



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Παλλόμενη ροή νερού γύρω από κύλινδρο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΛ ΟΥΡΕΪΚΑΤ ΚΑΡΙΜ

Επιβλέπων: Μαθιουλάκης Δημήτριος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Παλλόμενη ροή νερού γύρω από κύλινδρο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛ ΟΥΡΕΪΚΑΤ ΚΑΡΙΜ

Επιβλέπων Καθηγητής

Μαθιουλάκης Δημήτριος (Καθηγητής Ε.Μ.Π)

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22/Σεπ./2017

Δ. Μαθιουλάκης

Καθηγητής

Δ. Μπούρης

Αναπλ.Καθηγητής

Β. Ριζιώτης

Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2017

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα εκτενούς αναζήτησης και έρευνας. Θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Μαθιουλάκη Δημήτριο που μου έδωσε την ευκαρία εκπόνησης διπλωματικής εργασίας σε ένα σημαντικό από τεχνολογικής άποψης θέμα παρέχοντάς μου οποιαδήποτε ώρα στιδήποτε χρειαζόμουν.

Ένα εξίσου μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα κ.Γιασεμίδη Δημήτριο, ο οποίος ήταν από την πρώτη μέχρι και την τελευταία μέρα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας πάντα δίπλα μου και σίγουρα χωρίς αυτόν δεν θα μπορούσα να φτάσω ως εδώ.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	15
Abstract	15
Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.....	16
Εγκατάσταση των βάσεων των Ανεμογεννητριών στον πυθμένα.....	17
Είδη Βάσεων σε Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες	17
Jacket Foundation	19
Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες	21
Ανεμογεννήτριες σταθερής δομής.....	21
Στήριξη ανεμογεννήτριας σε ένα μόνο πυλώνα (Monopile foundation)	21
Ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε τρεις πυλώνες (Tripod Foundation).....	21
Ανεμογεννήτρια που η δομή της στηρίζεται στη βαρύτητα (Gravity Foundation)	22
Windfloat Ανεμογεννήτριες	23
Ανεμογεννήτριες με πόδια έντασης.....	24
Ανεμογεννήτρια με δομή σημαδούρας (Spar buoy).....	25
Πλατφόρμες εξόρυξης Πετρελαίου (Oil Platforms)	26
Σταθερές πλατφόρμες (Fixed Platforms)	27
Πλατφόρμα συμβατή με πύργους (Compliant towers)	27
Ημι-υποβρύχια πλατφόρμα (Semi-submersible platform).....	27

Jack-up εξέδρες γεώτρησης (Jack-up drilling rigs)	28
Γεωτρύπανα (Drillships)	28
Πλωτά συστήματα παραγωγής(Floating production systems)	28
TLP Πλατφόρμες.....	28
GBS Πλατφόρμες.....	28
Spar πλατφόρμες.....	29
Παράκτιες και υπεράκτιες εξέδρες	30
Πλατφόρμες με πόδια έντασης (TLP).....	30
Ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες.....	31
Αυτό-ανυψούμενη πλατφόρμα (Jack-up rig).....	32
Σταθερές πλατφόρμες (Fixed Platforms)	33
Συμβατός Πύργος (Compliant Tower).....	34
Πλωτή μονάδα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO).....	35
Πλατφόρμα που η δομή της βασίζεται στη βαρύτητα (GBS)	36
Πλατφόρμα με δομή σημαδούρας (Spar Platform).....	37
Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας (CALM)	38
Υποβρύχιοι Αγωγοί.....	39
Χαρακτηριστικά υποβρύχιων αγωγών.....	39
Παράγοντες επιλογής διαδρομής αγωγών	40
Φυσικοί παράγοντες	40
Ανθρώπινοι παράγοντες	41
Τοποθέτηση αγωγών.....	42
Pull/tow system.....	42
S-lay system	43
J-lay system.....	43
Reel-ray system	43
Καλωδιωτή γέφυρα.....	45
Παράλληλος σχεδιασμός	45
Σχεδιασμός βεντάλιας.....	46
SEA LAUNCH	47
ΙΣΤΟΡΙΑ	47
ΕΚΤΟΞΕΥΣΕΙΣ.....	47
ΑΠΟΤΥΧΙΑ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ NSS-8	48

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ ΕΚΤΟΞΕΥΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΙΣΗΜΕΡΙΝΟ ΩΚΕΑΝΟ .	49
Βιβλιογραφία	51
KEULEGAN CARPENTER	51
Εισαγωγή	51
Δυνάμεις ρευστού ενός σώματος σε ηρεμία μέσα σε κινούμενο υγρό	51
Χαρακτηριστικά των πειραματικών κυμάτων.....	53
Δυναμόμετρο	54
Καταγραφή δυνάμεων	55
Συντελεστές αδράνειας και οπισθέλκουσας κυλίνδρων και πλακών.....	55
Μεταβολές του Remainder Function και των C_m και C_d κατά την διάρκεια ενός κύκλου κύματος	58
Μορφή της ροής γύρω από κυλίνδρους και πλάκες	60
Μέγιστη δύναμη κατά την διάρκεια ενός κύκλου κύματος	61
BEARMAN & GRAHAM	63
Δυνάμεις σε κυλίνδρους σε συνεκτική παλλόμενη ροή σε χαμηλούς αριθμούς K_C	63
Εισαγωγή	63
Πειραματική διάταξη και παρουσίαση αποτελεσμάτων	64
Σχολιασμός αποτελεσμάτων	68
Sinusoidal flow relative to circular cylinders.....	71
By C.H.K. Williamson	71
Εισαγωγή	71
Πειραματική Διάταξη	71
Οπτικοποίηση ροής και μετρήσεις δυνάμεων.....	73
Καταστάσεις ροής με έκλυση δινών για μονό κύλινδρο	73
Υδροδυναμικά φαινόμενα για ζεύγος κυλίνδρων	83
Εγκάρσιος δρόμος δινών / μονό ζεύγος δινών ($7 < K_c < 15$).....	83
Συμπεριφορά της ροής για $K_c > 15$	85
4. Συντελεστές δυνάμεων (για μεμονωμένο κύλινδρο)	89
Πειραματική Διάταξη	90
Δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π από Plexiglas	90
Όργανα μετρήσεων	91
Επαγωγικός Αναλογικός Αισθητήρας θέσης (IA8-M1K-I3)	91
Τροφοδοτικό STATRON (No 0103013) του αισθητήρα θέσης	92
Μέθοδος triggering μέσω Arduino.....	93

Μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV).....	96
Υπολογισμός αριθμού Keulegan-Carpenter (KC).....	98
Υπολογισμός πλάτους ταλάντωσης $\{a(t)\}$	Error! Bookmark not defined.
Τρόπος επιλογής χρονικών στιγμών καταγραφής του πεδίου ροής	100
Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	101
Τυπική απόκλιση ταχύτητας (rms).....	101
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	102
1 ^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : T=2.016 sec KC=19.72	103
Williamson.....	103
Φάση 1	103
Φάση 2	104
Φάση 3	105
Φάση 4	106
Φάση 5	107
Φάση 6	108
Φάση 7	109
Φάση 8	110
Πειραματικά αποτελέσματα	111
Προφίλ Ταχύτητας.....	112
Φάσεις 1-4.....	112
Φάσεις 5-8.....	113
Πεδία Στροβιλότητας	113
Φάσεις 1-4.....	114
Φάσεις 5-8.....	114
2 ^ο ΠΕΙΡΑΜΑ: T=1.688 sec KC=25.16.....	115
Williamson.....	115
Πεδία Ροής	115
Φάση 1	115
Φάση 2	116
Φάση 3	117
Φάση 4	118
Φάση 5	119
Φάση 6	120
Φάση 7	121

Φάση 8	122
Πειραματικά αποτελέσματα	122
Προφίλ Ταχύτητας.....	123
Φάσεις 1-4.....	123
Φάσεις 5-8.....	124
Πεδία Στροβιλότητας	125
Φάσεις 1-4.....	125
Φάσεις 5-8.....	126
3 ^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : T=1.448 sec KC=34.24	127
Williamson	127
Πεδία Ροής	127
Φάση 1	127
Φάση 2	128
Φάση 3	129
Φάση 4	130
Φάση 5	131
Φάση 6	132
Φάση 7	133
Φάση 8	134
Πειραματικά αποτελέσματα	134
Προφίλ Ταχύτητας.....	135
Φάσεις 1-4.....	135
Φάσεις 5-8.....	136
Πεδία Στροβιλότητας	137
Φάσεις 1-4.....	137
Φάσεις 5-8.....	138
4 ^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : T=1.336 sec KC=42	139
Williamson	139
Πεδία Ροής	139
Φάση 1	139
Φάση 2	140
Φάση 3	141
Φάση 4	142
Φάση 5	143

Φάση 6	144
Φάση 7	145
Φάση 8	146
Πειραματικά αποτελέσματα	146
Προφίλ Ταχύτητας.....	147
Φάσεις 1-4.....	147
Φάσεις 5-8.....	148
Πεδία Στροβιλότητας	149
Φάσεις 1-4.....	149
Φάσεις 5-8.....	150
5 ^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : T=1.200 sec KC=36	151
Williamson	151
Πεδία Ροής	151
Φάση 1	151
Φάση 2	152
Φάση 3	153
Φάση 4	154
Φάση 5	155
Φάση 6	156
Φάση 7	157
Φάση 8	158
Πειραματικά αποτελέσματα	158
Προφίλ Ταχύτητας.....	159
Φάσεις 1-4.....	159
Φάσεις 5-8.....	160
Πεδία Στροβιλότητας	161
Φάσεις 1-4.....	161
Φάσεις 5-8.....	161
Συμπεράσματα	163
Παράρτημα Α.....	164
Παράρτημα Β.....	166
Παράρτημα Γ	167
Παράρτημα Δ.....	168
Παράρτημα Ε.....	170

Σχήμα 1 : Εφαρμογή Αιολικού Πάρκου	16
Σχήμα 2: Είδη βάσεων σε Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες	18
Σχήμα 3: Jacket Foundation.....	19
Σχήμα 4: Εφαρμογή ανεμογεννήτριας με στήριξη σε τρεις πυλώνες.....	21
Σχήμα 5: Ανεμογεννήτρια που η δομή της στηρίζεται στη βαρύτητα.....	22
Σχήμα 6: Windfloat Ανεμογεννήτρια.....	23
Σχήμα 7: Ανεμογεννήτρια με πόδια έντασης.....	24
Σχήμα 8: Spar Buoy Ανεμογεννήτρια.....	25
Σχήμα 9: Πλατφόρμες εξόρυξης Πετρελαίου.....	26
Σχήμα 10: 1,2)conventional fixed platforms;3)compliant tower;4,5)vertically moored tension leg and mini-tension leg platform;6)spar;7,8)semi-submersibles;9)floating production,storage,and offloading facility;10)sub-sea completion and tie-back to host facility.....	27
Σχήμα 11: Πλατφόρμες με πόδια έντασης (TLP)	30
Σχήμα 12: Ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες.....	31
Σχήμα 13: Αυτό-ανυψούμενη πλατφόρμα (Jack-up rig).....	32
Σχήμα 14: Σταθερές πλατφόρμες (Fixed Platforms).....	33
Σχήμα 15: Συμβατός Πύργος (Compliant Tower).....	34
Σχήμα 16: Πλωτή μονάδα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO).....	35
Σχήμα 17: Πλατφόρμα που η δομή της βασίζεται στη βαρύτητα (GBS).....	36
Σχήμα 18: Πλατφόρμα με δομή σημαδούρας (Spar Platform).....	37
Σχήμα 19: Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας (CALM).....	38
Σχήμα 20: Τοποθέτηση Υποβρύχιου Αγωγού.....	39
Σχήμα 21: Προσομοίωση Τοποθέτησης Υποβρύχιου Αγωγού.....	39
Σχήμα 22: S-lay,J-lay,Reel Systems	44
Σχήμα 23: Παράλληλος σχεδιασμός καλωδιωτής γέφυρας.....	45
Σχήμα 24: Καλωδιωτή γέφυρα σε σχεδιασμό βεντάλιας.....	46
Σχήμα 25: Περίπτωση αποτυχίας εκτόξευσης NSS-8 πυραύλου Sea Launch.....	48
Σχήμα 26: Εκτόξευση πυραύλου Sea Launch.....	49
Σχήμα 27: Περίπτωση διδιάστατης ροής.....	52
Σχήμα 28: Διάταξη δυναμόμετρου με τα μεγέθη μετρούμενα σε centimetres.....	54
Σχήμα 29: Παράδειγμα καταγραφής μέσω παλμογράφου των δυνάμεων σε κάθε δακτύλιο καθώς και του χρονισμού	55
Σχήμα 30: Συντελεστές αδράνειας C_m και οπισθέλκουσας C_d των κυλίνδρων.....	55

Σχήμα 31: Συντελεστές αδράνειας C_m και οπισθέλκουσας C_d των πλακών.	56
Σχήμα 32: Μεταβολή των συντελεστών αδράνειας των κυλίνδρων.	56
Σχήμα 33: Μεταβολή των συντελεστών οπισθέλκουσας των κυλίνδρων.	57
Σχήμα 34: Μεταβολή των συντελεστών αδράνειας των πλακών.	57
Σχήμα 35: Μεταβολή των συντελεστών οπισθέλκουσας των πλακών.	58
Σχήμα 36: Υπολογισμός της δύναμης ΔR για ένα κύλινδρο ($UmT/D=15.6$)	59
Σχήμα 37: Υπολογισμός της δύναμης ΔR για μία πλάκα ($UmT/D=6.6$).	59
Σχήμα 38: Μοτίβα ροής γύρω από κυλίνδρους (A) $D=3in, UmT/D=4$; (B) $D=3in, UmT/D=10$;	60
Σχήμα 39: Μοτίβα ροής γύρω από κυλίνδρους (A) $D=3in, UmT/D=1$; (B) $D=3in, UmT/D=4$;	61
Σχήμα 40: Μεταβολές του μεγέθους και της φάσης της μέγιστης δύναμης σε κυλίνδρους.	62
Σχήμα 41: Μεταβολές του μεγέθους και της φάσης της μέγιστης δύναμης σε πλάκες.	62
Σχήμα 42: Δυνάμεις σε κυλίνδρους σε συνεκτική παλλόμενη ροή (α)για πλάκα, (β)για κυκλικό κύλινδρο.	65
Σχήμα 43: Δυνάμεις σε κυλίνδρους σε συνεκτική παλλόμενη ροή (c)για απομονωμένη ακμή.	66
Σχήμα 44: Συντελεστές οπισθέλκουσας για κυκλικό κύλινδρο συναρτήσει του K_C	66
Σχήμα 45: (A) Συντελεστές αδράνειας για κυκλικό κύλινδρο συναρτήσει του K_C	67
Σχήμα 46: (B) Συντελεστής αδράνειας για κυκλικό κύλινδρο συναρτήσει του K_C	67
Σχήμα 47: Εκτίμηση της επίδρασης της έκλυσης δινών αφαιρώντας την θεωρητική τιμή του συνεκτικού συντελεστή οπισθέλκουσας.	69
Σχήμα 48: Μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει του K_C για αιχμηρούς κυλίνδρους.	70
Σχήμα 49: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.	72
Σχήμα 50: Γεωμετρία του ζεύγους κυλίνδρων.	73
Σχήμα 51: Συσχέτιση του πλάτους ροής με τα μοτίβα δινών.	74
Σχήμα 52: Συσχέτιση του K_C με τα μοτίβα δινών.	74
Σχήμα 53: Οπτικοποίηση της ροής.	76
Σχήμα 54: Εγκάρσιος δρόμος δινών/μονό ζεύγος δινών ($7 < K_C < 15$)	77
Σχήμα 55: Παραδείγματα δυνάμεων άνωσης και αντίστασης για εγκάρσιο δρόμο.	78
Σχήμα 56: (α) Διπλό ζεύγος δινών ($15 < K_C < 24$), (β) ταλάντωση της ανωστικής δύναμης για αυτή την κατάσταση ροής.	79
Σχήμα 57: Οπτικοποίηση αυτής της κατάστασης ροής.	80
Σχήμα 58: Σχηματισμός δινών και αναπαράσταση της ανωστικής δύναμης.	81
Σχήμα 59: Οπτικοποίηση ζευγών δινών.	82
Σχήμα 60: Οπτικοποίηση ζευγών δινών.	82
Σχήμα 61: Τυπικά μοτίβα ροής δινών.	83
Σχήμα 62: Ημιτονοειδής ροή σε σχέση με τους κυκλικούς κυλίνδρους για $K_C=14$	84
Σχήμα 63: Ημιτονοειδής ροή σε σχέση με τους κυκλικούς κυλίνδρους (c), (d).	84
Σχήμα 64: Δύο κύλινδροι δίπλα δίπλα (α) $K_C=24$, (β) $K_C=54$	86
Σχήμα 65: Δύο κύλινδροι με μεταξύ τους γωνία 45° για $K_C > 15$	87
Σχήμα 66: Δυο κύλινδροι σε σειρά για $15 < K_C < 24$	88
Σχήμα 67: Προσέγγιση συντελεστών αντίστασης C_L, C_F συναρτήσει του K_C	89
Σχήμα 68: Πειραματική διάταξη εργαστηρίου.	90
Σχήμα 69: Δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π από Plexiglas.	91
Σχήμα 70: Επαγωγικός Αναλογικός Αισθητήρας θέσης (IA8-M1K-I3)	92
Σχήμα 71: Τροφοδοτικό STATRON (No 0103013) του αισθητήρα θέσης.	93
Σχήμα 72: Συσκευή Arduino	94
Figure 73 : Γεννήτρια παλμών , Laser Controller	95
Σχήμα 74: Γυάλινα σωματίδια σφαιρικού σώματος.	96
Σχήμα 75: Πρόοψη του Laser.	97

Σχήμα 76: Πλάγια όψη του laser	97
Σχήμα 77: Κάμερα CCD	98
Σχήμα 78: Μετρητικός κανόνας στο δεξί σκέλος του δοχείου	99
Figure 79: Ημιτονοειδής ταλάντωση του νερού	100
Σχήμα 80: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 1.....	103
Σχήμα 81: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 2.....	104
Σχήμα 82: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 3.....	105
Σχήμα 83: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 4.....	106
Σχήμα 84: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 5.....	107
Σχήμα 85: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 6.....	108
Σχήμα 86: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 7.....	109
Σχήμα 87: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 8.....	110
Σχήμα 88: Προφίλ Ταχύτητας $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάσεις 1-4	112
Σχήμα 89: Προφίλ Ταχύτητας $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάσεις 5-8	113
Σχήμα 90: Πεδία Στροβιλότητας $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάσεις 1-4	114
Σχήμα 91: Πεδία Στροβιλότητας $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάσεις 5-8	114
Σχήμα 92: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 1.....	115
Σχήμα 93: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 2.....	116
Σχήμα 94: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 3.....	117
Σχήμα 95: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 4.....	118
Σχήμα 96: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 5.....	119
Σχήμα 97: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 6.....	120
Σχήμα 98: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 7.....	121
Σχήμα 99: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 8.....	122
Σχήμα 100: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάσεις 1-4	123
Σχήμα 101: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάσεις 5-8	124
Σχήμα 102: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάσεις 1-4	125
Σχήμα 103: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάσεις 5-8	126
Σχήμα 104: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 1.....	127
Σχήμα 105: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 2.....	128
Σχήμα 106: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 3.....	129
Σχήμα 107: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 4.....	130
Σχήμα 108: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 5.....	131
Σχήμα 109: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 6.....	132
Σχήμα 110: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 7.....	133
Σχήμα 111: Πεδίο ροής $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάση 8.....	134
Σχήμα 112: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 1-4	135
Σχήμα 113: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 5-8	136
Σχήμα 114: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 1-4	137
Σχήμα 115: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 5-8	138
Σχήμα 116: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 1.....	139
Σχήμα 117: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 2.....	140
Σχήμα 118: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 3.....	141
Σχήμα 119: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 4.....	142
Σχήμα 120: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 5.....	143
Σχήμα 121: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 6.....	144
Σχήμα 122: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 7.....	145
Σχήμα 123: Πεδίο ροής $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάση 8.....	146
Σχήμα 124: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάσεις 1-4	147

Σχήμα 125: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάσεις 5-8	148
Σχήμα 126: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάσεις 1-4	149
Σχήμα 127: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάσεις 5-8	150
Σχήμα 128: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 1	151
Σχήμα 129: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 2	152
Σχήμα 130: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 3	153
Σχήμα 131: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 4	154
Σχήμα 132: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 5	155
Σχήμα 133: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 6	156
Σχήμα 134: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 7	157
Σχήμα 135: Πεδίο ροής $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάση 8	158
Σχήμα 136: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 1-4	159
Σχήμα 137: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 5-8	160
Σχήμα 138: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 1-4	161
Σχήμα 139: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 5-8	162

Περίληψη

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π και διάταξη πάλμωσής του με σκοπό τη μελέτη της παλλόμενης ροής γύρω από κύλινδρο ο οποίος είναι τοποθετημένος στη μέση του δοχείου. Οι μεταβλητές παράμετροι του πειράματος ήταν η περίοδος ταλάντωσης της ροής T και ο αδιάστατος αριθμός Keulegan Carpenter (KC). Τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία του πεδίου ταχυτήτων της ροής καταγράφηκαν μέσω της τεχνικής PIV σε οκτώ φάσεις της περιοδικής κίνησής της, διαπιστώνοντας την εμφάνιση δινών ανάντι και κατάντι του κυλίνδρου η παραγωγή των οποίων ταυτίζονταν με την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής.

Abstract

In this diploma thesis, an inverted Π-shaped water tank was used to study the pulsating flow around a circular cylinder located in the middle of the tank. The variable parameters in this experiment were the period of oscillation T and the nondimensional Keulegan Carpenter (KC) number. The main characteristics of the flow field were recorded through the technique PIV at eight phases of the periodic flow via phase averaging. The basic flow features were the existence of counter rotating vortices both upstream and downstream of the cylinder being generated when the flow direction changed.

Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Αναζητώντας τοποθεσίες με αιολικά στοιχεία τέτοια που να παρέχουν όσο περισσότερη συνεχή λειτουργία, αλλά και υψηλές ταχύτητες ανέμου οδηγηθήκαμε στη θάλασσα. Τέτοιες κατασκευές μπορούν να τοποθετηθούν σχετικά κοντά σε ακτές, αρκεί να απέχουν κάποια απόσταση για να μην επηρεάζουν τη φυσική βιοποικιλότητα της περιοχής. Έτσι σε μία απόσταση πέντε έως δέκα χιλιομέτρων είναι δυνατή αυτή η εφαρμογή. Τα κέρδη που αφορούν την ποιότητα της αιολικής ισχύος εδώ είναι πολλά περισσότερα από την ξηρά. Λόγω της επιφάνειας της θάλασσας οι αναταράξεις της ροής του ανέμου είναι κατά πολύ μειωμένες και ταυτόχρονα υπάρχει μία ομαλή λειτουργία του πάρκου που συμβάλλει στη μακροζωία των ανεμογεννητριών και των ηλεκτρικών στοιχείων που δέχονται λιγότερες διακοπές λειτουργίας.



Σχήμα 1 : Εφαρμογή Αιολικού Πάρκου

Το ιδιαίτερο σε μία τέτοια κατασκευή είναι η πάκτωση των πύργων των ανεμογεννητριών. Εδώ συναντάμε διάφορα εδάφη και βάθη. Συνήθως πύργοι μπορούν να πακτωθούν μέχρι τριάντα μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό γιατί πηγαίνοντας σε μεγαλύτερα βάθη τα δεδομένα αλλάζουν αλλά και το κόστος σταθεροποίησης του πύργου είναι πολύ μεγαλύτερο. Δυστυχώς ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτών των πάρκων είναι η διαδικασία διασύνδεσης τους και ένωσης τους με το δίκτυο. Όπως είναι προφανές τα καλώδια τοποθετούνται υποθαλάσσια και θάβονται κάτω από τον βυθό ώστε να προστατεύονται από το στιδήποτε. Όσον αφορά την διασύνδεση με το δίκτυο, εξαρτάται από την ισχύ και την απόσταση του πάρκου από την ξηρά και διαφέρει από κατασκευή σε κατασκευή.

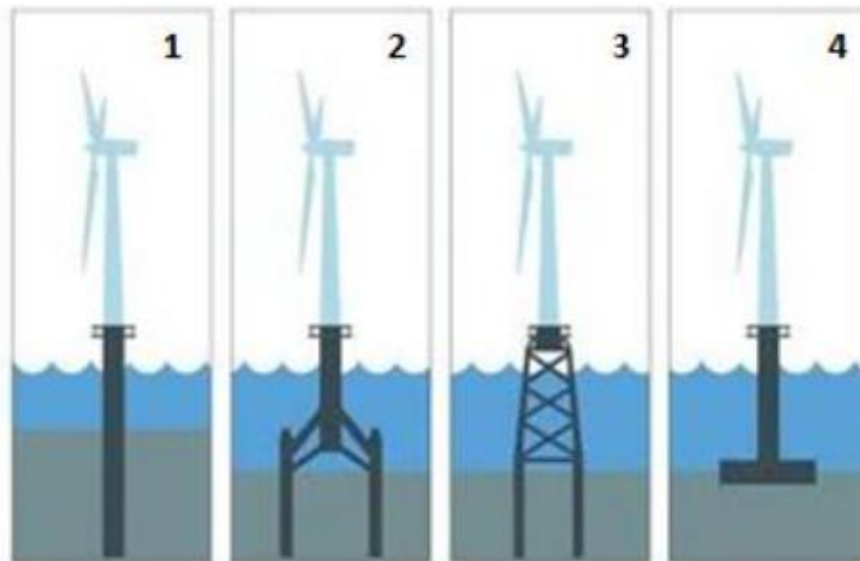
Εγκατάσταση των βάσεων των Ανεμογεννητριών στον πυθμένα

Βασικό μέλημα στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι η πάκτωση των ανεμογεννητριών στον πυθμένα των περιοχών που πρόκειται να εγκατασταθούν. Είναι μια δουλεία που απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη από πολλές πλευρές. Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετές ιδιαιτερότητες που πρέπει να ληφθούν πολύ σοβαρά υπ' όψιν για μία τέτοιου είδους μελέτη. Το κυριότερο μέλημα που ισχύει σε κάθε τέτοια κατασκευή είναι η σεισμική πρόληψη. Η χώρα χαρακτηρίζεται ως μία αρκετά σεισμογενής περιοχή και αυτό επιφέρει μία ιδιαίτερη προσοχή σε οποιαδήποτε στατική μελέτη. Ένας λόγος που κάνει πιο συγκεκριμένη μία τέτοια μελέτη είναι και οι αλλαγές του υλικού του βυθού κάθε περιοχής. Πολλές φορές αλλάζουν τα υλικά που συνθέτουν το ανάγλυφο της υποθαλάσσιας περιοχής. Αυτό μπορεί να είναι από μία πεδινή περιοχή με άμμο μέχρι σε μία βραχώδη γεμάτη πετρώματα περιοχή.

Στη συγκεκριμένη περιοχή δε, είναι πιο συγκεκριμένα τα πράγματα. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από αμμώδη βυθό μέχρι το βάθος των 40 μέτρων σε μία ακτίνα 3-4 χιλιομέτρων από την ακτή. Βέβαια η σεισμική δραστηριότητα είναι εντονότατη στην ευρύτερη περιοχή των νομών Αχαΐας και Αιτωλοακαρνανίας. Είναι γνωστό πως στο πέρασμα της γέφυρας που κατασκευάστηκε σε αυτή τη θάλασσα τα πέδιλα της κάθε κολώνας έχουν φτιαχτεί να αντέχουν σεισμούς μέχρι 9 βαθμούς της κλίμακας ρίχτερ. Επομένως κάτι αντίστοιχο θα πρέπει να ισχύει και στην μελέτη των βάσεων για το πάρκο, μιας και πρόκειται για μία αρκετά δαπανηρή και μακροχρόνια επένδυση.

Είδη Βάσεων σε Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες

Έχουν αναπτυχθεί αλλά και συνεχίζουν να δίνονται λύσεις στον τρόπο πάκτωσης μίας ανεμογεννήτριας στη θάλασσα. Ο σημαντικότερος παράγοντας είναι το βάθος της εγκατάστασης. Εδώ ποικίλουν οι λύσεις για μία τέτοια κατασκευή με διαφορετικά κόστη και χρόνο εγκατάστασης.



Σχήμα 2: Είδη βάσεων σε Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες

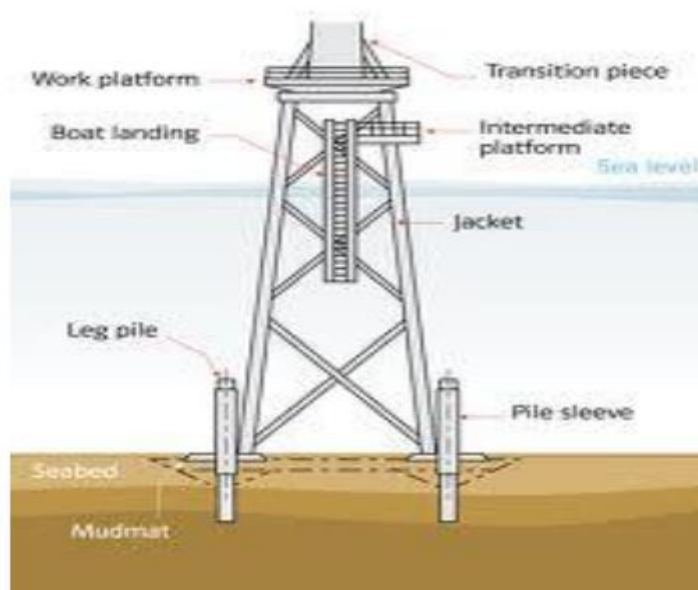
Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες και εφαρμοσμένες μέθοδοι με τις οποίες εγκαθίστανται υπεράκτια αιολικά πάρκα σε βάθη μικρότερα των 50 μέτρων. Είναι τέσσερα είδη που διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται για τελείως διαφορετικούς λόγους. Στην περίπτωση (1) της Εικόνας 2 είναι μία κολώνα που συνεχίζει υποθαλάσσια μέχρι που πακτώνεται στο βυθό σχεδόν σε βάθος όμοιο με αυτό της θάλασσας. Είναι σημαντικό εδώ να πούμε πως τέτοια εφαρμογή δεν μπορεί να γίνει σε περιοχή με βάθος πάνω από 15 μέτρα ή περιοχές με πετρώδη βυθό. Η περίπτωση (2) παρουσιάζει μία λύση με έναν τρίποδα με τσιμεντένιες βάσεις. Είναι μία λύση που εφαρμόζεται αρκετά σε εγκαταστάσεις με βαλτώδη βυθό κυρίως στη βόρεια θάλασσα, σε όλα τα βάθη μέχρι τα 40 μέτρα. Η περίπτωση (3) αποτελεί την πιο καινοτόμα λύση σε τέτοιες εγκαταστάσεις, γνωστό ως Jacket Foundation. Έρχεται από τη Σκωτία και είναι μία λύση για τα περισσότερα είδη βυθών και κυρίως για βάθη 30-50 μέτρα. Τέλος η περίπτωση (4) είναι η λύση της θεμελίωσης με ένα πέταλο τεραστίων διαστάσεων και ανάλογου βάρους. Η λύση της βαρύτητας εδώ είναι προφανής αλλά και πολύ ακριβή για βάθη άνω των 30 μέτρων (πρόκειται για την ίδια πάκτωση της γέφυρας Ρίου Αντίρριου και σε βάθος 65 μέτρων).

Σε βάθη μεγαλύτερα οι παραπάνω λύσεις δεν είναι δυνατές οικονομικά ούτε υλοποιήσιμες με τα σημερινά μέσα. Για το λόγο αυτό η τεχνολογία των εταιριών που κάνουν τέτοιες εγκαταστάσεις οδηγήθηκε στις πλωτές κατασκευές. Η λογική κατασκευής τους στηρίζονται στην άνωση που παρέχει το θαλασσινό νερό. Οι βάσεις αυτές είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να επιπλέει άνετα μία ανεμογεννήτρια με τον στύλο της συνολικού βάρους 80-100 τόνων. Για την σταθεροποίηση των βάσεων έχουν τοποθετηθεί συρματόσχοινα που δένονται σε τσιμεντένιες κατασκευές στο βυθό. Αυτά τα σχοινιά διατηρούν την βάση σε ένα συγκεκριμένο σημείο με τέτοιο τρόπο ώστε να μην

μετατοπίζεται από τις καιρικές συνθήκες, ούτε από την πίεση που ασκεί ο άνεμος στην ανεμογεννήτρια.

Jacket Foundation

Η συγκεκριμένη πρόταση αποτελεί ίσως την καλύτερη επιλογή για τα δικά μας δεδομένα. Τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι αυτά που την τοποθετούν πρώτη στη λίστα των βάσεων για ένα Ελληνικό υπεράκτιο πάρκο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος λειτουργίας μιας τέτοιας βάσης. Αποτελείται από 3 βασικά σκέλη. Το πρώτο αφορά τους τέσσερις σωλήνες όπου στηρίζεται η όλη κατασκευή. Είναι μια διαδικασία γεώτρησης του πυθμένα με σκοπό την τοποθέτηση αυτών των βεργών. Στη συνέχεια ένας κορμός σχεδιασμένος με βάση τα δικτυώματα αποτελεί την κύρια στατική κατασκευή. Το υλικό διαφοροποιείται σε δύο στρώματα. Αυτό που βρίσκεται στο νερό και αυτό που βρίσκεται πάνω από το νερό. Τέλος στην κορυφή τοποθετείται η υποδοχή της κολώνας της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3: Jacket Foundation

Τα κέρδη από την συγκεκριμένη πάκτωση είναι πολλά και πιο συγκεκριμένα :

- Αυξομειώνοντας το μήκος των σωληνών που αποτελούν την στήριξη του κύριου σώματος αλλάζει και το φορτίο. Το πλεονέκτημα αυτό κάνει την βάση αυτή εύχρηστη σε κάθε είδος και μέγεθος ανεμογεννήτριας. Μεγάλο κέρδος υπάρχει και για μελλοντικές αντικαταστάσεις.
- Η λογική του δικτυώματος επιτυγχάνει μικρότερη επιφάνεια στην θάλασσα, επομένως και μικρότερη αντίσταση στα κύματα και στα ρεύματα της

περιοχής. Έτσι έχουμε μία εγκατάσταση που καταπονείται πολύ λιγότερο από άλλες.

- Τα μεγαλύτερα στηρίγματα που βρίσκονται κάτω από τον πυθμένα προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα σε οποιαδήποτε δυναμική μεταβολή. Έτσι η κατασκευή αυτή έχει αντοχές σε σεισμούς και κακοκαιρίες πολύ μεγαλύτερες από οποιαδήποτε άλλη σύνθεση.
- Τέλος καλύπτει μεγάλη ποικιλία σε βάθη αλλά και σε πολλά διαφορετικά υλικά που υπάρχουν στον πυθμένα.

Η λύση αυτή έχει και ένα ακόμα πλεονέκτημα που κάνει πιο εύκολη την επιλογή μιας τέτοιας θεμελίωσης. Πρόκειται για την λύση με το μικρότερο κόστος ανά ανεμογεννήτρια. Συμπεριλαμβανομένων όσων αναφέρθηκαν πιο πάνω καταλήγουμε στην λύση αυτής μιας και είναι η πιο συμφέρουσα αυτή την περίοδο και για αυτό το είδος εγκατάστασης.

Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Ανεμογεννήτριες σταθερής δομής

Στήριξη ανεμογεννήτριας σε ένα μόνο πυλώνα (Monopile foundation)

Στο συγκεκριμένο είδος στήριξης υπεραράκτιας ανεμογεννήτριας είναι αναγκαίος ένας μόνο πυλώνας για την όλη στήριξη. Για αυτό το λόγο ο τελευταίος έχει αρκετά μεγάλη διάμετρο και μια άλλη απαραίτητη προϋπόθεση είναι να τοποθετηθεί κάτω από το πυθμένα της θάλασσας σε αρκετά μεγάλο βάθος. Τα βάθη τα οποία μπορεί να τοποθετηθεί μία τέτοια ανεμογεννήτρια ποικίλουν αλλά πρέπει να είναι αυστηρά ανάμεσα στα 9 εως 20m. Τέλος η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια εμφανίζει αντοχή στις φορτίσεις του αέρα, των κυμάτων και του βάρους της όλης κατασκευής.

Ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε τρεις πυλώνες (Tripod Foundation)

Όπως φαίνεται από τον τίτλο της ανεμογεννήτριας σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητοι τρεις πυλώνες-πόδια για την όλη στήριξη της κατασκευής. Οι τρεις αυτοί πυλώνες μπορούν να διεισδύσουν μέχρι και 20m βάθος κάτω από το πυθμένα της θάλασσα και η συγκεκριμένη τεχνολογία στήριξης χρησιμοποιείται για μεγάλα κυρίως βάθη.



Σχήμα 4: Εφαρμογή ανεμογεννήτριας με στήριξη σε τρεις πυλώνες.

Ανεμογεννήτρια που η δομή της στηρίζεται στη βαρύτητα (Gravity Foundation)

Σε αυτή την περίπτωση απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί μια μεγάλη βάση στήριξης. Η συγκεκριμένη βάση εξαιτίας του μεγέθους της είναι ο μοναδικός παράγοντας στήριξης και ισορροπίας ολόκληρης της κατασκευής.



Σχήμα 5: Ανεμογεννήτρια που η δομή της στηρίζεται στη βαρύτητα.

Windfloat Ανεμογεννήτριες

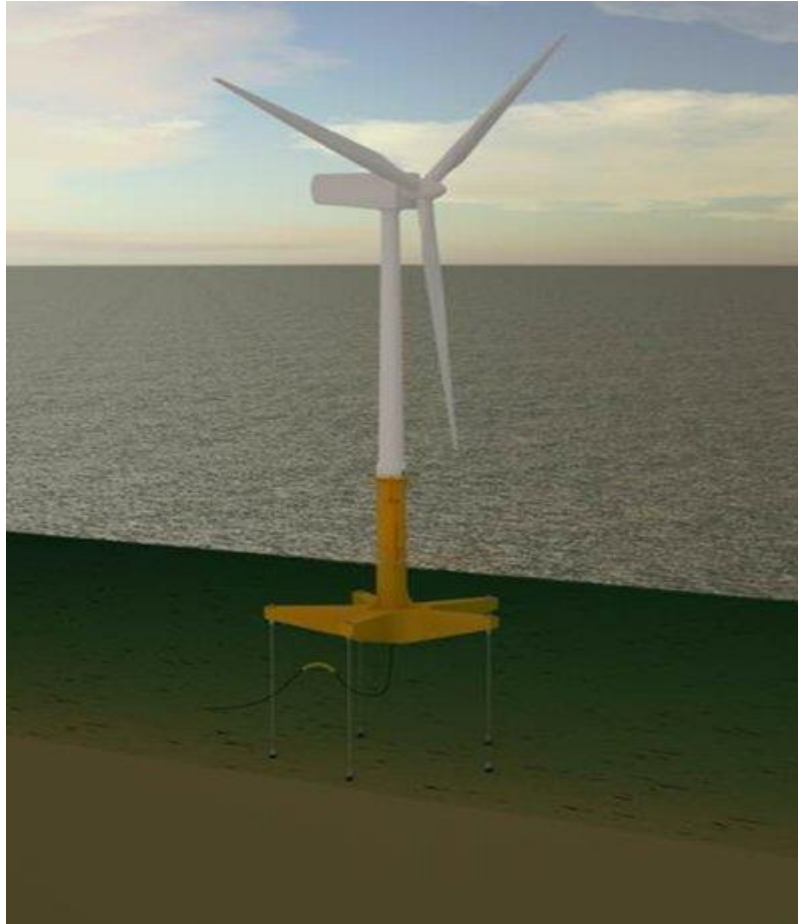
Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της ανεμογεννήτριας είναι η δυναμική ευστάθεια αυτής της ανεμογεννήτριας που οφείλεται στο σύστημα ισορροπίας που βρίσκεται στη βάση της. Το συγκεκριμένο σύστημα επιτρέπει την μεταβολή του κέντρου βάρους της κατασκευής ανάλογα με τις μεταβολές του αέρα και των αλλαγών φόρτισης επιτρέποντας έτσι στην ανεμογεννήτρια να παράγει το μέγιστο έργο της, χωρίς να επηρεάζεται από τις εκάστοτε συνθήκες. Στην windfloat ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται μια πλωτή τριγωνική βάση που αποτελείται από τρεις πυλώνες.



Σχήμα 6: Windfloat Ανεμογεννήτρια

Ανεμογεννήτριες με πόδια έντασης

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται σωληνοειδή καλώδια σαν σύστημα πρόσδεσης που λειτουργούν διεισδύοντας κάθετα το πυθμένα της θάλασσας. Τα συγκεκριμένα καλώδια χρησιμοποιούνται για ανεμογεννήτριες με ισχύ 5 έως 10 MW , βάθους 50 έως 200m. Είναι απαραίτητα ώστε η ανεμογεννήτρια να παραμένει συνεχώς ακίνητη και για αυτό τον λόγο βρίσκονται υπό τάση σε κάθε άκρη της κατασκευής.



Σχήμα 7: Ανεμογεννήτρια με πόδια έντασης.

Ανεμογεννήτρια με δομή σημαδούρας (Spar buoy)

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας τοποθετημένη πάνω σε μία κυλινδρική βάση. Η βάση αυτή της ανεμογεννήτριας έχει μεγάλη ευστάθεια εξαιτίας των αλυσίδων που χρησιμοποιεί για να αγκυροβολήσει σε βάθη πάνω από 200m. Η ευστάθεια της ανεμογεννήτριας επίσης στηρίζεται και στην κυλινδρική της βάση εξαιτίας του χαμηλού κέντρου βάρους της τελευταίας.



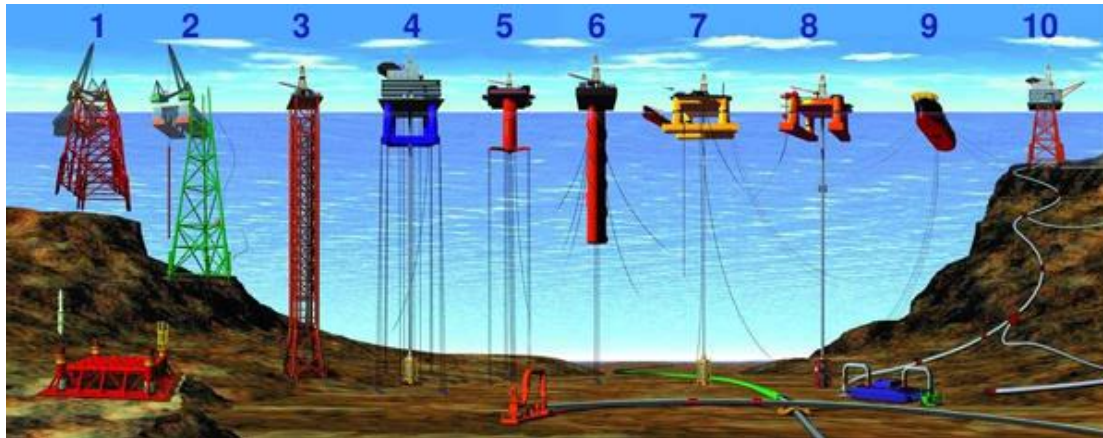
Σχήμα 8: Spar Buoy Ανεμογεννήτρια.

Πλατφόρμες εξόρυξης Πετρελαίου (Oil Platforms)



Σχήμα 9: Πλατφόρμες εξόρυξης Πετρελαίου.

Μία πλατφόρμα πετρελαίου, υπεράκτια πλατφόρμα, ή αλλιώς εξέδρα άντλησης πετρελαίου είναι μία μεγάλη δομή με εγκαταστάσεις για την διάνοιξη πηγαδιών, για την εξαγωγή και την διεργασία πετρελαίου και φυσικού αερίου, ή για την προσωρινή αποθήκευση του προϊόντος εως ότου μπορεί να μεταφερθεί στην ξηρά για διύλιση και πώληση. Σε πολλές περιπτώσεις η πλατφόρμα περιλαμβάνει και εγκαταστάσεις για να στεγάσει εργατικό δυναμικό. Ανάλογα με τις περιστάσεις η πλατφόρμα μπορεί να στερεώνεται στον πυθμένα του ωκεανού, μπορεί να αποτελείται από ένα τεχνητό νησί, ή μπορεί να επιπλέει. Απομακρυσμένα υποθαλάσσια πηγάδια μπορεί επίσης να συνδέονται σε μία πλατφόρμα με γραμμές ροής.



Σχήμα 10: 1,2)conventional fixed platforms;3)compliant tower;4,5)vertically moored tension leg and mini-tension leg platform;6)spar;7,8)semi-submersibles;9)floating production,storage,and offloading facility;10)sub-sea completion and tie-back to host facility.

Σταθερές πλατφόρμες (Fixed Platforms)

Αυτές οι πλατφόρμες είναι χτισμένες με σκυρόδεμα ή πόδια χάλυβα, ή και τα δύο, αγκυροβολημένα απευθείας στο βυθό της θάλασσας, υποστηρίζονται ένα κατάστρωμα με χώρο για εξέδρες γεώτρησης, εγκαταστάσεις παραγωγής και χώρους διαμονής του πληρώματος. Τέτοιες πλατφόρμες, λόγω της ακινησίας τους, έχουν σχεδιαστεί για μακροχρόνια χρήση.

Πλατφόρμα συμβατή με πύργους (Compliant towers)

Αυτές οι πλατφόρμες αποτελούνται από λεπτούς εύκαμπτους πύργους και ένα έργο υποστήλωσης που υποστηρίζοντας μια συμβατική γέφυρα για τις εργασίες γεώτρησης και παραγωγής. Οι συμβατοί πύργοι είναι σχεδιασμένοι για να αντέχουν σημαντικές πλευρικές εκτροπές και δυνάμεις και χρησιμοποιούνται συνήθως σε βάθη νερού που κυμαίνονται από 370 έως 910 μέτρα.

Ημι-υποβρύχια πλατφόρμα (Semi-submersible platform)

Αυτές οι πλατφόρμες έχουν κελύφη επαρκούς πλευστότητας για να κάνει την ροή να επιπλέει αλλά είναι επαρκούς βάρους για να διατηρηθεί η δομή σε όρθια θέση. Οι ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες μπορούν να μετακινηθούν από μέρος σε μέρος και μπορεί να στερεώνεται προς τα πάνω ή προς τα κάτω τροποποιώντας το ποσό των πλημμυρών στις δεξαμενές πλευστότητας. Είναι γενικά αγκυροβολημένες με συνδυασμούς αλυσίδας, συρματόσχοινο ή σχοινί από πολυεστέρα ή και τα δύο, κατά την διάτρηση ή την λειτουργία παραγωγής. Επίσης μπορούν να διατηρούνται στην θέση τους με την χρήση δυναμικής τοποθέτησης. Οι ημιυποβρύχιες πλατφόρμες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθος νερού από 60 έως 3000 μέτρα.

Jack-up εξέδρες γεώτρησης (Jack-up drilling rigs)

Οι κινητές μονάδες γεώτρησης Jack-up(ή αλλιώς jack-ups) όπως υποδηλώνει το όνομα, είναι εξέδρες που μπορούν να ανεβούν πάνω από την θάλασσα χρησιμοποιώντας πόδια που μπορούν να μειωθούν, όπως και υποδοχές. Τα MODUs (Mobile Offshore Drilling Units) ή αλλιώς Κινούμενες Μονάδες Γεώτρησης Ανοιχτής Θαλάσσης χρησιμοποιούνται συνήθως σε βάθος νερού μέχρι 120 μέτρα(390 πόδια) , αν και μερικά σχέδια μπορούν να πάνε στα 170 μέτρα βάθος. Είναι σχεδιασμένα για να κινούνται από μέρος σε μέρος και στην συνέχεια στηρίζονται από μόνες τους μέσω της ανάπτυξη ποδιών στον πυθμένα του ωκεανού.

Γεωτρύπανα (Drillships)

Ένα πλωτό γεωτρύπανο είναι ένα ναυτικό σκάφος που έχει εξοπλιστεί με συσκευές γεώτρησης. Πιο συχνά χρησιμοποιείται για δοκιμαστικές γεωτρήσεις νέων πηγαδιών πετρελαίου ή φυσικού αερίου σε βαθιά νερά. Πρώρες εκδόσεις στηρίχτηκαν πάνω σε ένα συμβατικό πετρελαιοφόρο αλλά τα ίδια σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν τότε χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Τα περισσότερα γεωτρύπανα είναι εφοδιασμένα με ένα δυναμικό σύστημα εντοπισμού θέσης ώστε να διατηρεί τη θέση πάνω από το πηγάδι. Μπορούν να διατρήσουν σε βάθος νερού μέχρι 3.700 μέτρα.

Πλωτά συστήματα παραγωγής(Floating production systems)

Οι κύριοι τύποι των πλωτών συστημάτων παραγωγής είναι FPSO (floating production, storage, and offloading system) δηλαδή πλωτής παραγωγής, αποθήκευσης και σύστημα εκφόρτωσης. Αυτές οι πλατφόρμες είναι αγκυροβολημένες σε μία θέση για μεγάλα χρονικά διαστήματα και στην πραγματικότητα δεν γίνεται διάτρηση για πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Μερικές παραλλαγές αυτών των εφαρμογών που ονομάζεται FSO (πλωτό σύστημα αποθήκευσης και εκφόρτωσης) ή FSU (πλωτή μονάδα αποθήκευσης), χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τους σκοπούς της αποθήκευσης και παραλαβής μικρού εξοπλισμού.

TLP Πλατφόρμες

Οι TLPs είναι πλωτές εξέδρες δεμένες με τον βυθό της θάλασσας κατά τέτοιο τρόπο που εξαλείφει την κατακόρυφη κίνηση της δομής. Οι TLPs χρησιμοποιούνται σε βάθος νερού μέχρι περίπου 2000 μέτρα(6000 πόδια). Η "συμβατική" TLP είναι ένα σχέδιο τεσσάρων στηλών που μοιάζει με ημι-υποβρύχια πλατφόρμα. Μικρές TLPs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σαν βοηθητικό, μέσω δορυφόρου ή πρώιμη παραγωγή πλατφόρμων για ανακαλύψεις σε μεγαλύτερα βάθη υδάτων.

GBS Πλατφόρμες

Μία GBS πλατφόρμα μπορεί να είναι είτε από χάλυβα ή σκυρόδεμα και συνήθως είναι αγκυροβολημένη απευθείας πάνω στον βυθό της θάλασσας. Χάλυβας GBS χρησιμοποιείται κυρίως όταν δεν υπάρχει καθόλου ή περιορισμένη διαθεσιμότητα γερανών για να εγκαταστήσουν μία συμβατική σταθερή υπεράκτια πλατφόρμα, όπως για παράδειγμα στην Κασπία Θάλασσα. Υπάρχουν αρκετοί χάλυβες GBS στον κόσμο σήμερα. Οι χάλυβες GBS δεν παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης υδρογονανθράκων.

Spar πλατφόρμες

Οι Spar πλατφόρμες είναι αγκυροβολημένες στον βυθό της θάλασσας, όπως οι TLPs, αλλά λαμβάνοντας υπόψη ότι μία TLP έχει κάθετα σημεία πρόσδεσης, μία Spar πλατφόρμα έχει πιο συμβατικά εξαρτήματα αγκυροβόλησης. Οι Spar πλατφόρμες μέχρι σήμερα έχουν σχεδιασθεί με τρεις διαμορφώσεις, το "συμβατικό" ενιαίο κυλινδρικό κέλυφος, το "truss spar" στο οποίο το μεσαίο τμήμα αποτελείται από στοιχεία δικτυώματος που συνδέει το ανώτερο πλωτό κέλυφος με την κάτω δεξαμενή. Η Spar πλατφόρμα έχει περισσότερο εγγενή σταθερότητα από μια TLP δεδομένου ότι έχει ένα μεγάλο αντίβαρο στο κάτω μέρος και δεν εξαρτάται από την πρόσδεση για να κρατηθεί όρθια. Επίσης έχει την δυνατότητα, με την προσαρμογή εντάσεων γραμμής πρόσδεσης, να κινείται οριζόντια και να τοποθετείται πάνω από πηγάδια σε κάποια απόσταση από την κεντρική θέση της πλατφόρμας.

Παράκτιες και υπεράκτιες εξέδρες

Πλατφόρμες με πόδια έντασης (TLP)

Αρχικά πόδι έντασης λέγεται η ομάδα των τενόντων σε κάθε γωνία της κατασκευής και αυτό γιατί οι τένοντες διατηρούνται υπό τάση εξαιτίας της άνωσης της πλατφόρμας. Μέσω των συγκεκριμένων πλατφόρμων είναι δυνατή τόσο η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου όσο και η ευκολότερη πρόσβαση σε εργασίες υποθαλάσσιων γεωτρήσεων που το βάθος τους κυμαίνεται από τα 450 έως τα 2100m. Κύριος σκοπός και σε αυτή την περίπτωση είναι η ευστάθεια του συστήματος . Για αυτό το λόγο είναι ζητούμενο η όσο το δυνατόν μηδενική μετατόπιση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας προ-έντασης που υπάρχει για να κρατάει τους τένοντες υπό τάση κάτω από όλες τις συνθήκες, ακόμα και σε κύματα με μεγάλα πλάτη.



Σχήμα 11: Πλατφόρμες με πόδια έντασης (TLP)

Ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα μπορεί να αποτελεί πλατφόρμα βαρέων γερανών, θαλάσσιων γεωτρύπανων, πλατφόρμα παραγωγής πετρελαίου ή ακόμα και εξέδρα διαμονής εργατικού προσωπικού καθώς το μεγάλο κατάστρωμα που διαθέτουν διατίθεται τόσο για χώρο εργασίας όσο και για την αποθήκευση του εξοπλισμού και των προμηθειών. Ουσιαστικά αποτελεί ένα τύπο εξειδικευμένου θαλάσσιου σκάφους, το οποίο χρησιμοποιείται για παράκτιες χρήσεις. Οι πλωτήρες που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας δίνουν την απαραίτητη άνωση για την ζητούμενη σταθερότητα των ημι-υποβρύχιων πλατφόρμων. Οι συγκεκριμένες πλατφόρμες δεν παρουσιάζουν υψηλή ευστάθεια και για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση της κατασκευής για την διατήρηση της ζητούμενης ευστάθειας. Η χρήση της συγκεκριμένης πλατφόρμας είναι δυνατή ακόμα και σε νερά με βάθος έως και 1800m και αυτό συμβαίνει γιατί αυτές οι ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες είναι μια κατασκευή της οποίας το ένα μέρος είναι βυθισμένο στο νερό και μπορεί και μεταβάλλεται καθιστώντας δυνατή τη χρήση της είτε κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας είτε σε πολύ μεγάλο βάθος μέσα στο νερό. Τέλος το κατάστρωμα της βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας προστατευμένο από τα κύματα.



Σχήμα 12: Ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες.

Αυτό-ανυψούμενη πλατφόρμα (Jack-up rig)

Το κατάστρωμα-πλωτό μέρος και τρία ή τέσσερα κινητά σκέλη(πόδια), τα όποια έχουν τη δυνατότητα να ανυψώσουν το πλωτό τμήμα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας είναι τα μέρη τα οποία αποτελείται η αυτό-ανυψούμενη εξέδρα. Και σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται η ζητούμενη ευστάθεια μέσω των ποδιών της εν λόγω πλατφόρμας τα οποία μπορούν και εισχωρούν στο ζητούμενο βάθος μέσα στην θάλασσα. Οι αυτό-ανυψούμενες πλατφόρμες χρησιμοποιούνται ευρέως ως διερευνητικές εξέδρες γεώτρησης, για την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων όπως και για την εξυπηρέτηση πλοίων που απαιτούν μια σταθερή πλατφόρμα για την ολοκλήρωση των σκοπών τους. Τέλος οι συγκεκριμένες εξέδρες είναι κινητές αλλά όχι αυτοκινούμενες καθώς για να μεταφερθούν στις επιθυμητές θέσεις χρειάζονται ρυμουλκά ή βαρέων φορτίων πλοία.



Σχήμα 13: Αυτό-ανυψούμενη πλατφόρμα (Jack-up rig).

Σταθερές πλατφόρμες (Fixed Platforms)

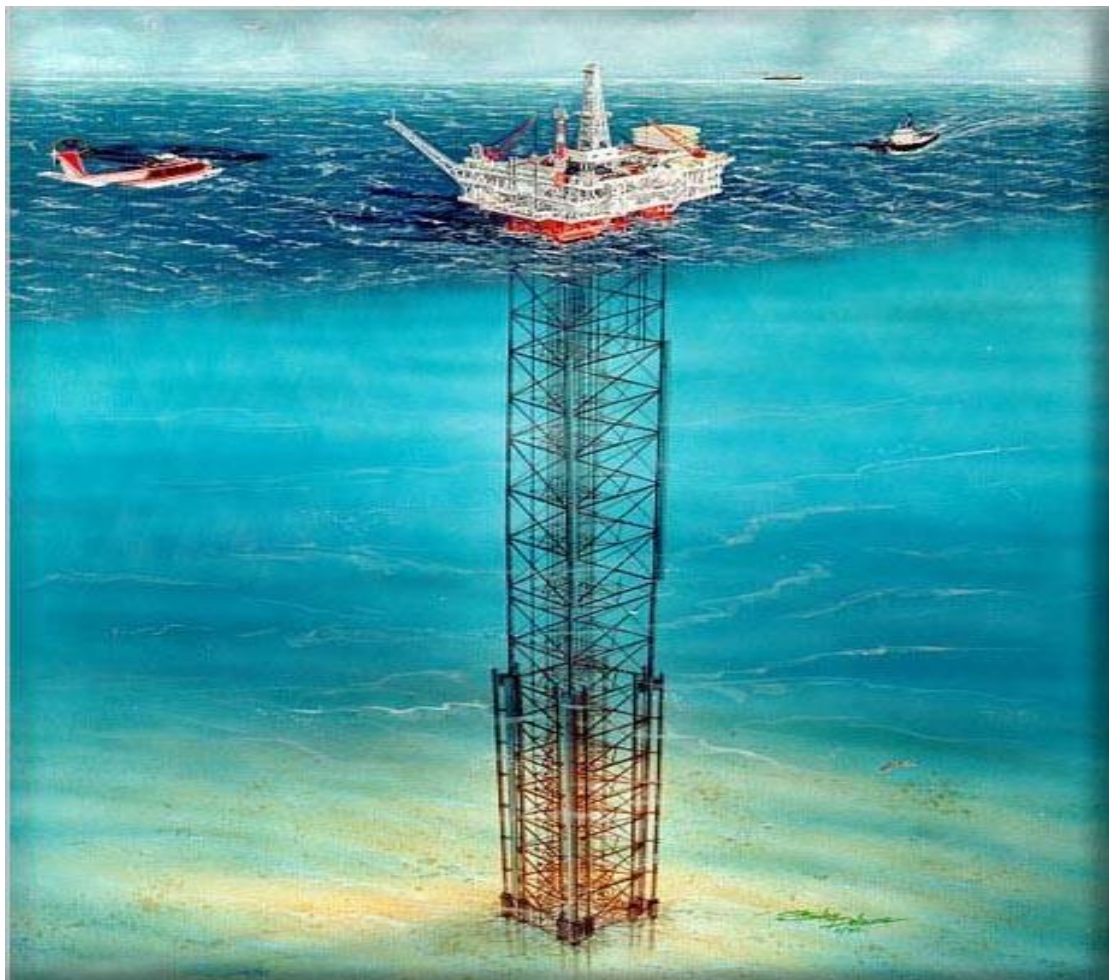
Το περίβλημα μαζί με το κατάστρωμα συνθέτουν την επιφάνεια της εγκατάστασης δηλαδή του χώρου που βρίσκονται τα θαλάσσια γεωτρήματα, οι εγκαταστάσεις παραγωγής καθώς και οι χώροι διαμονής του πληρώματος. Οι σταθερές πλατφόρμες αποτελούνται από το περίβλημα-βάση, το κατάστρωμα και το χώρο εργασίας. Εξαιτίας της ανθεκτικής κατασκευής τους μπορούν και φτάνουν σε βάθος νερού έως και 520m. Το περίβλημα στερεώνεται με βάρους και πασσάλους που διεισδύουν κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα δίνοντας έτσι σταθερότητα και αντοχή στη κατασκευή από τις φορτίσεις των θαλάσσιων ρευμάτων.



Σχήμα 14: Σταθερές πλατφόρμες (Fixed Platforms)

Συμβατός Πύργος (Compliant Tower)

Το περίβλημα το οποίο αποτελούνται οι συμβατοί πύργοι είναι χαλύβδινο σωληνωιδές καθώς επίσης αποτελείται από δυο ή περισσότερα τμήματα ανάλογα με το ύψος της κατασκευής που καθορίζεται από το βάθος του νερού στο οποίο θα τοποθετηθεί. Το περίβλημα των συμβατών πύργων, λόγω του ότι μπορεί να αποτελείται από πολλά τμήματα, έχει τη δυνατότητα να ξεπεράσει τις διαστάσεις των σταθερών πλατφόρμων και να φτάσει ακόμα και το ύψος των 920m. Επιπλέον είναι απαραίτητη η χρήση δεξαμενών αέρα που βρίσκονται στο ανώτερο τμήμα του περιβλήματος καθώς οι τελευταίοι ρυθμίζουν την άνωση ώστε να μειώσουν τις καταπονήσεις της κατασκευής εξαιτίας των κυμάτων και του αέρα. Τέλος το περίβλημα αυτό είναι ασφαλισμένο με πασσάλους, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι εκατοντάδες πόδια κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.



Σχήμα 15: Συμβατός Πύργος (Compliant Tower)

Πλωτή μονάδα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO)

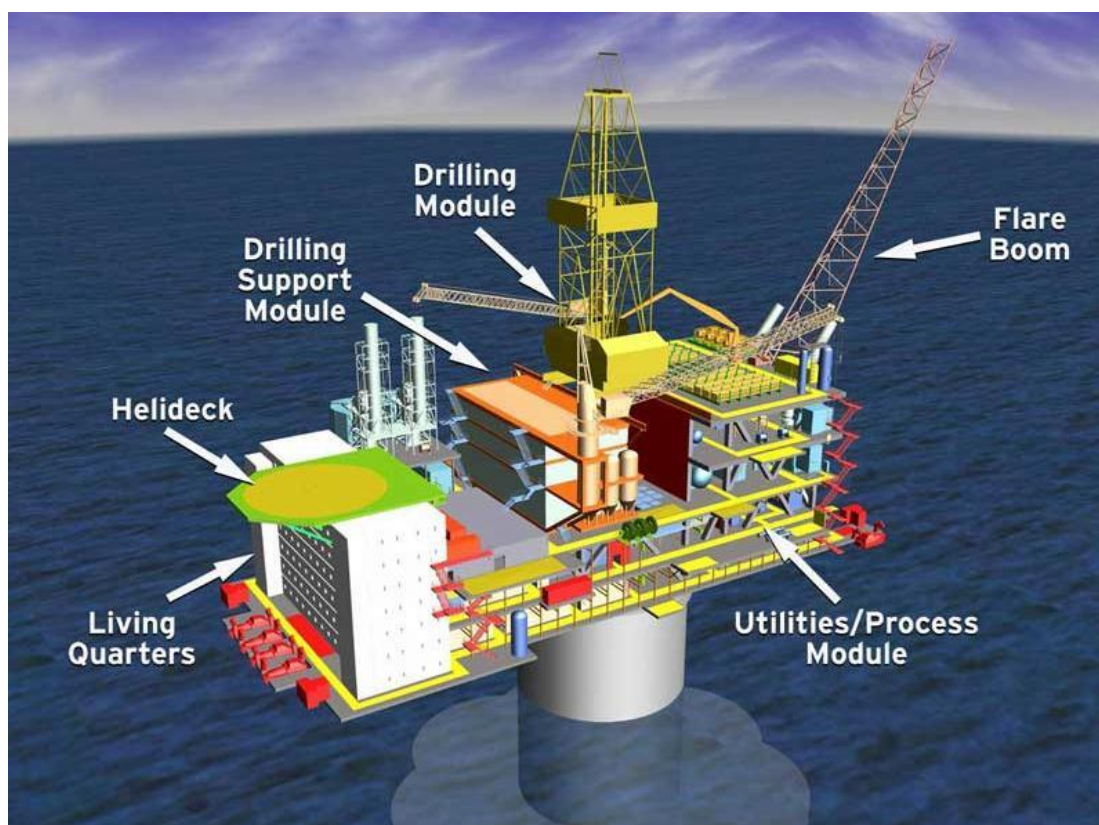
Η συγκεκριμένη πλωτή μονάδα είναι μια υπεράκτια μονάδα που χρησιμοποιεί σαν πλατφόρμα της πετρελαιοφόρα σκάφη τα οποία έχουν υποστεί μετατροπές ή σκάφη που έχουν ναυπηγηθεί για την παραγωγή, επεξεργασία, αποθήκευση και εκφόρτωση πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αυτή η πλωτή μονάδα είναι σχεδιασμένη για να φορτώνει υδρογονάνθρακες που μεταφέρονται στη FPSO από κοντινές πλατφόρμες εξόρυξης, τις οποίες επεξεργάζεται και στη συνέχεια τις αποθηκεύει μέχρι να τις εκφορτώσει σε δεξαμενόπλοια ή τις μεταφέρει μέσω υποθαλάσσιων αγωγών. Εάν τα συγκεκριμένα σκάφη δεν χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία του πετρελαίου τότε η συγκεκριμένη μονάδα ονομάζεται FSO δηλαδή πλωτή μονάδα αποθήκευσης και εκφόρτωσης σε πλοία. Η χρησιμότητα της FPSO μονάδας είναι ότι έχει τη δυνατότητα να αγκυροβολήσει μόνιμα είτε σε ρηχά είτε σε βαθύ νερά και είναι σε θέση να αντιμετωπίσει κρίσιμες περιβαλλοντικές συνθήκες.



Σχήμα 16: Πλωτή μονάδα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO)

Πλατφόρμα που η δομή της βασίζεται στη βαρύτητα (GBS)

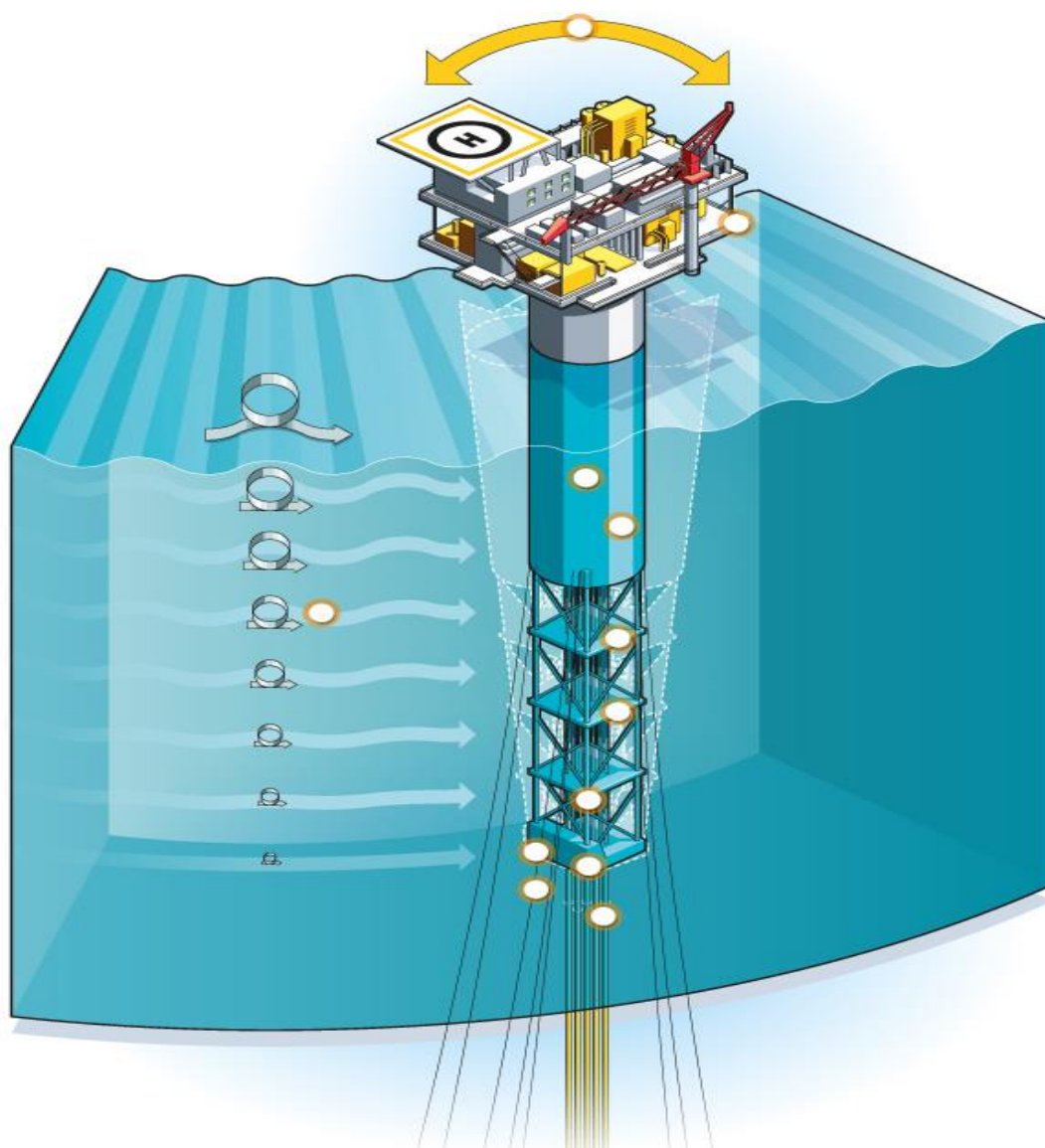
Ένας μεγάλος αριθμός κάθετων ποδιών είναι απαραίτητος για τον σχηματισμό αυτών των εξέδρων. Τα πόδια αυτά είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και ενισχυμένα εσωτερικά με χάλυβα, και από υδροστεγείς δεξαμενές με αέρα που βρίσκονται στη βάση της κατασκευής. Αυτές οι υδροστεγείς δεξαμενές είναι απαραίτητες για την άνωση της πλατφόρμας όπως επίσης και την ισορροπία της. Η GBS πλατφόρμα είναι μια υπεράκτια εξέδρα άντλησης πετρελαίου που η δομή στήριξής της βασίζεται στο μεγάλο βάρος της όλης κατασκευής. Οι συγκεκριμένες πλατφόρμες βυθίζονται ακόμα και 300m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και εξαιτίας του μεγάλου όγκου τους κατασκευάζονται αποκλειστικά στη στεριά πριν ρυμουλκηθούν.



Σχήμα 17: Πλατφόρμα που η δομή της βασίζεται στη βαρύτητα (GBS).

Πλατφόρμα με δομή σημαδούρας (Spar Platform)

Μια Spar πλατφόρμα είναι ένας κύλινδρος μεγάλης διαμέτρου, ο οποίος πλέει κάθετα στο επίπεδο της θάλασσας, έχοντας στη βάση του μια δεξαμενή με υλικό μεγαλύτερης πυκνότητας από το νερό ώστε η κατασκευή να έχει χαμηλό κέντρο βάρους και έτσι να αποκτά σταθερότητα. Οι συγκεκριμένες πλατφόρμες αγκυροβολούν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πρόσδεσης με το βυθό της θάλασσας, αλυσίδες συνδυασμένες με σύρμα ή πολυεστέρα, αποκτώντας έτσι μόνιμη θέση αλλά και ακόμη περισσότερη ευστάθεια. Οι πλατφόρμες Spar είναι πλωτές κατασκευές που χρησιμοποιούνται σε βαθιά νερά, που αγγίζουν ακόμα και τα 3000m βάθος, για την άντληση και αποθήκευση πετρελαίου όπως επίσης και για την χαρτογράφηση ωκεανών.



Σχήμα 18: Πλατφόρμα με δομή σημαδούρας (Spar Platform).

Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας (CALM)

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα παρουσιάζει αρκετά καλή πλευστότητα σε κακές καιρικές συνθήκες όπως και λειτουργικότητα διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε ρηχά όσο και σε βαθύ νερά της τάξεως των 1.000m. Μια CALM μονάδα είναι μια πλωτή σημαδούρα-πλατφόρμα που είναι αγκυροβολημένη είτε στο βυθό της θάλασσας είτε σε κάποια FPSO μονάδα, με αλυσσοειδείς τένοντες ή σορούς, και η χρήση της είναι η άντληση και η εκφόρτωση πετρελαίου.



Σχήμα 19: Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας (CALM)

Υποβρύχιοι Αγωγοί



Σχήμα 20: Τοποθέτηση Υποβρύχιου Αγωγού.



Σχήμα 21: Προσομοίωση Τοποθέτησης Υποβρύχιου Αγωγού.

Χαρακτηριστικά υποβρύχιων αγωγών

Εξωτερικά, οι θαλασσιοί αγωγοί είναι επιστρωμένοι από αντιοξειδωτικά υλικά για τη προστασία τους από τη διάβρωση και από σκυρόδεμα ή fiberglass (ενισχυμένο πλαστικό υλικό που αποτελείται από ίνες υάλου ενσωματωμένες σε μία μήτρα ρητίνης) για επιπλέον προστασία εναντίον στις τριβές. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι αγωγοί τοποθετημένοι στην επιφάνεια του βυθού της θάλασσας ή πολλές φορές και θαμμένοι σε αυτόν και χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τη μεταφορά πετρελαίου ή φυσικού αερίου από την πηγή

εξόρυξης στην μονάδα επεξεργασίας και αποθήκευσης. Τα τμήματα των αγωγών είναι ενωμένα με δυνατή συγκόλληση αλλά γίνεται και χρήση αξονικών εδράνων για την αποφυγή διαρροών. Η διάμετρος των υποβρύχιων αγωγών κυμαίνεται από 0,076:1,8m και το πάχος τους από 0,01:0,075m. Οι αγωγοί αυτοί είναι σχεδιασμένοι να μεταφέρουν ρευστά μεγάλων θερμοκρασιών και πιέσεων, και για το λόγο αυτό είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα αντοχής μέχρι και 500 MPa. Εσωτερικά οι αγωγοί όταν μεταφέρουν θαλασσινό νερό ή άλλες διαβρωτικές ουσίες είναι συνήθως επικαλυμμένοι με πολυουρεθάνη ή πολυαιθυλένιο, ενώ για τη μεταφορά πετρελαίου δεν χρειάζονται εσωτερική επίστρωση.

Παράγοντες επιλογής διαδρομής αγωγών

Η επιλογή της διαδρομής αλλά και η τοποθέτηση των αγωγών εξαρτάται από γεωλογικούς και μη κινδύνους, φυσικούς και ενίοτε και από πολιτικούς παράγοντες.

Φυσικοί παράγοντες

Ανάγλυφο βυθού

Η μορφολογική ανισότητα του εδάφους δημιουργεί το κίνδυνο σε κάποια τμήματα των αγωγών να εφαρμόζονται καμπτικές τάσεις αλλά και να φορτίζονται επιπρόσθετα από δίνες που αναπτύσσονται λόγω ρευμάτων.

Κατάσταση εδάφους βυθού

Σημαντικό για το καθορισμό της διαδρομής και της τοποθέτησης των αγωγών είναι η σκληρότητα του εδάφους. Εάν το έδαφος είναι αρκετά μαλακό τότε οι αγωγοί βυθίζονται με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η συντήρησής τους, αντίθετα εάν ο βυθός είναι αρκετά βραχώδης δηλαδή σκληρός τότε οι αγωγοί υπόκεινται σε τριβές με αποτέλεσμα να φθείρονται εξωτερικά.

Θαλάσσιες κατολισθήσεις

Οι υποβρύχιες κατολισθήσεις οφείλονται στις καθιζήσεις και εμφανίζονται σε σημεία με μεγάλη κλίση, ακόμα μπορούν να προκληθούν και από σεισμούς. Οι κατολισθήσεις επομένως μπορούν να επιφέρουν μετατοπίσεις αλλά και καταστροφή των αγωγών.

Υποθαλάσσια ρεύματα και κύματα

Εξαρτώνται από το βάθος της θάλασσας καθώς και από την γεωμορφολογία της περιοχής. Έχουν ως συνέπεια η κατασκευή και η τοποθέτηση των αγωγών να γίνεται δύσκολη καθώς και η μετασκευή ως σύνολο να μη παρουσιάζει σταθερότητα.

Μεταφορά φερτών

Αμμώδη κύματα και διάφοροι κυματισμοί δημιουργούνται και κινούνται στο βυθό, φθείροντας τους αγωγούς και μειώνοντάς έτσι το χρόνο ζωής-λειτουργίας τους.

Χαμηλές θερμοκρασίες και παγόβουνα

Οι μεταβολές θερμοκρασίας της θάλασσας έχουν ως συνέπεια τη διαστολή και τη συστολή των αγωγών, μειώνοντας με αυτό το τρόπο την αντοχή τους. Επίσης, σε κρύα νερά που υπάρχουν παγόβουνα ή το νερό μετατρέπεται σε πάγο υπάρχει ο κίνδυνος οι υποβρύχιοι αγωγοί να παρασυρθούν ή να καταστραφούν από τα τμήματα των πάγων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Ανθρώπινοι παράγοντες

Αλιευτικά πλοία

Τα σύγχρονα αλιευτικά σκάφη χρησιμοποιούν βαρέα δίχτυα, τα οποία σύρονται στο βυθό της θάλασσας προκαλώντας βλάβες στο θαλάσσιους αγωγούς.

Άγκυρες πλοίων

Αποτελούν ένα επιπλέον κίνδυνο για τους παράκτιους αγωγούς που βρίσκονται κοντά σε ξηρά και λιμάνια καθώς με το βάρος τους μπορούν να «τραυματίσουν» και να καταστρέψουν τους αγωγούς

Στρατιωτικές δραστηριότητες

Σε ορισμένες θαλάσσιες περιοχές γίνονται στρατιωτικές δόκιμες με ρίψη βλημάτων, που είναι ικανά να επιφέρουν καταστροφή των υποθαλάσσιων αγωγών.

Τοποθέτηση αγωγών

Η κατασκευή των αγωγών απαιτεί δυο βασικές διαδικασίες:

1. την συναρμολόγηση των τμημάτων του αγωγού σε έναν ενιαίο και
2. την τοποθέτησή τους κατά μήκος της επιθυμητής διαδρομής.

Η τοποθέτηση των αγωγών γίνεται με τέσσερα διαφορετικά συστήματα εγκατάστασης, τα οποία είναι τα εξής:

Pull/tow system

Ο υποβρύχιος αγωγός πρώτα συναρμολογείται και ελέγχεται στη ξηρά και στη συνέχεια ρυμουλκείται και τοποθετείται στο βυθό της θάλασσας.

Η ρυμούλκηση της όλης κατασκευής με αυτό το σύστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους.

Επιφανειακή ρυμούλκηση (surface tow)

Η κατασκευή μεταφέρεται επιπλέοντας στην επιφάνεια της θάλασσας και βυθίζεται στο επιθυμητό σημείο.

Ήμι-επιφανειακή ρυμούλκηση (semi-surface tow)

Ο αγωγός βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας αλλά κοντά σε αυτόν και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ιστών που επιπλέουν (σημαδούρες). Η συγκεκριμένη ρυμούλκηση γίνεται καθώς με αυτό το τρόπο η κίνηση των κυμάτων δεν επηρεάζει τη ρυμούλκηση.

Αλυσοειδή ρυμούλκηση (catenary tow)

Κατά την αλυσοειδή ρυμούλκηση ο αγωγός ρυμουλκείται από δυο σκάφη και βρίσκεται μέσα στη θάλασσα εξαιτίας είτε του βάρους του είτε των αλυσίδων που χρησιμοποιούνται για τη σταθερότητα του αγωγού στα θαλάσσια ρεύματα.

Βαθιά ρυμούλκηση (bottom tow)

Ο αγωγός καθώς ρυμουλκείται βρίσκεται στο πυθμένα της θάλασσας (σέρνεται), αποφεύγοντας έτσι τη δράση των κυμάτων και των θαλάσσιων ρευμάτων. Εάν η επιφάνεια του βυθού δεν είναι ομαλή τότε ο αγωγός μπορεί να εγκαταλειφθεί και να ξανά ανακτηθεί.

S-lay system

Στο S-lay σύστημα, η σύνδεση των τμημάτων της σωλήνωσης γίνεται πάνω στο σκάφος το οποίο διαθέτει το κατάλληλο εξοπλισμό. Στο σύστημα αυτό πήρε το όνομα του από το αγγλικό "S" λόγω του σχήματος που παίρνει ο αγωγός όταν εγκαταλείπεται από το πλοίο και βυθίζεται στη θάλασσα.

Ο αγωγός μπορεί να αφηθεί από τη πλώρη ή τη πρύμνη μέσω μια υποστηρικτικής κατασκευής που ονομάζεται "κεντρί", που ταυτόχρονα ελέγχει τα καμπτικά φορτία του αγωγού.

Αυτό το σύστημα κατασκευής και τοποθέτησης υποβρύχιων σωληνώσεων αν και αρκετά δαπανηρό είναι αποτελεσματικό, αξιόπιστο και ευέλικτο.

J-lay system

Σε βαθιά νερά το S-lay σύστημα δεν είναι το κατάλληλο για χρήση, αυτό συμβαίνει γιατί ο αγωγός βυθίζεται σχεδόν κάθετα εμφανίζοντας έτσι μεγάλα καμπτικά φορτία όταν έρχεται σε επαφή με το βυθό.

Αντί του S-lay χρησιμοποιείται το J-lay σύστημα, στο οποίο ο αγωγός εγκαταλείπει το σκάφος από μια κάθετη διαμορφωμένη ράμπα(ή πύργο) μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τα φορτία κάμψης της σωλήνωσης αλλά και προστατεύοντάς την από τη δράση των κυμάτων.

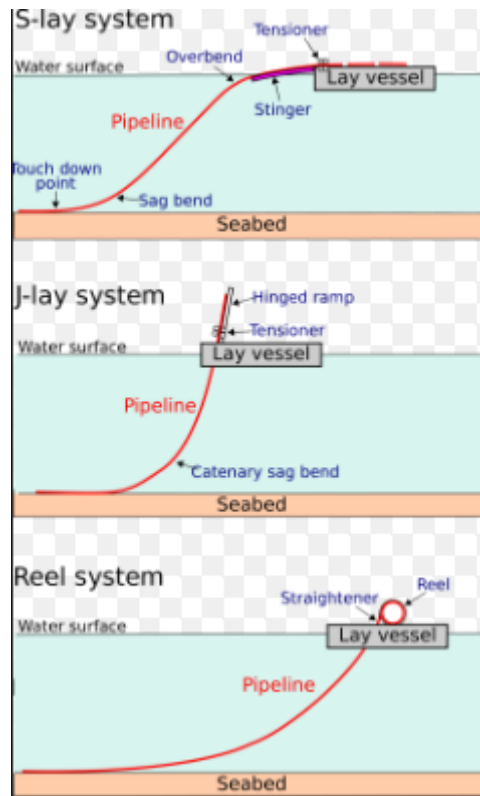
Τέλος, στο J-lay σύστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μια εργασία συγκόλλησης σε αντίθεση με το S-lay, όπου μπορεί να γίνει συγκόλληση σωλήνων σε διάφορες θέσεις του καταστρώματος.

Reel-ray system

Στο Reel-ray σύστημα, η σωλήνωση συναρμολογείται στη ξηρά και ύστερα τυλίγεται σε ένα τύμπανο μεγάλων διαστάσεων, το οποίο βρίσκεται στο σκάφος. τη συνέχεια, το σκάφος οδηγείται στη θέση τοποθέτησης και η σωλήνωση βυθίζεται-τοποθετείται στο βυθό.

Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι όλες οι εργασίες σύνδεσης της σωλήνωσης γίνονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις που δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες καθώς και ότι είναι αρκετά οικονομικές.

Παρόλ'αυτά, βασικό μειονέκτημα του Reel-lay συστήματος είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για σωληνώσεις με μικρή διάμετρο που μπορεί φτάσει μέχρι τα 400mm.



Σχήμα 22: S-lay, J-lay, Reel Systems

Καλωδιωτή γέφυρα

Η καλωδιωτή γέφυρα αποτελείται από έναν ή περισσότερους πυλώνες, στους οποίους καταλήγουν τα καλώδια που στηρίζουν το κατάστρωμα της γέφυρας.

Οι καλωδιωτές γέφυρες κατηγοριοποιούνται σε γέφυρες :

- Με παράλληλο σχεδιασμό
- Με σχεδιασμό βεντάλιας

Παράλληλος σχεδιασμός

Τα καλώδια είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους και το ύψος στερέωσής τους είναι αναλογικό της απόστασής του σημείου πρόσδεσής τους στον πύργο και της θέσης τοποθέτησής τους με το κατάστρωμα της γέφυρας.



Σχήμα 23: Παράλληλος σχεδιασμός καλωδιωτής γέφυρας.

Σχεδιασμός βεντάλιας

Τα καλώδια τερματίζουν-καταλήγουν όλα στη κορυφή των πύργων, εφαρμόζοντας έτσι μικρή ροπή στα υποστυλώματα. Για πρακτικούς λόγους όμως προτιμάται ο τροποποιημένος σχεδιασμός βεντάλιας, ένας σχεδιασμός που κάνει χρήση των στοιχείων του σχεδιασμού βεντάλιας και του παράλληλου. Κατά αυτό το σχεδιασμό, τα καλώδια καταλήγουν στο ανώτερο τμήμα των πυλώνων και είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους απέχοντας αρκετά το ένα με το άλλο.

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις καλωδιωτές γέφυρες οφείλονται στο βάρος της κατασκευής καθώς και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η δυνατή ροή του άνεμου. Οι κύριες δυνάμεις σε μια καλωδιωτή γέφυρα είναι οι τάσεις που εφαρμόζονται στα καλώδια και η συμπίεση στους μεταλλικούς ή τσιμεντένιους πυλώνες .



Σχήμα 24: Καλωδιωτή γέφυρα σε σχεδιασμό βεντάλιας.

SEA LAUNCH

Η Sea Launch είναι μια πολυεθνική υπηρεσία εκτόξευσης διαστημικών οχημάτων που χρησιμοποιείται σε κινητή θαλάσσια πλατφόρμα εκτόξευσης για ισημερινές εκτοξεύσεις των εμπορικών ωφέλιμων φορτίων σε εξειδικευμένους πυραύλους Zenit-3SL μέχρι το 2013.

Μέχρι το 2013, είχαν συναρμολογηθεί και τεθεί σε εφαρμογή τριάντα ένα πύραυλοι, με τρεις αποτυχίες και μια μερική αποτυχία. Όλα τα εμπορικά ωφέλιμα φορτία έχουν δορυφόρους επικοινωνιών που προορίζονται για την γεωστατική τροχιά μεταφοράς με τους πελάτες αυτούς όπως οι EchoStar, DirecTV, XM Satellite Radio, PanAmSat και Thuraya.

Ο εκτοξευτής και το ωφέλιμο φορτίο του συναρμολογούνται σε ένα ειδικά κατασκευασμένο πλοίο Sea Launch Commander στο Long Beach στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Στην συνέχεια τοποθετείται στην κορυφή της αυτοκινούμενης πλατφόρμας Ocean Odyssey και κινείται προς τον ισημερινό Ειρηνικό Ωκεανό για εκτόξευση, με το Sea Launch Commander να χρησιμεύει ως κέντρο διοίκησης. Το σύστημα εκτόξευσης με βάση την θάλασσα σημαίνει ότι οι πύραυλοι μπορούν να απολυθούν από την βέλτιστη θέση στην επιφάνεια της Γης, αυξάνοντας σημαντικά την ικανότητα ωφέλιμου φορτίου και μειώνοντας το κόστος εκτόξευσης σε σύγκριση με χερσαία συστήματα.

ΙΣΤΟΡΙΑ

Το Sea Launch ιδρύθηκε το 1995 ως κοινοπραξία των τεσσάρων εταιρειών από την Νορβηγία, την Ρωσία, την Ουκρανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες και διαχειρίζεται από την Boeing με συμμετοχή από άλλους μετόχους. Ο πρώτος πύραυλος ξεκίνησε τον Μάρτιο του 1999.

ΕΚΤΟΞΕΥΣΕΙΣ

Ο πρώτος δορυφόρος ξεκίνησε στις 27 Μαρτίου 1999 και ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος στις 9 Οκτωβρίου 1999. Το Sea Launch έχει εκτοξεύσει 29 ρουκέτες με 26 επιτυχίες και 1 μερική επιτυχία τον Σεπτέμβριο του 2008. Η πρώτη αποτυχία, ενός Hughes ενσωματωμένου δορυφόρου επικοινωνιών, έγινε στις 12 Μαρτίου 200 και συνέβη εξαιτίας ενός σφάλματος λογισμικού που απέτυχε να κλείσει μια βαλβίδα στο δεύτερο στάδιο του πυραύλου.

Ένας δεύτερος πύραυλος απέτυχε να ξεκινήσει στις 30 Ιανουαρίου 2007 όταν ο Zenit -3SL εξερράγη στην εξέδρα εκτόξευσης με τον δορυφόρο Boeing 702 NSS-8 επί του σκάφους, δευτερόλεπτα μετά την ανάφλεξη του κινητήρα.

Όλες οι αποστολές Sea Launch μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιήσει το ειδικά σχεδιασμένο τριών σταδίων όχημα εκτόξευσης Zenit-3SL ικανό να θέσει έως και 6000 κιλά (13000 λίβρες) ωφέλιμου φορτίου σε γεωσύγχρονη τροχιά μεταφοράς. Τα Sea Launch εξαρτήματα πυραύλων που κατασκευάζονται από SDO Yuzhnoye / PO Yuzhmash.

Οι πύραυλοι Sea Launch συναρμολογούνται στο Long Beach της Καλιφόρνια. Η τυπική διάταξη γίνεται επί του σκάφους, η συνδεσμολογία και η εντολή του πλοίου (το ωφέλιμο φορτίο ελέγχεται πρώτα, τροφοδοτείται και συμπυκνώνεται στο πλησιέστερο Payload Processing Facility). Ο πύραυλος στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα οριζόντιο υπόστεγο στην αυτοκινούμενη πλατφόρμα εκτόξευσης.

Μετά από δοκιμές πυραύλων και τα δύο πλοία πλέον πλέουν, περίπου 4.800 χιλιόμετρα (3.000 μίλια) προς τον ισημερινό σε 154 ° δυτικού γεωγραφικού μήκους, 0 ° N 154 ° Δ, στα διεθνή ύδατα περίπου 370 χιλιόμετρα (230 μίλια) από το Κιριμπάτι. Η πλατφόρμα ταξιδεύει την απόσταση σε περίπου 11 ημέρες και το πλοίο εντολής (command ship) σε περίπου οκτώ ημέρες.

Με την πλατφόρμα επικάλυψης φορτίου σε βάθος, με την έναρξη του, από 22m (72ft) , το υπόστεγο ανοίγει , ο πύραυλος κινείται μηχανικά σε κάθετη κατεύθυνση και το πλήρωμα της πλατφόρμας εκτόξευσης μετακινείται στο command ship_ το οποίο κινείται περίπου 5 χιλιόμετρα μακριά. Στη συνέχεια με την πλατφόρμα εκτόξευσης μη επανδρωμένη, ο πύραυλος τροφοδοτείται και εκτοξεύεται.

ΑΠΟΤΥΧΙΑ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ NSS-8

Στις 30 Ιουνίου 2007, ο Sea Launch Zenit-3SL πύραυλος έχοντας τον NSS-8 και 500 τόνους καυσίμου εξερράγη στην εκτόξευση.



Σχήμα 25: Περίπτωση αποτυχίας εκτόξευσης NSS-8 πυραύλου Sea Launch.

Η παραπάνω εικόνα δείχνει μία πύρινη μπάλα πολύ μεγαλύτερη από την πλατφόρμα εκτόξευσης στο επίπεδο της θάλασσας.

Επειδή η εξέδρα εκτόξευσης πυραύλων είχε εκκενωθεί από τους μηχανικούς, δεν υπήρξαν τραυματισμοί. Πιστεύεται ότι η αποτυχία προκλήθηκε από ένα εξωτερικό αντικείμενο το οποίο εισήλθε στην μηχανή, προκαλώντας την άμεση διάλυση του πυραύλου. Παρακάτω φαίνονται κάποιες περιπτώσεις αστοχίας εκτοξεύσεων.



Σχήμα 26: Εκτόξευση πυραύλου Sea Launch.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ ΕΚΤΟΞΕΥΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΙΣΗΜΕΡΙΝΟ ΩΚΕΑΝΟ

Μερικά από τα πλεονεκτήματα Ισημερινής τοποθεσίας εκτόξευσης πυραύλων είναι τα εξής:

- Η ταχύτητα περιστροφής της Γης είναι η μεγαλύτερη στον Ισημερινό, παρέχοντας μια μικρή επιπλέον "ώθηση".
- Η ανάγκη για μια "αλλαγή επιπέδου» σε μηδενικό βαθμό κλίσης γεωστατικής τροχιάς εξαλείφεται, παρέχοντας μια σημαντική επιπλέον "ώθηση". Αυτό επιτρέπει 17,5% -25% περισσότερη μάζα που θα ξεκινήσει σε γεωστατική τροχιά από τον ίδιο πύραυλο.

Μερικά τώρα από τα πλεονεκτήματα μιας συμβατικής χερσαίας πλατφόρμας εκτόξευσης βασιζόμενης στον ωκεανό είναι τα εξής:

- Μια εκτόξευση από τον ωκεανό μειώνει τους κινδύνους που σχετίζονται με τη έναρξη πάνω από κατοικημένες περιοχές, παρέχοντας καλύτερη ασφάλεια σε τρίτους.
- Απουσία σειράς συγκρούσεων με άλλα συστήματα εκτόξευσης και μια σχεδόν πλήρης απουσία πλοίου ή γενικά εναέριας κυκλοφορίας που θα περιορίσει την εκτόξευση.

Βιβλιογραφία

KEULEGAN CARPENTER

Εδώ μελετώνται οι συντελεστές αδράνειας και οπισθέλκουσας κυλίνδρων και πλακών σε απλά ημιτονοειδή ρεύματα. Οι κύλινδροι και οι πλάκες έχουν τοποθετηθεί κάθετα, τελείως βυθισμένα στο νερό και εκτείνονται από την μία πλευρά του δοχείου μέχρι την άλλη για να προσεγγιστεί όσο περισσότερο γίνεται η περίπτωση άπειρου μήκους. Ο μέσος όρος των συντελεστών αδράνειας και οπισθέλκουσας σε ένα κύκλο κύματος αλλάζει όταν η ένταση του ρεύματος και το μέγεθος των κυλίνδρων ή των πλακών αλλάζουν. Παρ' όλα αυτά οι μεταβολές αυτές μπορούν να συσχετιστούν με την περιοδική παράμετρο $U_m T/D$, όπου D η διάμετρος του κυλίνδρου ή το πλάτος της πλάκας, T η περίοδος ταλάντωσης και U_m η μέση ταχύτητα του ρευστού. Στη συνέχεια εξετάζονται οι μεταβολές των παραπάνω συντελεστών σε σχέση με τη φάση του κύματος και η σχέση του τελευταίου με τις δυνάμεις. Η ροή γύρω από τους κυλίνδρους και τις πλάκες εξετάζονται με την λήψη φωτογραφιών.

Εισαγωγή

Σε paper για την κίνηση των εκρεμμών ο Stokes έδειξε ότι η έκφραση της δύναμης σε μία σφαίρα ταλαντούμενη σε ένα ατελείωτο συνεκτικό ρευστό αποτελείται από δύο όρους, ο ένας αφορά την επιτάχυνση της σφαίρας και ο άλλος την ταχύτητα. Επιπλέον η αδράνεια που αφορά τον όρο της επιτάχυνσης είναι τροποποιημένη εξαιτίας του ιξώδους, επαυξημένη κατά την θεωρητική τιμή για τη μη περιστροφική κίνηση. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D που συσχετίζεται με τον όρο της ταχύτητας είναι τροποποιημένος εξαιτίας της επιτάχυνσης και η αξία του είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι αν η σφαίρα κινούνταν με σταθερή ταχύτητα. Σύμφωνα με την έρευνα του Stokes, οι δυνάμεις σε μία σφαίρα κινούμενη σε συνεκτική ροή με αυθαίρετο τρόπο ερευνήθηκαν από τους Boussinesq και Basset[2,3]. Αυτοί βρήκαν ότι η δύναμη που δέχεται μία σφαίρα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή εξαρτάται γενικά από ο την επιτάχυνση καθώς και την στιγμιαία ταχύτητα της. Για παράδειγμα, αν μία σφαίρα επιταχυνθεί με σταθερή επιτάχυνση από μία θέση ηρεμίας σε μια πεπερασμένη ταχύτητα και μετά παραμείνει σταθερή σε αυτή την ταχύτητα, η δύναμη κατά την διάρκεια της αρχικής εμφάνισης της ομοιόμορφης ταχύτητας διαφέρει από τη δύναμη τις τελευταίες στιγμές.

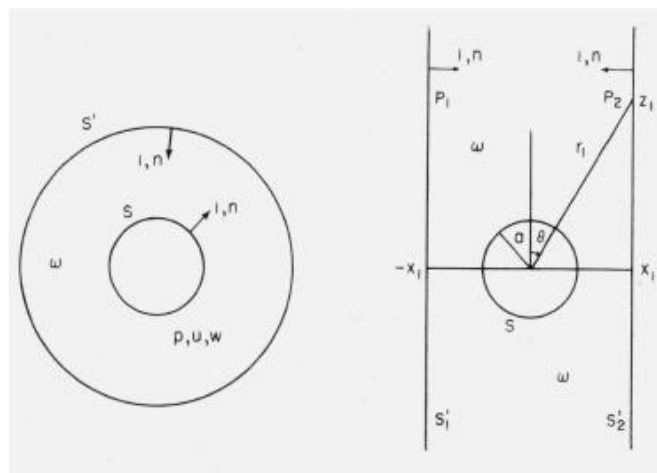
Δυνάμεις ρευστού ενός σώματος σε ηρεμία μέσα σε κινούμενο υγρό

Θα ήταν κατατοπιστικό εάν σκεφτόμασταν τις εξισώσεις ορμής που αναφέρθηκαν από τον Murnaghan για να βρούμε τη δύναμη που δέχεται ένα σώμα βυθισμένο μέσα σε μη συνεκτικό ρευστό. Η μέθοδός μας όμως είναι πιο γενική και ισχύει και για συνεκτικά ρευστά.

Σκεφτόμενοι την περίπτωση μιας διδιάστατης ροής με x οριζόντιο και z κάθετο άξονα. Η εξίσωση κίνησης στον x άξονα είναι:

Η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης είναι:

όπου u_1, u_2 οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας και p_1, p_2 οι πιέσεις στα σημεία P_1, P_2 αντίστοιχα.



Σχήμα 27: Περίπτωση διδιάστατης ροής.

Η παρακάτω εξίσωση χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την δύναμη σε έναν κυκλικό κύλινδρο όπου η κίνηση είναι αστρόβιλη.

Στη συνέχεια, αν υποθέσουμε ότι η αδιατάρακτη ταχύτητα είναι σταθερή, το σώμα υφίσταται οπισθέλκουσα, το ρευστό εκτείνεται στο άπειρο και αγνοώντας τις μεταβολές πίεσης από τις εκλυόμενες δίνες ή, ακριβέστερα, υποθέτοντας ότι οι επιφάνειες S'_1 και S'_2 βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τον κύλινδρο, $p_1=p_2$ τελικά έχουμε:

Όπου,

$$C_d = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} (1 - m^2) d \frac{z_1}{D}$$

και η παράμετρος m εξαρτάται απ' το z_1/D και τον αριθμό Reynolds UD/ν .

Χαρακτηριστικά των πειραματικών κυμάτων

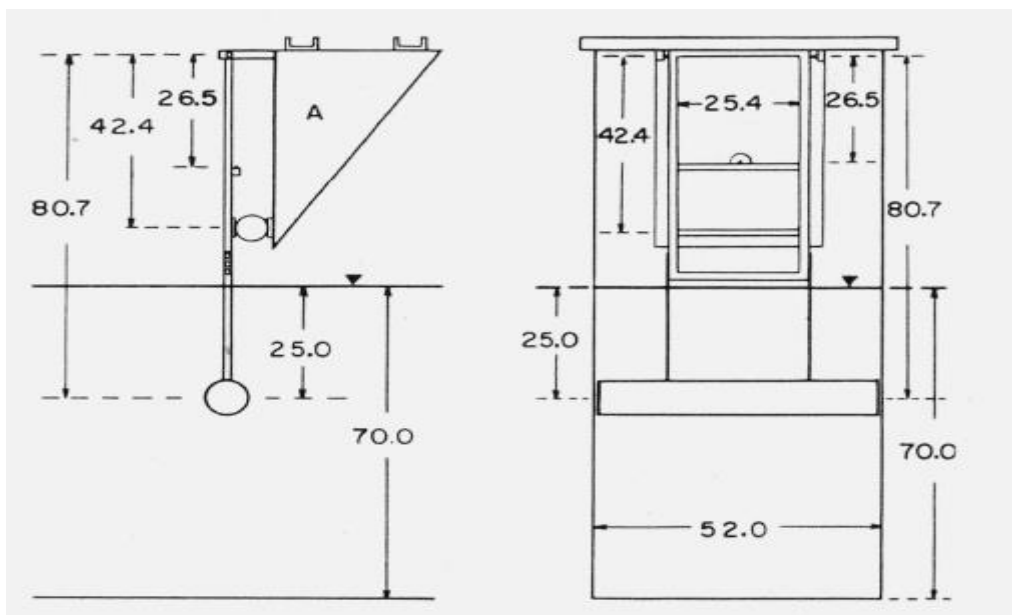
Αν πάρουμε τον x -άξονα παράλληλο στην επιφάνεια του αδιατάρακτου νερού, τον z -άξονα κάθετο και προς τα επάνω και την αρχή των αξόνων στη μία άκρη της λεκάνης, η ανύψωση της επιφάνειας σε σχέση με τη στάθμη του αδιατάρακτου νερού, σύμφωνα με τη δεύτερης τάξης προσεγγιστική θεωρία του Miche είναι:

Με

και

όπου $k=\pi/L$, L – το μήκος της δεξαμενής, $\sigma=2\pi/T$, T – η περίοδος της ταλάντωσης, H – το βάθος του νερού, και α – το ύψος ημικύματος. Το μήκος της δεξαμενής είναι $L=242$ m και το βάθος του νερού $H=70$ cm. Οι κύλινδροι και οι πλάκες τοποθετούνται 25 cm κάτω από την επιφάνεια του νερού.

Δυναμόμετρο

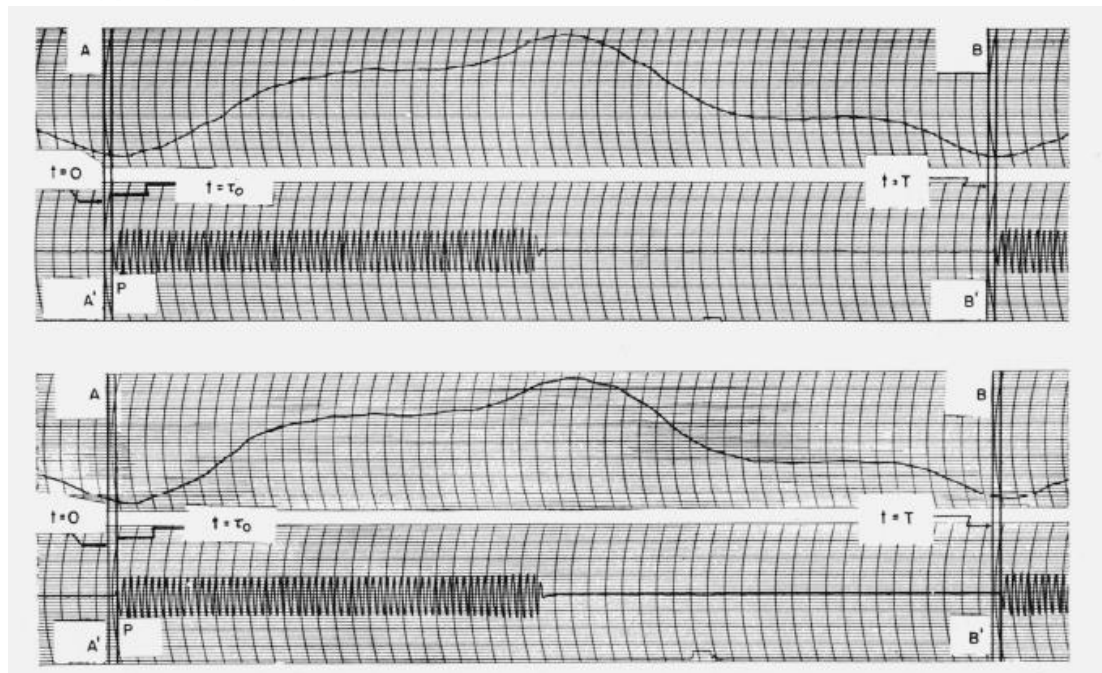


Σχήμα 28: Διάταξη δυναμόμετρου με τα μεγέθη μετρούμενα σε centimetres.

Η άκαμπτη και ογκώδης βάση στήριξης A είναι σταθερά συνδεδεμένη με το ατσάλινο πλαίσιο της δεξαμενής ακριβώς πάνω από το νερό. Το ίδιο το δυναμόμετρο αποτελείται από ένα πλαίσιο στο οποίο είναι τοποθετείται το αντικείμενο που βυθίζεται στο νερό, κύλινδρος ή ορθογώνια πλάκα. Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από ορειχάλκινες γωνίες και είναι αρκετά δυνατό ώστε να ανθίσταται σε καμπτική και στρεπτική παραμόρφωση. Δύο δακτύλιου ορθογώνιας διατομής συνδέουν τη βάση με το πλαίσιο.

Με τη βοήθεια των δακτυλίων αυτών γίνεται η μέτρηση των δυνάμεων. Δύο ζεύγη strain gauges (SR-4, 120 Ω) έχουν επικολληθεί σε κάθε δακτύλιο (εσωτερικά και εξωτερικά) σε διαμετρικά αντίθετα σημεία. Τα 4 αυτά strain gauges σχηματίζουν γέφυρα που συνδέεται με αναλυτή, που με τη σειρά του στέλνει τα δεδομένα σε μαγνητικό παλμογράφο 2 καναλιών. Παρόμοια διάταξη υπάρχει στον άλλον δακτύλιο.

Καταγραφή δυνάμεων



Σχήμα 29: Παράδειγμα καταγραφής μέσω παλμογράφου των δυνάμεων σε κάθε δακτύλιο καθώς και του χρονισμού

Συντελεστές αδράνειας και οπισθέλκουσας κυλίνδρων και πλακών

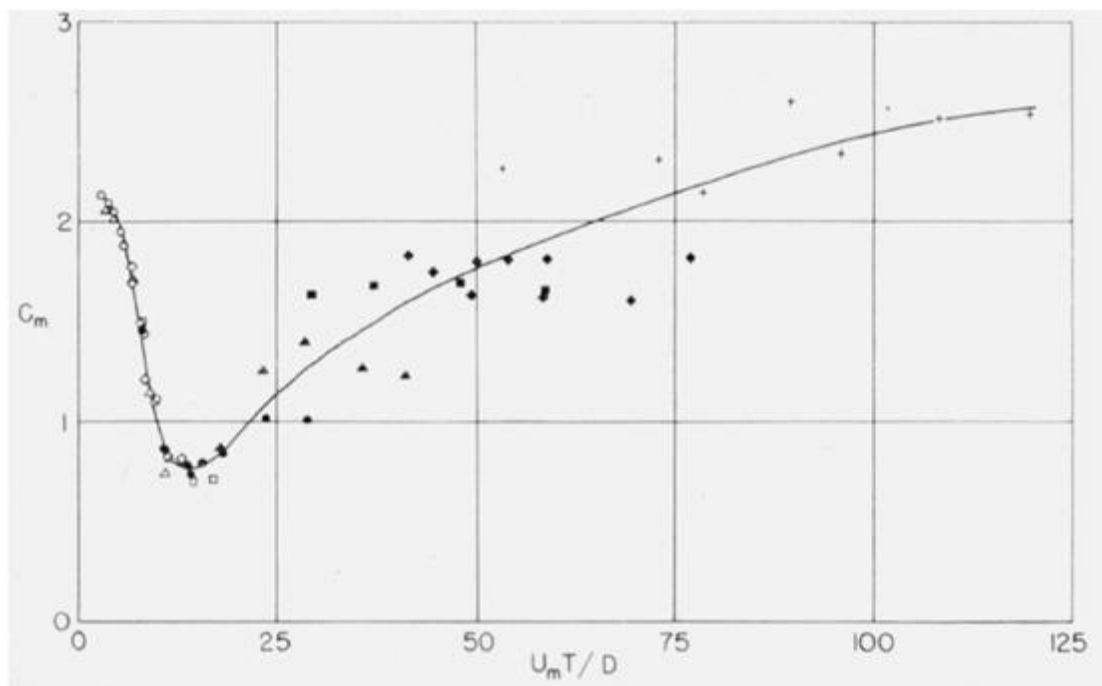
Run	C_m	C_d	$U_m T/D$	$U_m D/\nu$	Run	C_m	C_d	$U_m T/D$	$U_m D/\nu$
1	1.11	1.24	9.9	293×10^2	30	1.99	1.09	58.6	227×10^2
2	1.44	1.14	8.2	239	31	1.29	1.29	47.9	185
3	1.32	1.32	7.6	225	32	1.68	1.40	37.0	143
4	1.79	1.13	6.7	196	33	1.64	1.46	29.4	114
5	1.88	1.00	5.7	169	34	1.82	1.19	77.0	167
6	1.95	0.91	5.2	152	35	1.61	1.19	69.5	151
7	2.05	1.23	4.3	125	36	1.63	1.42	58.3	127
8	2.19	1.01	3.6	106	37	1.64	1.45	49.3	107
9	2.14	0.70	2.7	81	38	1.84	1.50	41.5	86
10	0.74	1.69	10.8	229	39	2.54	1.07	119.9	110
11	1.14	1.61	8.9	189	40	2.35	1.29	95.8	99
12	1.71	1.36	6.8	143	41	2.15	1.42	78.5	70
13	2.02	1.15	4.3	99	78	0.82	1.99	12.9	127
14	2.06	1.12	3.4	71	79	0.84	2.08	11.2	111
15	0.72	1.73	17.0	230	80	1.41	2.06	8.3	82
16	0.70	1.98	14.5	196	81	1.78	1.75	6.7	67
17	0.83	2.18	11.2	152	82	0.80	2.05	15.5	109
18	1.50	1.80	7.8	108	83	0.78	2.28	13.7	96
19	1.10	1.97	5.6	132	84	0.87	2.30	11.0	77
20	1.02	1.30	29.0	231	85	1.46	2.18	7.9	59
21	1.02	1.49	23.6	188	86	2.52	1.18	108.4	85
22	0.85	1.75	18.2	145	87	2.60	1.31	89.5	71
23	0.74	2.15	14.0	112	88	2.32	1.43	72.9	57
24	0.87	2.21	10.6	84	89	2.26	1.54	53.2	42
25	1.24	1.15	41.1	218	90	1.82	1.28	58.8	83
26	1.27	1.23	35.6	206	91	1.81	1.38	54.0	76
27	1.40	1.46	28.6	152	92	1.81	1.42	50.1	71
28	1.29	1.52	23.3	128	93	1.76	1.54	44.7	63
29	0.87	1.75	17.7	105					

Σχήμα 30: Συντελεστές αδράνειας C_m και οπισθέλκουσας C_d των κυλίνδρων.

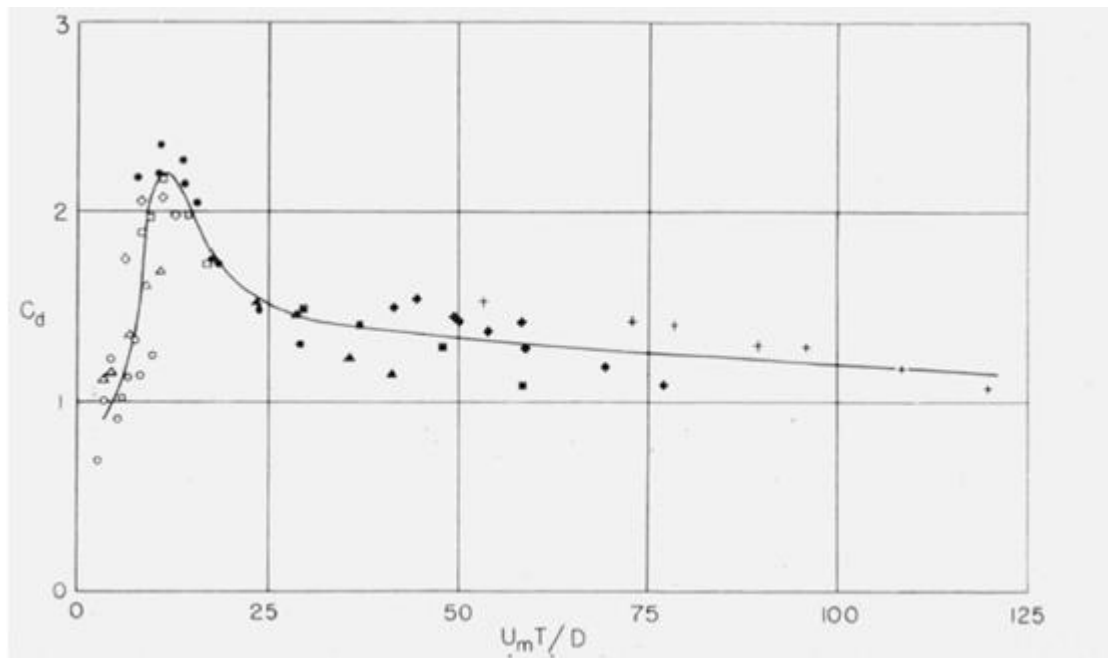
Run	C_m	C_d	$U_m T/D$	$U_m D/\nu$	Run	C_m	C_d	$U_m T/D$	$U_m D/\nu$
42	1.94	8.75	3.8	114×10^6	60	2.51	5.15	7.5	28×10^6
43	1.74	8.81	3.5	103	61	2.14	3.25	24.2	142
44	1.56	9.76	2.7	80	62	1.07	3.94	19.3	113
45	1.51	10.21	2.2	65	63	1.43	4.09	14.3	84
46	1.35	11.55	1.7	52	64	2.25	4.43	10.5	62
47	2.28	5.50	6.1	128	65	2.45	3.13	33.6	131
48	2.12	7.06	5.2	109	66	2.10	3.55	28.2	110
49	2.00	8.01	4.2	90	67	2.01	3.68	22.4	87
50	1.91	8.64	3.4	71	68	1.56	4.38	15.4	60
51	1.57	11.44	2.1	45	69	3.17	2.43	62.2	128
52	2.22	5.51	8.8	128	70	2.88	2.86	51.2	113
53	2.44	5.48	7.7	112	71	2.89	3.06	41.1	91
54	2.42	6.31	6.6	95	72	2.71	3.36	29.9	66
55	2.17	7.25	5.3	77	73	4.96	1.81	118.2	114
56	2.10	8.04	4.1	59	74	4.00	2.03	104.0	101
57	0.95	4.11	16.3	127	75	4.00	2.32	88.3	85
58	1.07	4.28	13.6	106	76	3.58	2.45	74.0	72
59	2.08	4.61	10.3	80	77	3.70	2.59	58.6	57

Σχήμα 31: Συντελεστές αδράνειας C_m και οπισθέλκουσας C_d των πλακών.

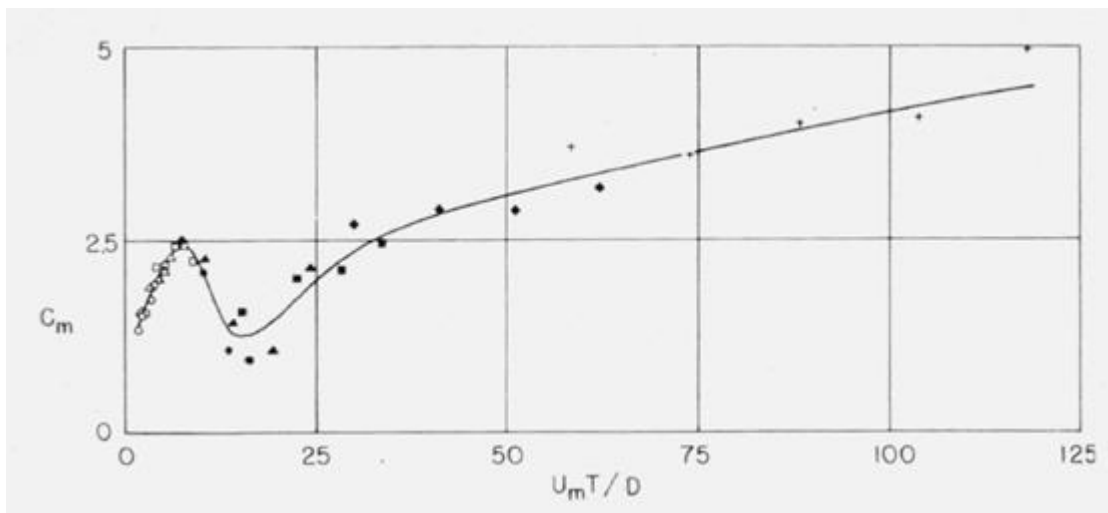
Αυτοί οι πίνακες περιέχουν επίσης τον αριθμό Reynolds, $U_m D/\nu$ και την περιοδική παράμετρο $U_m T/D$. Ο συντελεστής αδράνειας C_m αποκλίνει από την θεωρητική τιμή 2 όταν αλλάζει η διάμετρος του κυλίνδρου ή για δεδομένο κύλινδρο όταν η μέγιστη ταχύτητα ροής μεταβάλλεται. Παρόμοιες μεταβολές συμβαίνουν στο συντελεστή οπισθέλκουσας C_d . Συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών και του αριθμού Reynolds $U_m D/\nu$ δεν φαίνεται να υπάρχει. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται σαφής και σταθερή συσχέτισή τους με την περιοδική παράμετρο $U_m T/D$.



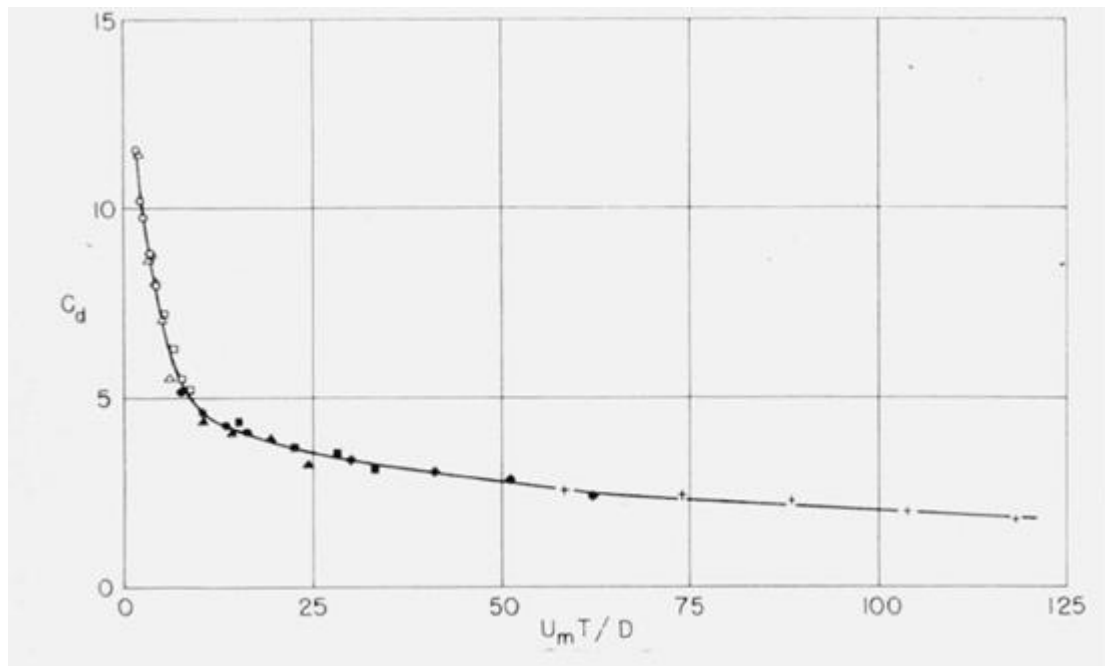
Σχήμα 32: Μεταβολή των συντελεστών αδράνειας των κυλίνδρων.



Σχήμα 33: Μεταβολή των συντελεστών οπισθέλκουσας των κυλίνδρων.



Σχήμα 34: Μεταβολή των συντελεστών αδράνειας των πλακών.



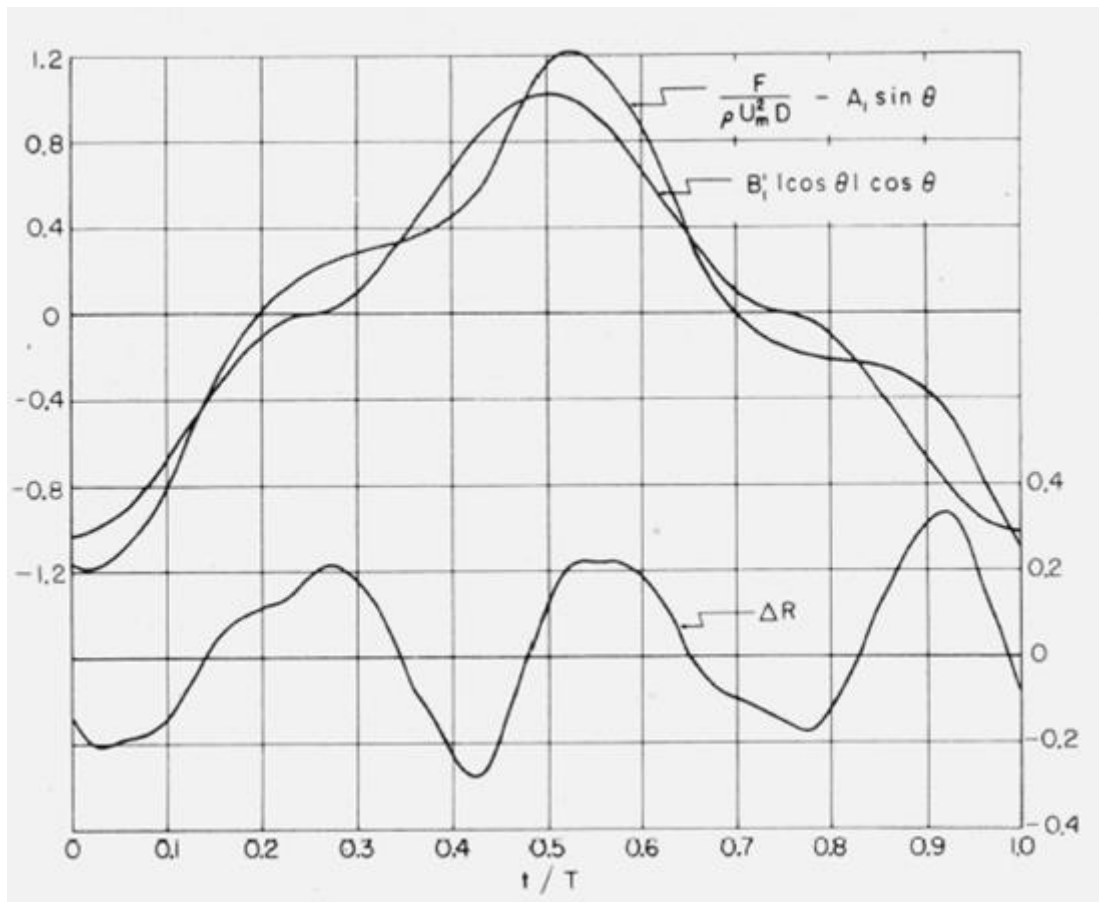
Σχήμα 35: Μεταβολή των συντελεστών οπισθέλκουσας των πλακών.

Για τους κυλίνδρους, καθώς περνάμε από τις μικρές τιμές της περιοδικής παραμέτρου σε μεγαλύτερες, ο συντελεστής αδράνειας τείνει να πέσει από την αρχική τιμή 2 στην ελάχιστη τιμή του ενός (1.00) για $U_m T/D=15$ και σταδιακά αυξάνεται μέχρι την τιμή 2.5 για $U_m T/D=120$. Όσον αφορά το συντελεστή οπισθέλκουσας, υπάρχει μία αύξηση από την αρχική τιμή 0.9 στη μέγιστη τιμή 2.5 για $U_m T/D=15$ και έπειτα μία σταδιακή μείωση στην τιμή της σταθερής ροής. Φαίνεται ότι για τους κυλίνδρους η στενή περιοχή γύρω από την τιμή $U_m T/D=15$ είναι και η κρίσιμη.

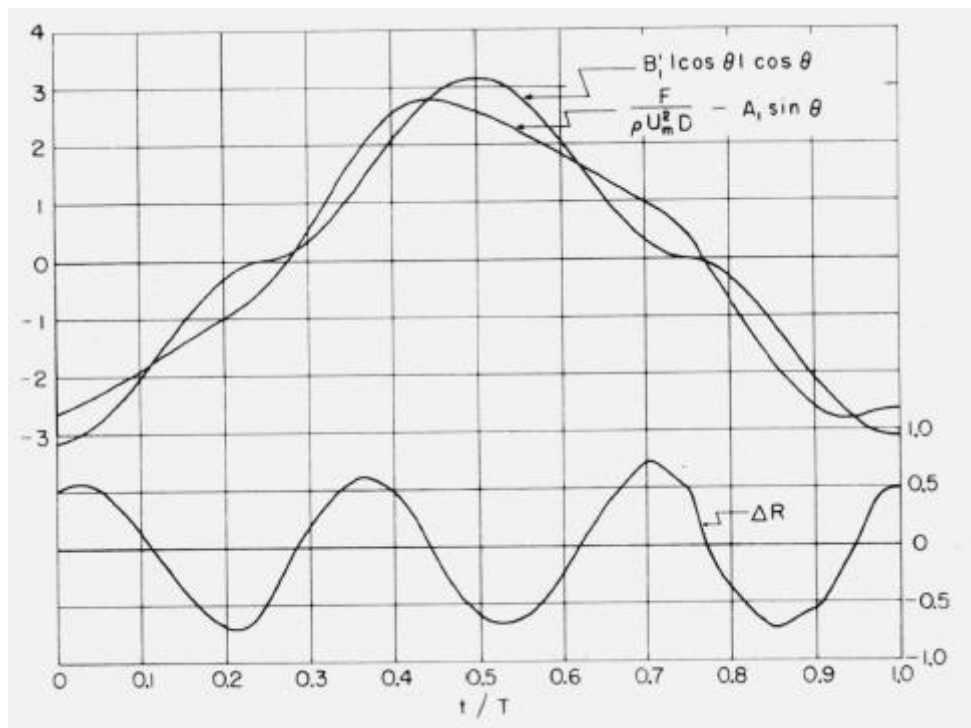
Όσον αφορά τις πλάκες, οι μεταβολές των C_m και C_d με την περιοδική παράμετρο είναι τελείως διαφορετικές. Ο C_m πρώτα αυξάνεται, έπειτα μειώνεται και τελικά αυξάνεται ξανά μέχρι μία τιμή κοντά στο 4.5. Η πιο αξιοσημείωτη συμπεριφορά παρ' όλα αυτά αφορά τον C_d . Ο συντελεστής της οπισθέλκουσας ξεκινάει με μία ασυνήθιστα μεγάλη τιμή (10), μειώνεται γρήγορα αρχικά και μετά αργά για αυξανόμενη περιοδική παράμετρο. Η τελική τιμή είναι σχεδόν ίδια με αυτή που βρέθηκε για σταθερή ροή. Επειδή ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι μεγάλος όταν η περιοδική παράμετρος είναι μικρή και οι μεταβολές του C_m είναι μέτριες, οι δυνάμεις των κυμάτων στις πλάκες οφείλονται κυρίως στην οπισθέλκουσα και η επίδραση της αδράνειας παίζει μικρό ρόλο, σχεδόν ανεξάρτητο απ' την περιοδική παράμετρο.

Μεταβολές του Remainder Function και των C_m και C_d κατά την διάρκεια ενός κύκλου κύματος

Οι τιμές των C_m και C_d που δίνονται στους πίνακες 3, 4 είναι ο μέσος όρος των τιμών για ολόκληρο τον κύκλο του κύματος και σε κάποιες περιπτώσεις οι τοπικές τιμές μπορεί να διαφέρουν από το μέσο όρο. Οι μεταβολές αυτές (ΔR -Remainder Function) για τους C_m και C_d φαίνονται στα Σχήματα 14, 15.



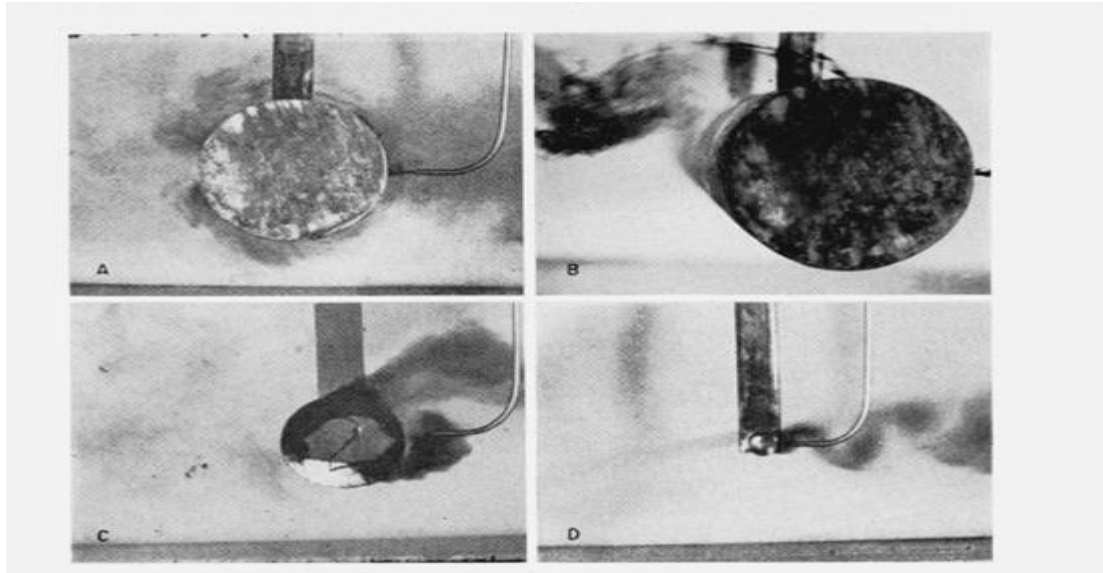
Σχήμα 36: Υπολογισμός της δύναμης ΔR για ένα κύλινδρο ($UmT/D=15.6$)



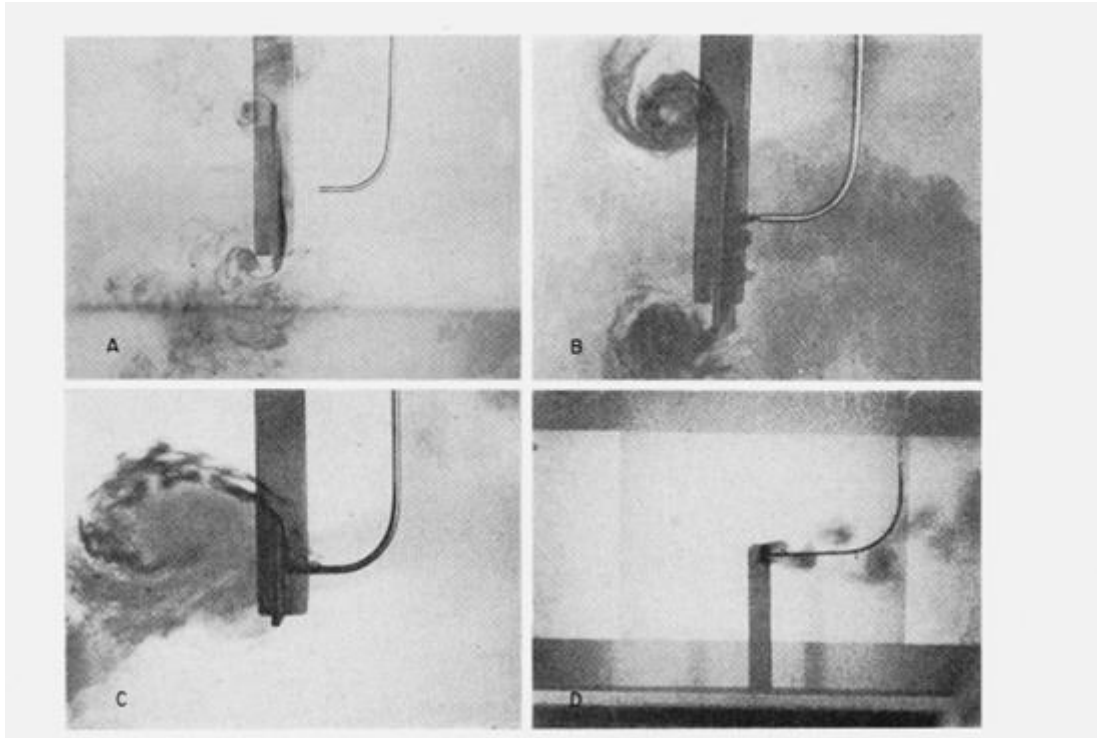
Σχήμα 37: Υπολογισμός της δύναμης ΔR για μία πλάκα ($UmT/D=6.6$).

Μορφή της ροής γύρω από κυλίνδρους και πλάκες

Εξετάζουμε τώρα τα πεδία ροής γύρω από κυλίνδρους και πλάκες για ποικίλες τιμές του $U_m T/D$. Αυτό γίνεται οπτικά, εισάγοντας χρωματιστό υγρό από τη μία πλευρά του εκάστοτε δοκιμίου. Η κίνηση καταγράφεται από μία σταθερή κάμερα. Κάποιες από αυτές τις εικόνες φαίνονται στα σχήματα 29 και 30.



Σχήμα 38: Μοτίβα ροής γύρω από κυλίνδρους (A) $D=3\text{in}$, $U_m T/D=4$; (B) $D=3\text{in}$, $U_m T/D=10$;



Σχήμα 39: Μοτίβα ροής γύρω από κυλίνδρους (A) $D=3\text{in}, U_m T/D=1$; (B) $D=3\text{in}, U_m T/D=4$;

Μέγιστη δύναμη κατά την διάρκεια ενός κύκλου κύματος

Σε μηχανικές εφαρμογές το κύριο ενδιαφέρον είναι στο μέγεθος της μέγιστης δύναμης κατά την διάρκεια ενός κύκλου κύματος. Εάν η remainder function ΔR είναι αμελητέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος $F/\rho U_m^2 D = A_1 \sin \theta + B_1' \cos \theta \text{Icos} \theta$ για τον υπολογισμό της μέγιστης δύναμης F_m , καθώς και της φάσης της. Εάν η μέγιστη δύναμη $F_m/\rho U_m^2 D$ εμφανίζεται για $\theta = \theta_m$, η φάση μπορεί να οριστεί ως:

$$\Phi = \pi - \theta_m,$$

Η μέγιστη θεωρητική τιμή της δύναμης είναι

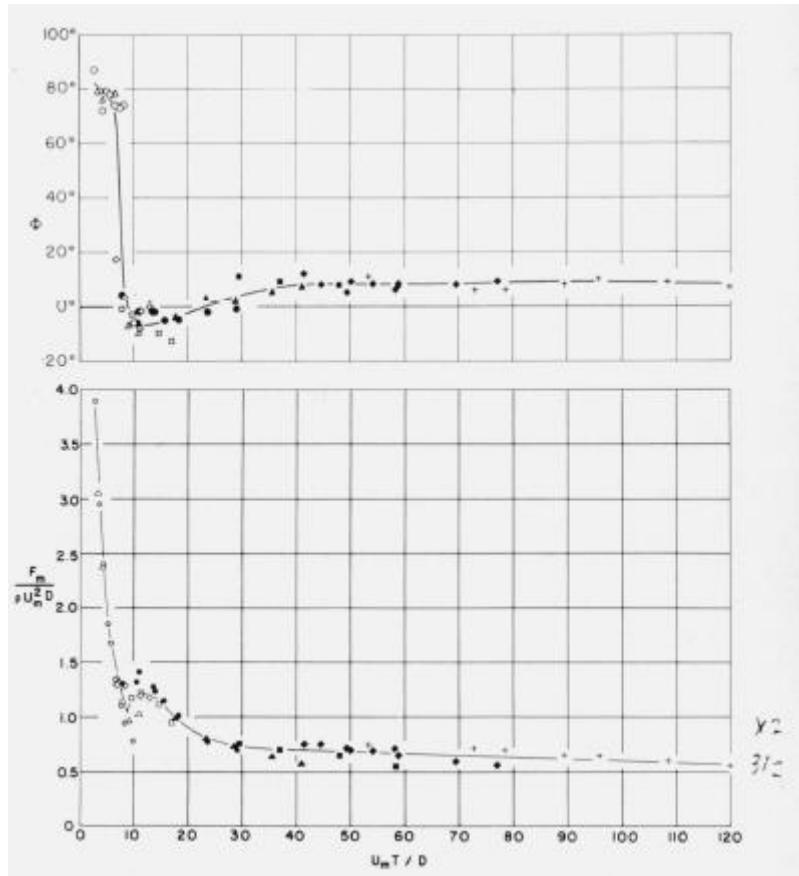
$$F_m/(\rho U_m^2 D) = A_1 \sin \theta_m + B_1' \text{Icos} \theta_m \text{Icos} \theta_m,$$

όπου η θ_m ικανοποιεί τη σχέση

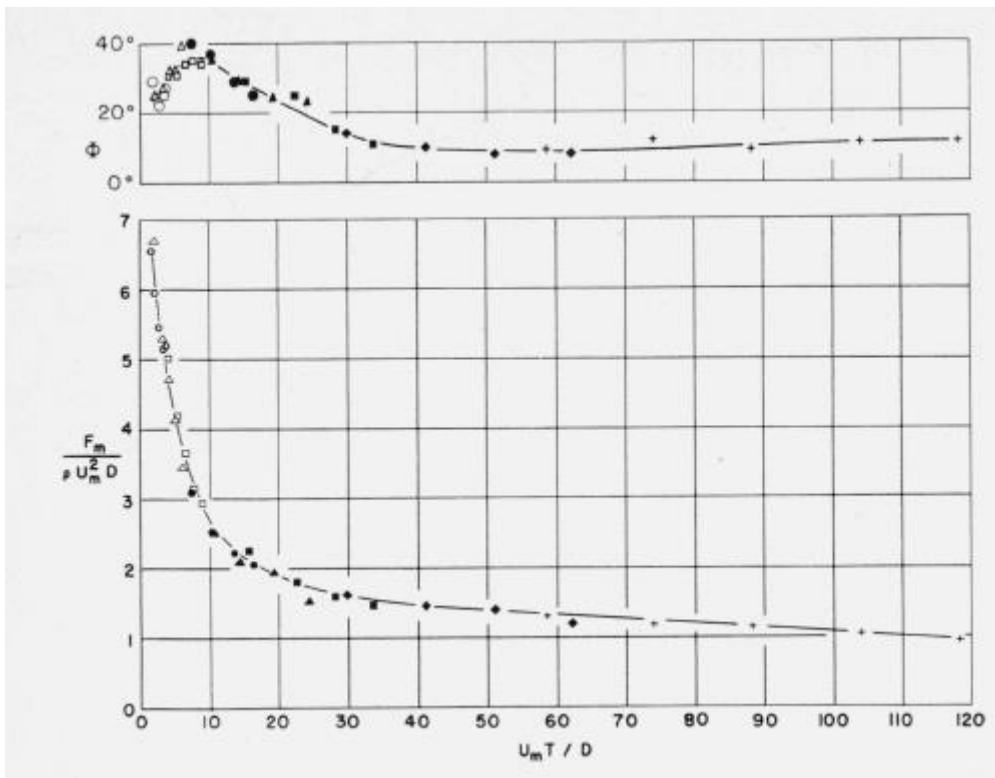
$$A_1 + 2B_1' \sin \theta_m = 0, \text{ ή } \sin \theta_m = -A_1/(2B_1''), \text{ για } \pi/2 < \theta_m < 3\pi/2$$

Εφόσον οι συντελεστές A_1 και B_1'' είναι συναρτήσεις μόνο του $U_m T/D$, οι $F_m/\rho U_m^2 D$ και Φ είναι και οι δύο συναρτήσεις του $U_m T/D$. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η Remainder Function, και μετά από πολύπλοκους υπολογισμούς βρίσκουμε τελικά πως η μέγιστη δύναμη και η φάση της είναι ξανά συναρτήσεις της περιοδικής παραμέτρου.

Μία εναλλακτική μέθοδος είναι ο απευθείας υπολογισμός της μέγιστης δύναμης και της φάσης της παίρνοντας απλώς αυτές τις ποσότητες από τις γραφικές παραστάσεις (Εικ.40 για κυλίνδρους και 41 για πλάκες) του παρόντος άρθρου.



Σχήμα 40: Μεταβολές του μεγέθους και της φάσης της μέγιστης δύναμης σε κυλίνδρους.



Σχήμα 41: Μεταβολές του μεγέθους και της φάσης της μέγιστης δύναμης σε πλάκες.

BEARMAN & GRAHAM

Δυνάμεις σε κυλίνδρους σε συνεκτική παλλόμενη ροή σε χαμηλούς αριθμούς ΚC

Στην εργασία αυτή γίνεται σύγκριση μεταξύ θεωρίας και πειράματος για τις παράλληλες στη ροή δυνάμεις σε κυλίνδρους γενικής διατομής σε ταλαντούμενη ροή μικρού πλάτους. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις μετρήσεις που πάρθηκαν σε υδροσήραγγα μορφής U για έναν αριθμό κυλίνδρων με διαφορετικές διατομές. Οι συγκρίσεις αυτές δείχνουν ότι η θεωρία είναι σωστή για αριθμούς K_c μικρότερους από περίπου 3 και για σχετικά ψηλές τιμές της παραμέτρου β .

Εισαγωγή

Όταν ένα κυλινδρικό σώμα ταλαντώνεται κάθετα στον άξονά του, μέσα σε ένα κατά τ' άλλα στάσιμο ρευστό, δέχεται μία δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από 3 συνιστώσες: τη δύναμη λόγω της αδράνειας της εξωτερικής επιταχυνόμενης ροής, τη δύναμη λόγω της επίδρασης των οριακών στρωμάτων και τη δύναμη που οφείλεται στην αποκόλληση αυτών των οριακών στρωμάτων η οποία οδηγεί στην έκλυση δινών. Εάν το πλάτος της κίνησης είναι μικρό σε σχέση με τη διάμετρο D του σώματος, όπως στις περιπτώσεις που εξετάζουμε εδώ, η κύρια συνιστώσα είναι η μη συνεκτική αδρανειακή δύναμη. Αυτή η δύναμη οφείλεται στην επιτάχυνση του ρευστού σε μη συνεκτική προσκολλημένη ροή και είναι η μόνη δύναμη που εμφανίζεται στο όριο πολύ μεγάλων αριθμών Reynolds και πολύ μικρών αριθμών K_c .

Η δεύτερη από τις 3 συνιστώσες της δύναμης προκύπτει από την επιρροή του ιξώδους στην προσκολλημένη ροή επί της επιφάνειας του σώματος μέσω μετατόπισης και επιφανειακής τριβής. Αυτή η συνιστώσα της δύναμης είναι ασήμαντη για τις περισσότερες μεγάλες κατασκευές αλλά μπορεί να γίνει σημαντική σε μοντέλα που εξετάζονται σε δεξαμενές κυματισμού, όπου οι αριθμοί Reynolds είναι σημαντικά μικρότεροι.

Για σώμα αυθαίρετου σχήματος, η προσκολλημένη ροή θα εξαρτηθεί τόσο από τον KC όσο και από τον αριθμό Reynolds. Στην περίπτωση κυκλικού κυλίνδρου μία κατάσταση ροής σε αρκετά μικρό K_c για την οποία η ροή γύρω από το σώμα παραμένει προσκολλημένη σε όλη τη διάρκεια της κίνησης ανεξάρτητα από τον Re . Η δύναμη τότε είναι:

Και οι συντελεστές ροπής και οπισθέλκουσας:

Η παράμετρος β που εμφανίζεται στις παραπάνω εκφράσεις είναι ο λόγος Re/K_c (όπου $Re = U_0 D/\nu$ και $K_c = U_0 T/D$) και έχει αποδειχθεί από τον Sarpkaya (1976) ότι παίζει σημαντικό ρόλο στη ροή γύρω από κυκλικό κύλινδρο. Είναι μία βολική παράμετρος για ταλαντούμενη ροή δεδομένου ότι, για συγκεκριμένο μέγεθος μοντέλου και τύπο ρευστού, η παράμετρος β εξαρτάται μόνο από την συχνότητα της ροής, ενώ ο Re εξαρτάται από την συχνότητα ροής και το πλάτος ταλάντωσης. Για πειράματα σε μικρές δεξαμενές $10^2 < \beta < 10^3$. Στην περίπτωση σταθερού κυκλικού κυλίνδρου σε ταλαντούμενη ροή οι συντελεστές δυνάμεων είναι:

$$C_M = 2 + 4(\pi\beta)^{-1/2} \text{ και } C_D = 1.5\pi^3 K_c^{-1} (\pi\beta)^{-1/2}$$

Η τρίτη συνιστώσα της δύναμης σε σώμα σε παλλόμενη ροή προκύπτει από την αποκόλληση του οριακού στρώματος και τον σχηματισμό δινών. Η αποκόλληση συμβαίνει σε σώματα με συνεχή κλίση επιφάνειας όταν ο K_c υπερβαίνει κάποια κρίσιμη τιμή ανάλογα με τον Re (ή την παράμετρο β) και το σχήμα του σώματος. Στην περίπτωση κυκλικού κυλίνδρου συνήθως αναμένεται ότι η έκλυση δινών ξεκινάει για K_c περίπου 5, τιμή πάνω απ' την οποία έχουμε ταχεία αύξηση του C_D . Ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι να βρει τον C_D για K_c γύρω από την κρίσιμη αυτή τιμή.

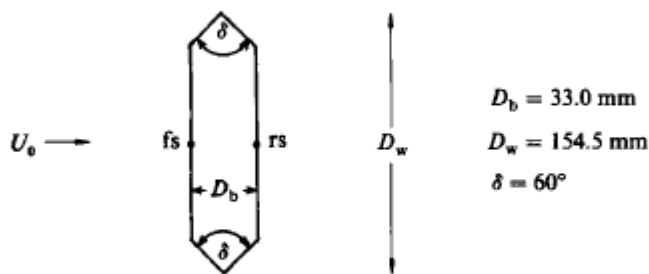
Πειραματική διάταξη και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι μετρήσεις έγιναν για επίπεδη ταλαντούμενη ροή μέσα σε σωλήνα σχήματος U. Το τμήμα του σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, το οριζόντιο σκέλος του, έχει τετραγωνική διατομή, πλάτος 0.61 m και 1.5 m μήκος. Τα κάθετα μέρη έχουν 2.5m ύψος. Σταθερού πλάτους ταλαντώσεις δημιουργούνται από έναν φυσητήρα αέρα που συνδέεται με ένα από τα κάθετα άκρα και ο οποίος ενεργοποιείται και απενεργοποιείται σε κατάλληλα διαστήματα από αισθητήρες χωρητικότητας σύμφωνα ανάλογα με τη στάθμη του νερού κάθε στιγμή. Όταν ο σωλήνας γεμίσει μέχρι το ζητούμενο σημείο, η περίοδος T της

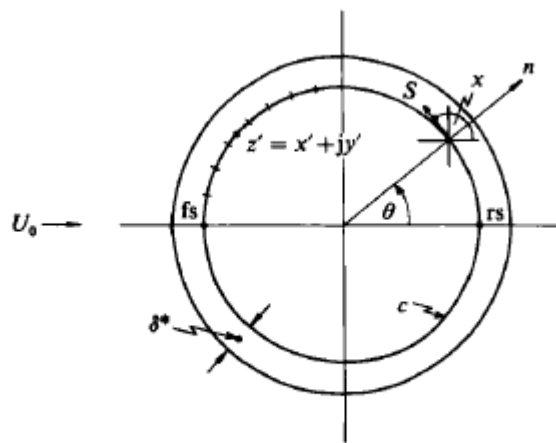
ταλάντωσης του νερού είναι 3.34 sec και η μετατόπιση της επιφάνειας μπορεί να μεταβάλλεται μέχρι και 0.6m από κορυφή σε κορυφή.

Τα αντικείμενα που εξετάστηκαν ήταν έξι κυκλικοί κύλινδροι διαφορετικών μεγεθών, μια επίπεδη πλάκα και ένας τετραγωνικός κύλινδρος. Οι διάμετροι των κυκλικών κυλίνδρων κυμαίνονταν από 2.56 έως 7.48 cm, οπότε η παράμετρος β μεταβαλλόταν από 196 έως 1665. Το μήκος της πλευράς του τετραγωνικού κυλίνδρου ήταν 2.67 cm που αντιστοιχεί σε $\beta = 213$ όταν η ροή πέφτει κάθετα στην πλευρά του κυλίνδρου. Όταν ο ίδιος κύλινδρος είχε τη μια διαγώνιο παράλληλη στη ροή το β ήταν ίσο με 432. Η πλάκα είχε 3.84 cm πλάτος και τοποθετήθηκε κάθετα στη ροή, δίνοντας $\beta = 439$. Η πλάκα φαίνεται στο Σχήμα 1α. Οι δοκιμές έγιναν για τιμές του K_c από 0.1 έως 10. Ο Re κυμαινόταν μεταξύ 350 και 16650.

Forces on cylinders in viscous oscillatory flow

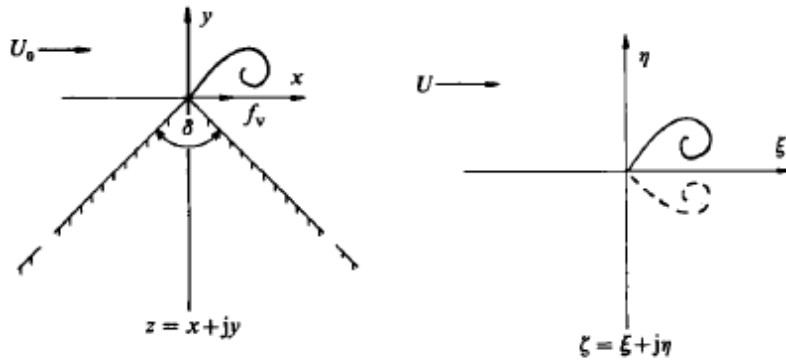


(a) the plate



(b) the circular cylinder

Σχήμα 42: Δυνάμεις σε κυλίνδρους σε συνεκτική παλλόμενη ροή (α)για πλάκα,(β)για κυκλικό κύλινδρο.

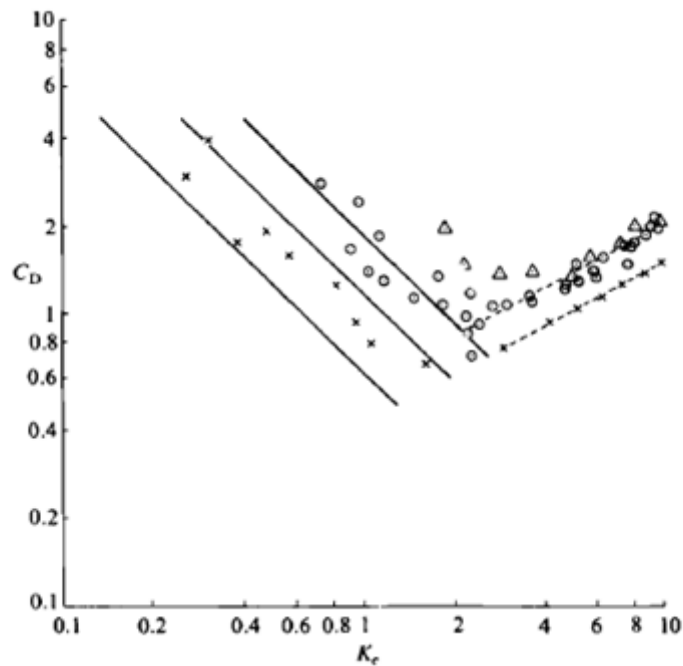


(c) the isolated edge

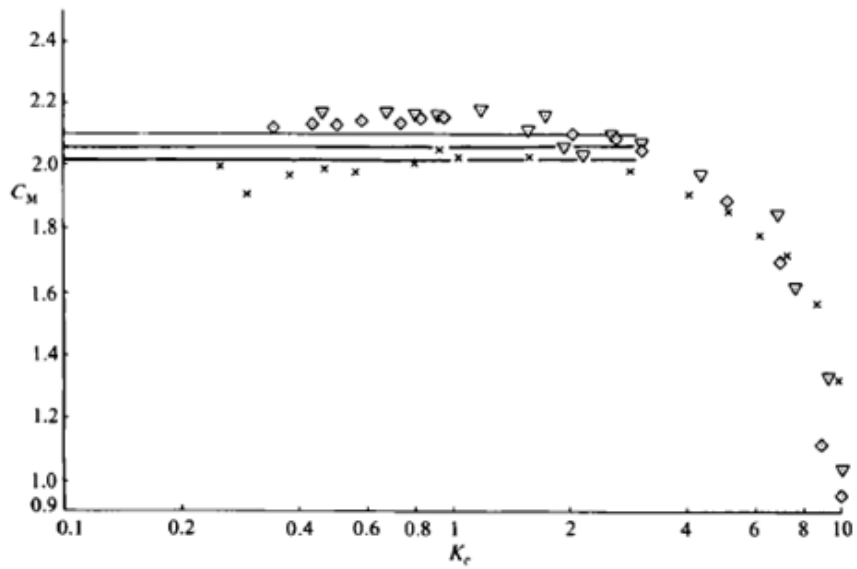
Σχήμα 43: Δυνάμεις σε κυλίνδρους σε συνεκτική παλλόμενη ροή (c)για απομονωμένη ακμή

Κάθε μοντέλο είχε 60.5 cm μήκος και είχε τοποθετηθεί οριζόντια, στηριζόμενο στην κάθε άκρη του σε strain gauges που συνδέονταν με τα τοιχώματα του σωλήνα σχήματος U. Η στάθμη του νερού και η παράλληλη στη ροή δύναμη καταγράφονταν ταυτόχρονα σε αναλογική ταινία και στη συνέχεια ψηφιοποιούνταν και υποβάλλονταν σε επεξεργασία. Ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν τέτοιος ώστε σε έναν κύκλο ταλάντωσης αντιστοιχούσαν 420 σημεία.

Οι συντελεστές για κυκλικό κύλινδρο παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες συναρτήσεως του K_c .

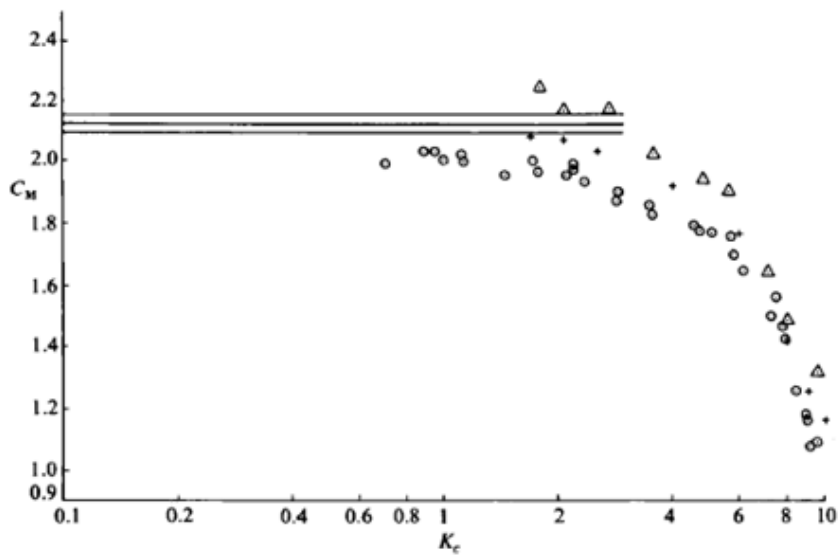


Σχήμα 44: Συντελεστές οπισθέλκουσας για κυκλικό κύλινδρο συναρτήσεως του K_c .



Inertia coefficient vs. Keulegan-Carpenter number for circular cylinder. Experiment: \times , $\beta = 1665$; \diamond , 1204; ∇ , 964; theory, —.

Σχήμα 45: (Α) Συντελεστής αδράνειας για κυκλικό κύλινδρο συναρτήσει του K_C .



Inertia coefficient vs. Keulegan-Carpenter number for circular cylinder. Experiment: \odot , $\beta = 483$; $+$, 301; \triangle , 196; theory, —.

Σχήμα 46: (Β) Συντελεστής αδράνειας για κυκλικό κύλινδρο συναρτήσει του K_C .

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η συμπεριφορά του C_D για διάφορες τιμές του β φαίνεται στο σχήμα 2 για κυκλικό κύλινδρο με K_c από 0.1 έως 10. Φαίνεται ότι για δεδομένο K_c , ο C_D πέφτει όσο το β αυξάνεται. Πιο εντυπωσιακή ίσως είναι η συμπεριφορά συναρτήσεως του K_c . Όσο ο K_c αυξάνεται από την τιμή 0.1, ο C_D πρώτα μειώνεται για αυξανόμενο K_c μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή του K_c (που εξαρτάται από το β αλλά γενικά κυμαίνεται γύρω στο 2). Σε αυτή την περιοχή η θεωρία της ιξώδους ροής προβλέπει τιμές του C_D σε σχετική συμφωνία με αυτές που προέκυψαν πειραματικά. Όσο το K_c αυξάνεται πέρα απ' αυτή την περιοχή, ο C_D μεγαλώνει.

Σε πολύ χαμηλούς K_c η ροή είναι προσκολλημένη και αναμένεται να επικρατούν συνεκτικά φαινόμενα. Όσο ο K_c αυξάνεται τα οριακά στρώματα αποκολλώνται και σε υψηλές τιμές του K_c η ροή κυριαρχείται από έκλυση δινών. Η εμφάνιση αυτών των δύο διακεκριμένων καταστάσεων ροής συναρτήσεως του K_c στην παρούσα έρευνα έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες μελέτες. Μετρήσεις από τους Stuart & Woodgate (1954) έδειξαν ότι συνεκτική ροή για κυκλικούς κυλίνδρους έχουμε για πλάτη ταλάντωσης της τάξης του 1/10 της διαμέτρου ή μικρότερες, δηλαδή για $K_c \leq 0.6$ περίπου.

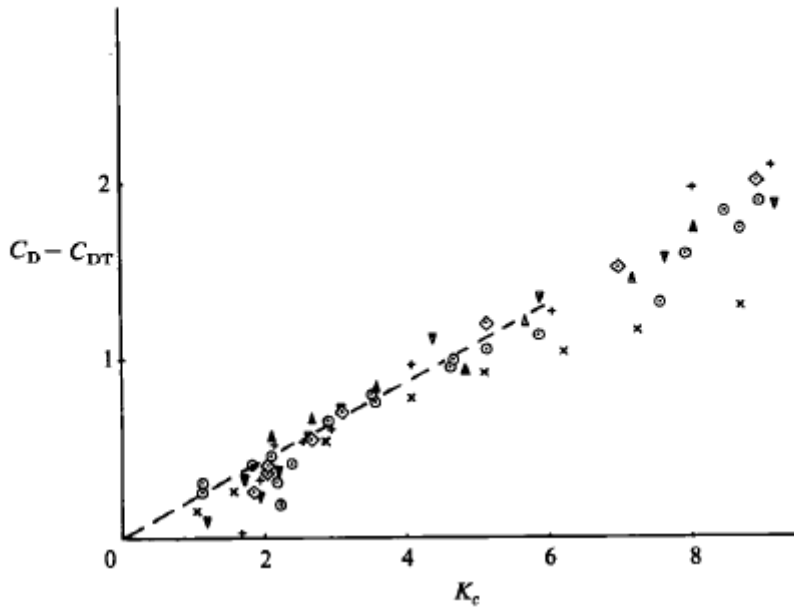
Πειράματα οπτικοποίησης της ροής που έγιναν από τους Singh (1979), Grass & Kemp (1979) και Williamson (1982) δείχνουν ότι οι δίνες ξεκινούν όλο και περισσότερο να κυριαρχούν στη ροή για $K_c \geq 5$ περίπου. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η αλλαγή στην συμπεριφορά των συντελεστών δύναμης οφείλεται στην έναρξη έκλυσης δινών. Αυτό θα σήμαινε ότι η έναρξη της έκλυσης της δινών δεν σχετίζεται με κάποιο σταθερό λόγο του πλάτους της ροής προς την διάμετρο του κυλίνδρου διαμέτρου, αλλά εξαρτάται από την παράμετρο β , αφού η αλλαγή της κατάστασης ροής συμβαίνει για διαφορετικές τιμές του K_c με διαφορετικές τιμές του β .

Μία καλύτερη εκτίμηση της επίδρασης της έκλυσης δινών μπορεί να γίνει αφαιρώντας την θεωρητική τιμή του συνεκτικού συντελεστή οπισθέλκουσας

$$\underline{C_{DBL}} = 1.5\pi^3 K_c^{-1} (\pi\beta)^{-1/2}$$

από το C_D των πειραματικών δεδομένων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Forces on cylinders in viscous oscillatory flow



Σχήμα 47: Εκτίμηση της επίδρασης της έκλυσης δινών αφαιρώντας την θεωρητική τιμή του συνεκτικού συντελεστή οπισθέλκουσας.

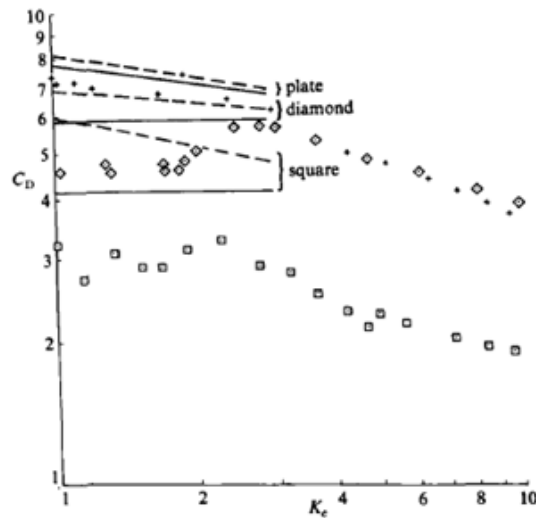
Προεκτείνοντας αυτά τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η επιπρόσθετη συνεισφορά της στην οπισθέλκουσα τείνει γραμμικά στο μηδέν. Αλλά η διασπορά για μικρότερες τιμές (πιθανότατα εξαιτίας ανακρίβειών στις μετρήσεις δυνάμεων που είναι πολύ μικρές) μπορεί να συγκαλύψει μια περιοχή $K_c < K_{cν}$ στην οποία δεν υπάρχει συνεισφορά λόγω αποκόλλησης. Ακόμα και έτσι, το $K_{cν}$ είναι μικρό (≤ 1.0 περίπου). Θεωρητικά

$$C_D \propto K_C.$$

Αυτό είναι σε συμφωνία με την γραμμική τάση των δεδομένων στο παραπάνω σχήμα. Παρ' όλα αυτά, όπως συζητήθηκε παραπάνω, αυτή η ανάλυση δεν ισχύει στην περίπτωση που η αποκόλληση γίνεται από λεία επιφάνεια, οπότε εδώ η συμφωνία μπορεί να είναι τυχαία. Δεν έχει αποδειχθεί από την οπτικοποίηση της ροής ότι η αποκόλληση με έκλυση δινών συμβαίνει σε κυκλικό κύλινδρο σε τόσο μικρές τιμές του K_c (περίπου 1). Ο αυξανόμενος $C_{Dν}$, για μεγαλύτερους K_c μπορεί να αποδοθεί στην εμφάνιση αποκόλλησης με μορφή φουσαλίδων.

Η διακύμανση του συντελεστή αδράνειας για τον κυκλικό κύλινδρο συναρτήσει των παραμέτρων β και K_c φαίνεται στα σχήματα 3 και 4. Για όλες τις τιμές του β ο συντελεστής αδράνειας αυξάνεται ραγδαία όσο το K_c μειώνεται από την τιμή 10 μέχρι να φτάσει σε μία σχετικά σταθερή τιμή για K_c μικρότερο από περίπου 2 ή 3. Για χαμηλούς K_c , η αύξηση στο συντελεστή αδράνειας λόγω συνεκτικών φαινομένων είναι αρκετά εμφανής στα πειραματικά δεδομένα εκτός των περιπτώσεων με $\beta=483$, όπου δεν φαίνεται να προσεγγίζει τις θεωρητικές τιμές.

Η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει του K_c για αιχμηρούς κυλίνδρους φαίνεται στην εικόνα 48.



Drag coefficient vs. Keulegan-Carpenter number for sharp-edged cylinders. Experiment: +, flat plate ($\beta = 60^\circ$), $\beta = 439$; \diamond , diamond (90°), 431; \square , square (90°), 231. Theory: —, isolated edge theory C_{Dv} ; ---, isolated edge theory plus viscous correction $C_{Dv} + C_{DBL}$.

Σχήμα 48: Μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει του K_c για αιχμηρούς κυλίνδρους.

Αυτά τα αποτελέσματα είναι σε κάθε περίπτωση για μία μόνο τιμή του β . Παρ' όλα αυτά καταδεικνύουν την ισχυρή επίδραση του σχήματος της διατομής του κυλίνδρου στους συντελεστές δύναμης για χαμηλές τιμές του K_c .

Η θεωρητικές τιμές του μη συνεκτικού C_D φαίνεται ότι είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα στην περίπτωση της πλάκας. Παρ' όλα αυτά είναι περίπου 20% υψηλότερες στις περιπτώσεις ρόμβου και τετραγώνου. Και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, όμως, η πειραματική συμπεριφορά είναι σε καλή συμφωνία με τη θεωρητική, δηλαδή ο C_D είναι ανεξάρτητος του K_c για ακμές με ορθές γωνίες και επιπλέον οι τιμές των C_D για ρόμβους και τετράγωνα είναι $\sqrt{2}$, όπως προβλέπεται από τη θεωρία.

Sinusoidal flow relative to circular cylinders

By C.H.K. Williamson

Εισαγωγή

Υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές όσον αφορά την κίνηση των δινών και τις δυνάμεις που ασκούνται σε κύλινδρο μέσα σε παλλόμενη ροή απ' ό,τι αν βρισκόταν σε σταθερή ροή. Στην παλλόμενη ροή το ρευστό αλλάζει κατεύθυνση, κάνοντας το γεμάτο δίνες ομόρρου που δημιουργήθηκαν στο πρώτο μισό ενός κύκλου να περνά πάλι απ' τον κύλινδρο στο δεύτερο μισό. Αυτή η αναστροφή της ροής έχει σημαντική επίδραση στα μεγέθη των δυνάμεων που προκαλούνται από το ρευστό, όπως επίσης και στην θεμελιώδη συχνότητα της δύναμης της άνωσης.

Η μελέτη των διδιάστατων παλλόμενων ροών είναι σημαντική κατά την έρευνα των δυνάμεων που ασκούνται από κύματα σε κυλινδρικές κατασκευές, καθώς είναι το πρώτο βήμα για την κατανόηση της τρισδιάστατης αλληλεπίδρασης κύματος-κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, η αναστροφή του ομόρρου εμφανίζεται και σε διδιάστατες περιπτώσεις και όπου έχουμε κυματισμό, και η κίνηση των δινών σε διδιάστατη ροή χαμηλού Re αναμένεται να είναι αντιπροσωπευτική της κίνησης των δινών στην περίπτωση κυλινδρικής κατασκευής μέσα σε κύματα. Η κύρια εφαρμογή όσον αφορά την υδροδυναμική αλληλεπίδραση ενός ζεύγους κυλίνδρων είναι η μελέτη των δυνάμεων σε γειτονικά κυλινδρικά μέλη υπεράκτιων κατασκευών. Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να ήταν οι πολλαπλοί κυλινδρικοί σωλήνες που μεταφέρουν πετρέλαιο από τον βυθό της θάλασσας στην επιφάνεια. Βρέθηκε στην παρούσα μελέτη πως όταν η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων του ζεύγους είναι 5 διάμετροι, όπως συχνά συμβαίνει στην πραγματικότητα, οι ροές γύρω απ' τους κυλίνδρους αλληλεπιδρούν ισχυρά μεταξύ τους.

Στην πράξη, η πρόβλεψη της οπισθέλκουσας σε παλλόμενη ροή βασίζεται στην εξίσωση του Morison (1950), σύμφωνα με την οποία η αντίσταση ανά μονάδα μήκους είναι:

για κυκλικό κύλινδρο, όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, D η διάμετρος του σώματος και U η ταχύτητα του ρευστού. Οι συντελεστές C_D και C_m έχουν υπολογιστεί πειραματικά.

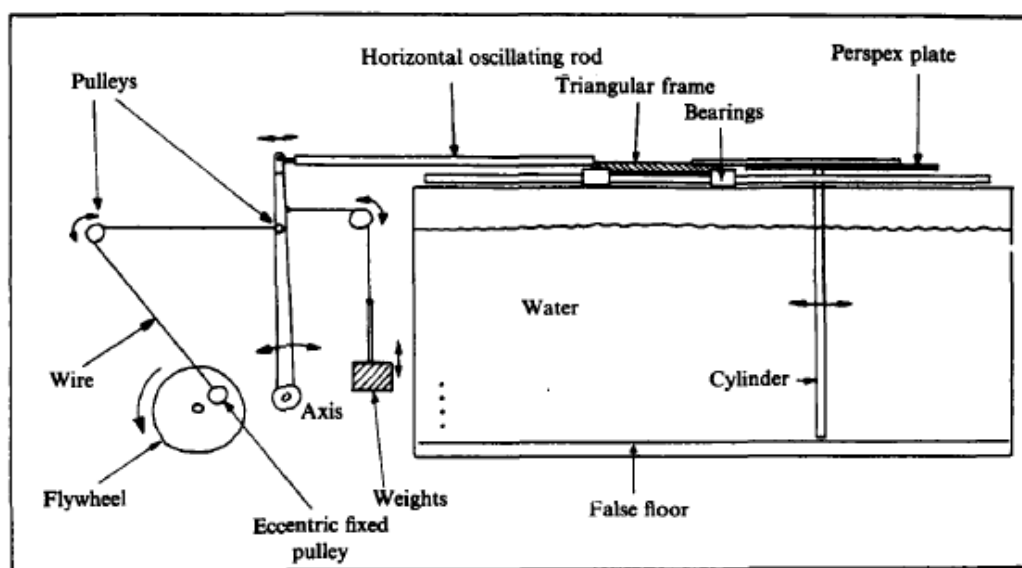
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται ταυτόχρονα οπτικοποίηση της ροής και μέτρηση των δυνάμεων, χρησιμοποιώντας μια δεξαμενή με ταλαντευμένο κύλινδρο. Για ασυμπίεστο ρευστό σταθερής πυκνότητας, η περίπτωση που ένα σώμα επιταχύνεται μέσα στο ρευστό είναι κινηματικά ισοδύναμη με την περίπτωση που το ρευστό επιταχύνεται σε σχέση με το σώμα., με κάποιες μικροδιαφορές. Αναμένεται πως η μορφή της ροής και στα δύο συστήματα αναφοράς θα είναι η ίδια.

Πειραματική Διάταξη

Ο σωλήνας σχήματος U που χρησιμοποιήθηκε σε κάποιες μετρήσεις δυνάμεων (και αρχικά για την οπτικοποίηση της ροής) στην περίπτωση του μονού κυλίνδρου είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και πλέξιγκλας. Τα όρθια άκρα έχουν ύψος 2.65 m και η βάση έχει μήκος 3.73 m. Η διατομή των κάθετων άκρων και του οριζόντιου τμήματος του

σωλήνα σχήματος U είναι 0.45 m x 0.48 m. Ο μελετούμενος κύλινδρος με διάμετρο 0.05 m στηρίζεται και στα δύο του άκρα στο δεξί σκέλος του σωλήνα σχήματος U μέσω strain gauges. Το ύψος του νερού μετριέται από αισθητήρα χωρητικότητας που βρίσκεται στο δεξί σκέλος του σωλήνα. Το νερό ταλαντώνεται μέσα στον σωλήνα στη συχνότητα συντονισμού με τη βοήθεια ταλαντούμενης οριζόντιας πλάκας που βρίσκεται στο αριστερό σκέλος του σωλήνα. Το εύρος του KC κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 35 και η παράμετρος β ισούται με 730. Οι RMS τιμές της άνωσης και της αντίστασης υπολογίζονται απ' τις τιμές που καταγράφονται σε ταινία, παίρνοντας το μέσο όρο 40 κύκλων με τη βοήθεια υπολογιστή.

Η κατασκευή στην οποία κάθετοι κύλινδροι ταλαντώνονται οριζόντια έχει εσωτερικές διαστάσεις 2.4 m μήκος και 0.9 m βάθος με 0.73 m πλάτος και φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.



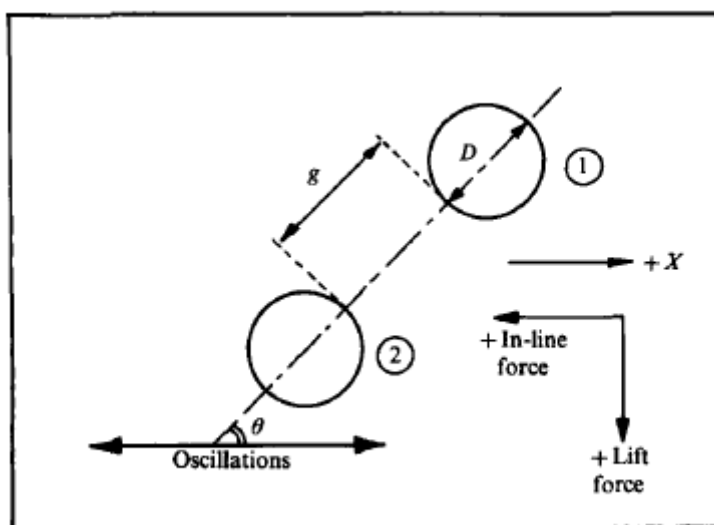
Σχήμα 49: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

Το κενό μεταξύ της κάτω άκρης των κυλίνδρων και του ψευδοπατώματος είναι 0.2 cm. Οι κύλινδροι είναι προσκολλημένοι στο πάνω μέρος τους σε οριζόντια πλάκα πλεξιγκλάς η οποία στερεώνεται σε ταλαντούμενο ολισθητήρα που κινείται ράγες δίπλα στη δεξαμενή. Ο ολισθητήρας ταλαντώνεται με τη βοήθεια σύρματος και τροχαλιών (Σχήμα 1).

Στην επιφάνεια του κυλίνδρου, μεταξύ της πλάκας από perspex και της επιφάνειας του νερού, είναι τοποθετημένα strain gauges. Οι κύλινδροι έχουν μήκος 0.7 m με διάμετρο 0.012, 0.025, 0.05 m, παρ' όλο που τα strain gauges χρησιμοποιήθηκαν μόνο στην περίπτωση του κυλίνδρου διαμέτρου 0.025 m, δίνοντας τιμή για την παράμετρο β ίση με 255. Πλάτη ταλάντωσης που αντιστοιχούν σε $KC < 60$ χρησιμοποιούνται στην οπτικοποίηση και σε $KC < 35$ για μετρήσεις δυνάμεων. Η μετατόπιση μετριέται με έναν γραμμικό μορφοτροπέα και το σήμα του μαζί με την δυνάμεις καταγράφονται ταυτόχρονα.

Το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος δείχνει πως καθορίζεται η γεωμετρία του ζεύγους κυλίνδρων. Για την οπτικοποίηση, έγινε φωτογράφιση με κάμερα Nikon τοποθετημένη από πάνω. Η επιφάνεια του νερού «πασπαλίστηκε» με σκόνη αλουμινίου. Πηγές φωτός ήταν 2 προβολείς διαφανειών των 250 W ο καθένας και μια λάμπα αλογόνου των 1000 W,

τοποθετημένα γύρω απ' τη δεξαμενή. Η κάμερα μπορεί να ακινητοποιηθεί είτε ως προς τον κύλινδρο, είτε ως προς το αδιατάρακτο ρευστό. Στις μετρήσεις δυνάμεων δεν ελήφθησαν υπόψη blockage ή end effects.

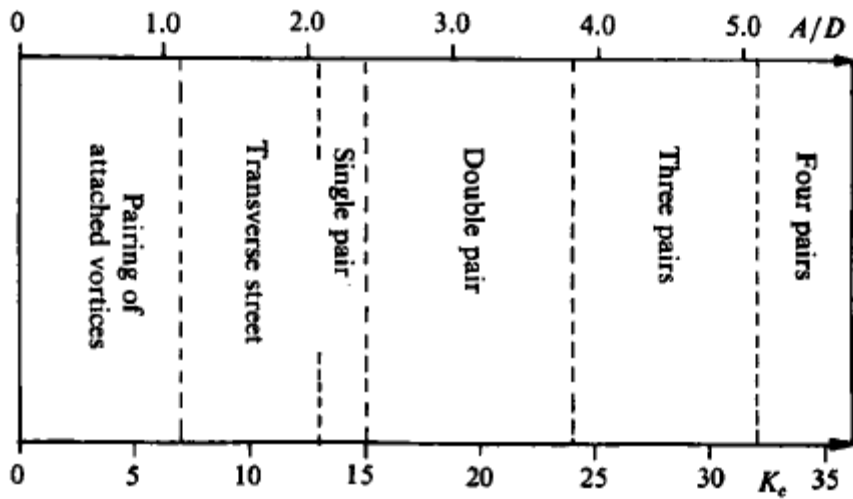


Σχήμα 50: Γεωμετρία του ζεύγους κυλίνδρων.

Οπτικοποίηση ροής και μετρήσεις δυνάμεων

Καταστάσεις ροής με έκλυση δινών για μονό κύλινδρο

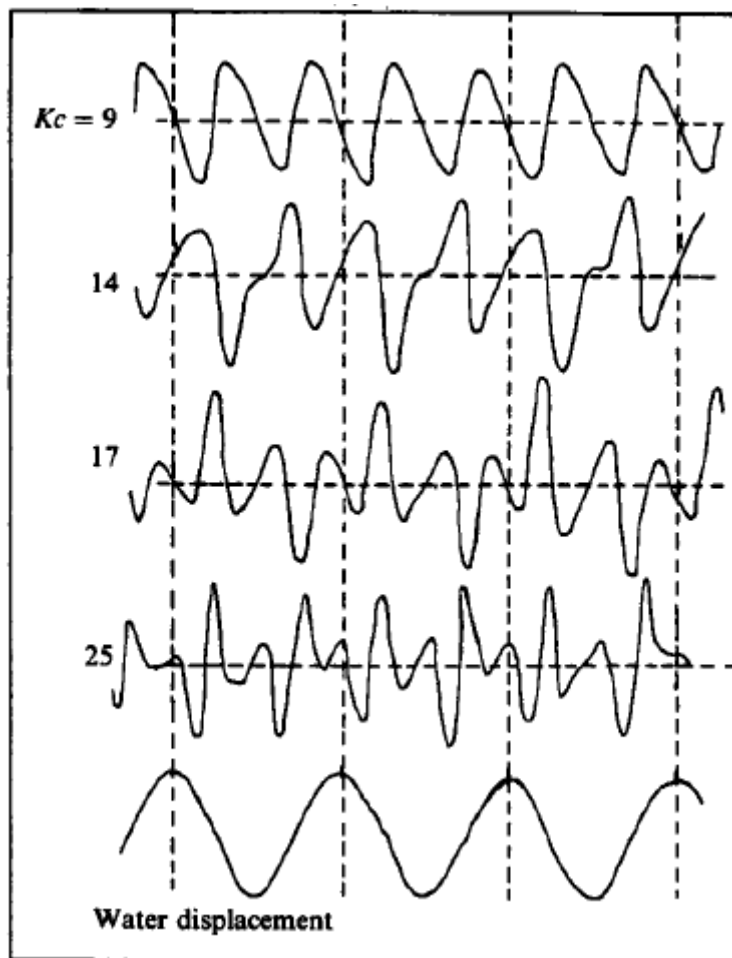
Όταν ένας μεμονωμένος κύλινδρος υποβάλλεται σε σχετική παλλόμενη ροή, εμφανίζονται συγκεκριμένα επαναλαμβανόμενα μοτίβα σχηματισμού δινών για συγκεκριμένα εύρη του πλάτους της ροής. Κάθε ένα από τα μοτίβα αυτά αντικατοπτρίζει την έκλυση συγκεκριμένου αριθμού δινών ανά μισό κύκλο. Μια προσεγγιστική συσχέτιση του πλάτους ροής ή του K_c με τα μοτίβα δινών θα περιγραφεί παρακάτω και φαίνεται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 51: Συσχέτιση του πλάτους ροής με τα μοτίβα δινών.

Κάθε μοτίβο μετά μπορεί να εμφανίζεται για πολλούς κύκλους συνέχεια, ή μπορεί να έχουμε αλλαγή από το ένα μοτίβο στο άλλο. Για παράδειγμα αν έχουμε έκλυση δινών μόνο από τη μια πλευρά του κυλίνδρου, η πλευρά αυτή μπορεί να αλλάζει από κύκλο σε κύκλο.

Σε όλες τις καταστάσεις ροής έχουμε παραγωγή άνωσης. Στο Σχ. 3β, φαίνονται οι χρονοσειρές της άνωσης και της μετατόπισης του νερού για κάποιες καταστάσεις ροής.



Σχήμα 52: Συσχέτιση του Kc με τα μοτίβα δινών.

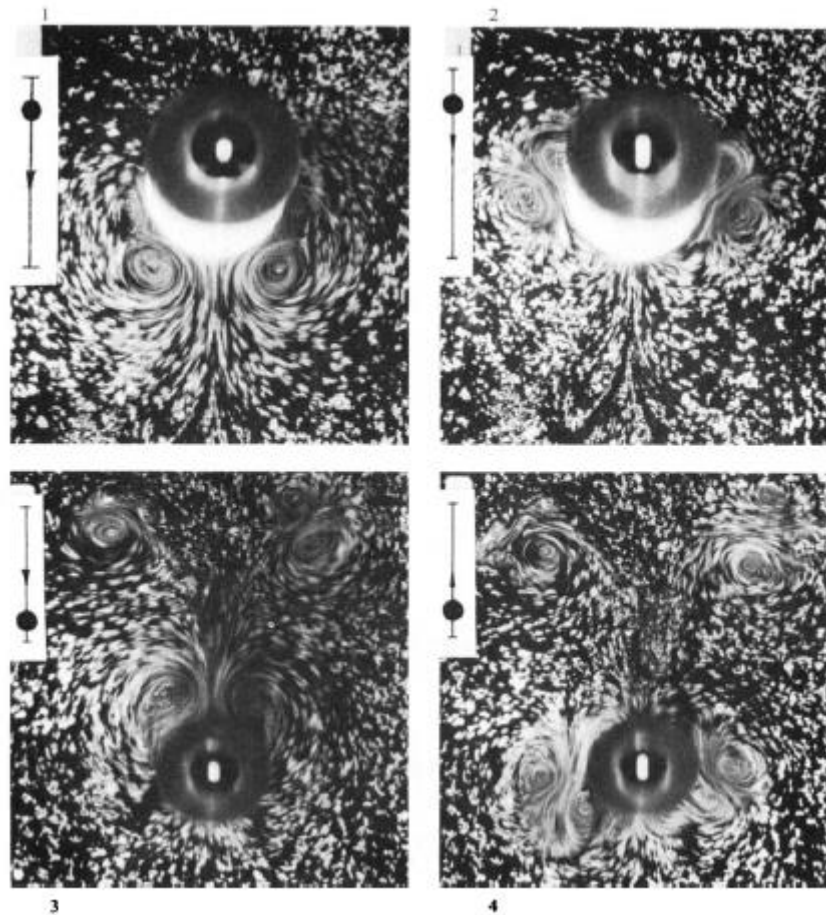
Η σχέση μεταξύ των μοτίβων των δινών με τα προφίλ των ανωστικών δυνάμεων σε κάθε περίπτωση βρέθηκε με παράλληλη λήψη φωτογραφιών και μέτρηση των δυνάμεων επί των κυλίνδρων.

Κάτω από $K_c = 7$ δεν σχηματίζονται μεγάλες δίνες κατά την διάρκεια μισού κύκλου παρ' όλο που ζεύγη μικρών δινών σχηματίζονται κάθε φορά που η ροή αντιστρέφεται. Μεγάλες δίνες σχηματίζονται σε κάθε μισό κύκλο για $K_c > 7$.

Στις φωτογραφίες της ροής που εμφανίζονται παρακάτω τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της κίνησης του κυλίνδρου μαζί με την κατά προσέγγιση θέση του κυλίνδρου μεταξύ των ακραίων θέσεών του. Τα βέλη στα σχήματα δείχνουν κι αυτά την κατεύθυνση της ροής, αν και για λόγους απλότητας το σύστημα αναφοράς κινείται μαζί με τον κύλινδρο.

Ζευγάριμα προσκολλημένων δινών ($0 < K_c < 7$)

Σε αυτό το εύρος πλάτους ροής, ένα ζεύγος μικρών «προσκολλημένων» δινών σχηματίζεται στον ομόρου του κυλίνδρου σε κάθε μισό κύκλο το οποίο με το ζεύγος δινών που σχηματίζεται πίσω από κύλινδρο όταν αρχίζει να κινείται. Όταν ο κύλινδρος αλλάζει κατεύθυνση οι προσκολλημένες δίνες διαχωρίζονται και «ζευγαρώνουν» με νέες δίνες στο νέο μισό κύκλο, απομακρυνόμενες έτσι από την περιοχή γύρω απ' τον κύλινδρο. Αυτό το ζευγάριμα των προσκολλημένων δινών συμβαίνει μόνο τη στιγμή της αντιστροφής της ροής μεταξύ των μικρών δινών που ήταν ακόμα προσκολλημένες στον κύλινδρο ακριβώς πριν την αντιστροφή της ροής. Οπτικοποίηση τέτοιας κατάστασης ροής, λίγο μετά την έναρξη της ταλάντωσης, φαίνεται στην εικόνα 53.

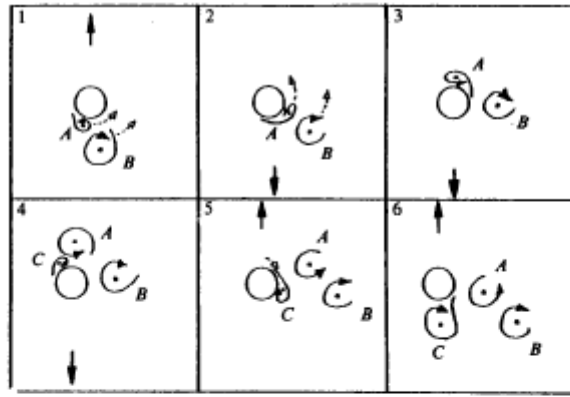


Σχήμα 53: Οπτικοποίηση της ροής.

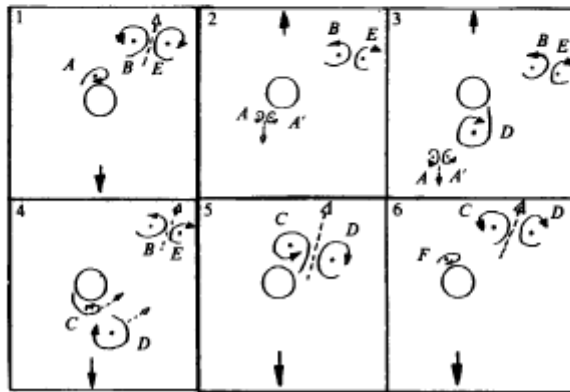
Στην (1) οι προσκολλημένες δίνες (από προηγούμενο μισό κύκλο) χωρίζονται καθώς ο κύλινδρος κινείται προς τα κάτω και στη (2) κάθε μία από αυτές σχηματίζει ένα μικρό ζεύγος δινών με νέες μικρές δίνες. Αυτά τα μικρά ζεύγη που σχηματίστηκαν κατά την αντιστροφή της ροής φαίνονται στις πάνω γωνίες των (3) και (4), όπου ο κύλινδρος αλλάζει ξανά κατεύθυνση και αυτό το ζευγάρι δινών επαναλαμβάνεται. Το ζευγάρι είναι συμμετρικό μέχρι περίπου $K_c = 4$, με την έννοια ότι τα δύο ζεύγη σχηματίζονται ταυτόχρονα όταν η ροή αντιστρέφεται. Για $4 < K_c < 7$, οι προσκολλημένες δίνες γίνονται άνισες σε μέγεθος και τα ζεύγη δινών δεν σχηματίζονται ταυτόχρονα κατά την αντιστροφή της ροής, προκαλώντας έτσι μία ανωστική δύναμη μικρού πλάτους που αυξομειώνεται με τη συχνότητα ταλάντωσης.

Εγκάρσιος δρόμος δινών/μονό ζεύγος δινών ($7 < K_c < 15$)

Αυτή η κατάσταση ροής είναι η πιο επαναλαμβανόμενη και περιλαμβάνει το σχηματισμό μιας μεγάλης δίνης κατά την διάρκεια κάθε μισού κύκλου. Για αυτά τα πλάτη ροής παρατηρούμε το ζευγάρι δινών που έχουν ήδη εκλυθεί και όχι αυτών που είναι προσκολλημένες. Ο εγκάρσιος δρόμος δινών αποτελείται από δίνες που κινούνται μακριά από την περιοχή γύρω απ' τον κύλινδρο, περίπου κάθετα προς την διεύθυνση ταλάντωσης. Η οπτικοποίηση φαίνεται στην εικόνα 54(a) και 54(b) όπου τα βέλη δείχνουν την κίνηση του κυλίνδρου και χάριν απλότητας το πλαίσιο αναφοράς μας κινείται μαζί με τον κύλινδρο.



(a)



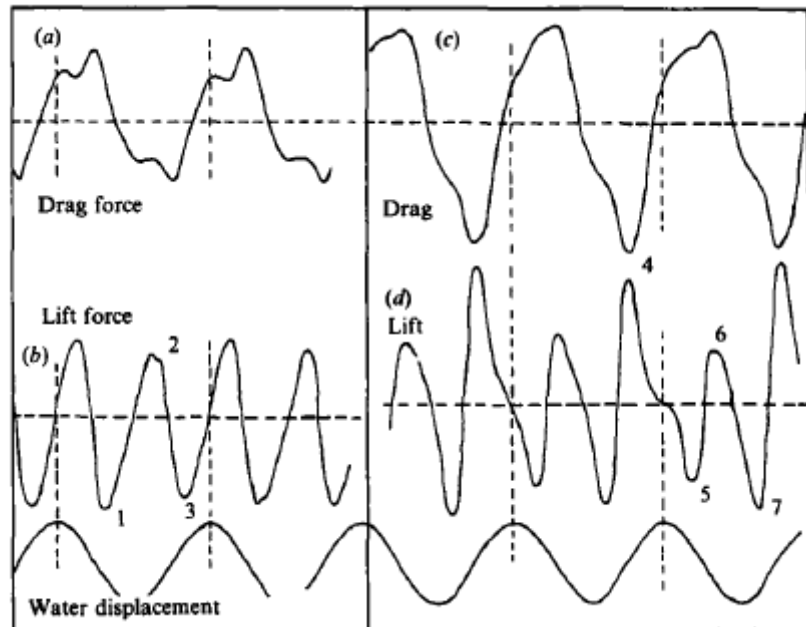
(b)

Σχήμα 54: Εγκάρσιος δρόμος δινών/μονό ζεύγος δινών ($7 < K_c < 15$)

Στο τέλος του μισού κύκλου στο (1) ο ομόρους κοντά στον κύλινδρο αποτελείται από μια εκλυμένη δίνη B και μια μη εκλυμένη δίνη A, οι οποίες και οι δύο μπορεί να κινηθούν γύρω από τη μια πλευρά του κυλίνδρου κατά την αντιστροφή του κατεύθυνσης κίνησης του κυλίνδρου (στη συγκεκριμένη περίπτωση, τη δεξιά πλευρά).

Στο άνω άκρο αυτού του εύρους πλατών ($13 < K_c < 15$) το κύριο μοτίβο δινών περιλαμβάνει μια σειρά ζευγών κινούμενων μακριά από τον κύλινδρο σε γωνία περίπου 45° ως προς την κατεύθυνση ταλάντωσης του κυλίνδρου όπως φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 5b. Η προσκολλημένη (ή μη εκλυμένη) δίνη A στο τέλος του μισού κύκλου στο (1), ζευγαρώνει με μικρή δίνη A' κατά την αντιστροφή της ροής στο (2) και (3). Η μεγαλύτερη και πιο σημαντική δίνη D κινείται γύρω από την ίδια πλευρά του κυλίνδρου με την μη εκλυμένη δίνη C στην επόμενη αντιστροφή της ροής. Η δίνη C γίνεται μεγαλύτερη και σχηματίζει με τη δίνη D ένα από τα βασικά ζεύγη δινών. Έτσι το μεγάλο ζεύγος C και D ακολουθεί το ζεύγος B και E που σχηματίστηκε ένα κύκλο νωρίτερα, και ούτω καθεξής. Τόσο στον εγκάρσιο δρόμο δινών όσο και στα μονά ζεύγη δινών, οι δίνες έχουν την τάση να κινούνται κυρίως μόνο προς μία πλευρά. Το ποιά πλευρά είναι αυτή καθορίζεται από τις αρχικές συνθήκες, αν και στην πορεία η έκλυση μπορεί να εναλλάσσει πλευρά.

Αυτές τα μοτίβα έκλυσης δινών ίσως έχουν σημασία για το σχεδιασμό θαλάσσιων κατασκευών, καθώς έχουν μεγάλη επαναληψιμότητα και προκαλούν ταλαντωτικές ανωστικές δυνάμεις. Παραδείγματα δυνάμεων άνωσης και αντίστασης για εγκάρσιο δρόμο φαίνονται στην εικόνα 55(a),55(b).

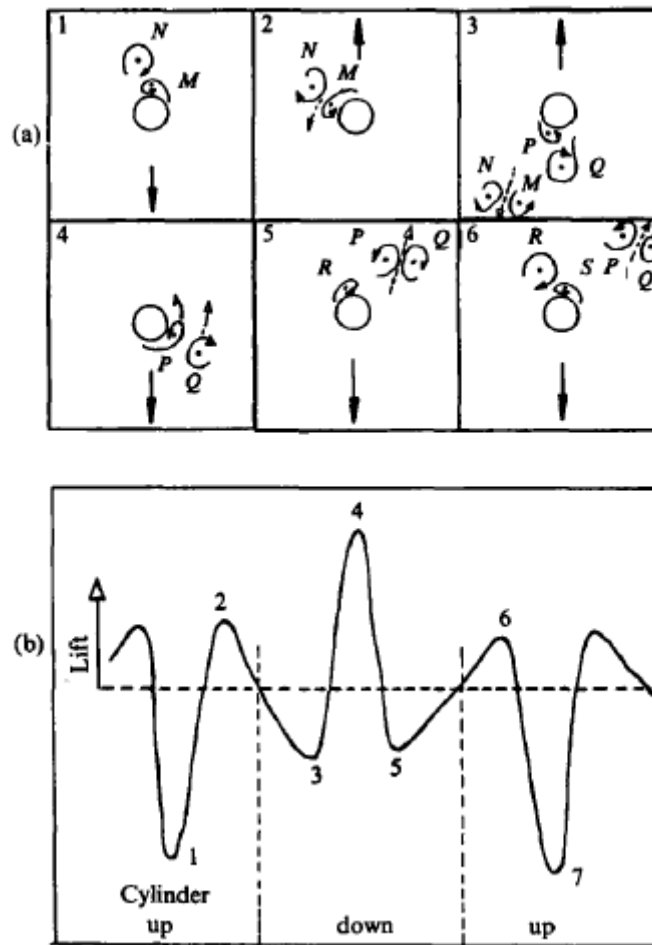


Σχήμα 55: Παραδείγματα δυνάμεων άνωσης και αντίστασης για εγκάρσιο δρόμο.

Στην περίπτωση αυτή οι δυνάμεις μετρήθηκαν από το σωλήνα σχήματος U και ως εκ τούτου δύναμη αντίστασης περιλαμβάνει την συνιστώσα λόγω βαθμίδας πίεσης που είναι σε φάση με την επιτάχυνση του ρευστού. Χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα για κάθε δύναμη είναι προφανές ότι το πλάτος της ανωστικής δύναμης μπορεί να υπερβίνει το πλάτος της δύναμης αντίστασης. Το ίδιο ισχύει και για τις δυνάμεων για μονό ζεύγος δινών (55 (c) & (d)).

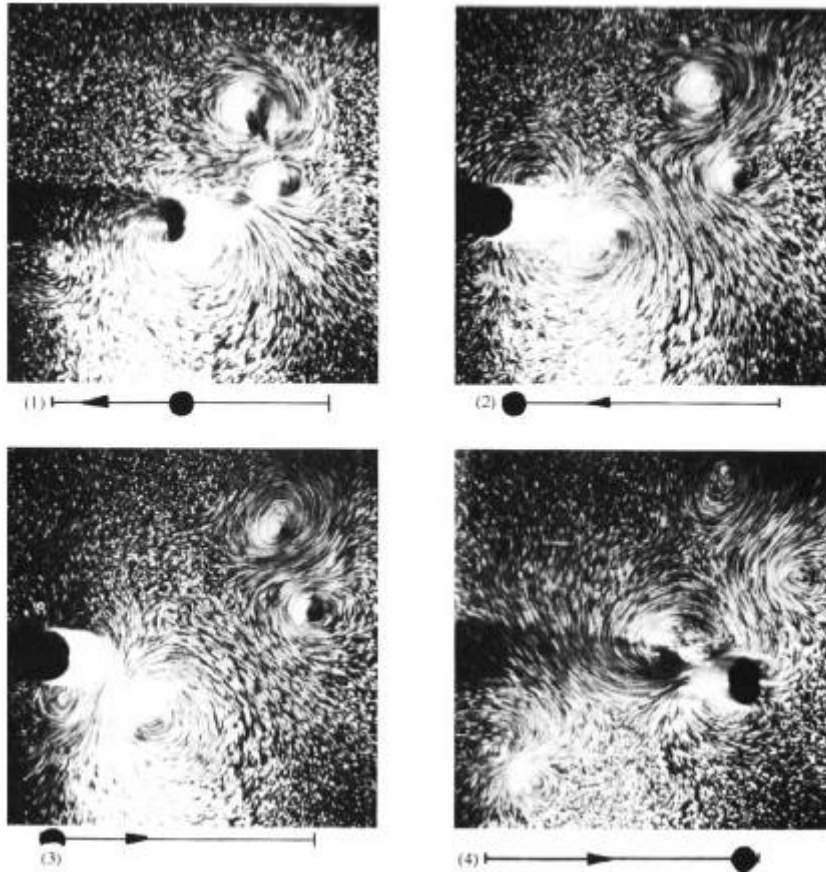
Διπλό ζεύγος δινών ($15 < K_c < 24$)

Όσο το πλάτος της ροής αυξάνεται, περνάμε από την έκλυση μονού ζεύγους δινών σε έκλυση διπλού ζεύγους. Συγκεκριμένα, έχουμε έκλυση δύο μεγάλων δινών σε κάθε μισό κύκλο και το σχηματισμό δύο ζευγών σε κάθε ολόκληρο κύκλο. Έχουμε μια σειρά από ζεύγη δινών που απομακρύνονται από τον κύλινδρο σε αντίθετες κατευθύνσεις και τεταρτημόρια. Ένα σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη σειρά έκλυσης φαίνεται στο Σχήμα 9(a), όπου το ζεύγος δινών (M,N) που σχηματίζεται στο πρώτο μισό του κύκλου απομακρύνεται προς τα κάτω και αριστερά του κυλίνδρου στα (2) και (3). Στον επόμενο μισό κύκλο το ζεύγος δινών (P,Q) απομακρύνεται προς τα πάνω και δεξιά σε σχέση με τον κύλινδρο και φαίνεται στα (4) και (5). Η ταλάντωση της ανωστικής δύναμης για αυτή την κατάσταση ροής φαίνεται στην εικόνα 56(β).



Σχήμα 56: (α) Διπλό ζεύγος δινών ($15 < Kc < 24$), (β) ταλάντωση της ανωστικής δύναμης για αυτή την κατάσταση ροής.

Οπτικοποίηση αυτής της κατάστασης ροής φαίνεται στην εικόνα 57 όπου ο κύλινδρος κινείται κατά μήκος της σελίδας. Στο (1) σχηματίζεται ένα ζεύγος δινών (αποτελούμενο από δίνες του προηγούμενου και του παρόντος μισού κύκλου) και στο (2) αυτό το ζεύγος απομακρύνεται προς τα πάνω και δεξιά του κυλίνδρου, ο οποίος κινείται προς τα αριστερά. Στον ακόλουθο μισό κύκλο σχηματίζεται ένα άλλο ζεύγος στο (3) και απομακρύνεται προς τα κάτω και αριστερά του κυλίνδρου στο (4).

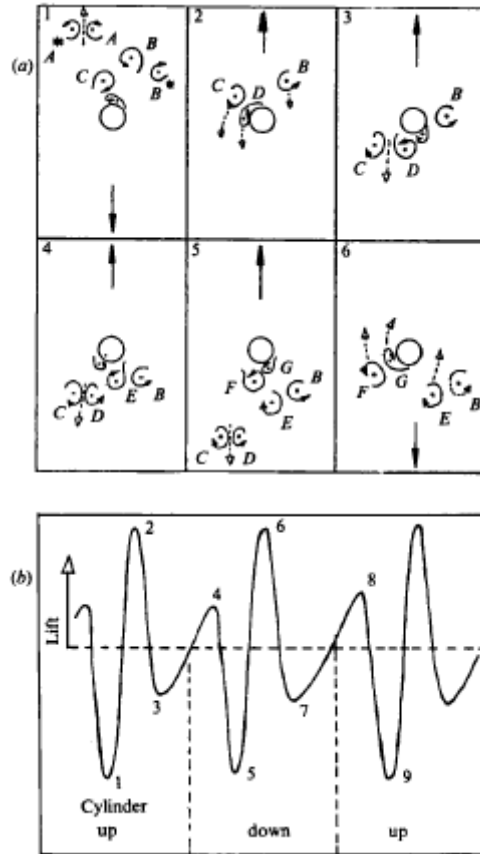


Σχήμα 57: Οπτικοποίηση αυτής της κατάστασης ροής.

Τρία ζεύγη ($24 < K_c < 32$) και τέσσερα ζεύγη δινών ($32 < K_c < 40$)

Όσο το πλάτος ταλάντωσης αυξάνεται ακόμα περισσότερο, τόσο μεγαλώνει ο αριθμός εκλυόμενων δινών σε κάθε μισό κύκλο. Για $24 < K_c < 32$ γενικά εκλύονται τρεις δίνες σε κάθε μισό κύκλο. Στην εικόνα 58(α) βλέπουμε ότι σχηματίζονται τρία ζεύγη δινών σε κάθε μισό κύκλο προκαλώντας έτσι την ταλάντωση της ακουστικής δύναμης που φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 11(β). Στο (1) οι δίνες A και B που έχουν εκλυθεί σε αυτόν το μισό κύκλο δημιουργούν ζεύγη με τις δίνες A* και B* που εκλύθηκαν στον προηγούμενο μισό κύκλο. Καθώς ο κύλινδρος αλλάζει κατεύθυνση στο (2), η δίνη C σχηματίζει ζεύγος με την D και

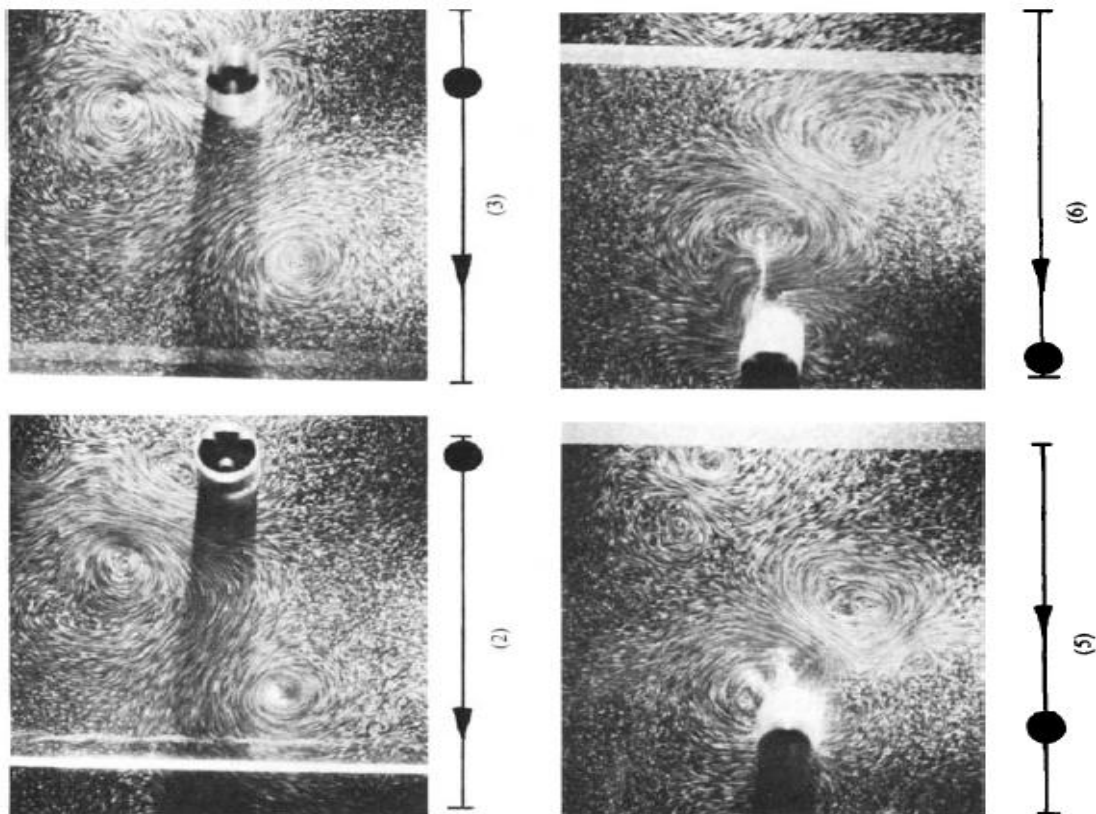
όταν η δίνη B από το προηγούμενο μισό κύκλο περνάει από τον κύλινδρο στα (3) και (4) σχηματίζει ζεύγος με την δίνη E. Στα (5) και (6) καθώς η ροή αντιστρέφεται ξανά, η δίνη F σχηματίζει ζεύγος ταιριάζει με τη G στο καινούργιο μισό κύκλο πλέον. Ο σχηματισμός και η κίνηση κάθε μεγάλης δίνης προκαλεί ακρότατα στην ανωστική δύναμη.



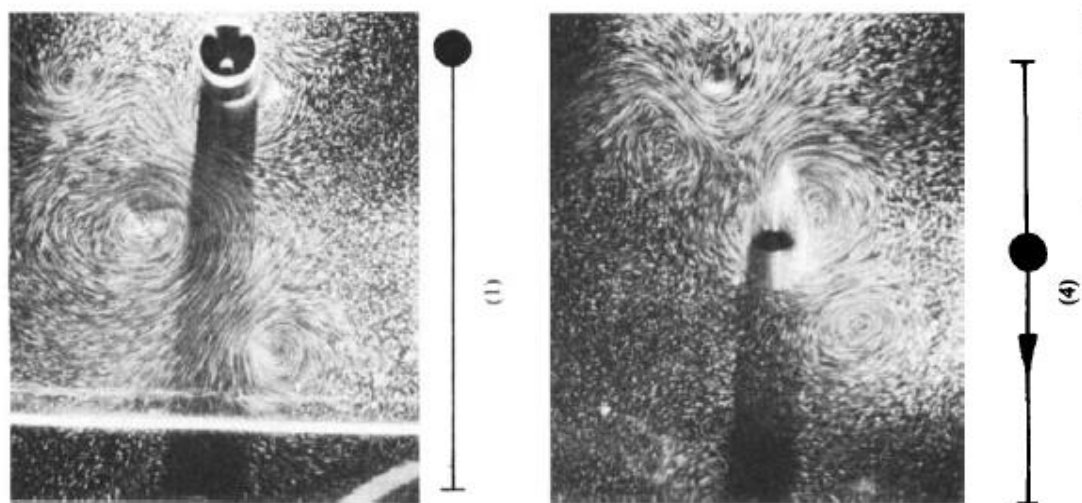
Σχήμα 58: Σχηματισμός δινών και αναπαράσταση της ανωστικής δύναμης.

Για παράδειγμα η ανάπτυξη και ο σχηματισμός των δινών D, E και F προκαλεί τα ακρότατα 1,2 και 3 αντίστοιχα. Η επιστροφή της F προς τον κύλινδρο προκαλεί το μέγιστο στο 4 ακολουθούμενο από το ελάχιστο στο 5 εξαιτίας του σχηματισμού της δίνης G κλπ.

Οπτικοποίηση της ροής για ένα μισό κύκλο φαίνεται στην εικόνα 58, όταν ο κύλινδρος κινείται από τα δεξιά προς τ' αριστερά. Η αλληλουχία των φωτογραφιών δείχνει το σχηματισμό ενός ζεύγους στα (2) και (3) από την πάνω πλευρά, άλλον ένα σχηματισμό από το κάτω μέρος αυτή τη φορά στα (4) και (5) και μια τρίτη έκλυση δίνης από την πάνω πλευρά κοντά στον κύλινδρο στα (5) και (6).



Σχήμα 59: Οπτικοποίηση ζευγών δινών.



Σχήμα 60: Οπτικοποίηση ζευγών δινών.

Για $32 < K_c < 40$ δημιουργούνται 4 ζεύγη δινών σε έναν πλήρη κύκλο, και η άνωση έχει συχνότητα πενταπλάσια της συχνότητας της ροής. Το τί συμβαίνει γι' αυτές τις τιμές του K_c φαίνεται στις εικόνες 59,60. Κάθε δίνη που σημειώνεται με αστερίσκο, όπως η A^* από τον προηγούμενο μισό κύκλο σχηματίζει ζεύγος με δίνη του παρόντος μισού κύκλου, όπως η A . Βέβαια, για μεγαλύτερα πλάτη ροής αυτό το μοτίβο γίνεται λιγότερο επαναλήψιμο.

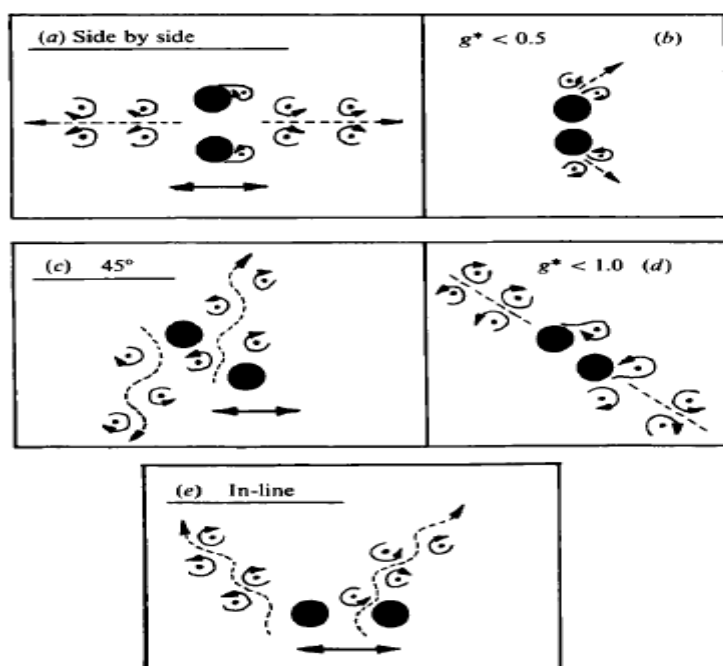
Όσον αφορά τις περιπτώσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, γενικά μόνο οι δίνες του προηγούμενου και του παρόντος μισού κύκλου ασκούν σημαντικές δυνάμεις στον κύλινδρο. Αυτό συμβαίνει γιατί οι δίνες (σχηματίζοντας ζεύγη, πχ) απομακρύνονται από την περιοχή του κυλίνδρου.

Επίσης, δεν είναι γνωστό πώς αυτά τα μοτίβα δινών για μονό κύλινδρο επηρεάζονται από τον αριθμό Reynolds, αν και αναμένεται να παραμένουν λίγο-πολύ ίδια για υποκρίσιμους Re. Προς το παρόν, όμως, δεν υπάρχουν στοιχεία που να δείχνουν πως αυτό συμβαίνει και για υπερκρίσιμους Re.

Υδροδυναμικά φαινόμενα για ζεύγος κυλίνδρων

Εγκάρσιος δρόμος δινών / μονό ζεύγος δινών ($7 < K_c < 15$)

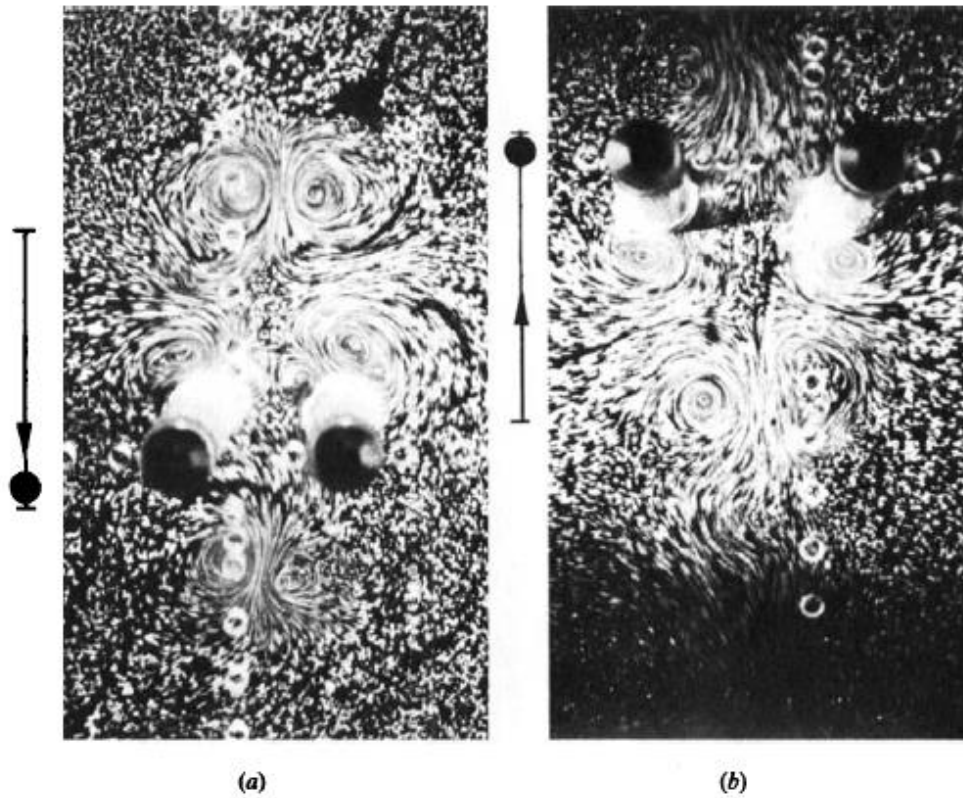
Όταν οι δύο κύλινδροι είναι ο ένας πίσω απ' τον άλλον, η έκλυση δινών απ' αυτούς γίνεται γενικά σε φάση. Αν όμως ο ένας είναι σε γωνία 45° ως προς τον άλλον ή βρίσκεται δίπλα του, η έκλυση δινών απ' τους δύο κυλίνδρους γίνεται συνήθως με διαφορά 180° . Και στις τρεις περιπτώσεις, όταν η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων είναι αρκετά μικρή ($g^* < 0.5$) η ροή γύρω τους είναι σχεδόν όμοια μ' αυτήν που προκαλείται από ένα μεμονωμένο, μεγαλύτερο στερεό σώμα. Τυπικά μοτίβα ροής φαίνονται στην εικόνα 60.



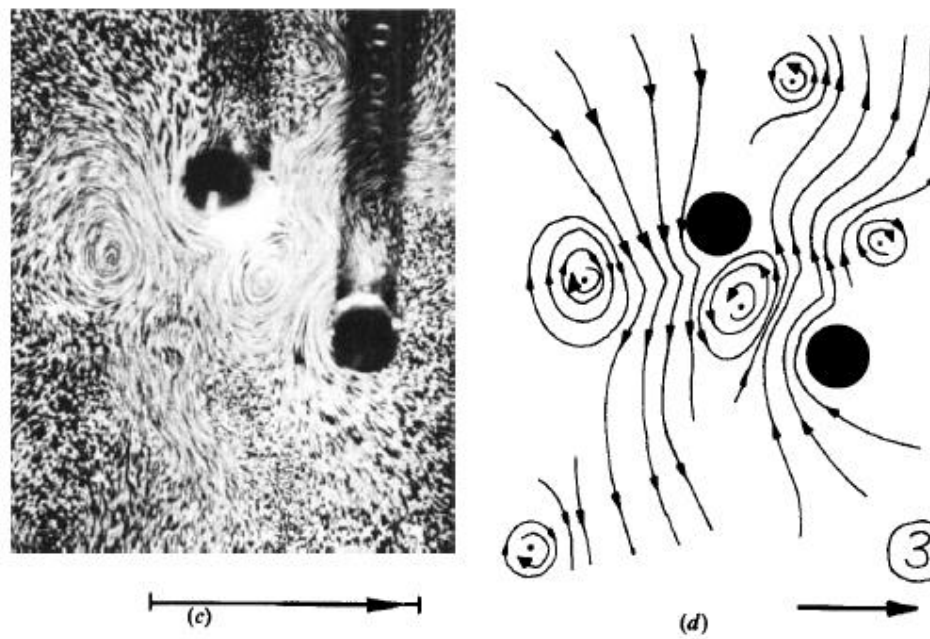
Σχήμα 61:Τυπικά μοτίβα ροής δινών.

Στην περίπτωση (α) βλέπουμε τον ομόρου δυο κυλίνδρων τοποθετημένων δίπλα-δίπλα, που αποτελείται από ζεύγη δινών απομακρυνόμενων από την τοπική περιοχή των κυλίνδρων παράλληλα με την κατεύθυνση της ταλάντωσης. Η ταυτόχρονη έκλυση δύο μεγάλων δινών από τις πλευρές των κυλίνδρων που «βλέπουν» το κενό μεταξύ τους σε κάθε μισό κύκλο σχηματίζει ένα ζεύγος δινών, ένα εξαιρετικά επαναλαμβανόμενο φαινόμενο. Αυτό ο ομόρους είναι πολύ διαφορετικός από τον εγκάρσιο ομόρου από μεμονωμένο κύλινδρο για τα ίδια πλάτη ροής. Ο σχηματισμός τέτοιων συμμετρικών ζευγών

από το κενό μεταξύ τους φαίνεται από την οπτικοποίηση της ροής στις εικόνες 62 (α) και (β) για $K_c = 14$.



Σχήμα 62: Ημιτονοειδής ροή σε σχέση με τους κυκλικούς κυλίνδρους για $KC=14$.



Σχήμα 63: Ημιτονοειδής ροή σε σχέση με τους κυκλικούς κυλίνδρους (c),(d).

Στο (α), $g^*=1.5$ και οι κύλινδροι κινούνται προς τα κάτω (η φωτογραφία έχει παρθεί λίγο μετά την έναρξη των ταλαντώσεων) και φαίνεται καθαρά ένα ζεύγος δινών πάνω από τους κυλίνδρους ν' απομακρύνεται προς τα πάνω κι ένα άλλο ζεύγος κάτω απ' τους κυλίνδρους ν' απομακρύνεται προς τα κάτω. Η ροή προς τους κυλίνδρους απ' τα πλάγια και μακριά απ' αυτούς κυλίνδρους παράλληλα στην κατεύθυνση ταλάντωσης φαίνεται στο (β) για $g^*=2.0$ μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων. Για πολύ μικρά κενά μεταξύ των κυλίνδρων στην εικόνα 62(b) το ζεύγος των κυλίνδρων συμπεριφέρεται σαν ένα, μεγαλύτερο σώμα, με έκλυση ζευγών μικρών δινών κατά την αντιστροφή της ροής απ' τις εξωτερικές πλευρές των κυλίνδρων.

Για δύο κυλίνδρους σε γωνία 45° , η έκλυση δινών γίνεται με διαφορά 180° για $1.0 < g^* < 3.0$. Ο ομόρους φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 63(c), όπου οι δίνες απομακρύνονται από τους κυλίνδρους με τη μορφή δύο εγκάρσιων δρόμων δινών με αντίθετες κατευθύνσεις. Φωτογραφία του ομόρου αυτού φαίνεται στο εικόνα 63(c) για $K_c=14$ όταν οι κύλινδροι έχουν μετακινηθεί από τ' αριστερά προς τα δεξιά κοντά στο τέλος ενός ημικύκλου. Στο (d) φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων για το (c), όπου διακρίνονται δύο πίδακες που ρέουν σε αντίθετες κατευθύνσεις, και οι δύο κάθετες στην διεύθυνση της ταλάντωσης. Όταν το g^* γίνεται μικρότερο από 1.0 στην εικόνα 63(d), έχουμε μια σημαντική αλλαγή, καθώς ο ομόρους μετατρέπεται σε μια σειρά από ζεύγη δινών που απομακρύνονται απ' την περιοχή των κυλίνδρων σε γωνία 45° ως προς τη διεύθυνση της ταλάντωσης. Αυτός ο ομόρους με τις διπλές δίνες κυριαρχεί για μέτριες αποστάσεις μεταξύ των κυλίνδρων μέχρι και για αναπάντεχα μεγάλα πλάτη ροής (περίπου $K_c=30$) και προκαλεί μεγάλα μέγιστα στην ανωστική δύναμη επί κάθε κύλινδρο.

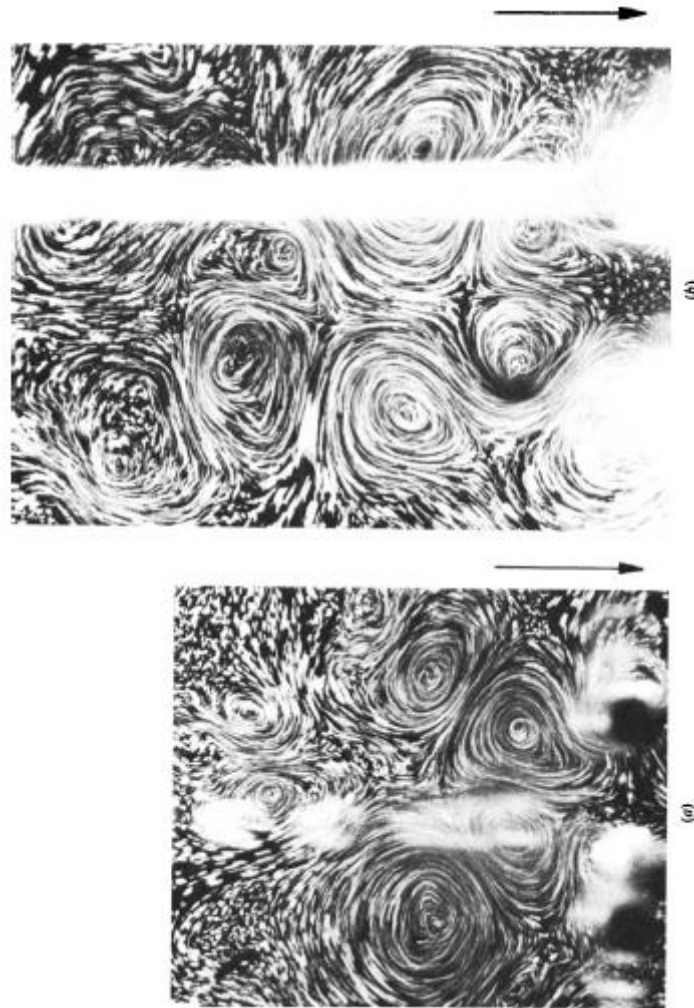
Στην περίπτωση όπου έχουμε δύο κυλίνδρους τον έναν πίσω απ' τον άλλον (ως προς την κατεύθυνση της ροής) η έκλυση των δινών γίνεται περίπου σε φάση για $g^* < 4$, οπότε ο ομόρους αποτελείται από 2 εγκάρσιους δρόμους δινών που κινούνται προς τα πλάγια – εικ.63(c). Όσο το g^* μειώνεται, η έκλυση δίνης στον κατάντι κύλινδρο σε κάθε μισό κύκλο προπορεύεται ελαφρά της έκλυσης στον ανάντι κύλινδρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι δύο δρόμοι δινών από κάθε κύλινδρο να έχουν γωνία μεταξύ τους. Στην εικόνα 63(a), οι δύο δρόμοι δινών είναι παράλληλοι μεταξύ τους και κάθετοι στην διεύθυνση ταλάντωσης. Όσο το κενό μεταξύ των κυλίνδρων μειώνεται στα (b) και (c) οι δρόμοι δινών αρχίζουν να σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους. Αυτό είναι παρόμοιο με την περίπτωση που οι κύλινδροι είναι δίπλα-δίπλα. Για πολύ μικρά κενά, η έκλυση δινών σε κάθε μισό κύκλο γίνεται μόνο στο πίσω μέρος του κατάντι κυλίνδρου, και δεν εμφανίζεται κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο δινών.

Συμπεριφορά της ροής για $K_c > 15$

Δυο κύλινδροι δίπλα-δίπλα

Όταν οι κύλινδροι τοποθετούνται δίπλα-δίπλα οι δίνες γενικά εκλύονται με διαφορά φάσης 180° για όλα τα πλάτη που εξετάστηκαν (μέχρι και $K_c = 55$) με $g^* < 4.0$. Για παράδειγμα, στις φωτογραφίες της ροής στην εικόνα (α) και (β) για $K_c = 24$ και $K_c = 54$

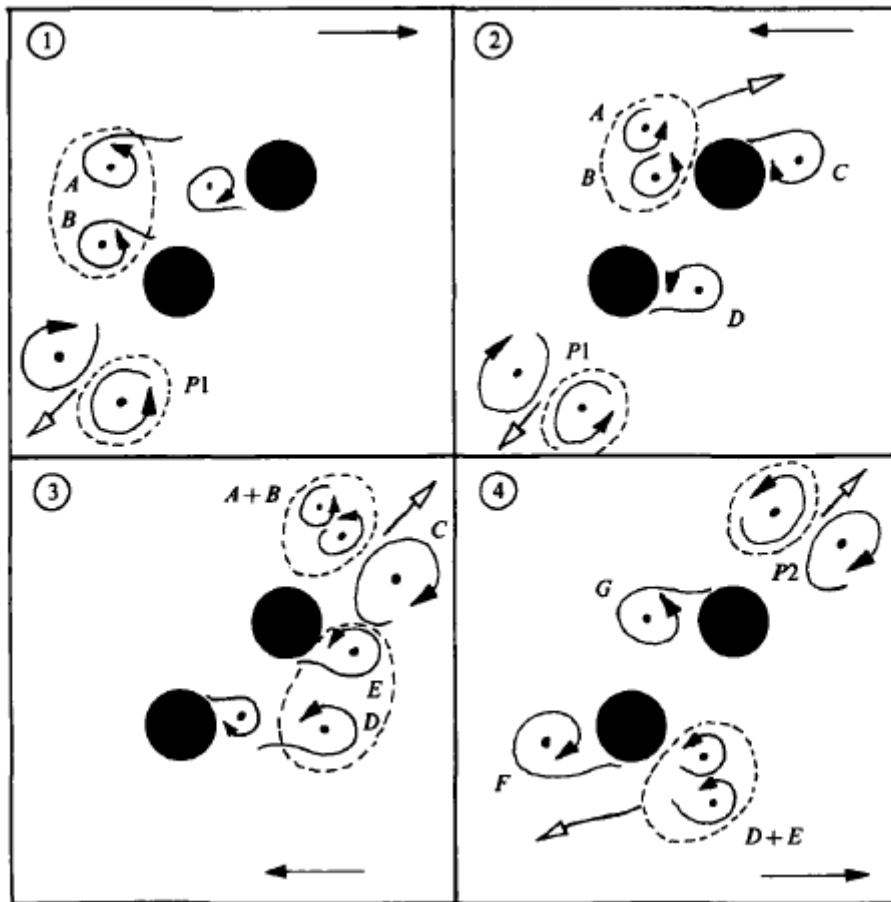
αντίστοιχα φαίνεται ότι οι ομόροι των μισών κύκλων είναι συμμετρικοί ως προς τη γραμμή που διχοτομεί την απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων). Σε κάθε μισό κύκλο, για τέτοιες διαμορφώσεις, πρώτα ένα μικρό ζεύγος δινών φεύγει απ' το κενό μεταξύ των κυλίνδρων και ακολουθείται έπειτα από άλλα ζεύγη δινών. Αυτό το ζευγάρι μπορεί να συμβεί μεταξύ δινών του προηγούμενου μισού κύκλου με δίνες του επόμενου μισού κύκλου απ' το εξωτερικό μέρος των κυλίνδρων. Για μεγαλύτερα πλάτη ροής απ' αυτά που εξετάστηκαν εδώ, η έκλυση δινών γίνεται περίπου όπως και για κυλίνδρους σε σταθερή ροή, όπου μικρά διάκενα έχουν σαν συνέπεια ασυμμετρίες στον ομόρου. Όταν το διάκενο γίνει αρκετά μικρό, δημιουργείται ενιαίος ομόρους ο οποίος μοιάζει με δρόμο δινών Karman.



Σχήμα 64: Δύο κύλινδροι δίπλα δίπλα (a) $K_C=24$, (b) $K_C=54$.

Δύο κύλινδροι με μεταξύ τους γωνία 45°

Στην περίπτωση αυτή δεν φαίνεται να εμφανίζονται κυρίαρχα μοτίβα δινών για $K_c > 15$ και διάκενα μεγαλύτερα από $g^*=2.0$. Βέβαια, για μικρότερα κενά εμφανίζεται διπλό ζεύγος δινών για $7 < K_c < 30$ (Για $K_c < 15$, τέτοιο είδος ομόρου έχουμε όταν $g^* < 1.0$). Αυτός ο ομόρους με το διπλό ζεύγος δινών συντίθεται απ' τους ομόρους του κάθε κυλίνδρου, μέσω της δημιουργίας ζεύγους και της ένωσης δύο δινών ίδιου προσήμου σε κάθε μισό κύκλο, όπως φαίνεται στην εικόνα 65.



Σχήμα 65: Δύο κύλινδροι με μεταξύ τους γωνία 45ο για $KC > 15$.

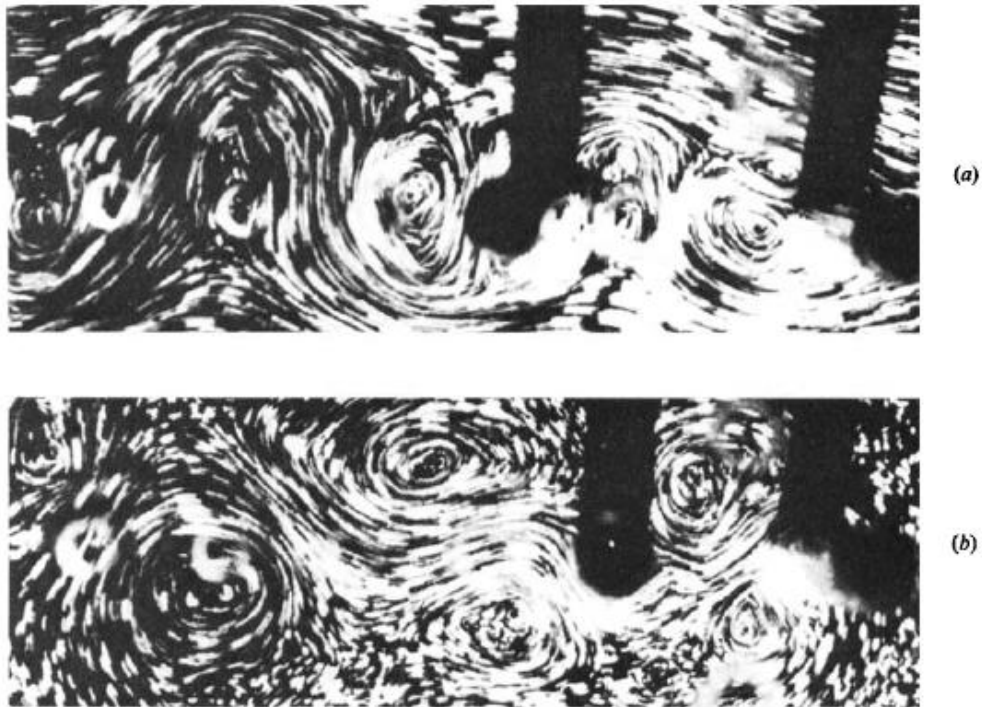
Οι δίνες παρατηρούνται σε σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με τους κυλίνδρους. Στο (1), όταν οι κύλινδροι κινούνται δεξιά, οι δύο δίνες A και B εκλύονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και ζευγαρώνουν στο (2), καθώς η ροή αντιστρέφεται, σχηματίζοντας μια μεγάλη δίνη. Αυτή η δίνη (A + B) περνά πάνω δεξιά από τον επάνω κύλινδρο στα (2) και (3) κάνοντας να αναπτυχθεί μια μεγάλη δίνη C. Στο τέλος αυτού του μισού κύκλου στο (3) η δίνη C έχει ζευγαρώσει με την (A+B) δίνη και απομακρύνεται γρήγορα παράλληλα στη γραμμή που ενώνει τα κέντρα των κυλίνδρων. Αυτό το ζεύγος που σημειώνεται σαν P2 στο (4) είναι μεγαλύτερο από αυτό που συσχετίζεται με έναν κύλινδρο μόνο και είναι παρόμοιο με το ζεύγος σημειωμένο σαν P1 που σχηματίστηκε μισό κύκλο νωρίτερα και το οποίο απομακρύνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τέλος, στο (4), το ζευγάρι της δίνης F με τις συγχωνευμένες δίνες (D+E) θα σχηματίσει ένα ζεύγος παρόμοιο του P2 και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Δυο κύλινδροι σε σειρά

Όταν είχαμε εγκάρσιο δρόμο δινών, η αποβολή δινών γινόταν εν φάση, με μεγάλη επαναληψιμότητα, όταν οι δύο κύλινδροι βρίσκονται ο ένας πίσω απ' τον άλλον. Για $15 < K_c$

< 24 , τείνει να σχηματιστεί, εν φάση, ένα διπλό ζεύγος δινών μεταξύ των κυλίνδρων για $g^*=2.0-4.0$ αλλά με μικρότερη επαναληψιμότητα. Με το σχετικό πλάτος ροής v' αυξάνεται ακόμα περισσότερο, ο ομόρους κάθε μισού κύκλου μετατρέπεται σε έναν μικρού μήκους δρόμο δινών Karman, σαν να οφειλόταν σε μεμονωμένο κύλινδρο. Για πολύ μικρά διάκενα, ο κύριος ομόρους σχηματίζεται στο πίσω μέρος του κατάντι κυλίνδρου, αλλιώς οι δίνες που προκαλεί ο ανάντι κύλινδρος ρέουν γύρω από τον κατάντι κύλινδρο, σχηματίζοντας τη βάση του κατάντι ομόρου σε κάθε μισό κύκλο.

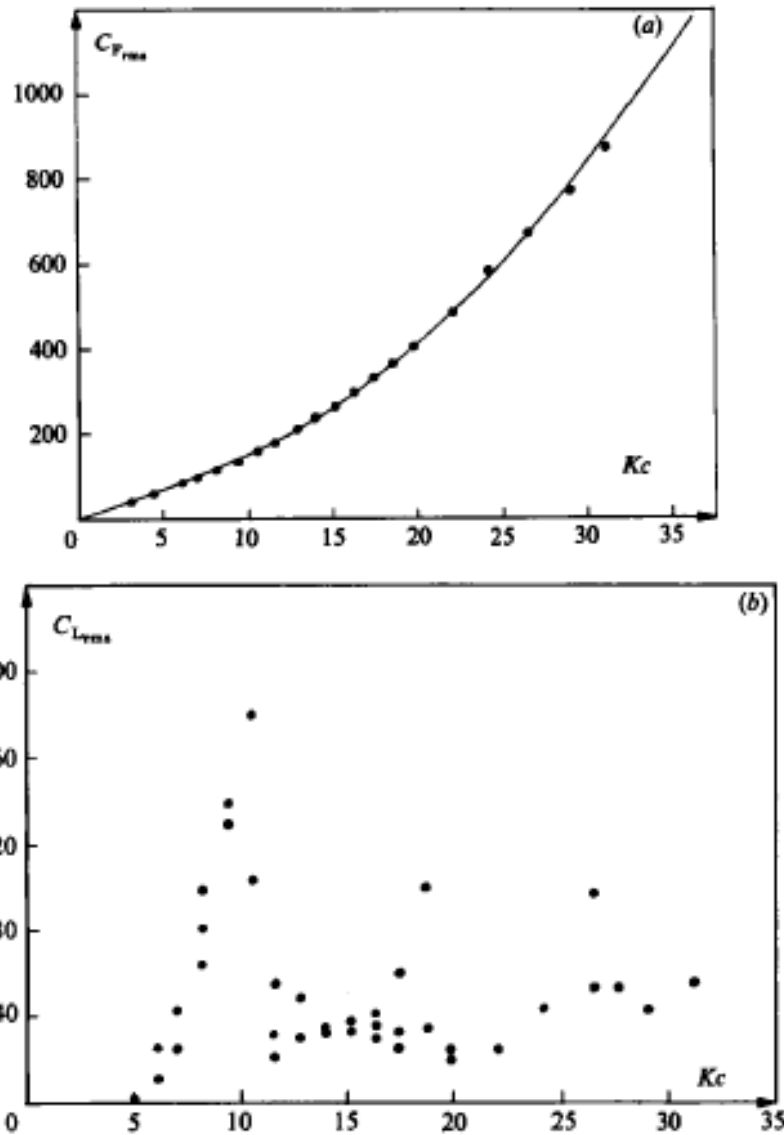
Στην εικόνα 66, το σύστημα αναφοράς για την οπτικοποίηση της ροής είναι σταθερό σε σχέση με τους κυλίνδρους. Στο (α) οι κύλινδροι κινούνται από τ' αριστερά προς τα δεξιά και στο (β) είμαστε κοντά στο τέλος ενός μισού κύκλου. Οι δίνες που σχηματίζονται εναλλάξ πίσω από τον ανάντι κύλινδρο και στις δύο φωτογραφίες μοιάζουν με τον ομόρου που θα σχηματιζόταν αν έλειπε ο κατάντι κύλινδρος.



Σχήμα 66: Δυο κύλινδροι σε σειρά για $15 < KC < 24$.

4. Συντελεστές δυνάμεων (για μεμονωμένο κύλινδρο)

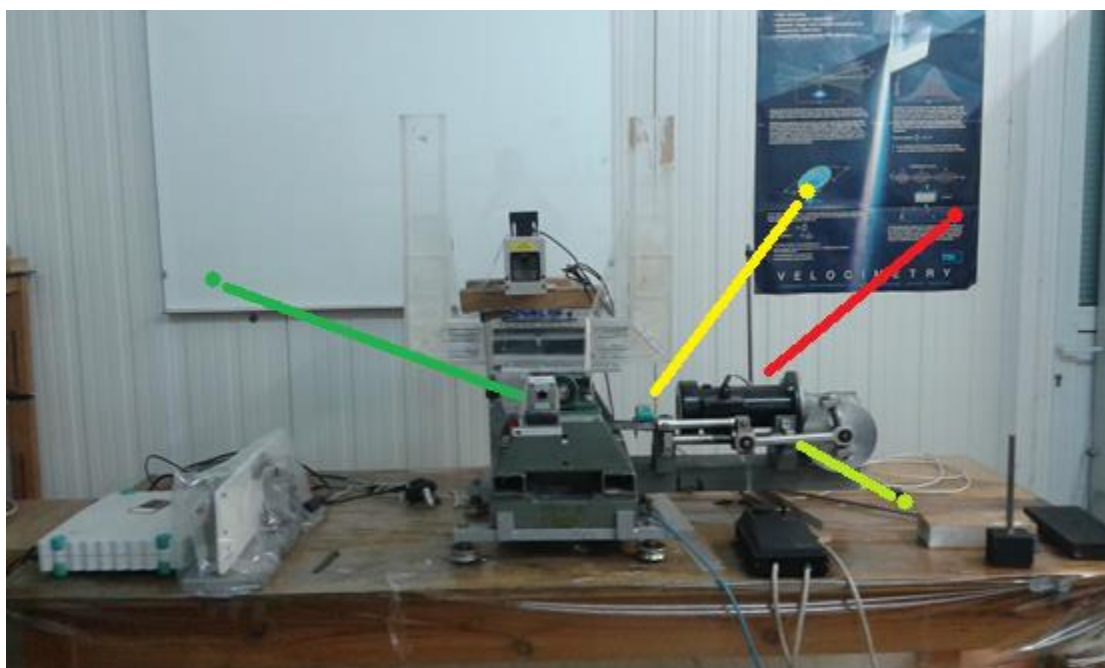
Η αντίσταση μπορεί να προσεγγιστεί πολύ καλά (εικόνα 67(a)) από την εξίσωση $C_{F_{rms}}=[160Kc^2+0.69Kc^4]^{1/2}$. Η δε άνωση οφείλεται αποκλειστικά στην ασύμμετρη ανάπτυξη και κίνηση των δινών. Η εξάρτηση του συντελεστή άνωσης από το Kc φαίνεται στο Σχήμα 22β. Τα 3 μέγιστα για Kc περίπου 11, 18 και 26 πιθανότατα οφείλονται στην αύξηση της επαναληψιμότητας στην έκλυση δινών. Κάθε μέγιστο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μοτίβο δινών, στην περίπτωση μας το μονό, διπλό και τριπλό ζεύγος αντίστοιχα.



Σχήμα 67: Προσέγγιση συντελεστών αντίστασης C_L, C_F συναρτήσει του Kc .

Στο επάνω τμήμα της βάσης του δοχείου υπάρχει παράθυρο διαστάσεων $14 \times 4 \text{ cm}^2$, όπου υπάρχει βαλβίδα για την απομάκρυνση τυχόν εγκλωβισμένου αέρα.

Το δοχείο ανεστραμμένου Π είναι τοποθετημένο σε τράπεζα της οποίας η κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο μεταβάλλεται αρμονικά με τον χρόνο με τη βοήθεια οδοντωτού τροχού προσαρμοσμένου σε οδοντωτό κανόνα. Ο κανόνας αυτός εκτελεί παλινδρομική κίνηση μέσω ηλεκτροκινητήρα μεταβλητών στροφών και διωστήρα. Το πλάτος της ταλάντωσης του οδοντωτού κανόνα και επομένως του πλάτους της γωνίας στροφής του δοχείου ελέγχεται μεταβάλλοντας κατά βούληση την εκκεντρότητα του διωστήρα.



Σχήμα 69: Δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π από Plexiglas

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται με ανοιχτή πράσινη γραμμή ο διωστήρας ενώ με την σκούρα πράσινη γραμμή φαίνεται η βάση της κάμερας που τοποθετήθηκε για την οπτικοποίηση της ροής. Στη συνέχεια με κίτρινη γραμμή απεικονίζεται ο αισθητήρας Varikont και τέλος στην κόκκινη γραμμή φαίνεται ο κινητήρας.

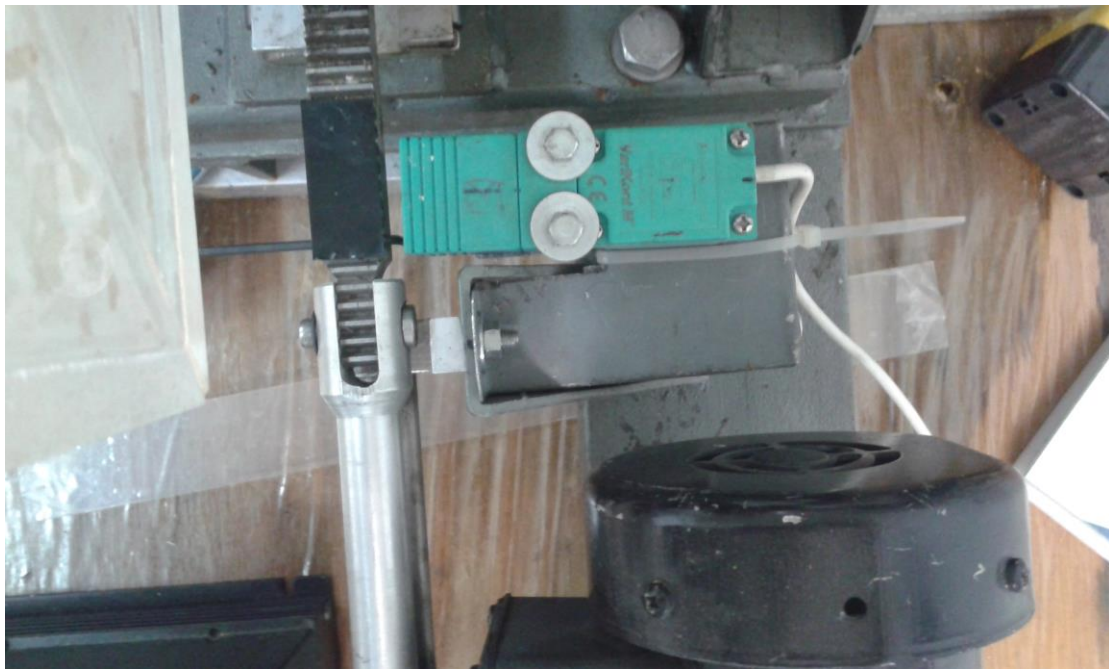
Όργανα μετρήσεων

Επαγωγικός Αναλογικός Αισθητήρας θέσης (IA8-M1K-I3)

Ο αναλογικός αισθητήρας θέσης Varikont της εταιρίας Pepperl+Fuchs, ο οποίος είναι ακίνητος, μετατρέπει την απόσταση του από ένα μεταλλικό αντικείμενο που είναι τοποθετημένο στον κινούμενο οδοντωτό κανόνα σε ένα αναλογικό σήμα εξόδου.

Η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτή των αναλογικών αισθητήρων προσέγγισης, όπου ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο εκπέμπεται από την ενεργούσα επιφάνεια του αισθητήρα. Αυτό προκαλεί ρεύμα αυτεπαγωγής όπου παράγεται κάθε φορά που ένα ηλεκτρικά αγώγιμο αντικείμενο πλησιάζει τον αισθητήρα.

Με τον αισθητήρα αυτό και το αναλογικό σήμα εξόδου του καθίσταται εφικτή η καταγραφή της κίνησης του οδοντωτού κανόνα και επομένως της κίνησης του δοχείου συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 70: Επαγωγικός Αναλογικός Αισθητήρας θέσης (IA8-M1K-I3)

Τροφοδοτικό STATRON (No 0103013) του αισθητήρα θέσης

Η παροχή συνεχούς τάσης, από 15 έως 30 V , για τη λειτουργία του αισθητήρα θέσης Varikont εξασφαλίστηκε από το τροφοδοτικό STATRON, το οποίο ήταν ρυθμισμένο στα 24V



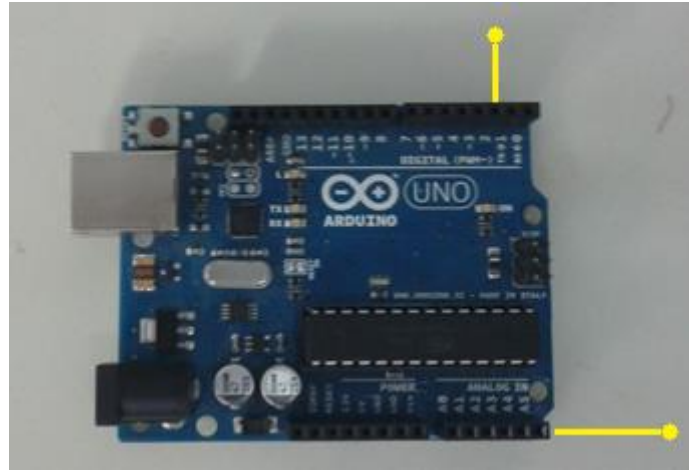
Σχήμα 71: Τροφοδοτικό STATRON (No 0103013) του αισθητήρα θέσης

Μέθοδος triggering μέσω Arduino

Το Arduino είναι μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα, με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία προγραμματίζεται σε γλώσσα C++ .

Το Arduino χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και για να συνδέεται με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων.

Στη παρούσα πειραματική διάταξη το Arduino έχει προγραμματιστεί να διαβάζει την τάση από τον αισθητήρα θέσης Varikonit και ανάλογα με την τάση αυτή (άρα και τη θέση του ολισθητή) να στέλνει σήμα triggering στη γεννήτρια παλμών ώστε το σύστημα PIV να παίρνει ζεύγος εικόνων σε συγκεκριμένη φάση της περιοδικής κίνησης του δοχείου. Συνολικά για κάθε φάση λαμβάνονται 100 ζεύγη εικόνων βάσει των οποίων έγινε ο υπολογισμός του μέσου πεδίου ροής για τη συγκεκριμένη φάση.



Σχήμα 72: Συσσκευή Arduino

Στην παραπάνω εικόνα η οριζόντια γραμμή δείχνει την αναλογική θύρα εισόδου pin A5 και συνεχίζοντας η κάθετη γραμμή δείχνει την ψηφιακή θύρα εξόδου pin2.



Figure 73 : Γεννήτρια παλμών , Laser Controller

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται μία γεννήτρια παλμών που βρίσκεται τοποθετημένη πάνω σε έναν laser controller. Συνεχίζοντας, το καλώδιο που βρίσκεται συνδεδεμένο στην γεννήτρια παλμών κάτω αριστερά, έρχεται από τη θύρα pin2 του Arduino και προκαλείται external triggering στην γεννήτρια παλμών. Με αυτόν τον τρόπο η γεννήτρια παλμών σε συνδυασμό με τον laser controller που βρίσκεται από κάτω, θέτει σε λειτουργία το laser του συστήματος PIV.

Μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV)

Το πεδίο ροής καταγράφηκε στο πλάγιο επίπεδο του δοχείου σχήματος Π, με τη χρήση συστήματος 2D-PIV της εταιρείας Oxford Lasers.

Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV) είναι μια οπτική μέθοδος απεικόνισης ροής που χρησιμοποιείται στην εκπαίδευση και την έρευνα. Χρησιμοποιείται για να λάβει στιγμιαίες μετρήσεις ταχύτητας. Η μέθοδος αποτελεί μια μη επεμβατική τεχνική μέτρησης της ταχύτητας του ρευστού, ταυτόχρονα σε πλήθος σημείων ενός επιπέδου. Οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας στο ίδιο επίπεδο προσδιορίζονται από την ανάλυση ζεύγους ψηφιακών εικόνων στις οποίες καταγράφεται η κίνηση γυάλινων σωματιδίων που εμπεριέχονται στο εργαζόμενο μέσο, ακολουθούν πιστά τη δυναμική της ροής και καθίστανται ορατά από φύλλο φωτός.

Τα γυάλινα σωματίδια, σφαιρικού σχήματος, έχουν μέση διάμετρο 10μm και λειτουργούν ως σκεδαστές φωτός. Η πυκνότητά τους είναι προσεγγιστικά ίση με του εργαζόμενου μέσου, με αποτέλεσμα να αιωρούνται και να μην καθιζάνουν.

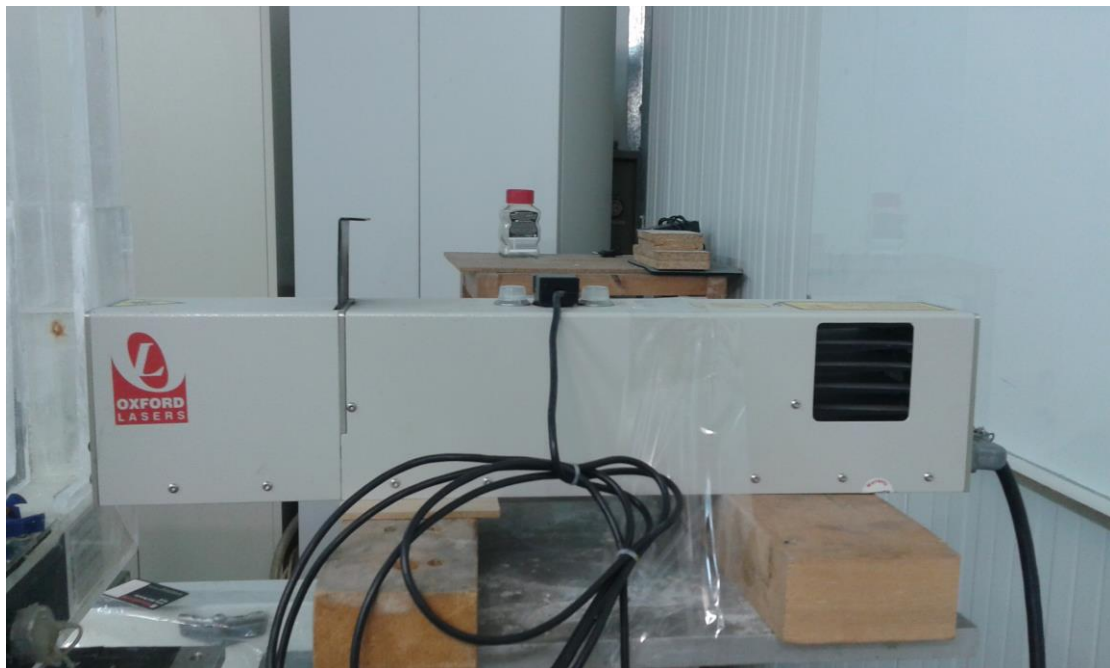


Σχήμα 74: Γυάλινα σωματίδια σφαιρικού σώματος.

Το φύλλο φωτός παράγεται από πηγή παλλόμενου laser, μήκους κύματος 808nm και βρίσκεται εκτός του ορατού φάσματος του φωτός. Στο διάστημα μεταξύ δύο αναλαμπών του laser επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα 200ms. Υπενθυμίζεται ότι η εκπομπή του φωτός από το Laser γίνονταν όταν το ARDUINO έστειλε σήμα στο σύστημα PIV.



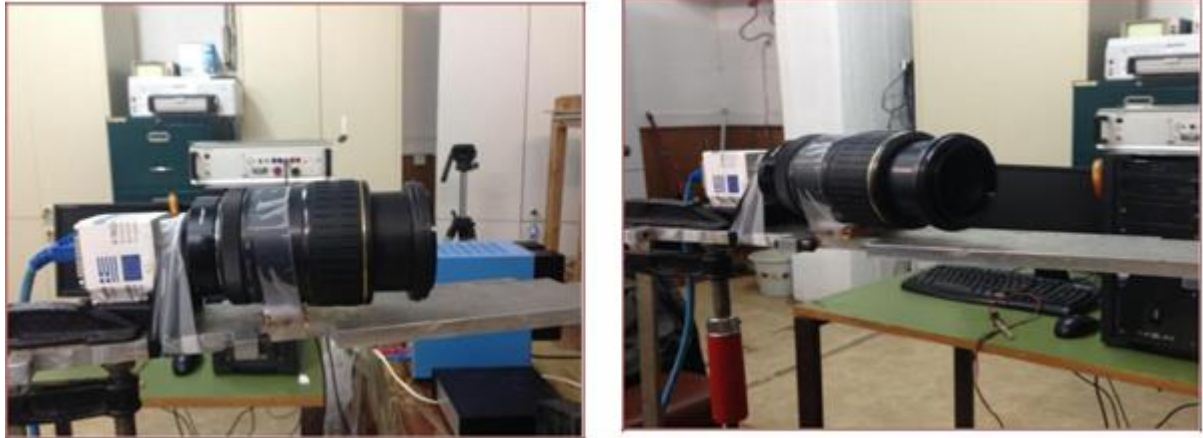
Σχήμα 75: Πρόοψη του laser.



Σχήμα 76: Πλάγια όψη του laser.

Για την καταγραφή των εικόνων χρησιμοποιείται κάμερα CCD (Charge Coupled Device), η οποία επιτρέπει τη λήψη έως και 6 ζευγών/δευτερόλεπτο σε συνδυασμό με macro φακό (Camron) για μεγέθυνση. Σα δεδομένα μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου υπόκεινται σε ψηφιακή επεξεργασία με τη βοήθεια του λογισμικού VidPIV v4.6 όπου τελικά πραγματοποιείται η εξαγωγή των διανυσμάτων της ταχύτητας του ρευστού. Η λεπτομερής διαδικασία επεξεργασίας των εικόνων καθώς και εξαγωγής και βελτιστοποίησης των διανυσμάτων γίνεται με τη βοήθεια του MATLAB.

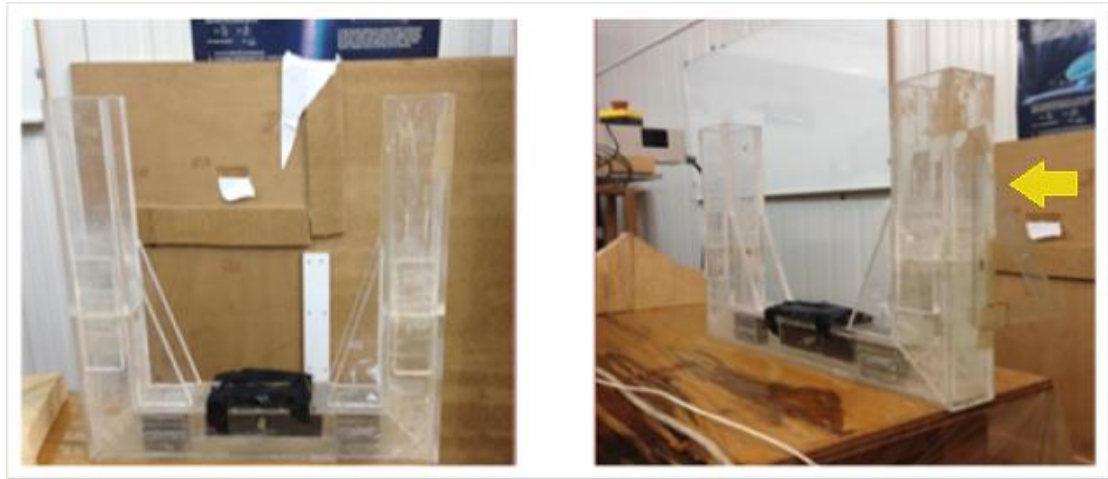
Επιπλέον, όσον αφορά το σύστημα PIV η εικόνα μας ήταν 1392 x 1024 pixels και 46 x 32 “τετραγωνάκια” (πλάτος x ύψος, με το κάθε “τετραγωνάκι” να είναι 32 x 32), που αντιστοιχούν σε πλάτος 33.2 mm και ύψος 24 mm. Άρα ένα “τετραγωνάκι” έχει πλευρά $33.2/46=0.75$ mm. Τέλος, ο αριθμός των εικόνων για τον υπολογισμό του μέσου πεδίου ροής ήταν 100 εικόνες για κάθε φάση.



Σχήμα 77: Κάμερα CCD

Υπολογισμός αριθμού Keulegan-Carpenter (KC)

Για τον υπολογισμό του KC είναι απαραίτητα τα πλάτη ταλάντωσης του νερού. Για το λόγο αυτό στο δεξί σκέλος του δοχείου τοποθετήθηκε μετρητικός κανόνας για τον υπολογισμό του πλάτους ταλάντωσης (εικόνα 3-4 πλάγια όψη δοχείου με κίτρινο βέλος). Μέσω οπτικής παρατήρησης καταγράφονταν οι ακρότατες θέσεις της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (h_{max} και h_{min}) και επομένως του πλάτους ταλάντωσής της A .



Σχήμα 78: Μετρητικός κανόνας στο δεξί σκέλος του δοχείου.

Ο ΚC για να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής υπολογίστηκε από τη μέση τιμή 10 διαδοχικών πλατών, έτσι:

$$H = 1/10 [(h_{\max 1} - h_{\min 1})/2 + \dots + (h_{\max 10} - h_{\min 2})/2]$$

Έτσι ο ΚC μπορεί να υπολογιστεί πλέον αφού εξ ορισμού διατυπώνεται ως εξής:

$$KC = (U \cdot T)/D = (\omega \cdot H)/(D \cdot f) = (2 \cdot \pi \cdot H)/D$$

Στον παραπάνω τύπο έχουμε

- 1) το U είναι το πλάτος της ταχύτητας της ροής
- 2) την περίοδο ταλάντωσης T
- 3) την διάμετρο D του κυλίνδρου

Στη συνέχεια είναι αναγκαίος και ο υπολογισμός της παραμέτρου β η οποία συμβολίζει τον αριθμό Stokes σύμφωνα με την ονοματολογία του Sarpkaya (1986). Έτσι:

$$\beta = Re/KC = D^2/T \cdot \nu$$

Στην συνέχεια αναλύονται οι παραπάνω συμβολισμοί:

- 1)Re: αριθμός Reynolds
- 2)KC: αριθμός Keulegan-Carpenter
- 3)T: περίοδος ταλάντωσης
- 4) ν : κινηματική συνεκτικότητα του νερού ($\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$)

Επιπλέον ισχύει ότι $x=A\sin\omega t$. Παραγωγίζοντας τη συγκεκριμένη σχέση προκύπτει ότι $v=A\omega\cos\omega t$. Συνεπώς η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει για μέγιστο συνημίτονο, $\cos\omega t=1$. Έτσι τελικά προκύπτει η μέγιστη ταχύτητα $v = \omega A$.

Τρόπος επιλογής χρονικών στιγμών καταγραφής του πεδίου ροής

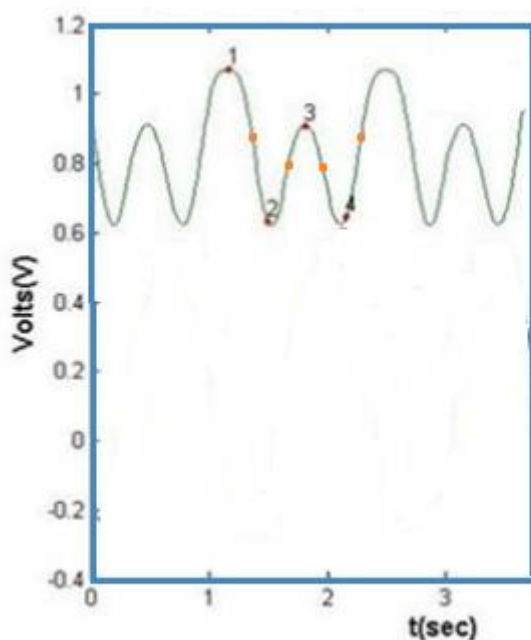


Figure 79: Ημιτονοειδής ταλάντωση του νερού

Παραπάνω φαίνεται το διάγραμμα τάσης του αισθητήρα θέσης Varikon. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων το νερό που βρίσκεται μέσα στο δοχείο εκτελεί μία ημιτονοειδή ταλάντωση. Στο σημείο 1 του σχήματος αντιστοιχεί η μέγιστη κλίση του δοχείου προς τα δεξιά, όπου έγινε οπτικοποίηση της ροής για τη χρονική στιγμή $t=0/8T=0 \text{ sec}$. Επιπλέον, στα σημεία 2 και 4 το δοχείο παρουσιάζει μηδενική κλίση. Οι λήψεις που πραγματοποιήθηκαν για τα σημεία 2 και 4 ήταν για $t=2/8T$ και $t=6/8T$ αντίστοιχα. Στο σημείο 3 το δοχείο παρουσιάζει μέγιστη κλίση προς τα αριστερά ενώ η οπτικοποίηση της ροής για το σημείο αυτό έγινε για τη χρονική στιγμή $t=4/8T$. Τέλος τα σημεία με πορτοκαλί χρώμα στο σχήμα είναι οι τιμές $t=1/8T, 3/8T, 5/8T, 7/8T$ είναι τιμές ενδιάμεσων θέσεων

για τις οποίες έγινε οπτικοποίηση. Συνολικά παρατηρούμε 8 διαφορετικούς χρόνους t_i που ταυτόχρονα μας οδήγησε στην επιλογή 8 φάσεων σε κάθε πείραμα.

Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

H (cm)	T (sec)	f (sec ⁻¹)	ω (rad/s)	KC	β	V_{max} (cm/sec)
3.140	2.016	0.496	3.114	19.72	49.603	9.781
4.007	1.688	0.592	3.720	25.16	59.241	14.907
5.452	1.448	0.690	4.336	34.24	69.060	23.647
6.745	1.336	0.748	4.700	42.36	74.850	31.709
5.865	1.200	0.833	5.233	36.83	83.333	30.695

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται συνολικά τα αποτελέσματα από τα 5 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η πρώτη στήλη αφορά στην μέγιστη στάθμη H του νερού κατά την διάρκεια της ταλάντωσης, η δεύτερη και η τρίτη είναι οι τιμές της περιόδου T και της συχνότητας f αντίστοιχα. Συνεχίζοντας, η τέταρτη στήλη αφορά την γωνιακή συχνότητα ω και η πέμπτη τους αριθμούς Keulegan Carpenter. Η παράμετρος β , που φαίνεται στην προτελευταία στήλη είναι ο λόγος Re/KC (όπου $Re = UD/\nu$ και $KC = UT/D$) και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της ροής. Τέλος, στην τελευταία στήλη φαίνεται η μέγιστη ταχύτητα της ροής v_{max} .

Τυπική απόκλιση ταχύτητας (rms)

Επιπλέον για κάθε περίοδο T υπολογίστηκε και η τυπική απόκλιση του μέτρου της ταχύτητας s_i για κάθε μία από τις οχτώ φάσεις του εκάστοτε πειράματος (όπου i ο αριθμός της φάσης). Ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης του μέτρου της ταχύτητας έγινε δημιουργώντας έναν πίνακα m που περιέχει μέσα τα μέτρα ταχυτήτων των στοιχείων της εκάστοτε εικόνας που λήφθηκε μέσω PIV ξεχωριστά. Στη συνέχεια με βάση τον κώδικα Matlab που φαίνεται σε παρακάτω παράρτημα βρήκαμε την τυπική απόκλιση του πίνακα

και συνεπώς του μέτρου της ταχύτητας της κάθε φάσης ξεχωριστά. Παρακάτω φαίνεται η τυπική απόκλιση s_i για κάθε περίοδο T (όπου i ο αριθμός της φάσης):

$T=2.016$ sec → $s_1=0.0171$ m/sec, $s_2=0.0281$ m/sec, $s_3=0.0345$ m/sec,
 $s_4=0.0300$ m/sec, $s_5=0.0096$ m/sec, $s_6=0.0293$ m/sec,
 $s_7=0.0400$ m/sec, $s_8=0.0326$ m/sec

$T=1.688$ sec → $s_1=0.0285$ m/sec, $s_2=0.0635$ m/sec, $s_3=0.0639$ m/sec,
 $s_4=0.0456$ m/sec, $s_5=0.0076$ m/sec, $s_6=0.0537$ m/sec,
 $s_7=0.0748$ m/sec, $s_8=0.0453$ m/sec

$T=1.448$ sec → $s_1=0.0443$ m/sec, $s_2=0.0780$ m/sec, $s_3=0.1010$ m/sec,
 $s_4=0.112$ m/sec, $s_5=0.0616$ m/sec, $s_6=0.0617$ m/sec,
 $s_7=0.1392$ m/sec, $s_8=0.1238$ m/sec

$T=1.336$ sec → $s_1=0.1082$ m/sec, $s_2=0.0628$ m/sec, $s_3=0.1270$ m/sec,
 $s_4=0.1599$ m/sec, $s_5=0.1228$ m/sec, $s_6=0.0246$ m/sec,
 $s_7=0.1623$ m/sec, $s_8=0.1708$ m/sec

$T=1.200$ sec → $s_1=0.1966$ m/sec, $s_2=0.0772$ m/sec, $s_3=0.0860$ m/sec,
 $s_4=0.1473$ m/sec, $s_5=0.1781$ m/sec, $s_6=0.1158$ m/sec,
 $s_7=0.0460$ m/sec, $s_8=0.1823$ m/sec

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για όλες τα σχήματα που ακολουθούν οι άξονες είναι το αδιάστατο πλάτος και ύψος, δηλαδή το πλάτος και το ύψος διαιρεμένα με τη διάμετρο του κυλίνδρου. Σε κάθε πεδίο ροής και προφίλ ταχύτητας φαίνεται και ένα διάνυσμα στην κορυφή της εικόνας με το μήκος της U για σύγκριση, όπως επίσης και η μέση ταχύτητα u κάθε πειράματος συνολικά. Τέλος, στα πεδία ροής ο κύλινδρος βρίσκεται πάντοτε στην μέση της δεξιάς πλευράς της εικόνας.

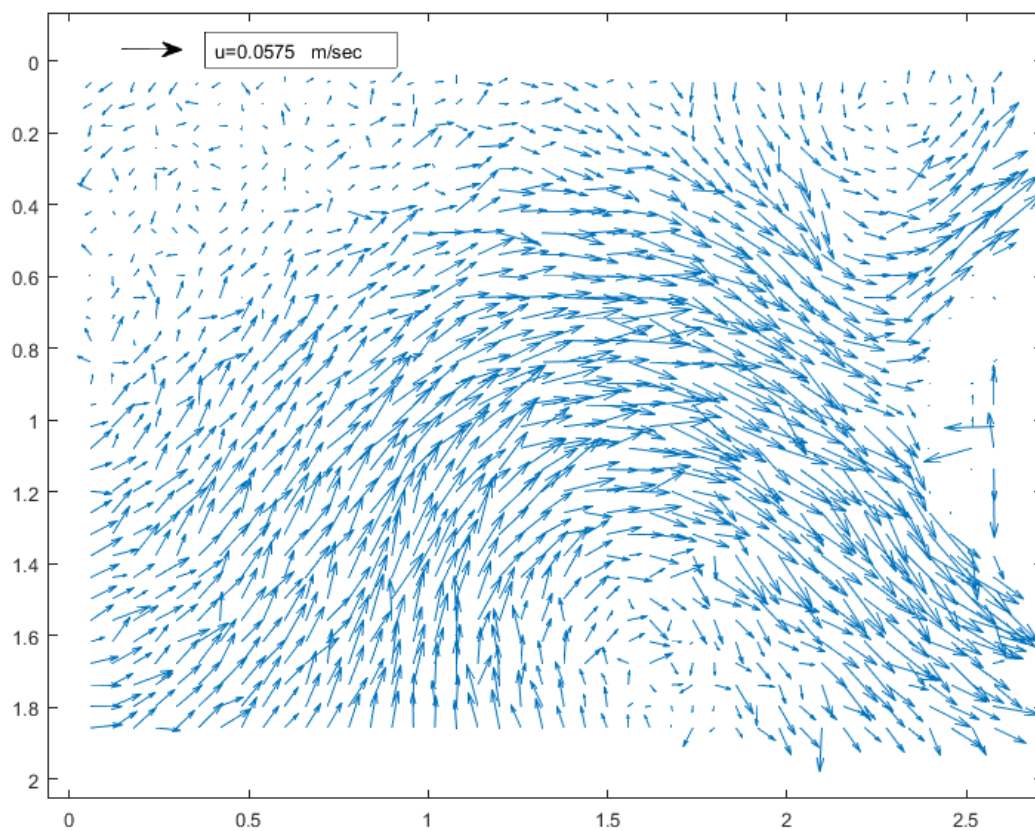
1^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$

Williamson

Σύμφωνα με τον Williamson, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στον εκτενή σχολιασμό της θεωρίας του, το συγκεκριμένο πείραμα υπάγεται στην κατηγορία: $15 < KC < 24$. Σε αυτή την περίπτωση προβλέπεται ο σχηματισμός δυο μεγάλων ζευγών δινών σε κάθε μισό κύκλο. Μια σειρά από ζεύγη δινών εμφανίζονται και απομακρύνονται από τον κύλινδρο σε αντίθετες κατευθύνσεις και τεταρτημόρια.

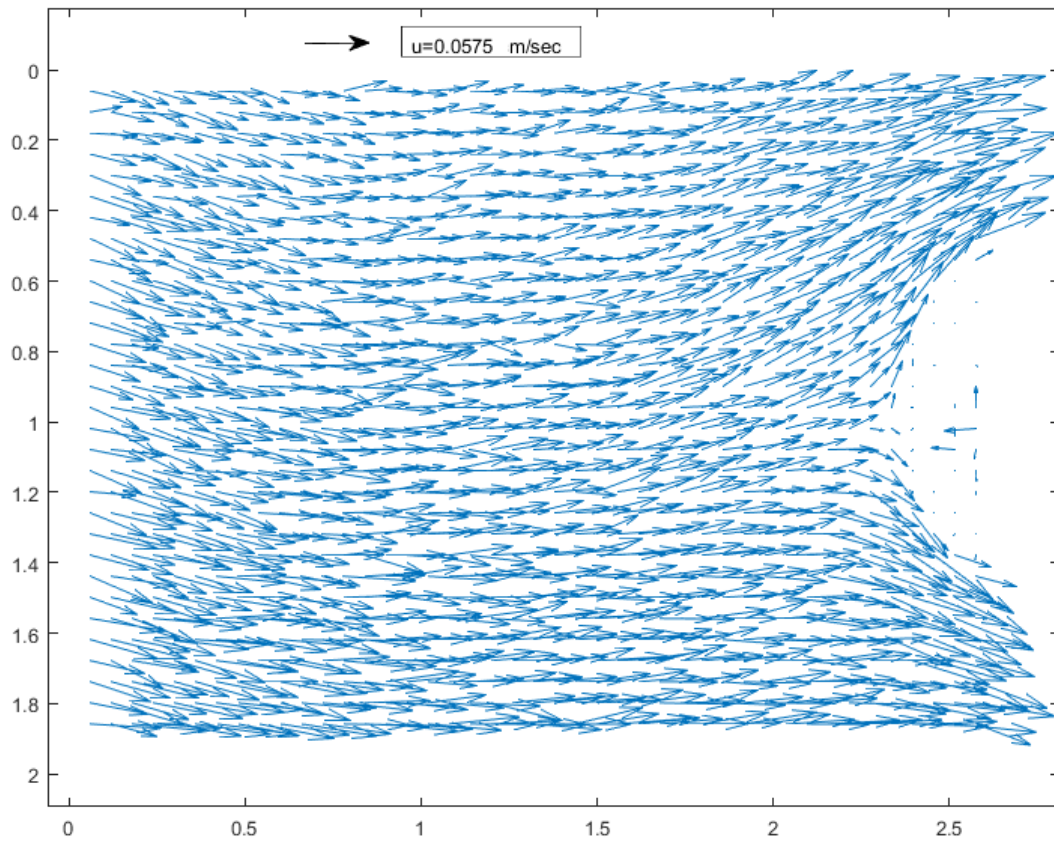
Πεδία Ροής

Φάση 1



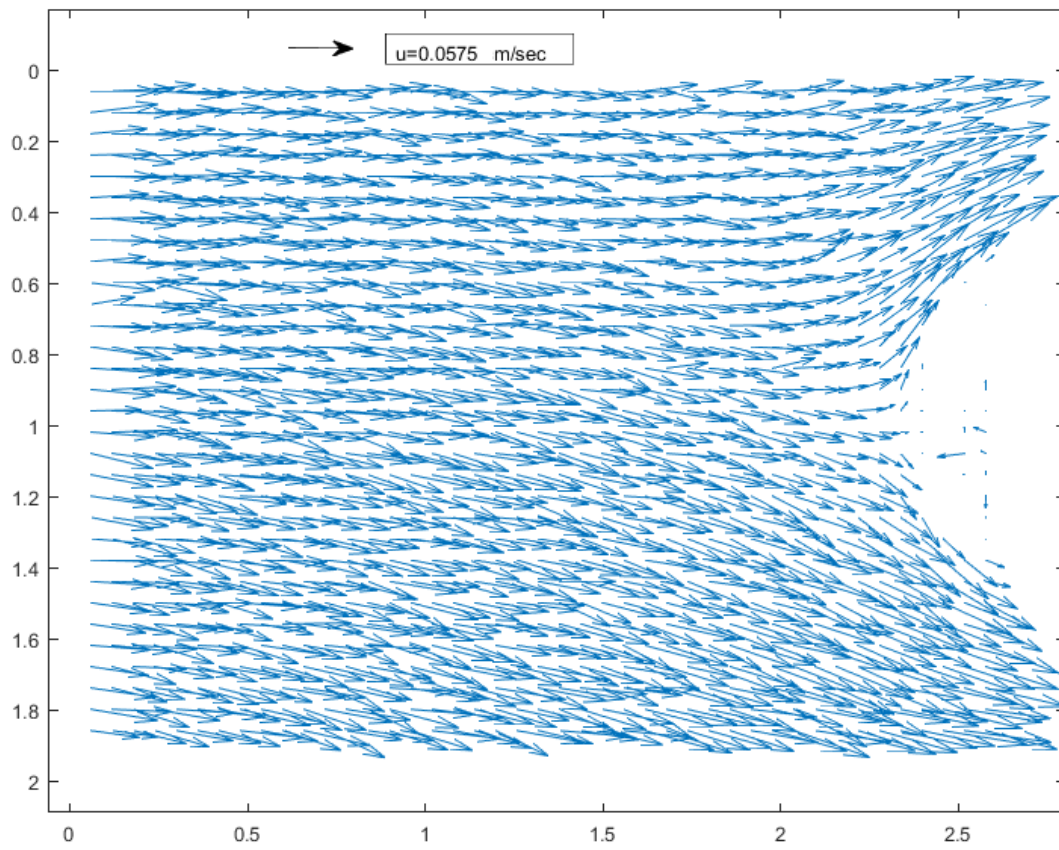
Σχήμα 80: Πεδίο ροής $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάση 1

Φάση 2



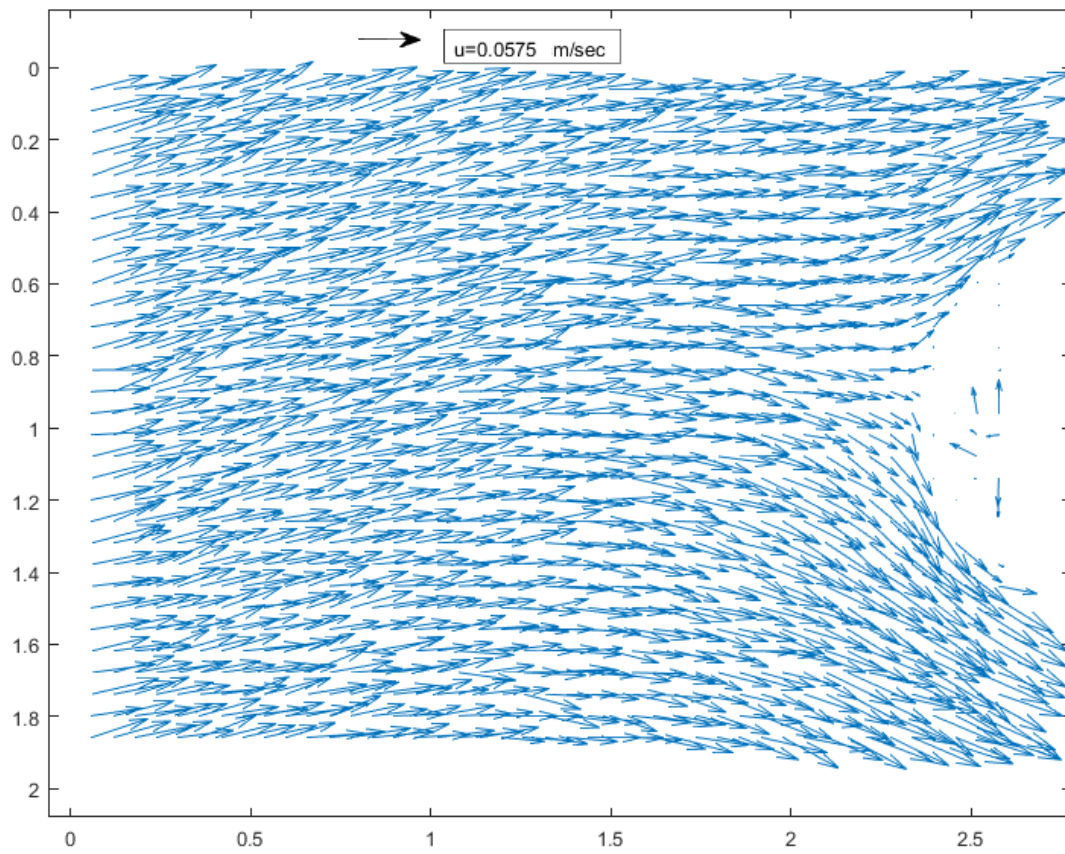
Σχήμα 81: Πεδίο ροής $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάση 2

Φάση 3



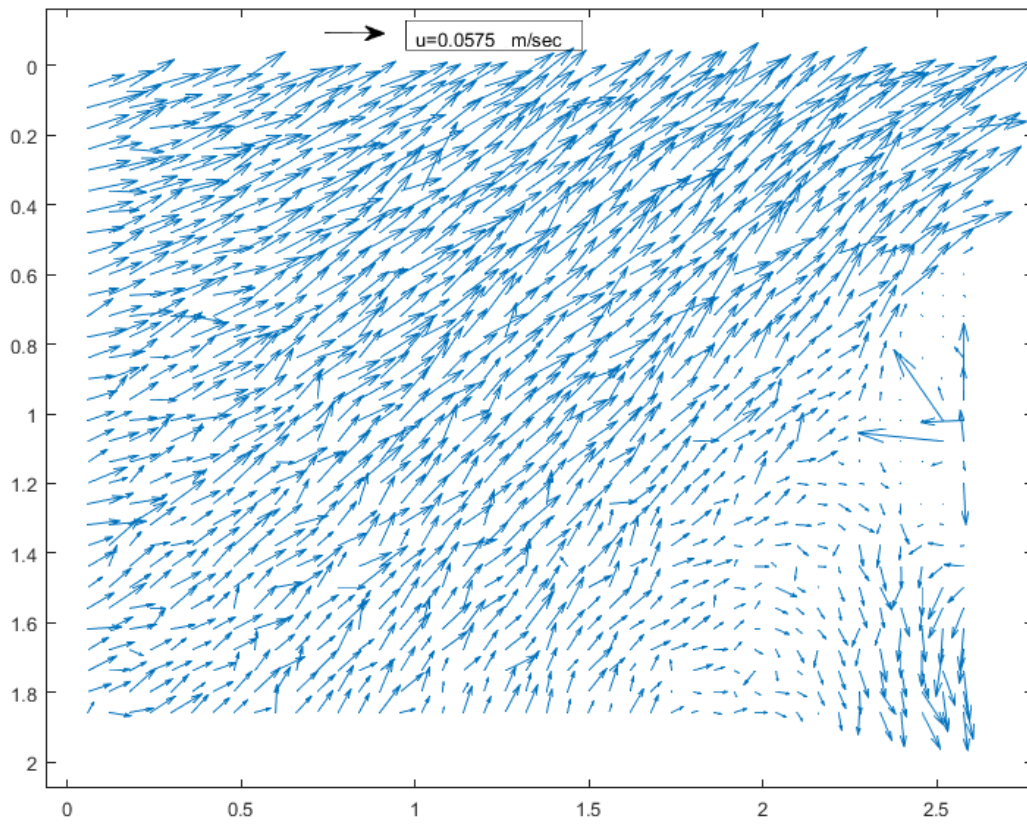
Σχήμα 82: Πεδίο ροής $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάση 3

Φάση 4



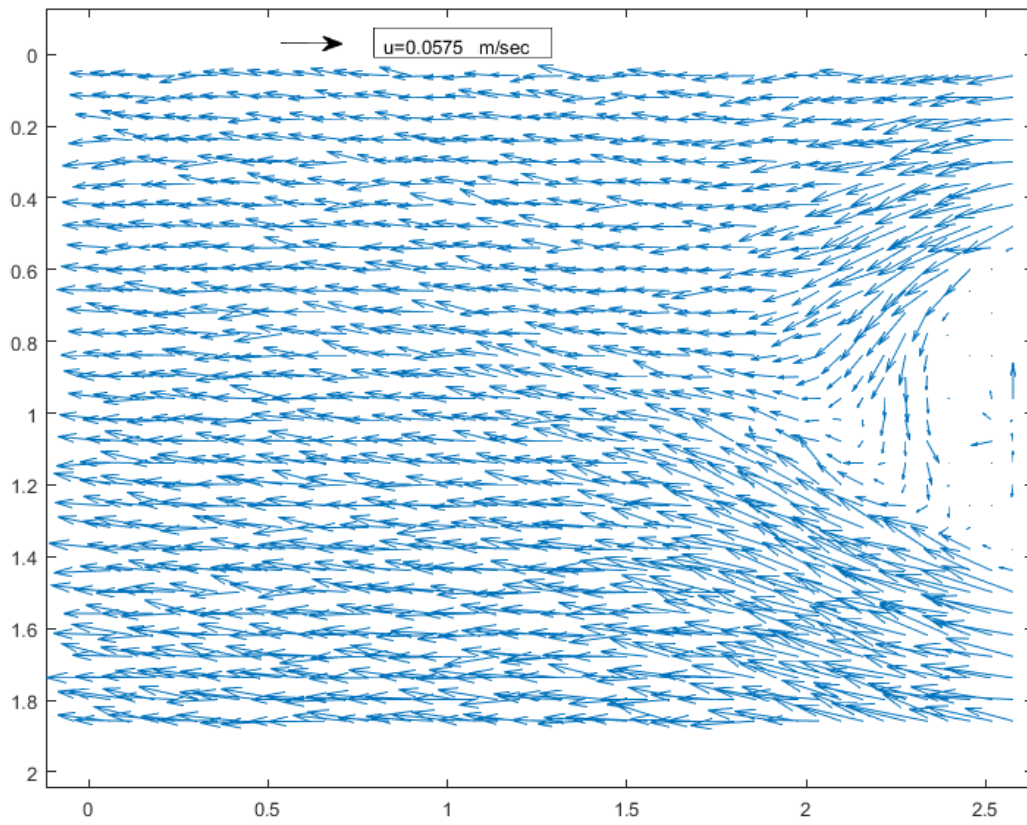
Σχήμα 83: Πεδίο ροής $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάση 4

Φάση 5



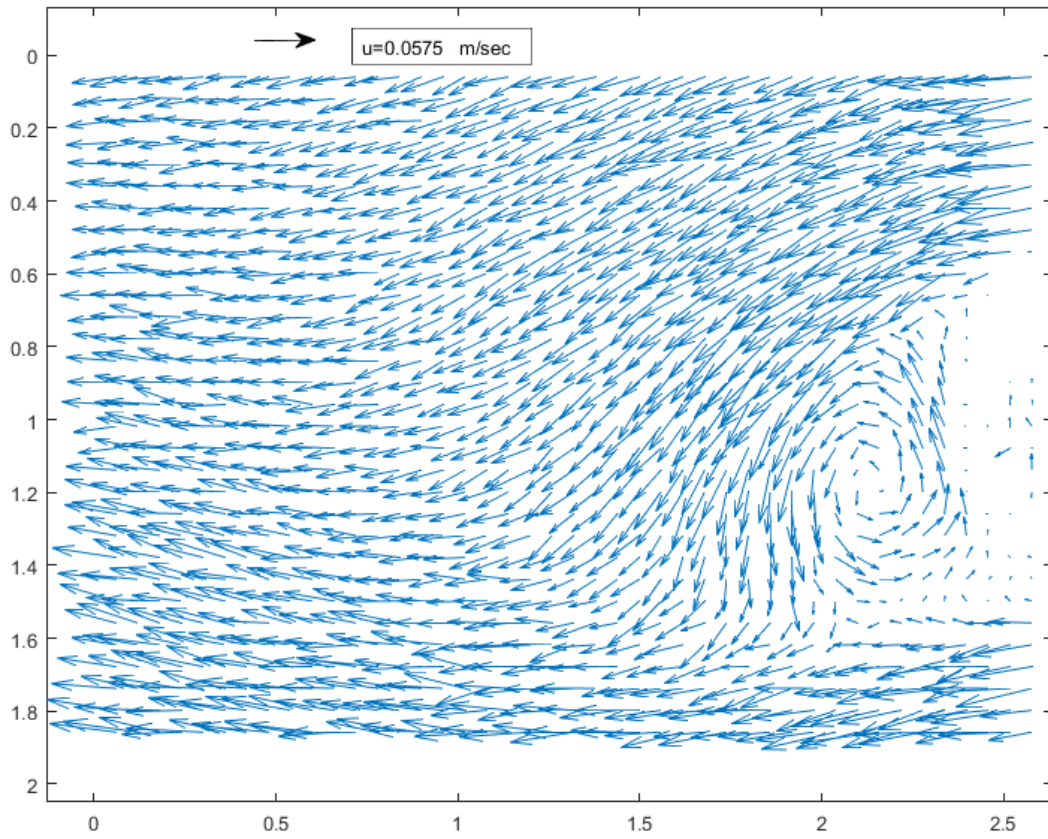
Σχήμα 84: Πεδίο ροής T=2.016 sec KC=19.72 Φάση 5

Φάση 6



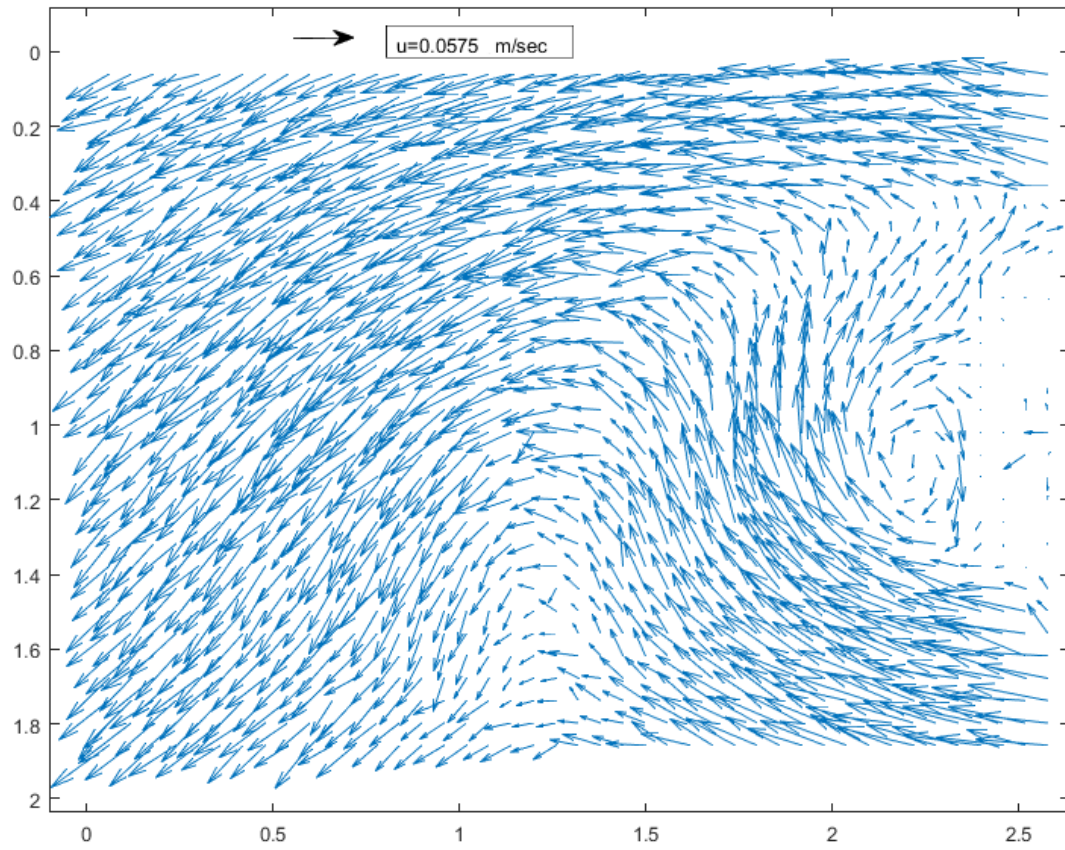
Σχήμα 85: Πεδίο ροής T=2.016 sec KC=19.72 Φάση 6

Φάση 7



Σχήμα 86: Πεδίο ροής $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάση 7

Φάση 8



Σχήμα 87: Πεδίο ροής $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάση 8

Πειραματικά αποτελέσματα

Φάση 1

Σε αυτή τη φάση εμφανίζεται ένα ζεύγος δινών και όχι δύο όπως αναμενόταν από τη θεωρία. Υπενθυμίζεται ότι στη φάση αυτή το εξεταζόμενο χωρίο βρίσκεται ανάντι του κυλίνδρου.

Φάσεις 2-4

Δεν εμφανίζονται κάποιες δίνες στις φάσεις αυτές όπου το εξεταζόμενο πεδίο βρίσκεται ανάντι του κυλίνδρου.

Φάση 5

Σε αυτή την φάση παρατηρείται ο σχηματισμός μιας δίνης πολύ κοντά στον κύλινδρο και από την επόμενη φάση η ροή αλλάζει κατεύθυνση όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

Φάση 6

Εδώ φαίνεται η έναρξη του σχηματισμού μιας δίνης αλλά δεν ολοκληρώνεται στην ίδια φάση. Το εξεταζόμενο πεδίο βρίσκεται κατάντι του κυλίνδρου.

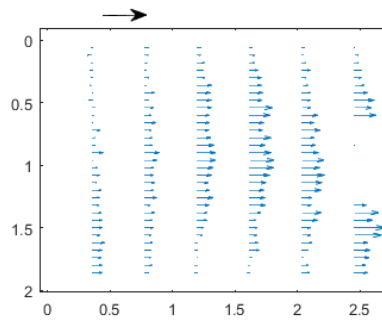
Φάση 7

Αυτή είναι η φάση που ολοκληρώνεται ο σχηματισμός μιας αριστερόστροφης δίνης πολύ κοντά στον κύλινδρο. Το εξεταζόμενο πεδίο βρίσκεται κατάντι του κυλίνδρου.

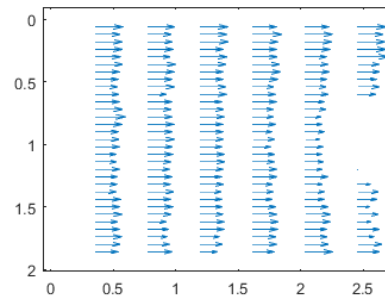
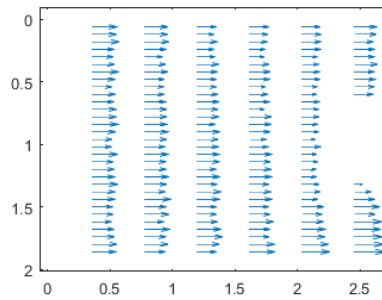
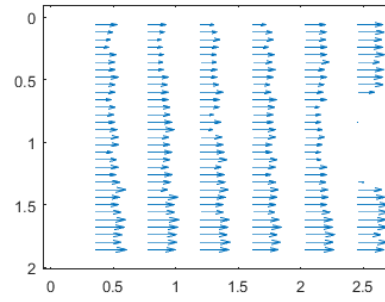
Φάση 8

Σε αυτή τη φάση σχηματίζεται μια δεξιόστροφη δίνη ενώ η αριστερόστροφη δίνη της προηγούμενης φάσης φαίνεται να έχει απομακρυνθεί από τον κύλινδρο. Το εξεταζόμενο πεδίο βρίσκεται κατάντι του κυλίνδρου.

Προφίλ Ταχύτητας



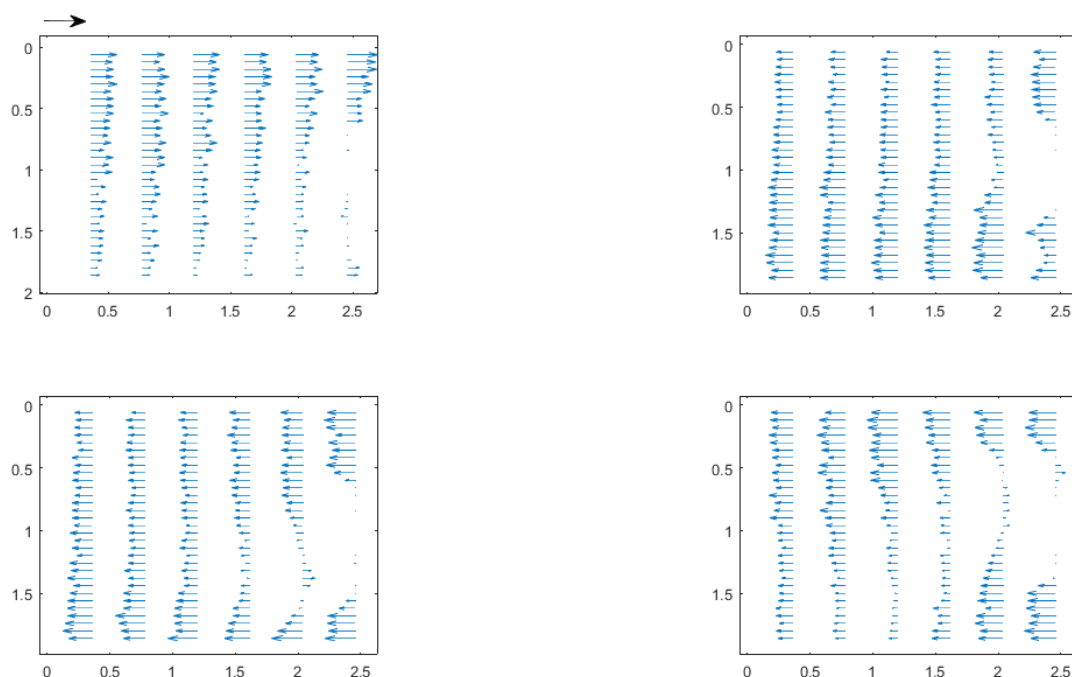
Φάσεις 1-4



Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Σχήμα 88: Προφίλ Ταχύτητας $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάσεις 1-4

Φάσεις 5-8



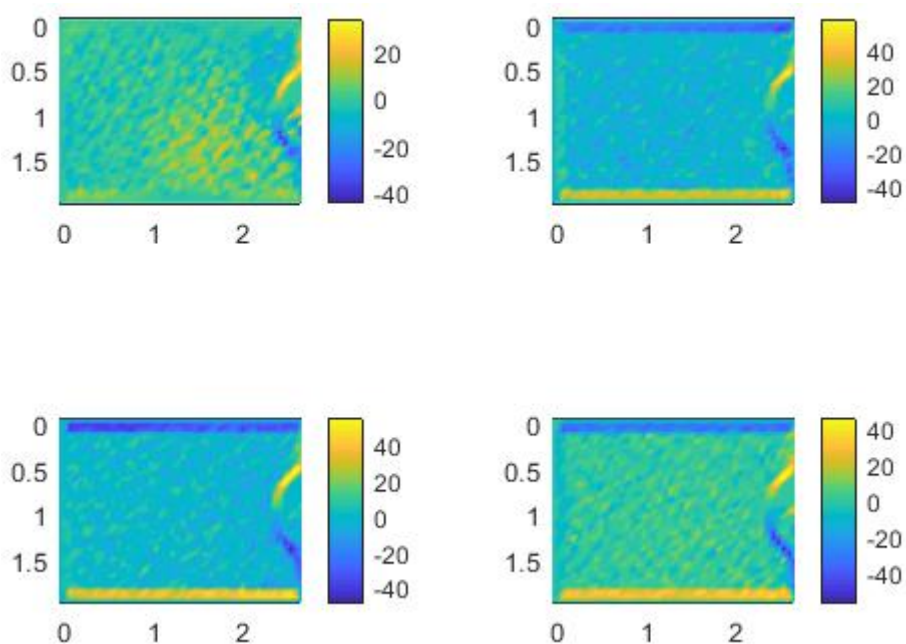
Σχήμα 89: Προφίλ Ταχύτητας $T=2.016$ sec $KC=19.72$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Πεδία Στροβιλότητας

Αρχικά τονίζεται ότι τα πεδία στροβιλότητας που φαίνονται παραπάνω εκφράζουν την ένταση των δινών. Το πόσο μεγάλη είναι η συγκεκριμένη ένταση φαίνεται από την απόχρωση του κάθε σημείου του πεδίου συναρτήσει της κλίμακας που βρίσκεται δεξιά της εικόνας. Επιπλέον, η στροβιλότητα κάθε φάσης του πεδίου ροής υπολογίστηκε με συγκεκριμένο κώδικα Matlab που φαίνεται σε παρακάτω παράρτημα. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$.

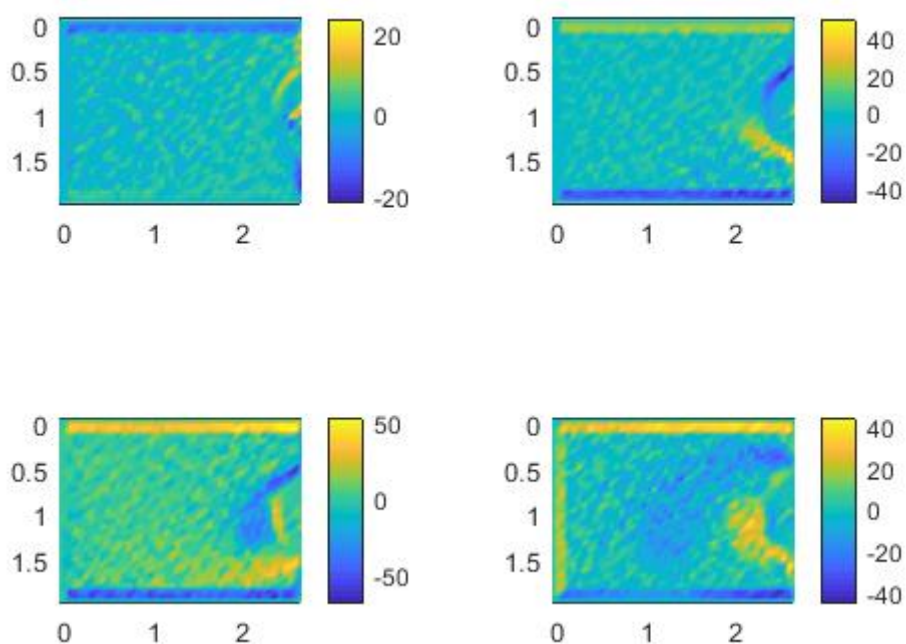
Φάσεις 1-4



Σχήμα 90: Πεδία Στροβιλότητας $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

Φάσεις 5-8



Σχήμα 91: Πεδία Στροβιλότητας $T=2.016 \text{ sec}$ $KC=19.72$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες 1/s. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

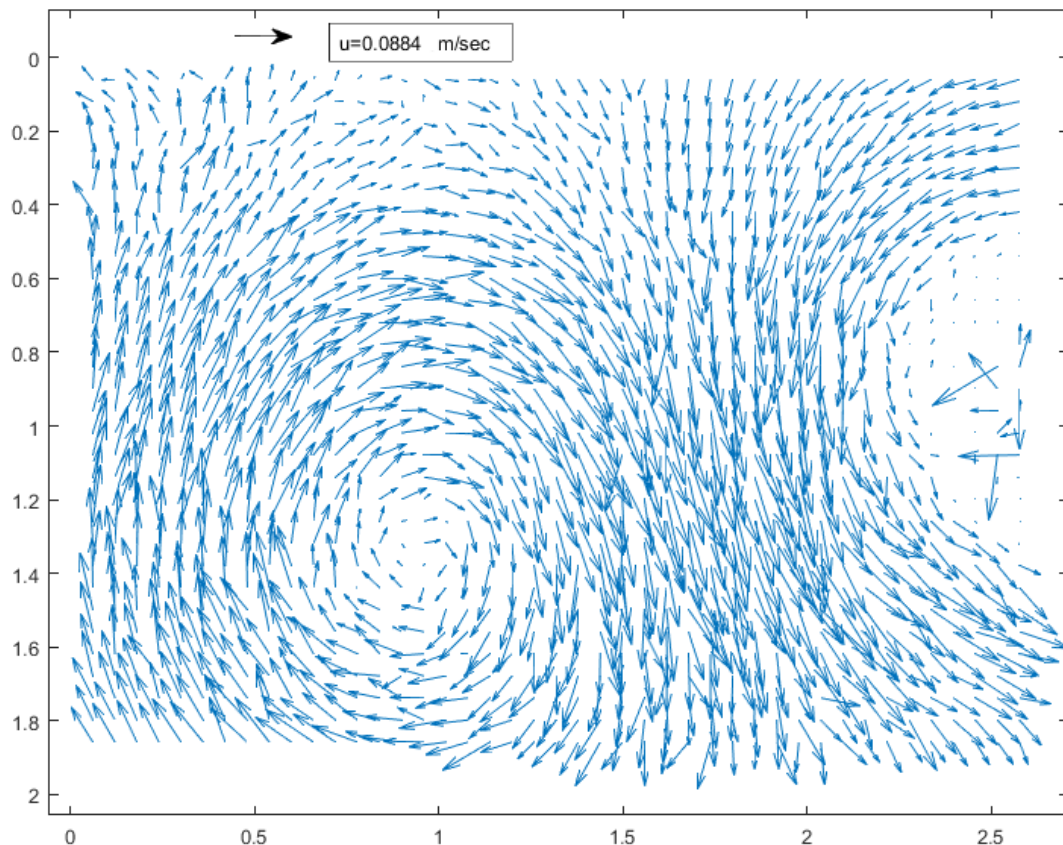
2^ο ΠΕΙΡΑΜΑ: $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$

Williamson

Σύμφωνα με τον Williamson το πείραμα ανήκει στην κατηγορία $25 < KC < 32$ όπου σε αυτή τη φάσεις προβλέπεται η δημιουργία τριων ζευγών δινών.

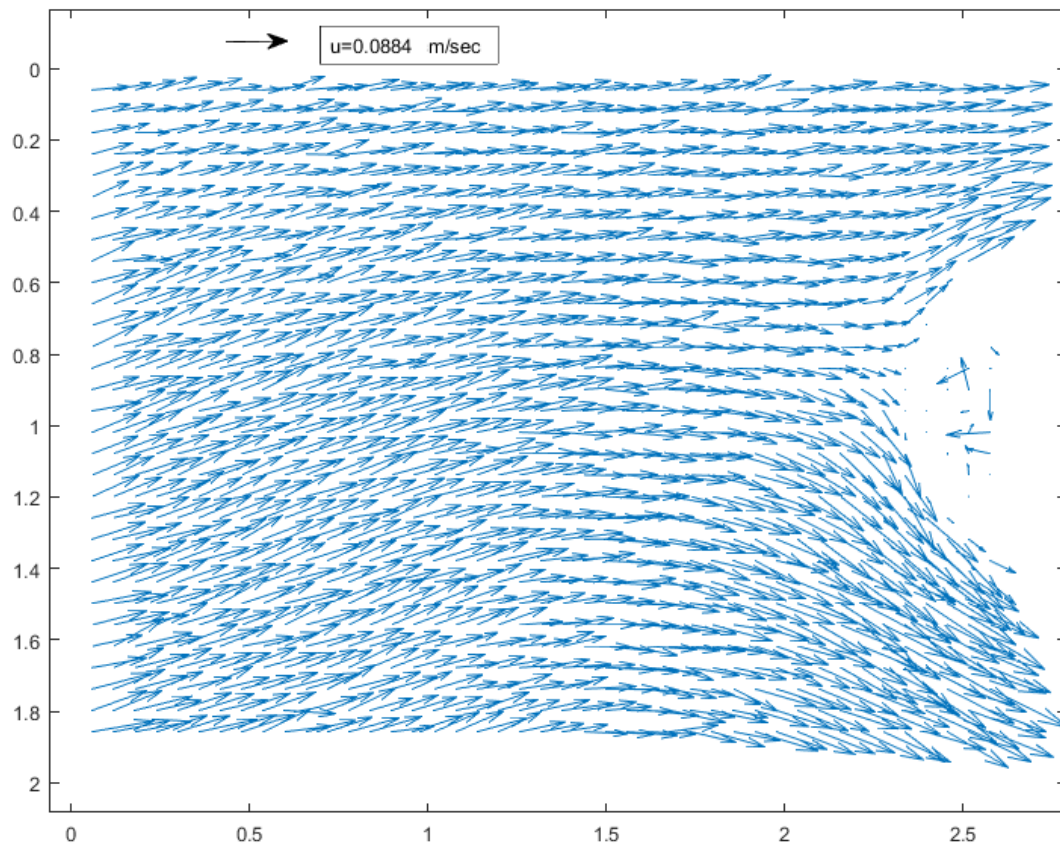
Πεδία Ροής

Φάση 1



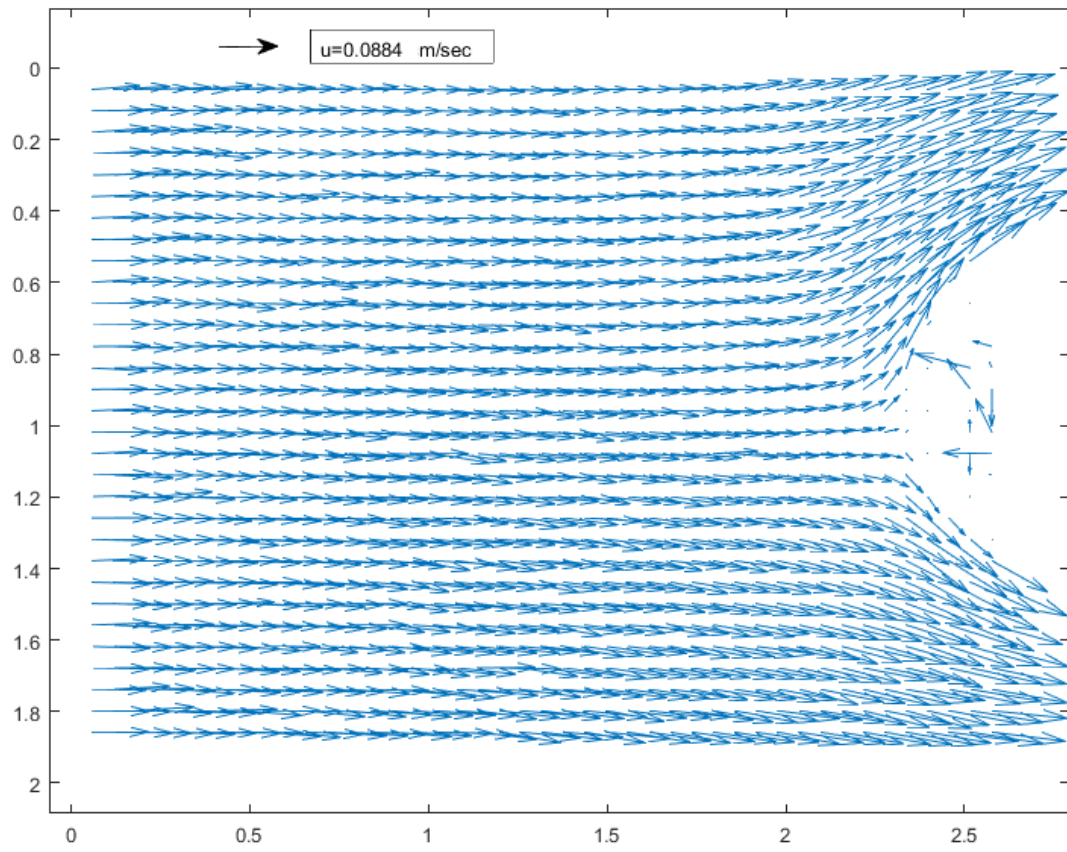
Σχήμα 92: Πεδίο ροής $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάση 1

Φάση 2



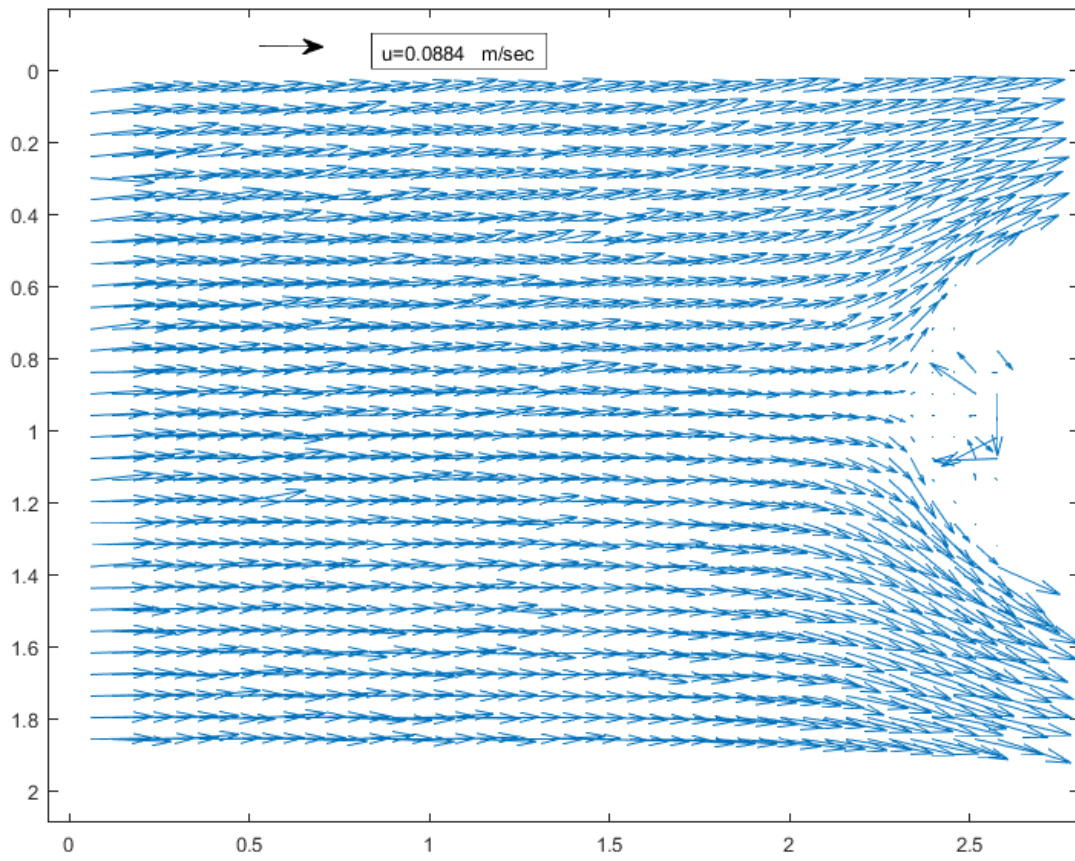
Σχήμα 93: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 2

Φάση 3



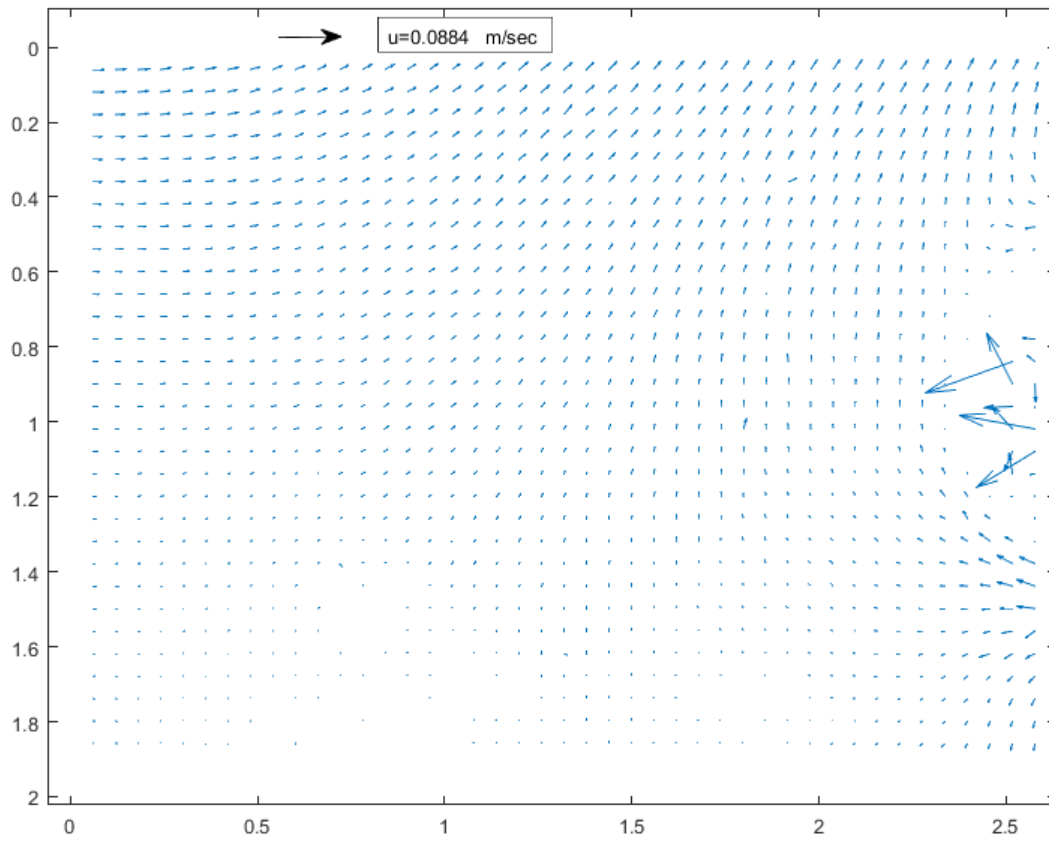
Σχήμα 94: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 3

Φάση 4



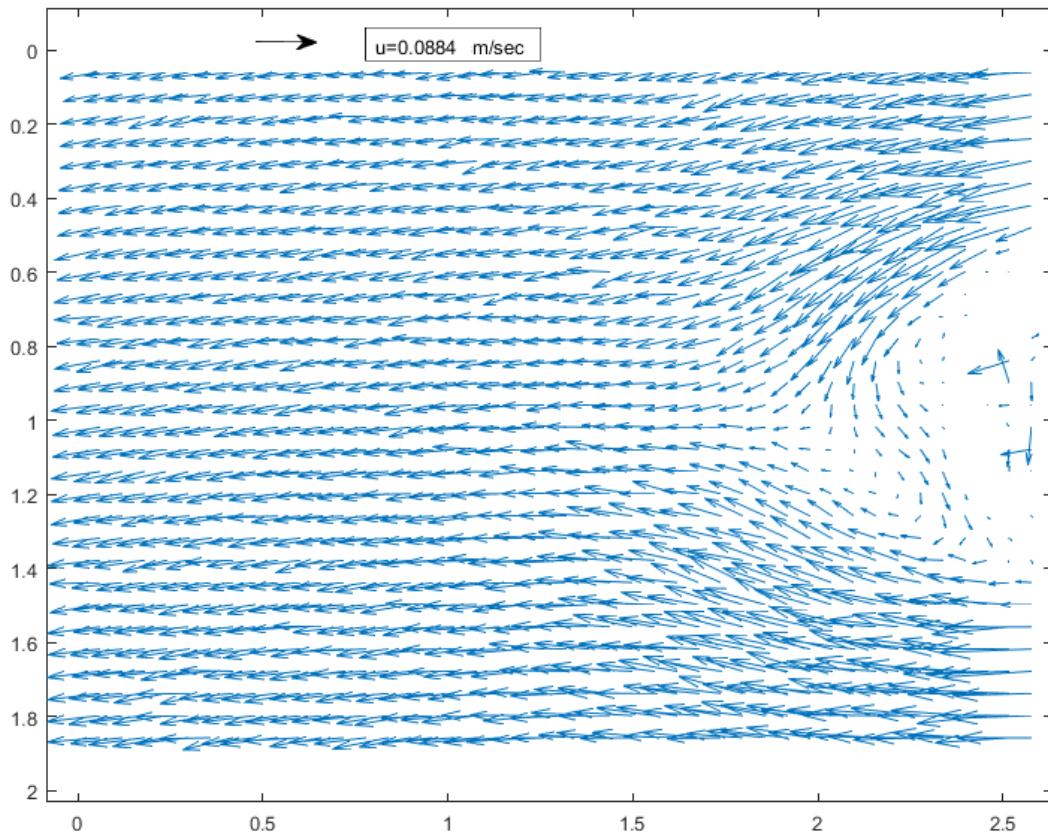
Σχήμα 95: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 4

Φάση 5



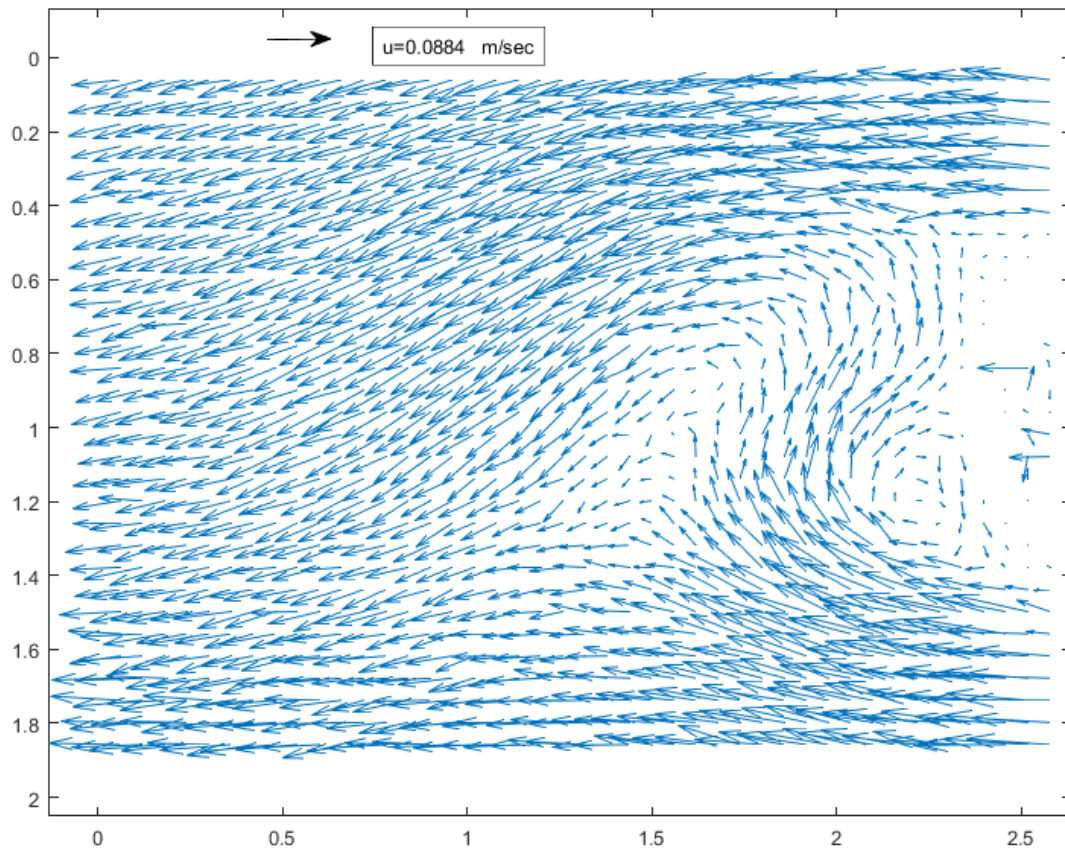
Σχήμα 96: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 5

Φάση 6



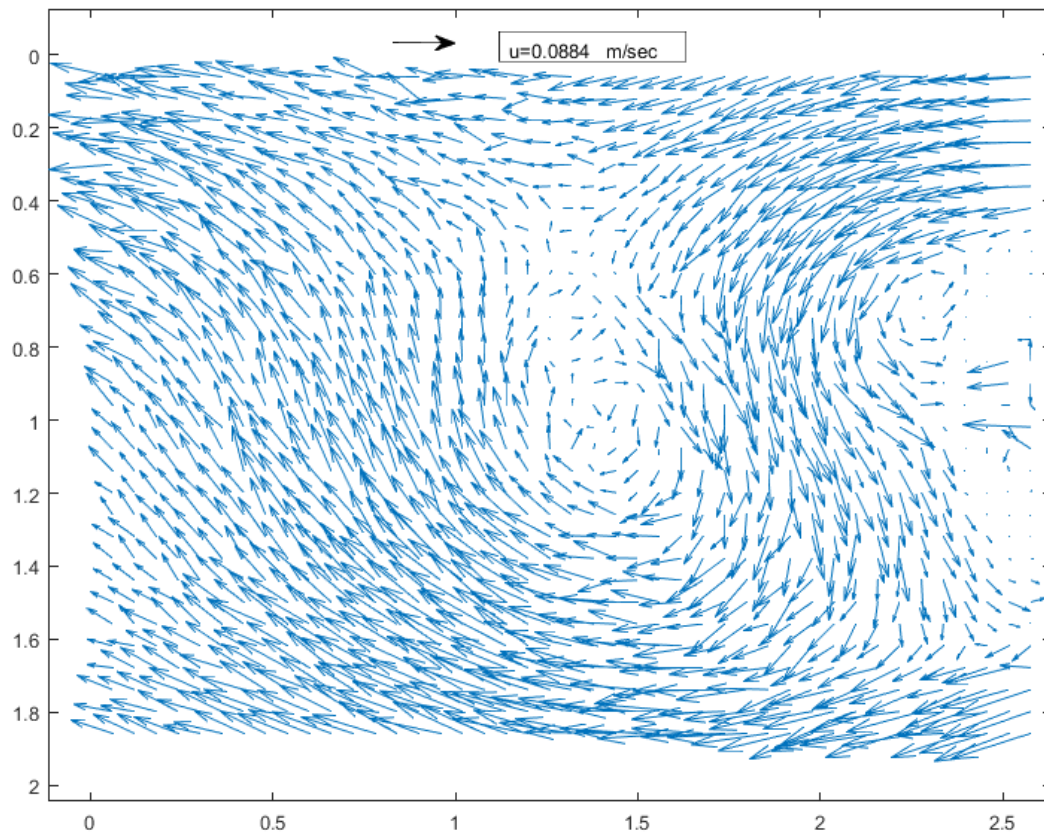
Σχήμα 97: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 6

Φάση 7



Σχήμα 98: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 7

Φάση 8



Σχήμα 99: Πεδίο ροής $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάση 8

Πειραματικά αποτελέσματα

Πειραματικά η συγκεκριμένη θεωρία δεν επαληθεύεται ούτε σε αυτή την περίπτωση.

Φάση 1

Πράγματι υπάρχει η τάση σχηματισμού ζεύγους δίνης καθώς όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα υπάρχει ήδη μια ολοκληρωμένη δίνη και άλλη μία κατά το ήμισυ σχηματισμένη και μάλιστα σε διαφορετικά τεταρτημόρια.

Φάσεις 2-6

Έδω πέρα συμβαίνει εξομάλυνση και αλλαγή κατεύθυνσης της ροής.

Φάση 7

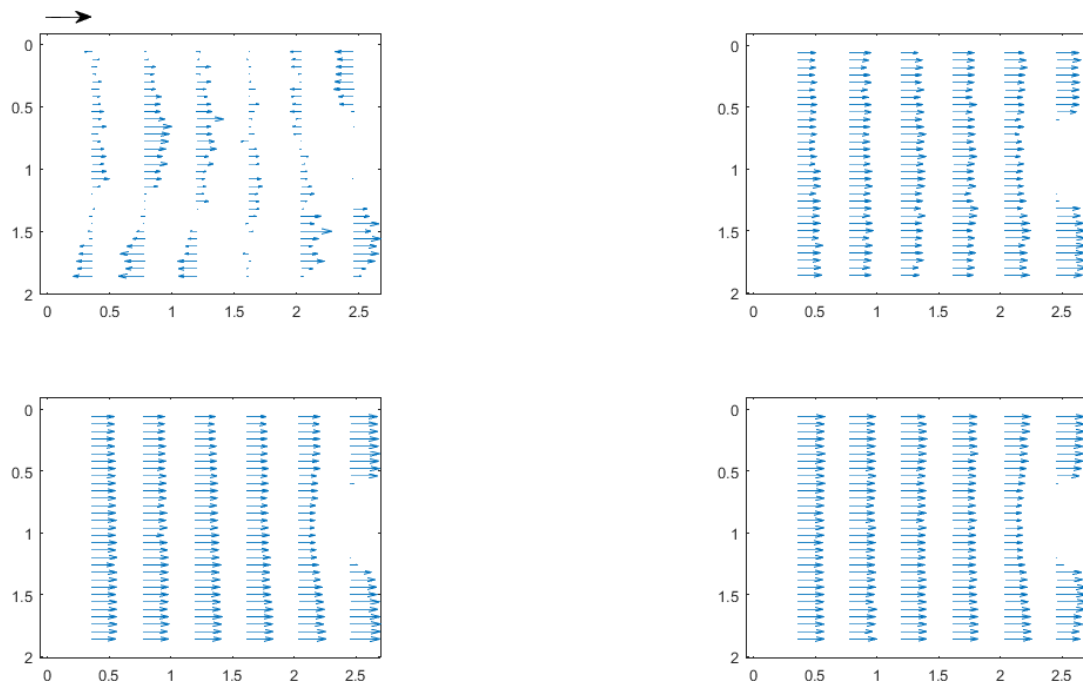
Σε αυτή την φάση εμφανίζεται ο σχηματισμός ενός ζεύγους δινών και μάλιστα σε πολύ πρώιμο στάδιο αυτή τη φορά καθώς όπως φαίνεται στο σχήμα οι δύο δίνες είναι ακόμα προσκολλημένες.

Φάση 8

Σε αυτή τη φάση φαίνεται ο τελικός σχηματισμός των δύο δινών και για άλλη μια φορά οι δύο δίνες βρίσκονται σε διαφορετικά τεταρτημόρια.

Προφίλ Ταχύτητας

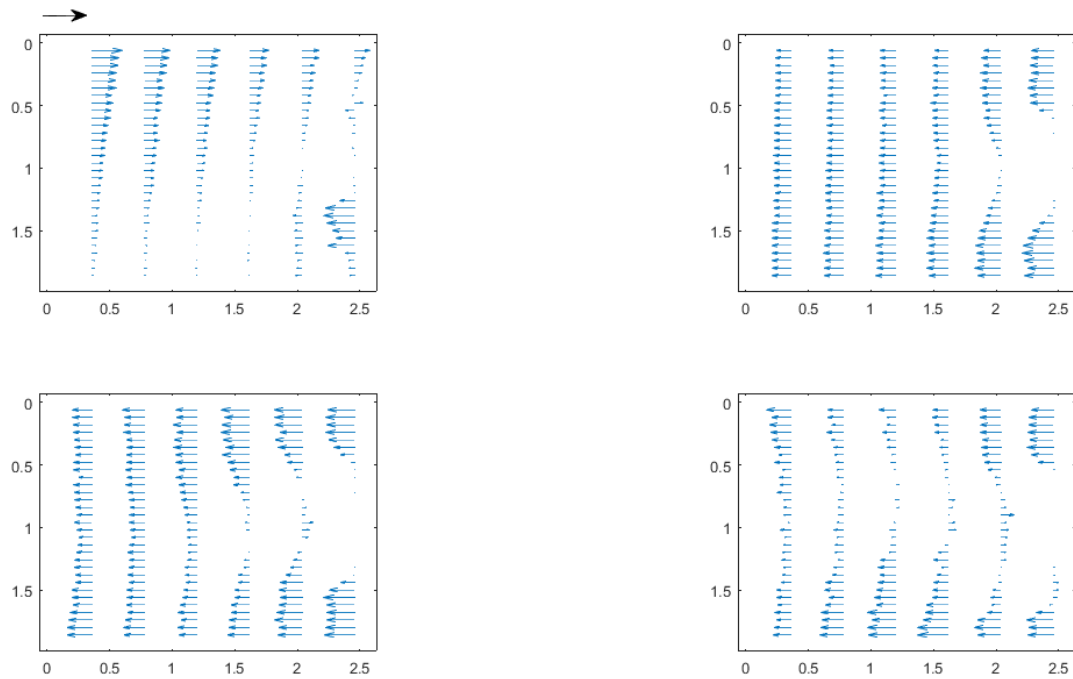
Φάσεις 1-4



Σχήμα 100: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Φάσεις 5-8

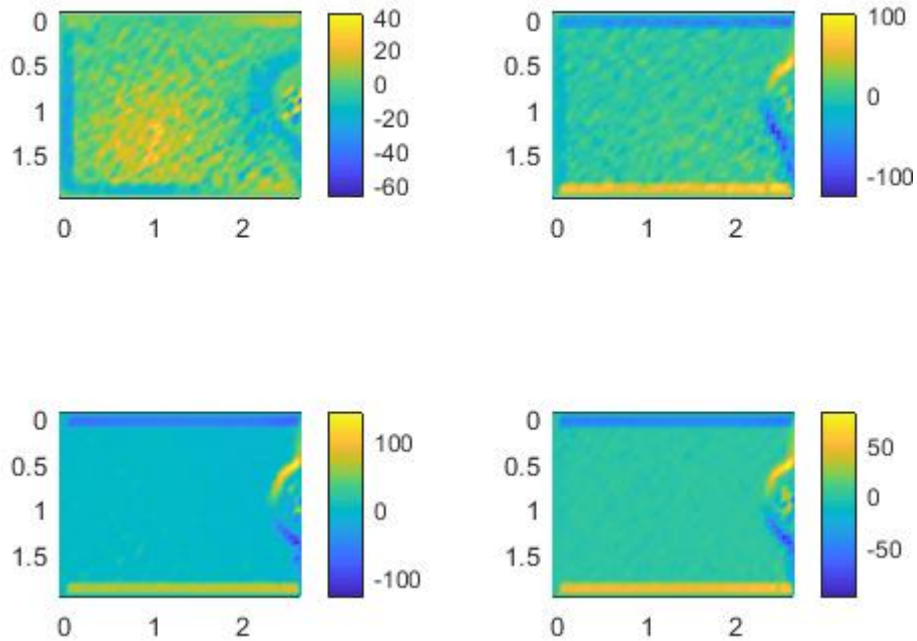


Σχήμα 101: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.688$ sec $KC=25.16$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

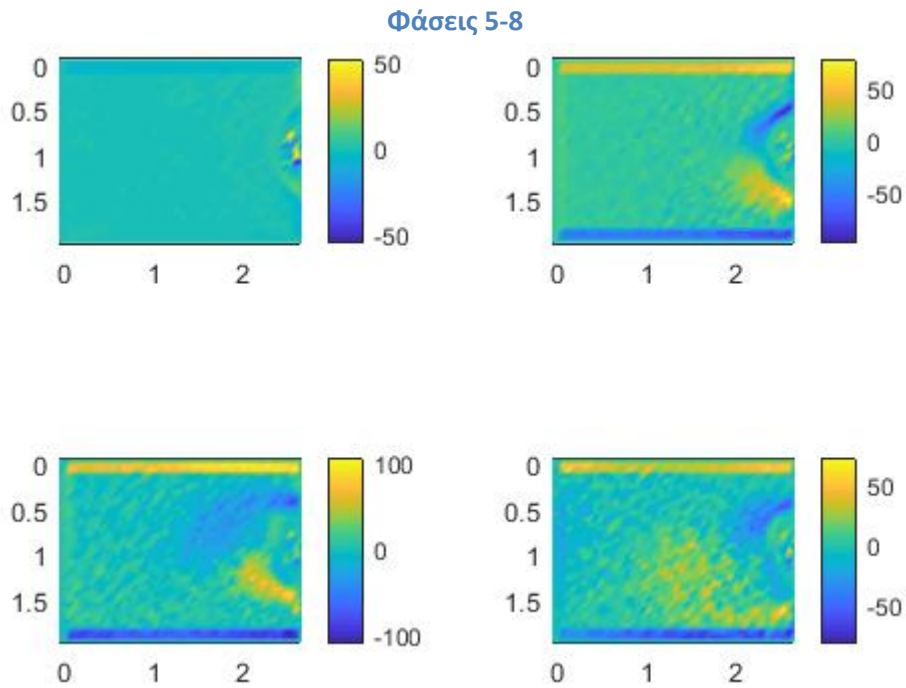
Πεδία Στροβιλότητας

Φάσεις 1-4



Σχήμα 102: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 103: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.688 \text{ sec}$ $KC=25.16$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

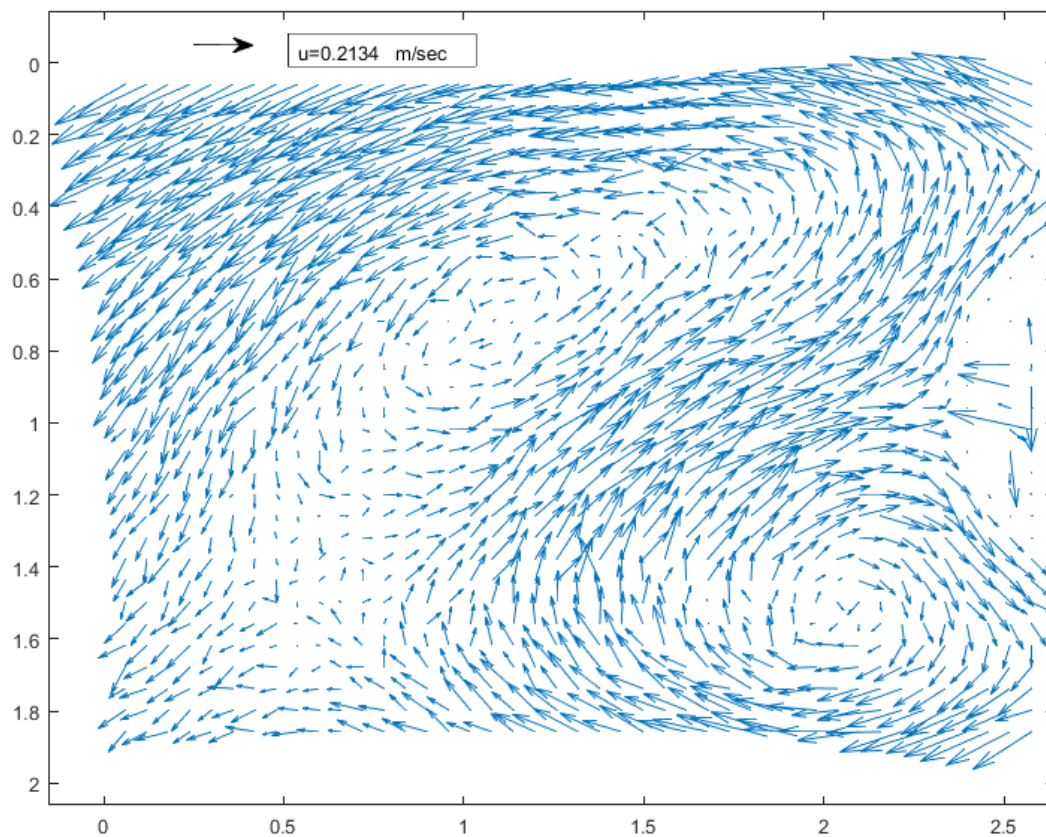
3^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : $T=1.448$ sec $KC=34.24$

Williamson

Σύμφωνα με τον Williamson το πείραμα ανήκει στην κατηγορία $32 < KC < 40$ όπου σε αυτή τη φάση προβλέπεται η δημιουργία τεσσάρων ζευγών δινών.

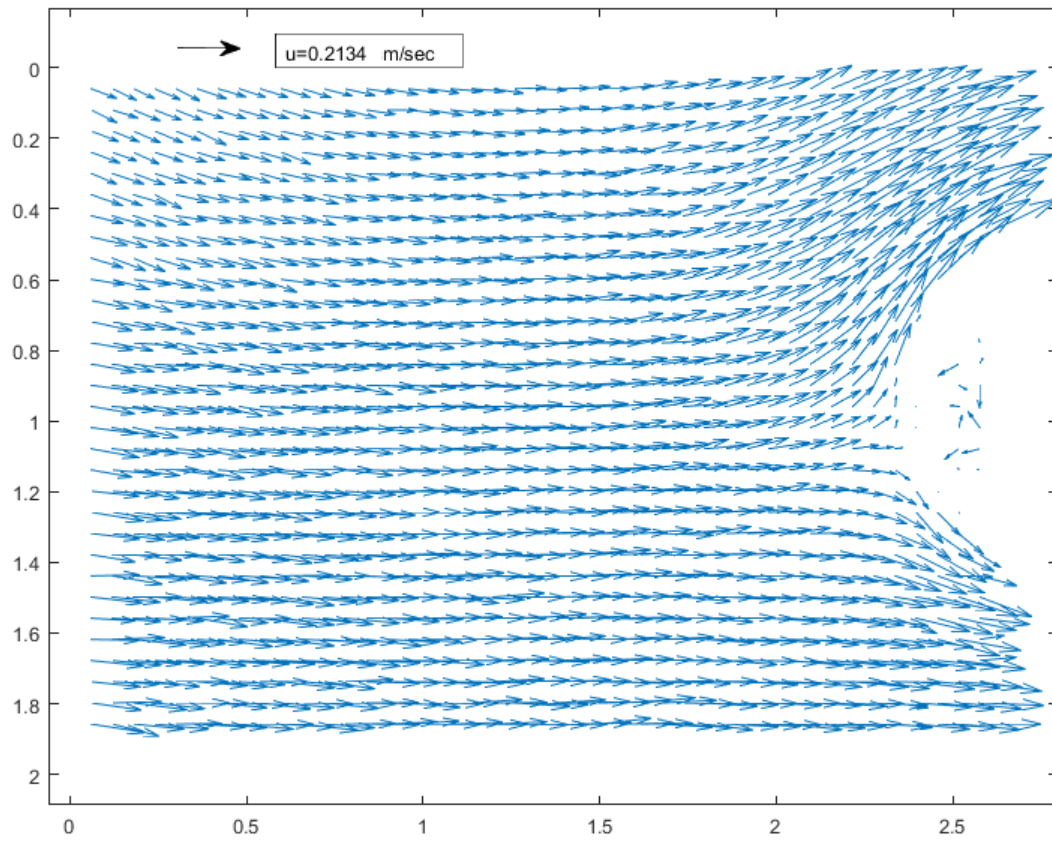
Πεδία Ροής

Φάση 1



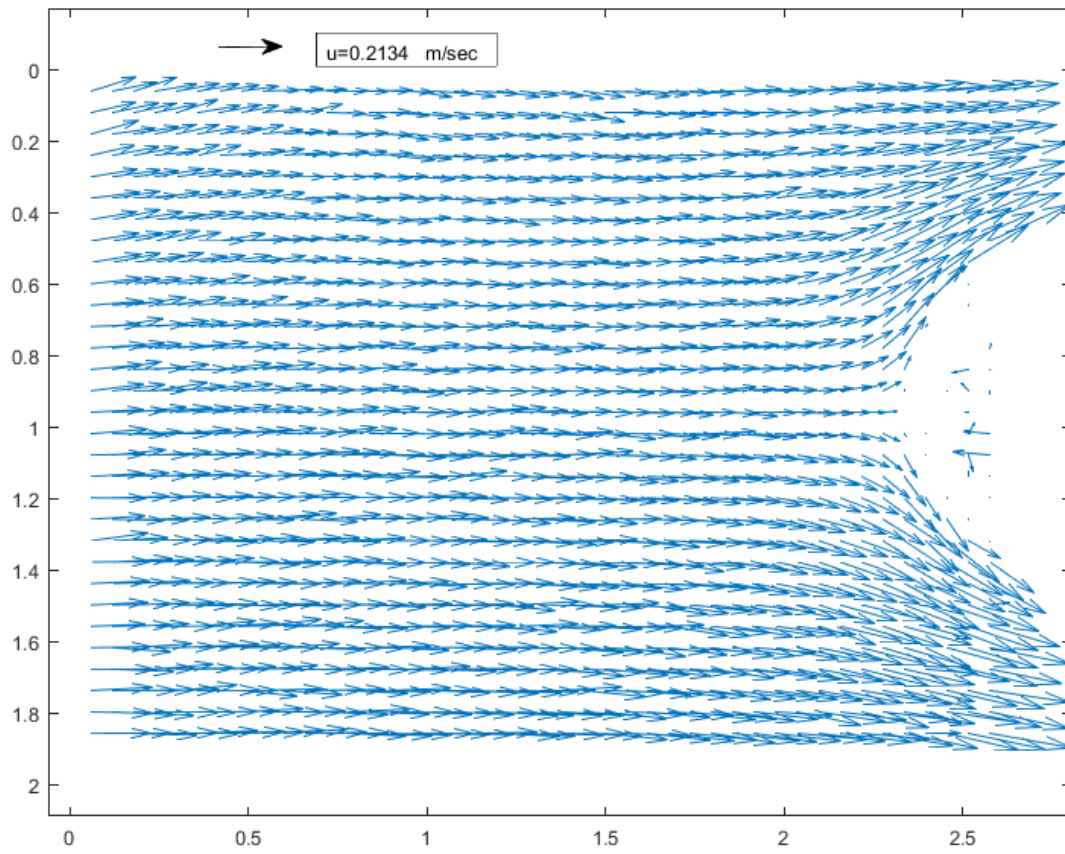
Σχήμα 104: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 1

Φάση 2



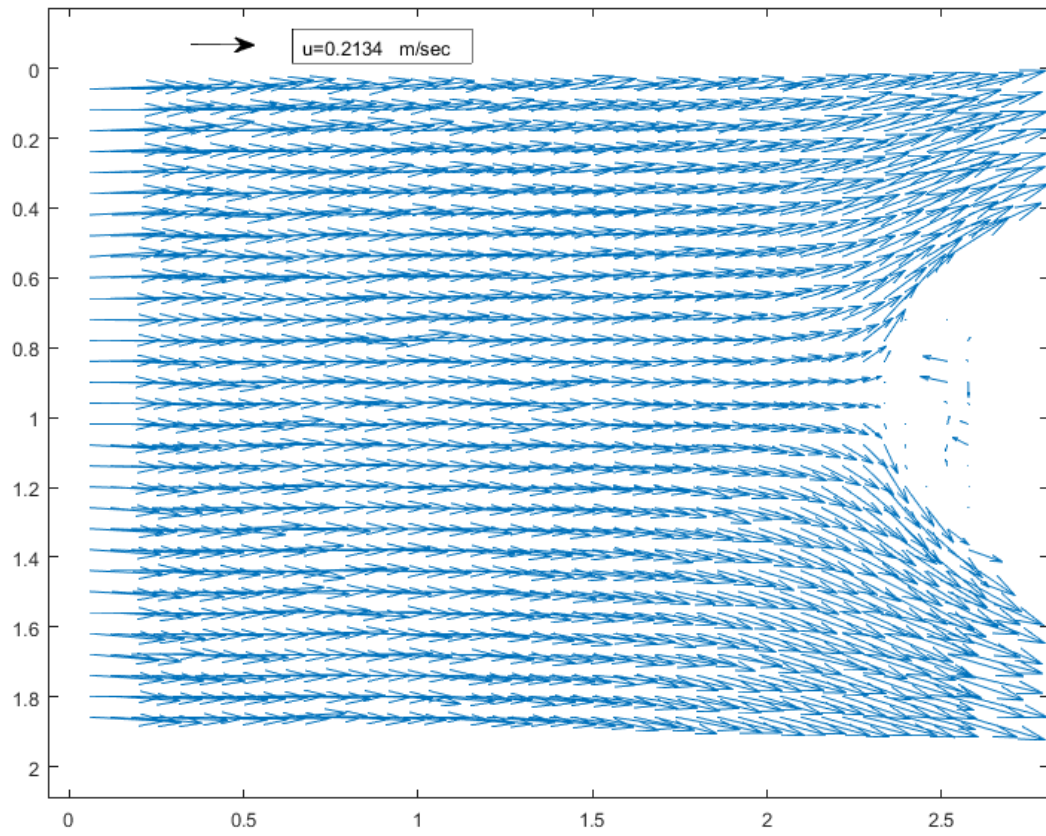
Σχήμα 105: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 2

Φάση 3



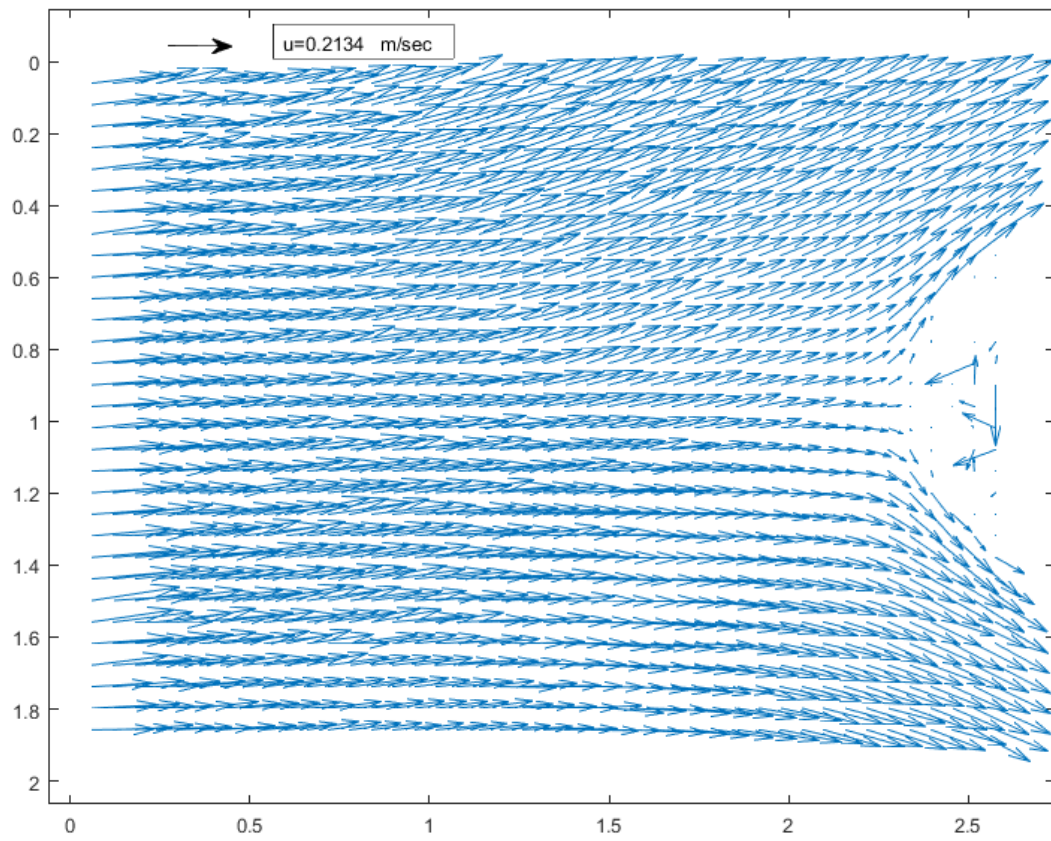
Σχήμα 106: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 3

Φάση 4



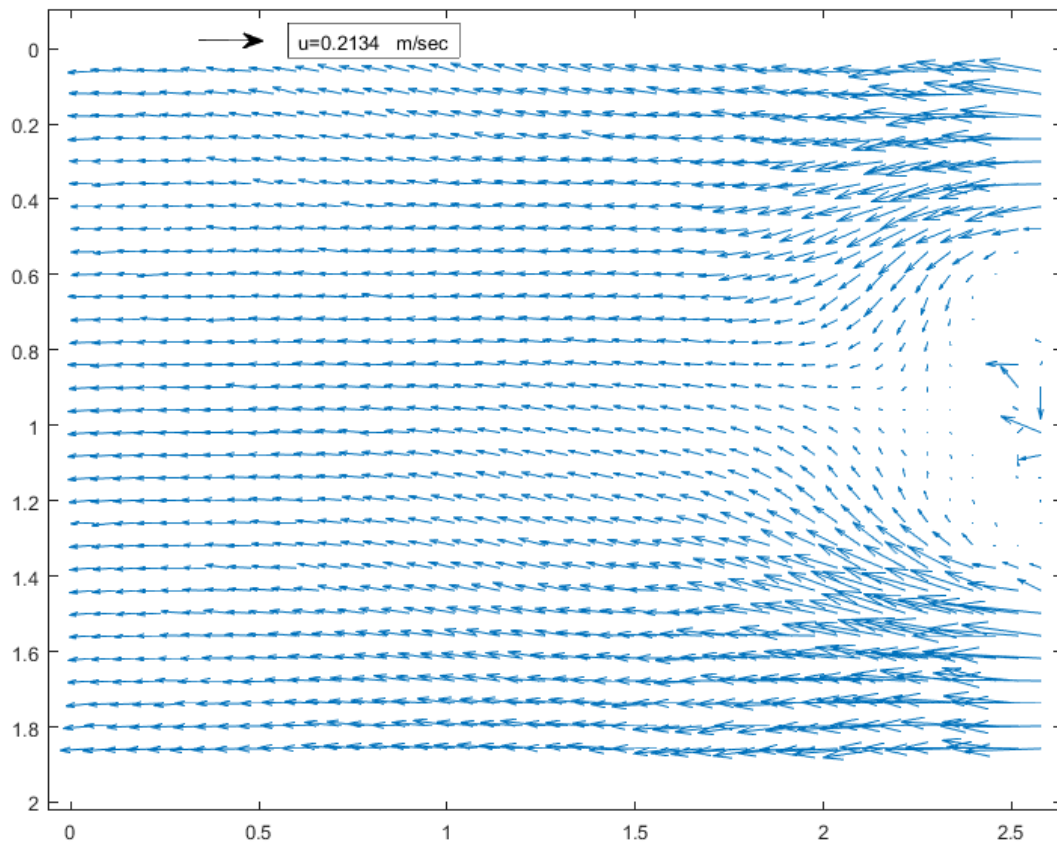
Σχήμα 107: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 4

Φάση 5



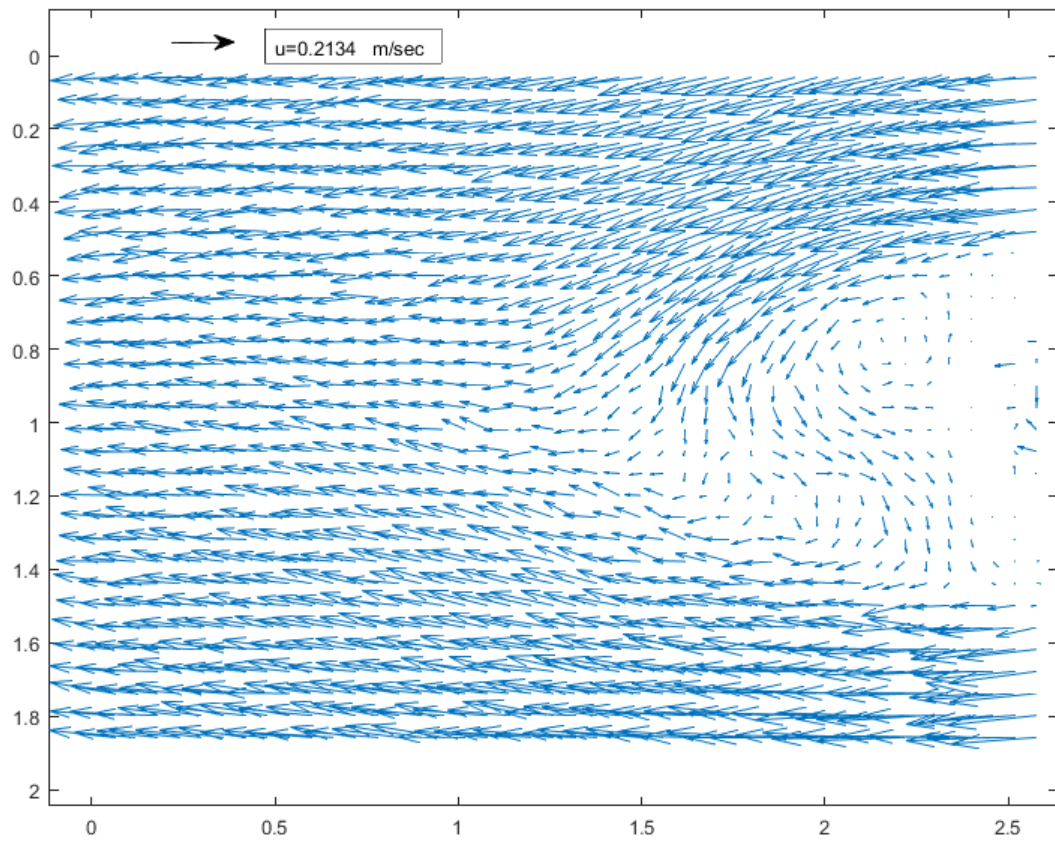
Σχήμα 108: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 5

Φάση 6



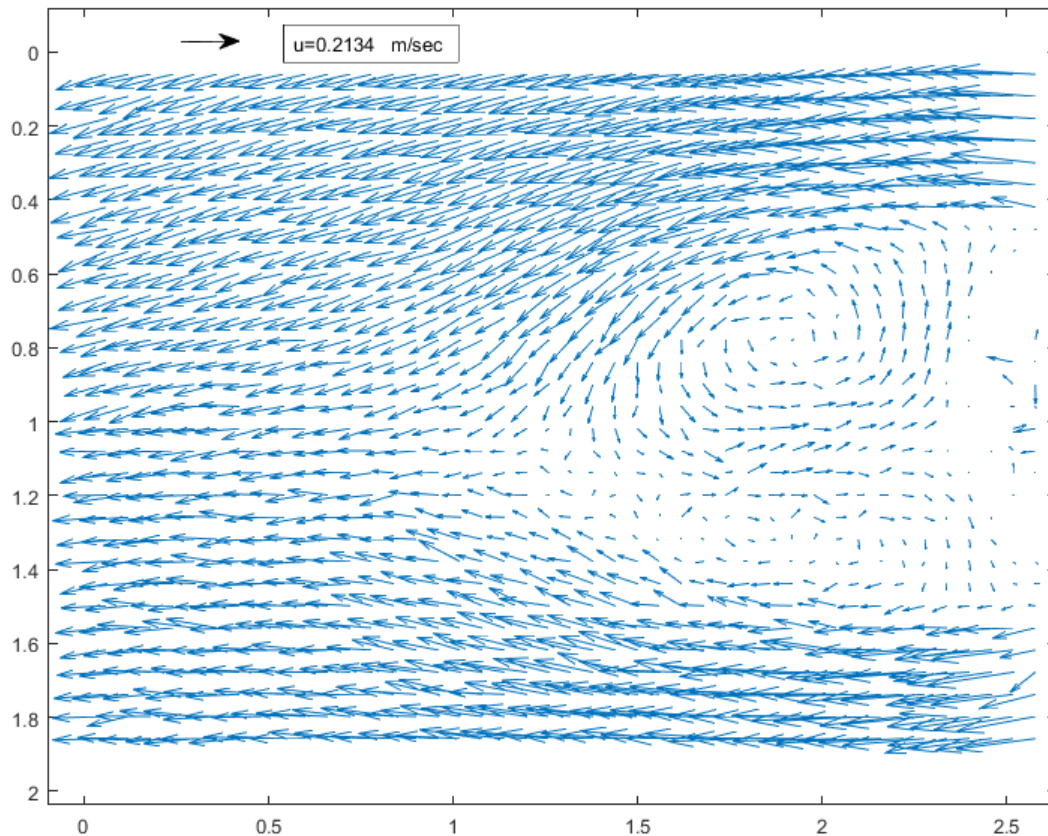
Σχήμα 109: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 6

Φάση 7



Σχήμα 110: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 7

Φάση 8



Σχήμα 111: Πεδίο ροής $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάση 8

Πειραματικά αποτελέσματα

Ούτε σε αυτή την περίπτωση δεν επαληθεύεται η θεωρία.

Φάση 1

Σχηματικά η συγκεκριμένη θεωρία δεν μπορεί να επαληθευτεί. Όπως φαίνεται στο σχήμα στο τέλος υπάρχει ο σχηματισμός ήδη ενός ζεύγους δινών και υπάρχει μεγάλη προδιάθεση σχηματισμού και μιας τρίτης δίνης καθώς υπάρχει μεγάλη αταξία και συνεχόμενη αντιστροφή της ροής σε όλο το πεδίο.

Φάσεις 2-6

Σε όλες αυτές τις φάσεις παρατηρείται απλά μια εξομάλυνση της ροής.

Φάση 7

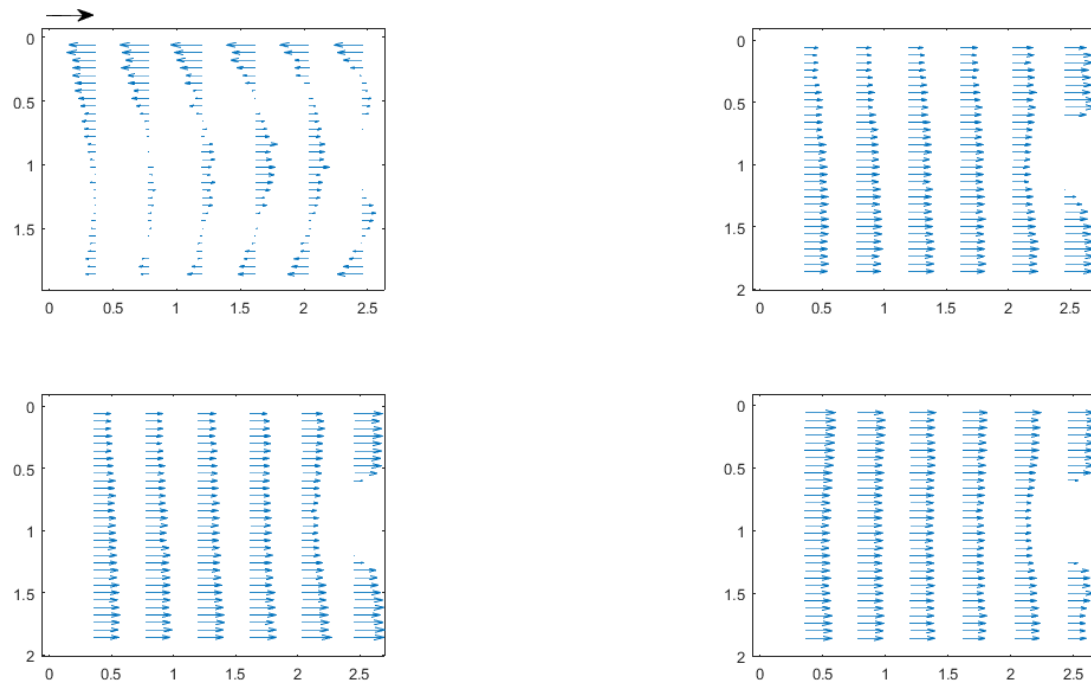
Σε αυτή τη φάση φαίνεται απλά ο σχηματισμός ενός ζεύγους δινών που είναι ακόμα προσκολλημένες μεταξύ τους και βρίσκονται πολύ κοντά στον κύλινδρο.

Φάση 8

Και σε αυτή τη φάση όπως και στην φάση 1 υπάρχουν δύο σχεδόν ολοκληρωμένες δίνες καθώς και μία τρίτη πολύ μικρότερη σε μέγεθος που είναι ακόμα προσκολλημένη στις υπόλοιπες δύο.

Πρόφιλ Ταχύτητας

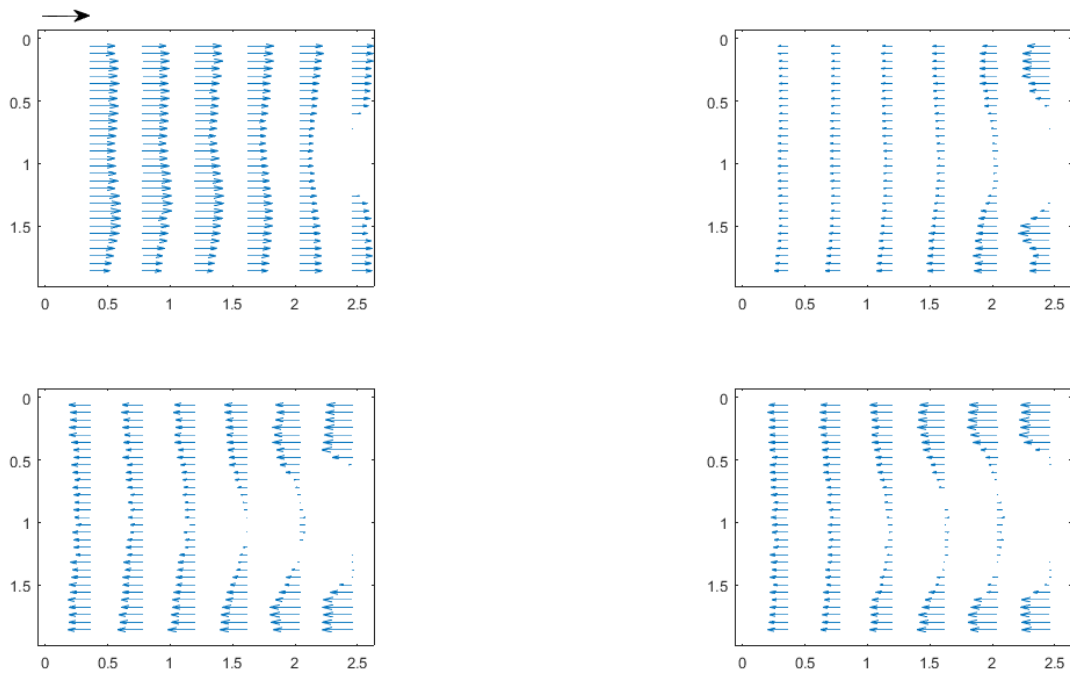
Φάσεις 1-4



Σχήμα 112: Πρόφιλ Ταχύτητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Φάσεις 5-8

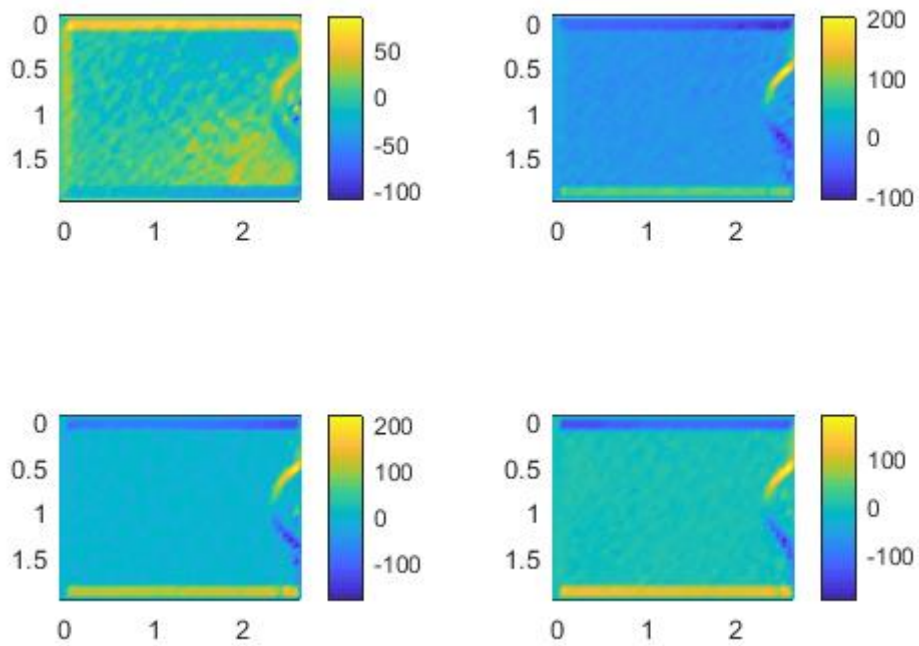


Σχήμα 113: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.448$ sec $KC=34.24$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

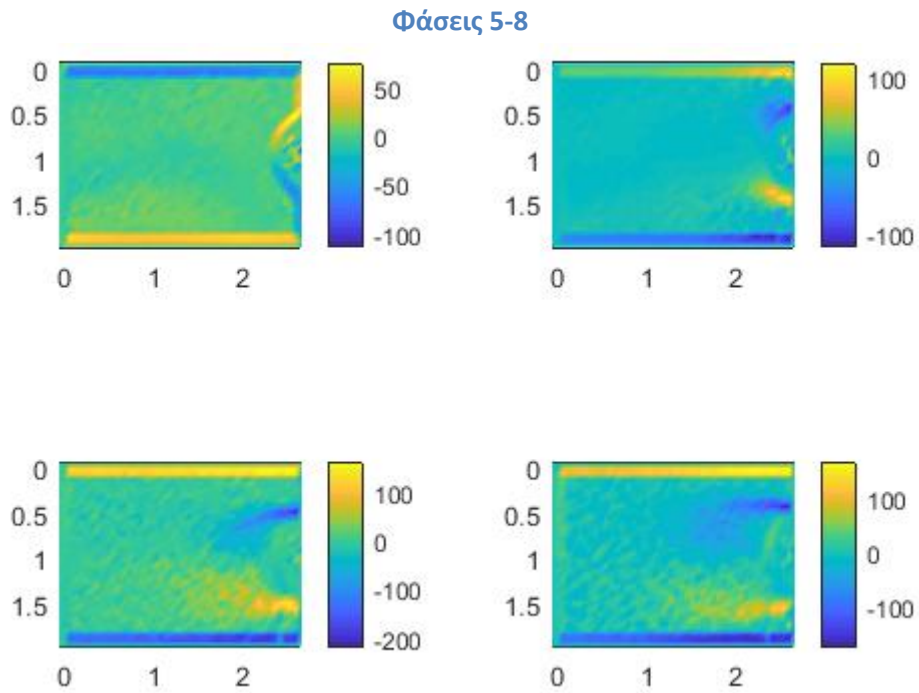
Πεδία Στροβιλότητας

Φάσεις 1-4



Σχήμα 114: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 115: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.448 \text{ sec}$ $KC=34.24$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

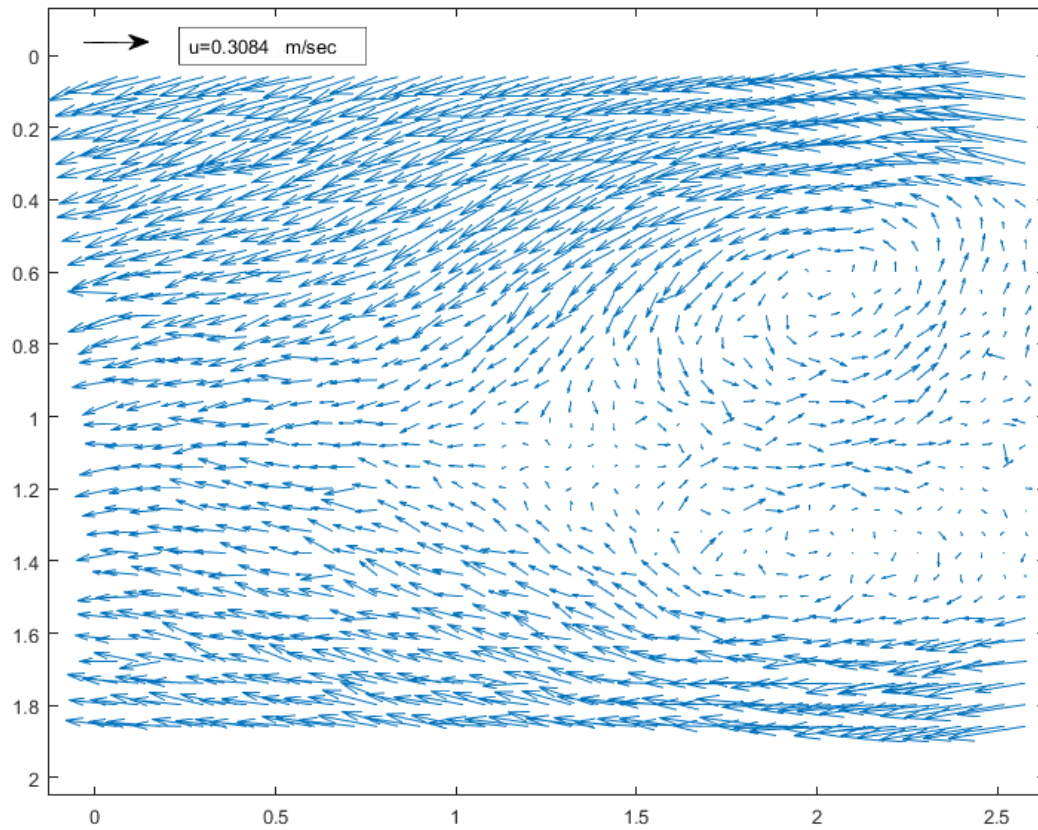
4^ο ΠΕΙΡΑΜΑ : $T=1.336$ sec $KC=42$

Williamson

Σε αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με τον Williamson, το πείραμα ανήκει προσεγγιστικά αυτή τη φορά στην κατηγορία $32 < KC < 40$ όπου σε αυτή τη φάση προβλέπεται η δημιουργία τεσσάρων ζευγών δινών.

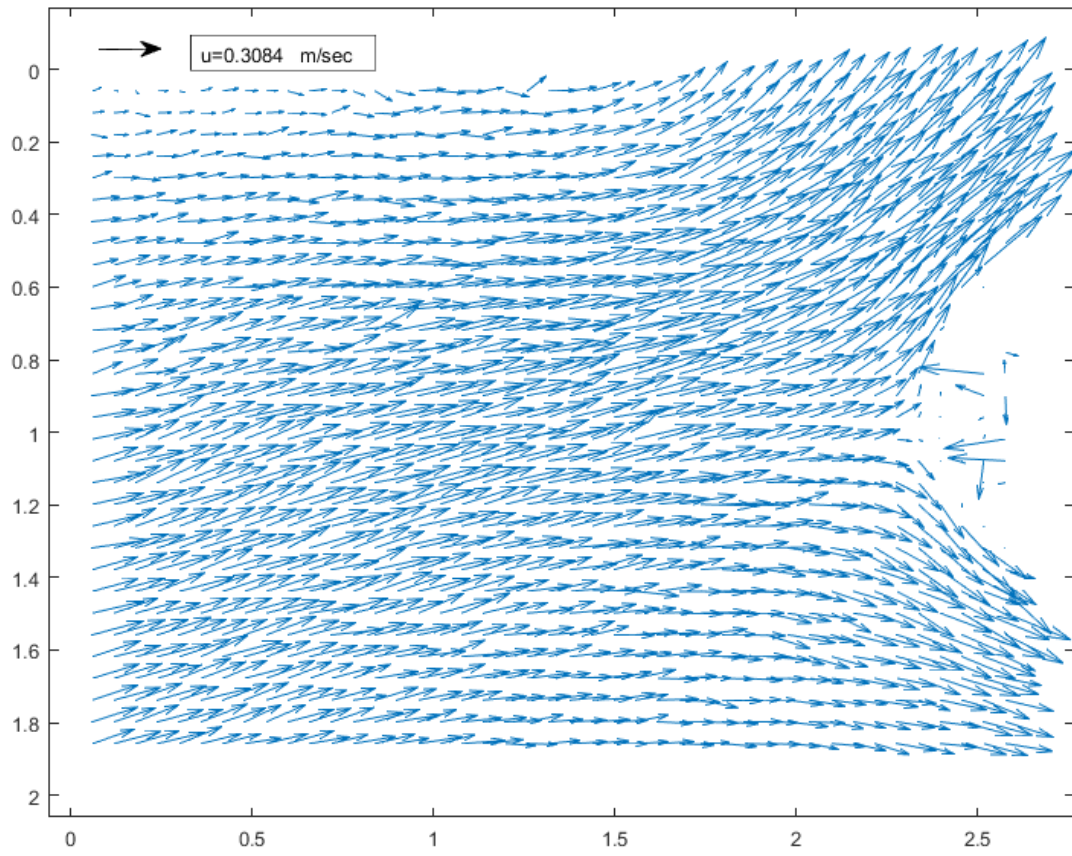
Πεδία Ροής

Φάση 1



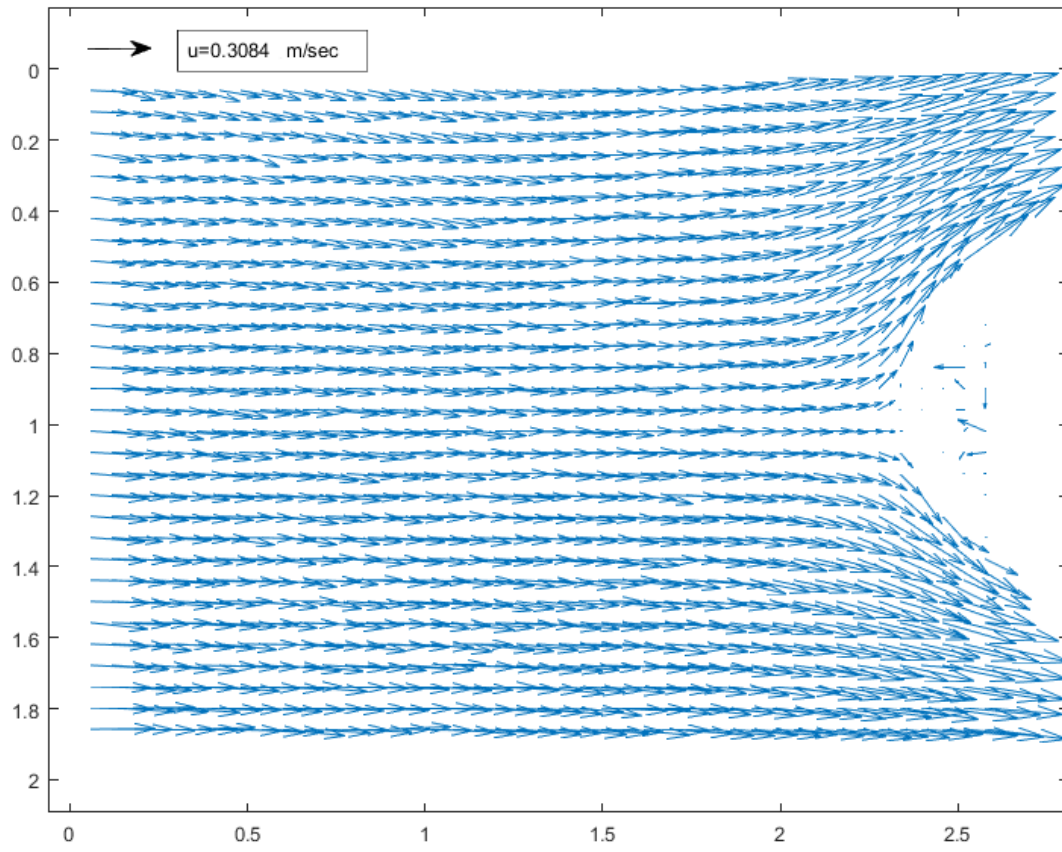
Σχήμα 116: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 1

Φάση 2



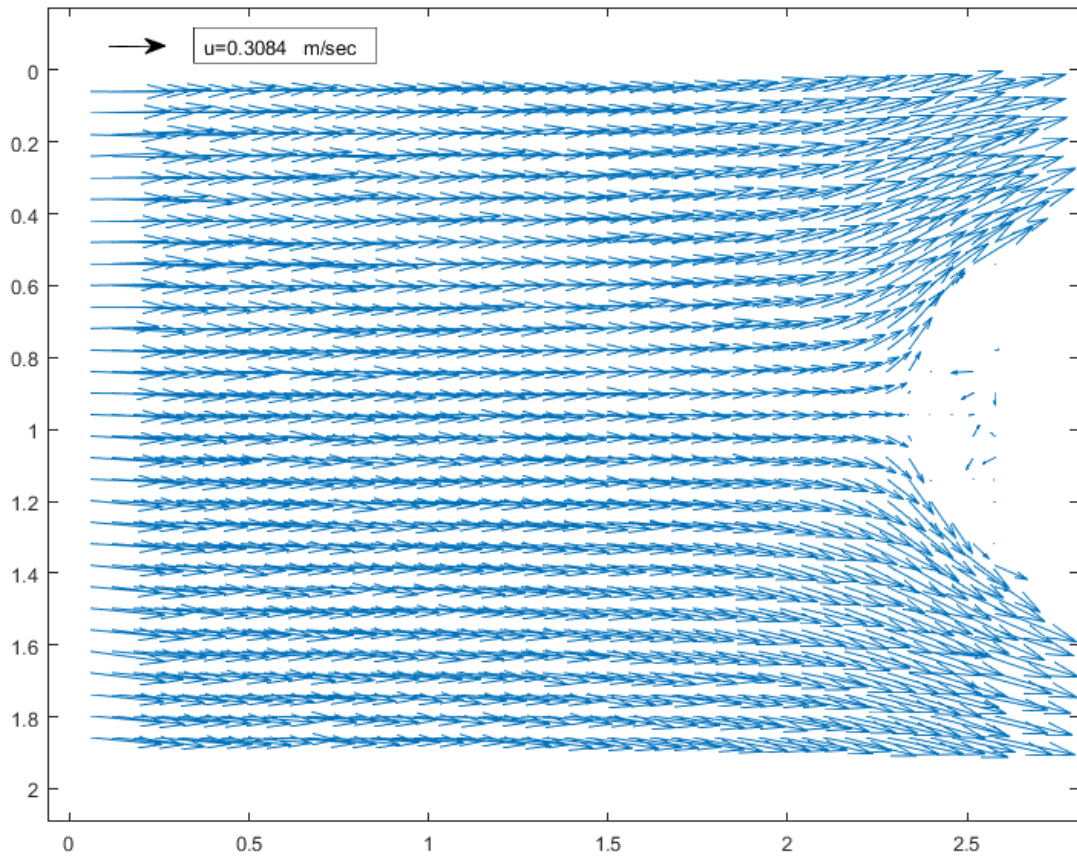
Σχήμα 117: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 2

Φάση 3



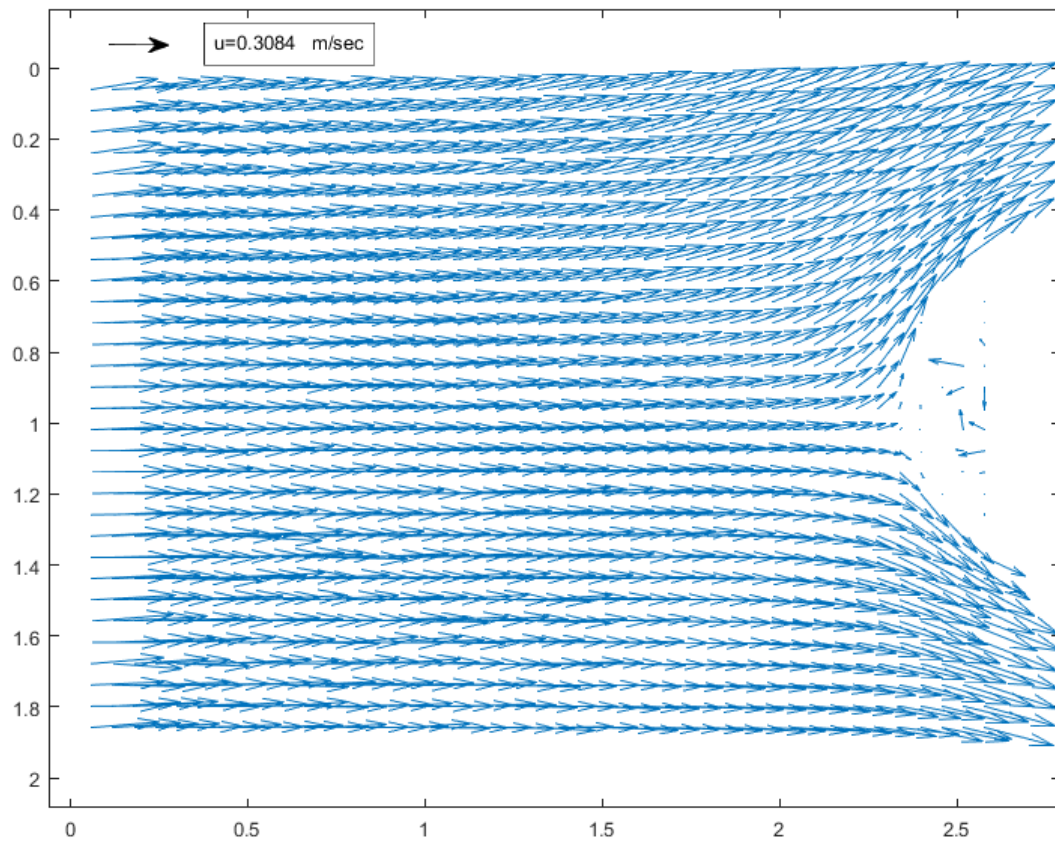
Σχήμα 118: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 3

Φάση 4



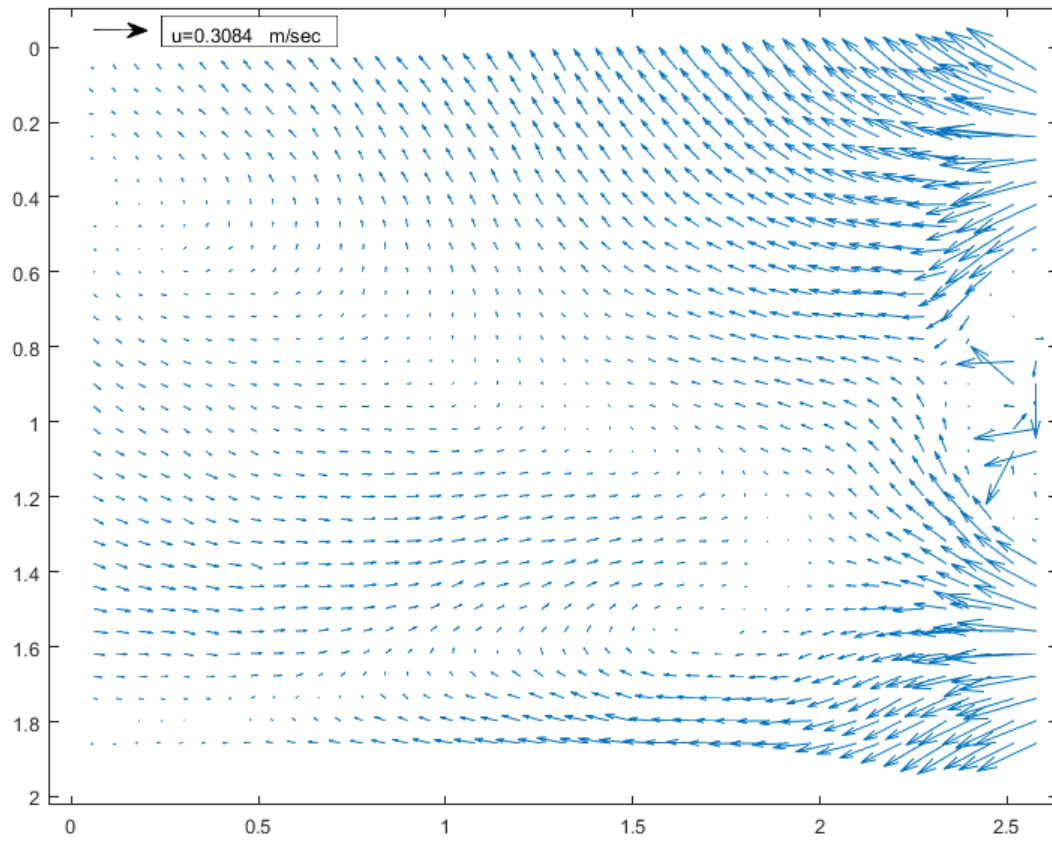
Σχήμα 119: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 4

Φάση 5



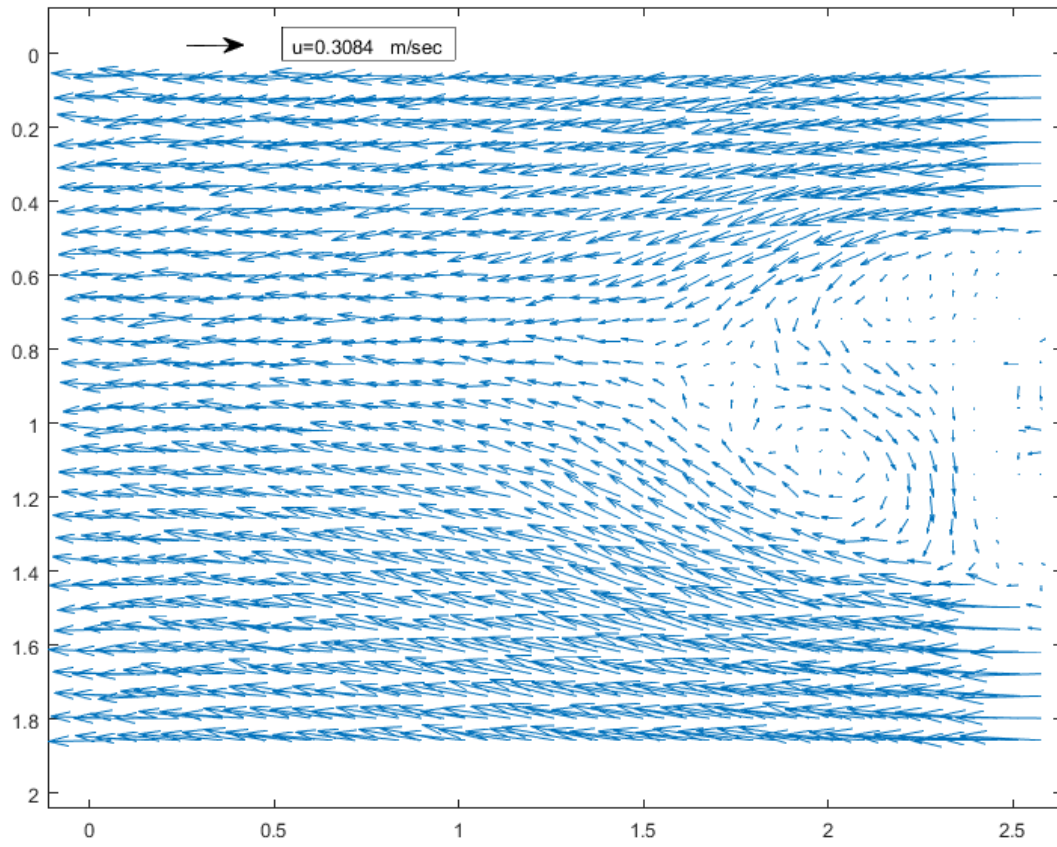
Σχήμα 120: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 5

Φάση 6



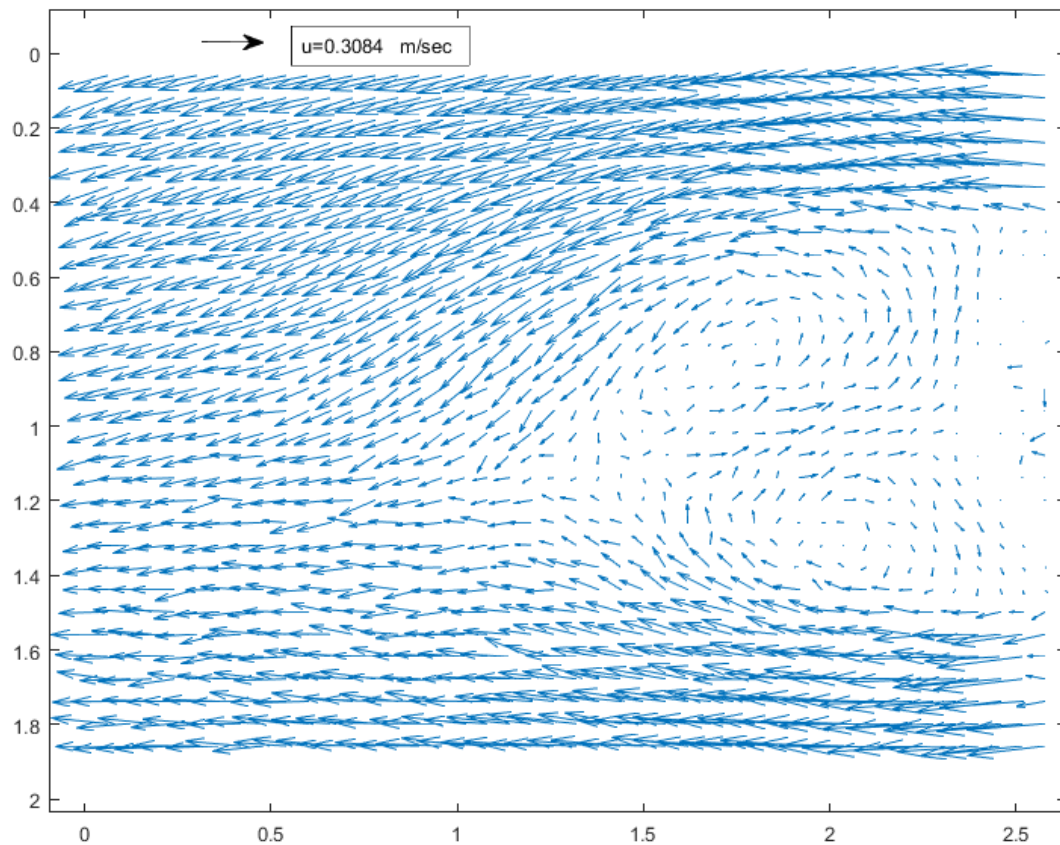
Σχήμα 121: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 6

Φάση 7



Σχήμα 122: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 7

Φάση 8



Σχήμα 123: Πεδίο ροής $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάση 8

Πειραματικά αποτελέσματα

Πειραματικά, όπως φαίνεται στα σχήματα παρακάτω με τις 8 φάσεις, δεν επαληθεύεται σε καμία περίπτωση η θεωρία του Williamson.

Φάση 1

Υπάρχει ο σχηματισμός ενός ζεύγους δινών με υποψία σχηματισμού μιας τρίτης δίνης. Σε καμία περίπτωση λοιπόν δεν μπορεί να επαληθευθεί ο σχηματισμός τεσσάρων ζευγών δινών.

Φάσεις 2-6

Σε αυτές τις φάσεις έχουμε απλά εξομάλυνση της ροής.

Φάση 7

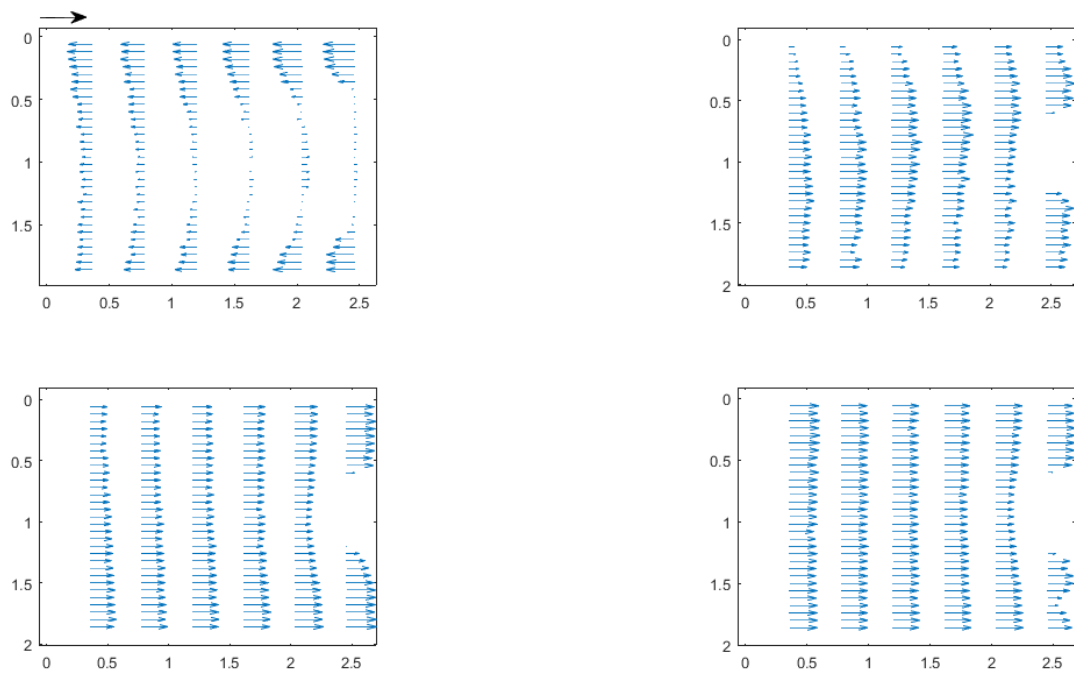
Σε αυτή τη φάση έχουμε την έναρξη σχηματισμού ενός ζεύγους δινών.

Φάση 8

Τέλος σε αυτή τη φάση έχουμε απλά το σχηματισμό ενός ολοκληρωμένου ζεύγους δινών.

Προφίλ Ταχύτητας

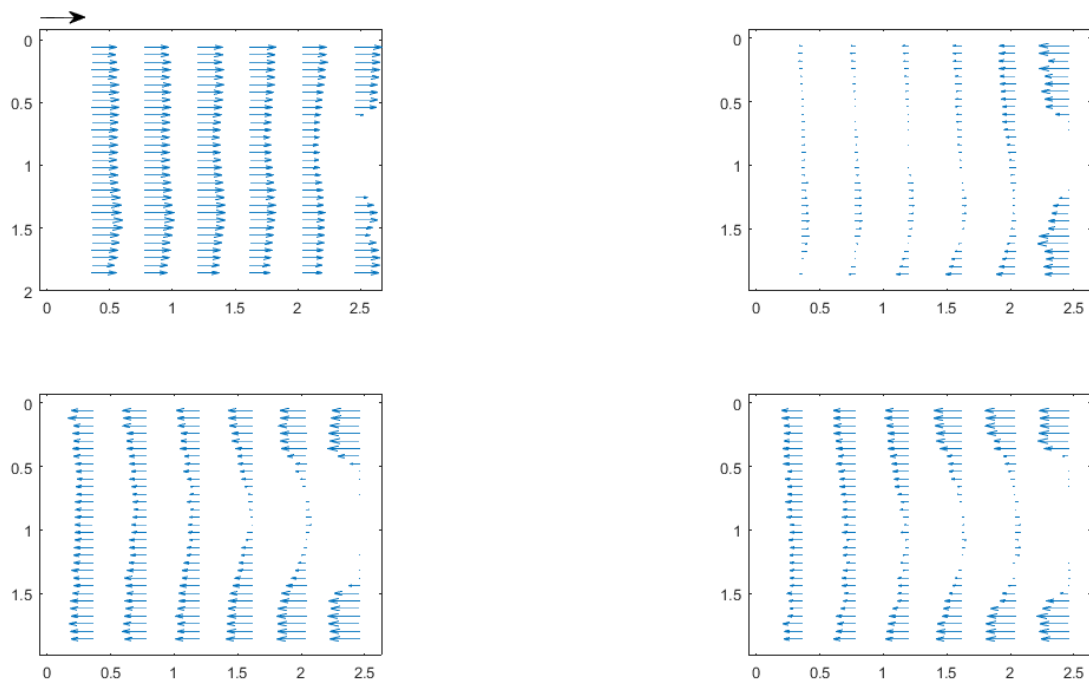
Φάσεις 1-4



Σχήμα 124: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Φάσεις 5-8

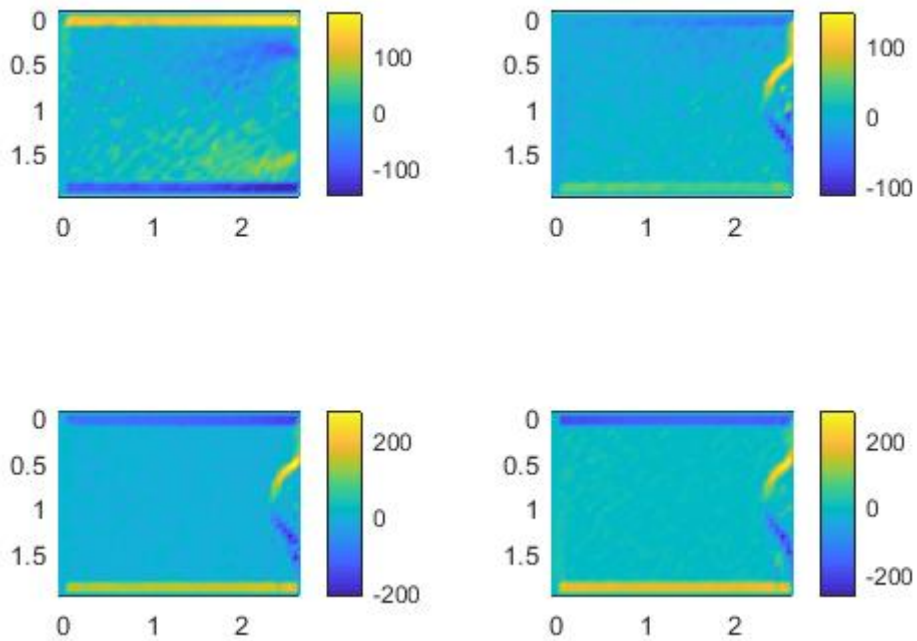


Σχήμα 125: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.336$ sec $KC=42$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

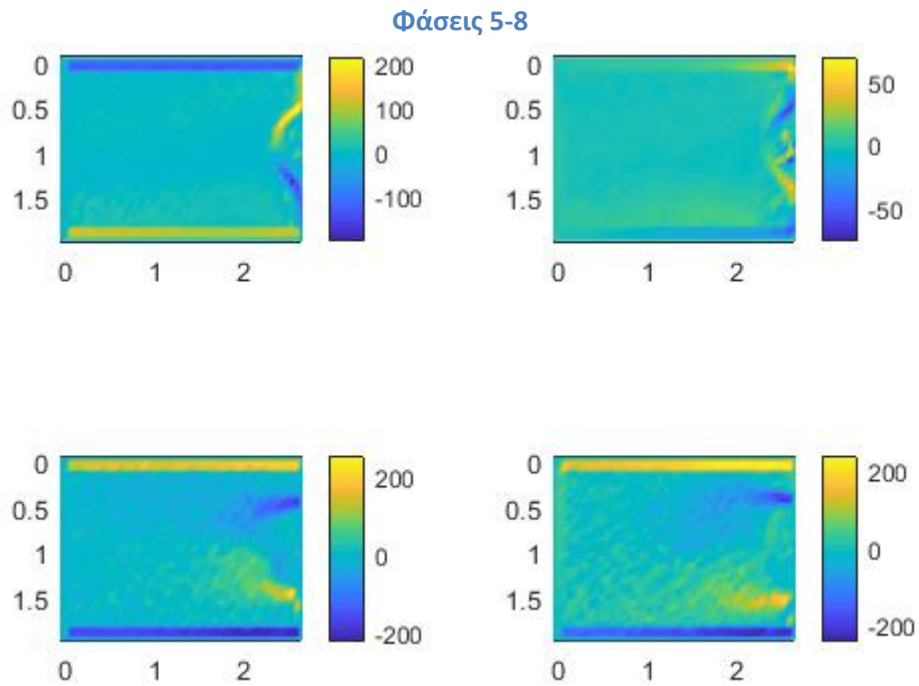
Πεδία Στροβιλότητας

Φάσεις 1-4



Σχήμα 126: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 127: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.336 \text{ sec}$ $KC=42$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

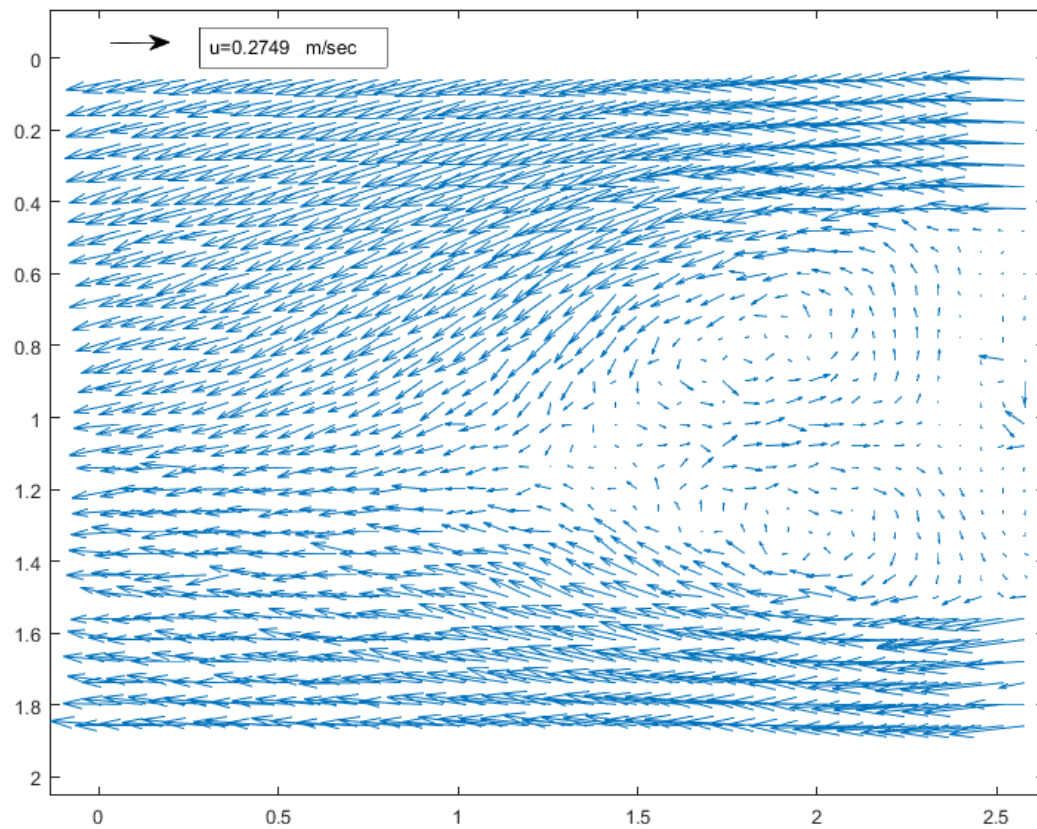
5° ΠΕΙΡΑΜΑ : $T=1.200$ sec $KC=36$

Williamson

Πάμε πάλι προσεγγιστικά στην περίπτωση για $24 < KC < 32$ όπου σε αυτή την περίπτωση αναμένουμε το σχηματισμό 3 ζευγών δινών.

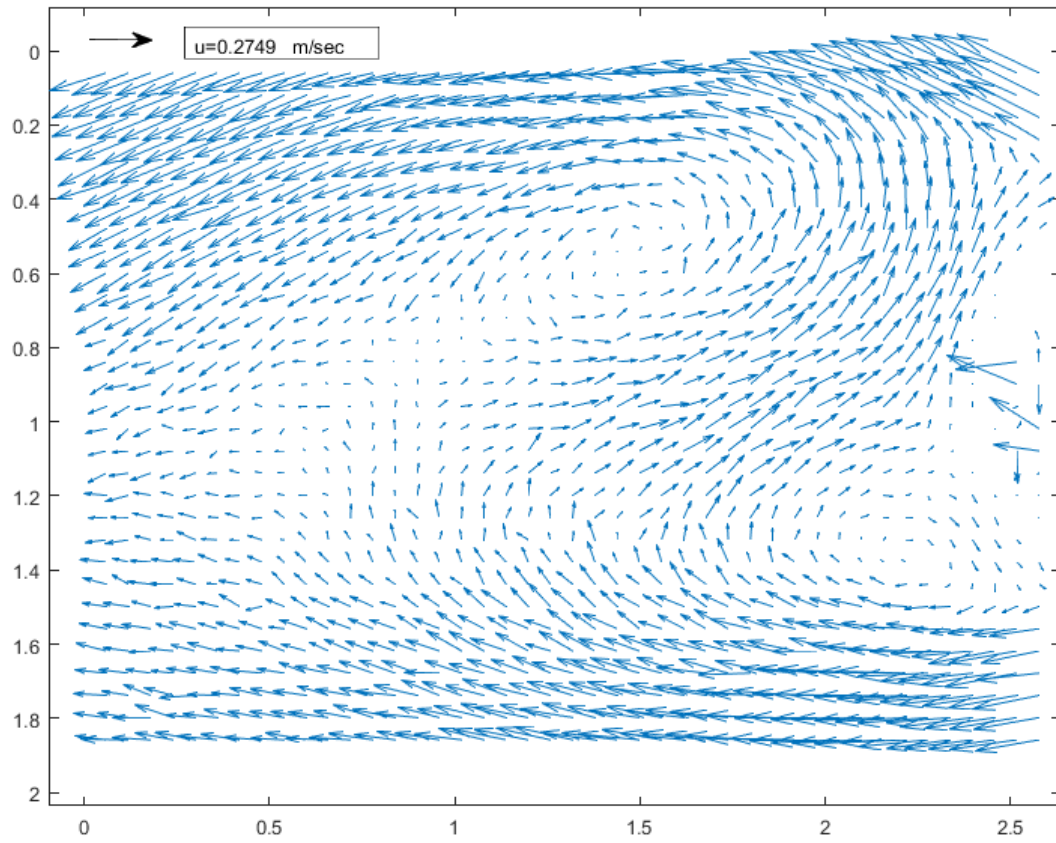
Πεδία Ροής

Φάση 1



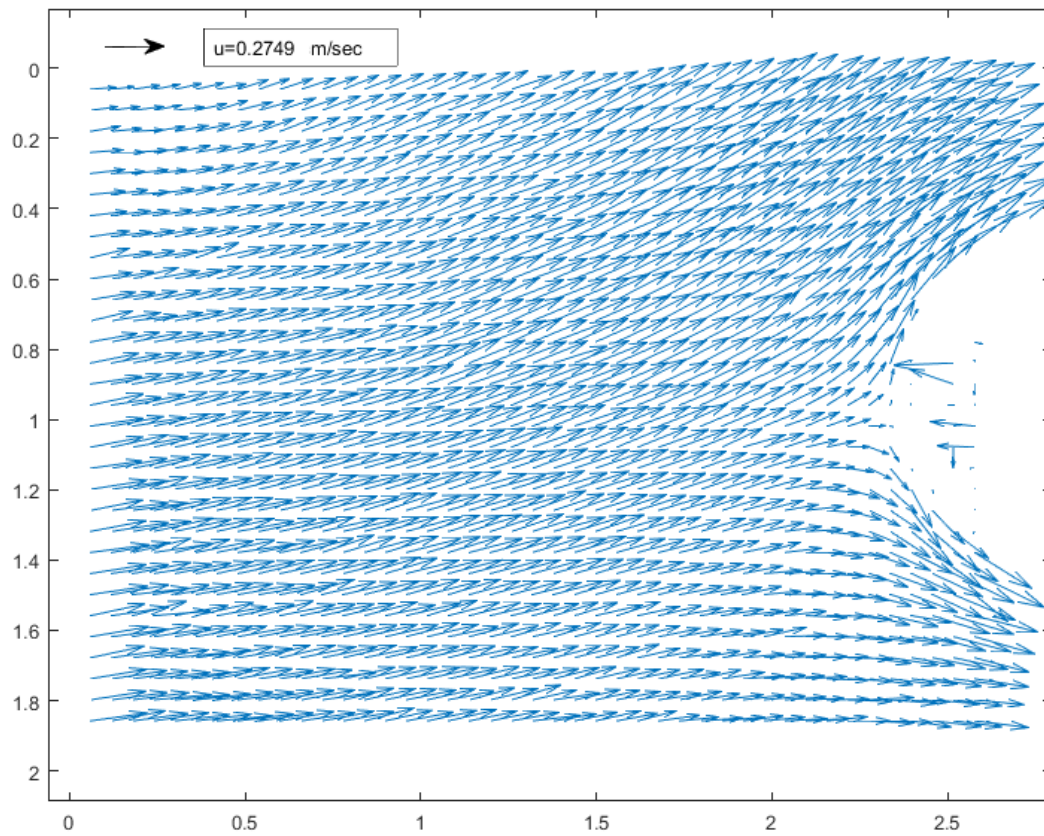
Σχήμα 128: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 1

Φάση 2



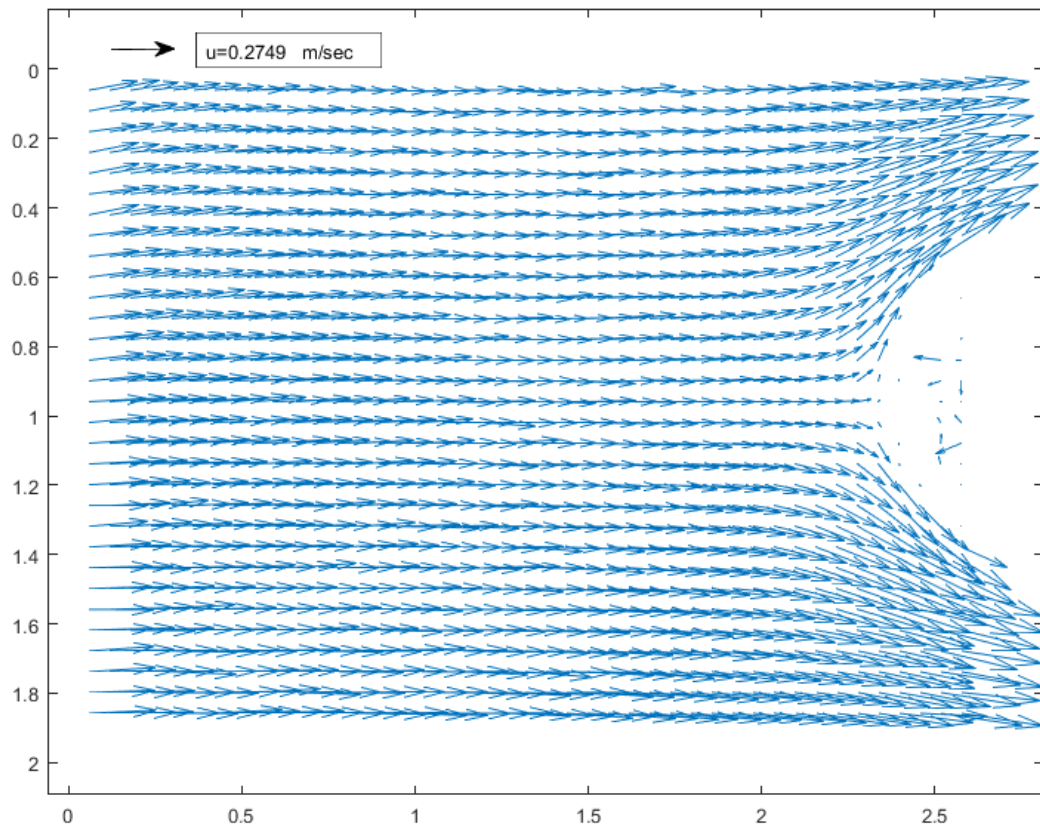
Σχήμα 129: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 2

Φάση 3



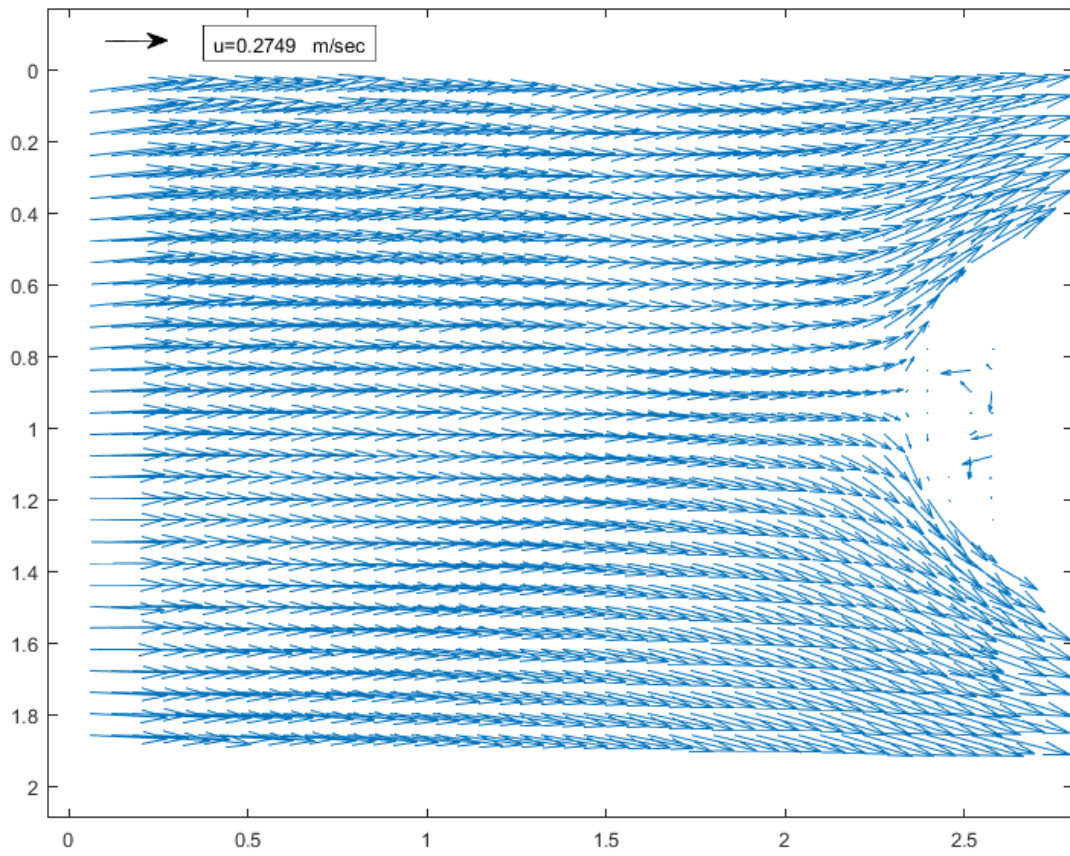
Σχήμα 130: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 3

Φάση 4



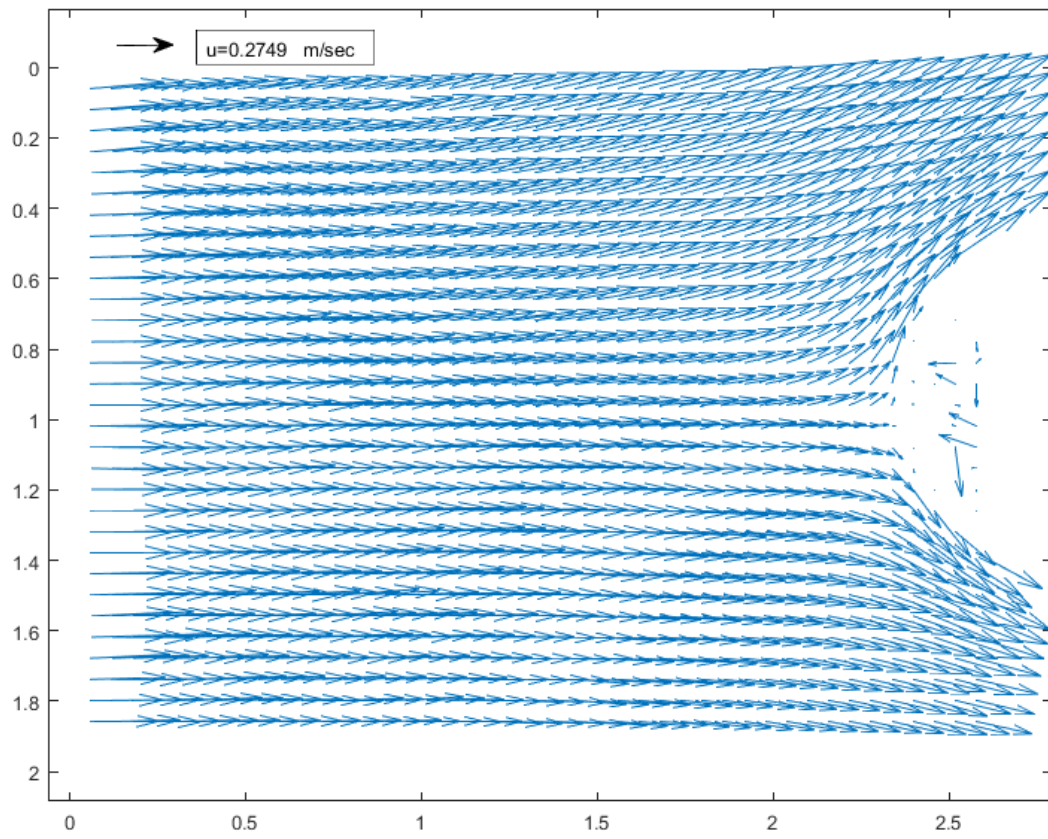
Σχήμα 131: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 4

Φάση 5



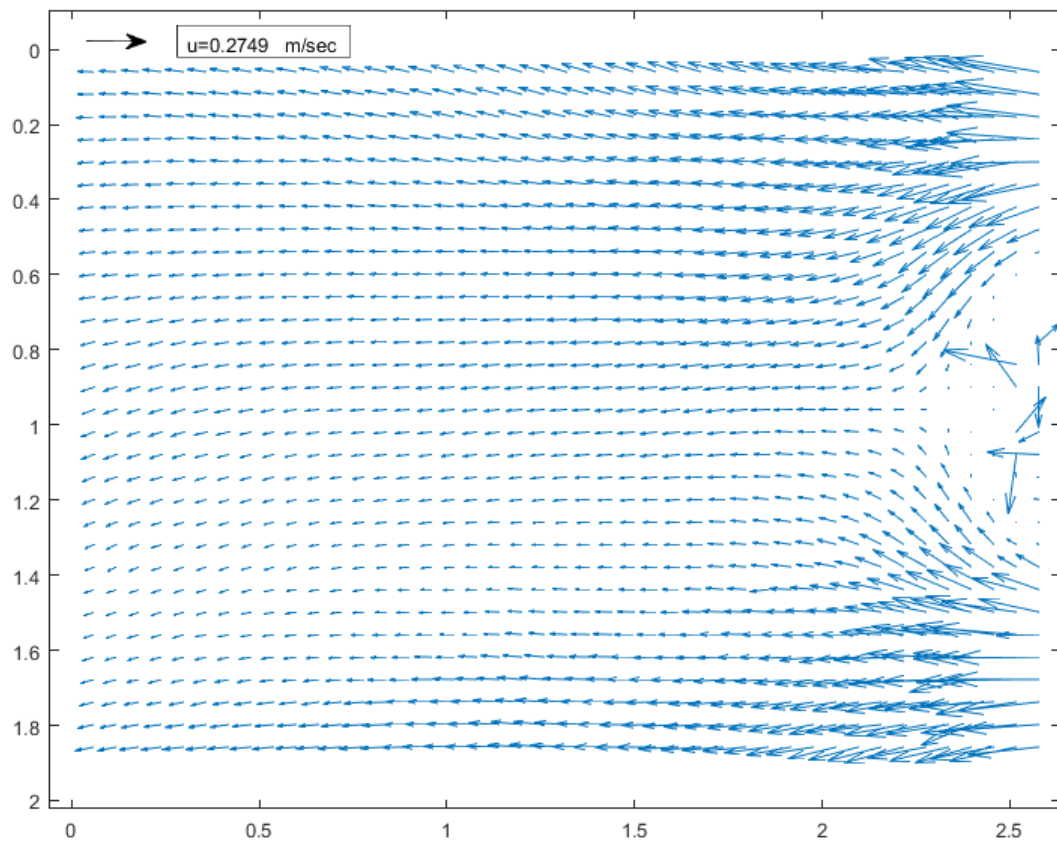
Σχήμα 132: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 5

Φάση 6

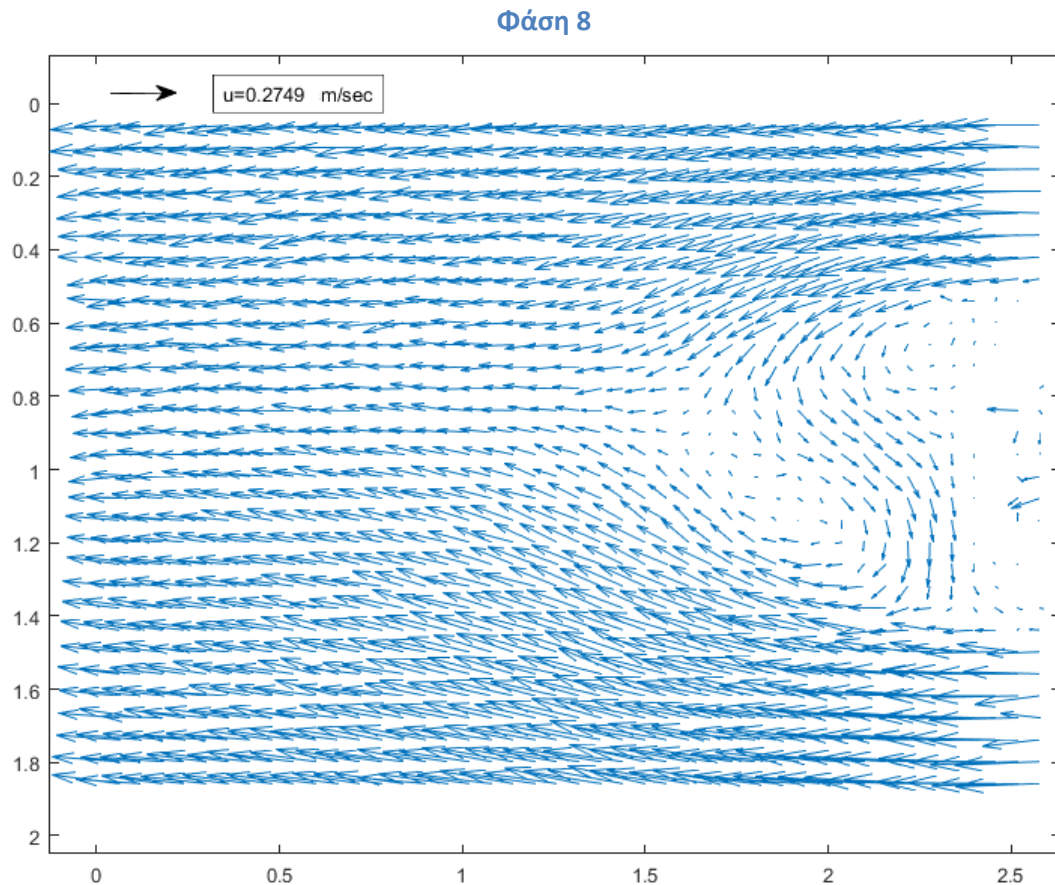


Σχήμα 133: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 6

Φάση 7



Σχήμα 134: Πεδίο ροής $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάση 7



Πειραματικά αποτελέσματα

Φάση 1

Σχηματικά ούτε σε αυτή την περίπτωση επαληθεύεται η θεωρία του Williamson.

Φάση 2

Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε το σχηματισμό ενός ζεύγους δινών σε διαφορετικά τεταρτημόρια αλλά και την τάση σχηματισμού μιας τρίτης.

Φάσεις 3-7

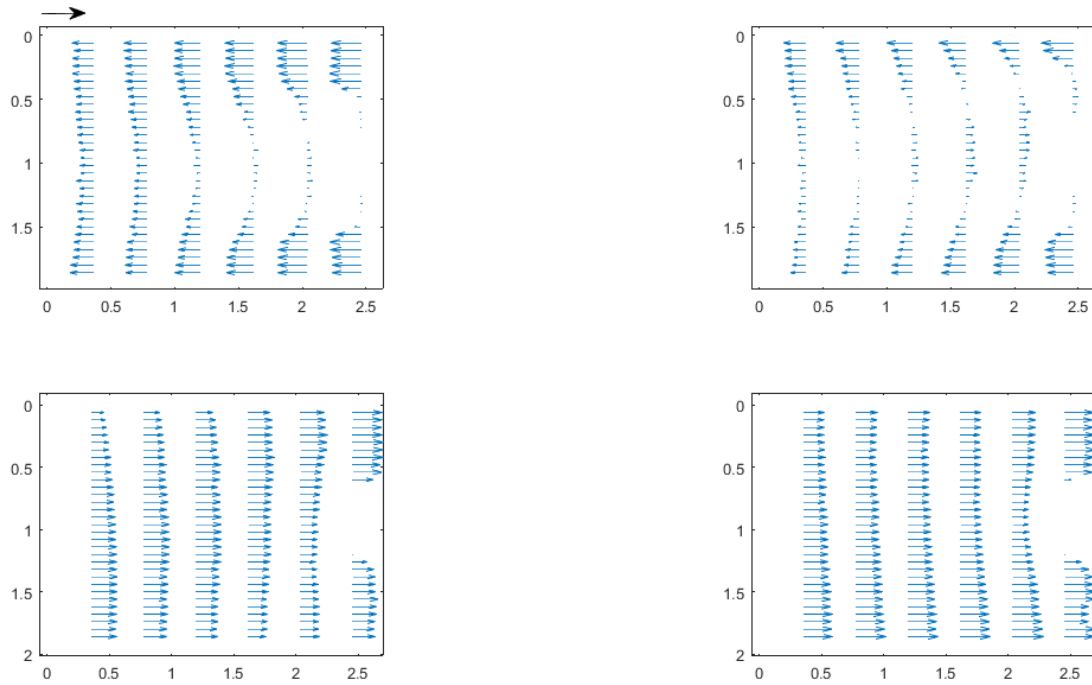
Για ακόμα μια φορά σε αυτές τις φάσεις δεν παρατηρείται τίποτα παραπάνω από μια εξομάλυνση της ροής.

Φάση 8

Το μοναδικό που παρατηρείται σε αυτή τη φάση είναι η έναρξη σχηματισμού ενός ζεύγους δινών αρκετά κοντά στον κύλινδρο.

Προφίλ Ταχύτητας

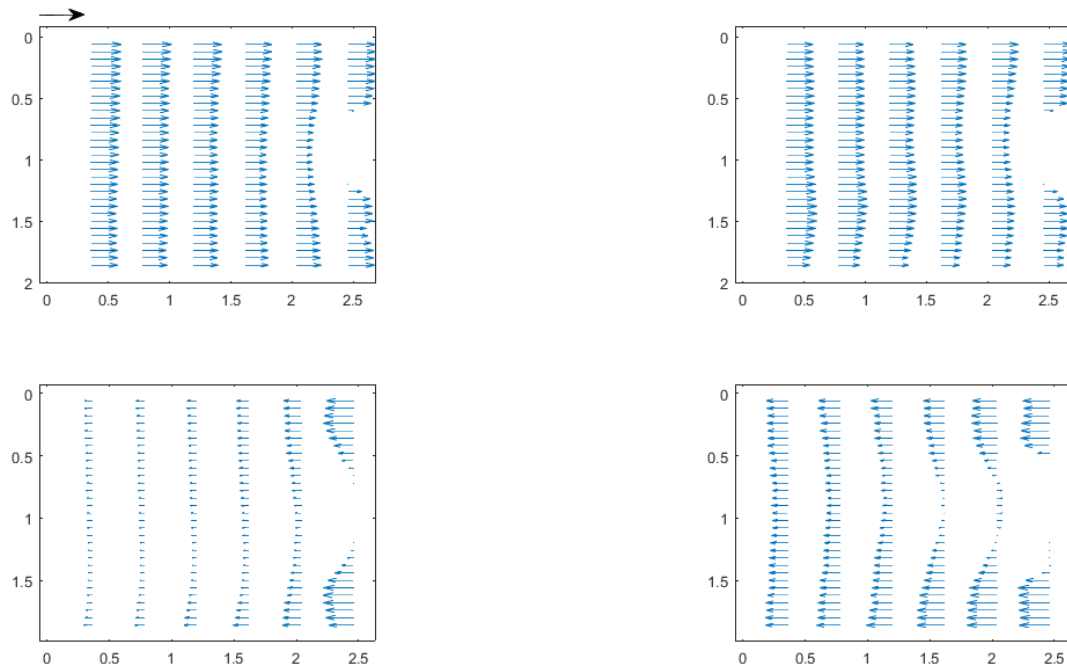
Φάσεις 1-4



Σχήμα 136: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.200$ sec $KC=36$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Φάσεις 5-8

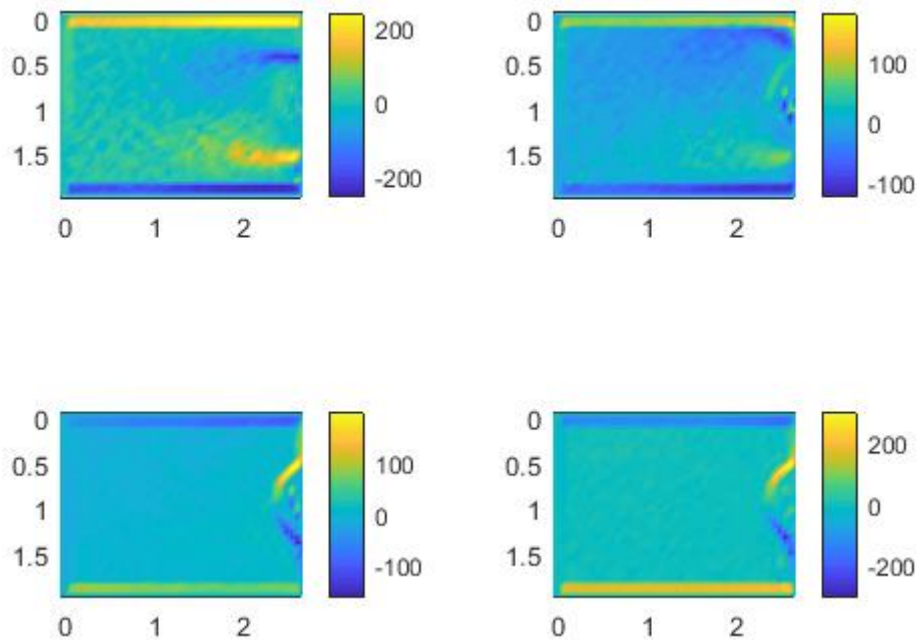


Σχήμα 137: Προφίλ Ταχύτητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των προφίλ ταχυτήτων ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά.

Πεδία Στροβιλότητας

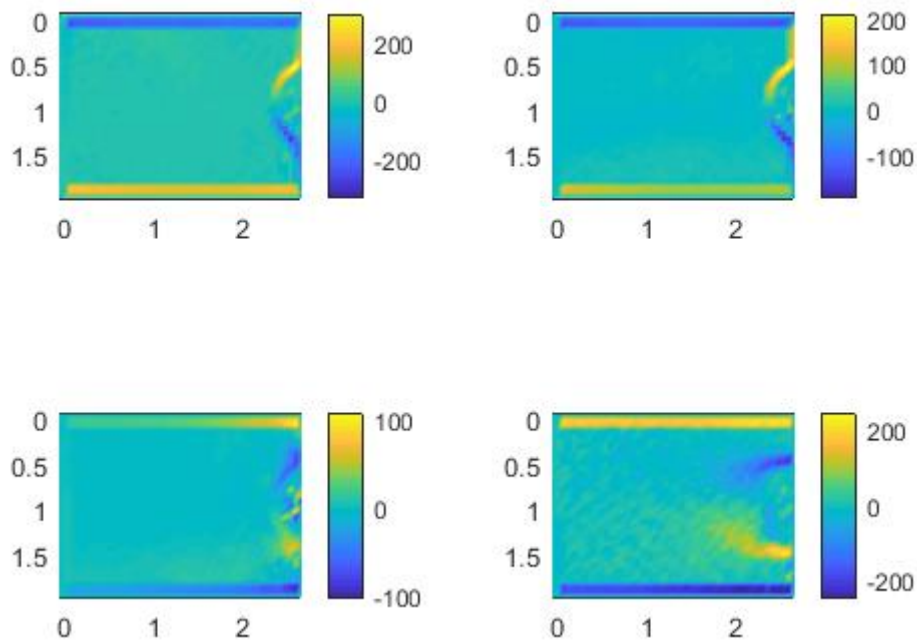
Φάσεις 1-4



Σχήμα 138: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 1-4

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

Φάσεις 5-8



Σχήμα 139: Πεδία Στροβιλότητας $T=1.200 \text{ sec}$ $KC=36$ Φάσεις 5-8

Παραπάνω φαίνονται οι τέσσερις τελευταίες φάσεις των πεδίων στροβιλότητας ξεκινώντας πάνω αριστερά με την πρώτη φάση, συνεχίζοντας δεξιά με την δεύτερη φάση. Την τρίτη φάση την βλέπουμε κάτω αριστερά και τέλος την τέταρτη φάση την βλέπουμε κάτω δεξιά. Τέλος, η στροβιλότητα των πεδίων είναι μετρημένη σε μονάδες $1/s$. Σε όλες τις παραπάνω εικόνες ο κύλινδρος βρίσκεται στην άκρη της εικόνας από τα δεξιά όπως φαίνεται και η συγκεκριμένη ημικυκλική απόχρωση σε κάθε περίπτωση.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιώντας την τεχνική PIV, μελετήθηκε το φαινόμενο της παλλόμενης ροής γύρω από ακίνητο κύλινδρο για διαφορετικούς αριθμούς KC. Συνεχίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε για τους αριθμούς $KC = 19.72, 25.16, 34.24, 42$ και 36 και παράμετρο $\beta = 49.603, 59.241, 69.060, 74.850, 83.333$ αντίστοιχα και αποτελεί μια προσπάθεια προσέγγισης του συγκεκριμένου σύνθετου μη μόνιμου υδροδυναμικού προβλήματος.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής :

- Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα ταλάντωσης τόσο αυξάνεται και η στροβιλότητα του πεδίου της ροής. Επιπλέον, η ένταση των δινών φαίνεται να είναι ανάλογη του KC , ενώ η στροβιλότητα του πεδίου εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου β .
- Λόγω της μικρής περιοχής παρατήρησης των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δεν παρατηρήθηκε ο μέγιστος αριθμός δινών. Παρ' όλα αυτά, το μοτίβο εμφάνισης δινών δείχνει στις περισσότερες περιπτώσεις σταθερό.
- Η χρονική διαφορά δημιουργίας δύο δινών φαίνεται ότι επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την παράμετρο β . Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η χρονική παράμετρος β , τόσο μικραίνει η συγκεκριμένη χρονική διαφορά.
- Επίσης, διαπιστώνεται ο σχηματισμός τουλάχιστον ενός ζεύγους δινών σε κάθε πείραμα. Αν αυτή η κατάσταση συνδυαζόταν με την οπτικοποίηση όλου του πεδίου ροής, πιθανότατα θα επιβεβαιώνονταν όλες οι θεωρίες των papers που παρουσιάστηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Παράρτημα Α

Πρόγραμμα σχεδίασης πεδίου ροής

```
a1=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export1000.dat');
a2=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export2000.dat');
a3=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export3000.dat');
a4=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export4000.dat');
a5=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export5000.dat');
a6=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export6000.dat');
a7=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export7000.dat');
a8=importdata('C:\Karim\27-4-2016 T 1-200sec sep 0-328
msec\Export8000.dat');
```

```
a1=4;
x=a1(:,1)/53400; y=a1(:,2)/53400; u=a1(:,3); v=a1(:,4);
xx=vec2mat(a1(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a1(:,2)/53400,46);
uu=vec2mat(a1(:,3),46); vv=vec2mat(a1(:,4),46);
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,a1);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');
pause;
```

```
x=a2(:,1)/53400; y=a2(:,2)/53400; u=a2(:,3); v=a2(:,4);
xx=vec2mat(a2(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a2(:,2)/53400,46);
uu=vec2mat(a2(:,3),46); vv=vec2mat(a2(:,4),46);
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,a2);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');
pause;
```

```
x=a3(:,1)/53400; y=a3(:,2)/53400; u=a3(:,3); v=a3(:,4);
xx=vec2mat(a3(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a3(:,2)/53400,46);
uu=vec2mat(a3(:,3),46); vv=vec2mat(a3(:,4),46);
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,a3);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');
pause;
```

```
x=a4(:,1)/53400; y=a4(:,2)/53400; u=a4(:,3); v=a4(:,4);  
xx=vec2mat(a4(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a4(:,2)/53400,46);  
uu=vec2mat(a4(:,3),46); vv=vec2mat(a4(:,4),46);  
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn  
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');  
pause;
```

```
x=a5(:,1)/53400; y=a5(:,2)/53400; u=a5(:,3); v=a5(:,4);  
xx=vec2mat(a5(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a5(:,2)/53400,46);  
uu=vec2mat(a5(:,3),46); vv=vec2mat(a5(:,4),46);  
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn  
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');  
pause;
```

```
x=a6(:,1)/53400; y=a6(:,2)/53400; u=a6(:,3); v=a6(:,4);  
xx=vec2mat(a6(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a6(:,2)/53400,46);  
uu=vec2mat(a6(:,3),46); vv=vec2mat(a6(:,4),46);  
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn  
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');  
pause;
```

```
x=a7(:,1)/53400; y=a7(:,2)/53400; u=a7(:,3); v=a7(:,4);  
xx=vec2mat(a7(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a7(:,2)/53400,46);  
uu=vec2mat(a7(:,3),46); vv=vec2mat(a7(:,4),46);  
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn  
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');  
pause;
```

```
x=a8(:,1)/53400; y=a8(:,2)/53400; u=a8(:,3); v=a8(:,4);  
xx=vec2mat(a8(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a8(:,2)/53400,46);  
uu=vec2mat(a8(:,3),46); vv=vec2mat(a8(:,4),46);  
%emfanizoume twra to adiaastato pedio rohs me isa mhkh axonwn  
quiver(xx/0.01,yy/0.01,uu,-vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');
```

Παράρτημα Β

Πρόγραμμα σχεδίασης προφίλ ταχύτητας

```
al=5;
x=a1(:,1)/53400; y=a1(:,2)/53400; u=a1(:,3); v=a1(:,4); subplot(2,2,1);
xx=vec2mat(a1(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a1(:,2)/53400,46);
uu=vec2mat(a1(:,3),46); vv=vec2mat(a1(:,4),46);quiver(xx,yy,uu,-vv,al);axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse');
%ftiaxnoume enan pinaka uu1 mhdenizontas arxika ola ta stoixeia tou kai sthn
%sunexeia antika8istoume ana 7 sthles tou pinaka ta mhdenika stoixeia tou me ta
%stoixeia tou pinaka uu ths antistoixhs 8eshs wste na prokuyei to antistoixo profil
vv=zeros(35,46);uu1=zeros(35,46);
uu1(:,1)=uu(:,1);uu1(:,8)=uu(:,8);uu1(:,15)=uu(:,15);uu1(:,22)=uu(:,22);
uu1(:,29)=uu(:,29);uu1(:,36)=uu(:,36);uu1(:,43)=uu(:,43);
quiver(xx,yy,uu1,vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');

x=a2(:,1)/53400; y=a2(:,2)/53400; u=a2(:,3); v=a2(:,4); subplot(2,2,2);
xx=vec2mat(a2(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a2(:,2)/53400,46);
uu=vec2mat(a2(:,3),46); vv=vec2mat(a2(:,4),46);quiver(xx,yy,uu,-vv,al);axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse');
vv=zeros(35,46);uu2=zeros(35,46);
uu2(:,1)=uu(:,1);uu2(:,8)=uu(:,8);uu2(:,15)=uu(:,15);uu2(:,22)=uu(:,22);
uu2(:,29)=uu(:,29);uu2(:,36)=uu(:,36);uu2(:,43)=uu(:,43);
quiver(xx,yy,uu2,vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');

x=a3(:,1)/53400; y=a3(:,2)/53400; u=a3(:,3); v=a3(:,4); subplot(2,2,3);
xx=vec2mat(a3(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a3(:,2)/53400,46);
uu=vec2mat(a3(:,3),46); vv=vec2mat(a3(:,4),46);quiver(xx,yy,uu,-vv,al);axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse');
vv=zeros(35,46);uu3=zeros(35,46);
uu3(:,1)=uu(:,1);uu3(:,8)=uu(:,8);uu3(:,15)=uu(:,15);uu3(:,22)=uu(:,22);
uu3(:,29)=uu(:,29);uu3(:,36)=uu(:,36);uu3(:,43)=uu(:,43);
quiver(xx,yy,uu3,vv,al);axis equal; set(gca,'YDir','Reverse');
```

Παράρτημα Γ

Πρόγραμμα triggering Arduino

```
double v1 = 0; double v2 = 0; double v3 = 0; double v4 = 0; double v5 = 0; double v6 = 0;
double v7 = 0; double v8 = 0; double v9 = 0; double v10 = 0;
double value1 = 0; double value2 = 0; int thresh = 180; int trig = 0;
void setup() { pinMode(2, OUTPUT); pinMode(A5, INPUT); Serial.begin(9600); }
void loop() {
Start:
v1 = analogRead(A5); delay(1); v2 = analogRead(A5); delay(1); v3 = analogRead(A5); delay(1);
v4 = analogRead(A5); delay(1); v5 = analogRead(A5); delay(1);
v6 = analogRead(A5); delay(1); v7 = analogRead(A5); delay(1); v8 = analogRead(A5); delay(1);
v9 = analogRead(A5); delay(1); v10 = analogRead(A5); delay(1);
value2 = ( v1 + v2 + v3 + v4 + v5 + v6 + v7 + v8 + v9 + v10 )/10;
Serial.println(trig);
if ( (value2 > thresh) && (trig == 0) ) {goto Triggering;}
Cont:
if (v2 < thresh) { trig = 0; }
goto Start;
Triggering:
digitalWrite(2, HIGH);
delay(10);
digitalWrite(2, LOW);
trig=1;
goto Cont;
}
```

Παράρτημα Δ

Πρόγραμμα εύρεσης τυπικής απόκλισης

```
al=3;

x=a1(:,1)/53400; y=a1(:,2)/53400; u=a1(:,3); v=a1(:,4);

xx=vec2mat(a1(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a1(:,2)/53400,46);

%oi uu kai vv einai oi duo sunistwse tis taxuthtas se ka8e fash

uu1=vec2mat(a1(:,3),46); vv1=vec2mat(a1(:,4),46);

u11=uu1.^2;v11=vv1.^2;

%o pinakas m dexetai gia stoixeia tou ta metra ths taxuthtas

m=(u11+v11).^0.5;

%metatrepoume ton pinaka m se [1610,1] gia na mporoume na vroume epeita thn tupikh
%apoklish s.

t1=reshape(m,[1610,1]);

s1=std(s1);

x=a2(:,1)/53400; y=a2(:,2)/53400; u=a2(:,3); v=a2(:,4);

xx=vec2mat(a2(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a2(:,2)/53400,46); uu2=vec2mat(a2(:,3),46);
vv2=vec2mat(a2(:,4),46);

u22=uu2.^2;v22=vv2.^2;m=(u22+v22).^0.5;

t2=reshape(m,[1610,1]);

s2=std(s2);

x=a3(:,1)/53400; y=a3(:,2)/53400; u=a3(:,3); v=a3(:,4);

xx=vec2mat(a3(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a3(:,2)/53400,46); uu3=vec2mat(a3(:,3),46);
vv3=vec2mat(a3(:,4),46);

u33=uu3.^2;v33=vv3.^2;m=(u33+v33).^0.5;

t3=reshape(m,[1610,1]);

s3=std(s3);

x=a4(:,1)/53400; y=a4(:,2)/53400; u=a4(:,3); v=a4(:,4);
```



```
xx=vec2mat(a4(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a4(:,2)/53400,46); uu4=vec2mat(a4(:,3),46);  
vv4=vec2mat(a4(:,4),46);
```

```
u44=uu4.^2;v44=vv4.^2;m=(u44+v44).^0.5;
```

```
t4=reshape(m,[1610,1]);
```

```
s4=std(s4);
```

```
x=a5(:,1)/53400; y=a5(:,2)/53400; u=a5(:,3); v=a5(:,4);
```

```
xx=vec2mat(a5(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a5(:,2)/53400,46); uu5=vec2mat(a5(:,3),46);  
vv5=vec2mat(a5(:,4),46);
```

```
u55=uu5.^2;v55=vv5.^2;m=(u55+v55).^0.5;
```

```
t5=reshape(m,[1610,1]);
```

```
s5=std(s5);
```

```
x=a6(:,1)/53400; y=a6(:,2)/53400; u=a6(:,3); v=a6(:,4);
```

```
xx=vec2mat(a6(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a6(:,2)/53400,46); uu6=vec2mat(a6(:,3),46);  
vv6=vec2mat(a6(:,4),46);
```

```
u66=uu6.^2;v66=vv6.^2;m=(u66+v66).^0.5;
```

```
t6=reshape(m,[1610,1]);
```

```
s6=std(s6);
```

```
x=a7(:,1)/53400; y=a7(:,2)/53400; u=a7(:,3); v=a7(:,4);
```

```
xx=vec2mat(a7(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a7(:,2)/53400,46); uu7=vec2mat(a7(:,3),46);  
vv7=vec2mat(a7(:,4),46);
```

```
u77=uu7.^2;v77=vv7.^2;m=(u77+v77).^0.5;
```

```
t7=reshape(m,[1610,1]);
```

```
s7=std(s7);
```

```
x=a8(:,1)/53400; y=a8(:,2)/53400; u=a8(:,3); v=a8(:,4);
```

```
xx=vec2mat(a8(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a8(:,2)/53400,46); uu8=vec2mat(a8(:,3),46);  
vv8=vec2mat(a8(:,4),46);
```

```
u88=uu8.^2;v88=vv8.^2;m=(u88+v88).^0.5;
```

```
t8=reshape(m,[1610,1]);
```

```
s8=std(s8);
```

Παράρτημα Ε

Πρόγραμμα σχεδίασης στροβιλότητας

```
a1=3;

x=a1(:,1)/53400; y=a1(:,2)/53400; u=a1(:,3); v=a1(:,4); subplot(2,2,1);

xx=vec2mat(a1(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a1(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a1(:,3),46);
vv=vec2mat(a1(:,4),46);

%vriskoume thn strovilothta vazontas isa mhkh axonwn ka8ws kai apoxrswseis gia na
%katalavainoume thn entash ths strovilothtas se ka8e shmeio

cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;

x=a2(:,1)/53400; y=a2(:,2)/53400; u=a2(:,3); v=a2(:,4); subplot(2,2,2);

xx=vec2mat(a2(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a2(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a2(:,3),46);
vv=vec2mat(a2(:,4),46);

cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;

x=a3(:,1)/53400; y=a3(:,2)/53400; u=a3(:,3); v=a3(:,4); subplot(2,2,3);

xx=vec2mat(a3(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a3(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a3(:,3),46);
vv=vec2mat(a3(:,4),46);

cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;

x=a4(:,1)/53400; y=a4(:,2)/53400; u=a4(:,3); v=a4(:,4); subplot(2,2,4);

xx=vec2mat(a4(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a4(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a4(:,3),46);
vv=vec2mat(a4(:,4),46);

cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;

%mesw ths entolhs subplot emfanizei 4 faseis tautoxrona

pause;
```

```
x=a5(:,1)/53400; y=a5(:,2)/53400; u=a5(:,3); v=a5(:,4); subplot(2,2,1);  
  
xx=vec2mat(a5(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a5(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a5(:,3),46);  
vv=vec2mat(a5(:,4),46);  
  
cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;  
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;  
  
x=a6(:,1)/53400; y=a6(:,2)/53400; u=a6(:,3); v=a6(:,4); subplot(2,2,2);  
  
xx=vec2mat(a6(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a6(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a6(:,3),46);  
vv=vec2mat(a6(:,4),46);  
  
cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;  
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;  
  
x=a7(:,1)/53400; y=a7(:,2)/53400; u=a7(:,3); v=a7(:,4); subplot(2,2,3);  
  
xx=vec2mat(a7(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a7(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a7(:,3),46);  
vv=vec2mat(a7(:,4),46);  
  
cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;  
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;  
  
x=a8(:,1)/53400; y=a8(:,2)/53400; u=a8(:,3); v=a8(:,4); subplot(2,2,4);  
  
xx=vec2mat(a8(:,1)/53400,46); yy=vec2mat(a8(:,2)/53400,46); uu=vec2mat(a8(:,3),46);  
vv=vec2mat(a8(:,4),46);  
  
cur=curl(xx,yy,uu,-vv); pcolor(xx/0.01,yy/0.01,cur); shading interp; axis equal;  
set(gca,'YDir','Reverse'); colorbar;
```

Βιβλιογραφία

1. **Williamson, C.H.K.** Μελέτη παλλόμενης ροής γύρω από κύλινδρο. 1985, Σόμ. 155.
2. **Obasaju, Bearman, Graham.** Μελέτη δυνάμεων, κυκλοφορίας και μοτίβων δινών γύρω από κύλινδρο σε παλλόμενη ροή. 1988, 196.
3. **Sarpkaya, Turgut.** Δυνάμεις πάνω σε κύλινδρο που βρίσκεται μέσα σε παλλόμενη συνεκτική ροή σε χαμηλούς αριθμούς Keulegan-Carpenter. 1986, 165.
4. **Anh-Hung Pham, Chang-Yeol Lee, Jang-Hoon Seo, Ho-Hwan Chun, Hee-Jung Kim, Hyun-Sik Yoon, Jeong-Hu Kim, Dong-Woo Park, and Il-Ryong Park.** LAMINAR FLOW PAST AN OSCILLATING CIRCULAR CYLINDER IN CROSS FLOW. 2010. Σόμ. 18
5. **J.C.Lin, D.Rockwell.** *Quantitative interpretation of vortices from a cylinder oscillating in quiescent fluid.* 1996
6. **Δημήτριος, Μαθιουλάκης.** "Μηχανική των Ρευστών II ". Αθήνα : ΕΜΠ, 2011.
7. **Σωκράτης, Σααγγάρης.** *Μηχανική των Ρευστών.* Αθήνα : Ξυμεών, 2005.
8. **JUSTESEN, PETER.** A numerical study of oscillating flow around a circular cylinder. 1991, Σόμ. 222.
9. **en.wikipedia.org.**
10. **<http://www.arduino.cc/>.**
11. **A. ONGOREN, D. ROCKWELL.** Flow structure from an oscillating cylinder Part 1 Mechanisms of phase shift and recovery in the near wake. 1988, Σόμ. 188.
12. **KEULEGAN CARPENTER.** Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid