



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία:

**Υπολογιστική ανάλυση και παραμετρική διερεύνηση της τεχνικής
συνεχούς αναρρόφησης για τον έλεγχο οριακών στρωμάτων**

Ξενοφών Σ. Τρομπούκης

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου

Οκτώβριος 2007

Αντικείμενο

Η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώθηκε, ακολουθώντας πρακτικές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*CFD*), στην τεχνική της συνεχούς αναρρόφησης για τον έλεγχο της αποκόλλησης των οριακών στρωμάτων. Ξεκινά από μια γενική διερεύνηση των υφιστάμενων μεθόδων ελέγχου της ροής (παθητικού και ενεργητικού) για να καταλήξει στην τεχνική της συνεχούς αναρρόφησης. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία για τη δημιουργία οπών αναρρόφησης σε καμπύλα τοίχωμα. Η διαδικασία αυτή επιδεικνύεται σε ένα συμμετρικό αγωγό που φέρει καμπύλη διαμόρφωση στο ένα του τοίχωμα και που ουσιαστικά αντιστοιχεί στο στερεό τοίχωμα μιας αεροτομής (μεμονωμένης ή πτερύγωσης στροβιλομηχανής). Εκεί τοποθετείται και η οπή αναρρόφησης. Στο εσωτερικό αυτού, συμπεριλαμβανομένου της περιοχής γύρω από την οπή αλλά και της κοιλότητας που ακολουθεί την οπή, κατασκευάζεται μη-δομημένο υπολογιστικό πλέγμα και ακολουθεί η αριθμητική επίλυση της ροής με λογισμικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ (επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes). Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή και παραμετρική μελέτη της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης, δηλαδή μιας ενεργητικού μεθόδου ελέγχου του οριακού στρώματος.

Μέθοδοι ελέγχου της ροής

Οι μέθοδοι ελέγχου της ροής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις παθητικού και ενεργητικού τύπου. Οι παθητικές μέθοδοι ελέγχου της ροής επεμβαίνουν στη γεωμετρία του αεροδυναμικού σώματος, εισάγοντας λ.χ. εμπόδια που γεννούν στροβιλότητα, με σκοπό την έξυπνη αλλαγή των χαρακτηριστικών της ροής που συνεπάγεται λ.χ. αύξηση του συντελεστή άνωσης, ή μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας σε ανωστικά σώματα κλπ. Τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται ήδη στην κατασκευή πτερυγών αεροσκαφών όπου στο πίσω μέρος αυτών τοποθετείται μια σειρά από γεννήτριες δινών. Αποτέλεσμα

της ύπαρξης των γεννητριών δινών είναι η μετάθεση του σημείου αποκόλλησης της ροής στα κατάντι άρα και η αύξηση του συντελεστή άνωσης και η μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας, όπως επίσης και η μετάθεση του σημείου απώλειας στήριξης. Αντίθετα, κοινός παρονομαστής των μεθόδων ενεργητικού ελέγχου είναι η ανάγκη διάνοιξης οπής στην επιφάνεια του αεροδυναμικού σώματος από όπου και θα αναρροφάται ή θα εγχύεται ρευστό, οδηγώντας στις τεχνικές συνεχούς αναρρόφησης (steady suction) και συνεχούς έγχυσης (steady blowing). Μια τρίτη μέθοδος ενεργητικού ελέγχου είναι ο συνδυασμός των δύο τελευταίων τεχνικών, με τον χαρακτηρισμό της ροής να μεταβάλλεται περιοδικά από αναρροφώμενη σε εγχυώμενη και αντίστροφα, στην περιοχή της οπής, συντελώντας στη δημιουργία μιας σύνθετης δέσμης. Η δημιουργία μιας σύνθετης δέσμης επιτυγχάνεται τοποθετώντας μια κοιλότητα ακολούθως της οπής, της οποίας το κάτω μέρος καταλαμβάνει μια μεμβράνη. Η ταλάντωση λοιπόν της εν λόγω μεμβράνης δίνει την περιοδική συμπεριφορά της ροής στην περιοχή της οπής.

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μείωση της ζώνης αποκόλλησης σε ένα αεροδυναμικό σώμα κάνοντας χρήση της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μια αυτοματοποιημένη μέθοδος δόμησης του περιγράμματος του χωρίου ροής και του απαραίτητου υπολογιστικού πλέγματος στο εσωτερικό αυτού, αλλά και της κοιλότητας που ακολουθεί την οπή, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη της οπής (πύκνωση του πλέγματος στην κοντινή περιοχή). Στο πλέγμα που παρασκευάζεται επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes με χρήση λογισμικού του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ. Η παραπάνω διαδικασία επέτρεψε την παραμετρική μελέτη της επίδρασης της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης και αποτελεί το πρώτο βήμα για την βελτιστοποίηση των εμπλεκόμενων παραμέτρων.

Παρουσίαση του χωρίου ροής και διακριτοποίηση αυτού

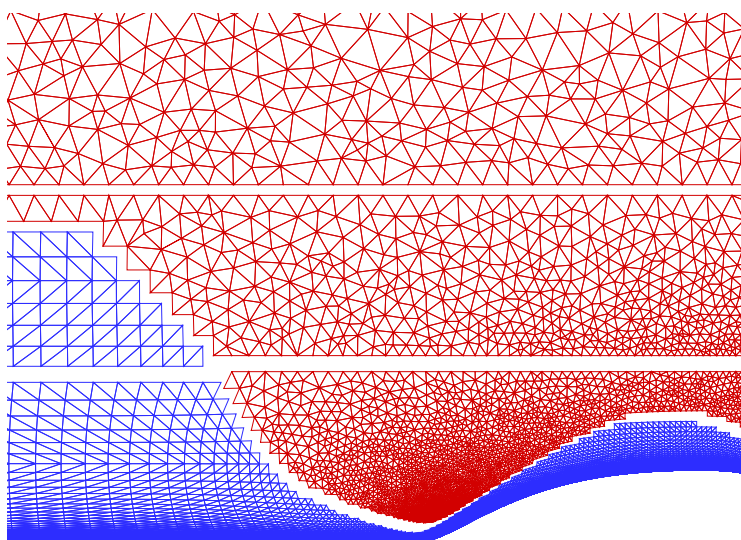
Το χωρίο ροής είναι συμμετρικός αγωγός που φέρει την ίδια καμπύλη διαμόρφωση στο κάτω και πάνω τοίχωμά του. Το πλάτος του αγωγού θεωρείται πρακτικά άπειρο, ώστε η ροή να μπορεί να θεωρηθεί διδιάστατη. Το πλέγμα που δημιουργεί η μέθοδος που προγραμματίστηκε αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία και κατασκευάζεται διασπώντας το χωρίο ροής σε υποχωρία και κατασκευάζοντας υπολογιστικά πλέγματα σε κάθε ένα από αυτά. Το Σχήμα 1 δείχνει την ένωση των πλεγμάτων των υποχωρίων. Στην εικόνα φαίνεται η περιοχή πάνω από την έναρξη της διαμόρφωσης. Η εγκατάσταση του ελέγχου σημαίνει τη διάνοιξη οπής στην επιφάνεια της διαμόρφωσης και την τοποθέτηση της κοιλότητας της δέσμης ακολούθως αυτής. Η παρουσία της οπής όμως σηματοδοτεί την ανάπτυξη υψηλών κλίσεων των χαρακτηριστικών της ροής στην περιοχή της οπής. Για τον λόγο αυτό, η εν λόγω περιοχή δομείται από ένα καινούργιο πιο πυκνό πλέγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Αντίθετα στο Σχήμα 3 εικονίζεται το τελικό πλέγμα, με το πλέγμα στην 'περιοχή πύκνωσης', στην κοιλότητα της δέσμης και στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο να χρωματίζεται διαφορετικά. Να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι στην κάτω πλευρά της κοιλότητας της δέσμης τοποθετούνται κατάλλη-

λες οριακές συνθήκες ανάλογα με την τεχνική ενεργητικού ελέγχου που θέλουμε να εφαρμόσουμε.

Η ευελιξία του κώδικα δόμησης του πλέγματος έγκειται στην δυνατότητα επιλογής από τον χρήστη:

1. της γεωμετρίας της διαμόρφωσης (λ.χ. του σχήματος μιας αεροτομής),
2. της γεωμετρίας του αγωγού (λ.χ. του βήματος μιας περύγωσης, αν πρόκειται για περύγωση),
3. της θέσης της οπής,
4. του προσανατολισμού της αναρροφώμενης δέσμης,
5. του πλάτους της οπής.

Αν και εδώ εφαρμόστηκε μόνο η μέθοδος της συνεχούς αναρρόφησης εντούτοις τα παραπάνω προσαρμόζονται άμεσα στη συνεχή έκχυση ή σε σύνθετες δέσμες.

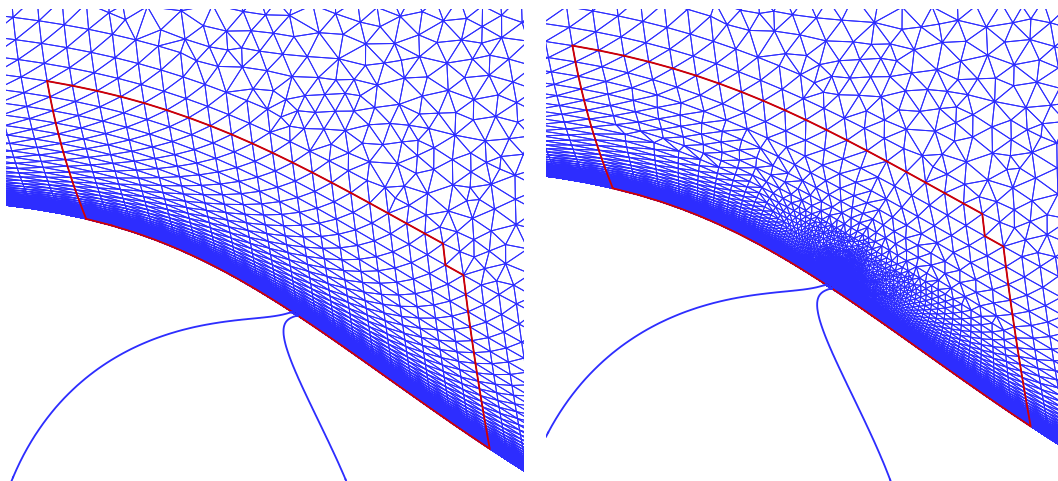


Σχήμα 1: Υπολογιστικό πλέγμα αγωγού στην περιοχή πάνω από την έναρξη της διαμόρφωσης. Φαίνονται τα υποχωρία που βοηθούν στη δημιουργία πλέγματος καλής ποιότητας και το είδος πλέγματος ανά υποχωρίο.

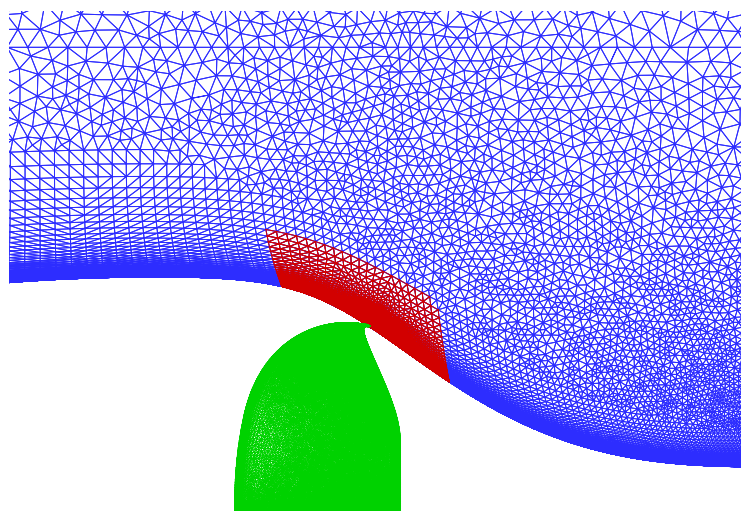
Παραμετρική μελέτη της επίδρασης της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης

Διατηρώντας σταθερή τη γεωμετρία του αγωγού (και κατά επέκταση και τη γεωμετρία της διαμόρφωσης) πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της επίδρασης της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης. Παράμετροι ελέγχου αποτέλεσαν οι τρεις τελευταίες της παραπάνω αρίθμησης και επιπρόσθετα η παροχή αναρρόφησης. Συνοψίζοντας, παράμετροι ελέγχου ήταν οι:

1. Η θέση της οπής.
2. Ο προσανατολισμός της δέσμης.
3. Το πλάτος της οπής.
4. Η παροχή αναρρόφησης.



Σχήμα 2: Πύκνωση υπολογιστικού πλέγματος στην περιοχή της οπής. Απεικονίζονται τα υπολογιστικά πλέγματα πριν και μετά την απαραίτητη πύκνωση.



Σχήμα 3: Τοπική μεγέθυνση του υπολογιστικού πλέγματος.

Ενώ η επίδραση του ελέγχου επί της ζώνης αποκόλλησης αξιολογήθηκε από:

1. Το μήκος της ζώνης αποκόλλησης (έκταση όπου ο συντελεστής τριβής είναι αρνητικός).
2. Την ελάχιστη αρνητική τιμή του συντελεστή τριβής.

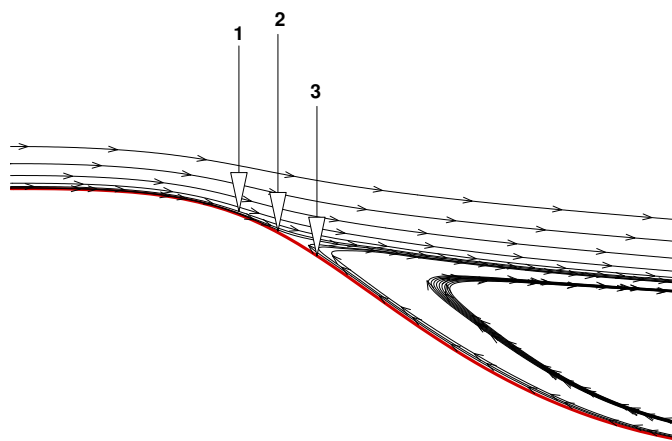
Πορεία 'βελτιστοποίησης '

Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση της θέσης της οπής και της παροχής αναρρόφησης. Έπειτα, για τις καλύτερες τιμές των προηγούμενων παραμέτρων που προέκυψαν δοκιμάστηκαν διαφορετικοί προσανατολισμοί της κοιλότητας της δέσμης. Τέλος μελετήθηκε η επίδραση του ανοίγματος της οπής με τις υπόλοιπες τρεις παραμέτρους να παίρνουν

τις καλύτερες τιμές που τους έδωσε η μέχρι εκείνο το σημείο 'βελτιστοποίηση'. Ο λόγος που ο όρος βελτιστοποίηση συνοδεύεται από εισαγωγικά είναι επειδή στην ουσία δεν βρέθηκαν οι βέλτιστες τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων αλλά τελέστηκε μια, ως την πούμε, 'βελτιστοποίηση με το χέρι', η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της οποίας βρίσκεται στο τέλος του κειμένου.

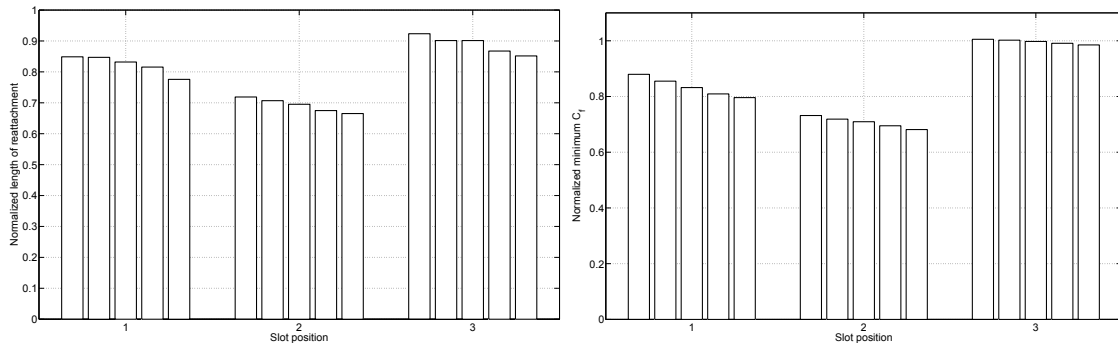
• Επίδραση θέσης οπής και παροχής αναρρόφησης

Επιλέχθηκαν στην αρχή τρεις θέσεις για την οπή στην περιοχή έναρξης της ζώνης αποκόλλησης, όπως εκείνη αναπτύσσεται στην χωρίς έλεγχο εφαρμογή. Για το σκοπό αυτό αρχικά επιλύθηκαν υπολογιστικά οι εξισώσεις της ροής (Navier-Stokes) χωρίς αναρρόφηση. Οι θέσεις τοποθέτησης του ελέγχου φαίνονται στο Σχήμα 4, με την πρώτη θέση να βρίσκεται καθαρά ανάντι της ζώνης αποκόλλησης, την τρίτη καθαρά εσωτερικά αυτής, ενώ η ενδιάμεση φαίνεται να είναι στην έναρξη της εν λόγω ζώνης. Τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς φαίνονται στο Σχήμα 5. Στο αριστερό σχήμα εικονίζεται το μήκος αποκόλλησης κάθε περίπτωσης, ανηγμένο στο μήκος αποκόλλησης που δημιουργείται όταν δεν υπάρχει έλεγχος, και στο δεξιό η ελάχιστη αρνητική τιμή του συντελεστή τριβής ανηγμένη στην αντίστοιχη τιμή της χωρίς έλεγχο εφαρμογής. Σε κάθε θέση δοκιμάστηκαν πέντε παροχές αναρρόφησης, με την εν λόγω τιμή να αυξάνει όπως κινούμαστε προς τα δεξιά του Σχήματος 5, αντίστοιχα για κάθε θέση οπής. Φαίνεται να υπάρχει μονοτονία ανάμεσα στην παροχή αναρρόφησης και την υποχώρηση της ζώνης αποκόλλησης (αύξηση της παροχής αναρρόφησης σηματοδοτεί μεγαλύτερη 'πτώση' της ζώνης αποκόλλησης), ενώ καλύτερα αποτελέσματα προκαλεί η θέση 2.

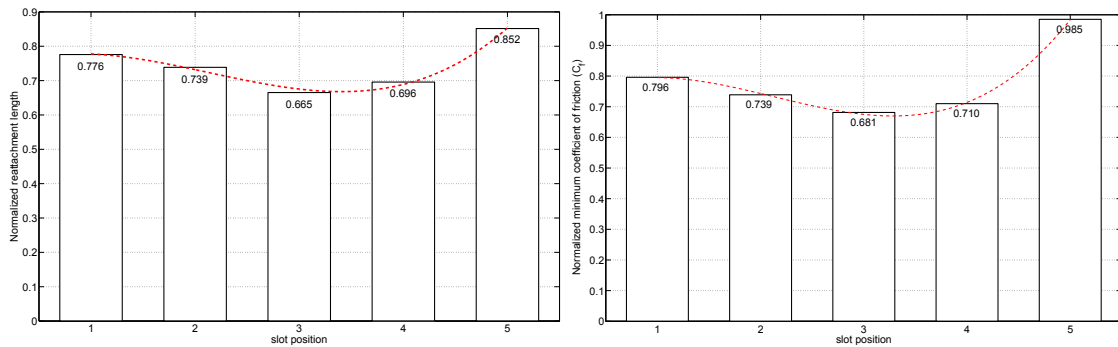


Σχήμα 4: Δοκιμαστικές θέσεις οπής. Φαίνονται και οι γραμμές ροής στην περιοχή της ζώνης αποκόλλησης για την χωρίς έλεγχο εφαρμογή.

Στη συνέχεια δοκιμάστηκαν δύο νέες θέσεις εκατέρωθεν της ενδιάμεσης, ενώ η παροχή αναρρόφησης πήρε τη μέγιστη συγκριτικά τιμή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6. Καλύτερη θέση φαίνεται να είναι η μεσαία (η 2 του Σχήματος 4) επιτυγχάνοντας μείωση του μήκους της ζώνης αποκόλλησης κατά 33.5% και της ελάχιστης αρνητικής τιμής του συντελεστή τριβής κατά 31.9%.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα δοκιμών με τις θέσεις της οπής να εικονίζονται στο Σχήμα 4. Για κάθε θέση δοκιμάστηκαν πέντε παροχές αναρρόφησης με τις τιμές των οποίων να αυξάνουν καθώς κινούμαστε δεξιά του Σχήματος αντίστοιχα για κάθε θέση.



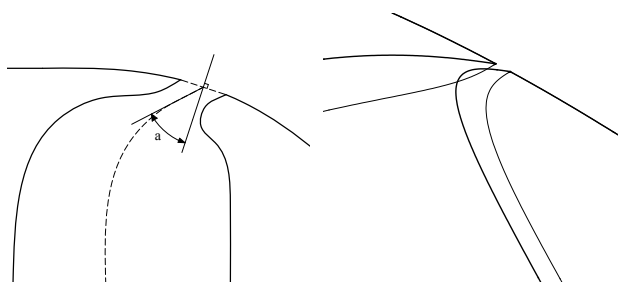
Σχήμα 6: Επίδραση της θέσης της οπής στην υποχώρηση της ζώνης αποκόλλησης. Οι δοκιμαζόμενες θέσεις είναι εκείνες του Σχήματος 4 εμπλουτισμένες με δύο νέες εκατέρωθεν της ενδιάμεσης. Η παροχή αναρρόφησης έχει τη μέγιστη συγκριτικά τιμή.

- **Επίδραση προσανατολισμού κοιλότητας δέσμης**

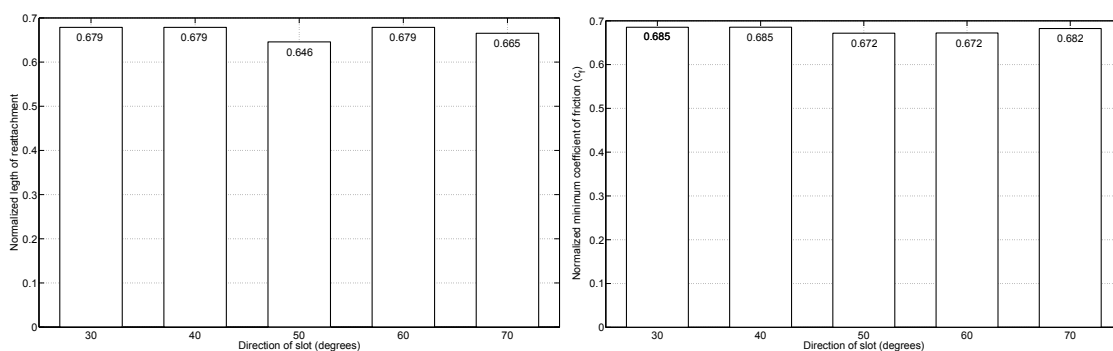
Στη συνέχεια διατηρώντας σταθερή τη θέση (2 Σχήματος 4) και την παροχή αναρρόφησης (μέγιστη συγκριτικά) μεταβλήθηκε η γωνία πρόσδεσης της κοιλότητας της δέσμης στο υπόλοιπο χωρίο. Ως γωνία πρόσδεσης της κοιλότητας στον αγωγό, ορίσθηκε η γωνία που σχηματίζει η κατεύθυνση της κοιλότητας με την κάθετη στο τοίχωμα του αγωγού στο σημείο πρόσδεσης (Σχήμα 7), και ήταν ίση με 70° . Στο Σχήμα 8 φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για γωνίες πρόσδεσης 30° , 40° , 50° , 60° , 70° αντίστοιχα (η τελευταία μπάρα προφανώς αντιστοιχεί στην καλύτερη λύση του προηγούμενου βήματος). Φαίνεται ότι καλύτερα αποτελέσματα έχει η γωνία των 50° επιτυγχάνοντας μείωση του μήκους της ζώνης αποκόλλησης κατά 35.5% και της ελάχιστης αρνητικής τιμής του συντελεστή τριβής κατά 32.8%.

- **Επίδραση ανοίγματος οπής**

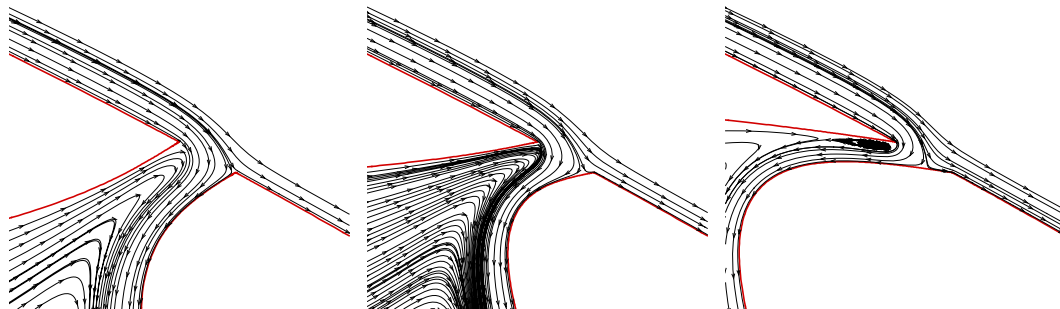
Στο τελευταίο βήμα της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, μελετήθηκε η επίδραση του ανοίγματος της οπής. Δοκιμάστηκαν δύο νέα ανοίγματα, ένα 30%



Σχήμα 7: (α) Ορισμός γωνίας πρόσδεσης της κοιλότητας της δέσμης. (β) Στροφή της κοιλότητας της δέσμης για γωνίες πρόσδεσης 30° (αχνή γραμμή) και 70° (έντονη γραμμή).



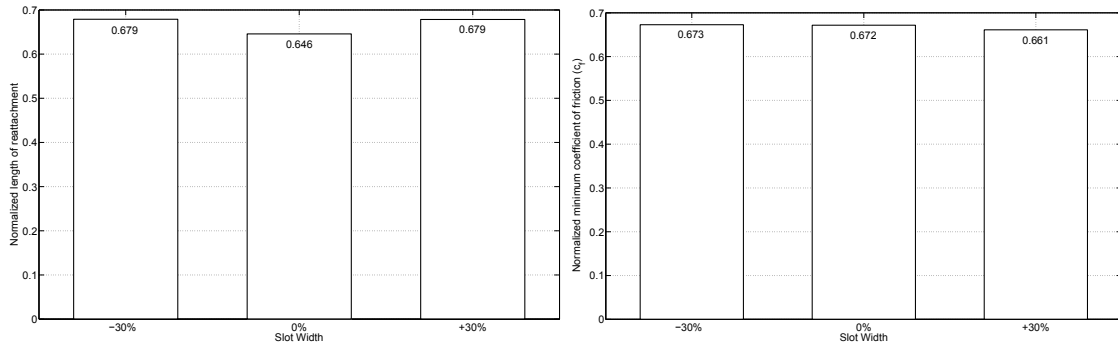
Σχήμα 8: Επίδραση του προσανατολισμού της κοιλότητας της δέσμης στην υποχώρηση της ζώνης αποκόλλησης. Η θέση της οπής είναι η 2 του Σχήματος 4 και η παροχή αναρρόφησης η μέγιστη συγκριτικά.



Σχήμα 9: Γραμμές ροής στην περιοχή της οπής για τις περιπτώσεις των γωνιών πρόσδεσης 30°, 50°, 70°. Φαίνεται ότι μεταβάλλοντας την γωνία πρόσδεσης ουσιαστικά μεταβάλλεται η ενεργός διατομή από όπου αναρροφάται το ρευστό. Η θέση της οπής για τα παραπάνω αποτελέσματα είναι η 2 του Σχήματος 4 και η παροχή αναρρόφησης έχει την συγκριτικά μέγιστη τιμή.

μικρότερο και ένα 30% μεγαλύτερο σε σχέση με τη διάσταση της οπής που χρησιμοποιούνταν μέχρι στιγμής (η οποία και ισούται με το 0.189% του μήκους της χορδής της διαμόρφωσης). Τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 10, από όπου και

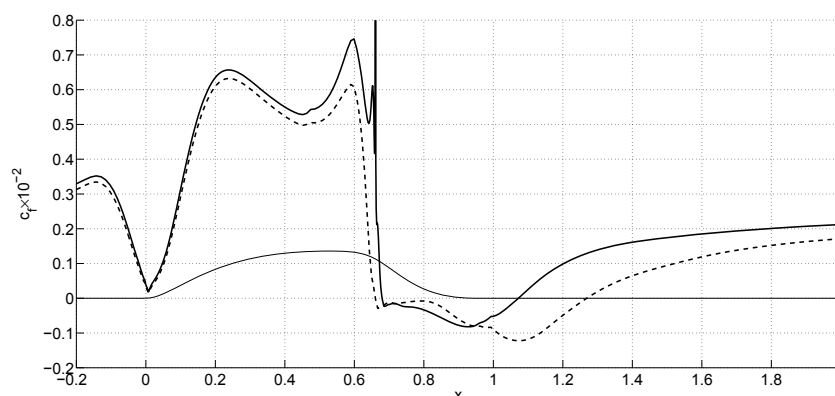
φαίνεται να υπερέχει, έναντι των υπολοίπων δύο, η διάσταση που χρησιμοποιείται μέχρι τώρα.



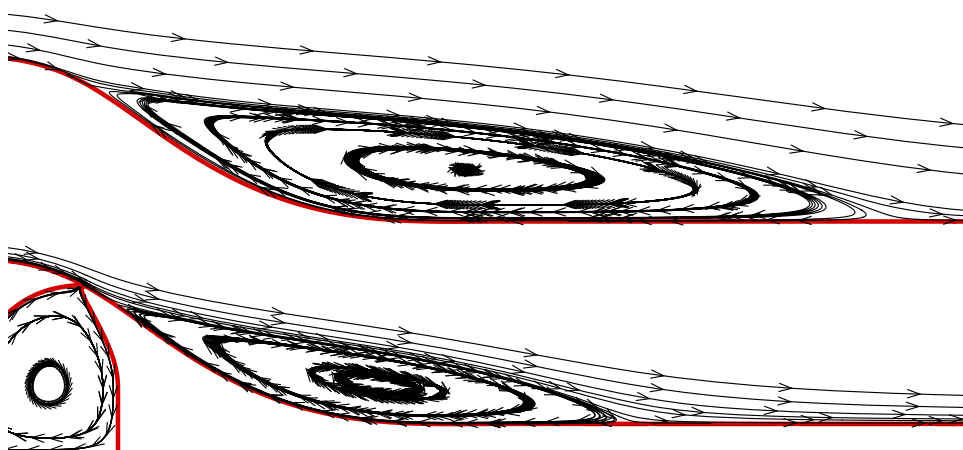
Σχήμα 10: Επίδραση του ανοίγματος της οπής στην υποχώρηση της ζώνης αποκόλλησης. Δοκιμάστηκαν δύο νέα ανοίγματα σε σχέση με ότι είχε προηγηθεί, ένα 30% μικρότερο και ένα 30% μεγαλύτερο. Η θέση της οπής είναι η 2 του Σχήματος 4, η παροχή αναρρόφησης η συγκριτικά μέγιστη και η γωνία πρόσδεσης της κοιλότητας της δέσμης είναι ίση με 50°.

Συμπεράσματα

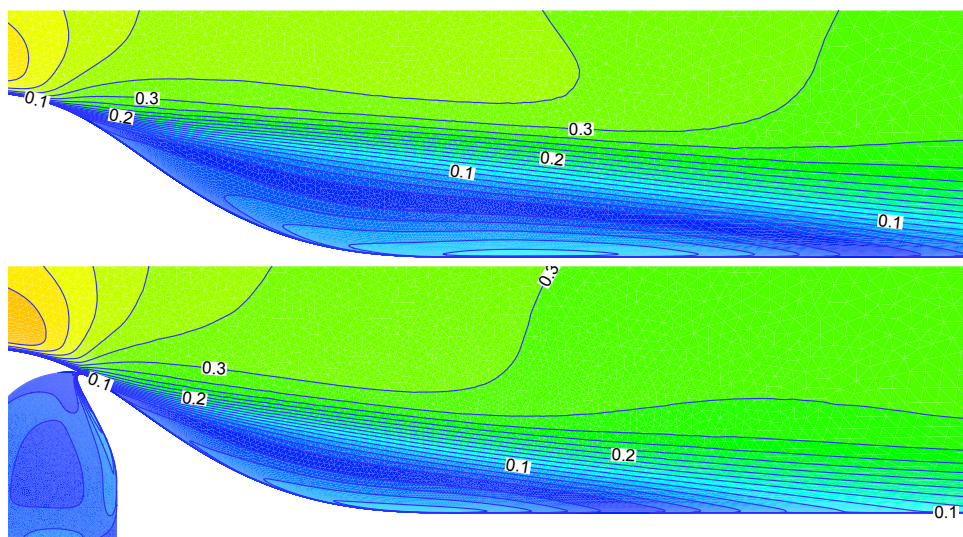
Τελικά τοποθετώντας την οπή στο 66% της χορδής της διαμόρφωσης (θέση 2 Σχήματος 4), με λόγο παροχών αναρρόφησης - εισόδου της τάξης του $-0.25 \cdot 10^{-3}$ (το αρνητικό πρόσημο δείχνει έλεγχο μέσω αναρρόφησης), γωνία πρόσδεσης της κοιλότητας της δέσμης 50° και άνοιγμα οπής ίσο με το 0.189% του μήκους της χορδής της διαμόρφωσης, επιτεύχθηκε ελάττωση του μήκους της ζώνης αποκόλλησης κατά περίπου 35% και της ελάχιστης αρνητικής τιμής του συντελεστή τριβής κατά περίπου 33%. Τα Σχήματα 11, 12, 13 επιδεικνύουν την εν λόγω εξασθένηση της ζώνης αποκόλλησης.



Σχήμα 11: Κατανομή του συντελεστή τριβής απουσίας ελέγχου (διακεκομμένη γραμμή) και παρουσίας ελέγχου 'βέλτιστων' παραμέτρων (έντονη συνεχής γραμμή). Με λεπτή γραμμή φαίνεται η γεωμετρία της διαμόρφωσης.



Σχήμα 12: Γραμμές ροής στη περιοχή της ζώνης αποκόλλησης για τις περιπτώσεις απουσίας ελέγχου και ελέγχου με τις 'βέλτιστες' παραμέτρους.



Σχήμα 13: Ισογραμμές *Mach* στη περιοχή της ζώνης αποκόλλησης για τις περιπτώσεις απουσίας ελέγχου και ελέγχου με τις 'βέλτιστες' παραμέτρους.

Συζήτηση - Σχόλια

Η διερεύνηση που έγινε έρχισε τη θέση της οπής και την παροχή αναρρόφησης σε πρωτεύουσες μεταβλητές ελέγχου της τεχνικής αναρρόφησης. Μάλιστα η βέλτιστη θέση φαίνεται να είναι στην περιοχή της έναρξης της ζώνης αποκόλλησης ενώ αύξηση της παροχής αναρρόφησης σημαίνει και περαιτέρω μείωση της ζώνης αποκόλλησης. Η γωνία πρόσδεσης της κοιλότητας και, δευτερευόντως, το άνοιγμα της οπής φαίνεται να επιδρούν επίσης στη μείωση της ζώνης αποκόλλησης, αλλά σε μικρότερη έκταση συγκριτικά με τις δύο πρώτες μεταβλητές ελέγχου. Συμπληρωματικά όσον αφορά στον προσανατολισμό της κοιλότητας της δέσμης, δεν μπορεί να εξαχθεί γενικό συμπέρασμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τελέστηκε παραμετρική μελέτη της επίδρασης της τεχνικής συνεχούς αναρρόφησης στην υποχώρηση της ζώνης αποκόλλησης. Γίνεται κατανοητό ότι οι βέλτιστες τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων (για την εξεταζόμενη γεωμετρία διαμόρφωσης και αγωγού) δεν βρέθηκαν. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβεί με τη χρήση ενός εξελικτικού αλγορίθμου, με την παρούσα εργασία να εφοδιάζει τον εξελικτικό αλγόριθμο με τα απαραίτητα όρια των παραμέτρων ελέγχου.

Συμπληρωματικά, η τεχνική που αναπτύχθηκε, με μερικές μικρές επεμβάσεις στον κώδικα δόμησης του υπολογιστικού πλέγματος, μπορεί να δώσει αποτελέσματα σε περιπτώσεις μεμονωμένης διαμόρφωσης. Επίσης η γεωμετρία της διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε θυμίζει την πλευρά υποπίεσης μιας αεροτομής οπότε κατασκευάζοντας δύο πλέγματα και, προσδίδοντας στη διαμόρφωση τη γεωμετρία της πλευράς υποπίεσης μιας αεροτομής στο ένα πλέγμα και τη γεωμετρία της πλευράς υπερπίεσης της ίδιας αεροτομής στο άλλο, μπορούμε συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των δύο πλεγμάτων να βγάλουμε συμπεράσματα για την αεροτομή (λ.χ. υπολογισμός του συντελεστή άνωσης και οπισθέλκουσας).

Τέλος το χωρίο ροής που παρουσιάστηκε θυμίζει έντονα πτερύγωση στροβιλομηχανής. Επεμβαίνοντας λοιπόν στη γεωμετρία του περιγράμματος του χωρίου ροής και αλλάζοντας τον χαρακτήρα ορισμένων κόμβων, από κόμβους τοιχώματος σε κόμβους περιοδικότητας, μπορούμε να προσομοιώσουμε τη ροή σε πτερύγωση στροβιλομηχανής.

Αναφορές

- [1] Δ. Γ. Κουμπογιάννης Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων *Navier – Stokes* με χρήση μη-δομημένων πλεγμάτων σε περιβάλλον παράλληλης επεξεργασίας, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Αθήνα, 1998
- [2] G. Godart, M. Stanislas Control of deceleration boundary layer. part1: Optimization of passive vortex generators, *Aerospace Science and Technology* 10 181-191, 2006
- [3] L. Huang, P.G. Huang, R.P. LeBeau, Th. Hauser Optimization of blowing and suction control on naca 0012 airfoil using EARND genetic algorithm with diversity control, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004
- [4] R. Duvigneau, M. Visonneau Optimization of a synthetic jet actuator for aerodynamic stall control, *Computers and Fluids* 35 624-638, 2006