

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ  
ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ: ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ

ΜΙΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗ  
Για τον Τίτλο του  
Διδάκτορα της Φιλοσοφίας

Παρουσιασθείσα από τον  
**ΜΑΡΙΟ Ε. ΜΑΣΤΡΟΚΑΛΟ**  
(Διπλωματούχο Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π.)

Γεννηθέντα την 24.06.1981  
Έλληνα Πολίτη

**Συμβουλευτική Επιτροπή της Διδακτορικής Διατριβής**

Α. Καϊκτσίης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)  
Χ.Ι. Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Γ.Σ. Τριανταφύλλου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Εξεταστική Επιτροπή της Διδακτορικής Διατριβής**

Α. Καϊκτσίης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)  
Χ.Ι. Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Γ.Σ. Τριανταφύλλου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Π. Κουμουτσάκος, Καθηγητής Ομοσπ. Πολυτεχνείου Ζυρίχης  
Ε. Κωνσταντινίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Δ.Μ.  
Γ. Παπαλάμπρου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Γ. Τζαμπίρας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Για τον Μανώλη τον Δάσκαλο



## Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετάται υπολογιστικά η βέλτιστη αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán σε ροή γύρω από κύλινδρο, με χρήση σχημάτων παθητικού ελέγχου, ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου και ελέγχου ανατροφοδότησης. Αυτό κατέστη δυνατό με σύζευξη ενός κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με έναν κώδικα βελτιστοποίησης. Η δράση ελέγχου συνίσταται είτε στην εφαρμογή συνθηκών ολίσθησης είτε στη χρήση εμφύσησης/αναρρόφησης, στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται στο πλαίσιο περαιτέρω υπολογισμών τοπικής και ολικής υδροδυναμικής ευστάθειας, με επίλυση της εξίσωσης Orr-Sommerfeld, και με επεξεργασία σήματος βάσει του μοντέλου Stuart-Landau, αντίστοιχα. Η μελέτη διεξάγεται για διδιάστατη ροή, σε χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds,  $Re < 180$ , όπου η ροή χωρίς την εφαρμογή δράσης ελέγχου είτε είναι ολικά ευσταθής είτε χαρακτηρίζεται από την παρουσία δρόμου δινών.

Σε πρώτο στάδιο, μελετάται η εφαρμογή χρονικά σταθερών συνθηκών ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου ή σε τμήμα αυτής, στο πλαίσιο ενός σχήματος παθητικού ελέγχου. Στην περίπτωση εφαρμογής συνθηκών ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, σε συμφωνία με πρόσφατες μελέτες, καταδεικνύουν τη σταθεροποιητική επίδραση της αύξησης του αδιάστατου μήκους ολίσθησης,  $b^* = b/D$ , όπου  $b$  είναι το μήκος ολίσθησης και  $D$  η διάμετρος του κυλίνδρου. Συγκεκριμένα, ο δρόμος δινών von Kármán αναιρείται για μια κρίσιμη τιμή του  $b^*$ , η οποία είναι αύξουσα συνάρτηση του  $Re$ . Επιπλέον, καταδεικνύεται ότι, για συγκεκριμένα επίπεδα του  $b^*$ , ο ομόρρους μπορεί να σταθεροποιηθεί με εφαρμογή συνθηκών ολίσθησης σε τμήμα μόνο της επιφάνειας του κυλίνδρου. Με βάση αυτή την παρατήρηση, επιλύθηκε το πρόβλημα της πλήρους ή μερικής αναίρεσης του δρόμου δινών von Kármán με εφαρμογή τμηματικής υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Αυτό κατέστη δυνατό με διαμόρφωση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, στο οποίο το γινόμενο του μήκους ολίσθησης επί την έκταση της υδροφοβικής περιοχής ποσοτικοποιεί τη δράση ελέγχου, ενώ η αστάθεια της ροής χαρακτηρίζεται από μια δεύτερη, κατάλληλα ορισμένη, αντικειμενική συνάρτηση. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καταδεικνύουν ότι, τόσο για περιπτώσεις πλήρους, όσο και για περιπτώσεις μερικής αναίρεσης του δρόμου δινών von Kármán, κατάλληλη χρήση τμηματικής υδροφοβικότητας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της απαιτούμενης δράσης ελέγχου, σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto χαρακτηρίζονται με χρήση υπολογισμών τοπικής υδροδυναμικής ευστάθειας (επίλυση της εξίσωσης Orr-Sommerfeld). Τα αποτελέσματα δεικνύουν ότι η σταθεροποίηση της ροής επιτυγχάνεται όταν μειώνεται σημαντικά μια κατάλληλα ορισμένη ολική ένταση της απόλυτης αστάθειας (σε συνάρτηση με τους τοπικούς απόλυτους ρυθμούς ενίσχυσης διαταραχών και την έκταση της περιοχής απόλυτης αστάθειας). Τέλος, χαρακτηρίζεται η ολική αστάθεια της ροής, με ανάλυση χρονοσειρών του συντελεστή άνωσης στο πλαίσιο της εξίσωσης Stuart-Landau.

Σε δεύτερο στάδιο, μελετάται η εφαρμογή χρονικά σταθερής εμφύσησης/αναρρόφησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου, στο πλαίσιο ενός σχήματος ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου. Εν προκειμένω, θεωρούνται τρεις περιοχές στην επιφάνεια του κυλίνδρου: (α) η περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, (β) η πλάγια περιοχή, και (γ) η περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Αρχικά, γίνεται παραμετρική μελέτη, στο πλαίσιο της εφαρμογής αναρρόφησης ή εμφύσησης σε καθεμία από τις τρεις ως άνω περιοχές, και αξιολογείται η επίδραση της δράσης ελέγχου στην ευστάθεια της ροής. Με οδηγό τα συγκεκριμένα αποτελέσματα, διαμορφώνεται ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán, με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Εδώ, εφαρμόζεται εμφύσηση στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, και αναρρόφηση στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής και στην πλάγια περιοχή, με ταχύτητα διαφορετικού μέτρου σε καθεμία από τις εν λόγω τρεις περιοχές. Για την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων άντλησης του ρευστού, επιβάλλεται ο περιορισμός της

μηδενικής καθαρής παροχής μάζας. Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών έκτασης των τριών περιοχών, καθώς και των αντίστοιχων ταχυτήτων αναρρόφησης/εμφύσησης, ώστε να ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα οι ορισθείσες δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες ποσοτικοποιούν τη δράση ελέγχου και την αστάθεια της ροής. Οι προκύπτουσες βέλτιστες λύσεις αντιστοιχούν σε επίπεδα δράσης ελέγχου σημαντικά μειωμένα, σε σύγκριση με αντίστοιχες μελέτες της βιβλιογραφίας. Αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto χαρακτηρίζονται με υπολογισμούς τοπικής υδροδυναμικής ευστάθειας, καθώς και με ανάλυση χρονοσειρών του συντελεστή άνωσης.

Τέλος, σε τρίτο στάδιο, τίθεται ο στόχος της πλήρους ή μερικής αναίρεσης του δρόμου δινών με χρήση ακόμη χαμηλότερων επιπέδων δράσης ελέγχου, με εφαρμογή δύο σχημάτων ενεργού ελέγχου ανατροφοδότησης, βασισμένων στις δράσεις ελέγχου της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα, στο πρώτο σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης, η δράση ελέγχου συνίσταται στην εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης, ενώ, στο δεύτερο σχήμα, στην εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Καί στις δύο περιπτώσεις, το σήμα ανατροφοδότησης παράγεται βάσει μέτρησης της ταχύτητας σε ένα σημείο στον εγγύ ομόρρο. Στην παρούσα έρευνα, διαμορφώνονται και επιλύονται δύο προβλήματα βελτιστοποίησης, με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου ανατροφοδότησης. Σε σύγκριση με τα προηγούμενα σχήματα ελέγχου της παρούσας διατριβής, τα παρόντα βελτιστοποιημένα σχήματα ελέγχου ανατροφοδότησης επιτυγχάνουν μείωση της δράσης ελέγχου κατά δύο τάξεις μεγέθους.

## Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις θερμές, ειλικρινείς και βαθύτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντά μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή, για την ανεκτίμητη υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Ο τρόπος της διδασκαλίας του, καθώς και η στήριξη και ενθάρρυνση που μου παρείχε, με βοήθησαν να φτάσω στο επίπεδο γνώσης που απαιτείται για την περάτωση των στόχων της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Θεωρώ τιμή για το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο να υπάρχουν άνθρωποι σαν τον κ. Καϊκτσή στις τάξεις του, που ωφελούν τους φοιτητές με την εμπειρία και την εξειδίκευσή τους, όχι μόνο όσον αφορά στην επιστημονική κατάρτιση αλλά και στη διαμόρφωση της στάσης ζωής.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Γ. Τριανταφύλλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Χ. Παπαδόπουλο, καθώς προς τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γ. Προυσαλίδη από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την πολύ σημαντική υποστήριξή τους και για τις γόνιμες συζητήσεις που είχαμε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα άλλα τέσσερα μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Π. Κουμουτσάκο από το Ομοσπονδιακό Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ε. Κωνσταντινίδη από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, καθώς και τον Καθηγητή κ. Γ. Τζαμπίρα και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γ. Παπαλάμπρου από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πολλές ευχαριστίες θέλω να εκφράσω επίσης προς τους Κ. Αϊβαλή, Α. Χαριτόπουλο, Δ. Καζαγκά, Π. Κοντούλη, Ε. Ευσταθίου, Δ. Φούφλια και Ξ. Βούβακο, για αυτά τα πέντε αξέχαστα χρόνια στο γραφείο. Τέλος, είμαι περισσότερο από ευγνώμων προς τους φίλους μου και τα μέλη της οικογένειάς μου. Ειδικότερα, προς τους φίλους μου Δ. Κατσιώπη, Ι. Γουζούαση, Ι. Καγιαυτάκη, τον ξάδερφο και φίλο μου Α. Αράπη, προς τη Βάσω για την υπομονή με την οποία στέκεται δίπλα μου, και προς τη μητέρα μου Ηλέκτρα για όλη την ηθική της υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στον πατέρα μου Μανώλη, Δάσκαλο των Μαθηματικών, ο οποίος μάς άφησε τον προηγούμενο Ιανουάριο, για όλα τα πράγματα που με δίδαξε και μου πρόσφερε απλόχερα, και κυρίως για το γεγονός ότι είμαι αυτός που είμαι.





# Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο.....	1
1.1 Ροή γύρω από κύλινδρο .....	1
1.2 Περί βελτιστοποίησης.....	2
1.3 Περί υδροδυναμικής ευστάθειας.....	2
1.4 Έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο .....	2
1.5 Μέθοδοι ελέγχου που εφαρμόζονται στην παρούσα διατριβή .....	3
Κεφάλαιο 2: Υπολογιστική μοντελοποίηση .....	5
2.1 Διατύπωση του προβλήματος .....	5
2.2 Ανάλυση ακρίβειας.....	8
2.2.1 Ανάλυση ακρίβειας χωρικής διακριτοποίησης.....	8
2.2.2 Ανάλυση ακρίβειας χρονικής διακριτοποίησης .....	9
2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας .....	10
Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου .....	13
3.1 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου.....	13
3.2 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου.....	15
3.3 Ροή γύρω από υδροφοβικό κύλινδρο: διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης .....	16
3.3.1 Μεταβλητές σχεδίασης.....	16
3.3.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις .....	16
3.3.3 Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης .....	17
3.3.5 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης .....	17
3.4 Ανάλυση υδροδυναμικής ευστάθειας.....	22
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή αναρρόφησης - εμφύσησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου .....	25
4.1. Εφαρμογή τμηματικής αναρρόφησης/εμφύσησης .....	25
4.1.1 Εφαρμογή αναρρόφησης και εμφύσησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, $0^\circ < \theta < 40^\circ$ . .....	26
4.1.2 Εφαρμογή αναρρόφησης και εμφύσησης στην πλάγια περιοχή, $40^\circ < \theta < 150^\circ$ .....	29
4.1.3 Εφαρμογή αναρρόφησης και εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, $150^\circ < \theta < 180^\circ$ .....	31
4.1.4 Αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής τμηματικά ομοιόμορφης αναρρόφησης/εμφύσησης .....	33
4.2 Διαμόρφωση προβλήματος βελτιστοποίησης με εφαρμογή τμηματικά ομοιόμορφης αναρρόφησης /εμφύσησης .....	33
4.2.1 Μεταβλητές σχεδίασης.....	35
4.2.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις .....	35
4.2.3 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης .....	35

4.2.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης .....	36
4.3 Ανάλυση υδροδυναμικής ευστάθειας .....	40
Κεφάλαιο 5: Έλεγχος ανατροφοδότησης: βελτιστοποίηση του σχήματος ελέγχου .....	43
5.1 Έλεγχος ανατροφοδότησης με χρήση χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης .....	43
5.1.1 Ενεργός έλεγχος με χρήση υλικών με χρονικά μεταβαλλόμενη υδροφοβικότητα .	43
5.1.2 Εφαρμογή ελεγχόμενης υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου ..	45
5.2 Έλεγχος ανατροφοδότησης: βελτιστοποίηση παραμέτρων.....	45
5.2.1 Μεταβλητές σχεδίασης.....	46
5.2.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις .....	46
5.2.3 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης .....	46
5.2.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης .....	47
Κεφάλαιο 6: Καινοτομίες της παρούσας διατριβής και συμβολή στην επιστημονική έρευνα	49
6.1 Προταθείσα μεθοδολογία .....	49
6.2 Νέα ευρήματα της παρούσας διατριβής.....	50
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.....	53
7.1 Συμπεράσματα .....	53
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	54
Βιβλιογραφία .....	57

# Κατάλογος Εικόνων

1. Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση του πεδίου ροής..... 6
2. Εικόνα 2. Ορισμός του μήκους ολίσθησης,  $b$ , σε υδροφοβική επιφάνεια..... 7
3. Εικόνα 3. (α) Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας εγγύς της επιφάνειας του κυλίνδρου, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος ολίσθησης  $b$ . (β) Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε τόξο που εκτείνεται από  $\theta_{min}$  έως  $\theta_{max}$ ..... 7
4. Εικόνα 4. (α) Εφαρμογή εμφύσησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου. (β) Εφαρμογή αναρρόφησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου και εμφύσησης στην υπόλοιπη επιφάνεια. .... 8
5. Εικόνα 5.  $Re=90$ , ροή χωρίς δράση ελέγχου: (I) έλεγχος ακρίβειας χωρικής διακριτοποίησης για τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t=0.01$ , (II) έλεγχος ακρίβειας χρονικής διακριτοποίησης για πλέγμα αποτελούμενο από  $N=54,000$  πεπερασμένους όγκους. Υπολογισθέντα μεγέθη: (α) Μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης, (β) πλάτος του συντελεστή αντίστασης, και (γ) πλάτος του συντελεστή άνωσης. .... 9
6. Εικόνα 6. Απεικόνιση λεπτομέρειας του πλέγματος εγγύς του κυλίνδρου. Στην επιφάνεια του κυλίνδρου εφάπτονται 100 πεπερασμένοι όγκοι. .... 10
7. Εικόνα 7. Μεταβολή υπολογισθέντων ροϊκών μεγεθών συναρτήσει του αριθμού Reynolds για μη γραμμική ροή γύρω από κύλινδρο χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, για την παρούσα εργασία και για αντίστοιχες της βιβλιογραφίας: (α) Μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , και (β) αριθμός Strouhal,  $St$ . .... 11
8. Εικόνα 8. Μεταβολή υπολογισθέντων ροϊκών μεγεθών συναρτήσει του αριθμού Reynolds για βασική ροή γύρω από κύλινδρο χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, για την παρούσα εργασία και για αντίστοιχες της βιβλιογραφίας: (α) Αδιάστατο μήκος των ζωνών ανακύκλωσης,  $x_R/D$ , και (β) γωνία σημείου αποκόλλησης της ροής,  $\theta_s$  (ως σημείο αναφοράς θεωρείται το εμπρός σημείο ανακοπής). .... 11
9. Εικόνα 9. Αριθμητικά αποτελέσματα για  $Re=120$ , για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου και για τις περιπτώσεις εφαρμογής υδροφοβικότητας για δύο τιμές του  $b^*$ : Κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική ροή, και γραμμές ροής στιγμιαίου πεδίου. .... 14
10. Εικόνα 10.  $Re=90$ ,  $b^*=0.17$ : κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης,  $u_\theta$ , στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική ροή και χρονοσειρά του συντελεστή άνωσης, για τις περιπτώσεις εφαρμογής συνθήκης ολίσθησης: (α) στην περιοχή που εκτείνεται  $\pm 37.5^\circ$  από το εμπρός σημείο ανακοπής και (β) στην περιοχή που εκτείνεται  $\pm 37.5^\circ$  από το πίσω σημείο ανακοπής. Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ . .... 15
11. Εικόνα 11.  $Re=90$ : αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  συναρτήσει της αντικειμενικής συνάρτηση  $J_2$ , και προσεγγιστική καμπύλη του μετώπου Pareto. Συμπεριλαμβάνονται και τρεις περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται από εφαρμογή της συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, και επισημαίνεται η μείωση της δράσης ελέγχου των βέλτιστων λύσεων σε σχέση με αυτές. .... 19
12. Εικόνα 12.  $Re=90$ : κατανομές της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική ροή (αριστερή στήλη) και ισούψεις καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας της μη γραμμικής ροής (δεξιά στήλη), για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση της σταθεροποιημένης

- ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11..... 20
13. Εικόνα 13.  $Re=90$ : χρονοσειρές των συντελεστών αντίστασης και άνωσης, για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11. Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ ..... 21
14. Εικόνα 14.  $Re=90$ : τιμές των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την τοπική ευστάθεια ως συνάρτηση της οριζόντιας συντεταγμένης, για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση της σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11. Οι λύσεις αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα δράσης ελέγχου, η οποία ποσοτικοποιείται από την αντικειμενική συνάρτηση,  $J_2$ : (α) Απόλυτη συχνότητα, και (β) τοπικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών..... 23
15. Εικόνα 15. Απεικόνιση των κατανομών αναρρόφησης και εμφύσησης σε τρεις διαφορετικές περιοχές του κυλίνδρου: (α) περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής,  $0^\circ < \theta < 40^\circ$ , (β) πλάγια περιοχή,  $40^\circ < \theta < 150^\circ$ , και (γ) περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής,  $150^\circ < \theta < 180^\circ$ ..... 26
16. Εικόνα 16.  $Re=90$ : στατιστικά μεγέθη της ροής ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, για εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής: (α) αριθμός Strouhal,  $St$ , (β) μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , (γ) πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,ampl}$ , και (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$ ..... 27
17. Εικόνα 17.  $Re=90$ : ισοϋψείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , για αναρρόφηση/εμφύσηση στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής. .... 28
18. Εικόνα 18.  $Re=90$ : στατιστικά μεγέθη της ροής ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, για εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην πλάγια περιοχή: (α) αριθμός Strouhal,  $St$ , (β) μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , (γ) πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,ampl}$ , και (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$ ..... 29
19. Εικόνα 19.  $Re=90$ : ισοϋψείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , για αναρρόφηση/εμφύσηση στην πλάγια περιοχή. .... 30
20. Εικόνα 20.  $Re=90$ : στατιστικά μεγέθη της ροής ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, για εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής: (α) αριθμός Strouhal,  $St$ , (β) μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , (γ) πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,ampl}$ , και (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$ ..... 31
21. Εικόνα 21.  $Re=90$ : ισοϋψείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , για αναρρόφηση/εμφύσηση στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. .... 32
22. Εικόνα 22. Απεικόνιση της κατανομής της αναρρόφησης/εμφύσησης..... 34
23. Εικόνα 23.  $Re=90$ : αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  συναρτήσει της αντικειμενικής συνάρτησης  $C_{suc}$  (συντελεστής αναρρόφησης). Συμπεριλαμβάνονται και περιπτώσεις της βιβλιογραφίας που χαρακτηρίζονται από αποκλειστική εφαρμογή εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, και επισημαίνεται η μείωση της δράσης ελέγχου των βέλτιστων λύσεων σε σχέση με αυτές. .... 37

24. Εικόνα 24.  $Re=90$ : κατανομή ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης που αντιστοιχούν στις λύσεις 1 έως 4 που επισημαίνονται στην Εικόνα 23 (αριστερή στήλη), και ισύβειες καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας (δεξιά στήλη). Περιλαμβάνεται και η περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου..... 38
25. Εικόνα 25.  $Re=90$ : χρονοσειρές των συντελεστών αντίστασης και άνωσης για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, και για τις λύσεις 1 έως 4 που απεικονίζονται στην Εικόνα 23. Η δράση ελέγχου εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ . ..... 39
26. Εικόνα 26.  $Re=90$ : τιμές των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την τοπική ευστάθεια ως συνάρτηση της οριζόντιας συντεταγμένης, για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, και για τις βέλτιστες λύσεις 1 έως 4 που απεικονίζονται στην Εικόνα 23: (α) Απόλυτη συχνότητα, και (β) τοπικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών. .... 41
27. Εικόνα 27. Αναλογικό σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης. Απεικονίζονται η οριζόντια θέση του αισθητήρα,  $x_s/D$ , η έκταση της περιοχής χρονικά μεταβαλλόμενης υδροφοβικότητας, ορισμένη από τις γωνίες  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$ , το αναλογικό κέρδος ανατροφοδότησης,  $k_p$ , καθώς και η εντολή ελέγχου,  $u(t)$ ..... 44
28. Εικόνα 28.  $Re=60$ : πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,amp}$ , (i) συναρτήσει της οριζόντιας θέσης του αισθητήρα,  $x_s$ , για τιμή του αναλογικού κέρδους  $k_p=0.5$  (αριστερή στήλη), και (ii) συναρτήσει του αναλογικού κέρδους,  $k_p$ , όταν ο αισθητήρας τοποθετείται στη θέση  $x_s=7$ . Όλη η επιφάνεια του κυλίνδρου είναι υδροφοβική..... 45
29. Εικόνα 29.  $Re=90$ : αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  ως συνάρτηση της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_2$  για λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης με εφαρμογή ελέγχου ανατροφοδότησης..... 47
30. Εικόνα 30.  $Re=90$ : χρονοσειρές του συντελεστή άνωσης και του μήκους ολίσθησης για τις περιπτώσεις που συμβολίζονται στην Εικόνα 29 με “Point a” και “Point b”, αντίστοιχα. Ο ενεργός έλεγχος ανατροφοδότησης εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ . ..... 48



## Κατάλογος Πινάκων

1. Πίνακας 1. Στατιστικά μεγέθη της ροής για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, για: (i) ροή χωρίς δράση ελέγχου, (ii) σταθεροποιημένη ροή για την κρίσιμη τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης. Περιλαμβάνονται αποτελέσματα και από προγενέστερη υπολογιστική μελέτη (Legendre et al., 2009)..... 14
2. Πίνακας 2.  $Re=90$ : τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για την περίπτωση χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11..... 19
3. Πίνακας 3.  $Re=90$ : ποσότητες που χαρακτηρίζουν την τοπική και ολική ευστάθεια της ροής, για αντιπροσωπευτικές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης. .... 22
4. Πίνακας 4.  $Re=90$ : τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για την περίπτωση χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, και για τις βέλτιστες λύσεις 1 έως 4, που απεικονίζονται στην Εικόνα 23. .... 37
5. Πίνακας 5.  $Re=90$ : ποσότητες που χαρακτηρίζουν την τοπική και ολική ευστάθεια της ροής, για αντιπροσωπευτικές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης. .... 41
6. Πίνακας 6.  $Re=90$ : τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων, για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται δράση ελέγχου, για τις λύσεις που συμβολίζονται ως “Point a” και “Point b” στην Εικόνα 29, καθώς και για τις λύσεις που αντιστοιχούν σε παθητικό σχήμα ελέγχου με υδροφοβικότητα σε τμήμα του κυλίνδρου (“Point 1” και “Point 2” στην Εικόνα 11) και σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου (Legendre et al., 2009). Στον πίνακα περιλαμβάνονται οι τιμές του μεγέθους  $\frac{1}{2}b^*\phi$  (το  $\phi$  σε ακτίνια). Για τις περιπτώσεις ελέγχου ανατροφοδότησης, οι τιμές του  $b^*$  αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή του..... 48





# Κεφάλαιο 1: Έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο

Η μελέτη των ροών γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, εξαιτίας του μεγάλου εύρους εφαρμογών που έχει σε χερσαίες και θαλάσσιες κατασκευές, καθώς και σε μηχανολογικές διατάξεις. Τυπικές χερσαίες κατασκευές που συμπεριφέρονται ως μη αεροδυναμικά σώματα είναι κτήρια μεγάλου ύψους, υψηλές γέφυρες, καπνοδόχοι, κεραίες τηλεπικοινωνίας, πυλώνες ανεμογεννητριών κλπ, ενώ η τυπικότερη αντίστοιχη θαλάσσια κατασκευή είναι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων. Σχετικό παράδειγμα μηχανολογικής διάταξης είναι ο εναλλάκτης θερμότητας. Σε ροές γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός του δρόμου δινών von Kármán, ο οποίος έχει ως απόρροια τη χρονική μεταβολή των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης. Η δυναμική φόρτιση των κατασκευών μπορεί να οδηγήσει σε κόπωση του υλικού και κατασκευαστική αστοχία.

## 1.1 Ροή γύρω από κύλινδρο

Η πρότυπη ροή γύρω από κύλινδρο θεωρείται η πλέον αντιπροσωπευτική από τις ροές γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα. Δεδομένου ότι ο ομόρρους του κυλίνδρου είναι ένα δυναμικό σύστημα που μπορεί να οριστεί εύκολα ως πρόβλημα (αλλά δύσκολο να επιλυθεί), αποτέλεσε αντικείμενο πειραματικής έρευνας από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, και υπολογιστικής έρευνας από το 1960 και έπειτα. Πρώτες σχετικές εργασίες εστίασαν σε βασικά μεγέθη, όπως η αδιάστατη συχνότητα του δρόμου δινών von Kármán (αριθμός Strouhal), οι αδιαστατοποιημένες δυνάμεις (συντελεστές άνωσης και αντίστασης), η γωνία που αντιστοιχεί στο σημείο αποκόλλησης της ροής, και το μέγεθος των ζωνών ανακύκλωσης του ρευστού. Αργότερα, η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος κατέστησε δυνατή την άμεση αριθμητική προσομοίωση της τρισδιάστατης ροής, η οποία συνοδεύθηκε από περαιτέρω ανάλυση της φυσικής του προβλήματος στο πλαίσιο της θεωρίας της υδροδυναμικής ευστάθειας.

Η δυναμική της ασυμπίεστης ροής γύρω από κύλινδρο εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds,  $Re$ , που ορίζεται συναρτήσει της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος, της διαμέτρου του κυλίνδρου και της κινηματικής συνεκτικότητας του ρευστού. Οι ιδιότητες της συγκεκριμένης ροής είναι γνωστές για ένα μεγάλο εύρος τιμών του αριθμού Reynolds, από έρπουσες ροές ( $Re \rightarrow 0$ ) έως πλήρως τυρβώδεις ροές ( $Re \approx 10^7$ ). Σε χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds,  $Re < 190$ , η ροή παραμένει διδιάστατη. Πιο συγκεκριμένα, για  $Re < 6$ , η ροή είναι ευσταθής, με ένα μόνο σημείο αποκόλλησης, το οποίο συμπίπτει με το πίσω σημείο ανακοπής (έρπουσα ροή). Στο πεδίο τιμών του αριθμού Reynolds  $6 < Re < 47$ , η ροή παραμένει ευσταθής, και χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό ενός ζεύγους ζωνών ανακύκλωσης, αμέσως κατάντη του κυλίνδρου, το μήκος των οποίων αυξάνεται ως γραμμική συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Όταν ο αριθμός Reynolds λάβει τιμή μεγαλύτερη από  $Re_{2D,cr} = 47$ , σχηματίζεται ο δρόμος δινών von Kármán, εξαιτίας της ύπαρξης μιας διακλάδωσης τύπου Hopf. Έτσι, για  $Re > Re_{2D,cr}$ , η ροή γύρω από κύλινδρο χαρακτηρίζεται από ολική αστάθεια, της οποίας η μη γραμμική κατάσταση είναι ο δρόμος δινών von Kármán. Ο τελευταίος είναι το αποτέλεσμα της εναλλακτικής δημιουργίας και αποκοπής δύο δινών αντιθέτου στροβιλότητας ανά περίοδο του φαινομένου.

Στην τιμή του αριθμού Reynolds  $Re_{3D,cr}=188.5$ , η ροή γύρω από κύλινδρο υπόκειται σε μια δεύτερη διακλάδωση, και η δομή του ομόρρου καθίσταται τρισδιάστατη, εξαιτίας της εμφάνισης μιας δευτερογενούς αστάθειας κατά την κάθετη στο επίπεδο του δρόμο των δινών διεύθυνση. Με περαιτέρω αύξηση του αριθμού Reynolds, λαμβάνει χώρα ένας αριθμός από άλλες μεταπτώσεις. Για  $Re>1000$ , γίνεται τυρβώδης η ροή στα διαμητικά στρώματα του ομόρρου, συντελώντας στη διαμόρφωση ενός συνολικά τυρβώδους ομόρρου. Τέλος, για  $Re > 5 \times 10^5$ , καθίσταται τυρβώδες το οριακό στρώμα. Για τον λόγο αυτόν, το σημείο αποκόλλησης μετακινείται προς το πίσω σημείο ανακοπής, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή αντίστασης (drag crisis).

Επισημαίνεται ότι, με βάση τα παραπάνω, στο εύρος τιμών του αριθμού Reynolds που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας μελέτης,  $50 < Re < 180$ , ο ομόρρος παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά, και παραμένει διδιάστατος.

## 1.2 Περί βελτιστοποίησης

Στο αγγλικό κείμενο παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση εννοιών βελτιστοποίησης, καθώς και του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη.

## 1.3 Περί υδροδυναμικής ευστάθειας

Στο αγγλικό κείμενο παρουσιάζονται βασικές έννοιες τοπικής και ολικής υδροδυναμικής ευστάθειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

## 1.4 Έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο

Ως έλεγχος μιας ροής θεωρείται η εφαρμογή μιας μεθόδου διαμόρφωσης της ροής, με στόχο την επίτευξη ενός ωφέλιμου αποτελέσματος. Όπως έχει αναλυθεί στο σύγγραμμα του Gad-el-Hak (2007), τα σχήματα ελέγχου μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες: (α) παθητικός έλεγχος, (β) ενεργός έλεγχος ανοικτού βρόχου, και (γ) ενεργός έλεγχος ανατροφοδότησης (κλειστού βρόχου). Στην περίπτωση παθητικού ελέγχου, δεν απαιτείται εισαγωγή ενέργειας, αλλά το υπό μελέτη δυναμικό σύστημα μετασχηματίζεται κατάλληλα (π.χ. μέσω διαμόρφωσης της γεωμετρίας), με στόχο την επίτευξη της επιθυμητής δυναμικής συμπεριφοράς. Στην περίπτωση ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου, απαιτείται μια προδιαγεγραμμένη παροχή ενέργειας, και κατά συνέπεια η τιμή της δράσης ελέγχου δεν εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Τέλος, στην περίπτωση ενεργού ελέγχου κλειστού βρόχου, η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, η οποία αναπαριστάται από ένα ή περισσότερα σήματα, μετρούμενα από αισθητήρες, ανατροφοδοτείται σε έναν ελεγκτή, ο οποίος ορίζει τη δράση ελέγχου στον ενεργοποιητή. Με αυτόν τον τρόπο, η κατάσταση του δυναμικού συστήματος καθοδηγεί τον έλεγχό του.

Διάφορες στρατηγικές ελέγχου που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ροής γύρω από κύλινδρο έχουν εφαρμοστεί σε πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες. Οι εν λόγω στρατηγικές περιλαμβάνουν τη χρήση παθητικού ελέγχου και ενεργού ελέγχου (ανοικτού και κλειστού βρόχου). Μια εκτενής επισκόπηση των μεθόδων ελέγχου για τη ροή γύρω από κύλινδρο παρουσιάζεται στην εργασία των Choi et al. (2008). Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της χρήσης παθητικού ελέγχου, ο Roshko (1955) τοποθέτησε μια διαχωριστική

πλάκα στον ομόρρου του κυλίνδρου, ενώ οι Strykowski and Sreenivasan (1990) και Mittal and Raghuvanshi (2001) έκαναν χρήση ενός μικρότερου κυλίνδρου (στον ομόρρου του μεγαλύτερου). Πιο πρόσφατα, οι You and Moin (2007) και Legendre et al. (2009) εφάρμοσαν υδροφοβικά υλικά στην επιφάνεια του κυλίνδρου, τα οποία, λόγω της προκαλούμενης ολίσθησης του ρευστού, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των ταλαντώσεων των δυνάμεων αντίστασης και άνωσης, και σε ορισμένες περιπτώσεις οδήγησαν στην πλήρη σταθεροποίηση της ροής. Στο πλαίσιο ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου, οι Tokumaru and Dimotakis (1991, 1993) και Mittal and Kumar (2003) εφάρμοσαν περιστροφή του κυλίνδρου, ενώ οι Delaunay and Kaiktsis (2001) και Dong et al. (2008) έκαναν χρήση αναρρόφησης/εμφύσησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Ιδιαίτερη μνεία οφείλει να γίνει στην εργασία των Milano and Koumoutsakos (2001), οι οποίοι χρησιμοποίησαν στην επιφάνεια του κυλίνδρου (α) εφαπτομενικά κινούμενους ιμάντες (σταθερής ταχύτητας) και (β) χρονικά σταθερή παροχή αναρρόφησης/εμφύσησης, υπό τον περιορισμό της μηδενικής καθαρής παροχής. Καί τα δύο σχήματα ελέγχου βελτιστοποιήθηκαν με χρήση γενετικού αλγορίθμου, με στόχο τη μείωση της δύναμης αντίστασης. Άλλες μέθοδοι ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου είναι η θέρμανση του κυλίνδρου (Lecordier et al. 1991) και η εφαρμογή μιας δύναμης Lorentz (Chen and Aubry, 2003). Τέλος, για τη ροή γύρω από κύλινδρο, έχουν υλοποιηθεί σχήματα ενεργού ελέγχου κλειστού βρόχου με εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης (Park et al., 1994, Min and Choi, 1999), καθώς και χρονικά μεταβαλλόμενης περιστροφικής ταλάντωσης του κυλίνδρου (Lee et al., 2009).

## **1.5 Μέθοδοι ελέγχου που εφαρμόζονται στην παρούσα διατριβή**

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μερική ή πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Δεδομένου ότι η ολική αστάθεια επηρεάζεται από τις ιδιότητες τοπικής ευστάθειας του ομόρρου, ο έλεγχος της ροής αποσκοπεί σε κατάλληλη διαμόρφωση της κατανομής των ταχυτήτων εγγύς του κυλίνδρου. Για αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιούνται δύο κατάλληλες δράσεις ελέγχου, με εφαρμογή στην επιφάνεια του κυλίνδρου: (α) συνθηκών ολίσθησης, και (β) αναρρόφησης/εμφύσησης.

Η πρώτη μέθοδος αφορά στην εφαρμογή συνθηκών ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου, χρησιμοποιώντας ένα σχήμα παθητικού ελέγχου. Η υλοποίηση της παραπάνω διάταξης καθίσταται δυνατή με χρήση υδροφοβικών και υπερυδροφοβικών υλικών, τα οποία επιτρέπουν την ολίσθηση του ρευστού ως προς μια στερεή επιφάνεια. Σύμφωνα με τον Rothstein (2010), η χρήση υδροφοβικών και υπερυδροφοβικών επιφανειών επιτρέπει τη μείωση της αντίστασης και την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Οι You and Moin (2007), Legendre et al. (2009), Muralidhar et al. (2011) και Seo and Song (2012) μελέτησαν τη ροή γύρω από υδροφοβικό κύλινδρο, έχοντας ως στόχο τον προσδιορισμό της επιρροής που έχουν τα υδροφοβικά υλικά στην ευστάθεια της ροής. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή αυτών των υλικών στην επιφάνεια του κυλίνδρου συντελεί στη μείωση της έντασης των δυνάμεων αντίστασης και άνωσης (You and Moin, 2007), και μπορεί να οδηγήσει στην πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών (Legendre et al., 2009). Επιπλέον, ένα βασικό πλεονέκτημα της εφαρμογής υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι η απαλλαγή από ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς και η διατήρηση της υφιστάμενης γεωμετρίας. Από την άλλη πλευρά όμως, δεδομένου ότι το κόστος κατασκευής των υδροφοβικών και υπερυδροφοβικών επιφανειών είναι ακόμη αρκετά υψηλό, κύριος στόχος κατά τον σχεδιασμό του σχήματος ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του σχετικού κόστους, γεγονός το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της έκτασης της υδροφοβικής περιοχής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί εάν, με χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης, μπορεί να επιτευχθεί μερική ή πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών, χρησιμοποιώντας χαμηλότερα επιπέδα δράσης ελέγχου,

σε σύγκριση με τα ευρήματα αντίστοιχων μελετών. Ο παραπάνω στόχος θα επιχειρηθεί να επιτευχθεί με εφαρμογή αυτών των υλικών σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου (τμηματική υδροφοβικότητα).

Η δεύτερη μέθοδος ελέγχου της ροής γύρω από κύλινδρο που διερευνάται στην παρούσα εργασία είναι η εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου με χρήση ενός σχήματος ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου. Η σταθεροποιητική/αποσταθεροποιητική επίδραση της αναρρόφησης/εμφύσησης έχει διερευνηθεί εκτενώς στις εργασίες των Delaunay and Kaiktsis (2001) και Dong et al. (2008). Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία των Delaunay and Kaiktsis (2001) αποδείχτηκε ότι ο δρόμος δινών μπορεί να αναιρεθεί πλήρως είτε με χρήση αναρρόφησης είτε με χρήση εμφύσησης, στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Εντούτοις, η εργασία των Delaunay and Kaiktsis (2001) κατέδειξε ότι η δράση ελέγχου που απαιτείται στην περίπτωση της αναρρόφησης είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται στην περίπτωση εμφύσησης. Στην παρούσα εργασία, η εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης δεν περιορίζεται στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, αλλά επεκτείνεται, τόσο στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, όσο και στην ενδιάμεση περιοχή. Εδώ, στόχος είναι η εύρεση της κατάλληλης συνολικής κατανομής αναρρόφησης/εμφύσησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου, η οποία θα οδηγήσει σε μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών, με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου (χρήση της ελάχιστης δυνατής συνολικής παροχής μάζας αναρρόφησης/εμφύσησης). Για την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων άντλησης του ρευστού, επιβάλλεται ο περιορισμός της μηδενικής καθαρής παροχής μάζας, ενώ η έκταση των περιοχών αναρρόφησης και εμφύσησης προσδιορίζεται με χρήση βελτιστοποίησης.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διαρθρώνεται ως ακολούθως. Στο κεφάλαιο (2) παρουσιάζεται η υπολογιστική μοντελοποίηση του προβλήματος. Στο κεφάλαιο (3) παρουσιάζεται ένα σχήμα παθητικού ελέγχου, στο οποίο εφαρμόζεται χρονικά σταθερή υδροφοβικότητα στην επιφάνεια του κυλίνδρου, και τα αντίστοιχα αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Στο κεφάλαιο (4) παρουσιάζεται ένα σχήμα ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου στο οποίο εφαρμόζεται χρονικά σταθερή αναρρόφηση/εμφύσηση στην επιφάνεια του κυλίνδρου, και αντίστοιχα αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Καί στα δύο προαναφερθέντα κεφάλαια, (3) και (4), τα αποτελέσματα ερμηνεύονται με χρήση υπολογισμών υδροδυναμικής ευστάθειας. Στο κεφάλαιο (5) εφαρμόζονται δύο σχήματα ενεργού ελέγχου ανατροφοδότησης, στα οποία γίνεται χρήση χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης και χρονικά μεταβαλλόμενης υδροφοβικότητας. Τέλος, στο κεφάλαιο (6) παρουσιάζονται οι καινοτομίες της παρούσας εργασίας και η συμβολή της στην επιστημονική έρευνα, ενώ στο κεφάλαιο (7) γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων της εργασίας, καθώς και παρουσίαση προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

## Κεφάλαιο 2: Υπολογιστική μοντελοποίηση

Θεωρούμε κύλινδρο απείρου μήκους, διαμέτρου  $D$ , ο οποίος είναι βυθισμένος εντός μιας ομοιόμορφης ροής Νευτώνιου ρευστού ταχύτητας  $U_{inf}$ . Για τον έλεγχο της ροής εφαρμόζονται δύο δράσεις ελέγχου στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Για την πρώτη δράση ελέγχου εφαρμόζονται συνθήκες ολίσθησης, ενώ για τη δεύτερη εφαρμόζεται αναρρόφηση/εμφύσηση. Οι παραπάνω δράσεις ελέγχου εφαρμόζονται αρχικά σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, και στη συνέχεια σε τμήμα αυτής. Στην παρούσα υπολογιστική μελέτη, χρησιμοποιείται η μέθοδος της άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης. Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει ελέγχους ακρίβειας χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, καθώς και σύγκριση των παρόντων αποτελεσμάτων με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.

### 2.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η ροή γύρω από κύλινδρο περιγράφεται από τις διδιάστατες εξισώσεις Navier–Stokes, οι οποίες παρουσιάζονται εδώ στην αδιάστατη μορφή τους:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

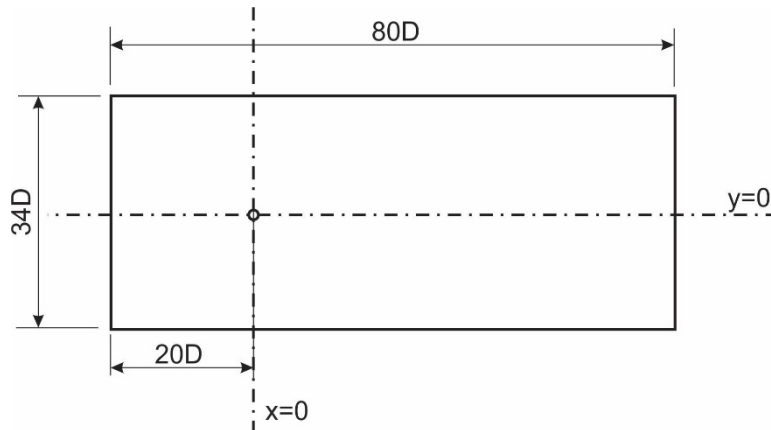
$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \vec{u} \quad (2)$$

όπου  $\vec{u} = (u, v)$  είναι το διάνυσμα της ταχύτητας και  $p$  η στατική πίεση. Όλες οι μεταβλητές ορίζονται σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων  $(x, y)$ , η αρχή των αξόνων του οποίου βρίσκεται στο κέντρο του κυλίνδρου. Οι μεταβλητές του προβλήματος έχουν αδιαστατοποιηθεί με χρήση κατάλληλης κλίμακας με βάση τη διάμετρο του κυλίνδρου,  $D$ , την ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος,  $U_{inf}$ , και την πυκνότητα του ρευστού,  $\rho$ , ενώ η αδιάστατη μορφή της συχνότητας είναι ο αριθμός Strouhal,  $St = \frac{fD}{U_{inf}}$ . Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως,

$$Re = \frac{U_{inf} D}{\nu}, \text{ όπου } \nu \text{ είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.}$$

Στην παρούσα διατριβή, η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων υλοποιείται με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS CFX. Εδώ, η διακριτοποίηση γίνεται με χρήση μεθόδου πεπερασμένων όγκων δεύτερης τάξεως, ενώ οι πεπερασμένοι όγκοι που χρησιμοποιούνται είναι τετράπλευροι.

Θεωρούμε ρεύμα ταχύτητας  $U_{inf}$  με κατεύθυνση από αριστερά προς δεξιά. Το υπολογιστικό πεδίο, το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 1, εκτείνεται  $20D$  αριστερά από το κέντρο του κυλίνδρου και  $60D$  δεξιά από το κέντρο του κυλίνδρου, ενώ τα πλευρικά όριά του εκτείνονται  $17D$  από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας,  $y=0$ . Η επάρκεια των ορίων του υπολογιστικού πεδίου έχει αποδειχθεί από προηγούμενες σχετικές μελέτες, συγκεκριμένα Kaiktsis et al. (2007), Evangelinos and Karniadakis (1999) και Delaunay and Kaiktsis (2001).



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση του πεδίου ροής.

Στα όρια του υπολογιστικού πεδίου εφαρμόζονται οι ακόλουθες συνθήκες:

$$\text{Σύνορο εισροής και πλάγια σύνορα: } u = U_{inf} = 1, \quad v = 0$$

Σύνορο εκροής:  $p=0$ , συνοριακή συνθήκη Neumann για την ταχύτητα.

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του κυλίνδρου κατηγοριοποιούνται σε τρεις περιπτώσεις, ανάλογα με την αντίστοιχη δράση ελέγχου:

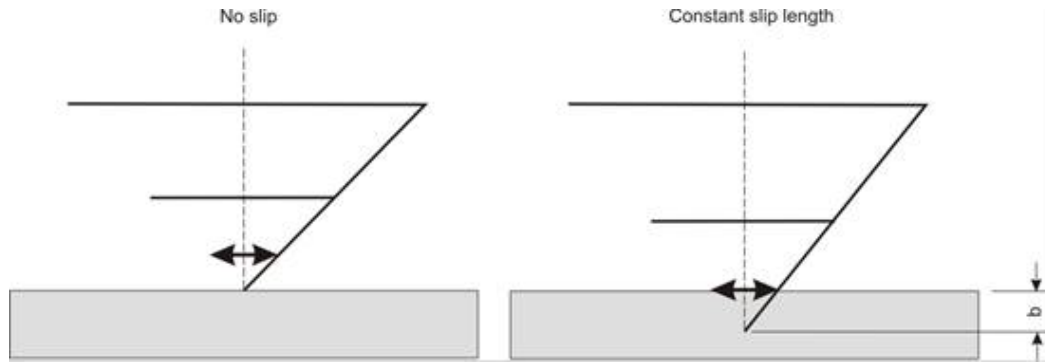
(α) Για την περίπτωση που στη ροή δεν εφαρμόζεται δράση ελέγχου, εφαρμόζεται συνοριακή συνθήκη μη ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου,  $u=v=0$ .

(β) Όταν εφαρμόζονται συνθήκες ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου ή σε τμήμα αυτής, υιοθετείται το μοντέλο Navier (Zhang et al., 2012). Αυτό θεωρεί ότι το ρευστό ρέει σε επαφή με μια υποθετική (μη υδροφοβική επιφάνεια), η οποία απέχει απόσταση  $b$  από το πραγματικό στερεό σύνορο. Η απόσταση  $b$  ορίζει το μήκος ολίσθησης, και η φυσική του σημασία αποτυπώνεται στην Εικόνα 2. Σύμφωνα με το μοντέλο Navier, η ταχύτητα ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι ανάλογη των τοπικών τιμών της διατμητικής τάσης και του μήκους ολίσθησης. Κατά συνέπεια, η συνοριακή συνθήκη στην επιφάνεια του κυλίνδρου ορίζεται για τις συνιστώσες της αδιάστατης ταχύτητας στη γωνιακή διεύθυνση,  $u_\theta$ , και στην ακτινική διεύθυνση,  $u_r$ , ως ακολούθως:

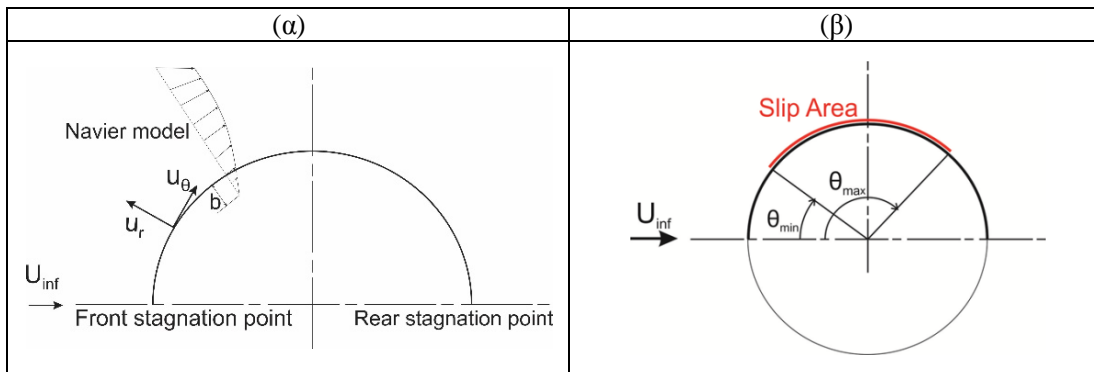
$$u_\theta = \tau b^* Re = b^* \frac{\partial u_\theta}{\partial r}, \quad u_r = 0 \quad (3)$$

όπου  $\tau$  είναι η αδιάστατη διατμητική τάση στο τοίχωμα του κυλίνδρου και  $b^* = \frac{b}{D}$  το

αδιάστατο μήκος ολίσθησης. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, εφαρμόζονται συνθήκες ολίσθησης αρχικά σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου (Εικόνα 3α), και στη συνέχεια σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου, συγκεκριμένα σε ένα τόξο που εκτείνεται από  $\theta_{min}$  έως  $\theta_{max}$ , στις δύο πλευρές εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας (Εικόνα 3β). Στη δεύτερη περίπτωση, εφαρμόζεται συνθήκη μη ολίσθησης στο υπόλοιπο (μη υδροφοβικό) τμήμα του κυλίνδρου. Σημειώνεται ότι το μήκος ολίσθησης θεωρείται σταθερό κατά μήκος του εκάστοτε υδροφοβικού τμήματος.



Εικόνα 2. Ορισμός του μήκους ολίσθησης,  $b$ , σε υδροφοβική επιφάνεια.



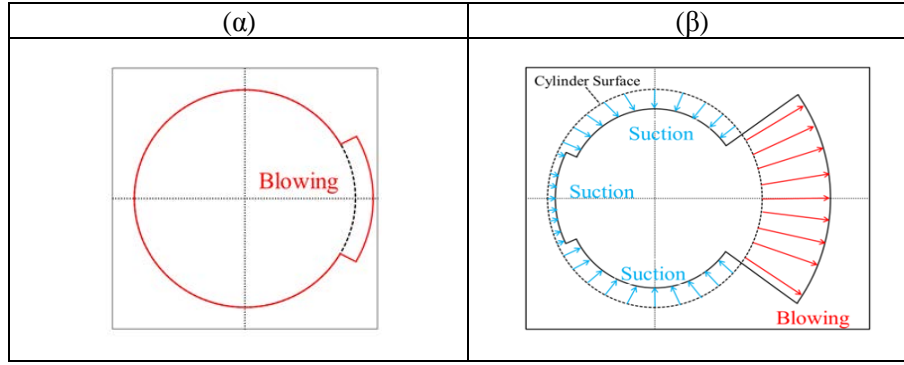
Εικόνα 3. (α) Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας εγγύς της επιφάνειας του κυλίνδρου, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος ολίσθησης  $b$ . (β) Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε τόξο που εκτείνεται από  $\theta_{min}$  έως  $\theta_{max}$ .

(γ) Όταν εφαρμόζεται αναρρόφηση/εμφύσηση, η αντίστοιχη κατανομή της αναρρόφησης/εμφύσησης ορίζεται στην επιφάνεια του κυλίνδρου, και η διεύθυνση της ταχύτητας είναι ακτινική. Η παρούσα εργασία μελετά δύο περιπτώσεις. Αρχικά, εφαρμόζεται αναρρόφηση ή εμφύσηση σε ένα τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου (Εικόνα 4α), και στη συνέχεια εφαρμόζεται αναρρόφηση σε ένα τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου και εμφύσηση στην υπόλοιπη επιφάνεια (Εικόνα 4β). Και στις δύο περιπτώσεις, η δράση ελέγχου ποσοτικοποιείται με βάση την ογκομετρική παροχή εμφύσησης,  $Q_{suc}$ , που ορίζεται ως ακολούθως:

$$Q_{suc} = -\int_{-\pi}^{\pi} u(\theta)Rd\theta \quad (4)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα του κυλίνδρου. Θεωρώντας την τιμή αναφοράς της ογκομετρικής παροχής,  $Q_{ref} = U_{inf}D$ , ορίζεται ο αδιάστατος συντελεστής εμφύσησης,  $C_{suc}$ , ως ακολούθως:

$$C_{suc} = \frac{Q_{suc}}{Q_{ref}} \quad (5)$$



Εικόνα 4. (α) Εφαρμογή εμφύσησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου. (β) Εφαρμογή αναρρόφησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου και εμφύσησης στην υπόλοιπη επιφάνεια.

Ένα κύριο χαρακτηριστικό σε μια ροή γύρω από μη αεροδυναμικό σώμα είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα. Η συνολική δύναμη που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του κυλίνδρου ορίζεται ως το άθροισμα της δύναμης πίεσης και της διατμητικής δύναμης,

$F_{Total} = F_{Pressure} + F_{Viscous}$ , οι οποίες ορίζονται ως ακολούθως:

$$F_{Pressure} = - \int_{Cylinder} p \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (6)$$

$$F_{Viscous} = \int_{Cylinder} \mu \cdot \nabla \vec{u} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (7)$$

όπου  $\nabla \vec{u}$ : η κλίση της ταχύτητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου,  $\vec{n}$ : το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα και  $\mu$ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού. Δεδομένου ότι  $F_x$  και  $F_y$  είναι οι συνιστώσες της συνολικής δύναμης ανά μονάδα μήκους του κυλίνδρου,  $F_{total}$ , οι συντελεστές αντίστασης,  $C_D$ , και άωσης,  $C_L$ , ορίζονται ως ακολούθως:

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho U_\infty^2 D}, \quad C_L = \frac{2F_y}{\rho U_\infty^2 D} \quad (8)$$

Στην παρούσα μελέτη, οι δυνάμεις αντίστασης και άωσης υπολογίζονται κατόπιν επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που αφορούν στα στιγμιαία πεδία ροής.

## 2.2 Ανάλυση ακρίβειας

### 2.2.1 Ανάλυση ακρίβειας χωρικής διακριτοποίησης

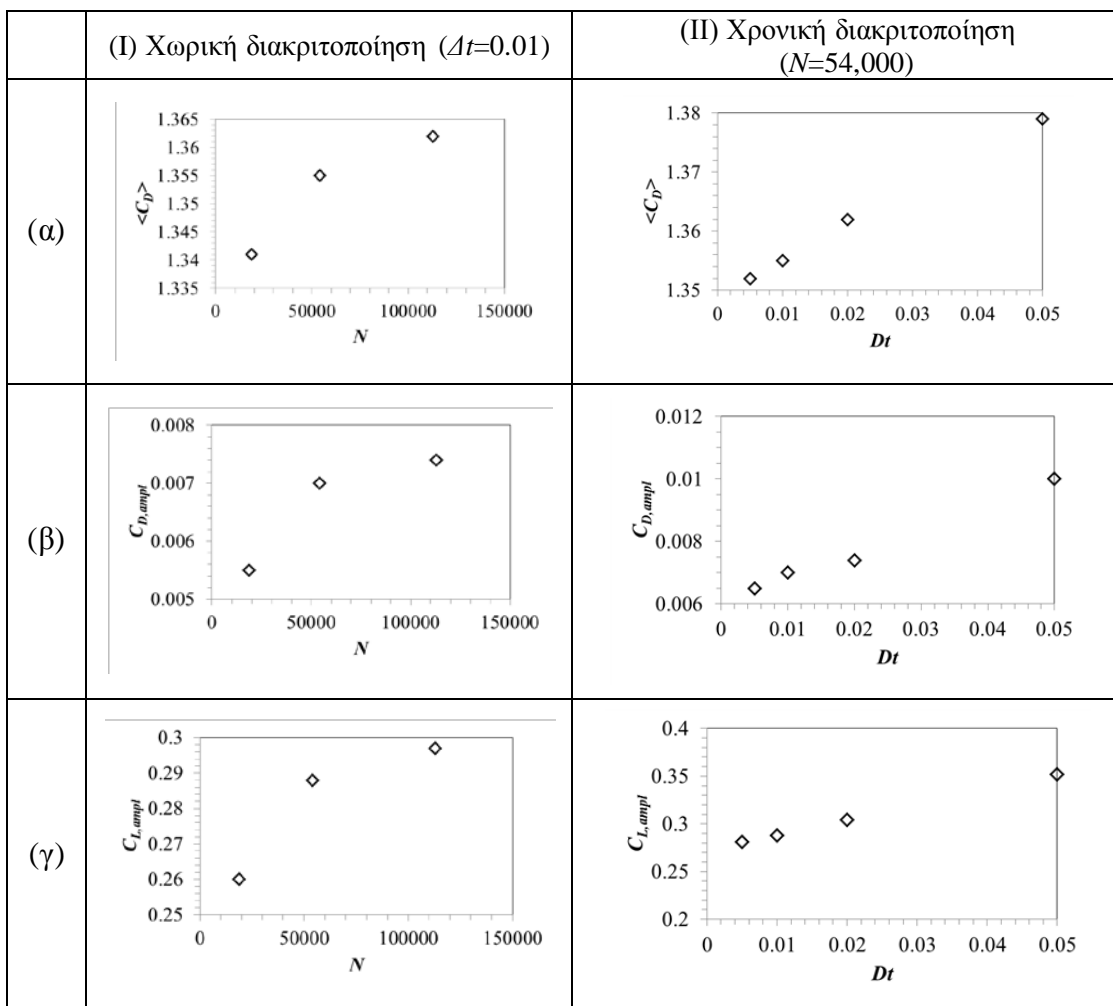
Η ανάλυση της ακρίβειας της χωρικής διακριτοποίησης γίνεται για την τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t=0.01$ . Για πλέγματα αποτελούμενα από διαφορετικό αριθμό πεπερασμένων όγκων, υπολογίζονται οι συντελεστές αντίστασης και άωσης για ροή χωρίς δράση ελέγχου για την τιμή του αριθμού Reynolds  $Re=90$ . Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 51α παρουσιάζεται η μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , στην Εικόνα 51β το πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$  και στην Εικόνα 51γ το πλάτος του συντελεστή άωσης,  $C_{L,ampl}$ . Καί για τα τρία μεγέθη, καταδεικνύεται ότι οι διαφορές ανάμεσα στο πλέγμα που αποτελείται από 113,000 πεπερασμένους όγκους και στο πλέγμα που αποτελείται από 54,000 πεπερασμένους όγκους είναι της τάξης του τρίτου ή τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Αυτή η παρατήρηση αποδεικνύει την επάρκεια ενός πλέγματος με 54,000 πεπερασμένους όγκους, το



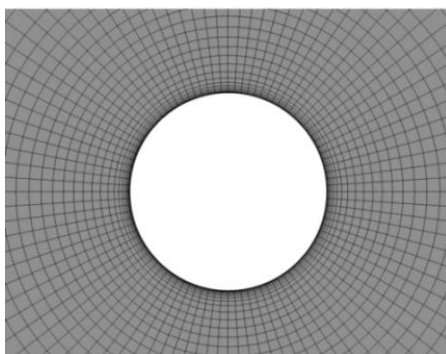
οποίο και χρησιμοποιείται ακολούθως στους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην επιφάνεια του κυλίνδρου εφάπτονται 100 πεπερασμένοι όγκοι, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6.

### 2.2.2 Ανάλυση ακρίβειας χρονικής διακριτοποίησης

Η ανάλυση της ακρίβειας της χρονικής διακριτοποίησης γίνεται για ένα πλέγμα αποτελούμενο από 54,000 πεπερασμένους όγκους. Συγκεκριμένα, ελέγχονται τέσσερις τιμές του χρονικού βήματος,  $\Delta t = 0.005, 0.01, 0.02, 0.05$ . Για αυτές τις περιπτώσεις, παρουσιάζονται στην Εικόνα 6II οι υπολογισθείσες τιμές της μέσης χρονικής τιμής του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , του πλάτους του συντελεστή αντίστασης και το πλάτους του συντελεστή άνωσης,  $C_{L, ampl}$ . Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η απόκλιση των μεγεθών για μια τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t=0.005$  από τα αντίστοιχα για την τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t=0.01$  είναι της τάξης του τρίτου δεκαδικού ψηφίου. Συνεπώς, η τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t=0.01$ , που χρησιμοποιείται σε όλη την έκταση της παρούσας εργασίας, οδηγεί σε αμελητέο σφάλμα χρονικής διακριτοποίησης.



Εικόνα 5.  $Re=90$ , ρή χωρίς δράση ελέγχου: (I) έλεγχος ακρίβειας χωρικής διακριτοποίησης για τιμή του χρονικού βήματος  $\Delta t=0.01$ , (II) έλεγχος ακρίβειας χρονικής διακριτοποίησης για πλέγμα αποτελούμενο από  $N=54,000$  πεπερασμένους όγκους. Υπολογισθέντα μεγέθη: (α) Μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης, (β) πλάτος του συντελεστή αντίστασης, και (γ) πλάτος του συντελεστή άνωσης.

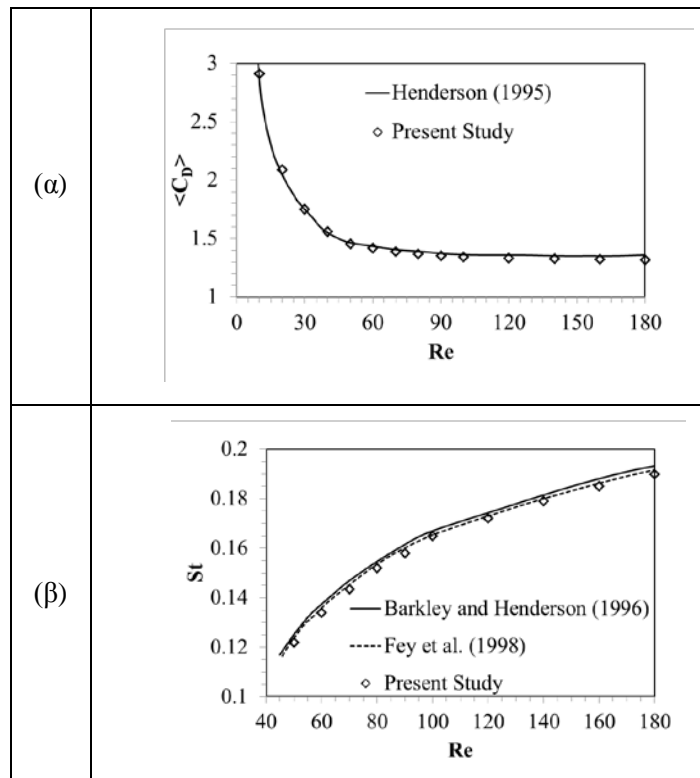


Εικόνα 6. Απεικόνιση λεπτομέρειας του πλέγματος εγγύς του κυλίνδρου. Στην επιφάνεια του κυλίνδρου εφάπτονται 100 πεπερασμένοι όγκοι.

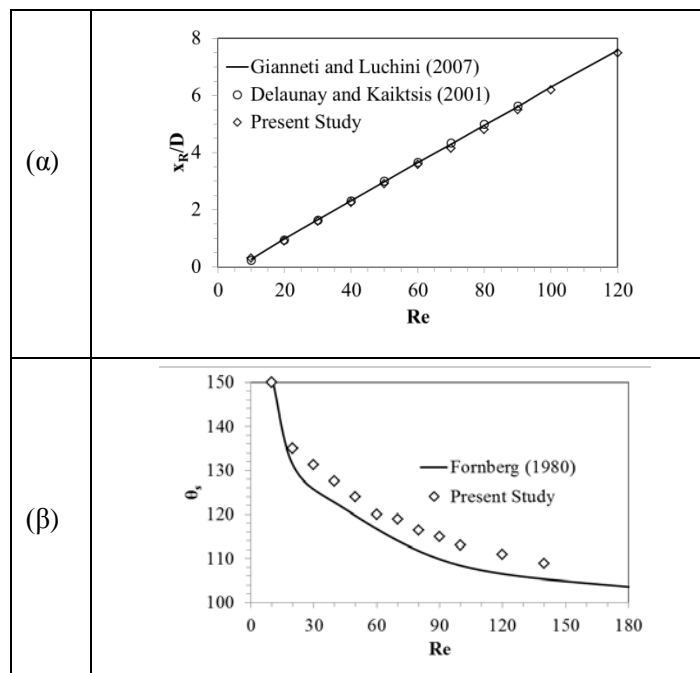
## 2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας

Η ακρίβεια των υπολογισμών της παρούσας διατριβής επικυρώνεται με σύγκριση των παρόντων αποτελεσμάτων για ροή χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, τόσο για τη μη γραμμική ροή, όσο και για τη βασική (αδιατάρακτη) ροή. Ο έλεγχος γίνεται για τιμές του αριθμού Reynolds από 10 έως 180, όπου η ροή παραμένει διδιάστατη.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν στη μη γραμμική ροή, για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds. Συγκεκριμένα, η Εικόνα 7α παρουσιάζει τη μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης για την παρούσα προσομοίωση και για αυτή του Henderson (1995), ενώ η Εικόνα 7β παρουσιάζει την αδιάστατη συχνότητα (αριθμός Strouhal) για την παρούσα προσομοίωση και για αυτές των Barkley and Henderson (1996) και των Fey et al. (1998). Καταδεικνύεται η πολύ καλή συμφωνία των παρόντων αποτελεσμάτων με αυτά των προηγούμενων μελετών. Επιπλέον, η Εικόνα 8 παρουσιάζει αποτελέσματα που αφορούν στη βασική ροή, για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds. Η Εικόνα 8α παρουσιάζει το αδιάστατοποιημένο μήκος των ζωνών ανακύκλωσης της παρούσας προσομοίωσης και των προσομοιώσεων των Delaunay and Kaiktsis (2001), και των Giannetti and Luchini (2007), καταδεικνύοντας, τόσο την πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων, όσο και την γνωστή γραμμική εξάρτηση του μήκους των ζωνών ανακύκλωσης από τον αριθμό Reynolds. Τέλος, στην Εικόνα 8β παρουσιάζεται η γωνία του σημείου αποκόλλησης (σε σχέση με το εμπρός σημείο ανακοπής) όπως προέκυψε από την παρούσα προσομοίωση και από αυτή του Fornberg (1980), και παρατηρείται απόκλιση μέχρι  $5^\circ$ . Σημειώνεται ότι η απόκλιση αυτή έχει παρατηρηθεί και σε άλλες εργασίες, φτάνοντας μέχρι  $15^\circ$  (Wu et al., 2004), ενώ τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βρίσκονται εγγύτερα στον μέσο όρο του εύρους των τιμών της βιβλιογραφίας.



Εικόνα 7. Μεταβολή υπολογισθέντων ροϊκών μεγεθών συναρτήσει του αριθμού Reynolds για μη γραμμική ροή γύρω από κύλινδρο χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, για την παρούσα εργασία και για αντίστοιχες της βιβλιογραφίας: (α) Μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , και (β) αριθμός Strouhal,  $St$ .



Εικόνα 8. Μεταβολή υπολογισθέντων ροϊκών μεγεθών συναρτήσει του αριθμού Reynolds για βασική ροή γύρω από κύλινδρο χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, για την παρούσα εργασία και για αντίστοιχες της βιβλιογραφίας: (α) Αδιάστατο μήκος των ζωνών ανακύκλωσης,  $x_R/D$ , και (β) γωνία σημείου αποκόλλησης της ροής,  $\theta_s$  (ως σημείο αναφοράς θεωρείται το εμπρός σημείο ανακοπής).



## Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα σχήμα παθητικού ελέγχου της ροής γύρω από κύλινδρο με εφαρμογή χρονικά σταθερής επιφανειακής υδροφοβικότητας, και στόχο την πλήρη ή μερική αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán. Αρχικά, η υδροφοβικότητα εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, και τα προκύπτοντα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με αυτά προηγούμενων μελετών. Εντούτοις, παρατηρείται ότι η εφαρμογή υδροφοβικότητας στην περιοχή μόνο του εμπρός ή μόνο του πίσω σημείου ανακοπής οδηγεί σε αποσταθεροποίηση της ροής. Βάσει αυτής της παρατήρησης, εφαρμόζεται υδροφοβικότητα μόνο σε ένα τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου, και αποδεικνύεται ότι σε αυτή την περίπτωση τα σταθεροποιητικά χαρακτηριστικά είναι ισχυρότερα από αυτά της περίπτωσης εφαρμογής υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Ακολούθως, τίθεται ο στόχος του ακριβούς προσδιορισμού ενός τμήματος της επιφάνειας του κυλίνδρου, ώστε με εφαρμογή υδροφοβικότητας μόνο σε αυτό να επιτυγχάνεται μερική ή πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Για τον σκοπό αυτόν διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καταδεικνύουν μείωση της απαιτούμενης δράσης ελέγχου κατά περίπου 50%, σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto χαρακτηρίζονται με υπολογισμούς τοπικής και ολικής υδροδυναμικής ευστάθειας.

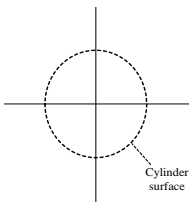
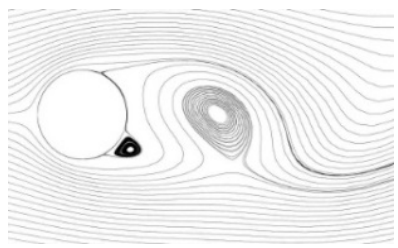
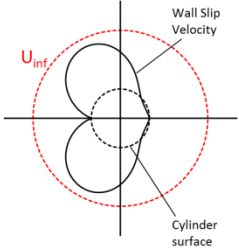
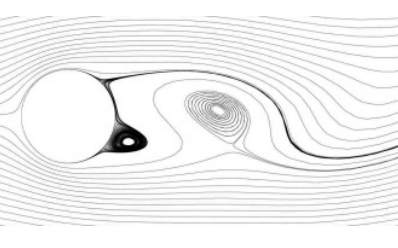
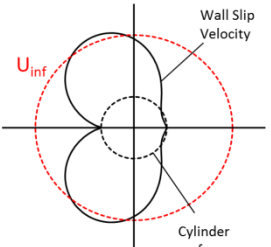
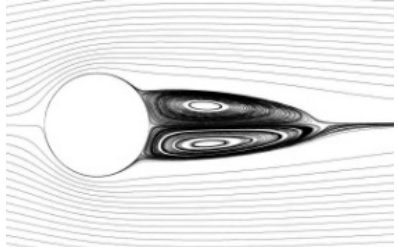
### 3.1 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου

Στο παρόν εδάφιο εφαρμόζονται συνθήκες ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds ( $Re=60, 90, 120, 180$ ), με στόχο να βρεθεί για καθεμία από αυτές η κρίσιμη τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης που οδηγεί στη σταθεροποίηση της ροής. Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει για τις εν λόγω τιμές του αριθμού Reynolds τις κρίσιμες τιμές του μήκους ολίσθησης, για τα παρόντα αποτελέσματα και αυτά των Legendre et al. (2009), καταδεικνύοντας την ελάχιστη απόκλιση μεταξύ τους. Επιπλέον, στον Πίνακα 1 καταγράφεται, για τις ίδιες τιμές του αριθμού Reynolds, η μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης, τόσο για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται υδροφοβικότητα στην επιφάνεια του κυλίνδρου, όσο και για την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας, συγκεκριμένα για την κρίσιμη τιμή του μήκους ολίσθησης. Η σύγκριση των δύο παραπάνω περιπτώσεων καταδεικνύει μια σημαντική μείωση του μέσου συντελεστή αντίστασης στην περίπτωση της εφαρμογής υδροφοβικότητας. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται η κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική (αδιατάρακτη) ροή, καθώς και οι γραμμές ροής στιγμιαίων πεδίων για την αντιπροσωπευτική τιμή του αριθμού Reynolds  $Re=120$ , για τρεις τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης. Διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης λαμβάνει χώρα αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης και σταθεροποίηση της ροής. Συγκεκριμένα δε, για  $b^*=0.2$ , παρατηρείται η πλήρης

αναίρεση του δρόμου δινών, και ο σχηματισμός των δύο ζωνών ανακύκλωσης στον εγγύ ομόρρο.

Πίνακας 1. Στατιστικά μεγέθη της ροής για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, για: (i) ροή χωρίς δράση ελέγχου, (ii) σταθεροποιημένη ροή για την κρίσιμη τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης. Περιλαμβάνονται αποτελέσματα και από προγενέστερη υπολογιστική μελέτη (Legendre et al., 2009).

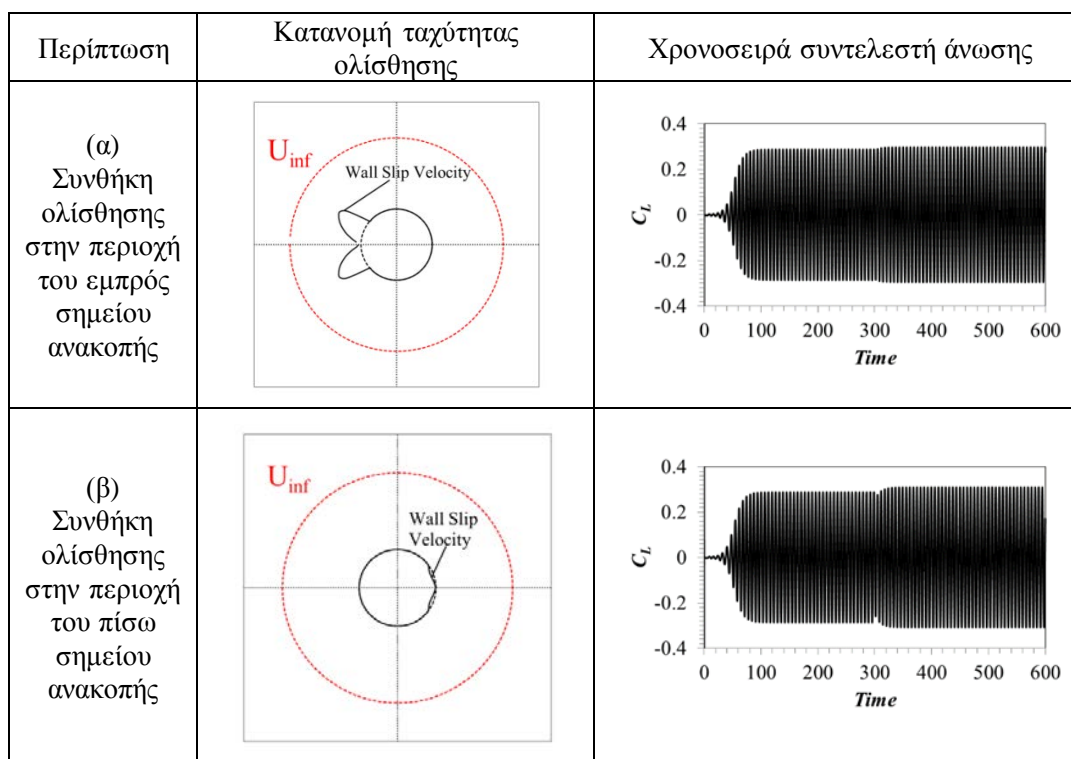
	Ροή χωρίς δράση ελέγχου (παρούσα μελέτη)	Σταθεροποιημένη ροή (παρούσα μελέτη)		Σταθεροποιημένη ροή (Legendre et al. 2009)
$Re$	$\langle C_D \rangle$	$b^*$	$C_D$	$b^*$
60	1.417	0.090	1.149	0.088
90	1.380	0.170	0.826	0.169
120	1.334	0.200	0.684	0.204
180	1.325	0.250	0.495	0.251

Περίπτωση	Κατανομή ταχύτητας ολίσθησης	Πεδίο γραμμών ροής
$b^*=0.00$		
$b^*=0.10$		
$b^*=0.20$		

Εικόνα 9. Αριθμητικά αποτελέσματα για  $Re=120$ , για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου και για τις περιπτώσεις εφαρμογής υδροφοβικότητας για δύο τιμές του  $b^*$ : Κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική ροή, και γραμμές ροής στιγμιαίου πεδίου.

### 3.2 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου

Στην Εικόνα 9 καταδεικνύεται ότι η ταχύτητα ολίσθησης είναι ιδιαίτερα χαμηλή στην περιοχή του εμπρός και του πίσω σημείου ανακοπής. Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επιρροή της υδροφοβικότητας στην ευστάθεια της ροής, εφαρμόζεται συνθήκη ολίσθησης μόνο σε αυτές τις δύο περιοχές. Οι σχετικοί υπολογισμοί γίνονται για  $Re=90$ ,  $b^*=0.17$ , και η υδροφοβικότητα εφαρμόζεται (α) σε μια περιοχή εκτεινόμενη  $\pm 37.5^\circ$  από το εμπρός σημείο ανακοπής, και (β) σε μια περιοχή εκτεινόμενη  $\pm 37.5^\circ$  από το πίσω σημείο ανακοπής. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται για τις δύο αυτές περιπτώσεις η κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης για τη βασική ροή, καθώς και η χρονοσειρά του συντελεστή άνωσης. Καί στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση του πλάτους ταλάντωσης του συντελεστή άνωσης, σε σύγκριση με τη μη υδροφοβική περίπτωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποσταθεροποίηση είναι μεγαλύτερη όταν η υδροφοβικότητα εφαρμόζεται στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, λόγω της αύξησης της έντασης της αντιρροής που προκαλούν οι αρνητικές ταχύτητες ολίσθησης (Εικόνα 10). Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή υδροφοβικότητας στις εν λόγω περιοχές όχι μόνο δεν είναι ευεργετική, αλλά τουναντίον αποσταθεροποιεί τη ροή. Συνεπώς, η χρήση υδροφοβικού υλικού σε αυτές τις περιοχές θα μπορούσε να αποφευχθεί, οδηγώντας, με βάση το ποσοστό της μη υδροφοβικής επιφάνειας, σε μείωση του σχετικού κόστους της τάξης του 40% .



Εικόνα 10.  $Re=90$ ,  $b^*=0.17$ : κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης,  $u_\theta$ , στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική ροή και χρονοσειρά του συντελεστή άνωσης, για τις περιπτώσεις εφαρμογής συνθήκης ολίσθησης: (α) στην περιοχή που εκτείνεται  $\pm 37.5^\circ$  από το εμπρός σημείο ανακοπής και (β) στην περιοχή που εκτείνεται  $\pm 37.5^\circ$  από το πίσω σημείο ανακοπής. Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ .

### 3.3 Ροή γύρω από υδροφοβικό κύλινδρο: διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Κύριος στόχος σε αυτό το εδάφιο είναι να επιτευχθεί η βέλτιστη αναίρεση του δρόμου διών νοη Κάρμάν σε ροή γύρω από κύλινδρο χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δυνατή δράση ελέγχου, στο πλαίσιο κατάλληλης εφαρμογής υδροφοβικότητας σε τμήμα της επιφάνειας. Οι παράμετροι του προβλήματος είναι οι γωνίες που ορίζουν την αρχή και το πέρας της υδροφοβικής περιοχής,  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$  (Εικόνα 3β), και το αντίστοιχο αδιάστατο μήκος ολίσθησης,  $b^*$ . Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος που τίθεται, διαμορφώνεται και επιλύεται ένα δικριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης, για τιμές του αριθμού Reynolds  $Re=90$  και  $Re=180$ .

#### 3.3.1 Μεταβλητές σχεδίασης

Στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης οι μεταβλητές σχεδίασης είναι το αδιάστατο μήκος ολίσθησης,  $b^*$ , και οι γωνίες που ορίζουν την υδροφοβική περιοχή,  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$ . Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται συμμετρικά ως προς τον οριζόντιο άξονα ( $y=0$ ). Το πεδίο αναζήτησης των μεταβλητών σχεδίασης είναι το ακόλουθο:

$$0 \leq b^* \leq 0.5, \quad 0 \leq \theta_{min} \leq 70^\circ, \quad 110^\circ \leq \theta_{max} \leq 180^\circ \quad (9)$$

#### 3.3.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις

Εισάγονται οι ακόλουθες αντικειμενικές συναρτήσεις:

(α) Αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$ :

Θεωρούμε  $M$  σημεία κατά μήκος του οριζόντιου άξονα συμμετρίας ( $y=0$ ), σε καθένα από τα οποία αναλύεται η χρονοσειρά της εγκάρσιας ταχύτητας,  $V$ , με βάση τιμές σε  $N$  χρονικές στιγμές. (Ο αριθμός  $N$  είναι επαρκώς μεγάλος, και αντιστοιχεί σε αρκετές περιόδους της ροής.) Η αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  ορίζεται ως ο μέσος όρος των τυπικών αποκλίσεων,  $S_j$ , των χρονοσειρών της εγκάρσιας ταχύτητας στα  $M$  σημεία:

$$\overline{V}_{x_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{t_i, x_j} \quad (10)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{t_i, x_j} - \overline{V}_{x_j})^2} \quad (11)$$

$$J_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M S_j \quad (12)$$

όπου  $V_{t_i, x_j}$  είναι η εγκάρσια ταχύτητα στο σημείο  $x_j$ , υπολογισμένη τη χρονική στιγμή  $t_i$ ,  $\overline{V}_{x_j}$  η αντίστοιχη μέση τιμή, και  $S_j$  η τυπική της απόκλιση στο σημείο  $x_j$ . Στην παρούσα εργασία



θεωρούμε  $M=100$ , αριθμός που αντιστοιχεί σε ισαπέχοντα σημεία, κατά μήκος του οριζόντιου άξονα συμμετρίας ( $y=0$ ), στην περιοχή του ομόρρου, για  $1 < x/D < 21$ .

Ένας ασταθής ομόρρος χαρακτηρίζεται από μη μηδενικές στιγμιαίες εγκάρσιες ταχύτητες,  $V$ , κατά μήκος του οριζόντιου άξονα συμμετρίας του, το μέγεθος των οποίων είναι αντιπροσωπευτικό της έντασης της αντίστοιχης ολικής αστάθειας. Από την άλλη πλευρά, ένας ευσταθής ομόρρος είναι συμμετρικός ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας ( $V=0$ ). Για αυτόν τον λόγο, αναμένεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_1$  να μειώνεται σε περιπτώσεις όπου η δράση ελέγχου έχει σταθεροποιητική επίδραση στη ροή, και να μηδενίζεται στην περίπτωση της πλήρους αναίρεσης του δρόμου δινών.

(β) Αντικειμενική συνάρτηση  $J_2$ :

Η αντικειμενική συνάρτηση  $J_2$  ποσοτικοποιεί τη δράση ελέγχου, η οποία αυξάνεται, τόσο με την αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης,  $b^*$ , όσο και με την αύξηση του ημιέυρους του συνολικού τόξου όπου εφαρμόζεται συνθήκη ολίσθησης. Έτσι, το γινόμενο των παραπάνω δύο μεγεθών ορίζει την αντικειμενική συνάρτηση  $J_2$ :

$$J_2 = b^* \frac{(\theta_{max} - \theta_{min})}{2} = \frac{1}{2} b^* \varphi \quad (13)$$

όπου η έκταση της υδροφοβικής περιοχής,  $\varphi = \theta_{max} - \theta_{min}$  εκφράζεται σε ακτίνια.

### 3.3.3 Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών των τριών μεταβλητών σχεδίασης ( $b^*$ ,  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{max}$ ) οι οποίοι ελαχιστοποιούν ταυτόχρονα τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις,  $J_1$ ,  $J_2$ . Εδώ, το πρόβλημα επιλύεται για δύο αντιπροσωπευτικές τιμές του αριθμού Reynolds,  $Re=90$  και  $Re=180$ , στην περιοχή δηλαδή όπου η ροή είναι διδιάστατη. Στο πλαίσιο της παρούσας βελτιστοποίησης, κάθε άτομο αντιστοιχεί σε μια διαφορετική συνθήκη ολίσθησης που εφαρμόζεται σε ένα διαφορετικό τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου. Για κάθε άτομο υπολογίζονται οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής ANSYS CFX, ο οποίος είναι εδώ σε σύζευξη με έναν κώδικα βελτιστοποίησης βασισμένο σε γενετικούς αλγορίθμους. Στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης, κάθε γενιά αποτελείται από 20 άτομα, ενώ η σύγκλιση στο τελικό μέτωπο Pareto ολοκληρώθηκε μετά από 22 γενιές. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε προσομοίωση υλοποιήθηκε σε εικοσιτετάρσερις παράλληλους υπολογιστικούς πυρήνες, με αντίστοιχη απαίτηση σε υπολογιστικό χρόνο περί τις 2.5 ώρες.

### 3.3.5 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

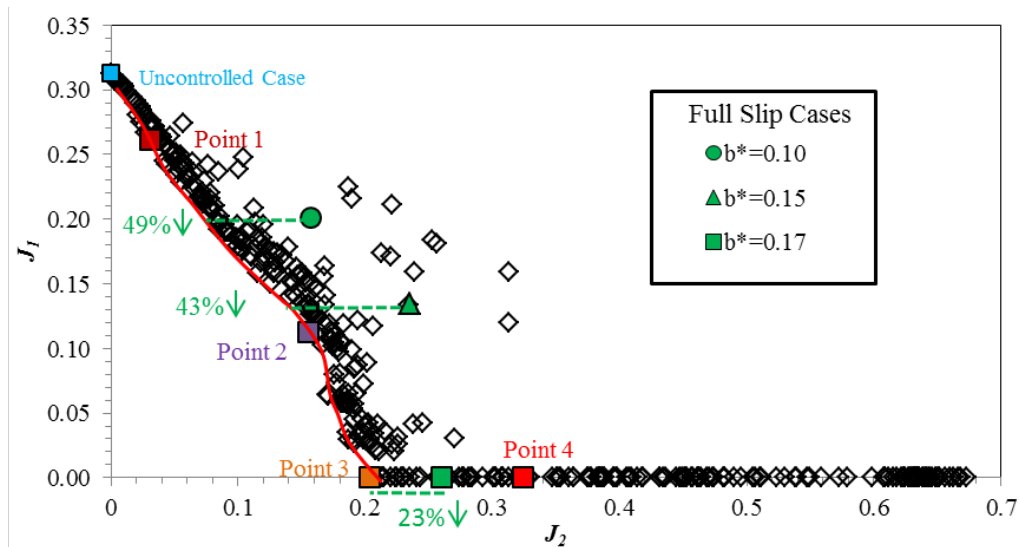
Τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης για  $Re=90$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 11, καταδεικνύοντας ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου (αύξηση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_2$ ) έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της ροής (μηδενισμός των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_1$ ). Στην Εικόνα 11 συμπεριλαμβάνονται, επιπρόσθετα, λύσεις που αντιστοιχούν σε εφαρμογή υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, ενώ σημειώνεται και η αντίστοιχη μείωση της δράσης ελέγχου που προκύπτει όταν εφαρμοστεί βέλτιστη τμηματική υδροφοβικότητα (για ίδια επίπεδα αστάθειας ( $J_1$ )).

Τέσσερις αντιπροσωπευτικές λύσεις (οι τρεις εκ των οποίων ανήκουν στο μέτωπο Pareto), καθώς και η περίπτωση της ροής χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, σημειώνονται στην Εικόνα 11 με έγχρωμα τετράγωνα. Οι αντίστοιχες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και των μεταβλητών σχεδίασης αναγράφονται στον Πίνακα 2. Στον Πίνακα 2 συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση που αντιστοιχεί σε σταθεροποίηση της ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, για την κρίσιμη τιμή του μήκους ολίσθησης. Ο Πίνακας 2 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου συνίσταται κυρίως στην αύξηση του μήκους ολίσθησης. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η Εικόνα 12 παρουσιάζει την κατανομή της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου (για τη βασική ροή) και ισοϋψείς του πεδίου στροβιλότητας στιγμιαίου πεδίου ροής, ενώ η Εικόνα 13 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των συντελεστών αντίστασης και άωσης. Η Εικόνα 13 καταδεικνύει ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου οδηγεί σε μείωση του πλάτους ταλάντωσης των συντελεστών αντίστασης και άωσης, και μηδενισμό του στην περίπτωση της πλήρους αναίρεσης του δρόμου δινών, ενώ μείωση παρουσιάζει και η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης. Με βάση την Εικόνα 13, η μείωση του συντελεστή αντίστασης με την επιβολή της δράσης ελέγχου είναι άμεση. Αυτό πρέπει να αποδοθεί στην άμεση μετατόπιση του σημείου αποκόλλησης της ροής προς την περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, καθώς και στη σημαντική μείωση των διαμητικών τάσεων στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι, η αύξηση του μήκους ολίσθησης επιφέρει τα ακόλουθα: (α) την άμεση μείωση της αντίστασης μορφής, εξαιτίας της μείωσης της ασυμμετρίας στην κατανομή της πίεσης, η οποία οφείλεται στην αύξηση της τιμής της γωνίας αποκόλλησης, και (β) την άμεση μείωση της αντίστασης τριβής, εξαιτίας της μείωσης των τιμών της διαμητικής τάσης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι, η άμεση μείωση της δύναμης αντίστασης με την επιβολή της συνθήκης ολίσθησης οφείλεται στην άμεση μείωση και των δύο συνιστωσών αυτής.

Ειδικότερα, η λύση που αντιστοιχεί σε σταθεροποίηση της ροής με χρήση της ελάχιστης δράσης ελέγχου χαρακτηρίζεται από ένα μήκος ολίσθησης  $b^*=0.207$ , το οποίο είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της περίπτωσης εφαρμογής υδροφοβικότητας σε όλο τον κύλινδρο ( $b^*=0.17$ ). Εντούτοις, η βέλτιστη λύση χαρακτηρίζεται από μείωση της συνολικής δράσης ελέγχου, η οποία οφείλεται στη σημαντική μείωση της έκτασης της υδροφοβικής περιοχής, η οποία εν προκειμένω εκτείνεται από  $\theta_{min}=33.57^\circ$  έως  $\theta_{max}=146.08^\circ$ . Συνεπώς, το μειονέκτημα της μικρής αύξησης του μήκους ολίσθησης αντισταθμίζεται από τη μείωση της έκτασης της υδροφοβικής περιοχής, οδηγώντας σε μείωση της συνολικής δράσης ελέγχου κατά 23%.

Επισημαίνεται ότι, στο πλαίσιο της διαθέσιμης σήμερα τεχνολογίας, μια ρεαλιστική τιμή του επιτυγχάνομενου με χρήση υδροφοβικών επιφανειών μήκους ολίσθησης είναι τάξης 100  $\mu\text{m}$ . Κατά συνέπεια, στην περίπτωση χρήσης χρονικά σταθερής συνθήκης υδροφοβικότητας για  $Re=90$ , μπορεί να επιτευχθεί αναίρεση του δρόμου δινών για κυλίνδρους μεγέθους έως  $D=0.58$  mm στην περίπτωση πλήρους υδροφοβικότητας ( $b^*=0.17$ ), και έως  $D=0.48$  mm στην περίπτωση τμηματικής υδροφοβικότητας ( $b^*=0.207$ ).

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης για  $Re=180$ . Συγκεκριμένα, σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, επιτυγχάνεται μείωση της δράσης ελέγχου της τάξης του 20%. (Αναλυτικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται στο Αγγλικό κείμενο.)



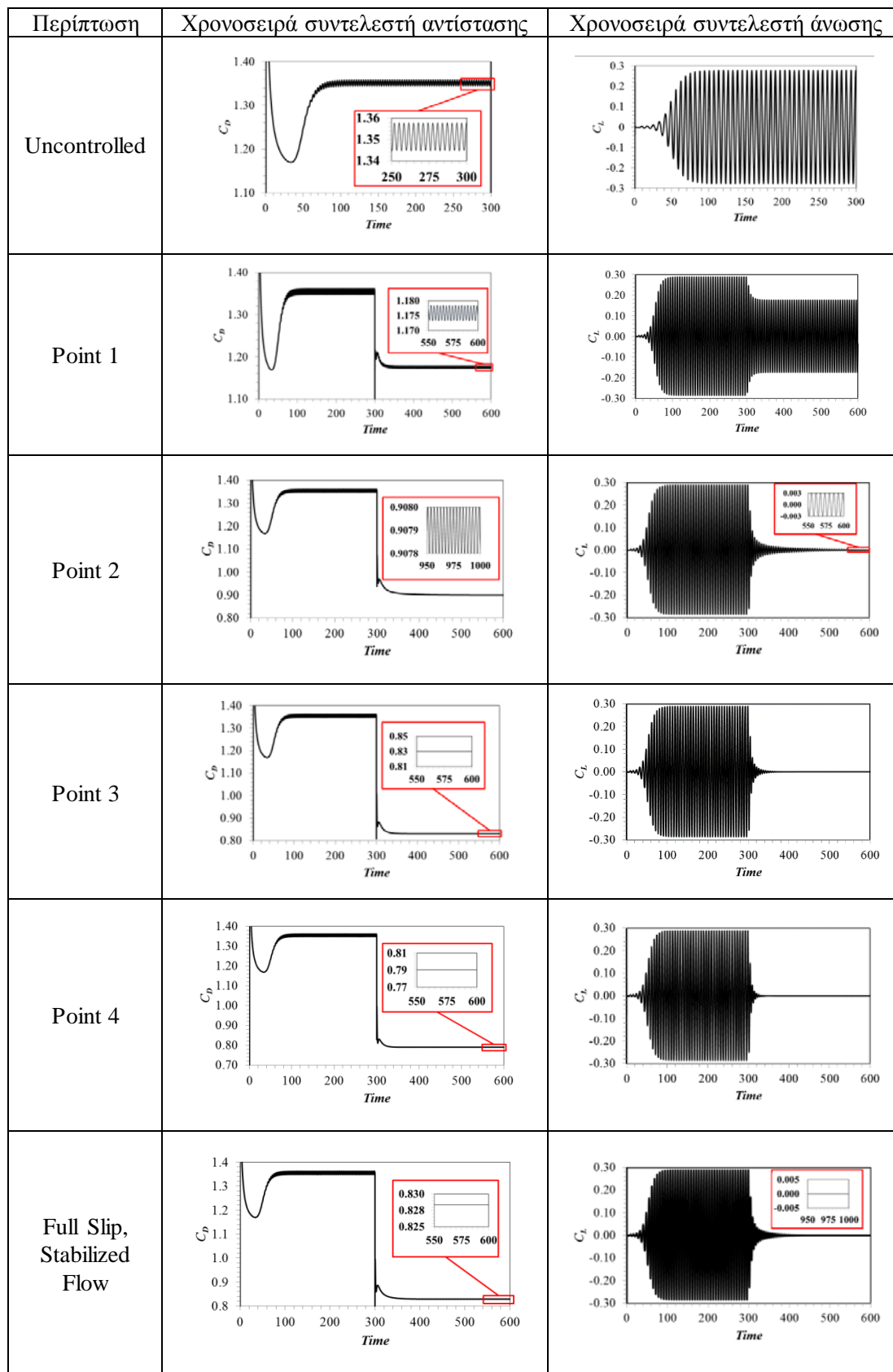
Εικόνα 11.  $Re=90$ : αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  συναρτήσει της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_2$ , και προσεγγιστική καμπύλη του μετώπου Pareto. Συμπεριλαμβάνονται και τρεις περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται από εφαρμογή της συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, και επισημαίνεται η μείωση της δράσης ελέγχου των βέλτιστων λύσεων σε σχέση με αυτές.

Πίνακας 2.  $Re=90$ : τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για την περίπτωση χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11.

Case	$b^*$	$\theta_{min}$	$\theta_{max}$	$\varphi = \theta_{max} - \theta_{min}$	$J_1$	$J_2$
Uncontrolled	0.000	$0.00^\circ$	$0.00^\circ$	$0.00^\circ$	0.319	0.000
Point 1	0.041	$40.89^\circ$	$129.19^\circ$	$88.29^\circ$	0.261	0.031
Point 2	0.196	$49.10^\circ$	$140.16^\circ$	$91.06^\circ$	0.112	0.156
Point 3	0.207	$33.57^\circ$	$146.08^\circ$	$112.51^\circ$	0.000	0.203
Point 4	0.303	$37.31^\circ$	$159.80^\circ$	$122.49^\circ$	0.000	0.324
Full slip, stabilized flow	0.170	$0.00^\circ$	$180.00^\circ$	$180.00^\circ$	0.000	0.260

Case	Slip Velocity Distribution	Vorticity Isocontours
Uncontrolled Flow		
Point 1		
Point 2		
Point 3		
Point 4		
Full Slip, Stabilized Flow		

Εικόνα 12.  $Re=90$ : κατανομές της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου για τη βασική ροή (αριστερή στήλη), και ισούψειες καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας της μη γραμμικής ροής (δεξιά στήλη), για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση της σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 13.  $Re=90$ : χρονοσειρές των συντελεστών αντίστασης και άωσης, για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11. Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ .

### 3.4 Ανάλυση υδροδυναμικής ευστάθειας

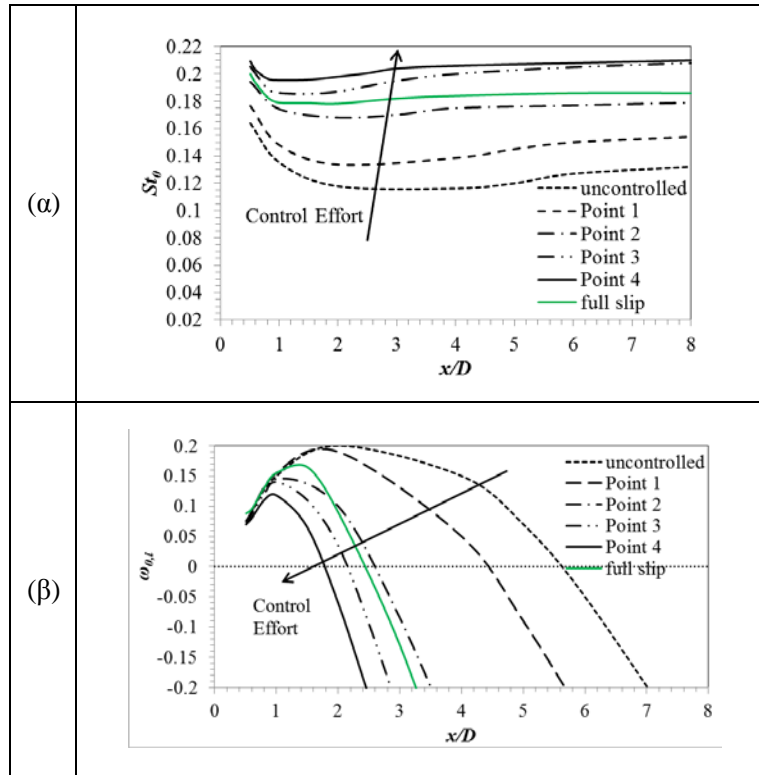
Σε αυτό το εδάφιο παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμών γραμμικής τοπικής και ολικής υδροδυναμικής ευστάθειας, για τα πεδία ροής που αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικές λύσεις για  $Re=90$ . Συγκεκριμένα, οι υπολογισμοί αφορούν σε τέσσερις λύσεις που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, και αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα δράσης ελέγχου, καθώς και στις περιπτώσεις της ροής χωρίς δράση ελέγχου και της σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή της ελάχιστης υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στον χαρακτηρισμό της ευστάθειας της ροής (με εφαρμογή δράσης ελέγχου) και στη συσχέτιση της ευστάθειας με το αντίστοιχο επίπεδο της επιβαλλόμενης δράσης ελέγχου.

#### 3.4.1 Ανάλυση τοπικής γραμμικής υδροδυναμικής ευστάθειας

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης τοπικής ευστάθειας, συγκεκριμένα οι τιμές της τοπικής συχνότητας,  $St_0$ , και του γραμμικού τοπικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών,  $\omega_{0,i}$ , ως συνάρτηση της οριζόντιας συντεταγμένης,  $x/D$ . Παρατηρείται ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου,  $J_2$ , οδηγεί σε αύξηση της τοπικής γραμμικής συχνότητας, γεγονός το οποίο γίνεται φανερό και από τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές της στον εγγύ ομόρρου ( $x/D < 10$ ),  $St_{0,min}$  και  $St_{0,max}$ , οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Η αυξητική τάση της καμπύλης τοπικής γραμμικής συχνότητας συναρτήσει της αύξησης της δράσης ελέγχου συνάδει με την αντίστοιχη αυξητική τάση του αριθμού Strouhal, με τις αντίστοιχες τιμές να παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 3. Από την άλλη πλευρά, η Εικόνα 14 φανερώνει ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου συντελεί στη μείωση της έκτασης της περιοχής της απόλυτης αστάθειας,  $x_a - x_b$ , καθώς και των μέγιστων τιμών του τοπικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών,  $\omega_{0,i max}$ , που επίσης καταγράφονται στον Πίνακα 3. Τέλος, τα μεγέθη που ποσοτικοποιούν την τοπική αστάθεια συσχετίζονται με την ολική αστάθεια της ροής με την εφαρμογή του κριτηρίου Chomaz et al. (1990), συγκεκριμένα με τον υπολογισμό του ολοκληρώματος  $I_g$ , όπως αυτό ορίζεται στον Πίνακα 3, το οποίο εκφράζει μια “ολική ένταση” της απόλυτης αστάθειας. Από τα αποτελέσματα στον Πίνακα 3 καθίσταται σαφές ότι, με την αύξηση της δράσης ελέγχου, οι τιμές της ποσότητας  $I_g$  ελατώνονται, προσεγγίζοντας την τιμή 0.5 στην περίπτωση ολικά ευσταθών λύσεων.

Πίνακας 3.  $Re=90$ : ποσότητες που χαρακτηρίζουν την τοπική και ολική ευστάθεια της ροής, για αντιπροσωπευτικές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Case	Global Linear Frequency, $s=\sigma_r+i\sigma_i$		$St$	Local Linear Frequency Range ( $x/D < 10$ )		$I_g = \int_{x_a}^{x_b} \sqrt{\omega_{0,i}(x)} dx$ $\omega_{0,i}(x) > 0$		
	$\sigma_r$	$St_{g,l} = \frac{\sigma_i}{2\pi}$		$St_{0,min}$	$St_{0,max}$	$\omega_{0,i max}$	$x_b-x_a$	$I_g$
Uncontrolled Flow	0.0898	0.1282	0.158	0.118	0.165	0.200	5.3	1.89
Point 1	0.0715	0.1351	0.161	0.135	0.178	0.195	4.1	1.35
Point 2	0.0002	0.1601	0.163	0.168	0.195	0.140	2.3	0.65
Point 3	-0.0357	0.1739	-	0.185	0.207	0.145	1.7	0.48
Point 4	-0.0651	0.1851	-	0.195	0.210	0.120	1.3	0.34
Full slip	-0.0078	0.1754	-	0.178	0.200	0.168	2.1	0.59



Εικόνα 14.  $Re=90$ : τιμές των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την τοπική ευστάθεια ως συνάρτηση της οριζόντιας συντεταγμένης, για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, για τις λύσεις 1 έως 4 και για την περίπτωση της σταθεροποιημένης ροής με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου, που απεικονίζονται στην Εικόνα 11. Οι λύσεις αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα δράσης ελέγχου, η οποία ποσοτικοποιείται από την αντικειμενική συνάρτηση,  $J_2$ : (α) Απόλυτη συχνότητα, και (β) τοπικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών.

### 3.4.2 Ανάλυση ολικής γραμμικής υδροδυναμικής ευστάθειας

Από την ανάλυση χρονοσειρών του συντελεστή άωσης (με χρήση μεθοδολογίας η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Αγγλικό κείμενο), υπολογίζονται η ολική γραμμική συχνότητα,

$$St_{g,l} = \frac{\sigma_i}{2\pi}, \text{ και ο ολικός γραμμικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών, } \sigma_r. \text{ Τα αποτελέσματα που}$$

παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 συνάδουν με τους αντίστοιχους μη γραμμικούς υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, ο ολικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών λαμβάνει θετικές τιμές στην περίπτωση χρονικά μεταβαλλόμενης ροής, και αρνητικές τιμές στην περίπτωση σταθεροποιημένης ροής. Επιπλέον, από τον Πίνακα 3 γίνεται φανερό ότι η ολική γραμμική συχνότητα αυξάνεται με αύξηση της δράσης ελέγχου, γεγονός το οποίο συνάδει με την αντίστοιχη αύξηση του αριθμού Strouhal. Ειδικότερα, στο όριο της αναίρεσης του δρόμου δινών, η ολική γραμμική συχνότητα συμπίπτει με τη μη γραμμική συχνότητα (αριθμός Strouhal).





## Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή αναρρόφησης - εμφύσησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται υπολογιστικά η εφαρμογή ένος σχήματος ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου το οποίο συνίσταται στη χρήση χρονικά σταθερής αναρρόφησης/εμφύσησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Αρχικά εφαρμόζεται αναρρόφηση/εμφύσηση σε τρεις περιοχές της επιφάνειας του κυλίνδρου, και συγκεκριμένα: (α) στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, (β) στην πλάγια περιοχή, και (γ) στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Για καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις, διερευνώνται οι επιδράσεις της αναρρόφησης/εμφύσησης στην ολική ευστάθεια της ροής. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, διαμορφώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αποσκοπεί στη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán, με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Η δράση ελέγχου σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από κατάλληλο συνδυασμό αναρρόφησης και εμφύσησης σε καθορισμένες περιοχές της επιφάνειας του κυλίνδρου, υπό τη συνθήκη ότι η ογκομετρική παροχή εμφύσησης θα είναι ίση με την ογκομετρική παροχή αναρρόφησης (μηδενική καθαρή παροχή). Στόχος είναι ο προσδιορισμός βέλτιστων κατανομών αναρρόφησης/εμφύσησης τα οποία ελαχιστοποιούν δύο κατάλληλα ορισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις. Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση ποσοτικοποιεί την ευστάθεια της ροής, ενώ η δεύτερη ποσοτικοποιεί τη δράση ελέγχου, στη μορφή του αδιάστατου συντελεστή αναρρόφησης. Αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto χαρακτηρίζονται με υπολογισμούς τοπικής και ολικής υδροδυναμικής ευστάθειας.

### 4.1. Εφαρμογή τμηματικής αναρρόφησης/εμφύσησης

Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου κάνει χρήση ιδεών για τον έλεγχο της ροής γύρω από κύλινδρο που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενες εργασίες (Delaunay and Kaiktsis, 2001 και Dong et al., 2008), και αποσκοπεί στην αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Με βάση τα αποτελέσματα μιας προκαταρκτικής διερεύνησης, ορίζονται τρεις περιοχές στην επιφάνεια του κυλίνδρου, με σημείο αναφοράς το εμπρός σημείο ανακοπής: (α) η περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής,  $0^\circ < \theta < 40^\circ$ , (β) η πλάγια περιοχή,  $40^\circ < \theta < 150^\circ$ , και (γ) η περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής,  $150^\circ < \theta < 180^\circ$ . Καί στις τρεις περιοχές εφαρμόζεται ομοιόμορφη αναρρόφηση ή εμφύσηση, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 15. Ειδικότερα, στην Εικόνα 15α εφαρμόζεται αναρρόφηση/εμφύσηση στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, στην Εικόνα 15β στην πλάγια περιοχή, και στην Εικόνα 15γ στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Η κατανομή της ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης ορίζεται στο σύνορο του κυλίνδρου, και η διεύθυνση των διανυσμάτων της ταχύτητας είναι ακτινική. Η παρούσα δράση ελέγχου είναι πλήρως συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας ( $y=0$ ).

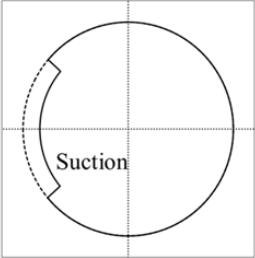
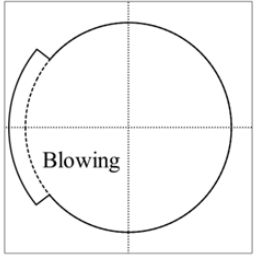
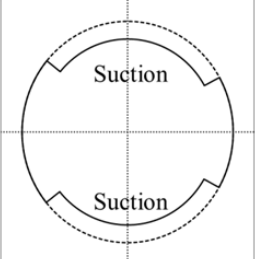
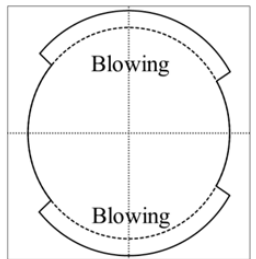
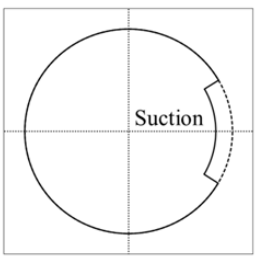
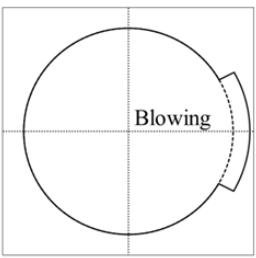
Προκειμένου να υπάρχει αντιστοιχία των υπολογιζόμενων μεγεθών με άλλες μελέτες της βιβλιογραφίας, ορίζονται η ογκομετρική παροχή αναρρόφησης,  $Q_{suc}$ , η παροχή αναφοράς,  $Q_{ref}$ , και ο συντελεστής αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , ως ακολούθως:

$$Q_{suc} = - \int_{-\pi}^{\pi} u(\theta) R d\theta \quad (14)$$

$$Q_{ref} = U_{inf} D \quad (15)$$

$$C_{suc} = \frac{Q_{suc}}{Q_{ref}} \quad (16)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα του κυλίνδρου. Θετική τιμή του συντελεστή αναρρόφησης αντιστοιχεί σε αναρρόφηση, ενώ αρνητική τιμή αντιστοιχεί σε εμφύσηση.

Transpiration Regime	Suction	Blowing
(a) $\theta_1=0^\circ < \theta < \theta_2=40^\circ$ Front stagnation point region		
(b) $\theta_1=40^\circ < \theta < \theta_2=150^\circ$ Sideway region		
(c) $\theta_1=150^\circ < \theta < \theta_2=180^\circ$ Rear stagnation point region		

Εικόνα 15. Απεικόνιση της κατανομής της ταχύτητας αναρρόφησης και εμφύσησης σε τρεις διαφορετικές περιοχές του κυλίνδρου: (α) περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής,  $0^\circ < \theta < 40^\circ$ , (β) πλάγια περιοχή,  $40^\circ < \theta < 150^\circ$ , και (γ) περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής,  $150^\circ < \theta < 180^\circ$ .

#### 4.1.1 Εφαρμογή αναρρόφησης και εμφύσησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, $0^\circ < \theta < 40^\circ$ .

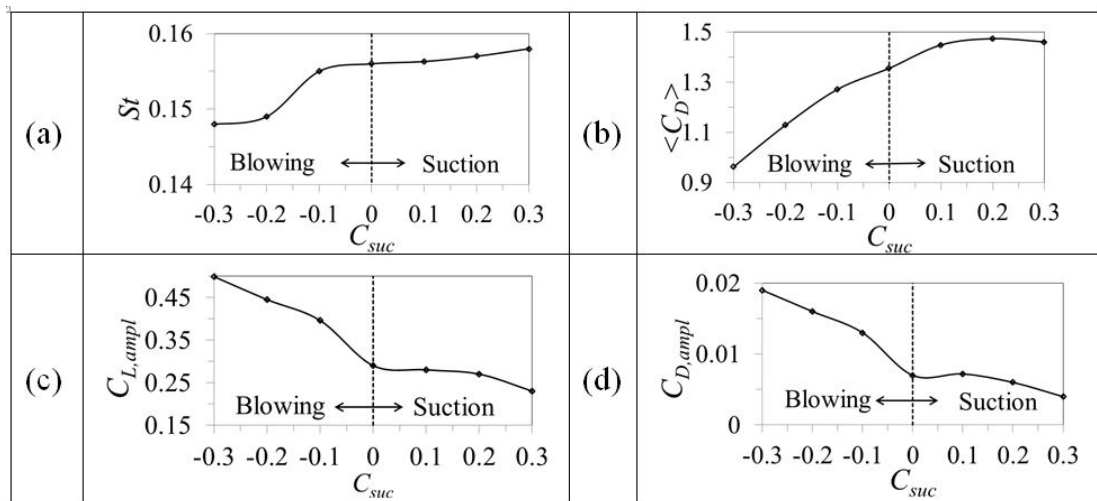
Στην περίπτωση που εφαρμόζεται ομοιόμορφη συμμετρική αναρρόφηση ή εμφύσηση στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής (Εικόνα 15α), η οποία εκτείνεται στο άνω ημιεπίπεδο από  $\theta_1=0^\circ$  έως  $\theta_2=40^\circ$ , ο συντελεστής αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , και η κανονικοποιημένη ταχύτητα αναρρόφησης/εμφύσησης,  $U_1/U_{inf}$ , ορίζονται ως ακολούθως:

$$Q_{suc} = -2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_1 R d\theta = -0.698 \cdot U_1 \cdot D \quad (17)$$

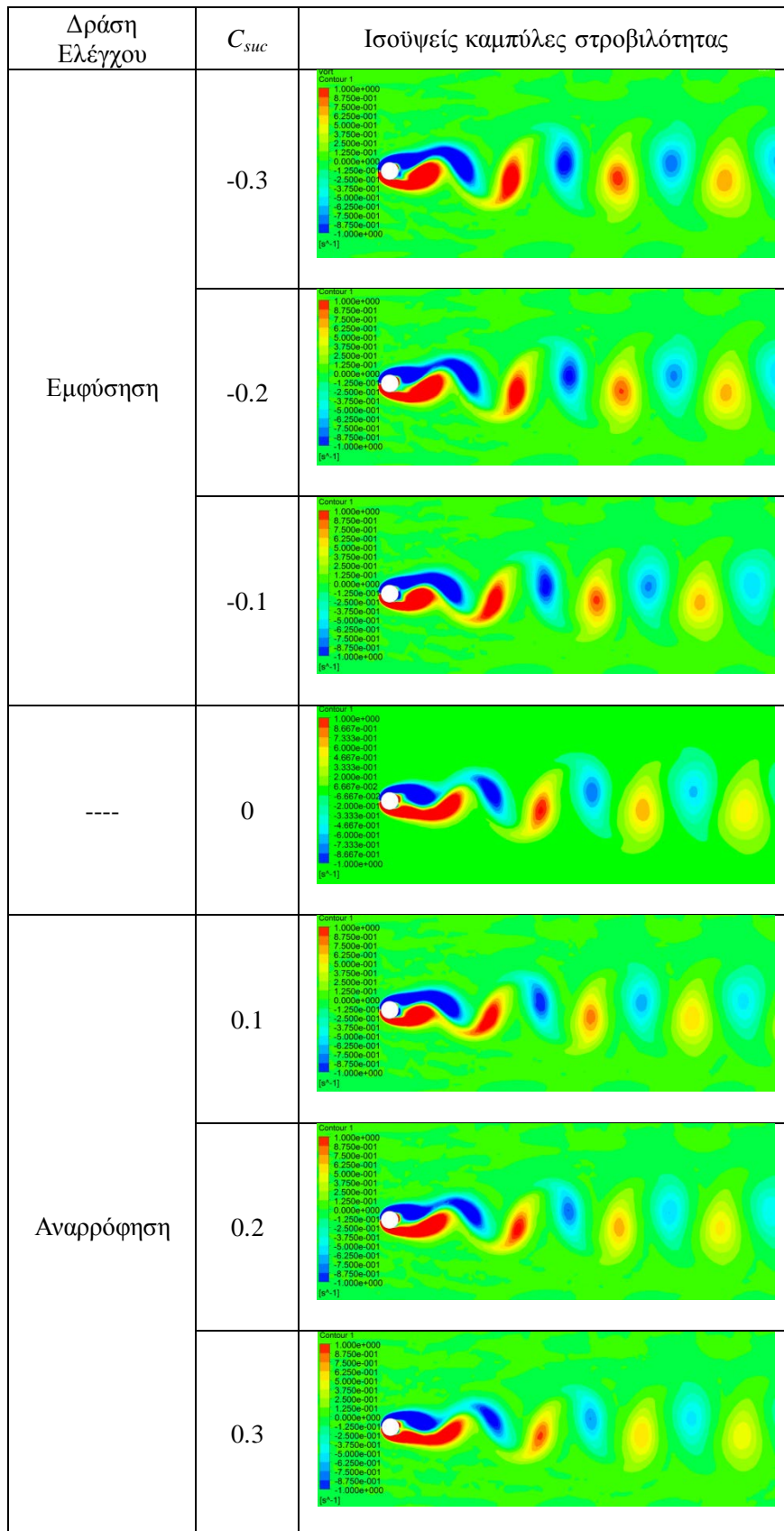
$$C_{suc} = \frac{Q_{suc}}{Q_{ref}} = \frac{-0.698 \cdot U_1}{U_{inf}}$$

$$\frac{U_1}{U_{inf}} = -1.433 \cdot C_{suc}$$

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμών, συγκεκριμένα, στατιστικά μεγεθη που χαρακτηρίζουν τη ροή. Στην Εικόνα 16α γίνεται καταδεικνύεται ότι ο αριθμός Strouhal μειώνεται με αύξηση της παροχής εμφύσησης, ενώ αυξάνεται ήπια με αύξηση της αναρρόφησης. Η Εικόνα 16β δεικνύει ότι η μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης μειώνεται με αύξηση της παροχής εμφύσησης, και παρουσιάζει μικρή αύξηση για αύξηση της αναρρόφησης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι απόρροια της μείωσης ή της ενίσχυσης των τάσεων λόγω πίεσης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, που προκαλείται από την εμφύσηση ή την αναρρόφηση, αντίστοιχα. Τέλος η Εικόνα 16γ και η Εικόνα 16δ, που παρουσιάζουν την εξάρτηση του εύρους των διακυμάνσεων του συντελεστή άωσης και αντίστασης, αντίστοιχα, ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, καταδεικνύουν την αύξηση των διακυμάνσεων στην περίπτωση εμφύσησης και μείωση αυτών στην περίπτωση αναρρόφησης. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή εμφύσησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής αποσταθεροποιεί τη ροή, ενώ η εφαρμογή αναρρόφησης έχει σταθεροποιητικό χαρακτήρα. Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι σε συμφωνία με την ένταση των στιγμιαίων ισουψών καμπυλών της στροβιλότητας που παρουσιάζονται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 16.  $Re=90$ : στατιστικά μεγέθη της ροής ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, για εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής: (α) αριθμός Strouhal,  $St$ , (β) μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , (γ) πλάτος του συντελεστή άωσης,  $C_{L,ampl}$  και (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$ .



Εικόνα 17.  $Re=90$ : ισοϋψείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , για αναρρόφηση/εμφύσηση στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής.

### 4.1.2 Εφαρμογή αναρρόφησης και εμφύσησης στην πλάγια περιοχή, $40^\circ < \theta < 150^\circ$

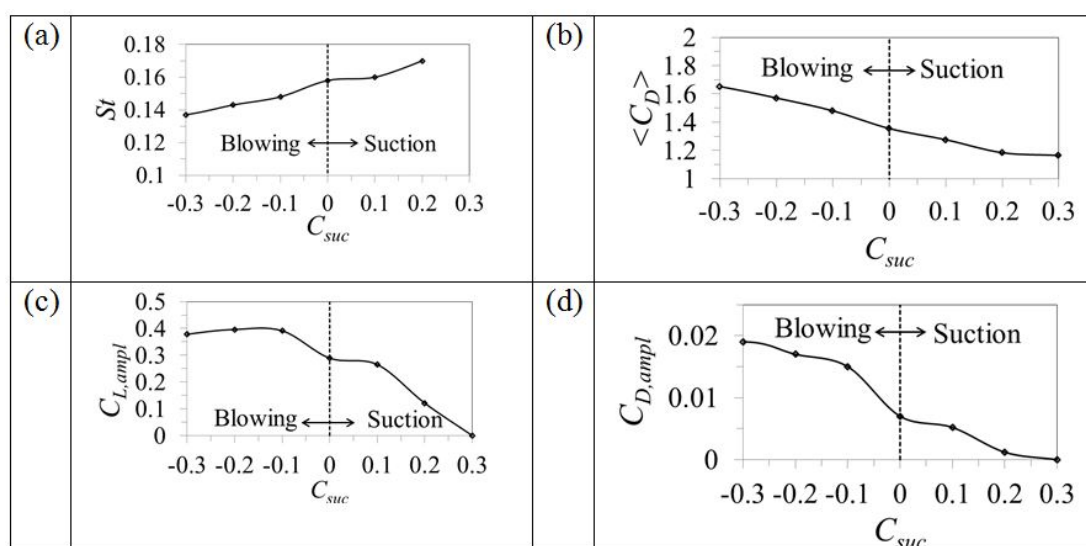
Στην περίπτωση που εφαρμόζεται ομοιόμορφη συμμετρική αναρρόφηση ή εμφύσηση στην πλάγια περιοχή (Εικόνα 15β), η οποία εκτείνεται στο άνω ημιπίεδο από  $\theta_1=40^\circ$  έως  $\theta_2=150^\circ$ , ο συντελεστής αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , και η κανονικοποιημένη ταχύτητα αναρρόφησης/εμφύσησης,  $U_2/U_{inf}$ , ορίζονται ως ακολούθως:

$$Q_{suc} = -2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_2 R d\theta = -1.919 \cdot U_2 \cdot D$$

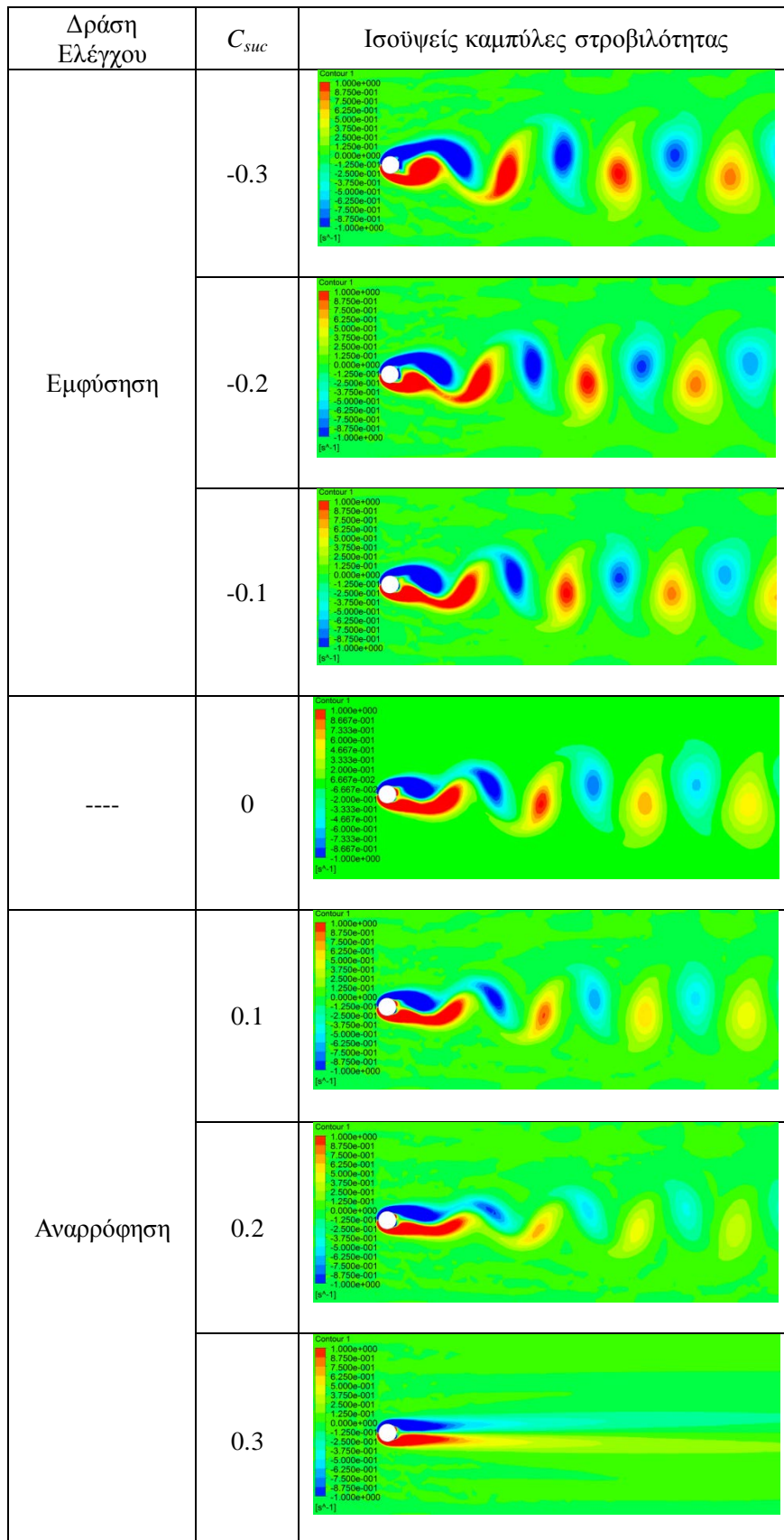
$$C_{suc} = \frac{Q_{suc}}{Q_{ref}} = \frac{-1.919 \cdot U_2}{U_{inf}} \quad (18)$$

$$\frac{U_2}{U_{inf}} = -0.521 \cdot C_{suc}$$

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμών για στατιστικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη ροή. Από την Εικόνα 18α προκύπτει ότι ο αριθμός Strouhal είναι αύξουσα συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, δηλαδή μειώνεται με αύξηση της εμφύσησης και αυξάνεται με αύξηση της αναρρόφησης. Η Εικόνα 18γ και η Εικόνα 18δ δεικνύουν ότι οι διακυμάνσεις των δυνάμεων αυξάνονται με την εμφύσηση και ελαττώνονται με την αναρρόφηση, ενώ εξαλείφονται για  $C_{suc}=0.3$ , λόγω της πλήρους αναίρεσης του δρόμου δινών. Παράλληλα, η σταθεροποιητική επίδραση της αναρρόφησης και η αποσταθεροποιητική επιρροή της εμφύσησης στα στατιστικά μεγέθη της ροής είναι σε συμφωνία με τις ισοϋψείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 19. Ειδικότερα, για  $C_{suc}=0.3$ , παρατηρείται ο σχηματισμός των δύο ζωνών ανακύκλωσης που αντιστοιχεί σε πλήρη σταθεροποίηση της ροής. Τέλος, η Εικόνα 18β καταδεικνύει τη μονοτονική μείωση της μέσης χρονικής τιμής του συντελεστή αντίστασης, συναρτήσει του συντελεστή αναρρόφησης.



Εικόνα 18.  $Re=90$ : στατιστικά μεγέθη της ροής ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, για εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην πλάγια περιοχή: (α) αριθμός Strouhal,  $St$ , (β) μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , (γ) πλάτος του συντελεστή άωσης,  $C_{L,ampl}$ , και (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$ .



Εικόνα 19.  $Re=90$ : ισοϋνείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , για αναρρόφηση/εμφύσηση στην πλάγια περιοχή.

### 4.1.3 Εφαρμογή αναρρόφησης και εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, $150^\circ < \theta < 180^\circ$

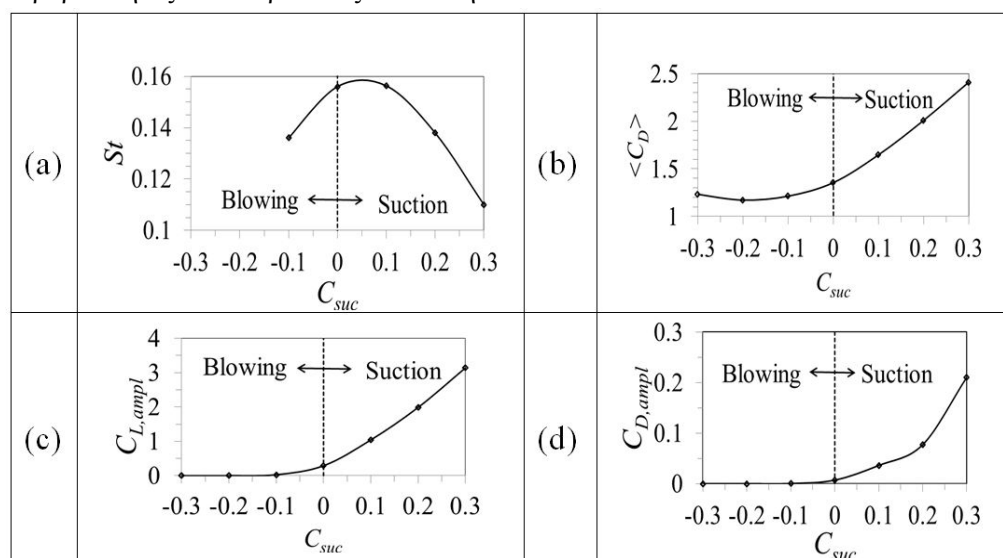
Στην περίπτωση που εφαρμόζεται ομοιόμορφη συμμετρική αναρρόφηση ή εμφύσηση στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής (Εικόνα 15γ) η οποία εκτείνεται στο άνω ημιεπίπεδο από  $\theta_1=150^\circ$  έως  $\theta_2=180^\circ$ , ο συντελεστής αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , και η κανονικοποιημένη ταχύτητα αναρρόφησης/εμφύσησης,  $U_3/U_{inf}$ , ορίζονται ως ακολούθως:

$$Q_{suc} = -2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_3 R d\theta = -0.523 \cdot U_3 \cdot D$$

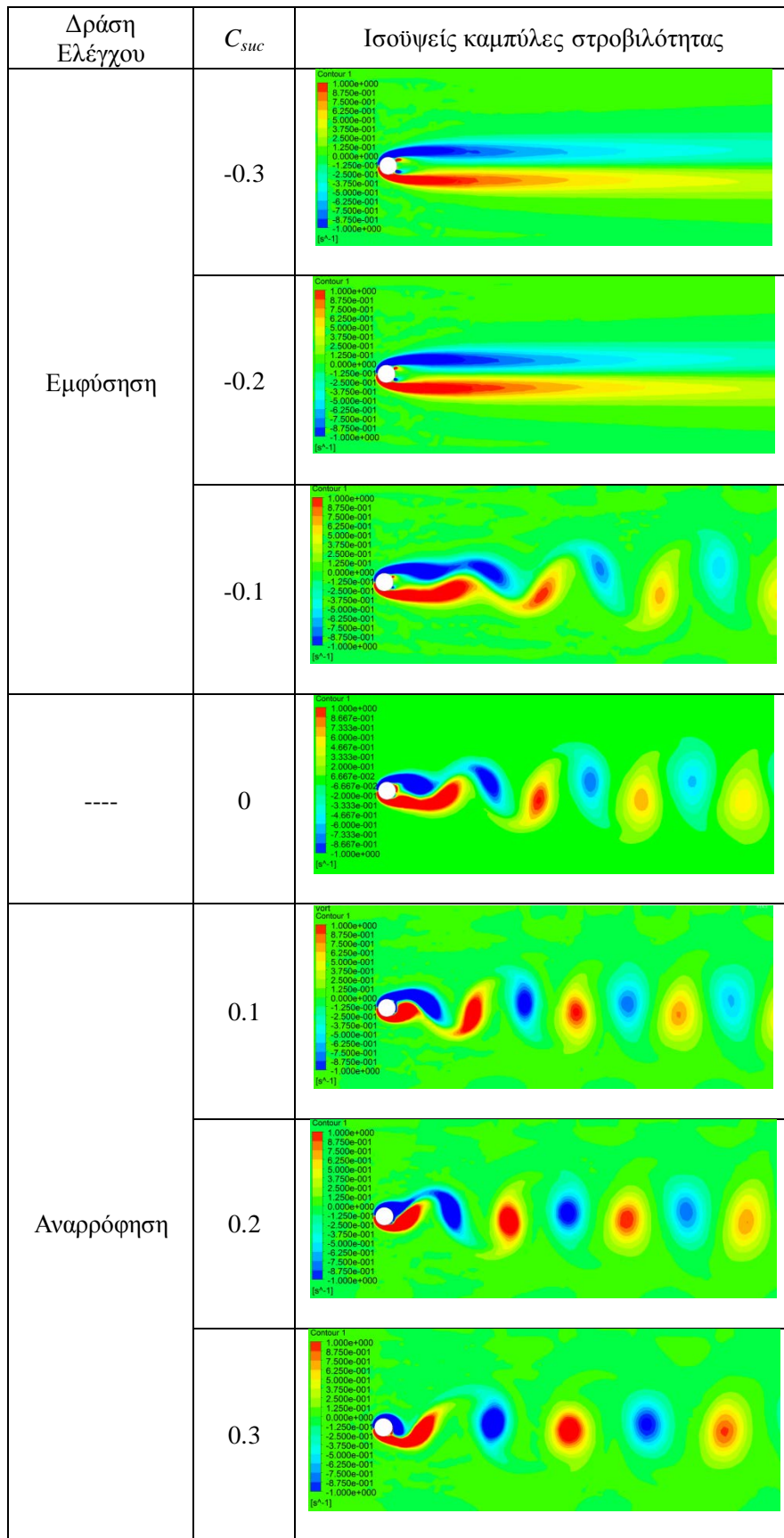
$$C_{suc} = \frac{Q_{suc}}{Q_{ref}} = \frac{-0.523 \cdot U_3}{U_{inf}} \quad (19)$$

$$\frac{U_3}{U_{inf}} = -1.909 \cdot C_{suc}$$

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμών για στατιστικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη ροή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20α, η συχνότητα του δρόμου δινών μειώνεται με αύξηση της παροχής εμφύσησης (έως την τιμή  $C_{suc} \approx -0.2$ , που αντιστοιχεί στην πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών), ενώ εμφανίζει σημαντική μείωση στην περίπτωση αναρρόφησης, για  $C_{suc} > 0.06$ . Στην Εικόνα 20β φαίνεται ότι η μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης μειώνεται ασθενώς στην περίπτωση εμφύσησης, ενώ αυξάνεται σημαντικά στην περίπτωση της αναρρόφησης. Τέλος, στην Εικόνα 20γ και στην Εικόνα 20δ καταδεικνύεται η σημαντική μείωση των διακυμάνσεων των δυνάμεων με την αύξηση της παροχής εμφύσησης, και η σταθεροποίηση της ροής για μια μετρίως υψηλή παροχή εμφύσησης ( $C_{suc} \approx -0.2$ ). Αντίθετα, αύξηση της παροχής εμφύσησης αυξάνει αισθητά το εύρος των διακυμάνσεων των δυνάμεων. Με βάση τα παραπάνω, η εφαρμογή αναρρόφησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής αποσταθεροποιεί περαιτέρω τη ροή, ενώ η εφαρμογή εμφύσησης έχει ισχυρό σταθεροποιητικό χαρακτήρα. Τα συγκεκριμένα συμπεράσματα είναι σε συμφωνία με την ένταση των στιγμιαίων κατανομών της στροβιλότητας που παρουσιάζονται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 20.  $Re=90$ : στατιστικά μεγέθη της ροής ως συνάρτηση του συντελεστή αναρρόφησης, για εφαρμογή αναρρόφησης/εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής: (α) αριθμός Strouhal,  $St$ , (β) μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης,  $\langle C_D \rangle$ , (γ) πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,ampl}$ , και (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης,  $C_{D,ampl}$ .



Εικόνα 21.  $Re=90$ : ισοϋνείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , για αναρρόφηση/εμφύσηση στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής.



#### 4.1.4 Αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής τμηματικά ομοιόμορφης αναρρόφησης/εμφύσησης

Στα προηγούμενα εδάφια διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής αναρρόφησης/εμφύσησης σε διαφορετικές περιοχές της επιφάνειας του κυλίνδρου στη δυναμική και στην ευστάθεια της ροής. Διαπιστώθηκε ότι: (α) εφαρμογή αναρρόφησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής έχει ήπια σταθεροποιητική επίδραση, (β) εφαρμογή αναρρόφησης στην πλάγια περιοχή έχει ισχυρή σταθεροποιητική επίδραση, και (γ) εφαρμογή εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής έχει ισχυρή σταθεροποιητική επίδραση. Οδηγούμαστε επομένως στο συμπέρασμα ότι ένα αποτελεσματικό σχήμα ελέγχου (με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών) θα μπορούσε να συνδυάζει την εφαρμογή αναρρόφησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής και στην πλάγια περιοχή, με την εφαρμογή εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Επιπλέον, έχοντας και ως στόχο τη φυσική υλοποίηση του σχήματος, είναι επιθυμητό το σχήμα ελέγχου να χαρακτηρίζεται από μηδενική καθαρή παροχή μάζας, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις άντλησης του ρευστού. Για αυτόν τον λόγο, στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα σχήμα ελέγχου που αποσκοπεί στη βέλτιστη αναίρεση (μερική ή πλήρη) του δρόμου δινών, με μηδενική καθαρή παροχή μάζας. Ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων του σχήματος επιτυγχάνεται με χρήση βελτιστοποίησης.

### 4.2 Διαμόρφωση προβλήματος βελτιστοποίησης με εφαρμογή τμηματικά ομοιόμορφης αναρρόφησης/εμφύσησης

Αντικείμενο του παρόντος εδαφίου είναι ο προσδιορισμός βέλτιστων ομοιόμορφων κατανομών τμηματικής αναρρόφησης/εμφύσησης, που οδηγούν σε μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán, με χρήση της ελάχιστης δυνατής παροχής αναρρόφησης/εμφύσησης. Για αυτόν τον σκοπό, διαμορφώνεται ένα δικριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στόχο την ελαχιστοποίηση δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Η πρώτη από αυτές σχετίζεται με την ολική ευστάθεια της ροής, ενώ η δεύτερη ποσοτικοποιεί τη δράση ελέγχου.

Η κατανομή της ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης ορίζεται παραμετρικά στην επιφάνεια του κυλίνδρου, έτσι ώστε να προκύπτει μηδενική καθαρή ογκομετρική παροχή. Η ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο εδάφιο υποδεικνύει ότι σταθεροποιητική επίδραση επιφέρει η εφαρμογή: (α) αναρρόφησης στην πλάγια περιοχή και στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, και (β) εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Προκειμένου να γίνει βέλτιστη αξιοποίηση όλων των επιμέρους σταθεροποιητικών παραγόντων, εφαρμόζεται ένας συνδυασμός των τριών δράσεων ελέγχου, με στόχο την αναίρεση της αστάθειας της ροής, με χρήση της ελάχιστης συνολικής δράσης ελέγχου. Ο στόχος της ελαχιστοποίησης των απαιτήσεων άντλησης του ρευστού υλοποιείται με την εξίσωση της παροχής εμφύσησης με την παροχή αναρρόφησης. Έτσι, συμβολίζοντας με  $Q_1$  και  $Q_2$  την ογκομετρική παροχή αναρρόφησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής και στην πλάγια περιοχή, αντίστοιχα, και με  $Q_3$  την ογκομετρική παροχή εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, ισχύει:  $Q_1+Q_2=Q_3$ . Κατά συνέπεια, στο παρόν σχήμα ελέγχου, ο συντελεστής αναρρόφησης μπορεί να οριστεί ως ακολούθως:

$$C_{suc} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_{ref}} = \frac{Q_3}{Q_{ref}} \quad (20)$$

Συμβολίζοντας με  $\theta_1$  και  $\theta_2$  τις γωνίες που οριοθετούν την πλάγια περιοχή (στο άνω ημιεπίπεδο),  $U_1$  και  $U_2$  τις ταχύτητες αναρρόφησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής και στην πλάγια περιοχή, αντίστοιχα, και  $U_3$  την ταχύτητα εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, οι ογκομετρικές παροχές αναρρόφησης/εμφύσησης υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$Q_{suc} = Q_1 + Q_2 = 2 \int_0^{\theta_1} U_1 R d\theta + 2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_2 R d\theta \quad (21)$$

$$Q_{suc} = (\theta_1 U_1 + (\theta_2 - \theta_1) U_2) D \quad (22)$$

$$Q_{blow} = Q_3 = 2 \int_{\theta_2}^{\pi} U_3 R d\theta = (\pi - \theta_2) U_3 D$$

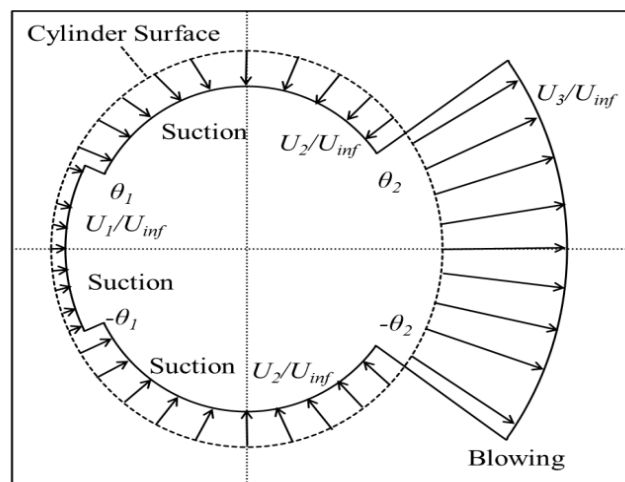
Ο περιορισμός της μηδενικής καθαρής ογκομετρικής παροχής υπαγορεύει τον ορισμό της ακόλουθης σχέσης ανάμεσα στις παροχές  $Q_1$ ,  $Q_2$ , ή, ισοδύναμα, ανάμεσα στις ταχύτητες αναρρόφησης  $U_1$ ,  $U_2$ :

$$U_1 = c \cdot U_2 \quad (23)$$

όπου  $c$  είναι μια κατάλληλη σταθερά. Η παραπάνω διαμόρφωση έχει γίνει με βάση τις αρχικές διαπιστώσεις του παρόντος κεφαλαίου, που υποδεικνύουν ότι η αναρρόφηση στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής ενδείκνυται να είναι ηπιότερη από την αναρρόφηση στην πλάγια περιοχή.

Για δεδομένες τιμές των τεσσάρων παραμέτρων που ορίζουν την κατανομή της αναρρόφησης/εμφύσησης που απεικονίζεται στην Εικόνα 22, δηλαδή του συντελεστή εμφύσησης,  $C_{suc}$ , των γωνιών που ορίζουν την πλάγια περιοχή,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , και της σταθεράς  $c$ , οι ταχύτητες αναρρόφησης/εμφύσησης υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_{inf}} &= \frac{c \cdot C_{suc}}{(\theta_1 \cdot (c-1) + \theta_2)} \\ \frac{U_2}{U_{inf}} &= \frac{C_{suc}}{(\theta_1 \cdot (c-1) + \theta_2)} \\ \frac{U_3}{U_{inf}} &= \frac{C_{suc}}{(\pi - \theta_2)} \end{aligned} \quad (24)$$



Εικόνα 22. Απεικόνιση της κατανομής της ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης

### 4.2.1 Μεταβλητές σχεδίασης

Δεδομένου ότι η κατανομή της αναρρόφησης/εμφύσησης είναι συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας ( $y=0$ ), αρκεί αυτή να οριστεί στο άνω ημιεπίπεδο  $x-y$ . Η εν λόγω κατανομή ορίζεται ως μια τμηματικά σταθερή παραμετρική συνάρτηση, της οποίας οι παράμετροι αποτελούν τις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\frac{U(\theta)}{U_{\text{inf}}} = \begin{cases} \frac{U_1}{U_{\text{inf}}} = \frac{c \cdot C_{suc}}{(\theta_1 \cdot (c-1) + \theta_2)}, & 0^\circ < \theta < \theta_1 \\ \frac{U_2}{U_{\text{inf}}} = \frac{C_{suc}}{(\theta_1 \cdot (c-1) + \theta_2)}, & \theta_1 < \theta < \theta_2 \\ \frac{U_3}{U_{\text{inf}}} = \frac{C_{suc}}{(\pi - \theta_2)}, & \theta_2 < \theta < \pi \end{cases} \quad (25)$$

Επομένως, η κατανομή της ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης ορίζεται παραμετρικά με τη χρήση τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης, και συγκεκριμένα, του συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , των γωνιών που ορίζουν την πλάγια περιοχή,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , και της σταθεράς  $c$ . Σημειώνεται ότι η γωνία  $\theta_2$  ορίζει το σύνορο ανάμεσα στις περιοχές αναρρόφησης και εμφύσησης. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιούνται εκτενή όρια για τον χώρο αναζήτησης των μεταβλητών σχεδίασης, ως εξής:

$$\begin{aligned} 0 < C_{suc} < 0.5 \\ 0^\circ < \theta_1 < 40^\circ \\ 140^\circ < \theta_2 < 165^\circ \\ 0 < c < 0.5 \end{aligned} \quad (26)$$

Αναφορικά με την επιλογή του χώρου αναζήτησης της μεταβλητής σχεδίασης  $\theta_2$ , σημειώνεται ότι, προκειμένου να αποφευχθεί μια αποσταθεροποιητική επίδραση της εμφύσησης, το κάτω όριο επιλέγεται να είναι μεγαλύτερο από τη γωνία του σημείου αποκόλλησης της βασικής ροής χωρίς δράση ελέγχου (σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παρόντων υπολογισμών, για  $Re=90$  προκύπτει  $\theta_s=117^\circ$ ).

### 4.2.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις

Εισάγονται δύο αντικειμενικές συναρτήσεις:

(α) Αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$ :

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση,  $J_1$ , η οποία ποσοτικοποιεί την ολική αστάθεια της ροής, είναι η ίδια που ορίστηκε και στο πρώτο πρόβλημα βελτιστοποίησης της παρούσας (βλ. σχέσεις 10, 11, 12).

(β) Αντικειμενική συνάρτηση  $C_{suc}$ :

Ο συντελεστής αναρρόφησης,  $C_{suc}$  (βλ. σχέση 16), που ποσοτικοποιεί τη συνολική δράση ελέγχου, επιλέγεται ως η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

### 4.2.3 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης

Το παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών των τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης ( $C_{suc}$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $c$ ) που αντιστοιχούν σε κατανομές

αναρρόφησης/εμφύσησης που ελαχιστοποιούν ταυτόχρονα τις αντικειμενικές συναρτήσεις  $J_1$  και  $C_{suc}$ . Σημειώνεται ότι εδώ ο συντελεστής αναρρόφησης,  $C_{suc}$ , θεωρείται τόσο μεταβλητή σχεδίασης, όσο και αντικειμενική συνάρτηση.

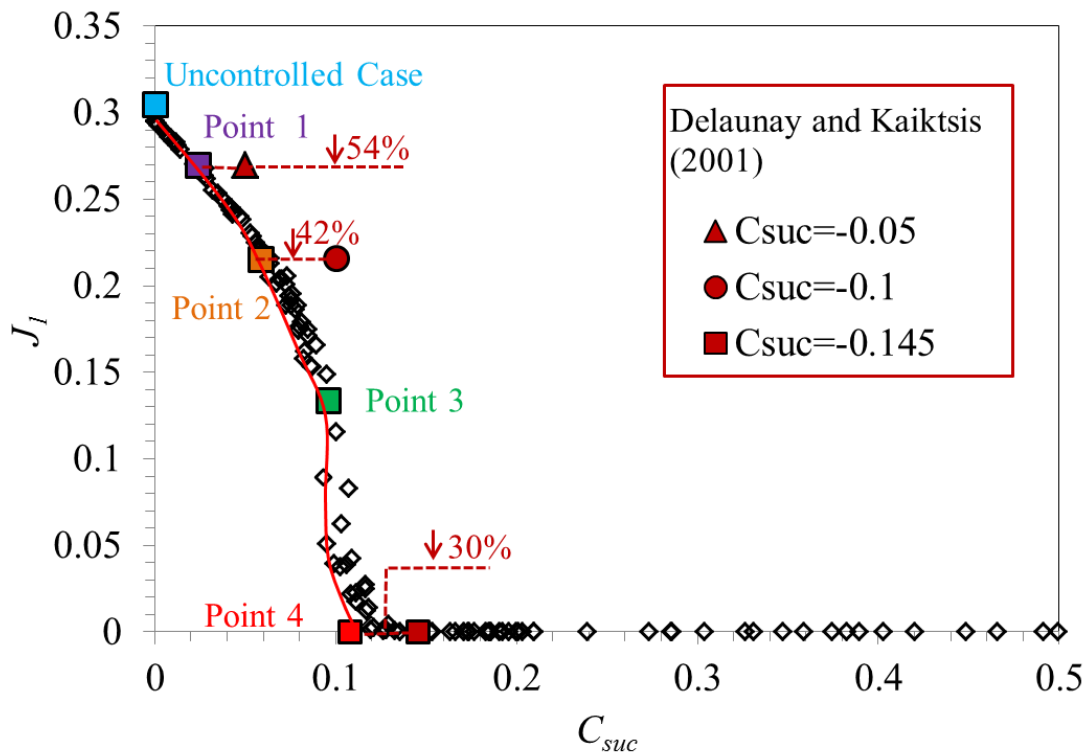
Στην παρούσα εφαρμογή, κάθε γενιά αποτελείται από 20 άτομα, ενώ η σύγκλιση στο τελικό μέτωπο Pareto ολοκληρώθηκε μετά από 15 γενιές. Σημειώνεται ότι κάθε προσομοίωση υλοποιήθηκε σε εικοσιτέσσερις παράλληλους υπολογιστικούς πυρήνες, και ο αντίστοιχος υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε προσέγγισε τις 2.5 ώρες.

#### 4.2.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για  $Re=90$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 23, αναφορικά με τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος,  $J_1$ ,  $C_{suc}$ . Στην Εικόνα 23 έχουν συμπεριληφθεί επίσης αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε εμφύσηση μόνο στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, τα οποία περιέχονται στη μελέτη των Delaunay and Kaiktsis (2001). Κάθε συνδυασμός των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος ( $C_{suc}$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $c$ ) αντιστοιχεί σε μία διαφορετική κατανομή αναρρόφησης/εμφύσησης, οδηγώντας είτε σε ασταθή είτε σε ολικά ευσταθή λύση, η οποία χαρακτηρίζεται από θετικές ή αρνητικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_1$ , αντίστοιχα. Η Εικόνα 23 αποδεικνύει ότι, στο σύνολο των βέλτιστων λύσεων, μια αύξηση στη δράση ελέγχου έχει ως αποτέλεσμα περισσότερο ευσταθείς λύσεις (μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_1$ ).

Τέσσερις αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις, καθώς και η περίπτωση της ροής χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου επισημαίνονται με έγχρωμα τετράγωνα στην Εικόνα 23. Οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Για αυτές τις λύσεις, η Εικόνα 24 παρουσιάζει τις κατανομές της ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης, καθώς και ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας σε στιγμιαία πεδία ροής, ενώ η Εικόνα 25 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των συντελεστών αντίστασης και άνωσης. Στην Εικόνα 24 γίνεται φανερό ότι, με την αύξηση της δράσης ελέγχου, περιορίζεται η αστάθεια της ροής, ενώ στην περίπτωση του “Point 4” παρατηρείται πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών. Το παραπάνω αποτέλεσμα επιβεβαιώνεται και από την Εικόνα 25, όπου καταδεικνύεται ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου επιφέρει μείωση τόσο στη μέση χρονική τιμή του συντελεστή αντίστασης, όσο και στις διακυμάνσεις των συντελεστών αντίστασης και άνωσης. Αυτό συντελείται εξαιτίας της συνδυασμένης σταθεροποιητικής επίδρασης της αναρρόφησης στην πλάγια περιοχή και στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, και της εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής.

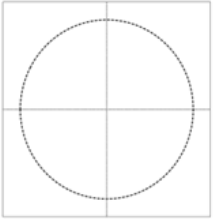
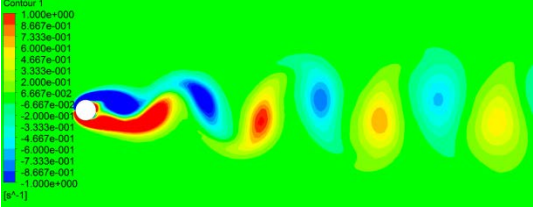
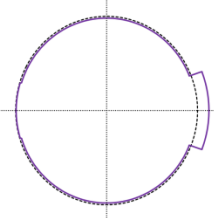
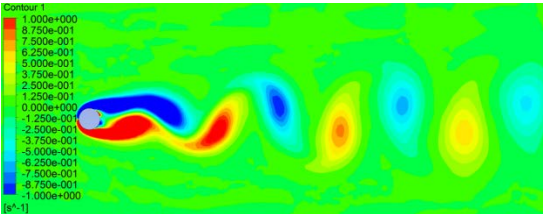
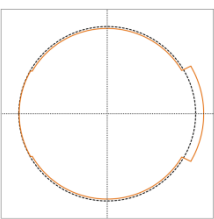
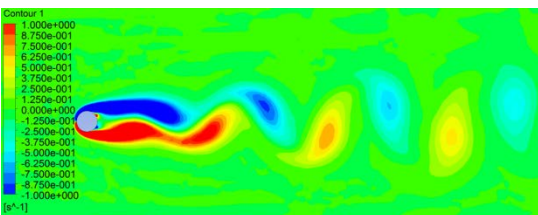
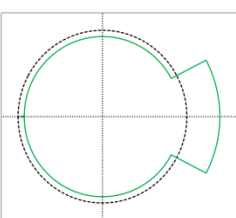
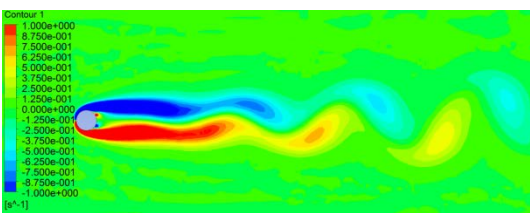
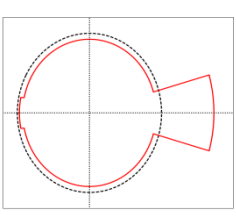
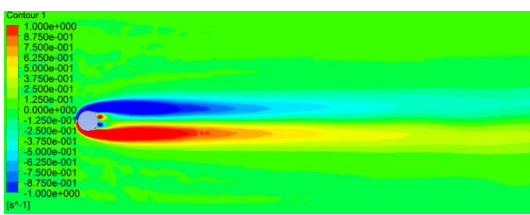
Συνεπώς, ο συνδυασμός της χρήσης εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής και αναρρόφησης στο υπόλοιπο τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου βελτιώνει τα σταθεροποιητικά χαρακτηριστικά καθεμιάς εκ των τριών μεμονωμένων δράσεων ελέγχου, οδηγώντας σε πλήρη σταθεροποίηση της ροής στην περίπτωση του “Point 4” (Εικόνα 23), για τη χαμηλή τιμή του συντελεστή αναρρόφησης  $C_{suc}=0.102$ . Μια σημαντική παρατήρηση αναφορικά με τις λύσεις στο όριο της σταθεροποίησης της ροής είναι ότι η περιοχή εμφύσησης είναι αρκετά στενή. Αυτό (με βάση τη διατήρηση της μάζας) ισοδυναμεί με ισχυρή εμφύσηση προς τον εγγύ ομόρρο, ο οποίος είναι στενός εξαιτίας της αναρρόφησης από την πλάγια περιοχή της επιφάνειας του κυλίνδρου. Ως απόρροια, η ελάχιστη δράση ελέγχου που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της ροής ( $C_{suc} = 0.102$ ) είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη που υπολογίστηκε στη μελέτη των Delaunay and Kaiktsis (2001) για την περίπτωση καθαρής εμφύσησης ( $|C_{suc}| = 0.145$ ).



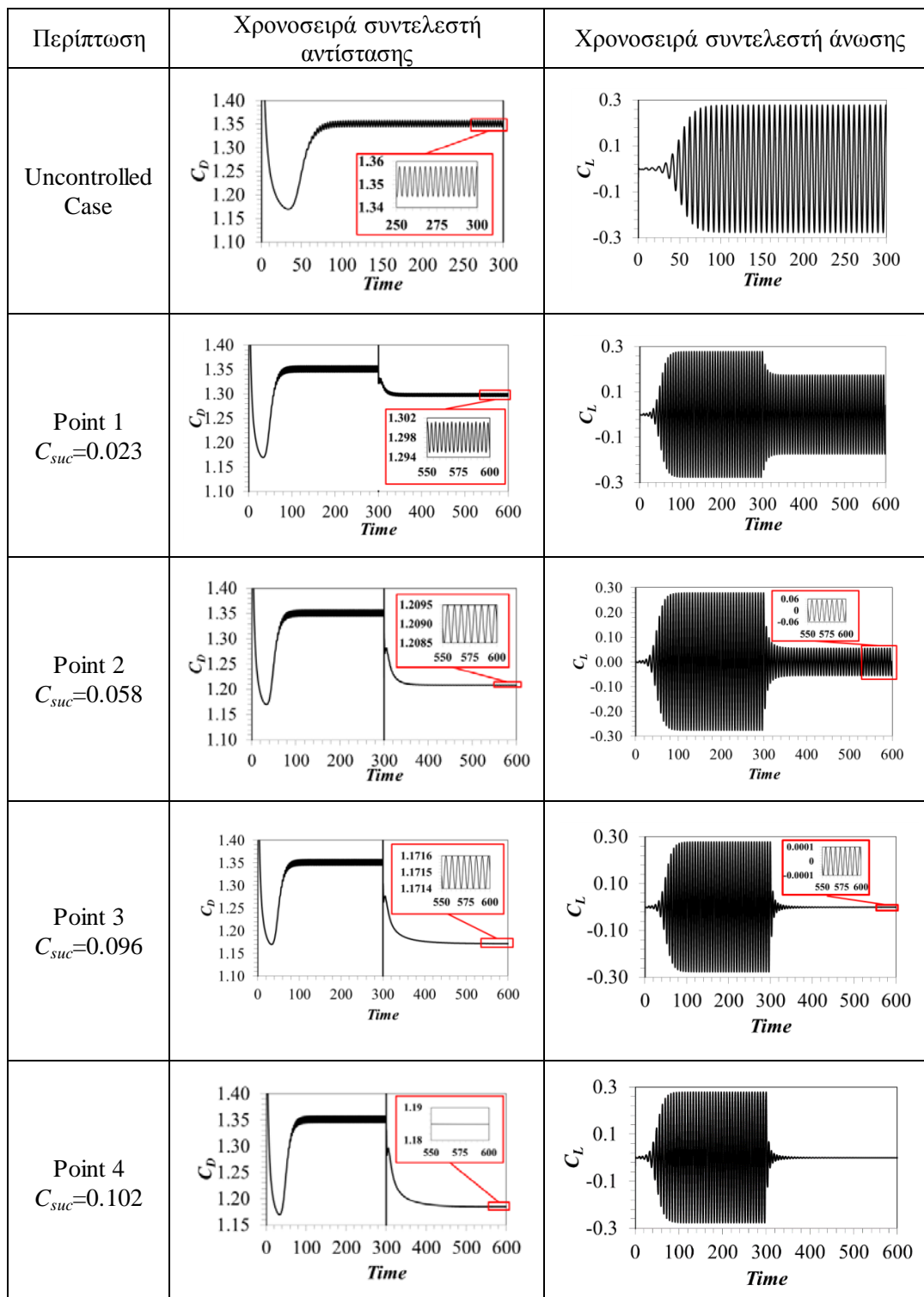
Εικόνα 23.  $Re=90$ : αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  συναρτήσει της αντικειμενικής συνάρτησης  $C_{suc}$  (συντελεστής αναρρόφησης). Συμπεριλαμβάνονται και περιπτώσεις της βιβλιογραφίας που χαρακτηρίζονται από αποκλειστική εφαρμογή εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, και επισημαίνεται η μείωση της δράσης ελέγχου των βέλτιστων λύσεων σε σχέση με αυτές.

Πίνακας 4.  $Re=90$ : τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για την περίπτωση χωρίς εφαρμογή δράσης ελέγχου, και για τις βέλτιστες λύσεις 1 έως 4, που απεικονίζονται στην Εικόνα 23.

Case	$C_{suc}$	$\theta_1$	$\theta_2$	$c$	$J_1$
Uncontrolled	-	-	-	-	0.319
Point 1	0.023	17.36°	158.12°	0.280	0.270
Point 2	0.058	29.59°	149.93°	0.200	0.220
Point 3	0.096	0.00°	151.83°	(0.428)	0.134
Point 4	0.102	11.57°	163.87°	0.380	0.000

Περίπτωση	Κατανομή αναρρόφησης/εμφύσησης	Ισοϋψείς καμπύλες στροβιλότητας
Uncontrolled Case		
Point 1 $C_{suc}=0.023$		
Point 2 $C_{suc}=0.058$		
Point 3 $C_{suc}=0.096$		
Point 4 $C_{suc}=0.102$		

Εικόνα 24.  $Re=90$ : κατανομή της ταχύτητας αναρρόφησης/εμφύσησης που αντιστοιχούν στις λύσεις 1 έως 4 που επισημαίνονται στην Εικόνα 23 (αριστερή στήλη), και ισοϋψείς καμπύλες της στιγμιαίας στροβιλότητας (δεξιά στήλη). Περιλαμβάνεται και η περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου.



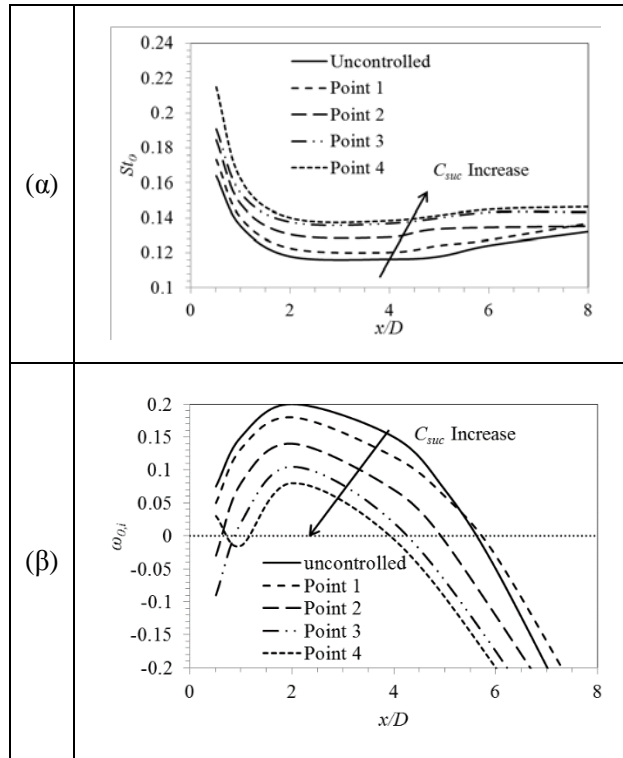
Εικόνα 25.  $Re=90$ : χρονοσειρές των συντελεστών αντίστασης και άνωσης για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, και για τις λύσεις 1 έως 4 που απεικονίζονται στην Εικόνα 23. Η δράση ελέγχου εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ .

### 4.3 Ανάλυση υδροδυναμικής ευστάθειας

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζονται για τις τέσσερις βέλτιστες λύσεις, καθώς και για την περίπτωση της ροής χωρίς δράση ελέγχου, οι τιμές της τοπικής γραμμικής συχνότητας,  $St_o$ , και του τοπικού γραμμικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών,  $\omega_{o,i}$ , ως συνάρτηση της οριζόντιας συντεταγμένης,  $x/D$ . Η Εικόνα 26α καταδεικνύει ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου,  $C_{suc}$ , οδηγεί σε αύξηση της τοπικής γραμμικής συχνότητας στη θεωρούμενη περιοχή του ομόρρου ( $x/D < 8$ ). Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της τοπικής γραμμικής συχνότητας,  $St_{o,max}$  και  $St_{o,min}$ , παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Η Εικόνα 26β καταδεικνύει ότι η αύξηση της δράσης ελέγχου ( $C_{suc}$ ) συντελεί στη δραστική μείωση, τόσο της έκτασης της περιοχής της απόλυτης αστάθειας, όσο και των τιμών του τοπικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών, επιδρώντας σταθεροποιητικά στη ροή.

Από την ανάλυση χρονοσειρών του συντελεστή άνωσης στο πλαίσιο της εξίσωσης Stuart-Landau υπολογίζονται η ολική γραμμική συχνότητα,  $St_{g,l} = \frac{\sigma_i}{2\pi}$ , και ο ολικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών,  $\sigma_r$ . Το αρνητικό πρόσημο του ολικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών στην περίπτωση του “Point 4” (Πίνακας 5) επιβεβαιώνει τη σταθεροποίηση της ροής, σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής. Από τον Πίνακα 5 γίνεται φανερό ότι η γραμμική ολική συχνότητα είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη μη γραμμική ( $St$ ), ενώ και οι δύο ολικές συχνότητες βρίσκονται εντός του πεδίου τιμών των τοπικών γραμμικών συχνοτήτων. Τέλος, ο Πίνακας 5 καταδεικνύει ότι η μέγιστη τιμή του τοπικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών,  $\omega_{o,max}$ , η έκταση της περιοχής της απόλυτης αστάθειας, καθώς και η τιμή του ολοκληρώματος  $I_g$ , μειώνονται με αύξηση της δράσης ελέγχου ( $C_{suc}$ ).





Εικόνα 26.  $Re=90$ : τιμές των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την τοπική ευστάθεια ως συνάρτηση της οριζόντιας συντεταγμένης, για την περίπτωση χωρίς δράση ελέγχου, και για τις βέλτιστες λύσεις 1 έως 4 που απεικονίζονται στην Εικόνα 23: (α) Απόλυτη συχνότητα, και (β) τοπικός ρυθμός ενίσχυσης διαταραχών.

Πίνακας 5.  $Re=90$ : ποσότητες που χαρακτηρίζουν την τοπική και ολική ευστάθεια της ροής, για αντιπροσωπευτικές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Case	Global Linear Frequency, $s=\sigma_r+i\sigma_i$		$St$	Local Linear Frequency Range ( $x/D < 8$ )		$I_g = \int_{x_a}^{x_b} \sqrt{\omega_{0,i}(x)} dx$ $\omega_{0,i}(x) > 0$		
	$\sigma_r$	$St_{g,l} = \frac{\sigma_i}{2\pi}$		$St_{0,min}$	$St_{0,max}$	$\omega_{0,i,max}$	$x_b-x_a$	$I_g$
Uncontrolled Flow	0.0898	0.128	0.158	0.118	0.165	0.200	5.30	1.89
Point 1	0.0727	0.127	0.155	0.123	0.178	0.180	5.20	1.72
Point 2	0.0555	0.129	0.150	0.132	0.188	0.135	4.30	1.09
Point 3	0.0033	0.120	0.143	0.139	0.192	0.105	3.37	0.61
Point 4	-0.0151	0.141	-	0.140	0.218	0.075	2.80	0.29



## **Κεφάλαιο 5: Έλεγχος ανατροφοδότησης: βελτιστοποίηση του σχήματος ελέγχου**

Στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν για την αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán ένα σχήμα παθητικού ελέγχου και ένα σχήμα ενεργού ελέγχου ανοικτού βρογχου. Καί στα δύο σχήματα που μελετήθηκαν, στόχος ήταν η σταθεροποίηση της ροής με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Ο παραπάνω στόχος επετεύχθη με διαμόρφωση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, οδηγώντας σε λύσεις σημαντικά βελτιωμένες σε σχέση με αντίστοιχες προηγούμενων σχετικών μελετών. Εντούτοις, εγείρεται το ερώτημα εάν μπορεί να επιτευχθεί μερική ή πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση ακόμη χαμηλότερων επιπέδων δράσης ελέγχου. Για τον σκοπό αυτόν, σχεδιάζονται δύο σχήματα ενεργού ελέγχου ανατροφοδότησης, χρησιμοποιώντας κατάλληλα τις δράσεις ελέγχου που εφαρμόστηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Στο πρώτο σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης (παρουσιάζεται μόνο στο αγγλικό κείμενο της διατριβής) χρησιμοποιείται ως δράση ελέγχου η εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης από κατάλληλες οπές στην επιφάνεια του κυλίνδρου, ενώ στο δεύτερο σχήμα χρησιμοποιείται η εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Καί στα δύο σχήματα ελέγχου, το σήμα ανατροφοδότησης παράγεται με βάση τη συνεχή μέτρηση κατάλληλου χρονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους σε ένα σημείο στον ομόρρο του κυλίνδρου. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων ελέγχου γίνεται με διαμόρφωση και επίλυση κατάλληλων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι βέλτιστες λύσεις αξιολογούνται και συγκρίνονται με αντίστοιχες των προηγούμενων σχημάτων ελέγχου, ως προς το επίπεδο δράσης ελέγχου που απαιτούν.

### **5.1 Έλεγχος ανατροφοδότησης με χρήση χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης**

#### **5.1.1 Ενεργός έλεγχος με χρήση υλικών με χρονικά μεταβαλλόμενη υδροφοβικότητα**

Στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας αποδείχθηκε, με χρήση βελτιστοποίησης, ότι η εφαρμογή επιφανειακής υδροφοβικότητας σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου οδηγεί σε αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση δράσης ελέγχου μειωμένης κατά 50%, σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Εντούτοις, επειδή το κατασκευαστικό κόστος των υδροφοβικών επιφανειών είναι αρκετά υψηλό, ενώ παρουσιάζει δυσκολίες και η κατασκευή υδροφοβικών επιφανειών με μεγάλο μήκος ολίσθησης, είναι επιθυμητή η περαιτέρω μείωση του απαιτούμενου για τη σταθεροποίηση της ροής μήκους ολίσθησης.

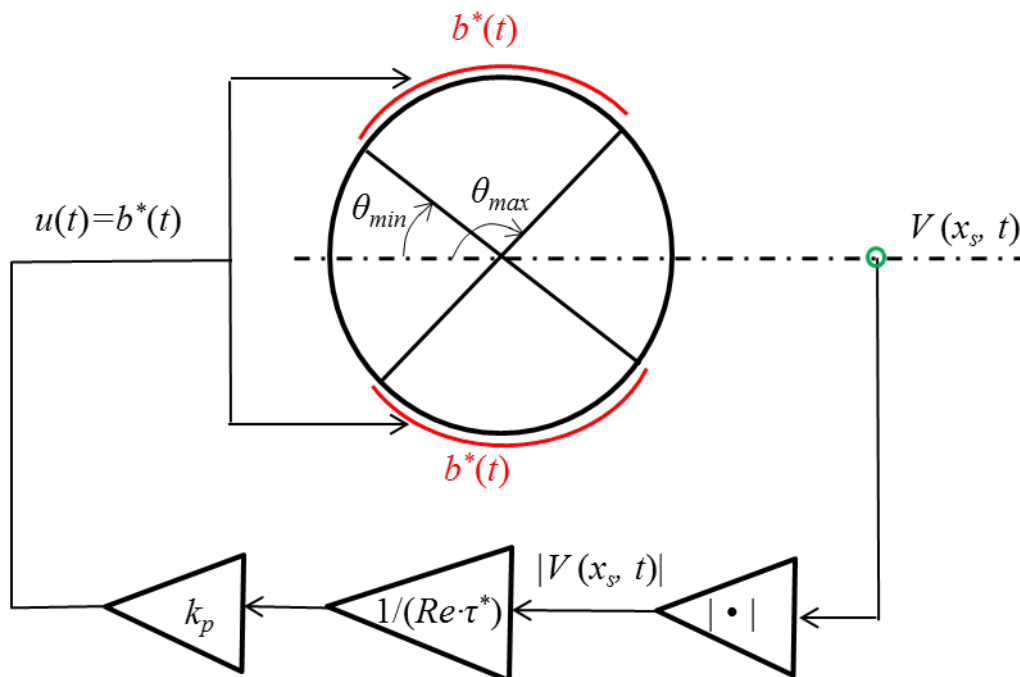
Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, μια υποψήφια προσέγγιση είναι η χρήση υλικών που χαρακτηρίζονται από χρονικά μεταβαλλόμενες υδροφοβικές ιδιότητες. Τα εν λόγω υλικά, που έχουν πολύ πρόσφατα μελετηθεί και κατασκευαστεί, μεταβάλλουν τις υδροφοβικές τους ιδιότητες όταν βρεθούν υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου, πχ μαγνητικού ή ηλεκτρικού (Verplanck et al., 2007). Το κύριο πλεονέκτημά αυτών των υλικών είναι ότι επιτρέπουν την εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης σε μια κατάλληλα κατασκευασμένη επιφάνεια, με τη χρήση ελέγχου ανατροφοδότησης, γεγονός το οποίο τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές ελέγχου ροής.

Σε προηγούμενες μελέτες έχει καταδειχθεί ότι η αναίρεση του δρόμου δινών μπορεί να επιτευχθεί με εφαρμογή ελέγχου ανατροφοδότησης (Park et al., 1994), χαρακτηριζόμενη από μειωμένη δράση ελέγχου, σε σχέση με τη δράση ελέγχου που απαιτείται στο πλαίσιο σχημάτων ελέγχου ανοικτού βρόχου. Η συγκεκριμένη διαπίστωση υποδεικνύει ότι η εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου στο πλαίσιο ενός σχήματος ελέγχου ανατροφοδότησης μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση μειωμένης δράσης ελέγχου, σε σύγκριση με το αντίστοιχο σχήμα παθητικού ελέγχου (με χρήση χρονικά σταθερής υδροφοβικότητας) που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Εδώ, ως μετρούμενο μέγεθος επιλέγεται η εγκάρσια στιγμιαία ταχύτητα  $V(x_s, t)$  σε ένα σημείο επί του άξονα συμμετρίας στον ομόρρου, ενώ ως εντολή ελέγχου,  $u(t)$ , χρησιμοποιείται το χρονικά μεταβαλλόμενο μήκος ολίσθησης,  $b^*(t)$ , το οποίο υπολογίζεται στο πλαίσιο ενός σχήματος αναλογικού ελέγχου με τη χρήση του μοντέλου Navier, ως ακολούθως:

$$u(t) = b^*(t) = \frac{1}{Re \cdot \tau^*} k_p |V(x_s, t)| \quad (27)$$

όπου  $k_p$  είναι η τιμή του κέρδους του αναλογικού ελεγκτή. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου απεικονίζεται στην Εικόνα 27. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται οι περιπτώσεις εφαρμογής ελεγχόμενης (χρονικά μεταβαλλόμενης) υδροφοβικότητας, τόσο σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, όσο και σε τμήμα αυτής. Στην τελευταία περίπτωση, το εύρος της περιοχής ελεγχόμενης υδροφοβικότητας ορίζεται από τις γωνίες  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$  (Εικόνα 27).

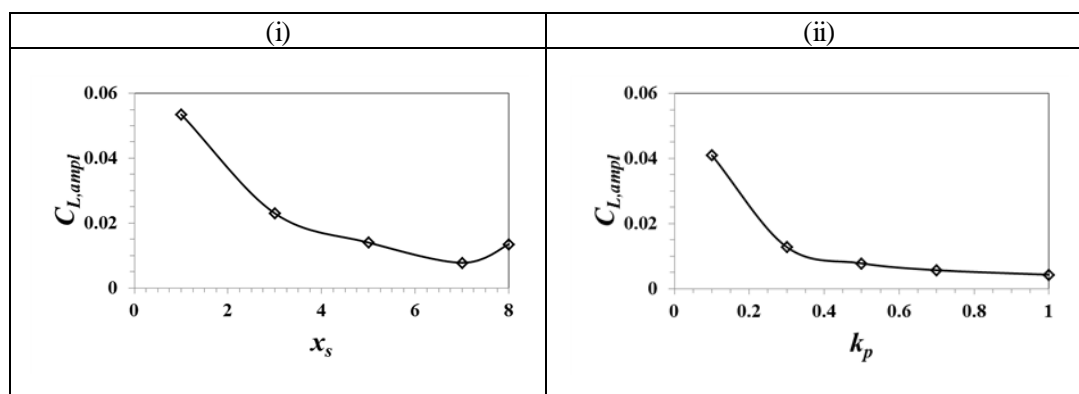


Εικόνα 27. Αναλογικό σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης. Απεικονίζονται η οριζόντια θέση του αισθητήρα,  $x_s$ , η έκταση της περιοχής χρονικά μεταβαλλόμενης υδροφοβικότητας, ορισμένη από τις γωνίες  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$ , το αναλογικό κέρδος ανατροφοδότησης,  $k_p$ , καθώς και η εντολή ελέγχου,  $u(t)$ .

## 5.1.2 Εφαρμογή ελεγχόμενης υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου

Αρχικά, γίνεται μια παραμετρική μελέτη, στο πλαίσιο της οποίας μεταβάλλονται οι παραμέτροι του βρόχου ανατροφοδότησης, και συγκεκριμένα η θέση του αισθητήρα  $x_s$ , και η τιμή του αναλογικού κέρδους ανατροφοδότησης,  $k_p$ . Εδώ, εφαρμόζονται χρονικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, και παρουσιάζονται αποτελέσματα για  $Re=60$ .

Αρχικά, χρησιμοποιείται μια σταθερή τιμή για το αναλογικό κέρδος, συγκεκριμένα  $k_p=0.5$ , και μεταβάλλεται η οριζόντια θέση του αισθητήρα,  $x_s$ . Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται το προκύπτον πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,amp}$ , ως συνάρτηση της οριζόντιας θέσης του αισθητήρα,  $x_s$ . Η Εικόνα 28 δεικνύει μια πτωτική τάση του  $C_{L,amp}$  καθώς ο αισθητήρας μετακινείται κατάντη, στην περιοχή του ομόρρου. Όταν ο αισθητήρας τοποθετείται στη θέση  $x_s=7$ , ο συντελεστής άνωσης λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του, αντιστοιχώντας σε πολύ χαμηλά επίπεδα αστάθειας, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται πλήρης σταθεροποίηση της ροής. Τέλος, όταν ο αισθητήρας τοποθετείται σε θέση  $x_s>7$ , η αστάθεια ενισχύεται εκ νέου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η σταθερή τιμή για τη διαμήκη θέση του αισθητήρα  $x_s=7$ , και μεταβάλλεται η τιμή του αναλογικού κέρδους,  $k_p$ . Από την Εικόνα 27 καθίσταται σαφές ότι, με την αύξηση της τιμής του αναλογικού κέρδους, η τιμή του  $C_{L,amp}$  μειώνεται, προσεγγίζοντας μηδενικά επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για τιμές του αναλογικού κέρδους  $k_p>0.5$ , δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή των τιμών των υπολογισθέντων ροϊκών μεγεθών.



Εικόνα 28.  $Re=60$ : πλάτος του συντελεστή άνωσης,  $C_{L,amp}$ , (i) συναρτήσει της οριζόντιας θέσης του αισθητήρα,  $x_s$ , για τιμή του αναλογικού κέρδους  $k_p=0.5$  (αριστερή στήλη), και (ii) συναρτήσει του αναλογικού κέρδους,  $k_p$ , όταν ο αισθητήρας τοποθετείται στη θέση  $x_s=7$ . Όλη η επιφάνεια του κυλίνδρου είναι υδροφοβική.

## 5.2 Έλεγχος ανατροφοδότησης: βελτιστοποίηση παραμέτρων

Στο παρόν εδάφιο, εφαρμόζεται ένα σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης με εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου. Οι παράμετροι του προβλήματος είναι οι γωνίες  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$  που ορίζουν την έκταση της υδροφοβικής περιοχής, το αναλογικό κέρδος,  $k_p$ , και η οριζόντια θέση του αισθητήρα,  $x_s$ .

Προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί των παραμέτρων που αντιστοιχούν σε αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου, διαμορφώνεται και επιλύεται πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αποτελέσματα παρουσιάζονται για  $Re=90$ . Στο Αγγλικό κείμενο παρουσιάζονται αποτελέσματα και για  $Re=60$ .

### 5.2.1 Μεταβλητές σχεδίασης

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιούνται τέσσερις μεταβλητές σχεδίασης: οι γωνίες  $\theta_{min}$  και  $\theta_{max}$ , οι οποίες ορίζουν την υδροφοβική περιοχή, το αναλογικό κέρδος,  $k_p$ , και η οριζόντια θέση του αισθητήρα,  $x_s$ . Επίσης, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα εκτενή όρια του χώρου αναζήτησης των μεταβλητών σχεδίασης:

$$1 \leq x_s \leq 10, 0 \leq k_p \leq 0.5, 0^\circ \leq \theta_{min} \leq 70^\circ, 110^\circ \leq \theta_{max} \leq 180^\circ \quad (28)$$

Η επιλογή των ορίων του χώρου αναζήτησης γίνεται με βάση τα αντίστοιχα όρια που επιλέχθηκαν για τη βελτιστοποίηση του παθητικού σχήματος ελέγχου με χρήση χρονικά σταθερής υδροφοβικότητας (κεφάλαιο 3), καθώς και με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο (5.1.2).

### 5.2.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις

Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες δύο αντικειμενικές συναρτήσεις:

(α) Αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$ :

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση,  $J_1$ , η οποία ποσοτικοποιεί την ολική αστάθεια της ροής, είναι η ίδια με αυτήν που ορίστηκε και στα προηγούμενα προβλήματα βελτιστοποίησης (βλ. εξισώσεις 10, 11, 12).

(β) Αντικειμενική συνάρτηση  $J_2$ :

Η δράση ελέγχου αυξάνεται με το χρονικά μεταβαλλόμενο μήκος ολίσθησης (που ορίζεται ως το γινόμενο της μετρούμενης από τον αισθητήρα εγκάρσιας ταχύτητας και του αναλογικού κέρδους ανατροφοδότησης) και με το ημιεύρος της υδροφοβικής περιοχής. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση που ποσοτικοποιεί τη δράση ελέγχου, ορίζεται ως:

$$J_2 = S_{V_{x_s}} k_p \frac{(\theta_{max} - \theta_{min})}{2} \quad (29)$$

όπου η τυπική απόκλιση της εγκάρσιας ταχύτητας  $S_{V_{x_s}}$  στο σημείο του αισθητήρα,  $x_s$ , ορίζεται ως ακολούθως:

$$S_{V_{x_s}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{t_i, x_s})^2} \quad (30)$$

όπου  $V_{t_i, x_s}$  είναι η εγκάρσια ταχύτητα στο ίδιο σημείο, τη χρονική στιγμή  $t_i$ .

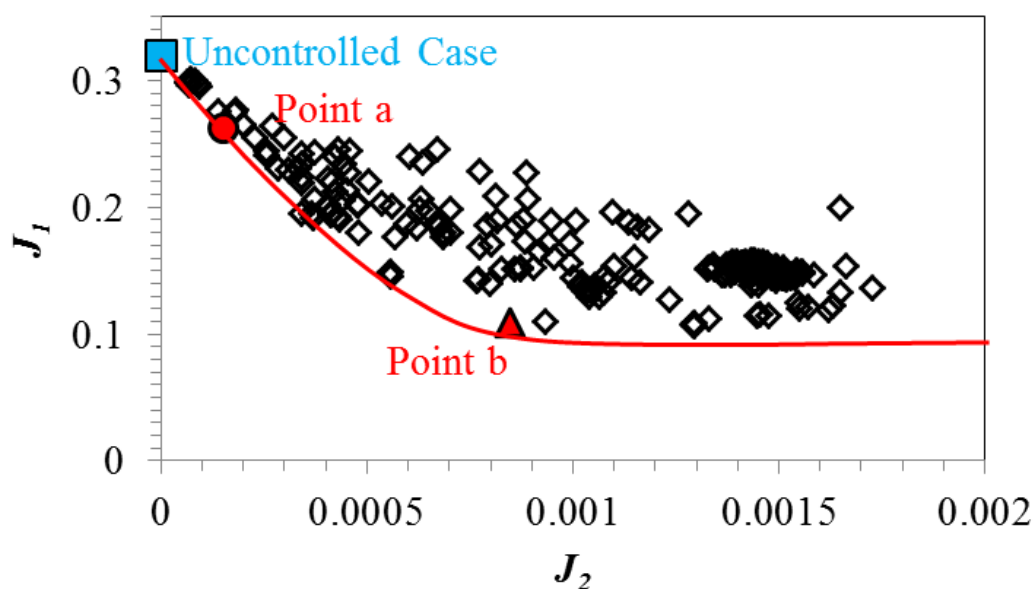
### 5.2.3 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης

Το παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών των τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης ( $x_s$ ,  $k_p$ ,  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{max}$ ) που ελαχιστοποιούν ταυτόχρονα τις αντικειμενικές συναρτήσεις  $J_1$  και  $J_2$ .

## 5.2.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για  $Re=90$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 29, αναφορικά με τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος,  $J_1$ ,  $J_2$ . Επιπλέον, στην Εικόνα 29 απεικονίζονται με έγχρωμα σύμβολα δύο αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto, και συμβολίζονται με “Point a” και “Point b”, καθώς και η περίπτωση που δεν εφαρμόζεται δράση ελέγχου. Για αυτές τις περιπτώσεις, οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων καταγράφονται στον Πίνακα 6.

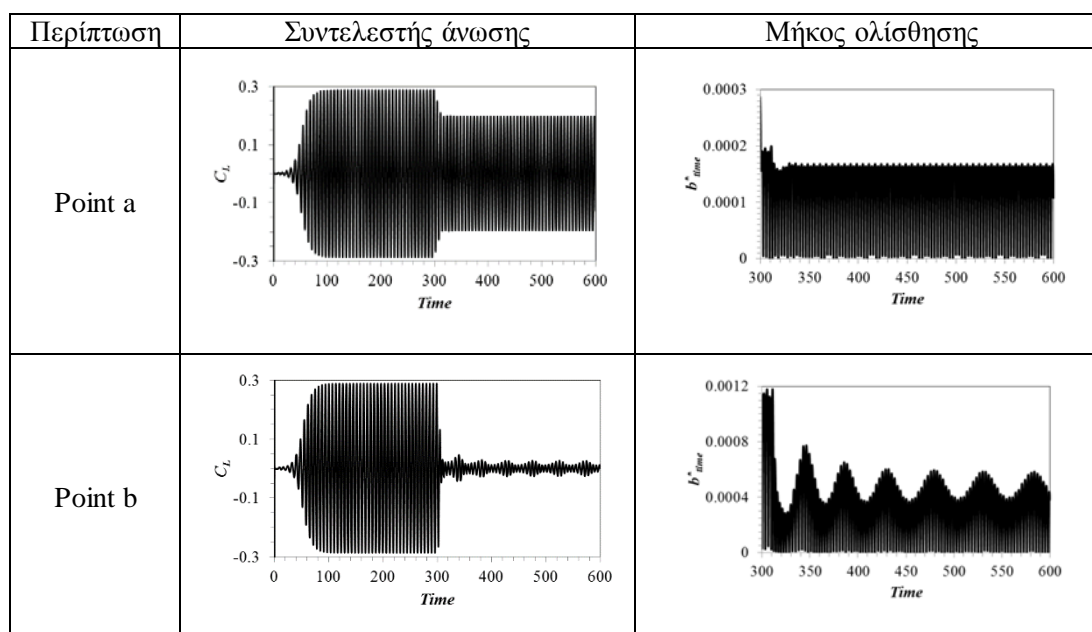
Ο Πίνακας 6 περιλαμβάνει και βέλτιστες λύσεις που υπολογίστηκαν στην παρούσα διατριβή στο πλαίσιο του παθητικού σχήματος ελέγχου με εφαρμογή τμηματικής (χρονικά σταθερής) υδροφοβικότητας, οι οποίες απεικονίζονται ως “Point 1” και “Point 2” στην Εικόνα 11 του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου, καθώς και μία λύση που αφορά σε εφαρμογή χρονικά σταθερής υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου, η οποία περιλαμβάνεται στην εργασία των Legendre et al. (2009). Ο Πίνακας 6 υποδεικνύει ότι, για τις βέλτιστες λύσεις, η μείωση των επιπέδων της αστάθειας στη ροή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αύξηση της τιμής του αναλογικού κέρδους,  $k_p$  και δευτερευόντως στη μετακίνηση της θέσης του αισθητήρα μακρύτερα από τον κύλινδρο. Για αυτές τις βέλτιστες λύσεις, η Εικόνα 30 παρουσιάζει τις χρονοσειρές του συντελεστή αντίστασης και του μήκους ολίσθησης. Γίνεται φανερό ότι, για τη λύση που συμβολίζεται ως “Point b”, το πλάτος του συντελεστή άνωσης ελαχιστοποιείται, ενώ το αντίστοιχο μήκος ολίσθησης ελαττώνεται. Τέλος, ο Πίνακας 6 υπογραμμίζει το γεγονός ότι η δράση ελέγχου, που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί επίσης από το γινόμενο  $\frac{1}{2}b^*(\theta_{max}-\theta_{min})$ , μειώνεται κατά περισσότερο από δύο τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με το παθητικό σχήμα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής.



Εικόνα 29.  $Re=90$ : αντικειμενική συνάρτηση  $J_1$  ως συνάρτηση της αντικειμενικής συνάρτησης  $J_2$  για λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης με εφαρμογή ελέγχου ανατροφοδότησης.

Πίνακας 6.  $Re=90$ : τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων, για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται δράση ελέγχου, για τις λύσεις που συμβολίζονται ως “Point a” και “Point b” στην Εικόνα 29, καθώς και για τις λύσεις που αντιστοιχούν σε παθητικό σχήμα ελέγχου με υδροφοβικότητα σε τμήμα του κυλίνδρου (“Point 1” και “Point 2” στην Εικόνα 11) και σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου (Legendre et al., 2009). Στον πίνακα περιλαμβάνονται οι τιμές του μεγέθους  $1/2b^*\varphi$  (το  $\varphi$  σε ακτίνια). Για τις περιπτώσεις ελέγχου ανατροφοδότησης, οι τιμές του  $b^*$  αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή του.

Case	$k_p$	$x_s$	$\theta_{min}$	$\theta_{max}$	$J_1$	$J_2$	$b^*$	$\varphi=\theta_{max}-\theta_{min}$	$1/2b^*\varphi$
Uncontrolled	-	-	-	-	0.319	0.00000	0.00000	$0^\circ$	0.0000
Point a	0.043	8.2	$56^\circ$	$119^\circ$	0.261	0.00015	0.00018	$63^\circ$	0.0001
Point b	0.263	8.6	$20^\circ$	$153^\circ$	0.112	0.00085	0.00060	$133^\circ$	0.0007
Point 1	-	-	$41^\circ$	$129^\circ$	0.261	-	0.04100	$88^\circ$	0.0310
Point 2	-	-	$34^\circ$	$146^\circ$	0.112	-	0.19600	$122^\circ$	0.1560
$b^*=0.15$	-	-	$0^\circ$	$180^\circ$	0.112	-	0.15000	$180^\circ$	0.2350



Εικόνα 30.  $Re=90$ : χρονοσειρές του συντελεστή άνωσης και του μήκους ολίσθησης για τις περιπτώσεις που συμβολίζονται στην Εικόνα 29 με “Point a” και “Point b”, αντίστοιχα. Ο ενεργός έλεγχος ανατροφοδότησης εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=300$ .



# Κεφάλαιο 6: Καινοτομίες της παρούσας διατριβής και συμβολή στην επιστημονική έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τον έλεγχο της ολικής ευστάθειας του πρότυπου προβλήματος της ροής γύρω από κύλινδρο, βελτιστοποιώντας σχήματα παθητικού και ενεργού ελέγχου (ανοικτού και κλειστού βρόχου). Μια βασική καινοτομία της παρούσας εργασίας είναι η πρόταση μιας συστηματικής μεθοδολογίας για τον βέλτιστο σχεδιασμό παθητικών και ενεργών συστημάτων ελέγχου, η οποία περιλαμβάνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων με υπολογισμούς υδροδυναμικής ευστάθειας.

## 6.1 Προταθείσα μεθοδολογία

Για καθένα από τα προβλήματα που μελετήθηκαν, η προταθείσα μεθοδολογία συνίσταται στα ακόλουθα βήματα:

**Βήμα 1:** Διαμόρφωση μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Αρχικά, αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι του αρχικού προβλήματος (χωρίς την εφαρμογή δράσης ελέγχου), καθώς και οι παραμέτροι που ορίζουν τη δράση ελέγχου. Στην παρούσα διατριβή, η εφαρμογή της δράσης ελέγχου αντιστοιχεί στον ορισμό κατάλληλης (σταθερής ή χρονικά μεταβαλλόμενης) συνθήκης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Για κάθε σχήμα ελέγχου, η ανεξαρτησία της λύσης από τον αριθμό στοιχείων του πλέγματος και από την τιμή του χρονικού βήματος εξασφαλίζεται με τη βοήθεια ελέγχων της ακρίβειας της χωρικής και της χρονικής διακριτοποίησης.

**Βήμα 2:** Παραμετρική ανάλυση

Για κάθε σχήμα ελέγχου, διεξάγεται παραμετρική υπολογιστική ανάλυση, με στόχο τη διερεύνηση της εξάρτησης της ευστάθειας της ροής και της αντίστοιχης δράσης ελέγχου από τις τιμές των παραμέτρων ελέγχου, και τον προσδιορισμό του κατάλληλου πεδίου ορισμού των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης.

**Βήμα 3:** Διαμόρφωση και επίλυση πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι η επίτευξη μερικής ή πλήρους αναίρεσης του δρόμου δινών, με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, για κάθε υπό θεώρηση σχήμα ελέγχου, διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία, οι δύο στόχοι βελτιστοποίησης (αναίρεση του δρόμου δινών και ελαχιστοποίηση της δράσης ελέγχου) ποσοτικοποιούνται από κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις. Η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται με τη σύζευξη ενός κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (εδώ, ο κώδικας ANSYS CFX) με έναν κώδικα βελτιστοποίησης, ο οποίος βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους. Η επίλυση κάθε προβλήματος βελτιστοποίησης οδηγεί στον προσδιορισμό του συνόλου των βέλτιστων λύσεων (μέτωπο Pareto).

**Βήμα 4:** Χαρακτηρισμός των βέλτιστων ροϊκών πεδίων

Αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto (πεδία ροής και χρονοσειρές δυνάμεων) υπόκεινται σε κατάλληλη επεξεργασία, προκειμένου να υπολογιστούν χρήσιμα στατιστικά μεγέθη. Τα αποτελέσματα συσχετίζονται με την ένταση της αστάθειας και με το επίπεδο της δράσης ελέγχου.

**Βήμα 5:** Ανάλυση τοπικής γραμμικής υδροδυναμικής ευστάθειας των βέλτιστων λύσεων  
Για αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις γίνεται ανάλυση τοπικής υδροδυναμικής ευστάθειας της αντίστοιχης βασικής (αδιατάρακτης) ροής. Οι υπολογισθείσες τιμές του τοπικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών και της τοπικής γραμμικής συχνότητας συσχετίζονται με τα αποτελέσματα των μη γραμμικών υπολογισμών.

**Βήμα 6:** Υπολογισμός ολικού γραμμικού ρυθμού ενίσχυσης διαταραχών των βέλτιστων λύσεων

Για αντιπροσωπευτικές βέλτιστες λύσεις, οι χρονοσειρές του συντελεστή αντίστασης επεξεργάζονται στο πλαίσιο της εξίσωσης Stuart-Landau, και τα αποτελέσματα συσχετίζονται με τα αποτελέσματα των μη γραμμικών υπολογισμών.

## 6.2 Νέα ευρήματα της παρούσας διατριβής

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο εφαρμόστηκε προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες λύσεις για τα τέσσερα σχήματα ελέγχου της παρούσας διατριβής. Τα νέα ευρήματα της παρούσας έρευνας μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

(Α) Παθητικός έλεγχος με χρήση χρονικά σταθερής υδροφοβικότητας

Η παρούσα διαδακτορική διατριβή κατέδειξε, για πρώτη φορά, ότι η εφαρμογή υδροφοβικότητας, τόσο στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, όσο και σε αυτή του πίσω σημείου ανακοπής, αποσταθεροποιεί τη ροή. Το συγκεκριμένο εύρημα υποδεικνύει την αποφυγή εφαρμογής υδροφοβικότητας στις εν λόγω περιοχές σε σχήματα ελέγχου που αποσκοπούν στη σταθεροποίηση της ροής (εφαρμογή τμηματικής υδροφοβικότητας), οδηγώντας σε μειωμένο κόστος ελέγχου. Έτσι, υλοποιήθηκε ένα σχήμα παθητικού ελέγχου, με εφαρμογή υδροφοβικότητας σε τμήμα μόνο του κυλίνδρου. Η βέλτιστη έκταση της υδροφοβικής περιοχής προσδιορίστηκε, για πρώτη φορά, με χρήση μιας συστηματικής διαδικασίας βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατέδειξαν μια σημαντική μείωση της δράσης ελέγχου, της τάξεως του 50%, σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου.

(Β) Ενεργός έλεγχος ανατροφοδότησης με χρήση χρονικά μεταβαλλόμενης υδροφοβικότητας

Στην παρούσα διαδακτορική διατριβή προτάθηκε, για πρώτη φορά, η χρήση υλικών που εμφανίζουν χρονικά μεταβαλλόμενη υδροφοβικότητα, με στόχο τη σταθεροποίηση της ροής γύρω από κύλινδρο. Στην παρούσα έρευνα, η χρονικά μεταβαλλόμενη υδροφοβικότητα ρυθμίζεται με χρήση ενός σχήματος ελέγχου ανατροφοδότησης, οι παράμετροι του οποίου βελτιστοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατέδειξαν ότι η αστάθεια της ροής μπορεί να περιοριστεί με χρήση δράσης ελέγχου μειωμένης κατά δύο τάξεις μεγέθους, σε σύγκριση με τις βέλτιστες λύσεις που αντιστοιχούν σε χρήση χρονικά σταθερής υδροφοβικότητας. Το μέγεθος της μείωσης μπορεί να καταστήσει το προταθέν σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης ελκυστικό για μελλοντική υλοποίησή του σε εφαρμογές.

(Γ) Ενεργός έλεγχος ανοικτού βρόχου με χρήση χρονικά σταθερής αναρρόφησης/εμφύσησης

Στην παρούσα διατριβή διερευνήθηκε συστηματικά για πρώτη φορά η επίδραση της εφαρμογής χρονικά σταθερής αναρρόφησης/εμφύσησης σε τρεις περιοχές της επιφάνειας του κυλίνδρου (περιοχή εμπρός σημείου ανακοπής, πλάγια περιοχή, περιοχή πίσω σημείου ανακοπής). Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης, διαμορφώθηκε και επιλύθηκε πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο επιβλήθηκε ο περιορισμός της μηδενικής καθαρής παροχής στην επιφάνεια του κυλίνδρου, αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση των αντλητικών απαιτήσεων. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης οδήγησαν στον προσδιορισμό της πλήρους κατανομής της ταχύτητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου, και κατέδειξαν μια μείωση της δράσης ελέγχου έως και 50%, σε σύγκριση με προγενέστερες μελέτες.

(Δ) Ενεργός έλεγχος ανατροφοδότησης με χρήση χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης

Εφαρμόστηκε ένα σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης με χρήση χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης. Οι παράμετροι ελέγχου προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια μιας συστηματικής διαδικασίας βελτιστοποίησης, για πρώτη φορά. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατέδειξαν μια σημαντική μείωση της δράσης ελέγχου, σε σύγκριση με τις βέλτιστες λύσεις του σχήματος ελέγχου με χρονικά σταθερή αναρρόφηση/εμφύσηση. Επιπλέον, το παρόν βελτιστοποιημένο σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης είναι περισσότερο εύρωστο, συγκρινόμενο με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.



# Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

## 7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκε υπολογιστικά η βέλτιστη αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán σε ροή γύρω από κύλινδρο, για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds ( $Re < 180$ ), με χρήση σχημάτων παθητικού ελέγχου, ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου και ενεργού ελέγχου ανατροφοδότησης. Για τον σκοπό αυτόν, αναπτύχθηκε ένα εργαλείο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με σύζευξη ενός κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με έναν κώδικο βελτιστοποίησης βασισμένο σε γενετικούς αλγορίθμους. Οι βέλτιστες λύσεις ερμηνεύτηκαν με περαιτέρω υπολογισμούς τοπικής και ολικής υδροδυναμικής ευστάθειας, συγκεκριμένα με αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Orr-Sommerfeld, καθώς και με επεξεργασία χρονοσειρών του συντελεστή άνωσης στο πλαίσιο του μοντέλου Stuart-Landau.

Αρχικά, μελετήθηκε το πρόβλημα του παθητικού ελέγχου της ροής γύρω από κύλινδρο, με εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης (σε ολόκληρη και) σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου. Αποδείχτηκε ότι η εφαρμογή υδροφοβικότητας, τόσο στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, όσο και στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής, έχει αποσταθεροποιητική επίδραση στη ροή. Με οδηγό αυτή τη διαπίστωση, διαμορφώθηκε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών με τη χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου, στο πλαίσιο της τμηματικής εφαρμογής υδροφοβικότητας. Εδώ, η δράση ελέγχου ποσοτικοποιήθηκε ως το γινόμενο του μήκους ολίσθησης επί το τόξο της υδροφοβικής περιοχής. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καταδεικνύουν ότι η βέλτιστη εφαρμογή τμηματικής υδροφοβικότητας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της δράσης ελέγχου μέχρι και 50%, σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Οι υπολογισμοί τοπικής υδροδυναμικής ευστάθειας κατέδειξαν τη μείωση της τοπικής έντασης και της περιοχής της απόλυτης αστάθειας. Αυτό οδηγεί σε περιορισμό των διακυμάνσεων της μη γραμμικής ροής, και σε πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών για μια κρίσιμη τιμή της δράσης ελέγχου.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ένα σχήμα ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόχου με χρήση χρονικά σταθερής παροχής μάζας (αναρρόφηση/εμφύσηση) στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Αρχικά, εφαρμόστηκε αναρρόφηση/εμφύσηση σε καθεμία μόνο από τις ακόλουθες τρεις περιοχές του κυλίνδρου, συγκεκριμένα: (α) στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής, (β) στην πλάγια περιοχή, και (γ) στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η εφαρμογή αναρρόφησης στην περιοχή του εμπρός σημείου ανακοπής ή στην πλάγια περιοχή ή εμφύσησης στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής οδηγεί σε σταθεροποίηση της ροής. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, διαμορφώθηκε και επιλύθηκε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου, υπό τον περιορισμό της μηδενικής καθαρής παροχής μάζας. Εδώ, η συνολική παροχή αναρρόφησης/εμφύσησης ποσοτικοποιήθηκε με βάση τον συντελεστή αναρρόφησης,  $C_{suc}$ . Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατέδειξαν

ότι η πλήρης σταθεροποίηση της ροής μπορεί να επιτευχθεί με χρήση δράσης ελέγχου μειωμένης κατά 30%, σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες (Delaunay and Kaiktsis, 2001). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τοπικής υδροδυναμικής ευστάθειας πιστοποιούν τη μείωση, τόσο της περιοχής, όσο και της τοπικής έντασης της απόλυτης αστάθειας, καθώς αυξάνεται η δράση ελέγχου ( $C_{suc}$ ), με αποτέλεσμα την ολική σταθεροποίηση της ροής για ένα κρίσιμο επίπεδο της δράσης ελέγχου.

Τέλος, με στόχο τη σταθεροποίηση της ροής με χρήση ακόμη χαμηλότερων επιπέδων δράσης ελέγχου, αναπτύχθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν δύο σχήματα ενεργού ελέγχου ανατροφοδότησης, με χρήση: (α) χρονικά μεταβαλλόμενης αναρρόφησης/εμφύσησης, και (β) χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ολίσθησης. Καί στα δύο σχήματα, το σήμα ανατροφοδότησης υπολογίζεται με χρήση ενός νόμου αναλογικού ελέγχου, ο οποίος βασίζεται στο χρονικό σήμα της εγκάρσιας ταχύτητας, μετρούμενο από αισθητήρα κατάλληλα τοποθετημένο στην περιοχή του εγγύς ομόρρου, επί του άξονα συμμετρίας του πεδίου ροής. Στο πρώτο σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης εφαρμόστηκε χρονικά μεταβαλλόμενη αναρρόφηση/εμφύσηση από δύο οπές στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Τα αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κατέδειξαν την ευαισθησία της ευστάθειας της ροής στις τιμές των παραμέτρων ελέγχου (τιμή αναλογικού κέρδους, θέση αισθητήρα), ενώ η σταθεροποίηση κατέστη δυνατή για περισσότερους συνδυασμούς των παραμέτρων ελέγχου, σε σύγκριση με αυτούς που ανέδειξε η αντίστοιχη προσέγγιση των Park et al. (1994). Στο δεύτερο σχήμα ελέγχου ανατροφοδότησης, εφαρμόστηκαν χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες ολίσθησης σε ολόκληρη ή σε τμήμα της επιφάνειας του κυλίνδρου, με χρήση επιφανειών που μπορούν να εμφανίσουν ελεγχόμενη (χρονικά μεταβαλλόμενη) υδροφοβικότητα. Η αρχική παραμετρική ανάλυση κατέδειξε ότι, με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων ελέγχου, η εφαρμογή χρονικά μεταβαλλόμενης υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των επιπέδων αστάθειας. Με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, διαμορφώθηκε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με στόχο την αναίρεση του δρόμου δινών με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατέδειξαν ότι η ένταση της αστάθειας μπορεί να περιοριστεί σημαντικά με χρήση δράσης ελέγχου μειωμένης κατά δύο τάξεις μεγέθους, σε σύγκριση με την αντίστοιχη που απαιτείται στις βέλτιστες λύσεις του παθητικού σχήματος ελέγχου.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκε υπολογιστικά ο έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, με χρήση: (α) επιφανειακής υδροφοβικότητας, και (β) αναρρόφησης/εμφύσησης. Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα που απορρέουν από την παρούσα μελέτη.

Πρώτα, αναφορικά με την εφαρμογή παθητικού ελέγχου με χρήση επιφανειακής υδροφοβικότητας, η παρούσα υπολογιστική μελέτη μπορεί να επεκταθεί σε μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds, όπου η ροή καθίσταται τρισδιάστατη. Δεδομένου ότι οι υπολογισμοί της τρισδιάστατης ροής χαρακτηρίζονται από σημαντικά υψηλότερο υπολογιστικό κόστος, η βελτιστοποίηση οφείλει να είναι κατά το δυνατόν αποδοτικότερη. Για αυτόν τον σκοπό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υβριδικά σχήματα βελτιστοποίησης, με συνδυασμένη χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων που βασίζονται σε αιτιοκρατικές μεθόδους, καθώς επίσης να γίνει χρήση μεταμοντέλων. Εν προκειμένω, θα μπορούσε να προσδιοριστεί το εύρος της περιοχής (του αριθμού Reynolds), όπου η εφαρμογή τμηματικής

επιφανειακής υδροφοβικότητας είναι αποδοτικότερη από την εφαρμογή υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου (γεγονός το οποίο αποδείχτηκε στην παρούσα μελέτη για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds). Σε όλες τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των βέλτιστων υπολογιστικών λύσεων θα μπορούσαν να συγκριθούν με αντίστοιχα πειραματικά, τα οποία θα μπορούσαν να προκύψουν για παράδειγμα με χρήση της μεθόδου Particle Image Velocimetry (PIV).

Αναφορικά με την εφαρμογή ενός ενεργού σχήματος ελέγχου ανοικτού βρόχου με χρήση χρονικά σταθερής αναρρόφησης/εμφύσησης, παρουσιάζει ενδιαφέρον η επέκταση της παρούσας μελέτης σε μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds, με χρήση υπολογισμών τρισδιάστατης ροής. Σε αυτή την περίπτωση, η παροχή μάζας αναρρόφησης/εμφύσησης θα μπορούσε να είναι συνάρτηση και της τρίτης χωρικής διάστασης, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η τρισδιάστατη δομή της υπό έλεγχο ροής. Καί εδώ θα μπορούσε να διατηρηθεί το παρόν σχήμα ελέγχου, το οποίο επιβάλλει μηδενική καθαρή παροχή μάζας, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων άντλησης του ρευστού. Οι βέλτιστες υπολογιστικές λύσεις ενδείκνυται να συγκριθούν με πειραματικά αποτελέσματα.

Επιπλέον, παρουσιάζει ενδιαφέρον η πειραματική μελέτη του ελέγχου της ροής γύρω από κύλινδρο με χρήση επιφανειών που επιτρέπουν την υλοποίηση χρονικά μεταβαλλόμενης υδροφοβικότητας, τόσο για χαμηλές όσο και για υψηλότερες τιμές του αριθμού Reynolds. Η εν λόγω υλοποίηση θα μπορούσε να επιβεβαιώσει στην πράξη τη δραστική μείωση της δράσης ελέγχου, η οποία αποδείχτηκε υπολογιστικά στην παρούσα μελέτη για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds.

Τέλος, σημειώνεται ότι η συστηματική μεθοδολογία που προτάθηκε στην παρούσα διατριβή για τον παθητικό και ενεργό έλεγχο ροών μπορεί να εφαρμοστεί για τη βελτιστοποίηση και άλλων σχημάτων ελέγχου ροών. Συγκεκριμένα, για ροές γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα, τέτοια σχήματα ελέγχου μπορούν να περιλαμβάνουν περιστροφικές ταλαντώσεις του κυλίνδρου, κατάλληλη τοποθέτηση κυλίνδρων ελέγχου στον ομόρρο, καθώς και θέρμανση του κυλίνδρου. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα προσέγγιση, η οποία επικεντρώθηκε στη σταθεροποίηση της ροής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη διαφορετικών στόχων ελέγχου, όπως για παράδειγμα η μεγιστοποίηση της μεταφορόμενης θερμικής ισχύος.





## Βιβλιογραφία

1. Barkley D, Henderson RD. Three-dimensional Floquet stability analysis in the wake of a circular cylinder. *J Fluid Mech* 1996; 322: 215-241.
2. Chen Z, Aubry N. Active control of cylinder wake. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 2003; 10: 205–216.
3. Choi H, Jeon W-P, Kim J. Control of flow over a bluff body. *Ann Rev Fluid Mech* 2008; 40:113–139.
4. Chomaz JM, Huerre P, Redekopp LG. The effect of nonlinearity and forcing on global modes. *New Trends in Nonlinear Dynamics and Pattern-Forming Phenomena*, edited by P. Coulet and P. Huerre (Plenum, New York, 1990), 259-274.
5. Delaunay Y, Kaiktsis L (2001). Control of circular cylinder wakes using base mass transpiration. *Phys Fluids*, 13, 3285–3302.
6. Dong S, Triantafyllou GS, Karniadakis GE (2008). Elimination of vortex streets in bluff-body flows. *Physical Review Letters*, 100, 20, 204501.
7. Evangelinos C, Karniadakis GE. Dynamics and flow structures in the turbulent wake of rigid and flexible cylinders subject to vortex-induced vibrations. *J Fluid Mech* 1999; 400: 91–124.
8. Fey U, König M, Eckelmann H. A new Strouhal–Reynolds number relationship for the Circular Cylinder in the Range  $47 < Re < 2 \times 10^5$ . *Phys Fluids* 1998; 10 (7): 1547.
9. Fornberg B. A numerical study of steady viscous flow past a circular cylinder. *J Fluid Mech* 1980; 98 (04): 819–55.
10. Gad-el-Hak M. *Flow control: passive, active, and reactive flow management* 2007. Cambridge University Press.
11. Giannetti F, Luchini P. Structural sensitivity of the first instability of the cylinder wake.” *J Fluid Mech* 2007; 581: 167–97.
12. Henderson RD. Details of the drag curve near the onset of vortex shedding. *Phys. Fluids* 1995; 7: 2102–2104.
13. Kaiktsis L, Triantafyllou GS, Özbas M. Excitation, inertia, and drag forces on a cylinder vibrating transversely to a steady flow. *J Fluids and Structures* 2007; 23: 1–21.
14. Lee SB, Baek SJ, Sung HJ. Feedback control of a circular cylinder wake with rotational oscillation. *Fluid Dyn Res* 2009; 41 (01): 011403.
15. Legendre D, Lauga E, Magnaudet J. Influence of slip on the dynamics of two-dimensional wakes. *J Fluid Mech* 2009; 633: 437–447.
16. Milano M, Koumoutsakos P. A clustering genetic algorithm for cylinder drag optimization. *J Comp Phys* 2002; 175: 79–107.
17. Min C, Choi H. Suboptimal feedback control of vortex shedding at low Reynolds numbers. *J Fluid Mech* 1999; 401: 123–156.
18. Mittal S, Kumar B. Flow past a rotating cylinder. *J Fluid Mech* 2003; 476: 303–34.
19. Mittal S, Raghuvanshi A. Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers. *Int J Num Meth Fluids* 2001; 35 (4): 421–447.
20. Muralidhar P, Ferrer N, Daniello R, and Rothstein JP. Influence of Slip on the Flow Past Superhydrophobic Circular Cylinders. *J Fluid Mech* 2011; 680: 459–476.
21. Park DS, Ladd DM, Hendricks EW. Feedback control of von Kármán vortex shedding behind a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Phys. Fluids* 1994; 6: 2390–2405.
22. Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies. *J Aerosp Sci* 1955; 22: 124-132.
23. Rothstein JP. Slip on superhydrophobic surfaces. *Ann Rev Fluid Mech* 2010; 41:89-109.
24. Seo IW, Song CG. Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder with slip conditions. *Int J Num Meth in Fluids* 2012; 68 (12): 1538–60.

25. Strykowski PJ, Sreenivasan KR. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers. *J Fluid Mech* 1990;218:71-107.
26. Tokumaru PT, Dimotakis PE. Rotary oscillation control of a cylinder wake. *J Fluid Mech* 1991; 224 :77–90.
27. Tokumaru PT, Dimotakis PE. The lift of a cylinder executing rotary motions in a uniform flow. *J Fluid Mech* 1993; 255: 1-10.
28. Verplanck N, Coffinier Y, Thomy V, Boukherroub R. Wettability switching techniques on superhydrophobic surfaces. *Nanoscale Res Lett* 2007; 12: 577.
29. Wu MH, Wen CY, Yen RH, Weng MC, Wang AB. experimental and numerical study of the separation angle for flow around a circular cylinder at low Reynolds number. *J Fluid Mech* 2004; 515: 233–60.
30. You D, Moin P. Effects of Hydrophobic Surfaces on the Drag and Lift of a Circular Cylinder. *Phys Fluids* 2007; 31 (8): 08170.
31. Zhang, WM, Meng G, Wei X. A review on slip models for gas microflows. *Microfluidics and Nanofluidics* 2012; 13(6): 845–882.