



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών

# Παλλόμενη ροή νερού γύρω από κύλινδρο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ ΚΟΥΡΟΥΣΗ

Επιβλέπων: Μαθιουλάκης Δημήτριος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2015





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών

# Παλλόμενη ροή νερού γύρω από κύλινδρο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΚΟΥΡΟΥΣΗΣ ΓΡΗΓΟΡΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής  
**Μαθιουλάκης Δημήτριος** (Καθηγητής ΕΜΠ)

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .... / .... / 2015

.....

.....

.....

ΑΘΗΝΑ, 2015



Το παρόν έγγραφο υπάγεται στην άδεια (CC BY-NC-SA 3.0)  
Κουρούσης Γρηγόρης, 2015

## Ευχαριστίες

---

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ.Δημήτρη Μαθιουλάκη για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω και να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και για την υπομονή και τη διάθεση που επέδειξε όλο αυτό το διάστημα καθοδηγώντας με και επιβλέποντάς με.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον υποψήφιο διδάκτορα κ.Δημήτρη Γιασεμίδη για την πολύτιμη υποστήριξη-αρωγή που μου παρείχε καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε.

Τέλος, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια, στα αδέρφια μου και σε όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Περίληψη .....	vi
Abstract.....	vi
1. Εισαγωγή – Σημεία Εφαρμογής.....	1
1.1. Παράκτιες και υπεράκτιες εξέδρες.....	1
1.1.1. Πλατφόρμες με πόδια έντασης (TLP).....	1
1.1.2. Ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες.....	2
1.1.3. Αυτό-ανυψούμενη πλατφόρμα (Jack-up rig).....	3
1.1.4. Σταθερές πλατφόρμες (Fixed platforms).....	3
1.1.5. Συμβατός Πύργος (Compliant tower).....	4
1.1.6. Πλωτή μονάδα παράγωγης, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO) .....	5
1.1.7. Πλατφόρμα που η δομή της βασίζεται στη βαρύτητα (GBS).....	6
1.1.8. Πλατφόρμα με δομή σημαδούρας (Spar platform).....	7
1.1.9. Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας (CALM) .....	8
1.2. Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.....	9
1.2.1. Ανεμογεννήτριες σταθερής δομής.....	9
1.2.1.1. Ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε ένα μόνο πλώνα (Monopile foundation).....	9
1.2.1.2. Ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε τρεις πλώνες (Tripod foundation).....	9
1.2.1.3. Ανεμογεννήτρια που η δομή της στηρίζεται στη βαρύτητα (Gravity foundation).....	10
1.2.2. Πλωτές ανεμογεννήτριες.....	10
1.2.2.1. Windfloat ανεμογεννήτριες.....	10
1.2.2.2. Ανεμογεννήτριες με πόδια έντασης.....	11
1.2.2.3. Ανεμογεννήτρια με δομή σημαδούρας (Spar buoy) .....	12
1.3. Υποβρύχιοι αγωγοί.....	13
1.3.1. Χαρακτηριστικά υποβρύχιων αγωγών .....	13
1.3.2. Παράγοντες επιλογής διαδρομής αγωγών.....	13
1.3.3. Τοποθέτηση αγωγών.....	14
1.3.3.1. Pull/tow system.....	14
1.3.3.2. S-lay system .....	15
1.3.3.3. J-lay system.....	16

1.3.3.4.	Reel-ray system .....	16
1.4.	Καλωδιωτές και κρεμαστές γέφυρες .....	17
1.4.1.	Κρεμαστή γέφυρα .....	17
1.4.2.	Καλωδιώτη γέφυρα.....	18
1.5.	Βιομηχανικές καμινάδες .....	20
1.6.	Καλώδιο μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος.....	21
2.	Πρότυπες Πειραματικές Δοκιμές .....	23
2.1.	Μελέτη παλλόμενης ροής γύρω από κύλινδρο κατά Williamson. ("Sinusoidal flow relative to circular cylinders", C.H.K. Williamson,1985,J.Fluid Mechanics, vol. 155, pp. 141-174)	23
2.1.1.	Πειραματικές Διατάξεις.....	24
2.1.1.1.	Πειραματική διάταξη σχήματος U .....	24
2.1.1.2.	Πειραματική διάταξη δυο κατακόρυφων κυλίνδρων.....	24
2.1.2.	Απεικόνιση της ροής και μελέτη δυνάμεων για την πειραματική διάταξη ενός κυλίνδρου.....	25
2.1.2.1.	Ζεύγος μικρών προσκολλημένων δινών ( $0 < KC < 7$ ) .....	26
2.1.2.2.	Εγκάρσια «οδός» /ένα ζεύγος δινών ( $7 < KC < 15$ ) .....	27
2.1.2.3.	Διπλό ζεύγος δινών για $15 < KC < 24$ .....	29
2.1.2.4.	Τρία ζεύγη δινών για $24 < KC < 32$ και τέσσερα ζεύγη δινών για $32 < KC < 40$ 30	
2.1.3.	Συντελεστές δυνάμεων .....	31
2.1.4.	Συμπεράσματα .....	33
2.2.	Δυνάμεις πάνω σε κύλινδρο που βρίσκεται μέσα σε παλλόμενη συνεκτική ροή σε χαμηλούς αριθμούς Keulegan-Carpenter κατά Sarpkaya.....	34
	("Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers", Turgut Sarpkaya, 1986, J.Fluid Mechanics, vol. 165, pp. 61-71)	34
2.2.1.	Εισαγωγή.....	34
2.2.2.	Πειραματική διάταξη και παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	36
2.2.3.	Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	40
2.2.4.	Συμπεράσματα .....	42
2.3.	Μελέτη δυνάμεων, κυκλοφορίας και μοτίβων δινών γύρω από κύλινδρο σε παλλόμενη ροή, των Obasaju, Bearman και Graham. ("A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow", E.D.Obasaju, P.W.Bearman, J.M.R. Graham, 1988, J.Fluid Mechanics, vol.196, pp.467-494)	43
2.3.1.	Εισαγωγή.....	43
2.3.2.	Πειραματική διάταξη .....	44

2.3.2.1.	Πειραματικές διατάξεις .....	44
2.3.2.2.	Τεχνική mode-averaging.....	46
2.3.3.	Αποτελέσματα.....	48
2.3.3.1.	Οπτικοποίηση της ροής .....	48
2.3.3.2.	Τοπικές δυνάμεις και κυκλοφορία .....	49
2.3.3.1.	Μετρήσεις δυνάμεων .....	54
2.3.4.	Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων.....	56
2.3.5.	Συμπεράσματα .....	60
3.	Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης .....	62
3.1.	Πειραματική διάταξη .....	63
3.1.1.	Δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π από Plexiglas .....	63
3.2.	Όργανα μετρήσεων.....	64
3.2.1.	Επαγωγικός Αναλογικός Αισθητήρας θέσης (IA8-M1K-I3).....	64
3.2.2.	Τροφοδοτικό STATRON (No 0103013) του αισθητήρα θέσης .....	65
3.3.	Μέθοδος triggering μέσω Arduino .....	66
3.4.	Μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV).....	66
3.5.	Μετατροπέας σήματος SPIDER 8.....	69
4.	Παρουσίαση και σχολιασμός πειραματικών αποτελεσμάτων .....	72
4.1.	Υπολογισμός αριθμού Keulegan-Carpenter (KC) και Stokes (όπου σύμφωνα με την ονοματολογία του Sarpkaya(1986) δόθηκε το σύμβολο $\beta$ ).....	72
4.2.	Προσδιορισμός διαφοράς φάσης $\Delta\varphi$ .....	73
4.3.	Συνοπτική παρουσίαση μετρήσεων .....	75
4.4.	Αριθμητικός υπολογισμός κυκλοφορίας $\Gamma$ .....	76
4.5.	Παρουσίαση υλικού οπτικοποιήσεων .....	77
4.5.1.	KC=19.4, $\beta=50$ , T= 2.0150sec και $\Delta\varphi=7^\circ$ .....	77
4.5.1.1.	Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile) .....	77
4.5.1.2.	Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile).....	85
4.5.1.3.	Δύναμη Άνωσης L.....	89
4.5.1.4.	Συντελεστής Άνωσης $C_L$ .....	89
4.5.2.	KC=26.4, $\beta=61$ , T=1.6520 sec και $\Delta\varphi=17^\circ$ .....	90
4.5.2.1.	Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile).....	90
4.5.2.2.	Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile).....	98
4.5.2.3.	Δύναμη Άνωσης L.....	102
4.5.2.4.	Συντελεστής Άνωσης $C_L$ .....	103



---

4.5.3.	KC=35.8, $\beta=70$ , $T=1.4200\text{sec}$ και $\Delta\varphi=46^\circ$ .....	104
4.5.3.1.	Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile) .....	104
4.5.3.2.	Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile).....	111
4.5.3.3.	Δύναμη Άνωσης L.....	115
4.5.3.4.	Συντελεστής Άνωσης $C_L$ .....	116
4.5.4.	KC=43, $\beta=76$ , $T=1.3200\text{ sec}$ και $\Delta\varphi=74^\circ$ .....	117
4.5.4.1.	Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile) .....	117
4.5.4.2.	Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile).....	125
4.5.4.3.	Δύναμη Άνωσης L.....	129
4.5.4.4.	Συντελεστής Άνωσης $C_L$ .....	129
4.5.5.	KC=37, $\beta=83$ , $T=1.200\text{ sec}$ και $\Delta\varphi=114^\circ$ .....	130
4.5.5.1.	Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile) .....	130
4.5.5.2.	Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile).....	138
4.5.5.1.	Δύναμη Άνωσης L.....	142
4.5.5.2.	Συντελεστής Άνωσης $C_L$ .....	143
4.5.6.	Συγκεντρωτικά γραφήματα δύναμης και συντελεστή άνωσης .....	144
5.	Συμπεράσματα .....	147
Παράρτημα Α'	.....	149
Παράρτημα Β'	.....	155
6.	Βιβλιογραφία.....	156

## Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της παλλόμενης ροής γύρω από ακίνητο κύλινδρο που σχετίζεται με διάφορες πρακτικές εφαρμογές, όπως σε υπεράκτιες κατασκευές και σε υποθαλάσσιους αγωγούς άντλησης - μεταφοράς πετρελαίου.

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε δοχείο νερού, σχήματος αναστραμμένου Π, ταλαντούμενου περί οριζόντιο άξονα επί του οποίου ήταν τοποθετημένος διαφανής κύλινδρος. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για διάφορες συχνότητες ταλάντωσης του δοχείου, με σκοπό την μελέτη του πεδίου για διάφορες τιμές του αδιάστατου αριθμού Keulegan-Carpenter και της παραμέτρου Sarpkaya  $\beta$ , που προσδιορίζουν το πεδίο ροής. Για τη μέτρηση του μη μόνιμου πεδίου των σχετικών ταχυτήτων ως προς τον κύλινδρο έγινε χρήση της τεχνικής 2D PIV, ενώ με τη βοήθεια επαγωγικού αισθητήρα μετρήθηκαν τα μέσα πεδία για οκτώ χρονικές στιγμές κάθε περιόδου εκτελώντας εν φάσει μετρήσεις, αποτυπώνοντας έτσι την δημιουργία και χρονική εξέλιξη των δημιουργούμενων δινών, την στροβιλότητα του πεδίου και την ασκούμενη στον κύλινδρο άνοση.

## Abstract

The objective of the present Diploma Thesis is the experimental study of the oscillatory flow about a stationary cylinder which is related to various practical applications like offshore structures and submerged tubes.

The experimental setup included a water tank having the shape of a reversed Greek letter Π, oscillating around a horizontal axis, along which a straight circular tube was installed. Experiments were conducted for various frequencies of oscillation in order to study the flow for different values of the non dimensional Keulegan- Carpenter number as well as Sarpakaya number  $\beta$  upon which the flow field is dependent. The relevant velocity field with respect to the cylinder was measured by applying the 2D PIV technique, while phase averaging allowed to record the time averaged field for 8 instants of each cycle in each of the examined cases. It was thus made possible to study the time evolution of vortical structures shed from the cylinder and estimate the lift applied on the cylinder.



## 1. Εισαγωγή - Σημεία Εφαρμογής

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται μέσω πειραματικής δοκιμής, το φαινόμενο της αστάθειας της ροής γύρω από ακίνητο κυλινδρικό κύλινδρο που δημιουργείται εξαιτίας της περιοδικής κίνησης του ρευστού.

Η μελέτη αυτή γίνεται διότι το συγκεκριμένο φαινόμενο, το οποίο αναλύεται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο, έχει άμεση σύνδεση με πολλές περιπτώσεις υπεράκτιων και άλλων κατασκευών.

Τέτοιες κατασκευές παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω:

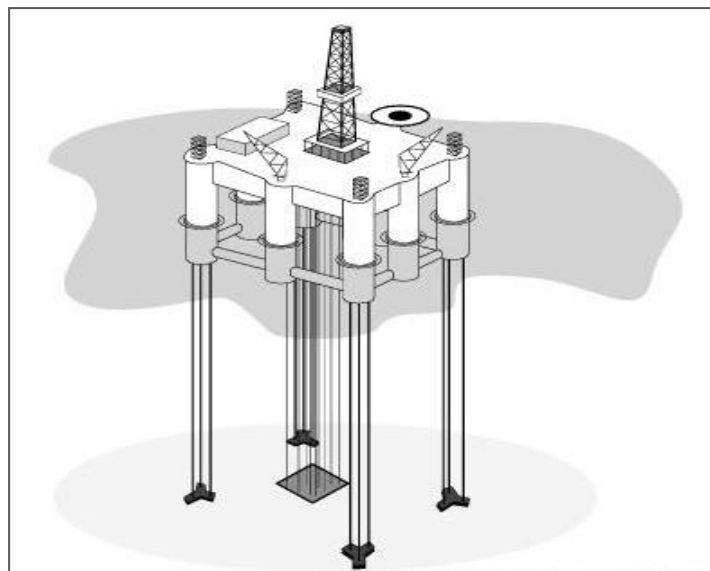
### 1.1. Παράκτιες και υπεράκτιες εξέδρες

#### 1.1.1. Πλατφόρμες με πόδια έντασης (TLP)

Οι υπεράκτιες εξέδρες TLP είναι πλωτές πλατφόρμες όπου το σύστημα πρόσδεσής τους με το θαλάσσιο βυθό αποτελείται από σωληνοειδή μέλη χάλυβα τα οποία λέγονται τένοντες και οι οποίοι παρουσιάζουν κάθετο προσανατολισμό. Η ομάδα των τενόντων σε κάθε γωνία της κατασκευής ονομάζεται πόδι έντασης και αυτό γιατί οι τένοντες διατηρούνται υπό τάση εξαιτίας της άνωσης της πλατφόρμας. Αυτή η προ-ένταση υπάρχει για να κρατάει τους τένοντες υπό τάση κάτω από όλες τις συνθήκες, ακόμα και σε κύματα με μεγάλα πλάτη.

Λόγω των υψηλών τάσεων που εμφανίζονται στα πόδια έντασης της κατασκευής η σύνδεση της πλατφόρμας με το βυθό της θάλασσας είναι άκαμπτη και για το λόγο αυτό οι κατακόρυφες κινήσεις είναι σχεδόν ανύπαρκτες όπως και οριζόντιες μετατοπίσεις .

Η σταθερότητα της πλατφόρμας TLP αποτελεί πλεονέκτημα για αυτού του είδους των εξεδρών καθώς παρουσιάζει αρκετά καλό έλεγχο για τη παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου όπως και ευκολότερη πρόσβαση σε εργασίες υποθαλάσσιων γεωτρήσεων που το βάθος τους κομμάινεται από τα 450÷2100m. (1)



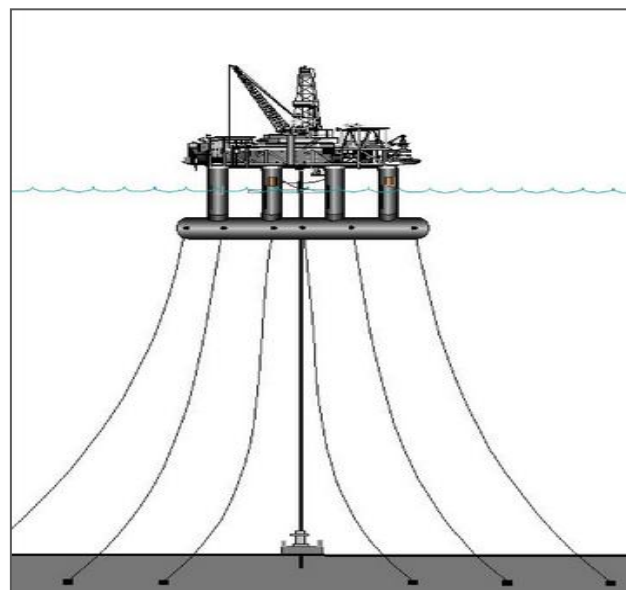
1-1 Πλατφόρμα με πόδια έντασης

### 1.1.2. Ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες

Οι ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες είναι ουσιαστικά ένας τύπος εξειδικευμένου θαλάσσιου σκάφους, το οποίο χρησιμοποιείται για παράκτιες χρήσεις. Έτσι μπορεί να αποτελεί πλατφόρμα βαρέων γερανών, θαλάσσιων γεωτρήσεων, 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.

Η σταθερότητα των ημι-υποβρύχιων πλατφόρμων οφείλεται στην άνωση που δέχεται η κατασκευή λόγω των πλωτήρων<sup>1</sup> που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και της δράσης των κυμάτων. Οι φορτίσεις, έτσι, είναι μικρότερες απ'ότι εάν η κατασκευή βρισκόταν στο επίπεδο της θάλασσας. Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένες πλατφόρμες δεν παρουσιάζουν καλή πλευστότητα αλλά αντιθέτως, εμφανίζουν μια ευαισθησία στις αλλαγές φόρτισης, γεγονός που φανερώνει την απαίτηση διαρκούς και προσεκτικής διατήρησης της σταθερότητας και της ισορροπίας της όλης κατασκευής.

Γενικά, οι ημι-υποβρύχιες πλατφόρμες είναι μια κατασκευή της οποίας το ένα μέρος είναι βυθισμένο στο νερό ενώ το κατάστρωμα της βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας προστατευμένο από τα κύματα. Τέλος, το τμήμα που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού μπορεί και μεταβάλλεται, καθιστώντας δυνατή τη χρήση τους είτε σε ρηχά είτε σε βαθύ νερά (έως 1800m). (1) (2)



1-2 Ημι-υποβρύχια πλατφόρμα

<sup>1</sup> Πλωτήρες είναι κοίλες αεροστεγές δομές που περιέχουν στο εσωτερικό τους αέρα, συνδέονται με το κατάστρωμα της πλατφόρμας με κολόνες και σκοπός τους είναι η άνωση της εκάστοτε κατασκευής.

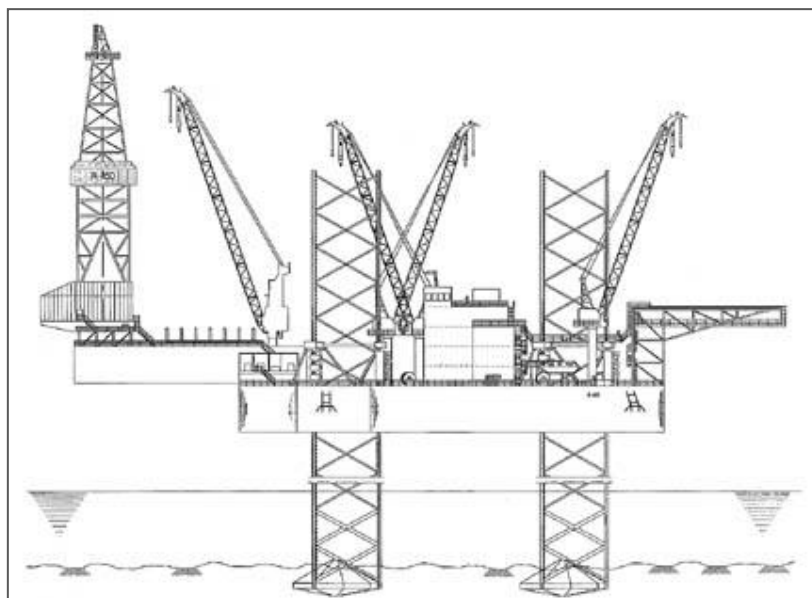
### 1.1.3. Αυτό-ανυψούμενη πλατφόρμα (Jack-up rig)

Η αυτό-ανυψούμενη εξέδρα είναι ένα είδος κινητής πλατφόρμας, που αποτελείται από 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.

Τα πόδια της συγκεκριμένης πλατφόρμας είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να εισχωρούν στο βυθό της θάλασσας και να προσδίδουν στη κατασκευή σταθερότητα.

Επιπλέον, να τονιστεί ότι οι συγκεκριμένες εξέδρες είναι κινητές αλλά όχι αυτοκινούμενες καθώς για να μεταφερθούν στις επιθυμητές θέσεις χρειάζονται ρυμουλκά ή βαρέων φορτίων πλοία.

Τέλος, 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. (1) (2)



1-3 Jack-up rig

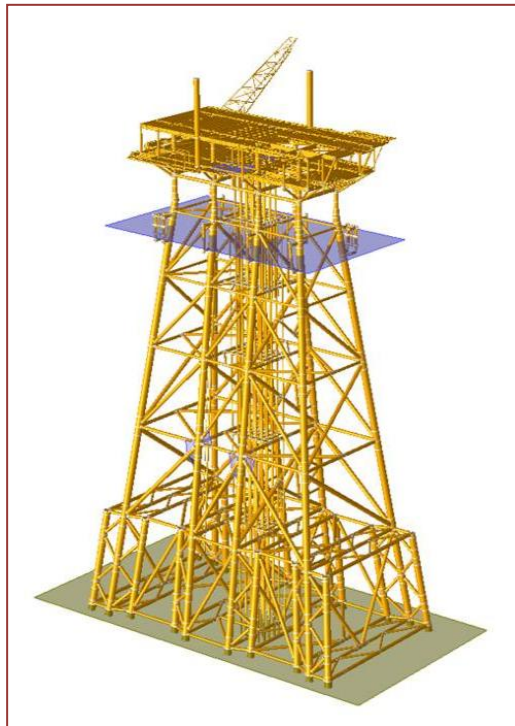
### 1.1.4. Σταθερές πλατφόρμες (Fixed platforms)

Οι σταθερές πλατφόρμες αποτελούνται από το περίβλημα-βάση, το κατάστρωμα και το χώρο εργασίας. 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.

Το περίβλημα της κατασκευής αποτελείται από τέσσερα, έξι ή και οχτώ χαλύβδινους σωλήνες διαμέτρου από 2÷4m, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι με άλλα σωληνοειδή στηρίγματα. 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.

Οι συγκεκριμένες πλατφόρμες έχουν σχεδιαστεί για μακροχρόνια χρήση-εκμετάλλευση σε νερά που φτάνουν τα 520m βάθος εξαιτίας της δυνατής και ανθεκτικής κατασκευής που τις χαρακτηρίζει.



1-4 Σταθερή πλατφόρμα

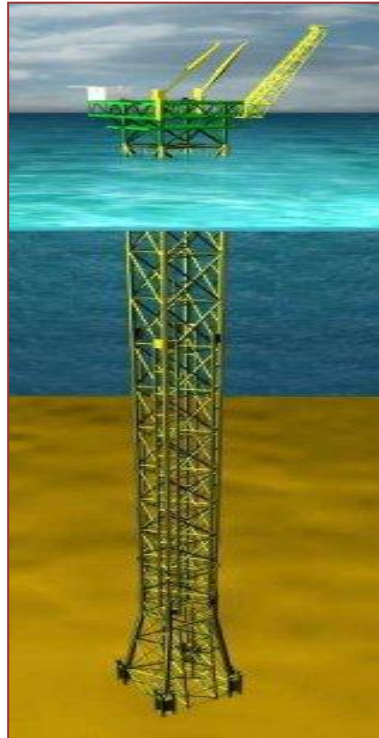
### 1.1.5. Συμβατός Πύργος (Compliant tower)

Οι συμβατοί πύργοι είναι μια κατασκευή η οποία παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις σταθερές πλατφόρμες ως προς το περιβλημά-βάση της και με τις πλωτές πλατφόρμες ως προς τη προσαρμοστικότητά της στα θαλάσσια και αέρια ρεύματα.

Οι συμβατοί πύργοι αποτελούνται από το χαλύβδινο σωληνοειδή περίβλημα το οποίο είναι ασφαλισμένο με πασσάλους που διεισδύουν εκατοντάδες πόδια κάτω από το πυθμένα της θάλασσας. Το περίβλημα αυτό, σε αντίθεση με αυτό των σταθερών πλατφόρμων, έχει μικρότερες διαστάσεις καθώς επίσης μπορεί να αποτελείται από δυο ή περισσότερα τμήματα ανάλογα με το ύψος της κατασκευής που καθορίζεται από το βάθος του νερού της εκάστοτε τοποθεσίας αλλά και από τις εργασίες γεώτρησης.

Αυτό σημαίνει ότι 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.

Τέλος, να αναφερθεί η χρήση δεξαμενών αέρα που βρίσκονται στο ανώτερο τμήμα του περιβλήματος, και ρυθμίζουν την άνωση με σκοπό τη μείωση των φορτίσεων της κατασκευής λόγω αέρα και κυμάτων.



1-5 Συμβατός πύργος-πλατφόρμα

### 1.1.6. Πλωτή μονάδα παράγωγης, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO)

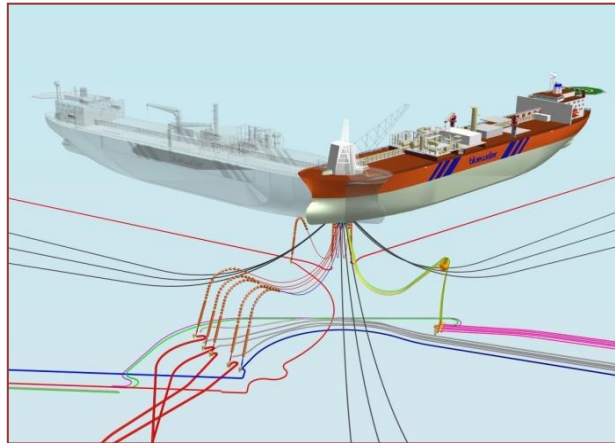
Η FPSO μονάδα είναι ένα πλωτό σκάφος που χρησιμοποιείται ως υπεράκτια μονάδα παραγωγής, επεξεργασίας, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

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.

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.

Γενικά, είναι μια υπεράκτια μονάδα που χρησιμοποιεί σαν πλατφόρμα της πετρελαιοφόρα σκάφη τα οποία έχουν υποστεί μετατροπές ή σκάφη που έχουν ναυπηγηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. 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.





1-6 Πλωτή μονάδα παράγωγης, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (FPSO)

### 1.1.7. Πλατφόρμα που η δομή της βασιζεται στη βαρύτητα (GBS)

Η GBS πλατφόρμα είναι μια υπεράκτια εξέδρα άντλησης πετρελαίου που η δομή στήριξης της βασιζεται στο μεγάλο βάρος της όλης κατασκευής.

Αυτές οι εξέδρες αποτελούνται από μεγάλο αριθμό κάθετων ποδιών, κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και ενισχυμένα εσωτερικά με χάλυβα, και από υδατοστεγείς δεξαμενές με αέρα που βρίσκονται στη βάση της κατασκευής και είναι απαραίτητες για την άνωση και την ισορροπία της πλατφόρμας.

Οι συγκεκριμένες πλατφόρμες λόγω του μεγάλου όγκου τους κατασκευάζονται στη στεριά και στη συνέχεια ρυμουλκούνται και βυθίζονται στην επιθυμητή θέση, ακόμα και 300m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Πριν την τοποθέτηση της πλατφόρμας στη θέση έδρασης πραγματοποιούνται εκτενείς έλεγχοι της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.



1-7 Gravity-based structure

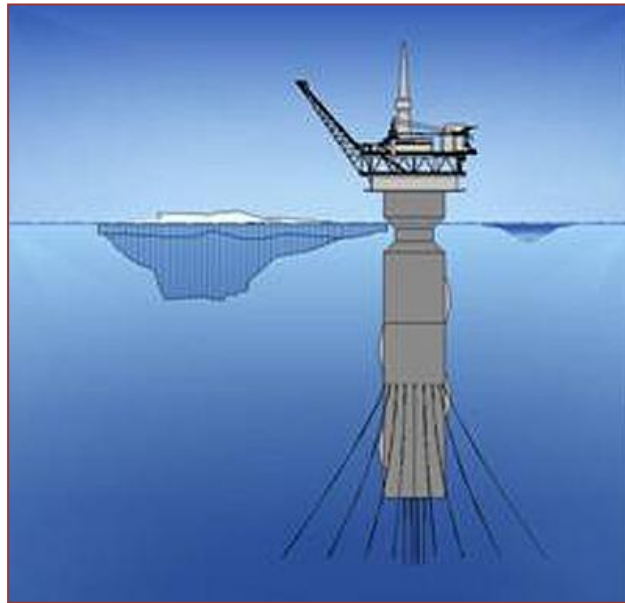
### 1.1.8. Πλατφόρμα με δομή σημαδούρας (Spar platform)

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.

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 απ' το νερό ώστε η κατασκευή να έχει χαμηλό κέντρο βάρους και έτσι να αποκτά σταθερότητα.

Να σημειωθεί ,επίσης , ότι ο καθορισμός της διαμέτρου, του ύψους του κυλίνδρου και του μεγέθους της δεξαμενής που χρησιμοποιείται για την άνωση της κατασκευής εξαρτάται από τον αριθμό των δεξαμενών, του χώρου εγκατάστασης και του βάρους των μηχανημάτων.

Τέλος, 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. (2)



1-8 Spar platform-Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας

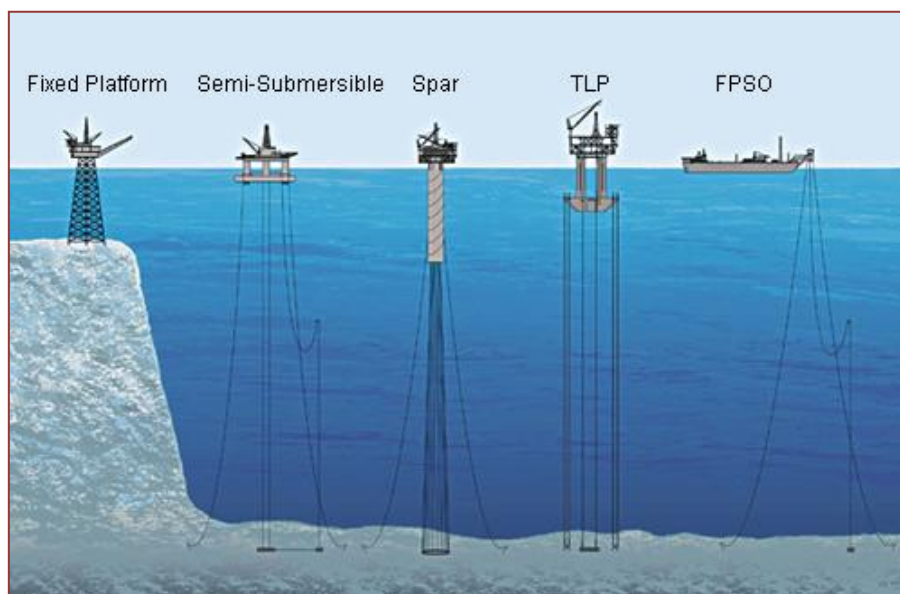
### 1.1.9. Πλατφόρμα με μορφή σημαδούρας (CALM)

Μια CALM μονάδα είναι μια πλωτή σημαδούρα-πλατφόρμα που είναι αγκυροβολημένη είτε στο βυθό της θάλασσας είτε σε κάποια FPSO μονάδα, με αλυσοειδείς τένοντες ή σορούς, και η χρήση της είναι η άντληση και η εκφόρτωση πετρελαίου.

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. (1)



1-9 CALM buoy



1-10 Συγκριτική απεικόνιση υπεράκτιων πλατφορμών

## 1.2. Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

### 1.2.1. Ανεμογεννήτριες σταθερής δομής

#### 1.2.1.1. Ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε ένα μόνο πυλώνα (Monopile foundation)

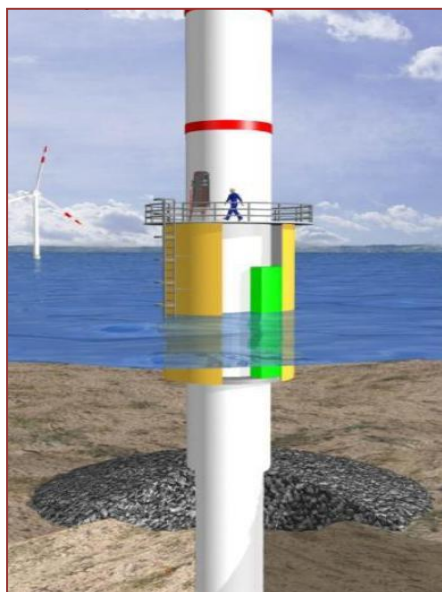
Αυτό το είδος στήριξης υπεραράκτιας ανεμογεννήτριας χρησιμοποιεί ένα και μόνο πυλώνα, ο οποίος έχει μεγάλη διάμετρο και είναι αρκετά μέτρα βυθισμένος κάτω από το πυθμένα της θάλασσας.

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια εμφανίζει αντοχή στις φορτίσεις του αέρα, των κυμάτων και του βάρους της όλης κατασκευής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βάθη που κυμαίνονται από 9÷20m.

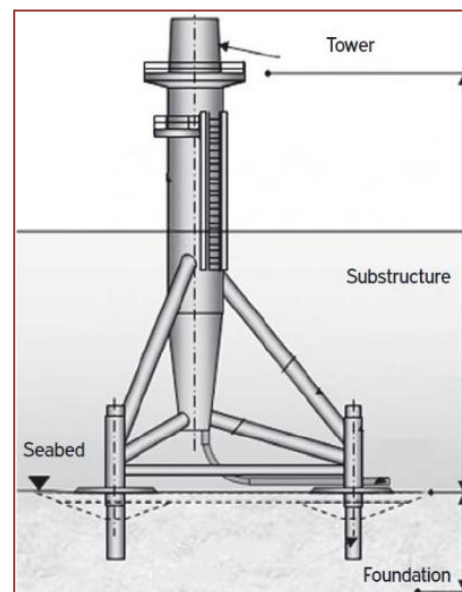
#### 1.2.1.2. Ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε τρεις πυλώνες (Tripod foundation)

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν αυτό το τρόπο στήριξης χρησιμοποιούν μια βάση που αποτελείται από τρεις πυλώνες-πόδια, τα οποία διεισδύουν μέχρι και 20m βάθος κάτω από το πυθμένα της θάλασσας.

Αυτή η τεχνολογία στήριξης χρησιμοποιείται για μεγάλα βάθη, αν και πλέον δεν επιλέγεται συχνά.



1-11 Ανεμογεννήτρια στήριξης μονού πυλώνα



1-12 Ανεμογεννήτρια τρίποδης στήριξης

### 1.2.1.3. Ανεμογεννήτρια που η δομή της στηρίζεται στη βαρύτητα (Gravity foundation)

Όπως στις πλατφόρμες τύπου GBS έτσι και στις ανεμογεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιηθεί δομή στήριξης που εκμεταλλεύεται το βάρος της κατασκευής.

Αυτό το είδος δομής αποτελείται από μια μεγάλη βάση, κατασκευασμένη από σκυρόδεμα ή χάλυβα και τοποθετημένη στο βυθό της θάλασσας, η οποία είναι υπεύθυνη για την ισορροπία της ανεμογεννήτριας.



1-13 Gravity foundation

## 1.2.2. Πλωτές ανεμογεννήτριες

### 1.2.2.1. Windfloat ανεμογεννήτριες

Η windfloat ανεμογεννήτρια είναι μια ημι-υποβρύχια, μεταλλική κατασκευή όπου η πλωτή τριγωνική βάση της αποτελείται από τρεις κολόνες, όπου πάνω στη μια από τις τρεις βρίσκεται ο στρόβιλος.

Η τριγωνική αυτή βάση χρησιμοποιεί ένα σύστημα αγκυροβόλησης-πρόσδεσης, το οποίο αποτελείται από τέσσερα αλυσσοειδή καλώδια, δυο εκ των οποίων είναι συνδεδεμένα με τη κολόνα του στρόβιλου.

Η δυναμική ευστάθεια αυτής της ανεμογεννήτριας οφείλεται στο σύστημα ισορροπίας που βρίσκεται στη βάση της, το οποίο μεταβάλλει το κέντρο βάρους της κατασκευής ανάλογα με τις μεταβολές του αέρα και των αλλαγών φόρτισης επιτρέποντας έτσι στην ανεμογεννήτρια να παράγει το μέγιστο έργο της την εκάστοτε στιγμή.



1-14 Windfloat ανεμογεννήτρια

#### 1.2.2.2. Ανεμογεννήτριες με πόδια έντασης

Οι ανεμογεννήτριες αυτές λειτουργούν όπως οι πλατφόρμες TLP δηλαδή το σύστημα πρόσδεσής τους είναι σωληνοειδή καλώδια από χάλυβα, τα οποία ονομάζονται τένοντες και διεισδύουν κάθετα το πυθμένα της θάλασσας.

Τα καλώδια αυτά βρίσκονται σε κάθε άκρη της κατασκευής και βρίσκονται συνεχώς υπό τάση ώστε η ανεμογεννήτρια να είναι όσο το δυνατό ακίνητη.

Αυτό το είδος πρόσδεσης χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες ισχύος 5÷10MW και βάθους 50÷200m.



1-15 TLP ανεμογεννήτρια

### 1.2.2.3. Ανεμογεννήτρια με δομή σημαδούρας (Spar buoy)

Οι ανεμογεννήτριες με δομή σημαδούρας εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά κατασκευής και λειτουργίας με τις πλατφόρμες Spar.

Η ανεμογεννήτρια είναι τοποθετημένη πάνω σε μια κυλινδρική βάση η οποία βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η κυλινδρική αυτή βάση όπως και στις πλατφόρμες Spar έχει χαμηλό κέντρο βάρους με αποτέλεσμα η ανεμογεννήτρια να είναι αρκετά ευσταθής.

Η βάση της ανεμογεννήτριας τύπου Spar χρησιμοποιεί αλυσίδες συνδυσασμένες με σύρμα ή πολυεστέρα, με τις οποίες αγκυροβολεί και αποκτά μόνιμη θέση σε βάθη που ξεπερνούν τα 200m. (1) (3)



1-16 Spar buoy

### 1.3. Υποβρύχιοι αγωγοί

#### 1.3.1. Χαρακτηριστικά υποβρύχιων αγωγών

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 τη πηγή εξόρυξης στην μονάδα επεξεργασίας και αποθήκευσης.

Η διάμετρος των υποβρύχιων αγωγών κυμαίνεται από  $0,076\pm 1,8\text{m}$  και το πάχος τους από  $0,01\pm 0,075\text{m}$ . 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.

Εξωτερικά, οι θαλασσιοί αγωγοί είναι επιστρωμένοι από αντιοξειδωτικά υλικά για τη προστασία τους από τη διάβρωση και από σκυρόδεμα ή fiberglass<sup>2</sup> για επιπλέον προστασία εναντίον στις τριβές. Να σημειωθεί, επίσης, ότι το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται και για την αντίσταση του αγωγού στην άνωση, όταν μεταφέρει ρευστά μικρότερης πυκνότητας του νερού αλλά και για την απόκτηση καλύτερης συμπεριφοράς πλεύσης.

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.

Τα τμήματα των αγωγών είναι ενωμένα με δυνατή συγκόλληση αλλά γίνεται και χρήση αζονικών εδράνων για την αποφυγή διαρροών.

#### 1.3.2. 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 συντήρησή 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.

<sup>2</sup> Fiberglass: ενισχυμένο πλαστικό υλικό που αποτελείται από ίνες υάλου ενσωματωμένες σε μία μήτρα ρητίνης.



- **Μεταφορά φερτών:** αμμόδη 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 ρήψη βλημάτων , που είναι ικανά να επιφέρουν καταστροφή των υποθαλάσσιων αγωγών.

### 1.3.3. 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 :

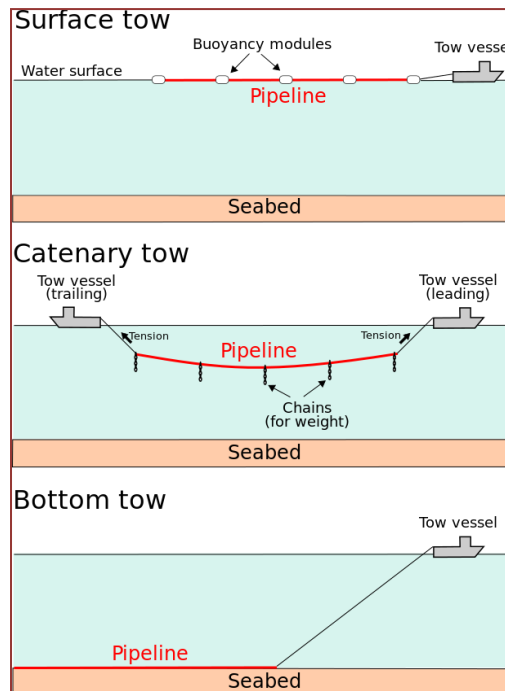
#### 1.3.3.1. Pull/tow system

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.

- Αλυσσειδή ρυμούλκηση (catenary tow) : κατά την αλυσσειδή 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.



1-17 Pull/Tow System

### 1.3.3.2. S-lay system

Στο S-lay σύστημα, η σύνδεση των τμημάτων της σωλήνωσης γίνεται πάνω στο σκάφος το οποίο διαθέτει το κατάλληλο εξοπλισμό. Το 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 αφεθεί από τη πλήρη ή τη πρόμνη μέσω μια υποστηρικτικής κατασκευής που ονομάζεται "κεντρι", που ταυτόχρονα ελέγχει τα καμπικά φορτία του αγωγού.

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

### 1.3.3.3. 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.

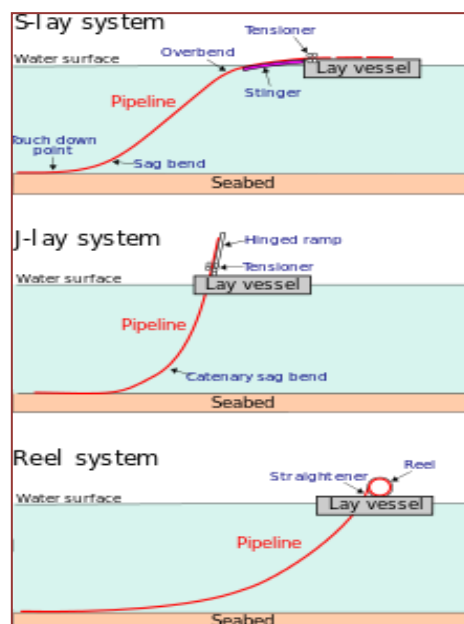
Τέλος, στο J-lay σύστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μια εργασία συγκόλλησης σε αντίθεση με το S-lay, όπου μπορεί να γίνει συγκόλληση σωλήνων σε διάφορες θέσεις του καταστρώματος.

### 1.3.3.4. 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. Στη 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.

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



1-18 S-lay/J-lay/Reel-lay system

## 1.4. Καλωδιωτές και κρεμαστές γέφυρες

### 1.4.1. Κρεμαστή γέφυρα

Η κρεμαστή γέφυρα είναι ένας τύπος γέφυρας όπου το κατάστρωμά της είναι κρεμασμένο από καλώδια-τένοντες.

Αυτός ο τύπος γέφυρας αποτελείται από πύργους (μεταλλικούς ή τσιμεντένιους), οι οποίοι αποτελούν τα στηρίγματα των κυρίων καλωδίων και συνδέουν τη γέφυρα με το έδαφος. Τα κύρια καλώδια που διατρέχουν όλο το μήκος της γέφυρας είναι αυτά με τα οποία συνδέονται τα κάθετα καλώδια που συγκρατούν το κατάστρωμα της γέφυρας.

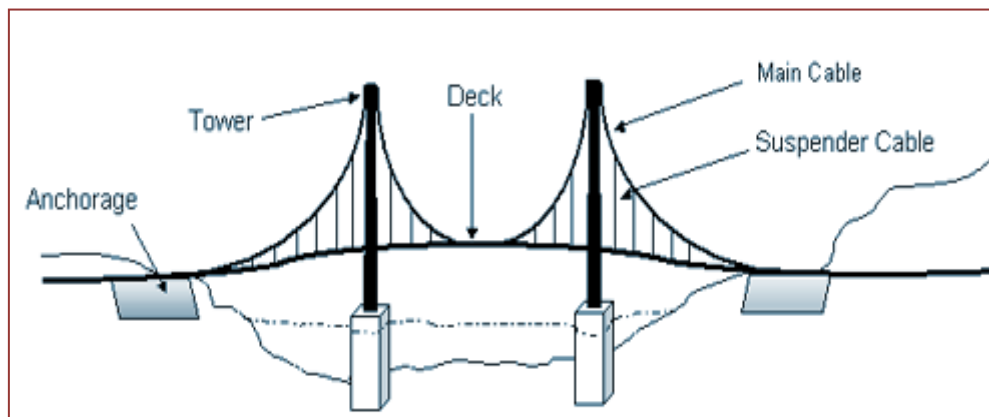
Τα κύρια καλώδια καταλήγουν σε κάθε άκρο της γέφυρας και στερεώνονται στο έδαφος για επιπλέον σταθερότητα, δεδομένου ότι το βάρος της κατασκευής μετατρέπεται σε εφελκύστηκες τάσεις που μεταφέρονται στα κύρια καλώδια μέσω των κάθετων καλωδίων.

Τα φορτία που αναπτύσσονται σε μια κρεμαστή γέφυρα είναι τριών ειδών: το μόνιμο, το κινητικό και το δυναμικό φορτίο.

Το μόνιμο φορτίο αναφέρεται στο βάρος της κατασκευής και αποτελεί τη τάση κάθε κατασκευής να καταρρεύσει λόγω των βαρυτικών δυνάμεων που επιδρούν σε αυτές.

Το κινητικό ή αλλιώς ωφέλιμο φορτίο αναφέρεται στη κίνηση πεζών και οχημάτων κατά μήκος της γέφυρας και των κανονικών περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως τις βροχοπτώσεις, τους άνεμους και τις μεταβολές θερμοκρασίας.

Το δυναμικό φορτίο, τέλος, αναφέρεται σε ακραίους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως είναι οι σεισμοί και οι ανεμοστρόβιλοι.



1-19 Κρεμαστή γέφυρα

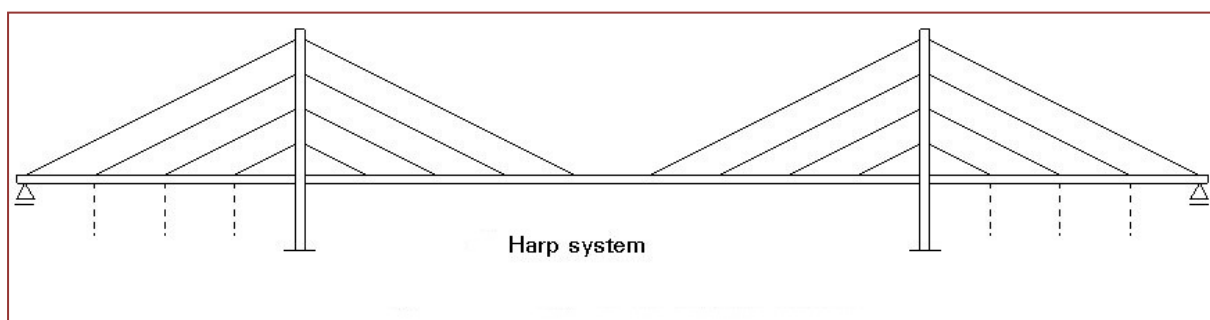
### 1.4.2. Καλωδιώτη γέφυρα

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

Οι καλωδιώτες γέφυρες κατηγοριοποιούνται σε γέφυρες :

- Με παράλληλο σχεδιασμό
- Με σχεδιασμό βεντάλιας

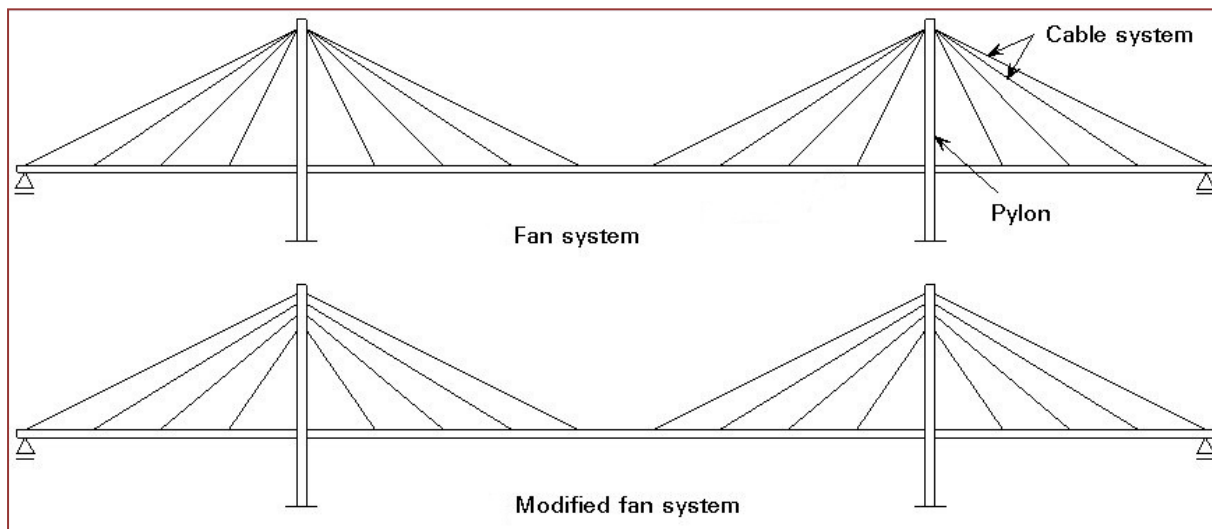
Στο παράλληλο σχεδιασμό, τα καλώδια είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους και το ύψος στερέωσής τους είναι αναλογικό της απόστασής του σημείου πρόσδεσής τους στον πύργο και της θέσης τοποθέτησής τους με το κατάστρωμα της γέφυρας.



1-20 Καλωδιώτη γέφυρα παράλληλου σχεδιασμού

Στο σχεδιασμό 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. Αυτός ο τροποποιημένος σχεδιασμός προσφέρει στη γέφυρα προσαρμοστικότητα στις περιβαλλοντικές μεταβολές και καλύτερη πρόσβαση για τη συντήρηση των καλωδίων.

Οι κύριες δυνάμεις σε μια καλωδιώτη γέφυρα είναι οι τάσεις που εφαρμόζονται στα καλώδια και η συμπίεση στους μεταλλικούς ή τσιμεντένιους πυλώνες. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις καλωδιώτες γέφυρες οφείλονται στο βάρος της κατασκευής καθώς και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η δυνατή ροή του ανέμου. (1)



1-21 Καλωδιωτή γέφυρα με κανονικό και τροποποιημένο σχεδιασμό βεντάλιας



1-22 Καλωδιωτή γέφυρα Ρίο-Αντίρριο με τροποποιημένο σχεδιασμό βεντάλιας

### 1.5. Βιομηχανικές καμινάδες

Καμινάδα είναι ένας κατακόρυφος ψηλός σωλήνας ή μια παρόμοια κατασκευή μέσω της οποίας τα θερμά αέρια προϊόντα(καυσαέρια)<sup>3</sup> που παράγονται από λέβητες, ατμοπαραγωγικούς κύκλους, πλοία, σόμπες κ.α. διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα.

Ο τρόπος λειτουργίας της καμινάδας βασίζεται στη διαφορά πιέσεων εσωτερικά και εξωτερικά της κολόνας. Τα θερμά αέρια προϊόντα στο κάτω τμήμα της καμινάδας έχουν μικρότερη πίεση από τον εξωτερικό αέρα του αντίστοιχου ύψους, έτσι αυτή η διαφορά πίεσης αποτελεί το κινητήριο μοχλό ώστε τα καυσαέρια να κινούνται ανοδικά και προς την έξοδο της καμινάδας.

Το ύψος της καμινάδας αποτελεί σημαντικό συντελεστή της κατασκευής καθώς είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την ομαλή ροή των καυσαερίων που οδηγούνται προς το περιβάλλον.

Με την ονομασία βιομηχανικές καμινάδες αναφερόμαστε σε καμινάδες από σκυρόδεμα ή από ανοξείδωτο χάλυβα, αλουμίνιο, και αποτελούν εξωτερικές κατασκευές και όχι ενσωματωμένες σε τοίχους κτηρίων.

Οι βιομηχανικές καμινάδες είναι εγκατεστημένες πλησίον ενός λέβητα παραγωγής ατμού ή ενός βιομηχανικού κλιβάνου, και στις οποίες μεταφέρονται τα αέρια προϊόντα μέσω αεραγωγών.

Το μεγάλο ύψος των καμινάδων δημιουργεί κινδύνους κατάρρευσης της κατασκευής. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός των μεγάλων βιομηχανικών καμινάδων πρέπει να είναι τέτοιος ώστε κίνδυνοι όπως η γένεση δινών και φαινόμενα συντονισμού, λόγω ισχυρών αέριων ρευμάτων που εμφανίζονται στα υψηλότερα τμήματα των καπνοδόχων, να αποφεύγονται.



1-23 Βιομηχανική καμινάδα

---

<sup>3</sup> Καυσαέρια ονομάζονται τα θερμά αέρια προϊόντα που παράγονται όταν ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το ξύλο αλλά και άλλων ειδών καύσιμα καίγονται σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας. Αυτά τα αέρια προϊόντα συνήθως αποτελούνται από διοξείδια του άνθρακα, υδρατμούς, άζωτο και περίσσεια οξυγόνου, καθώς επίσης μεταφέρουν και αιωρούμενα σωματίδια και ένα μικρό ποσοστό ρύπων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και του θείου.

### 1.6. Καλώδιο μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος

Καλώδιο μεταφοράς ρεύματος είναι ένα σύνολο ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών αγωγών που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα ηλεκτρικά καλώδια εγκαθίστανται ως μόνιμη καλωδίωση μέσα σε κτίρια, θαμμένα στο έδαφος ή εκτεθειμένα στηριζόμενα σε पुलώνες, πράγμα που σχετίζεται και με τη πειρατική δοκιμή που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Το μέγεθος, ο τύπος και το υλικό του καλωδίου ποικίλει ανάλογα με τη χρήση του και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Η κατασκευή και το υλικό του καλωδίου εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

- Την ένταση του ρεύματος, που καθορίζει το πάχος της μόνωσης και της διατομής του αγωγού.
- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η έκθεση στο φως του ήλιου και η ροή του αέρα είναι μερικοί παράγοντες που καθορίζουν τόσο το εξωτερικό περίβλημα του καλωδίου όσο και τη κατασκευή όταν αυτή είναι εκτεθειμένη στα παραπάνω.

Τα καλώδια είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή αλουμίνιο και όταν χρησιμοποιούνται σε εναέρια εγκατάσταση περιλαμβάνουν μια επιπλέον πλαστική ή μεταλλική θωράκιση που αγκαλιάζει τους ηλεκτρικούς αγωγούς.



1-24 Καλώδια μεταφοράς ενέργειας



1-25 Τυπική διατομή ηλεκτροφόρου καλωδίου





## 2. Πρότυπες Πειραματικές Δοκιμές

### 2.1. Μελέτη παλλόμενης ροής γύρω από κύλινδρο κατά Williamson. ("Sinusoidal flow relative to circular cylinders", C.H.K. Williamson, 1985, J. Fluid Mechanics, vol. 155, pp. 141-174)

Ο **Williamson** εξέτασε τις κινήσεις των δινών γύρω από κύλινδρο και γύρω από ζεύγος κυλίνδρων σε ημιτονοειδή ροή.

Χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα οπτικοποίηση της ροής και μετρήσεις των δυνάμεων, οι κινήσεις των δινών σχετίζονται με την επαγόμενη άνοση και αντίσταση στο κύλινδρο.

Για κύλινδρο, ο οποίος βρισκόταν μέσα σε παλλόμενη ροή ταυτοποιήθηκαν αρκετοί σχηματισμοί δινών μέσα σε συγκεκριμένο εύρος του πλάτους ροής. Η διαδικασία ζευγαρώματος των δινών από τον προηγούμενο μισό κύκλο στον επόμενο μισό ήταν βασική για όλα τα σχήματα. Οπτικοποίηση της ροής φαίνεται να είναι περισσότερο αποτελεσματική σε ένα πλαίσιο αναφοράς στο οποίο το ρευστό είναι ακίνητο και ο κύλινδρος κινείται. Διαπιστώθηκαν βασικές διαφορές όσον αφορά τις κινήσεις των δινών και τις επαγόμενες δυνάμεις στον κύλινδρο που βρισκόταν μέσα σε παλλόμενη ροή από την περίπτωση που η ροή ήταν μόνιμη.

Προτάθηκε από τον **Morison** η παρακάτω σχέση για τη δύναμη που ασκείται στον κύλινδρο κατά την κατεύθυνση της ροής ανά μονάδα μήκους:

$$F = \frac{1}{2} \rho D C_D U |U| + \frac{1}{4} \pi \rho D^2 C_M \frac{d}{dt} U \quad (2.1)$$

- $\rho$ , πυκνότητα του ρευστού
- $D$ , διάμετρος κυλίνδρου
- $U$ , ταχύτητα του ρευστού
- $C_D, C_M$ , συντελεστές αντίστασης και άνοσης που υπολογίζονται πειραματικά

Οι **Keulegan-Carpenter (1958)** τοποθέτησαν έναν κατακόρυφο κύλινδρο κάτω από ένα στάσιμο κύμα σε μια δεξαμενή κυματισμού και υπολόγισαν τις μέσες τιμές των  $C_D$  και  $C_M$  συναρτήσει του αριθμού Keulegan-Carpenter ( $KC$ ) όπου  $KC = \frac{U_m T}{D}$  ( $U_m$ , η μέγιστη ταχύτητα του ρευστού και  $T$ , η περίοδος).

Στην ημιτονοειδή ροή το  $KC = \frac{2\pi A}{D}$ , δηλαδή ο αριθμός  $KC$  είναι ανάλογος του πλάτους  $A$  της ροής.

Ο **Sarpkaya (1976)** χρησιμοποιώντας ένα δοχείο σχήματος  $U$  απέδειξε ότι οι συντελεστές  $C_D$  και  $C_M$  δεν εξαρτώνται μόνο από τον  $KC$  αλλά και από τη παράμετρο  $\beta$ , η οποία είναι ανάλογη του αριθμού **Reynolds** ( $Re$ );  $\beta = \frac{Re}{KC} = \frac{D^2}{\nu T}$ , όπου  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Η χρήση της οπτικοποίησης έδωσαν τη δυνατότητα της κατανόησης της σημασίας των δυνάμεων όσον αφορά τις δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό. Έτσι, οι **Bearman, Graham & Singh (1979)** χρησιμοποιώντας ένα δοχείο σχήματος U παρατήρησαν κάποια σχεδόν επαναλαμβανόμενα μοτίβα δυνάμεων. Κατέληξαν ότι για πάνω από  $KC=8$  εμφανιζόταν πλευρική κίνηση δυνάμεων ( $8 < KC < 15$ ) και κυκλική κίνηση δυνάμεων για  $15 < KC < 25$ . Για πάνω από  $KC=25$  η ροή παρουσίαζε περίπου τη μορφή της **Οδού των δυνάμεων Karman** για κάθε μισό κύκλο. Στη πλευρική κίνηση δυνάμεων κάθε κυρία δίνη κάθε μισού κύκλου απομακρυνόταν από το κύλινδρο από τη μια μόνο πλευρά κατά περίπου  $90^\circ$  σε σχέση με την κατεύθυνση της παλλόμενης ροής. Στην κυκλική κίνηση δυνάμεων ένα ζεύγος δυνάμεων απομακρυνόταν από τον κύλινδρο κατά  $30^\circ/40^\circ$  ως προς την κατεύθυνση της ροής σε κάθε μισό κύκλο. Διαδοχικά ζεύγη δυνάμεων απομακρύνονταν από το κύλινδρο από απέναντι τεταρτημόρια και σε αντίθετες κατευθύνσεις.

### 2.1.1. Πειραματικές Διατάξεις

#### 2.1.1.1. Πειραματική διάταξη σχήματος U

Ο Williamson, για τη μέτρηση των δυνάμεων και την οπτικοποίηση της ροής γύρω από έναν κύλινδρο, χρησιμοποιεί ένα δοχείο σχήματος U κατασκευασμένο από αλουμίνιο και διαφανές πλαστικό. Τα όρθια άκρα ήταν ύψους 2.65m και βάση τους ήταν μήκους 3.73m. Η εγκάρσια διατομή των κατακόρυφων άκρων και η οριζόντια διατομή του δοχείου ήταν 0.45 m x 0.48 m. Ο εξεταζόμενος κύλινδρος διαμέτρου 0.05 m ήταν αναρτημένος στο δεξί άκρο του δοχείου.

Ο κύλινδρος συνδεόταν με τα στηρίγματα μόνο μέσω ενός λεπτού σύρματος διαμέτρου 0.005m πάνω στο οποίο τοποθετήθηκαν **strain gauges**. Το ύψος νερού καθοριζόταν με τη βοήθεια ενός συστήματος μέτρησης της χωρητικότητας. Το νερό ταλαντωνόταν μέσα στο δοχείο με τη συχνότητα συντονισμού με τη βοήθεια ενός παλλόμενου ελάσματος, το οποίο βρισκόταν στο αριστερό άκρο του δοχείου.

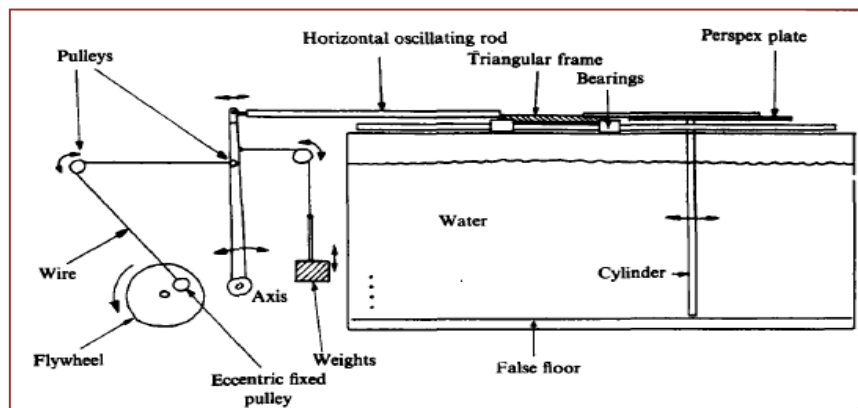
Ο  $KC$  ήταν  $0 < KC < 35$  και η τιμή του  $\beta$  ήταν **730**. Η RMS τιμή της άνωσης και οι συντελεστές δυνάμεων κατά τη κατεύθυνση της ροής υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις των δυνάμεων ως μέσο όρο 40 περιόδων.

#### 2.1.1.2. Πειραματική διάταξη δυο κατακόρυφων κυλίνδρων

Η διάταξη αυτή αποτελείται από κατακόρυφους κυλίνδρους που ταλαντώνονται οριζόντια και έχει εσωτερικές διαστάσεις 2.4 m μήκος, 0.9 m βάθος και 0.73 m πλάτος. Το διάκενο μεταξύ του κάτω άκρου των κατακόρυφων κυλίνδρων-ψευδοπατώματος είναι 0,2 cm.

Οι κύλινδροι συνδέονταν στα άνω άκρα τους σε μια οριζόντια πλάκα perspex<sup>4</sup>, η οποία ασφαλίεται σε ένα ταλαντευόμενο πλαίσιο που ολισθαίνει με τη βοήθεια εδράνων κατά μήκος οριζόντιων οδηγών γραμμών που είναι τοποθετημένες στις δύο πλευρές της δεξαμενής. Το πλαίσιο ταλαντώνεται μέσω ενός συστήματος συρμάτων γύρω από τροχαλίες (τεντωμένα με βάρη) που φαίνεται στο σχήμα 2-1, και το ένα άκρο του τεντωμένου συστήματος συνδέεται έκκεντρα μέσω σύρματος με το σφόνδυλο του κινητήρα.

<sup>4</sup> Perspex: άλλη ονομασία του Plexiglas.



2-1 Πειραματική διάταξη ταλαντευόμενων κατακόρυφων κυλίνδρων.

Ένας strain gauge είναι τοποθετημένος στην επιφάνεια του κυλίνδρου μεταξύ της πλάκας Perspex και της επιφάνειας νερού.

Ο κύλινδρος είχε μήκος 0.7 m και διαμέτρους 0.012, 0.025 και 0.05 m, αν και οι strain gauges χρησιμοποιήθηκαν μόνο στον κύλινδρο με διάμετρο 0.025 m δίνοντας  $\beta=255$ .

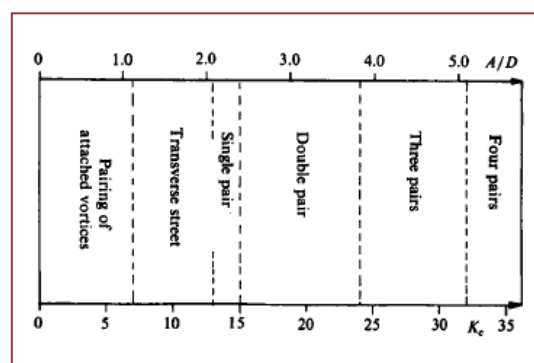
Η οπτικοποίηση της ροής έγινε για  $KC < 60$  ενώ μετρήσεις δυνάμεων για  $KC < 35$ . Η μετατόπιση μετρήθηκε με έναν γραμμικό αισθητήρα και το σήμα αυτό καταγράφηκε μαζί με τα σήματα των δυνάμεων.

Η οπτικοποίηση της ροής έγινε με σκόνη αλουμινίου και με τη βοήθεια δυο λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγή φωτός. Η φωτογράφιση έγινε με camera Nikon, η οποία ήταν ακίνητη είτε σε σχέση με το υγρό είτε με τον κατακόρυφο κύλινδρο.

Απεικόνιση της ροής για το εύρος του  $KC$ , μελέτη των δυνάμεων άωσης, συντελεστών δυνάμεων και παράθεση των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστεί μόνο για την πρώτη πειραματική διάταξη, σχήματος-U.

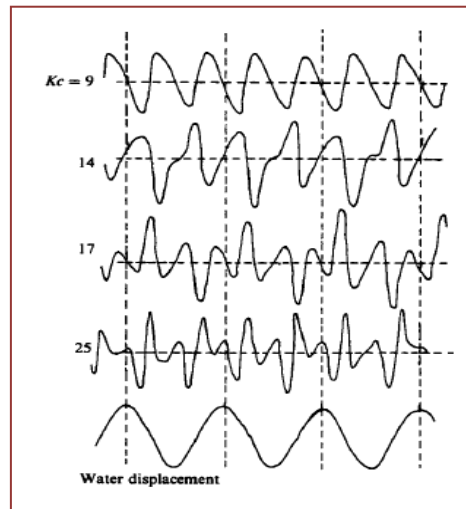
### 2.1.2. Απεικόνιση της ροής και μελέτη δυνάμεων για την πειραματική διάταξη ενός κυλίνδρου.

Όταν ένας κύλινδρος βρίσκεται μέσα σε παλλόμενη ροή συγκεκριμένα επαναλαμβανόμενα μοτίβα δινών εμφανίζονται μέσα σε συγκεκριμένο εύρος πλάτους. Κάθε ένα από αυτά τα μοτίβα αποτυπώνει την έκλυση συγκεκριμένου αριθμού δινών σε κάθε μισό κύκλο. Ένας πρόχειρος οδηγός, για τα για τα διάφορα διαστήματα του λόγου  $A/D$  ή  $KC$ , παρουσιάζει πως διαμορφώνεται η ροή γύρω από τον κύλινδρο και τα μοτίβα των δινών στο σχήμα 2-2.



2-2 Οδηγός διαστημάτων  $KC$ .

Ενώ στο σχήμα 2-3 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της άνωσης για κάποια τυπικά παραδείγματα τιμών του  $KC$  και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις νερού.



2-3 Τυπικές μορφές διακύμανσης της δύναμης για μια σειρά αριθμών Keulegan-Carpenter.

#### 2.1.2.1. Ζεύγος μικρών προσκολλημένων δινών ( $0 < KC < 7$ )

Σε αυτό το εύρος των πλατών ροής, ένα ζεύγος μικρών προσκολλημένων δινών σχηματίζεται στον ομόρου σε κάθε μισό κύκλο. Όταν ο κύλινδρος αντιστρέφει την κατεύθυνση κίνησής του, οι δίνες χωρίζονται και σχηματίζουν νέα ζεύγη μικρών δινών στον νέο μισό κύκλο, τα οποία κινούνται μακριά από τη τοπική περιοχή της ροής γύρω από τον κύλινδρο. Αυτό το ζευγάρι των δινών συμβαίνει μόνο κατά τη στιγμή της αναστροφής της ροής μεταξύ των μικρών δινών, οι οποίες εξακολουθούν να είναι **προσκολλημένες** και μέχρι λίγο πριν την αναστροφή της ροής.

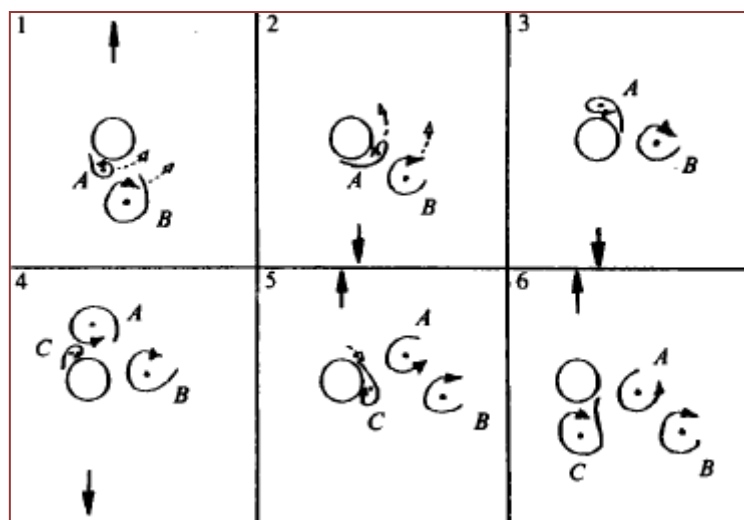
Το ζευγάρι των δινών είναι συμμετρικό μέχρι περίπου  $KC=4$ , και τα δύο ζεύγη σχηματίζονται ταυτόχρονα όταν αντιστρέφεται η ροή. Μεταξύ  $KC=4$  και 7, οι προσκολλημένες δίνες παρουσιάζουν διαφορά στροβιλότητας με αποτέλεσμα τα ζεύγη να μη σχηματίζονται ταυτόχρονα κατά την αναστροφή της ροής, δημιουργώντας έτσι μια δύναμη άνωσης, που αυξομειώνεται με τη συχνότητα ταλάντωσης.

2.1.2.2. Εγκάρσια «οδός» / ένα ζεύγος δινών ( $7 < KC < 15$ )

Στο συγκεκριμένο διάστημα  $KC$  δημιουργείται μια μεγάλη δίνη, η οποία εκλύεται κατά τη διάρκεια κάθε μισού κύκλου. Για αυτά τα πλάτη γίνεται ζευγάρισμα "εκλυθέντων" δινών σε αντίθεση με το ζευγάρισμα των δινών της παραγράφου 2.1.2.1. στο οποίο οι δίνες ήταν προσκολλημένες στο κύλινδρο.

Οι δίνες κινούνται μακριά από την περιοχή τοπικής ροής του κυλίνδρου, κατά προσέγγιση κάθετα προς την κατεύθυνση ταλάντωσης.

Στο διάστημα  $7 < KC < 13$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2-4, στο τέλος του ενός μισού κύκλου υπάρχει μια αποκολλημένη δίνη **B** και μια προσκολλημένη στο κύλινδρο δίνη **A**, οι οποίες θα κινηθούν μαζί στην ίδια πλευρά γύρω από το κύλινδρο κατά την αναστροφή της φοράς κίνησης. Αυτό οφείλεται στη δίνη **B**, η οποία "συμπαράσφρει" την **A**. Σε αυτό το διάστημα παρατηρείται ότι οι αρχικές δίνες **A** & **B** και ούτω καθεξής, απομακρύνονται από τον κύλινδρο **σχεδόν κάθετα** ως προς τη διεύθυνση της ταλάντωσης του κυλίνδρου.

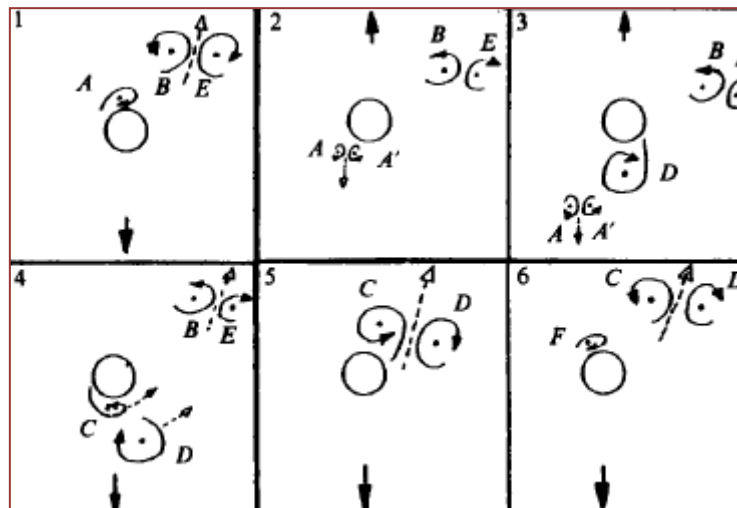


2-4 Διαδρομή δινών για  $7 < KC < 13$ .

Στο διάστημα  $13 < KC < 15$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5 το κύριο μοτίβο δινών είναι μια «οδός» από ζεύγη δινών που απομακρύνονται από το κύλινδρο με γωνία  $45^\circ$  ως προς τη διεύθυνση ταλάντωσης του κυλίνδρου. Η προσκολλημένη δίνη **A** στο τέλος του μισού κύκλου ζευγαρώνει με μια μικρότερη δίνη **A'** με παρόμοιο τρόπο με αυτού της παραγράφου 2.1.2.1..

Η μεγαλύτερη και περισσότερο σημαντική δίνη **D** κινείται στην ίδια πλευρά του κυλίνδρου μαζί με τη μη ακόμα αποκολλημένη δίνη **C** κατά την επόμενη αναστροφή του κυλίνδρου. Η δίνη **C** αποκτά μεγαλύτερη στροβιλότητα και γίνεται ζεύγος με τη δίνη **D**, αποτελώντας ένα από τα κύρια ζεύγη δινών. Έτσι το ζεύγος **C** και **D** ακολουθεί το ζεύγος **B+E** που είχε δημιουργηθεί σε προηγούμενο μισό κύκλο.

Οι αρχικές συνθήκες είναι αυτές που καθορίζουν προς ποια πλευρά κινούνται οι δίνες, τόσο στην εγκάρσια «οδό» δινών όσο και στη σειρά δινών που απομακρύνονται με γωνία  $45^\circ$  ως προς τη διεύθυνση της ταλάντωσης, αν η πλευρά, στην οποία έχουμε αποκόλληση δινών, μπορεί ν' αλλάξει με το χρόνο.

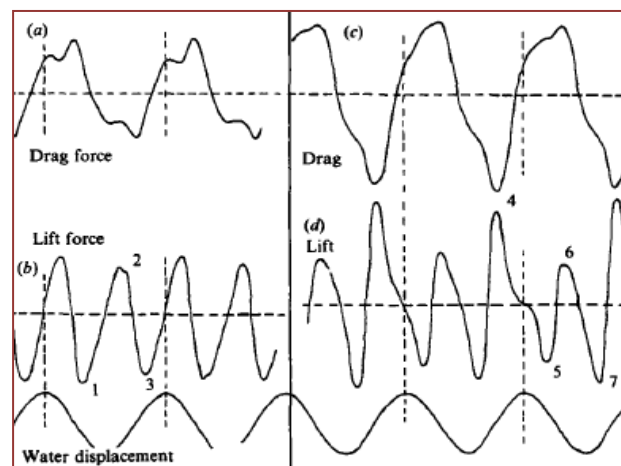
2-5 Ζευγάρια δινών για  $13 < KC < 15$ .

Στα σχήματα 2-6(a) και (b) παρουσιάζονται η δύναμη άνωσης και η δύναμη της διεύθυνσης της ροής για  $KC=11$ , αντίστοιχα. Στη περίπτωση αυτή, οι δυνάμεις που μετρήθηκαν για το σωλήνα σχήματος  $U$ , και ως εκ τούτου η οπισθέλκουσα περιλαμβάνει και τη συνιστώσα της κλίσης πίεσης, που είναι σε φάση με την επιτάχυνση του ρευστού.

Χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα μέτρησης για κάθε δύναμη είναι προφανές ότι το πλάτος της δύναμης άνωσης μπορεί να υπερβαίνει το πλάτος της οπισθέλκουσας.

Για τα σχήματα 2-6(c) και (d) παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της δύναμης άνωσης και οπισθέλκουσας για  $KC=13.7$ , αντίστοιχα. Από τα όποια εξάγεται ένας πρόχειρος κανόνας-συμπέρασμα ότι η συχνότητα της άνωσης είναι  $(n+1)$  φορές η συχνότητας της ταλάντωσης, όπου  $n$  ο αριθμός των δινών που σχηματίζονται σε κάθε μισό κύκλο· ως εκ τούτου στα παρακάτω σχήματα η συχνότητα της άνωσης είναι δυο φορές η συχνότητα ταλάντωσης.

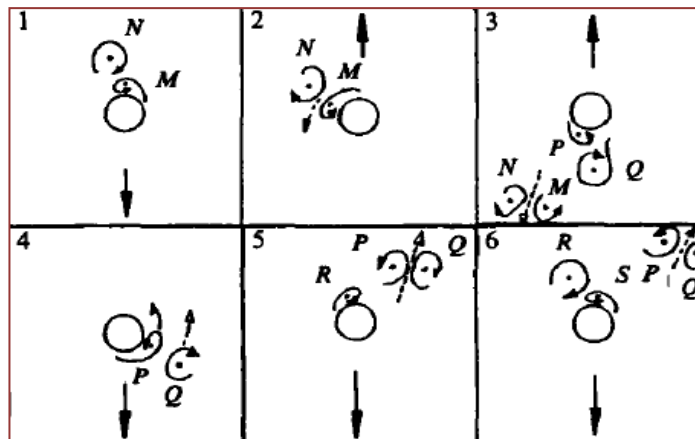
Εκτός των παραπάνω, για τα σχήματα 2-6(c) και (d) οι ταλαντώσεις των δυνάμεων άνωσης και οπισθέλκουσας είναι μη συμμετρικές με αποτέλεσμα οι δυνάμεις στον ένα μισό κύκλο να είναι άνισες και αντίθετες απ' ότι στον προηγούμενο μισό κύκλο.



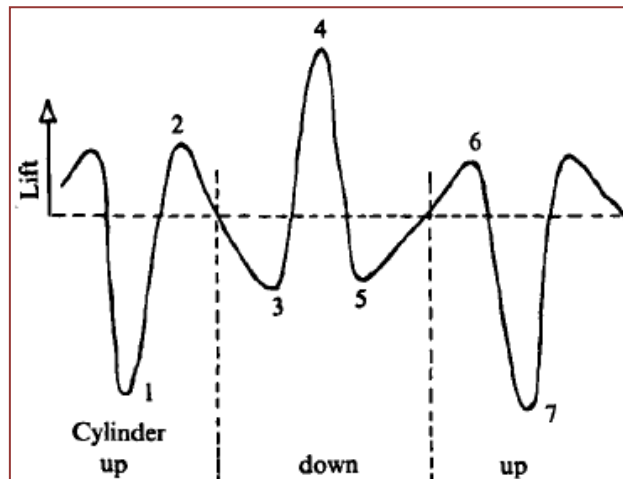
2-6 Τυπικά σχήματα διακυμάνσεων των δυνάμεων άνωσης και οπισθέλκουσας για τα διαστήματα  $7 < KC < 15$  για  $U$  αγωγό. Τα (a) και (b) είναι για  $KC=11$  και τα (c) και (d) για  $KC=13.7$ .

2.1.2.3. Διπλό ζεύγος δινών για  $15 < KC < 24$ 

Καθώς αυξάνεται το πλάτος της ταλάντωσης, η «οδός» των ζευγών δινών μετασχηματίζεται σε «οδό» διπλών ζευγών δινών. Τα ζεύγη δινών απομακρύνονται από τον κύλινδρο σε αντίθετες διευθύνσεις και αντίθετα τεταρτημόρια. Το σχήμα 2-7(2) και (3) παρουσιάζει ένα διάγραμμα που δείχνει το σχηματισμό του ζεύγους δινών **(M, N)** στο μισό κύκλο προς τα κάτω και προς τα αριστερά του κυλίνδρου και το 2-7(4) και (5) παρουσιάζουν στο επόμενο μισό του κύκλου ένα ζεύγος δινών **(P,Q)** να απομακρύνεται από τον κύλινδρο προς τα πάνω και προς τα δεξιά σε σχέση με τον κύλινδρο.

2-7 Διαδρομή διπλού ζεύγους δινών για  $15 < KC < 24$ .

Το σχήμα 2-8 είναι διάγραμμα της δύναμης άνωσης και αντιστοιχεί στα μοτίβα δινών του σχήματος 2-7.



2-8 Διάγραμμα της τοπικής μορφής της ταλάντωσης άνωσης.

Αν θεωρήσουμε ως θετική κυκλοφορία  $\Gamma$  την ανθρωρολογιακή, και θετική τη μετατόπιση της δίνης ( $x$ ) τη προς τα κάτω, το αρνητικό μέγιστο 1 του σχήματος 2-8 αντιστοιχεί στην ανάπτυξη και έκλυση της δίνης **M**.

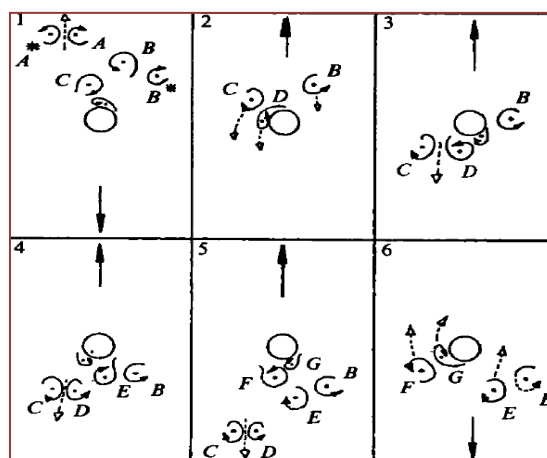
Επίσης, θεωρήθηκε ότι η δύναμη άνωσης είναι ανάλογη του μεγέθους  $-\partial/\partial t(\Gamma x)$  και περιλαμβάνει μόνο τις κινήσεις των πιο δυνατών δινών κοντά στον κύλινδρο.



Το **μέγιστο 2** αντιστοιχεί στο σχηματισμό και έκλυση της δίνης **Q** και το ελάχιστο **3** στην επιστροφή της δίνης **Q** κατά την αντιστροφή της κίνησης του κυλίνδρου. Παρόμοια, και στον επόμενο μισό κύκλο με τις δίνες **P** και **R** με το μέγιστο **4** και το ελάχιστο **5**, αντίστοιχα. Επομένως, μπορούμε να καταλήξουμε με βάση το σχήμα 2-3 για **KC=17** ότι η μορφή της δύναμης άωσης υποδηλώνει την ύπαρξη ομόρου από διπλά ζεύγη δινών. Η θεμελιώδης συχνότητα άωσης είναι τρεις φορές η συχνότητα ταλάντωσης του κυλίνδρου.

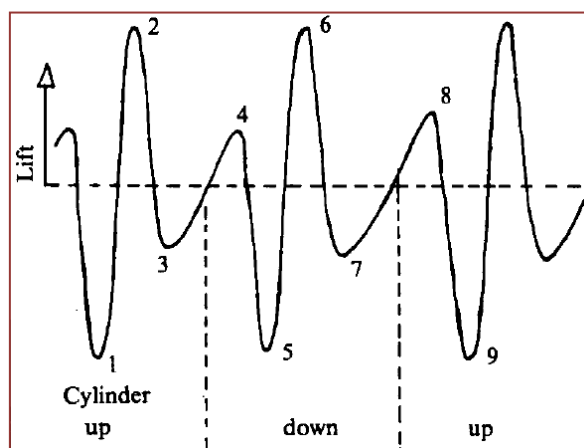
#### 2.1.2.4. Τρία ζεύγη δινών για $24 < KC < 32$ και τέσσερα ζεύγη δινών για $32 < KC < 40$

Καθώς το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνεται ακόμα περισσότερο, τόσο μεγαλώνει και ο αριθμός των αποκολλώμενων δινών στο μισό κύκλο, στο εύρος  $24 < KC < 32$ . Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό το διάστημα εμφανίζονται τρία ζεύγη δινών σε μισό κάθε κύκλο, σχήμα 2-9.



2-9 Διαδρομή τριών ζευγών για  $24 < KC < 32$ .  
Τα ζεύγη αποκολλώνται σε κάθε μισό κύκλο  
και κάθε ολόκληρος κύκλος αποτελείται από  
τρία ζεύγη (C+D, B+E, F+G).

Τα ζεύγη αυτά, που εμφανίζονται στο παραπάνω σχήμα, είναι υπεύθυνα για τη διακόμανση της δύναμης άωσης, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 2-10.



2-10 Διακόμανση δύναμης άωσης.

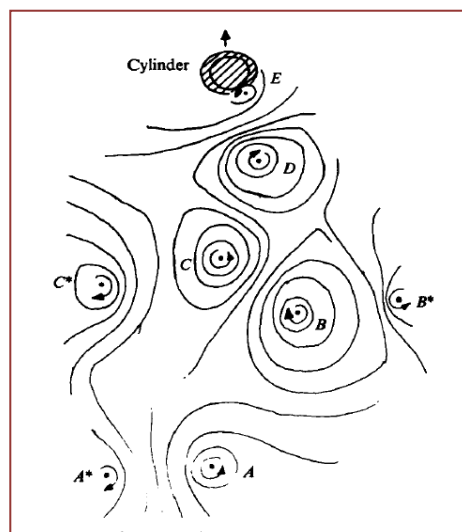
Στο σχήμα 2-9(1), οι δίνες **A** και **B** αποκολλώνται σε αυτό το μισό κύκλο και ζευγαρώνουν με τις δίνες **A\*** και **B\*** που είχαν αποκολληθεί στον προηγούμενο μισό κύκλο. Καθώς ο κύλινδρος αλλάζει διεύθυνση (2), η δίνη **C** ζευγαρώνει με τη **D** και η **B** από το προηγούμενο

μισό κύκλο δημιουργεί ένα ζεύγος με τη **E**. Στο (5) και (6) καθώς η ροή αντιστρέφεται ξανά, η **F** θα ζευγαρώσει με τη **G** στο νέο μισό κύκλο. Οι αποκολλήσεις και οι κινήσεις των μεγαλύτερων δινών είναι υπεύθυνες για τα ακρότατα της δύναμης άνωσης, τα οποία εξαρτώνται από το μέγεθος και το πρόσημο του  $-\partial/\partial t(\Gamma x)$ .

Από το σχήμα 2-3 για **KC=25** φαίνεται ότι η συχνότητα άνωσης είναι τέσσερις φορές η συχνότητα ταλάντωσης.

Στο διάστημα **32<KC<40** σχηματίζονται τέσσερα ζευγάρια δινών σε έναν ολόκληρο κύκλο και η συχνότητα της άνωσης είναι πέντε φορές η συχνότητα ταλάντωσης.

Παρακάτω παρατίθεται ένα σχηματικό διάγραμμα κίνησης των σωματιδίων που πάρθηκε από φωτογραφική μηχανή στο τέλος ενός μισού κύκλου.



2-11 Τέσσερα-ζεύγη για  $KC=33$ .

### 2.1.3. Συντελεστές δυνάμεων

Οι συντελεστές δυνάμεων Morrison μελετήθηκαν και από τον Williamson το 1982 και αποδείχθηκε ότι μεταβάλλονται με τρόπο που επιβεβαιώνεται και από άλλους, όπως πχ τον Graham. Οι συντελεστές Morrison είναι αρκετά ευαίσθητοι ιδίως στη περίπτωση της εγκάρσιας κίνησης των δινών. Επιπλέον πρόβλημα με τη σχέση του Morrison (2.1) αποτελεί η υπόθεση για συμμετρία του προφίλ της δύναμης, η οποία δεν είναι πάντα ορθή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-6(c) για το ένα ζεύγος δινών.

Η ρίζα του μέσου τετραγώνου του συντελεστή οπισθέλκουσας ( $C_{Frms}$ ) παρατίθεται για διάφορα  $KC$  στο σχήμα 2-12(a) και η δύναμη  $F_{rms}$  αδιαστατοποιείται με το  $(\rho D^3 l / 2T^2)$ , όπου  $l$  το μήκος του κυλίνδρου και γίνεται μικρό όταν το  $KC$  είναι μικρό.

Μια έκφραση για το  $(C_{Frms})^2$  που προέρχεται από τη (2.1) περιέχει δύο όρους, ο ένας ανάλογος του  $KC^2$  και ο άλλος του  $KC^4$ .

Μια ακριβής έκφραση για την καμπύλη του σχήματος 2-12 είναι η:

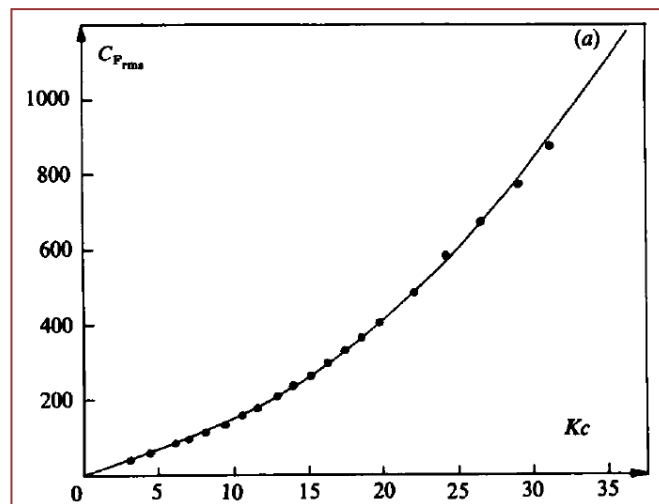
$$C_{Frms} = (160 KC^2 + 0.69 KC^4)^{0.5} \quad (2.2)$$

Η δύναμη της άνωσης οφείλεται αποκλειστικά στην ασύμμετρη ανάπτυξη και κίνηση των δινών και οι τιμές των συντελεστών αυτής φαίνονται στο 2-12(β). Η διακύμανση των τιμών είναι λογική.

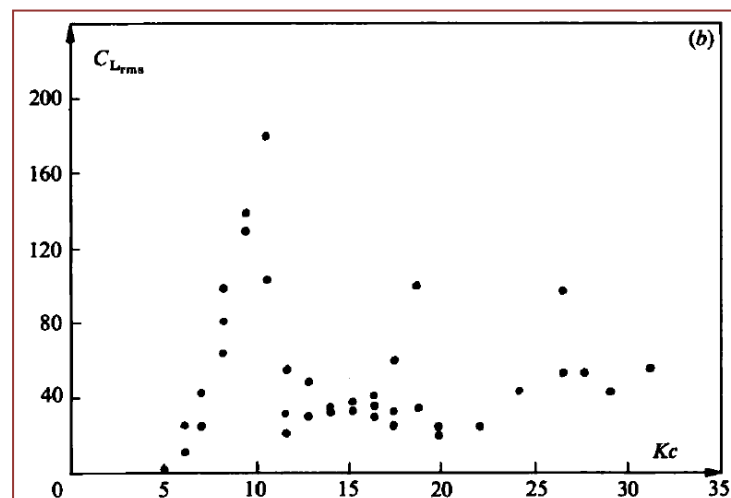
Η διακύμανση αυτή δημιουργείται ενδεχομένως από τη χρησιμοποίηση των μέσων τιμών των  $C_{L_{rms}}$ , οι οποίες έχουν υπολογιστεί από έναν αριθμό κύκλων, όπου οι δίνες άλλαζαν μη περιοδικά κατεύθυνση.

Ανάμεσα στους συντονισμούς, η δύναμη της άνωσης ταλαντώνεται με μικρό πλάτος, το οποίο σύμφωνα με το Bearman οφείλεται στον εκτός φάσης σχηματισμό δινών κατά μήκος του κυλίνδρου.

Επίσης, ο Williamson παρατήρησε, με τη χρήση λεπτών διαμηκών περυγίων, πως ίσως η έκλυση (αποκόλληση) των δινών γίνεται εκτός φάσης. Η άνοση τότε εκτελεί συνέχεια τυχαίες ταλαντώσεις μικρού πλάτους, ακριβώς όπως κάνει για έναν κύλινδρο στις ίδιες συνθήκες χωρίς περύγια, αλλά σποραδικά.



2-12 (α) Συντελεστές *r.m.s.* οπισθέλκουσας για διάφορα πλάτη (ή  $Kc$ ) και για αγωγό U-σχήματος και  $\beta=730$ .



2-12 (β) Συντελεστές *r.m.s.* δύναμης άνωσης συναρτήσει του  $Kc$ , για αγωγό U-σχήματος και  $\beta=730$ .

Τα τρία ακρότατα του διαγράμματος  $C_{Lrms}$  που παρουσιάζονται για  $KC= 11, 18,$  και  $26$  αντίστοιχα, αντιστοιχούν σε διαφορετικά μοτίβα δινών. Αυτά είναι του μονού ζεύγους ( $KC=11$ ), των δύο ζευγών ( $KC=18$ ) και των τριών ζευγών ( $KC=26$ ).

#### 2.1.4. Συμπεράσματα

Αρκετά επαναλαμβανόμενα μοτίβα δινών παρατηρήθηκαν γύρω από κύλινδρο που βρίσκεται μέσα σε ταλαντευμένη ροή ρευστού, με οπτικοποίηση της ροής και ταυτόχρονη μέτρηση δυνάμεων με τις οποίες σχετίζονται άμεσα.

Η μορφή των δυνάμεων που υφίσταται ο κύλινδρος, και που εξομοιώνουν τις δυνάμεις σε μια κατασκευή μέσα σε ταλαντούμενη ροή, ενδεχομένως συμβάλλουν στην κόπωσή της. Σε κάθε διάστημα αριθμών  $KC$  παρατηρείται ότι **η συχνότητα της άνωσης είναι πολλαπλάσιο της συχνότητας ταλάντωσης του κυλίνδρου ή του ρευστού** και αυτό οφείλεται στην αποκόλληση συγκεκριμένου αριθμού μεγάλων δινών σε κάθε μισό κύκλο.

Τέλος, το ζευγάρι μεταξύ δινών από προηγούμενους και νέους μισούς κύκλους παρατηρήθηκε σε όλα τα εύρη πλάτους ταλάντωσης(ή εύρους  $KC$ ). Έτσι έχουμε αδιάλειπτη παραγωγή δινών με το ίδιο μοτίβο.

## 2.2. Δυνάμεις πάνω σε κύλινδρο που βρίσκεται μέσα σε παλλόμενη συνεκτική ροή σε χαμηλούς αριθμούς Keulegan-Carpenter κατά Sarpkaya.

("Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers", Turgut Sarpkaya, 1986, J.Fluid Mechanics, vol. 165, pp. 61-71)

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν οι συντελεστές δυνάμεων για κυλίνδρους που βρίσκονται μέσα σε επίπεδη παλλόμενη ροή για χαμηλά πλάτη. Για δισδιάστατη, στρωτή και προσκολλημένη ροή προέκυψε ότι τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αυτά των Stokes και Wang. Η παλλόμενη συνεκτική ροή γίνεται ασταθής σε αξονικές περιοδικές δίνες πάνω από ένα **κρίσιμο** αριθμό **Keulegan-Carpenter** ( $KC = U_m T / D$ , όπου  $U_m$  η μέγιστη ταχύτητα,  $T$  η περίοδος της ταλάντωσης,  $D$  η διάμετρος του κυλίνδρου) για δεδομένο  $\beta$  ( $\beta = Re / KC = D^2 / \nu T$ ,  $Re = U_m D / \nu$ ,  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα). Έτσι, ο  $KC$  για τον οποίο ο συντελεστής  $C_D$  αποκλίνει από τις προβλέψεις του Stokes και του Wang αποτελεί το κρίσιμο  $KC$  για το οποίο παρουσιάζεται τυρβώδης αστάθεια.

### 2.2.1. Εισαγωγή

Η ημιτονοειδής ταλάντωση ρευστού γύρω από έναν κύλινδρο ή ημιτονοειδής κίνηση ενός κυλίνδρου μέσα σε συνεκτικό ρευστό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις υπεράκτιες κατασκευές.

Την περασμένη δεκαετία, έγιναν πολλές από πειραματικές μελέτες με σκοπό τη συσχέτιση των συντελεστών οπισθέλκουσας και αδράνειας  $C_D, C_m$  αντίστοιχα, με τους αριθμούς  $KC, Re, \beta$  και από τη σχετική τραχύτητα  $k/D$ .

Οι πειραματικές μελέτες, στο εργαστήριο ή στους ωκεανούς, κατέληξαν ότι για  $KC$  μικρότερο του 4, ο  $C_D$  είναι ασήμαντος ενώ ο  $C_m$  είχε τη θεωρητική τιμή της δυναμικής ροής, η οποία εξαρτάται από το σχήμα του σώματος. Τέτοιες παρατηρήσεις αγνοούν την πιθανότητα ότι για μεγάλα δισδιάστατα ή τρισδιάστατα σώματα που βρίσκονται κοντά στον πυθμένα των ωκεανών (μικρά  $KC$  και μεγάλοι  $Re$ ) το  $C_D$  μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο και η πραγματική τιμή του  $C_m$  να ξεπερνά την ιδανική του τιμή.

Ο Stokes (1851) ήταν ο πρώτος που έδειξε ότι η δύναμη που ασκείται πάνω σε κύλινδρο ή σε σφαίρα που πραγματοποιούν ημιτονοειδή ταλάντωση σε συνεκτικό υγρό **εξαρτώνται** και από το  $KC$  και από τον αριθμό  $Re$  (ή  $\beta$ ). Στην περίπτωση ενός ακίνητου κυλίνδρου που βρίσκεται μέσα σε ημιτονοειδή ροή, η δύναμη Stokes μπορεί να εκφραστεί από όρους της εξίσωσης **MOJS**, εφόσον σε ένα κύκλο της ροής το  $|\cos\theta| \cos\theta$  μπορεί να προσεγγιστεί από το  $(8\pi/3)\cos\theta$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω :

$$C_D = \frac{3\pi^3}{2KC} [(\pi\beta)^{-\frac{1}{2}} + (\pi\beta)^{-1} + O(\pi\beta)^{-\frac{3}{2}}] \quad (2.2)$$

και

$$C_m = 2 + 4(\pi\beta)^{-\frac{1}{2}} + O(\pi\beta)^{-\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν μόνο για μεγάλες τιμές του αριθμού  $\beta$ . Ο Wang(1968) επέκτεινε αυτή την ανάλυση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των εσωτερικών και εξωτερικών αναπτυγμάτων. Η ανάλυση του Wang ισχύει για  $KC \ll 1$ ,  $KC \cdot Re \ll 1$  και  $\beta \gg 1$  και οι εξισώσεις (2.2) και (2.3) μετασχηματίζονται σε :

$$C_D = \frac{3\pi^3}{2KC} [(\pi\beta)^{-\frac{1}{2}} + (\pi\beta)^{-1} - \frac{1}{4}(\pi\beta)^{-\frac{3}{2}}] \quad (2.4)$$

και

$$C_m = 2 + 4(\pi\beta)^{-\frac{1}{2}} + (\pi\beta)^{-\frac{3}{2}} \quad (2.5)$$

Οι εξισώσεις (2.4) και (2.5) διαφέρουν από τις (2.2) και (2.3) μόνο στους τελευταίους όρους. Ουσιαστικά, για μεγάλα  $\beta$  τα αποτελέσματα των Stokes και Wang είναι παρόμοια.

Σχετικά λίγα πειράματα έχουν γίνει με ημιτονοειδώς ταλαντούμενους κυλίνδρους για χαμηλούς  $Kc$ .

Ο **Honji** (1981) έθεσε σε ταλάντωση έναν κύλινδρο σε νερό που βρισκόταν σε ηρεμία για  $70 < \beta < 700$  και  $0 < KC < 4$  και ερεύνησε τη ευστάθεια της ροής. Καθόρισε τρεις περιοχές για το επίπεδο  $(KC, \beta)$ : (α) μια περιοχή που αντιστοιχεί σε σχετικά μικρά  $KC$  και η ροή παραμένει προσκολλημένη, σταθερή και διοδιάστατη, (β) μια δεύτερη περιοχή, όπου η ροή γίνεται ασταθής με εμφάνιση αξονικών περιοδικών δινών και (γ) μια τρίτη περιοχή στην οποία η ροή γίνεται τυρβώδης λόγω της μεγάλης διάρκειας αποκόλλησης της ροής. Ο Honji απέδωσε την αστάθεια της ροής της δεύτερης περίπτωσης στις **φυγόκεντρες δυνάμεις**.

Στη συνέχεια, ο Hall (1984) πραγματοποίησε έρευνα για την ευστάθεια της ροής στο όριο  $\beta \rightarrow \infty$  και  $KC \rightarrow 0$ , και έδειξε ότι η ταλάντωση συνεκτικής ροής που αλληλεπιδρά με άκαμπτες κυρτές επιφάνειες μπορούν να γίνουν ασταθείς εμφανίζοντας δίνες Taylor-Gortler.

Ο κρίσιμος αριθμός  $KC$  του **Hall** είναι :

$$KC_{cr} = Re_{cr}/\beta = 5.778 \beta^{-\frac{1}{4}} (1 + 0.205 \beta^{-\frac{1}{4}} + \dots) \quad (2.6)$$

Όπου ο κρίσιμος αριθμός Reynolds  $Re_{cr}$  αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού  $\beta$  (π.χ.  $Re_{cr}=6433$ ,  $KC_{cr}=0.57$ ,  $\beta=11240$ ).

Ο **Bearman** (1985) εξέδωσε πειρατικά δεδομένα και αναλύσεις για έναν αριθμό κυλίνδρων με διαφορετικές εγκάρσιες διατομές για μικρά πλάτη ταλάντωσης. Το μέγιστο  $\beta$  των κυλίνδρων ήταν 1665. Απέδειξε ότι οι τιμές του  $C_D$  είναι σε συμφωνία με τις προσεγγίσεις του Wang για δεδομένο  $KC_S$  (εξαρτώμενο από τη παράμετρο  $\beta$ , αλλά και μέσα στη δεύτερη περιοχή ( $\beta$ )). Επίσης, απέδωσε την αύξηση του  $C_D$  για  $KC > KC_S$ , στην έναρξη της αποκολλημένης ροής και του σχηματισμού δινών, οπότε η ανάλυση στρωτής ροής του Wang ισχύει μέχρι την έναρξη της στρωτής αποκόλλησης.

Οι τιμές του  $C_m$ , για  $KC < KC_S$ , που δόθηκαν από το Bearman και τους συνεργάτες του συμφωνούν με αυτές της εξίσωσης (2.5).

Η συγκεκριμένη έρευνα εξετάζει τις δυνάμεις που εμφανίζονται στη διεύθυνση της ταλάντωσης για έναν τραχύ και τρεις λείους κυλίνδρους για μεγάλα  $\beta$ , με τις μετρήσεις της παλλόμενης ροής να διεξάγονται μέσα σε αγωγό σχήματος-U. Ο κύριος σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η έκθεση δεδομένων και ο έλεγχος της ανάλυσης των Stokes-Wang. Πέρα όμως από τα παραπάνω, η έρευνα αυτή βοήθησε και στην καθιέρωση μιας σχέσης μεταξύ του  $C_D$  από την έναρξη της στροβιλώδους αστάθειας την αποκόλληση της ροής.

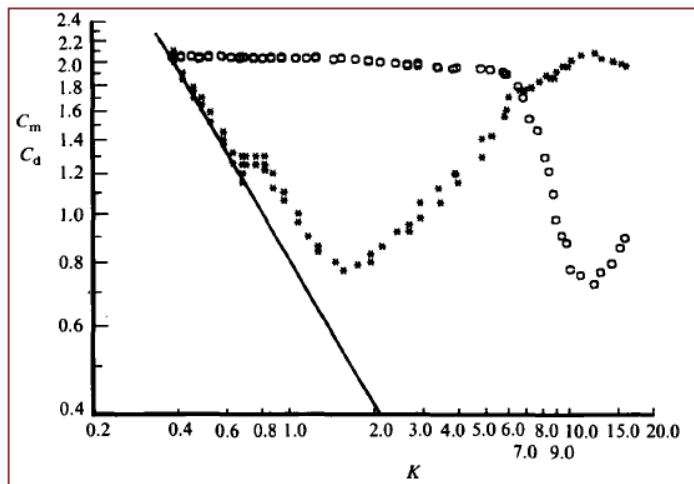
### 2.2.2. Πειραματική διάταξη και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε ταλαντευόμενο δοχείο σχήματος-U, με ύψος 6,7m, μήκος οριζόντιου τμήματος δοκιμών 10.7m, πλάτος 0.92m και ύψος διατομής 1.45m. Η έξοδος ενός ανεμιστήρα 1hp συνδεόταν με την κορυφή ενός από τα "άκρα" του δοχείου με ένα σωλήνα διαμέτρου 1m. Μια βαλβίδα τύπου πεταλούδας, ανάμεσα στην κορυφή του δοχείου και στην γραμμή ανατροφοδότησης, ταλαντώνεται ημιτονοειδές στη φυσική συχνότητα ταλάντωσης του νερού (5.3525s), και συγχρονίζεται με την ταλάντωση του νερού όταν γίνεται χρήση ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου ανατροφοδότησης. Το πλάτος ταλάντωσης μεταβάλλεται στενεύοντας ή μεγεθύνοντας την οπή στην έξοδο του ανεμιστήρα. Το πλάτος ταλάντωσης μετριέται με τη χρήση ενός διαφορικού μετατροπέα πίεσης και δύο μετρητές χωρητικότητας.

Κάθε κύλινδρος έχει μήκος 0.92m και είναι τοποθετημένος οριζόντια, στηριζόμενος σε ειδικά σχεδιασμένα κελία φορτίων. Οι άκρες του κυλίνδρου είναι κλειστές και έχει προβλεφθεί ένα διάκενο περίπου 0.5 mm μεταξύ των άκρων του κυλίνδρου και των τοιχωμάτων του δοχείου. Η μη φιλτραρισμένη δύναμη στη διεύθυνση της ταλάντωσης και τα σήματα της παλλόμενης ροής καταγράφονται ταυτόχρονα σε ψηφιακή μορφή με τη χρήση ενός αναλογικό-ψηφιακό

μετατροπέα. Η ανάλυση Fourier των μέσων συντελεστών οπισθέλκουσας και αδράνειας έγινε χρησιμοποιώντας το μέσο όρο 50 κύκλων. Για κάθε δεδομένο κύλινδρο, τα πειράματα επαναλήφθηκαν τουλάχιστον τρεις φορές και χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι διάμετροι κυλίνδρων ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές του  $\beta$ .

Οι συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης για λείους κυλίνδρους παρουσιάζονται στο σχήμα 2-13 ( $\beta=1035$ ), 2-14 ( $\beta=1380$ ) και 2-15 ( $\beta=11240$ ) ως συναρτήσεις του  $KC$ . Το σχήμα 2-16 παρουσιάζει τους συντελεστές δυνάμεων για έναν τραχύ κύλινδρο ( $k/D = 1/1000$  και  $\beta=1800$ ).

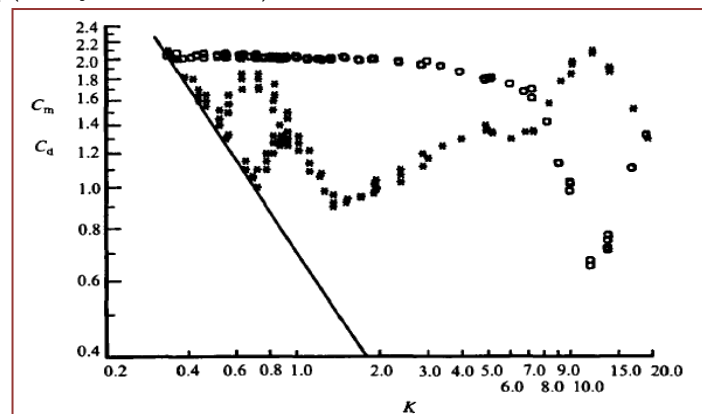


2-13 Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης για διάφορες τιμές  $KC$ .  
Πείραμα:  $\circ$ ,  $C_m$ ;  $*$ ,  $C_d$ ; —, θεωρία (όλα για  $\beta=1035$ )

Άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των υπολογισμένων δυνάμεων, που κανονικοποιούνται με τον όρο  $0.5\rho DU_m^2$ , είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση της τιμής τους, η οποία χρησιμοποιώντας την εξίσωση MOJS γίνεται:

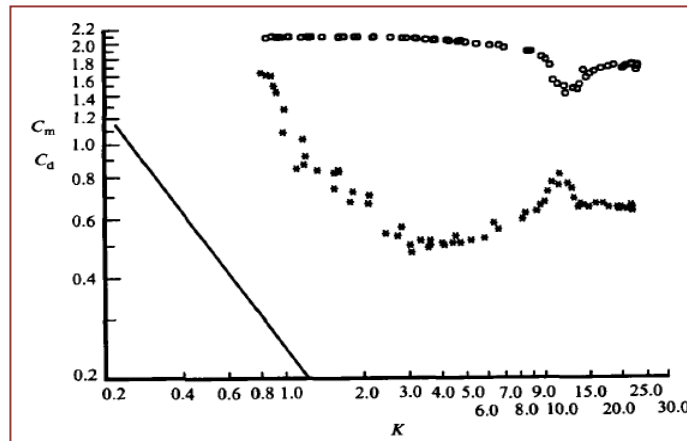
$$C_f(r.m.s.) = \left( \frac{3}{8} C_d^2 + \frac{\pi^4 C_m^2}{2KC^2} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Το σχήμα 2-17 δείχνει τις πειραματικές τιμές του  $C_f(r.m.s.)$  ως συνάρτηση του  $KC$ . Η εξίσωση (2.7) δείχνει ότι το  $C_f(r.m.s.)$  πλησιάζει τη μη συνεκτική τιμή του  $\sqrt{(2)\pi^2/KC}$  για μεγάλα  $\beta$  (για παράδειγμα  $C_D = 0$  και  $C_m = 2$ ). Τα πειραματικά δεδομένα συμπίπτουν με την ασύμπτωτη θεωρητική γραμμή (εκτός και αν  $KC > 9$ ).

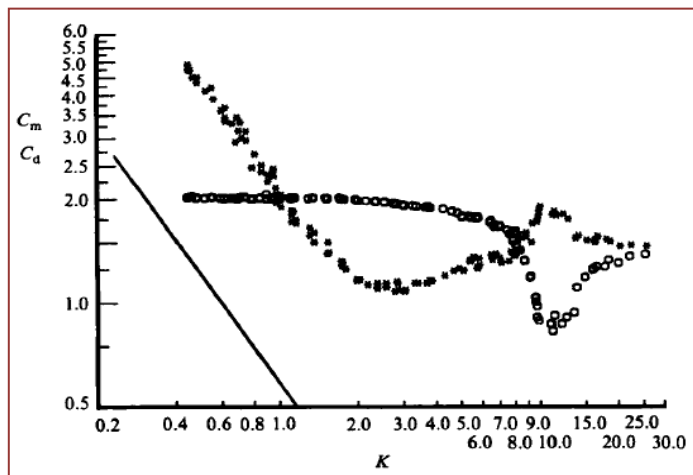


2-14 Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης για διάφορες τιμές  $KC$ .  
Πείραμα:  $\circ$ ,  $C_m$ ;  $*$ ,  $C_d$ ; θεωρία, — (όλα για  $\beta=1380$ )

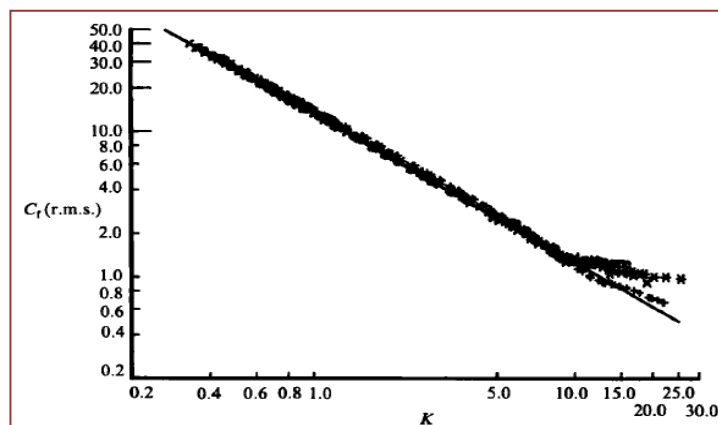




2-15 Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης για διάφορες τιμές ΚC.  
Πείραμα:  $\circ$ ,  $C_m$ ;  $*$ ,  $C_d$ ; θεωρία, — (όλα για  $\beta=11240$ )



2-16 Συντελεστές οπισθέλκουσας και άνωσης για διάφορες τιμές ΚC.  
Πείραμα:  $\circ$ ,  $C_m$ ;  $*$ ,  $C_d$ ; θεωρία, — (όλα για  $k/D=\frac{1}{100}$  και  $\beta=1800$ )

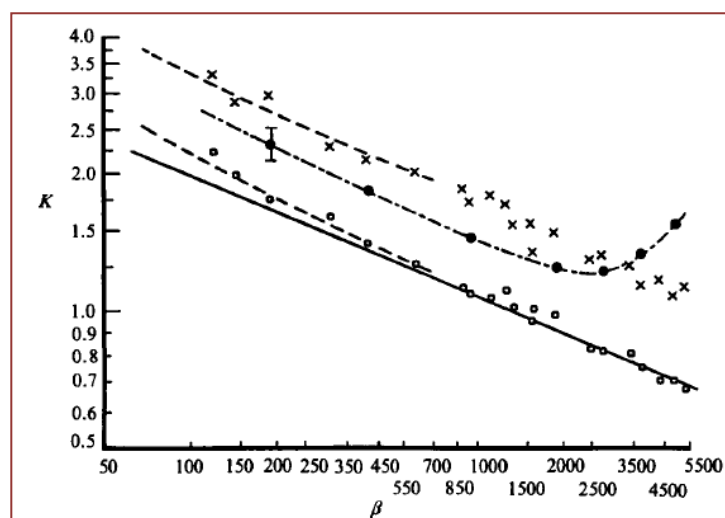


2-17 Συντελεστής της r.m.s. τιμής της δύναμης στη διεύθυνση της ταλάντωσης για διάφορες τιμές του ΚC. Πείραμα:  $\circ$ ,  $\beta=1035$ ;  $*$ ,  $\beta=1380$ ;  $+$ ,  $\beta=1800(k/D=\frac{1}{100})$ ;  $\bullet$ ,  $\beta=11240$ ; θεωρία  $(C_f (r.m.s.)) = \sqrt{(2)\pi^2/KC}$

Η οπτικοποίηση της ροής έγινε μέσα σε μια γυάλινη δεξαμενή με νερό, ύψους 62cm, μήκους 244cm και πλάτους 122cm. Τρεις λείοι κύλινδροι διαμέτρου  $D=2.54\text{cm}$  ( $L/D=24$ ),  $5.08\text{cm}$  ( $L/D=12$ ) και  $7.7\text{cm}$  ( $L/D=6.85$ ) και ένας τραχύς με  $D=5.08\text{cm}$  και σχετική τραχύτητα  $k/D = \frac{1}{100}$  ταλαντώνονταν ημιτονοειδώς μέσω ενός συστήματος εμβόλου-στροφάλου.

Η ροή γύρω από τον κύλινδρο έχει τη μορφή ραβδώσεων και οι δίνες που σχηματίζονται δημιουργούν ζεύγη δινών στα οποία αυτές είχαν αντίθετες κατευθύνσεις. Η συστροφή των δινών συνοδεύεται από την **αστάθεια** του **Helmholtz**, η οποία δημιουργεί τύρβη. Η αστάθεια αυτή είναι αρκετά δύσκολο να παρατηρηθεί εξαιτίας του μεγέθους των ραβδώσεων.

Τα δεδομένα του Honji, οι προσεγγίσεις του Hall και τα υπάρχοντα-πρόσφατα δεδομένα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



2-18 Έναρξη της αστάθειας Honji, αποκόλληση και τύρβη πάνω σε παλλόμενο κύλινδρο. Πείραμα :○, αστάθεια Honji ; ●, αποκόλληση; x, τύρβη; - -, μέση γραμμή μέσω των δεδομένων του Honji (κατώτερη γραμμή: αστάθεια Honji, ανώτερη γραμμή: τύρβη). Θεωρία: —, Hall.

Τα **ανώτατα σημεία** (σύμβολα x) δείχνουν τη μετάβαση στην τύρβη γύρω από ένα λείο κύλινδρο. Αυτά τα σημεία παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά και αυτό οφείλεται στο ότι η παρατήρηση της μετάβασης είναι κάπως υποκειμενική. Στο σχήμα 12-18 η μέση γραμμή ανάμεσα στα σημεία δείχνει την αποκόλληση που εμφανίζεται στους λείους κυλίνδρους. Πρέπει να τονιστεί ότι ο καθορισμός της έναρξης της αποκόλλησης είναι το ίδιο υποκειμενικός με αυτό της μετάβασης και αυτό γιατί υπάρχουν δυσκολίες στην οπτικοποίηση.

Τα πειράματα για την οπτικοποίηση της ροής σε τραχείς κυλίνδρους είναι αρκετά δύσκολα εξαιτίας της εμφάνισης αστάθειας σε μικρότερους αριθμούς  $KC$ , της διάχυσης του μεταλλικού καπνού κατά την αποκόλληση και τους υψηλότερους αριθμούς  $KC$  για τους οποίους ξεκινάει η αποκόλληση στους τραχείς κυλίνδρους σε αντίθεση με αυτούς των λείων.

Εξαιτίας αυτών των δυσκολιών, η μελέτες επικεντρώθηκαν σε μια συγκεκριμένη τιμή του  $\beta$ . Έτσι, επαναλαμβάνοντας αρκετές φορές το ίδιο τεστ για  $\beta=1800$  προέκυψε ότι  $KC_{cr}=0.40$ ,  $KC_t=1.1$ (έναρξη τύρβης) και  $KC_s=2$ (αποκόλληση).

### 2.2.3. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Το σχήμα 2-13 δείχνει τέσσερα διαστήματα ροής: (i)  $0 < KC < KC_{cr}$  ( $KC_{cr}=0.75$  για  $\beta=1035$ ), όπου το διάστημα αυτό αναφέρεται ως Stokes-Wang και η στρωτή ροή είναι προσκολλημένη και σταθερή, (ii)  $KC_{cr} < KC < KC_{md}$  ( $KC_{md} \approx 1.6$  και για  $\beta=1035$ ), που η στρωτή ροή γίνεται ασταθής σε αξονικές περιοδικές δίνες, που τελικά οδηγούν σε αποκόλληση, τύρβη και στο ελάχιστο  $C_d$ . Να σημειωθεί ότι ο όρος "τελικά" αναφέρεται στην αλλαγή που πραγματοποιείται με την αύξηση της παραμέτρου  $KC$ . Δηλαδή, υπάρχει ένα εύρος τιμών  $KC$  και  $\beta$ , όπου οι δίνες βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση, χωρίς τύρβη. (iii)  $KC_{cr} < KC < KC^*$ , που το  $C_d$  αυξάνεται και οι επιδράσεις της αποκόλλησης της ροής και της αποκόλλησης των δινών αυξάνεται σημαντικά και τελικά δημιουργείται σε μισή οδός Karman κατά την εγκάρσια κατεύθυνση στο διάστημα  $8 < KC < 13$ , και (iv)  $KC > KC^*$  όπου το  $C_d$  μειώνεται και ο αριθμός δινών και μορφών ροής όλο και εμφανίζεται.

Σύμφωνα με το σχήμα 2-18,  $KC_{cr}=1.06$ ,  $Re_{cr}=1097$ ,  $KC_s \approx 1.5$  και  $KC_t \approx 1.7$  για  $\beta=1035$ . Στο σχήμα 2-13, ο  $C_d$  αποκλίνει από τις προσεγγίσεις των Stokes-Wang για  $KC_{cr}=0.7 \div 0.8$  ( $Re_{cr}=725$  και  $825$ ). Το ελάχιστο  $C_d$  του σχήματος 2-13 φαίνεται να εμφανίζεται για  $KC_{md}=1.6$ . Έτσι, η ελάχιστη οπισθέλκουσα εμφανίζεται λίγο μετά την αποκόλληση και όταν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες, τουλάχιστον αυτό συμβαίνει για τους λείους κυλίνδρους για  $\beta=1035$ . Οι διαφορές μεταξύ των  $KC_s$ ,  $KC_t$  και  $KC_{md}$  είναι πολύ μικρές και σίγουρα εντός των ορίων των πειρατικών σφαλμάτων.

Το σχήμα 2-14 παρουσιάζει τα ίδια ακριβώς τέσσερα μοτίβα ροής για  $\beta=1380$  με ένα πρόσθετο διάστημα υστέρησης. Καθώς το  $KC$  αυξάνεται με μικρά βήματα (από 0.4 σε 1.5) ο  $C_d$  ακολουθεί τη γραμμή Stokes-Wang και μετά αποκλίνει από αυτή σχετικά γρήγορα για τιμές του  $KC_{cr}$  ανάμεσα στο  $0.7 \div 0.9$  ( $Re=996 \div 1242$ ) (σύμφωνα με το σχήμα 2-14,  $KC_{cr}=0.98$ ,  $Re_{cr} \approx 1350$ ,  $KC_s \approx 1.3$  και  $KC_t \approx 1.55$ ). Ακολούθως, το  $C_d$  μειώνεται και φτάνει στην ελάχιστη τιμή του  $KC_{md}=1.5$  (να σημειωθεί ότι το  $KC_{md} \approx KC_t$  όπως στη περίπτωση  $\beta=1035$ ). Όταν το  $KC$  μειώθηκε με μικρά βήματα, το  $C_d$  παραμένει στην υψηλότερη γραμμή, παράλληλη της γραμμής Stokes-Wang και "αλλάζει" γραμμή πηγαίνοντας σε αυτήν της στρωτής ροής για  $KC=0.55$ . Παρά των πολλών προσπαθειών δεν κατέστη εφικτό να εξαλειφθεί η υστέρηση. Μια παρόμοια αλλά μικρότερη υστέρηση παρατηρήθηκε στη περίπτωση για  $\beta=1035$  για εύρος  $KC=0.6 \div 0.8$ . Οι λόγοι εμφάνισης της υστέρησης δεν είναι ξεκάθαροι, αρχικά γιατί είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν τέτοια πειράματα. Αξίζει, επίσης να σημειωθεί ότι για μικρά  $KC$  (π.χ.  $KC=0.4$ ) οι διαταραχές στη ροή είναι αρκετά μικρές και η ροή παραμένει σταθερή για ένα μεγάλο διάστημα  $KC$  (μέχρι  $KC_{cr}=0.7$  για  $\beta=1380$ ) που είναι ακόμα πιο μικρό από αυτό του σχήματος 2-18. Παρόλαυτά, αν το πείραμα διεξαχθεί με μείωση του  $KC$ , η τύρβη που δημιουργείται στο οριακό στρώμα μπορεί να αυξήσει την τύρβη στη σήραγγα. Αν το νερό διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου, η δημιουργία μεταφοράς ρευμάτων δε μπορεί να αποκλειστεί εντελώς. Η ύπαρξη πρόσθετων πραγματικών ή φανταστικών διαταραχών οδηγεί στη μετάβαση της ροής σε ασταθή ροή καθώς το μειώνεται σταδιακά το  $KC$  κάτω από 0.7 (για  $\beta=1380$ ). Τελικά, για  $KC=0.55$  η ροή γίνεται σταθερή.

Η πρώτη αστάθεια δεν είναι προφανής για  $\beta=11240$  (σχήμα 2-15), όπου το μικρότερο  $KC$  είναι περίπου 0.8. Θεωρώντας ότι η ανάλυση του Hall μπορεί να επεκταθεί και για  $\beta=11240$ , έχουμε  $KC_{cr}=0.57$  και  $Re_{cr}=6400$ . Είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι το οριακό στρώμα είναι ήδη ασταθές και έχει γίνει τυρβώδες για το χαμηλότερο  $KC$  που επιτυγχάνεται για  $\beta=11240$  (το χαμηλότερο  $KC$  πρέπει να είναι περίπου 0.2 ή να παρατηρηθεί μια αλλαγή στο  $C_d$  για  $KC=0.57$  σύμφωνα με την ανάλυση του Hall).

Το ελάχιστο  $C_d$  εμφανίστηκε για  $KC_{md}\approx 3.5$  (για  $\beta=11240$ ). Δεν ήταν εφικτό να καθοριστεί το  $KC_S$  για  $\beta=11240$ . Το σχήμα 2-18 δείχνει το μεταβατικό διάστημα και την αποκόλληση της ροής που συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα για  $\beta=2600$  ( $KC=1.25$ ,  $Re=3250$ ). Για μεγαλύτερα  $\beta$ , το μεταβατικό διάστημα εμφανίζεται νωρίτερα όπως παρατηρήθηκε από τον Bearman, και η αποκόλληση μετατίθεται σε μεγαλύτερους  $KC$ . Έτσι, για  $\beta=11240$ , η αποκόλληση παρατηρείται για  $KC_S\approx 3$  σύμφωνα με το σχήμα 2-18.

Το σχήμα 2-16 παρουσιάζει τα δεδομένα που παρατηρήθηκαν για τραχύ κύλινδρο για  $\beta=1800$ . Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, η αστάθεια κανονικά θα πρέπει ξεκινάει όταν  $KC_{cr}=0.4$ , τιμή που είναι ανέφικτη για τα παρόντα πειράματα. Προφανώς, το οριακό στρώμα γίνεται ασταθές όταν το  $KC$  προσεγγίζει τη 0.45 (η χαμηλότερη στο σχήμα 2-16). Στη συνέχεια, το  $C_d$  μειώνεται ραγδαία, καθώς παραμένει σε μια γραμμή παράλληλη με αυτήν των Stokes-Wang και φτάνει στην ελάχιστη τιμή του,  $KC_{md}=2.4$ . Συνοπτικά, το μεταβατικό διάστημα για  $KC_t=1.1$  ακολουθείται από την αποκόλληση για  $KC_S=1.9$  ( $Re=3400$ ) και από την εμφάνιση ελάχιστης οπισθέλκουσας για  $KC_{md}=2.4$ .

Τα παραπάνω υπέδειξαν ότι η ροή γίνεται ασταθής σε αξονικές περιοδικές δίνες για μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Keulegan-Carpenter για δεδομένο  $\beta$  και  $k/D$ . Η επίδραση της τραχύτητας επιταχύνουν την εμφάνιση αστάθειας και την αποκόλληση. Για λείους κύλινδρους και για  $\beta$  μικρότερο από 2600, η αποκόλληση προηγείται της μετάβασης σε τύρβη στα οριακά στρώματα. Σε αυτή τη περίπτωση, η ελάχιστη οπισθέλκουσα και η μετάβαση στη τυρβώδη ροή συμβαίνει για περίπου ίδια  $KC$ . Όταν το μεταβατικό διάστημα προηγείται της αποκόλλησης, τότε η αποκόλληση καθυστερεί και εμφανίζεται σε μεγαλύτερα  $KC$ . Αλλά και σε αυτή τη περίπτωση, η ελάχιστη οπισθέλκουσα αντιστοιχεί στην εμφάνιση της αποκόλλησης,  $KC_S$ , το οποίο είναι ελάχιστα μικρότερο από το  $KC_{md}$ .

Τέλος, δύο επιπλέον παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν σύμφωνα με τα δεδομένα των σχημάτων 2-13-2-16. Πρώτα, ο συντελεστής αδράνειας είναι μεγαλύτερος από 2, τουλάχιστον για  $KC < KC_t$ , και σχεδόν ίδιος με αυτόν που δίνεται από τη σχέση (2.5). Οι ιδανικές τιμές του  $C_m$  είναι 2.07, 2.06, 2.05, και 2.02 για  $\beta=1035$ , 1380, 1800, και 11240, αντίστοιχα. Δεύτερον, δεν γίνεται να απομονώσουμε τη συμβολή της έκλυσης δινών αφαιρώντας τη τιμή του  $C_d$  που δίνεται από την Stokes-Wang ανάλυση από αυτήν που μετράται, από τη στιγμή που η ανάλυση δε μπορεί να υπολογίσει την οπισθέλκουσα για λείους ή τραχείς κύλινδρους με ασταθή ή τυρβώδη οριακά στρώματα, ιδιαίτερα για το εύρος  $KC_{cr} < KC < KC_{md}$ .

#### 2.2.4. Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις της δύναμης στη διεύθυνση της ταλάντωσης και η οπτικοποίηση της ροής γύρω από λείους ή τραχείς κυλίνδρους έχουν δείξει ότι **(i)** οι θεωρητικές τιμές του συντελεστή αδράνειας συμφωνούν αρκετά καλά με αυτές που παρατηρήθηκαν πειραματικά για αριθμούς Keulegan-Carpenter μικρότερους από αυτούς που αντιστοιχούν στην έναρξη της μετάβασης του οριακού στρώματος, **(ii)** ο συντελεστής οπισθέλκουσας που υπολογίστηκε από την ανάλυση των Stokes-Wang βρίσκεται σε καλή συμφωνία με αυτόν που παρατηρήθηκε πειραματικά για  $KC < KC_{cr}$ , για τον οποίο η ροή γίνεται ασταθής (για τους λείους κυλίνδρους), **(iii)** το κρίσιμο διάστημα ακολουθείται είτε από αποκόλληση και μετάβαση είτε από μετάβαση και καθυστερημένη αποκόλληση. Σε κάθε περίπτωση, η αποκόλληση και η εμφάνιση ελάχιστης οπισθέλκουσας συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα. **(iv)** Η τραχύτητα επισπεύδει την αστάθεια (στη παρούσα έρευνα φαίνεται μόνο για ένα  $\beta$ ) και τη μετάβαση στην τύρβη στο οριακό στρώμα. **(v)** Η ανάλυση του Hall και η υπόθεση του Honji ότι η ροή «με ραβδώσεις» μπορεί να υπάρξει έξω από το διάστημα  $70 < \beta < 700$  φαίνεται να ισχύει για  $\beta < 5500$ . (4)

### 2.3. Μελέτη δυνάμεων, κυκλοφορίας και μοτίβων δινών γύρω από κύλινδρο σε παλλόμενη ροή, των Obasaju, Bearman και Graham. ("A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow", E.D.Obasaju, P.W.Bearman, J.M.R. Graham, 1988, J.Fluid Mechanics, vol.196, pp.467-494)

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν οι μετρήσεις τοπικών και ολικών δυνάμεων και η συσχέτιση της έκλυσης δινών γύρω από κύλινδρο μέσα σε παλλόμενη ροή για αριθμούς  $KC$  στο διάστημα  $4 \div 55$ . Η παράμετρος  $\beta$  βρίσκεται στο διάστημα **100 με 1665**. Επίσης, μετρείται η κυκλοφορία σε μια κλειστή διαδρομή που περικλείει τον κύλινδρο. Χρησιμοποιήθηκε μια mode-averaging μέθοδος για τη μέτρηση των τοπικών δυνάμεων και της κυκλοφορίας, η οποία έδωσε για τυπικούς τρόπους έκλυσης δινών στιγμιότυπα για ένα μέσο κύκλο. Η εγκάρσια δύναμη και κυκλοφορία τείνουν να παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε φάση μεταξύ τους, εκτός από τη στιγμή της αναστροφής της ροής που η δύναμη αλλάζει πρόσημο ενώ η κυκλοφορία παραμένει υψηλή. Τιμές της δύναμης των δινών εκτιμήθηκαν από τη μέτρηση της κυκλοφορίας και βρέθηκε να είναι συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα της μόνιμης ροής. Για  $KC \leq 30$ , διαφορετικά μοτίβα έκλυσης δινών λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά διαστήματα  $KC$ , με εγκάρσια συσχέτιση υψηλή στο κέντρο ενός διαστήματος  $KC$  για συγκεκριμένο μοτίβο έκλυσης δινών και χαμηλό στα άκρα του. Για πάνω από  $KC \approx 30$  ο συσχετισμός δεν είναι τόσο ευαίσθητος και το μήκος συσχετισμού εκτιμάται να είναι ίσο με 4.65 διαμέτρους κυλίνδρου. Για εγκάρσια οδό δινών ( $8 \leq KC \leq 15$ ), ο κύλινδρος βρέθηκε να δέχεται μια σταθερή εγκάρσια δύναμη, όπου ο συντελεστής της εκτιμήθηκε να είναι περίπου 0.5 για  $KC = 14$ .

#### 2.3.1. Εισαγωγή

Όταν το  $KC$  είναι αρκετά μικρό, το οριακό στρώμα σε έναν ταλαντευόμενο κύλινδρο είναι παντού προσκολλημένο, στρωτό, σταθερό και δισδιάστατο. Η μόνη δύναμη που ασκείται στο κύλινδρο είναι κατά τη διεύθυνση της κίνησης και είναι συνάρτηση του  $\beta$ . Καθώς το  $KC$  αυξάνεται, το στρωτό οριακό στρώμα της ροής γίνεται ασταθές και σχηματίζονται τρισδιάστατες δίνες κατά μήκος του κυλίνδρου. Ο Sarpkaya (1986) έδειξε ότι αν το  $\beta$  είναι μικρότερο από 2600, τότε αυτή η αστάθεια ακολουθείται από αποκόλληση του οριακού στρώματος και μετάβαση του αποκολλημένου στρώματος από στρωτό σε τυρβώδες· ενώ για μεγαλύτερο  $\beta$  η μετάβαση συμβαίνει μέσα στο οριακό στρώμα πριν την αποκόλληση της ροής. Όταν το  $KC$  είναι **μεγάλο**, τα αποκολλημένα στρώματα σχηματίζουν δίνες μεγέθους της τάξης της **διαμέτρου του κυλίνδρου**. Όταν αυτές οι δίνες σχηματίζονται ασύμμετρα οδηγούν στη δημιουργία μιας πρόσθετης εγκάρσιας δύναμης ως προς την κατεύθυνση της ροής. Ανάλογα με το  $KC$  είτε μερικώς είτε ολικώς, η αποκολλημένη στροβιλότητα παρασύρτετε πίσω από τον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της αντιστροφής της ροής. Το αποτέλεσμα είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη ροή, η οποία δε μπορεί να εξεταστεί θεωρητικά. Σε αυτή την εργασία περιγράφεται η ανάπτυξη της ροής για  $KC$  από 4, που παρατηρήθηκαν οι πρώτες εγκάρσιες δυνάμεις, μέχρι 60.

Η κάθετη δύναμη είναι πιο δύσκολο να αναλυθεί επειδή είναι ευαίσθητη στο τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται και κινούνται οι δίνες. Μια ένδειξη της πολυπλοκότητας της ροής δόθηκε από τον **Iwagaki**, ο οποίος **πρότεινε** ότι το διάστημα του **KC** από **2.9** μέχρι **30** πρέπει να χωριστεί σε **8 υποδιαστήματα**. Ακόμα και αν το KC και το β είναι σταθερά, περισσότερα από ένα μοτίβο έκλυσης δινών είναι δυνατό να υπάρξει και η ροή μπορεί να εναλλαγεί μεταξύ δύο πιθανών μορφών. Οι περισσότερες πειραματικές πληροφορίες για τις εγκάρσιες δυνάμεις σχετίζονται με την κύρια συχνότητα και τη μέγιστη τιμή της δύναμης. Έτσι, μπορεί να γίνει **συσχετισμός της δύναμης στη διεύθυνση της ταλάντωσης και της εγκάρσιας δύναμης με τη δημιουργία και τον σχηματισμό δινών**.

Για να επιτευχθεί αυτός ο συσχετισμός είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας μεθόδου για την απόκτηση μέσων κύκλων από τις χρονοσειρές της εγκάρσιας δύναμης για διαφορετικά μοτίβα έκλυσης δινών. Το σχήμα αυτό θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Προκαταρκτικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ο αριθμός Strouhal,  $S = f D / U$ , που υπολογίζεται από τις στιγμιαίες τιμές της συχνότητας έκλυσης δινών και της ταχύτητας της ροής, είναι **σταθερός**. Μια πλήρης περιγραφή του φαινομενικά σταθερού μοντέλου δόθηκε από τους Bearman, Obasaju και Graham(1984). Όπου οι συγκρίσεις μεταξύ θεωρίας και μετρήσεων έγινε για KC κάτω από 6. Βρέθηκε ότι και για χαμηλούς αριθμούς KC, που η πρόβλεψη του μοντέλου είναι λιγότερο καλή, η συχνότητα της εγκάρσιας δύναμης αντιστοιχεί, με αρκετή ακρίβεια, σε αριθμό Strouhal 0.2 . **Οι συγκεκριμένες μελέτες έδειξαν ότι ο μηχανισμός ανάπτυξης δινών σε παλλόμενη ροή είναι ίδιος με αυτόν της μόνιμης**.

### 2.3.2. Πειραματική διάταξη

#### 2.3.2.1. Πειραματικές διατάξεις

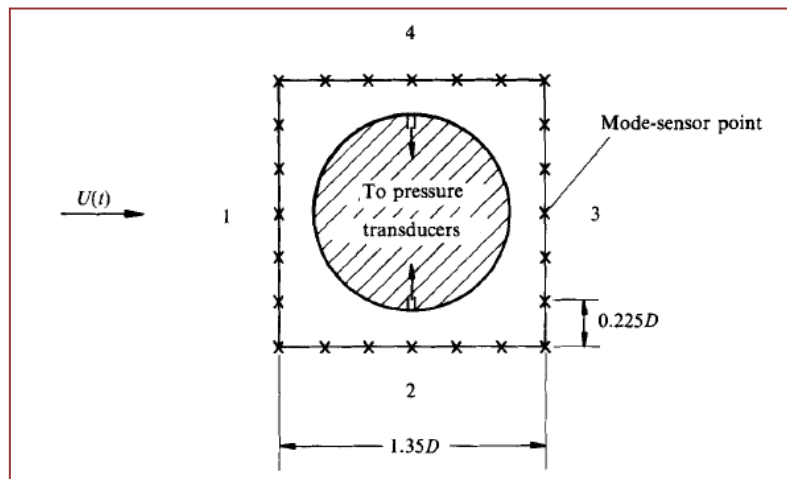
Η παλλόμενη ροή έγινε αντιληπτή με την αξιοποίηση του συντονισμού ενός δοχείου νερού σχήματος-U μέσα στο οποίο ήταν βυθισμένος ένας σταθερός κύλινδρος, καθώς και με την ταλάντωση ενός μοντέλου σε κανάλι νερού.

Το τμήμα δοκιμών, το οποίο βρισκόταν στο οριζόντιο άκρο του **αγωγού-U**, ήταν τετράγωνο πλευράς 0.61m και μήκος 1.5 m. Η περίοδος της ταλάντωσης του νερού στον αγωγό-U ήταν  $T = 3.34 \text{sec}$  . Το πλάτος κυμαινόταν μέχρι και 0.6m από peak-to-peak. Ταλαντώσεις σταθερού πλάτους δημιουργούνταν από αεροσυμπιεστή, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος σε ένα από τα κατακόρυφα άκρα, ο οποίος ελεγχόταν από το σήμα από έναν μετρητή χωρητικότητας που κατέγραφε το στιγμιαίο επίπεδο του νερού.

Έγιναν **δύο σειρές μετρήσεων** για τον αγωγό U-σχήματος. Για την **πρώτη** σειρά μετρήσεων, τα άκρα του μοντέλου στηρίζονταν σε strain gauges που μετρούσαν την ολική δύναμη στο μοντέλο. Τα πειράματα έγιναν για **επτά κυλίνδρους** με διάμετρο που κυμαινόταν από 1.91cm μέχρι 7.48cm, δίνοντας β μεταξύ 109 και 1665 .

Ο σκοπός της **δεύτερης σειράς μετρήσεων** στον αγωγό U ήταν να καθοριστεί η ασκούμενη δύναμη σε ένα μικρό μήκος του κυλίνδρου και να εκτιμηθεί η κυκλοφορία γύρω από αυτόν. Ο κύλινδρος που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις μετρήσεις είχε διάμετρο 3.73cm και έδινε  $\beta = 416$ . Ο κύλινδρος είχε δύο οπές πίεσης στο μέσον του, τοποθετημένες διαμετρικά αντίθετα η μια από την άλλη. Κάθε οπή ήταν συνδεδεμένη με ένα μορφοτροπέα πίεσης εύρους 5 psi . Η καταγραφή ταχυτήτων, πιέσεων και επιπέδου νερού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση laser

για τουλάχιστον 150 κύκλους της ταλάντωσης νερού. Για τον υπολογισμό των τοπικών δυνάμεων από τις μετρήσεις πίεσης, χρησιμοποιήθηκε ένα σημείο αναφοράς για την καταγραφή των ταχυτήτων (σχήμα 2-19), ενώ η καταγραφή διαφοράς πίεσης έγινε με ζευγάρια οπών που ήταν τοποθετημένα σε 12 ισαπέχουσες θέσεις στη περιφέρεια του κυλίνδρου.



2-19 Υποθετικό σχήμα εκτίμησης κατά μέσο όρο

Τα σημεία μέτρησης της ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κυκλοφορίας φαίνονται στο σχήμα 2-19. Η διαφορά πίεσης κατά μήκος του κυλίνδρου σε  $\pm 90^\circ$  ως προς στην κύρια διεύθυνση καταγράφηκε, ενώ ταυτόχρονα έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας στα σημεία που βρίσκονται πάνω στην τετραγωνική περίμετρο που περικλείει τον κύλινδρο. Η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας μετρήθηκε στα οριζόντια μέρη της περιμέτρου(πλευρές 2 και 4) και η κάθετη συνιστώσα στις πλευρές 1 και 3. Η κυκλοφορία γύρω από το κύλινδρο βρέθηκε με ολοκλήρωση της μετρούμενων ταχυτήτων.

Η **δεύτερη πειραματική διάταξη** που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή παλλόμενης ροής ήταν ένα ανοικτό κανάλι νερού. Το τμήμα δοκιμών είχε πλάτος 0.61m, βάθος 0.68m και μήκος 3m. Στην επιφάνεια του εργαζόμενου μέσου (νερό) υπήρχε μικρή πλατφόρμα, η οποία μπορούσε να τεθεί σε ημιτονοειδή ταλάντωση. Τα άνω άκρα των εξεταζόμενων μοντέλων (κύλινδροι) ήταν σφηνωμένα στη πλατφόρμα με αποτέλεσμα να ταλαντεύονται και αυτά. Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό των ταχυτήτων, της κυκλοφορίας, της κάθετης και της ολικής δύναμης έγιναν με αισθητήρες ίδιας μορφής και θέσης με αυτών της πρώτης πειραματικής διάταξης. Η συγκεκριμένη διάταξη δε θα αναλυθεί περισσότερο καθώς θεωρώ ότι δεν σχετίζεται επαρκώς με την πειραματική διάταξη που θα παρουσιαστεί παρακάτω στην παρούσα εργασία.



2.3.2.2. Τεχνική mode-averaging

Σκοπός εδώ είναι να ληφθούν οι μέσοι κύκλοι της εγκάρσιας δύναμης αλλά λόγω ότι η ροή για ένα δεδομένο ΚC **αλλάζει** μεταξύ διαφορετικών μοτίβων έκλυσης δινών δημιουργήθηκαν κάποιες δυσκολίες. Επίσης, για κάθε μοτίβο υπάρχει συνήθως κατοπτρικά αντίθετο του, στο οποίο δημιουργείται άνωση ακριβώς **ίδιου μεγέθους αλλά αντιθέτου προσήμου**. Οπότε, η μέση εγκάρσια δύναμη για ένα μεγάλο αριθμό κύκλων υπολογιζόταν σχεδόν ίση με το **μηδέν**. Για αυτούς τους λόγους αναζητήθηκε άλλη μέθοδος υπολογισμού.

Έτσι, στην παρούσα έρευνα η ροή **χαρακτηρίστηκε** από τη συμπεριφορά δύο διαφορετικών σημάτων που αναφέρονται και ως σήματα από τα σημεία **mode-sensor** σημεία. Οι θέσεις των σημείων αυτών φαίνονται στο σχήμα 12-19. Για τη μέτρηση των πιέσεων στον αγωγό-U, το mode-sensor είναι η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας που μετρήθηκε στην κεντρική γραμμή της ροής κοντά στο κύλινδρο, ενώ για τη μέτρηση της κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκε η διαφορά πίεσης στα mode-sensor σημεία που βρίσκονται πάνω στον κύλινδρο στις θέσεις με γωνίες  $\pm 90$  μοίρες ως προς την κατεύθυνση της ροής. Κάθε mode-sensor αναλύεται κατά Fourier σε συχνότητες που είναι **πολλαπλάσια** της συχνότητας ταλάντωσης και οι κύκλοι είναι ταξινομημένοι σύμφωνα με την **κύρια** συχνότητα και φάση. Η φάση είναι αρκετά **σημαντική** καθώς μπορεί δύο κύκλοι να έχουν την ίδια συχνότητα αλλά τα μοτίβα έκλυσης δινών να είναι αντιφασικά.

Ο τύπος της ανάλυσης από τον οποίο καθορίζονται τα modes ροής φαίνεται στο Σχήμα (12-20). Για αυτή την περίπτωση ΚC=17.5 και το mode-sensor είναι το σήμα της ταχύτητας. Η συνιστώσα  $F_m$  του mode-sensor σήματος στην κύρια συχνότητα,  $m$ , ορίζεται ως :

$$F_m = A_m \sin(2\pi t) + B_m \cos(2\pi t) \quad (2.8)$$

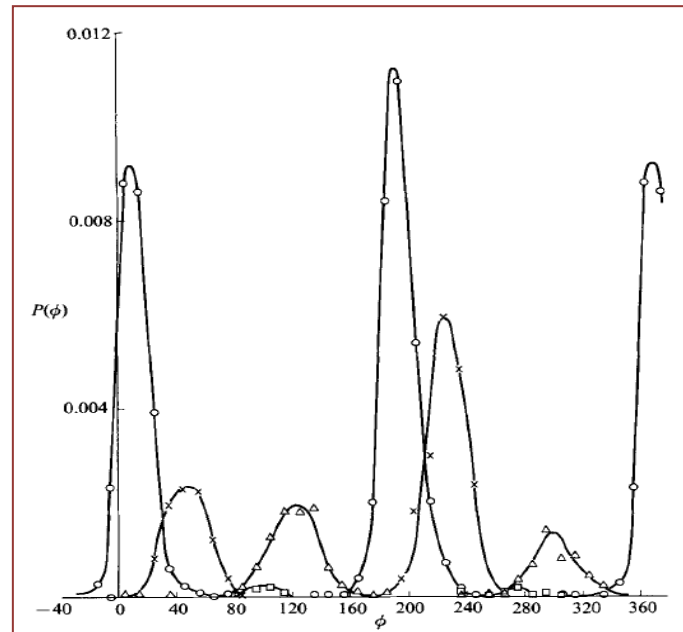
Και η γωνία φάσης  $\varphi$  δίνεται από :

$$\varphi = \tan^{-1}(A_m/B_m) \quad (2.9)$$

Για συγκεκριμένη συχνότητα, η αριθμητική συνάρτηση πυκνότητας,  $P(\varphi)$ , δίνεται ως:

$$\frac{\text{Αριθμός κύκλων για τον οποίο το } \varphi \text{ κυμαίνεται στο διάστημα } \varphi - \frac{1}{2}\Delta\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi + \frac{1}{2}\Delta\varphi_0}{(\text{Ολικός αριθμός των κύκλων}) \times \Delta\varphi_0}$$

όπου  $\Delta\varphi_0$  είναι η ζώνη εύρους που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση. Η  $P(\varphi)$  σαν συνάρτηση του  $\varphi$  σχεδιάζεται στο σχήμα 2-20 για τις κύριες συχνότητες  $N$ ,  $2N$ ,  $3N$ , και  $4N$ , όπου  $N$  η συχνότητα ταλάντωσης του νερού. Για την περίπτωση αυτή, το ποσοστό του αριθμού των κύκλων για το οποίο αυτές οι συχνότητες ήταν κύριες είναι 25%, 13%, 58% και 2%, αντίστοιχα. Ο ολικός αριθμός των κύκλων ήταν 2440 και το  $\Delta\varphi_0=10^\circ$ .



2-20 Αριθμητικές συναρτήσεις πυκνότητας, υπολογισμένες από τη εγκάρσια ταχύτητα κοντά σε ένα σημείο ανακοπής, για  $KC=17.5$ .  
Κύρια συχνότητα : x, N; Δ, 2N; ο, 3N; □, 4N.

Αν και χρήσιμα από τη χρήση της παραπάνω μεθόδου έχουν εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα, μερικές φορές δεν ήταν δυνατό να εντοπιστούν όλα τα modes. Για παράδειγμα, η οπτικοποίηση της ροής για  $KC=10$  για τον αγωγό-U δείχνει ότι ένα ζεύγος δινών αποκολλάται σε κάθε κύκλο και μπορεί να κινηθεί προς 4 κατευθύνσεις, με  $\theta = 45^\circ, 135^\circ, -45^\circ, -135^\circ$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της διαδρομής των δινών και της θετικής κατεύθυνσης της κύριας ροής. Η διαφορά πίεσης μεταξύ των θέσεων του κυλίνδρου με γωνίες  $\pm 90^\circ$  ως προς τη διεύθυνση της κίνησης έδειξαν ότι για  $KC=10$  η κύρια συχνότητα ήταν πάντα 2N. Σε αυτή τη συχνότητα, η  $P(\varphi)$  έχει δύο μέγιστα τα οποία χωρίζονται από μια γωνία φάσης 180. Οπότε θα έπρεπε να υπάρχουν μόνο 2 modes, σε αντίθεση με αυτά που παρατηρήθηκαν. Η ανάλυση σε άλλες αρμονικές της συχνότητας ταλάντωσης έδειξαν ότι οι γωνίες φάσης ήταν συγκεντρωμένες γύρω από δύο τιμές που απείχαν 180°. Βρέθηκε ότι τα τέσσερα modes θα μπορούσαν να αναλυθούν συνδυάζοντας τη πληροφορία της φάσης καταγραμμένη σε δύο συχνότητες, με τη μια να είναι σε άρτιο πολλαπλάσιο της συχνότητας της ταλάντωσης και την άλλη σε περιττό. Έτσι, αυτή η ιδέα ενσωματώθηκε στη μέθοδο mode-averaging.

### 2.3.3. Αποτελέσματα

#### 2.3.3.1. Οπτικοποίηση της ροής

Το διάστημα  $KC$  από 3 μέχρι 55 μπορεί να χωριστεί στα επόμενα υποδιαστήματα:  $KC \leq 4$ ,  $4 \leq KC \leq 8$ ,  $8 \leq KC \leq 15$ ,  $15 \leq KC \leq 22$ ,  $22 \leq KC \leq 30$  και  $KC \geq 30$ .

Τα πέντε πρώτα ονομάζονται: (i) **συμμετρικό**, (ii) **ασύμμετρο**, (iii) **εγκάρσιο**, (iv) **διαγώνιο μοτίβο** και (v) **τριών δινών**. Το τελευταίο διάστημα με  $KC \geq 30$  ονομάζεται **ημιμόνιμο**. Η κύρια διαφορά της παραπάνω κατηγοριοποίησης με αυτήν που είχε δοθεί πάλι από το Bearman (1981) αφορούσε το διαγώνιο διάστημα, όπου κατά τον Bearman συνόρευε με το ημιμόνιμο δηλαδή δεν υπήρχε το διάστημα τριών δινών. Επίσης, να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον Williamson μια αύξηση στο  $KC$  κατά 8 δίνει μια δίνη σε κάθε μισό κύκλο και ως εκ τούτου δίνει νέο μοτίβο.

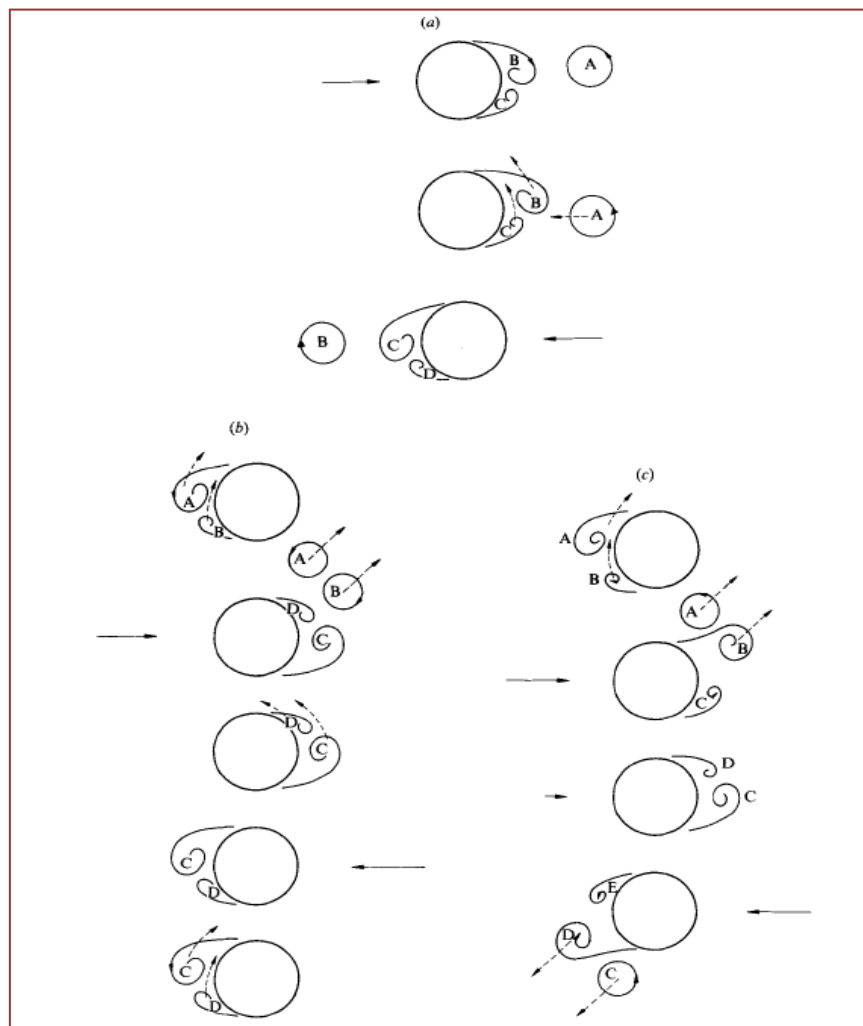
Η οπτικοποίηση της ροής για το σχήμα-U έγινε για  $KC= 7, 10$  και  $18$  για  $\beta= 416$ . Χρησιμοποιήθηκαν μικρά κομμάτια πολυστερίνης φωτισμένα από στενές δέσμες φωτός. Στο σχήμα 12-21(a) για  $KC= 7$  παρουσιάζεται το ασύμμετρο, στο οποίο η δίνη τείνει να εκλύεται στη μια μεριά του κυλίνδρου (πάνω πλευρά στις εικόνες). Μια αποκολλημένη δίνη που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο μισό κύκλο φαίνεται ότι είναι παρούσα και στον επόμενο μισό και αρχίζει να εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια της αντιστροφής της ροής (μεσοαία εικόνα στο Σχήμα 12-21(a)).

Τα μοτίβα δινών στο εγκάρσιο διάστημα για  $KC= 10$  δείχνονται στο σχήμα 12-21(b). Η δραστηριότητα των δινών είναι από τη μια πλευρά και δύο δίνες με αντίθετα πρόσημα αποκολλούνται, ζευγαρώνουν και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις από το μοντέλο.

Στο διαγώνιο διάστημα για  $KC= 18$  (Σχήμα 12-21(c)), ένα ζευγάρι δινών αποκολλάται σε κάθε μισό κύκλο και ένα ζευγάρι δινών σε ένα μισό κύκλο εκλύεται διαμετρικά αντίθετα με το ζευγάρι του προηγούμενου μισού κύκλου. Τόσο στο εγκάρσιο όσο και στο διαγώνιο διάστημα τα ζεύγη δινών απομακρύνονται σε κατεύθυνση ως προς την κύρια διεύθυνση της ροής, όταν τα παρατηρούμε με τον κύλινδρο σταθερό.

Λόγω της πιθανότητας εμφάνισης κατοπτρικών modes, υπάρχουν δύο κύρια modes στο εγκάρσιο και διαγώνιο διάστημα. Έχει παρατηρηθεί ότι το μοτίβο σχηματισμού δινών μπορεί να παραμένει σταθερό για ένα μεγάλο αριθμό κύκλων και στη συνέχεια να αλλάζει μορφή. Μετρήσεις όμως αποκάλυψαν ότι η αλλαγή αυτή δε συμβαίνει απότομα και κατά συνέπεια μια μεγάλη ποικιλία από δευτερογενής μοτίβα δινών μπορεί να δημιουργηθεί. Υπό αυτές τις συνθήκες, η αναγνώριση των modes εξαρτάται από την αυστηρότητα των κριτηρίων επιλογής. Έτσι, στα όρια των διαστημάτων μπορούν να αναγνωριστούν πάνω από 10 modes. Το κλάσμα,  $P$ , του συνολικού αριθμού των κύκλων που ανήκουν στο κύριο mode, συμπεριλαμβανομένων και των ειδώλων του βρέθηκε να κυμαίνεται από περίπου μονάδα για  $KC=10$  έως 0.35 για  $KC=50$ .

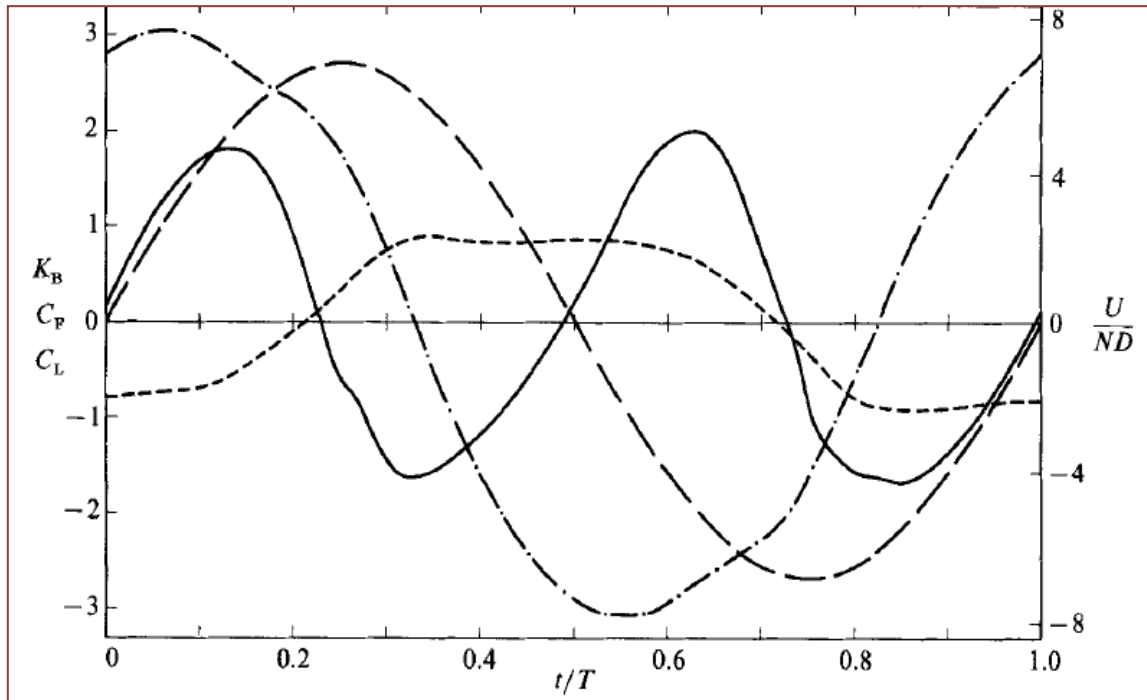
Τέλος, οι δίνες μπορούν να σχηματιστούν είτε σε φάση κατά μήκος του κυλίνδρου είτε σαν δύο ανεξάρτητα στοιχεία. Σε αυτή την περίπτωση στον αγωγό σχήματος-U το ένα ζεύγος κινείται προς την κορυφή του δοχείου και το άλλο προς το έδαφος.



2-21 Μοτίβα αποκολλημένων δινών (a) στο ασύμμετρο διάστημα για  $KC=7$ ; (b) στο εγκάρσιο διάστημα για  $KC=10$ ; (c) στο διαγώνιο διάστημα για  $KC=18$ ;

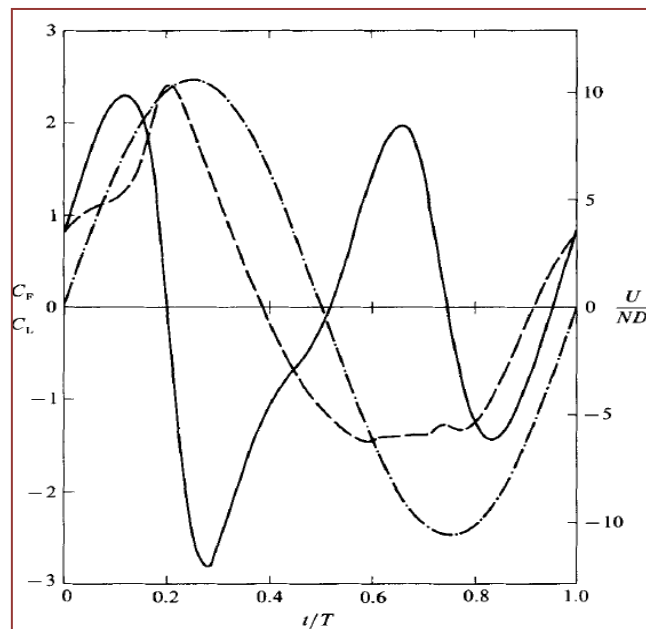
### 2.3.3.2. Τοπικές δυνάμεις και κυκλοφορία

Τα σχήματα 2-22÷2-30 δείχνουν τα στιγμιότυπα της μεθόδου mode-averaging. Οι τιμές των συντελεστών εγκάρσιας δύναμης και οπισθέλκουσας υπολογίζονται από τις κατανομές πίεσης και σχεδιάζονται ως προς το  $t/T$ , όπου  $T$  η περίοδος της ταλάντωσης. Οι συντελεστές έχουν διααιρεθεί με το  $0.5\rho U_0^2 D$ , όπου  $U_0$  το πλάτος της ταχύτητας ελεύθερης ροής. Η καμπύλη του  $U/ND$  ως προς το  $t/T$ , όπου  $N$  είναι η συχνότητα της κύριας ροής φαίνεται σε όλα τα σχήματα. Να τονιστεί ότι ένας μισός κύκλος αρχίζει και τελειώνει όταν  $U/ND=0$ . Τα σχήματα 2-22, 2-24 και 2-26 δείχνουν στιγμιότυπα της κυκλοφορίας  $\Gamma_B$  που μετρήθηκε επί της τετραγωνικής διαδρομής, που η διαδρομή που χρησιμοποιήθηκε περιβάλλει τη στροβιλότητα της ροής κοντά στον κύλινδρο αλλά πιθανότατα όχι και των δινών που έχουν αποκολληθεί, καθώς και να σημειωθεί ότι η θετική φορά της κυκλοφορίας  $\Gamma_B$  είναι η ανθρωπολογιακή και έχει αδιαστατοποιηθεί με το  $U_0 D$ , δηλαδή  $K_B = \Gamma_B / U_0 D$ .



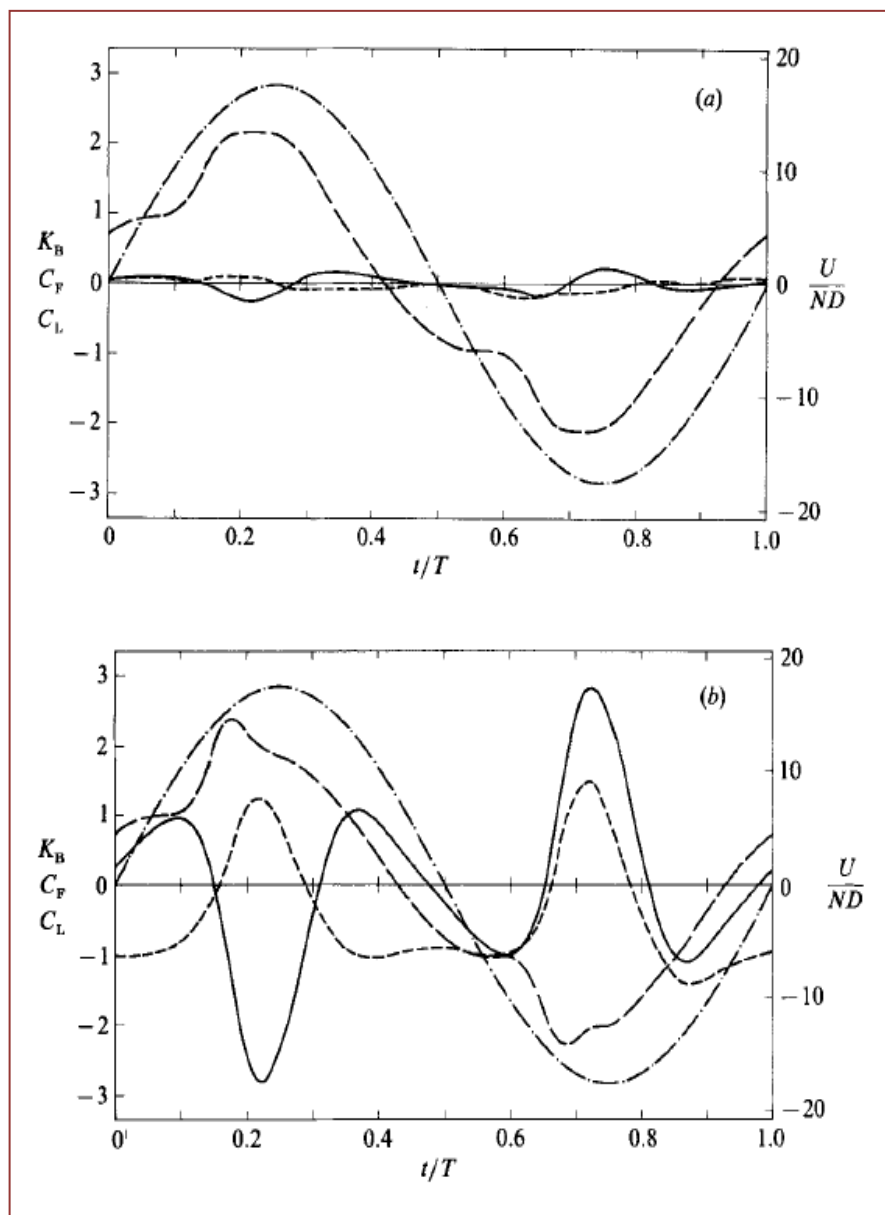
2-22 Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων και της κυκλοφορίας για  $KC=6.75$ ;  $-\cdot-$  συντελεστής οπισθέλκουσας ;  $-$ , συντελεστής εγκάρσιας δύναμης ;  $---$ , αδιάστατη κυκλοφορία;  $- -$ , σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.

Στα σχήματα που παρατίθενται φαίνονται οι καμπύλες των συντελεστών δυνάμεων, της αδιάστατης κυκλοφορίας και της σχετικής ταχύτητας για διάφορους αριθμούς  $KC$  και διαστήματα. Να σημειωθεί ότι στα σχήματα 2-27(a),(b) για  $KC=15.8$ , το οποίο είναι κοντά στο σύνορο που χωρίζει το εγκάρσιο από το διαγώνιο διάστημα, φαίνεται πως αλλάζει η μορφή της ροής σε άλλη.

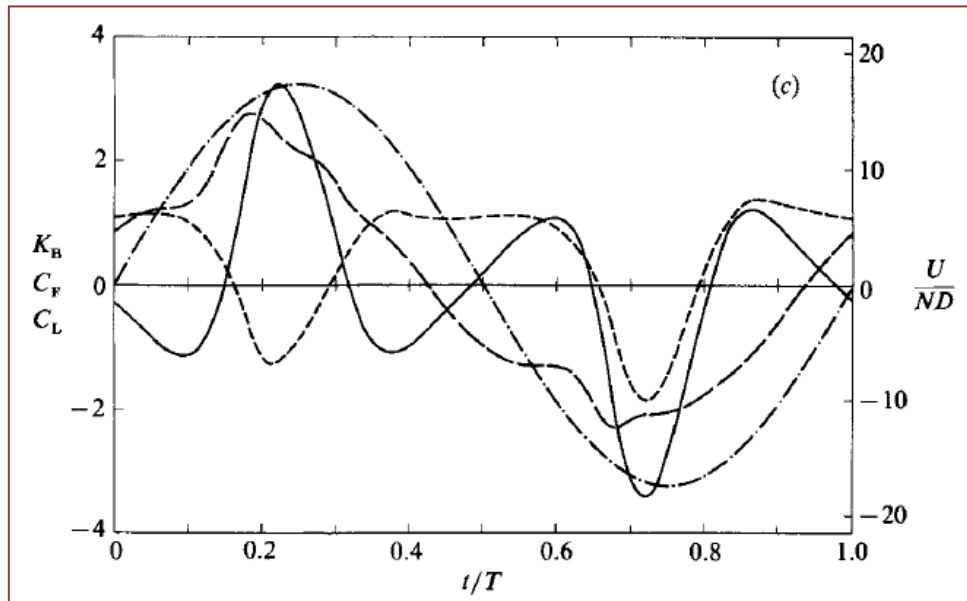


2-23 Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων και της κυκλοφορίας για  $KC=10.6$ ;  $---$  συντελεστής οπισθέλκουσας ;  $-$ , συντελεστής εγκάρσιας δύναμης ;  $- \cdot -$ , σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.

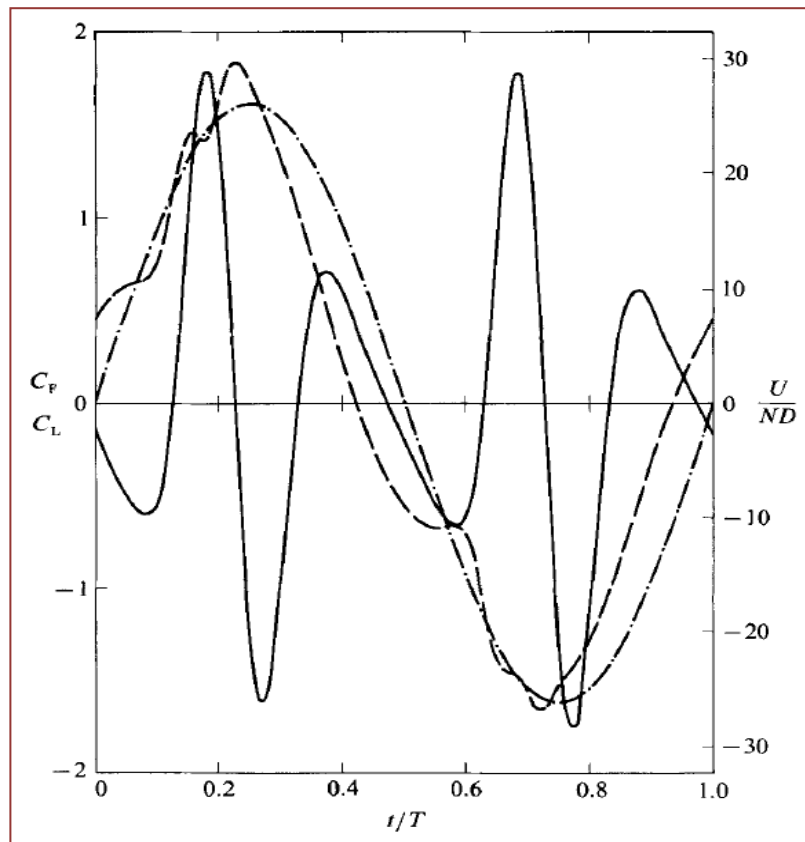
Η σύνδεση ανάμεσα στην κυκλοφορία και την κάθετη δύναμη παρουσιάζεται πιο ξεκάθαρα για  $KC=52.6$  (σχήμα 2-26) όπου η κυρίαρχη συχνότητα της εγκάρσιας (κάθετης δύναμης) είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή της ροής. Η εγκάρσια δύναμη και η κυκλοφορία φαίνεται ότι ταλαντώνονται σε φάση, εκτός της φάσης της αντιστροφής της ροής, όπου η δύναμη πέφτει στο μηδέν και αλλάζει πρόσημο· αλλά η κυκλοφορία παραμένει σχετικά υψηλή. Να σημειωθεί ότι το πλάτος του  $K_B$  είναι περίπου το μισό του  $C_L$  και ότι η άνωση και η κυκλοφορία τείνουν να είναι σε φάση στο μισό κύκλο, όπου το  $U/ND$  είναι αρνητικό. Στα σχήματα 2-22 και 2-24(b)(c) φαίνεται η κυκλοφορία κατά την αντιστροφή της ροής.



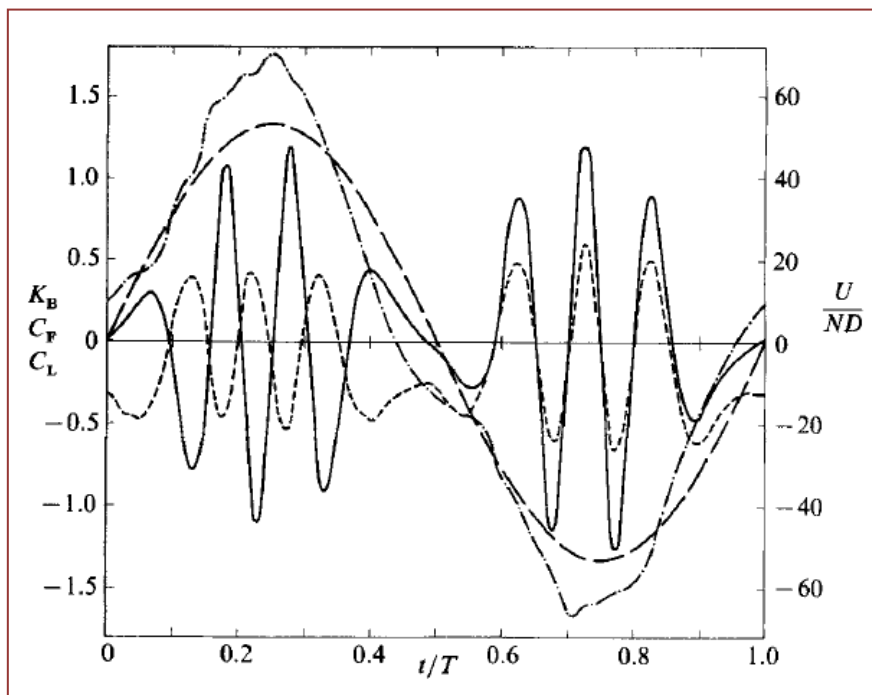
2-24 (a) Μέσοι κύκλοι δύναμης και κυκλοφορίας για  $KC=17.5$ . (b) Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων και της κυκλοφορίας για  $KC=17.5$ . ; — — συντελεστής οπισθέλκουσας ; —, συντελεστής εγκάρσιας δύναμης ; — — —, αδιάστατη κυκλοφορία ; — · —, σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.



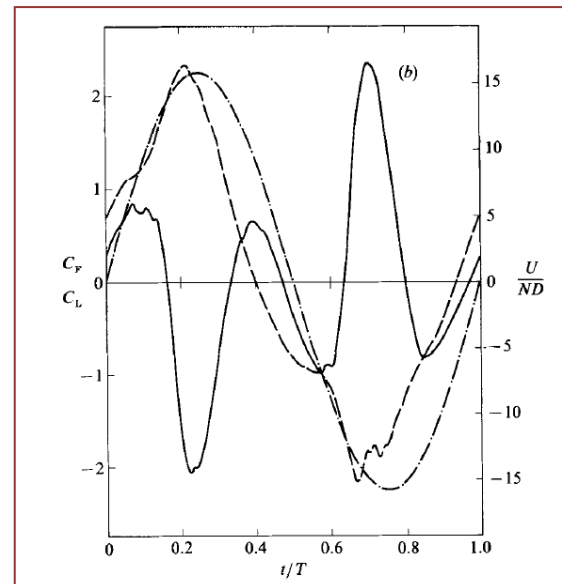
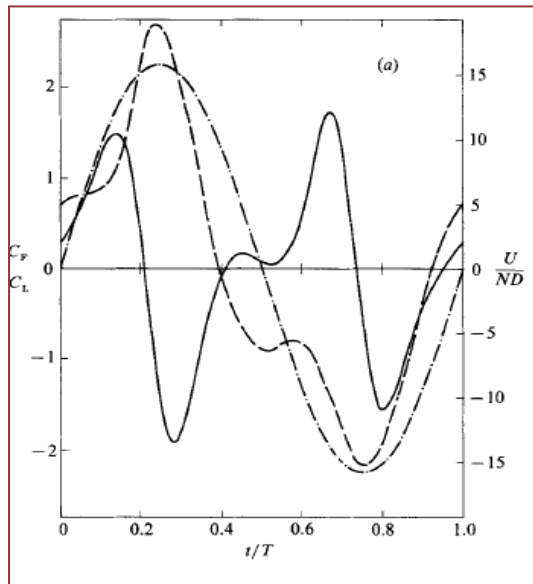
2-24 (c) Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων και της κυκλοφορίας για  $KC=17.5$ . (Η μορφή αυτή είναι το κατοπτρικό είδωλο του σχήματος (b) ;  $---$  συντελεστής οπισθέλκουσας ;  $-$ , συντελεστής εγκάρσιας δύναμης ;  $---$ , αδιάστατη κυκλοφορία ;  $- \cdot -$ , σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.



2-25 Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων για  $KC=26.2$ ;  $---$  συντελεστής οπισθέλκουσας ;  $-$ , συντελεστής εγκάρσιας δύναμης ;  $- \cdot -$ , σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.



2-26 Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων και της κυκλοφορίας για  $KC=52.6$ ; — — συντελεστής οπισθέλκουσας ; —, συντελεστής εγκάρσιας δύναμης; — · —, αδιάστατη κυκλοφορία ; · · ·, σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.



2-27 (a), (b) Mode-averaged κύκλοι των δυνάμεων και της κυκλοφορίας για  $KC=15.8$ ; — — συντελεστής οπισθέλκουσας ; —, συντελεστής εγκάρσιας δύναμης; — · —, σχετική ταχύτητα ελεύθερης ροής.

Με βάση τα σχήματα αυτά μπορεί κάποιος να συσχετίσει τις ασκούμενες δυνάμεις με το σχηματισμό δινών. Για παράδειγμα όταν η ροή αντιστρέφεται, όπως στο σχήμα 2-21(b), με την ασθενέστερη από τις δύο επιστρέφουσες να προσκολλάται στην πίσω πλευρά, ενώ το



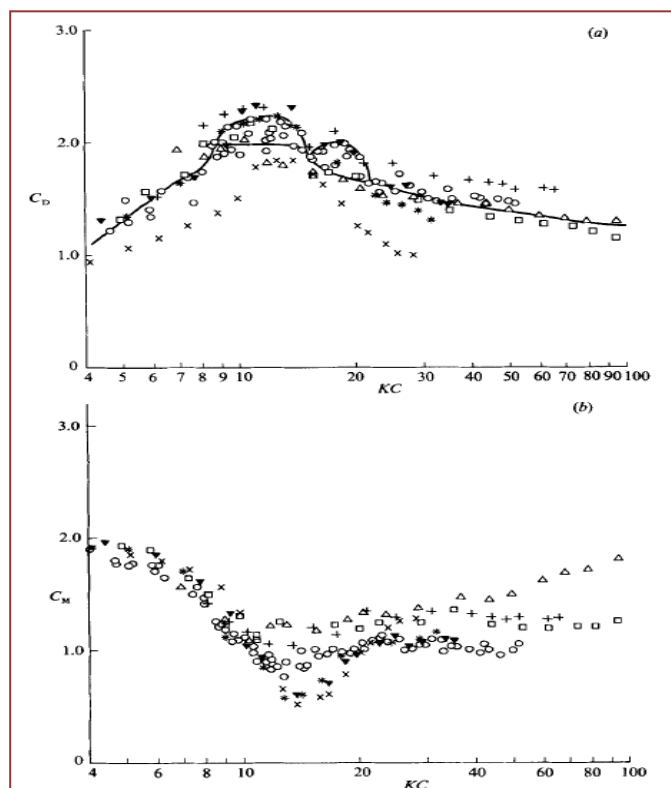
σχήμα 2-24(b) δείχνει ότι η άνωση που αυξομειώνεται αλλάζει πρόσημο πριν την αντιστροφή της ροής. Έτσι αυτή η μορφή της αντιστροφής λέγεται **κανονική**, ενώ η μορφή της αντιστροφής που η δυνατότερη δίνη αποκολλάται **διαγώνια** από την πίσω πλευρά του κυλίνδρου (σχ.2-21(b)), αναφέρεται ως **διαγώνια μορφή**. Στο σχήμα 2-23 φαίνεται ότι στη διαγώνια μορφή η αυξομειούμενη άνωση αλλάζει πρόσημο μετά την κύρια ροή.

Εξετάζοντας τα σχήματα, παρατηρούμε ότι το μοντέλο στο δοχείο-U πέρα από τις δυνάμεις άνωσης και οπισθέλκουσας δέχεται και μια πρόσθετη δύναμη στη διεύθυνση της ταλάντωσης, η οποία σχετίζεται με τη κλίση της πίεσης την οποία χρειάζεται για να ταλαντωθεί το νερό.

### 2.3.3.1. Μετρήσεις δυνάμεων

Τα πλήρη δεδομένα για την οπισθέλκουσα φαίνονται στο σχήμα 2-28(a,b), όπου οι τιμές των συντελεστών οπισθέλκουσας και αδράνειας υπολογίζονται από την εξίσωση του Morison και σχεδιάζονται συναρτήσει του KC. Ο μέσος κύκλος της οπισθέλκουσας σχηματίστηκε από το μέσο όρο 200 διαδοχικών κύκλων του σήματος της δύναμης και οι συντελεστές  $C_D$  και  $C_M$  υπολογίστηκαν από τους συντελεστές Fourier της συνιστώσας της δύναμης με την κύρια συχνότητα.

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται είναι για επτά τιμές του  $\beta$ , οι οποίες είναι : 109, 196, 301, 483, 964, 1204 και 1665.

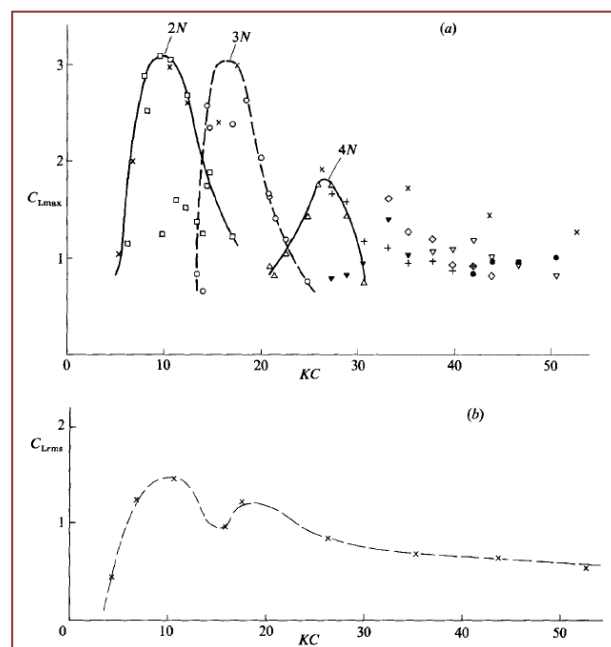


2-28 (a) Συντελεστής οπισθέλκουσας συναρτήσει του KC. (b) Συντελεστής αδράνειας συναρτήσει του KC.  $\Delta$ ,  $\beta=109$ ;  $\square$ ,  $\beta=196$ ;  $+$ ,  $\beta=301$ ;  $\circ$ ,  $\beta=483$ ;  $\blacktriangledown$ ,  $\beta=964$ ;  $*$ ,  $\beta=1204$ ;  $\times$ ,  $\beta=1665$ .

Στο σχήμα 2-28(a) φαίνεται ότι υπάρχει ένα εύρος τιμών του  $\beta$  μέσα στο οποίο το  $C_D$  δεν είναι τόσο ευαίσθητο στις αλλαγές του  $\beta$ . Για  $KC \leq 30$ , το πάνω όριο του εύρους βρίσκεται μεταξύ του  $\beta=964$  και 1204. Φαίνεται ότι στο δοχείο-U, το  $C_D$  μπορεί να πάρει δύο τιμές όταν το  $KC$  βρίσκεται στο εγκάρσιο και στο διαγώνιο διάστημα.

Οι κύκλοι της εγκάρσιας δύναμης μετρήθηκαν με τη βοήθεια κυπέλων φορτίων, ταξινομούνται σε modes που προκύπτουν από τη μέθοδο που περιγράφεται στη παράγραφο 2.3.2.2. Ο συντελεστής της εγκάρσιας δύναμης υπολογίστηκε διαιρώντας την κάθετη δύναμη με το  $0.5\rho U_0^2 DL$ , όπου  $L$  είναι το μήκος του κυλίνδρου, και υπολογίστηκε το μέγιστο μέγεθος του συντελεστή ( $C_{Lmax}$ ) για κάθε mode. Παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα, το κάθε mode και το αντίστοιχο κατοπτρικό της είδωλο θεωρήθηκαν ζευγάρι και η μεγαλύτερη από τις δύο τιμές του  $C_{Lmax}$  υπολογίστηκε για το ζευγάρι και σχεδιάστηκε συναρτήσε του  $KC$ , σχήμα 2-29(a). Γι' αυτό το σχήμα, για  $\beta=483$  τα σύμβολα επιλέχθηκαν για να υποδείξουν τη κύρια συχνότητα της εγκάρσιας δύναμης. Στο ίδιο σχήμα, επίσης, φαίνονται οι τιμές του  $C_{Lmax}$  που πάρθηκαν από την ολοκλήρωση των μετρήσεων της πίεσης όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 2-22÷2-27. Στη περίπτωση των δεδομένων πίεσης μόνο τα κυρίαρχα modes και τα κατοπτρικά τους είδωλα λήφθηκαν υπόψη. Το σχήμα 2-29(b) δείχνει τη ρίζα του μέσου τετραγώνου της τιμής των συντελεστών της εγκάρσιας δύναμης,  $C_{Lr.m.s.}$ , μόνο για την επικρατέστερη mode χρησιμοποιώντας την τεχνική ολοκλήρωσης της πίεσης.

Στο σχήμα 2-29(a), όπως αναμενόταν προέκυψαν διαφορετικά μέγιστα του  $C_L$  για τις τιμές του  $KC$  από 10 μέχρι 17. Όπως περιγράφηκε και από το Williamson (1985), το μέγιστο στο  $KC=10$  σχετίζεται με την **κύρια συχνότητα** 2N και για  $KC=17$  με τη 3N. Αντίστοιχα για  $KC=26$ , η θέση του τρίτου μεγίστου στο σχήμα 2-29(a) σχετίζεται με την κύρια συχνότητα της εγκάρσιας δύναμης, που είναι 4N για το 90% και 5N για το 4% των κύκλων που εξετάστηκαν.



2-29 (a) Mode-averaged  $C_L$  συναρτήσε του  $KC$ . Σύμβολα και κυρίαρχες συχνότητες για τα δεδομένα της ολικής δύναμης:  $\square$ , 2N;  $\circ$ , 3N;  $\Delta$ , 4N;  $\blacktriangledown$ , 5N;  $+$ , 6N;  $\nabla$ , 7N;  $\bullet$ , 9N. Δεδομένα τοπικής δύναμης για το κύριο mode:  $\times$ . (b) Τιμές του  $C_{Lr.m.s.}$  για το κύριο mode, υπολογιζόμενο από τις μετρήσεις της πίεσης συναρτήσε του  $KC$

Να σημειωθεί ότι ο **Ikeda & Yamamoto** (1981) ανέφεραν ότι τα μέγιστα  $C_{Lmax}$  εμφανίζονταν για τιμές του  $KC$ , όπου η έκλυση δινών είναι σταθερή και τακτική. Ανέφεραν, ακόμα, ότι η έκλυση δινών γίνεται ασταθής εκεί που αλλάζει το διάστημα δινών. Με βάση αυτό το κριτήριο και τα δεδομένα του σχήματος 2-29(a), φαίνεται ότι τα  $KC \approx 14, 22.8$  και  $30.5$  είναι πιθανά σημεία συνόρων μεταξύ των διαστημάτων. Επιπλέον, το όριο που διαχωρίζει τα διαστήματα μπορεί εξαχθεί από το γεγονός ότι ο  $C_D$  παίρνει δύο τιμές και στο εγκάρσιο και διαγώνιο διάστημα του σχήματος 2-28. Έτσι, το κριτήριο αυτό δίνει  $KC = 8.5, 15$  και  $22$ .

### 2.3.4. Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της αποκόλλησης δινών μέσα σε παλλόμενη ροή συνοψίστηκαν από τον Bearman (1985) όπως θα παρατεθούν παρακάτω. Η έκλυση δινών σε κάθε μισό κύκλο ξεκινάει από δίνες που δημιουργούνται σε προηγούμενους μισούς κύκλους και μένουν πίσω από το σώμα κατά τη διάρκεια της αντιστροφής. Οι δίνες απομακρύνονται μακριά από το κύλινδρο ζευγαρώνοντας με δίνες αντίθετους προσήμου. Κάθε φορά που το  $KC$  αυξάνεται κατά περίπου 8, μια πρόσθετη ολόκληρη δίνη αποκολλάται κατά τη διάρκεια ενός μισό κύκλο και το μοτίβο αποκόλλησης αλλάζει. Επιπλέον, λαμβάνει χώρα διαδοχική αποκόλληση δινών αντίθετου προσήμου για  $KC$  αρκετά **υψηλό** ώστε η ροή να είναι **μη συμμετρική**. Αυτό σημαίνει ότι εάν η τελευταία δίνη που αποκολλάται στον ένα μισό κύκλο είχε **ωρολογιακή κυκλοφορία** τότε η πρώτη δίνη που θα αποκολληθεί στον επόμενο μισό κύκλο θα έχει **ανθωρολογιακή κυκλοφορία**.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, για το εύρος αριθμών Reynolds που μελετήθηκε εδώ, ένα ημιμόνιμο μοντέλο, το οποίο προϋποθέτει ένα **σταθερό** αριθμό Strouhal,  $S=0.2$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της χρονοσειράς της εγκάρσιας δύναμης που ασκείται σε έναν κύλινδρο που βρίσκεται σε παλλόμενη ροή. Η σταθερότητα αριθμού Strouhal φαίνεται να επιβεβαιώνεται από τη διαπίστωση ότι μια αύξηση περίπου 8 στο  $KC$  δημιουργεί μια ολόκληρη δίνη σε κάθε μισό κύκλο. Αν υποθέσουμε πως η στιγμιαία συχνότητα αποκόλλησης δινών ίδιου προσήμου είναι  $S U/D$ , όπου  $U$  η στιγμιαία ταχύτητα.

Τότε χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$U = \frac{2\pi A}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.10)$$

όπου  $A$  και  $T$  είναι το πλάτος και η περίοδος της κύριας ροής αντίστοιχα, ο αριθμός,  $F$ , των δινών του ίδιου προσήμου που εκλύονται σε κάθε μισό κύκλο είναι:

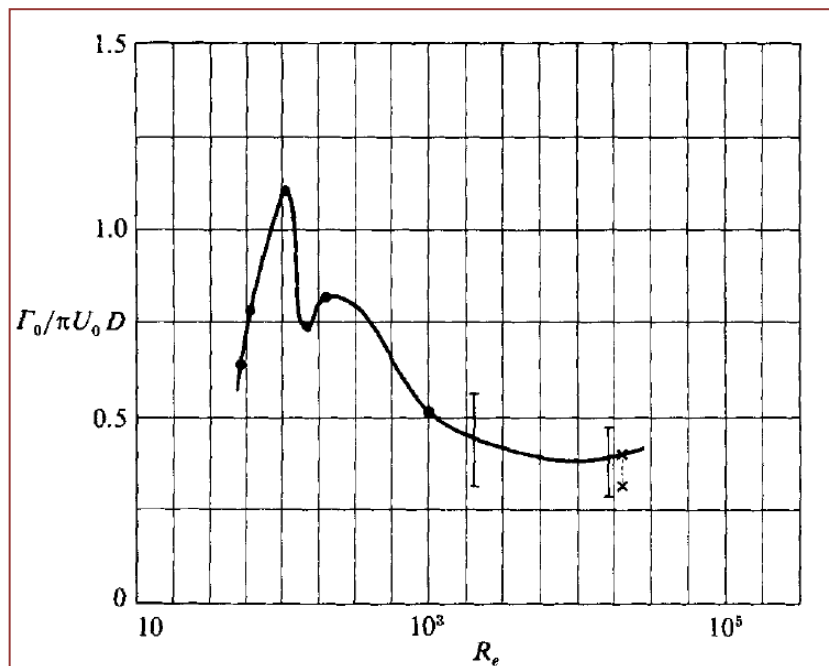
$$F = \int_0^{2\pi} \frac{2\pi}{T} \frac{A}{D} S \left| \sin \frac{2\pi t}{T} \right| dt = \frac{2 S K C}{\pi} \quad (2.11)$$

Ο αριθμός  $F$  ερμηνεύεται ως ο λόγος της μέσης συχνότητας της αποκόλλησης των δινών κατά τη διάρκεια ενός κύκλου προς τη συχνότητα της ταλάντωσης της κύριας ροής. Από τη

στιγμή που δίνες αντίθετου προσήμου αποκολλούνται διαδοχικά, βγάζουμε το συμπέρασμα πως δύο πρόσθετες δίνες (μια θετική και μια αρνητική) αποκολλούνται σε κάθε κύκλο κάθε φορά που η τιμή του  $KC$  αυξάνεται κατά  $\pi/2S$ . Χρησιμοποιώντας  $S=0.2$ , προβλέπεται ότι μια δίνη αποκολλάται σε κάθε μισό κύκλο όταν ο  $KC$  αυξάνεται περίπου 7.85 ή περίπου 8. Για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds ο αριθμός  $St$  ίσως να πρέπει ν' αλλάξει.

Ενδιαφέρον αποτέλεσμα της παρούσας έρευνας είναι ότι στο εγκάρσιο διάστημα δινών υπάρχει μια σταθερή εγκάρσια δύναμη που ασκείται στο κύλινδρο και έχει συντελεστή περίπου 0.5 για  $KC=14$ . Ο σχηματισμός των δινών που παρατηρήθηκε σε αυτό το διάστημα παρουσιάστηκε στο σχήμα 2-21(b). Μια κύρια δίνη σχηματίζεται σε κάθε μισό κύκλο και εμφανίζεται πάντα στην ίδια πλευρά του κυλίνδρου (εγκάρσια διαδρομή δινών Williamson (1985)) και δημιουργεί μια σταθερή δύναμη. Φαίνεται ότι στον αγωγό-U ζεύγη δινών κινούνται με γωνία  $45^\circ$  ως προς τη διεύθυνση αδιατάρακτης ροής και επηρεάζονται από την κύρια ροή και την επαγόμενη ταχύτητα.

Πέρα από τα παραπάνω, θεωρήθηκε ότι η μέση χρονικά τιμή της κυκλοφορίας είναι μηδέν και ότι η **αποκόλληση δινών δύναμης**  $\Gamma_0$  οδηγεί σε μια κυκλοφορία γύρω από τον κύλινδρο, η οποία ταλαντώνεται μεταξύ  $\pm \frac{1}{2} \Gamma_0$ . Έτσι λοιπόν, η αδιάστατη δύναμη της δίνης,  $\Gamma_0/\pi U_0 D$ , βρέθηκε να κυμαίνεται από  $0.51 \pm 0.55$ ,  $0.70 \pm 1.03$  και  $0.27 \pm 0.40$  για  $KC=6.75$ ,  $17.5$  και  $52.6$  αντίστοιχα. Το  $KC=52.6$  είναι μέσα στο ημιμόνιμο διάστημα και έτσι έγινε η σύγκριση της δύναμης για αυτό το  $KC$  με τις τιμές της σταθερής ροής. Το σχήμα 2-30 δείχνει ότι για  $KC=52.6$  είναι συγκρίσιμος με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων για σταθερή ροή που πάρθηκαν από τον Gerrard(1978). Για τη παλλόμενη ροή φαίνεται να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα καθώς έχει αδιαστατοποιηθεί με τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας της ελεύθερης ροής.



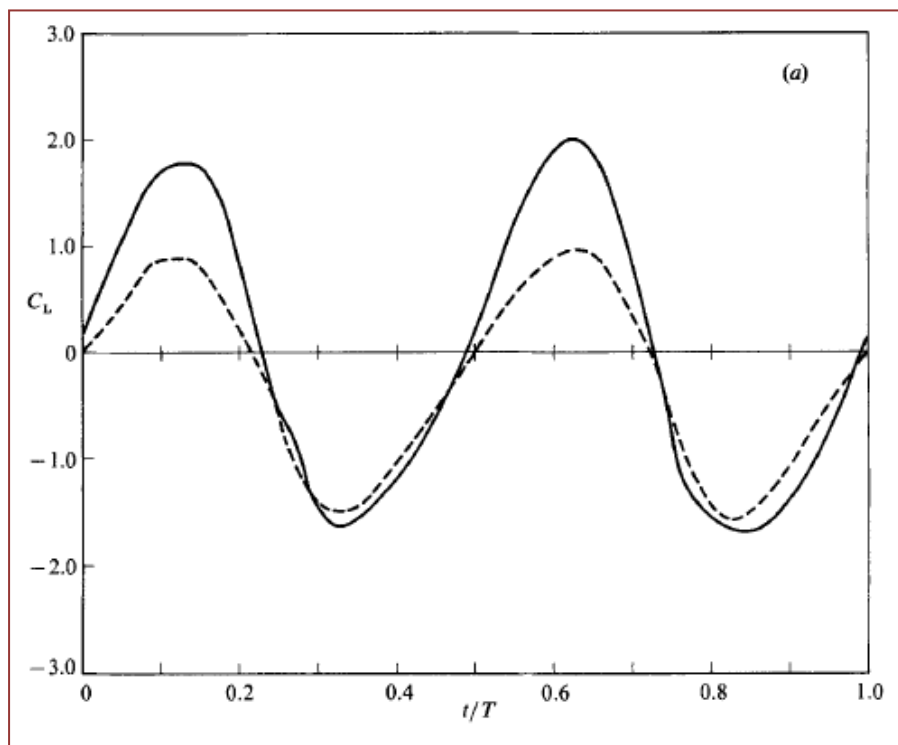
2-30 Δύναμη της δίνης συναρτήσει του αριθμού Reynolds :●, I, σταθερή ροή (Gerrard 1978); \*, παλλόμενη ροή,  $KC=52.6$ .

Για τη σύγκριση των δυνάμεων των δινών που υπολογίστηκαν για τις διάφορες τιμές του  $KC$ , έγινε αδιαστατοποίηση με τη μέγιστη ταχύτητα της κύριας ροής για  $KC=6.75$ . Το αποτέλεσμα ήταν ότι η δύναμη κυμαινόταν από  $0.51 \div 0.55$  για  $KC=6.75$ , ενώ ήταν από  $1.81 \div 2.67$  και από  $2.10 \div 3.12$  για  $KC=17.5$  και  $52.6$ , αντίστοιχα. Έτσι φάνηκε ότι η **δύναμη των δινών** για  $KC=6.75$  είναι **χαμηλή** γιατί στο μη συμμετρικό διάστημα η κυκλοφορία δεν μπορεί να πάρει τη μέγιστη τιμή της πριν την αντιστροφή της ροής.

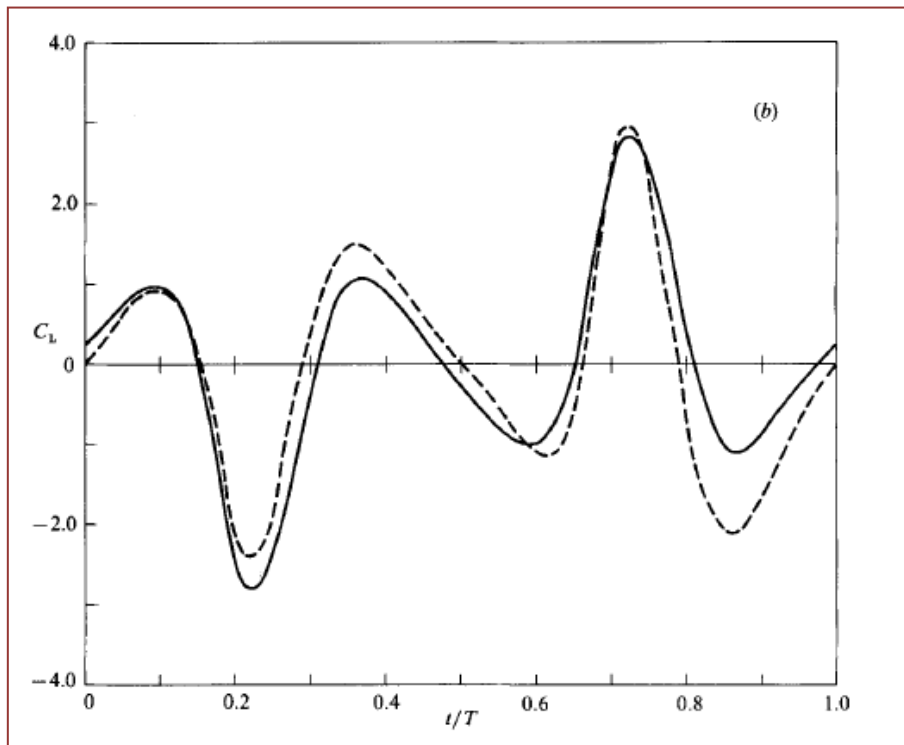
Βρέθηκε ότι η άνωση και η κυκλοφορία γύρω από το κύλινδρο τείνουν να κυμαίνονται αυξομειώνονται σε φάση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να είναι πιθανό η άνωση να εξάγεται από τη κυκλοφορία και αντιστρόφως. Για να δοκιμαστεί αυτή η πιθανότητα, η μετρούμενη τοπική άνωση συγκρίθηκε με τη τοπική δύναμη άνωσης ανά μονάδα μήκους,  $F_L$  (σχήμα 2-31).

$$F_L = -\rho U \Gamma_B \quad (2.11)$$

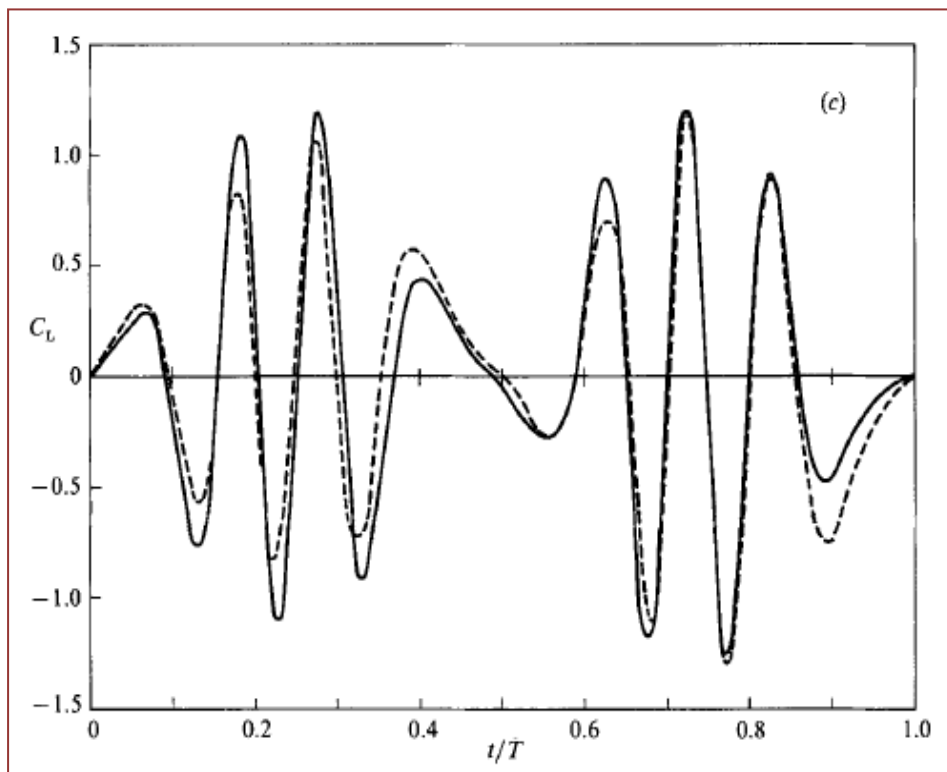
όπου  $F_L$ ,  $U$  και  $\Gamma_B$  είναι οι στιγμιαίες τιμές της άνωσης, της σχετικής ταχύτητας της κύριας ροής και της κυκλοφορίας αντίστοιχα. Με βάση τη (2.10) και τη (2.11) ο συντελεστής άνωσης είναι  $2(\Gamma_B/U_0 D) \sin(2\pi t/T)$  όταν η δύναμη της άνωσης ανά μονάδα μήκους έχει αδιαστατοποιηθεί με το  $0.5\rho U_0^2 D$ . Αυτό και ο πειραματικός συντελεστής απεικονίζονται στο σχήμα 2-31 συναρτήσει του  $t/T$  για  $KC=6.75$ ,  $17.5$  και  $52.6$ . Για  $KC=52.6$ , υπάρχει ένας μισός κύκλος που η προβλεπόμενη άνωση (2.11) βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις. Αντίθετα, η προβλεπόμενη άνωση για  $KC=6.75$  και  $17.5$  δεν είναι τόσο καλή, αν και τα κύρια χαρακτηριστικά των καμπύλων της υπολογισμένης άνωσης (θέσεις μεγίστων και κοίλα) είναι ακόμα σε καλή συμφωνία.



2-31(a) Σύγκριση της μετρούμενης εγκάρσιας δύναμης με τη πρόβλεψη του γενικευμένου θεωρήματος κυκλοφορίας-άνωσης; —, πειραματικός συντελεστής εγκάρσιας δύναμης; — —, πρόβλεψη γενικευμένου θεωρήματος κυκλοφορίας-άνωσης,  $KC=6.75$ .



2-31(b) Σύγκριση της μετρούμενης εγκάρσιας δύναμης με τη πρόβλεψη του γενικευμένου θεωρήματος κυκλοφορίας-άνωσης; —, υπολογισμένος συντελεστής εγκάρσιας δύναμης; - · -, πρόβλεψη γενικευμένου θεωρήματος κυκλοφορίας-άνωσης.  $KC=17.5$ .



2-31(c) Σύγκριση της μετρούμενης εγκάρσιας δύναμης με τη πρόβλεψη του γενικευμένου θεωρήματος κυκλοφορίας-άνωσης; —, υπολογισμένος συντελεστής εγκάρσιας δύναμης; - · -, πρόβλεψη γενικευμένου θεωρήματος κυκλοφορίας-άνωσης.  $KC=52.6$ .

### 2.3.5. Συμπεράσματα

Ερευνήθηκε η ανάπτυξη της ροής γύρω από τον κύλινδρο για Keulegan-Carpenter από 4 έως 55. Όπως προαναφέρθηκε το διάστημα αυτό χωρίστηκε σε πέντε υποδιαστήματα :  $4 \leq KC \leq 8$ ,  $8 \leq KC \leq 15$ ,  $15 \leq KC \leq 22$ ,  $22 \leq KC \leq 30$  και  $KC \geq 30$ . Τα υποδιαστήματα αυτά ονομάστηκαν μη συμμετρικό, εγκάρσιο, διαγώνιο, τριών δινών και ημιμόνιμο, αντίστοιχα. Στο εγκάρσιο διάστημα, ο κύλινδρος δέχεται μια σταθερή τοπική δύναμη άνωσης, της οποίας ο συντελεστής έχει αδιαστατοποιηθεί με το  $0.5\rho U_0^2 D$  και υπολογίζεται να είναι 0.5 για  $KC=14$ . Σε αυτό το διάστημα, ένα ζεύγος δινών αποκολλάται μόνο σε ένα μισό κύκλο της ροής και η σταθερή άνοση σχετίζεται με την τάση των αποκολλημένων δινών να σχηματίσουν μια διαδρομή στη μια πλευρά του κυλίνδρου.

Οι κύκλοι της ροής ταξινομήθηκαν ανάλογα με τα μοτίβα σχηματισμού των δινών και παρουσιάστηκαν οι καμπύλες της οπισθέλκουσας και της άνωσης συναρτήσει του χρόνου για ένα τυπικό μοτίβο. Επίσης, απεικονίστηκαν οι καμπύλες της χρονικής εξέλιξης της κυκλοφορίας πάνω στη διαδρομή που περικλείει το κύλινδρο για το ασύμμετρο, το διαγώνιο και το ημιμόνιμο διάστημα. Το μέγεθος της κυκλοφορίας βρέθηκε να είναι λίγο-πολύ σταθερό κατά τη διάρκεια της αντιστροφής της ροής.

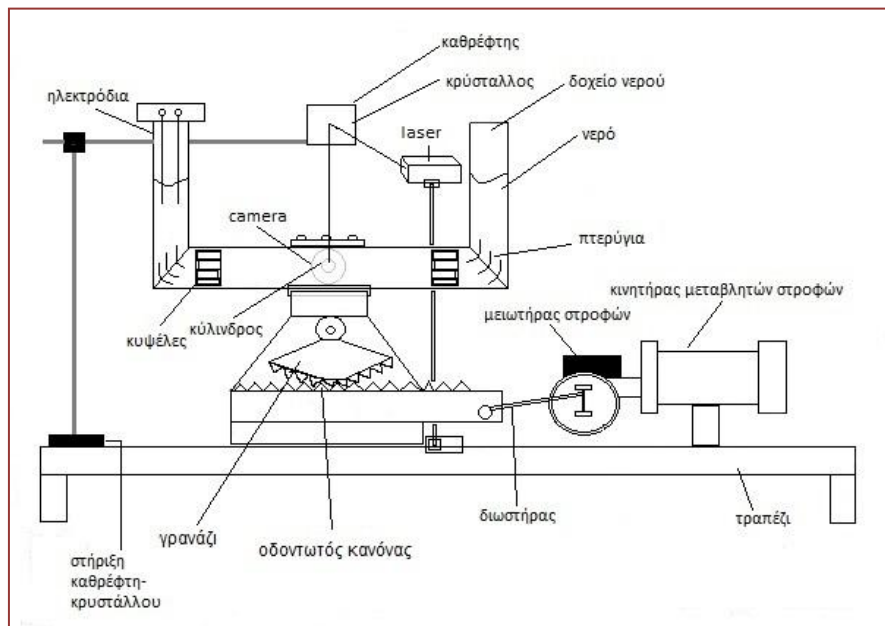
Υπολογίστηκε η αδιάστατη δύναμη της δίνης,  $\Gamma_0/\rho U_0 D$ , και με βάση τις τιμές αυτές διαπιστώθηκε ότι σε όλα τα διαστήματα οι πλήρως διαμορφωμένες δίνες έχουν περίπου την ίδια κυκλοφορία. Τέλος, η σχέση (2.11) αποτελεί μια καλή προσέγγιση της στιγμιαίας άνωσης.





### 3. Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

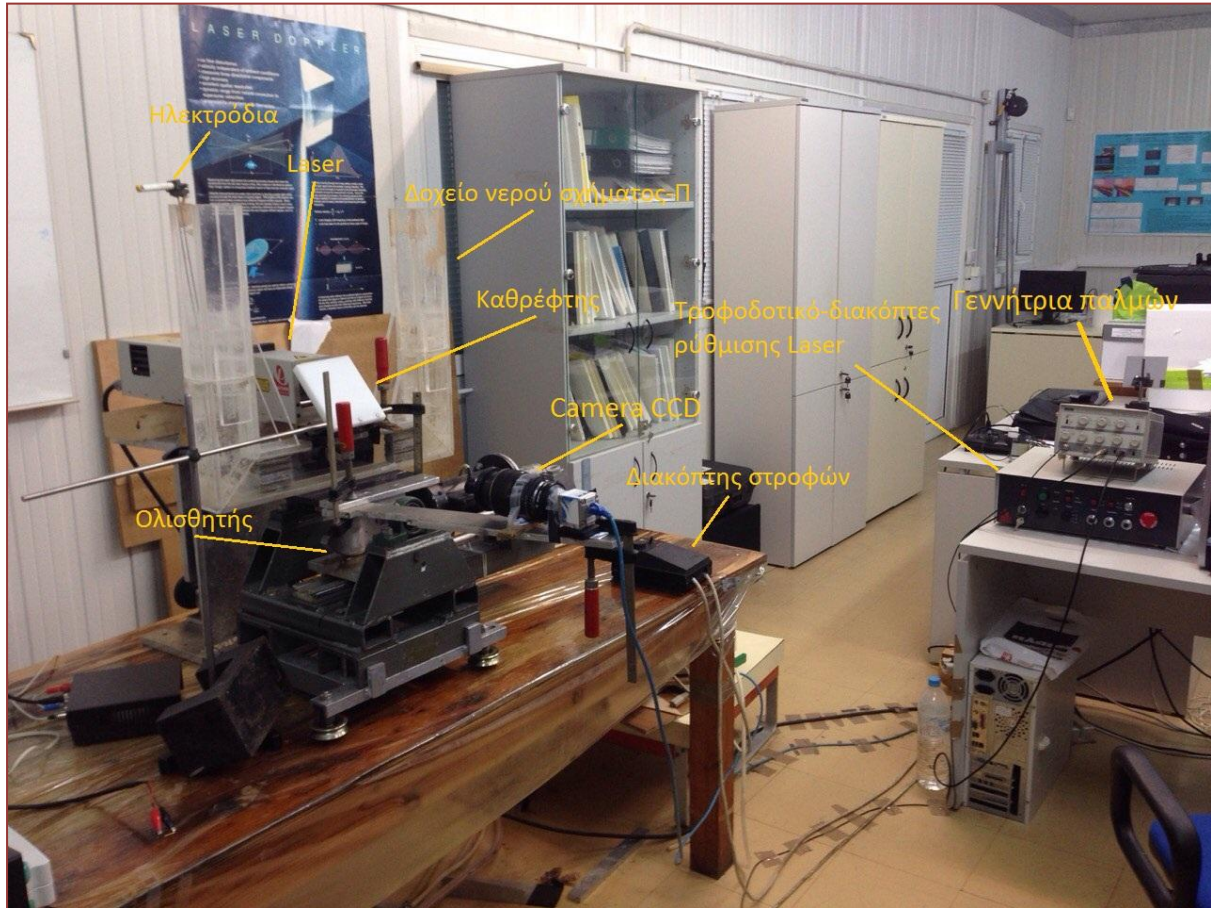
Το πείραμα που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Ρευστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και η διάταξη αποτελείται από ένα δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π που απεικονίζεται στο σκαρίφημα του σχήματος 3-1 .



3-1 Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης.



3-2 Πειραματική διάταξη.



3-3 Πειραματικός Εξοπλισμός

### 3.1. Πειραματική διάταξη

#### 3.1.1. Δοχείο νερού σχήματος ανεστραμμένου Π από Plexiglas

Τα δύο σκέλη του δοχείου έχουν εξωτερικό ύψος 43,5 cm , εσωτερικό ύψος 37,5 cm, πάχος 1 cm και η διατομή τους είναι 6x4 cm<sup>2</sup> . Η βάση του δοχείου έχει εξωτερικό μήκος 47 cm, εσωτερικό μήκος 35 cm και εσωτερικά στο μέσο της βάσης είναι τοποθετημένος κύλινδρος από Plexiglas διαμέτρου 1 cm και μήκους 4 cm .

Στη σύνδεση του κάθε σκέλους με τη βάση υπάρχουν εσωτερικά περύνια και κυφές από αλουμίνιο, διαστάσεων  $6 \times 3 \text{ cm}^2$  και πάχους  $4 \text{ cm}$ , που βοηθούν στην εξομαλοποίηση της ροής.

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 αναστραμμένου Π είναι τοποθετημένο στον ολισθητή, ο οποίος κινείται πάνω σε σιδηροτροχιά, που θέτεται σε κίνηση από τον ηλεκτροκινητήρα μεταβλητών στροφών.



3-4 Μπροστινή και πλάγια όψη του δοχείου νερού, σχήματος αναστραμμένου-Π.

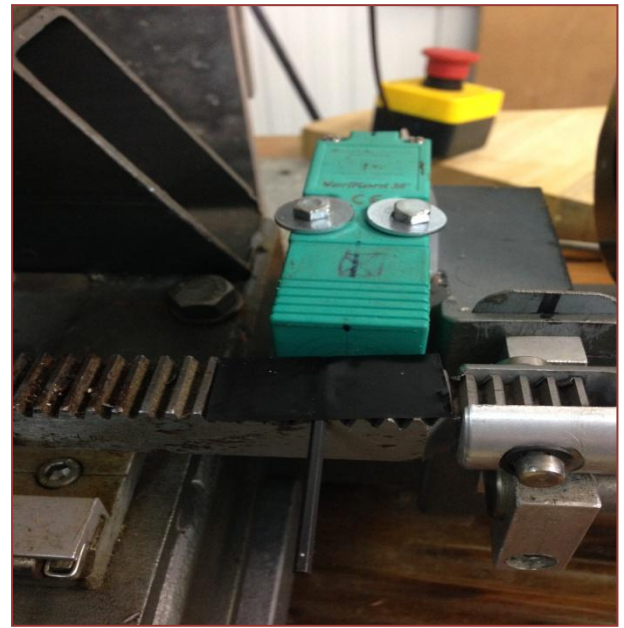
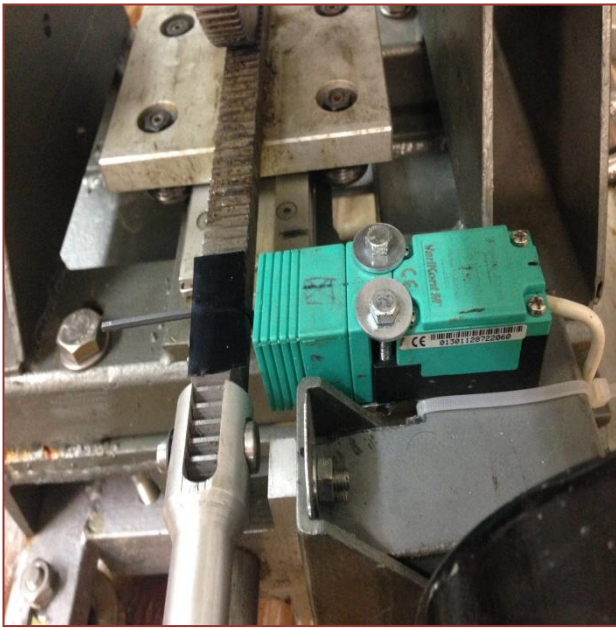
## 3.2. Όργανα μετρήσεων

### 3.2.1. Επαγωγικός Αναλογικός Αισθητήρας θέσης (IA8-M1K-I3)

Ο αναλογικός αισθητήρας θέσης Varikont της εταιρίας Pepperl+Fuchs, με έξοδο ρεύμα  $0 \div 20 \text{ mA}$ , μετατρέπει την απόσταση του από ένα μεταλλικό αντικείμενο 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 εύρεση της συχνότητας του ολισθητή.



3-5 Αισθητήρας μη-επαφής Varikont της Pepperl+Fuchs.

### 3.2.2. 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, ο οποίος ήταν ρυθμισμένος στα 24V .



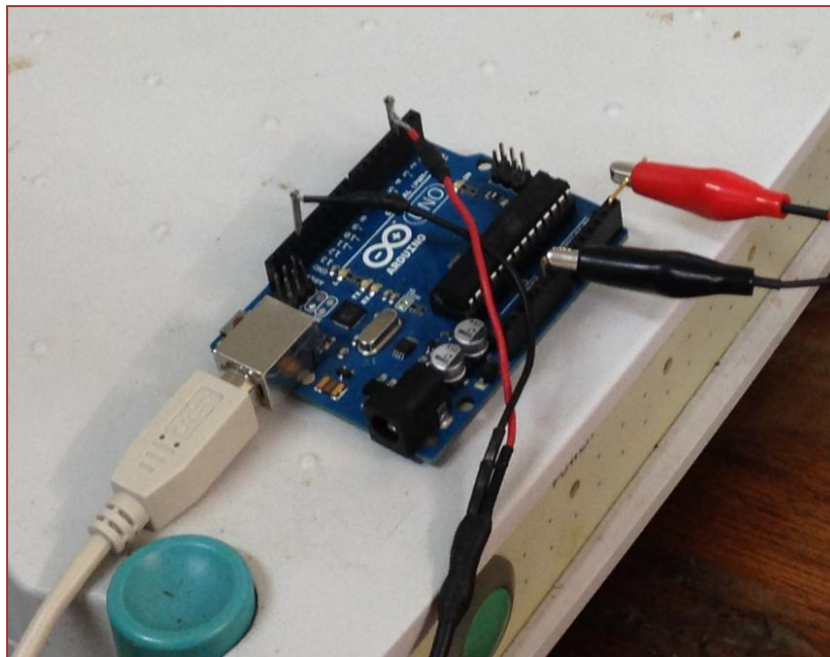
3-6 Τροφοδοτικό Statron, μπροστινή και πλάγια όψη.

### 3.3. Μέθοδος triggering μέσω Arduino

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

Το Arduino χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και για να συνδέεται με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων. (5)

Στη παρούσα πειραματική διάταξη το Arduino έχει προγραμματιστεί να διαβάζει την τάση από τον αισθητήρα θέσης Varikont και ανάλογα με την τάση αυτή (άρα και τη θέση του ολισθητή) να στέλνει σήμα triggering στη γεννήτρια παλμών ώστε να πάρει ζεύγος φωτογραφιών.



3-7 Μικροεπεξεργαστής Arduino

### 3.4. 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 10 $\mu$ m και λειτουργούν ως σκεδαστές φωτός. Η πυκνότητά τους είναι προσεγγιστικά ίση με του εργαζόμενου μέσου, με αποτέλεσμα να αιωρούνται και να μην καθιζάνουν.



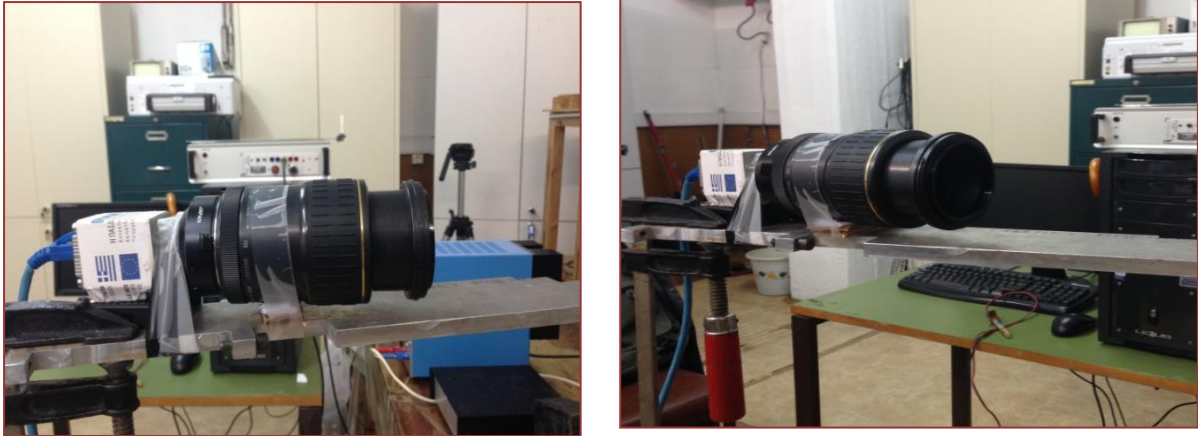
3-8 Σωματίδια οπτικοποίησης.

Το φύλλο φωτός παράγεται από πηγή παλλόμενου laser, μήκους κύματος 808nm και βρίσκεται εκτός του ορατού φάσματος του φωτός. Το διάστημα μεταξύ δύο αναλαμπών του laser επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα 200ms.

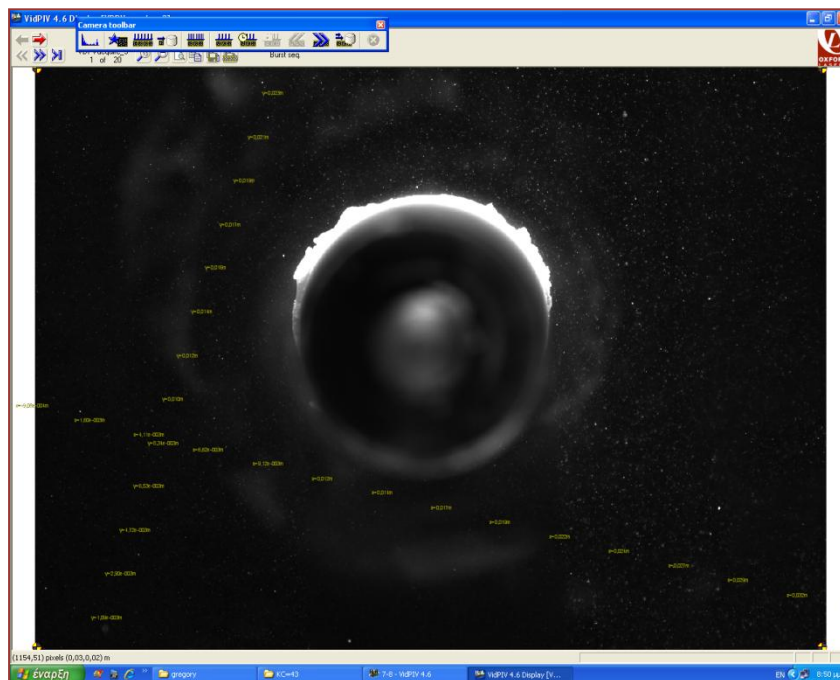


3-9 Μπροστινή και πλάγια όψη laser της Oxford Lasers, μήκους κύματος 808 nm .

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 (Tamron) για μεγέθυνση. Τα 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.



3-10 Camera CCD της PCO .



3-11 Φωτογραφία του πεδίου ροής γύρω από το κύλινδρο όπως επεξεργάστηκε από το λογισμικό του VidPIV v4.6

### 3.5. Μετατροπέας σήματος SPIDER 8

Η μονάδα **SPIDER 8** της εταιρίας **HBM** χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Πρόκειται για μια ηλεκτρονική μονάδα πολλαπλών καναλιών που χρησιμοποιείται για την παράλληλη δυναμική απόκτηση δεδομένων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και είναι ιδανική για συστήματα με πολλά στοιχεία (μεταβλητές).

Χρησιμοποιείται για μετρήσεις ρεύματος, τάσεων, θερμοκρασιών, μετατόπισης, πίεσης κ.α. χρησιμοποιώντας επιμηκονσιόμετρα και επαγωγικούς μετατροπείς.

Κάθε κανάλι της κάρτας SPIDER 8 παρέχει διέγερση για παθητικούς μετατροπείς, ενισχυτή, φίλτρα και το δικό του αναλογικό-ψηφιακό (A/D) μετατροπέα. Κάθε A/D μετατροπέας λειτουργεί συγχρονισμένα, έχει μέγιστη συχνότητα ψηφιοποίησης 9600 μετρήσεις/sec και ρυθμό δειγματοληψίας 16 bit .



3-12 Μετατροπέας σήματος SPIDER 8

Στις εισόδους του μετατροπέα συνδέθηκαν ο **αισθητήρας θέσης Varikont** και τα **ηλεκτρόδια**, που αντιστοιχούν στα κανάλια **ch5** και **ch4** αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στη παρακάτω φωτογραφία 3-13.



3-13 Εισόδοι μετατροπέα σήματος SPIDER 8



Ο συγκεκριμένος μετατροπέας σε συνδυασμό με το πρόγραμμα **Catman version 5.0 release2** χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση και καταγραφή του σήματος, με σκοπό τη συσχέτιση της στάθμης του νερού με τη κίνηση του δοχείου και την εύρεση τυχόν διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο σημάτων, η οποία μπορεί να οφείλεται στην αδράνεια και τις συνεκτικές ιδιότητες του νερού .



## 4. Παρουσίαση και σχολιασμός πειραματικών αποτελεσμάτων

Στο τρέχων κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία του πειράματος και σχολιάζεται ο τρόπος με τον οποίον πάρθηκαν και επεξεργάστηκαν τα δεδομένα, με βάση τα οποία καταλήξαμε στα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στη παρούσα πειραματική μελέτη πραγματοποιείται η διερεύνηση και η οπτικοποίηση παλλόμενης ροής γύρω από **ακίνητο** κύλινδρο διαμέτρου  $D = 1 \text{ cm}$ .

Η δημιουργία παλλόμενης ροής επιτυγχάνεται με τη ταλάντωση του δοχείου νερού σχήματος ανεστραμμένου Π, το οποίο είναι τοποθετημένο επάνω σε έναν ολισθητή που τίθεται σε κίνηση από έναν ηλεκτροκινητήρα (εικόνες 3-1÷ 3-3).

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε για 5 διαφορετικές συχνότητες με σκοπό να προσεγγίζει τιμές από όλα τα υποδιαστήματα που αναφέρθηκαν από το Williamson (υποκεφάλαιο 2.1, "Sinusoidal flow relative to circular cylinders", C.H.K. Williamson, 1985, J. Fluid Mechanics, vol. 155, pp. 141-174)

Στη συνέχεια γίνεται η παρουσίαση των πειραματικών εικόνων που προέκυψαν από κώδικα που δημιουργήθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα σε υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB(R2011a) και η επεξήγηση κάποιων χαρακτηριστικών που παρατηρήθηκαν από τις εικόνες-αποτελέσματα.

### 4.1. Υπολογισμός αριθμού Keulegan-Carpenter (KC) και Stokes (όπου σύμφωνα με την ονοματολογία του Sarpkaya(1986) δόθηκε το σύμβολο $\beta$ ).

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).

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

$$\bar{A} = \frac{1}{10} \left( \frac{A_{\max 1} - A_{\min 1}}{2} + \frac{A_{\max 2} - A_{\min 2}}{2} + \dots + \frac{A_{\max 10} - A_{\min 10}}{2} \right) = \frac{\sum_{10} \frac{A_{\max n} - A_{\min n}}{2}}{10} \quad (4.1)$$

και

$$KC = \frac{U * T}{D} = \frac{\omega * \bar{A} * \frac{1}{f}}{D} = \frac{2 * \pi * \bar{A}}{D} \quad (4.2)$$

όπου:

- $U$  είναι το πλάτος της ταχύτητας της ροής
- $T$  είναι η περίοδος της ταλάντωσης, και
- $D$  είναι η διάμετρος του κυλίνδρου

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $\beta$  είναι αναγκαία η εύρεση της περιόδου ταλάντωσης είτε του νερού είτε του δοχείου.

$$\beta = \frac{Re}{KC} = \frac{D^2}{T * v} \quad (4.3)$$

όπου:

- $Re$  είναι ο αριθμός Reynolds
- $KC$  είναι ο αριθμός Keulegan-Carpenter
- $T$  είναι η περίοδος της ταλάντωσης, και
- $v$  είναι κινηματική συνεκτικότητα του νερού ( $v=0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ )

Επομένως, η περίοδος υπολογίστηκε από κατάλληλο κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού C++ που δεχόταν τις εξόδους του αισθητήρα θέσης Varikont του δοχείου(Παράρτημα Β').

Να αναφερθεί ότι η περίοδος του νερού είναι ίδια με αυτή του δοχείου, όμως διαφέρουν κατά φάση  $\Delta\phi$ . Αυτή η διαφορά φάσης οφείλεται όπως έχει ήδη αναφερθεί στην αδράνεια και στις συνεκτικές ιδιότητες του νερού.

Η  $\Delta\phi$  υπολογίζεται για κάθε δοκιμή από κώδικα MATLAB που δέχεται σαν εισόδους του τις κυματομορφές του αισθητήρα θέσης και των ηλεκτροδίων ( Παράρτημα Α').

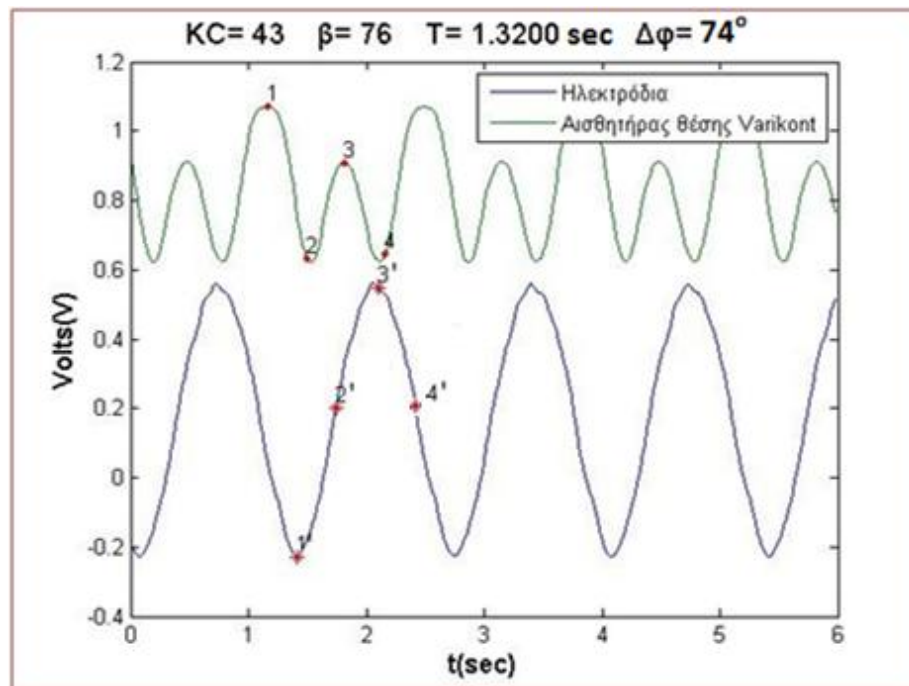
Να τονιστεί ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γνωρίζουμε τη  $\Delta\phi$  διότι μόνο έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή θέση-στάθμη του νερού ως προς το δεξιό σκέλος του δοχείου που έχουμε ορίσει ως σημείο αναφοράς. Ο προσδιορισμός της  $\Delta\phi$  παρουσιάζεται παρακάτω.

#### 4.2. Προσδιορισμός διαφοράς φάσης $\Delta\phi$

Ο προσδιορισμός της  $\Delta\phi$  είναι αναγκαίος διότι παρατηρήθηκε ότι τα μέγιστα των δύο κυματομορφών του αισθητήρα θέσης Varikont και αυτής των ηλεκτροδίων δε παρουσιάζουν ταυτόχρονα μέγιστα παρότι έχουν την ίδια περίοδο.

Όπου:

$$\Delta\phi(\text{rad}) = \omega(\text{rad}/\text{sec}) \times \Delta t(\text{sec}) \quad (4.4)$$



4-1 Απεικόνιση διαφοράς φάσης

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ της κυματομορφής του δοχείου(Varikont) και εκείνης του νερού(ηλεκτρόδια) για τιμή  $KC=43$ , η οποία επιλέχτηκε τυχαία για τις τιμές του  $KC$  που προκύψαν.

Στο σημείο 1 του σχήματος αντιστοιχεί η μέγιστη κλίση του δοχείου προς τα δεξιά, όπου έγινε οπτικοποίηση της ροής για τη χρονική στιγμή  $t = 0/8T = 0 \text{ sec}$ .

Αντίστοιχα, για τη θέση 1' του σχήματος προσδιορίστηκε αρχικά η χρονική στιγμή  $t$  και κατόπιν αυτού η διάφορα  $\Delta t = t_1' - t_1$ . Έτσι, προκύπτει ο προσδιορισμός της διαφοράς φάσης  $\Delta\phi$  από το τύπο (4.4). Τέλος, στο σημείο αυτό το νερό εμφανίζει τη μέγιστη στάθμη.

Επιπλέον, στα σημεία 2 και 4 το δοχείο παρουσιάζει μηδενική κλίση ενώ τις χρονικές στιγμές 2' και 4' το δοχείο παρουσιάζει ελαφρά κλίση και το νερό διέρχεται από τη θέση ισορροπίας του. Οι λήψεις που πραγματοποιήθηκαν για τα σημεία 2 και 4 ήταν  $t = 2/8T$  και  $t = 6/8T$  αντίστοιχα.

Στο σημείο 3 το δοχείο παρουσιάζει μέγιστη κλίση προς τα αριστερά ενώ το νερό στο σημείο 3' εμφανίζει την ελάχιστη στάθμη του. Για το σημείο 3 έγινε οπτικοποίηση της ροής για τη χρονική στιγμή  $t = 4/8T$ .

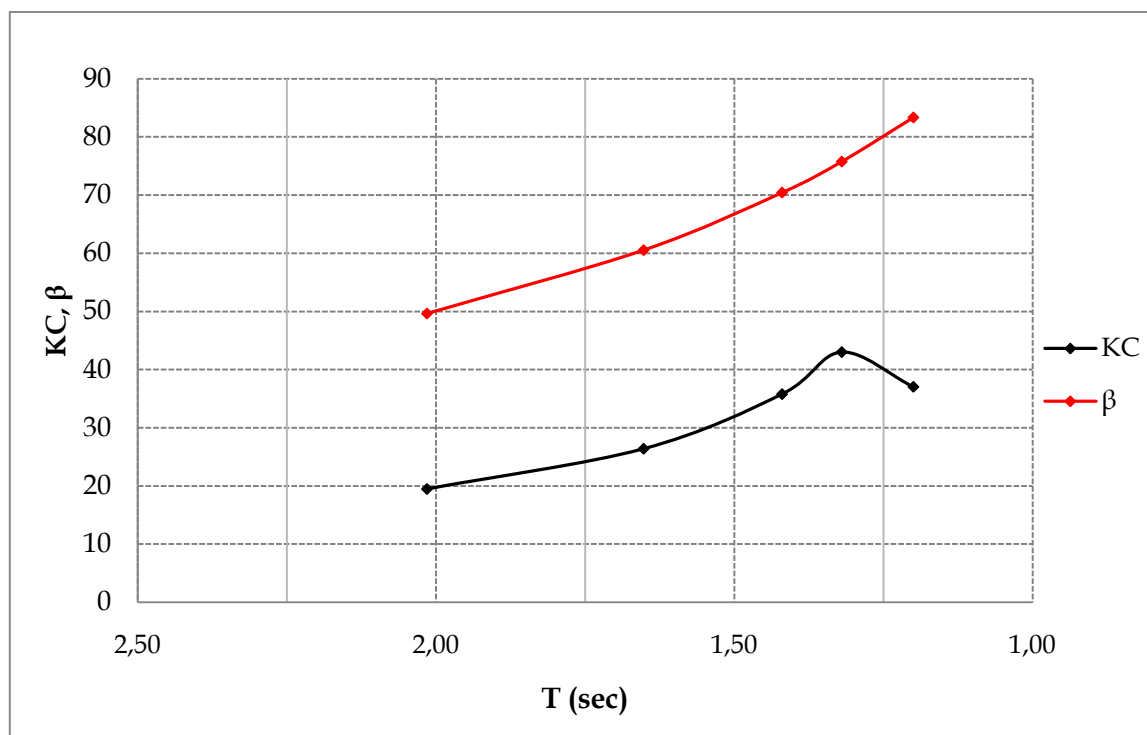
Οι χρονικές στιγμές  $t_1 = 1/8T, 3/8T, 5/8T, 7/8T$  είναι τιμές ενδιάμεσων θέσεων για τις οποίες έγινε οπτικοποίηση.

### 4.3. Συνοπτική παρουσίαση μετρήσεων

A(cm)	T(sec)	f(sec-1)	$\omega$ (rad/sec)	Kc	$\beta$	Umax(cm/sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta\phi$ (degrees)
3,10	2,02	0,4963	3,118	19,48	49,6	9,666	0,04	7
4,20	1,65	0,6053	3,803	26,40	60,5	15,974	0,08	17
5,70	1,42	0,7042	4,425	35,80	70,4	25,221	0,18	46
6,85	1,32	0,7576	4,760	43,00	75,8	32,606	0,27	74
5,90	1,20	0,8333	5,236	37,00	83,3	30,892	0,38	114

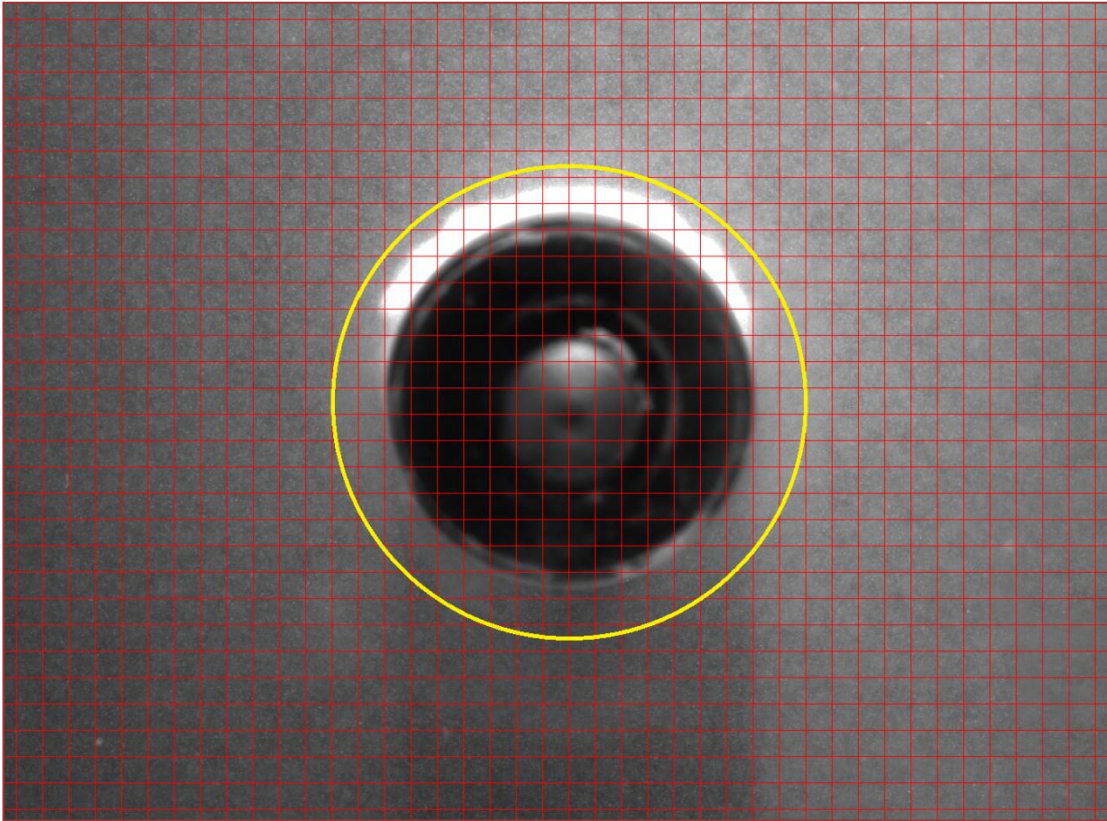
Πίνακας 1 Συνοπτική παρουσίαση μετρήσεων

Στο παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν. Μετά από σειρά δοκιμών, κρατήθηκαν οι αποδεκτές τιμές Kc, υπολογιστήκαν οι περίοδοι T και οι γωνιακές συχνότητες  $\omega$  καθώς και η διαφορά φάσης των δύο κυματομορφών που έχουν αναφερθεί παραπάνω.



4-2 Ενδεικτικό διάγραμμα εξάρτησης Kc,β από τη περίοδο.

#### 4.4. Αριθμητικός υπολογισμός κυκλοφορίας $\Gamma$



4-3 Περιοχή(εντός κίτρινου κύκλου) αριθμητικού υπολογισμού κυκλοφορίας

Η κυκλοφορία υπολογίστηκε ολοκληρώνοντας αριθμητικά τη στροβιλότητα (θεώρημα Stokes) εντός της επιφάνειας που περικλείεται στον κίτρινο κύκλο.

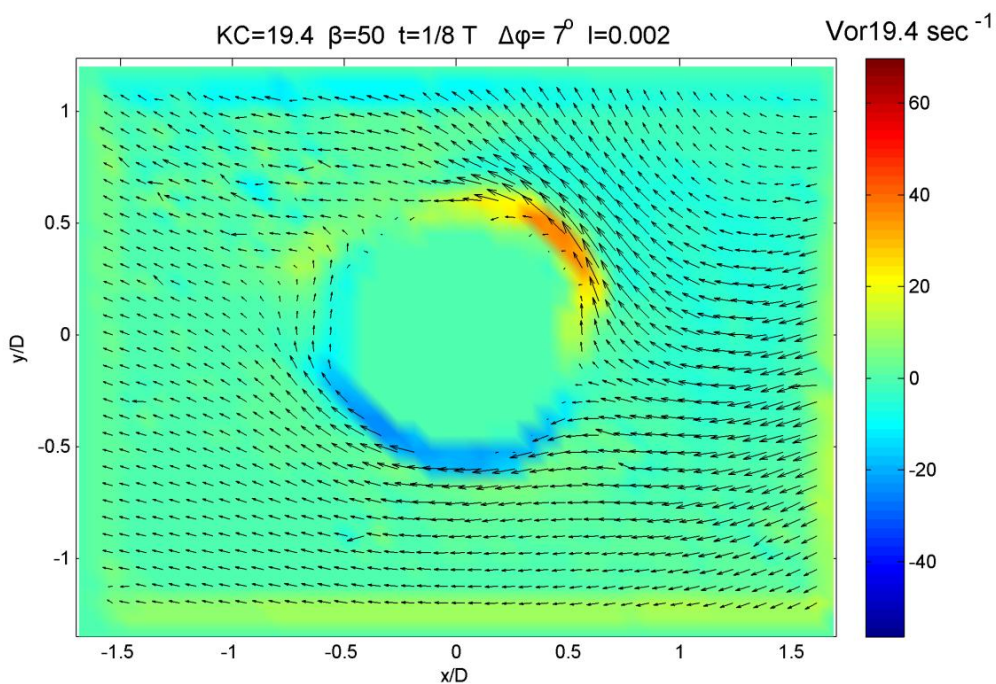
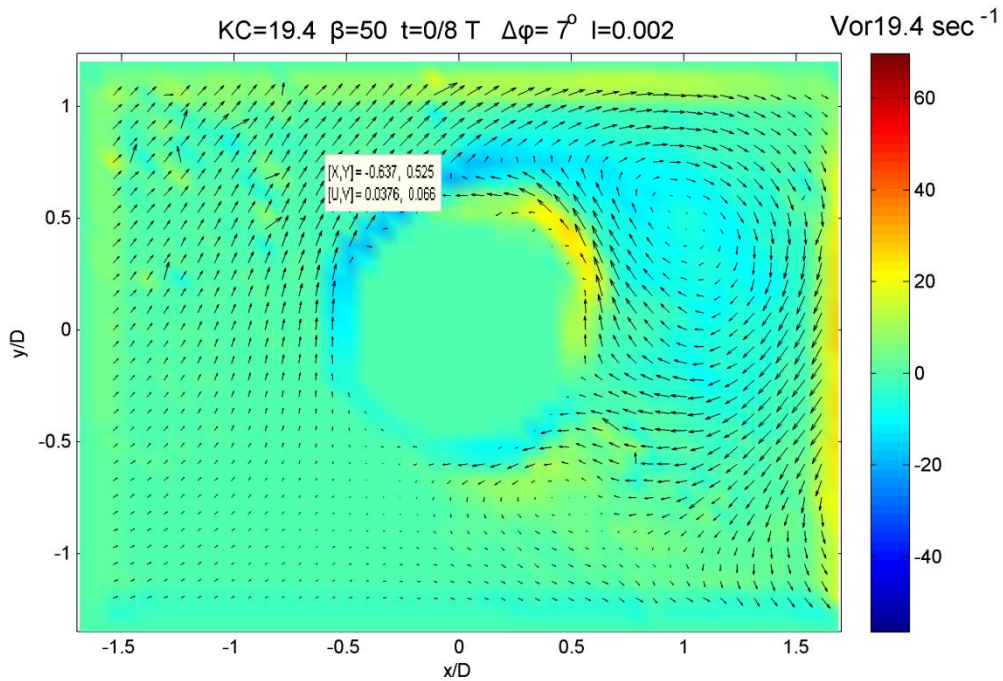
Επιλέξαμε τέτοια διάμετρο του κύκλου (1,2 φορές τη διάμετρο του κυλίνδρου), ώστε η δύναμη συναρτήσει του χρόνου να είναι λίγο πολύ αρμονική και περιοδική. Επιλογή μεγαλύτερης ή μικρότερης διαμέτρου οδηγούσε σε ακανόνιστη μορφή της χρονοσειράς της δύναμης.

## 4.5. Παρουσίαση υλικού οπτικοποιήσεων

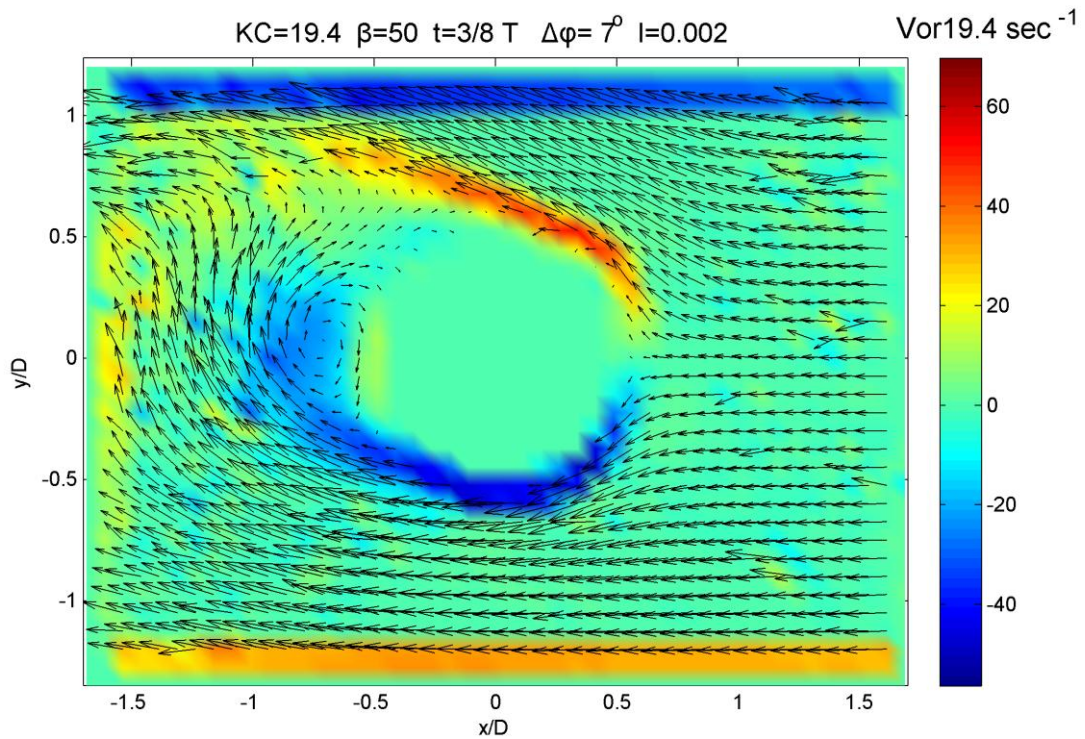
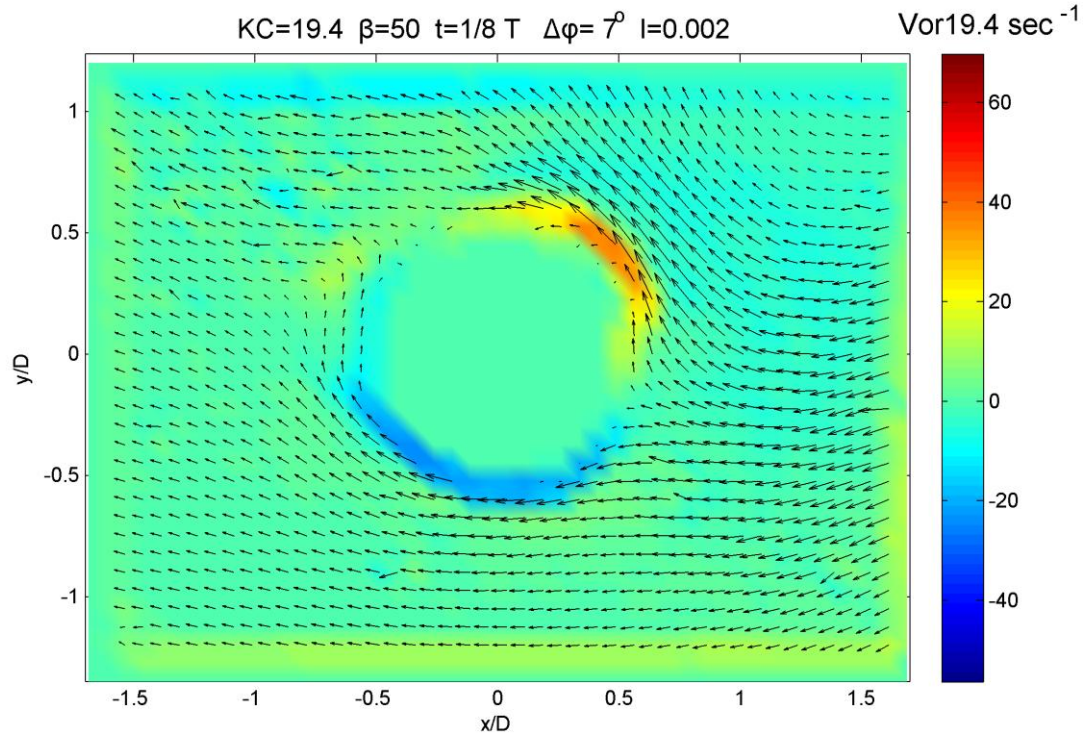
### 4.5.1. $KC=19.4$ , $\beta=50$ , $T= 2.0150\text{sec}$ και $\Delta\varphi=7^\circ$ .

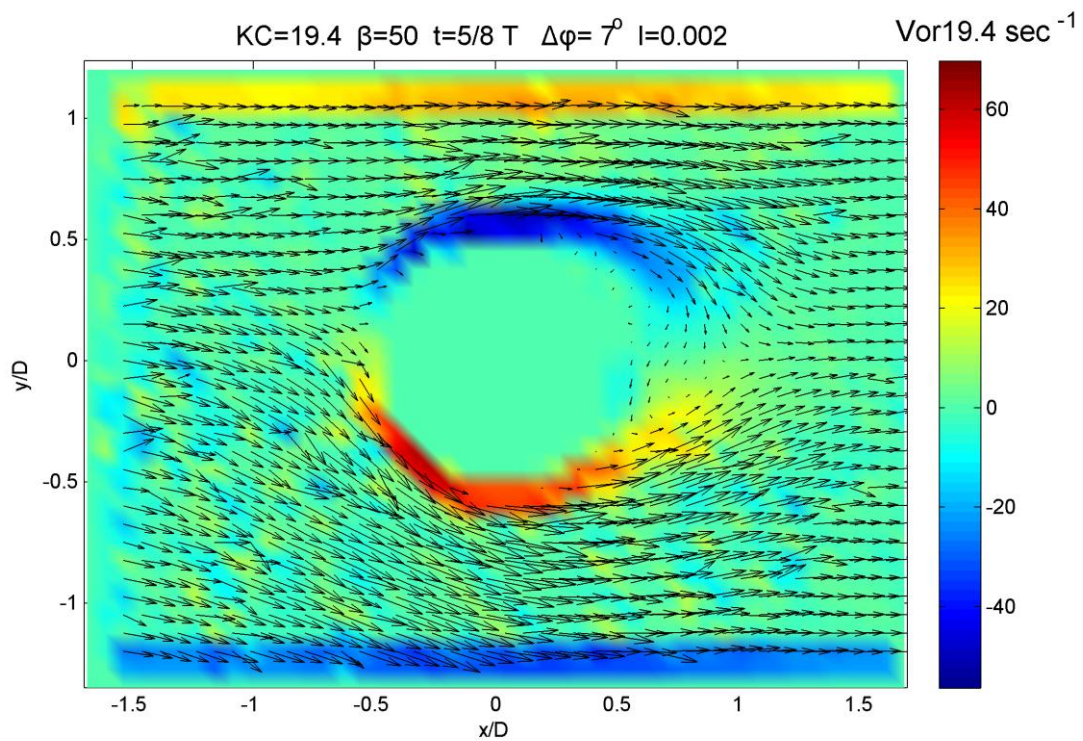
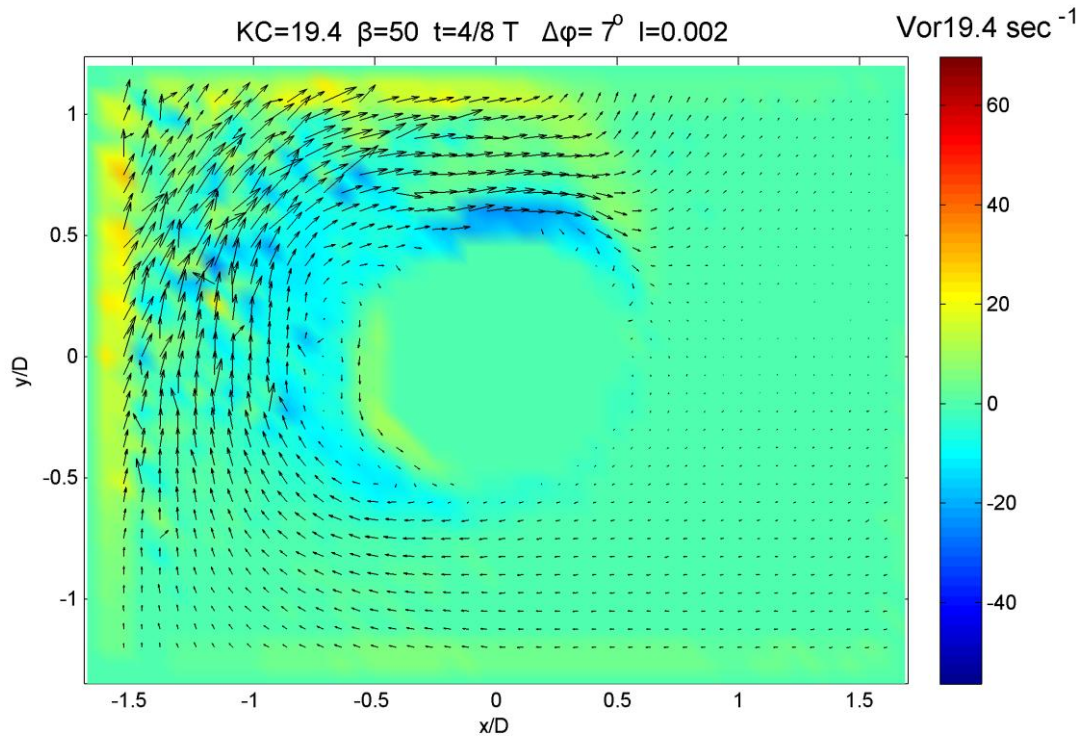
#### 4.5.1.1. Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile)

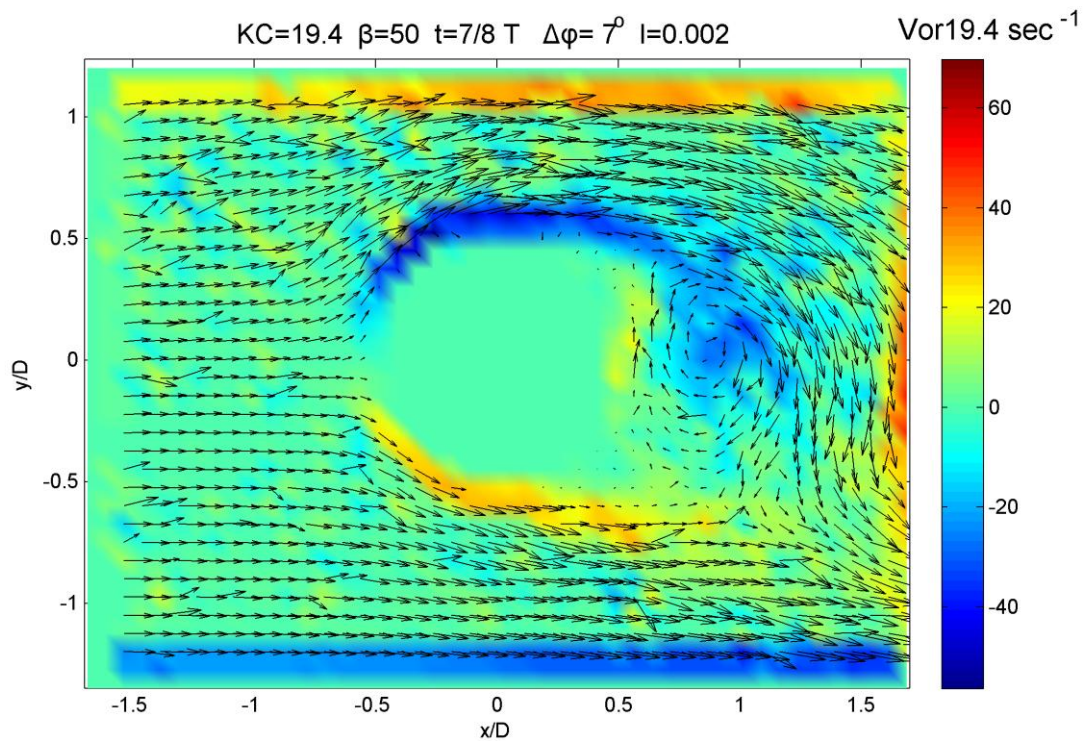
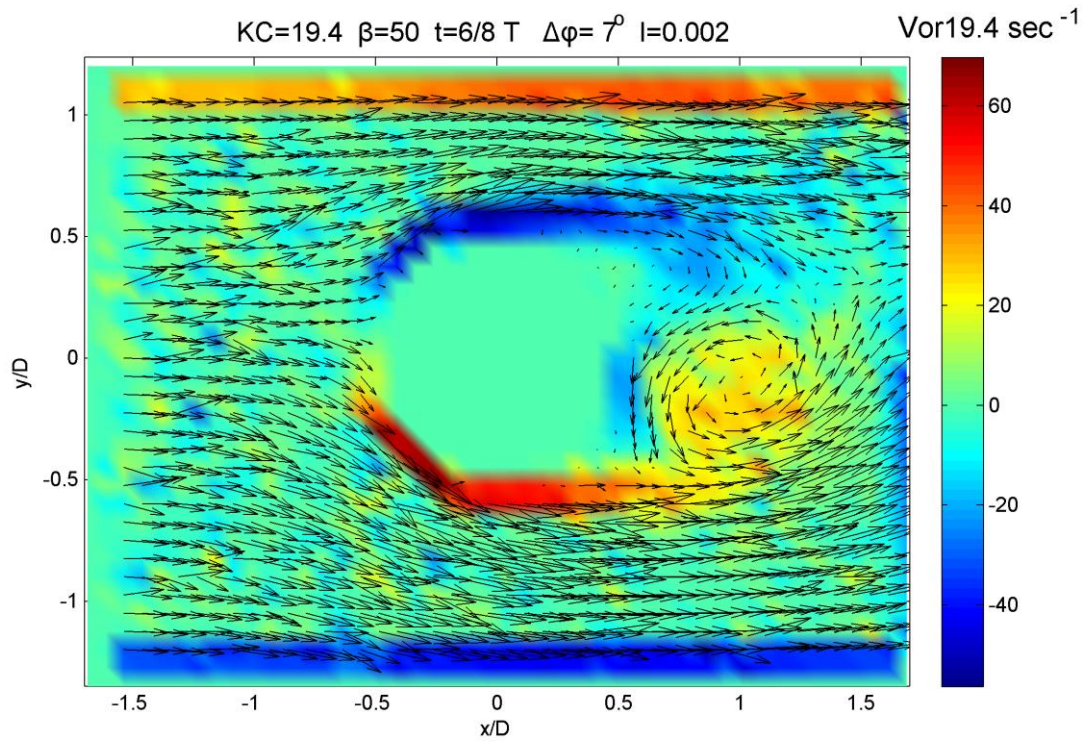
*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν τη διαστατή στροβιλότητα*



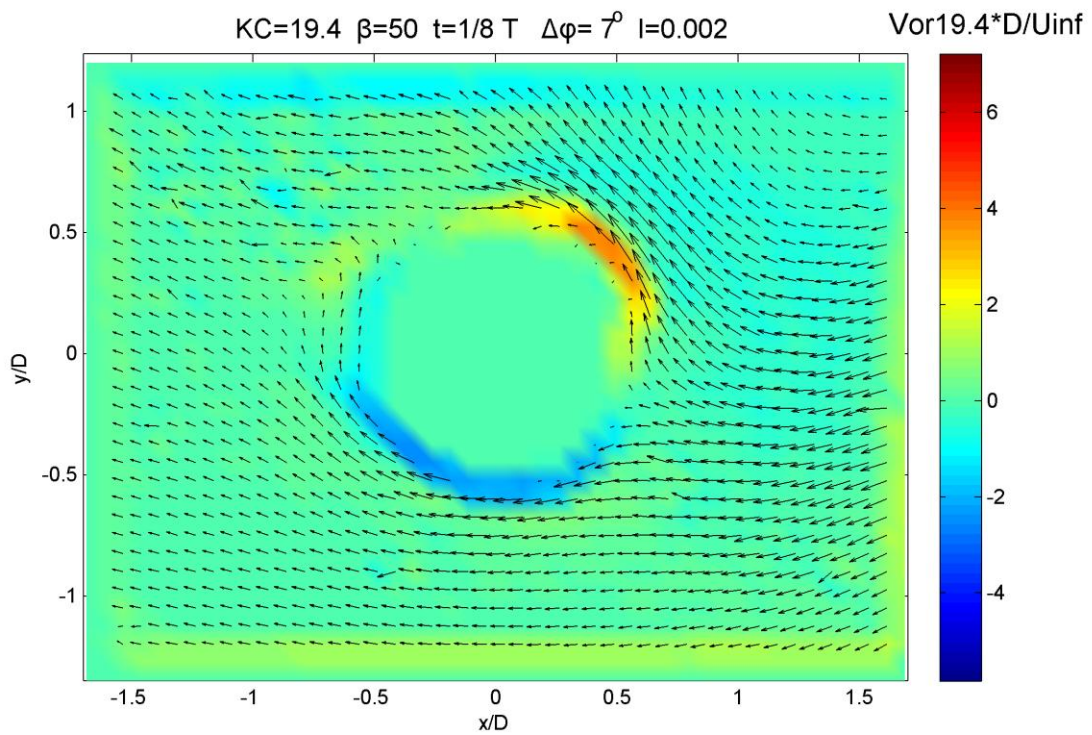
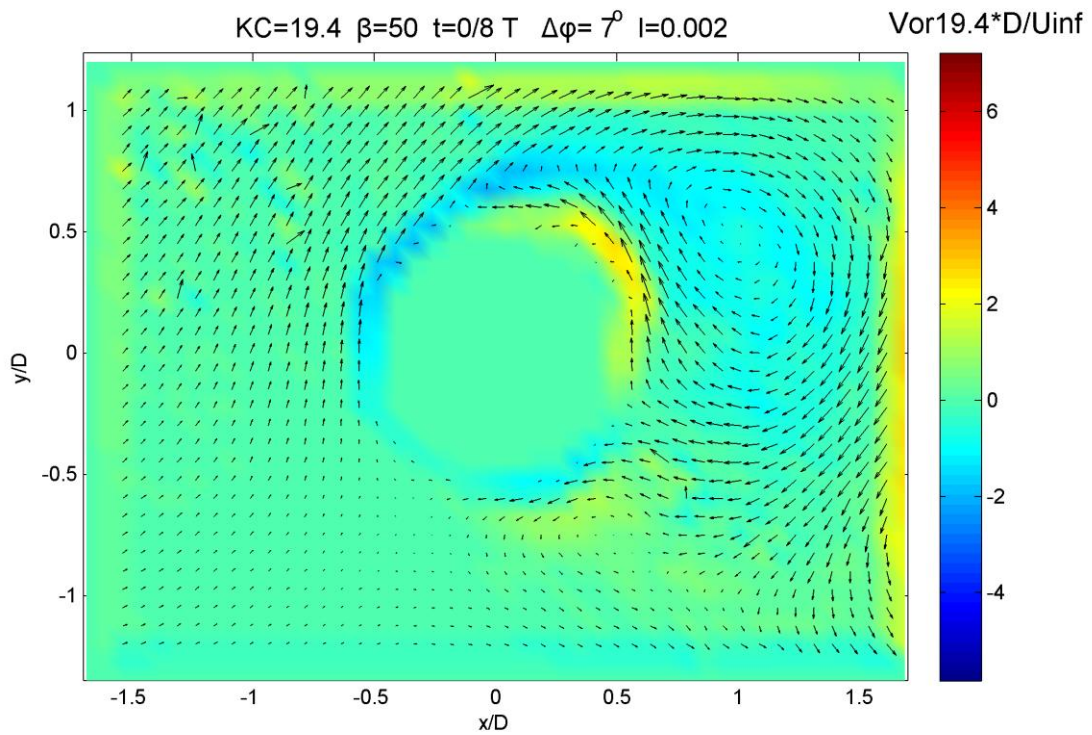


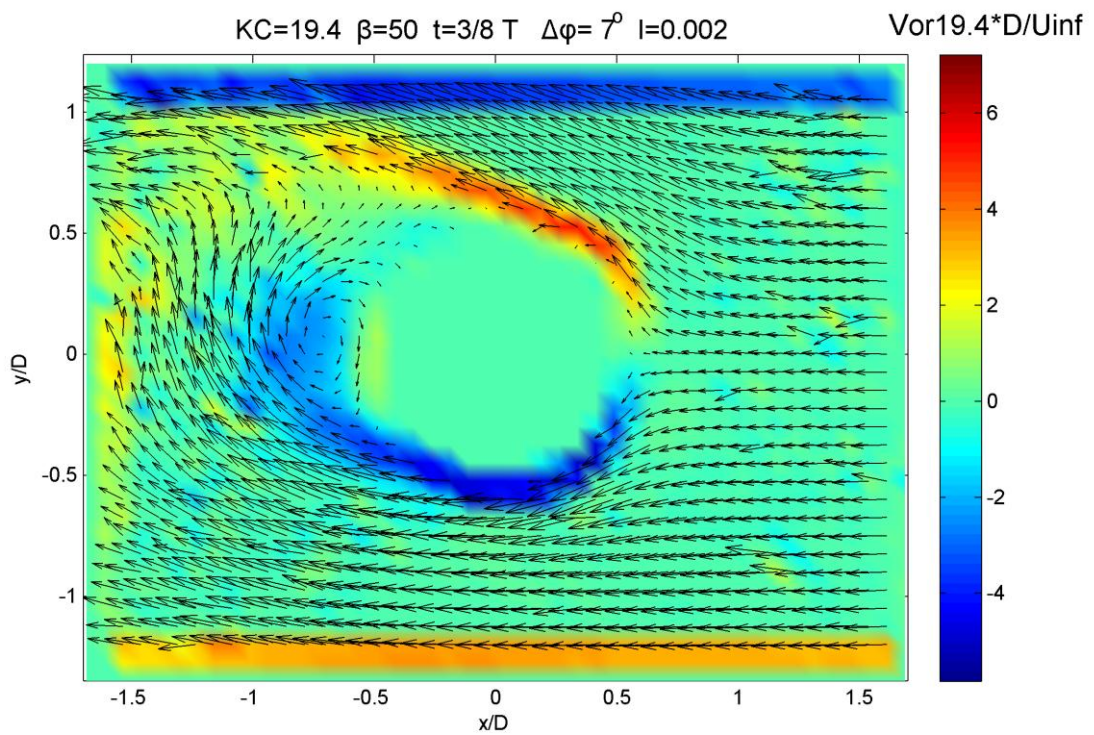
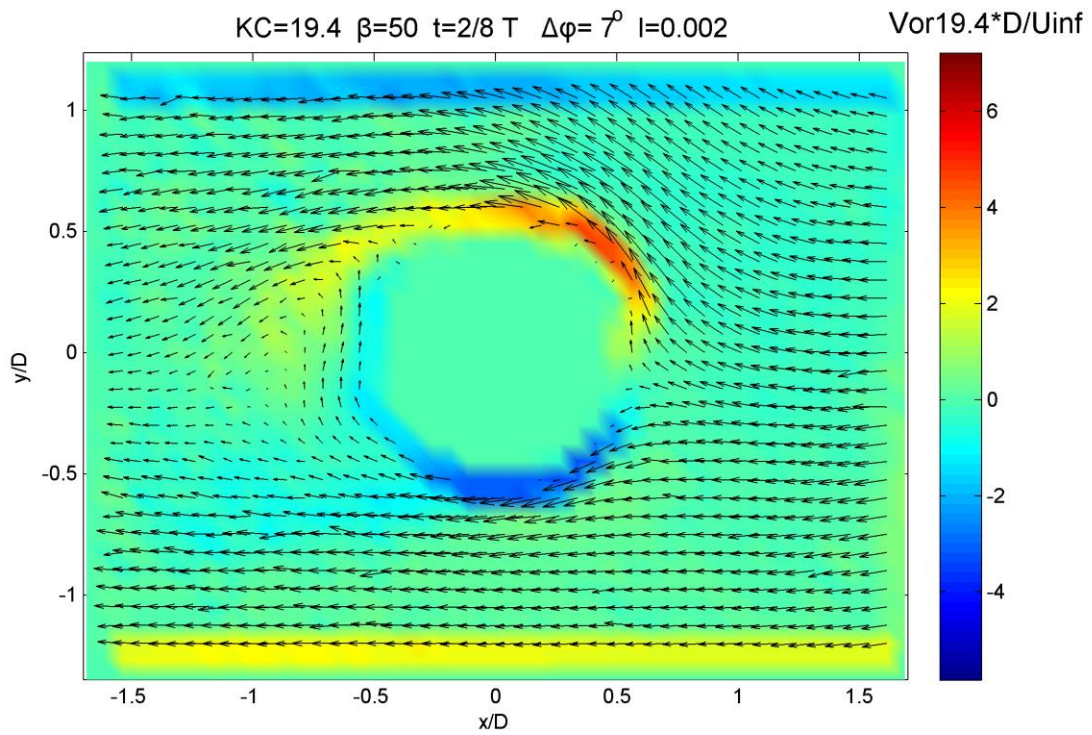


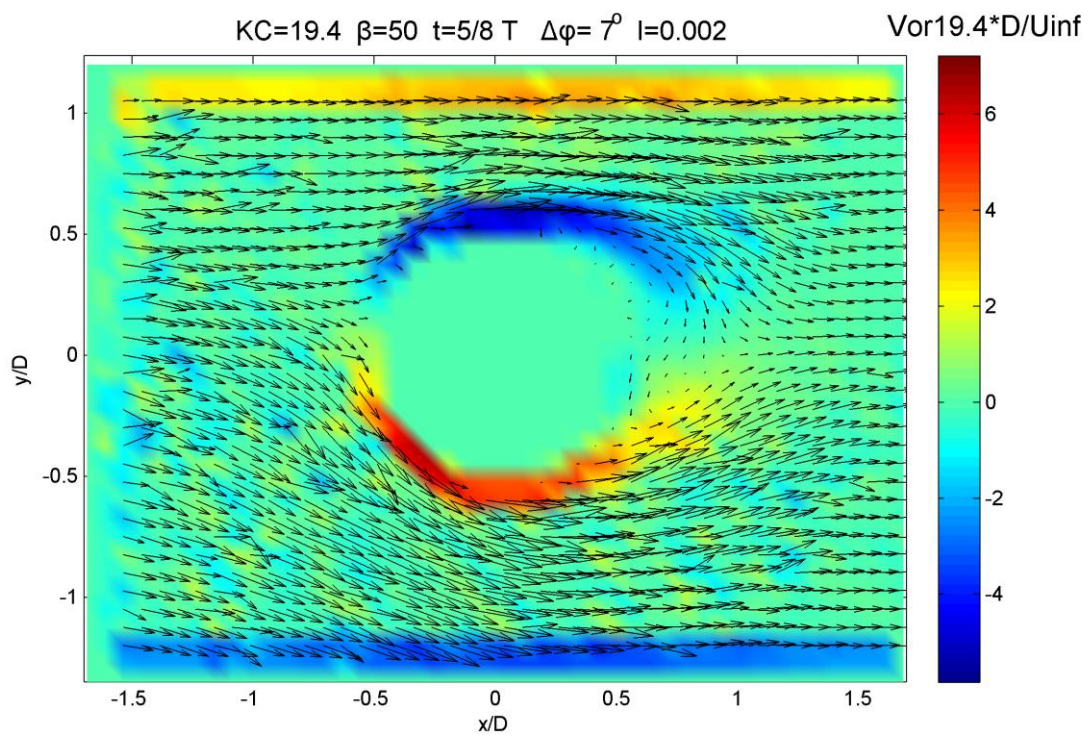
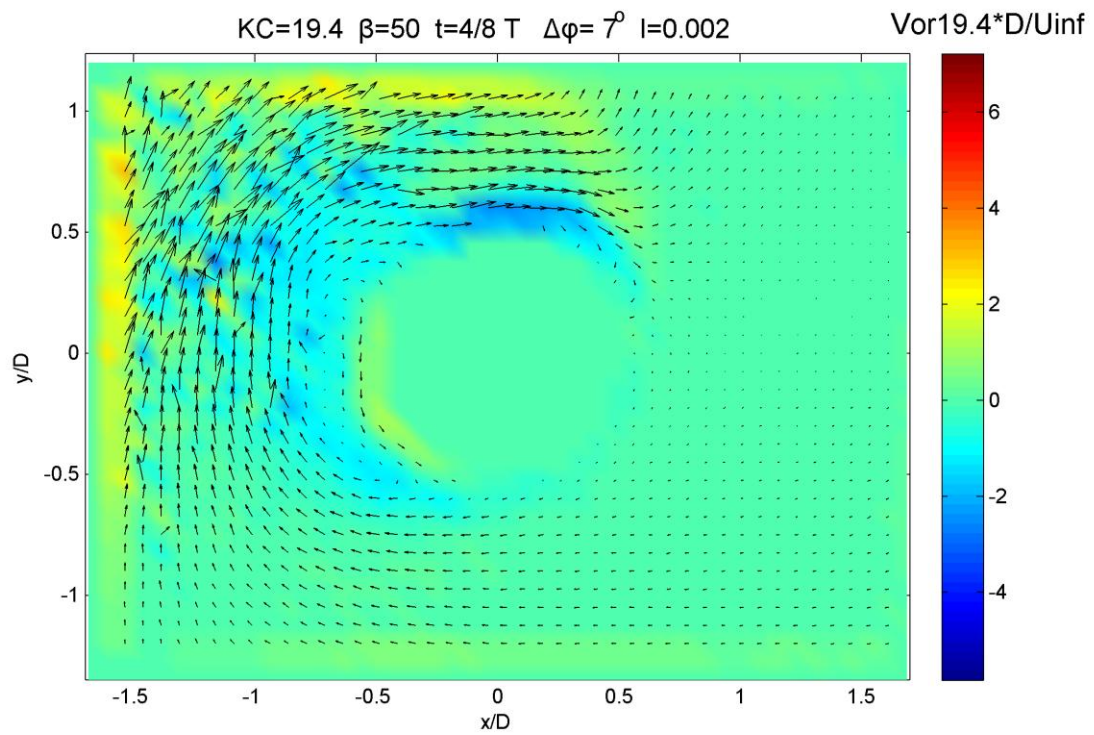


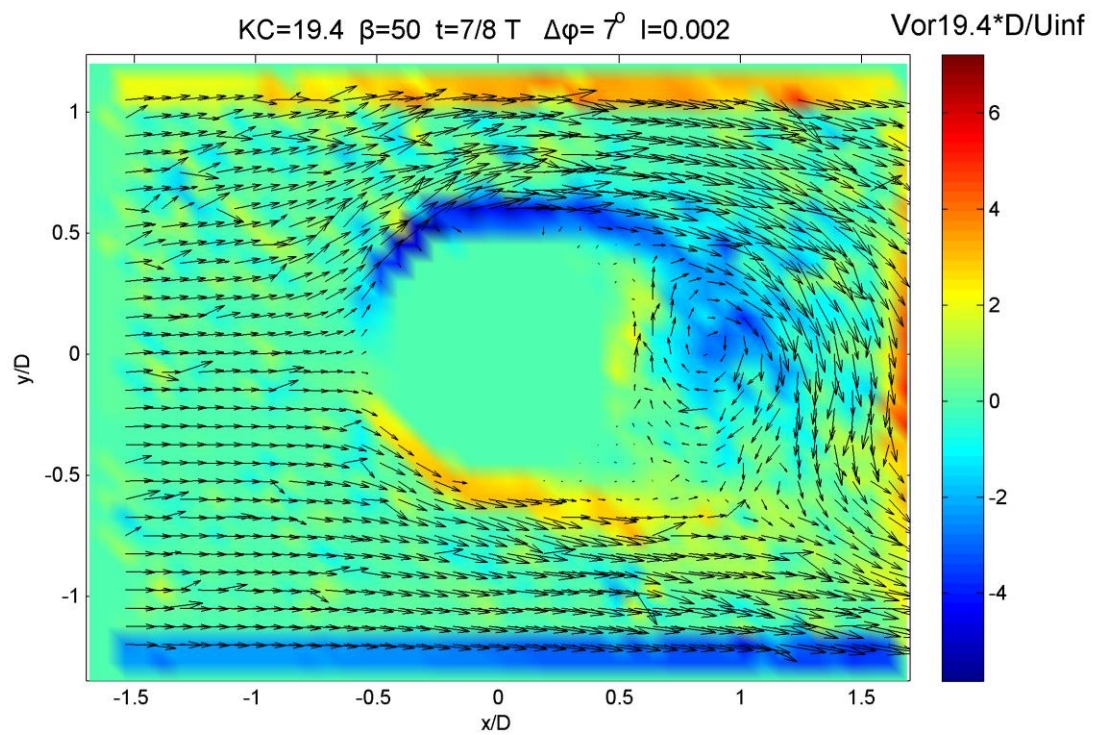
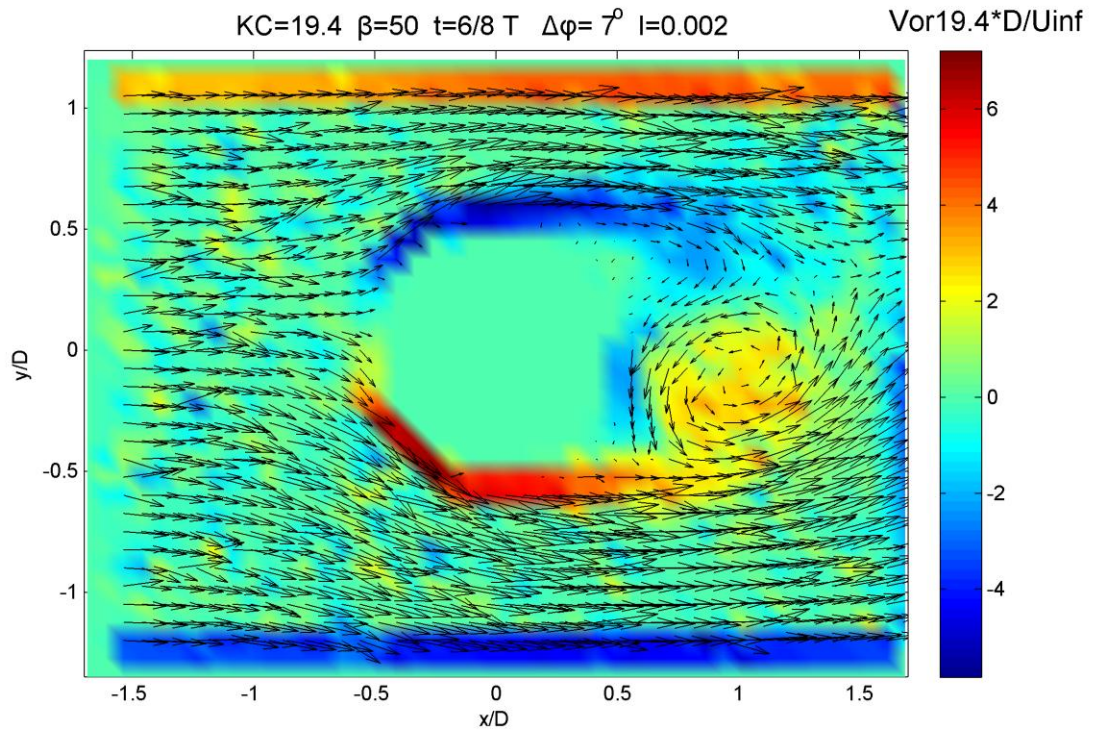


*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν την αδιάστατη στροβιλότητα*

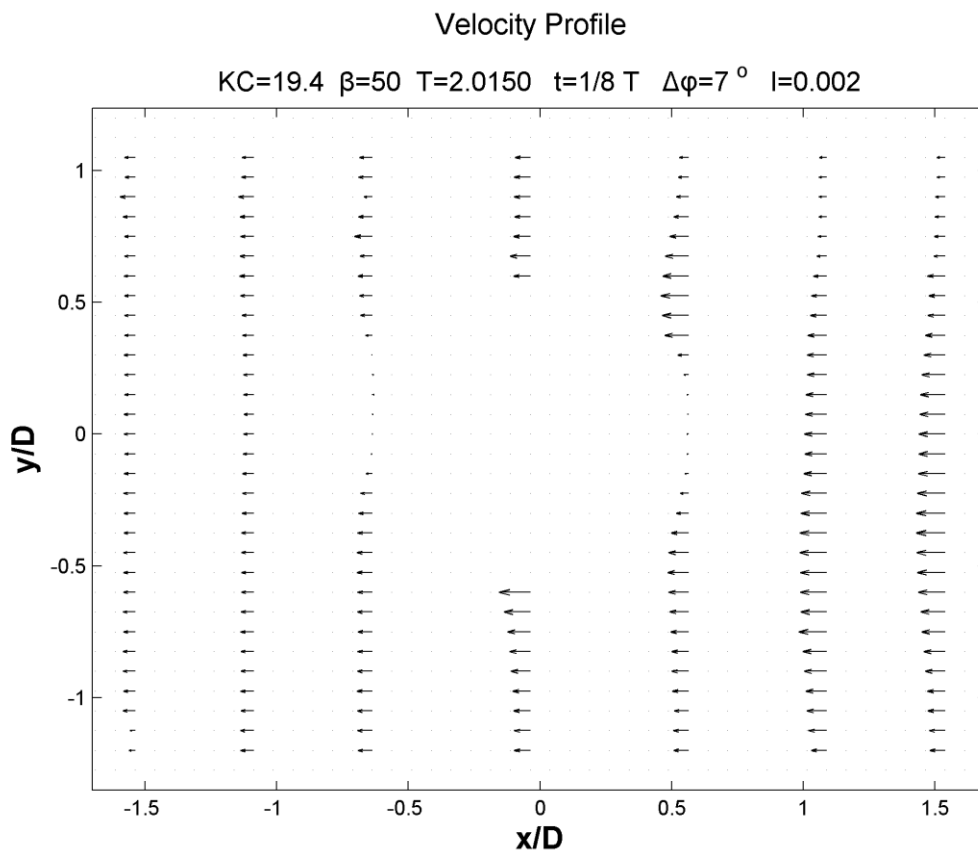
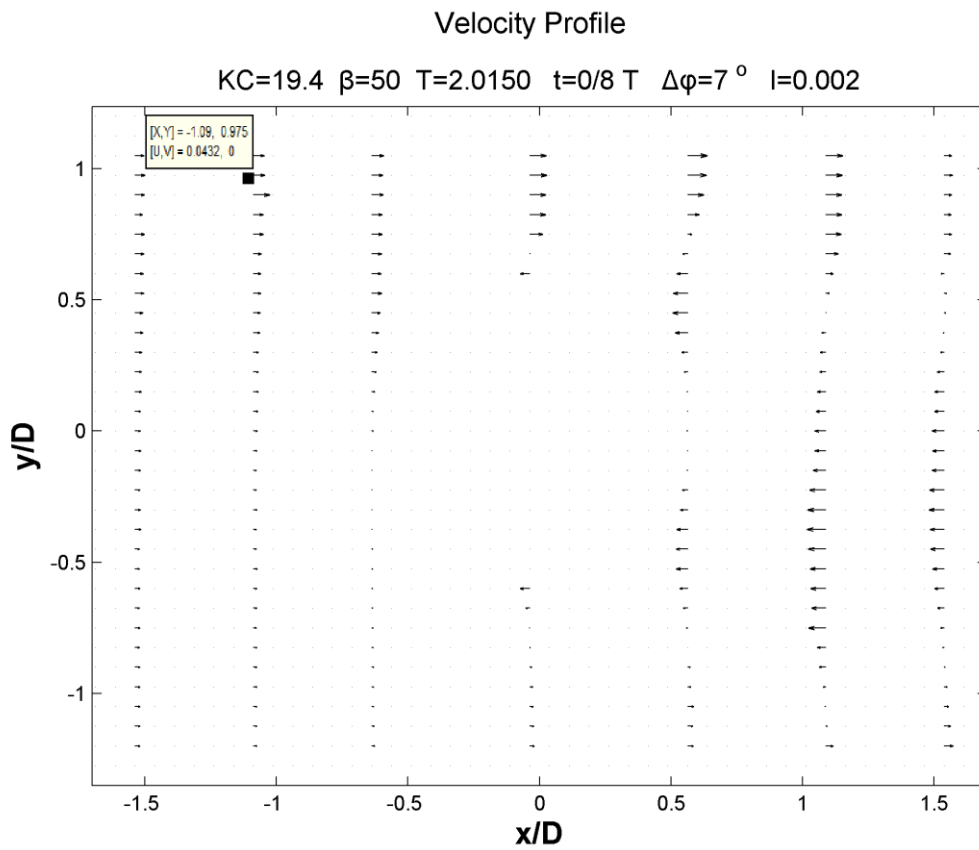




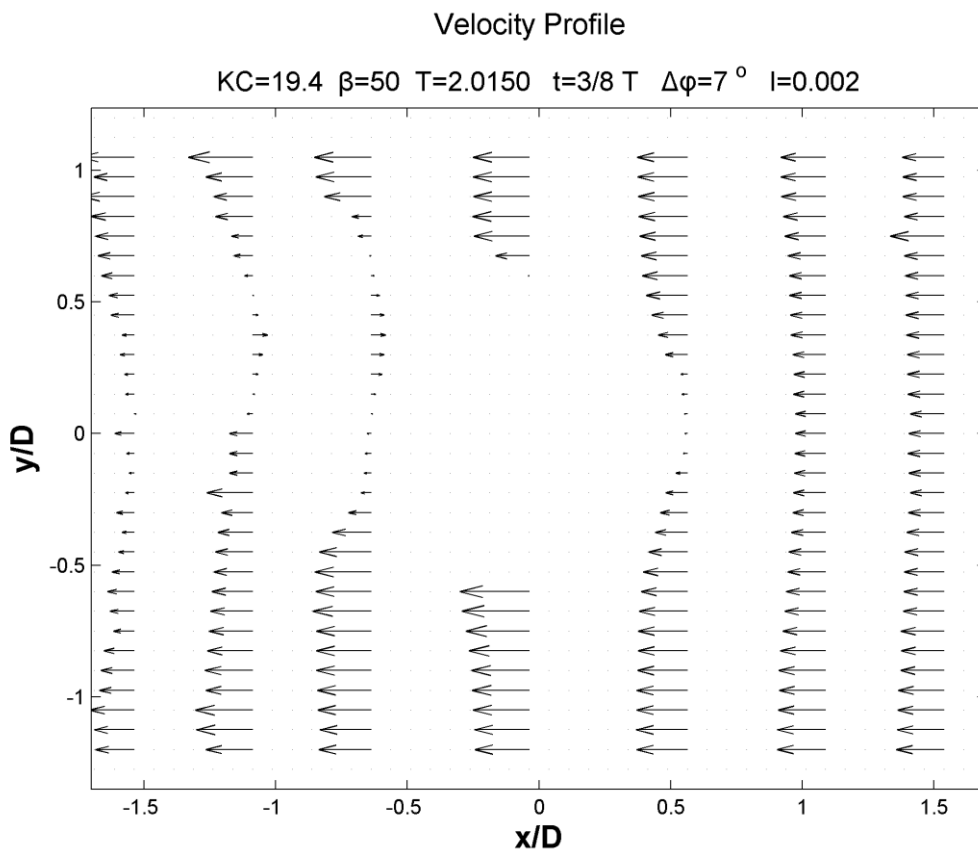
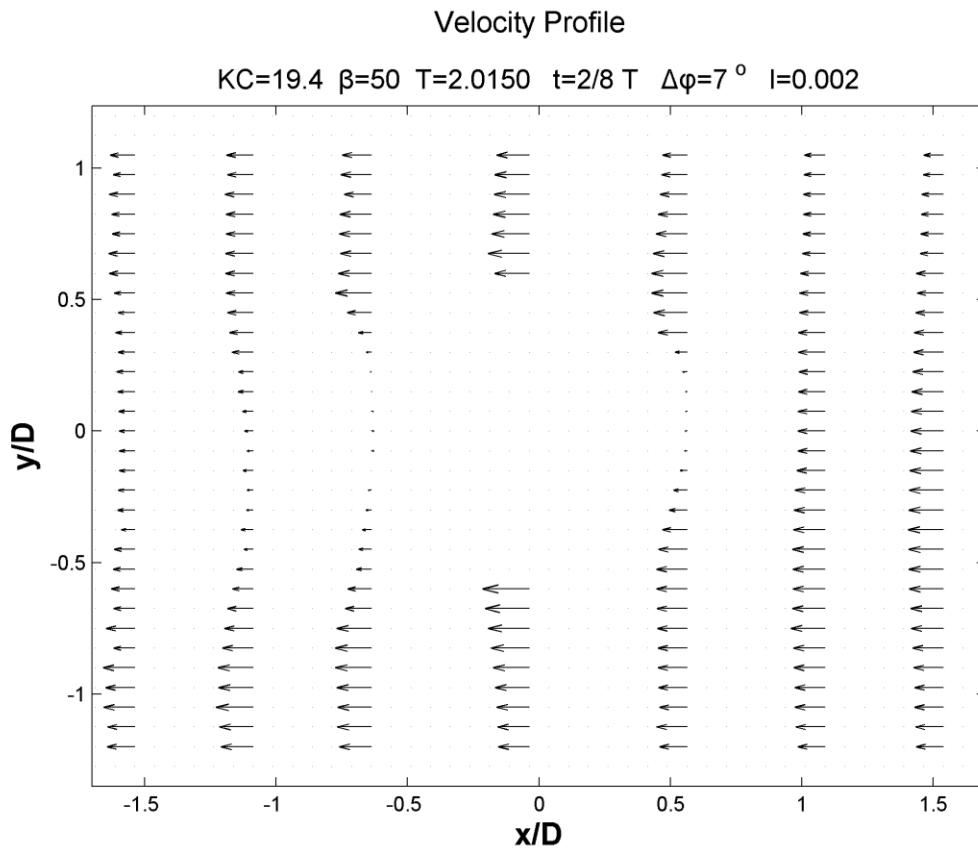


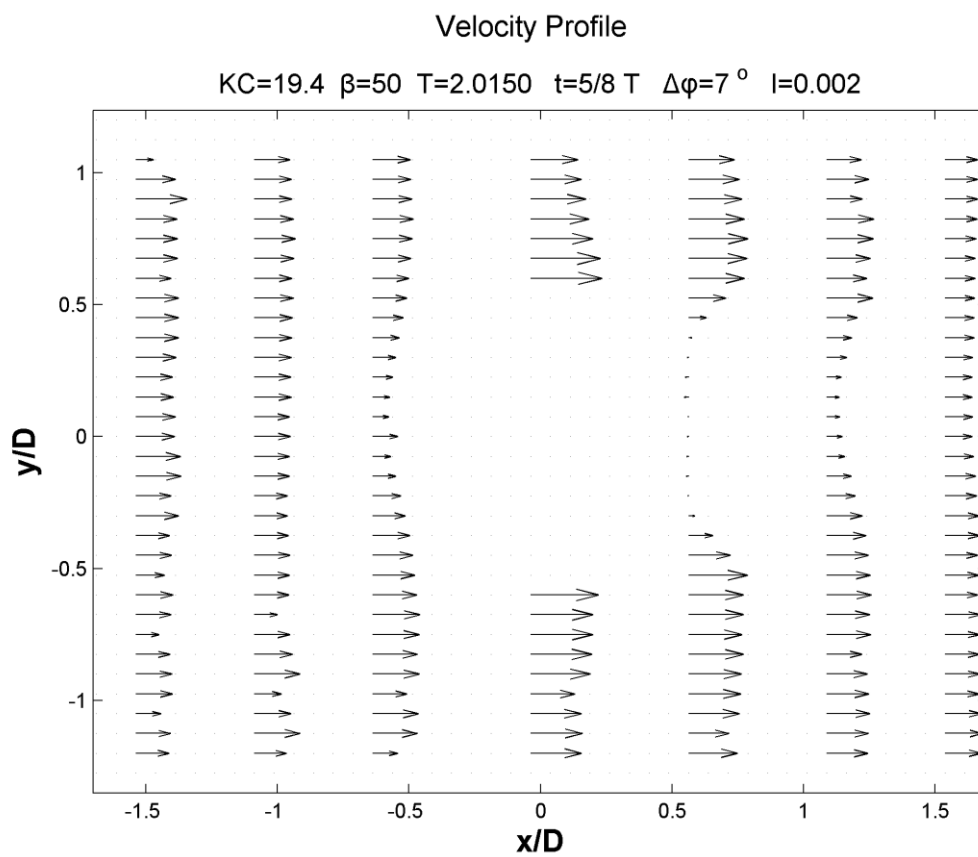
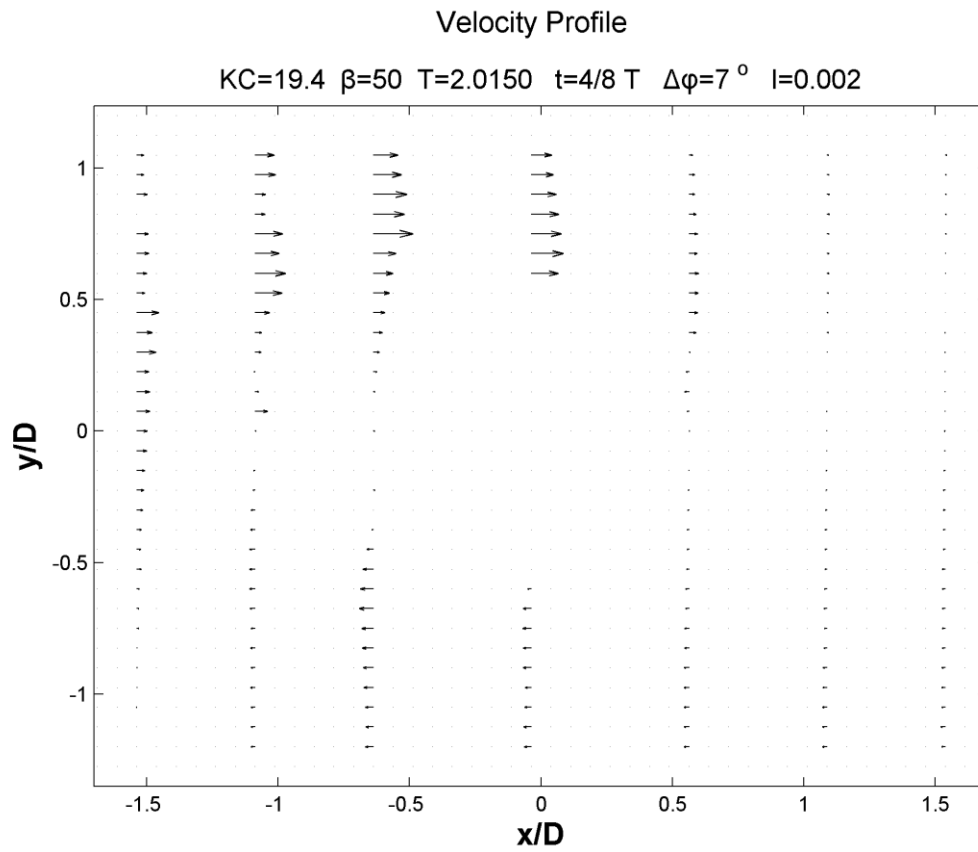


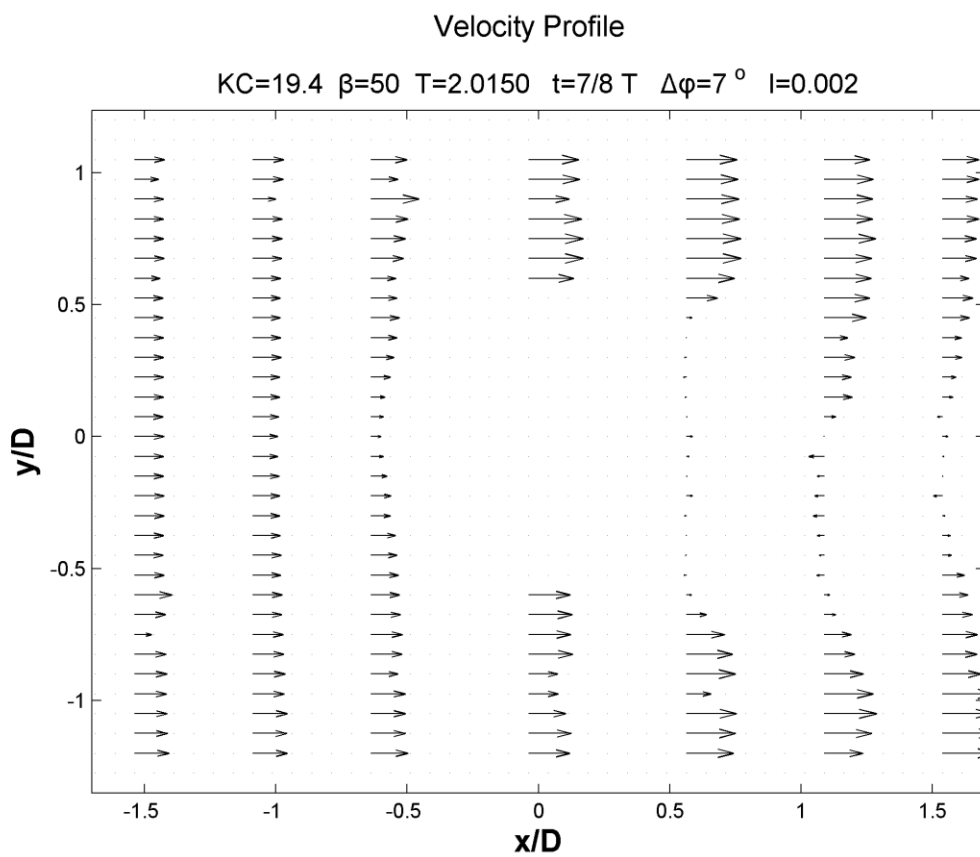
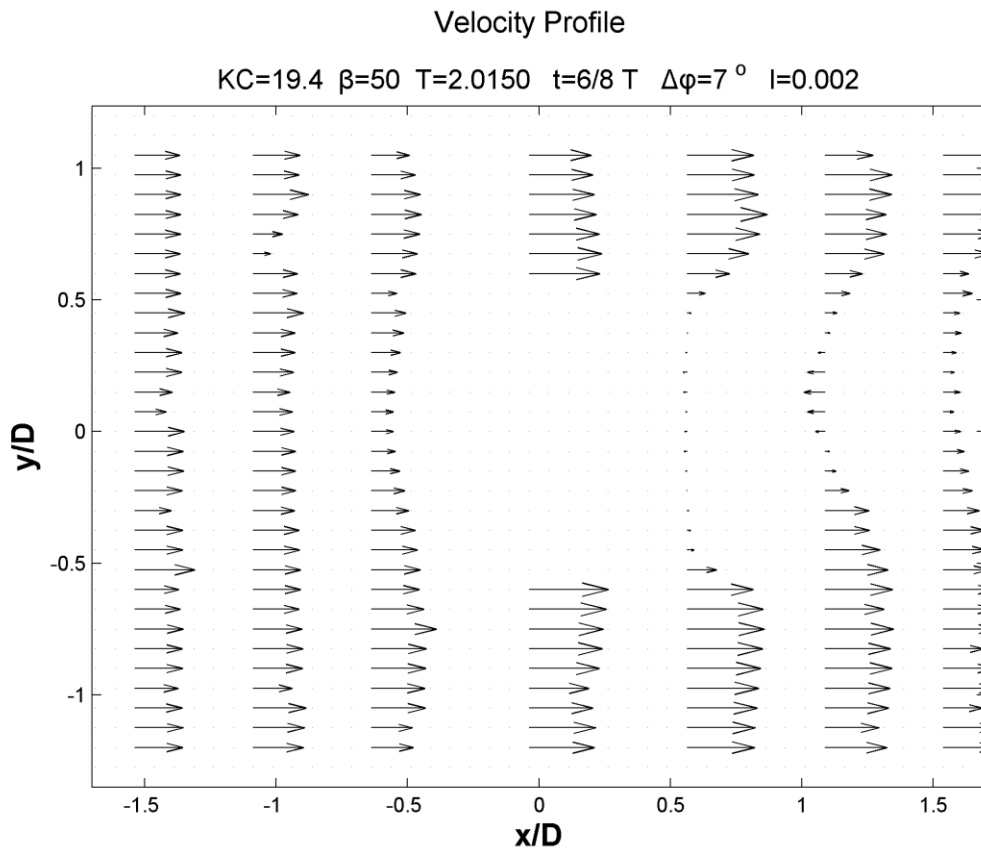
## 4.5.1.2. Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile)



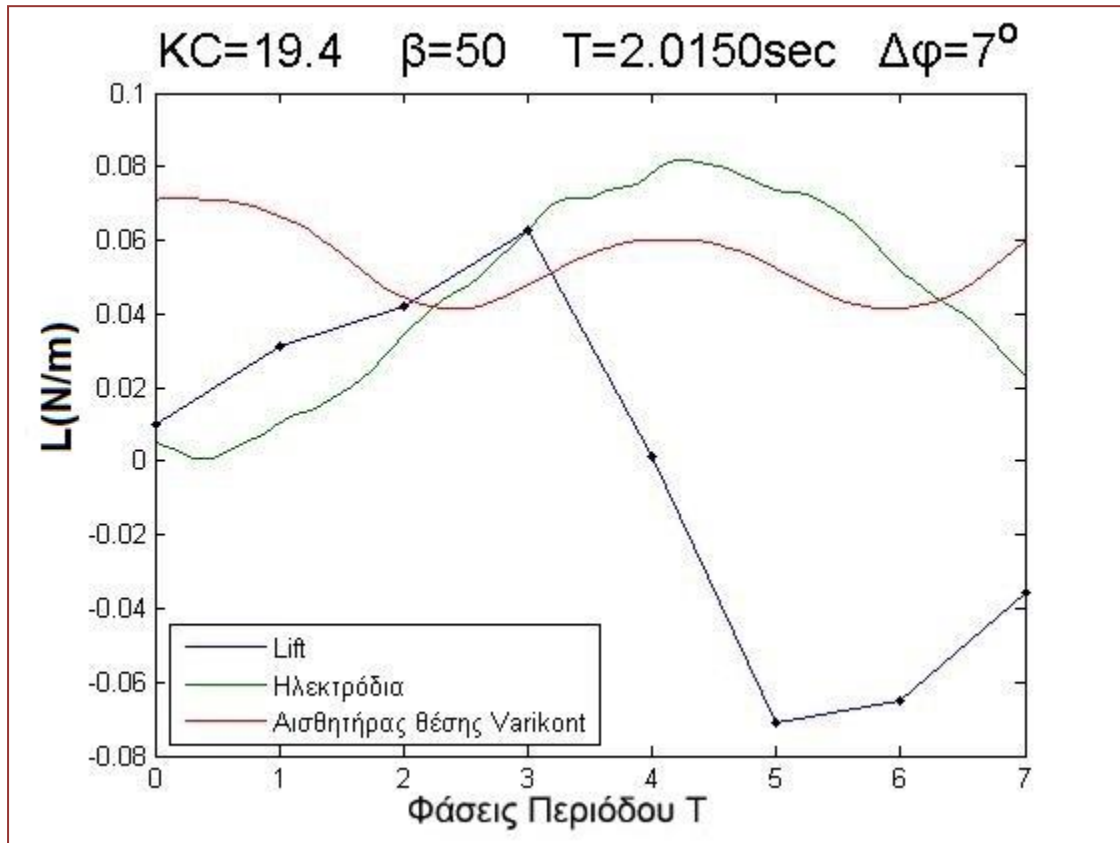
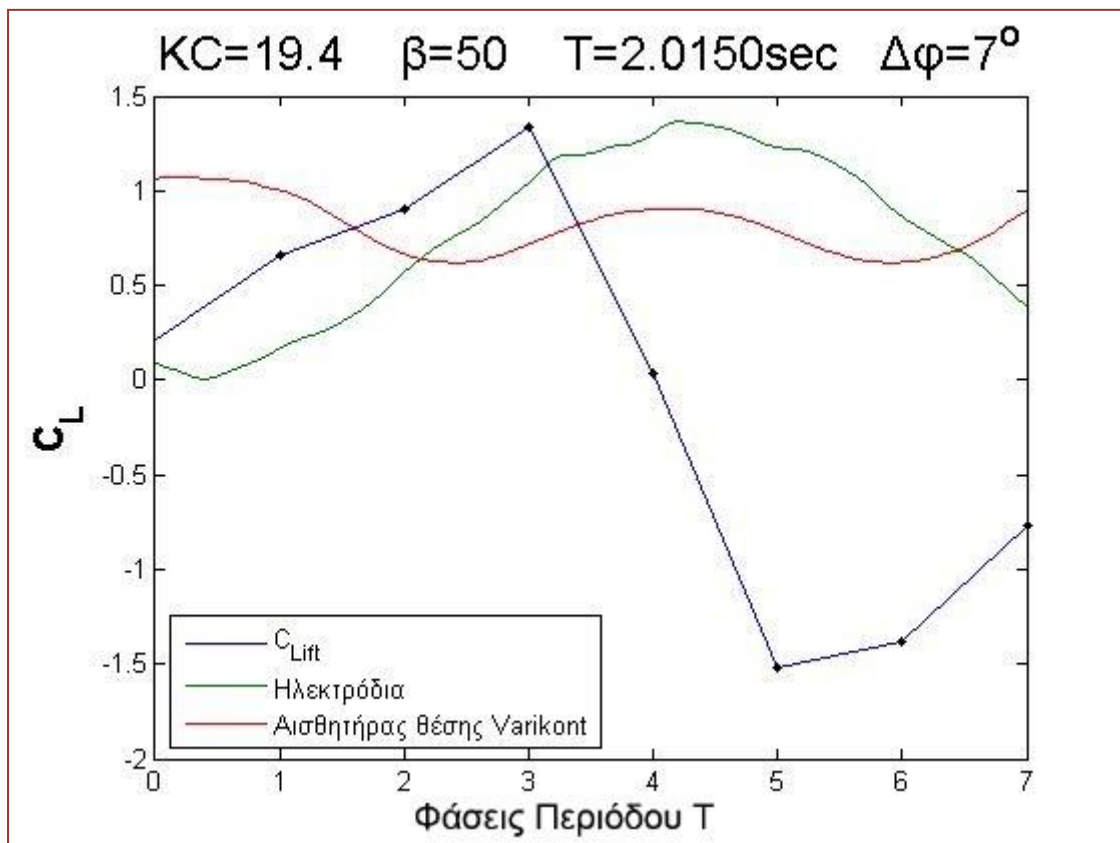








## 4.5.1.3. Δύναμη Άνωσης L

4.5.1.4. Συντελεστής Άνωσης  $C_L$ 

Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι σε κάθε μισό κύκλο κατά τη μέγιστη ταχύτητα της ροής(κίνηση του νερού προς τα δεξιά,  $t=5/8T$ ) με μια μικρή διαφορά φάσης γεννιούνται δύο δίνες αντίθετης φοράς, ίδιου μεγέθους( $t=6/8T$ ,  $7/8T$ ). Η δίνη που σχηματίζεται πρώτη "προλαβαίνει" και αποκολλάται καθώς και απομακρύνεται με γωνία  $40^\circ$  ως προς τη διεύθυνση της ροής, σε αντίθεση με τη "νέοτερη" δίνη που δεν προλαβαίνει, παραμένει προσκολλημένη και τελικά εξασθενεί κατά την αλλαγή της φοράς της ροής.

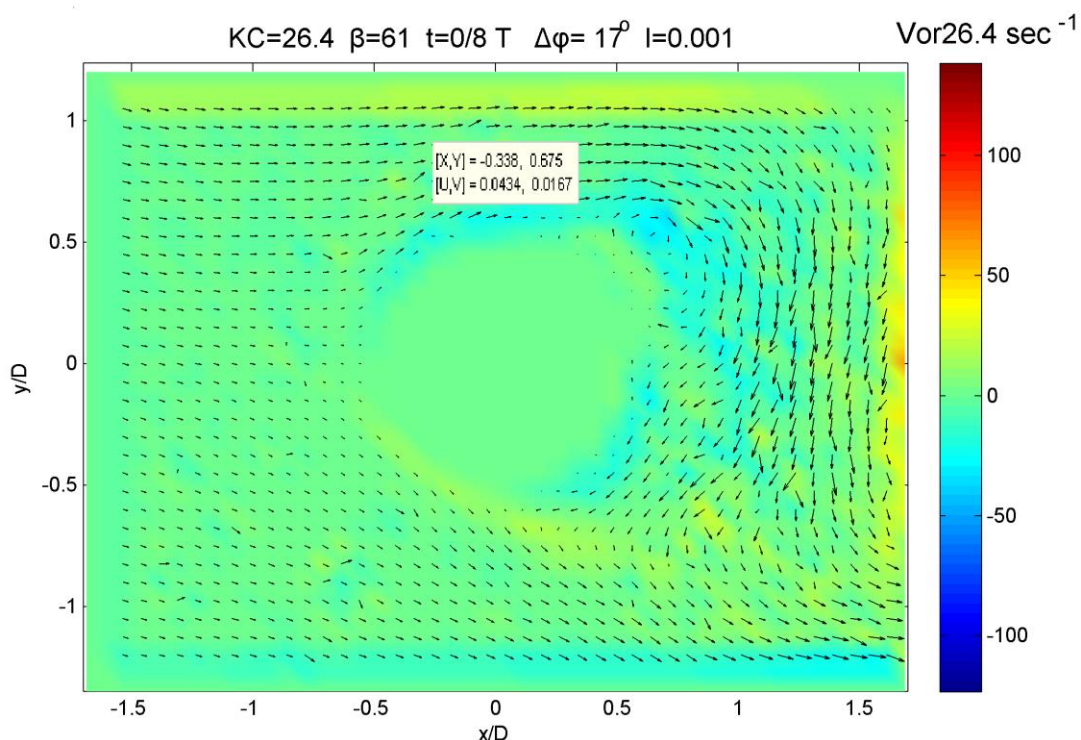
Αντίστοιχα, και στον προηγούμενο μισό κύκλο, για τη χρονική στιγμή  $t=3/8T$  και κίνηση του νερού προς τα αριστερά εμφανίζεται το ίδιο μοτίβο που περιγράφηκε παραπάνω.

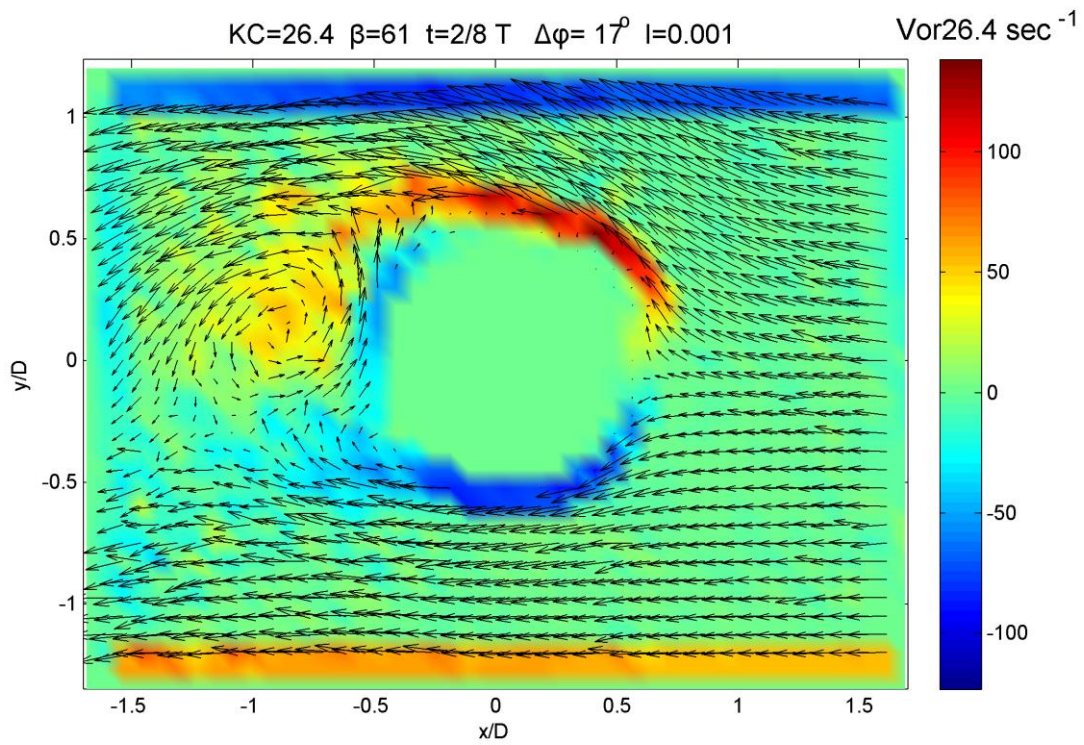
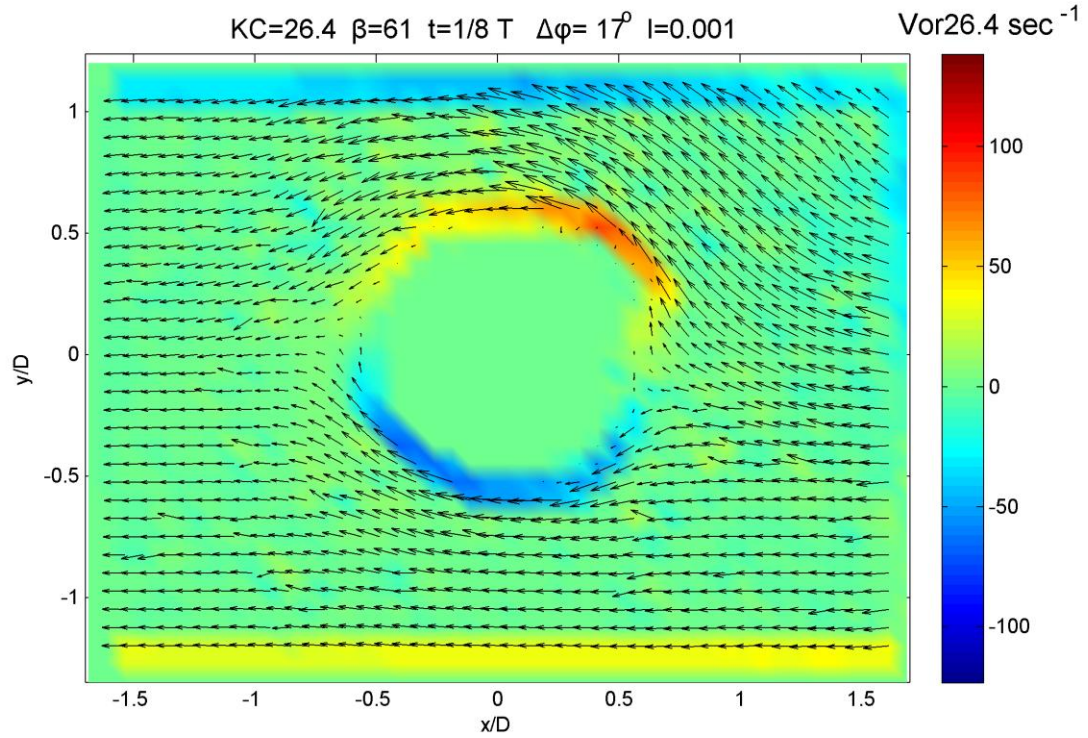
Στο διάστημα της μέγιστης ταχύτητας της ροής εμφανίζονται περιοχές με αρκετά μεγάλη στροβιλότητα και λόγω αυτών εμφανίζεται και η μέγιστη δύναμη άνωσης ( $t=3/8T$ ).

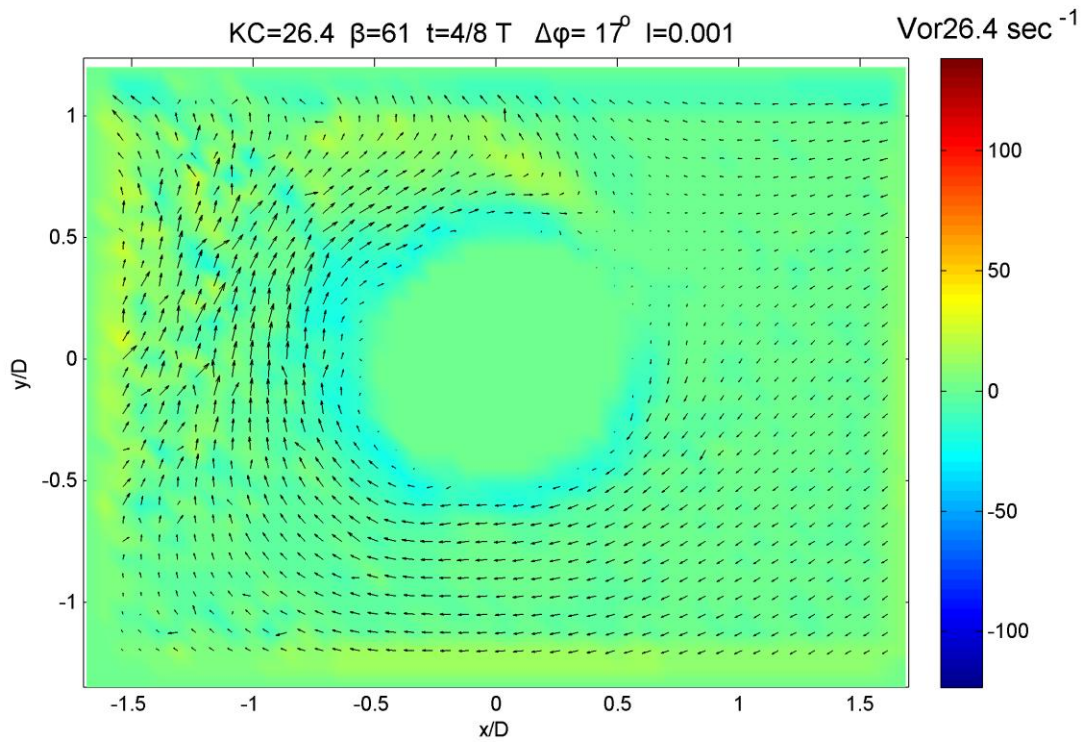
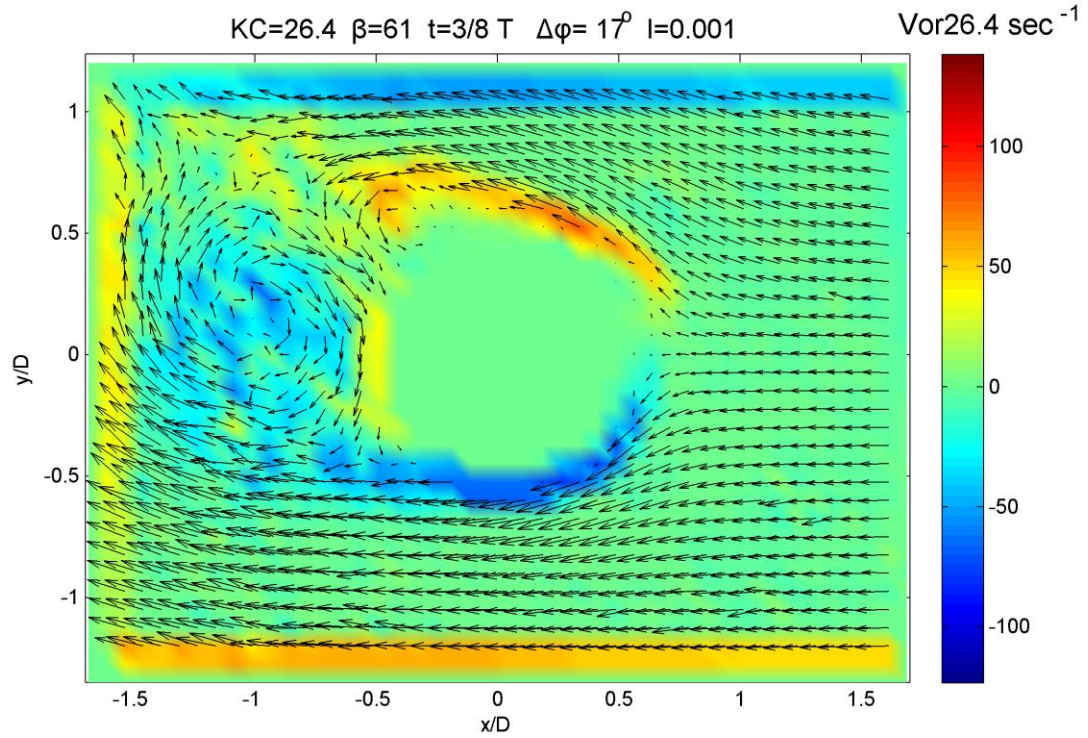
#### 4.5.2. $KC=26.4$ , $\beta=61$ , $T=1.6520$ sec και $\Delta\varphi=17^\circ$ .

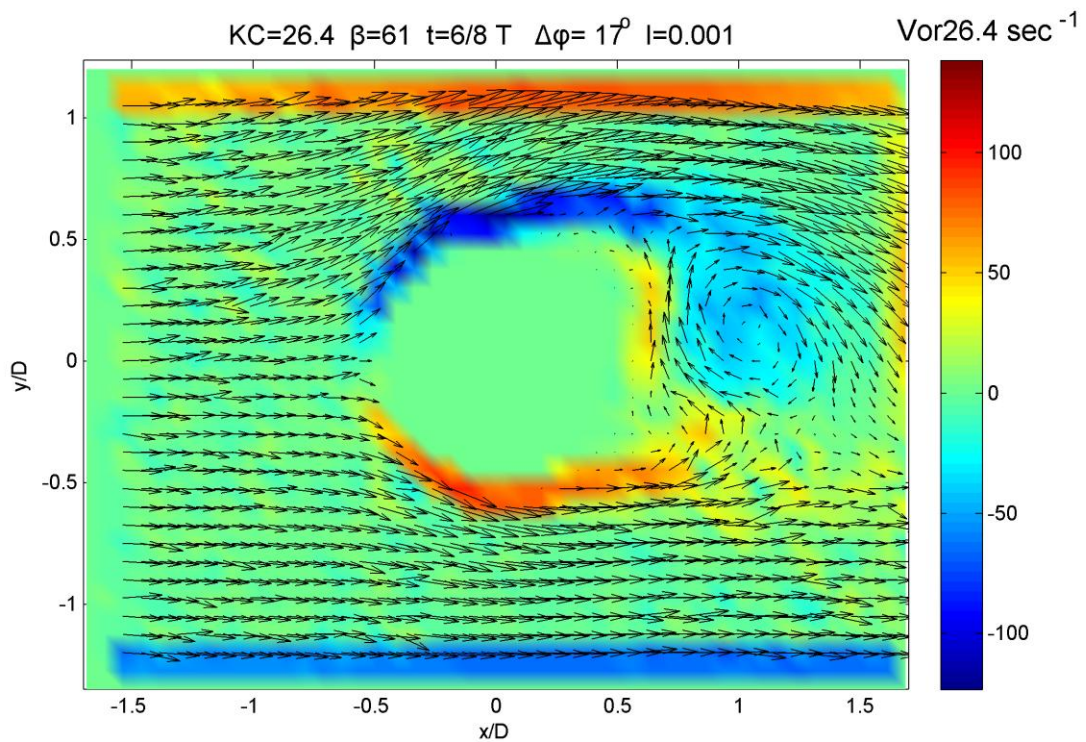
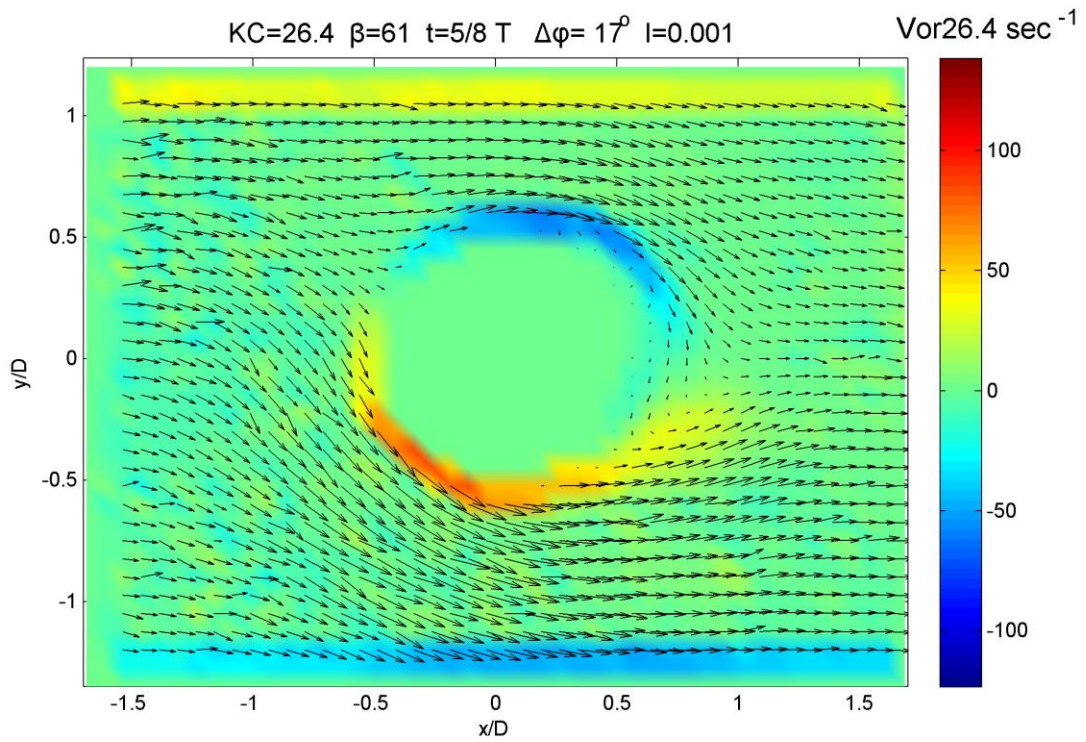
##### 4.5.2.1. Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile)

*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν την διαστατή στροβιλότητα*

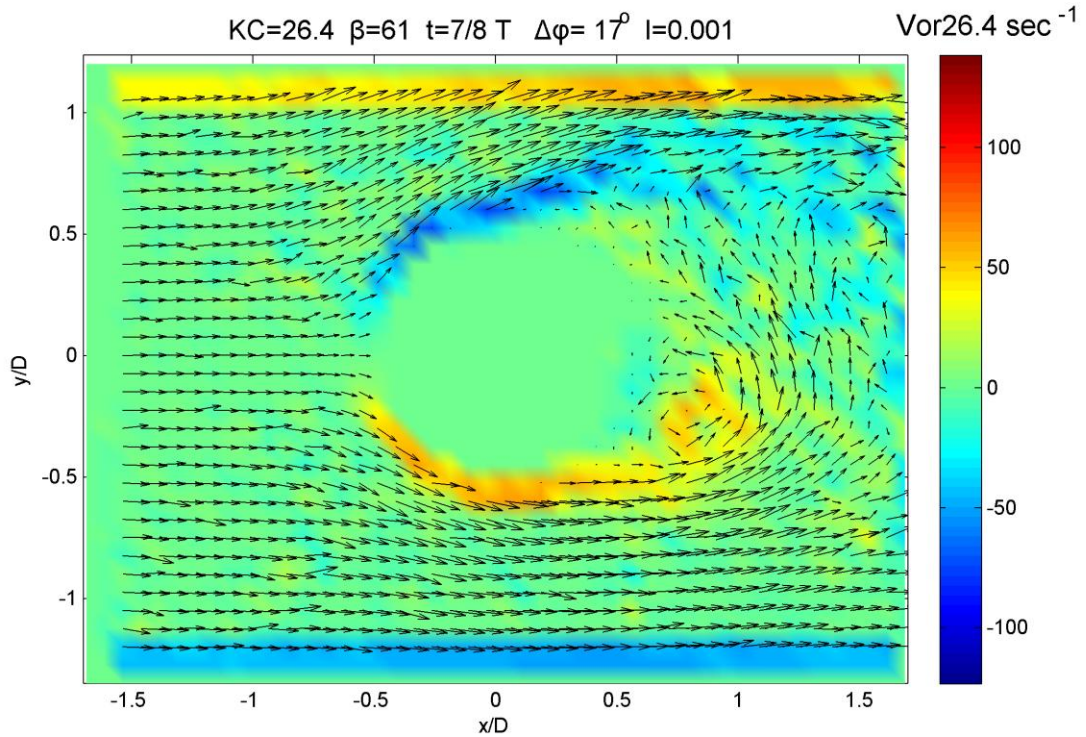




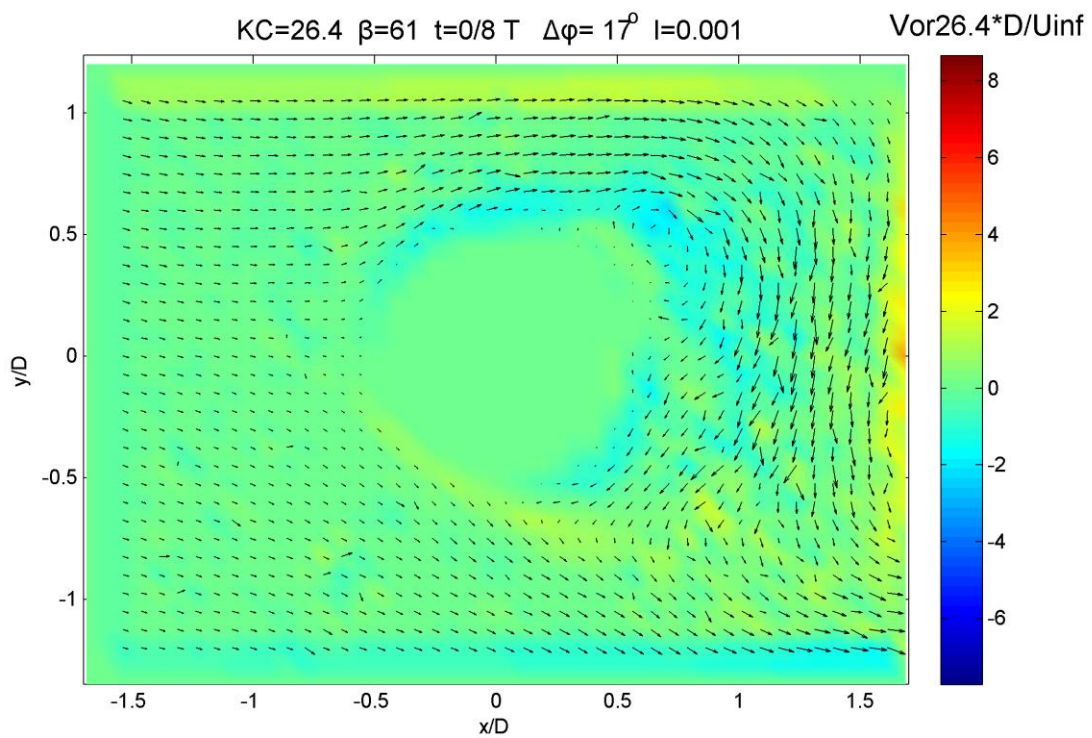


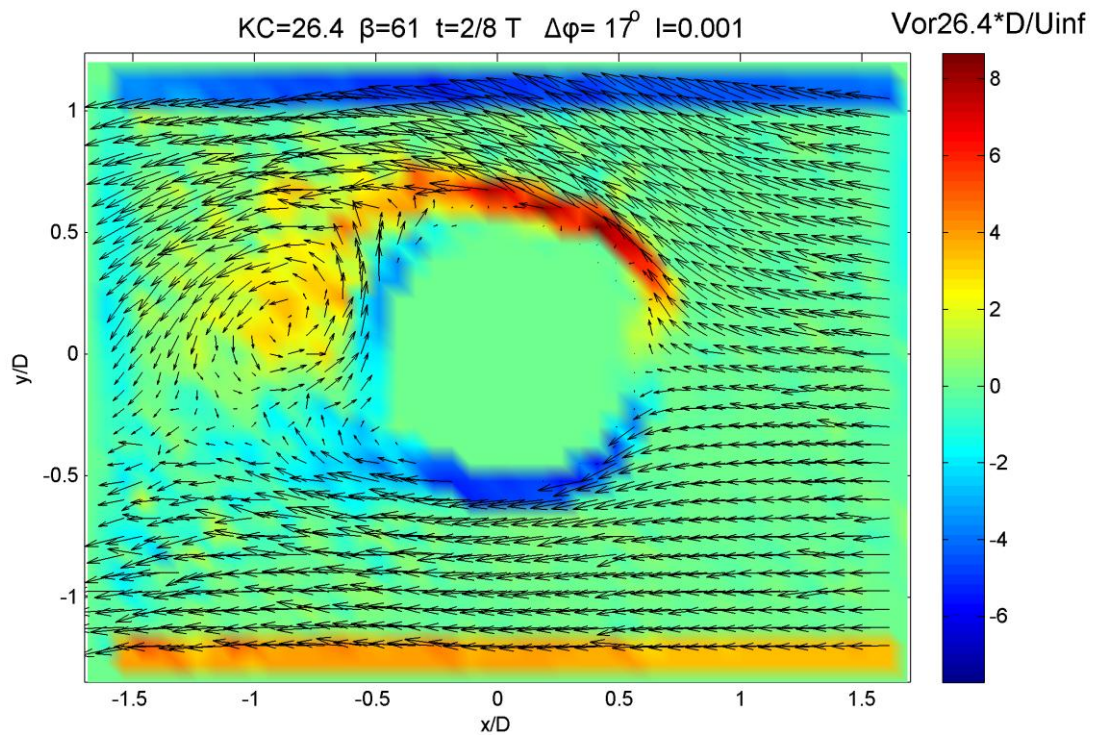
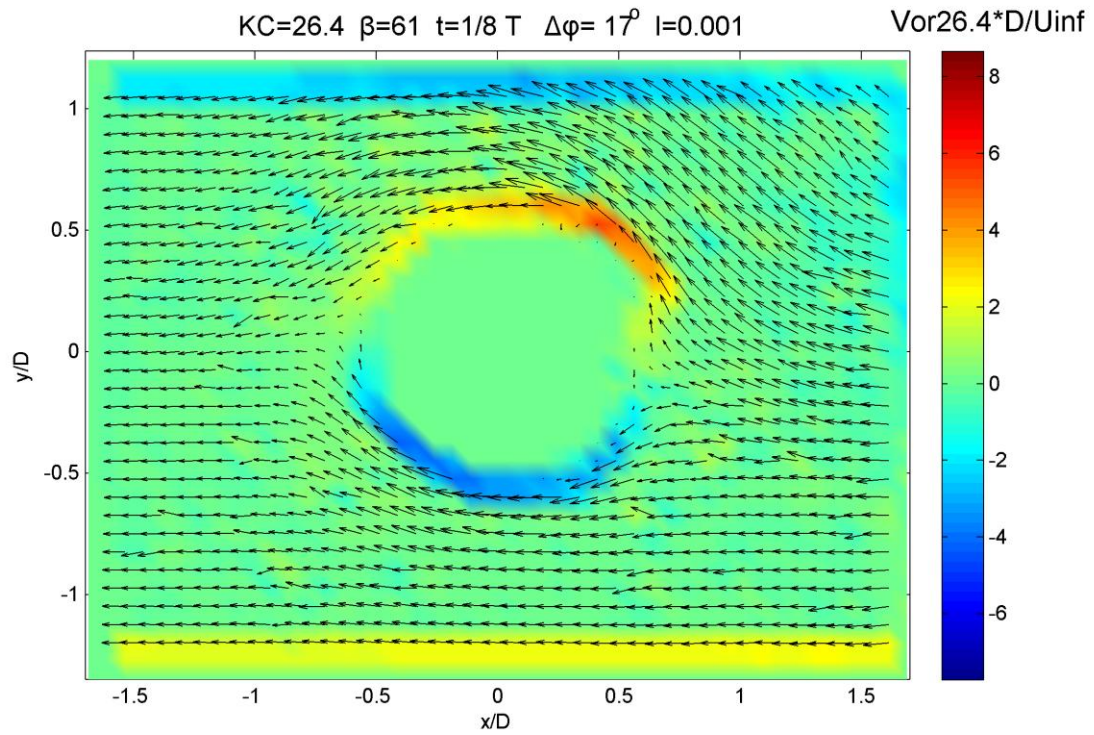


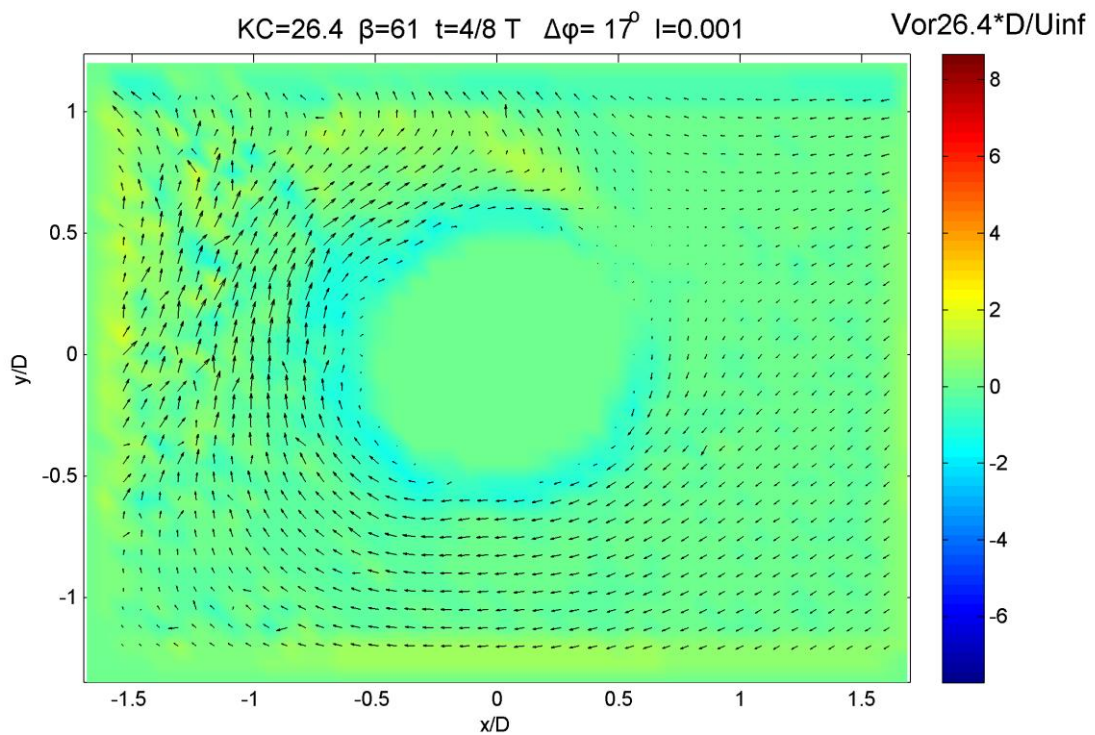
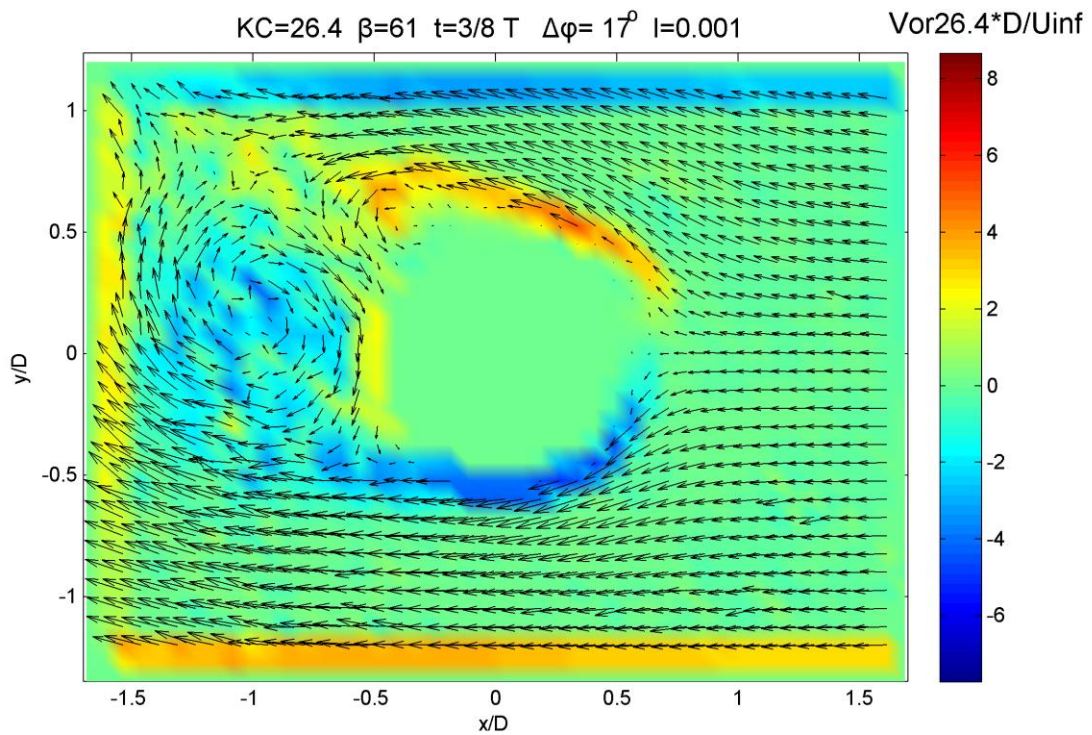


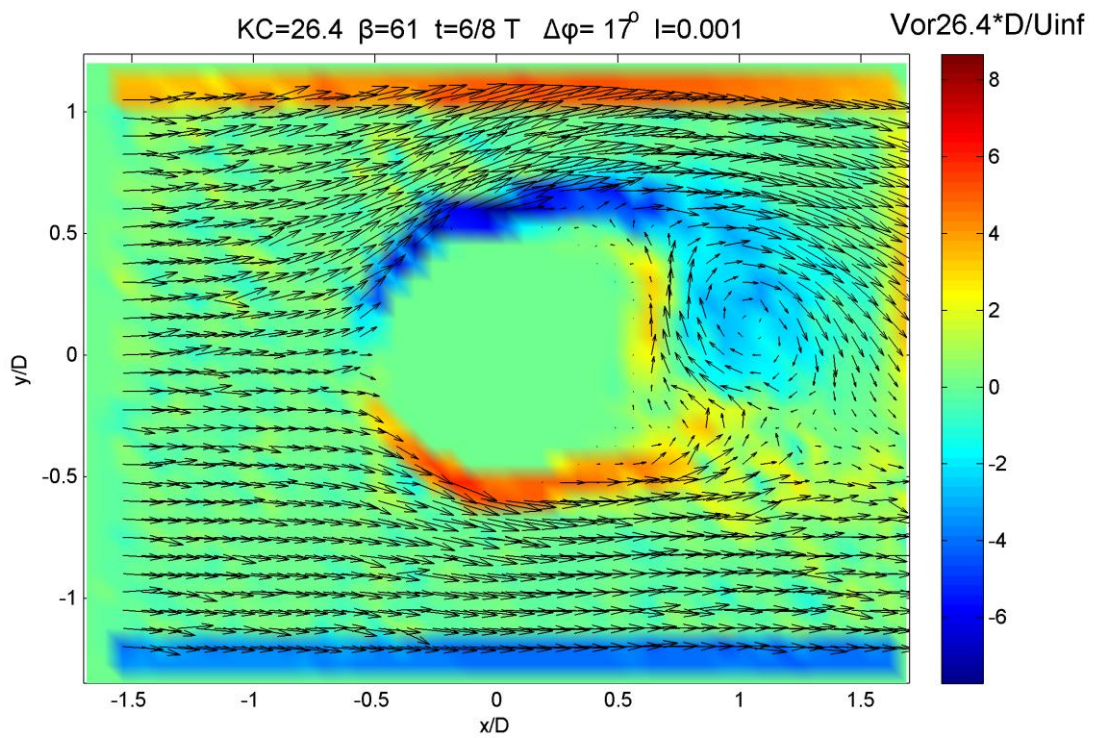
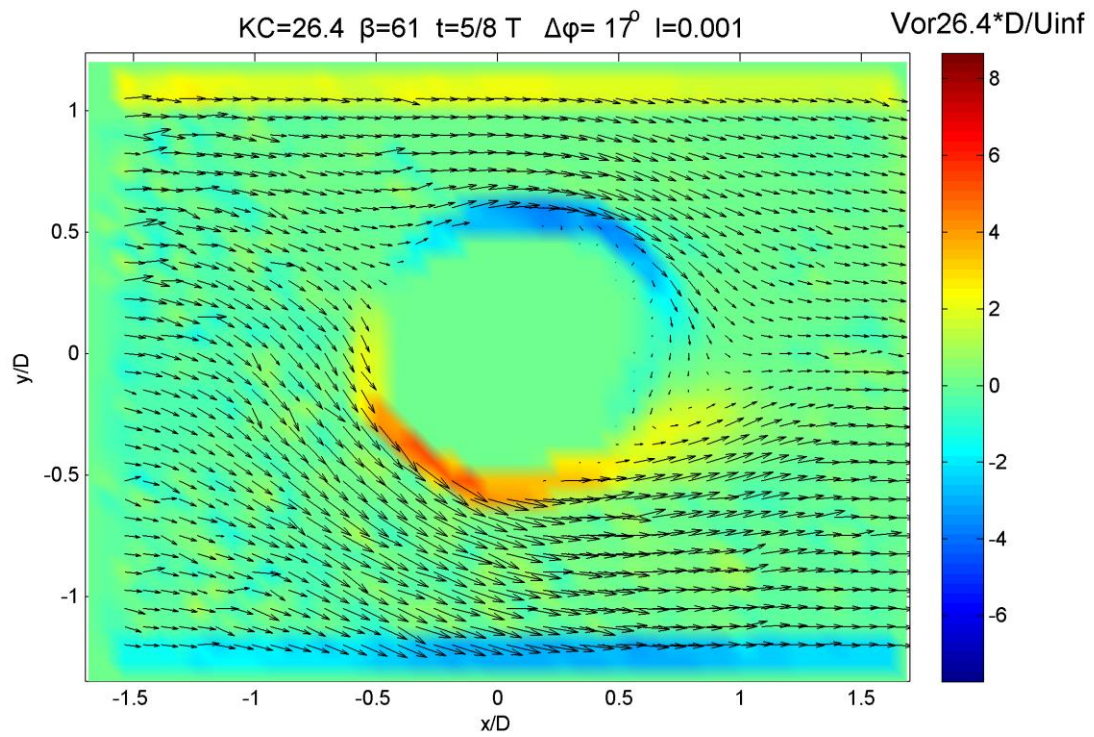


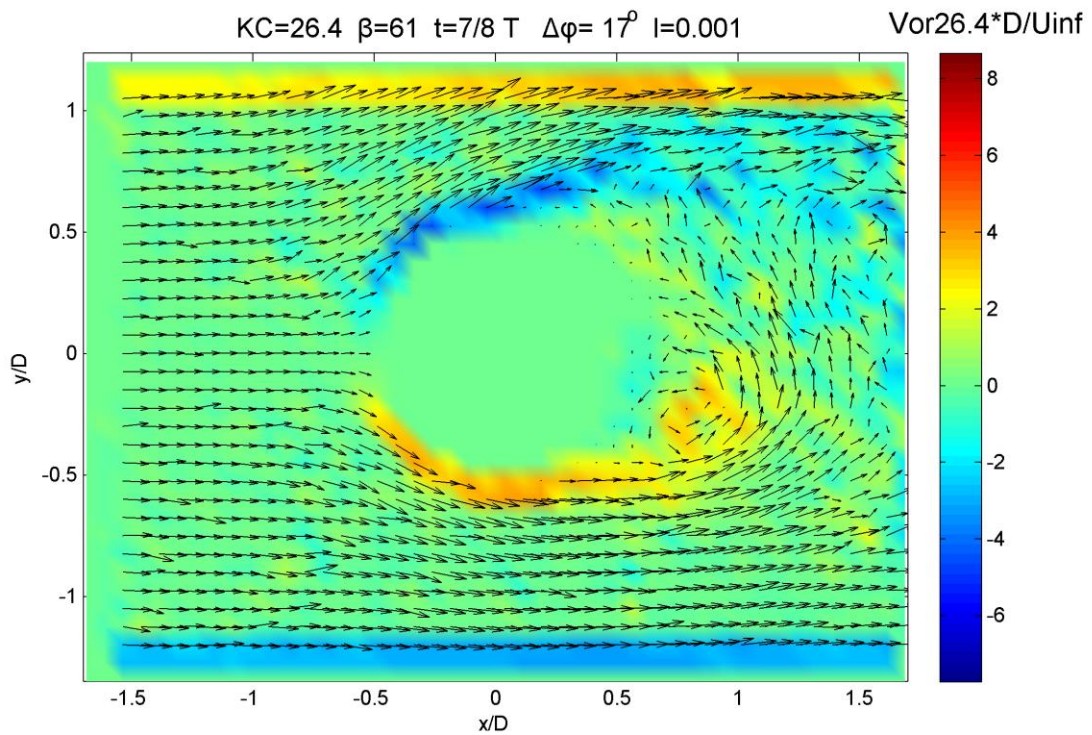
*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν την αδιάστατη στροβιλότητα*



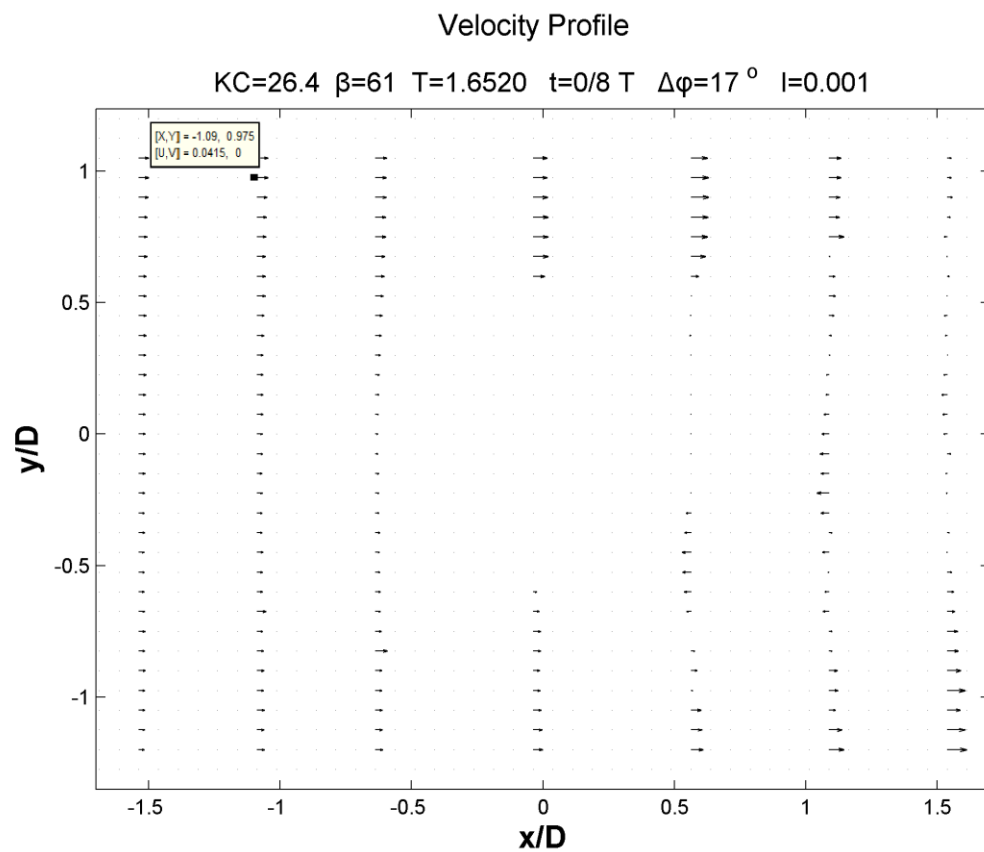


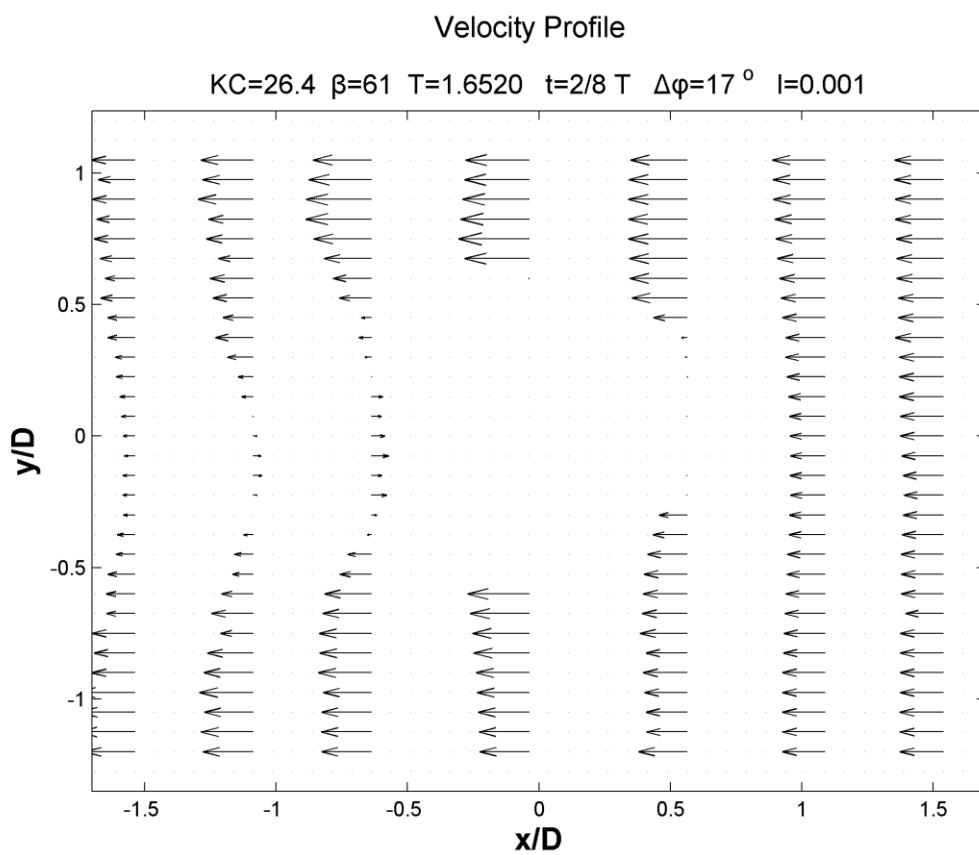
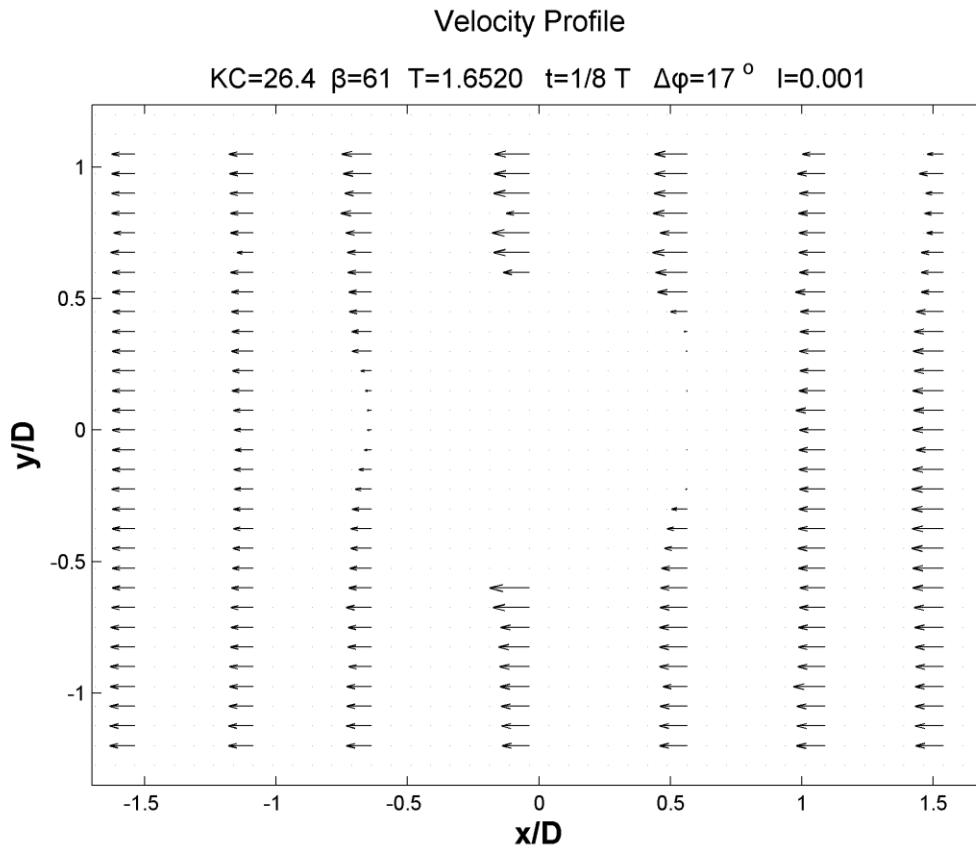


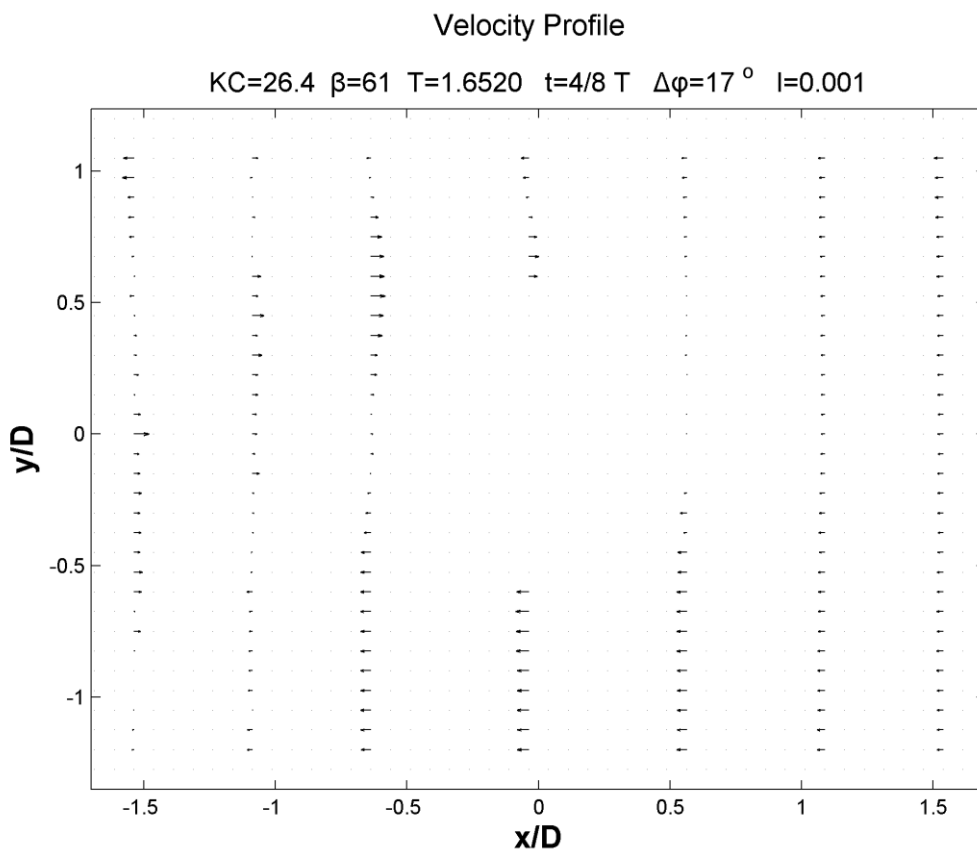
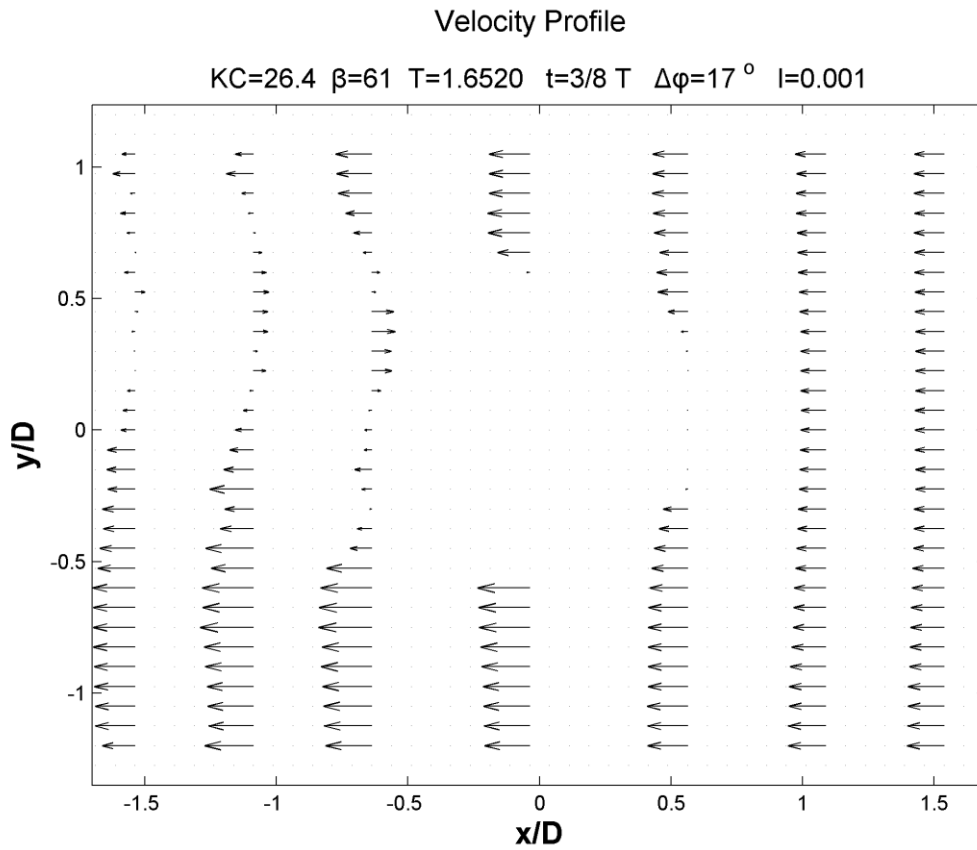


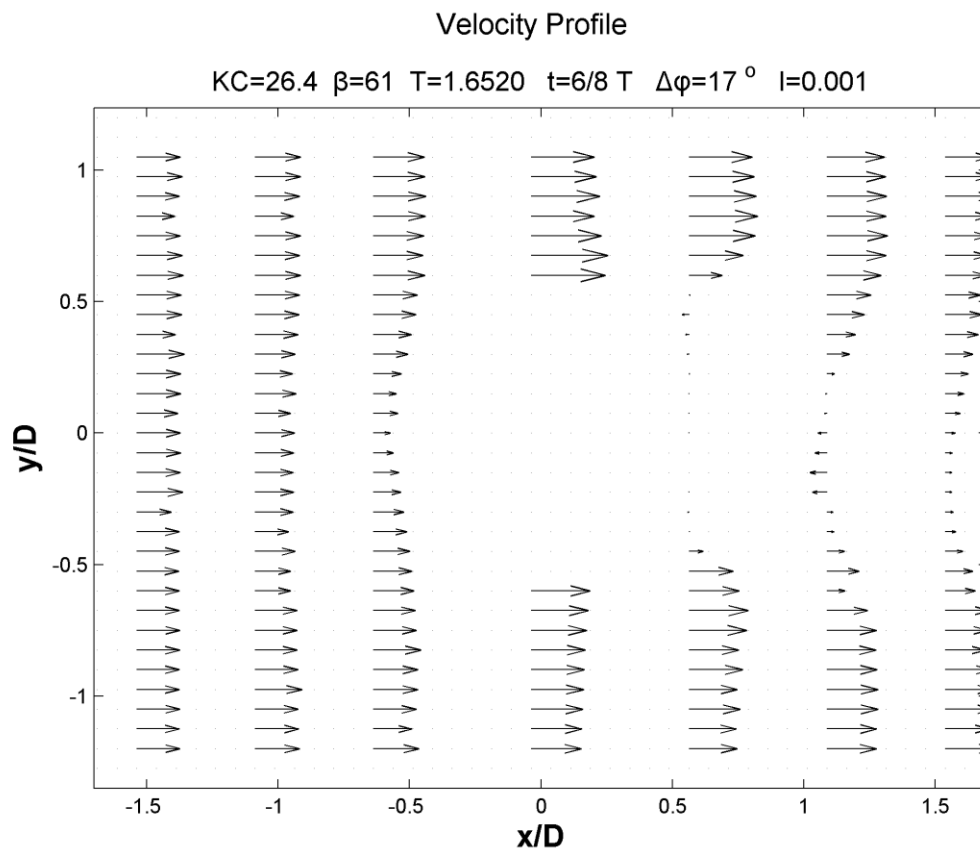
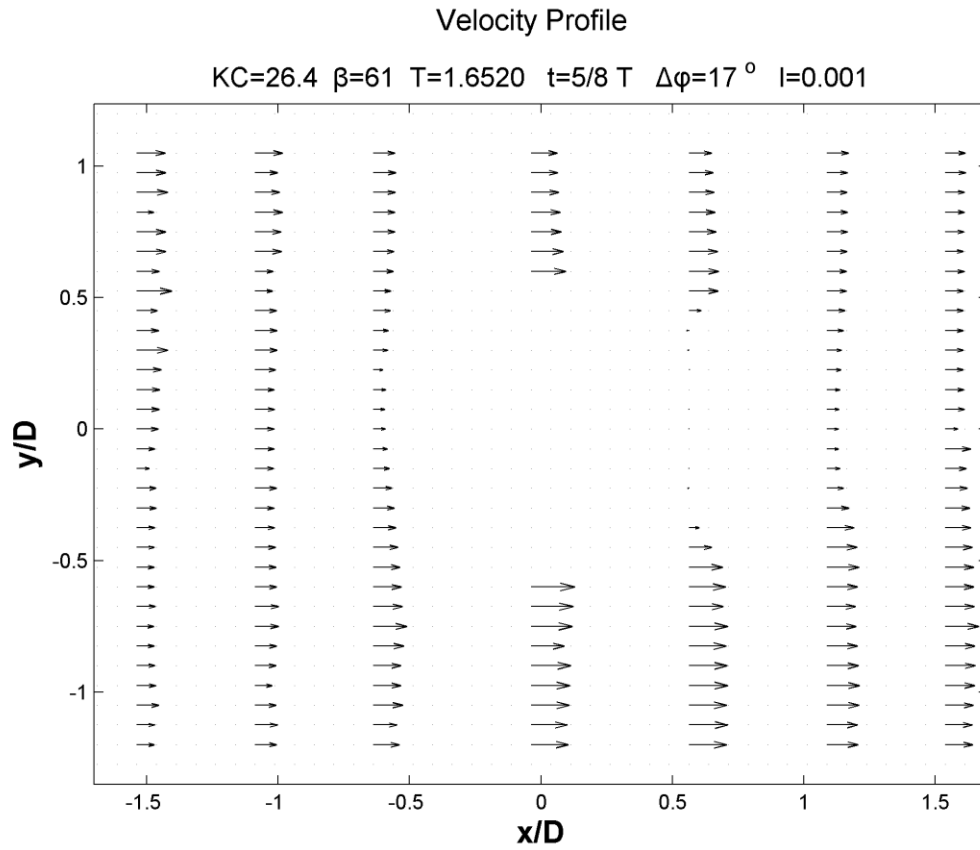


#### 4.5.2.2. Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile)

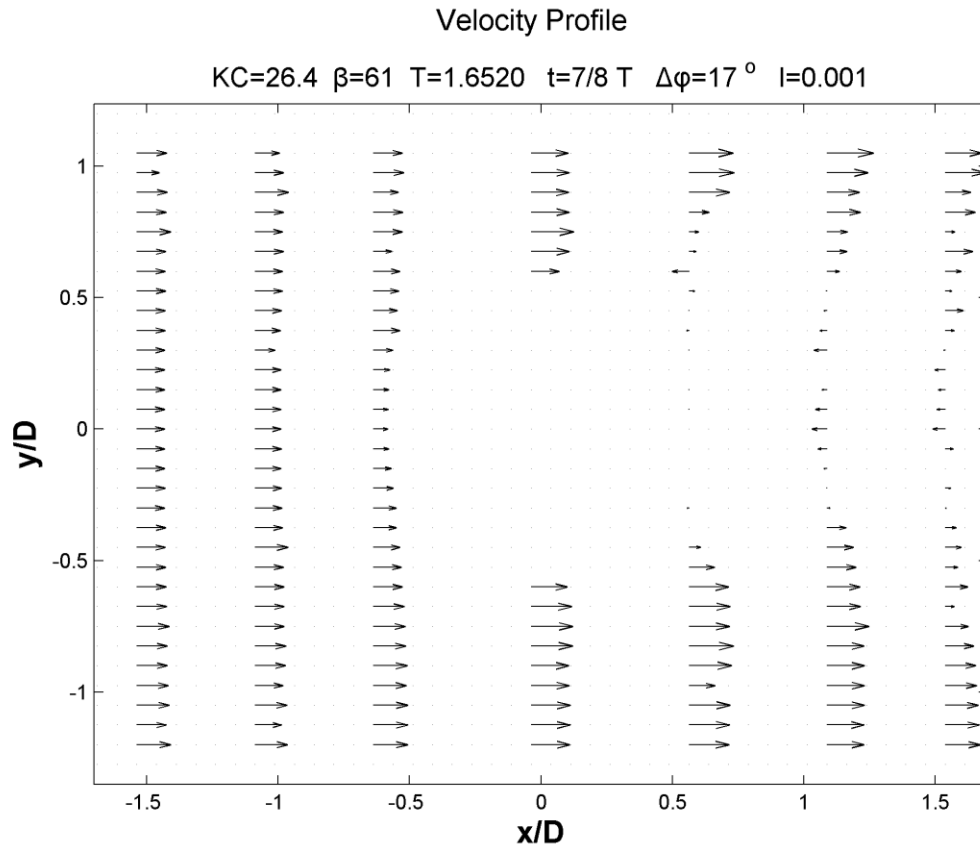




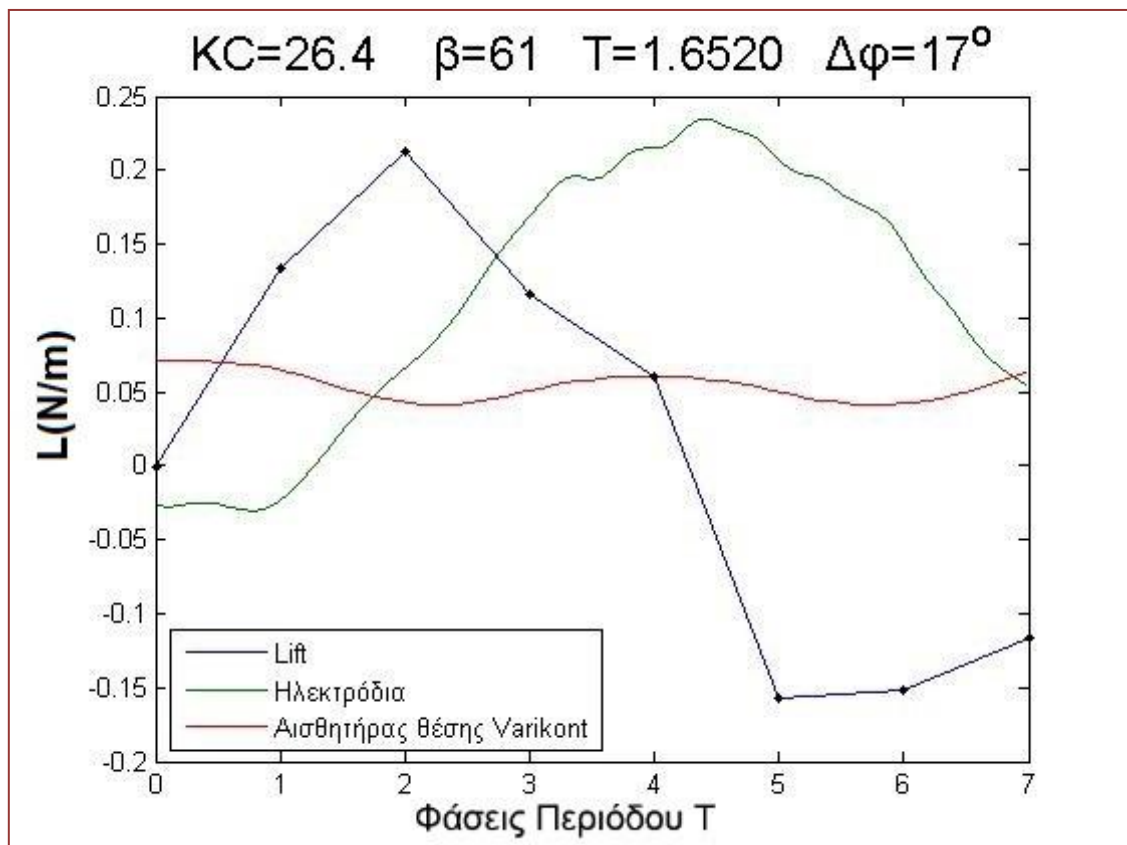


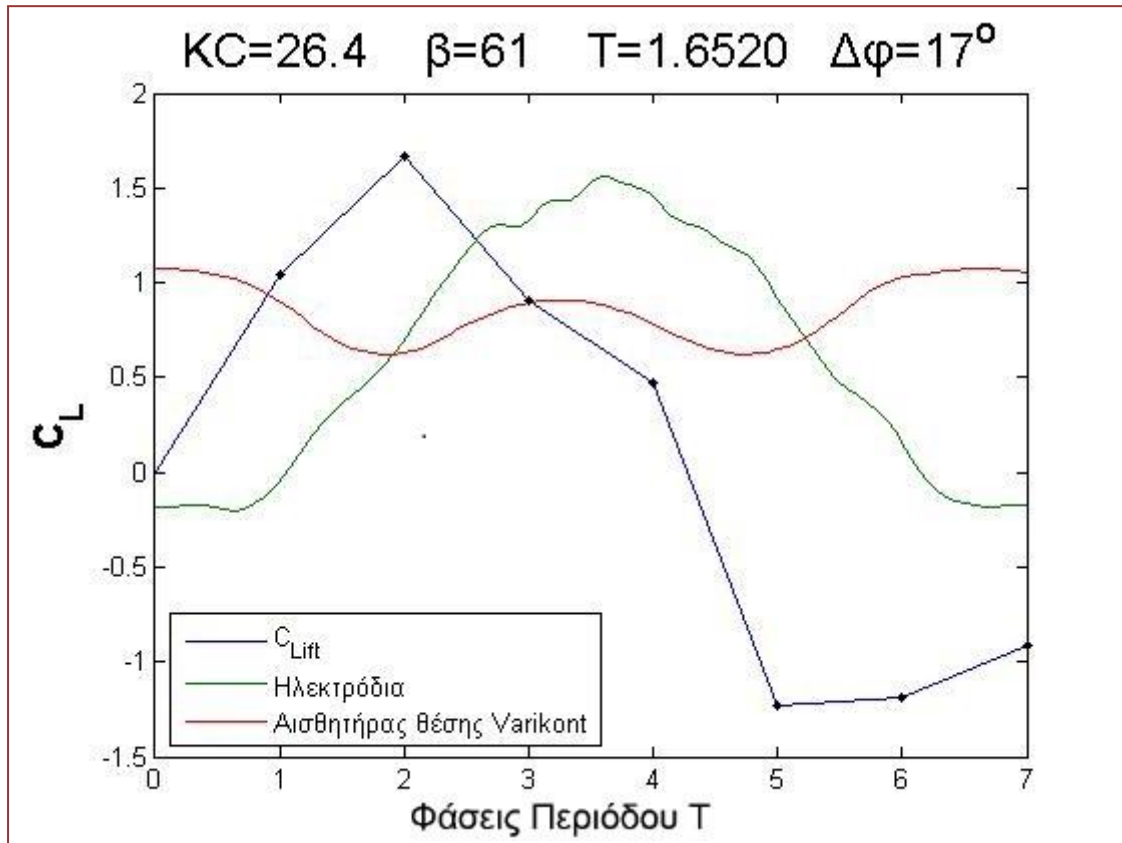






#### 4.5.2.3. Δύναμη Άνωσης $L$



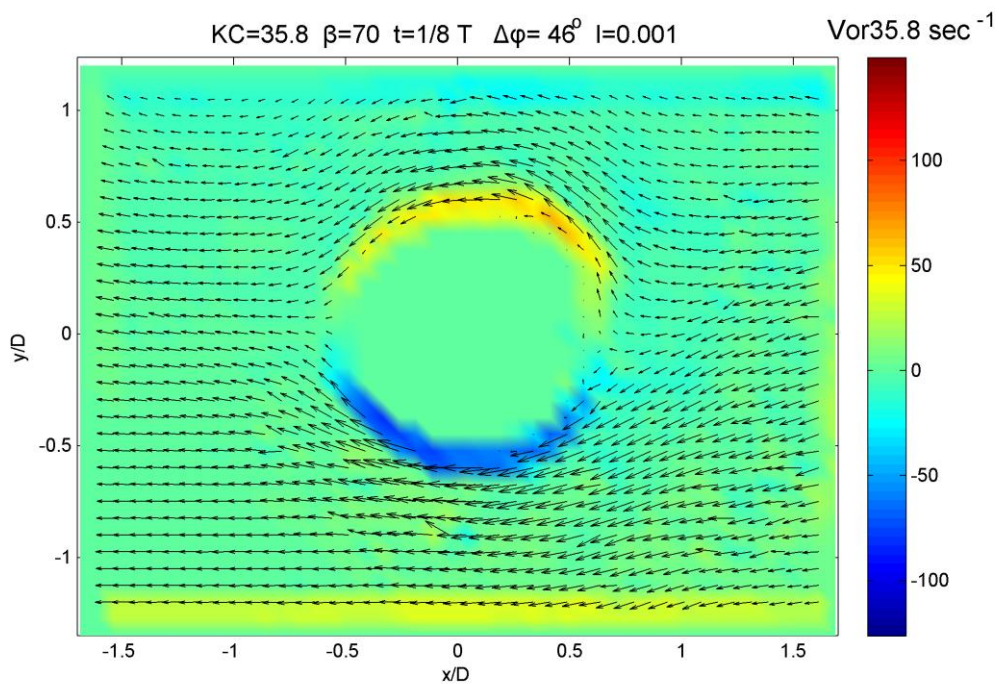
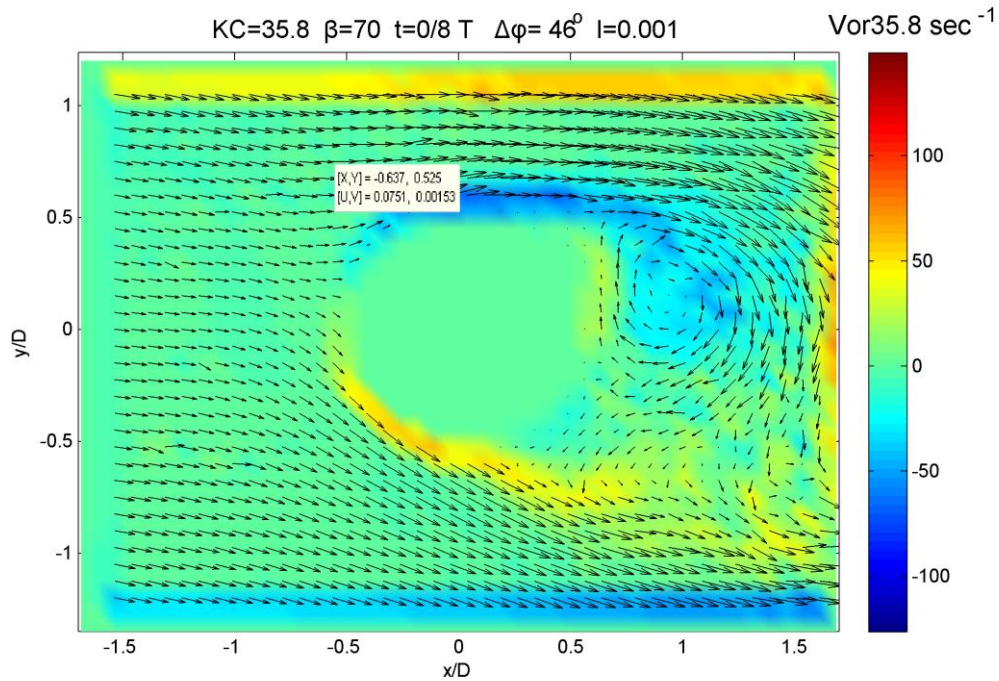
4.5.2.4. Συντελεστής Άνωσης  $C_L$ 

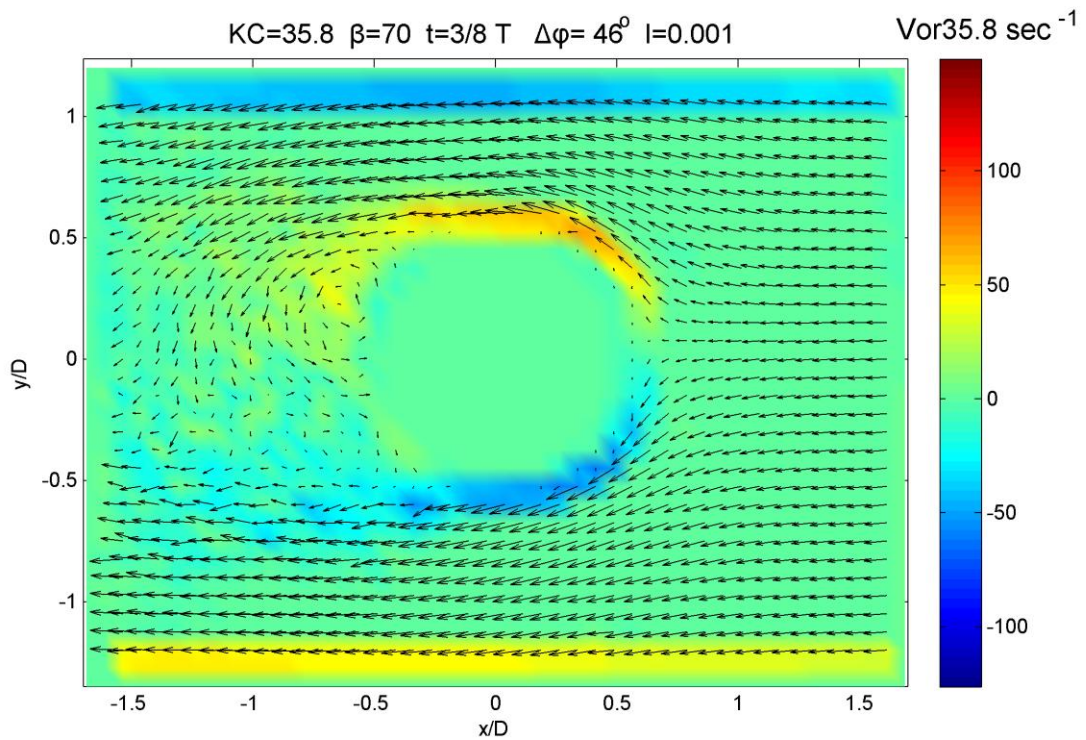
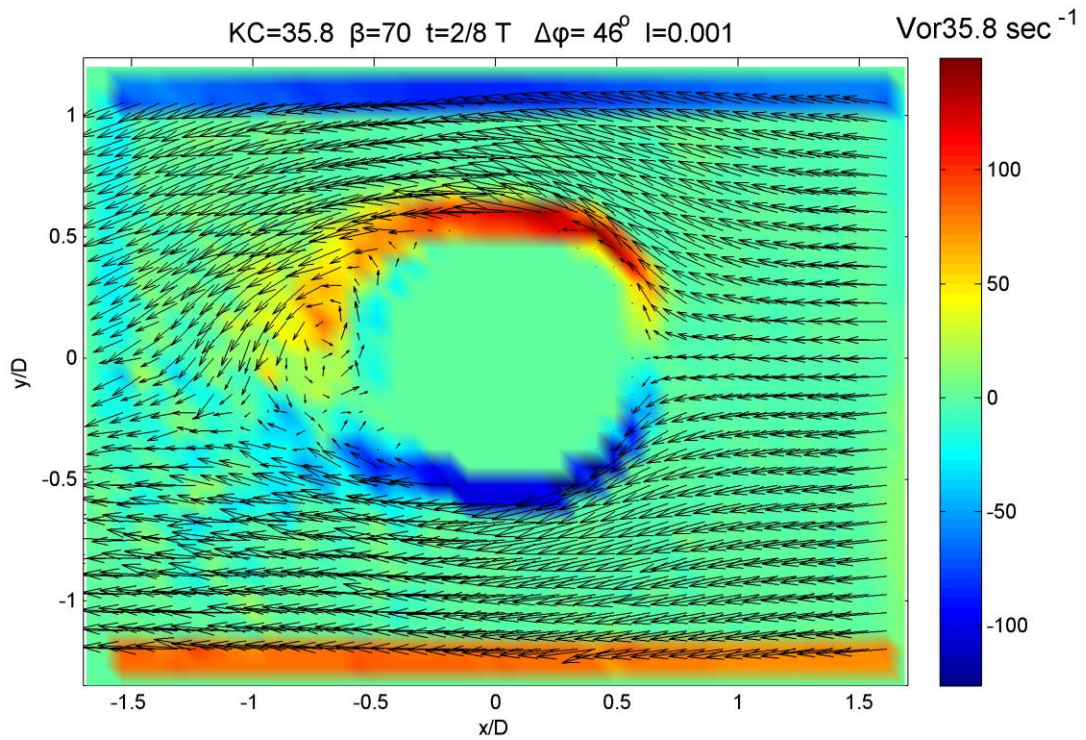
Για  $KC=26.4$  και  $\beta=61$  κατά την εμφάνιση της μέγιστης ταχύτητας του νερού σχηματίζονται πάλι δύο δίνες, με διαφορά χρόνου μεταξύ τους, σε κάθε μισό κύκλο, όπου τα κέντρα τους βρίσκονται σχεδόν στη διεύθυνση της ροής. Το ζεύγος αυτό αποτελείται από δύο αντίθετης φοράς δίνες, όχι ίδιου μέτρου, όπου λίγο πριν την αλλαγή της φοράς αν και εξασθενημένες, απομακρύνονται από το κύλινδρο προς τα πάνω και διαγώνια.

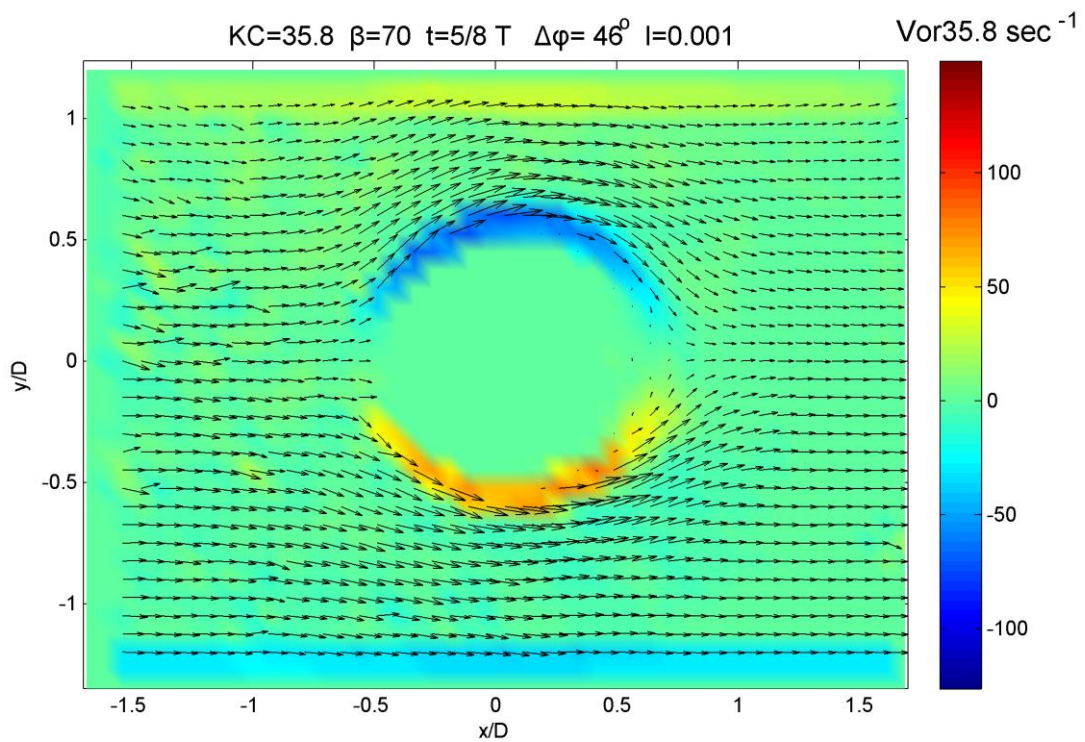
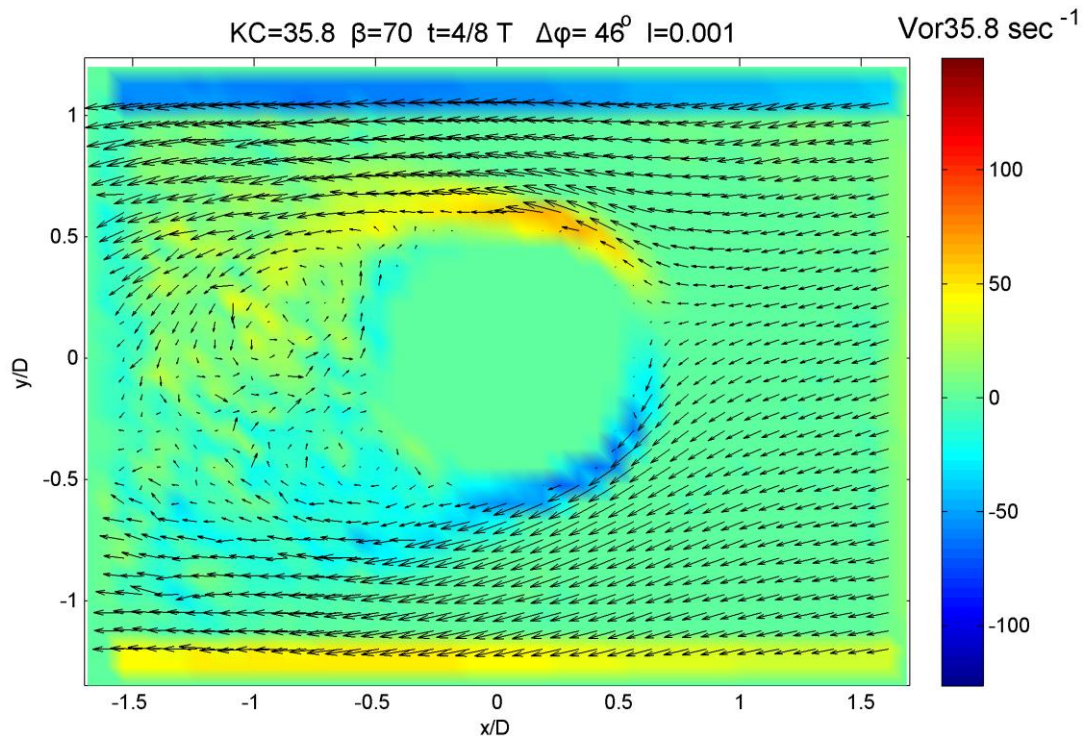
Όσον αφορά τη δύναμη και το συντελεστή άνωσης παρατηρείται ότι επηρεάζεται περισσότερο από τη ταχύτητα του νερού και τη διεύθυνσή της παρά από τις δίνες που σχηματίστηκαν ύστερα από την εμφάνιση των μέγιστων ταχυτήτων.

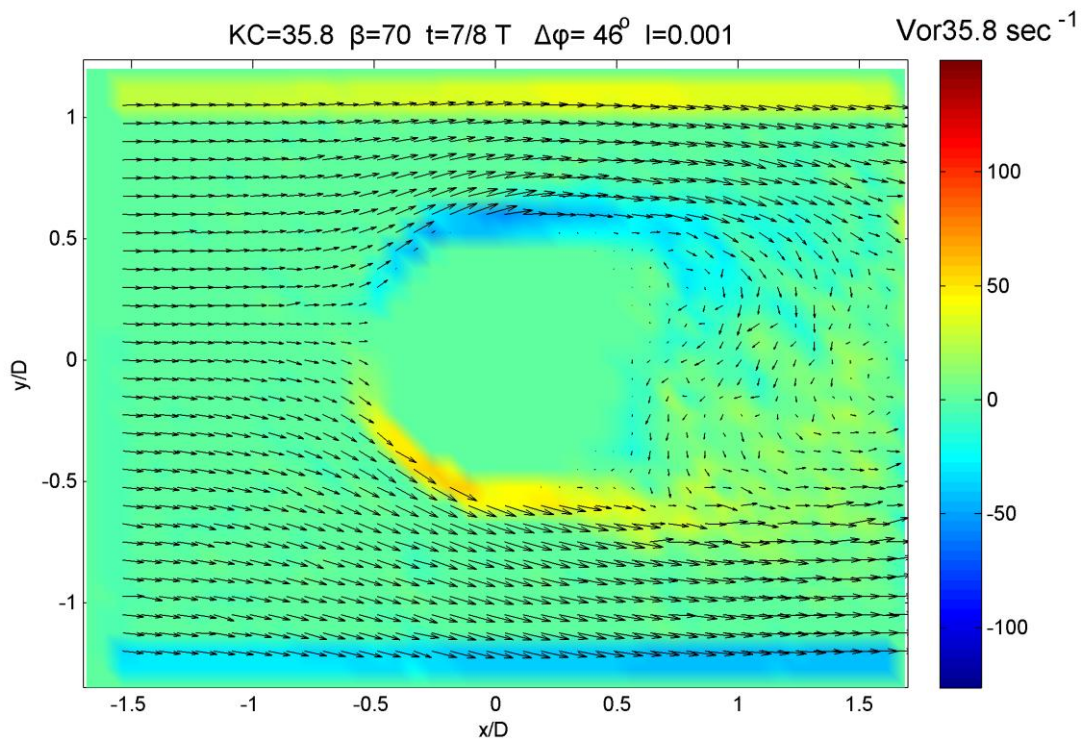
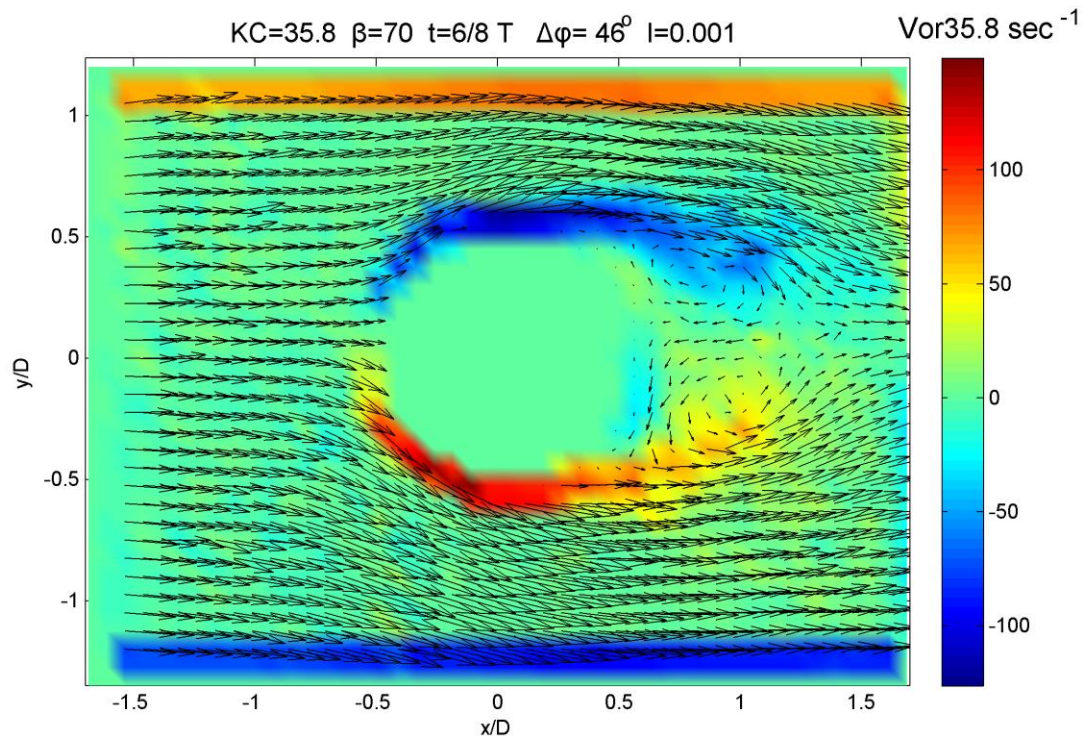
**4.5.3.  $KC=35.8$ ,  $\beta=70$ ,  $T=1.4200\text{sec}$  και  $\Delta\varphi=46^\circ$  .**4.5.3.1. Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile)

*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν τη διαστατή στροβιλότητα*

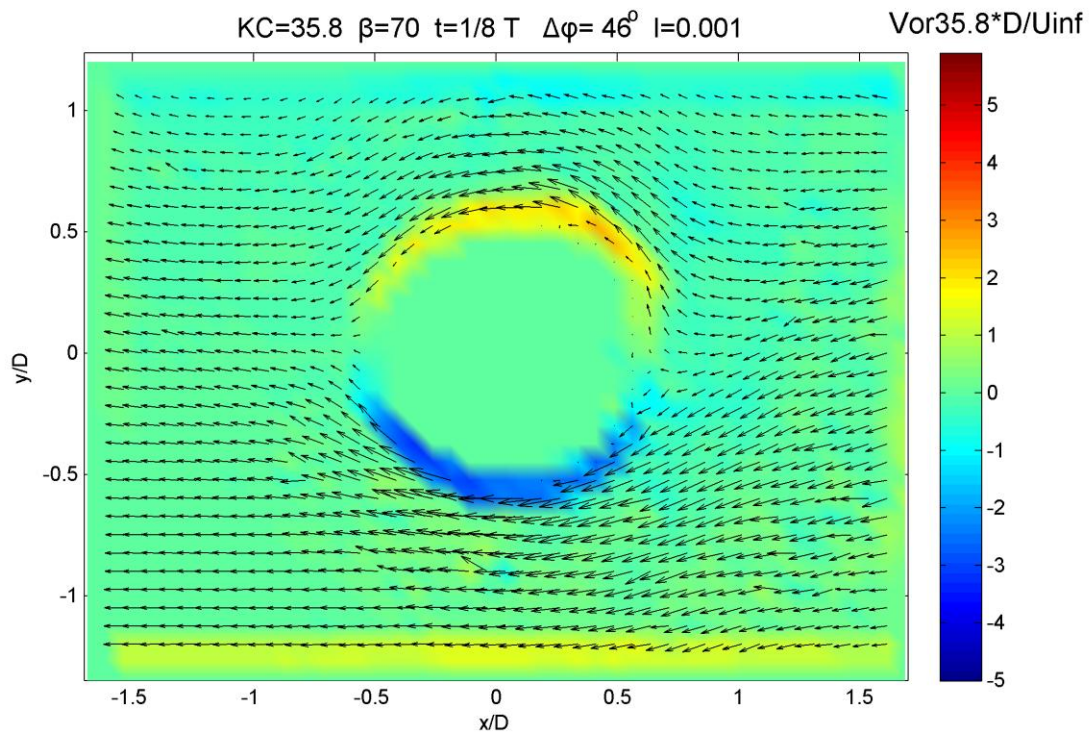
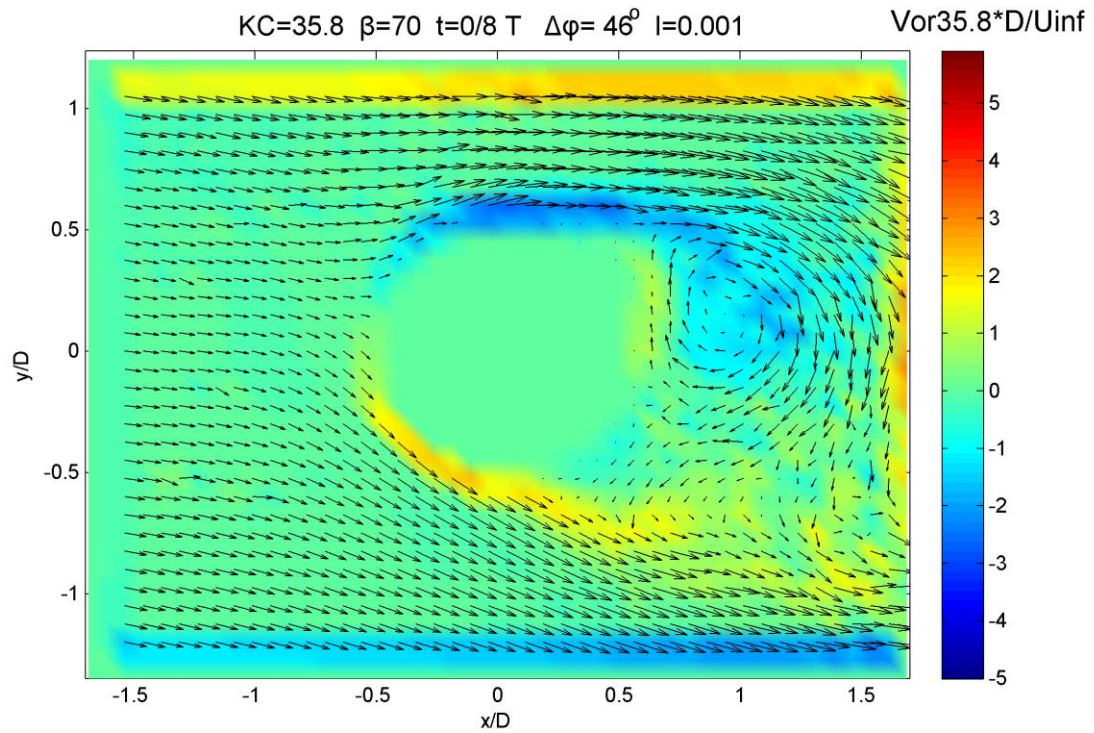


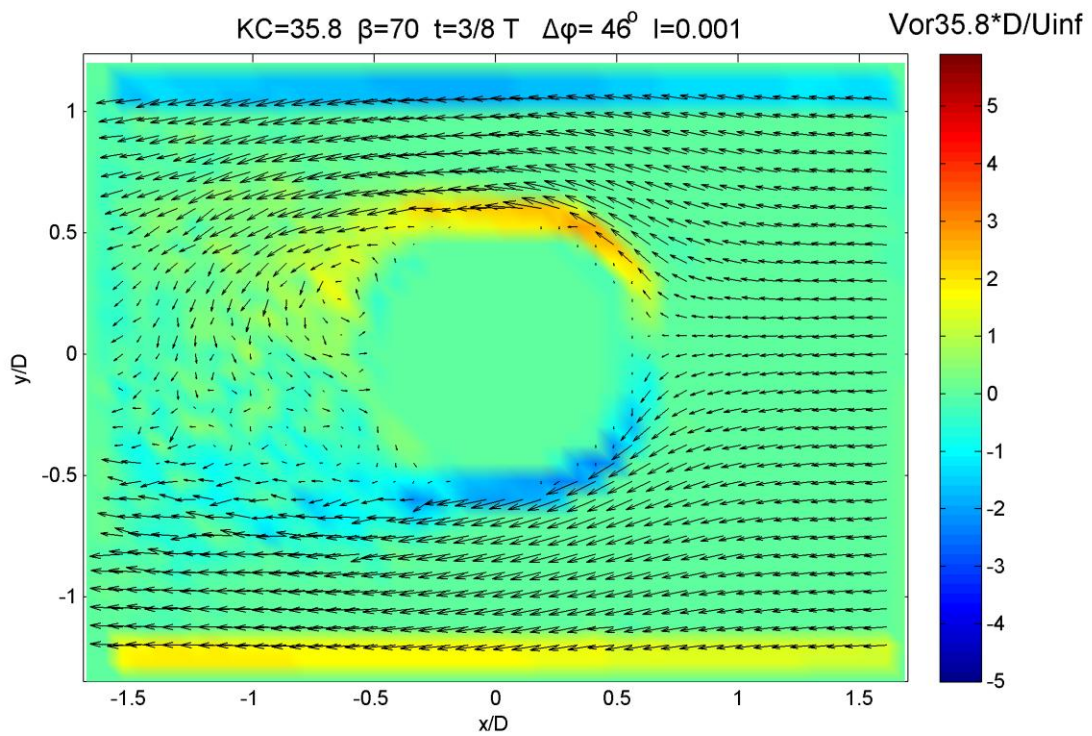
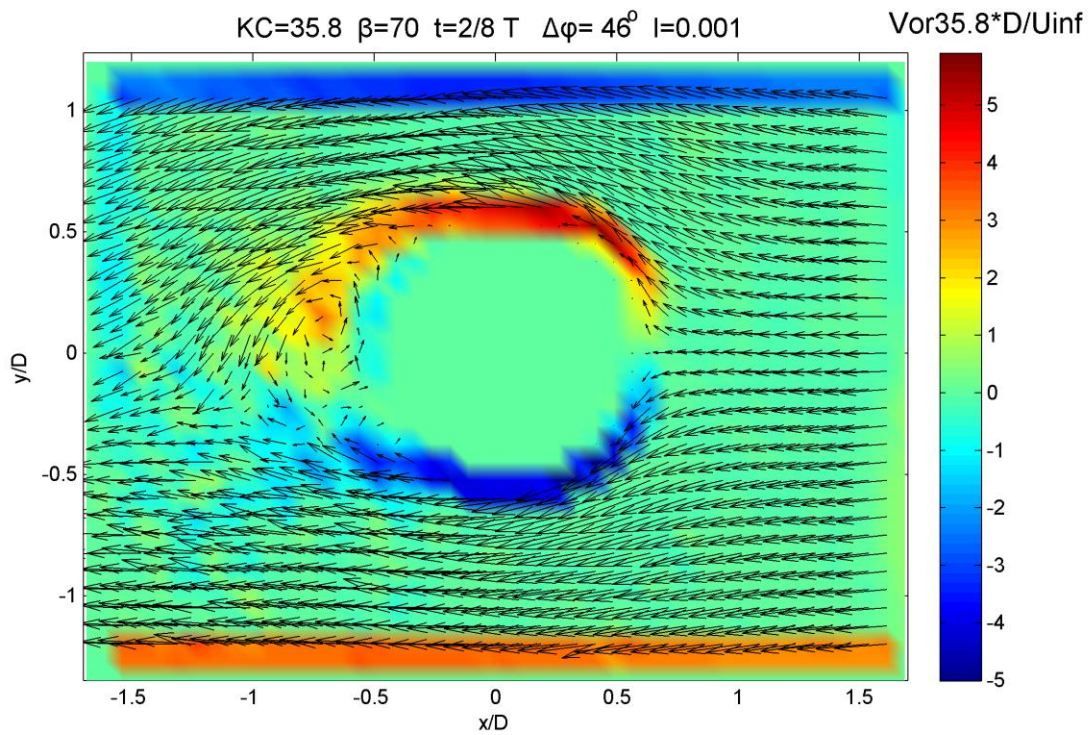




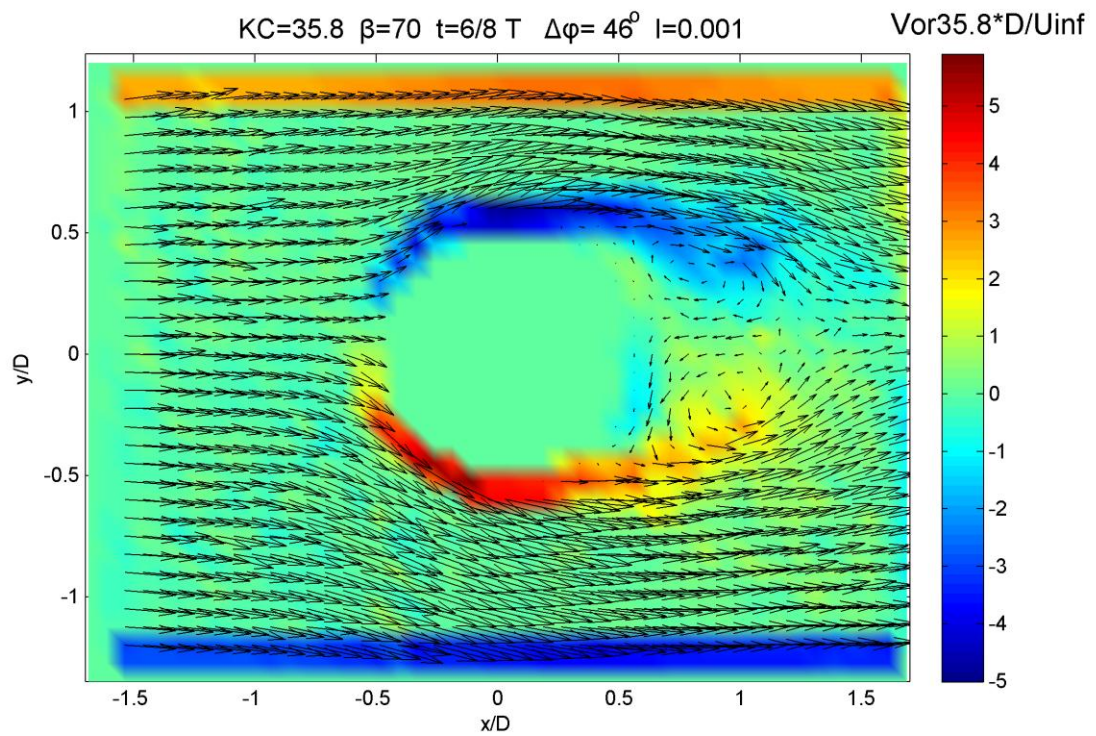
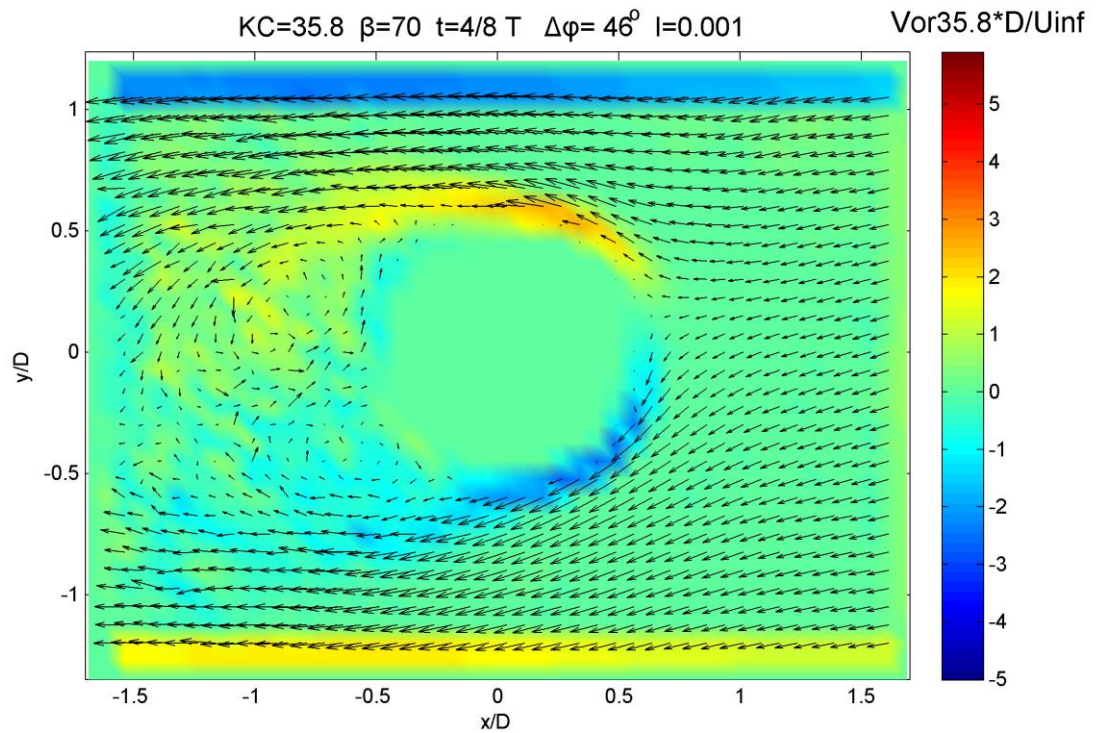


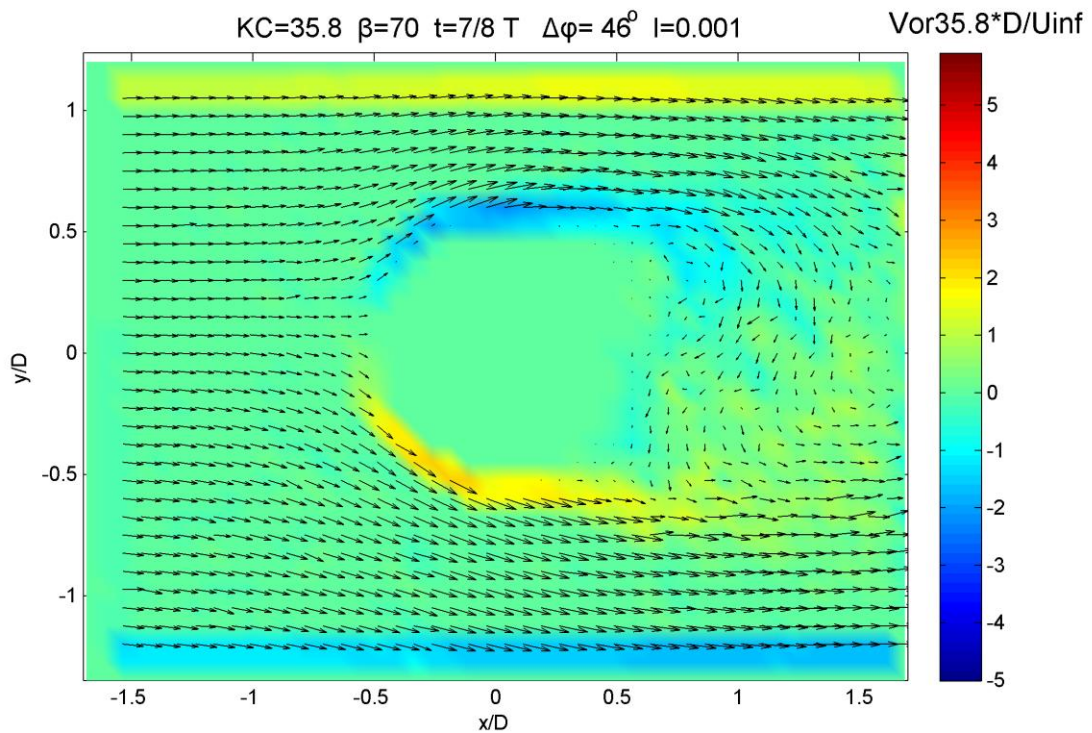
*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν τη αδιαστατή στροβιλότητα*



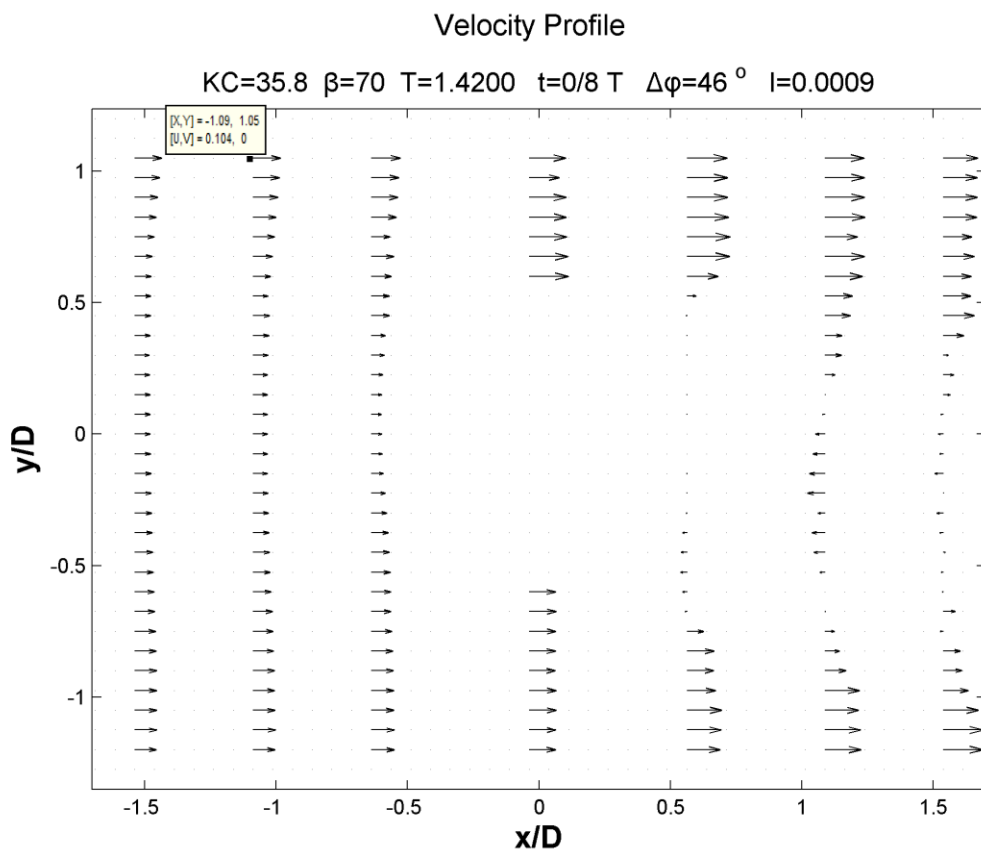


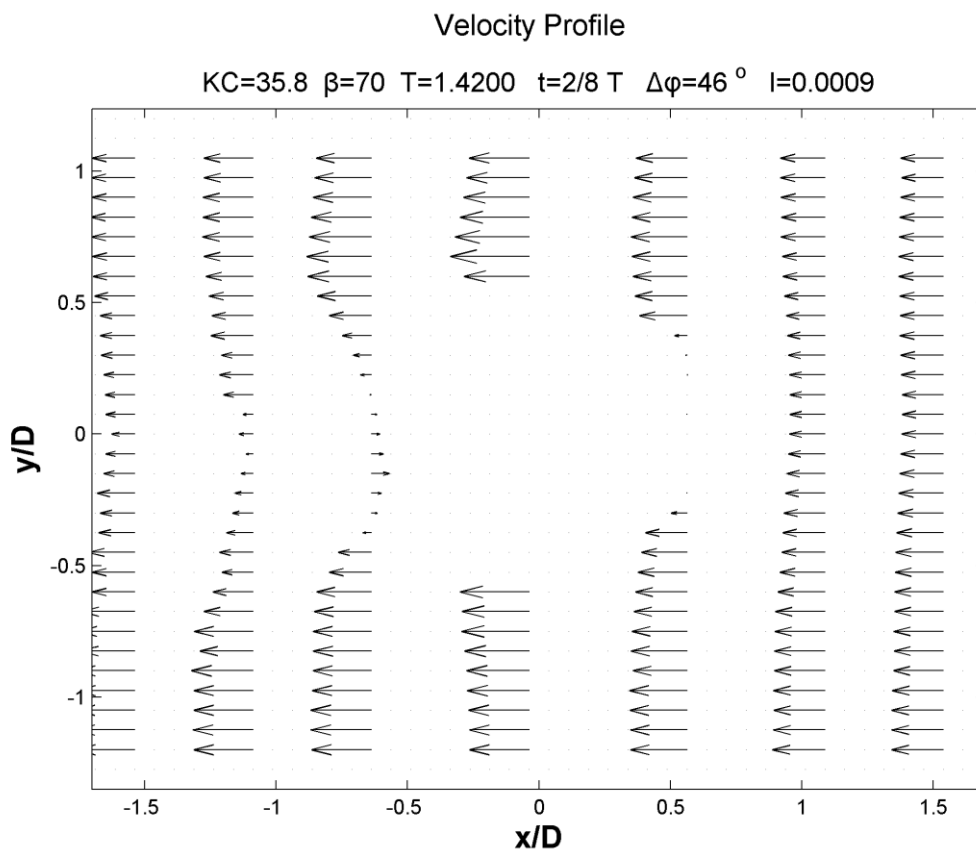
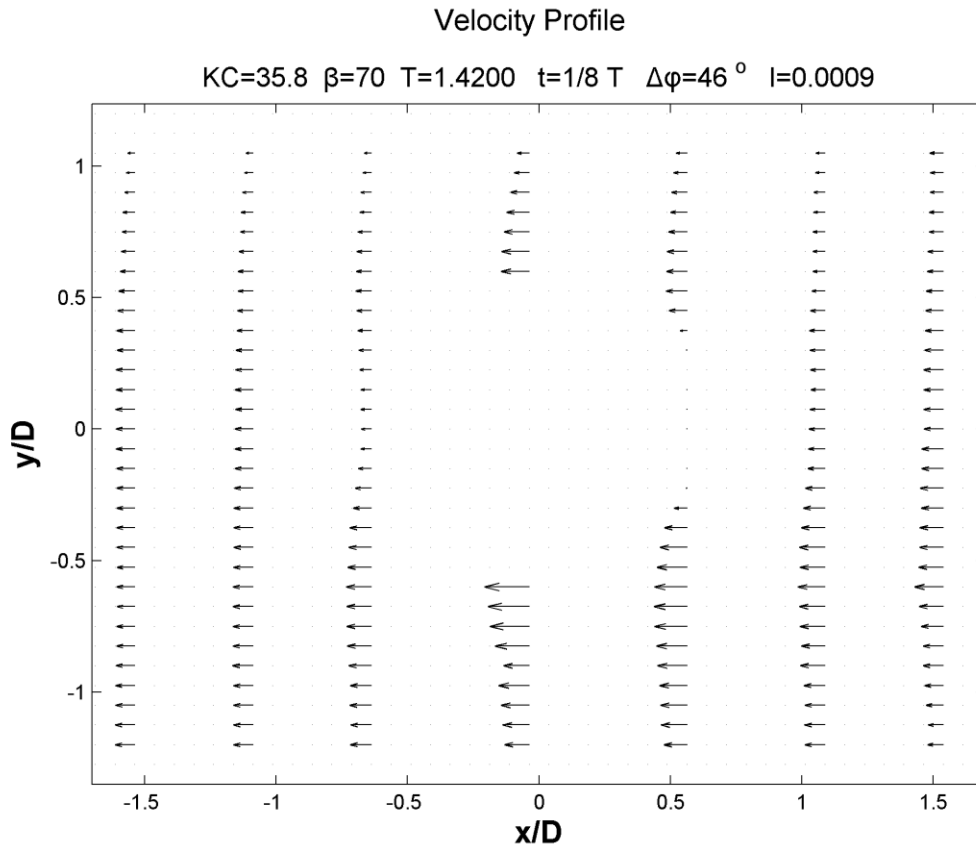


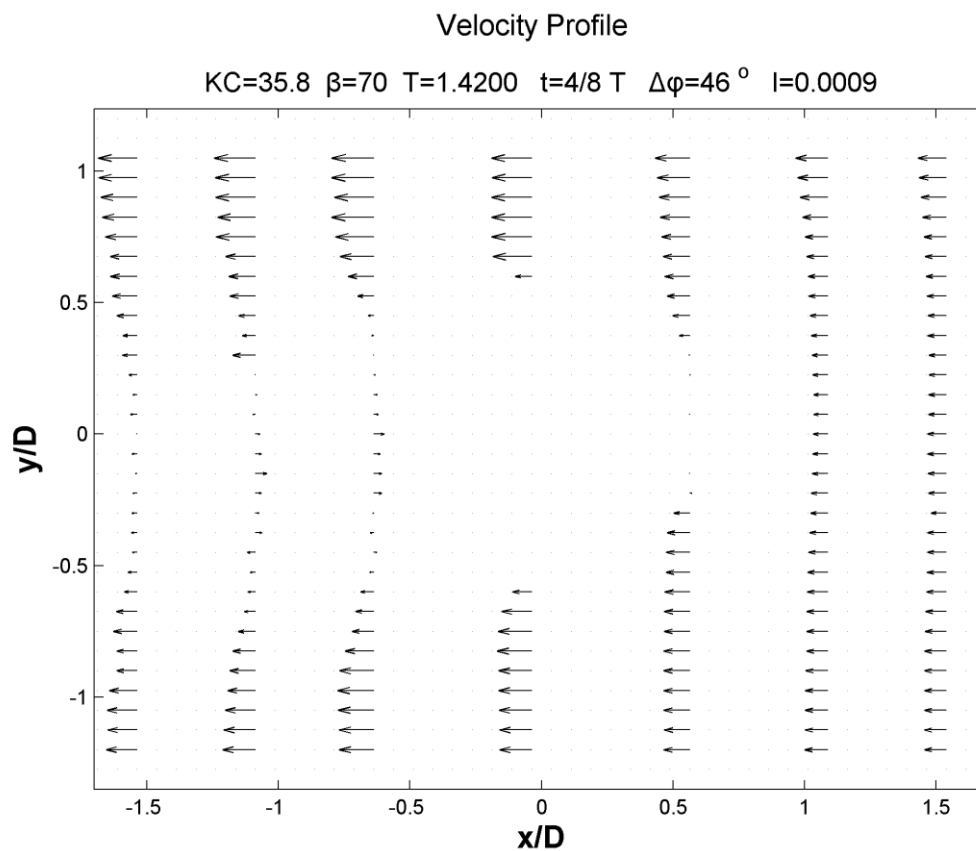
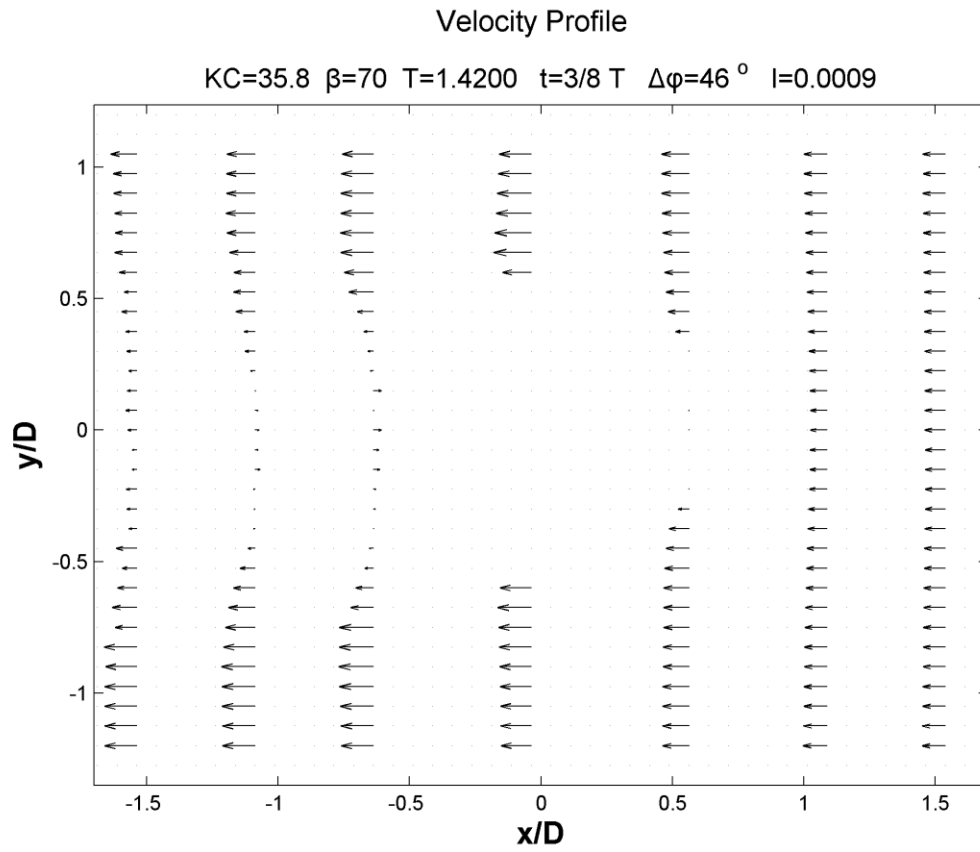


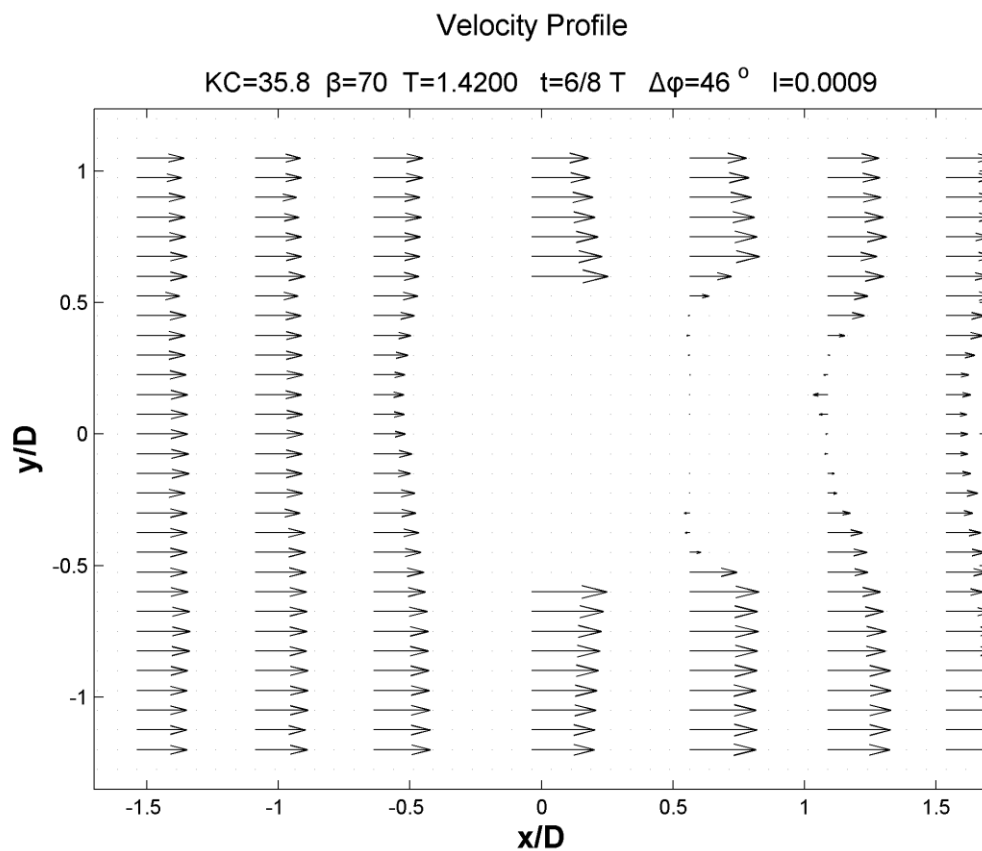
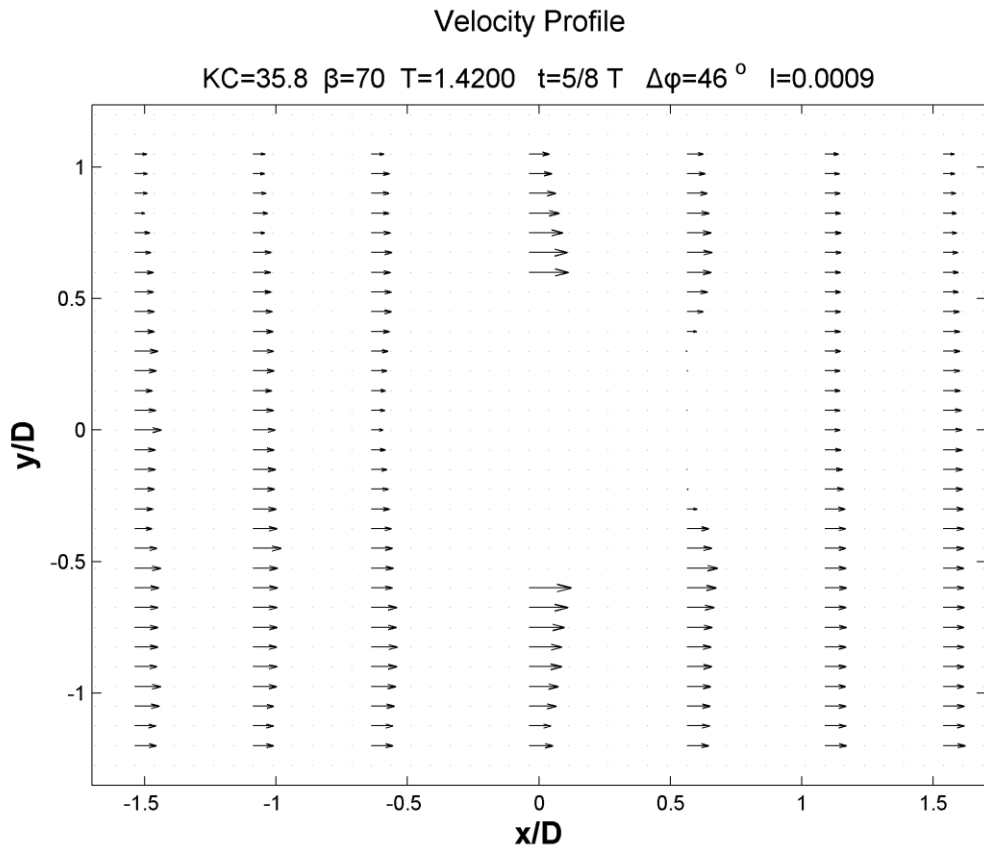


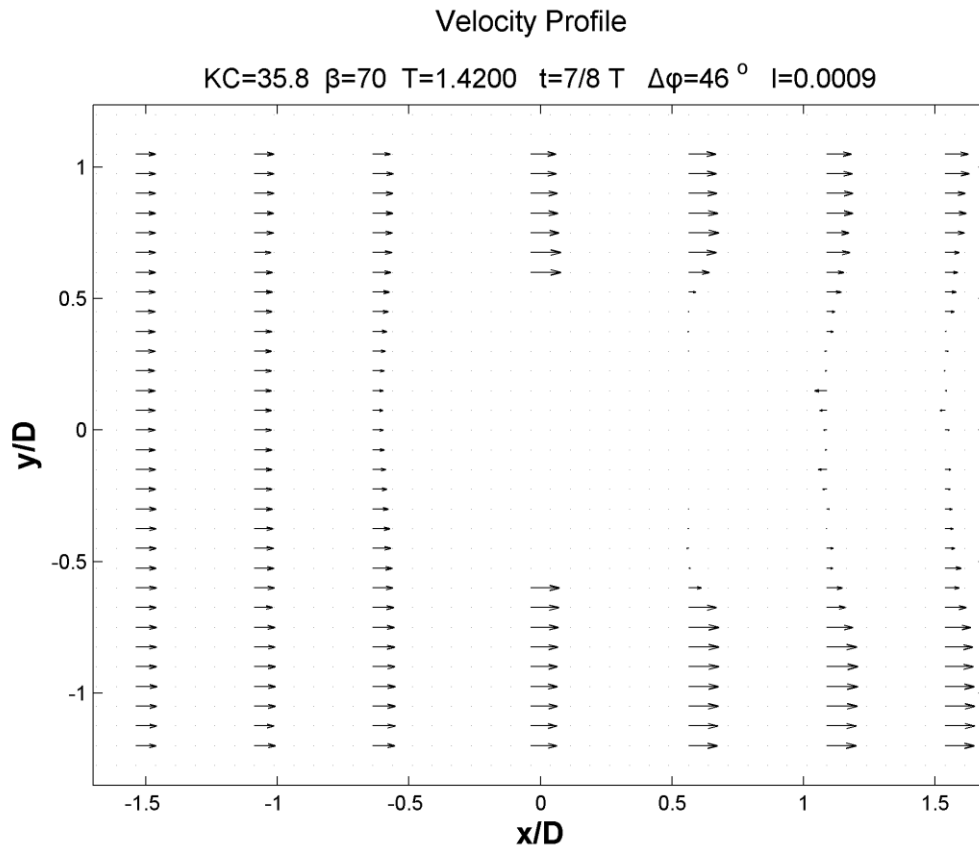
#### 4.5.3.2. Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile)



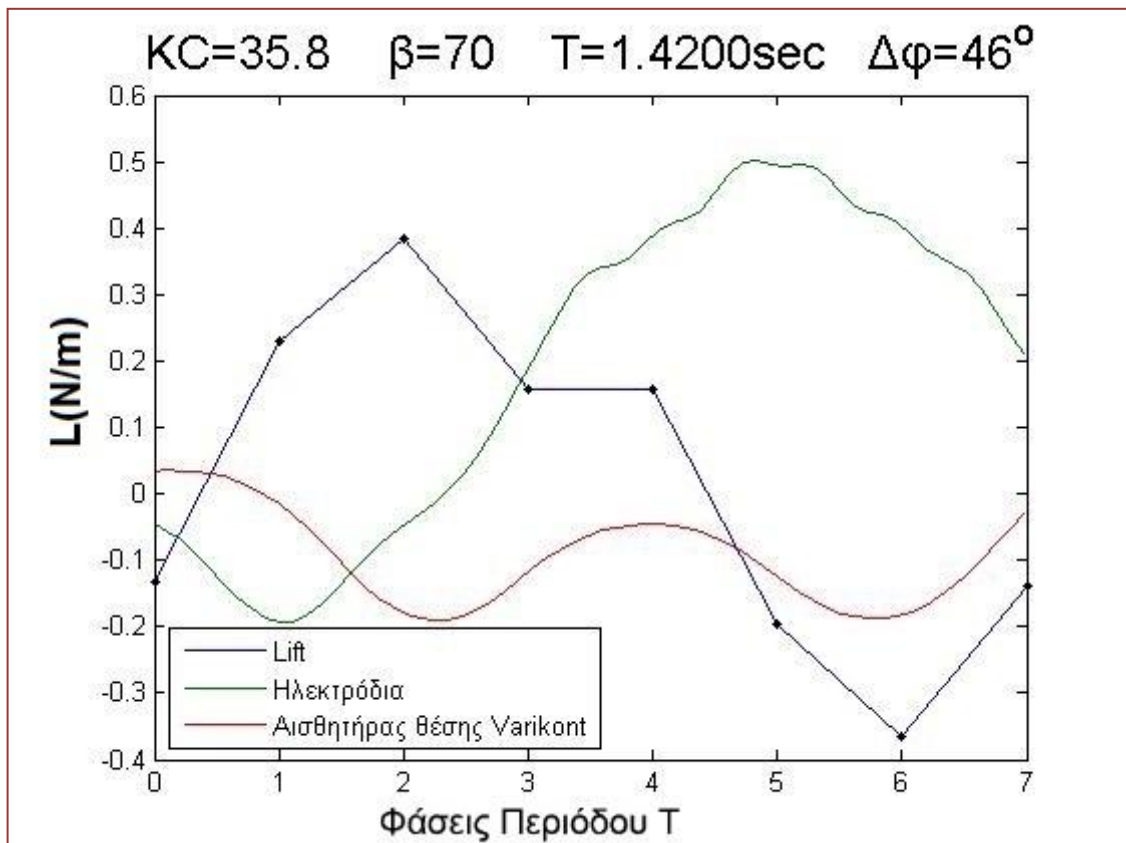


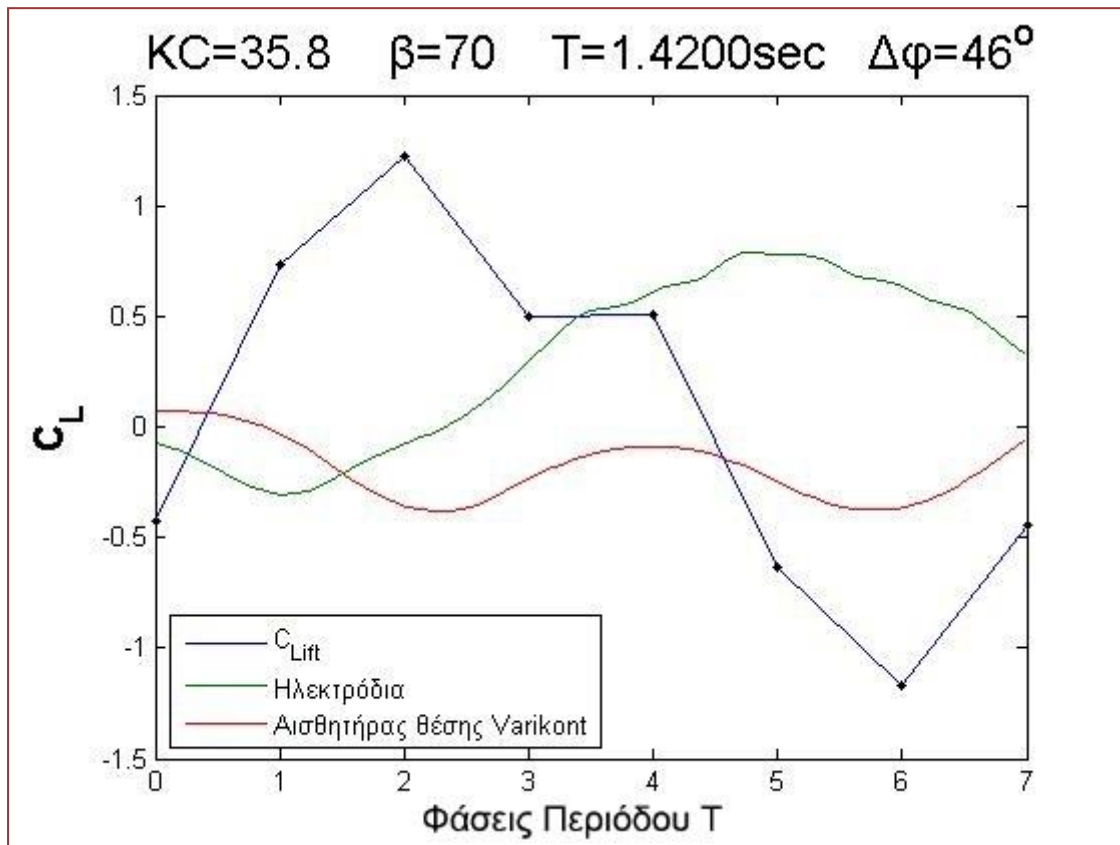






#### 4.5.3.3. Δύναμη Άνωσης $L$



4.5.3.4. Συντελεστής Άνωσης  $C_L$ 

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για  $KC=35.8$  και  $\beta=70$  με βάση το velocity profile γίνεται αντιληπτό ότι όταν το μέτρο της ταχύτητας του ρευστού βρίσκεται γύρω από τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή στις φάσεις  $t=2/8T$  και  $t=6/8T$ , δημιουργούνται γενικά ταυτόχρονα δύο αντίθετες δίνες στον ομόρου του κυλίνδρου από αποκολλημένο οριακό στρώμα, που τα κέντρα τους παρουσιάζουν μια συμμετρική κλίση ως προς τη διεύθυνση της ροής και μέτρα μεγαλύτερα από αυτά των μικρότερων  $KC$  αριθμών και  $\beta$ .

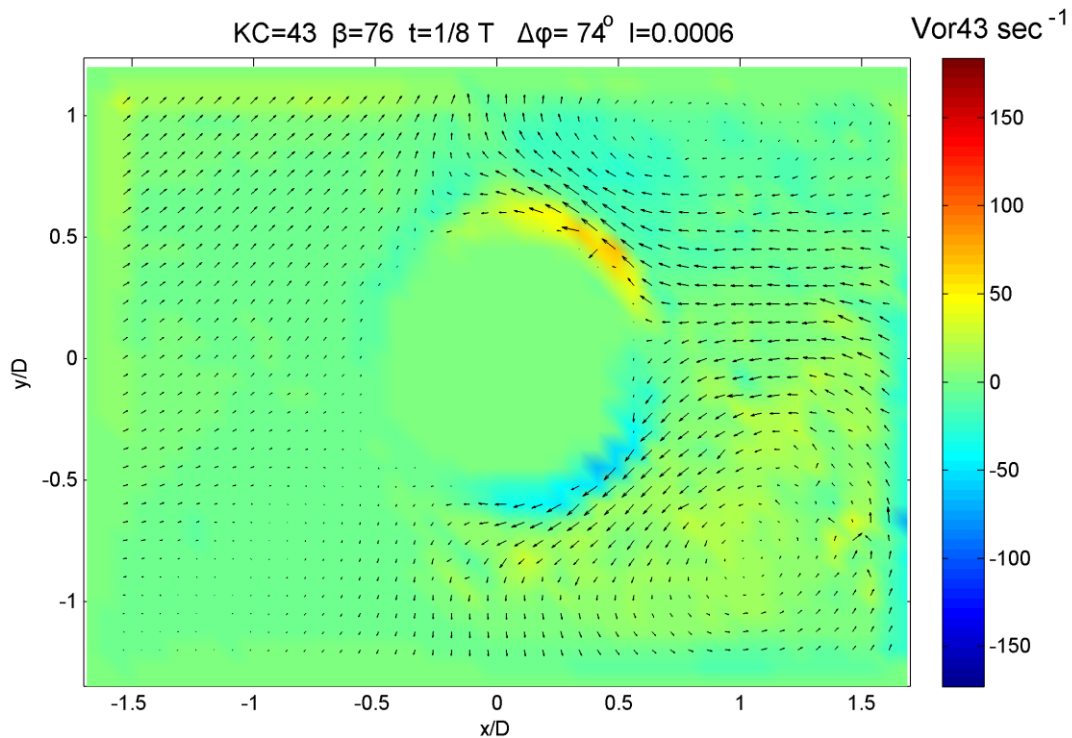
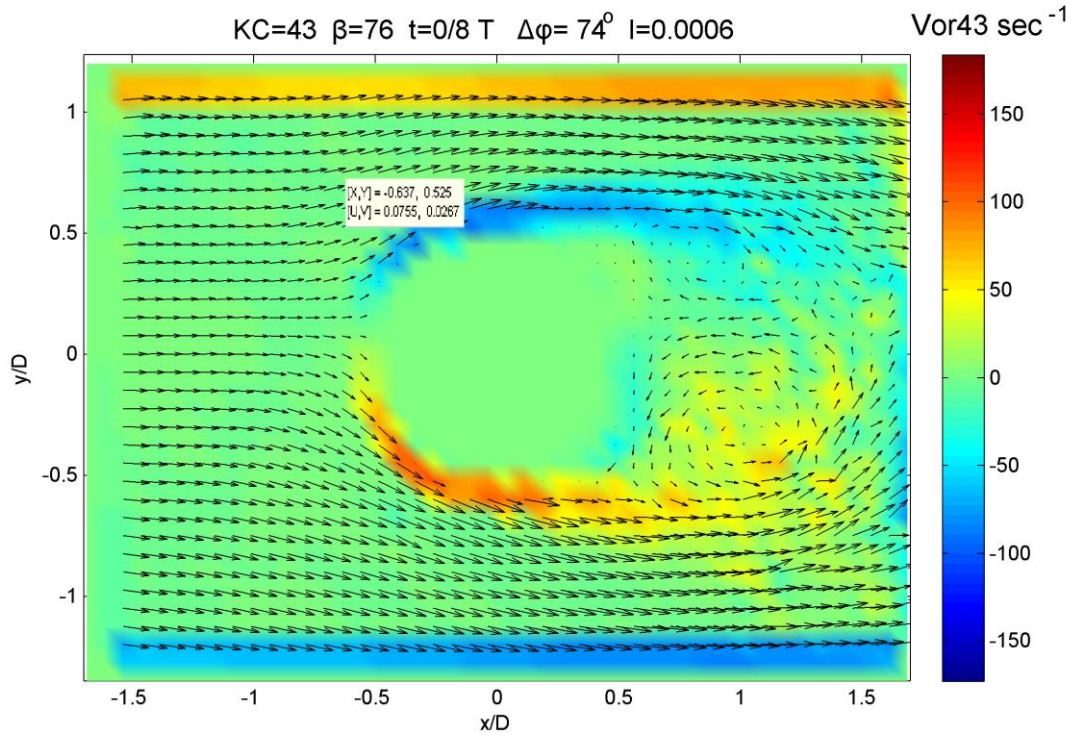
Οι δίνες αυτές παραμένουν προσκολλημένες στο κύλινδρο καθώς δε προλαβαίνουν να απομακρυνθούν και κατά τη πάροδο του χρόνου εξασθενούν μέχρι που εξαφανίζονται κατά την αλλαγή της φοράς.

Τις χρονικές στιγμές που δημιουργούνται οι δίνες εμφανίζονται και οι μέγιστες τιμές της δύναμης και του συντελεστή άνωσης, δηλαδή όταν το νερό κινείται από τη μέγιστη στάθμη προς τη μηδενική στάθμη του.

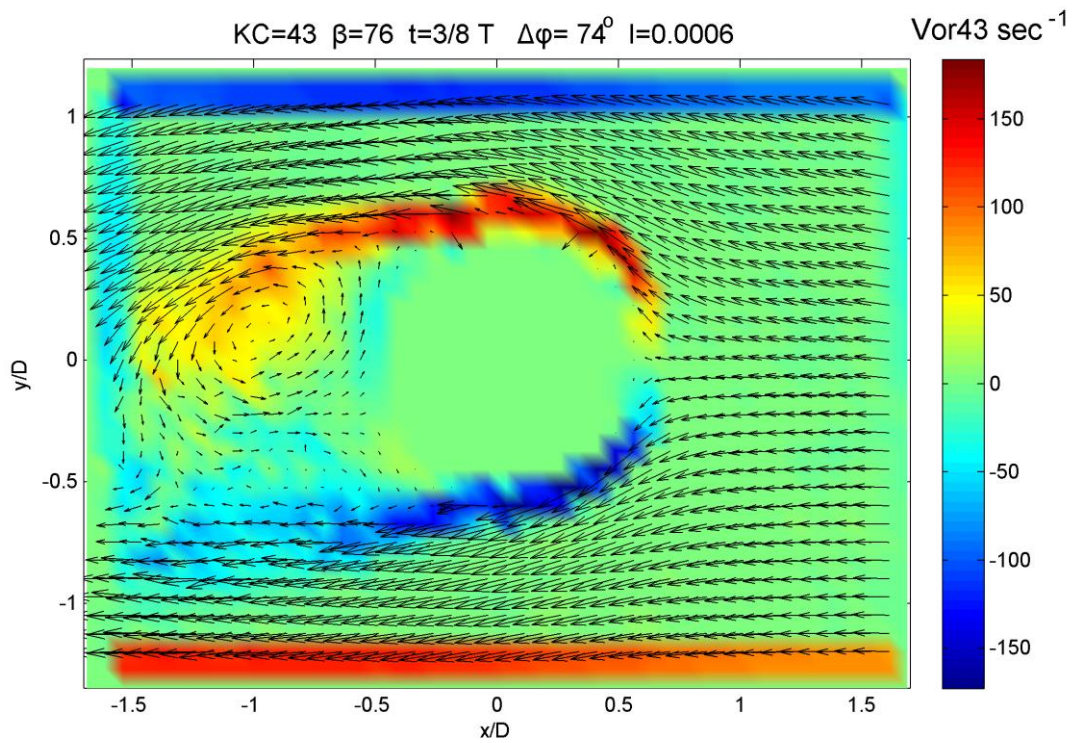
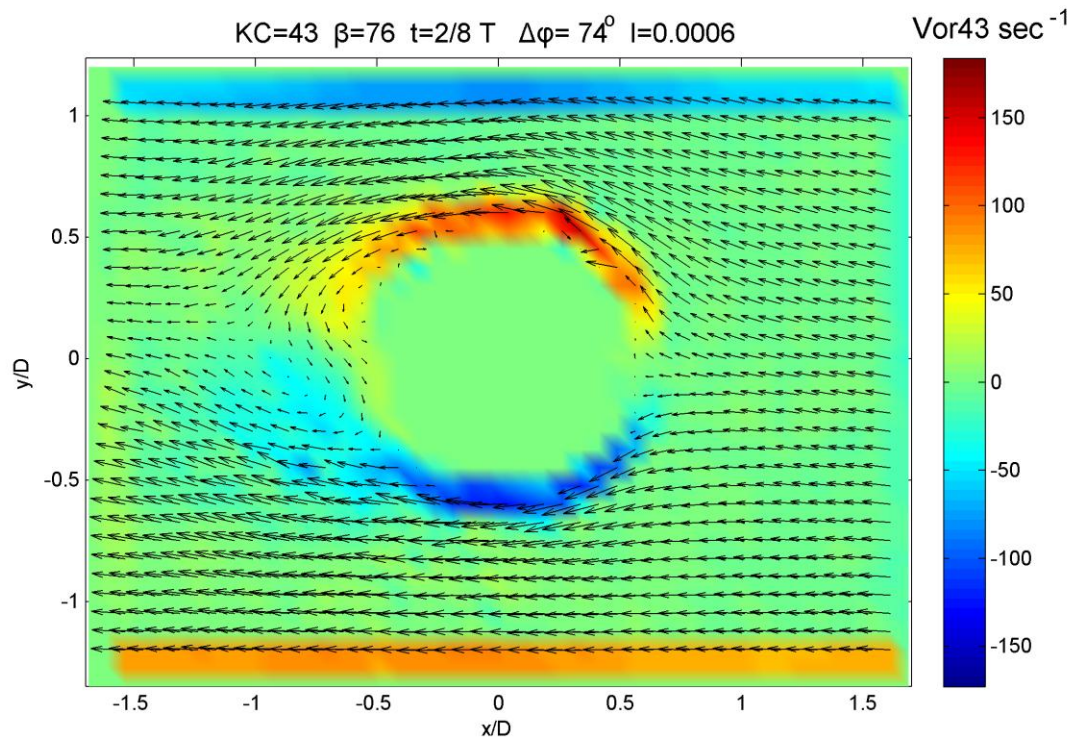
#### 4.5.4. $KC=43$ , $\beta=76$ , $T=1.3200$ sec και $\Delta\varphi=74^\circ$ .

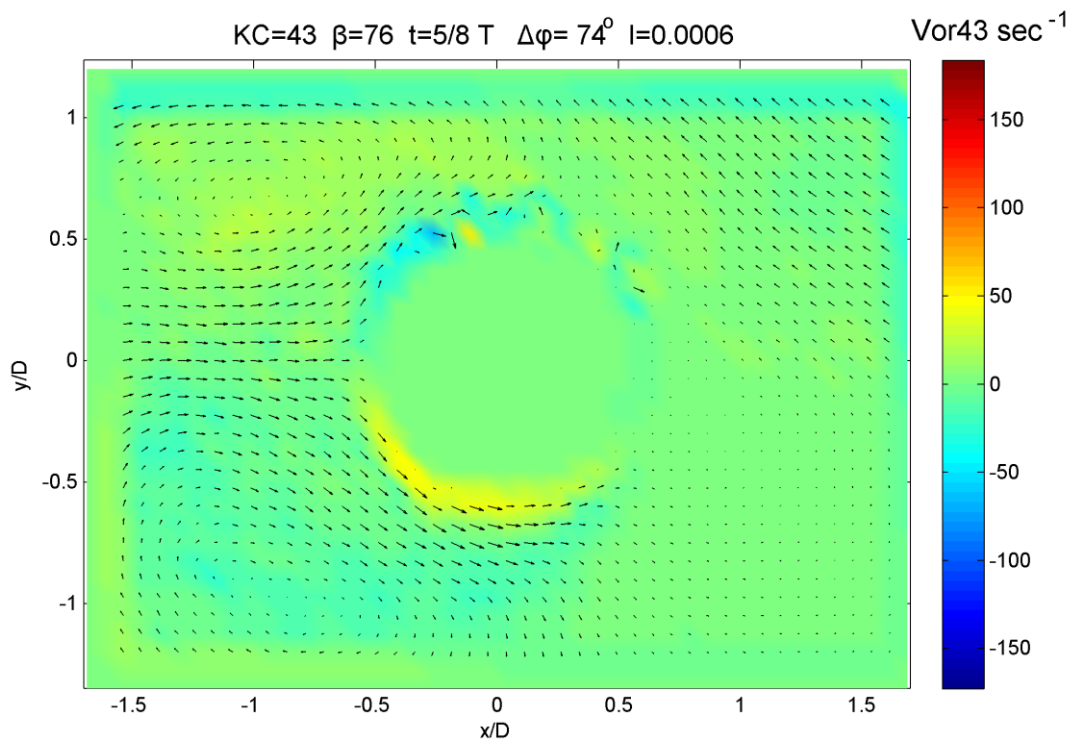
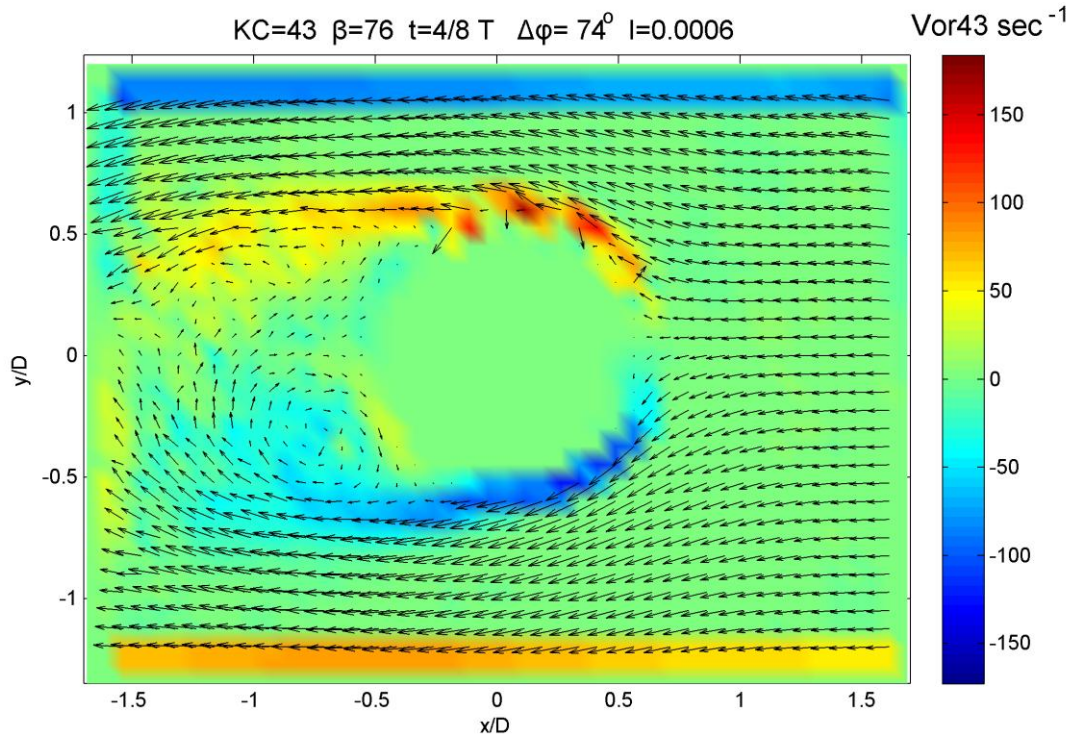
##### 4.5.4.1. Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile)

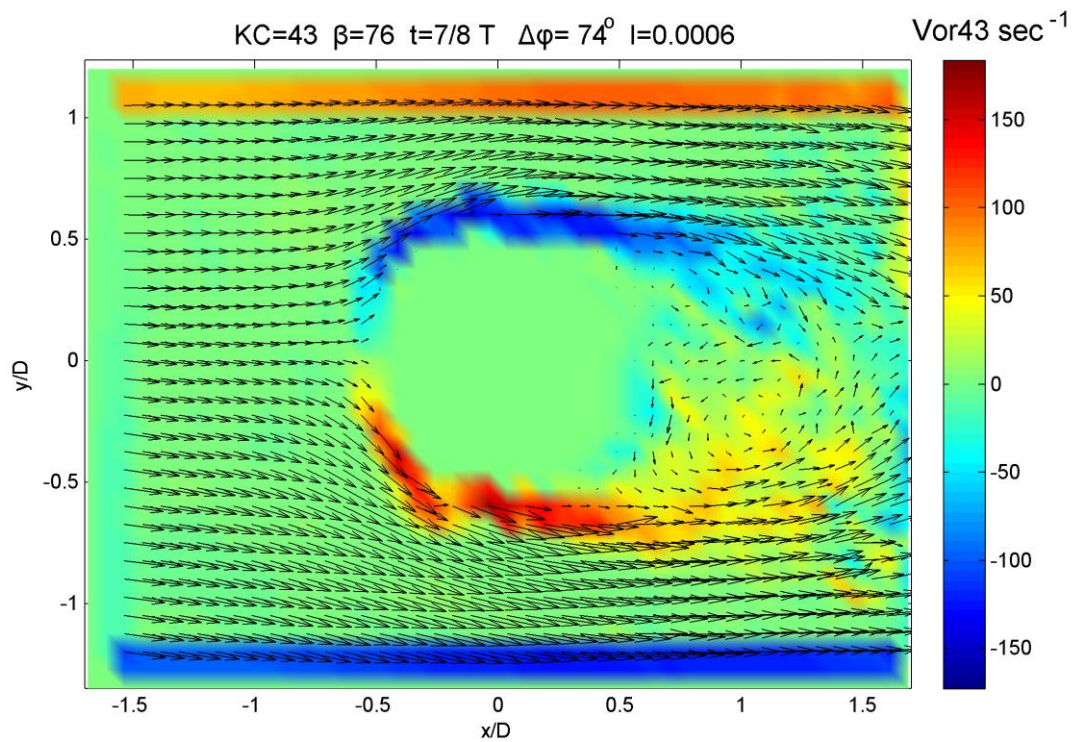
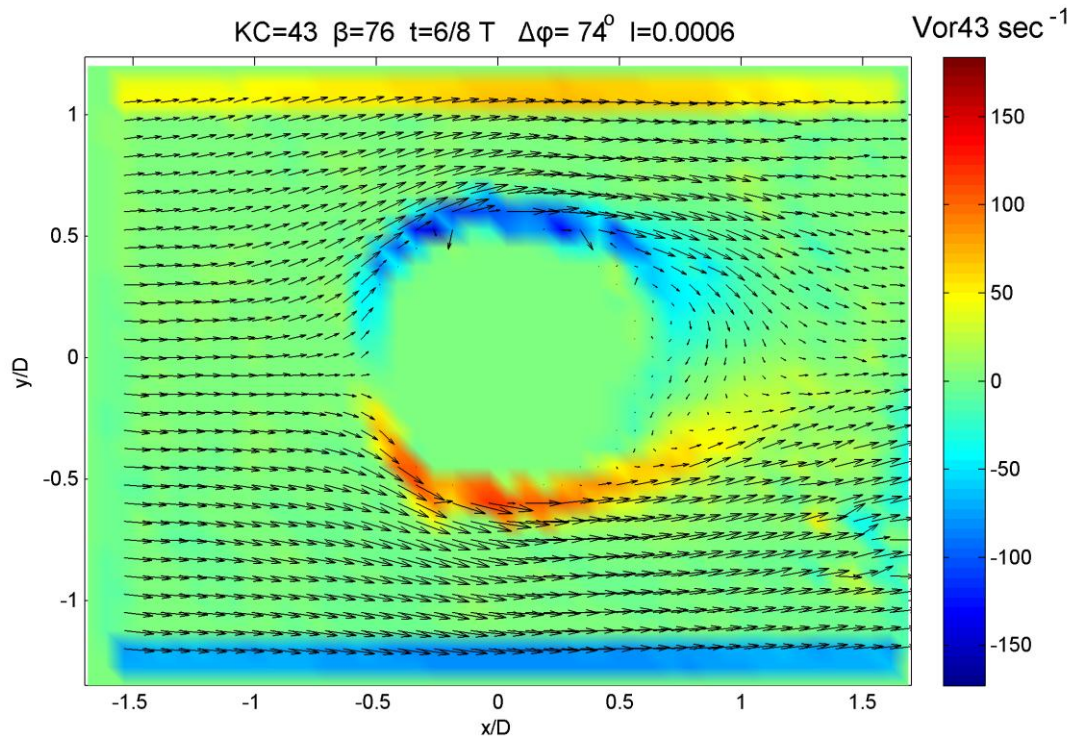
*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν τη διαστατή στροβιλότητα*



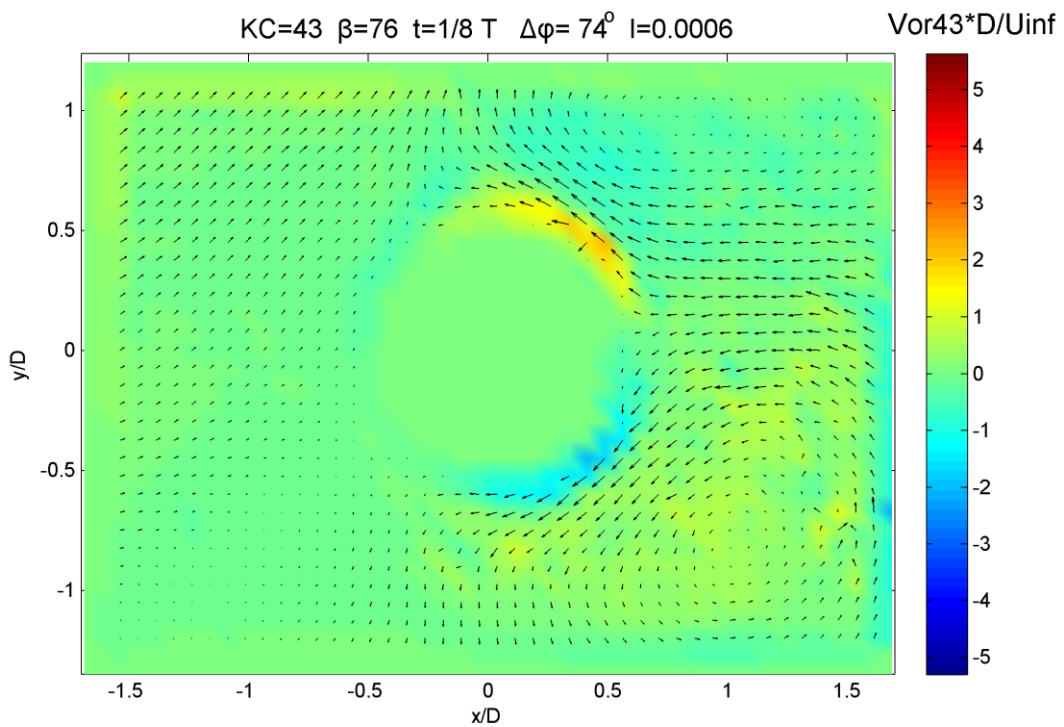
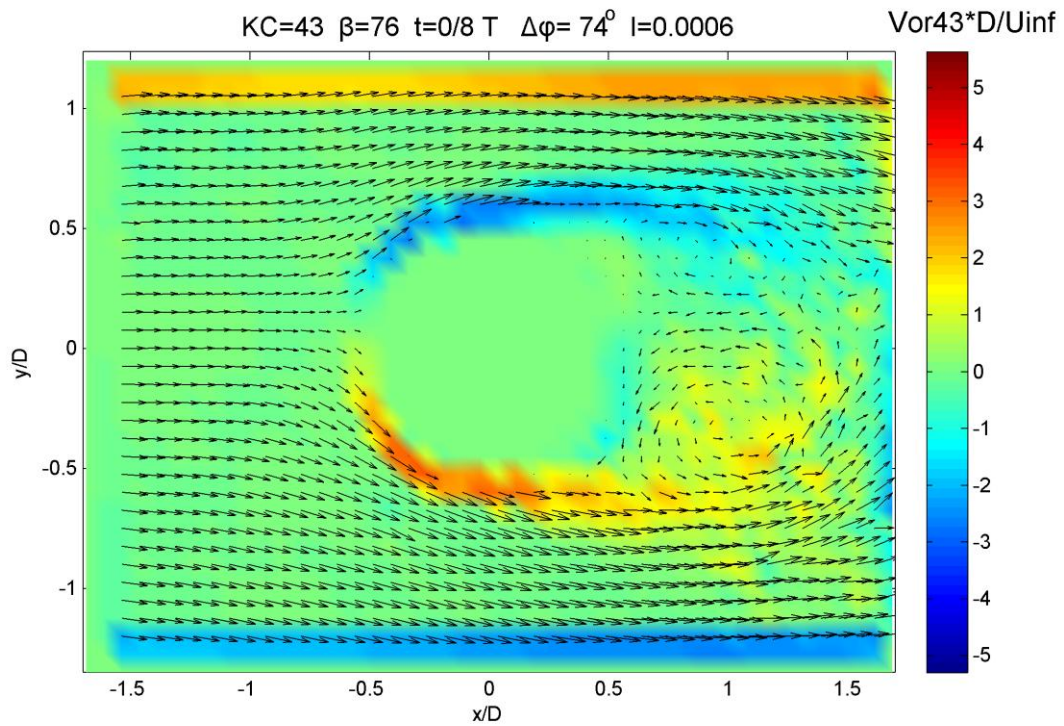


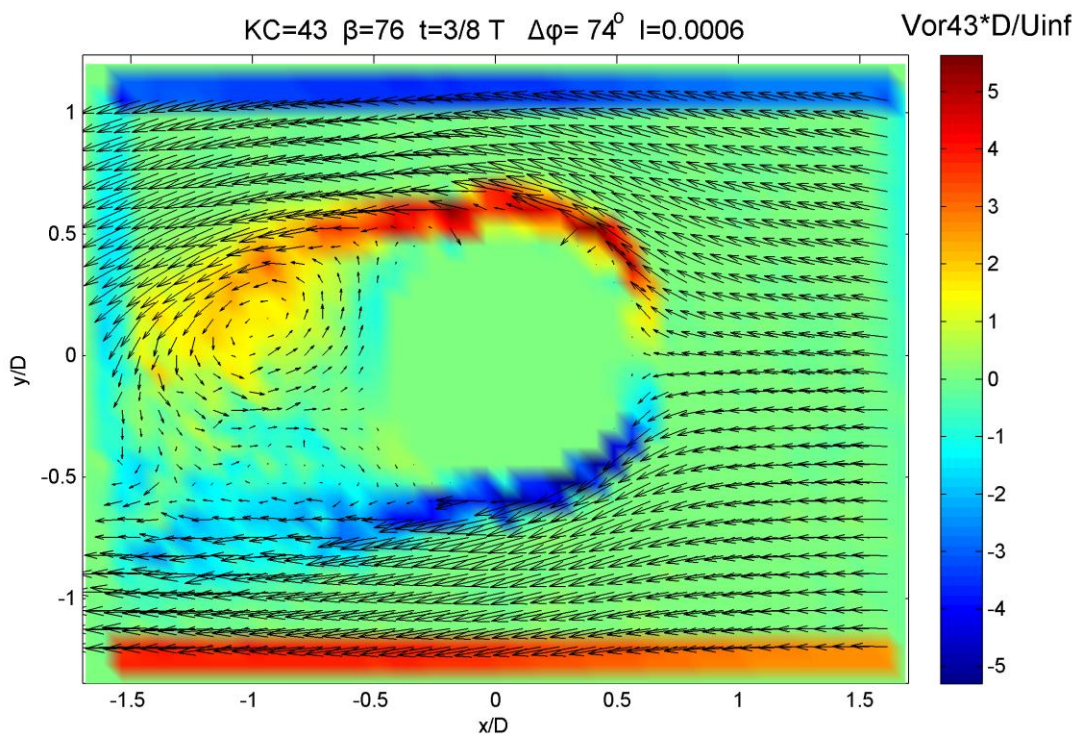
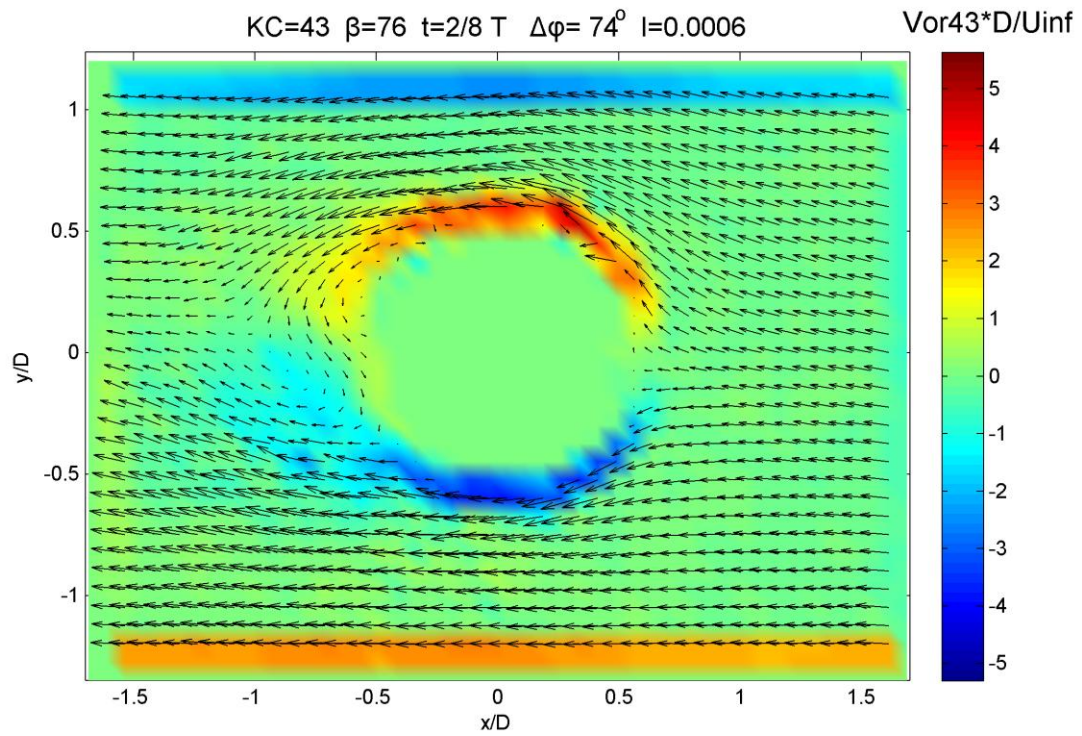


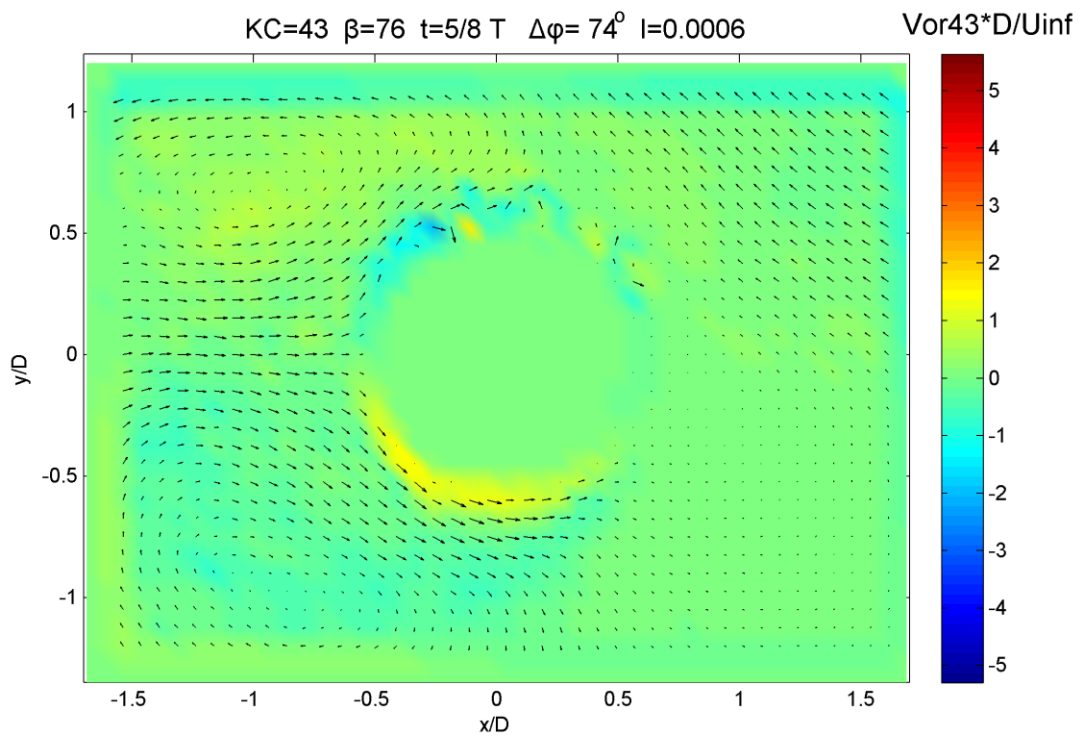
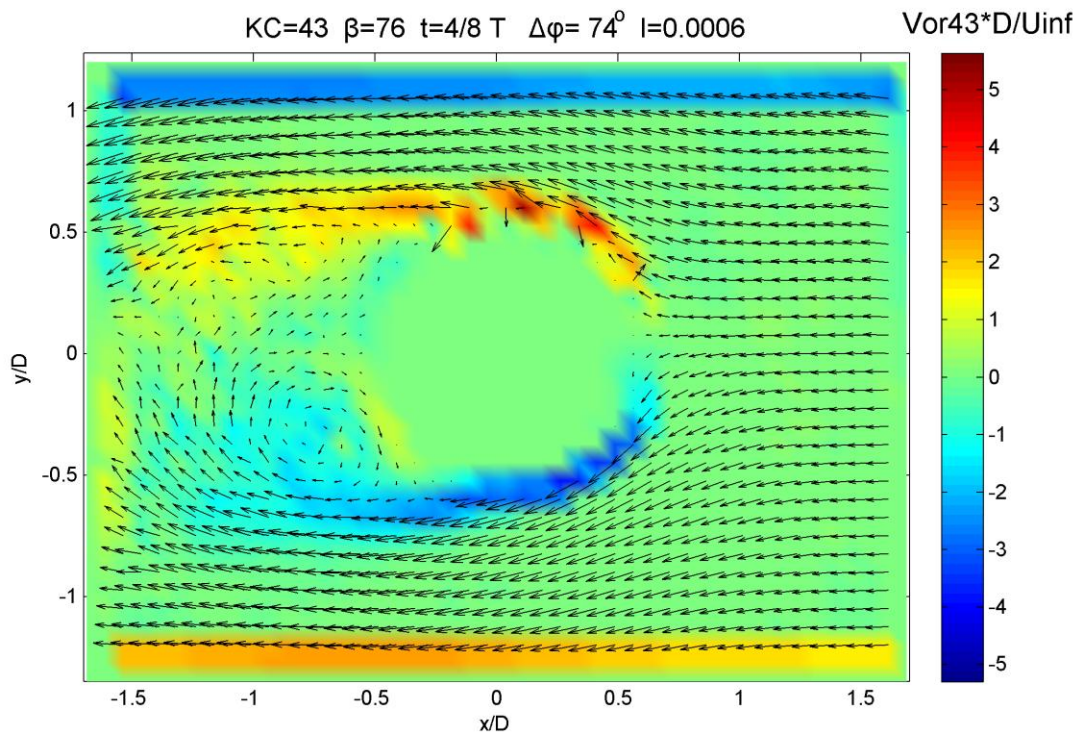


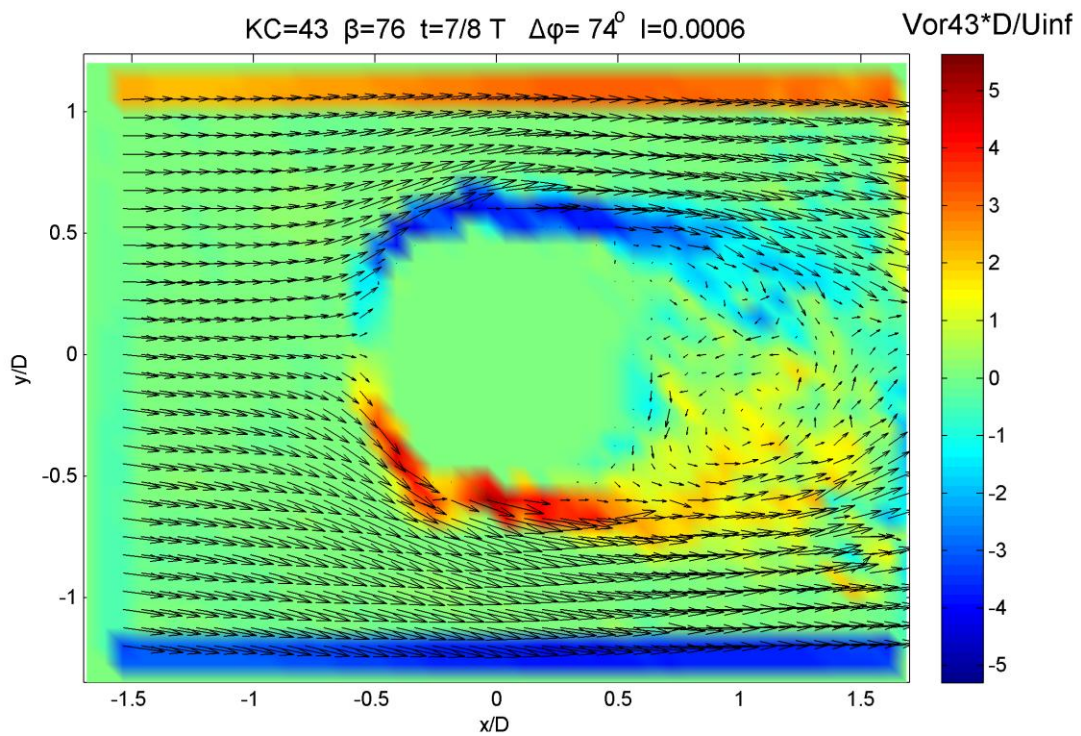
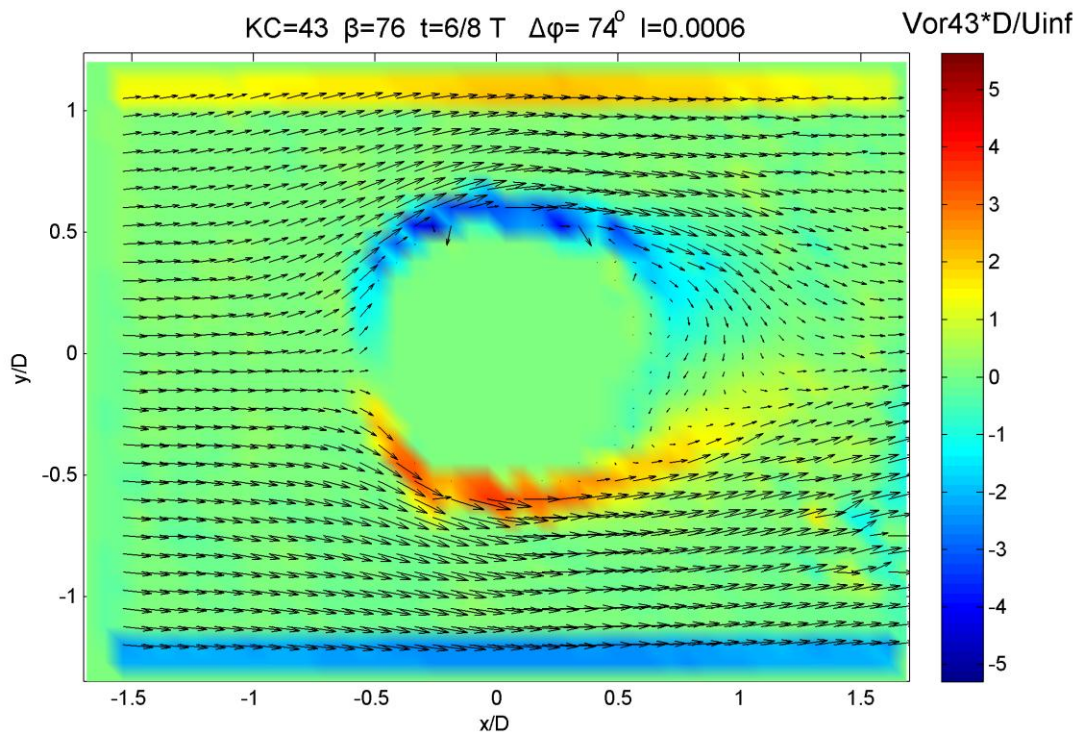


Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν την αδιάστατη στροβιλότητα

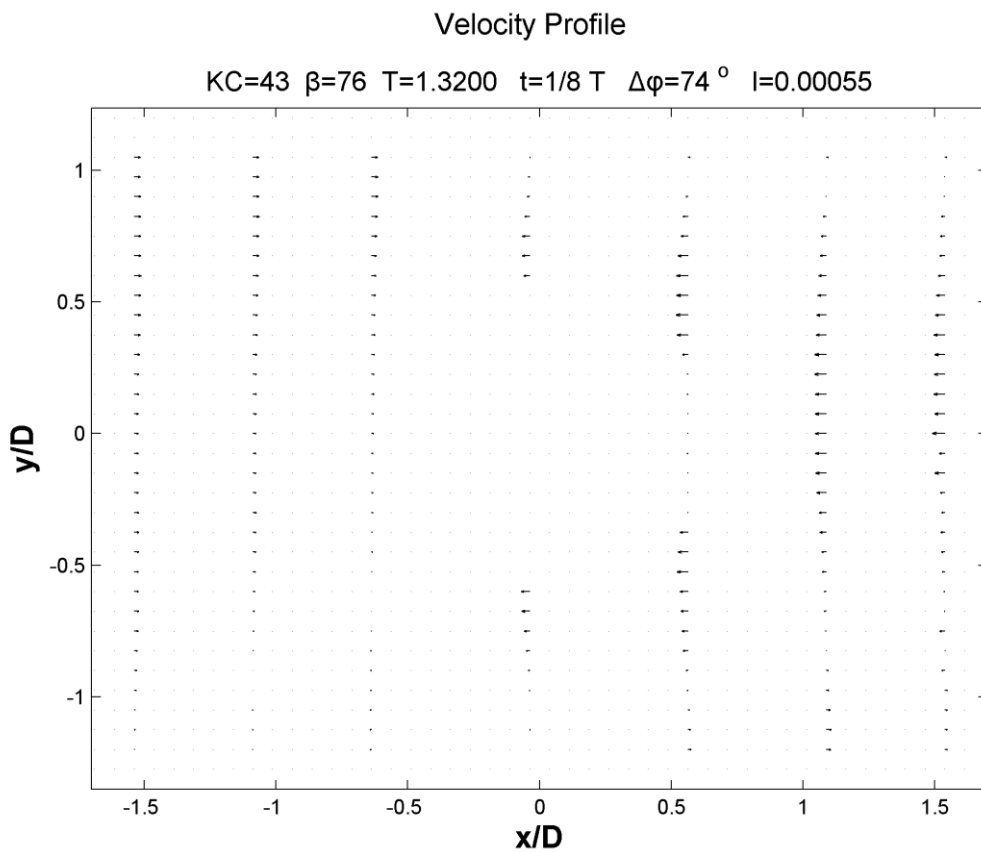
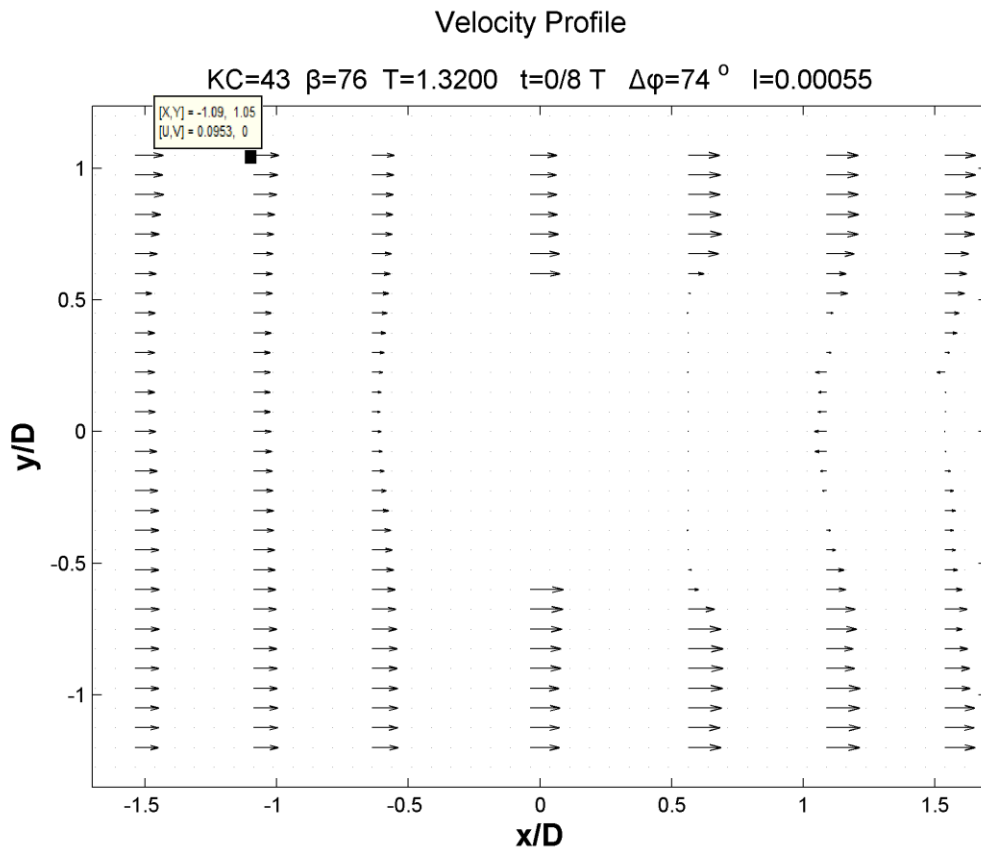




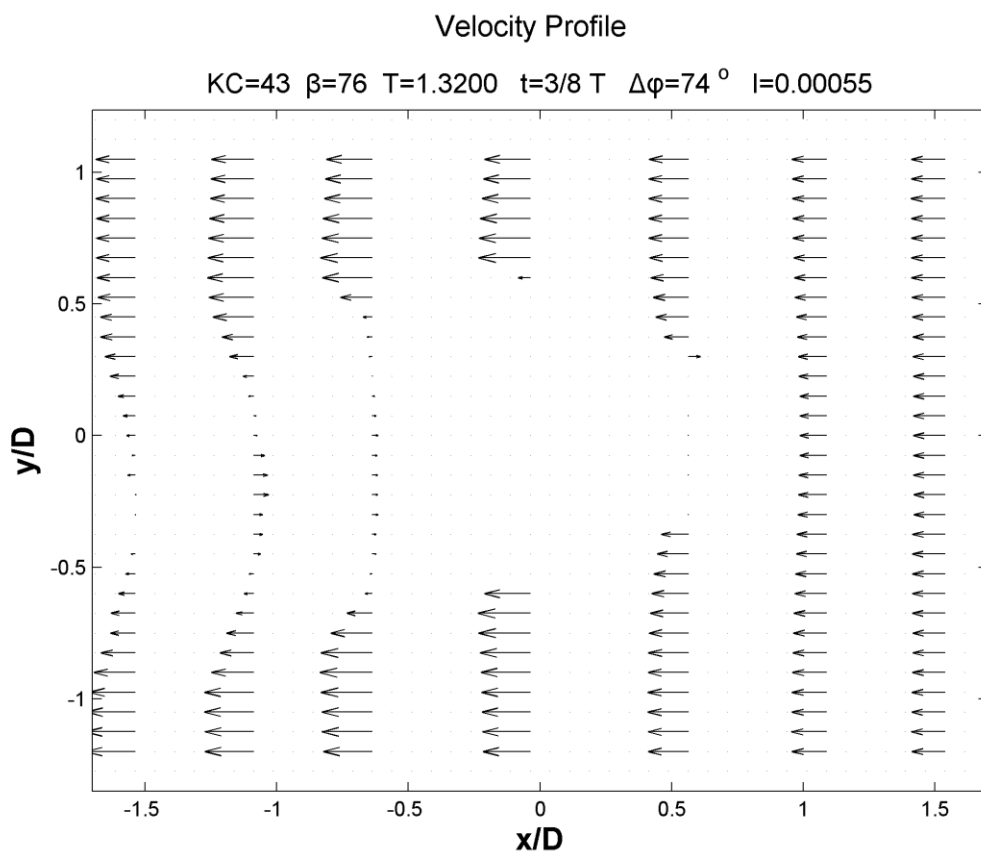
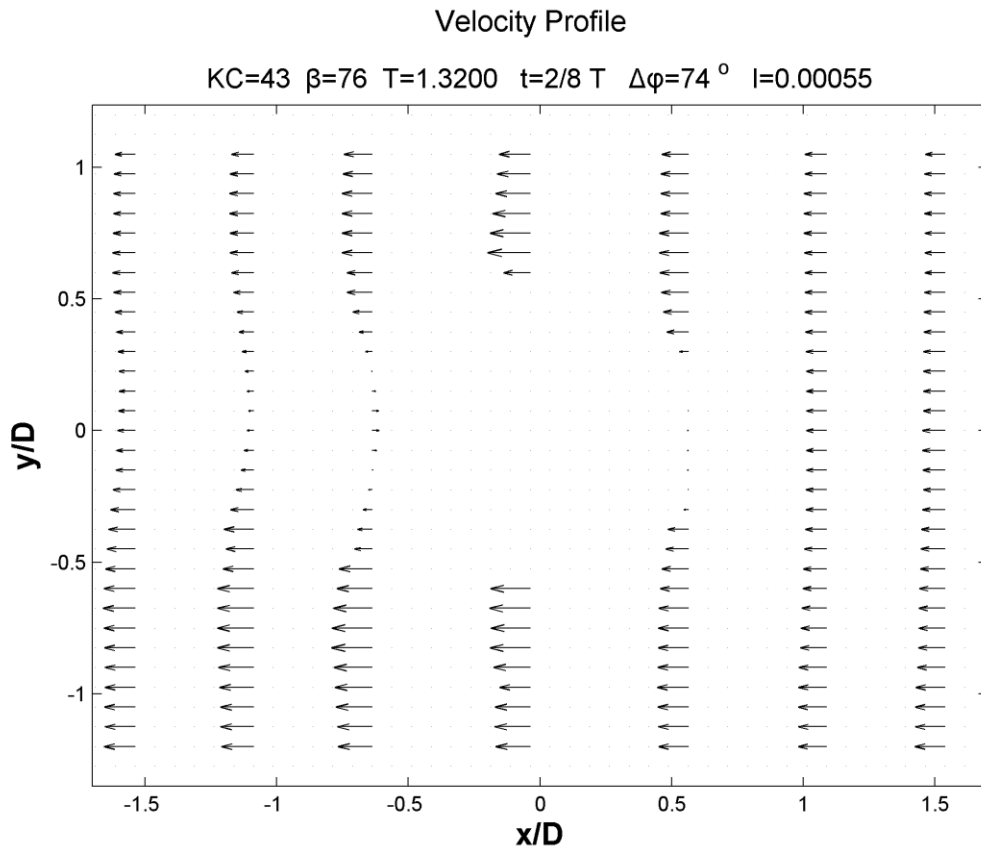


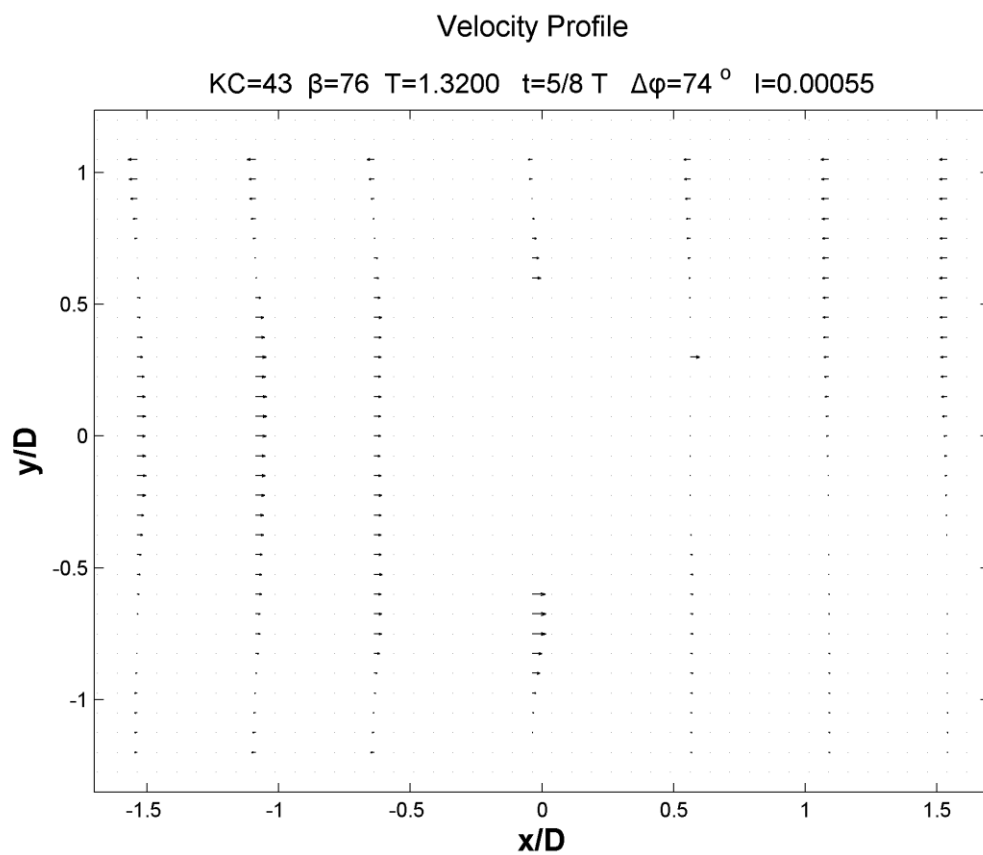
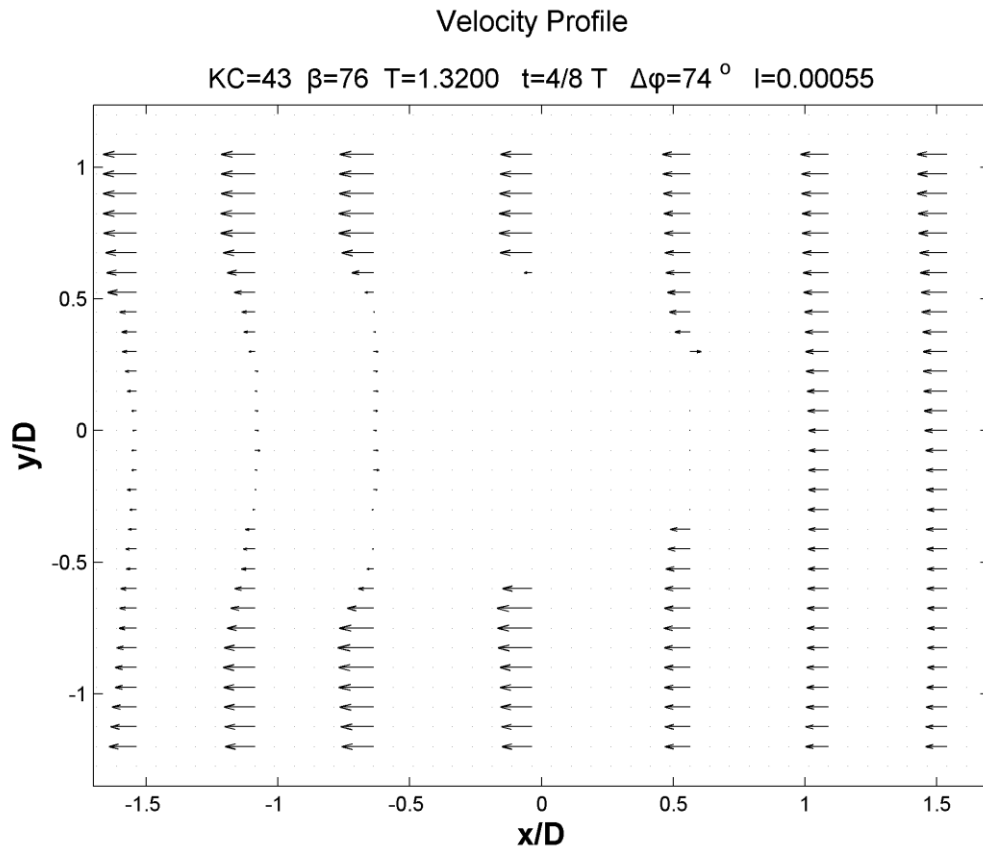


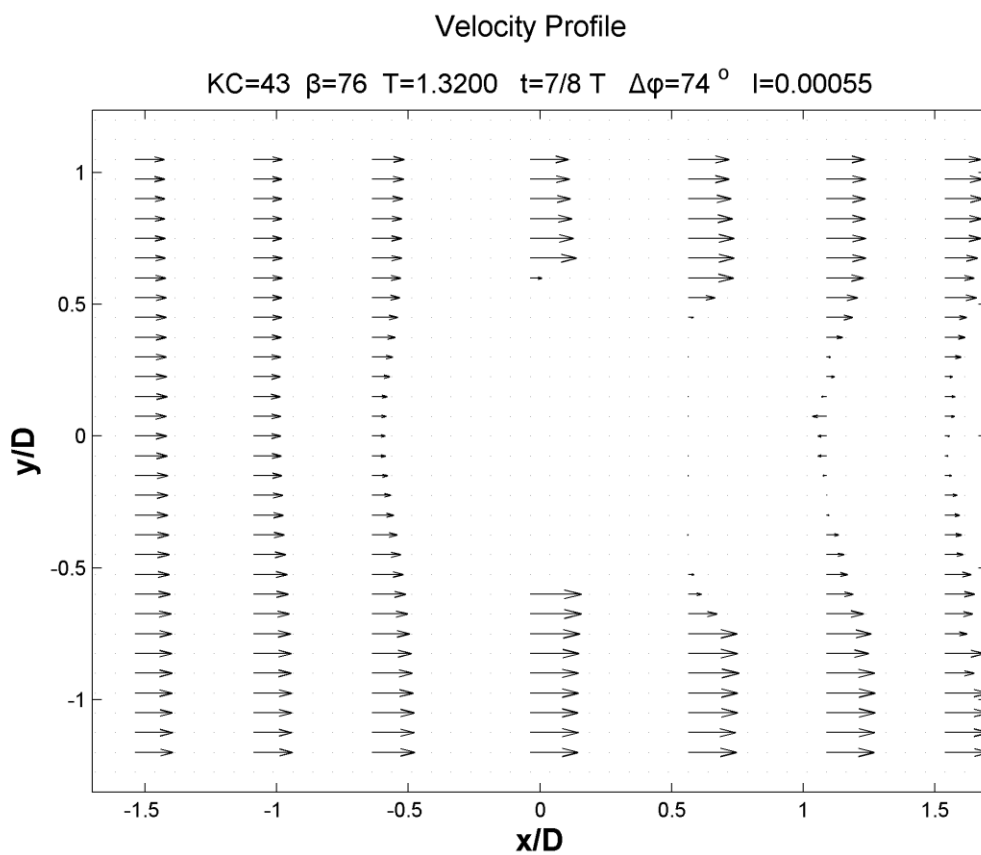
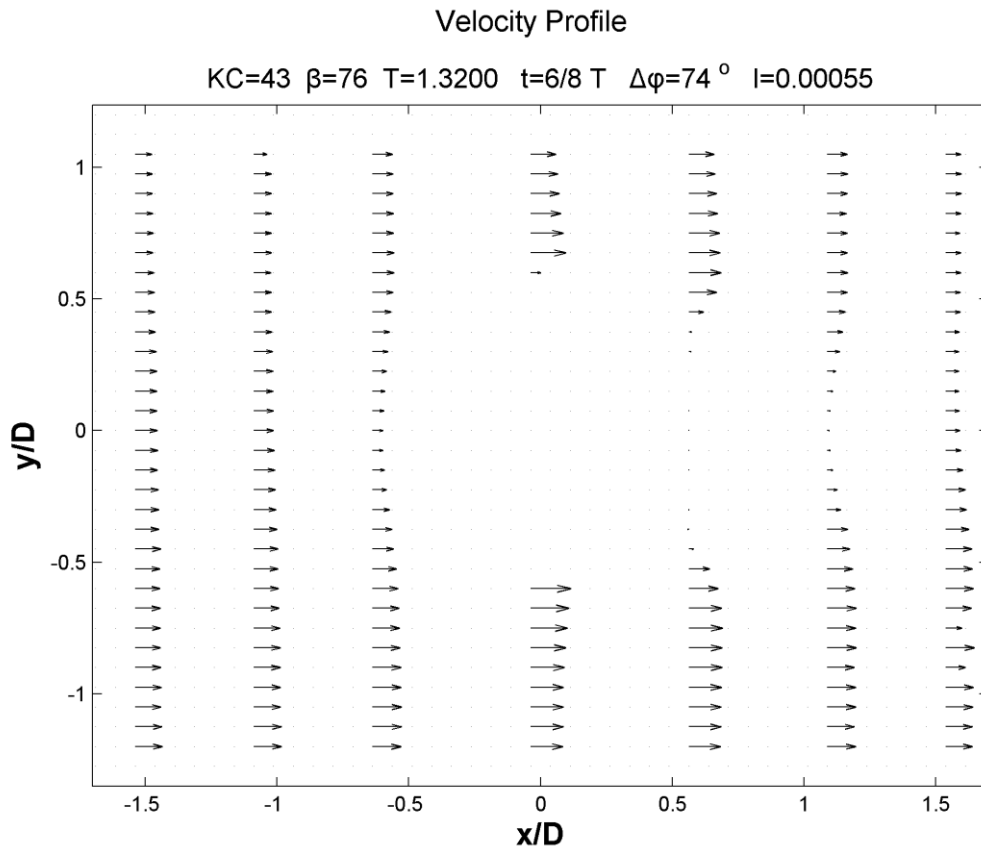
## 4.5.4.2. Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile)

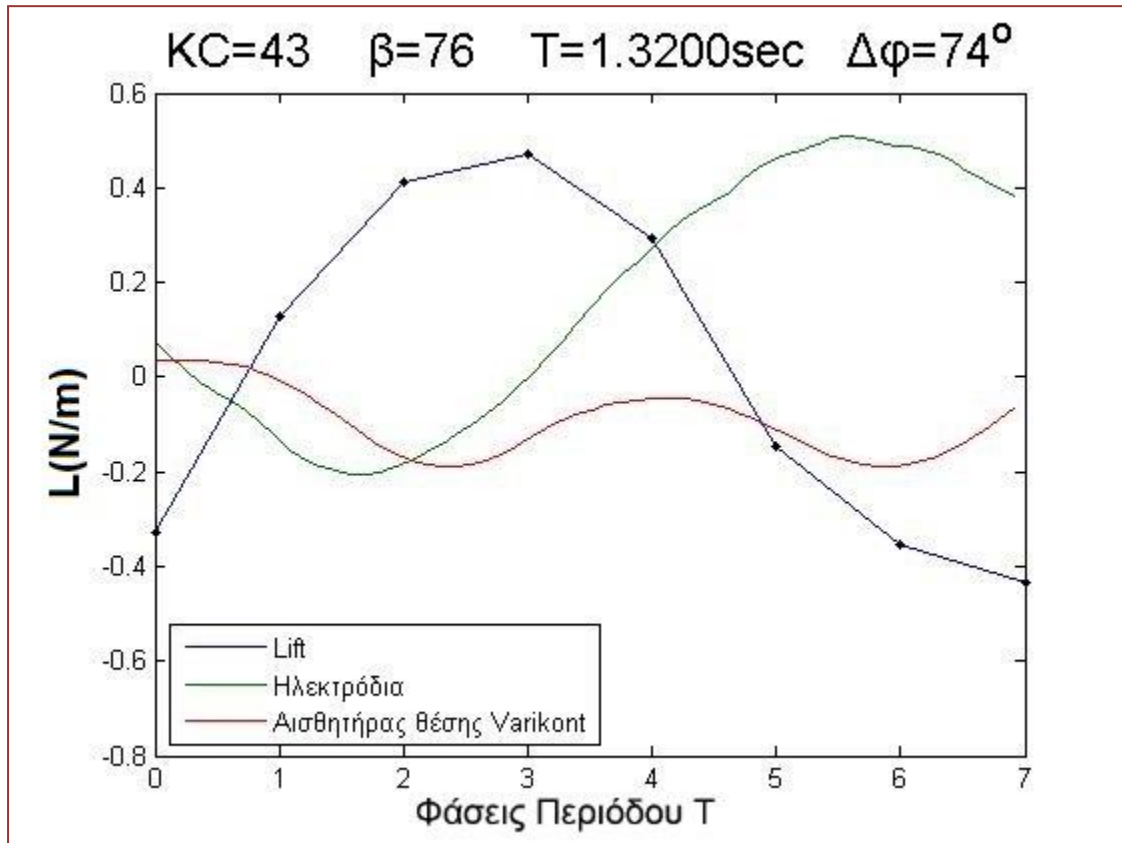
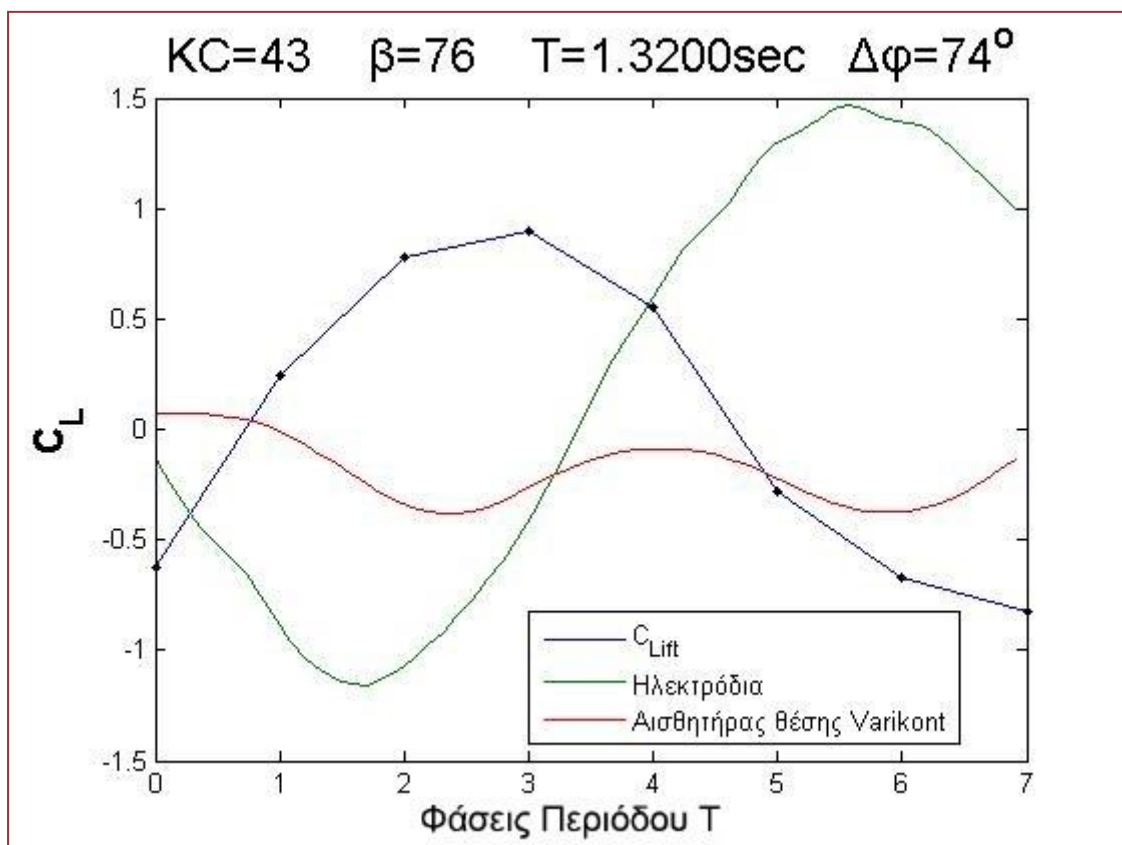










4.5.4.3. Δύναμη Άνωσης  $L$ 4.5.4.4. Συντελεστής Άνωσης  $C_L$ 

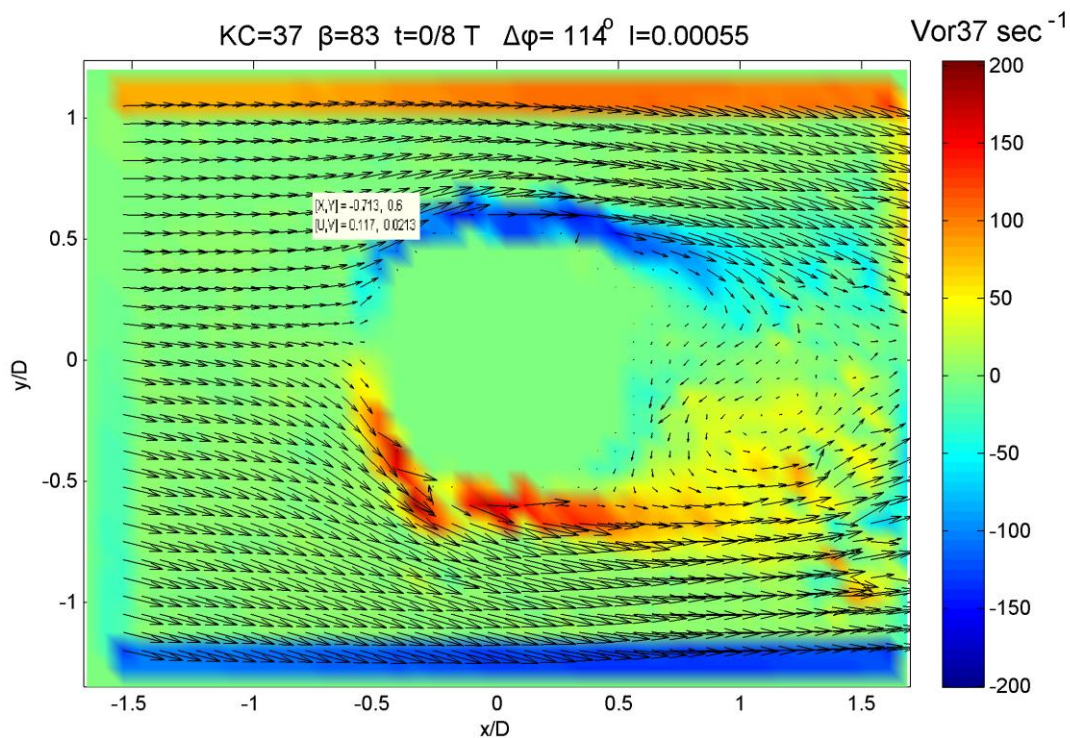
Οι τιμές  $KC=43$  και  $\beta=76$  είναι οι πιο "κοντινές" στο συντονισμό του συστήματος δοχείου-νερού. Για αυτή τη συχνότητα τις χρονικές στιγμές  $t=2/8T$  και  $t=6/8T$ , δηλαδή αμέσως μετά από την εμφάνιση της μέγιστης και ελάχιστης στάθμης του νερού, δημιουργείται ένα **S** στον ομόρου του κυλίνδρου το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε δύο μικρές, αποκολλημένες, αντίθετες δίνες. Κατά την αντιστροφή της φοράς της ροής οι δύο αυτές δίνες αποκτούν ολοκληρωμένη μορφή και βρίσκονται ανάντι πλέον του κυλίνδρου, αποκολλημένες και με κέντρα που παρουσιάζουν μια συμμετρική κλίση σε σχέση με τη διεύθυνση της ροής.

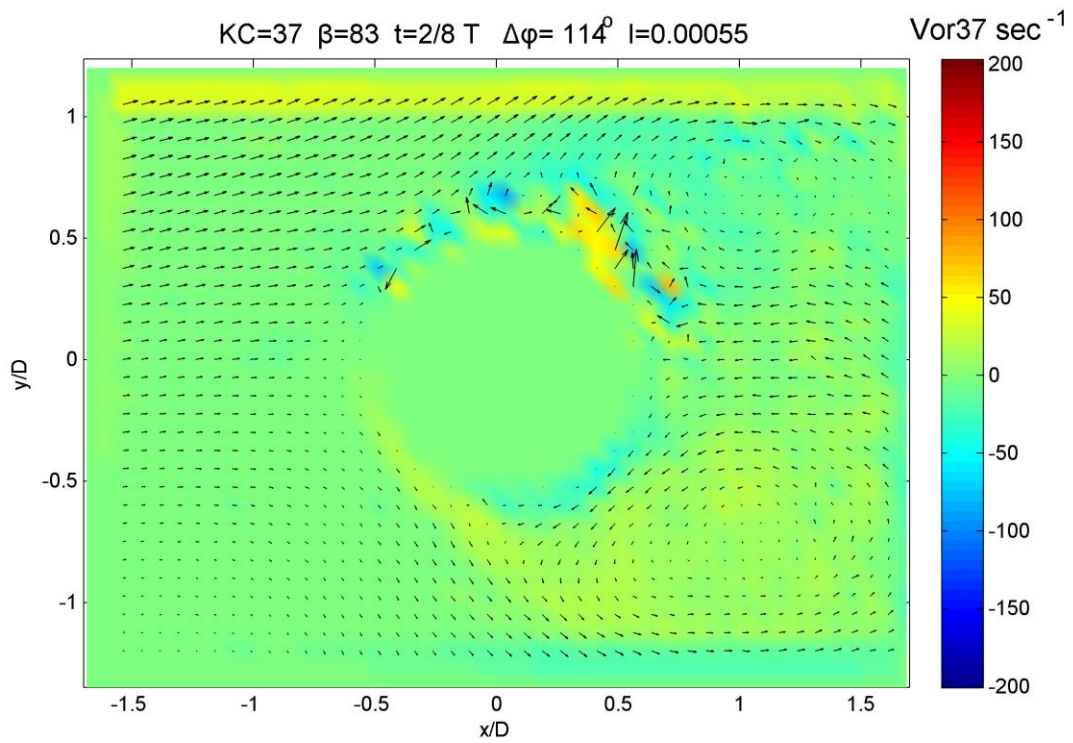
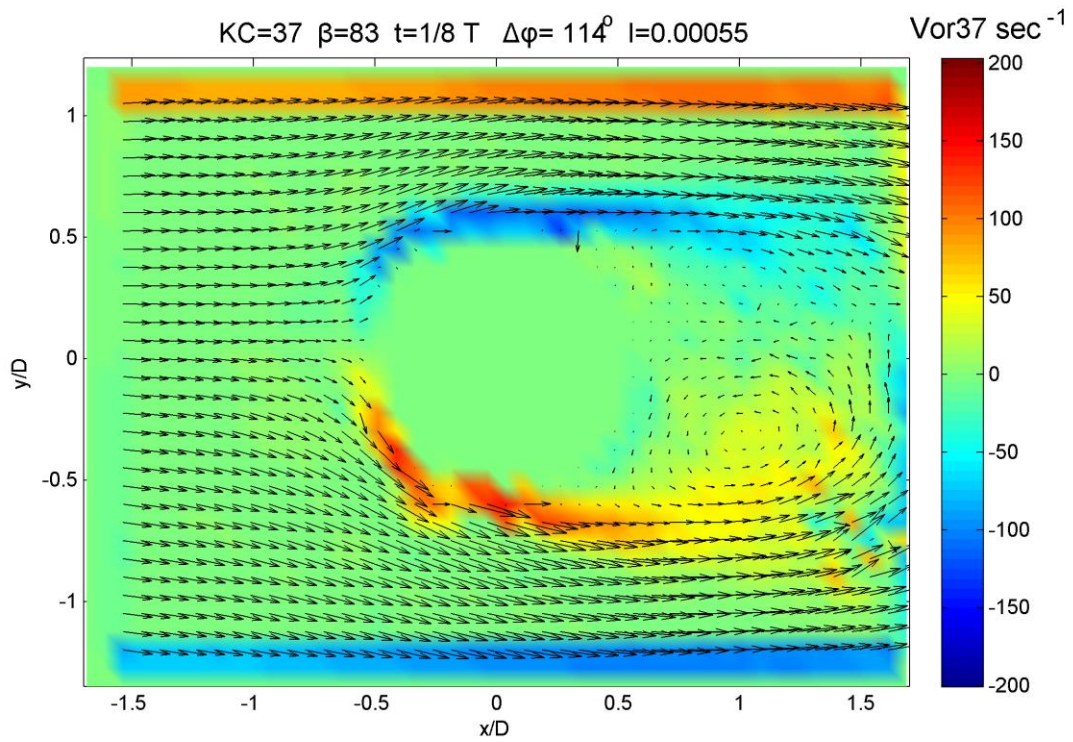
Όταν το νερό βρίσκεται στο μηδέν της στάθμης τότε εμφανίζονται τα πλάτη της δύναμης και του συντελεστή άνωσης. Αυτό δικαιολογείται καθώς τότε το νερό παρουσιάζει τη μέγιστη ταχύτητα του.

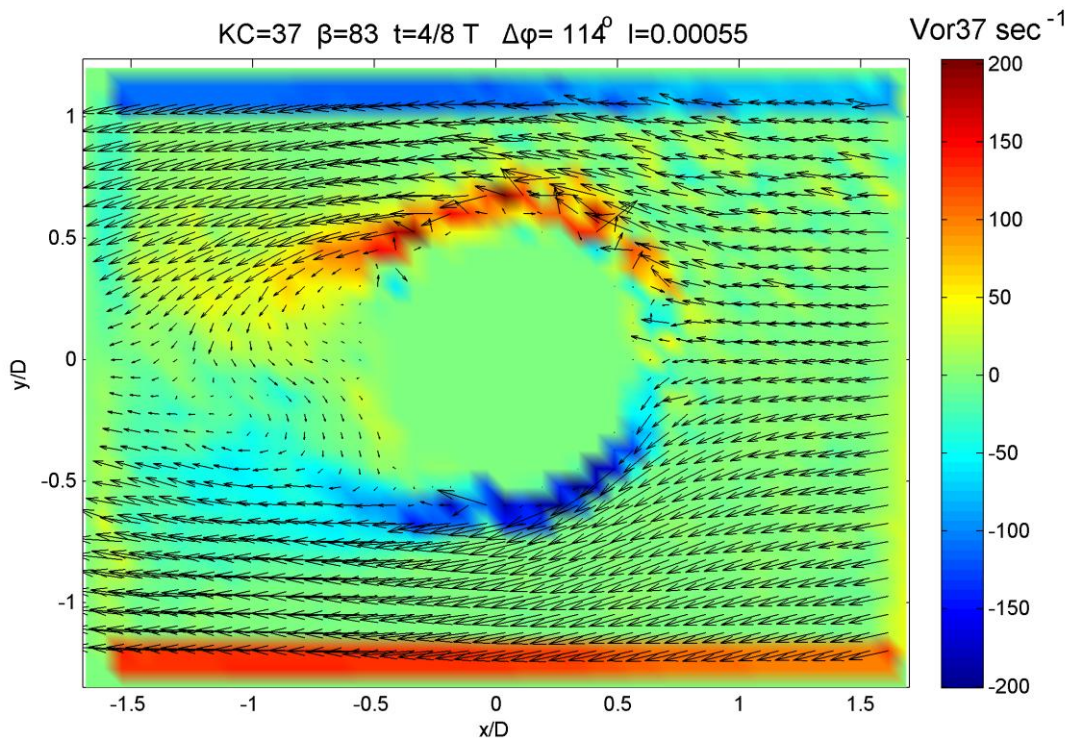
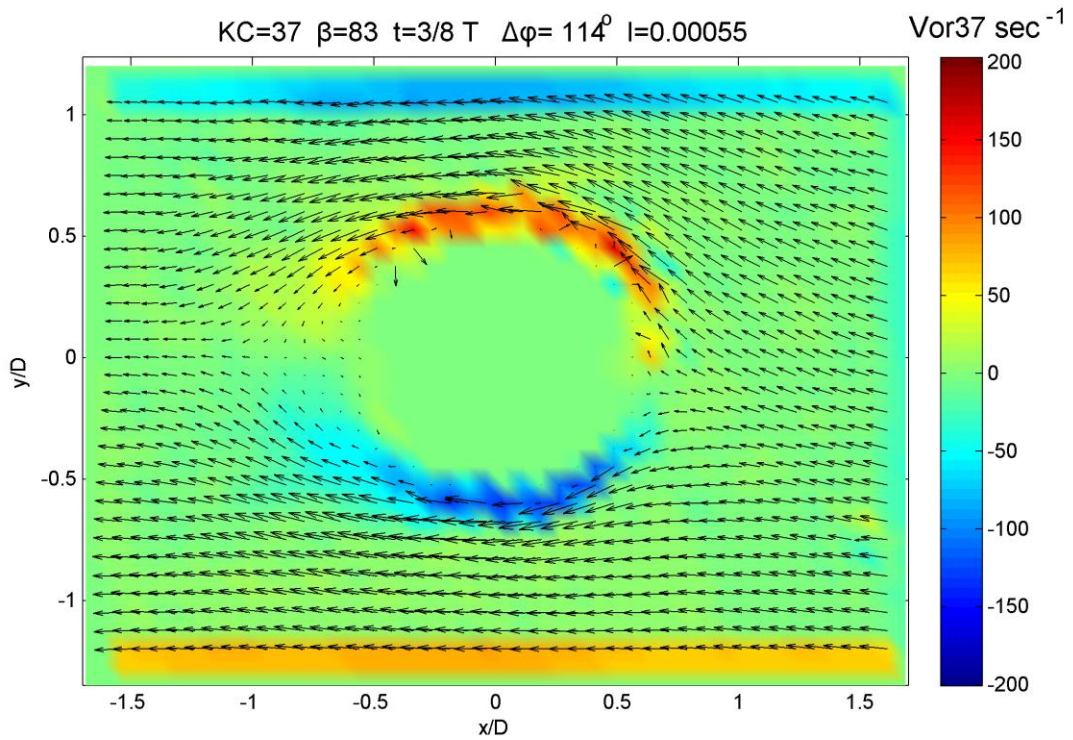
#### 4.5.5. $KC=37$ , $\beta=83$ , $T=1.200$ sec και $\Delta\varphi=114^\circ$ .

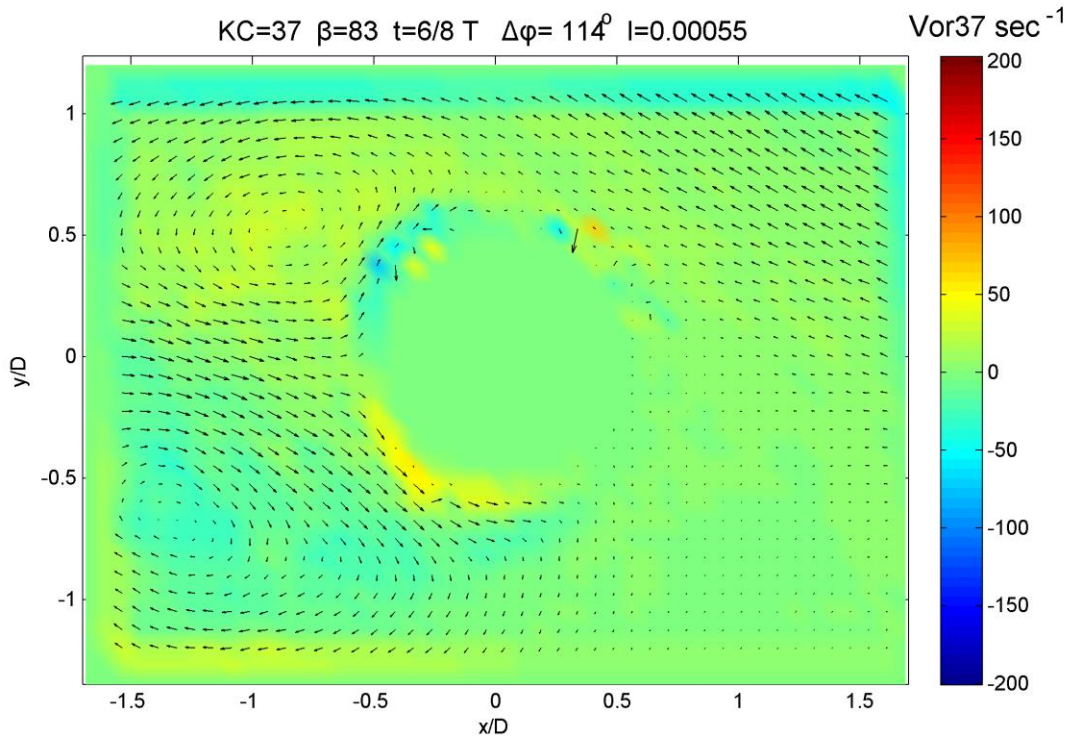
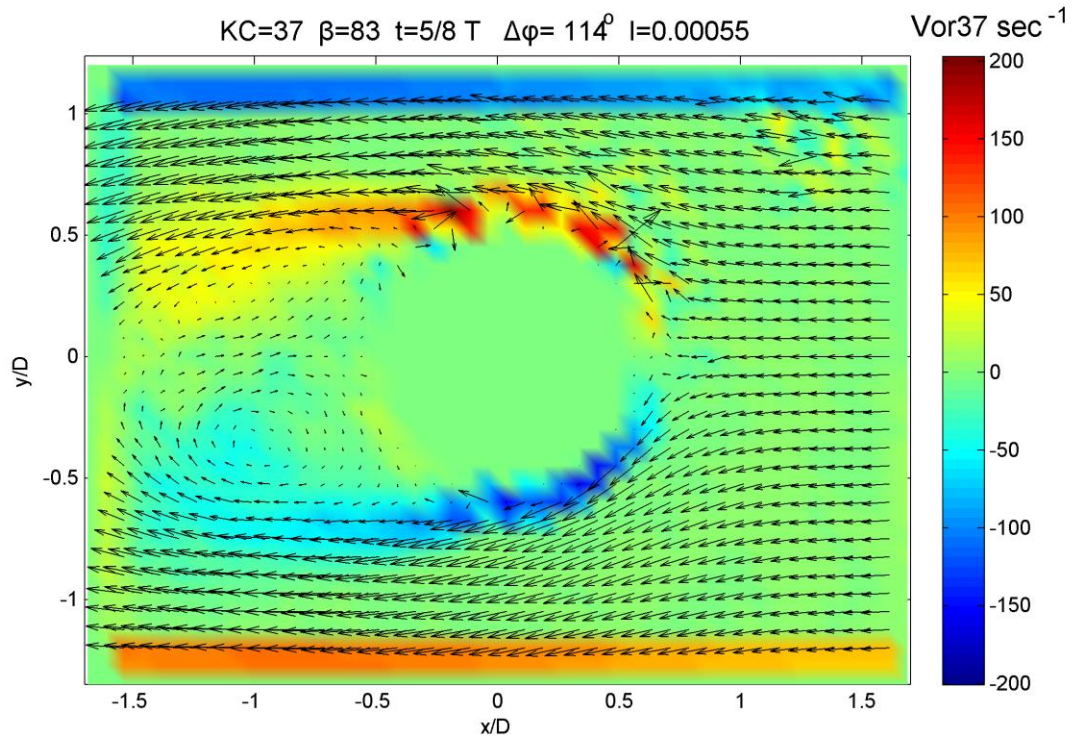
##### 4.5.5.1. Πεδίο ροής και στροβιλότητας (Vorticity profile)

*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν τη διαστατή στροβιλότητα*

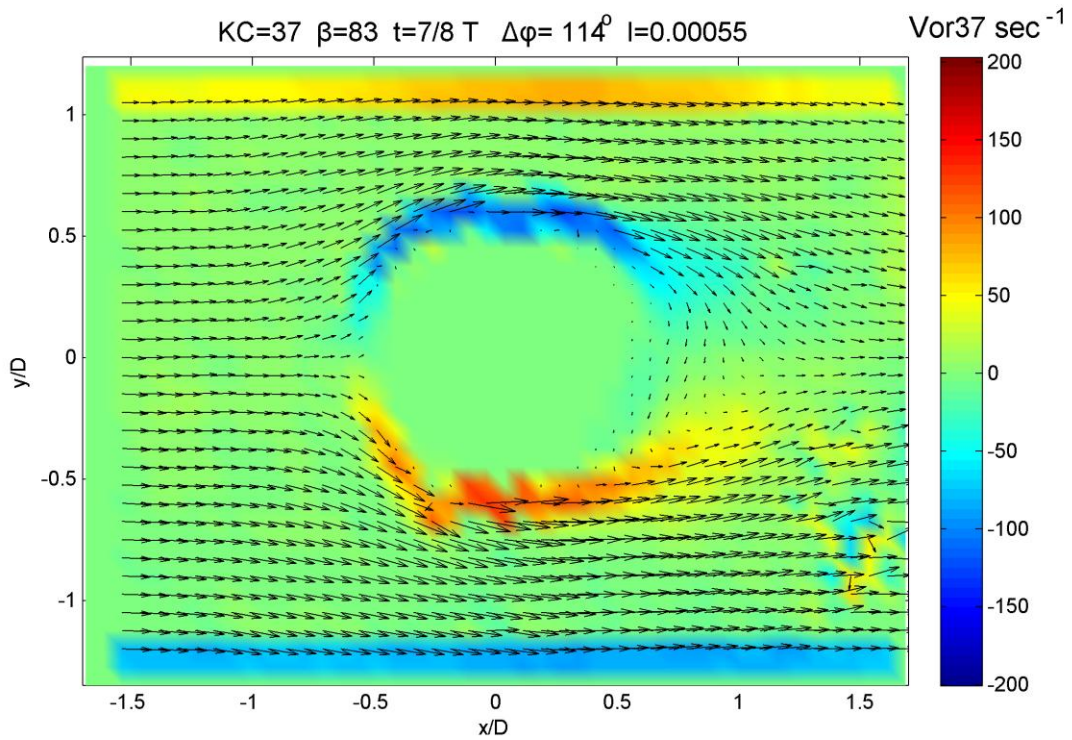




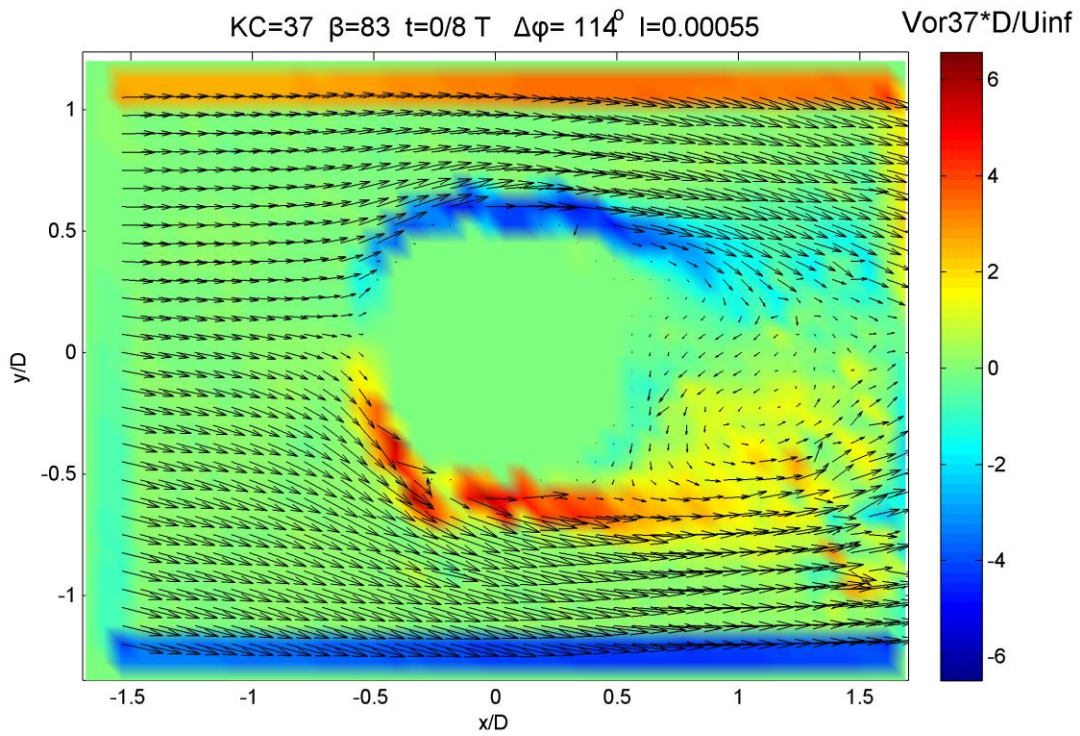


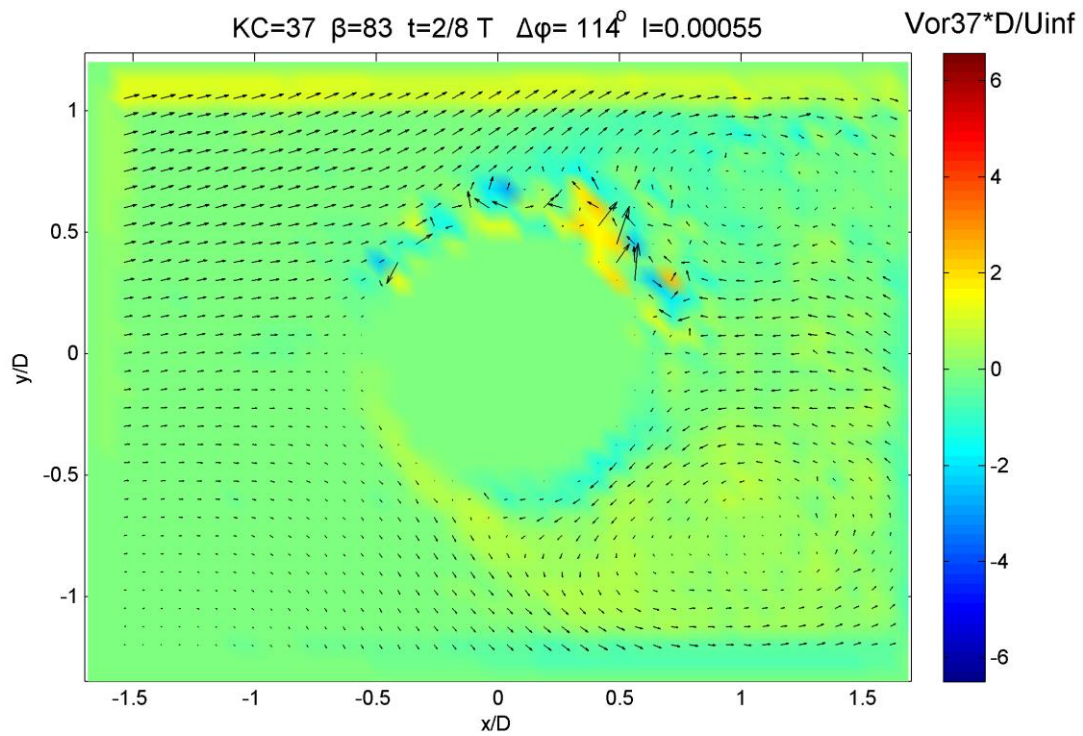
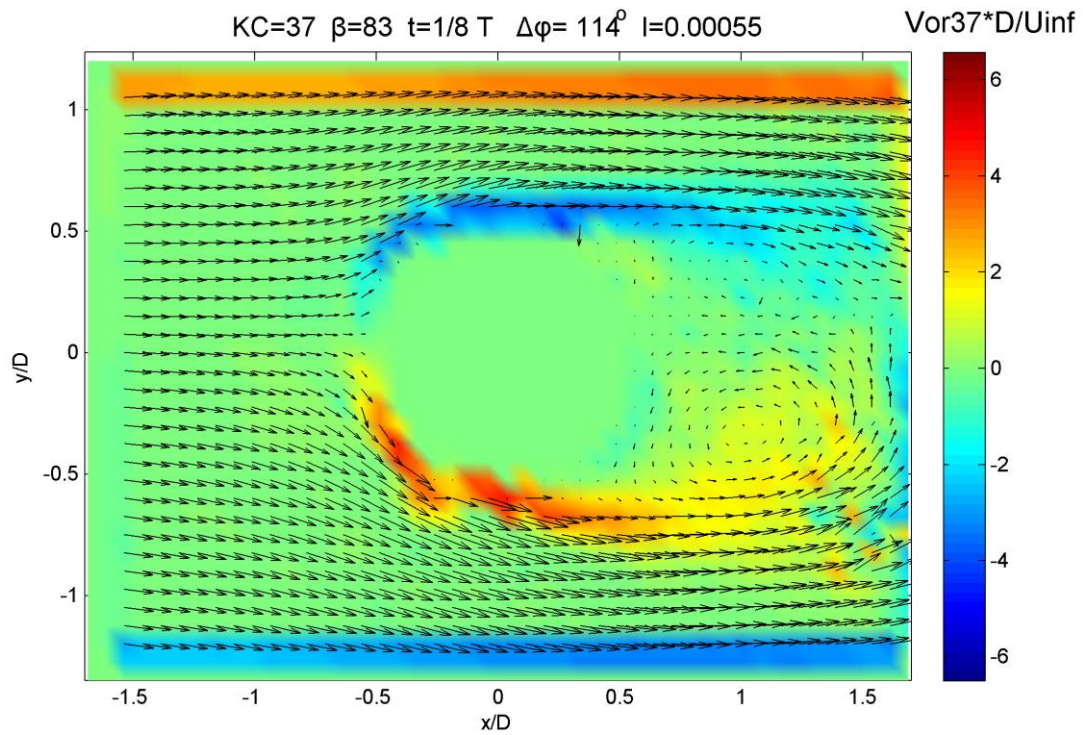


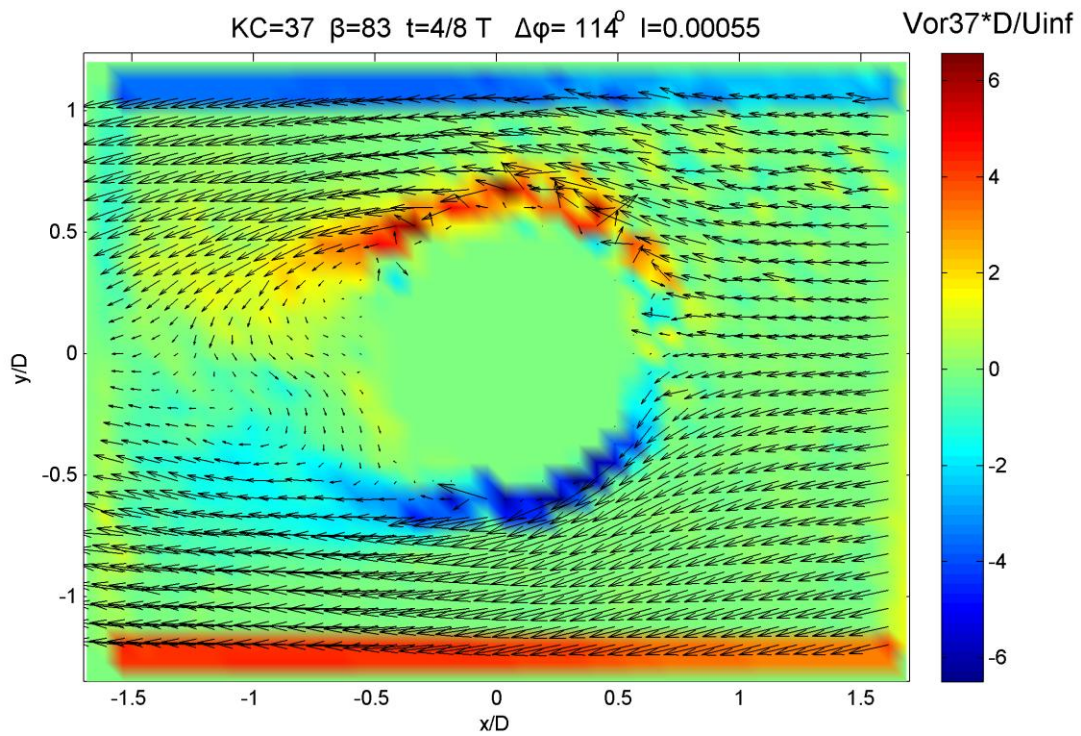
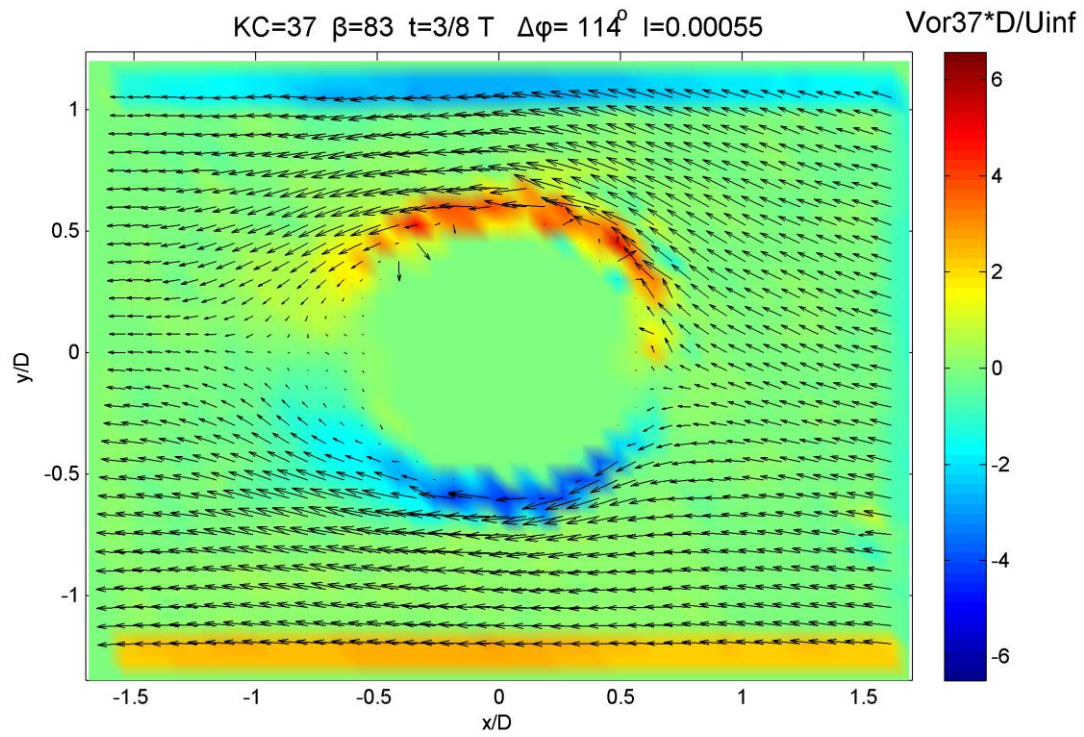


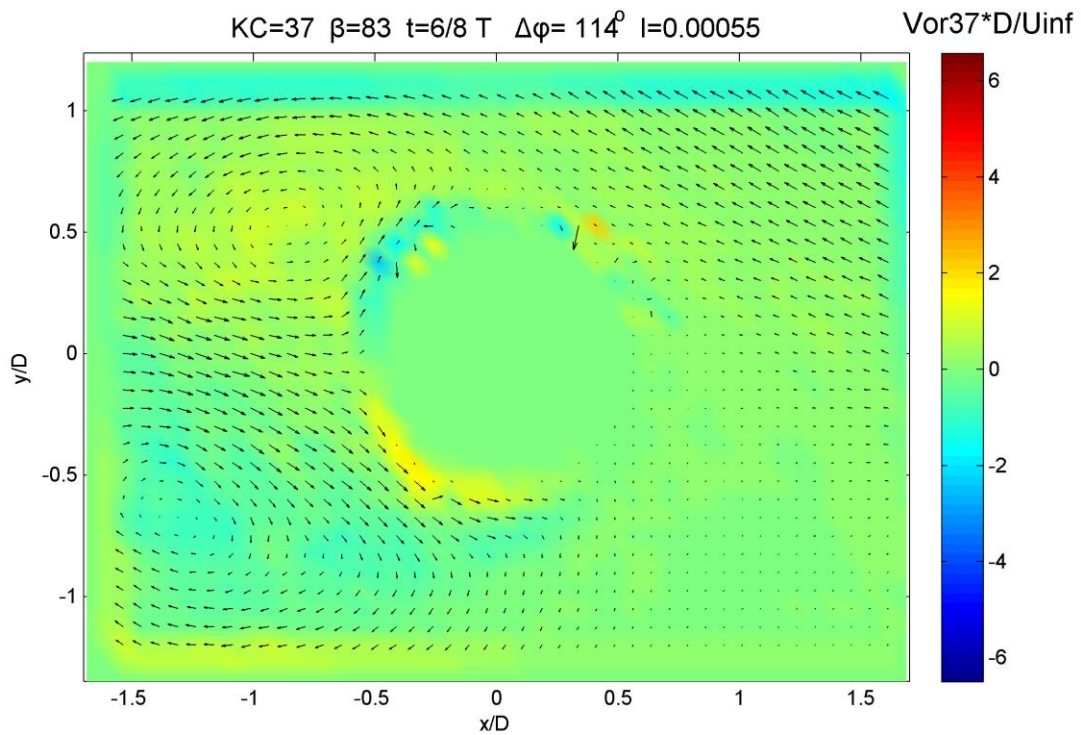
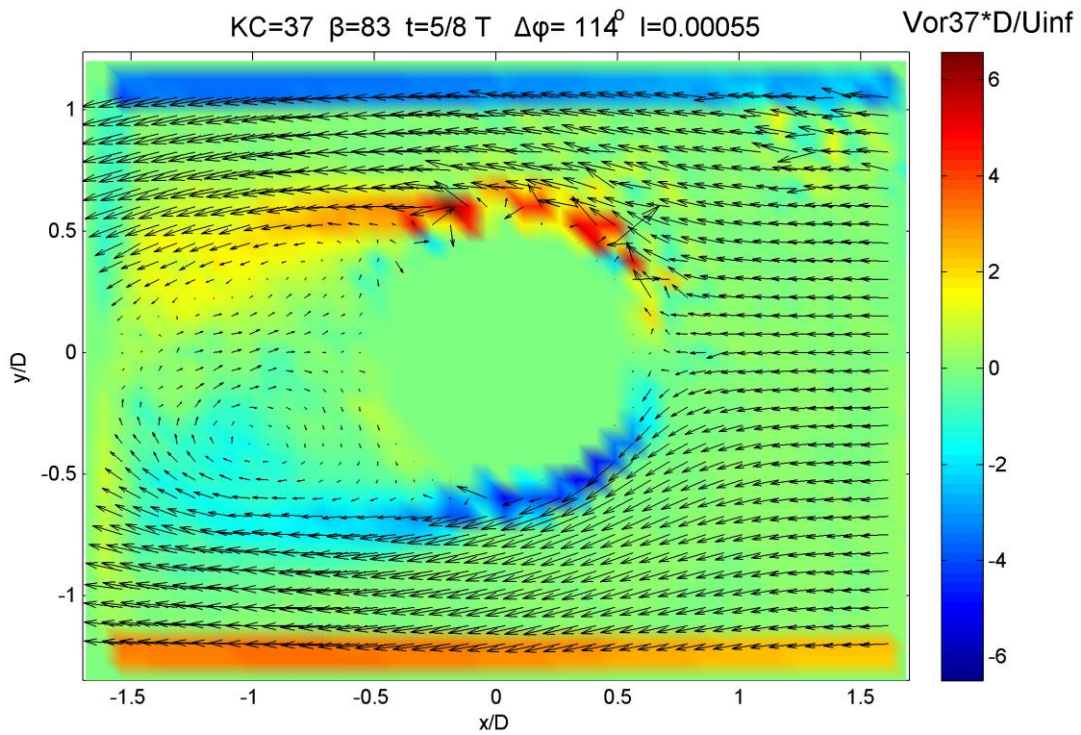


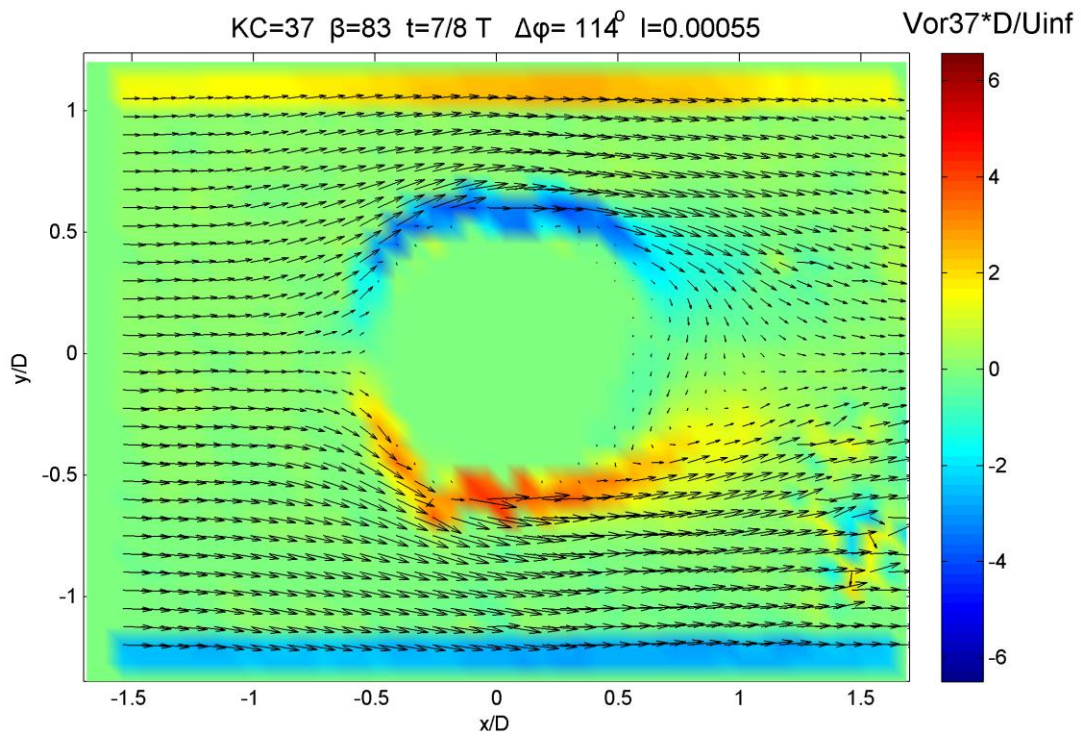
*Οι παρακάτω 8 εικόνες παρουσιάζουν την αδιάστατη στροβιλότητα*



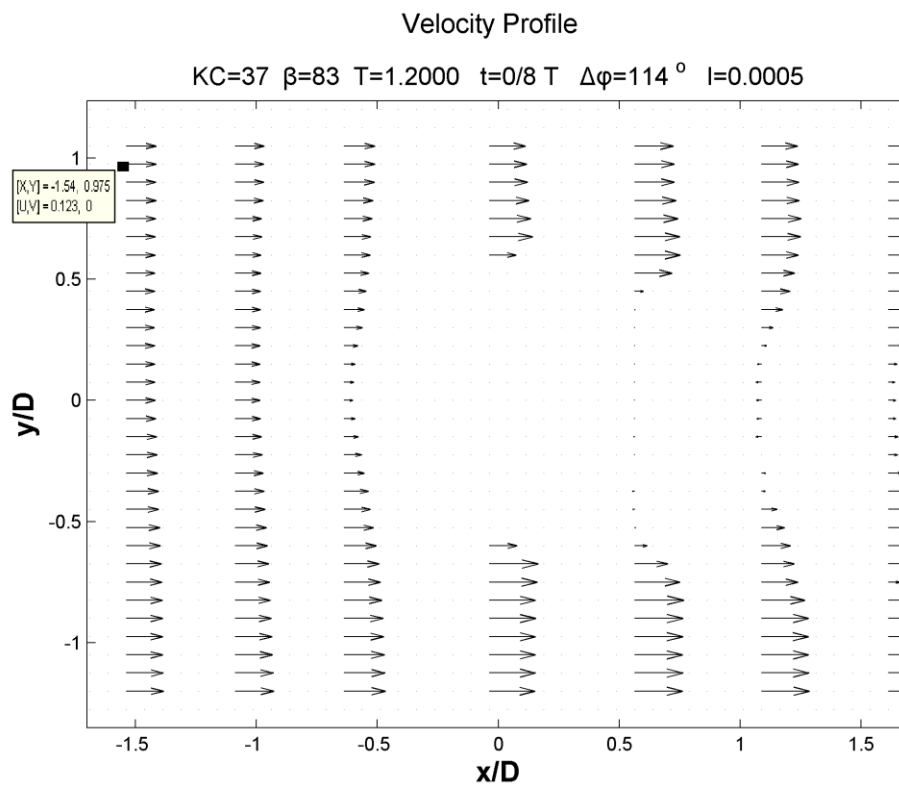


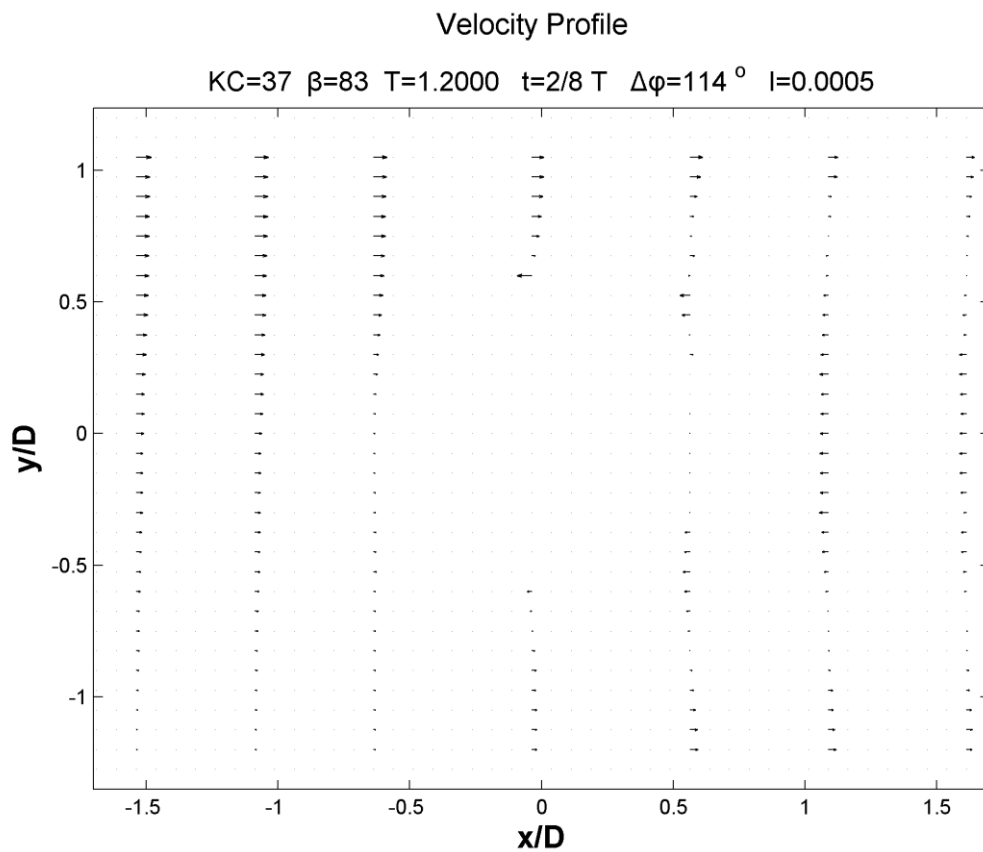
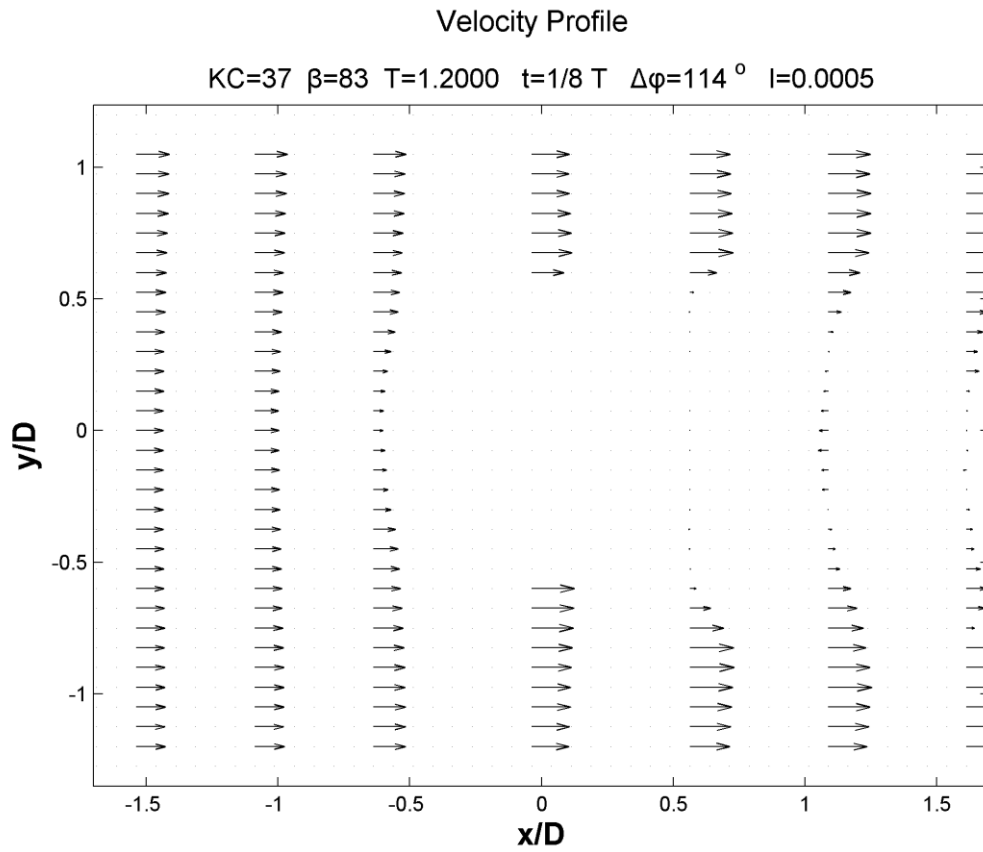


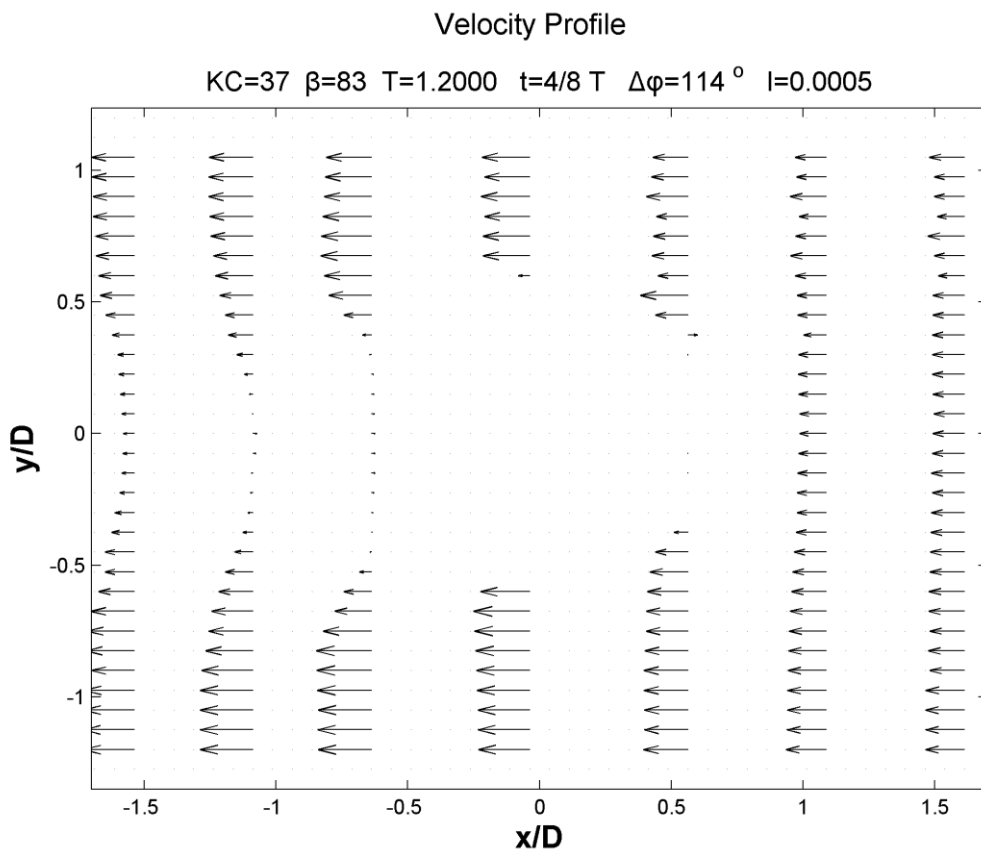
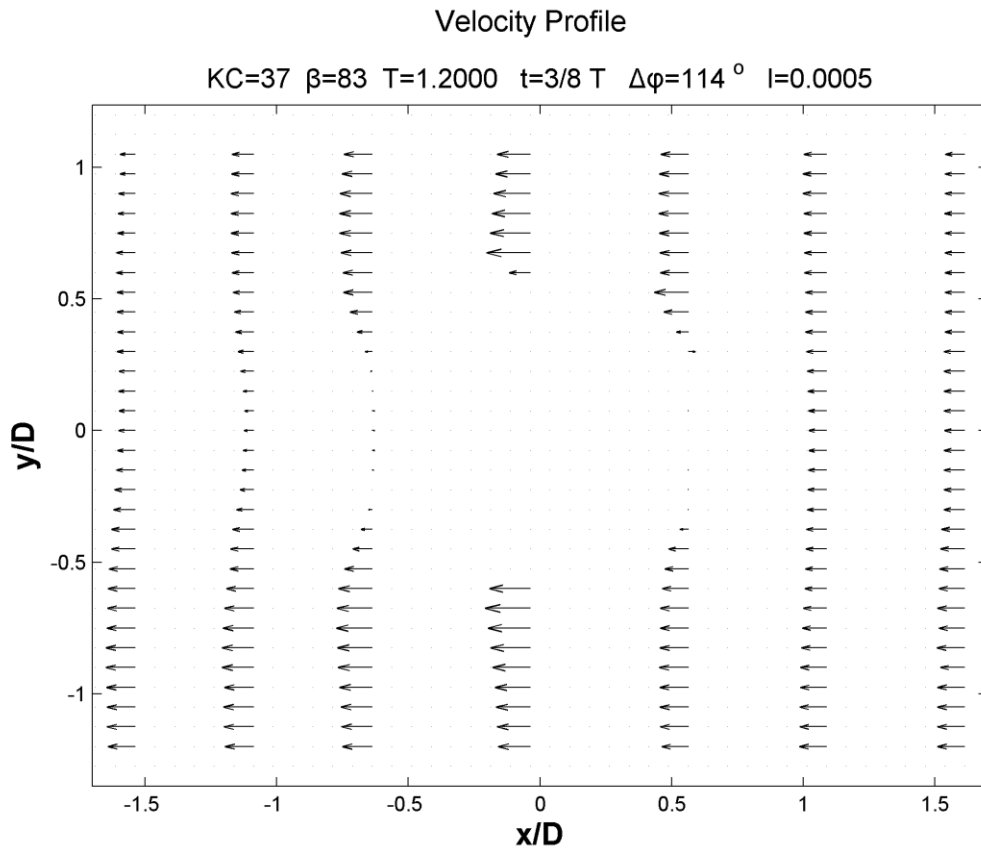


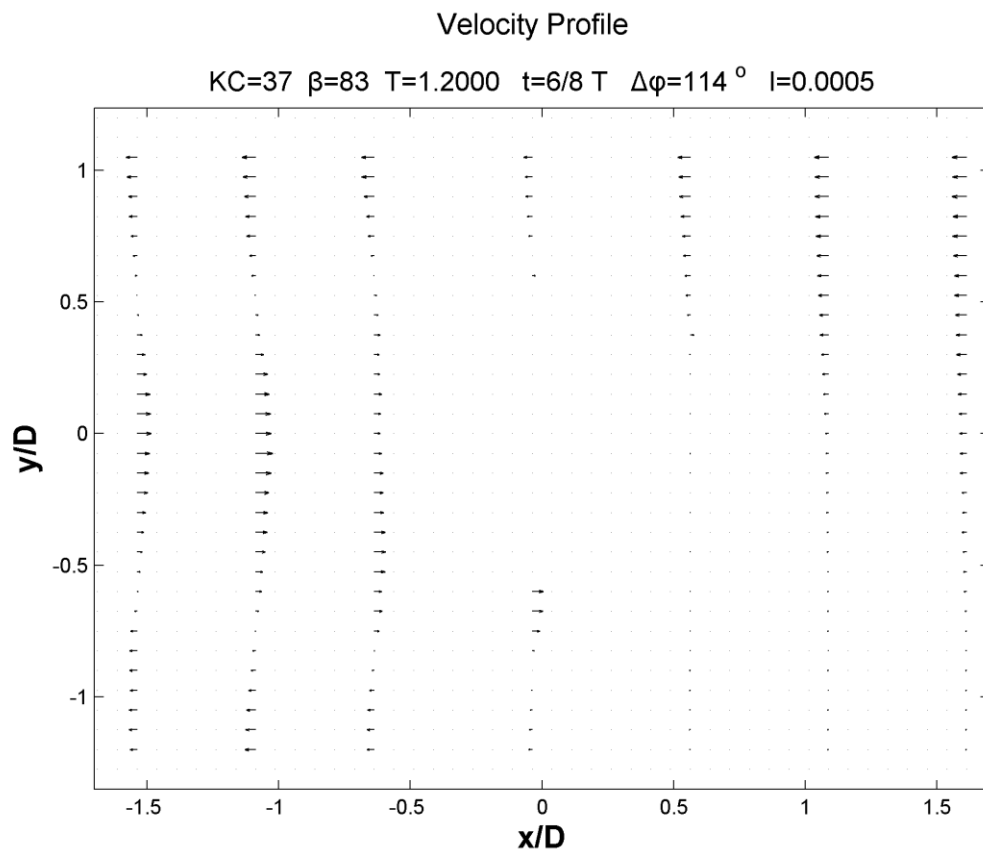
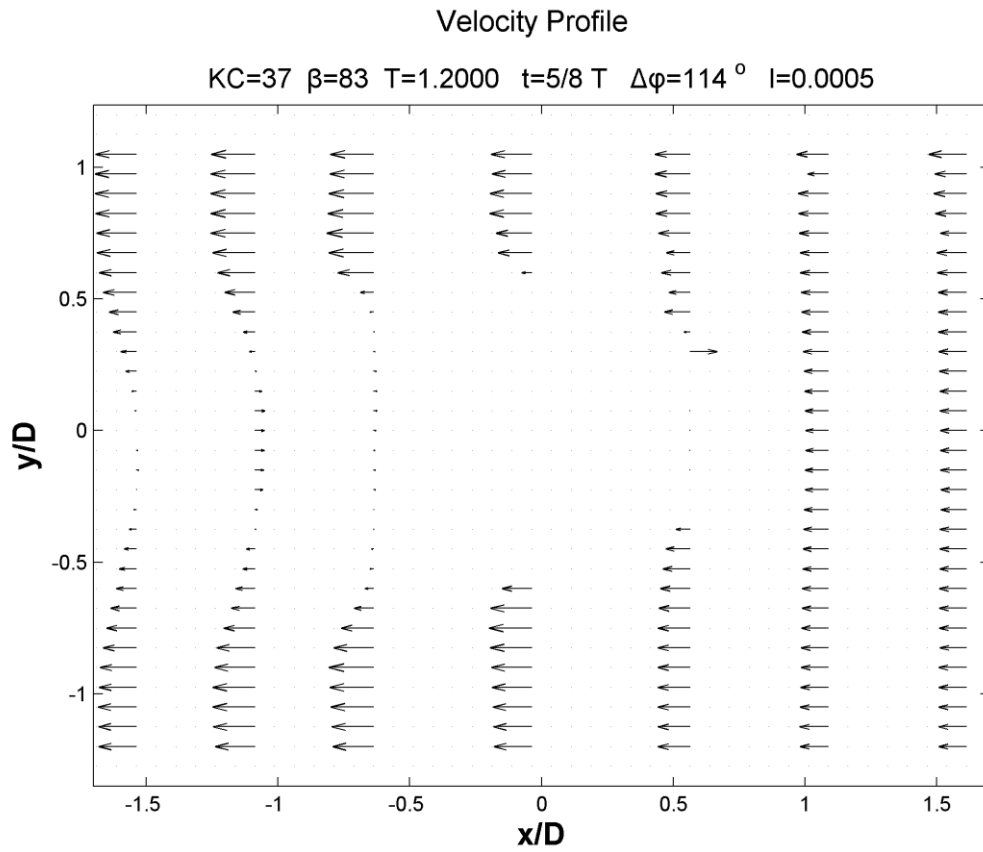


#### 4.5.5.2. Προφίλ ταχύτητας U (Velocity profile)

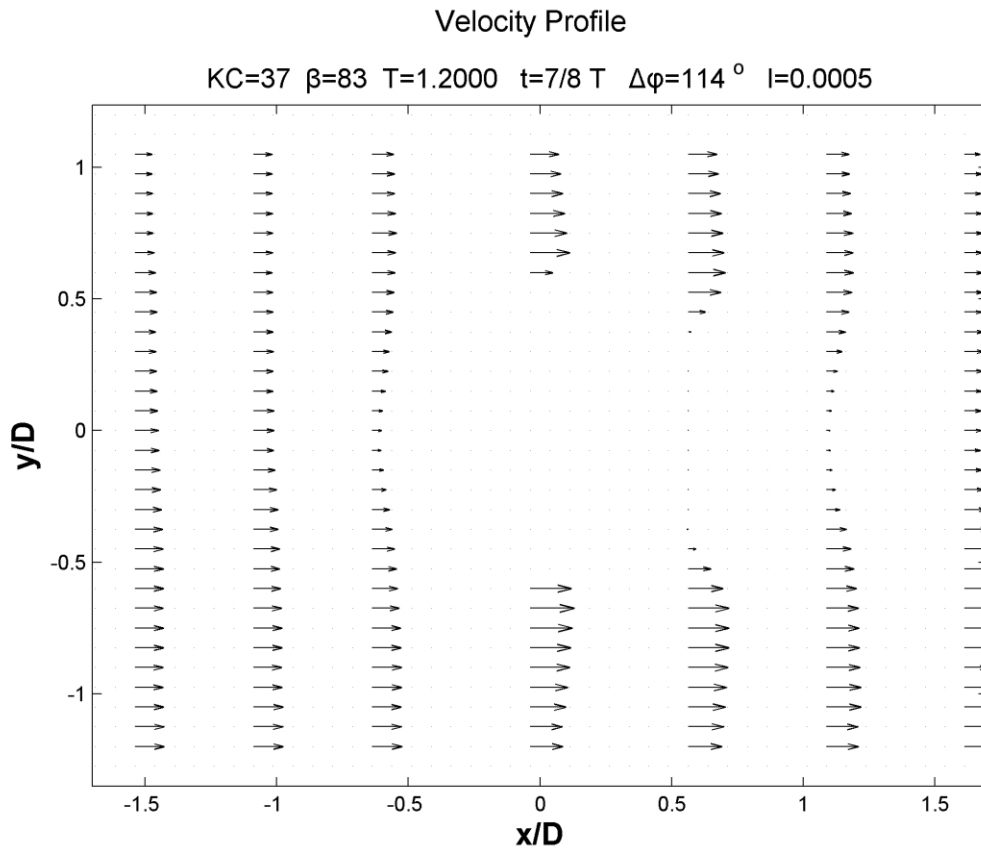




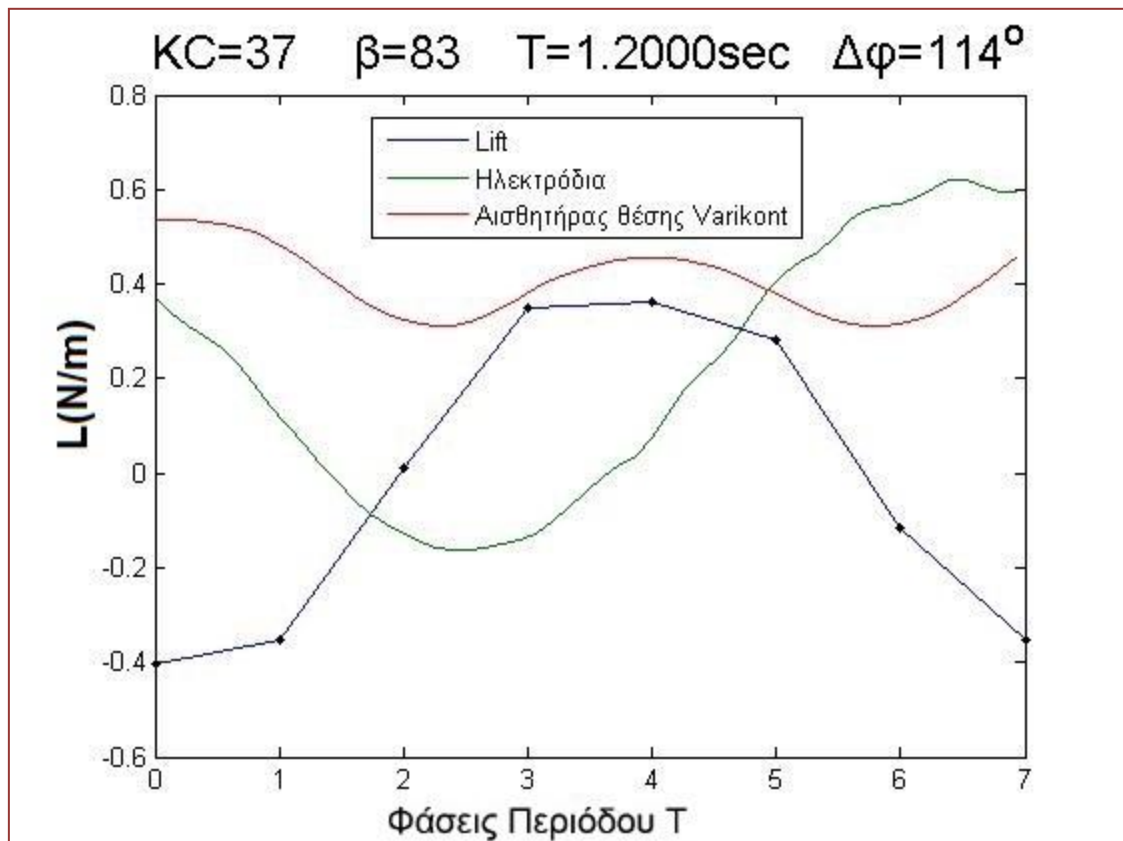


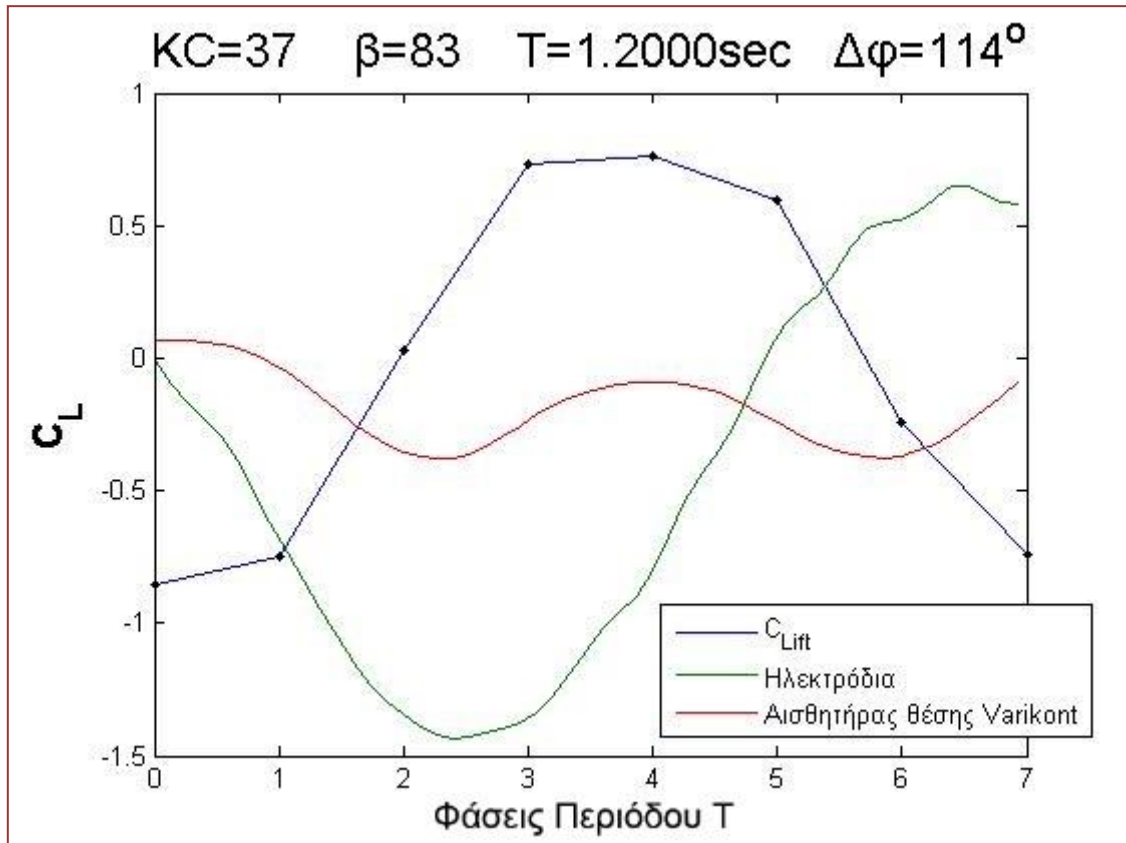






#### 4.5.5.1. Δύναμη Άνωσης L

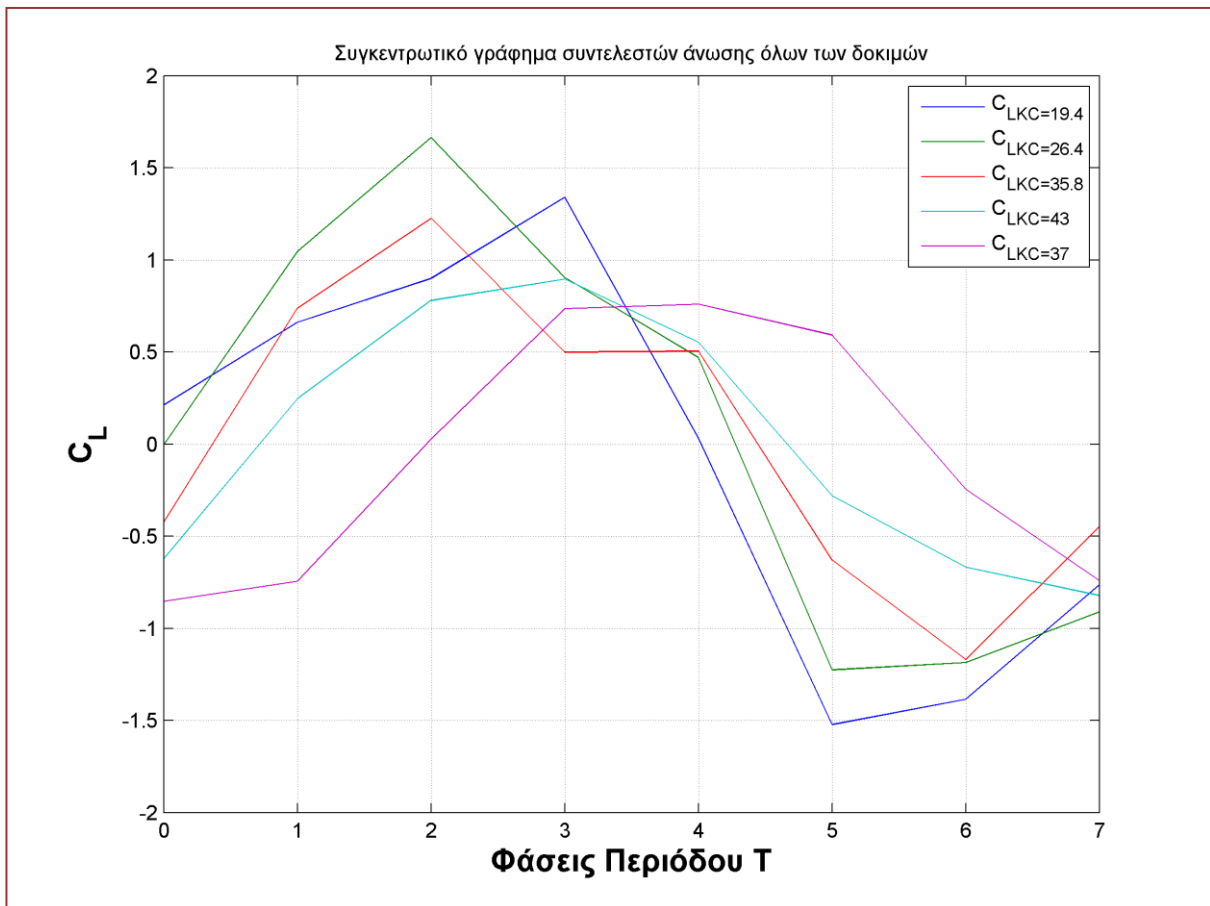
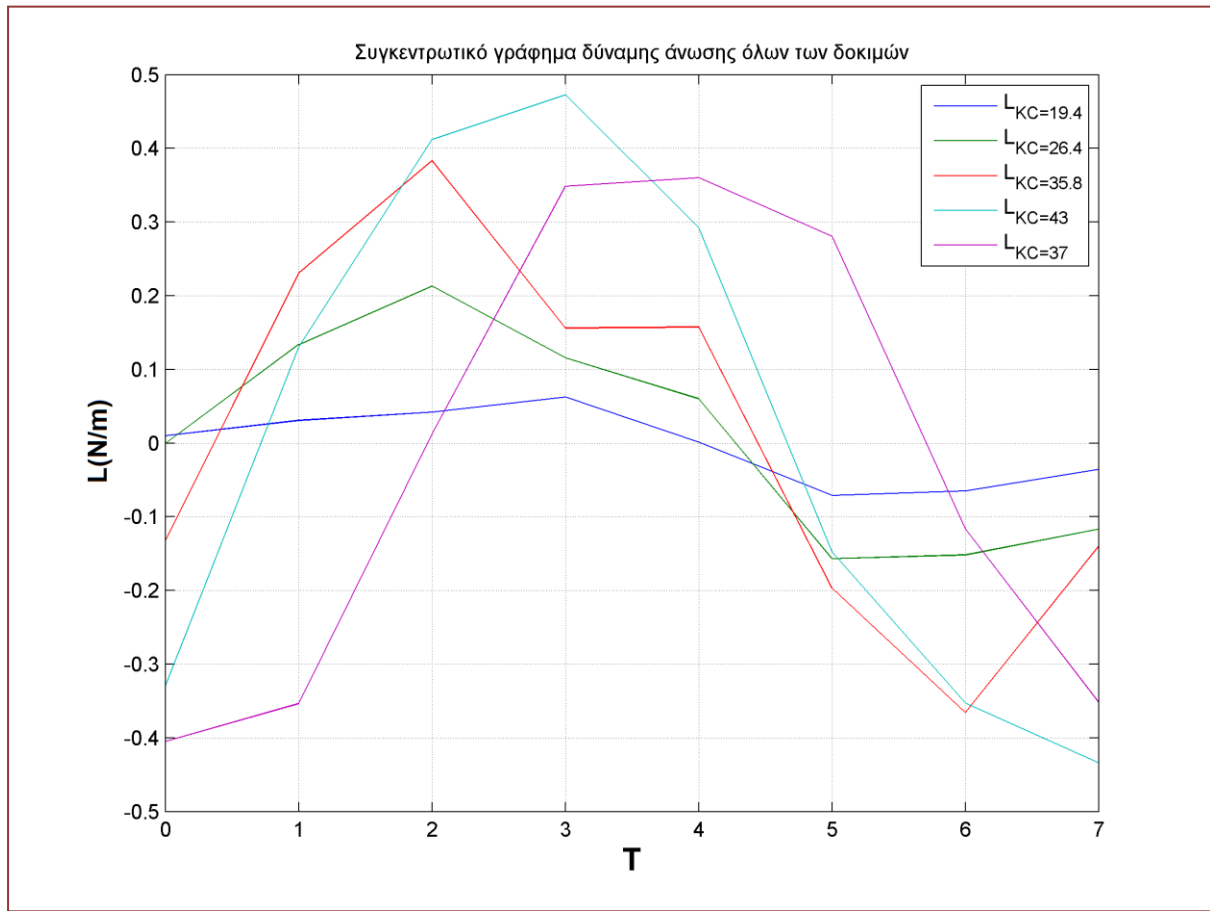


4.5.5.2. Συντελεστής Άνωσης  $C_L$ 

Για  $KC=37$  και  $\beta=83$ , άρα πτώση του πλάτους της στάθμης νερού και αύξηση της συχνότητας, οι εικόνες  $t=0/8T$  και  $t=4/8T$  απεικονίζουν τα μέγιστα της ταχύτητας της ροής. Αυτές τις χρονικές στιγμές παρατηρείται στον ομόρου του κυλίνδρου ότι η ροή σχηματίζει ένα **S**, που στη συνέχεια μετατρέπεται σε δύο δίνες αντίθετου προσήμου και ίδιου μεγέθους. Το ζευγάρι αυτό των δινών παραμένει προσκολλημένο στον κύλινδρο μέχρι και λίγο πριν τη μετάβαση στον επόμενο μισό κύκλο, ύστερα βρίσκεται αποκολλημένο και ανάντι του κυλίνδρου όπως το ζεύγος της προηγούμενης περίπτωσης.

Όπως και στις περισσότερες παραπάνω περιπτώσεις, έτσι και σε αυτήν τα μέγιστα της δύναμης και του συντελεστή άνωσης παρατηρήθηκαν κατά της φάση της μέγιστης ταχύτητας του νερού και της δημιουργίας δινών, όπως και αναμενόταν.

## 4.5.6. Συγκεντρωτικά γραφήματα δύναμης και συντελεστή άνωσης



Το γράφημα της δύναμης άνωσης παρουσιάζει τη δύναμη που ασκείται στο κύλινδρο κατά τις φάσεις μιας περιόδου  $T$  για όλα τα  $KC$  και  $\beta$  για τα οποία πραγματοποιήθηκε η πειραματική μελέτη.

Με βάση αυτό το γράφημα φαίνεται ότι όσο το  $KC$  πλησιάζει το  $KC_{\text{ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ}}$  τόσο αυξάνει και η δύναμη άνωσης και ενώ όταν το  $KC$  ξαναπέφτει μειώνεται. Άρα, η δύναμη άνωσης  $L$  είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού  $KC$  και αντίστροφα.

Αντίθετα και με βάση το δεύτερο γράφημα, ο συντελεστής άνωσης  $C_L$  δεν παρουσιάζει την ίδια εξάρτηση από το  $KC$  σε αντίθεση με τη δύναμη άνωσης  $L$ .

**Σημείωση:** το  $l$  στον τίτλο κάθε εικόνας (vorticity και velocity profile) είναι ο αριθμός που πρέπει να διαιρεθεί η ταχύτητα για να προκύψει η πραγματική της τιμή.



## 5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στη παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιώντας τη τεχνική PIV, μελετήθηκε το φαινόμενο της παλλόμενης ροής γύρω από ακίνητο κύλινδρο για αριθμούς Keulegan-Carpenter που πλησίαζαν και ξεπερνούσαν τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος δοχείου ανεστραμμένου-Π και νερού.

Η παρούσα διπλωματική μελέτη πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, για τους αριθμούς  $KC= 19.4, 26.4, 35.8, 43, 37,$  και παράμετρο  $\beta= 50, 61, 70, 76, 83,$  αντίστοιχα και αποτελεί μια προσπάθεια προσέγγισης του συγκεκριμένου σύνθετου μη μόνιμου υδροδυναμικού προβλήματος.

Παρακάτω παρατίθενται τα συμπεράσματα που πρόέκυψαν:

- Παρατηρήσαμε ένα "λίγο-πολύ" σταθερό μοτίβο δινών που εμφανίζονται ως ζεύγη σε κάθε ημiperίοδο στον ομόρρου του κυλίνδρου, σε αντίθεση με άλλες πειραματικές έρευνες σύμφωνα με τις οποίες ο αριθμός των δινών αποτελεί συνάρτηση του  $KC$  και του  $\beta$ , όπου όμως οι τιμές του  $\beta$  ήταν σταθερές με μεταβλητό τον  $KC$  και πολύ μεγαλύτερες συγκρινόμενες με της παρούσας εργασίας. Επίσης, η περιοχή παρατήρησης στη δική μας περίπτωση ήταν αρκετά μικρότερη από ότι στη βιβλιογραφία και πιθανότατα δεν παρατηρήσαμε περισσότερες δίνες.
- Στην αρχή κάθε ημiperίοδου σχηματίζεται ένα ζεύγος δινών, αλλά γενικά όχι ακριβώς ταυτόχρονα. Τις επόμενες χρονικές στιγμές η πιο αναπτυγμένη δίνη αποκολλάται νωρίτερα από την άλλη και απομακρύνεται από τον κύλινδρο. Ταυτόχρονα, η τελευταία δυναμώνει προοδευτικά παίρνοντας την μεγαλύτερη τιμή της όταν η άλλη δίνη δεν βρίσκεται πλέον στο παράθυρο παρατήρησης του πειράματος.
- Οι δίνες κινούνται κατάντι και συνήθως παράλληλα προς την κύρια κατεύθυνση της ροής πλην κάποιων περιπτώσεων που κινούνται υπό γωνία ως προς αυτήν.
- Η παράμετρος  $\beta$  φαίνεται να καθορίζει τη χρονική διαφορά γέννησης των δύο δινών. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η αδιάστατη παράμετρος  $\beta$ , η χρονική διαφορά μικραίνει και μετά από κάποια τιμή π.χ. στην περιοχή του μέγιστου πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (συντονισμός μάζας νερού), οι δίνες δημιουργούνται σχεδόν ταυτόχρονα.
- Η ένταση των δινών φαίνεται να είναι ανάλογη του  $KC$ , ενώ η μέση στροβιλότητα του πεδίου είναι ανάλογη του  $\beta$ . Δηλαδή, οι δίνες στο συντονισμό εμφανίζουν τη μέγιστη κυκλοφορία τους, καθώς η στροβιλότητα φαίνεται να αυξάνεται με αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης.
- Η άνωση  $L$  είναι ανάλογη του  $KC$  και μεγιστοποιείται στη μέγιστη τιμή του  $KC=43$ . Η παρατήρηση αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια υπεράκτια πλατφόρμα όπου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εκτός από τη διάμετρο των ποδιών της κατασκευής και το πλάτος των κυμάτων για τον περιορισμό των ασκούμενων υδροδυναμικών φορτίων.

Κλείνοντας, το φαινόμενο που περιγράφηκε και αναλύθηκε στην παρούσα εργασία εμφανίζεται έντονα σε υπεράκτιες πλατφόρμες, στις βάσεις ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα, υποβρύχιους αγωγούς, καλώδια και πολλές άλλες κατασκευές. Για τον λόγο

αυτό, τα συμπεράσματα που εξάγονται παραπάνω θα μπορούσαν να είναι χρήσιμα στον σχεδιασμό και την μελέτη όλων των προαναφερθεισών κατασκευών.

## Παράρτημα Α'

```

close all
clear all
clear
%%%%%%%%%% Import Data %%%%%%%%%%%
d = ['0' '1' '2' '3' '4' '5' '6' '7'];
Kc27 = zeros(1610,4,8);
Kc43 = zeros(1610,4,8);
Kc14_6 = zeros(1610,4,8);
Kc35_8 = zeros(1610,4,8);
Kc26_4 = zeros(1610,4,8);
Kc19_4 = zeros(1610,4,8);

for n=1:8
%s = ['D:\ΜΙΠΤ\ΚC=19-4\T-' d(n) '-8000.dat' ]; Kc19_4(:,:,n) = importdata( s );
s = ['D:\ΜΙΠΤ\ΚC=27\T-' d(n) '-8000.dat' ]; Kc27(:,:,n) = importdata( s );
s = ['D:\ΜΙΠΤ\ΚC_43\T-' d(n) '-8000.dat' ]; Kc43(:,:,n) = importdata( s );
s = ['D:\ΜΙΠΤ\Κc 14,6\T-' d(n) '-8000.dat' ]; Kc14_6(:,:,n) = importdata( s );
s = ['D:\ΜΙΠΤ\kc=35-8\T-' d(n) '-8000.dat' ]; Kc35_8(:,:,n) = importdata( s );
s = ['D:\ΜΙΠΤ\kc= 26,4\T-' d(n) '-8000.dat' ]; Kc26_4(:,:,n) = importdata( s );

end

sin14_6=importdata('D:\waveforms\14-6.txt');
sin19_4=importdata('D:\waveforms\19-4.txt');
sin26_4=importdata('D:\waveforms\26-4.txt');
sin37=importdata('D:\waveforms\37.txt');
sin43=importdata('D:\waveforms\43.txt');
sin35_8=importdata('D:\waveforms\35-8.txt');

%%%%%%%%%% Velocity Array %%%%%%%%%%%
a = zeros(1610,4,8);
m=55;
for n=1:8

```



```

for i=1:1610
a = Kc19_4;
if (a(i,1,n)-688).^2 + (a(i,2,n)-480).^2 < m*1024 Kc19_4(i,3,n)=0; Kc19_4(i,4,n)=0;
end
a = Kc27;
if (a(i,1,n)-688).^2 + (a(i,2,n)-480).^2 < m*1024 Kc27(i,3,n)=0; Kc27(i,4,n)=0;
end
a = Kc43;
if (a(i,1,n)-688).^2 + (a(i,2,n)-480).^2 < m*1024 Kc43(i,3,n)=0; Kc43(i,4,n)=0;
end
a = Kc14_6;
if (a(i,1,n)-688).^2 + (a(i,2,n)-480).^2 < m*1024 Kc14_6(i,3,n)=0; Kc14_6(i,4,n)=0;
end
a = Kc35_8;
if (a(i,1,n)-688).^2 + (a(i,2,n)-480).^2 < m*1024 Kc35_8(i,3,n)=0; Kc35_8(i,4,n)=0;
end
a = Kc26_4;
if (a(i,1,n)-688).^2 + (a(i,2,n)-480).^2 < m*1024 Kc26_4(i,3,n)=0; Kc26_4(i,4,n)=0;
end
end
end
end

```

```

x=zeros(35,46); y=zeros(35,46);
u19_4=zeros(35,46,8); v19_4=zeros(35,46,8);
u27=zeros(35,46,8); v27=zeros(35,46,8);
u43=zeros(35,46,8); v43=zeros(35,46,8);
u14_6=zeros(35,46,8); v14_6=zeros(35,46,8);
u35_8=zeros(35,46,8); v35_8=zeros(35,46,8);
u26_4=zeros(35,46,8); v26_4=zeros(35,46,8);

```

```

x = vec2mat ( Kc19_4(:,1,1), 46 ); y = vec2mat ( Kc19_4(:,2,1), 46 );
X=(x-688)*24/10240; Y=(480-y)*24/10240;

```

```

for n=1:8
u19_4(:, :, n) = vec2mat ( Kc19_4(:,3,n), 46 ); v19_4(:, :, n) = vec2mat ( Kc19_4(:,4,n), 46 );
u27(:, :, n) = vec2mat ( Kc27(:,3,n), 46 ); v27(:, :, n) = vec2mat ( Kc27(:,4,n), 46 );

```

```

u43(:,n) = vec2mat ( Kc43(:,3,n), 46 ); v43(:,n) = vec2mat ( Kc43(:,4,n), 46 );
u14_6(:,n) = vec2mat ( Kc14_6(:,3,n), 46 ); v14_6(:,n) = vec2mat ( Kc14_6(:,4,n), 46 );
u35_8(:,n) = vec2mat ( Kc35_8(:,3,n), 46 ); v35_8(:,n) = vec2mat ( Kc35_8(:,4,n), 46 );
u26_4(:,n) = vec2mat ( Kc26_4(:,3,n), 46 ); v26_4(:,n) = vec2mat ( Kc26_4(:,4,n), 46 );
end

v35_8(:,8) = -v35_8(:,8)/100;
u35_8(:,8) = u35_8(:,8)/100;
v35_8(:,4) = v35_8(:,4)*1000;
u35_8(:,4) = u35_8(:,4)*1000;

%%%%%%%%%%%% Vorticity Calculation %%%%%%%%%%
Vor19_4=zeros(35,46,8); Vor27=zeros(35,46,8); Vor43=zeros(35,46,8); Vor26_4=zeros(35,46,8);
Vor14_6=zeros(35,46,8); Vor35_8=zeros(35,46,8);
a = zeros(35,46,8); b = zeros(35,46,8);

for n=1:8
a = u19_4; b = v19_4; Vor19_4(:,n) = curl( x*24/1024, -y*24/1024, a(:,n), b(:,n) ) * 10 / 96.66;
a = u27; b = v27; Vor27(:,n) = curl( x*24/1024, -y*24/1024, a(:,n), b(:,n) ) * 10 / 308.92;
a = u43; b = v43; Vor43(:,n) = curl( x*24/1024, -y*24/1024, a(:,n), b(:,n) ) * 10 / 326.05;
a = u14_6; b = v14_6; Vor14_6(:,n) = curl( x*24/1024, -y*24/1024, a(:,n), b(:,n) ) * 10 / 25.23;
a = u26_4; b = v26_4; Vor26_4(:,n) = curl( x*24/1024, -y*24/1024, a(:,n), b(:,n) ) * 10 / 159.74;
a = u35_8; b = v35_8; Vor35_8(:,n) = curl( x*24/1024, -y*24/1024, a(:,n), b(:,n) ) * 10 / 252.21;
min1(n)=min(min(min(Vor14_6)));
max1(n)=max(max(max(Vor14_6)));
end

%%%%%%%%%%%% Vorticity Field-Visualization %%%%%%%%%%
top=max(max1);
bottom=min(min1);

g = ['8' '1' '2' '3' '4' '5' '6' '7'];
close all
l=0.002;

```

```

a = zeros(35,46,8); b = zeros(35,46,8);
for n=1:8
    pcolor( X, Y, Vor14_6(:, :, n) );
    hold on;
    shading interp
    a = u14_6; b = v14_6;

    axis equal
    quiver( X, Y, l*a(:, :, n), l*b(:, :, n), 'k', 'Autoscale', 'Off' )
    hold off
    caxis manual
    caxis([bottom top]);
    hcb=colorbar;
    colorTitleHandle = get(hcb,'title');
    titleString = ' Vor14,6*D/Uinf';
    set(colorTitleHandle , 'String', titleString, 'FontSize', 14);
    xlabel('x/D')
    ylabel('y/D')
    str = ['KC=19,4    t=' g(n) '/8 T'];
    title( str, 'FontSize', 13 )

    pause
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Circulation %%%%%%%%%
c19_4 = zeros(1,8); c27 = zeros(1,8); c43 = zeros(1,8); c14_6 = zeros(1,8); c35_8 = zeros(1,8);
c26_4 = zeros(1,8);
a = zeros(35,46,8);
m = 64;
for n=1:8
    for i=1:35
        for j=1:46
            if (x(i,j)-688).^2 + (y(i,j)-512).^2 < m*1024    c19_4(1,n) = c19_4(1,n) + Vor19_4(i,j,n);
            end
            if (x(i,j)-688).^2 + (y(i,j)-512).^2 < m*1024    c27(1,n) = c27(1,n) + Vor27(i,j,n);
            end
        end
    end
end

```

```

if (x(i,j)-688).^2 + (y(i,j)-512).^2 < m*1024  c43(1,n) = c43(1,n) + Vor43(i,j,n);
end
if (x(i,j)-688).^2 + (y(i,j)-512).^2 < m*1024  c26_4(1,n) = c26_4(1,n) + Vor26_4(i,j,n);
end
if (x(i,j)-688).^2 + (y(i,j)-512).^2 < m*1024  c14_6(1,n) = c14_6(1,n) + Vor14_6(i,j,n);
end
if (x(i,j)-688).^2 + (y(i,j)-512).^2 < m*1024  c35_8(1,n) = c35_8(1,n) + Vor35_8(i,j,n);
end
end
end
end

%%%%%%%%%%%%% Lift Forces and plotting %%%%%%%%%%%%%%
j=-1/1000000000;
plot([0:7],j*c14_6*0.5625*(1000*25.2),[0:7],j*c19_4*0.5625*(1000*96.7),[0:7],j*c26_4*0.5625*(1000*160),[0:7],j*c35_8*0.5625*(1000*250),[0:7],j*c43*0.5625*(1000*325),[0:7],j*c27*0.5625*(1000*308)
)
legend('14,6','19,4','26,4','35,8','43','37')

%%%%%%%%%%%%% Lift Coefficient and plotting %%%%%%%%%%%%%%
plot([0:7],-c14_6*0.5625/(5*25.2),[0:7],-c19_4*0.5625/(5*96.7),[0:7],-c26_4*0.5625/(5*160),[0:7],-c35_8*0.5625/(5*250),[0:7],-c43*0.5625/(5*325),[0:7],-c27*0.5625/(5*308))
legend('14,6','19,4','26,4','35,8','43','37')

%%%%%%%%%%%%% Phase finding and plotting %%%%%%%%%%%%%%
elec=zeros(500,1); vari=zeros(500,1);
e=zeros(500,3); v=zeros(500,3);

time=sin43(1:410,1);
elec=sin43(1:410,2);
vari=sin43(1:410,3);

n=0;
for j=50:450
if (elec(j)-mine)<=0.2*(maxe-mine) & (elec(j-1)-mine)>=0.2*(maxe-mine)      n=n+1;
e(n,1)=time(j);

```

```

end
if      (elec(j)-mine)>=0.2*(maxe-mine)      &      (elec(j-1)-mine)<=0.2*(maxe-mine)
e(n,2)=time(j);
end
end

e(:,3)=(e(:,1)+e(:,2))/2;
e=e(1:n,:);

n=0;
for j=2:475
if (vari(j)-minv)>=0.8*(maxv-minv) & (vari(j-1)-minv)<=0.8*(maxv-minv)      n=n+1;
v(n,1)=time(j);
end
if      (vari(j)-minv)<=0.8*(maxv-minv)      &      (vari(j-1)-minv)>=0.8*(maxv-minv)
v(n,2)=time(j);
end
end

v(:,3)=(v(:,1)+v(:,2))/2;
v=v(1:n,:);

DT = abs( mean( v(:,3)-e(:,3) ) )

plot(time(1:210),elec(1:210),time(1:210),vari(1:210)),e(:,3),(maxe+mine)/2,v(:,3),(maxv+minv)
/2)

title('KC=43  β=76')
xlabel('t(sec)')
ylabel('Volts(V)')

legend('Ηλεκτρόδια','Αισθητήρας θέσης Varikont')

```

## Παράρτημα Β'

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Triggering (C++) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
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;

}
```

## 6. Βιβλιογραφία

---

1. [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org).
2. [www.marin.nl](http://www.marin.nl).
3. [offshorewind.org](http://offshorewind.org).
4. **Sarpkaya, Turgut**. Δυνάμεις πάνω σε κύλινδρο που βρίσκεται μέσα σε παλλόμενη συνεκτική ροή σε χαμηλούς αριθμούς Keulegan-Carpenter. 1986, 165.
5. <http://www.arduino.cc/>.
6. **W. Althaus, CH. Brücker**. *Breakdown of Slender Vortices*. 1995.
7. **Williamson, C.H.K.** Μελέτη παλλόμενης ροής γύρω από κύλινδρο. 1985, Τόμ. 155.
8. **Obasaju, Bearman, Graham**. Μελέτη δυνάμεων, κυκλοφορίας και μοτίβων δυνών γύρω από κύλινδρο σε παλλόμενη ροή. 1988, 196.
9. **M. TATSUNO, P. W. BEARMAN**. A visual study of the flow around an oscillating circular cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers and low Stokes numbers. 1990, Τόμ. 211.
10. **JUSTESEN, PETER**. A numerical study of oscillating flow around a circular cylinder. 1991, Τόμ. 222.
11. **A. ONGOREN, D. ROCKWELL**. Flow structure from an oscillating cylinder Part 1 Mechanisms of phase shift and recovery in the near wake. 1988, Τόμ. 188.
12. **Σωκράτης, Τσαγγάρης**. *Μηχανική των Ρευστών*. Αθήνα : Συμεών, 2005.
13. **Δημήτριος, Μαθιουλάκης**. "*Μηχανική των Ρευστών II*". Αθήνα : ΕΜΠ, 2011.
14. **Karman, T. Von**. *Airfoil theory for non-uniform motion*. 1938.
15. **K.M.Lam, J.C.Hu,P.Liu**. *Vortex formation processes from an oscillating circular cylinder at high Keulegan-Carpenter numbers*, 2010
16. **J.C.Lin, D.Rockwell**. *Quantitative interpretation of vortices from a cylinder oscillating in quiescent fluid*. 1996
17. **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. Τόμ. 18