

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán σε ροή γύρω από υδροφοβικό κύλινδρο με τοποθέτηση κυλίνδρου ελέγχου

Γεώργιος Δ. Γιαννόπουλος

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Α. Καϊκτσης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη: Γ.Σ. Τριανταφύλλου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ.Ι. Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Λάμπρο Καϊκτσή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας, καθώς και για την εποπτεία και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Θέλω ακόμα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Μάριο Μαστρόκαλο για την πολύτιμη και ανεκτίμητη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης, για τις χρήσιμες ιδέες και υποδείξεις του. Τέλος, ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή κ. Γ. Τριανταφύλλου και Επίκουρο Καθηγητή κ. Χ. Παπαδόπουλο, για τη συμβολή τους.

Περίληψη

Η ροή γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα αποτελεί αντικείμενο εκτενούς έρευνας εξαιτίας των πολλών σχετικών εφαρμογών σε ένα μεγάλο εύρος κατασκευών. Το ενδιαφέρον της μελέτης των κατασκευών αυτών προκύπτει, σε μεγάλο βαθμό, από το γεγονός ότι, λόγω της δημιουργίας του δρόμου δινών von Kármán, αυτές υπόκεινται σε δυναμικές φορτίσεις, οι οποίες μπορούν να επιφέρουν κόπωση, και σε ακραίες συνθήκες να οδηγήσουν σε αστοχία.

Στο σχετικό πεδίο έρευνας, ξεχωριστή θέση κατέχει η ροή γύρω από κύλινδρο. Η τελευταία αποτελεί μια πρότυπη ροή που έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, λόγω της απλότητας στον ορισμό του προβλήματος, του μεγάλου εύρους των σχετικών εφαρμογών, αλλά και της σύνθετης και ενδιαφέρουσας φύσης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Ένας κύριος στόχος που μπορεί να τεθεί στο πλαίσιο του ελέγχου της ροής γύρω από κύλινδρο είναι η μερική ή η πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών, και κατά συνέπεια των επαγόμενων δυναμικών φορτίσεων στις κατασκευές. Οι μέθοδοι ελέγχου μπορεί να είναι παθητικές ή ενεργητικές, με τις τελευταίες να χαρακτηρίζονται από χρήση ενέργειας για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου.

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο συνδυασμός δύο μεθόδων παθητικού ελέγχου με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου των δινών στη ροή γύρω από κύλινδρο, με χρήση χαμηλών επιπέδων δράσης ελέγχου, για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds. Συγκεκριμένα, τοποθετείται ένας μικρότερος κύλινδρος (κύλινδρος ελέγχου) σε κατάλληλες θέσεις στην περιοχή του ομόρρου του κύριου κυλίνδρου, ενώ ταυτόχρονα γίνεται χρήση υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου, ή σε τμήμα αυτής. Εν προκειμένω, το κόστος ελέγχου είναι ανάλογο του αδιάστατου μήκους ολίσθησης που χαρακτηρίζει την υδροφοβική επιφάνεια.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση του κυλίνδρου ελέγχου έχει σταθεροποιητική επίδραση στη ροή, σε συμφωνία με αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Η εν λόγω σταθεροποιητική επίδραση καθίσταται εντονότερη με αύξηση της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου, καθώς και με μείωση της απόστασης μεταξύ των δύο κυλίνδρων. Η χρήση κατάλληλα τοποθετημένου κυλίνδρου ελέγχου με διάμετρο ίση προς το $1/7$ της διαμέτρου του κύριου κυλίνδρου μειώνει την απαίτηση σε μήκος ολίσθησης για την πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών κατά περίπου 50%. Τέλος, η χρήση υδροφοβικότητας σε τμήμα μόνο της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου, εξαιρουμένης της περιοχής του πίσω σημείου ανακοπής, οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της απαίτησης σε μήκος ολίσθησης για την πλήρη σταθεροποίηση της ροής, συγκεκριμένα κατά 10%. Η δυνατότητα σημαντικής μείωσης της απαίτησης σε μήκος ολίσθησης και εύρος της υδροφοβικής επιφάνειας καθιστά το παρόν σχήμα ελέγχου ενδιαφέρον στο πλαίσιο μιας μελλοντικής εφαρμογής του σε κατασκευές.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
1. Εισαγωγή	10
1.1 Ροή γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα	10
1.2 Ροή γύρω από κύλινδρο	11
1.2.1 Δομή της ροής γύρω από κύλινδρο	11
1.2.2 Δυνάμεις αντίστασης και άνωσης	14
2. Έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο	15
2.1 Παθητικός έλεγχος της ροής (Passive control)	15
2.1.1 Τοποθέτηση διαχωριστικών πλακών στον ομόρρου (Splitter plates)	15
2.1.2 Τοποθέτηση ενός μικρότερου κυλίνδρου στον ομόρρου του κυλίνδρου (Control wire)	16
2.1.3 Εφαρμογή υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου (Hydrophobic material)	16
2.2 Ενεργός έλεγχος της ροής (Active control).....	16
2.2.1 Εφαρμογή δύναμης Lorentz (Lorentz force)	17
2.2.2 Περιστροφή του κυλίνδρου (Rotation).....	17
2.2.3 Αναρρόφηση και εμφύσηση ρευστού (Suction/Blowing).....	17
2.2.4 Θέρμανση του κυλίνδρου (Cylinder heating).....	18
3. Διατύπωση προβλήματος.....	19
3.1 Επισκόπηση μεθόδων ελέγχου που εφαρμόζονται στην παρούσα μελέτη	19
3.1.1 Τοποθέτηση κυλίνδρου ελέγχου στον ομόρρου του κύριου κυλίνδρου.....	19
3.1.2 Εφαρμογή υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου	20
3.2 Εξισώσεις ροής.....	22
3.3 Υπολογιστικό πεδίο – Συνοριακές συνθήκες.....	22
3.4 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος.....	24
3.5 Έλεγχος ακρίβειας διακριτοποίησης	25
3.5.1 Έλεγχος ακρίβειας χωρικής διακριτοποίησης	25
3.5.2 Έλεγχος ακρίβειας χρονικής διακριτοποίησης.....	28
3.6 Αντικατάσταση του κυλίνδρου ελέγχου από πλέγμα.....	30
4. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά προηγούμενων εργασιών.....	31
4.1 Σύγκριση με αποτελέσματα των Strykowski and Sreenivasan (1990)	31

4.2 Σύγκριση με αποτελέσματα των Mittal and Raghuvanshi (2001)	36
5. Διερεύνηση της ευστάθειας της ροής γύρω από κύλινδρο με προσθήκη κυλίνδρου ελέγχου και χρήση υδροφοβικής επιφάνειας	39
5.1 Τοποθέτηση κυλίνδρου ελέγχου	39
5.2 Χρήση υδροφοβικής επιφάνειας	42
6. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης στον κύλινδρο ελέγχου	44
6.1 Τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στην περιοχή του ενός διαμητρικού στρώματος του κύριου κυλίνδρου	45
6.2 Τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας	48
7. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης στην επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου	53
7.1 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου (full slip)	53
7.2 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου για $Re = 90$ και διαφορετικές θέσεις του κυλίνδρου ελέγχου	55
7.2.1 Θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=1.2$, $Y/D= 1.0$ για λόγο διαμέτρων $D/d = 7$	55
7.2.2 Θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$ για λόγο διαμέτρων $D/d = 10$	60
7.2.3 Θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=2.0$, $Y/D= 1.0$ για λόγο διαμέτρων $D/d = 7$	63
7.2.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για συνδυασμούς θέσης και διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου	66
8. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου	67
9. Συμπεράσματα	71
10. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	73
Βιβλιογραφία	74

Υπότιτλοι Εικόνων

- Εικόνα 1. Πρότυπα μη αεροδυναμικά σώματα με διατομή: (α) κυκλική, (β) τετραγωνική, και (γ) τριγωνική. 10
- Εικόνα 2. Γωνία επαφής για: (α) υδρόφιλες επιφάνειες, (β) υδροφοβικές επιφάνειες, και (γ) για υπερυδροφοβικές επιφάνειες..... 21
- Εικόνα 3. Κατανομή της ταχύτητας κοντά στην επιφάνεια του κυλίνδρου, για μήκος ολίσθησης b 21
- Εικόνα 4. Υπολογιστικό πεδίο. 23
- Εικόνα 5. Ορισμός της τοπικής γωνίας, μετρούμενης από το μπροστινό σημείο ανακοπής, και απεικόνιση των τοπικών συνιστωσών της ταχύτητας, u_θ και u_r 23
- Εικόνα 6. Υποδιαίρεση του υπολογιστικού πεδίου σε οκτώ υποχωρία..... 24
- Εικόνα 7. Απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος με μεγεθύνσεις στις περιοχές εγγύς των δύο κυλίνδρων..... 24
- Εικόνα 8. $Re=90$, $D/d=7$, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$: ροϊκά μεγέθη ως συνάρτηση του αριθμού πεπερασμένων όγκων, N : (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St 27
- Εικόνα 9. Οι τιμές ροϊκών μεγεθών συναρτήσει του αδιάστατου χρονικού βήματος Δt . Ροϊκά μεγέθη: (α) Μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St 29
- Εικόνα 10. Οριοθέτηση των περιοχών τοποθέτησης του μικρού κυλίνδρου ($D/d=10$) που αντιστοιχούν σε αναίρεση του δρόμου δινών, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds (Strykowski and Sreenivasan, 1990). Με κόκκινο χρώμα σηματοδοτείται η ευσταθής περιοχή για $Re = 48$, ενώ με μπλε χρώμα η ευσταθής περιοχή για $Re = 60$ 32
- Εικόνα 11. Απεικόνιση των θέσεων τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου ($D/d=10$) που ελέγχθηκαν στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας (X). Στην Εικόνα, οριοθετείται επίσης η περιοχή τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου, που αντιστοιχεί σε αναίρεση του δρόμου δινών για $Re=60$ (Strykowski and Sreenivasan, 1990) 32
- Εικόνα 12. $Re=60$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, όταν ο κύλινδρος ελέγχου ($D/d=10$) τοποθετείται στην οριζόντια θέση $X/D = 2.0$, για διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις $Y/D=0, 0.5, 0.75, 1$ 33

Εικόνα 13. $Re=60$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, όταν ο κύλινδρος ελέγχου ($D/d=10$) τοποθετείται στην οριζόντια θέση $X/D = 2.0$, για διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις $Y/D=1.25, 1.5, 2.....$ 34

Εικόνα 14. $Re=60, D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει της εγκάρσιας θέσης του μικρού κυλίνδρου, Y/D , για διαμήκη θέση $X/D=2.0$: (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, και (γ) αριθμός Strouhal, $St.....$ 35

Εικόνα 15. $X/D=2, Y/D=1$ και $D/d=7$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αριθμού Reynolds (τιμές: $Re = 60, 70, 80$): (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle.....$ 37

Εικόνα 16. $X/D=2, Y/D=1$ και $D/d=7$: στιγμιαίες ισοϋψείς καμπύλες στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, με βάση τα παρόντα αποτελέσματα και αυτά της εργασίας των Mittal and Raghuvanshi (2001). 38

Εικόνα 17. $X/D=1.2, Y/D=1.0$ και $D/d=7$, χρήση μη υδροφοβικών κυλίνδρων: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αριθμού Reynolds: (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle.....$ 40

Εικόνα 18. $X/D=1.2, Y/D=1.0$ και $D/d=7$, χρήση μη υδροφοβικών κυλίνδρων: ισοϋψείς της στροβιλότητας και γραμμές ροής, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, $Re.....$ 41

Εικόνα 19. Ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* ($b^* = 0, 0.10, 0.15$) (Mastrokalos et al., 2015).43

Εικόνα 20. Μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* ($b^* = 0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$) (Mastrokalos et al., 2015).43

Εικόνα 21. $Re=90, X/D=1.5, Y/D=1.0$ και $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος συντελεστή άνωσης κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle.....$ 46

Εικόνα 22. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$ και $D/d=10$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για διαφορετικές τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου.....47

Εικόνα 23. $Re=90$, $Y/D=0$ και $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου: (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$50

Εικόνα 24. $Re=90$, $Y/D=0$, $D/d=10$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για συνδυασμούς των τιμών του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* και της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου, X/D51

Εικόνα 25. $Re=90$, $Y/D=0$, $D/d=10$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για συνδυασμούς των τιμών του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* και της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου, X/D52

Εικόνα 26. $X/D=1.2$, $Y/D=1$, $D/d=7$, εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου: ισοϋψείς της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, Re . Σε όλες τις περιπτώσεις σημειώνεται η κρίσιμη τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$ 54

Εικόνα 27. $Re=90$, $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$57

Εικόνα 28. $Re=90$, $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*=0, 0.05, 0.06$. 58

Εικόνα 29. $Re=90$, $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*=0.08, 0.1, 0.15$59

Εικόνα 30. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$, $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$61

Εικόνα 31. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$, $D/d=10$: στιγμιαίες ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*=0, 0.05, 0.08, 0.1$62

Εικόνα 32. $Re=90$, $X/D=2.0$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,amp}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,amp-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$64

Εικόνα 33. $Re=90$, $X/D=2.0$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*= 0.08, 0.1, 0.15$65

Εικόνα 34. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου, για τόξο γωνίας $\theta=142.56^\circ$. Η ροή είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά.67

Εικόνα 35. $X/D=1.2$, $Y/D=1$, $D/d=7$: ισοϋψείς της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για την κρίσιμη τιμή αναίρεσης του δρόμου δινών, $b^*_{critical}$, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, Re . Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου (δεν εφαρμόζεται συνθήκη ολίσθησης, στην περιοχή $\pm 37.44^\circ$ εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής του κυλίνδρου).69

Εικόνα 36. $X/D=1.2$, $Y/D=1$, $D/d=7$: κρίσιμες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου ή σε τμήμα αυτής (εξαίρεση της περιοχής $\pm 37.44^\circ$ εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής). ..70

Υπότιτλοι Πινάκων

Πίνακας 1. Ροή γύρω από κύλινδρο: Δομή του ομόρρου για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds (Sumer and Fredsøe, 2006)..... 13

Πίνακας 2. $Re=90$, $D/d=7$, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$: ροϊκά μεγέθη ως συνάρτηση του χρησιμοποιούμενου αριθμού πεπερασμένων όγκων, N : (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St 26

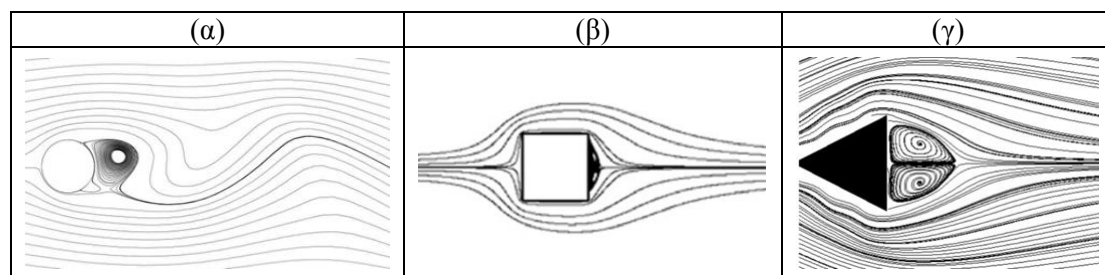
Πίνακας 3. $Re=90$, $D/d=7$, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$: ροϊκά μεγέθη ως συνάρτηση της τιμής του χρονικού βήματος, Δt : (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .
..... 28

Πίνακας 4. $Re=90$: ροϊκά μεγέθη: (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .
..... 30

1. Εισαγωγή

1.1 Ροή γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα

Μη αεροδυναμικά σώματα θεωρούνται οι κατασκευές των οποίων το μήκος, μετρούμενο κατά τη διεύθυνση της ροής, είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το πλάτος τους, μετρούμενο κατά τη διεύθυνση κάθετα στη ροή. Οι ροές γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα αποτελούν αντικείμενο έρευνας εξαιτίας των πολλών εφαρμογών τους σε πληθώρα κατασκευών. Τυπικά παραδείγματα κατασκευών που συμπεριφέρονται ως μη αεροδυναμικά σώματα στην ξηρά είναι τα ψηλά κτήρια και οι πυλώνες ανεμογεννητριών, στη θάλασσα οι αγωγοί μεταφοράς υδρογοναναθράκων, και σε μηχανολογικές κατασκευές οι εναλλάκτες θερμότητας. Οι μη αεροδυναμικές κατασκευές υπόκεινται σε χρονικά μεταβαλλόμενες δυνάμεις, εξαιτίας της εμφάνισης μιας διπλής σειράς περιοδικών δινών στην περιοχή του ομόρρου τους, που είναι γνωστή με την ονομασία «δρόμος δινών von Κάρμάν». Η περιοδική φύση των δυνάμεων αυτών μπορεί να οδηγήσει στην κόπωση, και ακόμη και στην αστοχία τέτοιων κατασκευών. Για αυτόν τον λόγο, είναι σκόπιμη η μελέτη της ροής γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα, με στόχο τη μερική ή πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών von Κάρμάν, που θα οδηγήσει και σε αντίστοιχο περιορισμό των επαγόμενων δυναμικών φορτίων. Παραδείγματα πρότυπων μη αεροδυναμικών σωμάτων είναι η σφαίρα καθώς και σώματα με κυκλική, τετραγωνική ή τριγωνική διατομή (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Πρότυπα μη αεροδυναμικά σώματα με διατομή: (α) κυκλική, (β) τετραγωνική, και (γ) τριγωνική.

1.2 Ροή γύρω από κύλινδρο

Ένα από τα πιο διαδεδομένα μη αεροδυναμικά σώματα, εξαιτίας της απλότητας της γεωμετρίας του, είναι ο κύλινδρος. Η δυναμική της ροής Νευτώνιου ρευστού γύρω από κύλινδρο, όταν απουσιάζουν εξωτερικές φορτίσεις, εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό Reynolds. Ο αριθμός Reynolds εκφράζει τον λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας. Για την περίπτωση της ροής γύρω από κύλινδρο, ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ακολούθως:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

Όπου:

U : η ελεύθερη ταχύτητα ροής του ρευστού

D : η διάμετρος του κυλίνδρου

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στη δυναμική της ροής γύρω από κύλινδρο σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds, και ορίζονται οι επαγόμενες δυνάμεις στον κύλινδρο.

1.2.1 Δομή της ροής γύρω από κύλινδρο

Η δομή της ροής γύρω από κύλινδρο μπορεί να περιγραφεί ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Οι ιδιότητες της ροής είναι γνωστές για μεγάλο εύρος του αριθμού Reynolds, από έρπουσες ροές, όπου $Re \rightarrow 0$, μέχρι πλήρως τυρβώδεις ροές, όπου $Re \approx 10^7$ (Delaunay, 2001). Για όλο το εύρος τιμών αριθμού Reynolds η δομή των γραμμών ροής και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Για τιμές του αριθμού Reynolds $Re < 5$, η ροή είναι δισδιάστατη και ακολουθεί τη γεωμετρία του κυλίνδρου έως το πίσω σημείο ανακοπής, όπου και αποκολλάται από αυτόν.

Για το εύρος τιμών $5 < Re < 47$, η ροή συνεχίζει να είναι ευσταθής και δισδιάστατη. Σε αυτήν την περίπτωση, λαμβάνει χώρα αποκόλληση της ροής από την επιφάνεια του κυλίνδρου, και σχηματισμός δύο συμμετρικών δινών στο πίσω μέρος αυτού. Το μήκος της ζώνης ανακύκλωσης αυξάνεται γραμμικά ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

Για τιμές μεγαλύτερες του $Re=47$, οι σχηματιζόμενες δίνες αποκόπτονται, και δημιουργείται ο δρόμος δινών von Kármán. Για τιμές του αριθμού Reynolds στην περιοχή $47 < Re < 180$, η ροή εξακολουθεί να είναι δισδιάστατη. Οι δίνες

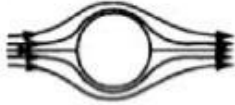
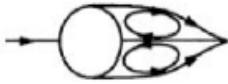


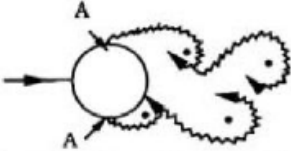
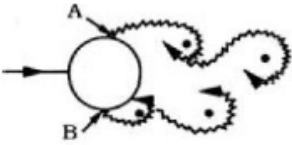
δημιουργούνται εναλλάξ, και η συχνότητα που αντιστοιχεί σε έναν πλήρη κύκλο (δημιουργία και αποκοπή δύο δινών) εκφράζεται σε αδιάστατη μορφή από τον αριθμό Stouhal, ως κάτωθι:

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (2)$$

όπου f είναι η συχνότητα του δρόμου δινών.

Για τιμές του αριθμού Reynolds μεγαλύτερες από $Re=180$, η ροή γίνεται τρισδιάστατη. Στην περιοχή $180 < Re < 1000$, επικρατεί ένα μεταβατικό στάδιο, κατά το οποίο οι δίνες στον ομόρρου ξεκινούν και γίνονται σταδιακά τυρβώδεις, ενώ για τιμές, $1000 < Re < 3 \cdot 10^5$, η ροή καθίσταται πλήρως τυρβώδης στην περιοχή ομόρρου. Για τιμές του αριθμού Reynolds $Re \approx 2 \cdot 10^5$, παρατηρείται μια απότομη πτώση της τιμής του συντελεστή αντίστασης, C_D (drag crisis). Η πτώση αυτή της τιμής του συντελεστή C_D , οφείλεται στο γεγονός της μετάβασης του οριακού στρώματος στην επιφάνεια του κυλίνδρου, από στρωτό σε τυρβώδες, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός στενότερου ομόρρου (Singh and Mittal, 2005). Η τυρβώδης ροή και αποκόλληση είναι δυνατό να χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα (Distler et al., 2011).

Πίνακας 1. Ροή γύρω από κύλινδρο: Δομή του ομόρρου για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds (Sumer and Fredsøe, 2006).

$Re < 5$		<p>Η ροή ακολουθεί τη γεωμετρία του κυλίνδρου (έρπουσα ροή).</p>
$5 < Re < 47$		<p>Δισδιάστατη ροή: αποκόλληση της ροής και δημιουργία δύο συμμετρικών ζωνών ανακύκλωσης.</p>
$47 < Re < 180$		<p>Δισδιάστατη ροή: δημιουργία δρόμου δινών.</p>
$180 < Re < 1000$		<p>Τρισδιάστατη ροή: Έναρξη δημιουργίας τύρβης στον ομόρρο.</p>
$1000 < Re < 3 \cdot 10^5$		<p>Ο δρόμος δινών είναι πλήρως τυρβώδης. Στρωτή αποκόλληση του οριακού στρώματος από τον κύλινδρο.</p>
$3 \cdot 10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^6$		<p>Πλήρως τυρβώδης ροή.</p>

1.2.2 Δυνάμεις αντίστασης και άνωσης

Η εμφάνιση του δρόμου δινών έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας περιοδικής συνολικής δύναμης που ασκείται στον κύλινδρο. Με την ανάλυση αυτής της δύναμης στις δύο διευθύνσεις, προκύπτουν η δύναμη αντίστασης, F_D , στην οριζόντια διεύθυνση (x), και η δύναμη άνωσης, F_L , στην κατακόρυφη διεύθυνση (y). Η τελευταία εμφανίζεται μόνο κατά τη δημιουργία του δρόμου δινών. Οι δύο συνιστώσες δυνάμεις είναι υπεύθυνες για τις ταλαντώσεις που προκύπτουν στις κατασκευές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πλάτος της ταλαντωτικής κίνησης, που οφείλεται στην δύναμη άνωσης, F_L , είναι αρκετά μεγαλύτερο από εκείνο που οφείλεται στη δύναμη αντίστασης, F_D . Ωστόσο η συχνότητα των ταλαντώσεων, στη διεύθυνση της δύναμης αντίστασης, F_D (κύρια διεύθυνση της ροής), είναι διπλάσια εκείνης των ταλαντώσεων στη διεύθυνση της δύναμης της άνωσης, F_L . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία περίοδος ταλάντωσης της δύναμης αντίστασης ολοκληρώνεται κατά τον σχηματισμό μίας δίνης, ενώ μία περίοδος ταλάντωσης της δύναμης άνωσης ολοκληρώνεται κατά τον σχηματισμό ενός ζεύγους δινών.

Από τη δύναμη αντίστασης, F_D , και τη δύναμη άνωσης, F_L , προκύπτουν οι αδιάστατοι συντελεστές αντίστασης και άνωσης, αντίστοιχα:

$$\text{Συντελεστής αντίστασης: } C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D \cdot z} \quad (3)$$

$$\text{Συντελεστής άνωσης: } C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D \cdot z} \quad (4)$$

όπου: ρ η πυκνότητα του ρευστού, και z το ύψος του κυλίνδρου.

2. Έλεγχος της ροής γύρω από κύλινδρο

Στο πλαίσιο της μελέτης της ροής γύρω από κύλινδρο, έχουν διερευνηθεί διάφοροι τρόποι ελέγχου αυτής. Πιο συγκεκριμένα, με εφαρμογή μεθόδων που θα περιγραφούν ακολούθως, η ροή γύρω από κύλινδρο έχει τη δυνατότητα να σταθεροποιηθεί για τιμές του αριθμού Reynolds μεγαλύτερες της κρίσιμης τιμής, $Re > 47$. Ο έλεγχος της ροής μπορεί να γίνει με χρήση σχήματος παθητικού ή ενεργού ελέγχου.

2.1 Παθητικός έλεγχος της ροής (Passive control)

Παθητικός έλεγχος της ροής θεωρείται ο έλεγχος για τον οποίο δεν απαιτείται η επιβολή εξωτερικής δύναμης ή ενέργειας. Οι μηχανισμοί παθητικού ελέγχου περιλαμβάνουν είτε αλλαγές στη γεωμετρία του σώματος είτε αλλαγές στη ροή με προσθήκη κάποιου σώματος.

2.1.1 Τοποθέτηση διαχωριστικών πλακών στον ομόρρο (Splitter plates)

Η τοποθέτηση διαχωριστικών πλακών στον ομόρρο του κυλίνδρου αποτελεί έναν από τους πρώτους τρόπους παθητικού ελέγχου της ροής, και εισήχθη από τον Roshko (1954). Οι διαχωριστικές πλάκες τοποθετούνται παράλληλα στη ροή, στον εγγύ ομόρρο του κυλίνδρου, με σκοπό την αναίρεση του δρόμου δινών, και τη μείωση των δυνάμεων που ασκούνται στον κύλινδρο. Διαχωρίζοντας τον εγγύ ομόρρο σε δύο τμήματα, εμποδίζεται η δημιουργία της αντισυμμετρικής δομής του δρόμου δινών, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι δυνάμεις. Η επιρροή των διαχωριστικών πλακών στη ροή, έχει να κάνει με διάφορες παραμέτρους. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από το μήκος της διαχωριστικής πλάκας, τη σχετική απόσταση μεταξύ του κυλίνδρου και της άκρης της διαχωριστικής πλάκας, καθώς και το πάχος της διαχωριστικής πλάκας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αναίρεση του δρόμου δινών είναι εφικτή μόνο στην περίπτωση που οι διαχωριστικές πλάκες τοποθετηθούν παράλληλα στην κύρια διεύθυνση της ροής (Igbalajobi, 2011).

2.1.2 Τοποθέτηση ενός μικρότερου κυλίνδρου στον ομόρρου του κυλίνδρου (Control wire)

Μια δεύτερη μέθοδος παθητικού ελέγχου είναι η τοποθέτηση ενός μικρότερου κυλίνδρου σε κατάλληλες θέσεις στον ομόρρου του μεγαλύτερου κυλίνδρου. Στη βιβλιογραφία ο μικρότερος κύλινδρος αναφέρεται ως κύλινδρος ελέγχου, ενώ ο μεγαλύτερος κύλινδρος αναφέρεται ως κύριος κύλινδρος. Η πειραματική μελέτη των Strykowski and Sreenivasan (1990), καθώς και οι υπολογιστικές μελέτες των Mittal and Raghuvanshi (2001) και Dipankar et al. (2006), έχουν καταλήξει στο γεγονός ότι ο κύλινδρος ελέγχου μειώνει τον ρυθμό ανάπτυξης διαταραχών, και επηρεάζει την ένταση του δρόμου δινών. Επίσης, ο κύλινδρος ελέγχου μεταβάλλει τις ιδιότητες τοπικής ευστάθειας, διαχέοντας στροβιλότητα, εκτρέποντας δηλαδή ένα τμήμα του ρευστού στον ομόρρου του μεγαλύτερου κυλίνδρου. Σε ένα τέτοιο σχήμα ελέγχου, οι παράμετροι που επηρεάζουν το επίπεδο ευστάθειας της ροής είναι, ο λόγος των διαμέτρων των δύο κυλίνδρων, καθώς και οι συντεταγμένες του κυλίνδρου ελέγχου.

2.1.3 Εφαρμογή υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου (Hydrophobic material)

Μια τρίτη, αρκετά πρόσφατη, μέθοδος παθητικού ελέγχου είναι η εφαρμογή υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Οι μελέτες των Legendre et al. (2009), Seo and Song (2012) και Muralidhar et al. (2011) έχουν δείξει ότι, με χρήση υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου, μειώνεται σημαντικά η μέση δύναμη αντίστασης, και μπορεί να επιτευχθεί πλήρης σταθεροποίηση της ροής για επαρκώς υψηλές τιμές του μήκους ολίσθησης. Επιπλέον, η εμφάνιση του δρόμου δινών λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες τιμές του αριθμού Reynolds. Στην πράξη, η δυναμική της ροής εξαρτάται από τη φύση της επιφάνειας (υδροφοβική επιφάνεια, υπερυδροφοβική επιφάνεια), καθώς και από την επιλογή του τμήματος της επιφάνειας που θα χαρακτηρίζεται από υδροφοβικότητα. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι η απουσία υδροφοβικότητας στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής επιδρά περαιτέρω σταθεροποιητικά στη ροή (Mastrokalos et al., 2015).

2.2 Ενεργός έλεγχος της ροής (Active control)

Σε αντίθεση με τον παθητικό έλεγχο, οι μηχανισμοί ενεργού ελέγχου της ροής απαιτούν την επιβολή εξωτερικής ισχύος. Ο ενεργός έλεγχος εφαρμόζεται κυρίως σε χρονικά μεταβαλλόμενες ροές, στις οποίες είναι επιθυμητή η αλλαγή τη συμπεριφοράς της ροής σε μικρό χρονικό διάστημα. Τα σχήματα ενεργού ελέγχου μπορούν να διαχωριστούν σε ανοικτού βρόγχου και κλειστού βρόγχου (έλεγχος ανατροφοδότησης – feedback control). Στην περίπτωση σχημάτων ενεργού ελέγχου ανοικτού βρόγχου, η δράση ελέγχου είναι προκαθορισμένη. Αντίθετα, στην περίπτωση ελέγχου κλειστού βρόγχου, η δράση ελέγχου είναι χρονικά

μεταβαλλόμενη, και καθοδηγείται με βάση κάποιο μετρούμενο μέγεθος εντός του ροϊκού πεδίου.

2.2.1 Εφαρμογή δύναμης Lorentz (Lorentz force)

Ο έλεγχος της ροής με εφαρμογή δύναμης Lorentz σε ηλεκτρικά αγωγίμο ρευστό κατηγοριοποιείται ως ενεργός έλεγχος. Σύμφωνα με τις μελέτες των Breuer et al. (2002) και Chen and Aubry (2003), η δύναμη Lorentz χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί στο ρευστό περαιτέρω κίνηση, ούτως ώστε να προκύψει ένα συνολικά σταθεροποιητικό αποτέλεσμα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη δυναμική της ροής είναι το μέγεθος της δύναμης Lorentz που εφαρμόζεται, η διεύθυνση αυτής, και το τμήμα του κυλίνδρου στο οποίο η δύναμη εφαρμόζεται.

2.2.2 Περιστροφή του κυλίνδρου (Rotation)

Ο έλεγχος της ροής με περιστροφή του κυλίνδρου ανήκει στις δράσεις ενεργού ελέγχου. Ο Gal-el-Hak (2000) διαπιστώνει πως, καθώς ο κύλινδρος περιστρέφεται, η αποκόλληση της ροής αναιρείται στην πλευρά του κυλίνδρου στην οποία η ροή και ο κύλινδρος κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Αντίθετα, στην άλλη πλευρά, η αποκόλληση εξακολουθεί να υφίσταται. Η δημιουργούμενη ασυμμετρία προκαλεί μια δύναμη άνωσης (Magnus effect). Η παράμετρος που επηρεάζει τη δυναμική της ροής είναι η αδιαστατοποιημένη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (Schulmeister, 2012)). Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η χρήση περιστροφικής ταλάντωσης του κυλίνδρου (Tokumaru and Dimotakis, 1991).

2.2.3 Αναρρόφηση και εμφύσηση ρευστού (Suction/Blowing)

Μια μέθοδος ενεργού ελέγχου είναι η χρήση αναρρόφησης/εμφύσησης ρευστού από την επιφάνεια του κυλίνδρου. Σύμφωνα με τους Delaunay and Kaiktsis (2001) και Dong et al. (2008), η κατάλληλη χρήση αναρρόφησης ή εμφύσησης μπορεί να οδηγήσει σε σταθεροποίηση της ροής. Συγκεκριμένα οι Delaunay and Kaiktsis (2001) διαπιστώνουν ότι, για τιμές του αριθμού $Re > 47$, απαιτείται μικρή παροχή εμφύσησης αλλά πολύ μεγαλύτερη παροχή αναρρόφησης από την περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής προκειμένου να σταθεροποιηθεί η ροή. Αντίθετα για τιμές του αριθμού Reynolds, $Re < 47$ διαπιστώνουν πως η αναρρόφηση αποσταθεροποιεί τη ροή, και οδηγεί σε εμφάνιση του δρόμου δινών. Οι παράμετροι που επιτελούν σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η ροή είναι, τα τμήματα της επιφάνειας του κυλίνδρου από τα οποία θα γίνεται η αναρρόφηση – εμφύσηση, καθώς και η παροχή μάζας του ρευστού.

2.2.4 Θέρμανση του κυλίνδρου (Cylinder heating)

Έχει διαπιστωθεί ότι, με θέρμανση του κυλίνδρου, η ροή μπορεί να σταθεροποιηθεί. Οι Feng et al. (2010) και οι Dumouchel et al. (1998) διαπίστωσαν, για πειράματα σε αέρα, ότι η μείωση της πυκνότητας και η αύξηση της συνεκτικότητας στη ζώνη ανακύκλωσης λόγω της θέρμανσης οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές του τοπικού αριθμού Reynolds, και κατά συνέπεια σε σταθεροποίηση της ροής. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση υγρού, η θέρμανση του κυλίνδρου μπορεί να έχει αποσταθεροποιητικά αποτελέσματα στη ροή, εξαιτίας της αύξησης της συνεκτικότητας. Οι παράμετροι που επηρεάζουν το παρόν φαινόμενο είναι η επιλογή των τμημάτων στα οποία θα θερμανθεί ο κύλινδρος (μπορεί ο κύλινδρος να θερμανθεί μερικώς, σε διάφορες περιοχές, ή ολόκληρος) και η θερμοκρασιακή διαφορά σε σχέση με το ρευστό μακριά από τον κύλινδρο.

3. Διατύπωση προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή δύο μεθόδων παθητικού ελέγχου της ροής γύρω από κύλινδρο. Η πρώτη μέθοδος αφορά στην απλή τοποθέτηση ενός μικρότερου κυλίνδρου στον ομόρρο του κύριου κυλίνδρου, ενώ η δεύτερη στην εφαρμογή υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια ενός εκ των δύο κυλίνδρων (είτε του κύριου κυλίνδρου, είτε του κυλίνδρου ελέγχου). Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση των δύο μεθόδων. Στη συνέχεια, ορίζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή, το πεδίο ροής, και οι συνοριακές συνθήκες. Τέλος, παράγεται το υπολογιστικό πλέγμα, και διεξάγεται έλεγχος ακρίβειας χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης.

3.1 Επισκόπηση μεθόδων ελέγχου που εφαρμόζονται στην παρούσα μελέτη

3.1.1 Τοποθέτηση κυλίνδρου ελέγχου στον ομόρρο του κύριου κυλίνδρου

Με την τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στον ομόρρο του κύριου κυλίνδρου, η ροή μπορεί να σταθεροποιηθεί, για τιμές του αριθμού Reynolds μεγαλύτερες της κρίσιμης τιμής, $Re=47$. Πιο συγκεκριμένα, στην πειραματική μελέτη των Strykowski and Sreenivasan (1990) αποδεικνύεται ότι η ροή μπορεί να σταθεροποιηθεί με την τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στον εγγύ ομόρρο του κύριου κυλίνδρου. Η ίδια εργασία αναφέρει ότι η σταθεροποίηση αυτή είναι εφικτή για μεγάλες τιμές της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου ($D/d < 7$), για τιμές του αριθμού Reynolds έως $Re=150$. Για μικρότερες τιμές της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου ($D/d=10$), η σταθεροποίηση είναι δυνατή για τιμές του αριθμού Reynolds έως $Re=90$. Τέλος, για πολύ μικρές τιμές της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου ($D/d > 20$), η σταθεροποίηση καθίσταται αδύνατη για $Re > 80$. Από την άλλη πλευρά, οι Strykowski and Sreenivasan (1990) έδειξαν ότι η χρήση του κυλίνδρου ελέγχου παύει να είναι αποτελεσματική όταν αυτός τοποθετείται σε μεγάλη οριζόντια απόσταση από τον κύριο κύλινδρο, συγκεκριμένα για $X/D > 4$. Σύμφωνα με την ίδια εργασία, ο μηχανισμός της σταθεροποίησης της ροής για κατάλληλη τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου έγκειται στην εξασθένιση του διατμητικού στρώματος λόγω της διάχυσης των κλίσεων (gradients) της ταχύτητας σε μεγαλύτερη απόσταση (διάχυση στροβιλότητας).

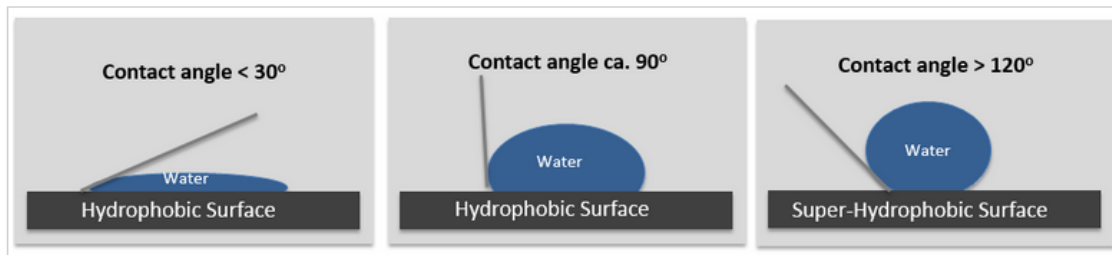
Αντίστοιχα, η υπολογιστική μελέτη των Mittal and Raghuvanshi (2001) για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, κατέδειξε ότι η σταθεροποίηση της ροής υπό την παρουσία κυλίνδρου ελέγχου είναι εφικτή για συγκεκριμένους συνδυασμούς της διαμέτρου του και της θέσης στην οποία τοποθετείται. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι όταν ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετείται στην περιοχή του διατμητικού στρώματος του κύριου κυλίνδρου, επιτυγχάνεται είτε σταθεροποίηση

της ροής, είτε μετριάσιμος του πλάτους των ταλαντώσεων. Σύμφωνα με τους Mittal and Raghuvanshi (2001) η σταθεροποίηση της ροής ξεκινά κοντά στους δύο κυλίνδρους και διαδίδεται κατάντη στη ροή. Το παραπάνω φαινόμενο είναι διαφορετικό στην περίπτωση απουσίας του κυλίνδρου ελέγχου, όπου η αστάθεια ξεκινά από τη ροή στον ομόρροου κι έπειτα διαδίδεται προς τον κύλινδρο.

Επιπλέον, οι Mittal and Raghuvanshi (2001) παρατήρησαν ότι, για ορισμένες θέσεις του κυλίνδρου ελέγχου, η συχνότητα του συντελεστή αντίστασης, C_D , είναι ίση με τη συχνότητα του συντελεστή άνωσης, C_L (αριθμός Strouhal). Οι θέσεις του μικρού κυλίνδρου στις οποίες παρατηρήθηκε το παραπάνω φαινόμενο αντιστοιχούν στην περιοχή του διατμητικού στρώματος του κύριου κυλίνδρου. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο τέτοιες θέσεις: (1) $X/D = 2$, $Y/D = 1$ και (2) $X/D = 2$, $Y/D = 0.8$, όπου X και Y , η οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση των κέντρων των δύο κυλίνδρων αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους Mittal and Raghuvanshi (2001), η ταύτιση των δύο συχνοτήτων λαμβάνει χώρα λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του κυλίνδρου ελέγχου και των δινών που δημιουργούνται στην πλευρά του κύριου κυλίνδρου, η οποία βρίσκεται εγγύτερα στον κύλινδρο ελέγχου. Ωστόσο, αν ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετηθεί σε θέσεις μακριά από το διατμητικό στρώμα του κύριου κυλίνδρου, τότε ο συντελεστής C_D μεταβάλλεται με τη διπλάσια συχνότητα από εκείνη του συντελεστή C_L (δηλαδή, όπως στη ροή γύρω από μεμονωμένο κύλινδρο). Αυτό παρατηρείται από τους Mittal and Raghuvanshi (2001) για τη θέση $X/D = 5$, $Y/D = 5$, όπου η παρουσία του κυλίνδρου ελέγχου δεν επηρεάζει την ευστάθεια της ροής του κύριου κυλίνδρου.

3.1.2 Εφαρμογή υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου

Υδροφοβική θεωρείται μια επιφάνεια που τείνει να μην απορροφά ή να μην διαβρέχεται από το νερό, οπότε αναπτύσσεται μικρή τριβή μεταξύ των επιφανειών αυτών και του ρευστού. Η υδροφοβικότητα ποσοτικοποιείται συνήθως, από την τιμή της γωνίας επαφής (Contact angle) μεταξύ μιας σταγόνας του ρευστού και της επιφάνειας, η οποία για υδρόφιλες επιφάνειες είναι μικρότερη των 30° , για υδροφοβικές επιφάνειες μικρότερη των 150° , ενώ για υπερυδροφοβικές επιφάνειες ξεπερνάει τις 150° (Εικόνα 2).

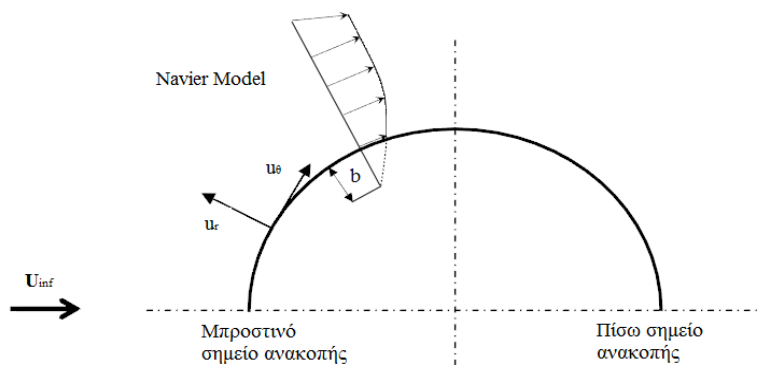


Εικόνα 2. Γωνία επαφής για: (α) υδρόφιλες επιφάνειες, (β) υδροφοβικές επιφάνειες, και (γ) για υπερυδροφοβικές επιφάνειες.

Σύμφωνα με υφιστάμενες μελέτες σε χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, η εφαρμογή υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου οδηγεί σε καθυστέρηση της αποκόλλησης της ροής (μετακίνηση του σημείου αποκόλλησης προς τα πίσω), και κατά συνέπεια στη διαμόρφωση ενός μικρότερου σε μήκος ομόρρου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης δύναμης αντίστασης (Seo and Song, 2012), καθώς και τη μείωση της έντασης των διακυμάνσεων των δυνάμεων αντίστασης και άνωσης (Legendre et al., 2009), και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών (You and Moin 2007, Mastrokalos et al. 2015). Ωστόσο, στην περίπτωση μερικής αναίρεσης της αστάθειας της ροής, παρατηρείται αύξηση της αδιάστατης συχνότητας (αριθμός Strouhal) του δρόμου δινών (Legendre et al., 2009, Mastrokalos et al., 2015).

Στην παρούσα εργασία, γίνεται χρήση του μοντέλου Navier για τον ορισμό της συνθήκης ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Σύμφωνα με αυτό, το ρευστό ρέει σε επαφή με μία εικονική (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 γίνεται φανερή στην Εικόνα 3. Σύμφωνα με το μοντέλο Navier, η ταχύτητα ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι ανάλογη των τοπικών τιμών της διατμητικής τάσης και του μήκους ολίσθησης, ως ακολούθως:

$$u_{\theta} = \tau \cdot b^* \cdot Re = b^* \cdot \frac{\partial u_{\theta}}{\partial r} \quad (5)$$



Εικόνα 3. Κατανομή της ταχύτητας κοντά στην επιφάνεια του κυλίνδρου, για μήκος ολίσθησης b .

3.2 Εξισώσεις ροής

Ο υπολογισμός των ροϊκών μεγεθών του πεδίου της ροής γύρω από τον κύλινδρο καθίσταται δυνατός με την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για ισόθερμη ασυμπίεστη ροή. Οι εξισώσεις Navier – Stokes παρουσιάζονται στην αδιάστατη διανυσματική τους μορφή:

$$\text{Εξίσωση συνέχειας:} \quad \nabla \vec{u} = 0, \quad (6)$$

$$\text{Εξίσωση ορμής:} \quad \frac{\partial}{\partial t} \vec{u} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u}. \quad (7)$$

όπου $\vec{u} = (U, V)$ το διάνυσμα της ταχύτητας και p η στατική πίεση. Στην παρούσα μελέτη, οι φυσικές μεταβλητές αδιαστατοποιούνται με χρήση κατάλληλων μεγεθών αναφοράς, τα οποία βασίζονται στη διάμετρο του κύριου κυλίνδρου, D , την ταχύτητα της ελεύθερης ροής, U_{inf} , και την πυκνότητα του ρευστού, ρ . Οι συχνότητες αδιαστατοποιούνται ως αριθμοί Strouhal, $St = \frac{f \cdot D}{U_{inf}}$, ενώ ο αριθμός Reynolds, ορίζεται ως, $Re = \frac{U_{inf} \cdot D}{\nu}$, όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Η επίλυση των εξισώσεων υλοποιείται με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής Ansys CFX.

3.3 Υπολογιστικό πεδίο – Συνοριακές συνθήκες

Η γεωμετρία του υπολογιστικού πεδίου της ροής σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του προβλήματος. Συγκεκριμένα, το υπολογιστικό πεδίο που σχεδιάστηκε έχει διαστάσεις $80D$ μήκος και $34D$ πλάτος (Εικόνα 4). Ως αρχή των αξόνων λαμβάνεται το κέντρο του κύριου κυλίνδρου ($x=0, y=0$). Συνεπώς, όλες οι συντεταγμένες καθορίζουν και την αδιάστατη απόσταση από το κέντρο του κύριου κυλίνδρου. Το υπολογιστικό πεδίο εκτείνεται $20D$ από το κέντρο του κύριου κυλίνδρου στην κατεύθυνση αντίθετα προς τη ροή, και $60D$ στην κατεύθυνση της ροής. Τα πλευρικά όρια του υπολογιστικού πεδίου εκτείνονται $17D$ εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας ($y = 0$). Η επάρκεια των διαστάσεων του υπολογιστικού πεδίου έχει αποδειχθεί σε σχετικές μελέτες (Kaiktsis et al., 2007, Delaunay and Kaiktsis, 2001, και Evangelinos and Karniadakis, 1999).

Η διάμετρος του κυλίνδρου ελέγχου ορίζεται συναρτήσει της διαμέτρου του κύριου κυλίνδρου, με την οποία συσχετίζεται μέσω του λόγου D/d . Οι συντεταγμένες του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου ορίζονται από τις αδιάστατες ποσότητες X/D και Y/D , όπου X, Y η οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο κυλίνδρων αντίστοιχα.

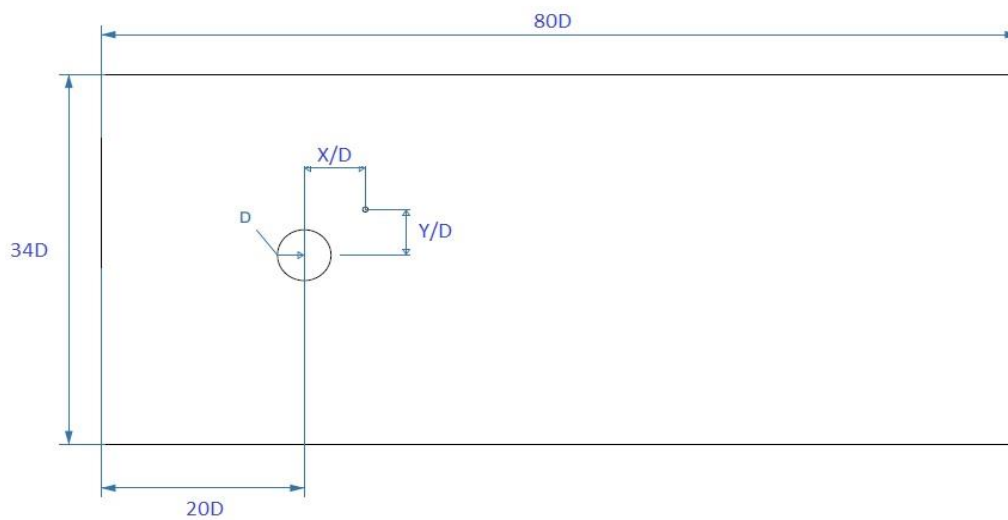
Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στα όρια του υπολογιστικού πεδίου είναι οι ακόλουθες:

Εισροή και πλευρικά όρια: $U = U_{inf} = 1$, $V = 0$

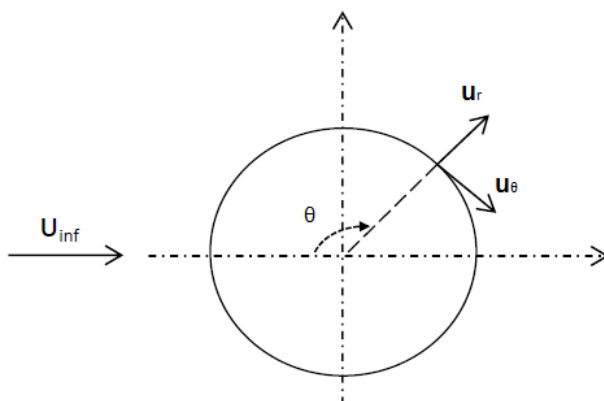
Εκροή: $p = 0$, οριακή συνθήκη Neumann για την ταχύτητα

Επιφάνεια κυλίνδρου: $u_\theta = \tau \cdot b^* \cdot Re = b^* \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial r}$, $u_r = 0$ (μοντέλο Navier - Zhang et al., 2012).

Στις παραπάνω σχέσεις, u_θ και u_r είναι οι αδιάστατες συνιστώσες της ταχύτητας, περιφερειακή και ακτινική, αντίστοιχα (Εικόνα 5), τ είναι η αδιάστατη διατμητική τάση, και $b^* = b/D$, το αδιάστατο μήκος ολίσθησης. Όταν για το μήκος ολίσθησης τεθεί μηδενική τιμή, η επιφάνεια καθίσταται μη υδροφοβική, και δεν υπάρχει σχετική ολίσθηση του ρευστού ως προς αυτήν.



Εικόνα 4. Υπολογιστικό πεδίο.



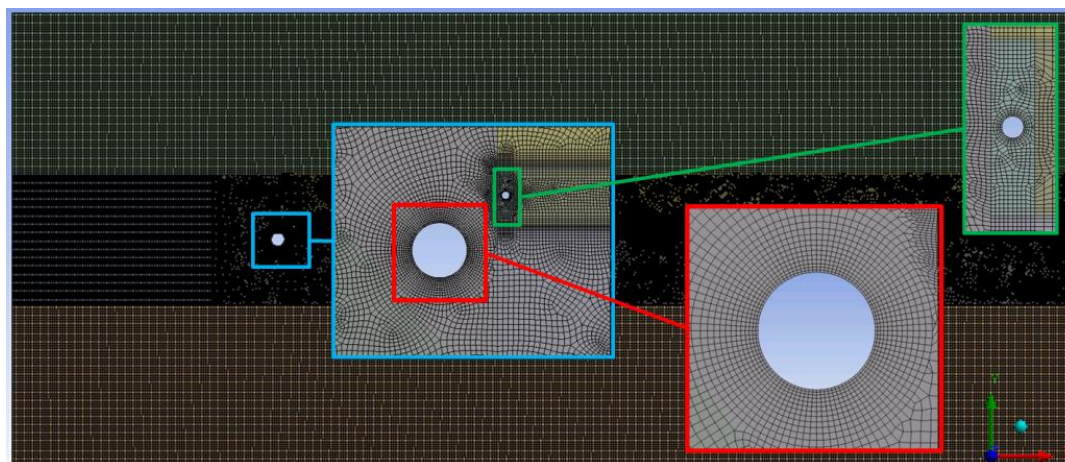
Εικόνα 5. Ορισμός της τοπικής γωνίας, μετρούμενης από το μπροστινό σημείο ανακοπής, και απεικόνιση των τοπικών συνιστωσών της ταχύτητας, u_θ και u_r .

3.4 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος

Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του παρόντος προβλήματος, η οποία οφείλεται στην παρουσία, σε μια μικρή περιοχή, τόσο του κύριου κυλίνδρου όσο και του κυλίνδρου ελέγχου, καθιστά δυσχερή τη δημιουργία ενός κατάλληλου πλέγματος. Για αυτόν τον λόγο, κρίνεται απαραίτητος ο επιμερισμός του πεδίου της ροής σε κατάλληλα μικρότερα υποχωρία, όπως για παράδειγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Ο επιμερισμός αυτός έχει υλοποιηθεί με κατάλληλη παραμετροποίηση, έτσι ώστε, για οποιαδήποτε αλλαγή της θέσης και της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου, να γίνεται και η αντίστοιχη διαμόρφωση του μεγέθους των υποχωρίων. Σε όλες τις περιπτώσεις, τοποθετήθηκαν 100 πεπερασμένοι όγκοι στην επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου, ενώ στην επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου τοποθετήθηκαν 30 πεπερασμένοι όγκοι, προκειμένου το πλέγμα γύρω από τους δύο κυλίνδρους να είναι αρκούντως πυκνό. Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται το υπολογιστικό πλέγμα με μεγεθύνσεις στις περιοχές εγγύς των δύο κυλίνδρων.



Εικόνα 6. Υποδιαίρεση του υπολογιστικού πεδίου σε οκτώ υποχωρία.



Εικόνα 7. Απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος με μεγεθύνσεις στις περιοχές εγγύς των δύο κυλίνδρων.

3.5 Έλεγχος ακρίβειας διακριτοποίησης

Η ακρίβεια της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier – Stokes εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος όσο και από την τιμή του χρησιμοποιούμενου χρονικού βήματος. Στα ακόλουθα εδάφια παρουσιάζονται υπολογισμοί αντιπροσωπευτικών μεγεθών της ροής ως συνάρτηση της χωρικής (αριθμός πεπερασμένων όγκων) και χρονικής διακριτοποίησης (τιμή χρονικού βήματος), για την τιμή του αριθμού Reynolds $Re=90$, με λόγο διαμέτρων $D/d=7$, και θέση τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$.

3.5.1 Έλεγχος ακρίβειας χωρικής διακριτοποίησης

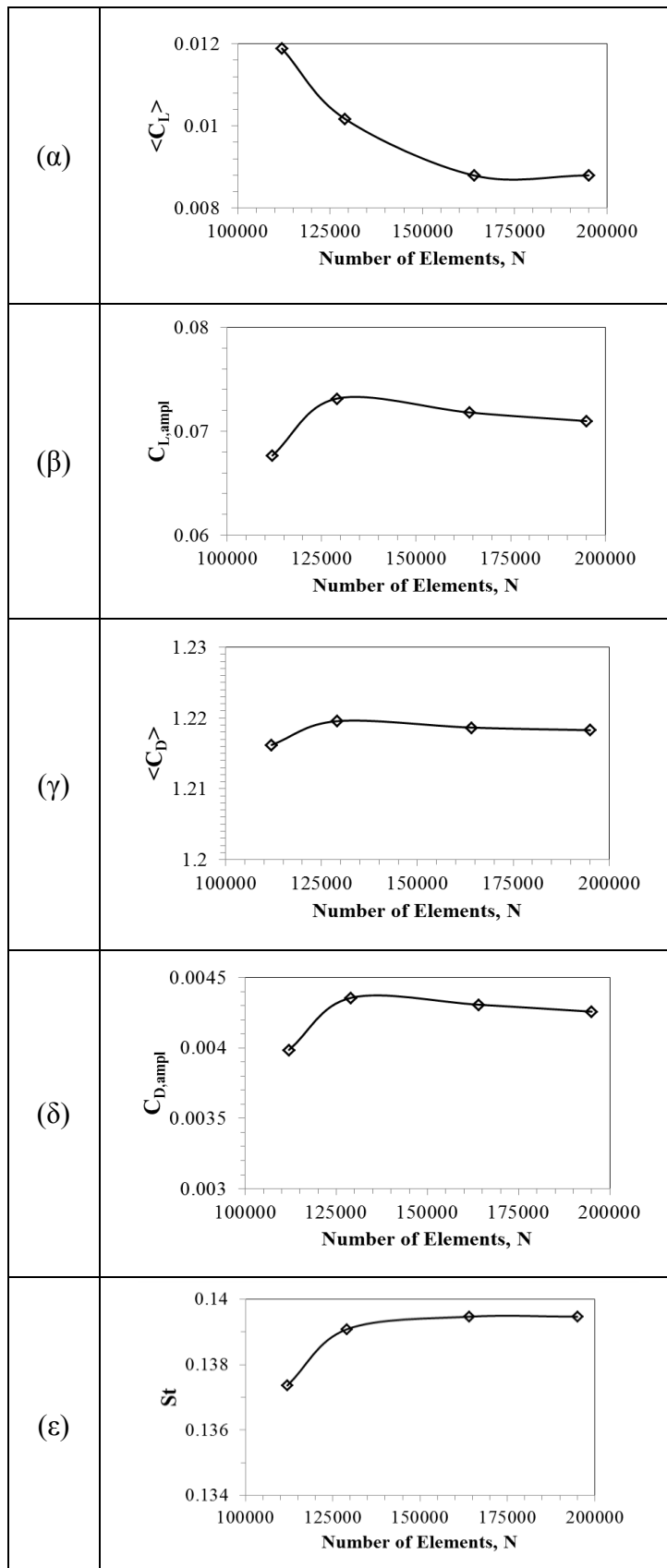
Συνολικά δημιουργήθηκαν τέσσερα (4) διαφορετικά πλέγματα αποτελούμενα από 112000, 129000, 164000 και 195000 πεπερασμένους όγκους, αντίστοιχα. Για καθένα από τα παραπάνω πλέγματα, υπολογίστηκε η μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, το πλάτος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, το πλάτος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και η τιμή του αριθμού Strouhal, St . Οι υπολογισμοί έγιναν για τη χαμηλή τιμή του χρονικού βήματος $\Delta t=0.01$.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ακρίβειας της χωρικής διακριτοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και στην Εικόνα 8 ($Re=90$).

Από την Εικόνα 8α είναι σαφές ότι, για πλέγματα με αριθμό στοιχείων, $N \geq 164000$, η μέση τιμή του συντελεστή άνωσης $\langle C_L \rangle$ παρουσιάζει αμελητέα μεταβολή, ενώ στην Εικόνα 8β καταδεικνύεται ότι οι τιμές του πλάτους του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, δεν παρουσιάζουν σημαντικές περαιτέρω διακυμάνσεις για τα πλέγματα των 129000, 164000 και 195000 πεπερασμένων όγκων. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$ (Εικόνα 8γ) και το πλάτος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$ (Εικόνα 8δ). Τέλος, για αριθμό πεπερασμένων όγκων $N \geq 129000$, οι τιμές του αριθμού Strouhal παρουσιάζουν πολύ μικρή σχετική απόκλιση (Εικόνα 8ε). Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν την επάρκεια ενός υπολογιστικού πλέγματος αποτελούμενου από 164000 πεπερασμένους όγκους (για το παρόν εύρος τιμών αριθμού Reynolds), καθώς οι τιμές των συντελεστών που υπολογίστηκαν παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τα πυκνότερα πλέγματα.

Πίνακας 2. $Re=90$, $D/d=7$, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$: ροϊκά μεγέθη ως συνάρτηση του χρησιμοποιούμενου αριθμού πεπερασμένων όγκων, N : (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .

N	$\langle C_L \rangle$	$C_{L,ampl}$	$\langle C_D \rangle$	$C_{D,ampl}$	St
112000	0.011883	0.067676	1.216202	0.003986	0.137363
129000	0.010175	0.073149	1.219555	0.004356	0.139082
164000	0.008796	0.071815	1.218655	0.004307	0.139470
195000	0.008800	0.070986	1.218281	0.004258	0.139470



Εικόνα 8. $Re=90$, $D/d=7$, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$: ροϊκά μεγέθη ως συνάρτηση του αριθμού πεπερασμένων όγκων, N : (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,amp}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,amp}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .

3.5.2 Έλεγχος ακρίβειας χρονικής διακριτοποίησης

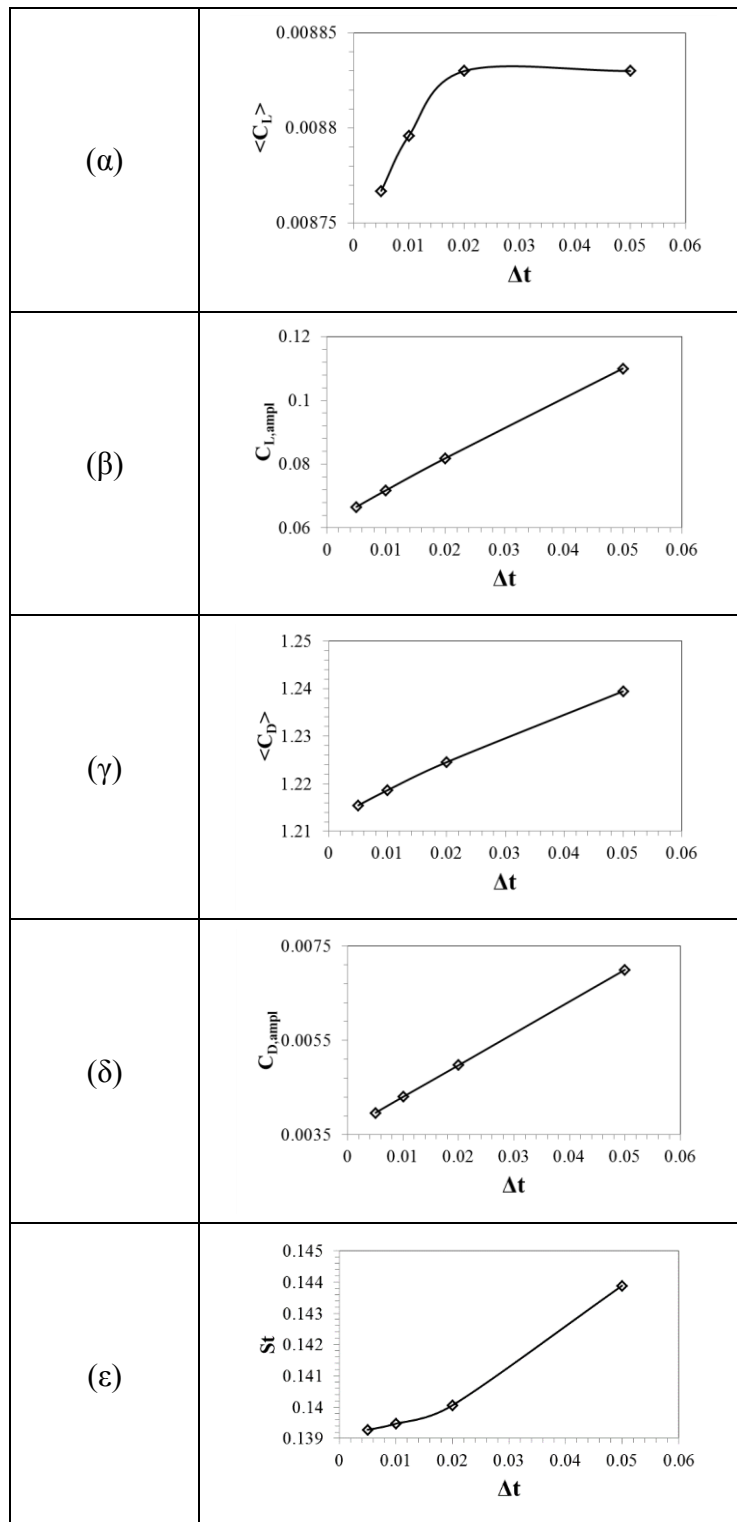
Με βάση το πλέγμα των 164000 πεπερασμένων όγκων που επιλέχθηκε στο προηγούμενο εδάφιο ως το καταλληλότερο, πραγματοποιήθηκαν 4 προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές του χρονικού βήματος, $\Delta t = 0.05, 0.02, 0.01, 0.005$, για την τιμή του αριθμού Reynolds, $Re=90$, με λόγο διαμέτρων $D/d=7$, και συντεταγμένες του κυλίνδρου ελέγχου, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$ (ίδιο πρόβλημα με αυτό του ελέγχου της χωρικής διακριτοποίησης). (Το χρονικό βήμα, Δt , εκφράζεται σε αδιάστατες χρονικές μονάδες).

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται οι τιμές αντιπροσωπευτικών ροϊκών μεγεθών ως συνάρτηση της τιμής του χρονικού βήματος. Ειδικότερα, στην Εικόνα 9α, παρουσιάζεται η μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, στην Εικόνα 9β το ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, στην Εικόνα 9γ η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, στην Εικόνα 9δ το ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και στην Εικόνα 9ε ο αριθμός Strouhal, St . Οι υπολογιζόμενες τιμές των παραπάνω μεγεθών για τις αντίστοιχες τιμές του χρονικού βήματος καταγράφονται στον Πίνακα 3.

Σε όλα τα διαγράμματα της Εικόνα 9, παρατηρείται ότι, καθώς μειώνεται η τιμή του χρονικού βήματος, ελαττώνονται οι προκύπτουσες τιμές των διακυμάνσεων των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης. Για τιμές του χρονικού βήματος $\Delta t \leq 0.01$, παρατηρείται αμελητέα περαιτέρω μεταβολή των υπολογιζόμενων μεγεθών. Έτσι, επιλέγεται ως τιμή του χρονικού βήματος $\Delta t = 0.01$.

Πίνακας 3. $Re=90$, $D/d=7$, $X/D=1.2$ και $Y/D=1.0$: ροϊκά μεγέθη ως συνάρτηση της τιμής του χρονικού βήματος, Δt : (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .

Δt	$\langle C_L \rangle$	$C_{L,ampl}$	$\langle C_D \rangle$	$C_{D,ampl}$	St
0.05	0.008830	0.110044	1.239432	0.006996	0.143884
0.02	0.008830	0.081838	1.224521	0.004975	0.140056
0.01	0.008796	0.071815	1.218655	0.004307	0.139470
0.005	0.008767	0.066602	1.215466	0.003968	0.139276



Εικόνα 9. Οι τιμές ροϊκών μεγεθών συναρτήσει του αδιάστατου χρονικού βήματος Δt . Ροϊκά μεγέθη: (α) Μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιέυρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) πλάτος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .

3.6 Αντικατάσταση του κυλίνδρου ελέγχου από πλέγμα

Ένας επιπλέον έλεγχος που πραγματοποιήθηκε ήταν ο ακόλουθος. Λαμβάνοντας τη γεωμετρία, το πλέγμα καθώς και το χρονικό βήμα που επιλέχθηκαν στα υποεδάφια 3.5.1 και 3.5.2, αφαιρέθηκε ο κύλινδρος ελέγχου, και η κενή περιοχή αντικαταστάθηκε από κατάλληλο πλέγμα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα νέο πλέγμα αποτελούμενο από 217000 πεπερασμένους όγκους, και επιλύθηκε με αυτό η ροή γύρω μόνο από τον κύριο κύλινδρο.

Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση ($Re = 90$), καταγράφηκε το ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, το ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και η τιμή του αριθμού Strouhal, St . Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των Mastrokalos et al., 2015 (Πίνακας 4), και παρατηρείται ότι βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά.

Πίνακας 4. $Re=90$: ροϊκά μεγέθη: (α) μέση τιμή του συντελεστή άνωσης, $\langle C_L \rangle$, (β) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (γ) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, (δ) ημιεύρος του συντελεστή αντίστασης, $C_{D,ampl}$, και (ε) αριθμός Strouhal, St .

	$C_{L,ampl}$	$\langle C_D \rangle$	$C_{D,ampl}$	St
Παρούσα εργασία	0.305	1.371	0.008	0.160
Mastrokalos et al.	0.288	1.380	0.007	0.158

4. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά προηγούμενων εργασιών

Προκειμένου να πιστοποιηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών της παρούσας εργασίας, πραγματοποιούνται υπολογισμοί για ροή γύρω από μη υδροφοβικό κύλινδρο με παρουσία κυλίνδρου ελέγχου, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αποτελέσματα των εργασιών: (α) Strykowski and Sreenivasan (1990), (β) Mittal and Raghuvanshi (2001).

4.1 Σύγκριση με αποτελέσματα των Strykowski and Sreenivasan (1990)

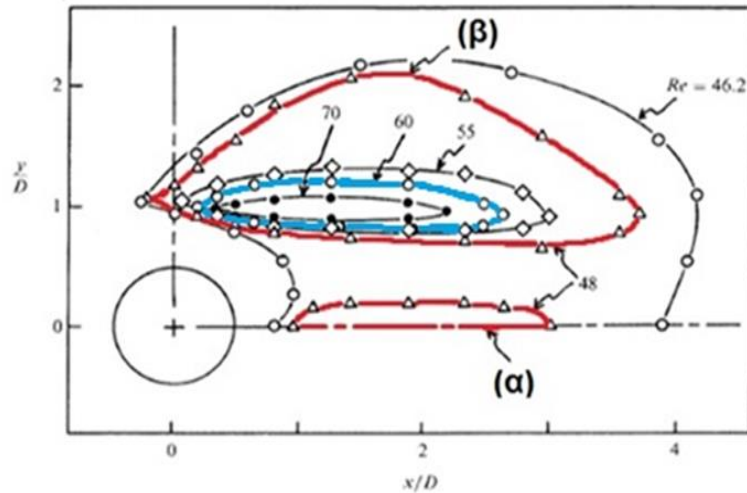
Στην εργασία των Strykowski and Sreenivasan (1990) βρέθηκε, για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds, το εύρος της περιοχής του ομόρρου του κύριου κυλίνδρου, για την οποία, εάν τοποθετηθεί εκεί ο μικρότερος κύλινδρος, αναιρείται πλήρως ο δρόμος δινών. Ο λόγος των διαμέτρων των δύο κυλίνδρων στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι $D/d = 10$. Για συγκεκριμένες τιμές του αριθμού Reynolds, οι περιοχές αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 10. Στην παρούσα εργασία γίνονται υπολογισμοί για $Re=60$, για διαμήκη θέση του κυλίνδρου ελέγχου $X/D = 2$. Οι υπολογισμοί γίνονται για τις ακόλουθες κατακόρυφες θέσεις του κυλίνδρου ελέγχου, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 11.

- $Y/D = 0$
- $Y/D = 0.5$
- $Y/D = 0.75$
- $Y/D = 1.0$
- $Y/D = 1.25$
- $Y/D = 1.5$
- $Y/D = 2.0$

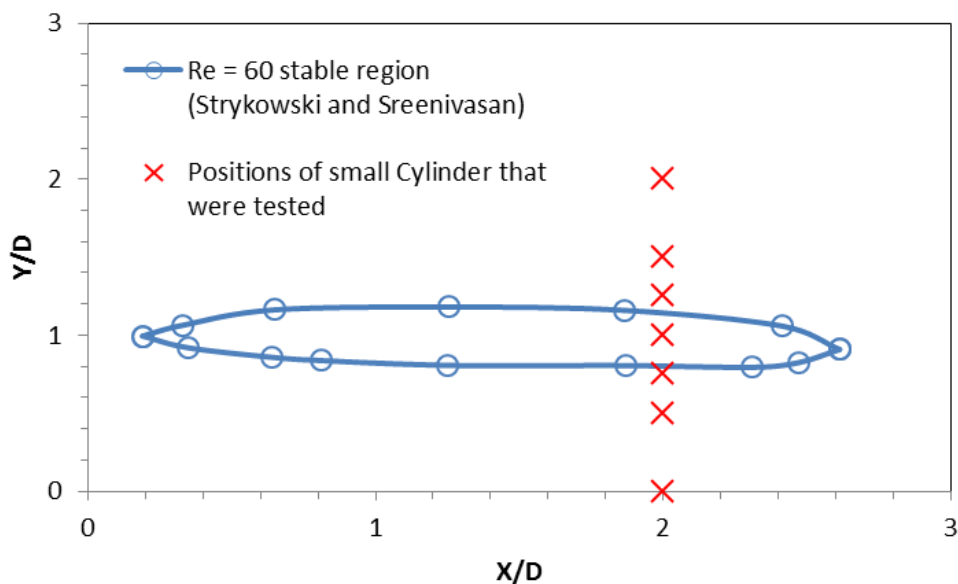
Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης, στόχος είναι να ελεγχθεί η ευστάθεια της ροής όταν ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετηθεί στις παραπάνω κατακόρυφες θέσεις. Στην Εικόνα 12 και στην Εικόνα 13 απεικονίζονται οι στιγμιαίες ισοϋψείς της στροβιλότητας και το στιγμιαίο πεδίο των γραμμών ροής για διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις του κυλίνδρου ελέγχου ($X/D = 2$). Είναι φανερό ότι για $Y/D=0.75$ και $Y/D=1$ αναιρείται πλήρως ο δρόμος δινών (βλ. Εικόνα 12), σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Strykowski & Sreenivasan. Σε όλες τις άλλες θέσεις, δηλαδή για $Y/D<0.75$ και $Y/D>1$, παρατηρείται ο σχηματισμός του δρόμου δινών.

Η αναίρεση του δρόμου δινών για $Y/D=0.75$ και $Y/D=1$ γίνεται φανερή και στην Εικόνα 14α από τον μηδενισμό του ημιεύρους του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$. Αντίθετα, για $Y/D<0.75$ και $Y/D>1$ (Εικόνα 14α) παρατηρούνται μη μηδενικές τιμές του ημιεύρους του συντελεστή άνωσης, επιβεβαιώνοντας τον σχηματισμό του δρόμου δινών. Συγχρόνως, για τις ευσταθείς λύσεις ($Y/D=0.75$ και $Y/D=1$) παρατηρείται στην

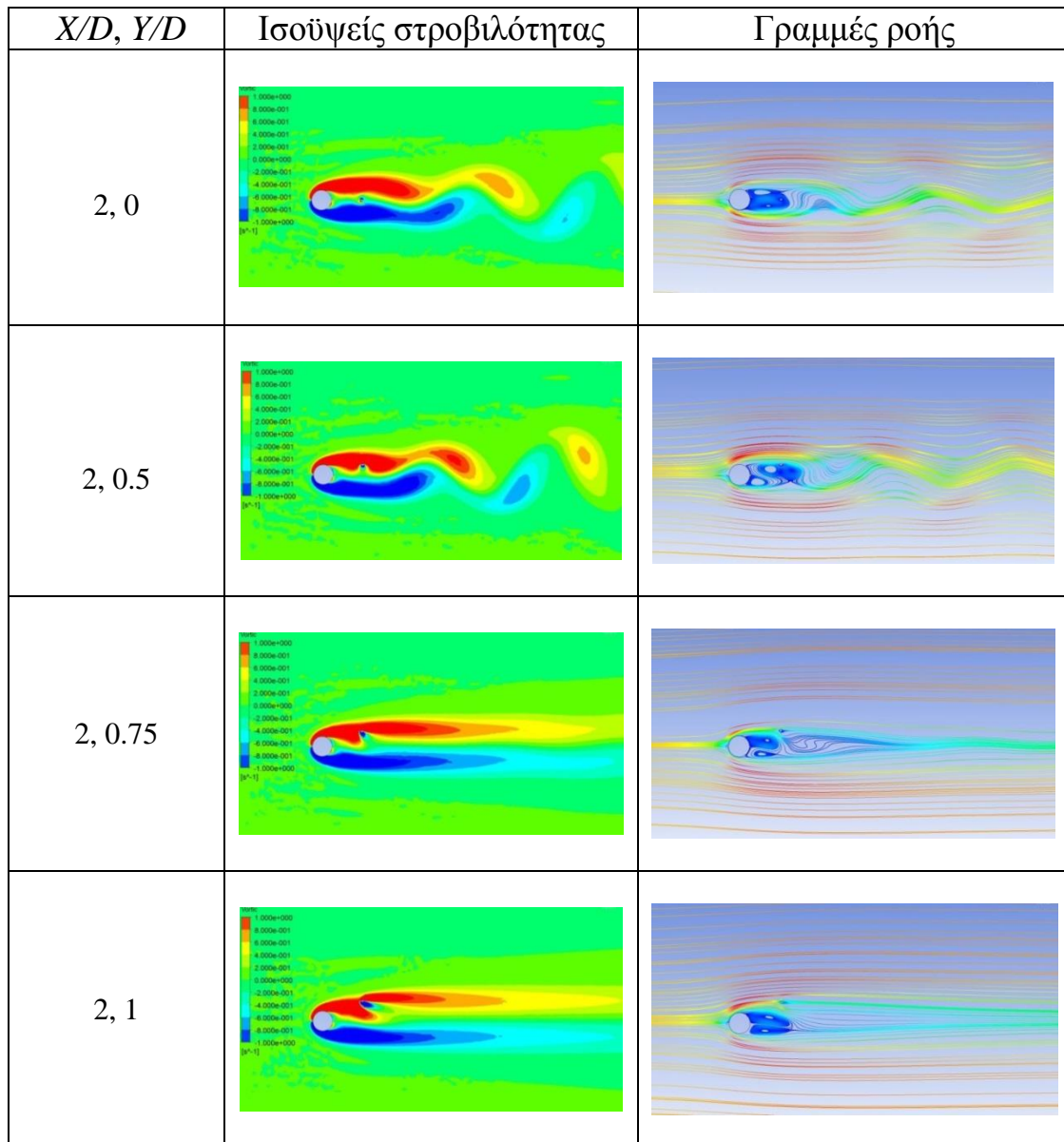
Εικόνα 14β η ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$. Τέλος, για $Y/D < 0.75$ προκύπτουν σταθερά επίπεδα τιμών του αριθμού Strouhal, ενώ για $Y/D > 1$ ο αριθμός Strouhal αυξάνεται περαιτέρω (Εικόνα 14γ).



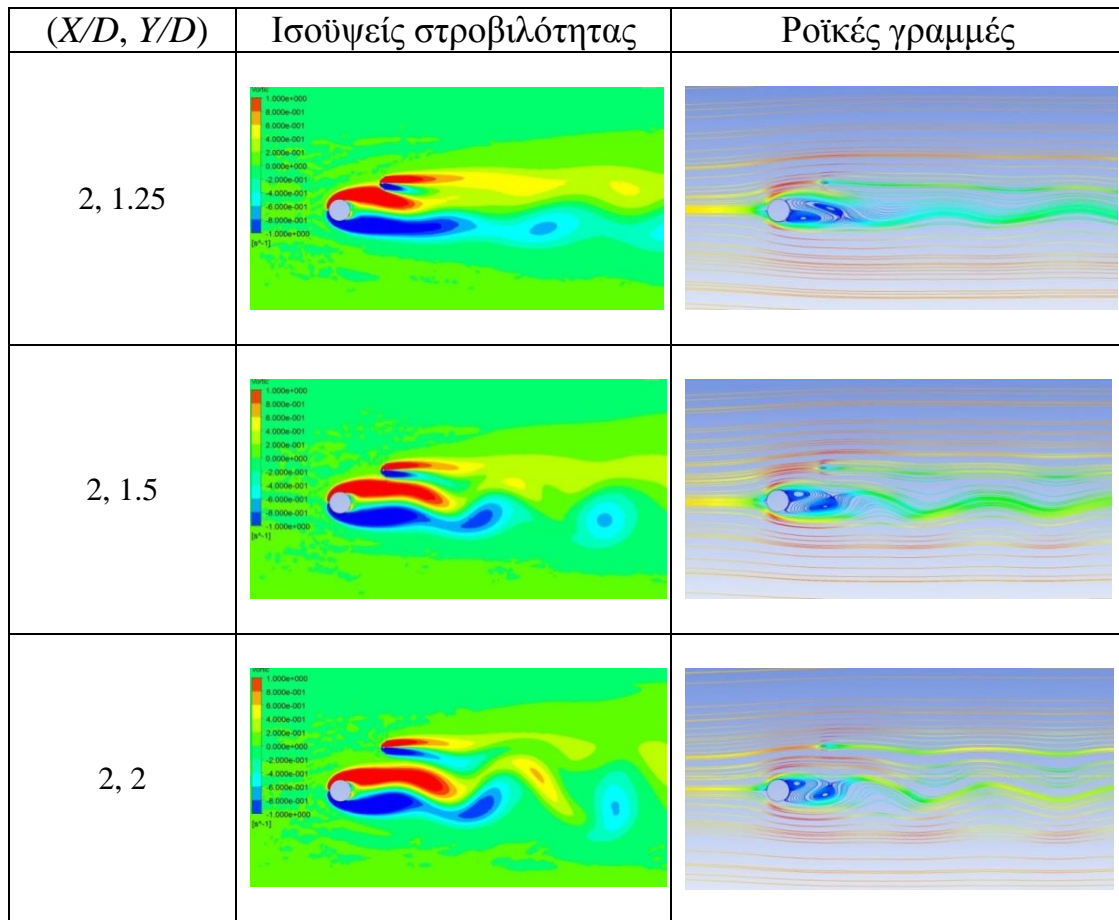
Εικόνα 10. Οριοθέτηση των περιοχών τοποθέτησης του μικρού κυλίνδρου ($D/d=10$) που αντιστοιχούν σε αναίρεση του δρόμου δινών, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds (Strykowski and Sreenivasan, 1990). Με κόκκινο χρώμα σηματοδοτείται η ευσταθής περιοχή για $Re = 48$, ενώ με μπλε χρώμα η ευσταθής περιοχή για $Re = 60$.



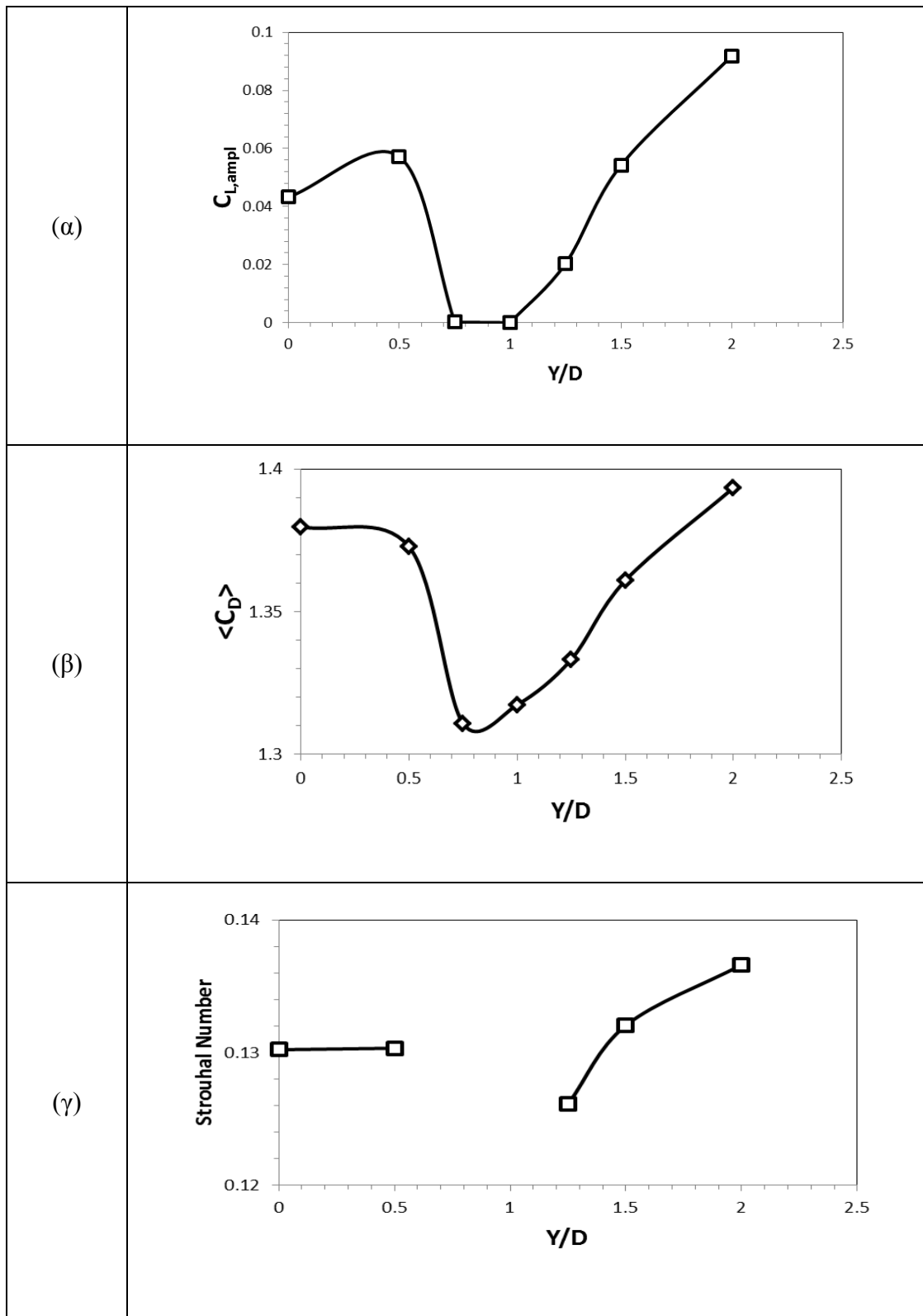
Εικόνα 11. Απεικόνιση των θέσεων τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου ($D/d=10$) που ελέγχθηκαν στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας (X). Στην Εικόνα, οριοθετείται επίσης η περιοχή τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου, που αντιστοιχεί σε αναίρεση του δρόμου δινών για $Re=60$ (Strykowski and Sreenivasan, 1990)



Εικόνα 12. $Re=60$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, όταν ο κύλινδρος ελέγχου ($D/d=10$) τοποθετείται στην οριζόντια θέση $X/D = 2.0$, για διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις $Y/D=0, 0.5, 0.75, 1$.



Εικόνα 13. $Re=60$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, όταν ο κύλινδρος ελέγχου ($D/d=10$) τοποθετείται στην οριζόντια θέση $X/D = 2.0$, για διάφορες κατακόρυφες θέσεις $Y/D=1.25, 1.5, 2$.



Εικόνα 14. $Re=60$, $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει της εγκάρσιας θέσης του μικρού κυλίνδρου, Y/D , για διαμήκη θέση $X/D=2.0$: (α) ημιέρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, και (γ) αριθμός Strouhal, St .

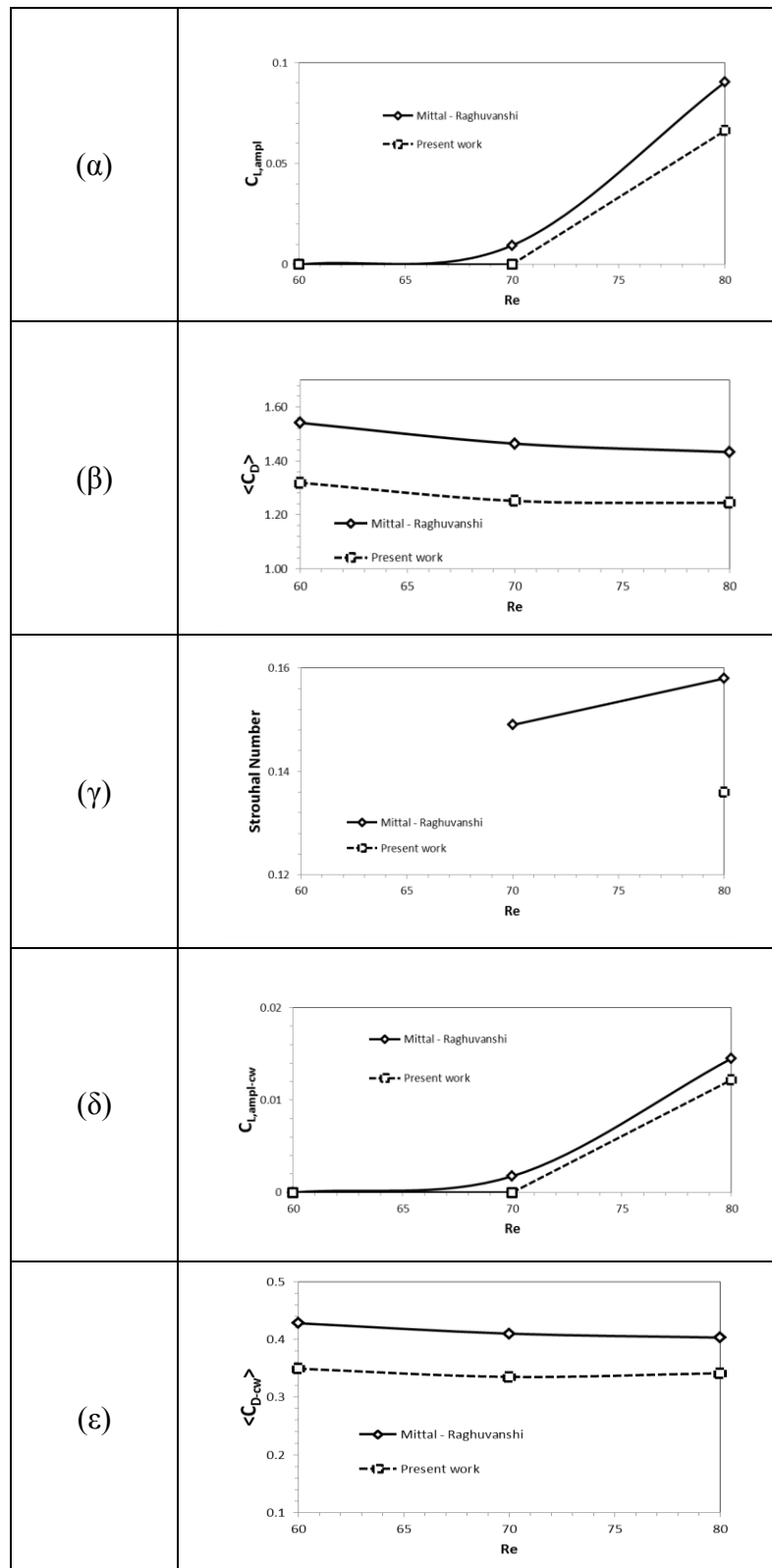
4.2 Σύγκριση με αποτελέσματα των Mittal and Raghuvanshi (2001)

Στην παρούσα ενότητα, συγκρίνονται υπολογιστικά αποτελέσματα με αντίστοιχα της εργασίας των Mittal and Raghuvanshi (2001). Εδώ, μελετάται η ροή γύρω από κύλινδρο με παρουσία κυλίνδρου ελέγχου, για τιμή του λόγου διαμέτρων $D/d=7$. Σε όλες τις περιπτώσεις, η θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου είναι: $(X/D, Y/D)=(2,1)$. Η σύγκριση γίνεται για τρεις τιμές του αριθμού Reynolds, $Re = 60, 70, 80$.

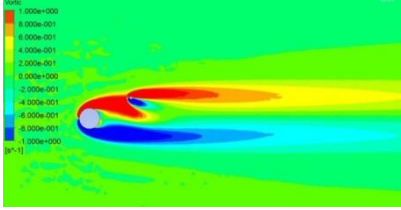
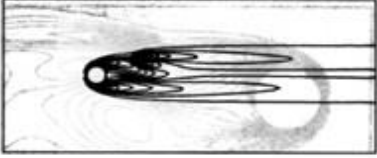
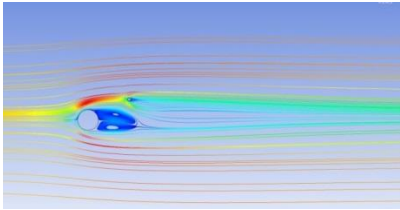

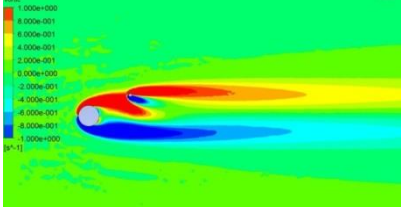
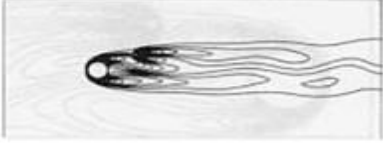
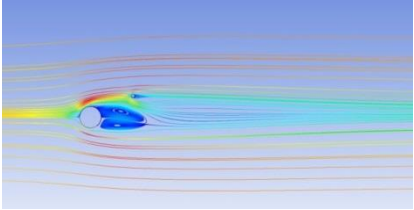

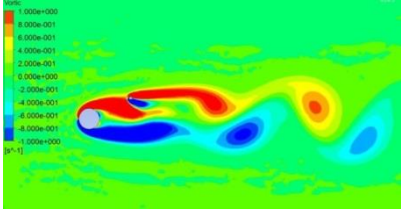

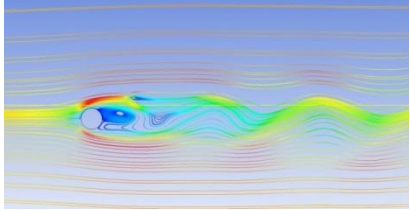

Τα αποτελέσματα των παρόντων υπολογισμών συγκρίνονται με αυτά της εργασίας των Mittal and Raghuvanshi στην Εικόνα 15. Η συμφωνία είναι εν γένει καλή, ενώ παρατηρούνται οι ίδιες τάσεις για όλα τα υπολογισθέντα μεγέθη. Τα αποτελέσματα πιστοποιούν ότι το εύρος της διακύμανσης του συντελεστή άνωσης, C_L , είναι αύξουσα συνάρτηση του αριθμού Reynolds, τόσο για τον κύριο κύλινδρο (Εικόνα 15α), όσο και για τον κύλινδρο ελέγχου (Εικόνα 15δ). Η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, είναι φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού Reynolds, τόσο για τον κύριο κύλινδρο (Εικόνα 15β), όσο και για τον κύλινδρο ελέγχου (Εικόνα 15ε). Στην Εικόνα 15γ αποτυπώνεται η μεταβολή του αριθμού Strouhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Για $Re=60$ και οριακά για $Re=70$, παρατηρείται σταθεροποίηση της ροής, τόσο στην παρούσα μελέτη όσο και στην εργασία των Mittal and Raghuvanshi. Εν γένει, στην παρούσα μελέτη οι διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι χαμηλότερες (ροή περισσότερο ευσταθής) σε σχέση με την εργασία των Mittal and Raghuvanshi. Πιστεύουμε ότι αυτό πρέπει να αποδοθεί στην κατάλληλη επιλογή των αριθμητικών παραμέτρων που έγινε στην παρούσα εργασία (υψηλότερη πυκνότητα πλέγματος, μικρότερη τιμή του χρονικού βήματος). Η ποιοτική ομοιότητα των υπολογισθέντων ροϊκών πεδίων με αυτά της εργασίας των Mittal and Raghuvanshi αποτυπώνεται στην Εικόνα 16 (ισοϋψείς καμπύλες στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές), για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds.

Όπως προαναφέρθηκε, η συχνότητα της μεταβολής του συντελεστή αντίστασης του μεγάλου κυλίνδρου, C_D , είναι ίδια με εκείνη της ταλάντωσης του συντελεστή C_L (ενώ στη ροή γύρω από μεμονωμένο κύλινδρο η συχνότητα της δύναμης αντίστασης είναι διπλάσια από τη συχνότητα της δύναμης άνωσης). Σύμφωνα με τους Mittal and Raghuvanshi, αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του κυλίνδρου ελέγχου και των δινών που δημιουργούνται στην ανώτερη επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου. Η αστάθεια της ροής στην άνω επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου είναι αισθητά μικρότερη από εκείνη στην κάτω επιφάνεια αυτού, γεγονός που οφείλεται στο ότι η δημιουργία και αποκοπή της μίας εκ των δύο δινών του δρόμου δινών λαμβάνει χώρα στην περιοχή της άνω επιφάνειας του κυλίνδρου ελέγχου. Έτσι, οι δυνάμεις άνωσης και αντίστασης στον κύριο κύλινδρο χαρακτηρίζονται από χρονική μεταβολή με την ίδια συχνότητα.



Εικόνα 15. $X/D=2$, $Y/D=1$ και $D/d=7$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αριθμού Reynolds (τιμές: $Re = 60, 70, 80$): (α) ημιέρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L, ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιέρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L, ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.

Re	Ισοϋψείς στροβιλότητας	Γραμμές ροής
60	 <p>Παρούσα εργασία</p>  <p>Mittal and Raghuvanshi (2001)</p>	 <p>Παρούσα εργασία</p>  <p>Mittal and Raghuvanshi (2001)</p>
70	 <p>Παρούσα εργασία</p>  <p>Mittal and Raghuvanshi (2001)</p>	 <p>Παρούσα εργασία</p>  <p>Mittal and Raghuvanshi (2001)</p>
80	 <p>Παρούσα εργασία</p>  <p>Mittal and Raghuvanshi (2001)</p>	 <p>Παρούσα εργασία</p>  <p>Mittal and Raghuvanshi (2001)</p>

Εικόνα 16. $X/D=2$, $Y/D=1$ και $D/d=7$: στιγμιαίες ισοϋψείς καμπύλες στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, με βάση τα παρόντα αποτελέσματα και αυτά της εργασίας των Mittal and Raghuvanshi (2001).

5. Διερεύνηση της ευστάθειας της ροής γύρω από κύλινδρο με προσθήκη κυλίνδρου ελέγχου και χρήση υδροφοβικής επιφάνειας

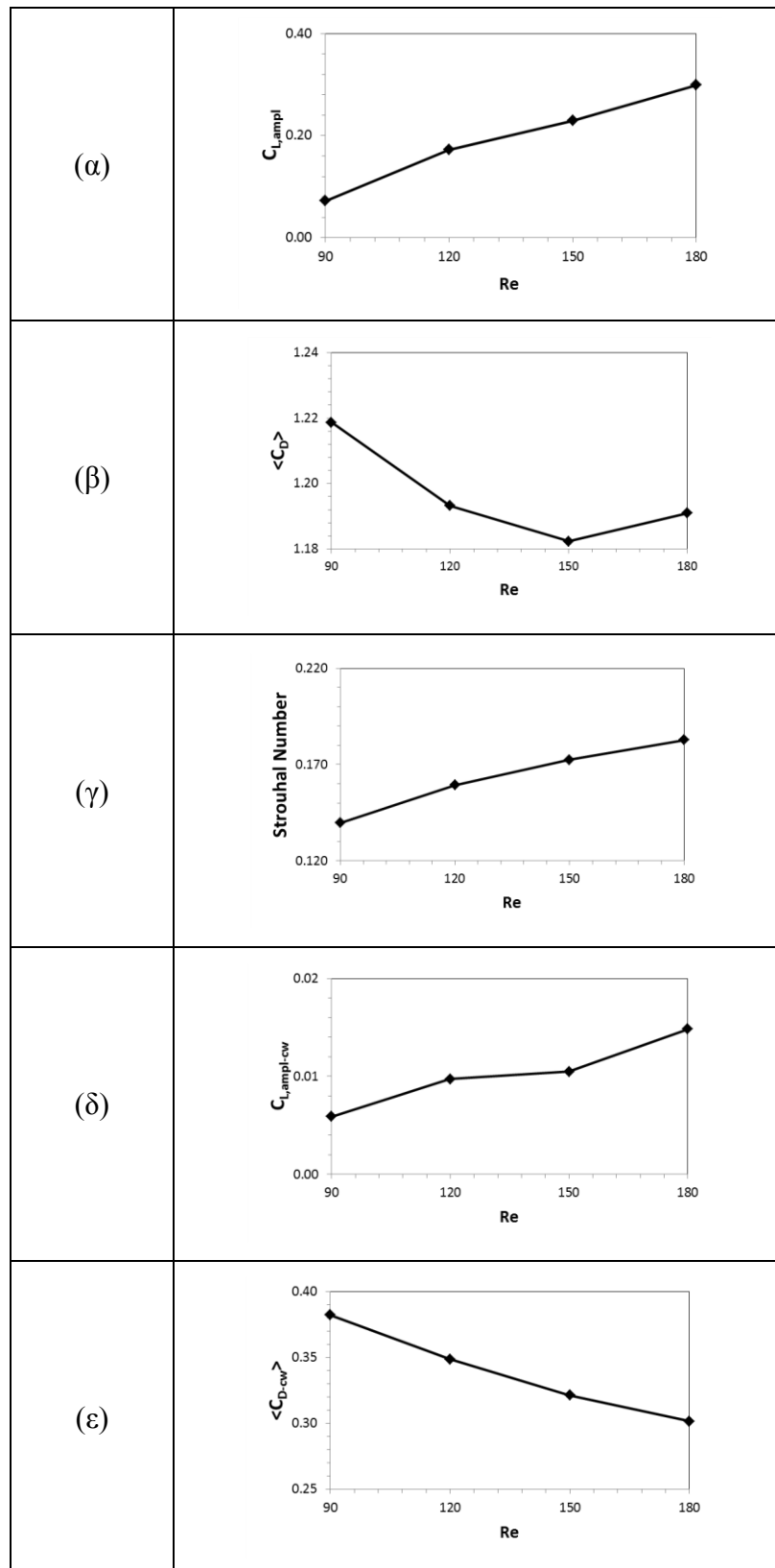
Στο τρέχον κεφάλαιο διερευνάται, για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds, η επίδραση δύο μεθόδων παθητικού ελέγχου στην ευστάθεια της ροής. Οι μέθοδοι αυτές είναι: (α) η τοποθέτηση ενός κυλίνδρου ελέγχου, και (β) η χρήση υδροφοβικής επιφάνειας.

5.1 Τοποθέτηση κυλίνδρου ελέγχου

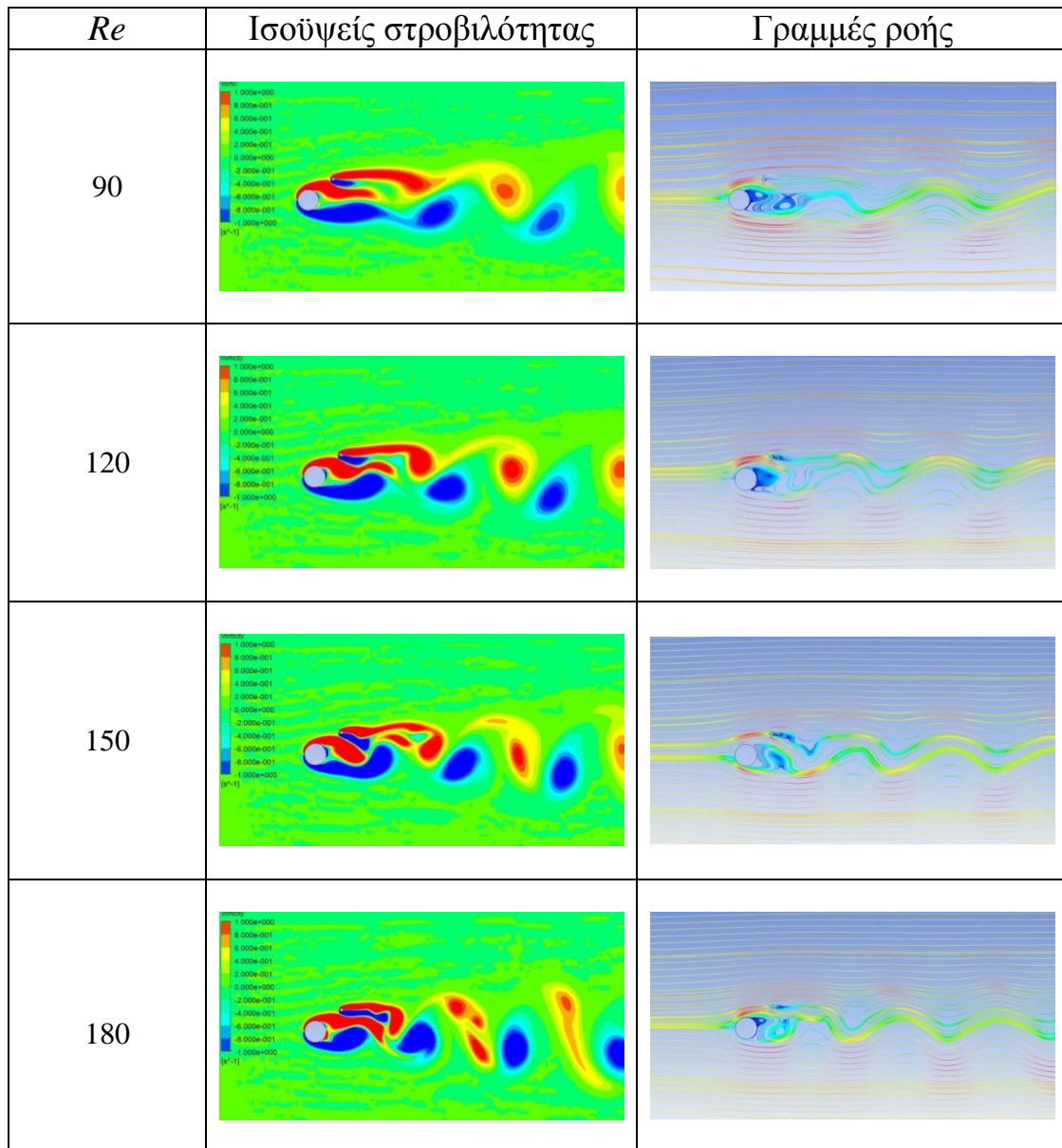
Στον παρόν εδάφιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τέσσερις τιμές του αριθμού Reynolds ($Re = 90, 120, 150$ και 180), στην περίπτωση που τοποθετείται κύλινδρος ελέγχου στη θέση $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, για λόγο διαμέτρων, $D/d=7$. Εδώ, τόσο ο κύριος κύλινδρος όσο και ο κύλινδρος ελέγχου θεωρούνται μη υδροφοβικοί.

Στην Εικόνα 17α, παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών του ημιεύρους του συντελεστή άνωσης, $C_{L, ampl}$, για τον κύριο κύλινδρο, συναρτήσει των τιμών του αριθμού Reynolds. Όπως είναι αναμενόμενο, οι τιμές του συντελεστή άνωσης αυξάνονται με την αύξηση της τιμής του αριθμού Reynolds. Στην Εικόνα 17β, παρουσιάζεται η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, συναρτήσει των τιμών του αριθμού Reynolds, για τον κύριο κύλινδρο. Παρατηρείται ότι, για το εύρος $90 < Re < 150$, οι τιμές του συντελεστή αντίστασης είναι φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού Reynolds, ενώ, για $150 < Re < 180$, είναι αύξουσα συνάρτηση αυτού. Ο αριθμός Strouhal εμφανίζεται ως αύξουσα συνάρτηση των τιμών του αριθμού Reynolds (Εικόνα 17γ). Σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα για τον κύριο κύλινδρο (Εικόνα 17α), το ημιεύρος του συντελεστή άνωσης προκύπτει αύξουσα συνάρτηση του αριθμού Reynolds και για τον κύλινδρο ελέγχου (Εικόνα 17δ). Τέλος, για τον κύλινδρο ελέγχου, η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης είναι φθίνουσα συνάρτηση των τιμών του αριθμού Reynolds (Εικόνα 17ε).

Στην Εικόνα 18, παρουσιάζονται οι ισοϋψείς της στροβιλότητας και οι γραμμές ροής για τις παραπάνω τιμές του αριθμού Reynolds. Παρατηρείται, ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds, αυξάνεται και η ένταση της στροβιλότητας.



Εικόνα 17. $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$ και $D/d=7$, χρήση μη υδροφοβικών κυλίνδρων: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αριθμού Reynolds: (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.



Εικόνα 18. $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$ και $D/d=7$, χρήση μη υδροφοβικών κυλίνδρων: ισοϋψείς της στροβιλότητας και γραμμές ροής, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, Re .

5.2 Χρήση υδροφοβικής επιφάνειας

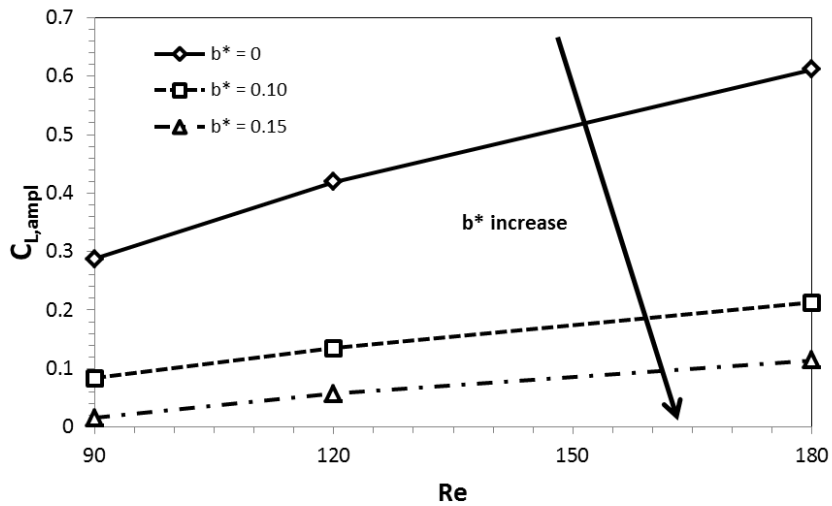
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.1.2, η χρήση υδροφοβικού υλικού στην επιφάνεια του κυλίνδρου μπορεί να αναιρέσει τον δρόμο δινών για τιμές του αριθμού Reynolds μεγαλύτερες της κρίσιμης, $Re = 47$.

Από τη μελέτη των Mastrokalos et al. (2015), έχουν προκύψει αποτελέσματα για το ημιέυρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L, ampl}$, και τη μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, για ένα εύρος τιμών του αριθμού Reynolds ($Re = 60, 90, 120, 180$), για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται αποτελέσματα της εργασίας των Mastrokalos et al. (2015), για την περίπτωση χρήσης υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου.

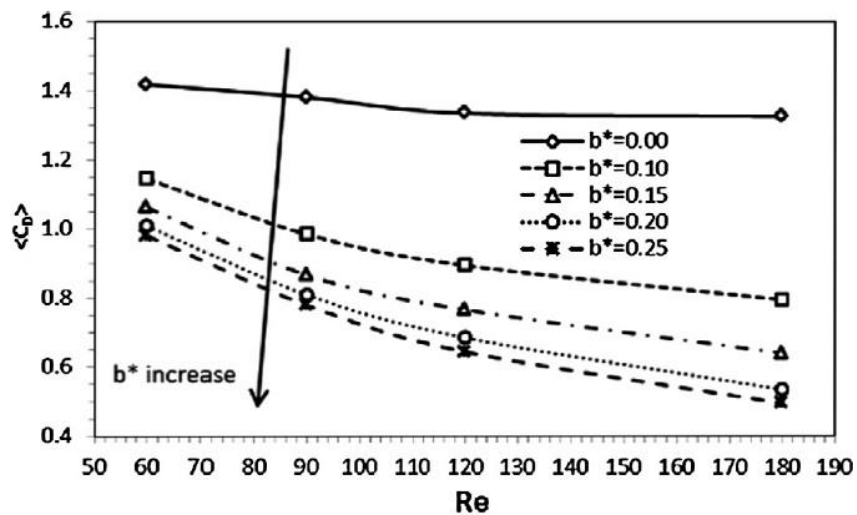
Στην Εικόνα 19, απεικονίζεται η μεταβολή του ημιέυρους του συντελεστή άνωσης, $C_{L, ampl}$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Όπως είναι αναμενόμενο, το ημιέυρος του συντελεστή άνωσης αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds, για όλες τις τιμές του b^* . Παρατηρούμε, επίσης, ότι η ένταση των διακυμάνσεων του συντελεστή άνωσης ελαττώνεται με αύξηση του b^* . Έτσι, είναι σαφές ότι η χρήση επιφανειακής υδροφοβικότητας συνιστά μια αποτελεσματική μέθοδο παθητικού ελέγχου, που μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη σταθεροποίηση της ροής.

Στην Εικόνα 20, παρουσιάζεται η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Σε όλες τις περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε σταθερή τιμή του b^* , η μορφή της προκύπτουσας καμπύλης είναι φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Οι τιμές του συντελεστή άνωσης μειώνονται με αύξηση του b^* .

Συμπερασματικά, η εφαρμογή επιφανειακής υδροφοβικότητας σε ροή γύρω από κύλινδρο οδηγεί σε μείωση των διακυμάνσεων των δυνάμεων επί του κυλίνδρου, μείωση του συντελεστή αντίστασης, και μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη σταθεροποίηση της ροής, για αρκούντως υψηλή τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* .



Εικόνα 19. Ημιεύρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* ($b^* = 0, 0.10, 0.15$) (Mastrokalos et al., 2015).



Εικόνα 20. Μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για διάφορες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* ($b^* = 0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$) (Mastrokalos et al., 2015).

6. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης στον κύλινδρο ελέγχου

Στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε φανερό ότι η προσθήκη του κυλίνδρου ελέγχου κατάλληλης διαμέτρου ($D/d \geq 7$) σε κατάλληλη θέση στον ομόρρο του κύριου κυλίνδρου σταθεροποιεί πλήρως τη ροή για αριθμούς Reynolds $Re \leq 80$. Παρατηρήθηκε επίσης ότι, αυξανόμενης της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου, αυξάνεται το εύρος της περιοχής, στην οποία, αν τοποθετηθεί ο τελευταίος, θα σταθεροποιηθεί η ροή. Ωστόσο, με την αύξηση του αριθμού Reynolds, για σταθερό λόγο διαμέτρων των δύο κυλίνδρων, D/d , συρρικνώνεται η εν λόγω περιοχή τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου. Σύμφωνα με τους Strykowski and Sreenivasan (1990), για μικρότερες τιμές του λόγου D/d , καθίσταται εφικτή η πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών για $Re \geq 150$.

Αναφορικά με τη χρήση υδροφοβικής επιφάνειας, επισημαίνεται ότι η απαιτούμενη κατεργασία της επιφάνειας του κυλίνδρου είναι δύσκολη και δαπανηρή, με το σχετικό κόστος να είναι άξουσα συνάρτηση του μήκους ολίσθησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κατασκευαστικά εφικτές τιμές του μήκους ολίσθησης παραμένουν και σήμερα ιδιαίτερα χαμηλές (αισθητά μικροτερες από 1 mm - Rothstein, 2010). Για τον λόγο αυτόν, επιλέγεται εδώ ο συνδυασμός των δύο μεθόδων (χρήση κυλίνδρου ελέγχου και εφαρμογή επιφανειακής υδροφοβικότητας), προκειμένου να επιδιωχθεί η αναίρεση του δρόμου δινών για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds, με κατά το δυνατόν μείωση του απαιτούμενου μήκους ολίσθησης. Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζεται υδροφοβικότητα μόνο στην επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου, και μελετώνται δύο περιπτώσεις: (α) τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στην περιοχή του ενός διατμητικού στρώματος του κύριου κυλίνδρου, και (β) τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στον ομόρρο του κύριου κυλίνδρου, σε διαφορετικές θέσεις επί του οριζόντιου άξονα συμμετρίας.

6.1 Τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στην περιοχή του ενός διατμητικού στρώματος του κύριου κυλίνδρου

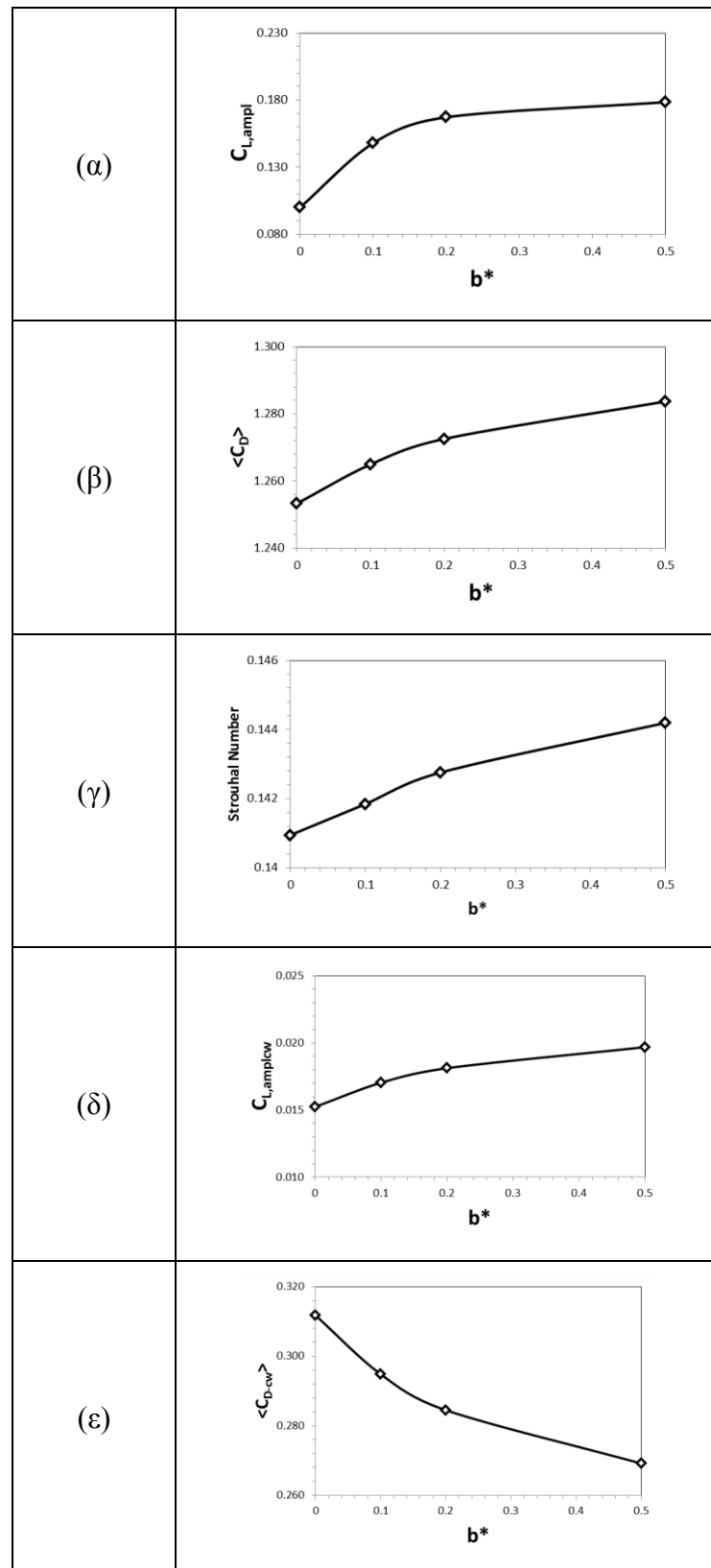
Εδώ, ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετείται στη θέση $X/D=1.5$, $Y/D=1$, που βρίσκεται στην περιοχή του ενός διατμητικού στρώματος του κύριου κυλίνδρου. Η διάμετρός του είναι υποδεκαπλάσια αυτής του κύριου κυλίνδρου, $D/d=10$.

Σκοπός μας είναι να μελετήσουμε τη ροή όταν εφαρμόζεται συνθήκη ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου. Εν προκειμένω, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τιμή του αριθμού Reynolds $Re = 90$, με τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στην προαναφερθείσα θέση. Η εν λόγω ροή είναι ολικά ασταθής χωρίς εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης. Εδώ, χρησιμοποιούνται τρεις τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^* = 0.1, 0.2, 0.5$ (η αδιαστατοποίηση γίνεται με βάση τη διάμετρο του κυλίνδρου ελέγχου).

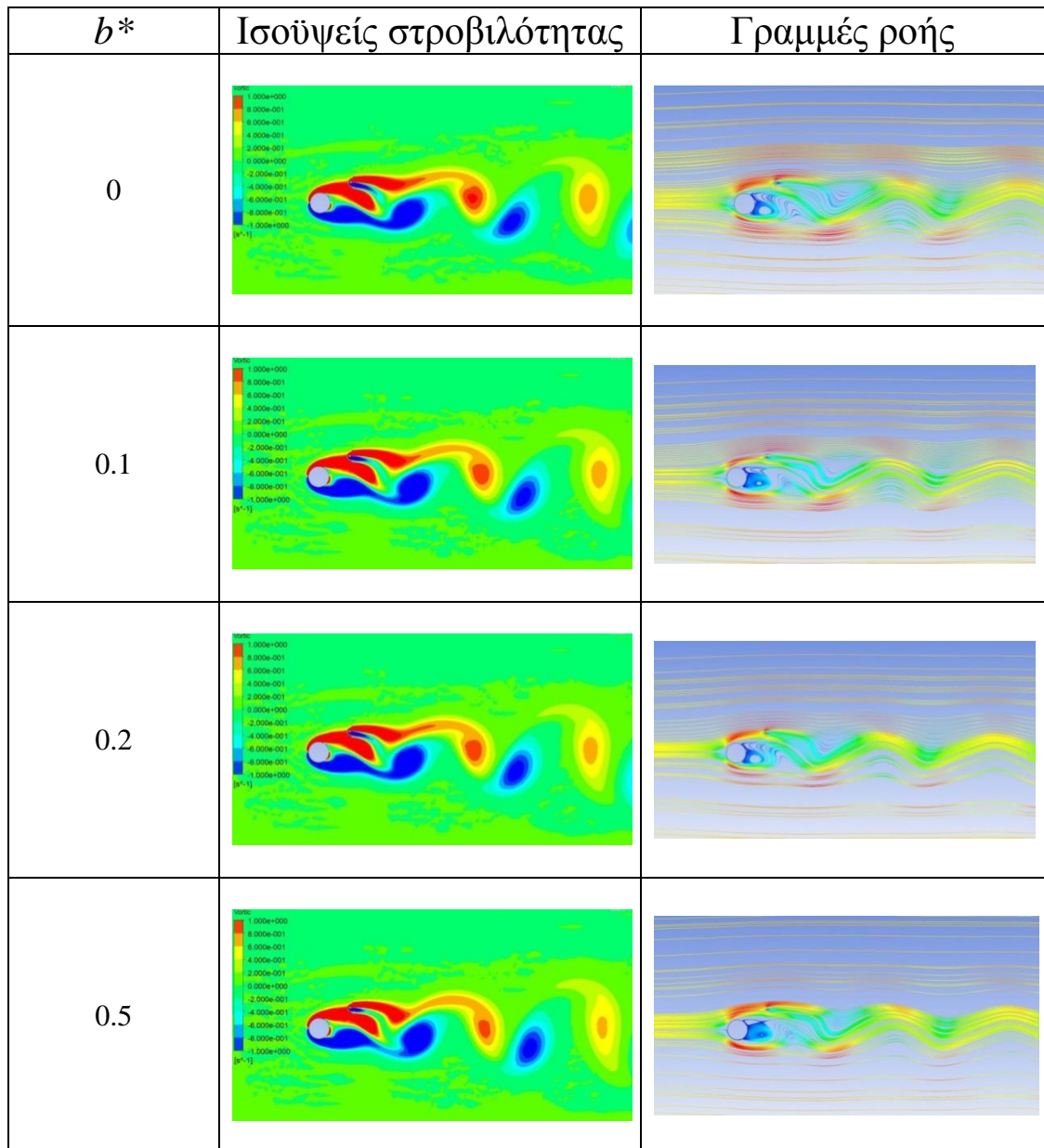
Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται ροϊκά μεγέθη τόσο για τον κύριο κύλινδρο όσο και για τον κύλινδρο ελέγχου ως συνάρτηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Ειδικότερα, στην Εικόνα 21α και στην Εικόνα 21δ παρουσιάζονται οι τιμές του ημιεύρους των διακυμάνσεων του συντελεστή άνωσης, για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι, με αύξηση του μήκους ολίσθησης, b^* , αυξάνεται το ημιέυρος των διακυμάνσεων, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της συνθήκης ολίσθησης στον κύλινδρο ελέγχου έχει αποσταθεροποιητική επίδραση στη ροή.

Στην Εικόνα 21β και στην Εικόνα 21ε παρουσιάζεται η επίδραση του μήκους ολίσθησης στη μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του b^* αυξάνεται η μέση δύναμη αντίστασης στον κύριο κύλινδρο, ενώ μειώνεται η αντίστοιχη δύναμη στον κύλινδρο ελέγχου. Οι τάσεις αυτές συνάδουν με τη συνολική αποσταθεροποίηση της ροής, καθώς και με τη μείωση του μέσου εύρους των ζωνών ανακύκλωσης του κυλίνδρου ελέγχου, για αύξηση του μήκους ολίσθησης.

Στην Εικόνα 21γ παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού Strouhal συναρτήσει του μήκους ολίσθησης. Διαπιστώνεται η αύξηση του αριθμού Strouhal με το b^* . Η αποσταθεροποιητική επίδραση της αύξησης του μήκους ολίσθησης, b^* , στη ροή επιβεβαιώνεται και από την αντίστοιχη αύξηση της έντασης της στροβιλότητας, η οποία αποτυπώνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 21. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$ και $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L, ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος συντελεστή άνωσης κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L, ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.



Εικόνα 22. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$ και $D/d=10$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για διαφορετικές τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου.

6.2 Τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας

Στο παρόν εδάφιο, ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετείται σε διάφορες θέσεις του άξονα συμμετρίας ($Y/D=0$) στον ομόρου του κύριου κυλίνδρου, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή του στην ευστάθεια της ροής, με ή χωρίς προσθήκη υδροφοβικότητας στον κύλινδρο ελέγχου.

Συγκεκριμένα, ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετείται στις εξής θέσεις:

- $X/D = 1.0, Y/D = 0$
- $X/D = 1.5, Y/D = 0$
- $X/D = 2.0, Y/D = 0$
- $X/D = 2.5, Y/D = 0$

Κάθε περίπτωση μελετάται για δύο διαφορετικές τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης ($b^* = 0$ και 0.1). Ο αριθμός Reynolds έχει την τιμή, $Re = 90$, ενώ ο λόγος των διαμέτρων επιλέγεται $D/d = 10$.

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται ροϊκά μεγέθη, τόσο για τον κύριο κύλινδρο όσο και για τον κύλινδρο ελέγχου, ως συνάρτηση της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου, X/D , για τις δύο τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* . Στην Εικόνα 23α και στην Εικόνα 23δ παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή άνωσης, για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι, καί στις δύο περιπτώσεις, το ημιεύρος του συντελεστή άνωσης αυξάνεται με την απομάκρυνση της απόστασης μεταξύ των κέντρων των δύο κυλίνδρων, για το εύρος των τιμών X/D που εδώ μελετήθηκε. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους ολίσθησης επιδρά ελαφρά αυξητικά στο ημιεύρος του συντελεστή άνωσης.

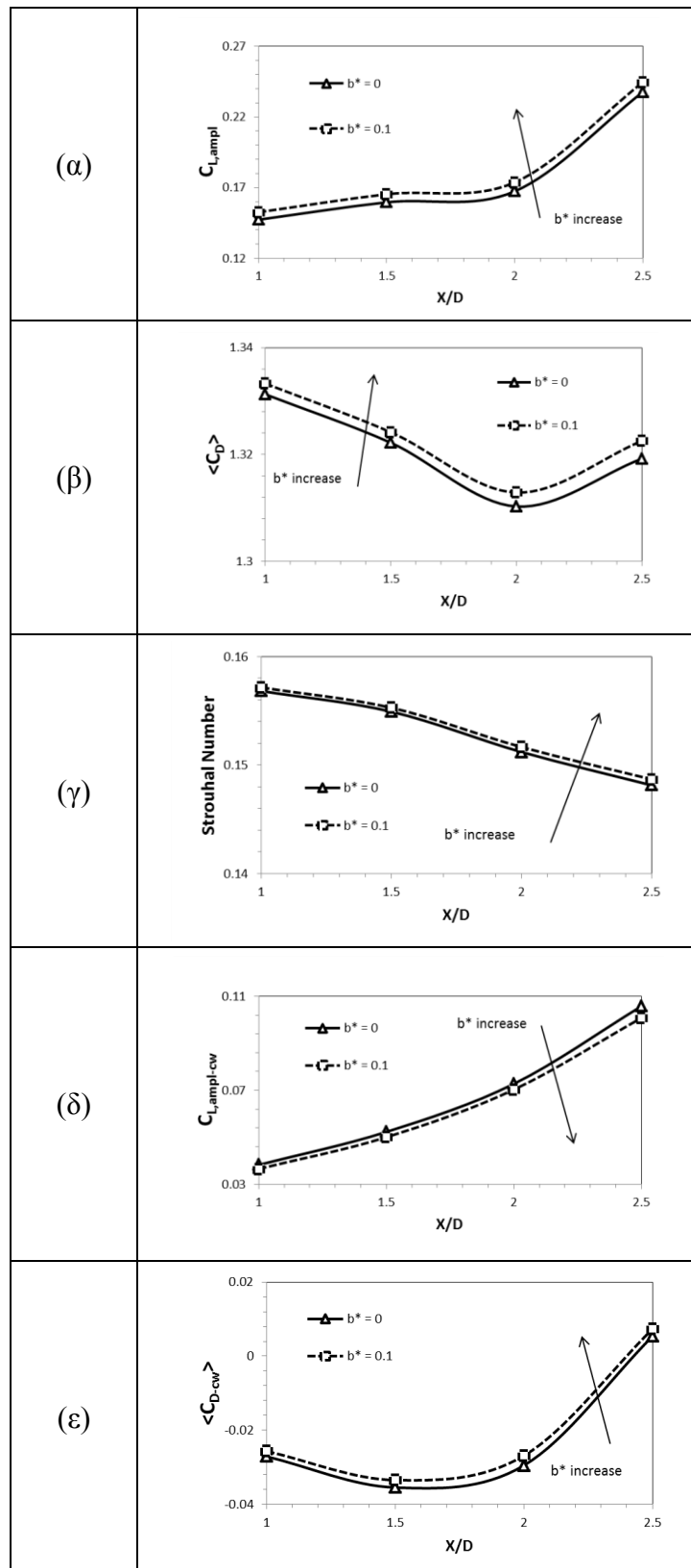
Στην Εικόνα 23β και στην Εικόνα 23ε παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου, αντίστοιχα. Αναφορικά με τον κύριο κύλινδρο, διαπιστώνεται, με βάση την Εικόνα 23β, ότι η τιμή του $\langle C_D \rangle$ είναι φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των δύο κυλίνδρων έως $X/D=2$, ενώ αυξάνεται για $X/D>2$. Αναφορικά με τον κύλινδρο ελέγχου, από την Εικόνα 23ε προκύπτει ότι η τιμή του $\langle C_D \rangle$ είναι φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των κυλίνδρων για $X/D \leq 1.5$, και αύξουσα για $X/D > 1.5$. Οι παραπάνω διαπιστώσεις ισχύουν καί για τις δύο τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης που εδώ θεωρούνται. Η αύξηση του μήκους ολίσθησης αυξάνει τη δύναμη αντίστασης στον μεγάλο κύλινδρο. Σημειώνεται ότι, για τον κύλινδρο ελέγχου, η δύναμη αντίστασης είναι αρνητική για ένα μεγάλο εύρος της απόστασης X/D , γεγονός που δεικνύει ότι η θέση του μικρού κυλίνδρου είναι εντός της μέσης περιοχής των ζωνών ανακύκλωσης πίσω από τον κύριο κύλινδρο.

Στην Εικόνα 23γ παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού Strouhal, συναρτήσει της απόστασης X/D . Διαπιστώνεται η μείωση της αδιάστατης συχνότητας του δρόμου δινών με αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο κυλίνδρων.

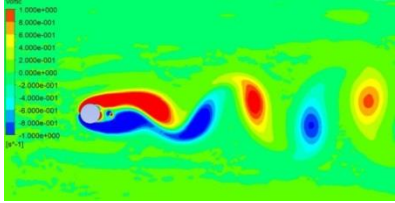
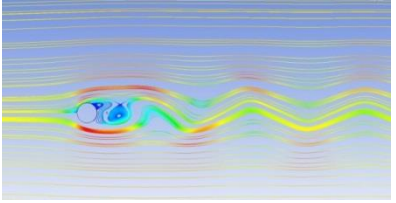
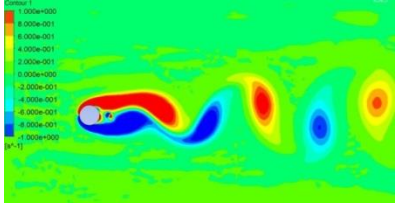
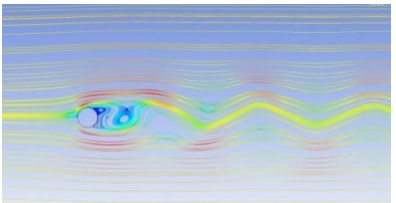
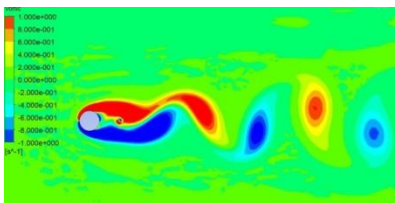
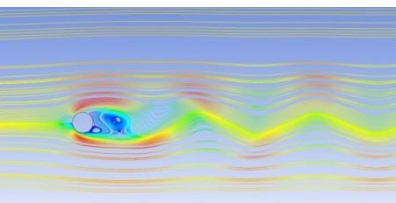
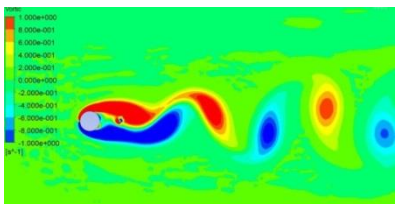
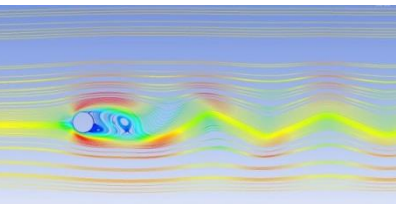
Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η σταθεροποίηση της ροής δεν ευνοείται από την εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης, γύρω από την επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου, καθώς το ημιέυρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,amp}$, για τον κύριο κύλινδρο αυξάνεται με την αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης (Εικόνα 23α). Αντιθέτως, παρατηρούμε ότι η εφαρμογή της συνθήκης ολίσθησης επιδρά μειωτικά στο ημιέυρος του συντελεστή άνωσης, $C_{L,amp}$, του κυλίνδρου ελέγχου, καθώς οι αντίστοιχες τιμές μειώνονται σε κάθε θέση, με την αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* (Εικόνα 23δ). Αναφορικά με τη μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, αυτή αυξάνεται με την αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης για τον κύριο κύλινδρο (Εικόνα 23β), και μειώνεται κατ' απόλυτο τιμή για τον κύλινδρο ελέγχου (Εικόνα 23ε).

Στην Εικόνα 24 και την Εικόνα 25, παρουσιάζονται οι ισοϋψείς της στροβιλότητας και οι γραμμές ροής για κάθε θέση του κυλίνδρου ελέγχου που εξετάστηκε, για τις δύο τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^* = 0, 0.1$. Επιβεβαιώνεται ότι η επίδραση της μεταβολής του b^* στη δομή της ροής δεν είναι σημαντική.

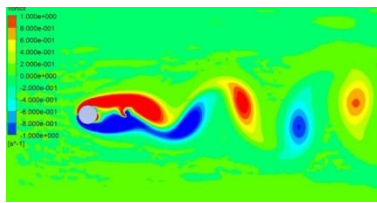
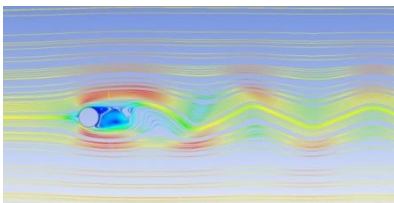
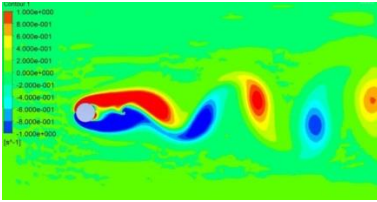
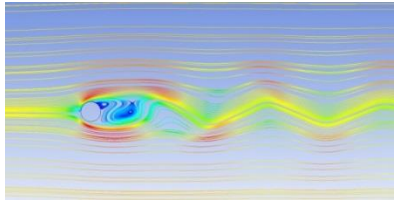
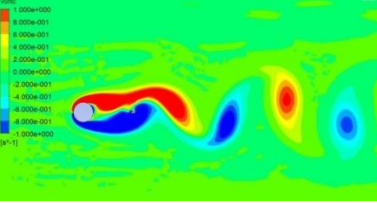
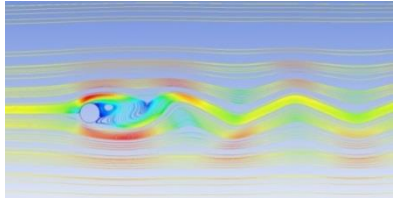
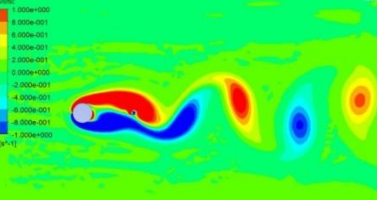
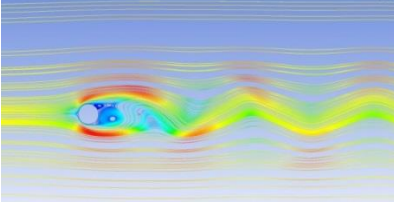
Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι, για τις περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου στον άξονα συμμετρίας, η συχνότητα μεταβολής του συντελεστή C_D είναι διπλάσια εκείνης του συντελεστή C_L . Αυτό συνιστά μια διαφορά σε σχέση με τις περιπτώσεις που ο κύλινδρος ελέγχου είναι τοποθετημένος στην περιοχή του διατμητικού στρώματος. Όταν ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετείται στον άξονα συμμετρίας, δεν επιδρά σημαντικά στη δυναμική σχηματισμού του δρόμου δινών, γεγονός το οποίο οφείλεται στη δημιουργία και αποκοπή μίας δίνης στο άνω τμήμα και μίας στο κάτω τμήμα της περιοχής εγγύς του κύριου κυλίνδρου.



Εικόνα 23. $Re=90$, $Y/D=0$ και $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου: (α) ημιέυρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L, ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιέυρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L, ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.

b^*	X/D	Ισοϋψείς στροβιλότητας	Γραμμές ροής
0	1		
0.1	1		
0	1.5		
0.1	1.5		

Εικόνα 24. $Re=90$, $Y/D=0$, $D/d=10$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για συνδυασμούς των τιμών του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* και της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου, X/D .

b^*	X/D	Ισοϋψείς στροβιλότητας	Γραμμές ροής
0	2		
0.1	2		
0	2.5		
0.1	2.5		

Εικόνα 25. $Re=90$, $Y/D=0$, $D/d=10$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για συνδυασμούς των τιμών του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* και της οριζόντιας θέσης του κυλίνδρου ελέγχου, X/D .

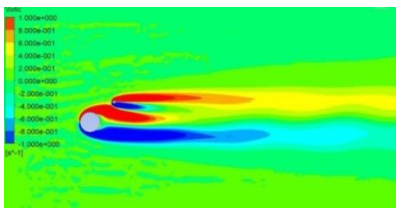
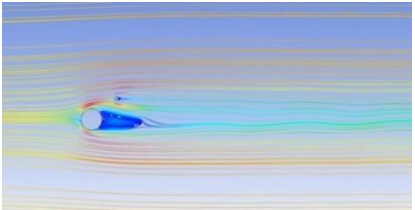
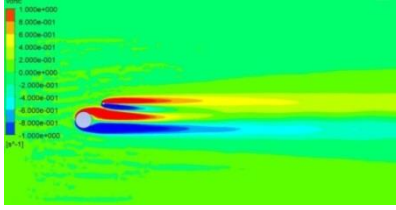
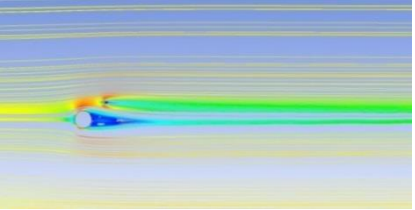
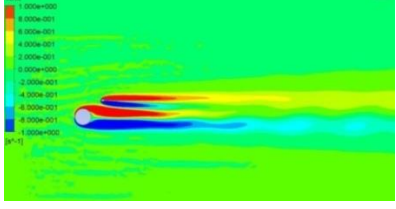
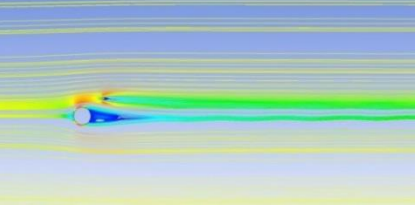
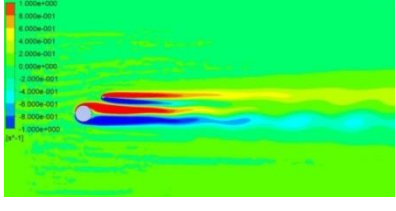
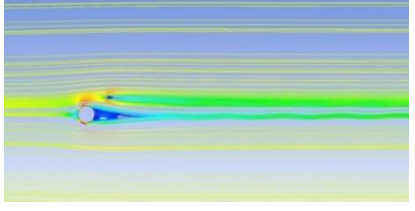
7. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης στην επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου

Στην τρέχον κεφάλαιο, μελετώνται οι επιπτώσεις της εφαρμογής συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου, για τυπικές τιμές του αριθμού Reynolds στην περιοχή όπου η ροή παραμένει δισδιάστατη. Συγκεκριμένα, για μία θέση και διάμετρο του κυλίνδρου ελέγχου, μελετάται η ροή για $Re=90, 120, 150$ και 180 . Επιπλέον, για $Re=90$, μελετάται η ροή για διαφορετικούς συνδυασμούς της θέσης και της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου.

7.1 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου (full slip)

Εδώ, ο κύλινδρος ελέγχου τοποθετείται στη θέση $X/D=1.2, Y/D=1$, ενώ ο λόγος διαμέτρων έχει την τιμή $D/d=7$. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για τέσσερις τιμές του αριθμού Reynolds, $Re=90, 120, 150$ και 180 , με εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου. Ένας κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός της οριακής τιμής του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$, η οποία οδηγεί σε πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών. Για τον υπολογισμό αυτής της τιμής, επιλύεται αρχικά η ροή για σχετικά μικρές τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, για τις οποίες δεν αναιρείται ο δρόμος των δινών. Στη συνέχεια, αυξάνεται σταδιακά η τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, έως ότου παρατηρηθεί ότι το ημιεύρος των συντελεστών αντίστασης, $C_{D,ampl}$ και άνωσης, $C_{L,ampl}$, τείνει στο μηδέν. Η τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης που αντιστοιχεί σε μηδενισμό των διακυμάνσεων των δυνάμεων είναι η οριακή τιμή, $b^*_{critical}$.

Στην Εικόνα 26, παρουσιάζονται, για τις τέσσερις τιμές του αριθμού Reynolds και τις αντίστοιχες τιμές του κρίσιμου αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$, οι ισοϋψείς της στροβιλότητας και οι ροϊκές γραμμές. Η Εικόνα 26 επιβεβαιώνει, σε όλες τις περιπτώσεις, την πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών, με αύξηση της απαίτησης σε $b^*_{critical}$, με αύξηση του αριθμού Reynolds.

Re	$b^*_{critical}$	Ισοϋψείς στροβιλότητας	Γραμμές ροής
90	0.060		
120	0.116		
150	0.129		
180	0.139		

Εικόνα 26. $X/D=1.2$, $Y/D=1$, $D/d=7$, εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου: ισοϋψείς της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, Re . Σε όλες τις περιπτώσεις σημειώνεται η κρίσιμη τιμή του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$.

7.2 Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου για $Re = 90$ και διαφορετικές θέσεις του κυλίνδρου ελέγχου

Στην παρούσα ενότητα, μελετώνται οι επιπτώσεις της εφαρμογής συνθήκης ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου, για τιμή του αριθμού Reynolds, $Re=90$, για τους ακόλουθους συνδυασμούς θέσης και διαμέτρου: (α) $X/D = 1.2$, $Y/D = 1.0$ και $D/d = 7$, (β) $X/D = 1.5$, $Y/D = 1.0$ και $D/d = 10$ και (γ) $X/D = 2.0$, $Y/D = 1.0$ και $D/d = 7$.

7.2.1 Θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=1.2$, $Y/D= 1.0$ για λόγο διαμέτρων $D/d = 7$

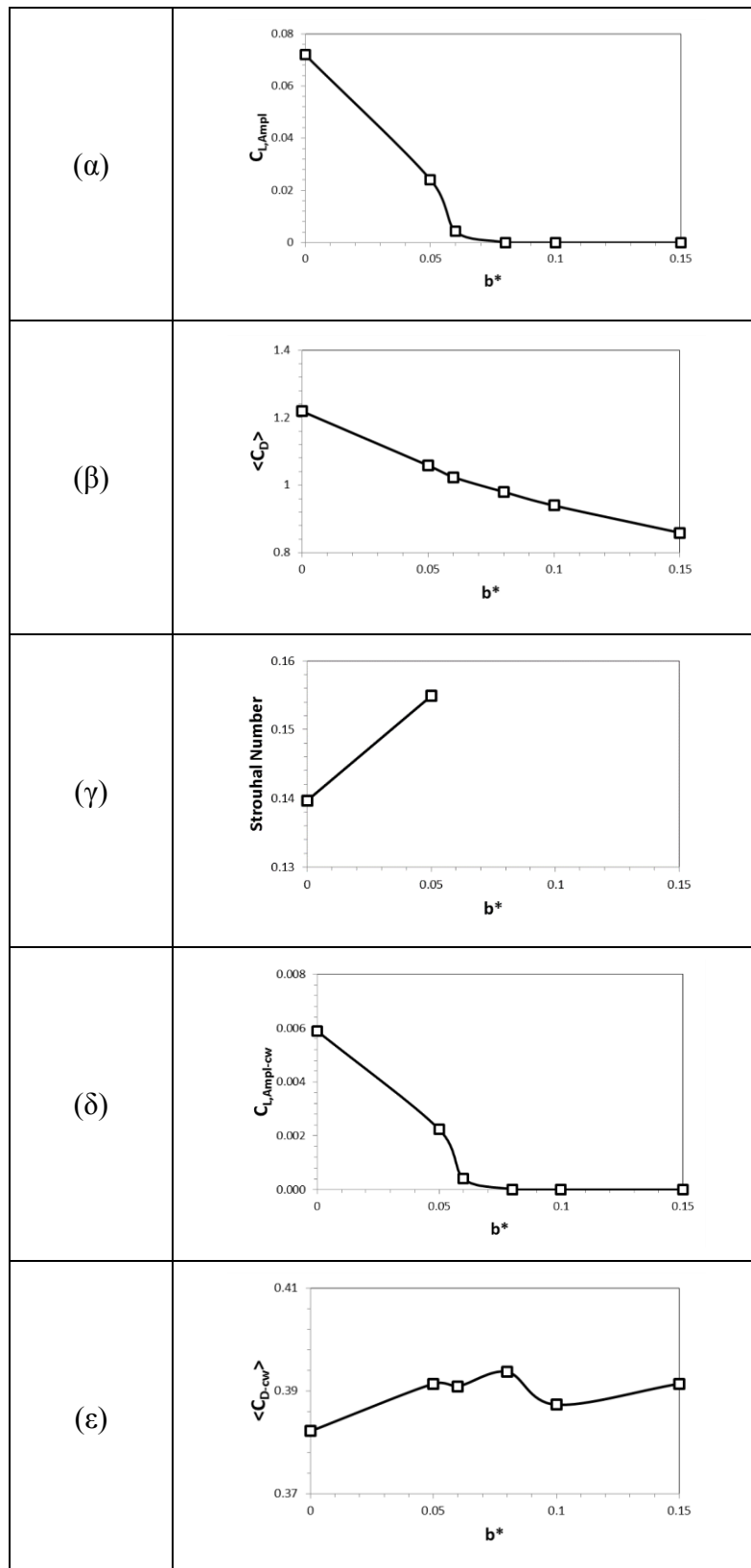
Για τη συγκεκριμένη θέση του κυλίνδρου ελέγχου, έγιναν υπολογισμοί για πέντε τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* ($b^* = 0.05, 0.06, 0.08, 0.1, 0.15$). Ένας κύριος στόχος των υπολογισμών αυτών είναι να προσδιοριστεί η οριακή τιμή του b^* για την οποία αναιρείται ο δρόμος δινών στον ομόρροτο των δύο κυλίνδρων.

Στην Εικόνα 27α παρουσιάζεται το εύρος της διακύμανσης του συντελεστή άνωσης, $C_{L,ampl}$, για τον κύριο κύλινδρο, ως (φθίνουσα) συνάρτηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης. Διαπιστώνεται ότι η τιμή του $C_{L,ampl}$ παραμένει μη μηδενική για $b^* < 0.08$, ενώ μηδενίζεται για $b^* > 0.08$. Αντίστοιχη τάση παρουσιάζει και το εύρος διακύμανσης του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$ (Εικόνα 27δ). Στην Εικόνα 27β εμφανίζεται η χρονικά μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_D \rangle$, για τον κύριο κύλινδρο, ως (φθίνουσα) συνάρτηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* , ενώ στην Εικόνα 27ε παρουσιάζεται η χρονικά μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης, $\langle C_{D-cw} \rangle$, για τον κύλινδρο ελέγχου. Παρατηρείται ότι οι τιμές του $\langle C_{D-cw} \rangle$ δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές, για το μελετούμενο εύρος των τιμών του b^* . Τέλος, στην Εικόνα 27γ παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού Strouhal συναρτήσει του μήκους ολίσθησης, και παρατηρείται αύξηση αυτού για την τιμή $b^* = 0.05$, σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται υδροφοβικότητα.

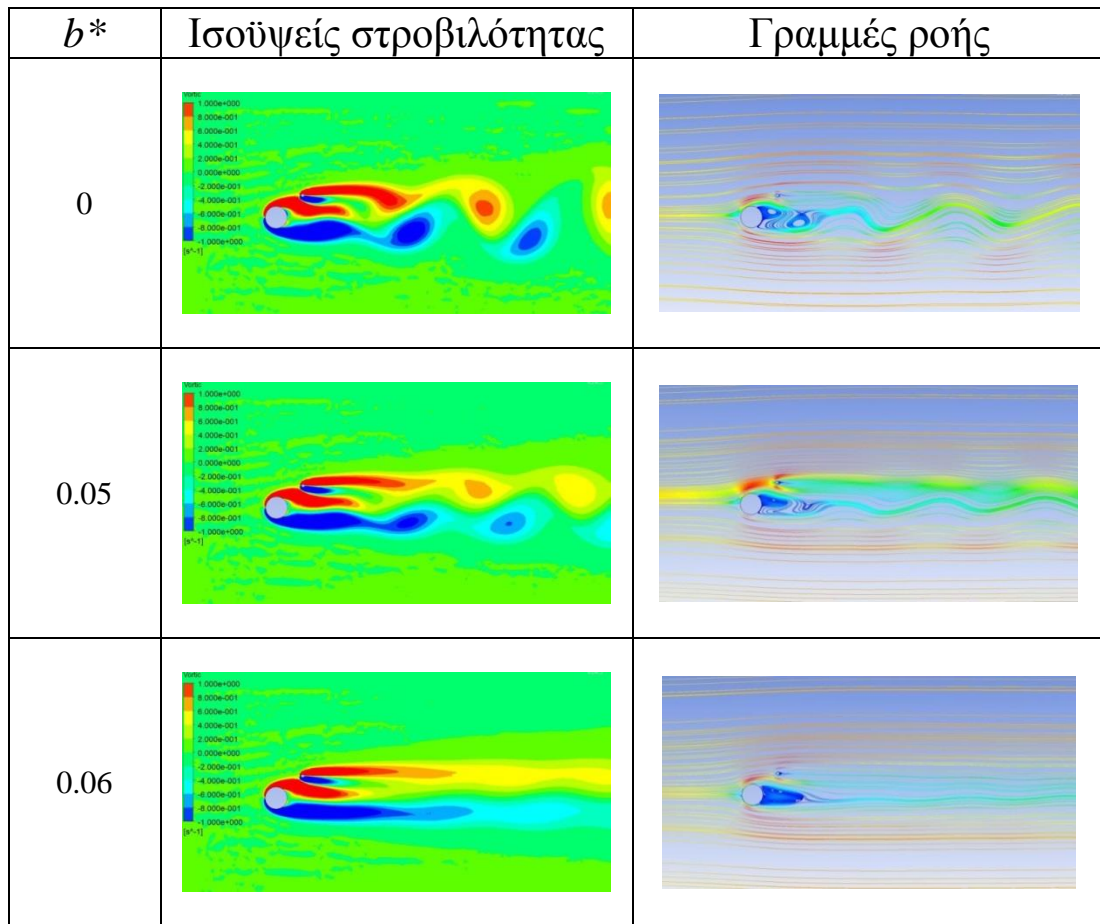
Στην Εικόνα 28 και στην Εικόνα 29, παρουσιάζονται, για διαφορετικές τιμές του μήκους ολίσθησης, οι στιγμιαίες ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και οι ροϊκές γραμμές. Παρατηρείται ότι η αύξηση του μήκους ολίσθησης έχει ως αποτέλεσμα την αναίρεση του δρόμου δινών για $b^*=0.06$, όπου σχηματίζονται οι συαθερές ζώνες ανακύκλωσης. Αξίζει να σημειωθεί, για περαιτέρω αύξηση του $b^*(b^*>0.06)$, παρατηρείται μείωση του μήκους των ζωνών ανακύκλωσης πίσω από τον κύριο κύλινδρο, οδηγώντας σε περισσότερο ευσταθή ροή.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της βιβλιογραφίας, για εφαρμογή της συνθήκης ολίσθησης σε όλη την επιφάνεια ενός μεμονωμένου κυλίνδρου για $Re=90$, επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της ροής για τιμή του μήκους ολίσθησης $b^*=0.17$ (Legendre et al., 2009, Mastrokalos et al., 2015). Έτσι, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αποδεικνύουν ότι η επιπλέον

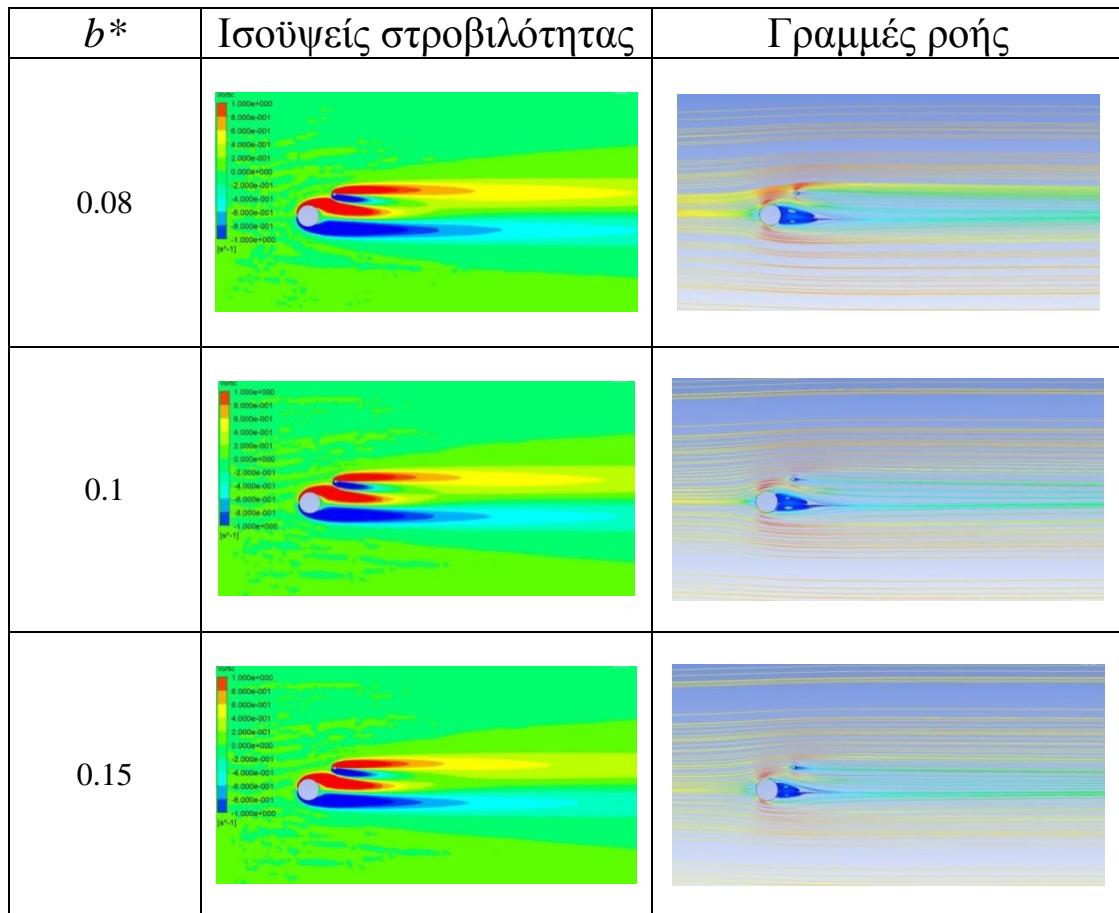
τοποθέτηση ενός μικρού κυλίνδρου ελέγχου μειώνει το απαιτούμενο για τη σταθεροποίηση της ροής μήκος ολίσθησης στον κύριο κύλινδρο ($b^*=0.06$) , κατά περισσότερο από 50%.



Εικόνα 27. $Re=90$, $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιέρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιέρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.



Εικόνα 28. $Re=90$, $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*=0, 0.05, 0.06$.



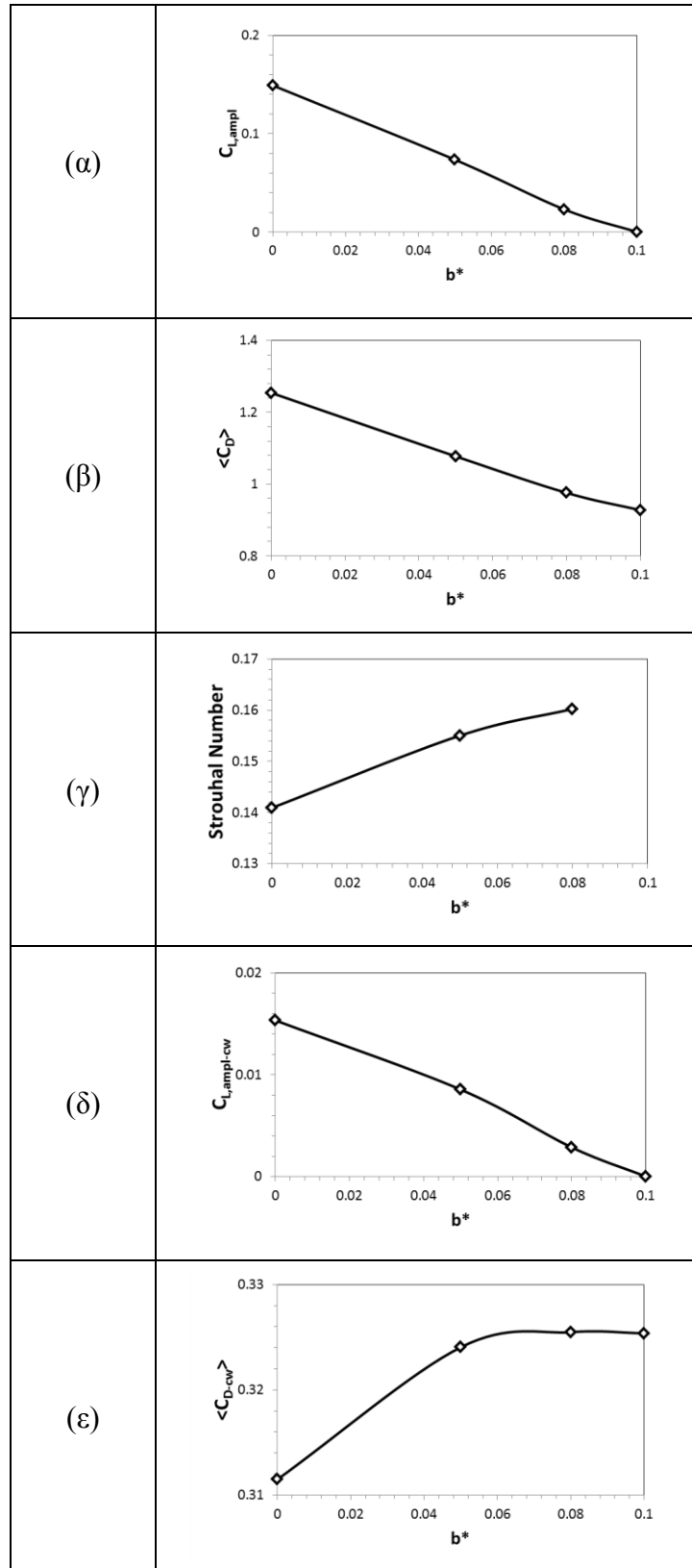
Εικόνα 29. $Re=90$, $X/D=1.2$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*=0.08, 0.1, 0.15$.

7.2.2 Θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$ για λόγο διαμέτρων $D/d = 10$

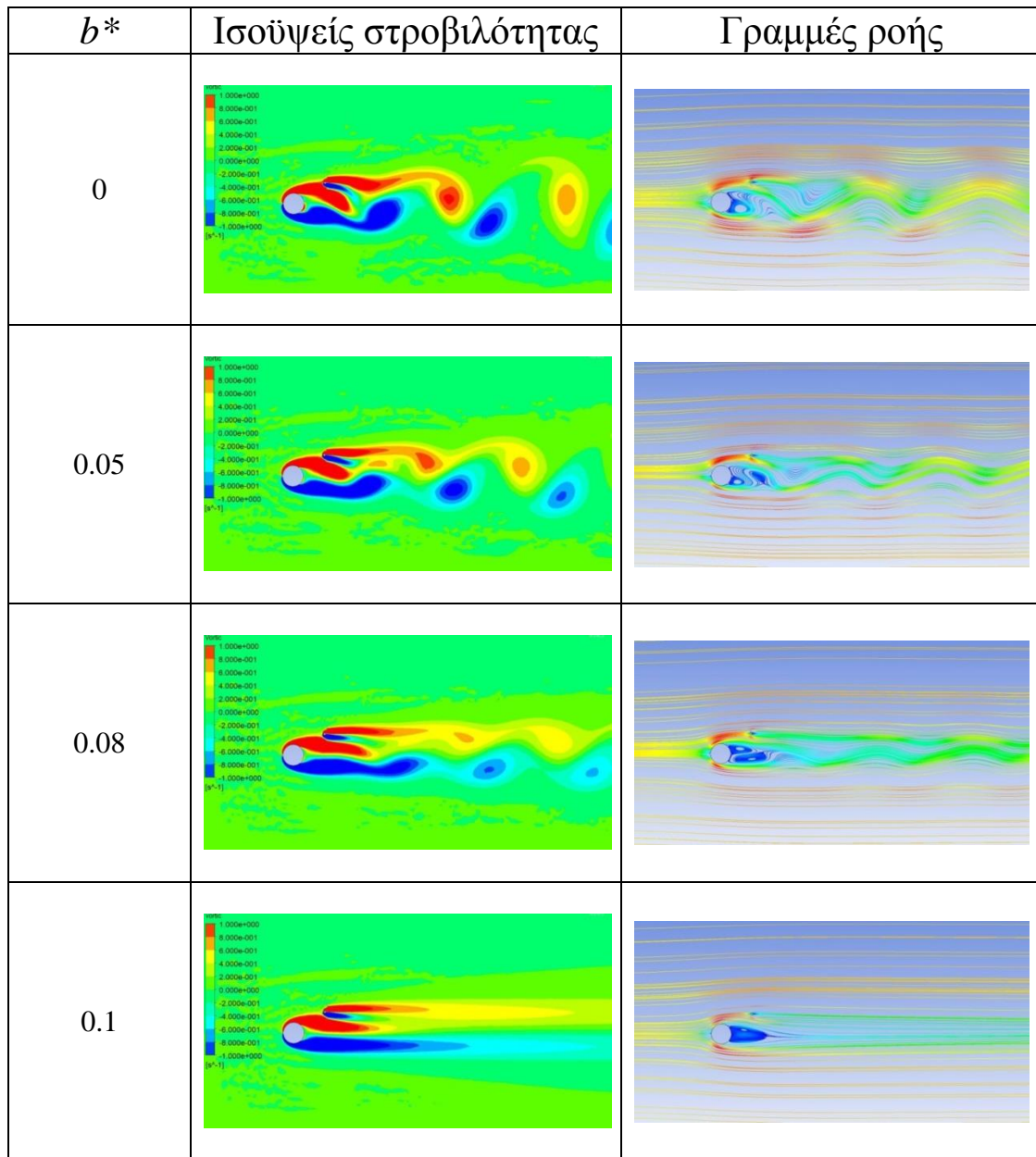
Στο παρόν εδάφιο, πραγματοποιούνται υπολογισμοί για τρεις τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, ($b^* = 0.05, 0.08, 0.1$). Με βάση τα αποτελέσματα, προκύπτει αναίρεση του δρόμου δινών για την τιμή $b^* = 0.1$.

Στην Εικόνα 30α και στην Εικόνα 30δ, παρουσιάζεται η μεταβολή του ημιεύρους της διακύμανσης του συντελεστή άνωσης, συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται η σταθεροποιητική επίδραση της αύξησης του μήκους ολίσθησης (μείωση των διακυμάνσεων του συντελεστή άνωσης), και η σταθεροποίηση της ροής για την τιμή $b^*=0.1$. Αναφορικά με τη μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, διαπιστώνεται ότι αυτή είναι φθίνουσα συνάρτηση του b^* (Εικόνα 30β). Αυτό συνάδει με τη σταθεροποίηση της ροής και τη μείωση του μέσου εύρους του ομόρρου με αύξηση του b^* . Η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου δεν μεταβάλλεται αισθητά για το παρόν εύρος μεταβολής του b^* (βλ. Εικόνα 30ε). Στην Εικόνα 30γ παρουσιάζεται η μεταβολή της αδιάστατης συχνότητας του δρόμου δινών (αριθμός Strouhal), συναρτήσει της τιμής του b^* . Διαπιστώνεται η μικρή αύξηση του αριθμού Strouhal με αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης.

Τέλος, στην Εικόνα 31 παρουσιάζονται, για διαφορετικές τιμές του μήκους ολίσθησης, οι στιγμιαίες ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και οι αντίστοιχες ροϊκές γραμμές, οι οποίες καταδεικνύουν την προοδευτική σταθεροποίηση της ροής με αύξηση του b^* .



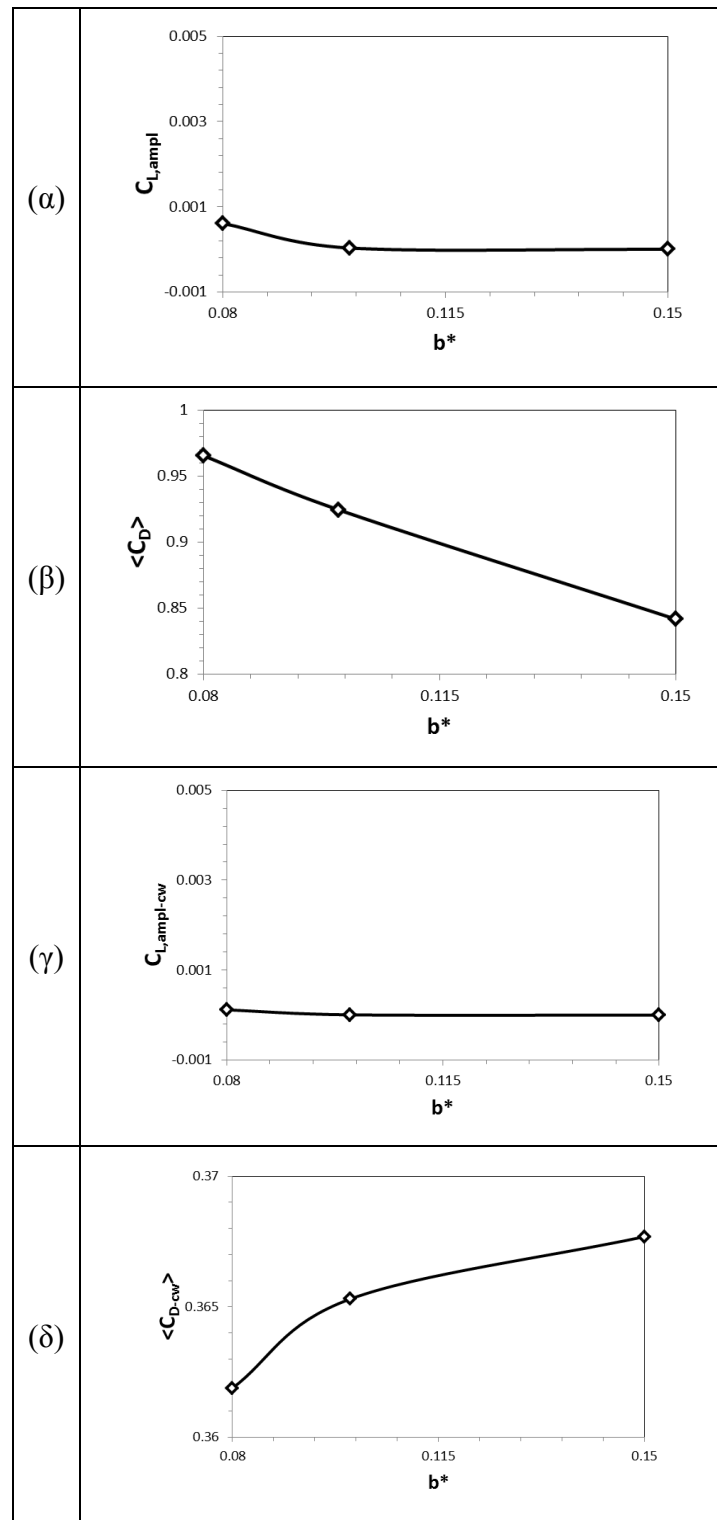
Εικόνα 30. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$, $D/d=10$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L, ampl}$, (β) μέση τιμή συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L, ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.



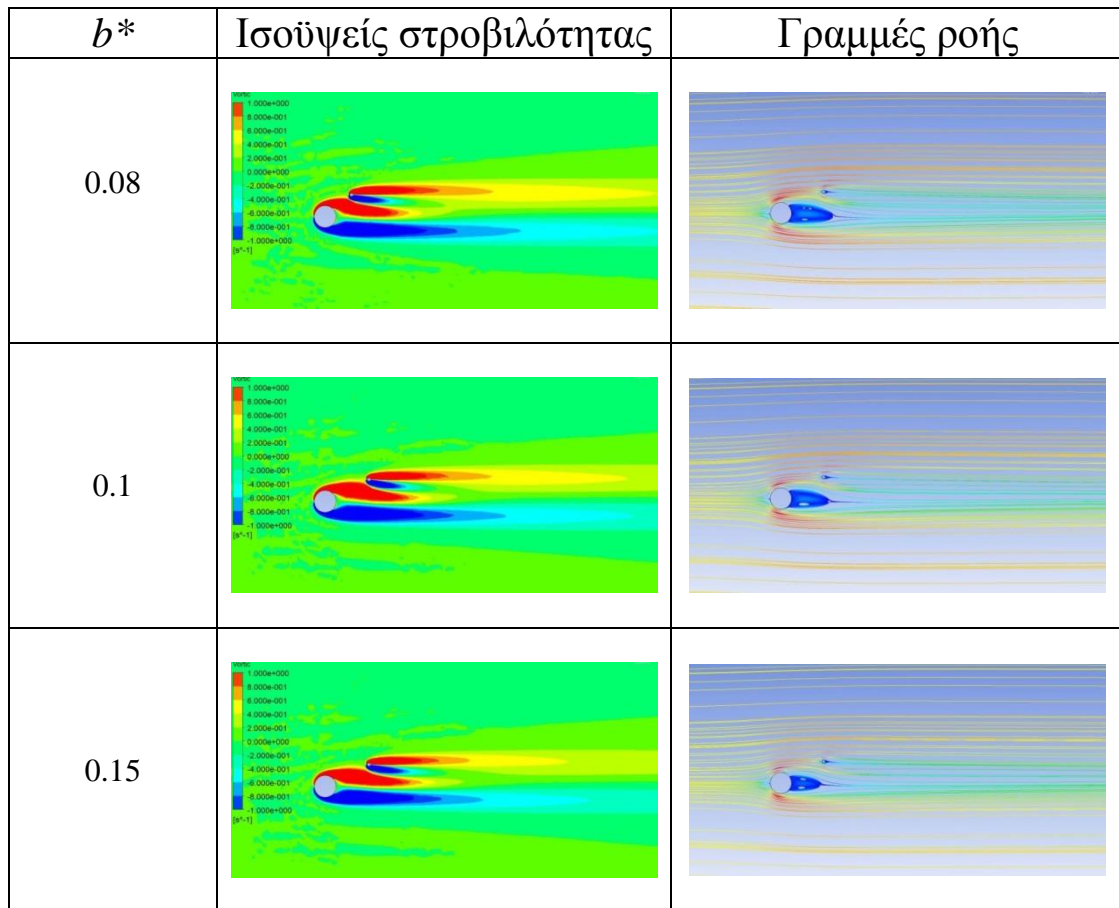
Εικόνα 31. $Re=90$, $X/D=1.5$, $Y/D=1.0$, $D/d=10$: στιγμιαίες ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*=0, 0.05, 0.08, 0.1$.

7.2.3 Θέση του κέντρου του κυλίνδρου ελέγχου $X/D=2.0$, $Y/D= 1.0$ για λόγο διαμέτρων $D/d = 7$

Για την παρούσα θέση του κυλίνδρου ελέγχου, έγιναν υπολογισμοί για τρεις τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* ($b^* = 0.08, 0.1, 0.15$). Στην Εικόνα 32α και στην Εικόνα 32γ, παρουσιάζεται η εξάρτηση του ημιεύρους του συντελεστή άωσης από το αδιάστατο μήκος ολίσθησης, b^* , για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι, και στις δύο περιπτώσεις, το εύρος μηδενίζεται για $b^* > 0.1$. Στην Εικόνα 32β και στην Εικόνα 32δ παρουσιάζεται η μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του b^* , για τον κύριο κύλινδρο και τον κύλινδρο ελέγχου αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι, στην περίπτωση του κύριου κυλίνδρου, η τάση είναι πτωτική, εξαιτίας της σταθεροποίησης της ροής με αύξηση του b^* . Στην περίπτωση του κυλίνδρου ελέγχου, διαπιστώνεται μικρή αύξηση του συντελεστή αντίστασης με αύξηση του b^* . Τέλος, η δομή των στιγμιαίων ισοϋψών καμπυλών της στροβιλότητας και των ροϊκών γραμμών επιβεβαιώνει τη μείωση του μήκους των δύο κύριων ζωνών ανακύκλωσης, με την αύξηση του b^* (Εικόνα 33).



Εικόνα 32. $Re=90$, $X/D=2.0$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ροϊκά μεγέθη συναρτήσει του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* : (α) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κύριου κυλίνδρου, $C_{L,ampl}$, (β) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κύριου κυλίνδρου, $\langle C_D \rangle$, (γ) αριθμός Strouhal, St , (δ) ημιεύρος του συντελεστή άνωσης του κυλίνδρου ελέγχου, $C_{L,ampl-cw}$, και (ε) μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης του κυλίνδρου ελέγχου, $\langle C_{D-cw} \rangle$.



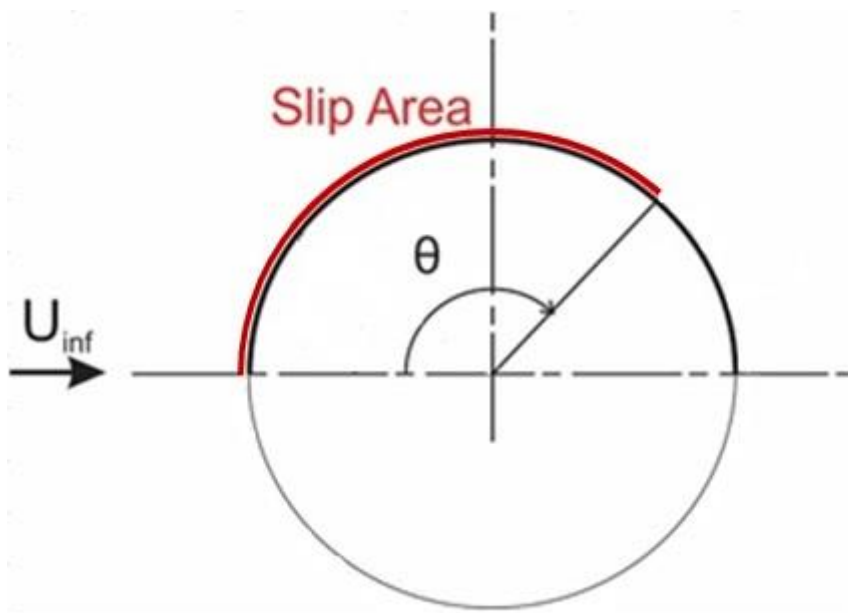
Εικόνα 33. $Re=90$, $X/D=2.0$, $Y/D=1.0$, $D/d=7$: ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*= 0.08, 0.1, 0.15$.

7.2.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για συνδυασμούς θέσης και διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν για συνδυασμούς της θέσης και της διαμέτρου του κυλίνδρου ελέγχου (ενότητες 7.2.1, 7.2.2 και 7.2.3), προκύπτει το συμπέρασμα ότι, για λόγο διαμέτρων $D/d=7$, η ροή σταθεροποιείται για μικρότερες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* (Εικόνα 27α και Εικόνα 32α), σε σύγκριση με την περίπτωση $D/d=10$ (Εικόνα 30α). Αυτό συνάδει με τα αποτελέσματα των Strykowski and Sreenivasan (1990) για μη υδροφοβικό κύριο κύλινδρο, σύμφωνα με τα οποία η ροή παρουσιάζει αυξημένη ευστάθεια για μικρότερες τιμές του λόγου διαμέτρων D/d . Επιπλέον, τα παρόντα αποτελέσματα πιστοποιούν, για ίδια τιμή του λόγου D/d , τη σημαντική εξάρτηση της ευστάθειας της ροής από τη θέση τοποθέτησης του κυλίνδρου ελέγχου. Τέλος, βρέθηκε ότι, για $D/d=7$, κατάλληλη τοποθέτηση του κυλίνδρου ελέγχου συνεπάγεται μείωση της απαίτησης σε κόστος ελέγχου (b^*) σε σχέση με τη ροή γύρω από μεμονωμένο κύλινδρο, κατά περίπου 65%.

8. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου

Σύμφωνα με συμπεράσματα της εργασίας των Mastrokalos et al. (2015), για $Re=90$, αν εφαρμοστεί συνθήκη ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου πλην της περιοχής ± 37.44 μοίρες εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής (Εικόνα 34), ο δρόμος δινών μπορεί να αναιρεθεί για μικρότερες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* , σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι, στην παρούσα εργασία, διερευνήθηκε η επίδραση της απουσίας υδροφοβικότητας στην περιοχή του πίσω σημείου ανακοπής του κύριου κυλίνδρου στην απαίτηση σε δράση ελέγχου (b^*) για τη σταθεροποίηση της ροής.

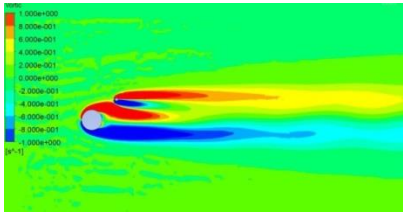
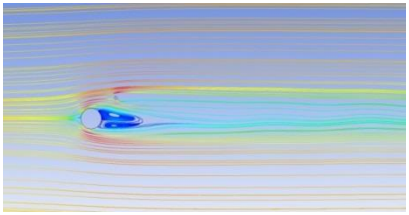
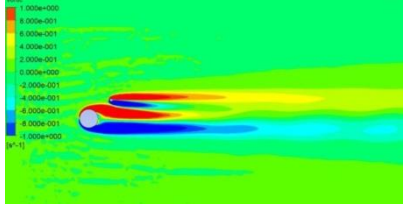
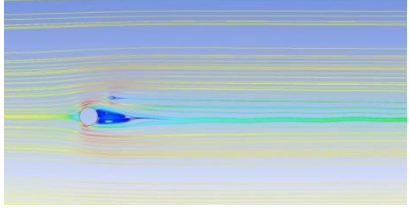
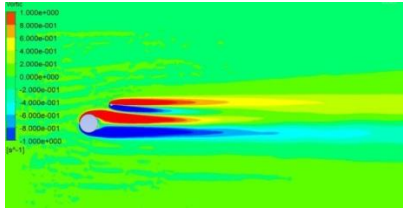
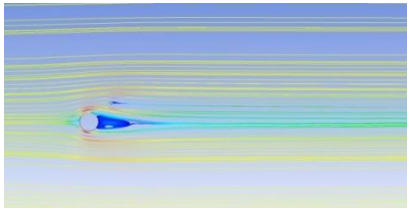
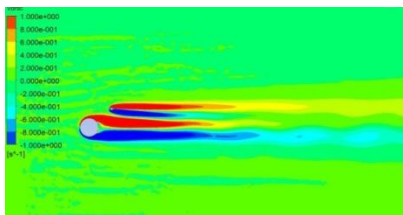
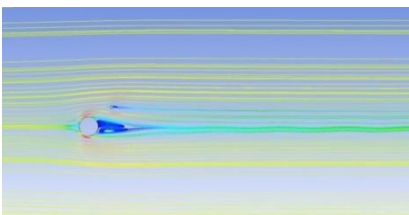


Εικόνα 34. Εφαρμογή συνθήκης ολίσθησης στην επιφάνεια του κυλίνδρου, για τόξο γωνίας $\theta=142.56^\circ$. Η ροή είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά.

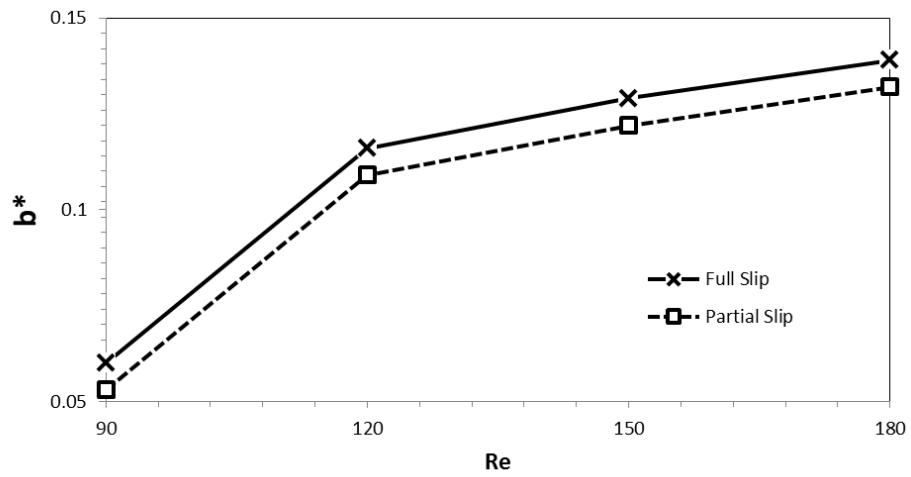
Εδώ, παρουσιάζονται αποτελέσματα, για τιμές του αριθμού Reynolds, $Re = 90, 120, 150, 180$, για εφαρμογή υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου, εξαιρουμένης της περιοχής $\pm 37.44^\circ$ εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής. Η θέση στην οποία τοποθετείται ο κύλινδρος ελέγχου είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για την ευστάθεια της ροής, σύμφωνα με την ενότητα 7.1 ($X/D, Y/D = 1.2, 1$), για λόγο διαμέτρων $D/d = 7$. Εδώ, κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$, η οποία αντιστοιχεί σε αναίρεση του δρόμου δινών.

Στην Εικόνα 35, παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της στροβιλότητας και οι ροϊκές γραμμές για την κρίσιμη τιμή αναίρεσης του δρόμου δινών, $b^*_{critical}$, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds. Η σταθεροποίηση της ροής είναι εμφανής από την παρουσία των σταθερών ζωνών ανακύκλωσης, και την απουσία του δρόμου δινών (Εικόνα 35). Υπογραμμίζεται ότι οι τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, b^* , που προσδιορίστηκαν στην παρούσα ενότητα είναι μικρότερες από εκείνες που υπολογίστηκαν στην ενότητα 7.1, στην οποία η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόστηκε σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου, έως και κατά 12%. Κατά συνέπεια, με την εφαρμογή υδροφοβικότητας σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου, μειώνεται το σχετικό κόστος, τόσο γιατί μειώνεται η απαιτούμενη τιμή του b^* , όσο και γιατί μειώνεται το χρησιμοποιούμενο εύρος της υδροφοβικής επιφάνειας.

Συνολικά, οι τιμές $b^*_{critical}$, όπως προκύπτουν για χρήση συνθήκης υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου και σε τμήμα αυτής, παρουσιάζονται στην Εικόνα 36, συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Παρατηρείται ότι, με αύξηση της τιμής του αριθμού Reynolds, αυξάνεται η απαίτηση σε αδιάστατο μήκος ολίσθησης για τη σταθεροποίηση της ροής. Επίσης, εφαρμόζοντας συνθήκη ολίσθησης σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου (πλην της περιοχής γύρω από το πίσω σημείο ανακοπής), προκύπτουν ευνοϊκότερα αποτελέσματα για τη σταθεροποίηση της ροής (μείωση του $b^*_{critical}$). Έτσι, μειώνεται σημαντικά η απαίτηση σε κόστος παθητικού ελέγχου.

Re	b^*	Ισοϋψείς στροβιλότητας	Γραμμές ροής
90	0.053		
120	0.109		
150	0.122		
180	0.132		

Εικόνα 35. $X/D=1.2$, $Y/D=1$, $D/d=7$: ισοϋψείς της στροβιλότητας και ροϊκές γραμμές, για την κρίσιμη τιμή αναίρεσης του δρόμου δινών, $b^*_{critical}$, για διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds, Re . Η συνθήκη ολίσθησης εφαρμόζεται σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου (δεν εφαρμόζεται συνθήκη ολίσθησης, στην περιοχή $\pm 37.44^\circ$ εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής του κυλίνδρου).



Εικόνα 36. $X/D=1.2$, $Y/D=1$, $D/d=7$: κρίσιμες τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης, $b^*_{critical}$, συναρτήσει του αριθμού Reynolds, για εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου ή σε τμήμα αυτής (εξαίρεση της περιοχής $\pm 37.44^\circ$ εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής).

9. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε υπολογιστικά η ροή γύρω από κύλινδρο, για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, με κύριο στόχο την αναίρεση του δρόμου δινών von Kármán. Για τον σκοπό αυτόν, εφαρμόστηκαν δύο σχήματα παθητικού ελέγχου. Οι δράσεις ελέγχου αυτών των σχημάτων είναι: (α) η κατάλληλη τοποθέτηση ενός μικρότερου κυλίνδρου (κύλινδρος ελέγχου), και (β) η εφαρμογή υδροφοβικότητας στην επιφάνεια ενός εκ των δύο κυλίνδρων. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων μελετήθηκε για πρώτη φορά στην παρούσα εργασία, για το εύρος τιμών του αριθμού Reynolds $90 < Re < 180$, στο οποίο η ροή είναι θεωρηθεί διδιάστατη.

Αρχικά, μελετήθηκε η ροή με παρουσία μη υδροφοβικού κυλίνδρου ελέγχου στον ομόρρου του κύριου κυλίνδρου, και διαπιστώθηκε η μερική ή ακόμα και η πλήρης αναίρεση του δρόμου δινών, για κατάλληλους συνδυασμούς της θέσης και του λόγου διαμέτρων. Επιβεβαιώθηκε επίσης ότι, με αύξηση του αριθμού Reynolds, περιορίζεται η σταθεροποιητική επίδραση του κυλίνδρου ελέγχου, η οποία μπορεί όμως να ενισχυθεί με χρήση μεγαλύτερων διαμέτρων του κυλίνδρου ελέγχου. Τα παραπάνω αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.

Ακολούθως, εφαρμόστηκε συνθήκη ολίσθησης σε ολόκληρη την επιφάνεια του κυλίνδρου ελέγχου, για μη υδροφοβικό κύριο κύλινδρο, και διαπιστώθηκε αποσταθεροποίηση της ροής. Ειδικότερα, βρέθηκε ότι η αποσταθεροποίηση της ροής είναι συνεχής με την αύξηση του αδιάστατου μήκους ολίσθησης.

Το βασικότερο βήμα της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή υδροφοβικότητας στον κύριο κύλινδρο (σε ολόκληρη την επιφάνεια ή σε τμήμα αυτής), με ταυτόχρονη χρήση μη υδροφοβικού κυλίνδρου ελέγχου. Σύμφωνα με τα παρόντα αποτελέσματα, η εφαρμογή υδροφοβικότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου οδηγεί στην πλήρη αναίρεση του δρόμου δινών. Αυτό κατέστη δυνατό για τιμές του αδιάστατου μήκους ολίσθησης μειωμένες αισθητά (σε κάποιες περιπτώσεις περισσότερο από 50%), σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς τη χρήση κυλίνδρου ελέγχου. Παράλληλα, σε αντιστοιχία με την περίπτωση μη υδροφοβικών κυλίνδρων, βρέθηκε ότι η σταθεροποίηση της ροής καθίσταται ευκολότερη με μείωση του λόγου των διαμέτρων, D/d , καθώς και με μείωση της μεταξύ τους απόστασης. Τέλος, έγινε χρήση υδροφοβικότητας σε τμήμα της επιφάνειας του κύριου κυλίνδρου, συγκεκριμένα με εξαίρεση της περιοχής $\pm 37.44^\circ$ εκατέρωθεν του πίσω σημείου ανακοπής (τμηματική υδροφοβικότητα). Σε αυτή την περίπτωση, διαπιστώθηκε σταθεροποίηση της ροής για ακόμη μικρότερες τιμές του κρίσιμου μήκους ολίσθησης, οδηγώντας έτσι σε νέα μείωση της τιμής αυτού (κατά περίπου 10%), σε σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής υδροφοβικότητας σε όλη την επιφάνεια του κύριου κυλίνδρου. Η μείωση του κόστους ελέγχου (μήκος ολίσθησης

και εύρος της υδροφοβικής περιοχής) καθιστά το παρόν σχήμα παθητικού ελέγχου ενδιαφέρον για μελλοντικές εφαρμογές.

10. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε συνέχεια της παρούσας εργασίας, προτείνονται τα ακόλουθα θέματα για περαιτέρω μελέτη της ροής γύρω από κύλινδρο, με χρήση κυλίνδρου ελέγχου:

1) Διαμόρφωση και επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης, με στόχο την αναίρεση του δρόμου δινών, για ελάχιστη δυνατή δράση ελέγχου. Μεταβλητές σχεδίασης ενός τέτοιου προβλήματος μπορούν να είναι η θέση και η διάμετρος του κυλίνδρου ελέγχου, καθώς και οι γωνίες που ορίζουν την υδροφοβική περιοχή στον κύριο κύλινδρο, και το αντίστοιχο αδιάστατο μήκος ολίσθησης. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις (προς ελαχιστοποίηση) πρέπει να ποσοτικοποιούν την ένταση των διακυμάνσεων (ταχύτητας ή δυνάμεων), καθώς και το κόστος της δράσης ελέγχου.

2) Επίλυση του παρόντος προβλήματος (χρήση κυλίνδρου ελέγχου και τμηματικής υδροφοβικότητας στον κύριο κύλινδρο) για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds, για τρισδιάστατη ροή.

3) Έλεγχος της ροής με χρήση αναρρόφησης/εμφύσησης από τον κύλινδρο ελέγχου. Στόχος καί σε αυτό το σχήμα ελέγχου θα είναι η σταθεροποίηση της ροής με χρήση της ελάχιστης δυνατής δράσης ελέγχου.

Βιβλιογραφία

- [1] Breuer K.S., Park J., Henoeh C. Actuation and control of a turbulent channel flow using Lorentz forces. *Physics of Fluids* 2002; volume 16: number 4.
- [2] Chen Z., Aubry N. Active control of cylinder wake. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 2003; 10:205–216.
- [3] Delaunay Y., Control of circular cylinder wakes using base mass actuation. ETH Zürich, 2001.
- [4] Delaunay Y., Kaiktsis L. Control of circular cylinder wakes using base mass transpiration. *Phys. Fluids* 2001; 13:3285–3302.
- [5] Dipankar A., Sengupta T.K. and Talla S.B. Suppression of vortex shedding behind a circular cylinder by another control cylinder at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 2006; 000:1-20
- [6] Distler D., Johnson B., Kielbasa M., Phinney B. Optimization of oscillating body for Vortex Induced Vibrations. 2011.
- [7] Dong S, Triantafyllou GS, Karniadakis GE (2008). Elimination of vortex streets in bluff-body flows. *Physical Review Letters*, 100, 20, 204501
- [8] Dumouchel F., Lecordier J.C., Paranthoën P. The effective Reynolds number of a heated cylinder. *International journal of heat and mass transfer* 1998; 41: 1787-1794.
- [9] Evangelinos C., Karniadakis G.E. 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.
- [10] Gal-el-Hak M. *Flow control. Passive, Active and Reactive Flow Management.* Cambridge University Press, 2000.
- [11] Igbalajobi A. The effect of a Splitter Plate on the flow around a surface-mounted finite circular cylinder. University of Saskatchewan, 2011.
- [12] Kaiktsis L., Triantafyllou G.S., Özbas M. Excitation, inertia, and drag forces on a cylinder vibrating transversely to a steady flow. *J Fluids and Structures* 2007;23:1–21
- [13] Legendre D., Lauga E., Magnaudet J. Influence of slip on the dynamics of two-dimensional wakes. *J Fluid Mech* 2009; 633:437–447.
- [14] Mastrokalos M., Papadopoulos C., Kaiktsis L. Optimal stabilization of a flow past a partially hydrophobic circular cylinder. *Comp. & Fluids* 2015;107:256-271.

- [15] Mittal S. and Raghuvanshi A.. Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2001; 35:421-447
- [16] Muralidhar P., Ferrer N., Daniello R., and Rothstein J.P.. Influence of Slip on the flow past superhydrophobic circular cylinders. *J. Fluid Mech.* 2011; 680:459–476.
- [17] Roshko, A. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies. NACA TN 3169, 1954.
- [18] Rothstein JP. Slip on superhydrophobic surfaces. *Ann Rev Fluid Mech* 2010;41:89-109.
- [19] Schulmeister J. C. Flow separation control with rotating cylinders. Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [20] Seo I.W., Song C.G. Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder with slip conditions. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2012; 68:1538–1560.
- [21] Singh SP, Mittal S., Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis, 2005. *Int J for Num Meth Fluids*, 47: 75–98.
- [22] Strykowski P.J. and Sreenivasan P.R.. On the formation and suppression of vortex ‘shedding’ at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech* 1990;218:71-107
- [23] Sumer B.M. and Fredsøe J. Hydrodynamics around cylindrical structure. World Scientific Publishing Co Pte. Ltd. Singapore, 2006.
- [24] Tokumaru PT, Dimotakis PE. Rotary oscillation control of a cylinder wake. *J Fluid Mech* 1991;224:77–90.
- [25] Xiao-Feng X., Cheng C., Bo-Fu W., Dong-Jun M., De-Jun S. Local heating effect of flow past a circular cylinder. *Chin. Phys. Lett.* 2010; 27:4.
- [26] You D, Moin P. Effects of Hydrophobic surfaces on the drag and lift of a circular cylinder. *Phys Fluids* 2007;31(8):08170.
- [27] Zhang, WM, Meng G, Wei X. A review on slip models for gas microflows. *Microfluidics and Nanofluidics* 2012; 13(6):845–882.