [31, 32, 33, 34, 35, 36] που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών και στη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Είναι ένα λογισμικό βελτιστοποίησης γενικής χρήσης που χρησιμοποιεί εξελικτικούς αλγορίθμους, όπως αυτοί περιγράφησαν παραπάνω, για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων ενός ή περισσότερων στόχων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η χρήση των εξελικτικών αλγορίθμων απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων, γεγονός το οποίο αντισταθμίζεται (σε επίπεδο χρόνου αναμονής) με τη χρήση μεταπροτύπων αξιολόγησης. Η τεχνική αυτή υποστηρίζεται από το λογισμικό. Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει επίσης, τη δυνατότητα παράλληλης αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων. Επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο ή περισσότερων κόμβων του πλέγματος υπολογιστών. Έτσι, σε κάθε κόμβο ανατίθεται η αξιολόγηση ενός ή περισσότερων ατόμων της κάθε γενιάς, αριθμός που εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για τη μείωση του χρόνου αναμονής (wall clock time) της βελτιστοποίησης. Τέλος, αναφέρεται ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα υποστηρίζει πλήθος άλλων τεχνικών και μεθόδων, η χρήση των οποίων δεν κρίθηκε αναγκαία στη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος.

## Χαμηλού Κόστους Βελτιστοποίηση (Low Budget Optimization)

Η εφαρμογή των τεχνικών που αναλύθηκαν και εφαρμόστηκαν στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης του ελέγχου ροής είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας ταχύτερης μεθόδου βελτιστοποίησης χαμηλού κόστους. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ο μικρός χρόνος αναμονής. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται συνοψίζονται ως εξής:

- **Επίλυση των εξισώσεων ροής σε GPUs.**  
Αποτέλεσμα της χρήσης των καρτών γραφικών για την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής είναι η μείωση του υπολογιστικού χρόνου για κάθε αξιολόγηση. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, η επίλυση των εξισώσεων σε μια κάρτα γραφικών επιταχύνεται πλέον περίπου 40 φορές σε σχέση με την επίλυση των ίδιων εξισώσεων σε έναν πυρήνα επεξεργαστή. Η επιτάχυνση αυτή αποφέρει βέβαια μείωση του χρόνου αναμονής.
- **Χρήση μεταπροτύπων αξιολόγησης.**  
Αποτέλεσμα της χρήσης των μεταπροτύπων είναι η μείωση του συνολικού αριθμού των αξιολογήσεων με τον τρόπο που περιγράφηκε σε παραπάνω παράγραφο. Αυτό σημαίνει μείωση του υπολογιστικού κόστους και βέβαια μείωση του χρόνου αναμονής.
- **Παράλληλη αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων.**  
Η παραλληλοποίηση επετεύχθη με τη χρήση δύο κόμβων του πλέγματος υπολο-



γιστών. Αποτέλεσμα της παράλληλης αξιολόγησης είναι η μείωση του χρόνου αναμονής καθώς γίνονται ταυτόχρονα δύο αξιολογήσεις.



# Κεφάλαιο 6

## Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, του ελέγχου ροής με χρήση της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης γύρω από αεροτομή δεδομένης γεωμετρίας για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά τη βελτιστοποίηση του ελέγχου ροής με μια δέσμη ελέγχου ( $\Delta E$ ) και γωνία επ' άπειρον ροής ( $a_\infty$ ) ίση με  $12^\circ$ . Η δεύτερη και τρίτη περίπτωση αναφέρονται σε γωνία επ' άπειρον ροής  $18^\circ$  με μία και δύο  $\Delta E$  αντίστοιχα. Όλα τα αποτελέσματα αναφέρονται στην ίδια αεροτομή "NACA 4415", αδιάστατη τιμή *Reynolds* ( $Re$ ) του πεδίου ροής ίση με 500.000 και αριθμό *Mach* της επ' άπειρον ροής ( $M_\infty$ ) ίσο με 0.3. Οι διαφορετικές περιπτώσεις συνοψίζονται στον πίνακα 6.1.

Περίπτωση	Αριθμός $\Delta E$	$a_\infty$	$M_\infty$	$Re$
1η	1	12	0.3	500,000
2η	1	18	0.3	500,000
3η	2	18	0.3	500,000

Πίνακας 6.1: Εξεταζόμενες περιπτώσεις βελτιστοποίησης ελέγχου ροής γύρω από αεροτομή τύπου "NACA 4415".

### Περιγραφή προβλήματος βελτιστοποίησης

Το ζητούμενο της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά της  $\Delta E$  ροής ώστε να μεγιστοποιηθεί η άνωση του συστήματος και να ελαχιστοποιηθεί η αντίσταση. Με βάση αυτή τη διατύπωση αποσαφηνίζονται οι ελεύθερες μεταβλητές (ή μεταβλητές σχεδιασμού) του προβλήματος, δηλαδή οι παράμετροι στις οποίες πρέπει να αποδοθούν τιμές που να εξασφαλίζουν βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά, και οι στόχοι του προβλήματος των οποίων αναζητούμε το ακρότατο (τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή κατά περίπτωση, που αντιστοιχούν στην αεροδυναμικά βέλτιστη λύση). Έτσι, με βάση όσα προηγήθηκαν έχουμε:

### Μεταβλητές σχεδιασμού

- Θέση οπής της δέσμης ( $x_{slot}$ )
- Εύρος της οπής ( $SlotWidth$ )
- Γωνία της δέσμης ( $\theta_{jet}$ )
- Παροχή αναρρόφησης της δέσμης ( $Q_{jet}$ )

### Στόχοι

- Μεγιστοποίηση Συντελεστή Άνωσης
- Ελαχιστοποίηση Συντελεστή Αντίστασης

Οι μεταβλητές σχεδιασμού έχουν καθοριστεί ήδη από το κεφάλαιο 4, όπου αποδείχτηκε ότι αποτελούν τις παραμέτρους ευαισθησίας των στόχων του συγκεκριμένου προβλήματος. Παράλληλα στο ίδιο κεφάλαιο είχε γίνει μια πρώτη διερεύνηση της επίδρασης τους στις τιμές των στόχων. Το πρόβλημα, όπως διατυπώθηκε, παρουσιάζει δύο στόχους προς αναζήτηση ολικού ακρότατου τους. Ο απλός τρόπος θα ήταν ο συνδυασμός των δύο στόχων σε έναν, εισάγοντας κατάλληλους πολλαπλασιαστές και το πρόβλημα να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου. Στην περίπτωση αυτή όμως, η βέλτιστη λύση θα αντιστοιχεί στους συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν και θα στερείται γενικότητας. Για τον παραπάνω λόγο αντιμετωπίζεται πραγματικά ως πρόβλημα δύο στόχων και δεν υπολογίζεται μια λύση αλλά το μέγιστο των βέλτιστων κατά *Pareto* λύσεων.

### Παράμετροι αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Οι παράμετροι που τέθηκαν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ίδιες και για τις τρεις περιπτώσεις ελέγχου. Αυτοί είναι:

#### Εξελικτικοί παράμετροι

- (Απόγονοι  $\lambda$ , γονείς  $\mu$ ) = (20,8)
- Επίλεκτοι = 6

#### Μεταπρότυπο αξιολόγησης

- Η έναρξη των προσεγγιστικών προ-αξιολογήσεων γίνεται όταν η βάση δεδομένων έχει τουλάχιστον 100 ακριβείς αξιολογήσεις.
- Ακριβείς αξιολογήσεις ανά γενιά μετά την έναρξη των προσεγγιστικών προ-αξιολογήσεων:  $2 \leq \sigma \leq 3$

## 6.1 Περίπτωση 1<sup>η</sup>: 1 ΔΕ, $a_{\infty} = 12^{\circ}$

### Όρια των μεταβλητών σχεδιασμού

Τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού καθορίστηκαν με βάση τη διερεύνηση που έγινε στο κεφάλαιο 4. Έτσι οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορούν να πάρουν τιμές που βρίσκονται στα παρακάτω διαστήματα.

$$\begin{aligned}
0.6 &\leq x_{slot} \leq 0.8 \\
-30^\circ &\leq \theta_{jet} \leq 30^\circ \\
0.01 &\leq SlotWidth \leq 0.02 \\
0.0045 &\leq Q_{jet} \leq 0.0090
\end{aligned}$$

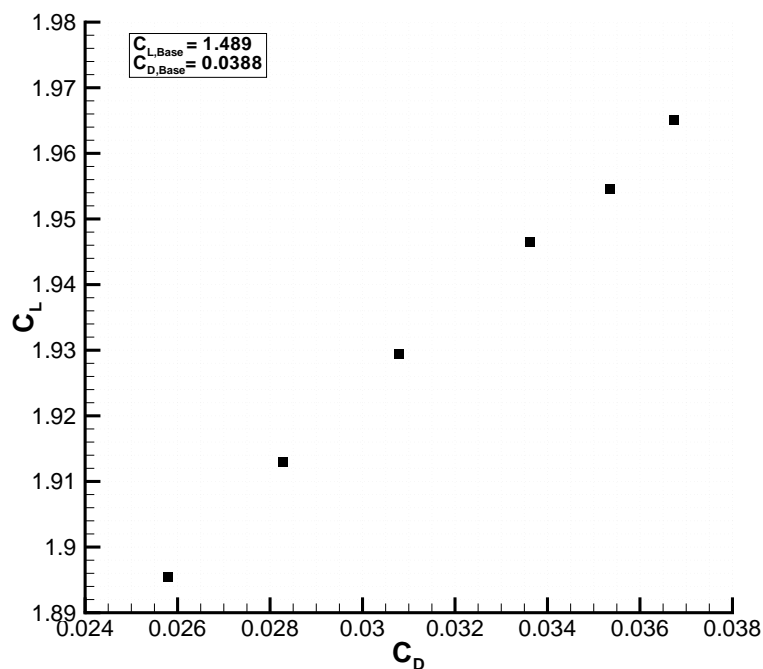
Η θέση της οπής  $x_{slot}$  και το εύρος της  $SlotWidth$  έχουν αδιαστατοποιηθεί με το μήκος της χορδής  $c$  της αεροτομής (στην προκειμένη περίπτωση είναι μοναδιαίου μήκους) ενώ η τιμή της παροχής έχει αδιαστατοποιηθεί, επίσης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{jet} = \frac{(\rho V)_{base} b}{\rho_\infty U_\infty c}$$

όπου  $(\rho V)_{base}$  είναι το γινόμενο της πυκνότητας και της κάθετης ταχύτητας στη βάση της κοιλότητας της δέσμης,  $b$  το μήκος της βάσης της κοιλότητας ως προς το μήκος της χορδής  $c$  και  $\rho_\infty, U_\infty$  η πυκνότητα και η ταχύτητα της επί άπειρον ροής.

### Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, όπως αυτός παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έδωσε το παρακάτω μέτωπο βέλτιστων λύσεων κατά *Pareto* (σχήμα 6.1).



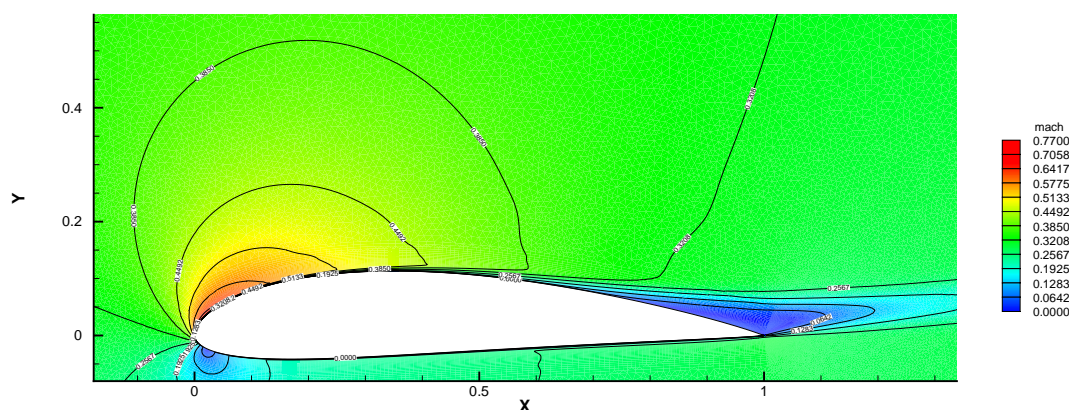
Σχήμα 6.1: Περίπτωση 1: Βέλτιστες κατά *Pareto* λύσεις. Για λόγους σύγκρισης, αναγράφεται η απόδοση της αεροτομής χωρίς έλεγχο ( $C_{L,Base}, C_{D,Base}$ ).

Λύση <i>Pareto</i>	Στόχοι		Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	$C_D$	$C_L$	$x_{slot}$	$\theta_{jet}$	$SlotWidth$	$Q_{jet}$
1	0.0257	1.895	0.600	-9.76	0.0196	0.009
2	0.0282	1.913	0.650	-9.76	0.0197	0.009
3	0.0307	1.929	0.698	-10.94	0.0196	0.009
4	0.0336	1.946	0.749	-9.76	0.0196	0.009
5	0.0353	1.954	0.776	2.23	0.0197	0.009
6	0.0367	1.965	0.799	-9.76	0.0196	0.009

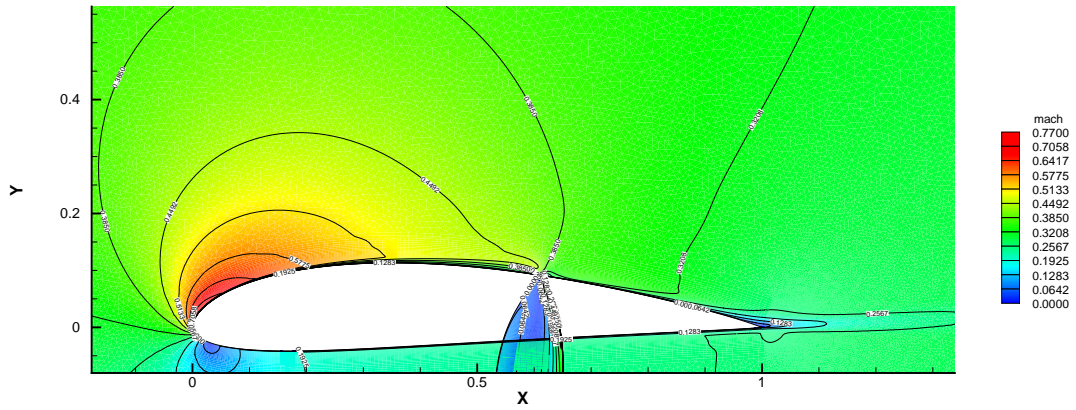
Πίνακας 6.2: Περίπτωση 1: Τιμές των στόχων και των μεταβλητών σχεδιασμού που αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις κατά *Pareto*.

Κάθε κουκίδα αντιπροσωπεύει μία βέλτιστη λύση του μετώπου. Χαρακτηριστική ιδιότητα των σημείων είναι ότι κανένα από αυτά δεν υπερτερεί οποιουδήποτε άλλου ως προς όλους (και τους δύο) στόχους. Οι μεταβλητές σχεδιασμού της δέσμης ελέγχου που αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις του μετώπου δίνονται στον πίνακα 6.2.

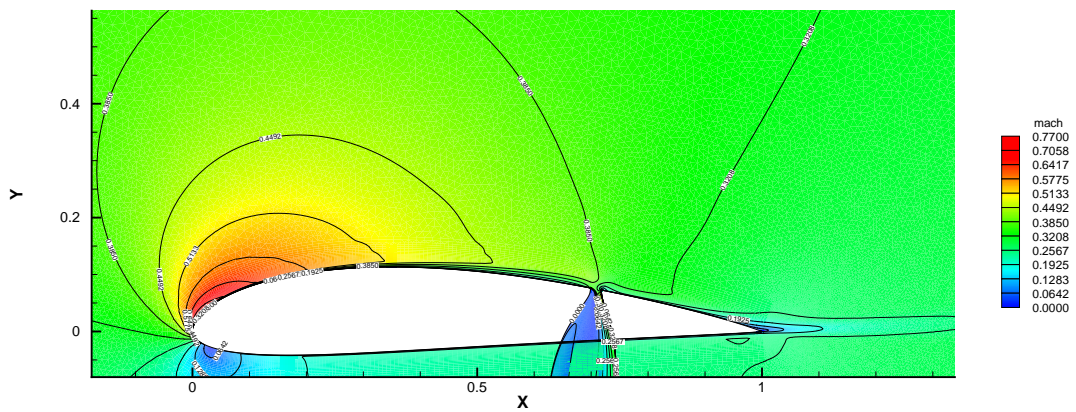
Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται το πεδίο ροής της αεροτομής για διακριτές βέλτιστες λύσεις κατά *Pareto* (σχήμα 6.3) και ο αντίστοιχος συντελεστής πίεσης ( $C_P$ ) της κάθε λύσης (σχήμα 6.4). Συγκεκριμένα επιλέγονται να παρουσιαστούν οι δύο οριακές λύσεις (λύσεις 1 και 6) και μια ενδιάμεση (λύση 3). Χαρακτηριστικό της οριακής λύσης 1 είναι ο ελάχιστος συντελεστής αντίστασης ( $C_D$ ) ενώ για την οριακή λύση 6 ο μέγιστος συντελεστής άνωσης ( $C_L$ ).



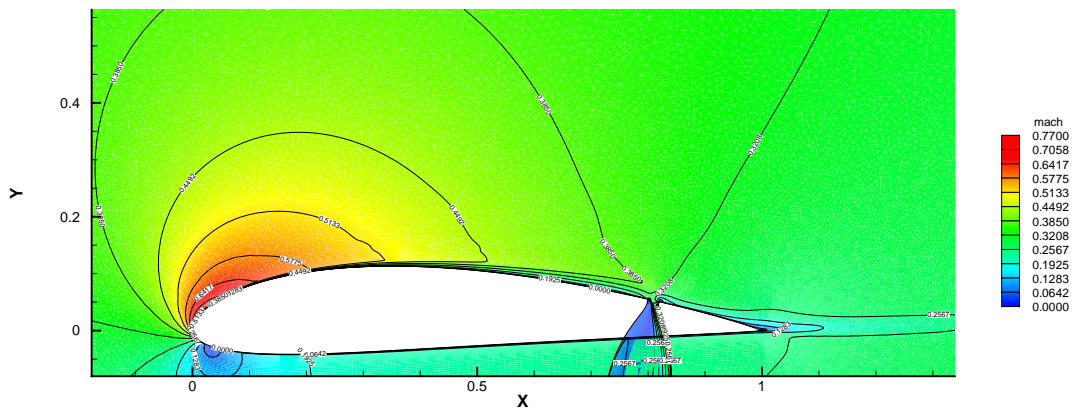
Σχήμα 6.2: Περίπτωση αναφοράς (χωρίς έλεγχο): Πεδίο *Mach* και ισογραμμές *Mach* της ροής γύρω από την αεροτομή ( $a_\infty = 12^0$ ,  $M_\infty = 0.3$ ,  $Re = 500.000$ ).



(α) Λύση 1

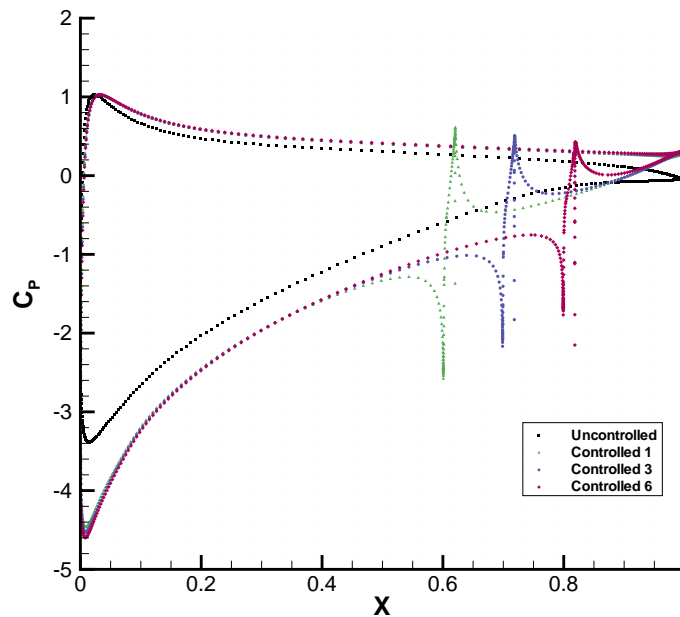


(β) Λύση 3



(γ) Λύση 6

Σχήμα 6.3: Περίπτωση 1-Βέλτιστες λύσεις κατά Pareto: Πεδίο Mach και ισογραμμές Mach της ροής ( $M_\infty = 0.3$ ).



Σχήμα 6.4: Συντελεστής πίεσης της αεροτομής  $C_p$  για τις περιπτώσεις χωρίς έλεγχο (*Uncontrolled*) και με έλεγχο (*Controlled*) του σχήματος 6.3.

### Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Άμεσα συμπεράσματα προκύπτουν από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης που βρίσκονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 6.2. Για την καλύτερη εποπτεία των στόχων για τα διάφορα σημεία του μετώπου *Pareto* έγινε αναγωγή τους ως προς τις τιμές της περίπτωσης χωρίς έλεγχο (πίνακας 6.3).

Η παροχή αναρρόφησης της δέσμης, όπως προέκυψε από τη βελτιστοποίηση, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της  $Q_{jet} = 0.009$  για όλες τις βέλτιστες λύσεις του μετώπου. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς αύξηση της παροχής αναρρόφησης (εντός 'λογικών' ορίων) έχει ως αποτέλεσμα μείωση της ζώνης αποκόλλησης, καθώς όλο και μεγαλύτερο τμήμα της αποκολλημένης ζώνης τείνει να προσκολληθεί στο τοίχωμα λόγω της αναρρόφησης. Η ερμηνεία αυτή επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Περαιτέρω αύξηση της τιμής της παροχής αναμένεται να επιφέρει ακόμη μεγαλύτερη βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της αεροτομής. Όμως για την ρεαλιστική προσομοίωση του ελέγχου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γίνεται οριοθέτηση των τιμών της κυρίως λόγω κατασκευαστικών περιορισμών του επενεργητή αλλά και συνολικής απόδοσης της όλης διάταξης ώστε να μην γίνεται ασύμφορη η χρήση της. Το εύρος των τιμών της συνηθίζεται να είναι τέτοιο ώστε η ταχύτητα της δέσμης στην οπή να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ταχύτητα της επί άπειρον



ροής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, με την υπόθεση ότι το ρευστό είναι σχεδόν ασυμπίεστο και η κατανομή της ταχύτητας στην οπή είναι ομοιόμορφη, προκύπτει ότι η ταχύτητα της δέσμης αναρρόφησης είναι ίση με 0.45 της ταχύτητας της επ' άπειρον ροής.

Η επόμενη μεταβλητή σχεδιασμού είναι το εύρος της οπής, το οποίο παραμένει σταθερό σχεδόν για όλες τις λύσεις του μετώπου. Η τιμή αυτή (*SlotWidth*) κυμαίνεται μεταξύ 0.0196 και 0.0197 του μήκους της χορδής της αεροτομής, δηλαδή τείνει στο άνω όριο του διαστήματος που τέθηκε ως εύρος για τη συγκεκριμένη μεταβλητή σχεδιασμού, δηλαδή 0.02. Υπενθυμίζεται ότι μία πρώτη επιλογή των ορίων του εύρους της οπής έγινε με βάση το γεγονός ότι αύξηση του ανοίγματος της οπής πέρα του 2.5% του μήκους της χορδής δεν προξενεί σημαντική αύξηση της άνωσης της αεροτομής, όπως υπαγορεύει η εργασία του *Dannenber* [11] σε αεροτομή διαφορετικής γεωμετρίας.

Σχεδόν σταθερή τιμή παρατηρείται και για τη γωνία της δέσμης ( $\theta_{jet}$ ). Η τιμή της είναι περίπου ίση με  $-10^\circ$ , δηλαδή η δέσμη είναι σχεδόν κάθετη στο τοίχωμα της αεροτομής. Εξαιρέση αποτελεί το πέμπτο σημείο του *Pareto*, για το οποίο η ίδια μεταβλητή είναι ίση με  $2.23^0$ . Αυτό κρίνεται ως τυχαίο. στοχαστικός αλγόριθμος, μη επαρκής σύγκλιση). Υπενθυμίζεται ότι η ποσότητα που ρυθμίζεται και παίρνει τιμή ίση με την συγκεκριμένη τιμή της γωνίας είναι η γωνία των τοιχωμάτων της κοιλότητας που προσδένονται στην οπή της αεροτομής, την οποία ταυτίζουμε με τη γωνία της δέσμης.

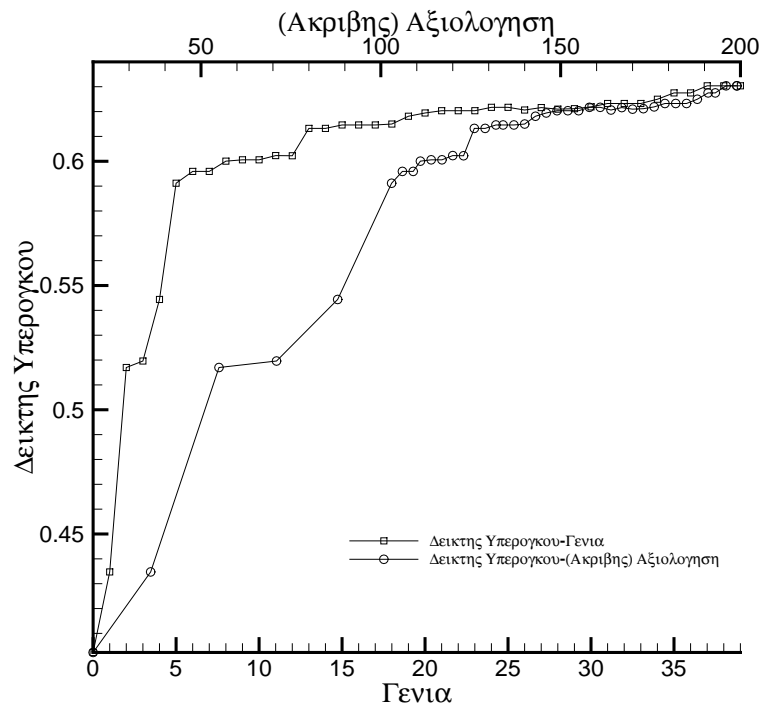
Η τελευταία μεταβλητή σχεδιασμού της δέσμης ελέγχου, δηλαδή η θέση της οπής ( $x_{slot}$ ), φαίνεται να ασκεί τη σημαντικότερη επίδραση στους δύο στόχους. Στην πραγματικότητα η συγκεκριμένη μεταβλητή διαμορφώνει το μέτωπο *Pareto*, καθώς οι υπόλοιπες έλαβαν σχεδόν σταθερή τιμή σύμφωνα με τα παραπάνω. Για τη μικρότερη τιμή αυτής ( $x_{slot} = 0.6$ , δηλαδή ΔΕ αρκετά ανάντι), προκύπτει ο ελάχιστος συντελεστής αντίστασης ( $C_D = 0.0257$ ), ενώ για τη μεγαλύτερη τιμή ( $x_{slot} = 0.799$ ) προκύπτει ο μέγιστος συντελεστής άνωσης ( $C_L = 1.965$ ). Η παρατήρηση ότι η θέση της οπής λαμβάνει τις δύο οριακές της τιμές όταν οι στόχοι παρουσιάζουν ακρότατο, υποδεικνύει ότι διεύρυνση των ορίων της συγκεκριμένης μεταβλητής μπορεί να έχει πιθανώς ως αποτέλεσμα περαιτέρω βελτίωση των στόχων. Συμπερασματικά, η μετάβαση στο μέτωπο από την τιμή του ελάχιστου  $C_D$  στην τιμή του μέγιστου  $C_L$  γίνεται με αύξηση της τιμής της στο αντίστοιχο διάστημα τιμών της. Δηλαδή, η μετακίνηση της θέσης της οπής προς τα κατάντι έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση του  $C_D$  και του  $C_L$ .

Ο πίνακας 6.3 καθιστά εμφανή την άκρως θετική επίδραση του ελέγχου ροής στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής, σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος, σε όλες τις λύσεις του μετώπου. Υπενθυμίζεται ότι στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης ήταν η μεγιστοποίηση του συντελεστή άνωσης και η ελαχιστοποίηση του συντελεστή αντίστασης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μέγιστη υποχώρηση του  $C_D$  κατά 34% (λύση 1) και μέγιστη αύξηση του  $C_L$  κατά 31% (λύση 6), για τις βέλτιστες οριακές λύσεις. Οι υπόλοιπες λύσεις αποτελούν ενδιάμεσες καταστάσεις. Κύριο χαρακτηριστικό των λύσεων του μετώπου είναι ότι καμία δεν υπερτερεί οποιασδήποτε άλλης και ως προς του δύο στόχους (μη-κυριαρχούμενες λύσεις). Είναι

σημαντικό να αναφερθεί ότι σε όλες τις λύσεις του μετώπου οι τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών υπερτερούν έναντι της περίπτωσης χωρίς έλεγχο.

Λύση Pareto	Ανηγγμένοι Στόχοι	
	$C_D/C_{D,Base}$	$C_L/C_{L,Base}$
1	0.66	1.27
2	0.72	1.28
3	0.79	1.29
4	0.86	1.30
5	0.91	1.31
6	0.94	1.31

Πίνακας 6.3: Περίπτωση 1: Ανηγγμένες τιμές των βέλτιστων συντελεστών άνωσης και αντίστασης. Η αναγωγή έγινε ως προς τις αντίστοιχες τιμές χωρίς την εφαρμογή ελέγχου ( $C_{L,Base} = 1.489$ ),  $C_{D,Base} = 0.0388$ ).



Σχήμα 6.5: Περίπτωση 1: Σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

## 6.2 Περίπτωση 2<sup>η</sup>: 1 ΔΕ, $a_\infty = 18^\circ$

### Όρια των μεταβλητών σχεδιασμού

Η επιλογή των ορίων έγινε με ανάλογο τρόπο όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Βασικό κριτήριο της επιλογής των ορίων της θέσης της οπής αποτελεί πάλι η θέση έναρξης της αποκόλλησης της περίπτωσης χωρίς έλεγχο (στο κεφάλαιο 4 υπολογίστηκε ότι ξεκινά στη θέση 0.40 του μήκους της αεροτομής). Τα όρια των υπόλοιπων μεταβλητών παραμένουν ίδια για προφανείς λόγους. Έτσι οι ελεύθερες μεταβλητές μπορούν να πάρουν τιμές που βρίσκονται στα παρακάτω διαστήματα.

$$\begin{aligned} 0.15 &\leq x_{slot} \leq 0.50 \\ -30^\circ &\leq \theta_{jet} \leq 30^\circ \\ 0.01 &\leq SlotWidth \leq 0.02 \\ 0.0045 &\leq Q_{jet} \leq 0.0090 \end{aligned}$$

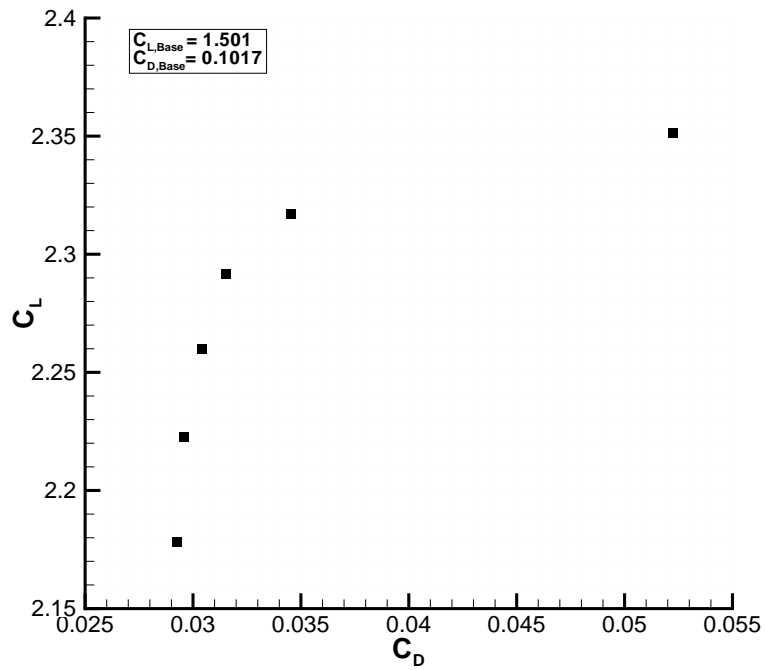
Η αδιαστατοποίηση των μεταβλητών σχεδιασμού έγινε όπως στην πρώτη περίπτωση.

### Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

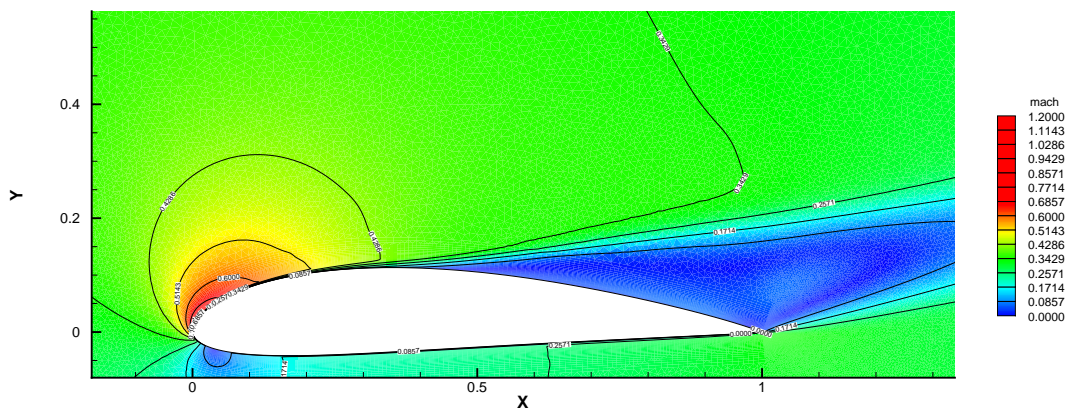
Η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης έδωσε το παρακάτω μέτωπο βέλτιστων λύσεων κατά *Pareto* (σχήμα 6.6).

Λύση <i>Pareto</i>	Στόχοι		Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	$C_D$	$C_L$	$x_{slot}$	$\theta_{jet}$	$SlotWidth$	$Q_{jet}$
1	0.0292	2.178	0.150	-2.23	0.0199	0.009
2	0.0295	2.222	0.335	-2.47	0.0199	0.009
3	0.0304	2.260	0.192	-2.23	0.0199	0.009
4	0.0315	2.291	0.215	-2.23	0.0198	0.009
5	0.0345	2.317	0.259	2.23	0.0198	0.009
6	0.0522	2.351	0.500	-2.23	0.0198	0.009

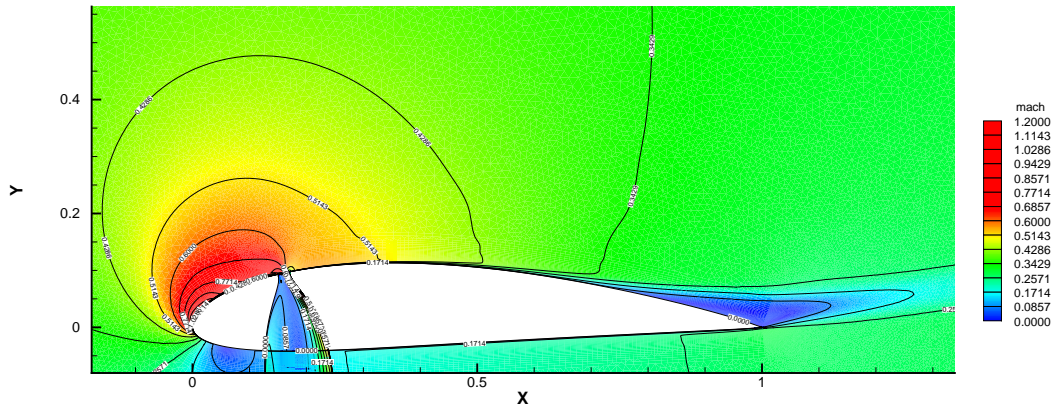
Πίνακας 6.4: Περίπτωση 2: Τιμές των στόχων και των μεταβλητών σχεδιασμού που αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις κατά *Pareto*.



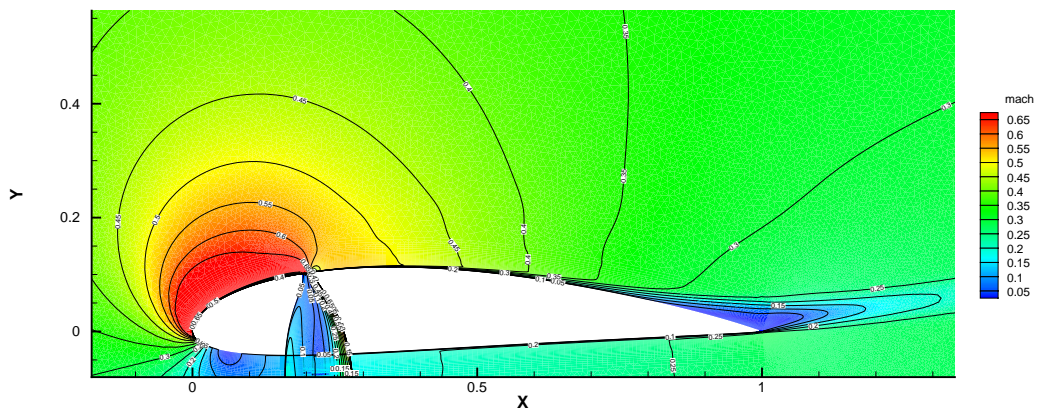
Σχήμα 6.6: Περίπτωση 2: Βέλτιστες κατά *Pareto* λύσεις. Για λόγους σύγκρισης, αναγράφεται η απόδοση της αεροτομής χωρίς έλεγχο ( $C_{L,Base}$ ,  $C_{D,Base}$ ).



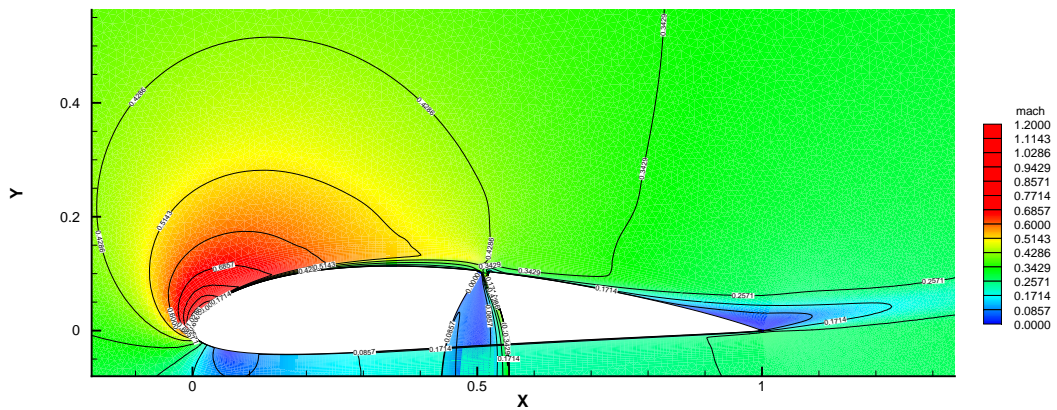
Σχήμα 6.7: Περίπτωση αναφοράς (χωρίς έλεγχο): Πεδίο *Mach* και ισογραμμές *Mach* της ροής γύρω από την αεροτομή ( $\alpha_\infty = 18^\circ$ ,  $M_\infty = 0.3$ ,  $Re = 500.000$ ).



(α) Λύση 1

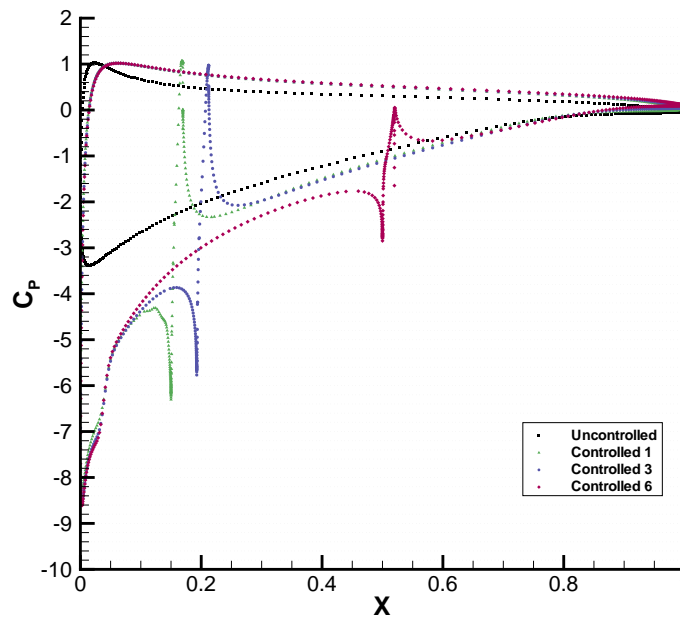


(β) Λύση 3



(γ) Λύση 6

Σχήμα 6.8: Περίπτωση 2-Βέλτιστες λύσεις κατά Pareto: Πεδίο Mach και ισογραμμές Mach της ροής ( $M_\infty = 0.3$ ).



Σχήμα 6.9: Συντελεστής πίεσης της αεροτομής  $C_p$  για τις περιπτώσεις χωρίς έλεγχο (*Uncontrolled*) και με έλεγχο (*Controlled*) του σχήματος 6.8.

### Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης (πίνακας 6.2) συμπίπτουν ποιοτικά με αυτά της πρώτης περίπτωσης. Και εδώ έγινε αναγωγή των τιμών των στόχων ως προς τις τιμές της περίπτωσης χωρίς έλεγχο (πίνακας 6.5).

Σταθερές(ή σχεδόν σταθερές) προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές της παροχής αναρρόφησης, του εύρους της οπής και της γωνίας της δέσμης. Συγκεκριμένα, η παροχή αναρρόφησης της δέσμης, όπως προέκυψε από τη βελτιστοποίηση, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της  $Q_{jet} = 0.009$  για όλες τις βέλτιστες λύσεις του μετώπου. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο. Περαιτέρω αύξηση της τιμής της παροχής αναμένεται να επιφέρει ακόμη μεγαλύτερη βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της αεροτομής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, με την υπόθεση ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο και η κατανομή της ταχύτητας στην οπή είναι ομοιόμορφη, προκύπτει ότι η ταχύτητα της δέσμης αναρρόφησης είναι ίση με 0.45 της ταχύτητας της επ' άπειρου ροής. Το εύρος της οπής παραμένει επίσης σχεδόν σταθερό για όλες τις λύσεις του μετώπου. Η τιμή αυτή (*SlotWidth*) κυμαίνεται μεταξύ 0.0198 και 0.0199 του μήκους της χορδής της αεροτομής, δηλαδή τείνει στο άνω όριο του διαστήματος που τέθηκε ως εύρος για τη συγκεκριμένη μεταβλητή σχεδιασμού, δηλαδή 0.02. Σχεδόν σταθερή τιμή παρατηρείται

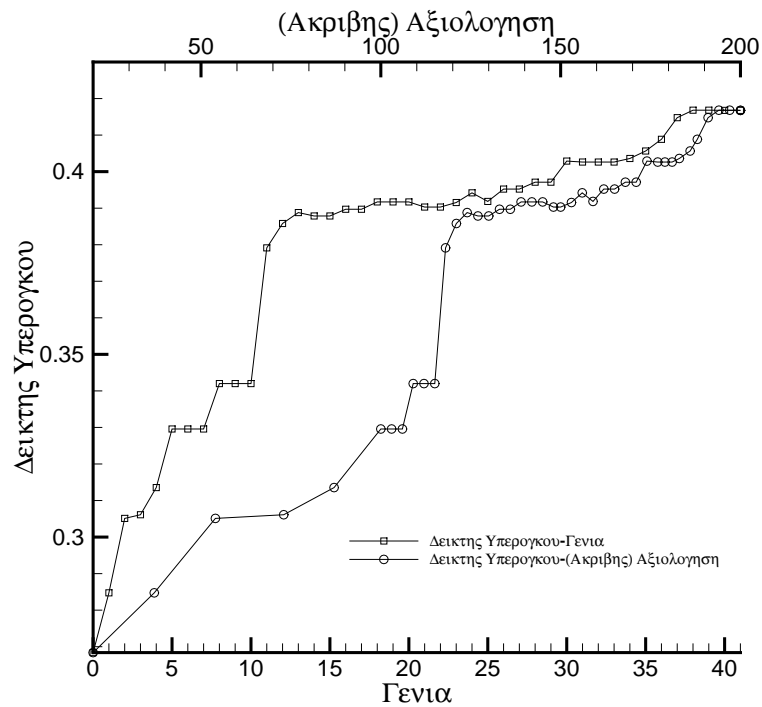
και για τη γωνία της δέσμης ( $\theta_{jet}$ ). Η τιμή της είναι περίπου ίση με  $-2^\circ$ , δηλαδή η δέσμη είναι σχεδόν κάθετη στο τοίχωμα της αεροτομής και σε αυτή την περίπτωση. Εξαιρέση αποτελεί και εδώ το πέμπτο σημείο του *Pareto*, για το οποίο η ίδια μεταβλητή είναι ίση με  $2.23^\circ$ .

Η θέση της οπής ( $x_{slot}$ ) φαίνεται να ασκεί τη σημαντικότερη επίδραση στους δύο στόχους και σε αυτή την περίπτωση και να διαμορφώνει το μέτωπο *Pareto*, καθώς οι υπόλοιπες έλαβαν σχεδόν σταθερή τιμή σύμφωνα με τα παραπάνω. Για τη μικρότερη τιμή αυτής ( $x_{slot} = 0.15$ ), προκύπτει ο ελάχιστος συντελεστής αντίστασης ( $C_D = 0.0292$ ), ενώ για τη μεγαλύτερη τιμή ( $x_{slot} = 0.5$ ) προκύπτει ο μέγιστος συντελεστής άνωσης ( $C_L = 2.351$ ). Το γεγονός ότι η θέση της οπής λαμβάνει τις δύο οριακές της τιμές όταν οι στόχοι παρουσιάζουν ακρότατο, υποδεικνύει ότι διεύρυνση των ορίων της συγκεκριμένης μεταβλητής μπορεί να έχει πιθανώς ως αποτέλεσμα περαιτέρω βελτίωση των στόχων. Και εδώ, η μετάβαση στο μέτωπο από την τιμή του ελάχιστου  $C_D$  στην τιμή του μέγιστου  $C_L$  γίνεται με αύξηση της τιμής της στο αντίστοιχο διάστημα τιμών της ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδιασμού παραμένουν σταθερές.

Ο πίνακας 6.3 δείχνει και εδώ την άκρως θετική επίδραση του ελέγχου ροής στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής, σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος, σε όλες τις λύσεις του μετώπου. Μάλιστα, παρατηρείται καλύτερη απόδοση του ελέγχου σε σχέση με τα αποτελέσματα της πρώτης περίπτωσης (σύγκριση αντίστοιχων αύξησεων  $C_L$ ,  $C_D$ ). Το γεγονός αυτό έγκειται στη μεγαλύτερη ζώνη αποκόλλησης της κατάστασης αναφοράς (δηλαδή χωρίς έλεγχο ροής για  $a_\infty = 18^\circ$ ) και σχεδόν την πλήρη εξάλειψή της, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8. Από την άλλη πλευρά, η αντίστοιχη ζώνη αποκόλλησης της κατάστασης αναφοράς για  $a_\infty = 12^\circ$  είναι αρκετά μικρότερη, η οποία με την εφαρμογή ελέγχου περιορίζεται και αυτή σχεδόν πλήρως. Έτσι, η μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή αντίστασης, σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, έγκειται στην μεγαλύτερη μείωση της ζώνης αποκόλλησης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μέγιστη υποχώρηση του  $C_D$  κατά 72% (λύση 1) και μέγιστη αύξηση του  $C_L$  κατά 57% (λύση 6), για τις βέλτιστες οριακές λύσεις. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι στην περίπτωση χωρίς έλεγχο η θέση έναρξης της αποκόλλησης είναι ίση με 0.40 της χορδής ενώ στην περίπτωση του ελέγχου περιορίζεται μεταξύ των τιμών 0.75 (λύση 1) και 0.85 (λύση 6).

Λύση Pareto	Ανηγμένοι Στόχοι	
	$C_D/C_{D,Base}$	$C_L/C_{L,Base}$
1	0.28	1.45
2	0.29	1.48
3	0.30	1.51
4	0.31	1.53
5	0.34	1.54
6	0.51	1.57

Πίνακας 6.5: Περίπτωση 2: Ανηγμένες τιμές των βέλτιστων συντελεστών άνωσης και αντίστασης. Η αναγωγή έγινε ως προς τις αντίστοιχες τιμές χωρίς την εφαρμογή ελέγχου ( $C_{L,Base} = 1.501$ ),  $C_{D,Base} = 0.1017$ ).



Σχήμα 6.10: Περίπτωση 2: Σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης



### 6.3 Περίπτωση 3<sup>η</sup>: 2 ΔΕ, $a_\infty = 18^\circ$

#### Όρια των μεταβλητών σχεδιασμού

Η ύπαρξη δεύτερης δέσμης ελέγχου επιβάλλει την εισαγωγή επιπλέον μεταβλητών ελέγχου στο πρόβλημα, ώστε να καθορίζονται τα χαρακτηριστικά της δεύτερης δέσμης. Τα όρια των μεταβλητών παραμένουν ίδια με αυτά της περίπτωσης 2, όπου εφαρμόστηκε μία δέσμη ελέγχου. Διαφοροποίηση παρουσιάζει ο τρόπος υπολογισμού των ορίων των παροχών. Μάλιστα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, οριοθετήθηκε η τιμή της παροχής της μίας δέσμης για λόγους που εξηγούνται στη συνέχεια. Οι δείκτες 1 και 2 εισάγονται για τη διάκριση των μεταβλητών σχεδιασμού των δύο δεσμών.

$$\begin{aligned} 0.15 &\leq x_{slot,1} &\leq 0.50 \\ -30^\circ &\leq \theta_{jet,1} &\leq 30^\circ \\ 0.01 &\leq SlotWidth_1 &\leq 0.02 \\ 0.15 &\leq x_{slot,2} &\leq 0.50 \\ -30^\circ &\leq \theta_{jet,2} &\leq 30^\circ \\ 0.01 &\leq SlotWidth_2 &\leq 0.02 \\ 0.000 &\leq Q_{jet,1} &\leq 0.009 \end{aligned}$$

Ο τρόπος υπολογισμού των ορίων των παροχών προκύπτει από την απαίτηση για διατήρηση της συνολικής παροχής των δύο οπών στα ίδια όρια με αυτά της παροχής της περίπτωσης 2. Στην περίπτωση που δεν ίσχυε η παραπάνω απαίτηση, δεν θα ήταν εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων. Μάλιστα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η συνολική παροχή και των δύο δεσμών τέθηκε ίση με 0.009, δηλαδή ίση με την τιμή της βέλτιστης παροχής των παραπάνω περιπτώσεων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύχθηκε ο καθορισμός νέας μεταβλητής σχεδιασμού ή αντίστοιχου περιορισμού, μιας και στις προηγούμενες περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι η παροχή αναρρόφησης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της ως βέλτιστη λύση. Έτσι, η παροχή αναρρόφησης της δεύτερης δέσμης ( $Q_{jet,2}$ ) αποτελεί στην περίπτωση αυτή εξαρτημένη μεταβλητή και υπολογίζεται συναρτήσει της παροχής της πρώτης ( $Q_{jet,1}$ ). Με βάση όσα αναφέρθηκαν, όταν η παροχή της πρώτης δέσμης είναι  $Q_{jet,1}$ , η παροχή της δεύτερης  $Q_{jet,2}$  προκύπτει ως:

$$Q_{jet,2} = 0.009 - Q_{jet,1} \quad (6.1)$$

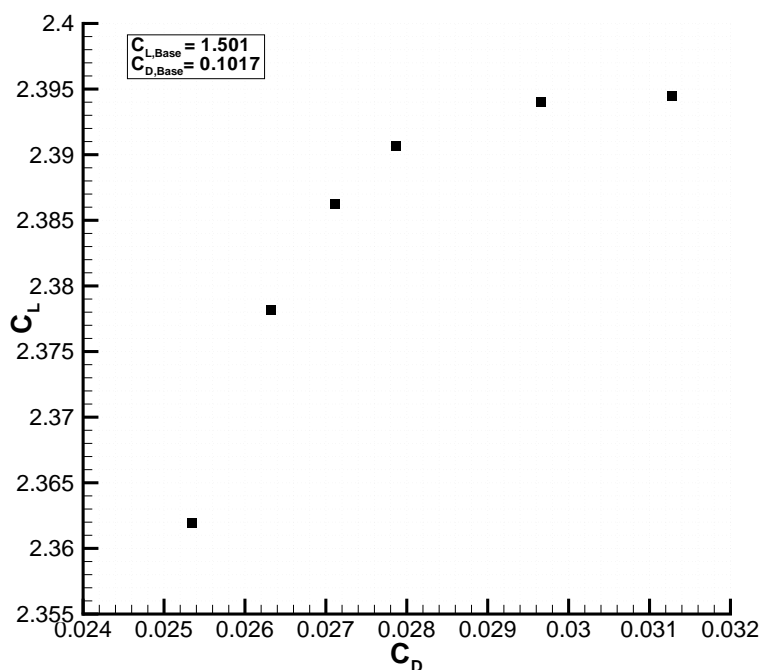
Επίσης, στο πρόβλημα προστέθηκαν κατάλληλοι περιορισμοί για τη σχετική θέση των δύο οπών της δέσμης. Οι περιορισμοί αυτοί εκφράστηκαν μέσω των παραμέτρων της θέσης της δέσμης ( $x_{slot,i}$ ) και του αντίστοιχου εύρους της κάθε οπής ( $SlotWidth_i$ ). Ο λόγος για τον οποίο υφίστανται προκύπτει από τον αλγόριθμο κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος με δύο δέσμες ελέγχου, ο οποίος παρουσιάζει δύο χαρακτηριστικά σημεία. Πρώτο σημείο αποτελεί η αδυναμία κατασκευής πλέγματος όταν τμήματα των δύο οπών συμπίπτουν. Στην περίπτωση αυτή όμως, το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα μίας δέσμης, το οποίο εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Δεύτερο σημείο απο-

τελεί η αδυναμία κατασκευής πλέγματος όταν η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δύο οπών γίνει μικρότερη μιας προκαθορισμένης τιμής. Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο δύο, η τοποθέτηση οπής στο τοίχωμα της αεροτομής επιβάλλει την πύκνωση της περιοχής γύρω από αυτή. Για το λόγο αυτό δεν είναι εφικτό, κατά την κατασκευή δύο οπών, τμήματα των περιοχών πύκνωσης να συμπίπτουν, σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευή του πλέγματος που ακολουθήθηκε. Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι ο δεύτερος περιορισμός περιλαμβάνει και τον πρώτο. Για το συγκεκριμένο πλέγμα, η απόσταση της περιοχής πύκνωσης εκατέρωθεν της τρύπας είναι 0.05 του μήκους της χορδής για την κάθε πλευρά. Ο περιορισμός που προκύπτει είναι:

$$c = \begin{cases} x_{slot,1} - x_{slot,2} - slotwidth_2 > 0.10 & \text{αν } x_{slot,1} \geq x_{slot,2} \\ x_{slot,2} - x_{slot,1} - slotwidth_1 > 0.10 & \text{αν } x_{slot,1} < x_{slot,2} \end{cases} \quad (6.2)$$

### Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης έδωσε το παρακάτω μέτωπο βέλτιστων λύσεων κατά *Pareto* (σχήμα 6.11).

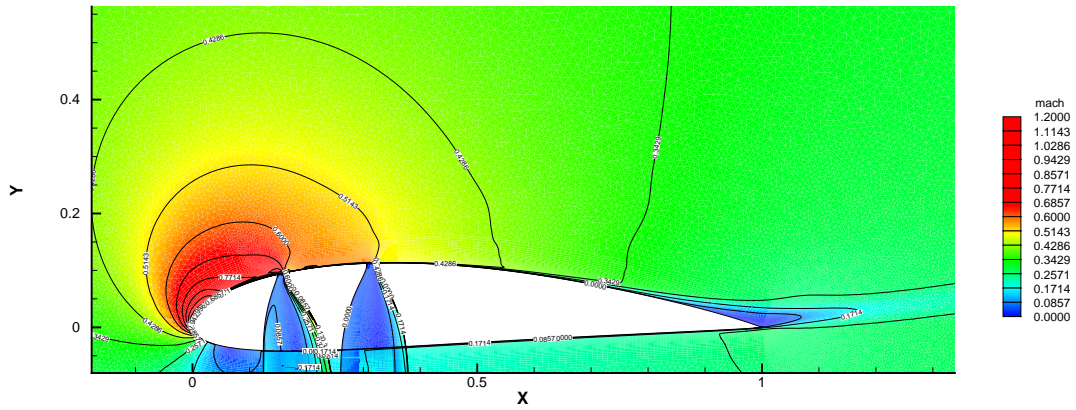


Σχήμα 6.11: Περίπτωση 3: Βέλτιστες κατά *Pareto* λύσεις.

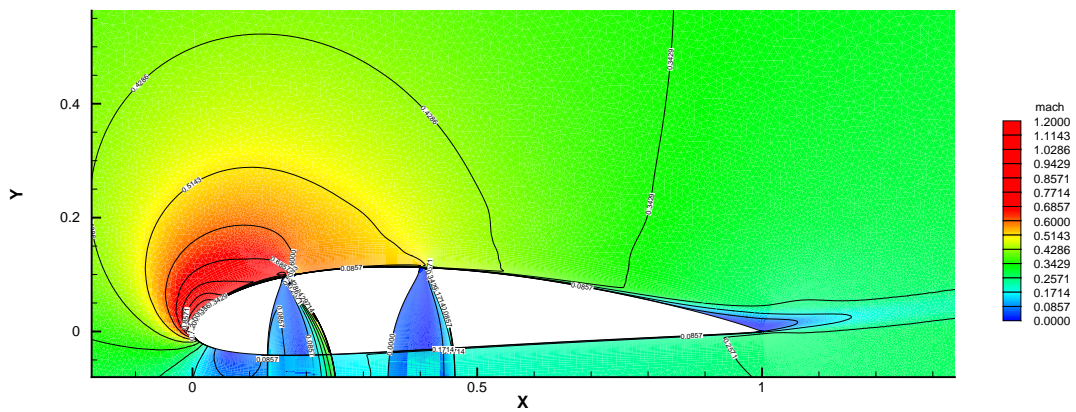
Λύση <i>Pareto</i>	Στόχοι		Μεταβλητές Σχεδιασμού							
	$C_D$	$C_L$	$x_{slot,1}$	$\theta_{jet,1}$	$SlotWidth_1$	$Q_{jet,1}$	$x_{slot,2}$	$\theta_{jet,2}$	$SlotWidth_2$	$Q_{jet,2}$
1	0.0253	2.362	0.306	6.24	0.0191	0.0029	0.150	25.76	0.0188	0.0061
2	0.0263	2.378	0.427	1.29	0.0185	0.0027	0.160	26.00	0.0106	0.0063
3	0.0271	2.386	0.355	-1.29	0.0185	0.0027	0.161	26.00	0.0191	0.0063
4	0.0279	2.391	0.398	1.29	0.0185	0.0027	0.158	22.94	0.0197	0.0063
5	0.0297	2.394	0.355	1.29	0.0185	0.0027	0.150	26.00	0.0103	0.0063
6	0.0313	2.394	0.398	1.29	0.0185	0.0027	0.160	26.00	0.0103	0.0063

Πίνακας 6.6: Περίπτωση 3: Τιμές των στόχων και των μεταβλητών σχεδιασμού που αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις κατά *Pareto*.

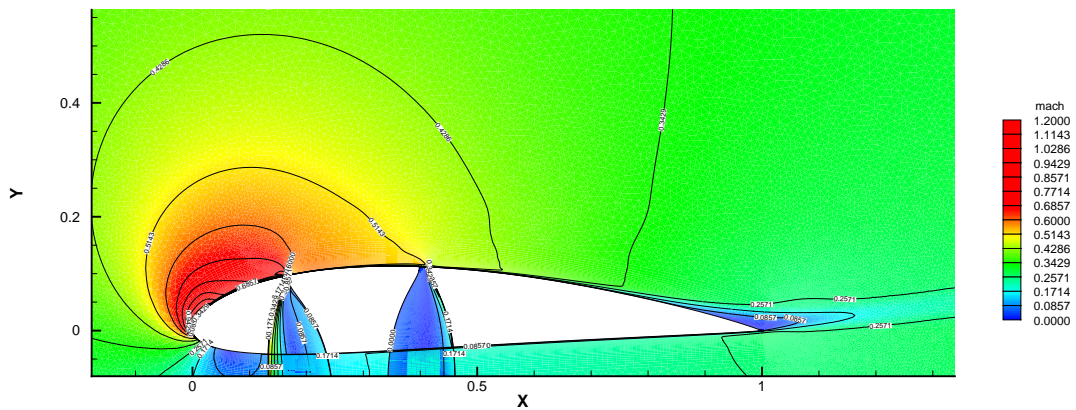
Η περίπτωση αναφοράς (περίπτωση χωρίς έλεγχο) με την οποία γίνεται σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων είναι η ίδια με αυτή της περίπτωσης 2 (σχήμα 6.7). Και στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μετώπου *Pareto* έχει η θέση της οπής της κάθε δέσμης. Οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδιασμού παραμένουν σχεδόν σταθερές με εξαίρεση το εύρος οπής της δεύτερης δέσμης (πίνακας 6.6). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μέγιστη υποχώρηση του  $C_D$  κατά 75% (λύση 1) και μέγιστη αύξηση του  $C_L$  κατά 59% (λύση 6), για τις βέλτιστες οριακές λύσεις. Η σύγκριση των μετώπων *Pareto* των περιπτώσεων 2 και 3 (σχήμα 6.14) δείχνει ότι οι βέλτιστες λύσεις της τελευταίας υπερτερούν και ως προς τους δύο στόχους σχεδόν σε όλα τα σημεία του μετώπου σε σχέση με αυτά της πρώτης περίπτωσης, καθώς το νέο μέτωπο έχει μετατοπιστεί προς τα πάνω και αριστερά. Ειδικότερα, ο συντελεστής άνωσης εμφανίζεται βελτιωμένος σε όλο το νέο μέτωπο ενώ ο συντελεστής αντίστασης υστερεί μόνο σε μια μικρή περιοχή τιμών. Με βάση όσα αναφέρθηκαν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ή χρήση δύο δεσμών ελέγχου είναι σαφώς αποτελεσματικότερη από τη χρήση μιας δέσμης ως προς την αύξηση της άνωσης - στο συγκεκριμένο πεδίο τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού - και κατά διαστήματα ως προς την μείωση της αντίστασης.



(α) Λύση 1

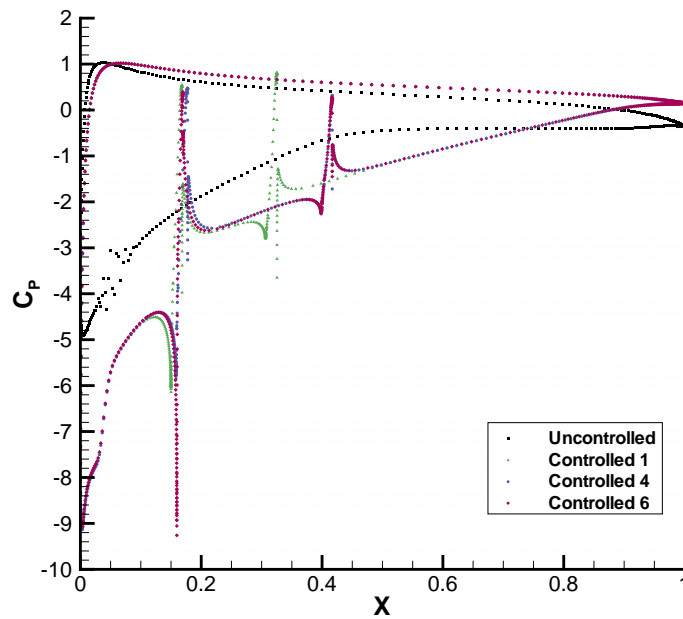


(β) Λύση 4



(γ) Λύση 6

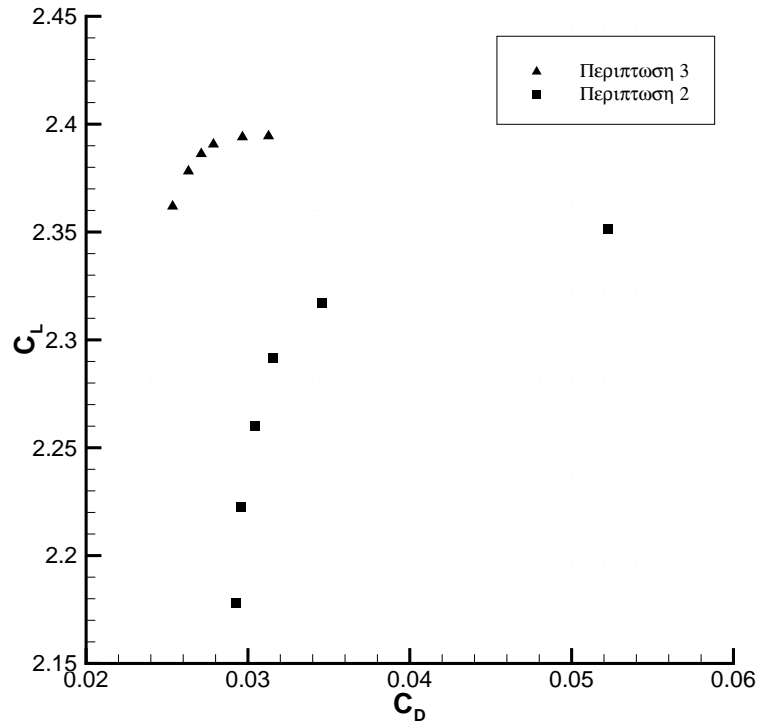
Σχήμα 6.12: Περίπτωση 3-Βέλτιστες λύσεις κατά *Pareto*: Πεδίο *Mach* και ισογραμμές *Mach* της ροής ( $M_\infty = 0.3$ ).



Σχήμα 6.13: Συντελεστής πίεσης της αεροτομής  $C_P$  για τις περιπτώσεις χωρίς έλεγχο (*Uncontrolled*) και με έλεγχο (*Controlled*) του σχήματος 6.12.

Λύση <i>Pareto</i>	Ανηγγμένοι Στόχοι	
	$C_D/C_{D,Base}$	$C_L/C_{L,Base}$
1	0.25	1.57
2	0.26	1.58
3	0.27	1.59
4	0.27	1.59
5	0.29	1.59
6	0.31	1.59

Πίνακας 6.7: Περίπτωση 3: Ανηγγμένες τιμές των βέλτιστων συντελεστών άνωσης και αντίστασης. Η αναγωγή έγινε ως προς τις αντίστοιχες τιμές χωρίς την εφαρμογή ελέγχου ( $C_{L,Base} = 1.501$ ),  $C_{D,Base} = 0.1017$ ).



Σχήμα 6.14: Περίπτωση 2 και 3: Βέλτιστες κατά *Pareto* λύσεις. Οι βέλτιστες λύσεις της περίπτωσης 3 (2  $\Delta E$ ) υπερτερούν έναντι της περίπτωσης 2 (1  $\Delta E$ ).

## Κεφάλαιο 7

# Ανακεφαλαίωση - Συζήτηση - Συμπεράσματα

Στην διπλωματική αυτή εργασία αναπτύσσεται μια αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης του ενεργητικού ελέγχου της ροής γύρω από αεροτομή με εφαρμογή της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης. Παράλληλα, εφαρμόζεται μια μέθοδος βελτιστοποίησης των παραμέτρων της παραπάνω τεχνικής σε αεροτομή με μια ή περισσότερες οπές αναρρόφησης. Βασικό τμήμα και συνεισφορά της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μιας πλήρους και αυτοματοποιημένης διαδικασίας αριθμητικής προσομοίωσης του ελέγχου ροής, με μια ή περισσότερες δέσμες αναρρόφησης ή έγχυσης ρευστού, και βελτιστοποίησης των παραμέτρων της δέσμης σε αεροτομές. Η διαδικασία εφαρμόζεται και επιδεικνύεται σε αεροτομή τύπου 'NACA 4415'. Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της δέσμης ελέγχου, κατασκευάζεται υβριδικό υπολογιστικό πλέγμα γύρω από την αεροτομή και ακολουθεί η αριθμητική επίλυση της ροής με λογισμικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε κάρτες γραφικών). Η γένεση της γεωμετρίας και του υπολογιστικού πλέγματος είναι πλήρως αυτοματοποιημένη δίνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμου βελτιστοποίησης με παραμέτρους σχεδίασης τα χαρακτηριστικά της δέσμης. Για την εύρεση των βέλτιστων χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται λογισμικό του ΕΘΣ (EASY).

Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [17] κατά την οποία είχε μελετηθεί ο έλεγχος ροής σε ένα συμμετρικό αγωγό άπειρου πλάτους που φέρει καμπύλη διαμόρφωση στα πλευρικά του τοιχώματα. Τμήμα της παλαιότερης εργασίας ήταν η δημιουργία λογισμικού για την κατασκευή του πλέγματος της κοιλότητας του επενεργητή και της πυκνώσης της περιοχής πάνω από την οπή της δέσμης ρευστού, στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν (αφού προσαρμόστηκαν κατάλληλα και εξελίχθηκαν - εμπλουτίστηκαν όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο) και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι σημαντικότερες επεκτάσεις και προσθήκες που έγιναν συνοψίζονται ως εξής:

- Δυνατότητα μελέτης μεμονωμένης αεροτομής (όχι μόνο εσωτερικής αεροδυναμικής).

- Αυτοματοποιημένη γένεση πλέγματος με περισσότερες από μία οπές.
- Κατασκευή καμπύλωσης στις ένωση κοιλότητας–επενεργητή.
- Χαμηλού κόστους βελτιστοποίηση.

Η βελτιστοποίηση του ελέγχου ροής στοχεύει σε χαμηλού κόστους διαδικασία καταφεύγοντας στη χρήση καρτών γραφικών πάνω τις οποίες επιλύονται οι εξισώσεις ροής. Τονίζεται ότι η διαδικασία που αναπτύχθηκε χαρακτηρίζεται, εκτός από χαμηλό υπολογιστικό κόστος, και από χαμηλό κόστος κτήσης του εξοπλισμού (hardware) που χρησιμοποιείται. Τέλος, δείχτηκε ότι το παραχθέν λογισμικό πραγματοποιεί του στόχους για τους οποίους δημιουργήθηκε και μπορεί άμεσα να χρησιμοποιηθεί για βιομηχανικές εφαρμογές και είναι επεκτάσιμο για να καλύψει και άλλες πιθανές περιπτώσεις. Στη συνέχεια ακολουθεί ανακεφαλαίωση και σχολιασμός των επιμέρων συνιστωσών της διπλωματικής εργασίας.

Η εργασία που έγινε συνίσταται σε δύο διαφορετικά τμήματα, τα οποία είναι:

1. Η ανάπτυξη αυτοματοποιημένης διαδικασίας γένεσης υπολογιστικού πλέγματος γύρω από την αεροτομή για την προσομοίωση του ελέγχου ροής με μία ή περισσότερες δέσμες ελέγχου.
2. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των δεσμών ελέγχου σε συγκεκριμένες συνθήκες ροής.

## Προσομοίωση ελέγχου ροής

Η αεροδυναμική απόδοση των αεροτομών συχνά μειώνεται λόγω της αποκόλλησης της ροής, η οποία αυξάνει την αντίσταση και παράλληλα μειώνει την άνωση, ιδίως σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Σκοπός λοιπόν της εργασίας είναι η βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών (αύξηση συντελεστή άνωσης  $C_L$  - μείωση συντελεστή αντίστασης  $C_D$ ) με τον περιορισμό της ζώνης αποκόλλησης, ως αποτέλεσμα του ελέγχου ροής. Οι παράμετροι ευαισθησίας του προβλήματος είναι τα χαρακτηριστικά της δέσμης ελέγχου:

1. Η θέση της οπής της δέσμης
2. Το εύρος της οπής
3. Η γωνία της δέσμης
4. Η παροχή αναρρόφησης της δέσμης

Πρώτο βήμα για την προσομοίωση του ελέγχου αποτέλεσε η δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος γύρω από την αεροτομή (Κεφάλαιο 2). Η προσομοίωση της δέσμης ελέγχου έγινε με την κατασκευή κοιλότητας, η οποία προσαρμόζεται στην προκαθορισμένη θέση της οπής στην πλευρά υποπίεσης, και την πύκνωση της περιοχής γύρω από



την οπή. Στη βάση της κοιλότητας ορίζεται η συμπεριφορά της δέσμης ανάλογα με το είδος του ενεργητικού ελέγχου που εφαρμόζεται (εδώ ορίζεται σταθερή τιμή για το γινόμενο της πυκνότητας με την κάθετη στο όριο συνιστώσα της ταχύτητας εκεί, δηλαδή έμμεσα η παροχή αναρρόφησης). Ο τελικός αλγόριθμος γένεσης του πλέγματος είναι αποτέλεσμα τροποποίησης του ήδη ολοκληρωμένου από το ΕΘΣ γενέτη πλέγματος γύρω από αεροτομή χωρίς την παρουσία ελέγχου. Οι τροποποιήσεις περιλαμβάνουν την κατάλληλη προσαρμογή και εξέλιξη-εμπλουτισμό των ήδη ολοκληρωμένων προγραμμάτων κατασκευής της κοιλότητας και πύκνωσης της περιοχής γύρω από την οπή αλλά και την ανάπτυξη-προσαρμογή εξαρχής νέων προγραμμάτων (λ.χ. αλγόριθμος αποκοπής, κατασκευή καμπύλωσης στην ένωση κοιλότητας-επενεργητή, κατασκευή περισσότερων της μίας δέσμες) όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο.

Επί των πλεγμάτων αυτών επιλύθηκαν σε κάρτες γραφικών οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής (Reynolds Averaged Navier Stokes με ένα μοντέλο τύρβης μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης, αυτό των *Spalart – Allmaras*) με λογισμικό του ΕΘΣ ενώ έγινε μια πρώτη προσπάθεια για προσέγγιση του φυσικού φαινομένου που διέπει τον έλεγχο (κεφάλαια 3,4) αλλά και μελέτη της επίδρασης των μεταβλητών σχεδιασμού στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής.

## Βελτιστοποίηση

Για την εύρεση των βέλτιστων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών έγινε χρήση λογισμικού βελτιστοποίησης με εξελικτικούς αλγόριθμους (EASY). Η χρήση των εξελικτικών αλγορίθμων, ως μέθοδο βελτιστοποίησης, απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων για σύγκλιση στη βέλτιστη λύση και συνεπώς μεγάλου χρόνου αναμονής για λήψη των αντίστοιχων αποτελεσμάτων καθώς η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης προϋποθέτει τη χρονοβόρο επίλυση των εξισώσεων *Navier – Stokes*. Το γεγονός αυτό αντισταθμίστηκε με τη χρήση συγκεκριμένων τεχνικών που υποστηρίζει το λογισμικό βελτιστοποίησης. Αυτές είναι:

- Προσεγγιστικές προ-αξιολογήσεις με μεταπρότυπα αξιολόγησης
- Παράλληλη αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων

Περαιτέρω μείωση του χρόνου αναμονής επιτεύχθη με την επίλυση των εξισώσεων ροής σε κάρτες γραφικών. Συγκεκριμένα, η χρήση καρτών γραφικών επιταχύνει την επίλυση περίπου 40 φορές (με βάση αναφοράς την επίλυση των ίδιων εξισώσεων σε επεξεργαστή μονού πυρήνα) μειώνοντας καθοριστικά τον υπολογιστικό χρόνο της κάθε αξιολόγησης. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας μεθόδου βελτιστοποίησης χαμηλού κόστους (Low Budget Optimization) του προβλήματος ελέγχου ροής γύρω από αεροτομή, με αποδεκτό χρόνο αναμονής του μηχανικού.

Η βελτιστοποίηση εφαρμόστηκε σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Οι συνθήκες ροής στις οποίες εφαρμόζεται ο έλεγχος αναφέρονται σε αδιάστατη τιμή *Reynolds* του πεδίου ροής ίση με 500.000, αριθμό *Mach* της επί άπειρον ροής ίσο με 0.3. Τα

αποτελέσματα που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για μελλοντικές εφαρμογές. Ακολουθεί μία σύνοψη των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν καθώς και μερικές προτάσεις τη μελλοντική χρήση αυτών.

Η πρώτη προσομοίωση και βελτιστοποίηση του ελέγχου ροής έγινε με την εφαρμογή μίας δέσμης ελέγχου για γωνία της επ' άπειρον ροής ίση με  $12^\circ$ . Για τις συγκεκριμένες συνθήκες ροής, η πρόλεξη του πεδίου ροής, χωρίς εφαρμογή ελέγχου, δείχνει ότι η ροή γύρω από την αεροτομή είναι αποκολλημένη (ολική αποκόλληση στο 75% του μήκους της χορδής). Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του ελέγχου ροής δείχνουν σχεδόν πλήρη αναίρεση της αποκόλλησης. Για τη μικρότερη τιμή του διαστήματος των δυνατών θέσεων της οπής της δέσμης ( $x_{slot} = 60\%$  της χορδής), προκύπτει μικρότερος συντελεστής αντίστασης κατά 34% (σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο), ενώ για τη μεγαλύτερη τιμή ( $x_{slot} = 80\%$  της χορδής) προκύπτει μεγαλύτερος συντελεστής άνωσης κατά 31%. Οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδιασμού παραμένουν σταθερές και συνεπώς η μετάβαση στο μέτωπο των βέλτιστων λύσεων κατά *Pareto*, από την τιμή του ελάχιστου  $C_D$  στην τιμή του μέγιστου  $C_L$ , γίνεται με αύξηση της θέσης της οπής στο αντίστοιχο διάστημα τιμών της.

Η δεύτερη και τρίτη περίπτωση αναφέρονται σε γωνία της επ' άπειρον ροής ίση με  $18^\circ$  με μία και δύο δέσμες ελέγχου αντίστοιχα. Στη δεύτερη, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μίας δέσμης συμπίπτουν ποιοτικά με τα αποτελέσματα της πρώτης. Για τη μικρότερη τιμή του διαστήματος των δυνατών θέσεων της οπής της δέσμης ( $x_{slot} = 15\%$  της χορδής), προκύπτει μικρότερος συντελεστής αντίστασης κατά 72% ενώ για τη μεγαλύτερη τιμή ( $x_{slot} = 50\%$  της χορδής) προκύπτει μεγαλύτερος συντελεστής άνωσης κατά 57%. Οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδιασμού παραμένουν σταθερές για τις διάφορες λύσεις κατά *Pareto*. Η μεγαλύτερη βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών οφείλεται στη μεγαλύτερη μείωση της αποκόλλησης σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Η αρχή της αποκόλλησης εντοπίζονταν στο 40% της χορδής (χωρίς έλεγχο) ενώ η εφαρμογή ελέγχου επέφερε μέγιστη αύξηση της στο 85%. Η προσομοίωση δυο δεσμών ελέγχου (τρίτη περίπτωση) έδειξε ότι η χρήση δύο δεσμών ελέγχου είναι σαφώς αποτελεσματικότερη από τη χρήση μιας δέσμης ως προς την αύξηση της άνωσης - στο συγκεκριμένο πεδίο τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού που εξετάστηκε - και κατά διαστήματα ως προς την μείωση της αντίστασης. Τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα μιας και επιλέχθηκαν κοινά όρια των μεταβλητών σχεδιασμού που καθορίζουν την γεωμετρία της κάθε δέσμης. Επιπλέον, η συνολική παροχή στις δύο δέσμες της τελευταίας περίπτωσης διατηρήθηκε ίση με αυτή της δεύτερης περίπτωσης στη μία δέσμη, ώστε να υπάρχει η ίδια κατανάλωση ισχύος από τις διατάξεις αναρρόφησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν μέγιστη αύξηση του συντελεστή άνωσης κατά 59% και μέγιστη μείωση του συντελεστή άνωσης κατά 75%.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό και παράλληλα την παρουσίαση της εργασίας που έγινε, να υπενθυμίσουμε ότι εφαρμόστηκε έλεγχος της ροής με τη μέθοδο της συνεχούς αναρρόφησης (steady suction). Ολόκληρη η διαδικασία που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε μπορεί να εφαρμοστεί για την συνεχή έγχυση (steady blowing) αλλά και την περιοδική αναρρόφηση-έγχυση ρευστού (σύνθετη δέσμη -synthetic jet) στην

επιφάνεια αεροτομών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η συμπεριφορά της δέσμης ορίζεται στους κόμβους της βάσης της κοιλότητας ανάλογα με το είδος του ενεργητικού ελέγχου που επιθυμείται μέσω κατάλληλων τιμών των ταχυτήτων. Έτσι, με περιοδική μεταβολή της οριακής ταχύτητας προσομοιώνεται στο χρόνο και η εφαρμογή της σύνθετης δέσμης. Εναλλακτικός τρόπος προσομοίωσης της σύνθετης δέσμης αποτελεί η περιοδική μετατόπιση της βάσης της κοιλότητας, με αναδημιουργία του πλέγματος ανά χρονικό βήμα. Προφανώς, στην περίπτωση αυτή η βάση της κοιλότητας θα αποτελεί στερεό τοίχωμα και όχι είσοδος/έξοδος. Επιπλέον, με επέμβαση στον κώδικα γένεσης πλέγματος υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του ελέγχου ροής σε περυγώσεις στροβιλομηχανών. Επέμβαση δηλαδή στη γεωμετρία του περιγράμματος του πλέγματος (στο επ' άπειρο όριο) για τον καθορισμό περιοχής εισόδου, εξόδου και περιοδικότητας της ροής.



# Βιβλιογραφία

- [1] J.J. Thibert, J. Reneaux, F. Moens, J. Priest. ONERA activities on highlift devices for transport aircraft. *Aeronautical Journal*, 99:395–411, 1995.
- [2] A. Jirasek. A vortex generator model and its application to flow control. *AIAA Paper*, 4965, 2004.
- [3] L.S. Huang, L. Maestrello, T.D. Bryant,. Separation Control over an airfoil at high angles of attack by sound emanating from the surface. NASA Langley Research Center, Virginia, 1987.
- [4] R. Sosa, G. Artana, E. Moreau. Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators. *Springer*, 2006.
- [5] L. Prandtl. Proceedings of the third international mathematics congress. Heidelberg, 1904. 184-91.
- [6] M.B. Glauert. The Design of Suction Aerofoils with a Very Large CL-Range. Aeronautical Research Council, 1945.
- [7] G. Lachman. Boundary layer and flow control. Oxford: Pergamon Press, 1961.
- [8] M. Gad-el-Hak. Flow control fundamentals and practices. Berlin: Springer, 1998.
- [9] L. Huang, P.G. Huang, R.P. LeBeau. Numerical Study of Blowing and Suction Control Mechanism on NACA0012 Airfoil. *Journal of Aircraft*, 41, 2004.
- [10] L. Huang, P.G. Huang, R.P. LeBeau, Th. Hauser. Optimization of Blowing and Suction Control On NACA0012 Airfoil Using Genetic Algorithm. *AIAA Paper 0225*, 2004.
- [11] R.E. Dannenberg, J.A. Weiberg. Section characteristics of a 10.5-percent thick airfoil with area suction as affected by chordwise distributions of permeability. NASA technical note 2847, 1952.
- [12] R. Duvigneau, M. Visonneau. Optimization of a synthetic jet actuator for aerodynamic stall control. *Computers and Fluids* 35 624-638, 2006.

- [13] F. Menter. Zonal two-equations k-w turbulence models for aerodynamic flows. AIAA paper 93-2906, 1993.
- [14] J. Gilarranz, L. Traub, O. Rediniotis. Characterization of a compact, high power synthetic jet actuator for flow separation control. AIAA Paper 2002-0127, 2002.
- [15] D. You, P.Moin. Active control of flow separation over an airfoil using synthetic jets. *Journal of Fluids and Structures*, 24:1349–1357, 2008.
- [16] Shutian Deng, Li Jiang, Chaoqun Liu. DNS for flow separation control around an airfoil by pulsed jets. doi:10.1016/j.compfluid.2007.10.010, 2007.
- [17] Ξ. Τρομπούκης. Υπολογιστική ανάλυση και παραμετρική διερεύνηση της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης για τον έλεγχο οριακών στρωμάτων. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2007.
- [18] Α.Σ. Ζυμάρης. Συζυγείς μέθοδοι για το σχεδιασμό μορφών με βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά σε στρωτές και τυρβώδεις ροές. Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2010.
- [19] P.Spalart, S. Allmaras. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *La Recherche Aerospatiale* , 1:5–21, 1994.
- [20] NVIDIA. NVIDIA CUDA homepage, 2008.
- [21] NVIDIA. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture Programming Guide, 2008.
- [22] I.C. Kambolis, X.S. Trompoukis, V.G. Asouti and K.C. Giannakoglou. CFD-based analysis and two-level aerodynamic optimization on graphics processing units. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* , 199(9-12):712–722, 2010.
- [23] V. G. Asouti, X. S. Trompoukis, I. C. Kambolis, 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*, 199:5–21, 2010.
- [24] C. Darwin. *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favored races in the struggle for life*. John Murray, London, UK, 1859.
- [25] Κ.Χ. Γιαννάκογλου. *Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική*. Ε.Μ.Π., 4η Έκδοση, 2006.
- [26] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison–Wesley, 1989.

- [27] Z. Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlang, 1996.
- [28] K. C. Giannakoglou. Design of optimal aerodynamic shapes using stochastic optimization methods and computational intelligence. *Progress in Aerospace Sciences*, 38:43–76, 2002.
- [29] K. C. Giannakoglou. Acceleration of Genetic Algorithms Using Artificial Neural Networks-Theoretical Background. *Von Karman Institute Lectures Series on “Genetic Algorithms for Optimization in Aeronautics and Turbomachinery”*, May 15-19 2000.
- [30] S. Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice-Hall, second edition, 1992.
- [31] Evolutionary Algorithm SYstem, NTUA, <http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/research/easy>.
- [32] Α. Γιώτης. Χρήση εξελικτικών τεχνικών, υπολογιστικής ευφυΐας και μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής στη βελτιστοποίηση-αντίστροφη σχεδίαση πτερυγώσεων στροβιλομηχανών μέσω παράλληλης επεξεργασίας. Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2003.
- [33] Ι. Καμπόλης. Πολυεπίπεδοι, πολυεπεξεργαστικοί αλγόριθμοι αεροδυναμικής βελτιστοποίησης στις στροβιλομηχανές. Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2009.
- [34] Μ. Καρακάσης. Ιεραρχικοί, κατανεμημένοι εξελικτικοί αλγόριθμοι και υπολογιστική ευφυΐα στη σχεδίαση βέλτιστων αεροδυναμικών μορφών, σε περιβάλλον πολυεπεξεργασίας. Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, 2006.
- [35] K.C. Giannakoglou, A.P. Giotis, M.K. Karakasis. Low-cost genetic optimization based on inexact pre-evaluations and the sensitivity analysis of design parameters. *Inverse Problems in Engineering*, 9:389–412, 2001.
- [36] Karakasis, M.K. and Giannakoglou, K.C. On the use of metamodel-assisted, multi-objective evolutionary algorithms. *Engineering Optimization*, 38(8):941–957, 2006.