

Εντοπισμός δινών από συστοιχία αισθητήρων πίεσης σε ροής με απότομη διεύρυνση

Καπίρης Παναγιώτης, υποψήφιος διδάκτορας
Μαθιουλάκης Δημήτριος, Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων, Τομέας Ρευστών
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 15773
e-mail: mathew@fluid.mech.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

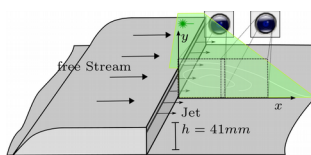
Μελετήθηκε πειραματικά μέσω 2D PIV η ροή στην περιοχή ανακυκλοφορίας απότομης διεύρυνσης υπό συνθήκες διέγερσης εισάγοντας παλμικά ρευστό κοντά στην ακμή της με στόχο την μείωση του μήκους ανακυκλοφορίας αφενός και αφετέρου για την συντονισμένη πρόκληση δινών προκειμένου να μελετηθούν δυναμικά χαρακτηριστικά. Με βάση το ύψος της διεύρυνσης ο αριθμός Reynolds ήταν περίπου 7000 και οι αριθμοί Strouhal (St) του εισαγόμενου ρευστού που εξετάστηκαν κυμαίνονταν στην περιοχή από μηδέν έως 0.23. Στον βέλτιστο St επιτεύχθηκε μείωση του μήκους ανακυκλοφορίας κατά 20%. Με βάση εν φάσει μετρήσεις καταγράφηκε το πεδίο ταχυτήτων σε 14 χρονικές στιγμές της περιόδου για την βέλτιστη συχνότητα διέγερσης καθώς και για μια υποαρμονική της. Εφαρμόζοντας την τεχνική POD (proper orthogonal decomposition) και το κριτήριο λ_2 έγινε εντοπισμός των δινών σε κάθε στιγμιότυπο και διαγράφηκαν οι τροχιές τους και κατ' επέκταση η ταχύτητα τους μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών. Ανεξάρτητο πείραμα με την ίδια ροή περιλάμβανε δίκτυο αισθητήρων πίεσης όπου καταγράφεται η πίεση κατά μήκος στο κέντρο της περιοχής ανακυκλοφορίας (~2h) καλύπτοντας μια απόσταση περίπου 1h. Έγινε ανάλυση «συνεκτικότητας» στο πεδίο συχνοτήτων (coherency) και με εστίαση σε συσχετισμένες συχνότητες εντοπίστηκαν χαρακτηριστικά δινών ίδια με αυτά που προκύπτουν με τα πειράματα του PIV.

Λέξεις Κλειδιά: αισθητήρες πίεσης, 2D PIV, τυρβώδης ροή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος της ροής με χρονικά μεταβαλλόμενη εισαγωγή ρευστού έχει διαπιστωθεί ότι είναι ενεργειακά αποδοτικότερος σε σχέση με τη συνεχή εισαγωγή. Η συχνότητα, το πλάτος και η θέση της διέγερσης είναι σημαντικές παράμετροι για τη βέλτιστη μείωση του μήκους της αποκολλημένης περιοχής. Η ερμηνεία της επίδρασης της διέγερσης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όχι μόνον επιστημονικό αλλά και πρακτικό προκειμένου να γίνει με βέλτιστο τρόπο η εφαρμογή της μεθόδου. Μολονότι ο αριθμός των δημοσιευμένων σχετικών εργασιών είναι μεγάλος, φαίνεται ότι απαιτείται ακόμη σοβαρή προσπάθεια για να δοθούν εξηγήσεις σε πολλά αναπάντητα ερωτήματα. Η παρούσα πειραματική εργασία δεδομένου του ρόλου των δινών στην επίδραση της διέγερσης στο πεδίο ροής επιχειρεί να τεκμηριώσει αν είναι εφικτός ο έλεγχος της ροής σε πραγματικό χρόνο μέσω εντοπισμού δινών με απλή εύκολα εγκαταστάσιμη συστοιχία αισθητήρων πίεσης.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Σχ.1 Απότομη διεύρυνση και οι δυο κάμερες

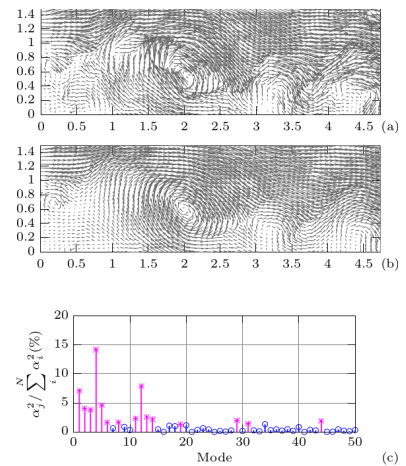
Η καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων έγινε με τη μέθοδο 2D PIV σε αεροδυναμική σήραγγα ανοικτού κυκλώματος. Για να μελετηθεί η περιοχή ανακυκλοφορίας η οποία είχε μήκος περίπου πενταπλάσιο του

ύψους της διεύρυνσης (41mm, βλ.σχ.1) χρησιμοποιήθηκαν δύο κάμερες με πεδία λήψης που συνόρευαν και λειτουργούσαν συγχρονισμένα.

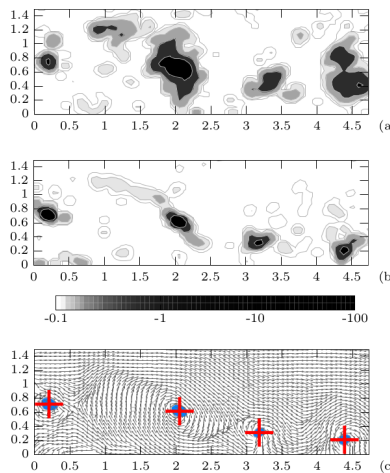
Εξετάστηκε μεταξύ άλλων η περίπτωση συχνότητας διέγερσης 10Hz που είναι και η βέλτιστη και μελετήθηκαν τα πεδία ροής σε 14 χρονικές στιγμές του κύκλου διέγερσης, καθώς και μία για την αδιατάρακτη ροή. Τεχνικά αυτό έγινε με εξωτερικό σκανδαλισμό των καμερών από υπολογιστή που έλεγχε τη λειτουργία ηλεκτροβάνας μέσω της οποίας διοχετεύετο αέρας παλμικά από αεροφυλάκιο προς το πεδίο. Σε κάθε μια από τις 14 φάσεις του κύκλου καταγράφονταν 300 στιγμιότυπα της ροής με ρυθμό δυο ζεύγη εικόνων ανά sec και με χρονική απόσταση 120μsec μεταξύ των εικόνων κάθε ζεύγους. Αντίστοιχα στο ίδιο χώρο τοποθετήθηκαν αισθητήρες πίεσης κατά μήκος της ροής σε απόσταση 1cm μεταξύ τους και έγιναν μετρήσεις από τέσσερις διαφορετικούς ταυτόχρονα .

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Βασικό εργαλείο για την μελέτη των τροχιών των δινών υπήρξε η διέγερση της ροής και ο εντοπισμός των δινών των οποίων ο άξονας ήταν κάθετος στο επίπεδο παρατήρησης δηλ κάθετα στην κύρια κατεύθυνση της ροής. Για τον λόγο αυτό προηγήθηκε φιλτράρισμα των πεδίων ταχυτήτων εφαρμόζοντας την μέθοδο POD στις διαταραχές της ταχύτητας (στιγμιαία μείον μέση τιμή) έτσι ώστε μέγαν περιορισμένο αριθμό όρων της σειράς (χρησιμοποιώντας τους μεγαλύτερους κατ' απόλυτη τιμή temporal coefficients) η τυρβώδης κινητική ενέργεια του φιλτραρισμένου στιγμιότυπου να είναι περίπου 60% του αφιλτράριστου. Στο σχ.2 δείχνεται το αρχικό στιγμιότυπο, από κάτω το φιλτραρισμένο και στο τελευταίο διάγραμμα δείχνονται οι συντελεστές της σειράς για 50 modes και με αστερίσκο οι συντελεστές που ελήφθησαν υπόψη στο φιλτράρισμα του συγκεκριμένου στιγμιότυπου. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε για όλα τα στιγμιότυπα κάθε φάσης του κύκλου. Στη συνέχεια ακολούθησε ο εντοπισμός του κέντρου των δινών εφαρμόζοντας το κριτήριο των Jeong and Hussain (1995) σύμφωνα με το οποίο το κέντρο της δίνης βρίσκεται εκεί που ισχύει η ανισότητα $(du/dx)^2 + (du/dy)(dv/dx) < 0$. Στο σχ. 3 φαίνονται οι περιοχές

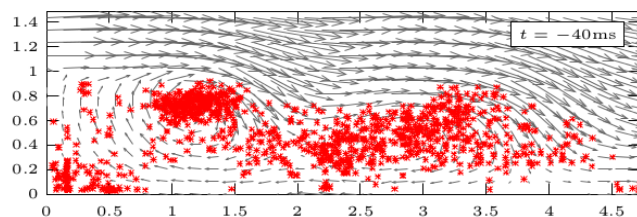


Σχ.2 Φιλτράρισμα πεδίου

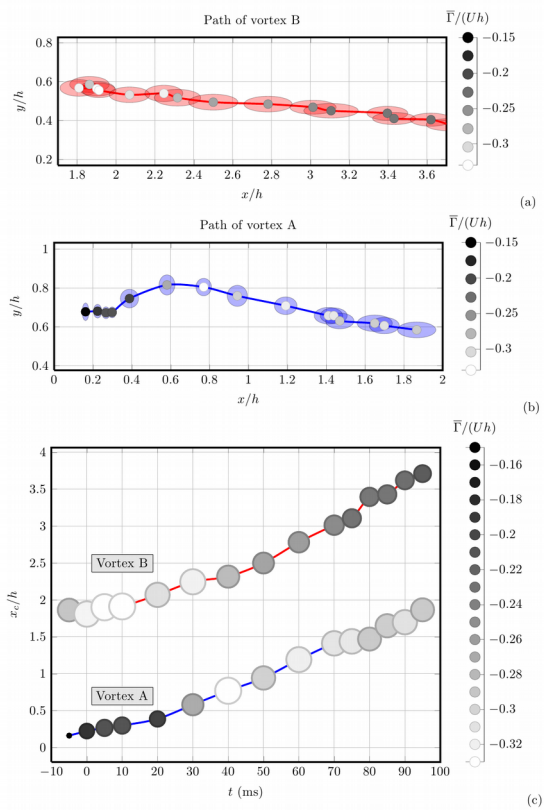


Σχ.3 Εύρεση κέντρων δινών

(με σκούρο χρώμα) που ισχύει η ανισότητα και με κόκκινο σταυρό το κέντρο των δινών. Σύμφωνα με την διαδικασία αυτή παρατηρήθηκε οτι στη βέλτιστη συχνότητα διέγερσης ο πλήθος δινών σχηματίζει σμήνος το κέντρο βάρους των οποίων υπολογίζεται. Στο σχ.4 απεικονίζεται μία χρονική στιγμή ως προς το άνοιγμα της βαλβίδας οι δίνες για συχνότητα 10Hz που αποτελεί τη βέλτιστη συχνότητα. Είναι εμφανές το σμήνος στο $x=1h$. Στις υπόλοιπες χρονικές στιγμές προκύπτουν παρόμοιες εικόνες με μετατοπισμένα τα κέντρα βάρους των σμηνών. Στο σχ.5 φαίνονται οι θέσεις σε κάθε στιγμιότυπο του κύκλου από το οποίο προκύπτουν οι τροχιές και με βάση το γεγονός ότι η περίοδος του κύκλου είναι 0.1sec οι ταχύτητες των δινών που είναι περίπου 1m/s (Kapiris P. and Mathioulakis D. (2014)).



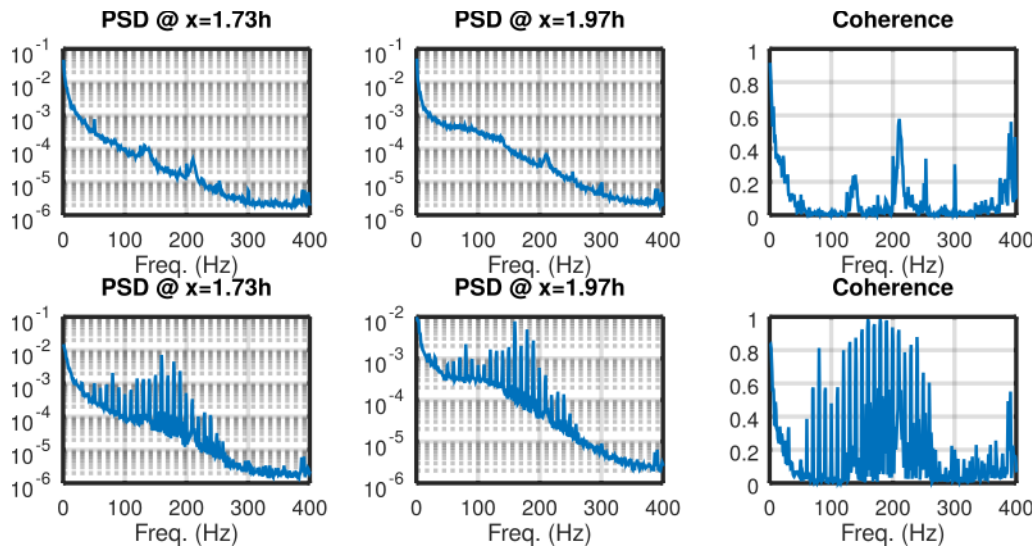
Σχ.4 Θέσεις δινών για 10Hz



Σχ. 5: Τροχιές δινών

διαφοροποίηση του πληθυσμού των δινών και τη χωρική διαφοροποίηση τους μεταξύ των δύο ροών (αδιέγερτη και διεγερμένη) από τα πειράματα PIV, εφόσον οι δίνες αποτυπώνονται διακριτά τότε οι χρονοσειρές των πιέσεων με κατάλληλη επεξεργασία θα πρέπει να αποκαλύπτουν τις ίδιες διαφοροποιήσεις.

Η μεθοδολογία ανάλυσης έχει ως εξής. Στις χρονοσειρές πιέσεων προερχόμενες από αισθητήρες σε απόσταση 1.5h-2h όπου αναμένονται έντονες διαταραχές της ταχύτητας έγινε κλασική φασματική ανάλυση με τον υπολογισμό του περιοδογραμματος Welch δηλαδή τον FFT μέσω όρο

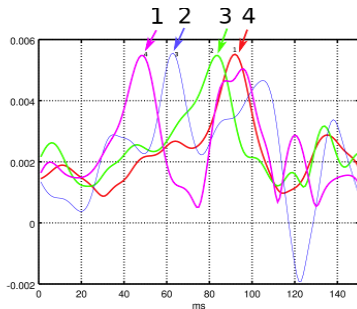


Σχ. 6: Φασματική εκτίμηση με FFT περιοδόγραμμα σε δύο διαδοχικούς αισθητήρες. Πάνω, αδιέγερτη ροή. Κάτω, διεγερμένη ροή.

επικαλυπτόμενων τμημάτων των χρονοσερών. Ομοίως υπολογίζεται και η συνεκτικότητα με γειτονικό αισθητήρα. Ενδεικτικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 6 για τις δύο περιπτώσεις ροών.

Το συνδυαστικό πειράματα περιλαμβάνει PIV και δειγματοληψία πιέσεων από οπές στο στερεό όριο και κατά μήκος του ίχνους του φύλλου φωτός του laser. Οι εικόνες του PIV λαμβάνονται με ελεγχόμενο σκανδαλισμό με σήμα παλμών που επίσης καταγράφονται ταυτόχρονα με τα σήματα από τέσσερις επιλεγμένους αισθητήρες πίεσης. Έτσι προκύπτουν χρονοσειρές πιέσεων και στιγμιότυπα διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων η χρονική τοποθέτηση των οποίων είναι ακριβώς προσδιορισμένη. Κάθε φορά το οπτικό πεδίο του PIV περιλαμβάνει τις θέσεις των αισθητήρων που καταγράφονται. Με πλήθος πειραμάτων με διαφορετικά οπτικά πεδία και ομάδες αισθητήρων σαρώθηκε η περιοχή ανακυκλοφορίας από 1h-5.5h. Από τα πειράματα αυτά έγινε μια πρώτη εκτίμηση για το αν οι δίνες διακριτά δίνουν ανιχνεύσιμες διαταραχές πίεσης. Μια δεύτερη κατηγορία πειραμάτων περιλάμβανε μετρήσεις πιέσης για χρονικά διαστήματα περίπου τριών λεπτών από κάθε αισθητήρα πίεσης με ροή χωρίς διέγερση και με ροή με διέγερση από jet συχνότητας 10Hz όπως ακριβώς στα πειράματα PIV για την ανίχνευση δινών. Από τα πειράματα αυτά έγινε ο έλεγχος της υπόθεσης ότι μόνο από τις μετρήσεις πίεσης μπορεί να αποτυπωθεί η περιοχή ανακυκλοφορίας. Γνωρίζοντας τη

Παρατηρείται μια συνεκτικότητα στη περιοχή 130-140Hz της τάξης του 0.2. Η περιοχή αυτή του φάσματος έχει ενδιαφέρον διότι με ταχύτητα 1m/s-2m/s μίας δίνης με διάμετρο περίπου 1cm (ακτίνα μεταβολής στροβιλότητας) θα προκαλέσει διαταραχή στη πίεση διάρκειας 0.01sec-0.005sec που μεταφράζεται σε ταλαντώσεις 100-200Hz. Δεδομένης και της σχετικά καλής συνεκτικότητας, η συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος είναι υποψήφια για μεγαλύτερη ευαισθησία στη παρουσία δίνης. Στη διεγερμένη ροή οι αρμονικές της διέγερσης επικάθονται σε φάσμα ίδιο με αυτό της αδιέγερτης ροής. Δηλαδή ποιοτικά οι δίνες είναι ίδιες και στις δύο περιπτώσεις.

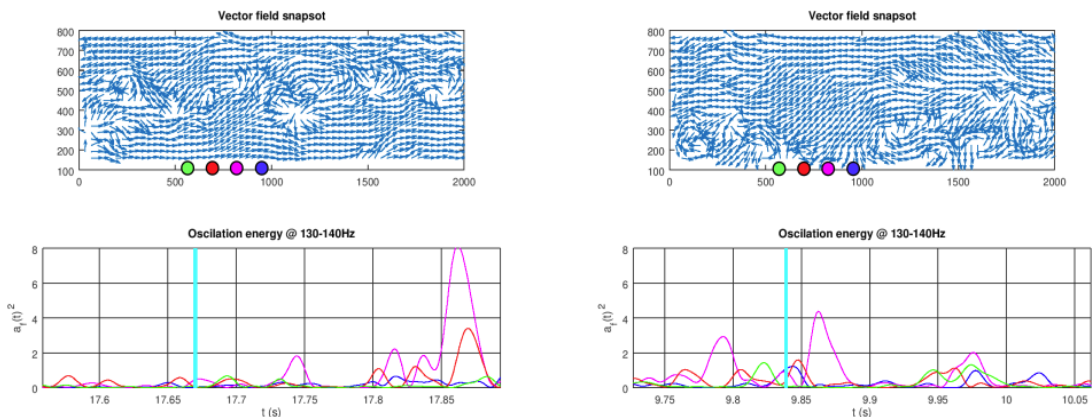


Σχ. 7: Παλμός που διαδίδεται. Οι θέσεις μέτρησις είναι 1h, 1.2h, 1.5h και 1.7h για τους αισθητήρες 1-4 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, με βάση την πληροφορία του φάσματος, εφαρμόζουμε χρονο-συχνοτική ανάλυση με συνεχή μετασχηματισμό wavelet με βάση το Morlet (Torrence, C. and G. P. Compo, (1998)) και ανασυνθέτουμε το σήμα μόνο με τους συντελεστές του μετασχηματισμού wavelet με κεντρική συχνότητα γύρω από τη συχνότητα των 135Hz (σχήμα 7) ή υπολογίζουμε την ενέργεια (σχήμα 8). Στο σχήμα 7 απεικονίζεται περίπτωση παλμού που καταγράφεται με χρονική καθυστέρηση από τους τέσσερις διαδοχικούς αισθητήρες συμβατή με την ταχύτητα κίνησης μια δίνης. Στο σχήμα 8, σε πιο απομακρυσμένους αισθητήρες, παρατηρείται επιλεκτική διέγερση ανάλογα με την θέση πρόσκρουσης δίνης με το στερεό όριο. Η αλληλεπίδραση της δίνης με το στερεό όριο θα επιφέρει την καταστροφή της και θα επηρεάσει την πίεση μιας περιορισμένης περιοχής. Και οι δύο περιπτώσεις είναι ενδεικτικές για την διακριτή επιρροή κάθε δίνης στο πεδίο της

πίεσης.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει στατιστική ανάλυση των παραπάνω διαταραχών στους δύο τύπους ροής. Για την απόσταση 1.7h-2.5h της έντονης τύρβης, στο σχήμα 9 απεικονίζεται η χρονοσυχνοτική ανάλυση της ενέργειας ταλαντώσεων για την περιοχή συχνοτήτων 20Hz-250Hz εκφυλισμένη με τέτοιο τρόπο ώστε με άσπρο χρώμα να είναι τα μέγιστα στη διεύθυνση του χρόνου ασχέτου τιμής και με μαύρο οποιαδήποτε άλλη τιμή. Ο πληθυσμός των μεγίστων που εκφράζουν μεταβατικές ταλαντώσεις πολλαπλασιάζονται στη διεγερμένη ροή ενώ ταυτόχρονα δεν είναι περιοδικές για να

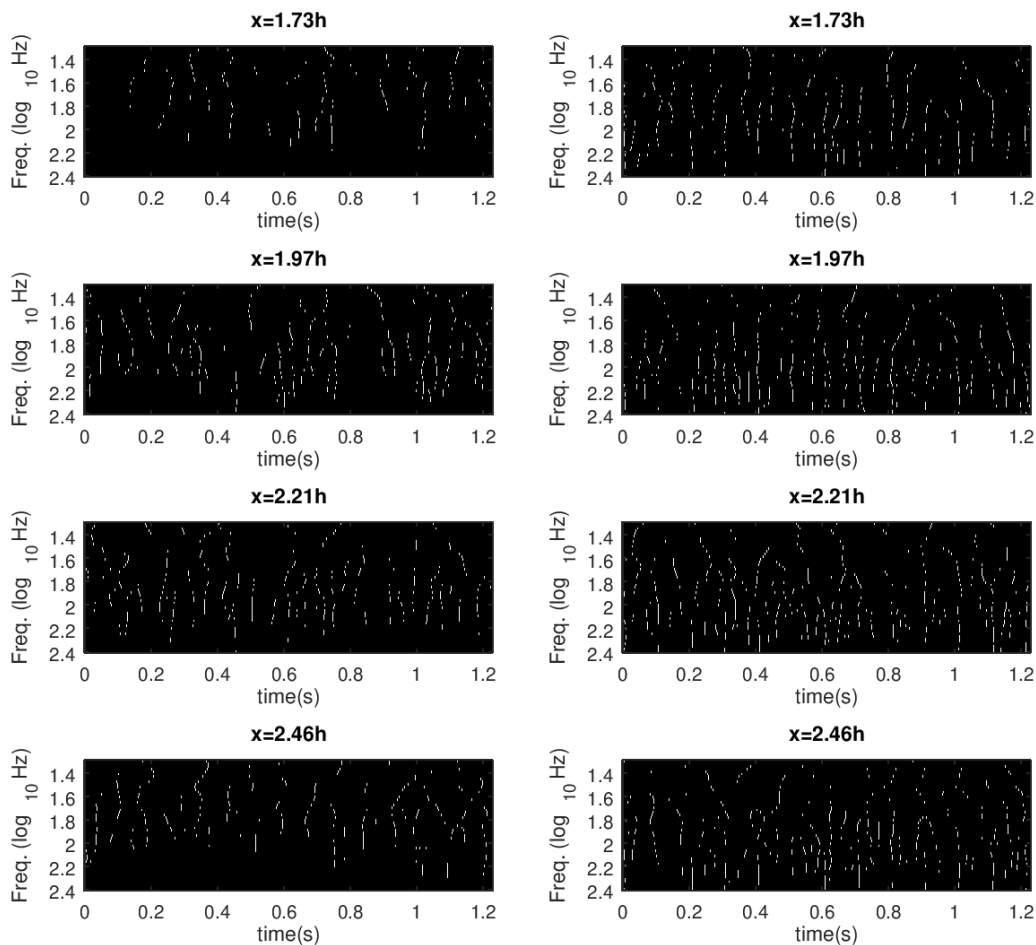


Σχ. 8: Ενέργεια ταλαντώσεων (κάτω) σε ένα “ήσυχο” στιγμιότυπο (αριστερά) και σε ένα στιγμιότυπο με δύο δίνες. Η μία μόλις πέρασε από τον αισθητήρα #4 (πράσινο) και η άλλη πρόκειται να προσγειωθεί πάνω στον αισθητήρα #2 (ματζέντα). Η ροή είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά και οι θέσεις πλέγματος είναι με διακριτικότητα 2 χιλιοστών. Η γραμμή απεικονίζει τη στιγμή που καταγράφεται το διανυσματικό πεδίο και οι έγχρωμοι κύκλοι δηλώνουν τις θέσεις των αισθητήρων με τα αντίστοιχα χρώματα των χρονοσειρών.

Οι θέσεις των αισθητήρων είναι σε απόσταση 3.7h, 3.9h, 4.1h και 4.4h

συνδέονται με τη διέγερση με εξαίρεση μια πολύ στενή περιοχή γύρω από τα 160Hz. Τελικά θα επιλεγεί μια πολύ στενή ζώνη συχνοτήτων από 132Hz-138Hz και θα γίνει η ίδια χρονοσυχνοτική

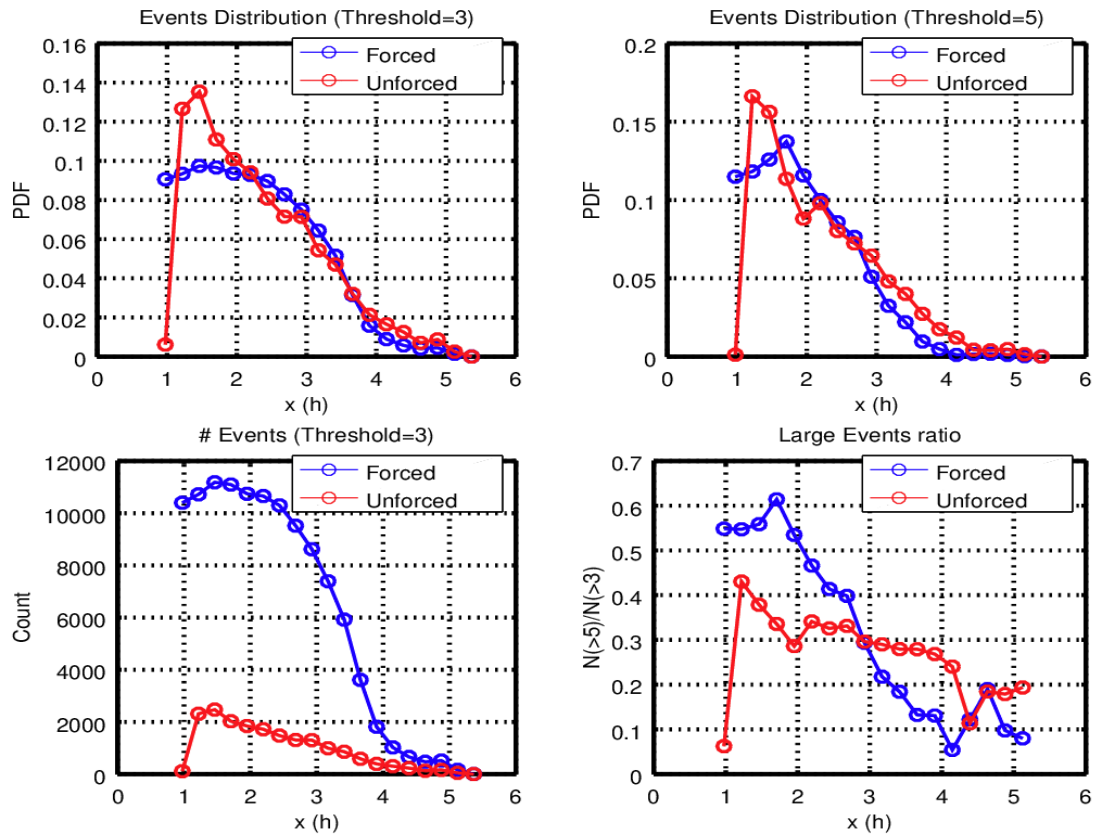
απεικόνιση και θα καταμετρηθούν τα παραπάνω μέγιστα σε όλους τους αισθητήρες κατά μήκος της ροής. Τα μέγιστα δεν έχουν την ίδια τιμή και παίρνουν τιμές περίπου από 0-9 (βλ. Σχήμα 8) και στη καταμέτρηση μπορούμε να ορίσουμε επίπεδα και να ταξινομήσουμε σε μικρές, μεσαίες και ισχυρές ταλαντώσεις. Επιλέγοντας δύο επίπεδα, το 3 και το 5, απεικονίζεται ο πληθυσμός των ταλαντώσεων στο σχήμα 10. Από την απεικόνιση των απολύτων πληθυσμών διακρίνεται ότι στη περιοχή με την έντονη τύρβη οι ταλαντώσεις είναι 6 φορές περισσότερες. Οι κανονικοποιημένες κατανομές στο άθροισμα αποκαλύπτουν την απότομη πτώση των ταλαντώσεων στη διεγερμένη ροή στην απόσταση $x=4h$ από $x=5h$ της αδιέγερτης. Η έντονη τύρβη έχει απομακρυνθεί κατά $0.5h$, δηλαδή από το $x=1.2h$ της αδιέγερτης στο $x=1.7h$. Τέλος ο λόγος των ταλαντώσεων που ξεπερνούν το επίπεδο 5 προς αυτές που ξεπερνούν το επίπεδο 3 αυξάνεται έντονα στην περιοχή έντονης τύρβης ($x=1.7h$) και ελαττώνεται υπερβολικά στην επανακόλληση της ροής ($x=4h$) ενώ στη αδιέγερτη ροή η αναλογία είναι σχεδόν σταθερή.



Σχ. 9: Στιγμιότυπα ταλαντώσεων στη φασματική περιοχή σε τέσσερις διαδοχικούς αισθητήρες. Αριστερά, αδιέγερτη ροή. Δεξιά, διεγερμένη ροή

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά όπως απεικονίζεται στο σχήμα 10 επαληθεύει το βασικό συμπέρασμα του τρόπου που επιδρούν οι δίνες στη μείωση του μήκους ανακυκλοφορίας όπως αποκάλυψαν τα πειράματα με το PIV (Kariris P. and Mathioulakis D. (2014)). Δηλαδή περισσότερες, πιο έντονες και πιο οργανωμένες δίνες που προκαλούνται με τη διέγερση “πιέζουν” το ρευστό προς το στερεό όριο.



Σχ. 10: Απαρίθμηση ταλαντώσεων στη περιοχή 132-138Hz

Σε πρακτική εφαρμογή, οι εκτιμήσεις του σχήματος 10 και ειδικά ο λόγος ισχυρών προς ασθενών ταλαντώσεων μπορεί να υπολογίζεται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο ως δείκτης επιπέδου τύρβης για αξιοποίηση σε συστήματα ελέγχου ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Jeong, J. and Hussain, F. (1995) On the identification of a vortex, *Journal of Fluid Mechanics*, 285, p. 69-94.

Καπίρης P. and Μαθιουλάκης D. (2014) *International Journal of Heat and Fluid Flow* 47, p.101–112

Torrence, C. and G. P. Compo, (1998): *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 61-78.