

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΥΡΒΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ



Υπό

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΜΑΡΑΚΑΚΗ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2004



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 4056/1  
Ημερ. Εισ.: 26-10-2004  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2004  
ΜΑΡ

© 2004 Κωνσταντίνος Μαρακάκης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Νίκος Πελεκάσης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Παναγιώτης Τσιακαρας Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ Νίκο Πελεκάση και κκ. Παναγιώτη Τσιακαρα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Εμμανουήλ Αλυγιζάκη, που μου υπέδειξε την μέθοδο της οπτικοποίησης των ροών που ανέπτυξα στο Κεφάλαιο 5. Ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ Κωνσταντίνο Τσικλιφή και τον συναδέλφο μου Ντότσιο Ευαγγελο για την πολύτιμη βοήθειά τους στον προγραμματισμό με Matlab. Ευχαριστώ τους συναδέλφους μου Αλεξανδρόγλου Ε., Κουμουνδούρο Π., Ντίο Ε., Συρόπουλο Γ. και Φλαμουρίδη Δ. για την αμοιβαία συνεργασία στο εργαστήριο της Μηχανικής των Ρευστών. Επίσης, ευχαριστώ τα αδέρφια μου Μαρακάκη Γεώργιο και Μαρακάκη Ειρήνη-Ευφροσύνη για την ηθική υποστήριξη τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Μανώλη και Μαρία Μαρακάκη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου.

Κωνσταντίνος Μαρακάκης





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή** ..... 1

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

2.1 Τύρβη (Turbulence)..... 3  
2.2 Τύρβη παλλόμενου πλέγματος ( Grid Stirred Turbulence)..... 11  
2.3 Τυρβώδης διάχυση (Turbulent Diffusion)..... 15  
2.4 Οπτικοποίηση των ροών..... 18  
2.5 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας στην οπτικοποίηση ροής..... 22

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Σχεδιασμός Πειραματικής Διάταξης**

3.1 Υδροδεξαμενή..... 24  
3.2 Πλέγμα..... 24  
3.3 Βαθμονόμηση Ταλαντωτικού Μηχανισμού..... 26  
3.4 Βαθμονόμηση της αντλίας..... 32

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Πειραματική διάταξη, Μετρητικά όργανα & Στοιχεία οπτικοποίησης της ροής**

**4.1 Πειραματική διάταξη** ..... 33  
4.1.1 Υδροδεξαμενή ..... 33  
4.1.2 Πλέγματα..... 34  
4.1.3 Ένσφαιρος σύνδεσμος (BALL JOIN)..... 36  
4.1.4 Ελατήρια κραδασμών..... 37  
4.1.5 Μηχανισμός ταλάντωσης..... 38  
4.1.6 Ρυθμιστής στροφών..... 38  
4.1.7 Σύνδεσμος μηχανισμού ταλάντωσης με πλέγματα..... 39  
4.1.8 Δοχείο με αντλία για το μελάνι..... 39  
4.1.9 Τροφοδοτικό ..... 40  
4.1.10 Ηλεκτροβάνα (& απλή βάνα) ..... 40  
4.1.11 Προγραμματιζόμενος διεγέρτης..... 41  
4.1.12 Φίλτρο νερού..... 41  
4.1.13 Βάση στήριξης της πειραματικής διάταξης..... 42  
  
**4.2 Μετρητικά όργανα**..... 43  
4.2.1 Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος..... 43  
4.2.2 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων, ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D..... 45  
4.2.3 Παλμογράφος..... 46  
4.2.4 Γεννήτρια συχνοτήτων ..... 47

<u>4.3 Στοιχεία οπτικοποίησης της ροής</u> .....	48
4.3.1.Χρώματα οπτικοποίησης.....	48
4.3.2 Πειραματικά μοντέλα οπτικοποίησης .....	49
4.3.3.Ψηφιακή κάμερα και φωτισμός .....	52
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Πειραματική μεθοδολογία</u></b> .....	53
5.1 Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot-film .....	53
5.2 Υπολογιστική Μεθοδολογία –διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων .....	54
5.3 Χρήση Matlab για την υπολογιστική μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης εικόνας.....	59
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συγκριτικοί έλεγχοι για το πεδίο ταχυτήτων</u></b>	
6.1 Επιρροή παλλόμενων πλεγμάτων σε συνεχές jet.....	63
6.2 Επιρροή παλλόμενων πλεγμάτων σε μικρής διάρκειας (2sec) jet.....	68
6.3 Συγκριτική Μελέτη στη διεύθυνση ταλάντωσης Z .....	73
6.4 Συγκριτική Μελέτη στην ακτινική διεύθυνση R.....	95
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Συγκριτικοί έλεγχοι με την μέθοδο της οπτικοποίησης</u></b>	
7.1 Μελέτη επιρροής πλεγμάτων σε συνεχές jet με την μέθοδο της οπτικοποίησης.....	112
7.2 Μελέτη επιρροής πλεγμάτων σε διάχυση ουσιών με τη μέθοδο της οπτικοποίησης.....	120
7.2.1 Μελέτη διάχυσης με λήψη κάθετη στη ροή.....	120
7.2.2 Μελέτη διάχυσης με λήψη παράλληλη στη ροή.....	126
7.3 Συγκριτική μελέτη διάχυσης στη διεύθυνση ταλάντωσης Z με τη μέθοδο της οπτικοποίησης.....	132
7.3.1 Ταλάντωση με συχνότητα 3.1 Hz.....	132
7.3.2 Ταλάντωση με συχνότητα 5.2 Hz.....	138
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Συμπεράσματα</u></b> .....	144
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Βιβλιογραφία</u></b> .....	146
<b><u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u></b> .....	148

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εντάσσεται στην επιστημονική περιοχή της μηχανικής των ρευστών που πραγματεύεται φαινόμενα διάχυσης (diffusion) και ανάμειξης (mixing) ουσιών που σχετίζονται με προβλήματα της βιομηχανίας και του περιβάλλοντος .

Βασικός στόχος της εργασίας είναι η συμπλήρωση της γνώσης που αφορά την διάχυση ουσιών σε τυρβώδεις ροές με μέση ταχύτητα μηδέν. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από διπλά παλλόμενα πλέγματα για την παραγωγή περίπου ισοτροπικής τύρβης με ελεγχόμενη διανομή έντασης και κλίμακας.

Η εισαγωγή της ουσίας για διασπορά (tracer, pollutant, tagged fluid element) είναι συνεχής ή στιγμιαία (continuous, instantaneous source). Τα πειραματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κατασκευάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα που θέλουμε να μελετήσουμε καθώς επίσης και τους πειραματικούς περιορισμούς (μέγεθος υδροδεξαμενής , μετρητικά όργανα).

Το κυρίως πειραματικό μέρος αφορά την συστηματική-επιστημονική παρατήρηση που περιλαμβάνει σειρά μετρήσεων για την μελέτη της επιρροής της ταλάντωσης των πλεγμάτων στην υδροδεξαμενή, καθώς και η οπτικοποίηση των φαινομένων διάχυσης με την παρουσία τύρβης .

Η ανεμομετρία θερμού νήματος ,(Hot Wire Anemometry, HWA ), ήταν η κύρια τεχνική μέτρησης που χρησιμοποιήσαμε για την απόκτηση των πειραματικών δεδομένων που αφορούσαν την ταχύτητα ροής και την επιρροή της τύρβης σε αυτή.

Η οπτικοποίηση των φαινομένων αποσκοπεί στην κατανόηση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα περιβάλλον με έντονη την παρουσία της τύρβης. Με την μέθοδο αυτή μπορούμε να έχουμε άμεση

απεικόνιση της επίδρασης των παλλόμενων πλεγμάτων σε διαφορετικούς τύπους ροής για διαφορετικά Hz ταλάντωσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση ξεκινώντας με την θεωρία γύρω από την τύρβη ,την τύρβη από παλλόμενα πλέγματα ,την τυρβώδη διάχυση και στην συνέχεια γίνεται μια παρουσίαση για τις γενικές αρχές της οπτικοποίησης των ρευστών.

Στο τρίτο κεφάλαιο έχουμε το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης και την βαθμονόμηση του μηχανισμού ταλάντωσης και της αντλίας παροχής χρωστικών ουσιών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την πειραματική διάταξη , τα μετρητικά όργανα και τα πειραματικά μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε.

Συνεχίζουμε στο πέμπτο κεφάλαιο με την περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων (πειραματική μεθοδολογία ) καθώς και τη διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων στον υπολογιστή (υπολογιστική μεθοδολογία).

Στο έκτο κεφάλαιο έχουμε τις μετρήσεις του ροϊκού πεδίου με την τεχνική της ανεμομετρίας του θερμού νήματος.

Στο έβδομο κεφαλαίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο της οπτικοποίησης για τις μετρήσεις διάχυσης μάζας και της επιρροής των παλλόμενων πλεγμάτων σε συνεχείς ροές.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφαλαίο της διπλωματικής εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων , οι παρατηρήσεις για την βελτίωση των διατάξεων και την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου.

Στο παράρτημα δίνονται ο πίνακας συμβολών και τα προγράμματα Matlab που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Τύρβη (Turbulence)

Η τύρβη είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να συναντήσει κάποιος οπουδήποτε στην καθημερινή του ζωή, από το ανακάτεμα μια κούπας με καφέ μέχρι τον άνεμο στην ατμόσφαιρα. Οι πιο πολλές ροές που συναντάμε στην φύση και στις εφαρμογές της μηχανικής είναι τυρβώδεις. Τα θαλάσσια ρεύματα κάτω από την επιφάνια των ωκεανών είναι τυρβώδη. Το οριακό στρώμα στην ατμόσφαιρα της γης είναι τυρβώδες. Τα πυκνά σύννεφα είναι σε τυρβώδη κίνηση. Το οριακό στρώμα που δημιουργείται στα πτερύγια των αεροπλάνων είναι τυρβώδες. Οι περισσότερες καύσεις γίνονται με την παρουσία τύρβης και πολύ συχνά εξαρτώνται άμεσα από αυτήν. Η ροή του νερού σε ποτάμια και αγωγούς είναι τυρβώδης. Όπως επίσης και τα απόνερα των πλοίων και των υποβρύχιων είναι σε τυρβώδη κίνηση.

Η μελέτη της τύρβης είναι σαφώς μια διεπιστημονική δραστηριότητα, που έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών. Στην δυναμική των ρευστών η στρωτή ροή είναι η εξαίρεση, όχι ο κανόνας: για να είναι μια ροή στρωτή πρέπει να έχει μικρές διαστάσεις και μεγάλη πυκνότητα. Η τύρβη δεν είναι μια ιδιότητα των ρευστών αλλά είναι χαρακτηριστικό της κίνησης του ρευστού. Οι σχέσεις που ισχύουν στη δυναμική της τύρβης είναι οι ίδιες για όλα τα ρευστά, ανεξαρτήτως αν αυτά είναι υγρά ή αέρια, αρκεί ο αριθμός Reynolds της τύρβης να είναι αρκετά μεγάλος. Το κύριο χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής δεν εξαρτάται από της μοριακές ιδιότητες του ρευστού. Είναι πολύ δύσκολο να δώσουμε ακριβή ορισμό



στην τύρβη. Συχνά στην ερώτηση εάν μια ροή είναι τυρβώδης απαντάμε με την βοήθεια μερικών χαρακτηριστικών της τύρβης, όπως περιγράφονται από τους Tennekes and Lumley (1990). Τα οποία είναι:

**Irregularity, or randomness (Αταξία ή τυχαιότητα):** Η τυρβώδης ροή μοιάζει να είναι άτακτη, χαοτική και ασταθής. Αυτό κάνει αδύνατη την προσέγγιση των προβλημάτων της τύρβης με κάποιο νόμο ή θεωρία.

**Nonlinearity (Μη γραμμικότητα):** Οι τυρβώδεις ροές που είναι ιδιαίτερα μη γραμμικές.

**Diffusivity (Διαχυτικότητα):** Λόγω της μακροσκοπικής ανάμιξης των μορίων του ρευστού, οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από ταχεία διάχυση της ορμής, μεταφορά θερμότητας και μάζας.

**Vorticity (Στροβιλότητα):** Η τύρβη χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα διακύμανση του στροβιλισμού. Οι άτακτες δομές που παρουσιάζονται στη τυρβώδη ροή ονομάζονται δίνες. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της τύρβης είναι η ύπαρξη μεγάλων σε κλίμακα δινών. Η μεγάλη δίνη έχει μέγεθος ανάλογο του πλάτους της περιοχής της τυρβώδους ροής ,σε ένα οριακό στρώμα είναι η πιο λεπτή στρώση. Η μεγάλη δίνη περικλείει την περισσότερη ενέργεια. Η ενέργεια μεταβιβάζεται από την μεγάλη στις μικρές δίνες με μη γραμμική αλληλεπίδραση , μέχρι την εξασθένηση της ενέργειας στην ιξώδης διάχυση από τις μικρότερες όλων δίνες, οι οποίες είναι της τάξης των χιλιοστών.

**Dissipation (φθορά, απώλεια, σκέδαση):** Οι τυρβώδεις ροές είναι συνεχώς « σπάταλες». Το ιξώδες αποκόπτει την ένταση του παραγόμενου έργου με το οποίο αυξάνεται η εσωτερική ενέργεια του ρευστού , για τη δαπάνη κινητικής ενέργειας στη τύρβη. Η τύρβη χρειάζεται συνεχής παροχή ενέργειας για την εξισορρόπηση του χαμένου ιξώδες. Εάν δεν παρέχεται ενέργεια , η τύρβη εξασθενεί άμεσα.

## Αριθμός Reynolds

Ο αδιάστατος αυτός αριθμός είναι μια από τις βασικές παραμέτρους για τον έλεγχο της τύρβης και δίνεται από τη σχέση (2.1) :

$$Re = \frac{L \cdot U}{\nu} \quad (2.1)$$

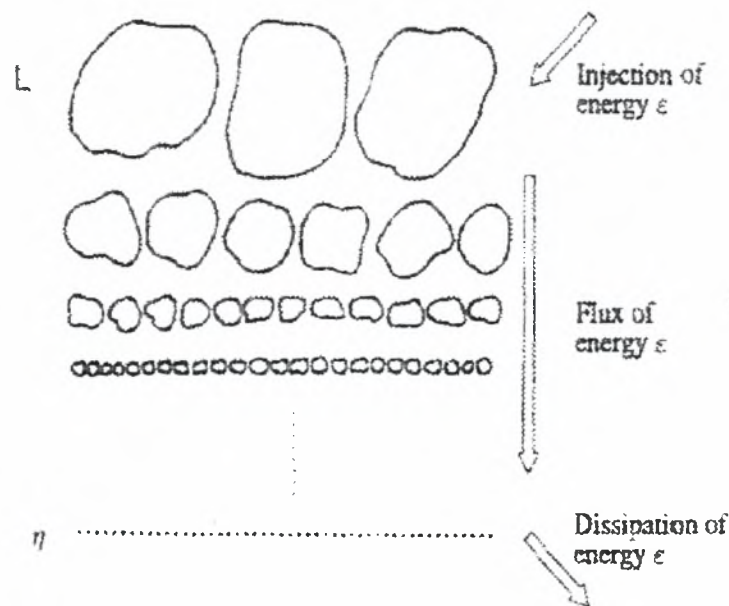
όπου  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες ( $m^2/sec$ ) ,  $L$  μονάδες μήκους ( $m$ ) και  $U$  η ταχύτητα ( $m/sec$ ). Τα δυο τελευταία μεγέθη εξαρτώνται άμεσα με την γεωμετρία της ροής. Η εξίσωση (2.1) δηλώνει ότι αν η ταχύτητα και οι διαστάσεις της ροής είναι αρκετά μεγάλες , η ροή θα είναι τυρβώδης.

Η τύρβη παρουσίασε μεγάλο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μαθηματικά και η φυσική της τύρβης είναι ακόμα προβλήματα που δεν έχουν λυθεί. Αν και οι εξισώσεις Navier-Stokes που διέπουν την τύρβη είναι γνωστές ,δεν μπορούν να επιλυθούν ακόμα και αφού ληφθούν οι μέσες τιμές επειδή οι άγνωστοι είναι περισσότεροι από τις διατιθέμενες εξισώσεις .Επομένως χρειάζεται ένα μοντέλο τύρβης το οποίο θα μας δώσει τις ελλείπουσες εξισώσεις. Υπάρχουν πολλά μοντέλα που περιγράφουν αρκετά καλά μερικές μορφές της τύρβης ,αλλά δεν υπάρχει μια γενική μορφή που να τα περιγράφει όλα. Μέχρι και σήμερα η πολυπλοκότητα της τύρβης κάνει τον υπολογισμό σχεδόν αδύνατο σε μεγάλους αριθμούς Reynolds . Όμως με την ραγδαία αύξηση της ισχύος των υπολογιστών μεγαλώνουν συνεχώς οι πιθανότητες για τον υπολογισμό της τύρβης. Η προσομοίωση μαζί με την πειραματική



μελέτη μέσα στην δομή της τύρβης αποτελούν τις θεμελιώδεις βάσεις για την επίλυση του προβλήματος.

Η πιο γνωστή θεωρία για τοπικά ομογενή, ισότροπη και μόνιμη τύρβη χρονολογείται το 1941, όταν ο Kolmogorov παρουσίασε την θεωρία του K41. Η θεωρία αυτή βασίζεται στην ιδέα του Richardson ότι η ενέργεια βρίσκεται συνεχής και διαδοχική πτώση, στην εικόνα (2.1) γίνεται γραφική απεικόνιση της ιδέας.



Energy cascade process according to Richardson.

Η διαδοχική πτώση της ενέργειας οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια εισάγεται αρχικά σε μεγάλα ενεργειακά περιεχόμενα ή οντότητες (turbulent eddies). Αυτά τα ενεργειακά περιεχόμενα “διασπώνται” σε περισσότερα μικρότερα και με τον τρόπο αυτό χάνεται ενέργεια από τις μεγαλύτερες κλίμακες στις μικρότερες. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να φθάσουμε σε πολύ μικρές κλίμακες όπου τα ενεργειακά

περιεχόμενα δεν μπορούν να διασπαστούν άλλο . σε αυτή τη πιο μικρή κλίμακα , την κλίμακα του Kolmogorov ( $\eta$ ) , η ενέργεια καταναλίσκεται από το ιξώδες.

Ο Kolmogorov εισήγαγε την θεωρία ότι οι μικρό-κλίμακες της δομής , όπου η τυπική κλίμακα μήκους  $l$  είναι πολύ μικρότερη από την συνολική κλίμακα  $L$  , είναι ιστροπική και ομοιογενή , και επομένως η μόνη εξάρτηση είναι στην απώλεια (dissipation)  $\langle \varepsilon \rangle$  και στο ιξώδες  $\nu$ . Στις μεγάλες κλίμακες οι τυπικές μεταβλητές είναι η συνολική κλίμακα  $L$  και  $u'$  , η ρίζα της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας .

Μπορεί να αποδειχθεί ότι , αν αυτή η θεωρία του Kolmogorov είναι σωστή .σε μια περιοχή όπου το  $l$  είναι μεγαλύτερο από την κλίμακα ( $\eta$ ) του Kolmogorov, αλλά και μικρότερη από την συνολική κλίμακα  $L$ , τότε πρέπει να υπάρξει μια λογαριθμική σχέση . Όπου η πυκνότητα της τυρβώδους ενέργειας ανά μονάδα μάζας θα ακολουθεί την σχέση :

$$E(l) = C_1 \langle \varepsilon \rangle^{2/3} l^{2/3}$$

Και για την ισοδύναμη πυκνότητα φάσματος έχουμε:

$$E(k) = C_2 \langle \varepsilon \rangle^{2/3} k^{-5/3}$$

Όπου  $C_1, C_2$  είναι παγκόσμιες σταθερές ,  $l$  είναι σε ολόκληρη την υπό-κλίμακα , και  $k=2\pi/l$  είναι σχετικός κυματικός αριθμός . Η σταθερά  $C_2$  έχει υπολογισθεί γύρω από ένα ευρύ φάσμα του αριθμού Reynolds και είναι  $0.5 \pm 0.05$ .

Σε ροές που είναι πραγματικά στρωτές, η τύρβη χαρακτηρίζεται από αστάθειες σε μεγάλους αριθμούς Reynolds. Η στρωτή ροή σε σωλήνες γίνεται τυρβώδης (σύμφωνα πάντα με την μέση ταχύτητα και την διάμετρο) σε περιοχή 2.000 του αριθμού Reynolds, εκτός αν υπάρξει ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφεύγουμε τις μικρές διαταραχές που θα οδηγήσουν στην μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Το οριακό στρώμα σε μηδενική πίεση γίνεται ασταθές για αριθμούς Reynolds  $U\delta_0/\nu=600$  περίπου ( όπου  $\delta_0$  είναι το πάχος απώλειας ορμής,  $U$  είναι η ταχύτητα της ελεύθερης ροής και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες ). Οι ελεύθερες διατμητικές ροές, όπως η ροή σε ένα στρώμα ανάμιξης γίνονται ασταθείς σε πολύ χαμηλούς αριθμούς Reynolds λόγω ενός μηχανισμού αστάθειας ο οποίος δεν επιδρά στο οριακό στρώμα και στις ροές των σωλήνων. Ένα σύντομο παράδειγμα της μεταβολής αυτής είναι ο καπνός που βγαίνει από ένα τσιγάρο.

Από την άλλη όμως, η τύρβη δεν μπορεί να διατηρείται από μόνη της, αλλά εξαρτάται από το περιβάλλον της, από το οποίο αντλεί ενέργεια. Μια άλλη κοινή πηγή ενέργειας για την αυξομείωση της τυρβώδους ταχύτητας είναι η διάτμηση της κύριας ροής, μια άλλη πηγή ενέργειας είναι επίσης η άνωσης. Οι τυρβώδεις ροές είναι γενικά διατμητικές ροές. Εάν η τύρβη βρεθεί σε ένα περιβάλλον όπου δεν υπάρχουν μηχανισμοί διατήρησης της, εξασθενεί τελείως. Ο αριθμός Reynolds μειώνεται και η ροή τείνει να γίνει και πάλι στρωτή. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η τύρβη που παράγεται από ένα πλέγμα σε ομογενή ροή σε ένα κανάλι αέρα ή νερού.

Ένα άλλος τρόπος για να μετατρέψουμε την τυρβώδη ροή σε στρωτή ή να εμποδίσουμε την στρωτή να γίνει τυρβώδης είναι να εξασφαλίσουμε ένα μηχανισμό ο οποίος θα καταναλώνει την τυρβώδη κινητική ενέργεια . Αυτή η περίπτωση επικρατεί σε τυρβώδεις ροές με την εκμετάλλευση μαγνητικών πεδίων σε χαμηλούς μαγνητικούς αριθμούς Reynolds και σε ατμοσφαιρικές ροές με σταθερή πυκνότητα διαστρωμάτωσης , παρακάτω αναφέρονται δυο παραδείγματα.

Μαθηματικά , οι λεπτομέρειες της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή μάλλον δεν έχουν κατανοηθεί σωστά . Πολλές από τις θεωρίες για τις αστάθειες στην στρωτή ροή είναι θεωρίες γραμμικής μορφής , κάτι όμως που είναι αποτελεσματικό μόνο για πολύ μικρές διαταραχές . Αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μεγάλες αυξομειώσεις που έχουμε στην τυρβώδη ροή. Από την άλλη όμως όλη η θεωρία της τυρβώδους ροής είναι μια ασυμπτωτική θεωρία , η οποία δίνει ορθά αποτελέσματα για πολύ μεγάλους αριθμούς Reynolds αλλά ανακριβή και ατελή για αριθμούς Reynolds στους οποίους η τύρβη δεν μπορεί να διατηρηθεί από μόνη της αξιοσημείωτη αναφορά είναι η θεωρία σε προχωρημένο στάδιο εξασθένησης της τύρβης σε κανάλι αέρα.(Batchelor, 1953).

Τα πειράματα έχουν δείξει ότι η αλλαγή γίνεται με το ίδιο τρόπο ξεκινάει κυρίως από ένα μηχανισμό αστάθειας ο οποίος στην απλή περίπτωση είναι δισδιάστατος . Η κύρια αστάθεια παράγεται στη δευτερεύουσα κίνηση, όπου είναι γενικά τρισδιάστατη και γίνεται ασταθής από μόνη της .

Μια ακολουθία αυτής της φύσης παράγει έντονες τοπικές τρισδιάστατες διαταραχές (τυρβώδεις “περιοχές” ), οι οποίες εμφανίζονται σε τυχαίες θέσεις και τυχαίες χρονικές στιγμές. Αυτές οι τυρβώδεις “περιοχές” μεγαλώνουν απότομα, ενώνονται μεταξύ τους και γίνονται μεγάλες και πολυάριθμες για να σχηματίσουν ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή . Σε άλλες περιπτώσεις , η τύρβη γεννιέται από αστάθειες που οφείλονται σε δίνες οι οποίες γίνονται διαδοχικά ασταθείς . Πολλά απορρεύματα γίνονται τυρβώδη με αυτόν τον τρόπο.

## 2.2 Τύρβη παλλόμενου πλέγματος ( Grid Stirred Turbulence)

Πειραματικά η τύρβη μπορεί να δημιουργηθεί σε μια δεξαμενή ανάμιξης με παλλόμενα πλέγματα τα οποία θα παράγουν αυτό που ονομάζουμε τύρβη παλλόμενου πλέγματος ( “Grid Stirred Turbulence”). Το πλεονέκτημα είναι ότι η μέση ταχύτητα ροής είναι πολύ μικρή ή μηδέν.

Στην ροή που παράγεται από τα παλλόμενα γίνονται οι ακόλουθες τρεις διαδικασίες:

1. Πολύ κοντά σε κάθε πλέγμα όπου υπάρχει η δημιουργία μιας ροής που είναι κάτι ανάμεσα σε απόρευμα (wake) και σε δέσμη (jet).. Η μορφή και η ένταση της κίνησης σε αυτή την περιοχή εξαρτάται από το “σταυρό” που σχηματίζεται στην ένωση των ράβδων του πλέγματος , από το εύρος και την συχνότητα της ταλάντωσης.
2. Τα τζετ επιδρούν άμεσα και διαλύονται ώστε να δημιουργηθεί η τύρβη και να έχει την απαιτούμενη κίνηση
3. Η τύρβη φθίνει καθώς αυξάνεται η απόσταση από το πλέγμα.

Για να κατανοήσουμε τις μεταβολές που προκαλούνται σε κάποια απόσταση από την ταλάντωση του πλέγματος ,πρέπει να αρχικά να ξέρουμε τις ιδιότητες της τύρβης στην περιοχή που μας ενδιαφέρει . Αυτό μπορεί να υπολογιστεί άμεσα σαν συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο του παλλόμενου πλέγματος , αλλά και από όλες τις παραπάνω διαδικασίες που αναφέραμε.

Όταν ένα πλέγμα με τετράγωνα διάκενα ταλαντώνεται κατακόρυφα με εύρος ταλάντωσης ανάλογο της διατομής των ράβδων που αποτελούν το πλέγμα., τότε δημιουργείται μια δέσμη με “τζετ” των οποίων οι κεντρικές γραμμές διέρχονται από τα κέντρα των διατομών του πλέγματος. Επίσης μακριά από το πλέγμα η ομαλότητα χάνεται για δυο λόγους. Κάθε τζετ μεμονωμένα διαλύεται και γίνεται τύρβη ,με την δημιουργία ασταθειών στις άκρες τους .Ακόμα υπάρχει και η αλληλεπίδραση των τζετ μεταξύ τους . Χρησιμοποιώντας ράβδους κυκλικής διατομής ,για παράδειγμα, η παρουσία ξεχωριστών ροών τζετ είναι ακόμα αισθητή σε μικρές αποστάσεις , αλλά σε περιοχές πέρα από το πλέγμα αυτές οι ροές ενώνονται και σχηματίζουν μια τυρβώδη ροή. Οι ροές των τζετ παραμένουν ευδιάκριτες για δυο μέσες αποστάσεις mesh sizes (M),

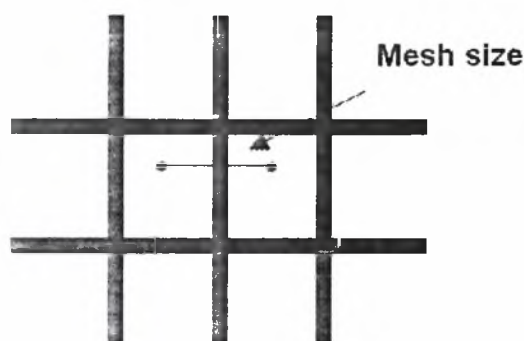
Οι Thompson and Tuner (1975) βρήκαν ότι σε κάποια απόσταση από το πλέγμα η ροή είναι τυρβώδης και σχετικά ομοιόμορφη.

Στην ειδική περίπτωση της παραγόμενης τύρβης από παλλόμενα πλέγματα ,δεν υπάρχει μέση ροή. Η δομή της ροής επομένως καθορίζεται από της διακυμάνσεις της ταχύτητας που προκαλεί το παλλόμενο πλέγμα. Μια εμπειρική σχέση της ρίζας της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας προτάθηκε από τους Hopfinger& Toly(1976),

$$u' = C_3 s^{3/2} M^{1/2} \omega z^{-1} \quad (2.2)$$



Όπου  $s$  είναι το εύρος της ταλάντωσης του πλέγματος,  $M$  είναι το mesh size (η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δυο διάκενων),  $\omega$  είναι η συχνότητα ταλάντωσης του πλέγματος (Hz),  $z$  είναι η απόσταση από το πλέγμα και  $d$  είναι η διατομή της ράβδου που είναι φτιαγμένο το πλέγμα. Ορισαν την σταθερά  $C_3$  να είναι κοντά στο 0.3 για την δικιά τους πειραματική μελέτη. (Στα περισσότερα paper επιλέγουν την τιμή 0.25)



Η εξάρτηση της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους  $L$  από την απόσταση  $z$  δίνεται από την σχέση  $L = \beta z$ . Η θεωρία συμφωνεί με την γραμμική σχέση (2.2) αλλά διαφωνεί με την πραγματική τιμή της μεταβλητής  $\beta$ . Μερικές μελέτες θεωρούν ότι το  $\beta$  εξαρτάται από το εύρος της ταλάντωσης όταν  $s/M \leq 0.8$ , άλλες μελέτες θεωρούν μικρή την διάφορα ανάμεσα στο  $s/M = 0.8$  και  $s/M = 0.2$ , όπου το  $\beta = 0.10$

Υπολογίζοντας ένα ισοζύγιο ενέργειας ανάμεσα στην ενέργεια που δίνεται από το πλέγμα, την ενέργεια που αποθηκεύεται στο δοχείο και την ενέργεια που καταναλώνεται στο σύστημα, οι Sanchez and Redondo (1998) πρότειναν ένα μονοδιάστατο μοντέλο. Επίσης πέτυχαν πειραματικά μια τιμή για την μεταβλητή  $C_3 = 0.03$  με  $M = 5$ . Και στο Sanchez and Redondo (1997), μια τιμή για την μεταβλητή  $C_3$  ήταν 0,25 για πλέγμα με  $M = 0.8$



Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιούμε στο δικό μας πείραμα είναι παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν από προηγούμενους μελετητές (Turner (1968) , Thorpe (1966), Turner (1973),Thompson and Turner (1975),Hopfinger and Toly (1976),Xuequan and Hopfinger (1987), Tsai and Lick (1987),Noh and Fernando (1991) Huppert ,Turner and Hallworth (1995) , Redondo ,Sanchez, Castilla(1995) , Peters and Redondo (1997) , Sanchez and Redondo (1998) , Redondo and Sanchez (1999) ,Mann, Ott and Andersen (1999) , Ott and Mann (2000), Redondo and Sanchez (2000), Matas and Redondo (2000),Medina, Sanchez and Redondo (2001) ).

## 2.3 Τυρβώδης διάχυση (Turbulent Diffusion)

Η τυρβώδης διάχυση είναι ένα αντικείμενο μεγάλης σπουδαιότητας, όπως για παράδειγμα στην διασπορά ρύπων στο περιβάλλον και σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες .

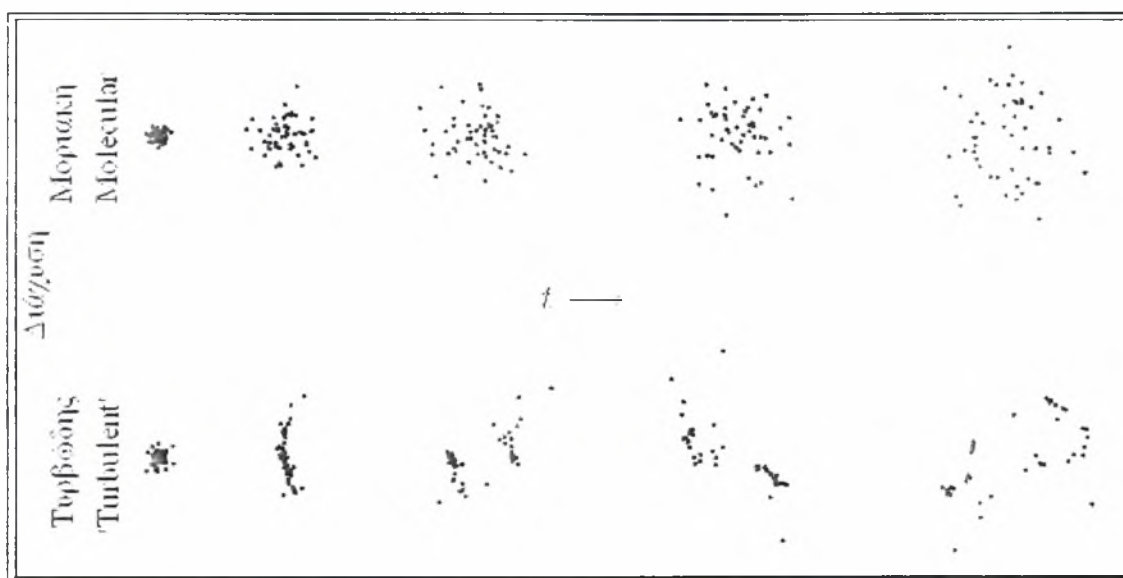
Η μελέτη της διάχυσης μπορεί να γίνει με πολλές μεθόδους μια εκ των οποίων είναι η παρακολούθηση ροϊκών στοιχείων στον χώρο-χρόνο (Λανγκραντζιανες μέθοδοι ).

Η στιγμιαία (instantaneous) συγκέντρωση της περιοχής είναι ιδιαίτερα ανομοιογενείς και ποικίλλουν στις μικρές κλίμακες. Για κάποιους λόγους η εκτίμηση των μακροπρόθεσμων αποτελεσμάτων της ρύπανσης , (the mean fields) μέσω περιοχών είναι πλήρως επαρκής. Εντούτοις, υπάρχει μια σειρά περιπτώσεων πρακτικής σπουδαιότητας, όπου η περιγραφή της στιγμιαίας συγκέντρωσης της περιοχής είναι απαραίτητη, και όπου ο προσδιορισμός μόνο της μέσης συγκέντρωσης περιοχής είναι ανεπαρκής. Ένα παράδειγμα είναι η αξιολόγηση της επίδρασης ενός εύφλεκτου αερίου, όπου η μέση συγκέντρωση μπορεί να είναι πιο κάτω από το κατώτατο όριο ανάφλεξης, χωρίς αυτό να συμβαίνει στην πραγματικότητα σε στιγμιαίες συγκεντρώσεις.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι το HF (hydrogen fluoride). Το HF χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες από τη βιομηχανία, μεταξύ άλλων στην παραγωγή της αμόλυβδης βενζίνης, και η διασπορά του είναι ανησυχητική για τη βιομηχανία και τις περιβαλλοντικές αρχές. Ένα ειδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του HF είναι ότι μπορεί να μετασχηματιστεί σε ολιγομερή, με αποτέλεσμα το μοριακό βάρος να εξαρτάται έντονα και μη-γραμμικά από τη συγκέντρωση. Για μια δεδομένη μέση συγκέντρωση η πυκνότητα του αερίου μπορεί επομένως να είναι χαμηλότερη ή υψηλότερη από τον αέρα ανάλογα με το πόσο

ανομοιογενής είναι η πραγματική διανομή του HF . Το ερώτημα για το αν το σύννεφο του HF είναι αραιό, είναι κρίσιμο για την αξιολόγηση του κινδύνου. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις συγκέντρωσης είναι σημαντικές για την αντίληψη μυρωδιών, τις επιπτώσεις των τοξικών αερίων, και για τις χημικές διαδικασίες στην ατμόσφαιρα γενικά .

Ένα κοινό συστατικό στις διαδικασίες είναι η σχετική τυρβώδης διάχυση, π.χ η περιγραφή για το πώς η τύρβη διασκορπίζει ένα συνοθύλεμα ροϊκών στοιχείων Εικόνα ( 2.2). Αυτή η *σχετική* διασπορά των μορίων που προκαλείται από τις τυρβώδεις μετακινήσεις του ρευστού αποτελεί ένα από τα αντικείμενα της παρούσας εργασίας .



Εικόνα ( 2.2) Πάνω έχουμε Μοριακή Διάχυση και κάτω Τυρβώδη

Ένα κεντρικό ζήτημα στη σχετική διασπορά είναι η συνάρτηση ροϊκών στοιχείων, που είναι δυστυχώς, όχι πολύ καλά πειραματικά καθορισμένη. Στο αδρανειακό υπόστρωμα,  $\langle \Delta r^2 \rangle = C \epsilon t^3$ , όπου  $\Delta r$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο ρευστών μορίων αρχικά το ένα κοντά στο άλλο,  $\epsilon$ , το ποσοστό συγκεκριμένης κινητικής ενέργειας διασκεδασμού (dissipation) και  $t$  ο χρόνος (Richardson 1926, Obukhov 1941) . Αυτή η

σχέση των Monin και Yaglom (1975) είναι το σημαντικότερο αποτέλεσμα στη σχετική, τυρβώδη διάχυση. Εκτός αυτού, η σταθερά  $C$  καθορίζεται μόνο μέσα σε μια τάξη μεγέθους και οι θεωρητικές προτάσεις ποικίλλουν μέσα σε δύο τάξεις μεγέθους (Kraichnan 1966, LarchevOque and Lesieur 1981, Mikkelsen 1982, Kristensen and Kirkegaard 1987, Thomson 1990, Ott 1992, Fung, Hunt, Malik and Perkins 1992). Με άλλα λόγια, η ροπή δεύτερης τάξης της σχετικής απόστασης των ροϊκών στοιχείων δεν είναι ευρέως γνωστή. Όσον αφορά τη μορφή της λειτουργίας υπάρχουν αποκλίνουσες απόψεις. Σε δύο κλασσικές εργασίες του Batchelor (1952) και του Richardson (1926) προτείνεται μια γκαουσιανή μορφή και μια (peaked field) οξυμένη μορφή, αντίστοιχα. Πρόσφατα, οι Virant and Dracos (1997) υποστήριξαν το μοντέλο του Batchelor, ενώ οι Jullien, Paret and Tabeling (1999) βρήκαν το μοντέλο του Richardson ανώτερο σε μια 2D ροή.

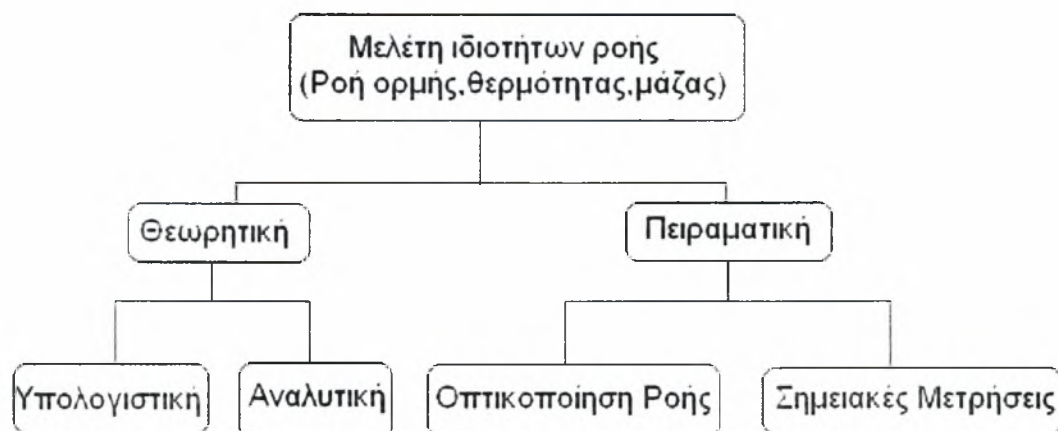
Η ποσοτική κατανόηση της σχετικής διάχυσης είναι αυτήν την περίοδο μάλλον στοιχειώδης. Η υπολογιστική μηχανική των ρευστών (CFD) έχει μικρή χρησιμότητα, δεδομένου ότι η σχετική διάχυση στηρίζεται σε χαοτικές κινήσεις στις μικρές κλίμακες. Οι καλύτερες διαθέσιμες μέθοδοι είναι η άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS) και τα πειράματα .

Η Λανγκραντζιανή έκδοση του Kraichnan της άμεσης προσέγγισης αλληλεπίδρασης (DIA) (Kraichnan 1966) μπορεί να προσφέρει την καλύτερη θεωρητική κατανόηση, ενώ τα τυχαία μοντέλα πτήσης (random flight models) μπορούν να είναι μια καλή λύση για πολλούς πρακτικούς λόγους (Durbin 1980),(Stapountzis 1986)

## 2.4 Οπτικοποίηση των ροών

Η οπτικοποίηση των ροών είναι ένα σημαντικό κεφάλαιο στην επιστήμη της μηχανικής των ρευστών , το οποίο έχει τις ρίζες του από την εποχή του Leonardo da Vinci (1452-1519). Η μέθοδος αυτή αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη εποχή μας, λόγω της ραγδαία αύξηση στην ισχύς των υπολογιστών. Αυτή η αλλαγή έδωσε την δυνατότητα να μπορούμε να εξάγουμε και ποσοτικά συμπεράσματα από μια οπτικοποίηση, κάτι που μέχρι σήμερα ήταν αδύνατο και το μόνο που μπορούσαμε να έχουμε ήταν μια ποιοτική ανάλυση του ροϊκού πεδίου. Η μελέτη των ιδιοτήτων της ροής χωρίζεται σε δυο βασικές κατηγορίες την θεωρητική και την πειραματική ( ).

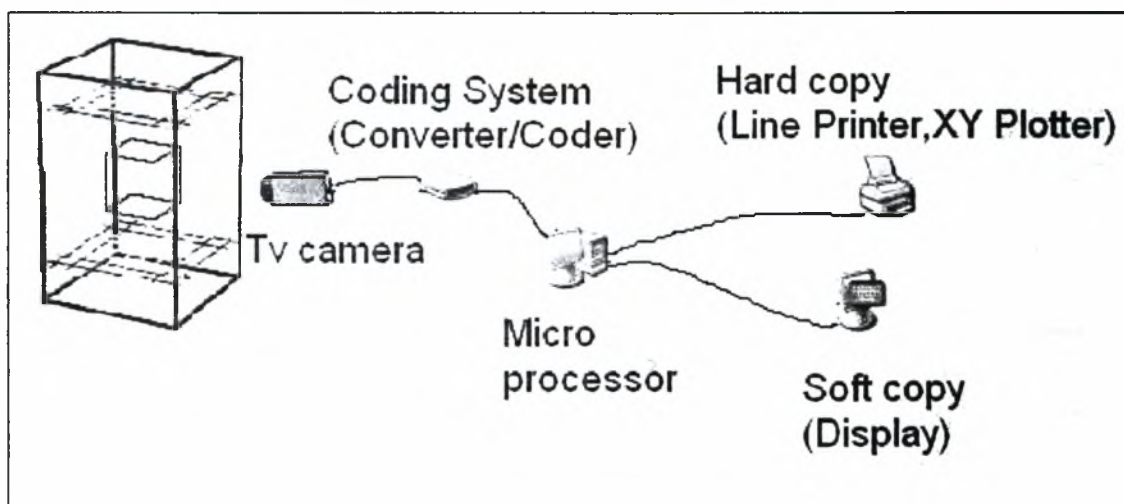
Στην θεωρητική μέθοδο η ανάλυση της ροής μπορεί να γίνει με αριθμητική επίλυση βασικών εξισώσεων (αναλυτικά) ή με προσομοίωση στον υπολογιστή ολόκληρου του πεδίου ροής (υπολογιστικά), στη πειραματική μέθοδο μπορούμε να μελετήσουμε την ροή με σημειακές μετρήσεις ή με την οπτικοποίηση της ροής .



Η μέθοδος της οπτικοποίησης χωρίζεται σε δυο βασικές κατηγορίες , τις μεθόδους πρώτης γενιάς και τις μεθόδους δεύτερης γενιάς . Στην πρώτη γενιά ανήκουν οι συμβατικές μέθοδοι στις οποίες εισάγουμε τις διάφορες ουσίες για να μελετήσουμε την συμπεριφορά τους. Από την μελέτη αυτή προκύπτουν μόνο ποιοτικά συμπεράσματα για τις ιδιότητες του ροϊκού πεδίου. Οι πρώτης γενιάς μέθοδοι χωρίζονται σε 4 κατηγορίες: Wall tracing , Tuft , Tracer (Direct injection, Chemical injection ,Electrical) ,Optical

Στις μεθόδους οπτικοποίησης δεύτερης γενιάς σημαντικό ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη των υπολογιστών όπως προαναφέραμε και γενικότερα η ψηφιακή τεχνολογία. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με αυτή της πρώτης γενιάς μόνο που εδώ έχουμε και ψηφιακή επεξεργασία της εικόνας από την οποία μπορούμε να αποκομίσουμε τα ποσοτικά αποτελέσματα. Ένα άλλο πλεονέκτημα που έχουν η οπτικοποίηση δεύτερης γενιάς είναι ότι τα αποτελέσματα αποθηκεύονται και μπορούν να τα εξεργαστούν περαιτέρω κάποια άλλη χρονική στιγμή.

Στην Εικόνα (2.3) που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας :



Εικόνα (2.3) .Σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας



Η μονάδα εισόδου αποτελείται από μια κάμερα και μια μονάδα κωδικοποίησης. Η μονάδα λειτουργεί έτσι ώστε να μετατρέπει την εικόνα ενός αντικειμένου σε σήμα. Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής αναγνωρίζει και αναλύει το σήμα (πληροφορία). Επίσης χρειάζεται και μια μονάδα εξόδου για να εξαχθούν και τα απαραίτητα συμπεράσματα μετά την επεξεργασία στον υπολογιστή.

Οι μέθοδοι δείκτες που χρησιμοποιούν για οπτικοποίηση σε νερό ή άλλο υγρό είναι πολλοί και διαφορετικής φύσεως. Η επιλογή των δεικτών είναι ένα σημαντικό μέρος στην επιτυχία της μεθόδου. Πρέπει δηλαδή οι δείκτες να αντιπροσωπεύουν στη συμπεριφορά τους μέσα στο πεδίο ροής τα στοιχεία του ρευστού. Αυτό αφορά κυρίως τα στοιχεία που έχουν διαφορετική πυκνότητα και ιξώδες από το ρευστό της ροής. Επίσης έχοντας διαφορετικές διαμέτρους υπόκεινται σε διάφορες επιδράσεις (βαρυτικές και κεντρομόλες δυνάμεις)

Ενώ στη στρωτή περιοχή μιας χρονικά σταθερής ροής οι τροχιές και γραμμές εκπομπής των δεικτών συμπίπτουν με τις ινώδης φλέβες, αυτό δεν ισχύει σε μια ασταθή ροή ή στην τυρβώδη περιοχή μιας ροής. Αν όμως ληφθούν οι απαραίτητες προφυλάξεις οι δείκτες μπορούν να δώσουν μια σωστή εικόνα (στιγμιαία).

Οι βασικοί υγροί ανιχνευτές (tracers) που χρησιμοποιούνται στο νερό είναι οι ακόλουθοι:

- διάλυμα γάλατος (μείγμα γάλατος, αλκοόλ και βαφής της οποίας η πυκνότητα και το ιξώδες είναι παρόμοια με αυτά του νερού).

- διαλυμένο rhodorsil (σταθερό λευκό μείγμα που αντικατέστησε το γάλα στα 1979)

- φθορίζουσες βαφές

•ουσίες όπως μελάνι, διαφημιστικές βαφές, βενζίνη, τετραχλωρίδιο του άνθρακα και υπερμαγγανικό κάλιο

Οι δέσμες βαφής εκπέμπονται από κάποιο κεκλιμένο επίπεδο αντίθετα προς τη ροή ή από τα ίδια τα μοντέλα σε συγκεκριμένα σημεία πάνω στην επιφάνειά τους.

Σε μια σταθερή ροή οι δέσμες βαφής μπορούν να αποκαλύψουν τις ινώδεις φλέβες της ροής, τον άξονα των στροβίλων και την δομή, την ροή στο τοίχωμα με τις ιδιομορφίες και τα χαρακτηριστικά της αποκόλλησης.

Στην τυρβώδη ροή αυτή η μέθοδος διατηρείται αποτελεσματική παρά τη γρήγορη διάχυση της βαφής. Όταν η ροή γίνεται μη σταθερή η βαφή σχηματίζει μόνο γραμμές εκπομπής οι οποίες παρόλα αυτά αποκαλύπτουν τη στιγμιαία μορφή της ροής, συγκεκριμένα τον ολκό, τα jet (τζετ) και τις δίνες. Για να διακρίνουμε πιο τυχαία (random) φαινόμενα όπως τον σχηματισμό περιοχών τύρβης κάτω από μεταβατικές συνθήκες συνήθως εκπέμπεται από μια σχισμή ένα συνεχές χρωματισμένο στρώμα ώστε να καλύπτει όλο το μοντέλο .

Ίσως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος οπτικοποίησης στο νερό είναι αυτή με τις φθορίζουσες βαφές (και πιθανά οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες βαφές είναι η Ροδαμίνη – Β και η Φλουορεσίνη). Αυτές προτιμούνται επειδή παρέχουν εικόνες υψηλής αντίθεσης (high – contrast pictures). Ο χώρος όπου γίνεται η οπτικοποίηση φωτίζεται με κατάλληλες πηγές φωτός ( Laser, λάμπες φθορισμού ) που διεγείρουν τις φθορίζουσες βαφές.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την επεξεργασία εικόνων που έχουν ληφθεί με αυτή τη μέθοδο ιδίως στην περίπτωση που συμβαίνει ανάμειξη. Στην περίπτωση αυτή η χρωματισμένη περιοχή δεν αντιπροσωπεύει την περιοχή του αρχικά χρωματισμένου ρευστού αλλά την περιοχή της ανάμιξης χρωματισμένου και περιβάλλοντος ρευστού.



## 2.5 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας στην οπτικοποίηση ροής

Η οπτικοποίηση ροής βασίζεται στην αλληλεπίδραση του φωτός και των γεγονότων (πειραμάτων). Οι διάφορες μέθοδοι οπτικοποίησης αποσκοπούν στο να κάνουν ορατές τις μεταβολές που συμβαίνουν στην ταχύτητα, πυκνότητα, πίεση και θερμοκρασία (οι μεταβολές αυτές επιφέρουν μεταβολές σε χαρακτηριστικά μεγέθη του φωτός τα οποία τελικά με την κατάλληλη ανάλυση που εξαρτάται από τη μέθοδο οπτικοποίησης μας δίνουν και τις τελικές πληροφορίες που χρειαζόμαστε).

Με τις κλασικές μεθόδους οπτικοποίησης μπορούμε να πάρουμε καλές πληροφορίες για διδιάστατες ροές εφόσον ο φωτισμός παρέχεται σε ένα λεπτού πάχους επίπεδο υπολογίζοντας τη διασπορά της ακτινοβολίας από μεταβολές που προέρχονται από Π.χ. μεταβολές της πυκνότητας των στοιχείων. Στην περίπτωση της πλήρως τριδιάστατης ροής εάν η ροή προβάλλεται πάλι σε ένα επίπεδο η εικόνα που λαμβάνουμε δεν μπορεί να αποδώσει με σαφήνεια τις χωρικές δομές της ροής.

Η ποσοτική πληροφορία που παρέχει μια εικόνα εκφράζεται μέσω μιας τιμής που έχει κάθε pixel (pixel είναι το ελάχιστο στοιχείο της ψηφιακής εικόνας). Η τιμή αυτή λαμβάνει τιμές μεταξύ 0-256 όσα είναι και τα γκρι επίπεδα (gray levels) μιας μη εγχρωμης εικόνας και 0-256 (Red), 0-256 (Green), 0-256 (Blue) για έγχρωμη εικόνα (RGB). Οι συγκρίσεις κάποιου μεγέθους του πεδίου ροής (χωρικά) γίνονται βάσει των τιμών αυτών στα διάφορα pixel της εικόνας. Η χρονική επεξεργασία του πεδίου απαιτεί πλήθος διαδοχικών εικόνων και η χωροχρονική μελέτη του πεδίου απαιτεί στατιστική επεξεργασία των τιμών των διάφορων pixel.

Επίσης πολλές φορές ο φωτισμός δεν είναι απόλυτα ομοιόμορφος, η ρύθμιση της φωτεινής πηγής ή του λέιζερ δεν είναι απόλυτα σωστή και τελικά έχουμε εισαγωγή και ενίσχυση σφαλμάτων (μέσω της ψηφιοποίησης) οπότε απαιτούνται κάποιες διορθωτικές κινήσεις στο στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων. Πιο συγκεκριμένα στα προγράμματα επεξεργασίας εικόνων υπάρχουν κάποιες λειτουργίες (π.χ. edge enhancement, line detection, filtering αναφερόμενες συνολικά ως convolution operations) οι οποίες διορθώνουν τα παραπάνω προβλήματα. Η τελική στατιστική επεξεργασία πραγματοποιείται πάνω στις 'διορθωμένες' εικόνες.

Τα προγράμματα MATLAB που χρησιμοποιήσαμε είναι από την διδακτορική διατριβή του Εμμανουήλ Κ. Αλυγιζάκη (2004) και δίνονται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.

### **3. Σχεδιασμός Πειραματικής Διάταξης**

#### **3.1 Υδροδεξαμενή:**

Η υδροδεξαμενή που επιλέξαμε για την διεξαγωγή του πειράματός μας έχει μήκος 40 cm ,πλάτος 40 cm και ύψος 80 cm. Η επιλογή αυτή έγινε μετά από τη μελέτη της βιβλιογραφίας που αναφερόταν σε πειράματα παλλόμενων πλεγμάτων. Η μεγαλύτερη υδροδεξαμενή που συναντήσαμε στη βιβλιογραφία είναι 67.5 x 67.5 x100 cm (Hopfinger και Toly 1976) και η μικρότερη 25.4x25.4x46 cm (Thompson και Turner 1975).

Δεν επιλέγει υδροδεξαμενή μεγαλύτερων διαστάσεων, γιατί αυτό θα απαιτούσε μεγαλύτερο χώρο στο εργαστήριο, μεγαλύτερης ισχύς ταλαντωτικό μηχανισμό και πιο ακριβή πειραματική διάταξη.

#### **3.2 Πλέγμα:**

Το κάθε πλέγμα αποτελείται από 12 ράβδους αλουμινίου τετραγωνικής διατομής 1x1 cm και είναι πορώδες κατά 70 %, δηλαδή το εμβαδόν των διάκενων προς το συνολικό εμβαδόν του πλέγματος ισούται με 0,7. Το μέγεθός του διακένου (mesh size) είναι  $M=62$  mm.

Η κατασκευή του πλέγματος έγινε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά επιλέχθηκε οι ράβδοι του πλέγματος να είναι από αλουμίνιο, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από το υδάτινο περιβάλλον και να έχουν μήκος 38 cm, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταλάντωσή του πλέγματος στη δεξαμενή διαστάσεων 40x40x80 που διαθέταμε.

Επιπλέον θέλοντας η οπτική μας ίνα (60 mm) να μπορεί να διαπερνά τα διάκενα του πλέγματος ,καταλήξαμε στο ότι το μέγεθος του κάθε διάκενου(mesh size) έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από 60 mm. Για τιμή  $M=62$ mm η στερεότητα του πλέγματος ήταν 30 % περίπου και μας οδηγούσε στη χρήση 12 τελικά ράβδων σε κάθε πλέγμα.

Για την αποφυγή της φθοράς του Plexiglas κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης, στις άκρες των πλεγμάτων τοποθετήθηκε Teflon.

Τα δυο πλέγματα βρίσκονται σε απόσταση  $L=475$  mm μεταξύ τους. Με βάση τα στοιχεία της βιβλιογραφίας, λόγω του μεγέθους του διακένου  $M$  το πρώτο πλέγμα τοποθετήθηκε 125mm, περίπου  $2M$  κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια και το δεύτερο 125mm από τον πυθμένα του δοχείου λόγω της επίδρασης των δεσμών (jet).

Μετά την επιλογή των αποστάσεων έγινε έλεγχος κατά πόσο η διάταξη παράγει τυρβώδη ροή και σε ποιο βαθμό. Λάβαμε υπόψη ότι η ένταση της τύρβης  $u$  εξαρτάται από πειραματικές παραμέτρους και από την απόσταση από το πλέγμα.

$$u=(c_u c_s^{1.5} f M^2)/z, \quad (1)$$

όπου  $c_u \approx 0,3$ ,  $f$  η συχνότητα της ταλάντωσης,  $S$  το εύρος της ταλάντωσης,  $M$  το μέγεθος του πλέγματος,  $z$  η απόσταση από το πλέγμα και  $c_s = S/M$ .

Η ολοκληρωτική κλίμακα  $l$  υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης από το πλέγμα:

$$l= c_l \cdot z \quad (2)$$

όπου  $c_l=0.12$ . Πρόσφατες μελέτες στην τύρβη παλλόμενου πλέγματος επαλήθευσαν τις σχέσεις (1) και (2) (Kit, Strang, and Fernando, (1997)).

Η εκτίμηση μας για την ολοκληρωτική κλίμακα της τύρβης  $l$  δίνεται σε συνάρτηση της απόστασης  $z$  όπου το  $S/M=0.2-0.9$  σύμφωνα με Hopfinger και Toly (1976).

$$l=C_0 C_S^{0.5} z \quad (3)$$

και  $C_0=0,25$  . Συνεπώς ο αριθμός Reynolds , $Re=u*l/\nu$ , χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) και (3) για την ταχύτητα και την ολοκληρωτική κλίμακα αντίστοιχα,

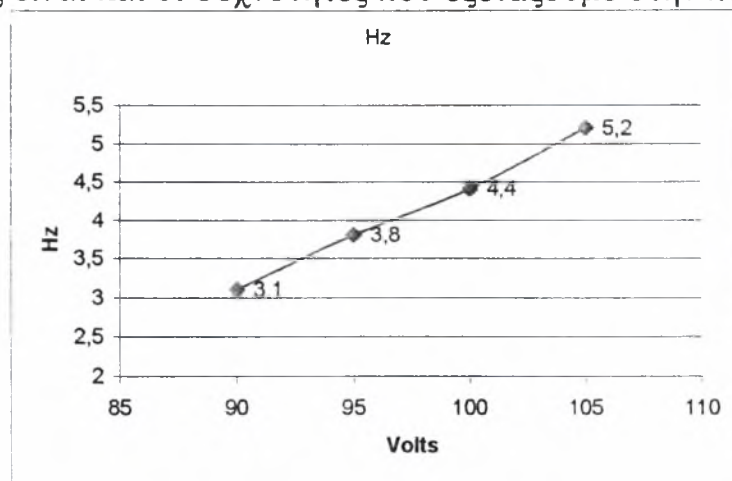
$$Re=(C_U C_0 C_S^2/\nu)lM^2 \quad (4)$$

όπου  $\nu$  είναι το κινητικό ιξώδες , το οποίο δεν εξαρτάται από την απόσταση από το πλέγμα. Εάν επιλέξουμε  $C_U=0.3$  ,  $C_0=0.25$  ,  $C_S=1$  , και  $\nu=0.15 \text{ cm}^2/\text{s}$ , τότε  $Re=0.5lM^2$ .

Για την περίπτωση μας , έχουμε μήκος  $L=475 \text{ mm}$  μεταξύ των δυο πλεγμάτων ,μέγιστο εύρος ταλάντωσης  $S=65 \text{ mm}$ , μέγεθος διάκενου  $M=62 \text{ mm}$  . Στο κέντρο των δυο πλεγμάτων  $L/2 =237.5 \text{ mm}$  από τη σχέση (1) προκύπτει  $u=2.42 \text{ cm/sec}$  , από τη σχέση (3)  $l=5.937 \text{ cm}$  και από (4) ο αριθμός Reynolds  $Re=95$ , γεγονός που δηλώνει ότι έχουμε την παρουσία τύρβης ανάμεσα στα πλέγματα .

### 3.3 Βαθμονόμηση Ταλαντωτικού Μηχανισμού :

Οι συχνότητες της ταλάντωσης καθορίστηκαν από τις δυνατότητες του ταλαντωτικού μηχανισμού και το εύρος των συχνοτήτων που θέλαμε να κυμαίνεται μεταξύ 2 και 6 Hz. Με δοκιμές που έγιναν στο μηχανισμό ταλάντωσης προέκυψε ότι σωστή λειτουργία είχαμε για 90, 95, 100 και 105 Volts τιμές που μας δίνουν 3.1 , 3.8 , 4.4 και 5.2 Hz ταλάντωσης. Αυτές είναι και οι συχνότητες που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία.

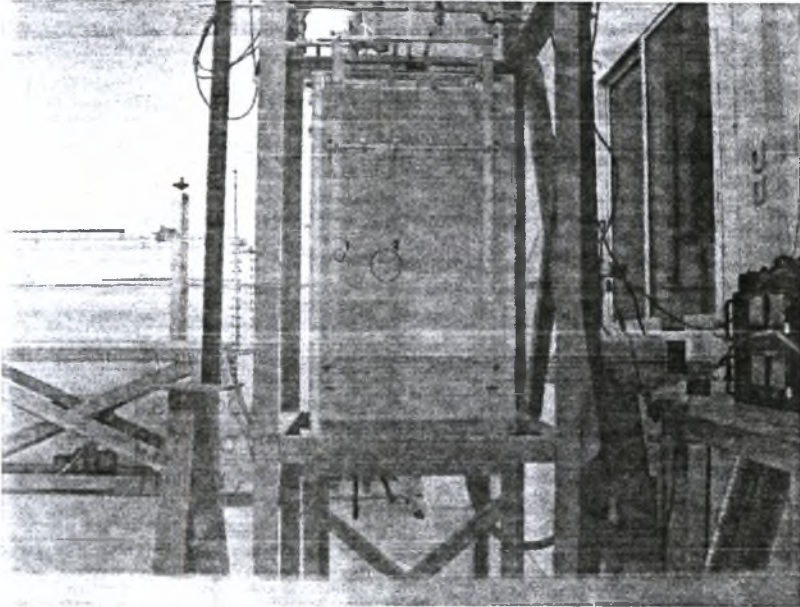


Σχήμα 3.1

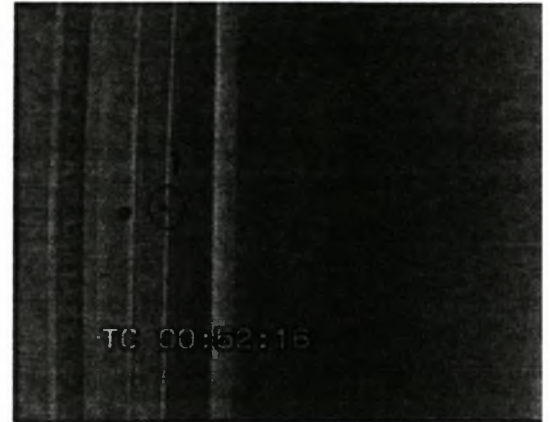


Οι τιμές των συχνοτήτων αυτών προέκυψαν με τις εξής δύο μεθόδους:

Η πρώτη ήταν μέθοδος οπτικοποίησης .Κατά τη λήψη των βίντεο τοποθετήσαμε ένα σημάδι (κυκλωμένη περιοχή (1), στις εικόνες 1 και 2) στη γωνία που παρεμβάλλεται ανάμεσα στα πλέγματα και μελετήσαμε την κίνηση που κάνει .



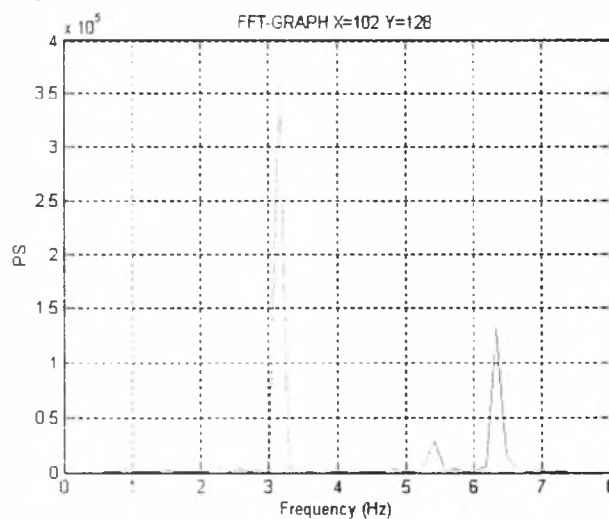
Εικόνα 1



Εικόνα 2

Με την βοήθεια των προγραμμάτων που χρησιμοποιήσαμε από την διδακτορική διατριβή του Εμμανουήλ Κ.Αλυγίζακη.( *ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ CONV, GRAY, FFTGRAY, GRAPHFFTGRAY*) υπολογίσαμε την ταλάντωση του κάθε πλέγματος για τα διάφορα Volts.

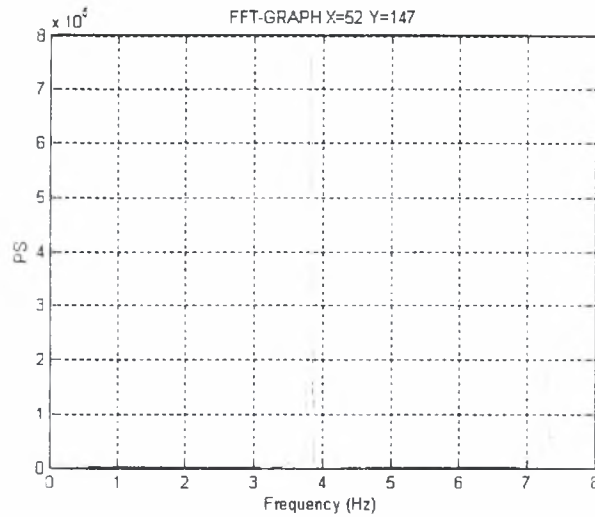
- Για λειτουργία με 90 Volts:



Σχήμα 3.2

Η συχνότητα που προκύπτει από το παραπάνω το γράφημα είναι 3,1 Hz

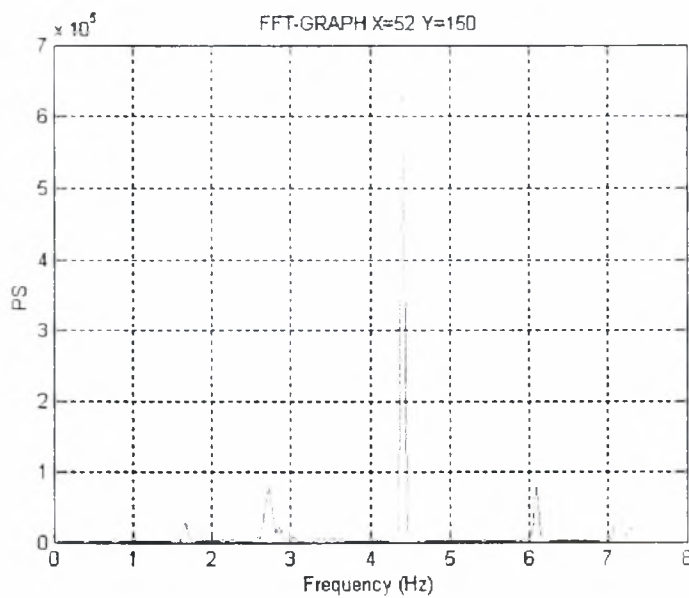
- Για την ταλάντωση με 95 Volts



Σχήμα 3.3

Η συχνότητα που προκύπτει από το παραπάνω το γράφημα είναι 3,8 Hz

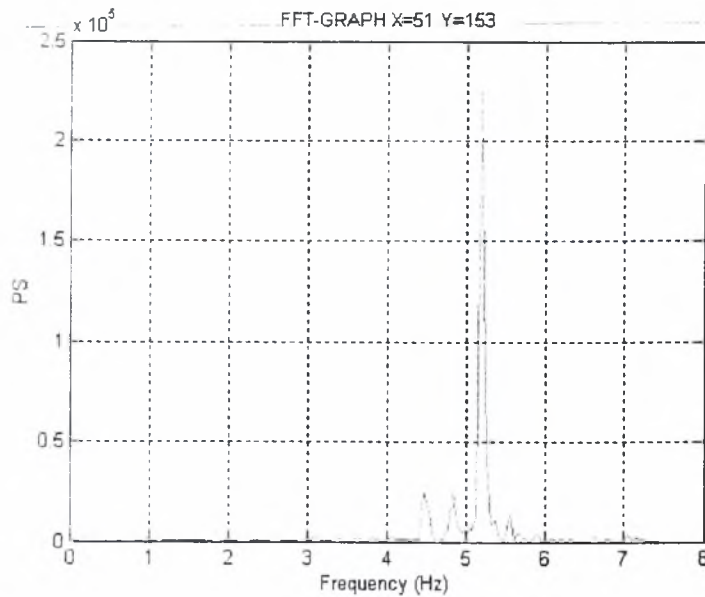
- Για την ταλάντωση με 100 Volts



Σχήμα 3.4

Η συχνότητα που προκύπτει είναι 4,4 Hz

- Για την ταλάντωση με 105 Volts

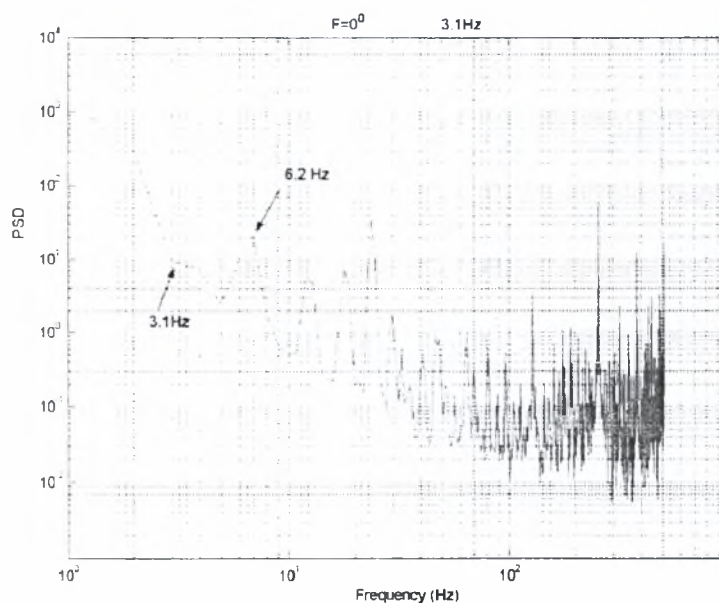


Σχήμα 3.5

Η συχνότητα που προκύπτει είναι 5,2 Hz

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για να υπολογίσουμε τα Hz που παράγει ο ταλαντωτικός μηχανισμός είναι η ανάλυση των διαγραμμάτων πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD) που πήραμε από μετρήσεις με το Hot film. Τοποθετήσαμε τον αισθητήρα του μετρητικού οργάνου (κυκλωμένη περιοχή 2, εικόνα 1) κοντά στην περιοχή όπου ταλαντώνεται το πλέγμα και τα γραφήματα PSD-Hz που προέκυψαν δίνονται παρακάτω:

- Για ταλάντωση με 90 Volts

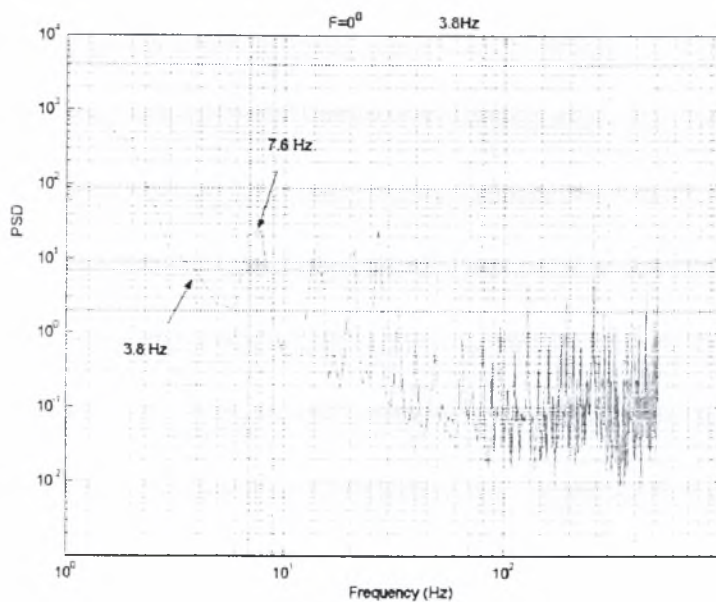


Σχήμα 3.6



Η συχνότητα που προκύπτει είναι 6,2 Hz.

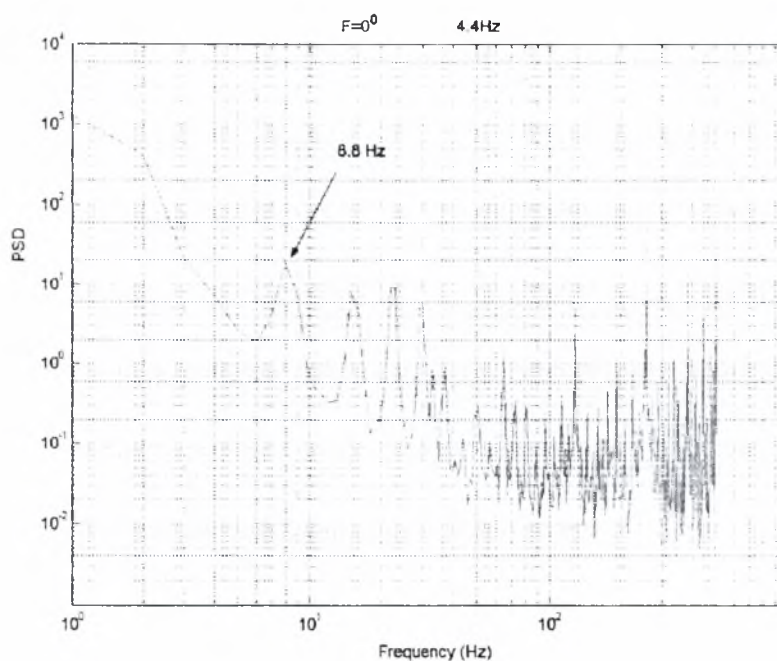
- Για ταλάντωση με 95 Volts



Σχήμα 3.7

Η συχνότητα που προκύπτει είναι περίπου 7,6 Hz.

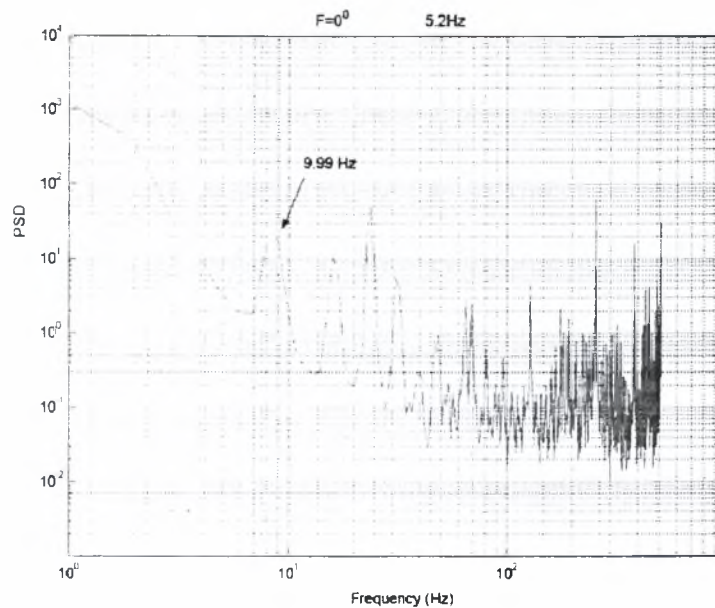
- Για ταλάντωση με 100 Volts



Σχήμα 3.8

Η συχνότητα που προκύπτει είναι περίπου 8,8 Hz.

- Για ταλάντωση με 105 Volts



Σχήμα 3.9

Η συχνότητα που προκύπτει είναι περίπου 9,9Hz

Στη μέθοδο αυτή οι συχνότητες ταλάντωσης που παίρνουμε είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές που προκύπτουν από την πρώτη μέθοδο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την ταλάντωση του πλέγματος ο αισθητήρας του Hot film δέχεται μια επίδραση κατά την άνοδο και μια δεύτερη κατά την κάθοδο του πλέγματος, αδυνατώντας να αναγνωρίσει ότι η κίνηση αυτή γίνεται σε μια μόνο περίοδο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η συχνότητα που προκύπτει να είναι διπλάσια.

### 3.4 Βαθμονόμηση της αντλίας

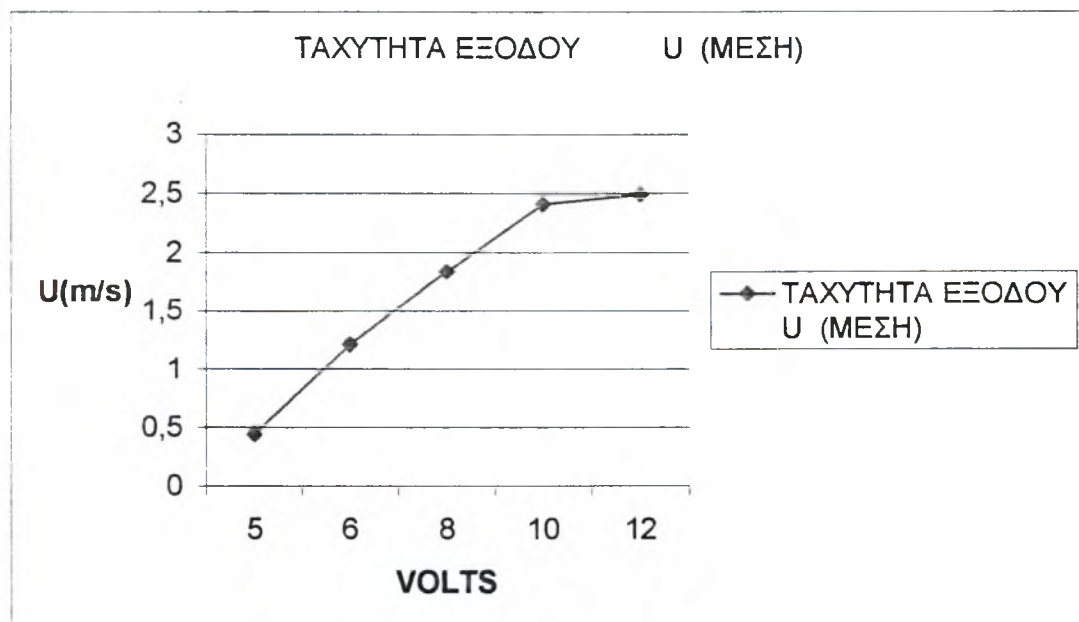
Για να γνωρίζουμε την ταχύτητα με την οποία εξέρχεται το ρευστό από το jet κάναμε , μια βαθμονόμηση στο μοτέρ που διοχετεύει το υγρό στο χώρο των πειραματικών δοκιμών. Κατά την βαθμονόμηση διοχετεύσαμε 0.5 lt νερού και μετρήσαμε το χρόνο (sec) που απαιτούνται για να γίνει αυτό. Η διάμετρος εξόδου του jet είναι :  $D= 3 \text{ mm}$

Η παροχή δίνεται από τη σχέση:  $Q=\text{Όγκος} / \text{χρόνος}$

Η μέση ταχύτητα εξόδου δίνεται από τη σχέση:  $\bar{U} = Q/(\pi D^2/4)$

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 0.5lt ΝΕΡΟΥ		0,0005m <sup>3</sup>			
Volts Αντλίας	5	6	8	10	12
ΧΡΟΝΟΣ (sec)	161,44	58,58	38,52	29,4	28,4
ΠΑΡΟΧΗ Q (m <sup>3</sup> /sec)	3,09713E-06	8,54E-06	1,3E-05	1,7E-05	2E-05
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (m)	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΞΟΔΟΥ $\bar{U}$ (ΜΕΣΗ)	0,438375919	1,208116	1,837264	2,407191	2,492

Το αντίστοιχο γράφημα παρουσιάζεται παρακάτω:



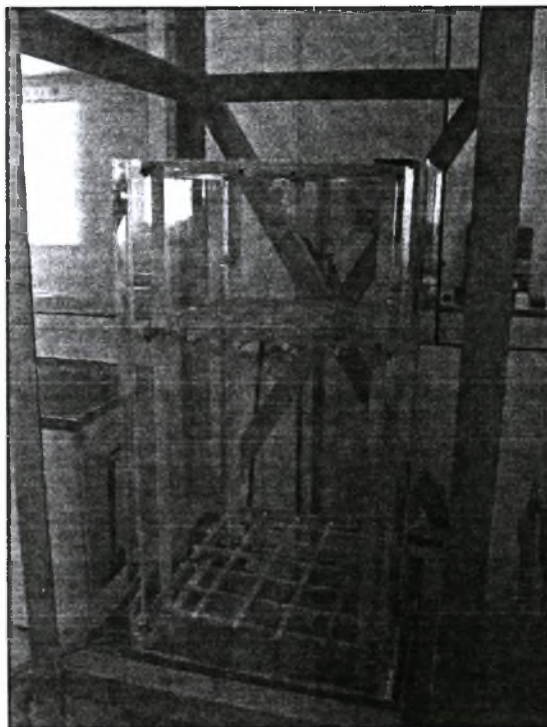
Σχήμα 3.10

## 4.Πειραματική διάταξη

Για τις ανάγκες της διπλωματικής σχεδιάστηκαν πειράματα τυρβώδους διαχυσης σε νερό. Η διάταξη αποτελείται κυρίως από το την υδροδεξαμενή και τα παλλόμενα πλέγματα. Παρακάτω περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις , τα μοντέλα , οι μετρητικές διατάξεις και τα συστήματα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Το μεγαλύτερο μέρος της πειραματικής διάταξης κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο του τμήματος.

### 4.1 Υδροδεξαμενή

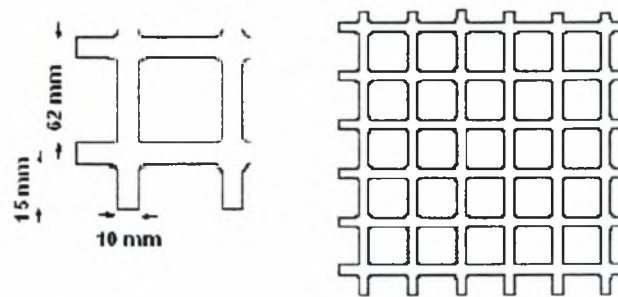
Η Υδροδεξαμενή είναι από Plexiglas έχει διαστάσεις 40×40×80cm και το πάχος των τοιχωμάτων είναι 1 cm. Πάνω στην υδροδεξαμενή έχουν τοποθετηθεί δυο βάνες , μια για την παροχή του νερού και μια για το άδειασμα της.



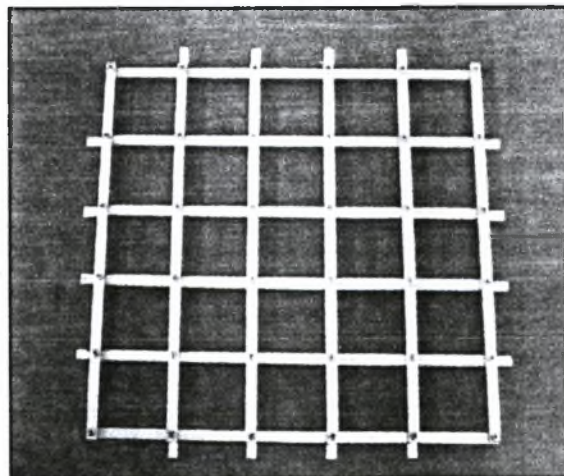
Εικόνα 4.1

## 4.2 Πλέγματα

Το πλέγμα έχει μέγεθος διάκενου (Mesh size)  $M=62\text{mm}$  και στερεότητα (grid solidity) $\approx 30\%$  (Το grid solidity είναι ο λόγος του εμβαδού που καταλαμβάνουν οι ράβδοι προς το συνολικό εμβαδού του πλέγματος.). Οι ράβδοι του πλέγματος είναι 1cm τετραγωνικής διατομής από αλουμίνιο. Στις άκρες των πλεγμάτων έχει τοποθετηθεί Teflon για να μην φθείρεται το Plexiglas κατά την διάρκεια της ταλάντωσης.



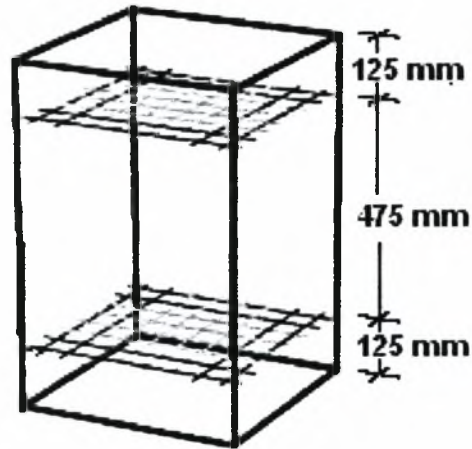
Σχήμα 4.1



Εικόνα 4.2

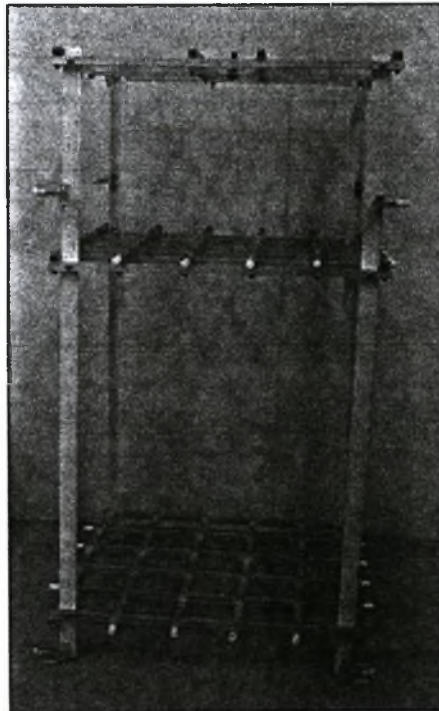


Τα δυο πλέγματα βρίσκονται σε απόσταση  $L=475$  mm μεταξύ τους. Το πρώτο πλέγμα απέχει κάτω από την ελεύθερη επιφάνια 125 mm και το δεύτερο 125 mm από τον πυθμένα του δοχείου όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω:



**Σχήμα 4.2**

Τα πλέγματα ενώνονται μεταξύ τους με γωνίες 15 mm από αλουμίνιο όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



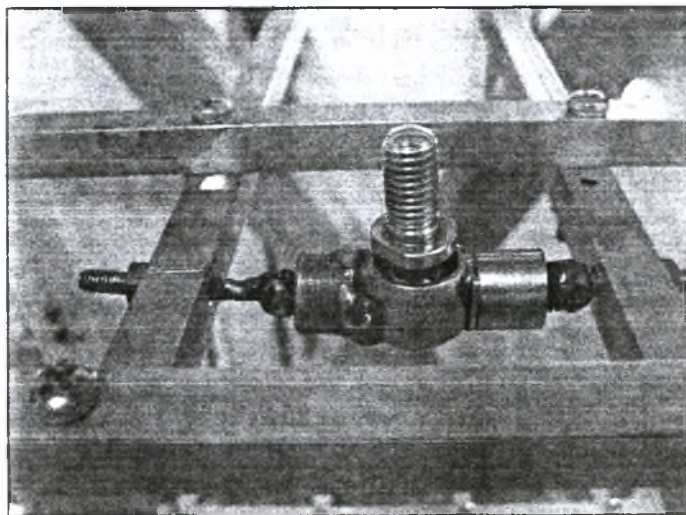
**Εικόνα 4.3**



Στο σώμα των δυο πλεγμάτων μεταδίδεται η κίνηση από ένα τρίτο πλέγμα το οποίο βρίσκεται 250 mm πάνω από το πρώτο πλέγμα. Το πλέγμα αυτό τοποθετήθηκε για να μην επηρεάζουν την ροή ο άξονας που θα μεταδίδει την κίνηση στα πλέγματα. Επίσης απέχει τόσο από το πρώτο πλέγμα ώστε να αποφεύγεται η εμβαπτίση του στο νερό κατά τη διάρκεια του πειράματος.

### **4.3 Ένσφαιρος σύνδεσμος (BALL JOIN)**

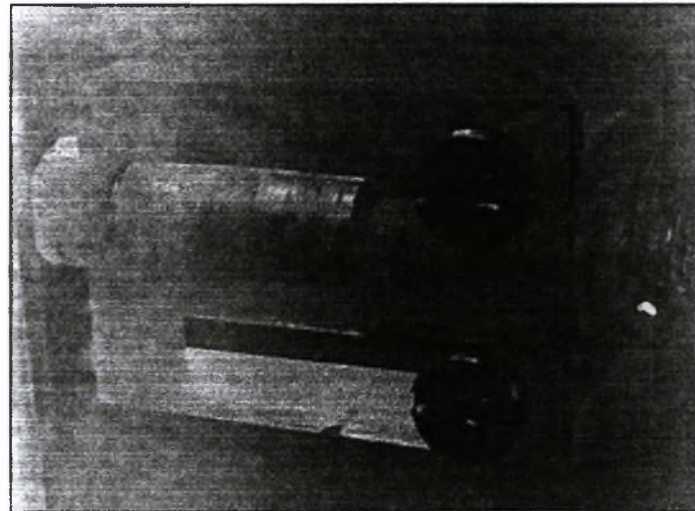
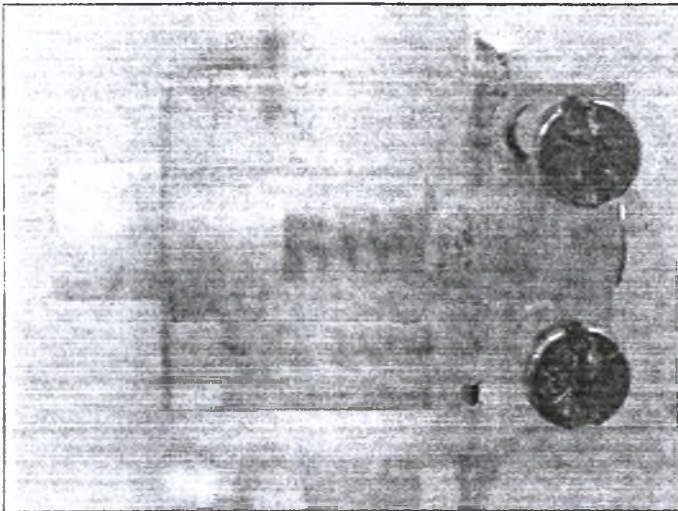
Στο κέντρο του πλέγματος που μεταδίδει την κίνηση στα δυο παλλόμενα τοποθετήσαμε ένα ένσφαιρο σύνδεσμο για να προστατεύσουμε τη κατασκευή σε περίπτωση που ο άξονα μετάδοσης κίνησης δεν είναι κάθετος στα πλέγματα.



**Εικόνα 4.3**

#### 4.4 Ελατήρια κραδασμών

Για να πετύχουμε το σώμα με τα πλέγματα να κινείται μόνο κατά την Υ διεύθυνση (κατακόρυφα) και για να αποφύγουμε κραδασμούς από την ταλάντωση τοποθετήσαμε ένα ειδικό μηχανισμό από ελατήρια που κατασκευάσαμε στο εργαστήριο εικόνα (3.4) τον οποίο τοποθετήσαμε πάνω στο σώμα στις τέσσερις διευθύνσεις κάθετα στην διεύθυνση Υ.



Εικόνα 4.4

Ο μηχανισμός αποτελείται από μικρά τεμάχια Plexiglas  $23 \times 31 \times 18$  mm (Η κοπή των τεμαχίων έγινε με την βοήθεια του Εργαστηρίου των Υλικών του κ. Χαϊδεμενόπουλου). Στο κέντρο των τεμαχίων υπάρχει ένα ελατήριο μέσα από το οποίο περνάει μια βίδα  $\Phi 4$  και μήκους 30 mm. Στην άκρη της βίδας τοποθετήσαμε Teflon το οποίο έρχεται σε επαφή με το δοχείο και διατηρεί τα πλέγματα στη σωστή θέση.

## 4.5 Μηχανισμός ταλάντωσης

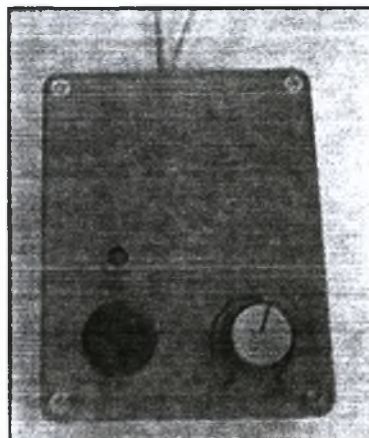
Ο Μηχανισμός που δίνει την ταλάντωση στα πλέγματα είναι σέγας RONDY SSP 500 (230 V- 50 Hz -500 Watt)



**Εικόνα 4.5**

## 4.6 Ρυθμιστής στροφών

Η αυξομείωση των Hz της ταλάντωσης γίνεται με ένα ρυθμιστή στροφών ( εικόνα ) τον οποίο συνδέουμε στη Σέγα .

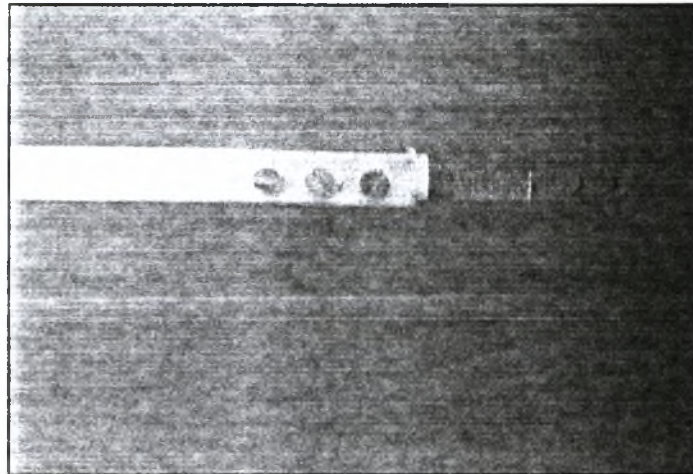


**Εικόνα 4.6**



#### 4.7 Σύνδεσμος μηχανισμού ταλάντωσης με πλέγματα.

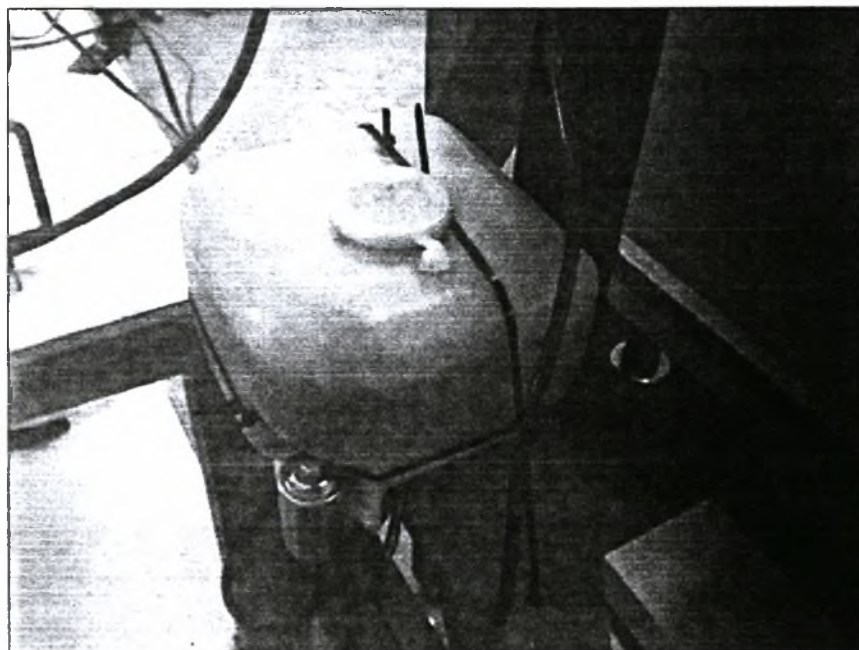
Ο άξονας που δίνει κίνηση στα πλέγματα προσαρμόστηκε με τρεις βίδες  $\Phi 1.5$  mm στις λάμες της Σέγας.



Εικόνα 4.7

#### 4.8 Δοχείο με αντλία για το μελάνι.

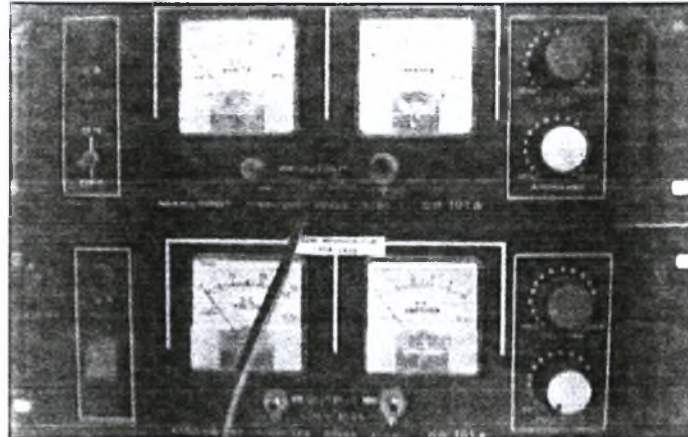
Το μελάνι που χρησιμοποιούμε στα πειράματα τοποθετείται ένα δοχείο που έχει ενσωματωμένη αντλία με την οποία ρυθμίζουμε την παροχή της ουσίας στο πείραμα.



Εικόνα 4.8

## 4.9 Τροφοδοτικό

Η παροχή  $Q$  που δίνεται στο πείραμα ρυθμίζεται με την αλλαγή τάσης στην αντλία. Με βαθμονόμηση που έγινε στη διάταξη υπολογίστηκε η παροχή σε αναλογία με τα volts της αντλίας. Το τροφοδοτικό που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα .



**Εικόνα 4.9**

## 4.10 Ηλεκτροβάνα ( & απλή βάνα)

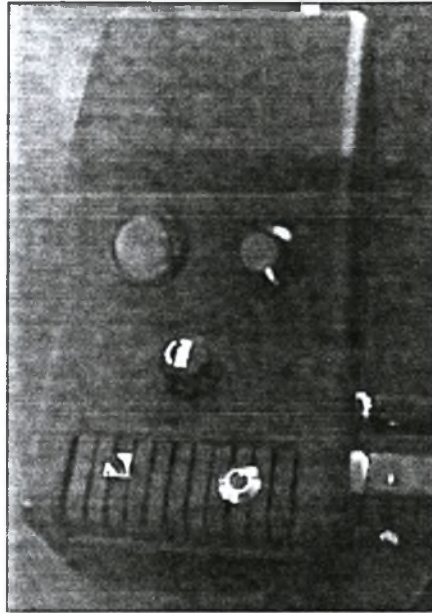
Ανάμεσα στην αντλία και το jet έχουμε παρεμβάλει μια Ηλεκτροβάνα (Τύπου ZA30A V24 Hz 50 VA 14) για να μπορούμε να έχουμε ελεγχόμενη ροή ( Συνεχής ή Διακοπτόμενη ). Για λόγους ασφάλειας σε περίπτωση δυσλειτουργίας της Ηλεκτροβάνα έχουμε τοποθέτησης εν σειρά μια απλή χειροκίνητη βάνα.



**Εικόνα 4.10**

#### 4.11 Προγραμματιζόμενος διεγέρτης

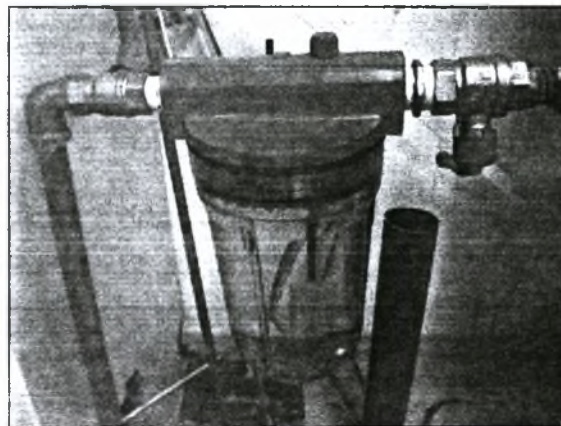
Η ρύθμιση για μη συνεχόμενη παροχή στο πείραμα γίνεται με την βοήθεια του προγραμματιζόμενου διεγέρτη. Με τον διεγέρτη ρυθμίζεται η χρονική διάρκεια που είναι ανοιχτή η ηλεκτροβάννα με το πάτημα ενός διακόπτη. (ο οποίος κατασκευάστηκε από τον ηλεκτρονικό του τμήματος κ.Α. Δεφέρερα .)



**Εικόνα 4.11**

#### 4.12 Φίλτρο νερού

Για την καλύτερη ποιότητα του νερού στις πειραματικές μετρήσεις τοποθετήσαμε ένα φίλτρο στην βάννα παροχής του όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω:

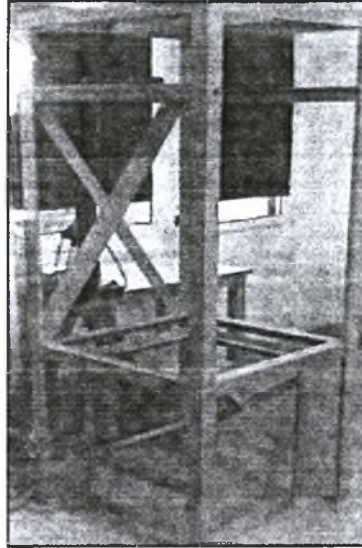


**Εικόνα 4.12**



### 4.13 Βάση στήριξης της πειραματικής διάταξης.

Η βάση στήριξης της διάταξης είναι διαστάσεων (80x80x180cm)



**Εικόνα 4.13**

## 4.2 Μετρητικά όργανα

### 4.2.1 Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος (HOT-FILM ANEMOMETER)

Το ανεμόμετρο χρησιμοποιείται συνήθως για την μέτρηση θερμοκρασιών.

Οι μετρήσεις των volts έγινε χρησιμοποιώντας σύστημα ανεμομετρίας θερμού σύρματος της εταιρίας DANTEC, τύπου DISA μοντέλο 55 M που έφερε το απαραίτητο κύκλωμα Wheatstone για την εφαρμογή της μεθόδου C.C.A ( Constant Current Anemometer).

Συγκεκριμένα ,το σύστημα δειγματοληψίας και επεξεργασίας αποτελείτο από:

α) Ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένη η A/D κάρτα National Instruments PCI-MIO16E-1

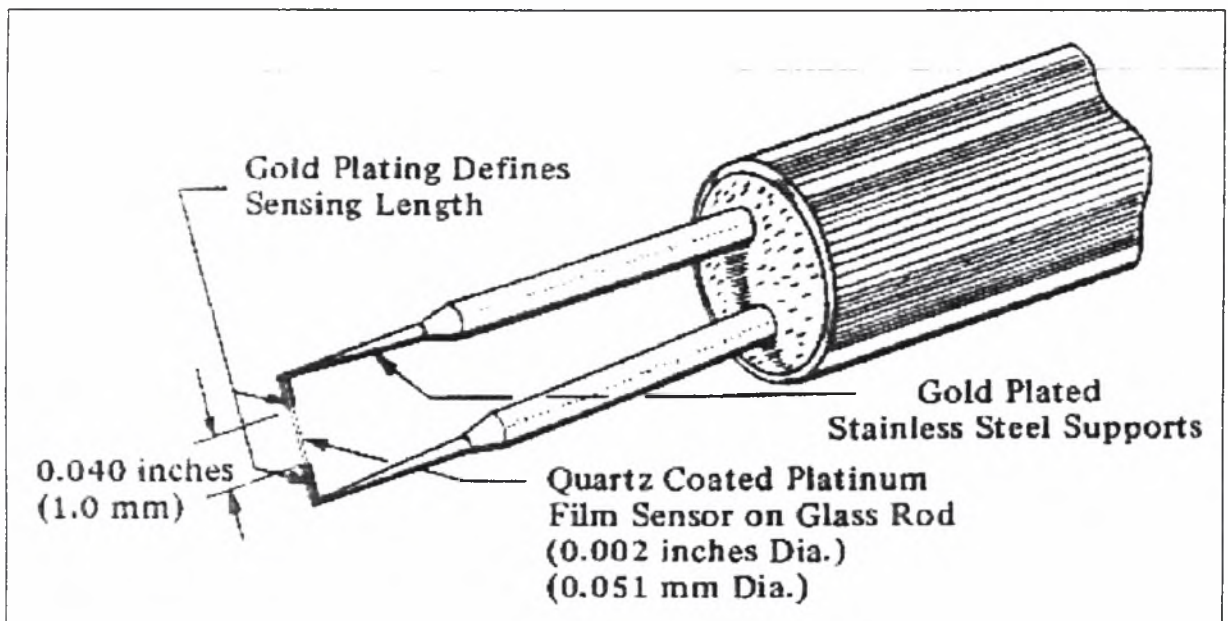
β) Σύστημα ανεμομετρίας Θέρμου σύρματος,Streamline 90N10 frame,το οποίο περιλαμβάνει τη γέφυρα ανεμομετρίας σταθερής θερμοκρασίας 90C10 και μια μονάδα βαθμονόμησης 90H01 με ένα ακροφύσιο 90H02



Στην παραπάνω διάταξη συνδέονται και όργανα μετρήσεων και έλεγχου για την περιοδική επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας του συστήματος.

Η ψηφιοποίηση του σήματος γινόταν με τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα National Instruments PCI-MIO16E-1.

Ο αισθητήρας του ανεμόμετρου αποτελείται από δυο μεταλλικές ακίδες σε σχήμα V. Αυτές οι ακίδες ξεκινούν μέσα από ένα λευκό μονωτικό περίβλημα. στην αιχμή των ακίδων είναι κολλημένο ένα πολύ λεπτό σύρμα διαμέτρου 0.051 mm που αποτελεί τον αισθητήρα του οργάνου .



Σχήμα(4.3)

Η αντίσταση του σύρματος εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία , υγρασία , ατμοσφαιρική πίεση). Η μεταβολή της αντίστασης του είναι  $(0.36\%)/^{\circ}\text{C}$ . Η θερμοκρασία λειτουργίας του αισθητήρα έχει οριστεί από τον κατασκευαστή μικρότερη από  $300^{\circ}\text{C}$  , ενώ η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $150^{\circ}\text{C}$  . Η ηλεκτρική του αντίσταση στους  $20^{\circ}\text{C}$  είναι  $R_{20}=3.5\Omega$  , ο συντελεστής ηλεκτρικής αντίστασης (TCR)  $\alpha_{20}=0.36\%[1/^{\circ}\text{C}]$ .

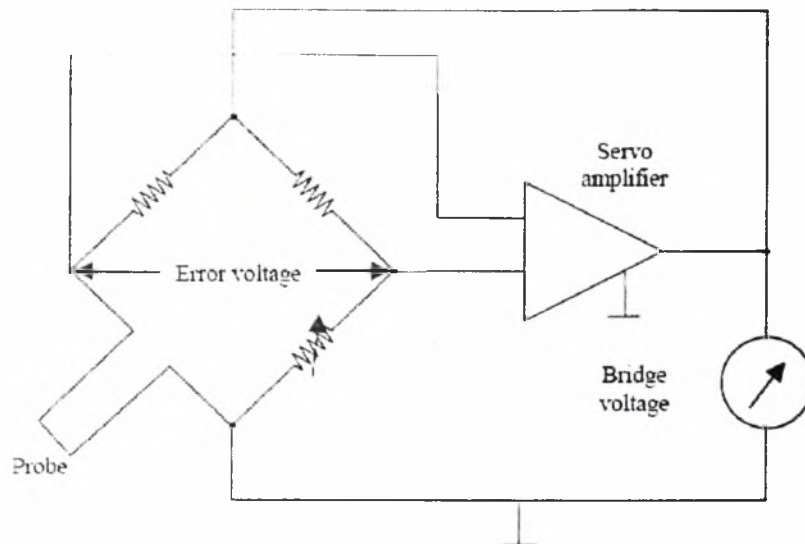
Η μετρούμενη ποσότητα είναι θερμοκρασία σε βαθμούς  $^{\circ}\text{C}$ . Το σήμα που δίνει ο αισθητήρας είναι μεταβολές σε volts. Γίνεται βαθμονόμηση , ώστε να μετατραπούν οι τάσεις (V) σε θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### Αρχή λειτουργίας

Το ανεμόμετρο αποτελείται από ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone (C.T.A) στο οποίο ο αισθητήρας είναι η μια από της τέσσερις αντίστασης Σχήμα (4.4)

Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στο ότι εάν εφαρμοστεί μια σταθερή ένταση ρεύματος στο σύρμα , τότε η ψύξη θα προκαλέσει αλλαγή της αντίστασης του και

επομένως αλλαγή της έντασης στα άκρα του ( από την σχέση:  $P=I^2 \cdot R$  με  $R=\text{const}$ ). Αυτή η διάφορα δυναμικού που παράγεται μεταφέρεται ως δεδομένο στον υπολογιστή μέσω κάρτας Analog-Digital.



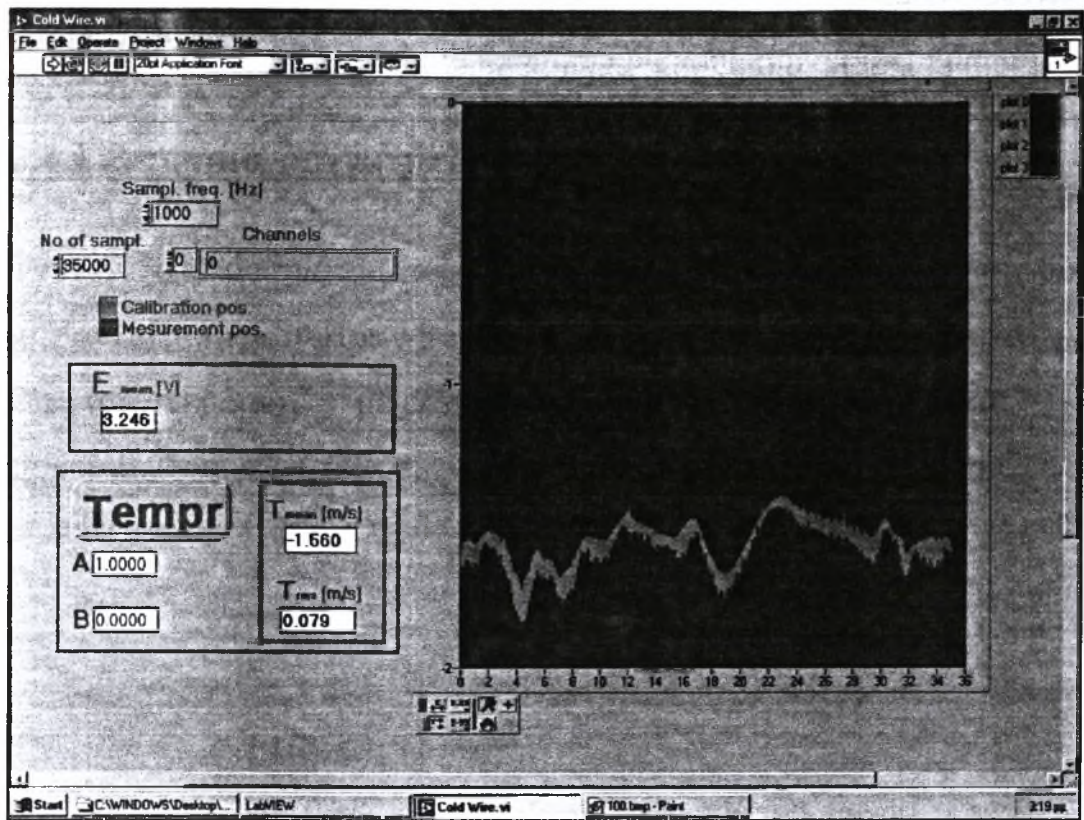
Σχήμα (4.4)

#### **4.2.2 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων, ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (ANALOG-DIGITAL)**

Για τις μετρήσεις των Volts με το Hot - wire η δειγματοληψία και αποθήκευση έγινε με την χρήση ειδικής ηλεκτρονικής κάρτας του οίκου National Instruments. Ο τύπος της κάρτας είναι NI-DAQ CCA, AT-M 10 16XE-50 Εικόνα(), με δυνατότητα λήψης οκτώ (8) καναλιών ταυτόχρονα στο εύρος των  $\pm 10$  [V] η οποία μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό με ακρίβεια 0,00488 [V/bit].

Η κάρτα αυτή τοποθετήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το λογισμικό επικοινωνίας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Labview. Στο σχήμα () που ακολουθεί φαίνεται η επιφάνεια εργασίας του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της θερμοκρασίας.





Εικόνα(4.15).Επιφάνια εργασίας σε περιβάλλον Labview

### 4.2.3 Παλμογράφος

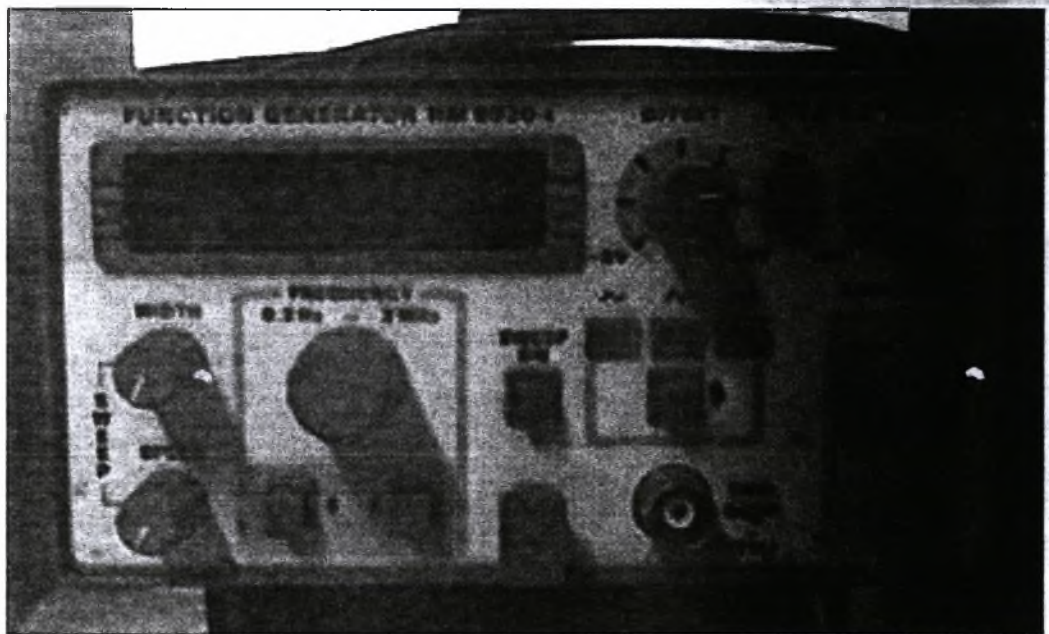
Για να έχουμε άμεσα μια εποπτική εικόνα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από διάφορους αισθητήρες σε κάθε σημείο της μέτρησης χρησιμοποιήσαμε τον παλμογράφο που φαίνεται στην εικόνα ( )



Εικόνα(4.16) Παλμογράφος

#### 4.2.4 Γεννήτρια συχνοτήτων

Για τον έλεγχο του συστήματος κατά το δοκιμαστικό στάδιο πριν την ρύθμιση της τιμής της αντίστασης του Hot-wire και την έναρξη των πειραμάτων ,έγινε έλεγχος της ακρίβειας του ανεμόμετρου με ελεγχόμενα σήματα .Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια συχνοτήτων τύπου : HAMEG Function Generator HM 8030



Εικόνα (4.17) Γεννήτρια Συχνοτήτων



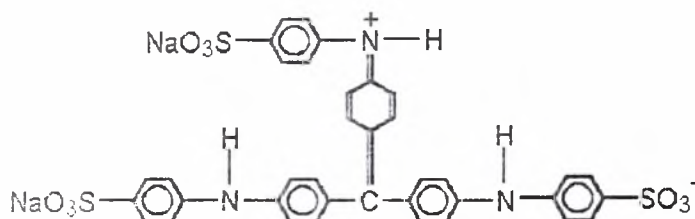
## 4.3 Στοιχεία οπτικοποίησης της ροής

### 4.3.1 Χρώματα οπτικοποίησης

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν οπτικοποίηση με έγχυση χρωστικής βαφής (dye injection). Το χρώμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το methyl blue (μπλε χρώμα) με χημικό τύπο  $C_{37}H_{27}N_3O_9S_3Na_2$ , μοριακό βάρος 799,81 και διαλυτό στο νερό.

### *Methyl Blue*

*Structural formula*



<i>Common name</i>	Methyl blue
<i>Suggested name</i>	Methyl blue
<i>Other names</i>	Cotton blue Helvetia blue
<i>C.I. number</i>	42780
<i>C.I. name</i>	Acid blue 93
<i>Class</i>	Triarylmethane
<i>Ionisation</i>	Acid
<i>Solubility in water</i>	Soluble
<i>Solubility in ethanol</i>	Slight
<i>Absorption maximum</i>	607
<i>Colour</i>	Blue
<i>Empirical formula</i>	$C_{37}H_{27}N_3O_9S_3Na_2$
<i>Formula weight</i>	799.81

Εικόνα (4.18)

### 4.3.2 Πειραματικά μοντέλα οπτικοποίησης

Για την οπτικοποίηση της ροής δοκιμάστηκαν αρκετά μοντέλα μέχρι να καταλήξουμε τελικά ποια θα αντιπροσώπευαν τις απαιτήσεις του πειράματος . Οι ιδέες , τα δοκιμαστικά και τα τελικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω:

#### • ΠΑΡΟΧΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΡΙΓΓΑΣ ΚΑΙ ΜΕ ΜΠΑΛΟΝΑΚΙ.

Αρχικά δοκιμάσαμε να κάνουμε την παροχή της χρωματικής ουσίας (methyl blue) χειροκίνητα και με την βοήθεια σύριγγας .στην άκρη της σύριγγας τοποθετήσαμε ένα μικρό μπαλονάκι όπως φαίνεται στην εικόνα ( ) και μέσα το μπαλονάκι περιείχε ένα μικρό κομμάτι σφουγγαριού σε σφαιρικό σχήμα. Το σφουγγάρι χρησιμοποιήθηκε για να εξέρχεται η χρωστική ουσία με μηδενική ταχύτητα , και το σφαιρικό σχήμα για να έχουμε ομοιόμορφη τρισδιάστατη παροχή στο πείραμα.



Εικόνα (4.19)

Το μοντέλο αυτό όμως δεν το χρησιμοποιήσαμε τελικά γιατί μετά την εκροή της ουσίας και την απομάκρυνση της σύριγγας από την περιοχή δόκιμης είχαμε .νέα εκροή της ουσίας που είχε απομείνει στο σφουγγάρι με αποτέλεσμα να δημιουργεί

ανεπιθύμητες επιρροές σε περιοχές γύρω από την περιοχή δόκιμης, όπως φαίνεται στην εικόνα () (κυκλωμένη περιοχή). Ένα άλλο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου ήταν ότι δεν μπορούσαμε να γνωρίζουμε ακριβώς την ποσότητα παροχής .



Εικόνα (4.20)

#### **• ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΠΑΓΟΥ**

Μια άλλη ιδέα που δοκιμάστηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής ήταν η τοποθέτηση της ουσίας στο κέντρο της διάταξης , σε σφαιρικό σχήμα και με την μορφή πάγου. Με την εφαρμογή αυτού του μοντέλου θέλαμε να προσομοιώσουμε μια πηγή μόλυνσης στο βυθό της θάλασσας , όπου θα είχαμε τυχαία διανομή της ουσίας ως προς το χρόνο και τον χώρο.

Το μοντέλο αυτό δεν μπόρεσε να λειτουργήσει γιατί κατά την εμβαπτιση του πάγου στο νερό αυτός διαλυόταν και έχανε την σφαιρική του μορφή. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ψύξη των μοντέλο απαιτούσε μεγάλο χρονικό διάστημα.

## **• ΠΑΡΟΧΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ ‘PITOT’ (ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ JET)**

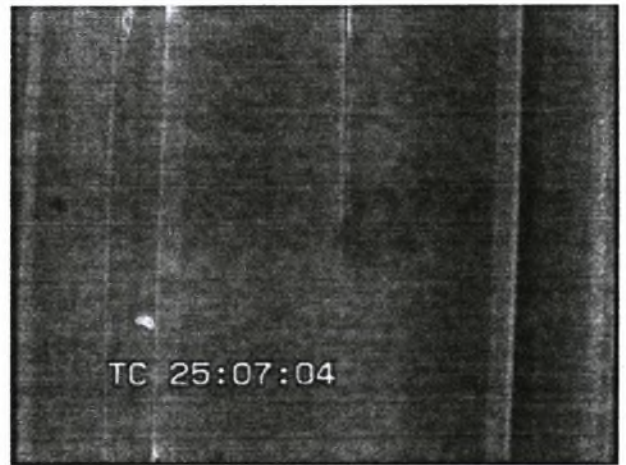
Το μοντέλο που τελικά χρησιμοποιήθηκε ήταν η παροχή της χρωματικής ουσίας με την χρήση μικρού σωλήνα σε σχήμα ‘Pitot’ και διάμετρο 3mm. Το μεγάλο πλεονέκτημα που έχει αυτή η μέθοδος είναι ότι με το σχήμα ‘Pitot’ δεν έχουμε επιρροή του μοντέλου στο χώρο της πειραματικής μελέτης όπως φαίνεται στις εικόνες( ) .

Λήψη κάθετη στη ροή



Εικόνα(4.21)

Λήψη παράλληλη στη ροή



Εικόνα(4.22)

## **• ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΙΚΡΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΡΗ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ‘PITOT’**

Μια παραλλαγή της προηγούμενη μεθόδου είναι η τοποθέτηση μικρής σφαίρας σιλικόνης στην άκρη του σωλήνα ‘Pitot’. Με την βοήθεια ενός μικρού σωλήνα προεκτείναμε το μοντέλο στο κέντρο της διάταξης και τοποθετήσαμε στην άκρη του μια σφαίρα σιλικόνης για να έχουμε τρισδιάστατη ροή της χρωματικής ουσίας , αλλά τελικά δεν καταφέραμε να τρυπήσουμε τη σφαίρα συμμετρικά και το μοντέλο αυτό απορρίφθηκε.



## • ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΦΑΙΡΑΣ ΑΠΟ ΣΦΟΥΓΓΑΡΙ ΣΤΗΝ ΑΚΡΗ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ 'PITOT'

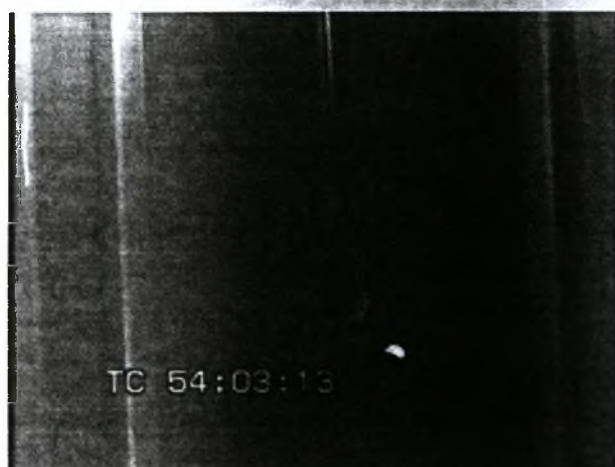
Η τοποθέτηση του μοντέλου είναι η ίδια με την τοποθέτηση στην προηγούμενη μέθοδο. Η διαφορά που έχουμε είναι ότι η σφαίρα σε αυτή την περίπτωση είναι μεγαλύτερη και το υλικό είναι το σφουγγάρι, όπως φαίνεται στις εικόνες () και ().

Λήψη κάθετη στον 'Pitot'



Εικόνα(4.23)

Λήψη παράλληλη στον 'Pitot'



Εικόνα(4.24)

### 4.3.3 Ψηφιακή κάμερα και φωτισμός

Η μαγνητοσκόπηση των πειραμάτων έγινε με έγχρωμη video κάμερα 25 πλαισίων/sec. Η κάμερα ήταν τοποθετημένη σε σταθερή θέση και σε απόσταση 1m απέναντι από τον χώρο δοκιμών μπροστά από το κανάλι. Κάθετα στο κανάλι και σε απόσταση 0,8 m και ύψος 1.0 m από το έδαφος ήταν τοποθετημένες η λάμπες αλογόνου για το φωτισμό του χώρου των πειραμάτων ενώ κατά τη διάρκεια της μαγνητοσκόπησης τα φώτα του εργαστηρίου παραμένουν κλειστά.

## 5. Πειραματική μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που συναντά κανείς στη βιβλιογραφία για ανάλογα πειράματα με παλλόμενα πλέγματα είναι μετρήσεις με ADV [Accoustic Doppler Velocimeter] Enriquez (2002) ,DPIV [Digital Particle Image Velocimetry] Cheng και Law (2001), PIV [Particle Image Velocimetry] LYN (1997), LDV [Laser Doppler Velocimetry] Da Silva και Fernando (1992),LDA [Laser Doppler Anemometry] Mc Dougal (1979) και με Hot-film (Tompson και Turner 1975).

### 5.1 Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot-film

Το Hot-film είναι μια από τις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το λογισμικό που διεξάγονται οι πειραματικές μετρήσεις είναι το Lab view και το πρόγραμμα Cold wire.vi. Το Hot-film χρησιμοποιείται συνήθως για να μετράει μεταβολές ταχυτήτων σε συνεχείς ροές και με συγκεκριμένη διεύθυνση ροής. Όπως έχουμε αναφέρει στη αρχή λειτουργίας του μετρητικού οργάνου , οι μεταβολές που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων είναι μεταβολές Volts οι οποίες μετατρέπονται σε ταχύτητες (m/s) με μια από τις παρακάτω συναρτήσεις :

$$A) \text{ Νόμος του KING , } E^2 = A + B * U^{0.45}$$

$$B) \text{ Πολυώνυμο } n^{\text{ου}} \text{ βαθμού , } U = E_0 + E_1 * V^1 + E_2 * V^2 + \dots + E_n * V^n$$

Όπου  $U$  = ταχύτητα

$E$  = τάση στην έξοδο του Hot-film.

$A, B, E_0, E_1, \dots, E_n$  = σταθερές παράμετροι που πρέπει να βρεθούν.



Στο πείραμα που μελετάμε όμως η ροή δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση ροής όποτε και το Hot-film δεν μπορεί να υπολογίσει σωστά τιμές ταχυτήτων .

Η μελέτη της ροής στη παρούσα διπλωματική έγινε με την μετατροπή του Hot-film σε ένα απλό 'βολτόμετρο'. Θέτουμε λοιπόν τις τιμές στις παραμέτρους  $A=1$  και  $B=0$  του Cold wire.νί και οι τιμές που μετράμε είναι σε Volts.

Τα πειράματα όπως έχουμε προαναφέρει γίνονται για 3.1 ,3.8 , 4.4 και 5.2 Hz ταλάντωσης . Ο αισθητήρας του μετρητικού οργάνου τοποθετείται σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο χώρο των πειραματικών δοκίμων για να μελετήσουμε την συμπεριφορά της ροής .

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται σε γραφήματα στο κεφαλαίο 6 της εργασίας. Στα αποτελέσματα αυτά γίνεται μια περαιτέρω επεξεργασία , η PSD. (Power Spectra Density Estimation) από όπου προκύπτουν οι συχνότητες που επηρεάζουν τον αισθητήρα σε κάθε μέτρηση.

## **5.2 Υπολογιστική Μεθοδολογία –διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων**

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων των πειραμάτων βασίστηκε στο γενικό πλαίσιο της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας μέσω λογισμικού (MATLAB) και freeware λογισμικό από το internet (virtualdub, irfan view). Αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολουθήθηκε με το τελείωμα των πειραμάτων μέχρι και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στις επόμενες σειρές της διατριβής.

Η αποθήκευση των πειραμάτων γινόταν σε κασέτες από τις οποίες στη συνέχεια γινόταν η μεταφορά των βιντεοσκοπήσεων με frame grabber σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (δεν υπήρχε δυνατότητα άμεσης μεταφοράς των βιντεοσκοπήσεων απευθείας στον υπολογιστή με τον υπάρχοντα εξοπλισμό του εργαστηρίου) σε μορφή αρχείων avi. Η ανάλυση των αρχείων αυτών καθώς και

των εικόνων που προέκυψαν από αυτά ήταν 352 x 288. Ο ρυθμός δειγματοληψίας (frame rate) ήταν 15 καρέ το δευτερόλεπτο (15 fps), δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών ήταν ίσος με 0,067 sec (1/15).

Στη συνέχεια για το 'κόψιμο' των εικόνων από τα αρχεία ανι χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Virtual dub.

### ***Πρόγραμμα virtual dub***

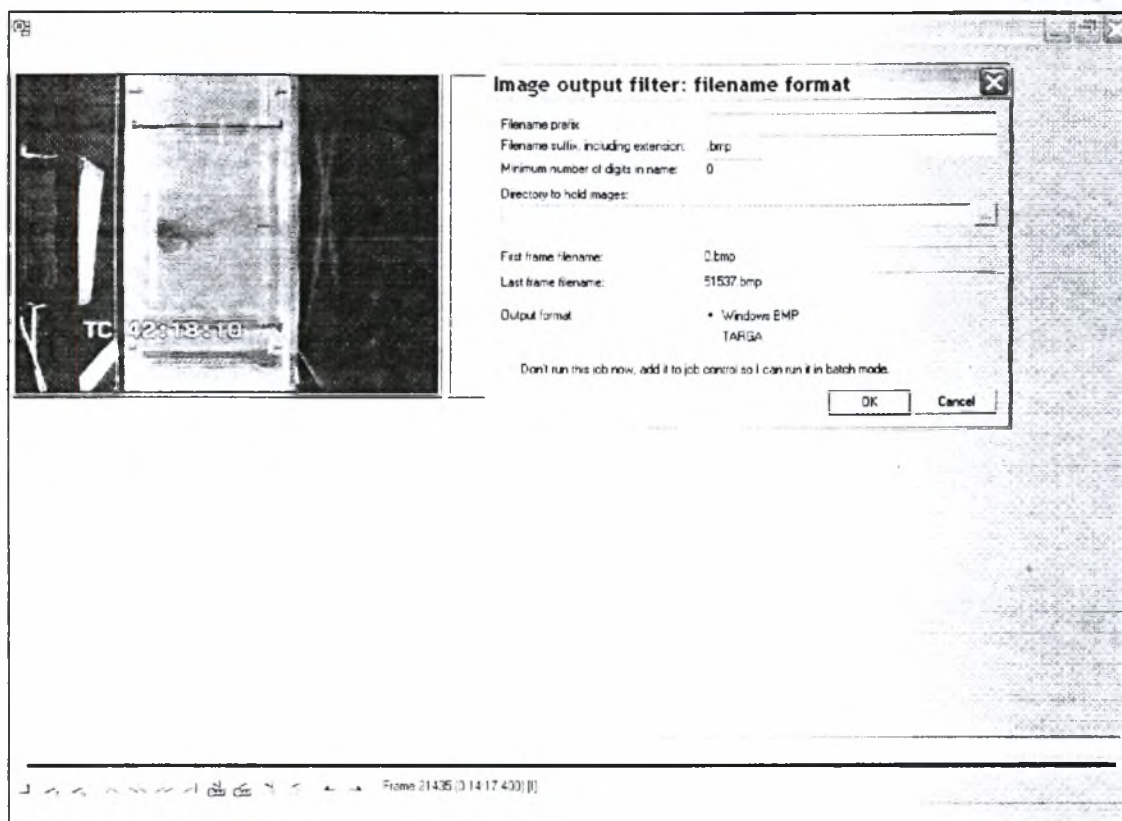
Για το 'κόψιμο' των εικόνων από τα αρχεία ανι χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα virtual dub το οποίο μετατρέπει κάθε καρέ του αρχείου ανι σε μια φωτογραφία-αρχείο τύπου bmp ή jpg ή οποιουδήποτε άλλου τύπου επιλεγθεί. Για να γίνει αυτό επιλέγεται



**Εικόνα (5.1)**

Μετακινώντας την μπάρα επιλέγεται η θέση που θα αρχίσει το «κόψιμο» των εικόνων και πατώντας το πλήκτρο "home" στο πληκτρολόγιο γίνεται η επιλογή. Ξαναμετακινώντας την μπάρα επιλέγεται το τέλος με πίεση του πλήκτρου "end".

Ύστερα επιλέγεται File -> Save image sequence και εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου:



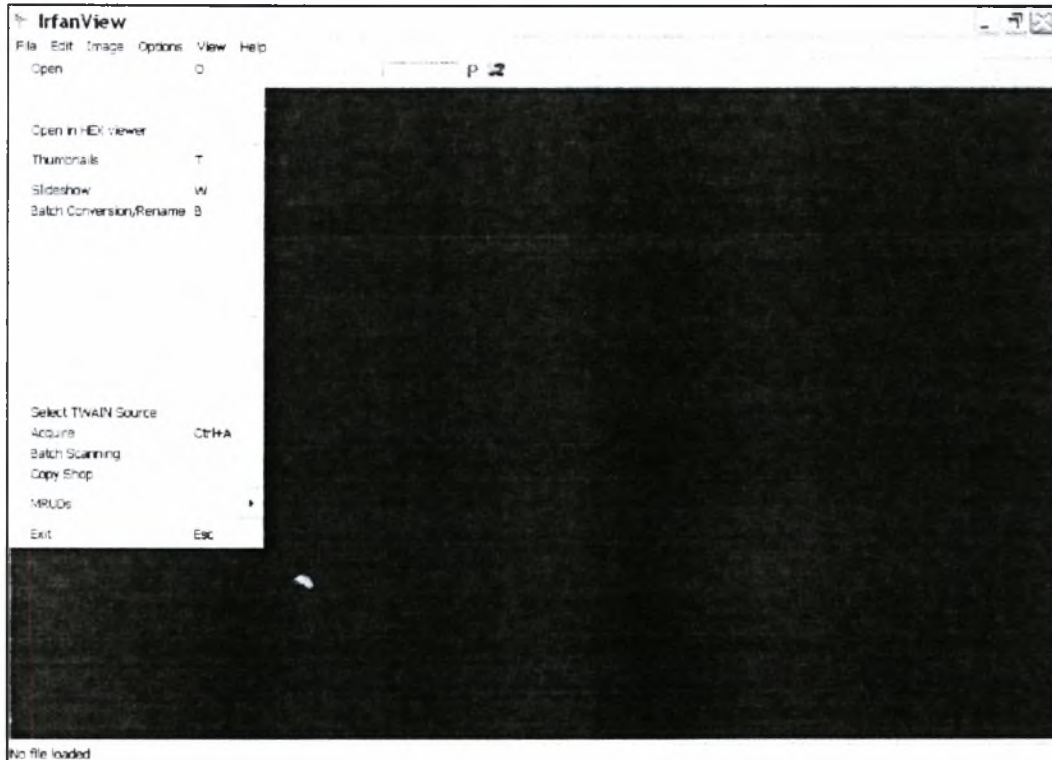
Εικόνα (5.2)

Στο "filename prefix" δίνεται το όνομα των εικόνων, στο "minimum number of digits" η τιμή 3, ενώ στο "directory to hold images" ο φάκελος προορισμού.

Η ανάλυση των εικόνων είναι ίδια με αυτή των αρχείων ανι. Αρχικά οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν σαν αρχεία bmp. Επειδή τα ανι ήταν έγχρωμα (βάθος ανάλυσης 24 RGB) χρειαζόταν να γίνει η μετατροπή των έγχρωμων εικόνων (RGB) σε Γκρι(gray scale). Γι αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας IRFAN VIEW 32.

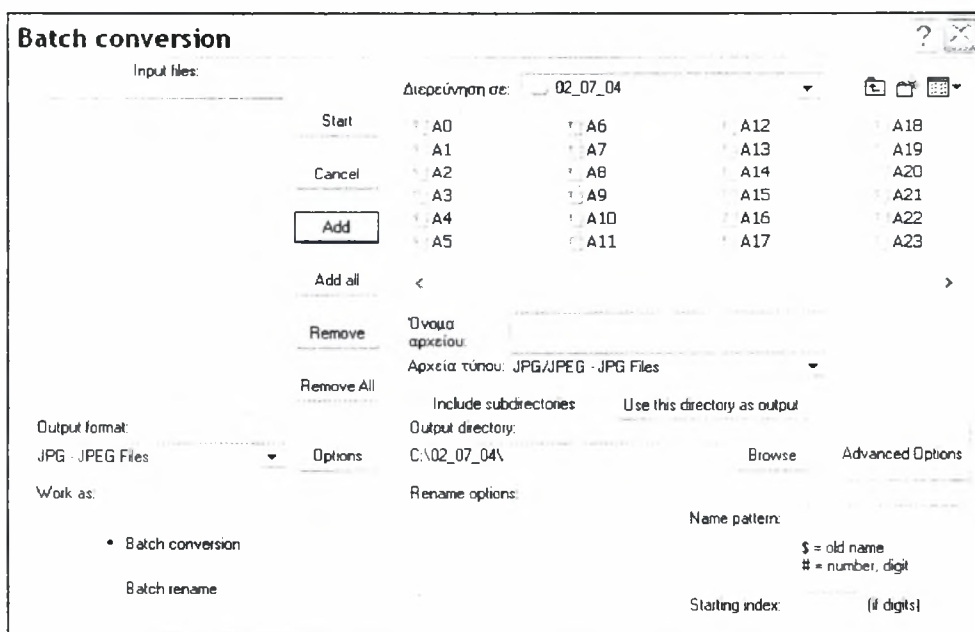
### *Πρόγραμμα IRFAN VIEW 32*

Η ανάλυση των εικόνων είναι ίδια με αυτή των αρχείων ανι. Αρχικά οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν σαν αρχεία bmp. Επειδή τα ανι ήταν έγχρωμα (βάθος ανάλυσης 24 RGB) χρειαζόταν να γίνει η μετατροπή των έγχρωμων εικόνων (RGB)σε Γκρι (gray scale). Γι αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας IRFAN VIEW 32.



Εικόνα (5.3)

Επιλέγεται File->batch conversion/rename εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου:



Εικόνα 5.4



Αφού επιλεγθεί ο φάκελος που είναι οι φωτογραφίες του video στο "Look in" και ο φάκελος προορισμού τους στο "Output directory" η ακολουθία είναι "Add all" →start (όλα τα άλλα παραμένουν όπως στην εικόνα και επίσης δεν υπάρχουν άλλες εικόνες μέσα στον φάκελο) γίνεται μετατροπή των αρχείων των έγχρωμων εικόνων bmp (24 RGB) σε γκρι jpg (8 bit). Αυτό σημαίνει η τιμή του κάθε pixel της γκρι jpg εικόνας λαμβάνει μια τιμή μεταξύ 0 και 255 (συνολικά  $2^3$  διακριτές τιμές). Η τιμή 0 αντιστοιχεί στο μαύρο και η τιμή 255 στο λευκό. Ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν σε διάφορα επίπεδα του γκρι.

Γνωρίζοντας τις πραγματικές διαστάσεις της πειραματικής διάταξης (π.χ. διάμετρος του jet καθώς και εισαγωγή ενός βαθμονομημένου κανόνα με χαρακτηριστικά μήκη) βρέθηκε η αντιστοιχία μεταξύ mm (πραγματικό μήκος) και pixel η οποία έχει ενσωματωθεί στα προγράμματα. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης μεγέθους των διαστάσεων του pixel. Δεν μπορούμε να μιλήσουμε για πολύ μικρές κλίμακες, μικρότερες δηλαδή κάθε φορά από τις διαστάσεις των pixels. Για την εύρεση μεγεθών σε μια περιοχή που η διάσταση της είναι μεγαλύτερη του ενός pixel μπορούμε να ολοκληρώσουμε τις τιμές που προκύπτουν από τα pixels που αποτελούν την εκάστοτε περιοχή. Ας σημειωθεί ότι όλες οι αποστάσεις στο πεδίο ροής είναι αδιαστατοποιημένες με τις διαμέτρους του jet ( $D=3$  mm). Δηλαδή κατά τον άξονα X (διεύθυνση της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος της ροής ) όλες οι αποστάσεις μετρούνται σε  $X/D$  μετρημένα από το κέντρο του jet (π.χ.  $X/D=4$  σημαίνει απόσταση ίση με 4 διαμέτρους του jet κατά τον άξονα X). Τα ίδια ισχύουν και για τον άξονα Y (κάθετα στον άξονα X). Δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων είναι προσαρμοσμένο στο κέντρο του jet (το 0,0 βρίσκεται στο κέντρο του jet ).

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν κάποια προγράμματα τα οποία γράφτηκαν σε περιβάλλον MATLAB 6.1. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των προγραμμάτων.



## 5.5 Χρήση Matlab για την υπολογιστική μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης

### εικόνας

#### **Προγράμματα για την εξαγωγή συχνοτήτων *ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CONVGRAY***

Η χρησιμοποίηση αυτού του προγράμματος έγινε για να αφαιρεθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος από τις φωτογραφίες. Χρησιμοποιεί ένα φίλτρο συνέλιξης (convolution filter) Gaussian 15x15 το οποίο 'επεμβαίνει' στις gray scale (jpg 8 bit) εικόνες με σκοπό την ομαλοποίηση της (smoothing). Το υπολογιστικό πακέτο MATLAB 6.1 περιέχει στις βιβλιοθήκες του περίπου 100 ηλεκτρονικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται για ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.

#### **ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CONV**

Η χρησιμοποίηση αυτού του προγράμματος έγινε για να αφαιρεθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος από τις έγχρωμες φωτογραφίες (RGB). Χρησιμοποιεί ένα φίλτρο συνέλιξης (convolution filter) Gaussian 15x15 το οποίο 'επεμβαίνει' στις RGB (bmp 24 bit) εικόνες με σκοπό την ομαλοποίηση της (smoothing).

#### **ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GRAY**

Η εντολή `readim` 'διαβάζει' την εικόνα (τη φιλτραρισμένη) και δημιουργεί ένα πίνακα δύο διαστάσεων (δηλαδή η ανάλυση σε pixel) του οποίου η κάθε τιμή είναι ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 0-255. Τα χρωματικά υγρά που χρησιμοποιούνται για οπτικοποίηση 'αντικατοπτρίζουν' χωροχρονικά τις τροχιές του πραγματικού ρευστού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα χρωματικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν κάνουν ορατό τον σχηματισμό των δινών στο πεδίο ροής. Κάθε δομικό στοιχείο της δίνης (χρωματισμένο pixel) έχει κάποια τιμή (0-255) ανάλογα με τη χωρική θέση που αντιπροσωπεύει το pixel αυτό του πεδίου ροής και ανάλογα με τη χρονική στιγμή του φαινομένου (αριθμός φωτογραφίας). Η

πραγματική κίνηση του ρευστού μετατοπίζει τα μόρια του χρωματισμένου διαλύματος σε συγκεκριμένες θέσεις που παράλληλα με τη συνεχή διάχυση με το νερό σε κάθε διακριτό σημείο (pixel της εικόνας) υπάρχει διαφορετική συγκέντρωση χρώματος που επιφέρει αλλαγή στην τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel (pixel intensity). Επειδή το φαινόμενο είναι έντονα περιοδικό οι περιοδικές αυτές μεταβολές στην τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel φέρουν στο φως και τις συχνότητες του φαινομένου όπως θα εξηγηθεί και μαθηματικά παρακάτω. Επίσης στο πρόγραμμα αυτό πραγματοποιούνταν και αποκοπή της φωτογραφίας στην περιοχή ενδιαφέροντος (σε δεδομένη περιοχή pixel που θα γινόταν η ανάλυση συχνοτήτων). Αυτό ήταν αναπόφευκτο δεδομένου του μεγάλου αριθμού πράξεων και της υπολογιστικής δυναμικότητας του υπολογιστή. Το 'τρέξιμο' των προγραμμάτων πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που είχε επεξεργαστή 1.7 GHz και RAM 512 MB. Ο προηγούμενος περιορισμός έδρασε και στον αριθμό των εικόνων που χρησιμοποιούνταν για την ανάλυση σε κάθε θέση του jet. Διαπιστώθηκε ότι όταν χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από 600 εικόνες το πρόγραμμα δεν αποκρινόταν και σε αριθμό εικόνων μεταξύ 400-600 το πρόγραμμα χρειαζόταν αρκετό χρόνο για την τελική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των πειραμάτων αποφασίστηκε ο αριθμός των εικόνων που θα χρησιμοποιούνταν σε κάθε θέση και για κάθε κύλινδρο να είναι ίσος με 400 ο οποίος αριθμός καλύπτει αρκετές περιόδους του φαινομένου και παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

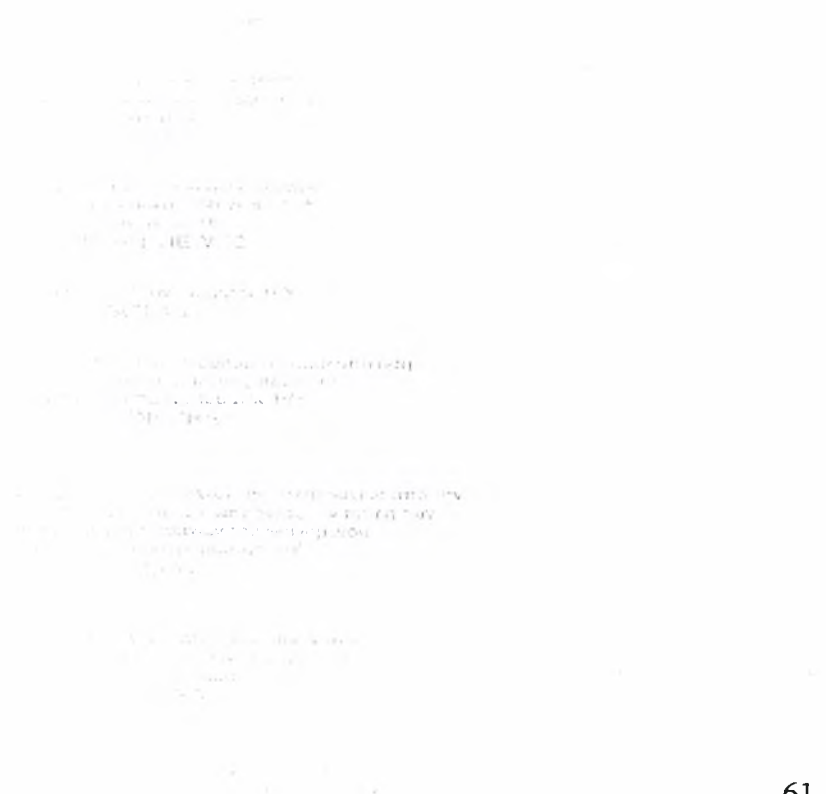
## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FFTGRAY

Τελικά οι τιμές των συχνοτήτων κατά τον έλεγχο με την οπτικοποίηση προκύπτουν μέσω ανάλυσης Fourier. Πιο συγκεκριμένα για την ανάλυση ενός σήματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση σήμα αποτελεί η τιμή της έντασης

ακτινοβολίας του pixel) χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DISCRETE FOURIER TRANSFORM-DFT) ο οποίος βρίσκει τις συχνότητες του σήματος .. Βασίζεται στο μετασχηματισμό Fourier και χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα του σήματος λαμβάνουν διακριτές τιμές. Το *MATLAB* 6.1 έχει στη διάθεση του το γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FAST FOURIER TRANSFORM-FFT) ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος που έγινε γνωστός μετά από μία εργασία των Cooley και Tuckey (1965) και απαιτεί  $N \log N$  αριθμητικές πράξεις για τον υπολογισμό του DFT ενώ ο παραδοσιακός τρόπος που εφαρμοζόταν μέχρι τότε απαιτούσε  $N^2$  πράξεις.

## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GRAPHFFTGRAY

Σε αυτό το πρόγραμμα ορίζονται τα σημεία εκείνα του πλεγματος στα οποία θα εμφανιστούν τα διαγράμματα συχνοτήτων μετά την ανάλυση που προηγήθηκε στο προηγούμενο πρόγραμμα. Οι κώδικες των προγραμμάτων καθώς και λεπτομερής ανάλυση του FFT παρουσιάζονται στο παράρτημα της εργασίας.



## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΑΝΦΟΤ

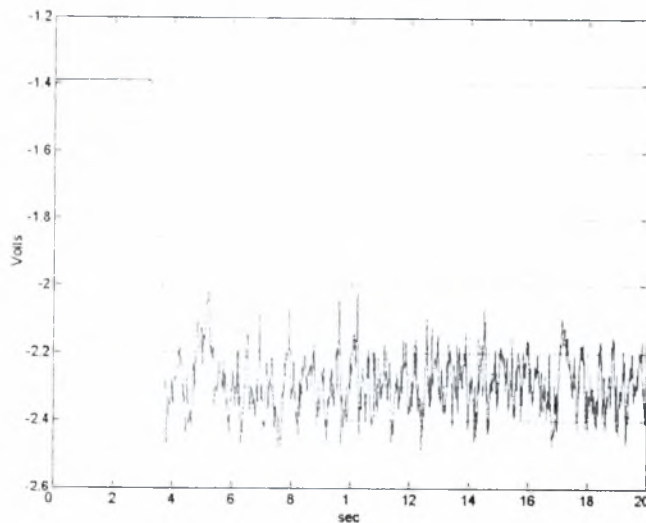
Το αυτό πρόγραμμα διαβάζει με την εντολή `readim` μια σειρά εικόνων ,υπολογίζει τη μέση χρονική τιμή της ακτινοβολίας σε κάθε pixel και δημιουργεί τις αντίστοιχες ισοϋψείς καμπύλες της ακτινοβολίας .

## 6. Συγκριτικοί έλεγχοι για το πεδίο ταχυτήτων

### 6.1 Επιρροή παλλόμενων πλεγμάτων σε συνεχές jet

Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάσαμε την επιρροή που ασκούν τα πλέγματα σε ένα jet συνεχής ροής. Έχοντας την αντλία παροχής στα 8Volts η ταχύτητα εξόδου του νερού ήταν 1,8 m/s και η παροχή  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Αφού θέταμε σε λειτουργία τα πλέγματα ξεκινούσαμε τη μέτρηση. Με την πάροδο των 3 πρώτων sec από την έναρξη της μέτρησης ξεκινούσε και η παροχή του ρευστού. Οι συχνότητες ταλάντωσης που εξετάσαμε ήταν 0, 3.1, 3.8, 4.4 και 5.2 Hz αντίστοιχα. και τα αποτελέσματα που πήραμε εμφανίζονται παρακάτω.

- Χωρίς ταλάντωση

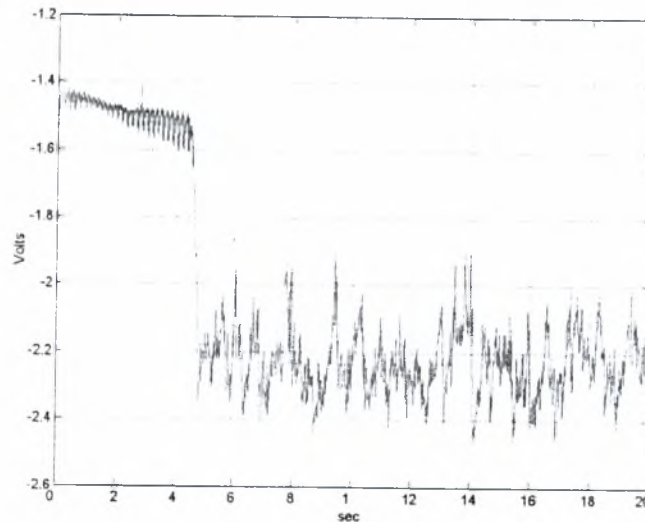


Σχήμα 6.1

Τα 4 πρώτα sec της λήψης το σήμα του Hot-wire βρίσκεται σε ηρεμία στα -1.4Volts . με την παρουσία του ρευστού παρατηρούμε μια διέγερση του αισθητήρα η οποία κυμαίνεται στα -2.5 και -2.1 Volts. Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι -2,291 και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.350.



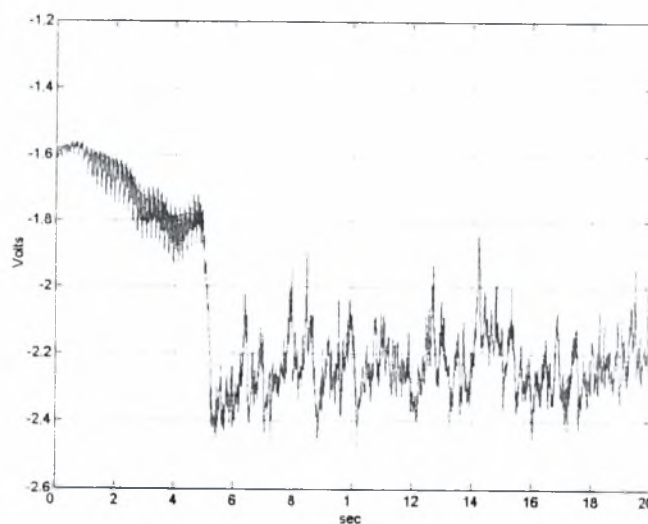
- **Ταλάντωση με 3.1 Hz**



Σχήμα 6.2

Τα 4 πρώτα sec έχουμε διαταραχές στο σήμα του Hot-wire οι οποίες οφείλονται στην ταλάντωση του πλέγματος. Την στιγμή που γίνεται αισθητή η παρουσία του ρευστού η μέτρηση είναι στα  $-1.6\text{ Volt}$ . Η διακύμανση στην παρουσία του ρευστού είναι από  $-2.5$  και  $-1.9\text{ Volts}$ . Εδώ η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-2,223$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση ( $V_{\text{rms}}$ ) είναι  $0.323$ .

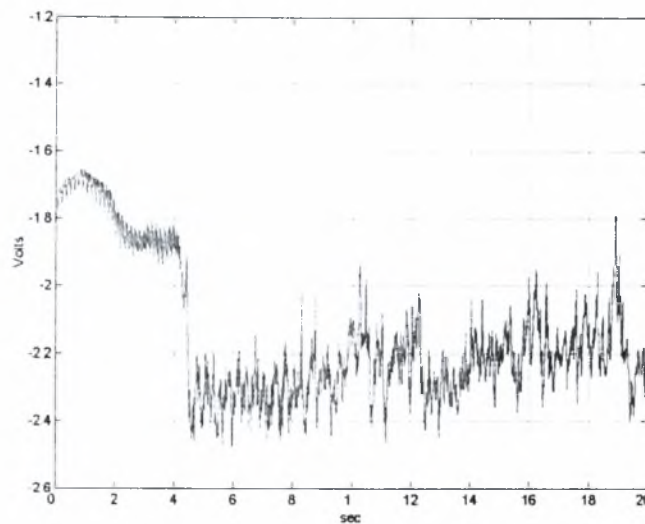
- **Ταλάντωση με 3.8 Hz**



Σχήμα 6.3

Τα 4 πρώτα sec η επιρροή του πλέγματος είναι μεγαλύτερη και προκαλεί εντονότερες διαταραχές. Την στιγμή που γίνεται αισθητή η παρουσία του ρευστού η μέτρηση είναι στα  $-1.8\text{ Volt}$ . Η διακύμανση των τιμών είναι ακόμα μεγαλύτερη με την παρουσία του ρευστού ξεκινάει από  $-2.5$  μέχρι  $-1.8\text{ Volts}$ . Σε αυτή την περίπτωση η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-2,238$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση ( $V_{\text{rms}}$ ) είναι  $0.248$ .

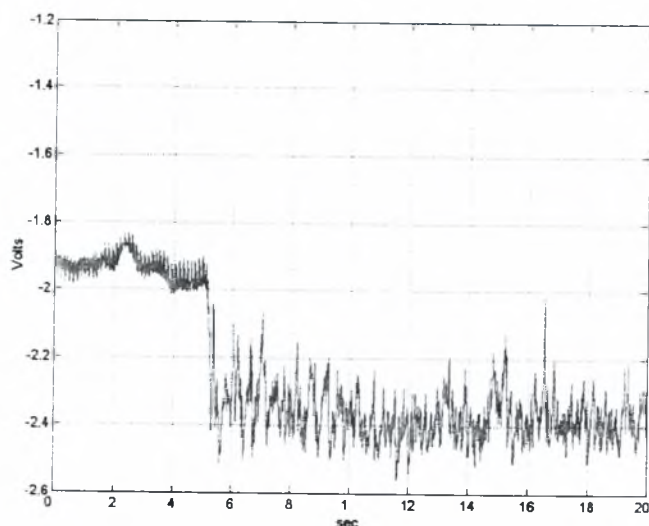
- Ταλάντωση με  $4.4\text{ Hz}$



Σχήμα 6.4

Οι διαταραχές στο σήμα που οφείλονται στην ταλάντωση του πλέγματος είναι ακόμα μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση που έχουμε  $3.8\text{ Hz}$ . Την στιγμή που γίνεται αισθητή η παρουσία του ρευστού η μέτρηση είναι στα επίσης μεγαλύτερη και έχει την τιμή  $-2.0\text{ Volt}$ . Η διακύμανση στην παρουσία του ρευστού είναι από  $-2.5$  και  $-1.8\text{ Volts}$ . Εδώ οι τιμές της μέσης τιμής των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) και της τετραγωνικής τυπικής απόκλισης ( $V_{\text{rms}}$ ) είναι αντίστοιχα  $-2,237$  και  $0.208$ .

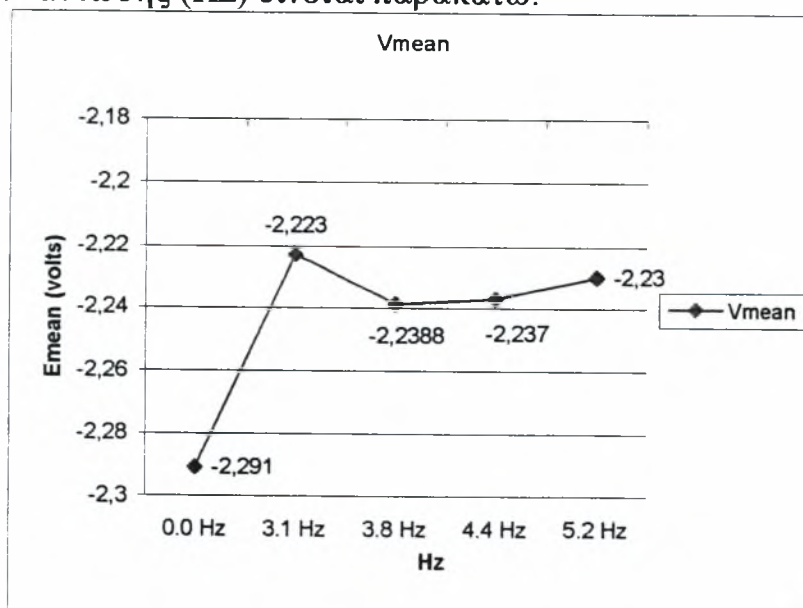
- Ταλάντωση με 5.2 Hz



Σχήμα 6.5

Όπως ήταν αναμενόμενο οι διαταραχές που προκαλούνται αρχικά στον αισθητήρα είναι μεγαλύτερες από κάθε άλλη μέτρηση στο συγκεκριμένο πείραμα. Οι διαταραχές αυτές ξεκινούν από το  $-1.9$  και την στιγμή της παρουσίας του ρευστού έχει τη τιμή  $-2.0$ . Με την παρουσία του ρευστού είχαμε μεταβολές στις μετρήσιμες ποσότητες από  $-2.5$  έως  $-2.1$  Volts. Η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-2,23$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση ( $V_{\text{rms}}$ ) είναι  $0.202$ .

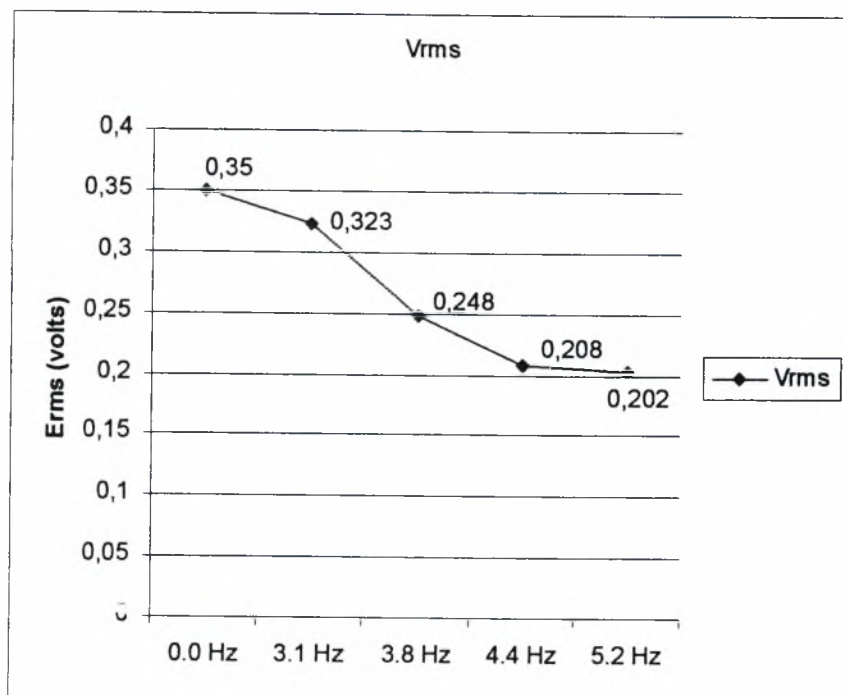
Το γράφημα της μεταβολής της μέσης τιμής των Volts συναρτήσει των συχνοτήτων ταλάντωσης (Hz) δίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.6

Από το προηγούμενο διάγραμμα παρατηρούμε ότι για 3,1 Hz συχνότητα ταλάντωσης η μέση τιμή των Volts παρουσιάζει μέγιστη τιμή,

Το γράφημα της μεταβολής της τυπικής απόκλισης των Volts συναρτήσει των Hz δίνεται παρακάτω:



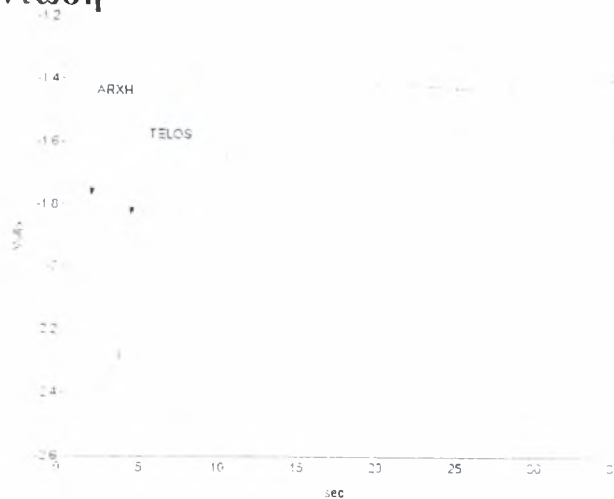
Σχήμα 6.7

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η τυπική απόκλιση των Volts μειώνεται σταδιακά με την αύξηση των τιμών των συχνοτήτων ταλάντωσης του πλέγματος. Παρατηρούμε λοιπόν ότι στην τελευταία περίπτωση έχουμε τη μικρότερη διακύμανση από τη μέση τιμή.

## 6.2 Επιρροή παλλόμενων πλεγμάτων σε μικρής διάρκειας (2sec) jet

Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάσαμε την επιρροή που ασκούν τα πλέγματα σε ένα jet μικρής διάρκειας (2sec). Έχοντας την αντλία παροχής στα 8Volts η ταχύτητα εξόδου του νερού ήταν 1,8 m/s και η παροχή  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Αφού θέταμε σε λειτουργία τα πλέγματα ξεκινούσαμε τη μέτρηση. Με την πάροδο των 2 πρώτων sec από την έναρξη της μέτρησης ξεκινούσε και η παροχή του ρευστού που και αυτή διαρκούσε μόλις 2 sec. Οι συχνότητες ταλάντωσης των πλεγμάτων ήταν 0, 3.1, 3.8, 4.4 και 5.2 Hz αντίστοιχα. και τα αποτελέσματα τελικά που πήραμε φαίνονται παρακάτω.

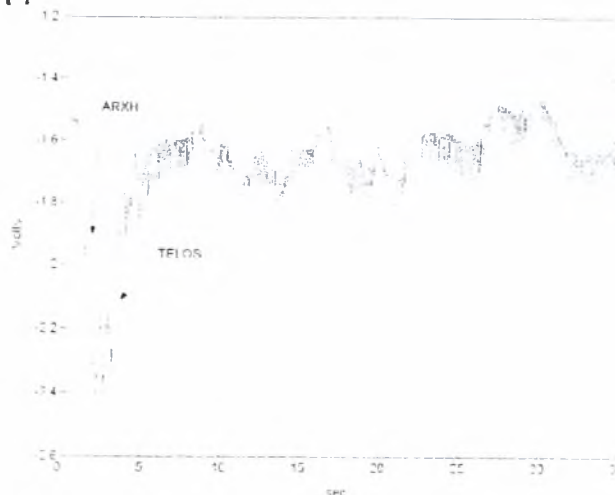
- Χωρίς ταλάντωση



Σχήμα 6.8

Η παρουσία της ροής γίνεται άμεσα αισθητή. Προκαλείται μια διέγερση στον αισθητήρα μέχρι τα  $-2.5 \text{ Volts}$  και μετά επανέρχεται σε ηρεμία το σύστημα. Για τη χρονική διάρκεια από 10 ως 35 sec η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,569$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.123.

- Ταλάντωση με 3.1 Hz

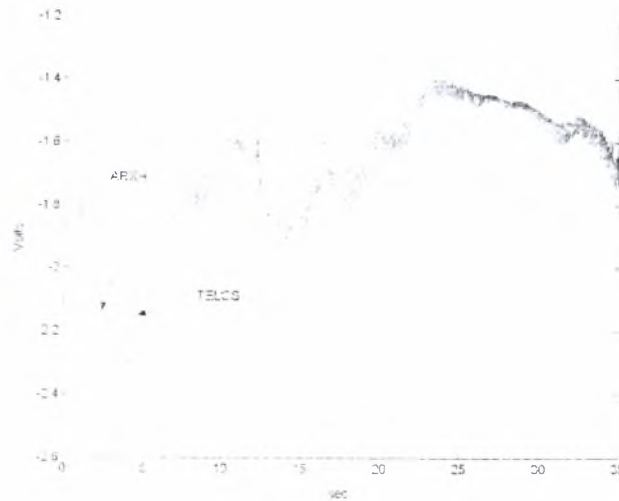


Σχήμα 6.9



Η διέγερση που προκαλείται στο αισθητήρα είναι της ίδιας έντασης (-2.5Volts). Αλλά το σύστημα δεν επανέρχεται σε ηρεμία όπως συνέβη στην προηγούμενη περίπτωση .Εδώ για τη ίδια χρονική διάρκεια η μέση τιμή των Volts( $v_{mean}$ ) είναι -1,6417 και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.09.

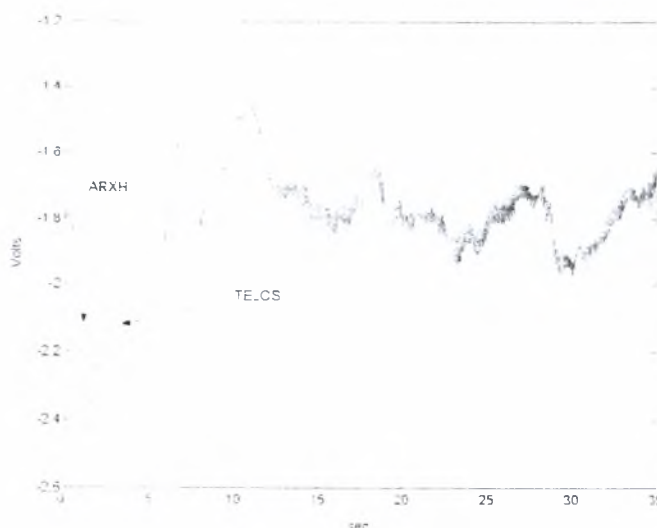
- **Ταλάντωση με 3.8 Hz**



Σχήμα 6.10

Όπως φαίνεται στο γράφημα η χρονική διάρκεια που επιδρά το jet είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις μέχρι τώρα (περίπου 2 sec ).Αυτό που είναι άμεσα αντιληπτό είναι ότι η επίδραση των πλεγμάτων είναι εντονότερη μετά την `διάλυση` της κύριας ροής .όπου το σύστημα δίνει μεγάλες διακυμάνσεις. Η μέση τιμή των Volts( $v_{mean}$ ) είναι -1,690 και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.167.

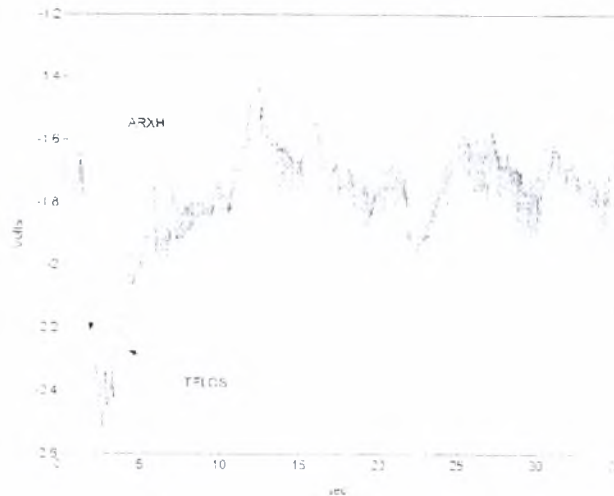
- **Ταλάντωση με 4.4 Hz**



Σχήμα 6.11

Η επιρροή του jet είναι της ίδιας μορφής με τα προηγούμενα , αλλά οι καμπύλες που δημιουργούνται μετά την επιρροή του jet είναι μεγαλύτερες και πιο πολλές. Για τη χρονική διάρκεια από 10 ως 35 sec η μέση τιμή των Volts( $v_{mean}$ ) και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι αντίστοιχα  $-1,802$  και  $0.109$ .

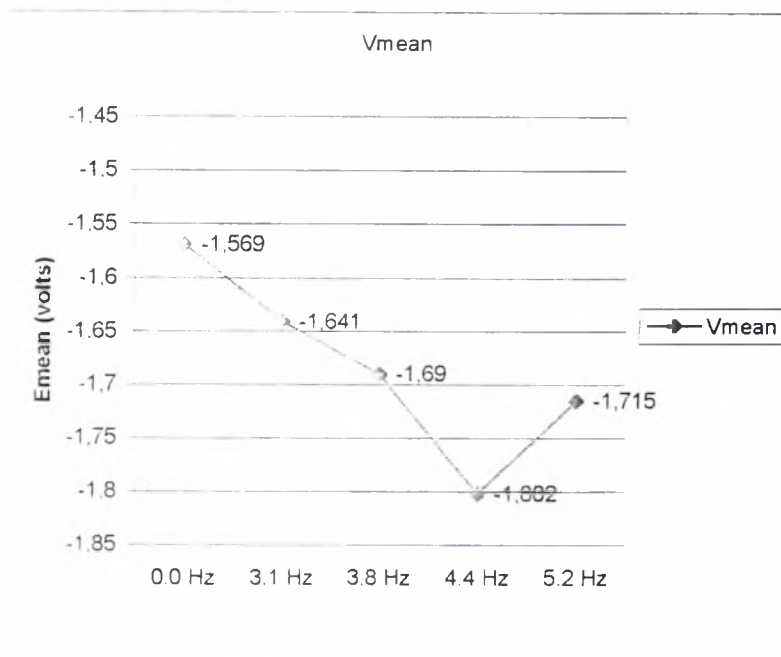
- **Ταλάντωση με 5.2 Hz**



Σχήμα 6.12

Το πάχος της γραμμής είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις προηγούμενες περιπτώσεις πράγμα που δείχνει ότι οι τιμές μεταβάλλονται πολλές φορές μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Εδώ για τη ίδια χρονική διάρκεια η μέση τιμή των Volts( $v_{mean}$ ) είναι  $-1,715$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.1$ .

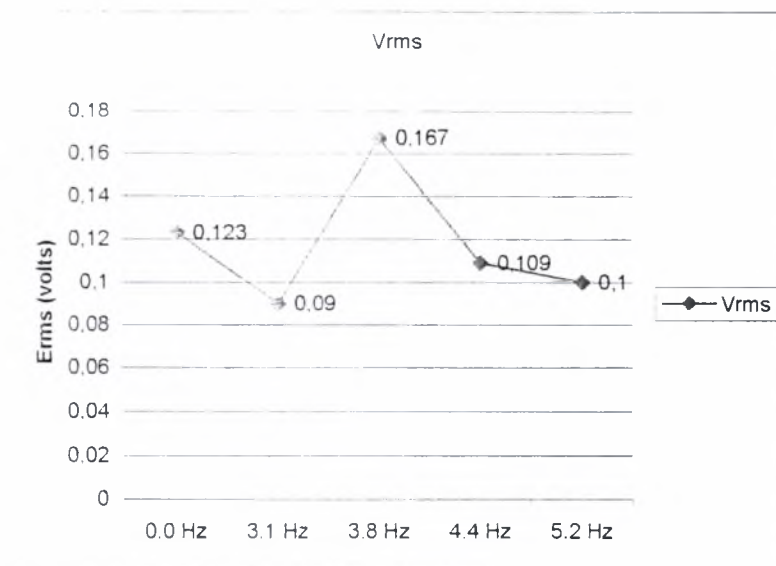
Το γράφημα της μεταβολής της μέσης τιμής των Volts συναρτήσει των συχνοτήτων ταλάντωσης (Hz) για τη χρονική διάρκεια από 10 ως 35 sec δίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.13

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η μέση τιμή των Volts μειώνεται σε σχέση με τη συχνότητα ταλάντωσης μέχρι τα 4,4 Hz ,εικόνα που αλλάζει στα 5.2 Hz ,αφού η μέση τιμή παρουσιάζει μια αύξηση.

Το γράφημα της μεταβολής της τυπικής απόκλισης των Volts συναρτήσει των συχνοτήτων ταλάντωσης (Hz) για τη χρονική διάρκεια από 10 ως 35 sec δίνεται παρακάτω



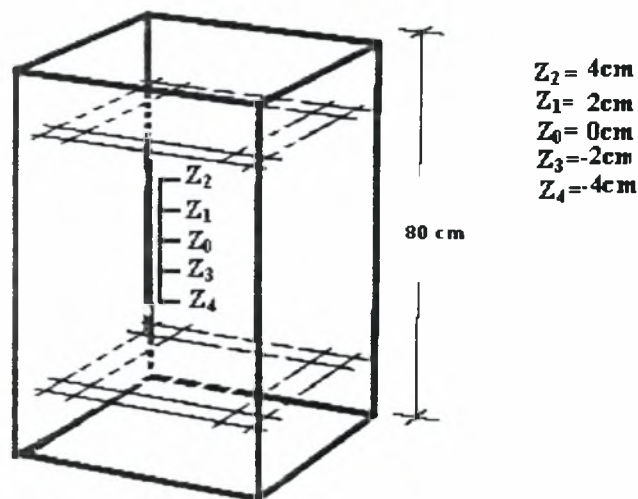
Σχήμα 6.14

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η τυπική απόκλιση των Volts παρουσιάζει αυξομειώσεις με την αύξηση των τιμών των συχνοτήτων ταλάντωσης του πλέγματος. Στα 3.1 Hz ταλάντωσης έχουμε τη μικρότερη διακύμανση από τη μέση τιμή.

### 6.3 Συγκριτική μελέτη στη διεύθυνση ταλάντωσης Z

Με το Hot film θέλουμε να μελετήσουμε αν η ροή είναι συμμετρική ή / και ισότροπη ανάμεσα στα πλέγματα (χωρίς jet). Για το λόγο αυτό έγιναν οι παρακάτω πειραματικές μετρήσεις.

Τοποθετήσαμε το hot film στις θέσεις  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  και μετρήσαμε την διέγερση στο αισθητήρα που προκαλείται για ταλάντωση με 0 Hz, 3.1Hz, 3.8Hz, 4.4 Hz και 5.2 Hz στον μηχανισμό ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα που θα πάρουμε είναι σε volt και τα παρουσιάζουμε παρακάτω.



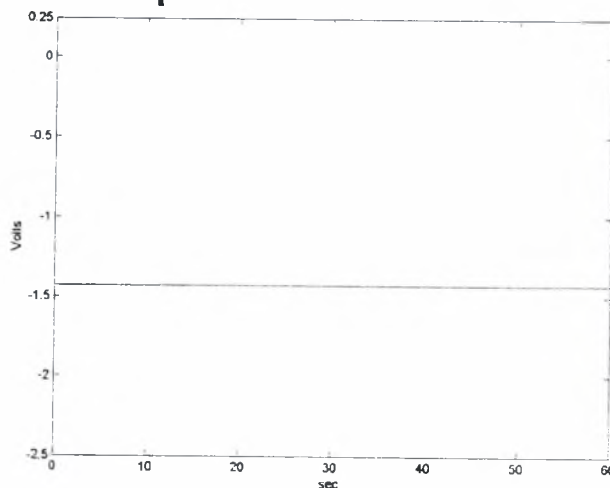
Σχήμα -6.15: Σχηματική απεικόνιση των θέσεων όπου έγιναν οι μετρήσεις.

Τα αποτελέσματα που πήραμε δίνονται παρακάτω σε γραφήματα Volts - χρόνου.



### 6.3.1 Στη θέση $Z=0$ cm έχουμε

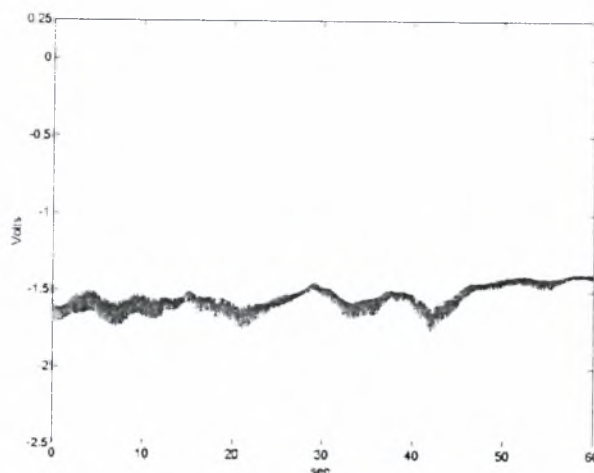
#### 6.3.1.1 Χωρίς Ταλάντωση και $Z=0$



Σχήμα 6.16

Το γράφημα είναι όπως αναμενόταν σταθερό στα  $-1,43$  Volts. Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,430$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.000$ .

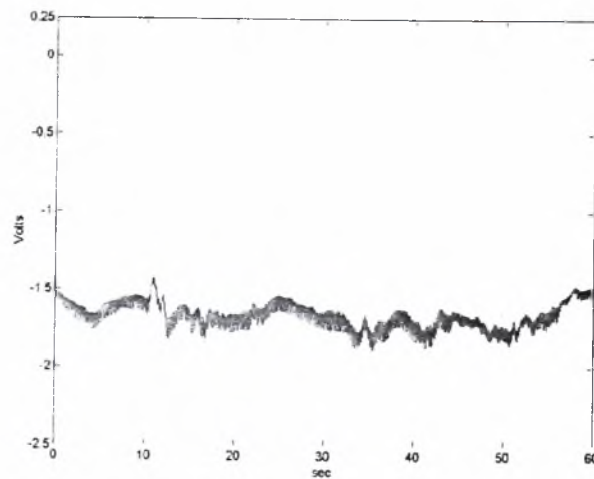
#### 6.3.1.2 Με ταλάντωση $3.1\text{Hz}$ και $Z=0$



Σχήμα 6.17

Παρατηρούμε ότι οι πρώτες επιρροές από το πλέγμα είναι από το  $-1.7$  έως τα  $-1.4$  Volts. Τα πρώτα  $20$  sec το πάχος της γραμμής είναι μεγαλύτερο γιατί έχουμε περισσότερες μεταβολές στην μονάδα του χρόνου. Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,545$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.080$ .

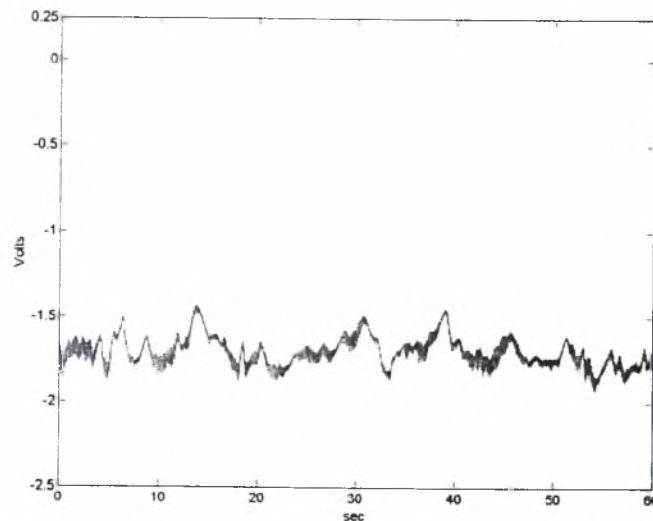
### 6.3.1.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $Z=0$



Σχήμα 6.18

Οι τιμές κυμαίνονται γύρω από το  $-1.6 \pm 1$  Volt . Εδώ η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,668$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.079$ .

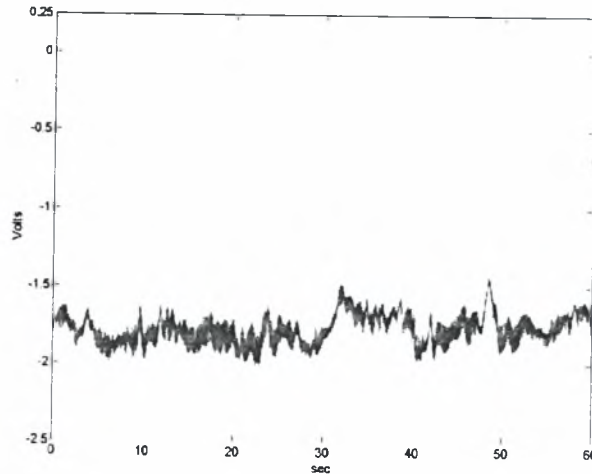
### 6.3.1.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $Z=0$



Σχήμα 6.19

Την χρονική στιγμή  $t=0$  sec παρατηρούμε ότι το γράφημα ξεκινάει από την τιμή  $-1.6$  Volts και έχει μια διακύμανση από  $-1.8$  έως  $-1.4$  Volts. Το πάχος της γραμμής είναι μικρότερο από τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις κάτι που δηλώνει ότι οι μεταβολές συμβαίνουν σε μεγαλύτερη χρονική διάρκεια από ότι πριν. Σε αυτή την περίπτωση η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,702$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.084$ .

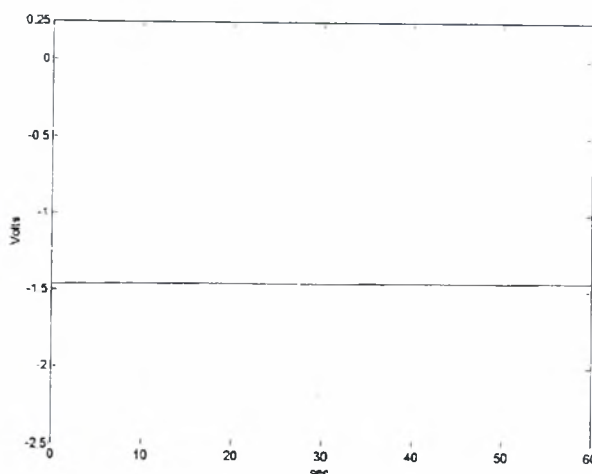
### 6.3.1.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $Z=0$



Σχήμα 6.20

Την χρονική στιγμή  $t=0$  η τιμή είναι 1,7 volts. Οι διακυμάνσεις σε αυτή την περίπτωση είναι από  $-1.9$  μέχρι  $-1.4$  Volts. Το πάχος της γραμμής και οι πολλές καμπύλες μας δείχνουν ότι η επιρροή των 5.2 Hz επηρεάζουν πιο έντονα την περιοχή μελέτης. Εδώ η μέση τιμή των Volts( $v_{mean}$ ) είναι  $-1,773$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.095.

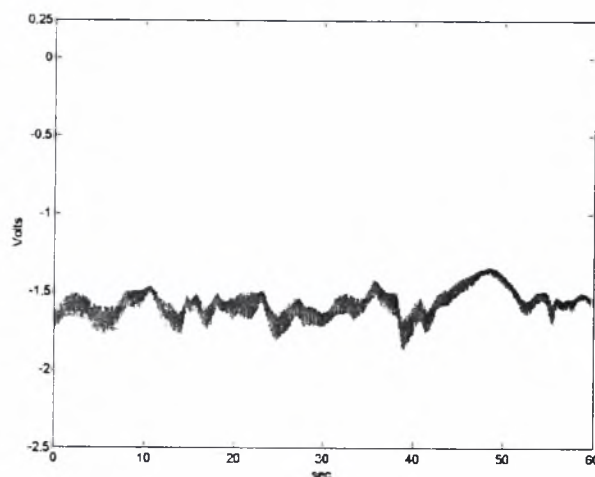
### 6.3.2.1 Χωρίς Ταλάντωση και $Z=+2$ cm



Σχήμα 6.21

Όπως και το προηγούμενο γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,45$  Volts. Η μέση τιμή των Volts( $v_{mean}$ ) είναι  $-1,455$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.000.

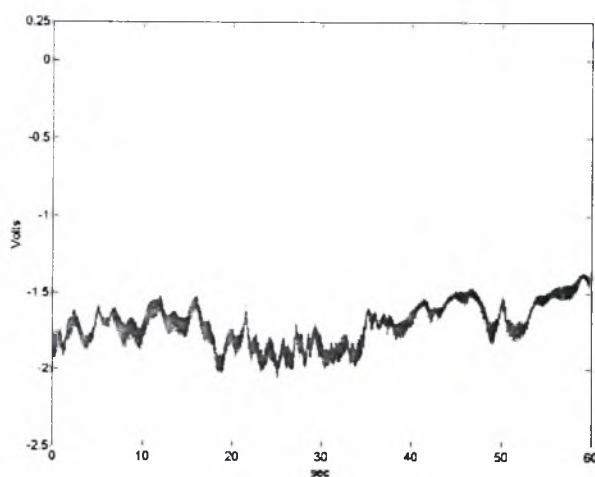
### 6.3.2.2 Με ταλάντωση 3.1Hz και $Z=+2$ cm



Σχήμα 6.22

Οι διακυμάνσεις των τιμών είναι από  $-1,7$  έως  $-1,5$ . Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,571$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.085$ .

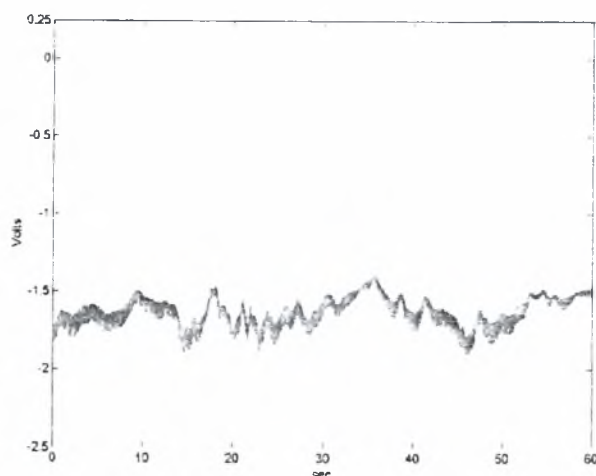
### 6.3.2.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $Z=+2$ cm



Σχήμα 6.23

Απότομες διακυμάνσεις των τιμών το οποίο φαίνεται στις πολλές κορυφές που έχουμε στο γράφημα. Οι τιμές κυμαίνονται από τα  $-2,0$  έως τα  $-1,4$  Volts. Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,705$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.143$ .

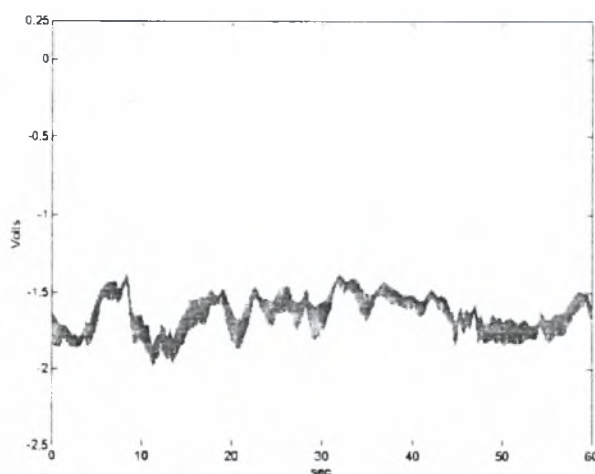
#### 6.3.2.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $Z=+2$ cm



Σχήμα 6.24

Το γράφημα έχει παρόμοια μορφή με το γράφημα στην περίπτωση για  $Z=2$  και 3.8Hz. Το εύρος των τιμών είναι από  $-2.0$  έως τα  $-1.4$  Volts. Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,632$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.093.

#### 6.3.2.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $Z=+2$ cm



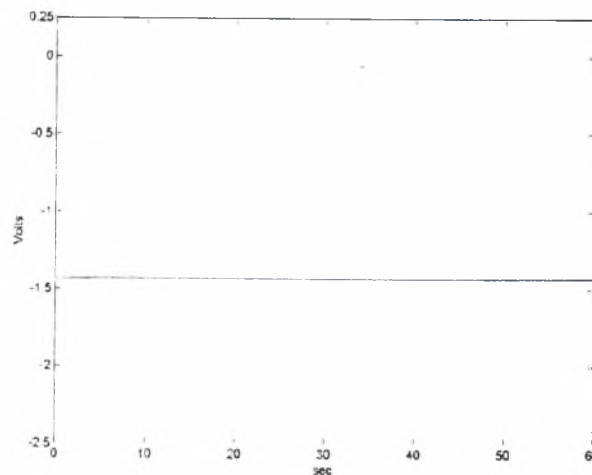
Σχήμα 6.25

Το γράφημα έχει τιμές που κυμαίνονται από τα  $-2.0$  έως τα  $-1.4$  Volts. Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,629$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι 0.117.



### 6.3.3 Στη θέση $Z_2=+4$ cm έχουμε

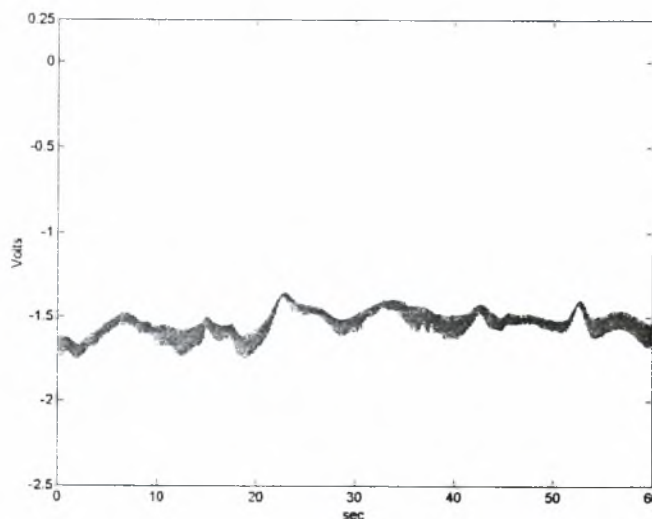
#### 6.3.3.1 Χωρίς Ταλάντωση και $Z=+4$ cm



Σχήμα 6.26

Το γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,45$  Volts Εδώ η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1433$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.000$ .

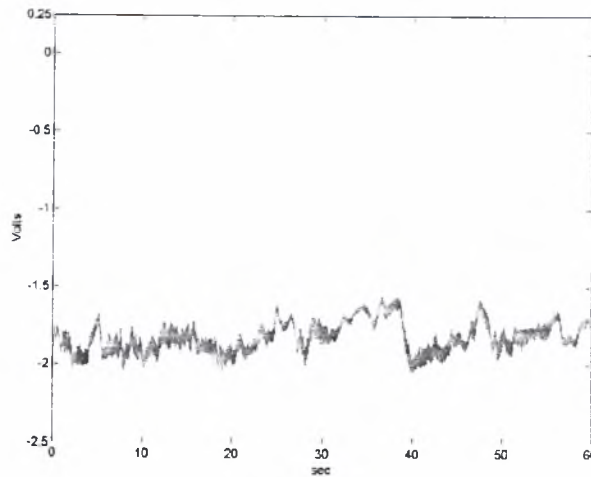
#### 6.3.3.2 Με ταλάντωση $3.1\text{Hz}$ και $Z=+4$ cm



Σχήμα 6.27

Μικρές διακυμάνσεις στις τιμές από  $-1.7$  έως  $-1.4$  Volts, το γράφημα έχει μορφή ανάλογη των γραφημάτων για  $3.1$  Hz στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις για  $Z=0$  και  $Z=2$ . Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1538$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.075$ .

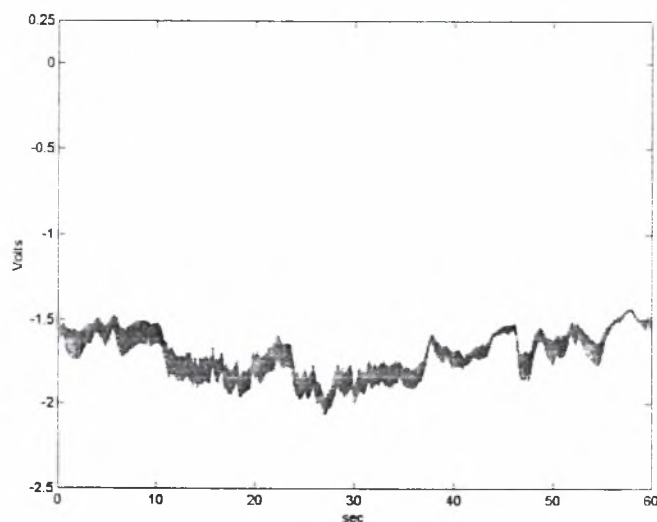
### 6.3.3.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $Z=+4$ cm



Σχήμα 6.28

Το γράφημα έχει τιμές που κυμαίνονται από τα  $-2.0$  έως τα  $-1.5$  Volts. Η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,823$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.101$ .

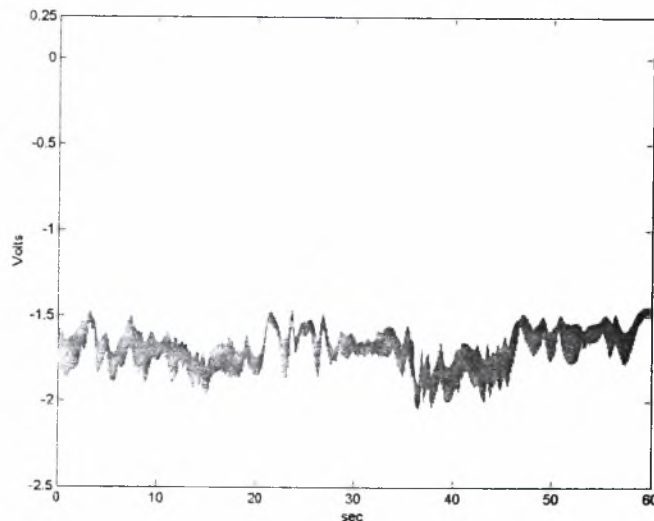
### 6.3.3.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $Z=+4$ cm



Σχήμα 6.29

Το γράφημα έχει τιμές που κυμαίνονται από τα  $-2.0$  έως τα  $-1.5$  Volts. Στην περίπτωση αυτή η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,707$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.137$ .

### 6.3.3.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $Z=+4$ cm

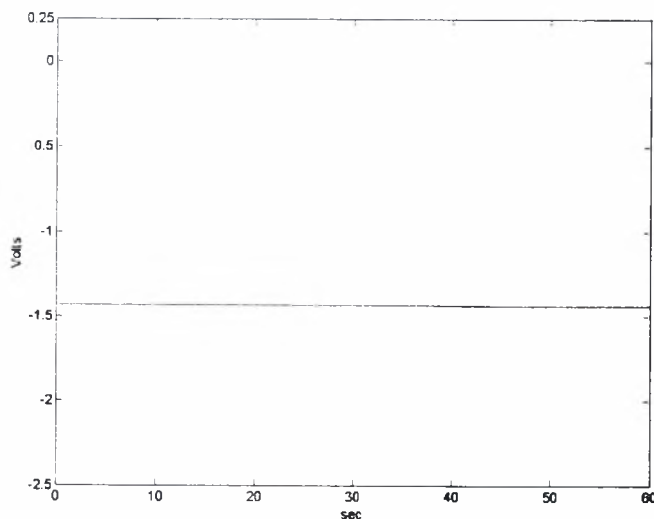


Σχήμα 6.30

Το γράφημα έχει τιμές που κυμαίνονται από τα  $-1.8$  έως τα  $-1.5$  Volts .Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,679$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.105$ .

### 6.3.4 Στη θέση $Z_3=-2$ cm έχουμε

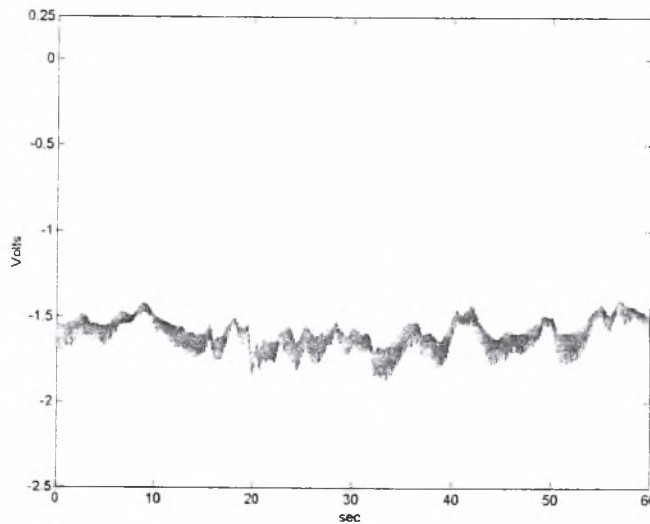
#### 6.3.4.1 Χωρίς Ταλάντωση και $Z=-2$ cm



Σχήμα 6.31

Το γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,45$  Volts και η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) που παρουσιάζει είναι  $-1,437$  καθώς και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms)  $0,000$

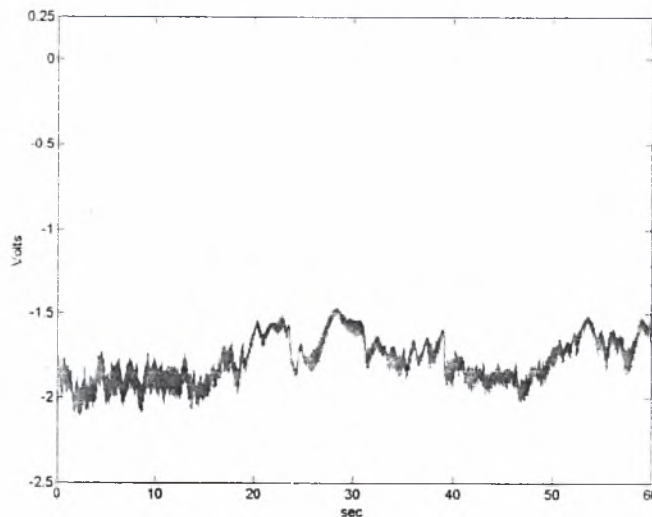
### 6.3.4.2 Με ταλάντωση 3.1Hz και $Z=-2$ cm



Σχήμα 6.32

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-1.7$  έως τα  $-1.4$  Volts Η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,598$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.084$ .

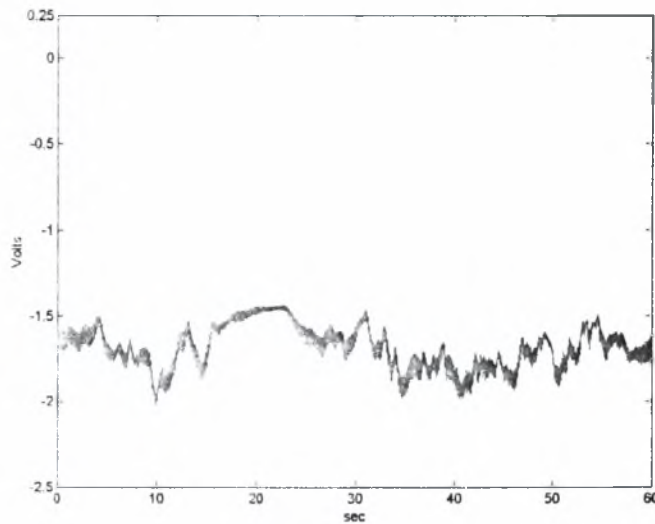
### 6.3.4.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $Z=-2$ cm



Σχήμα 6.33

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-2.1$  έως τα  $-1.4$  Volts Η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,773$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.135$ .

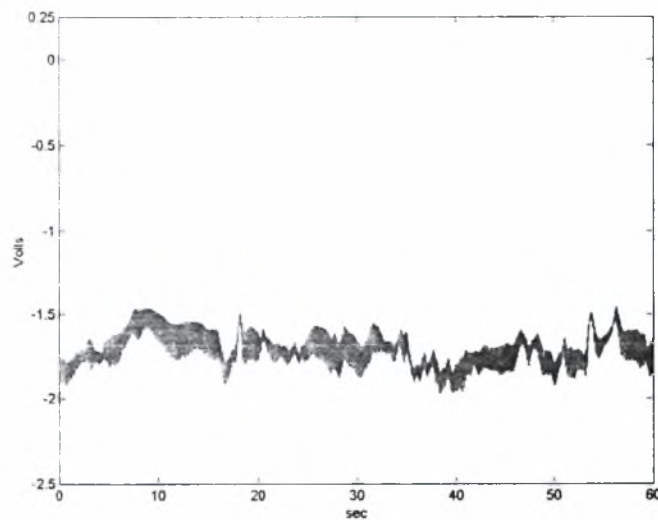
#### 6.3.4.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $Z=-2$ cm



Σχήμα 6.34

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-2.0$  έως τα  $-1.4$  Volts Η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,680$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms)  $0.124$ .

#### 6.3.4.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $Z=-2$ cm

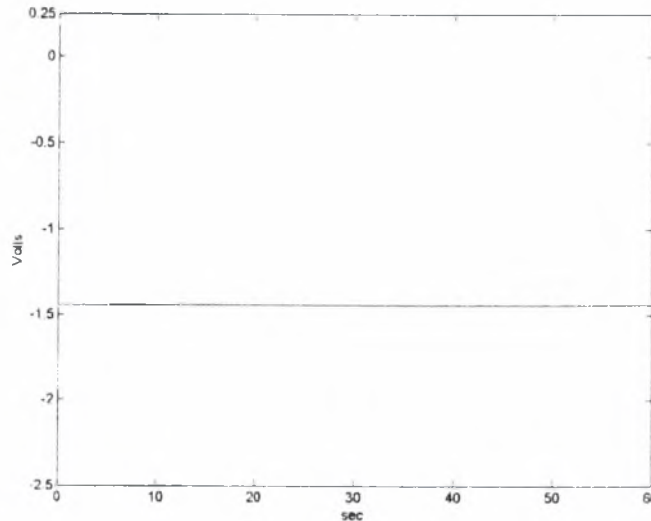


Σχήμα 6.35

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-2.0$  έως τα  $-1.5$  Volts Η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) σε αυτή την περίπτωση είναι  $-1,704$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.090$ .

## 6.3.5 Στη θέση $Z_4=-4$ cm έχουμε

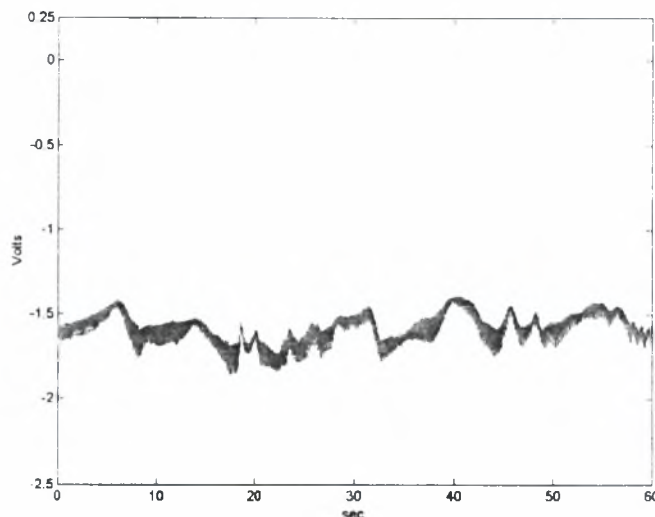
### 6.3.5.1 Χωρίς Ταλάντωση και $Z=-4$ cm



Σχήμα 6.36

Το γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,45$  Volts Στην περίπτωση αυτή η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,444$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.000$ .

### 6.3.5.2 Με ταλάντωση $3.1\text{Hz}$ και $Z=-4$ cm

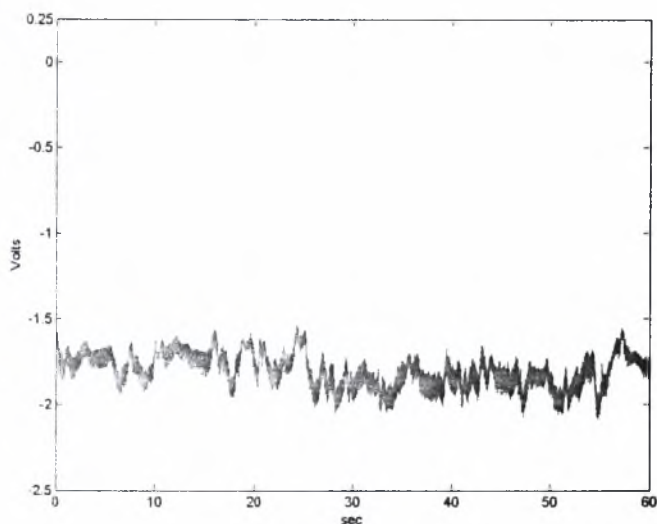


Σχήμα 6.37

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-1.8$  έως τα  $-1.4$  Volts Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,587$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.088$ .



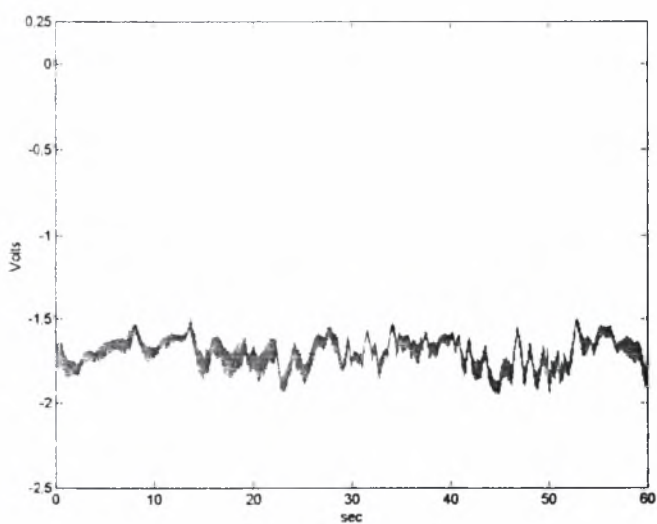
### 6.3.5.3 ε ταλάντωση 3.8Hz και Z=-4 cm



Σχήμα 6.36

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-2.0$  έως τα  $-1.5$  Volts Εδώ η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,8$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.098$ .

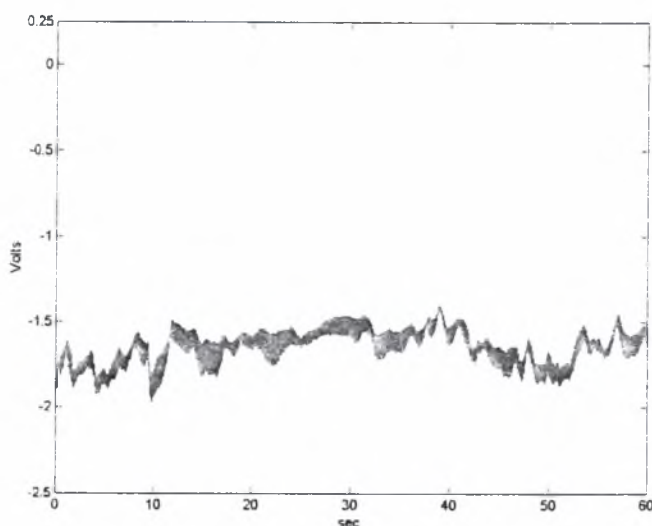
### 6.3.5.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και Z=-4 cm



Σχήμα 6.37

Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-1.9$  έως τα  $-1.5$  Volts Η μέση τιμή των Volts( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,701$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.083$ .

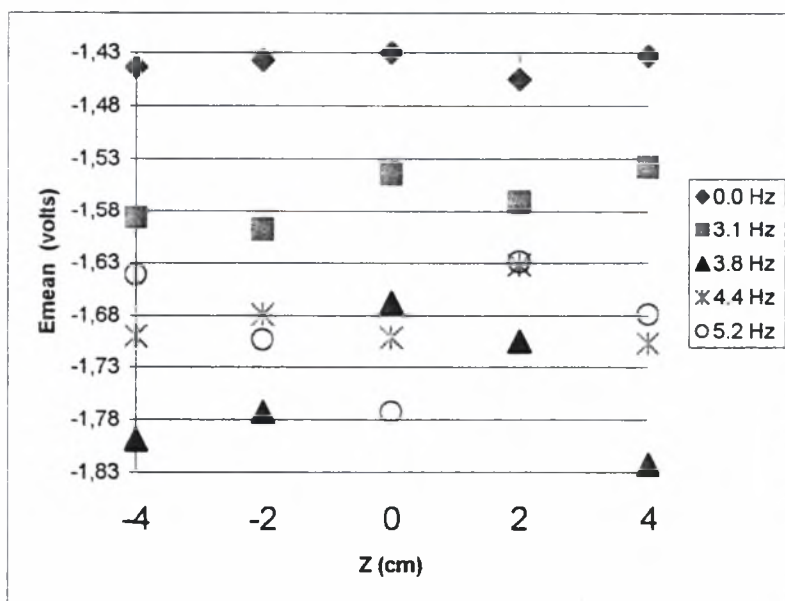
### 6.3.5.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και Z=-4 cm



Σχήμα 6.38

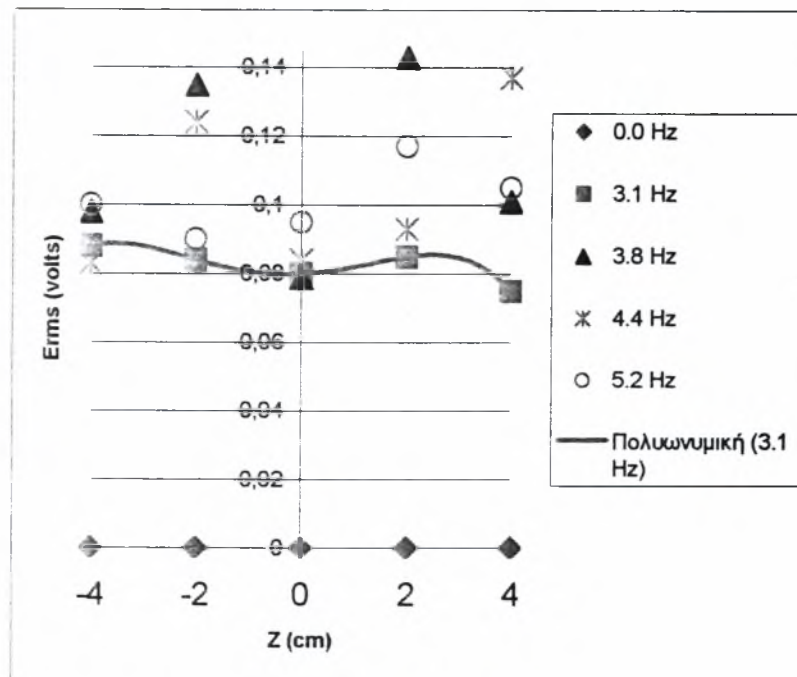
Οι τιμές που έχει το γράφημα κυμαίνονται από τα  $-1.9$  έως τα  $-1.4$  Volts Εδώ η μέση τιμή των Volts ( $v_{\text{mean}}$ ) είναι  $-1,642$  και η τετραγωνική τυπική απόκλιση (rms) είναι  $0.100$ .

Το γράφημα της μεταβολής της μέσης τιμής των Volts συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από το κέντρο Z(cm) είναι το εξής:



Σχήμα 6.39

Το γράφημα της μεταβολής της τυπικής απόκλισης των Volts συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από το κέντρο  $Z(\text{cm})$  είναι το εξής:



Σχήμα 6.40

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι χωρίς ταλάντωση η τυπική απόκλιση των Volts είναι 0.

Οι Mann, J., Ott, S. και Andersen, J. S., (1999) κατά την πειραματική μελέτη τυρβώδους διάχυσης υπολόγισαν την τυπική απόκλιση της ταχύτητας σε συνάρτηση με την απόσταση  $Z$  στην διεύθυνση ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις τους παρουσιάζονται παρακάτω:

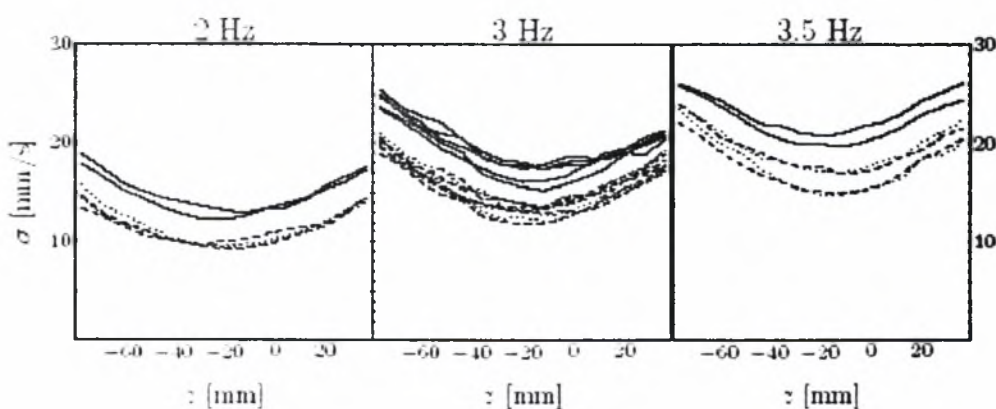
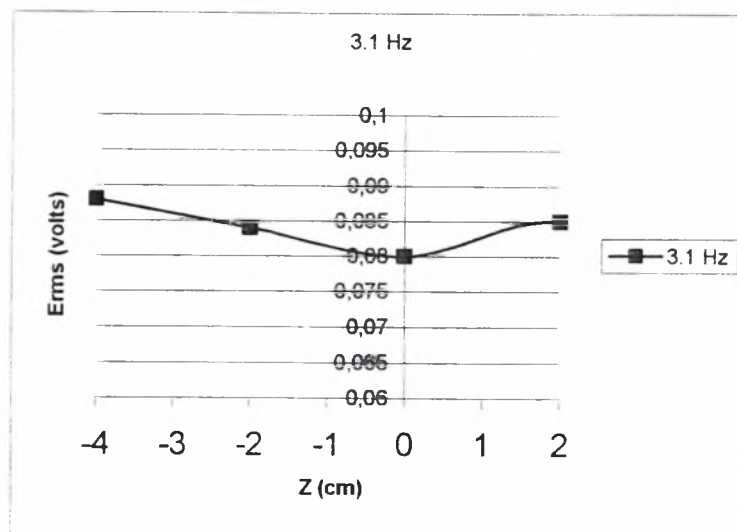


Figure 31. Standard deviation of the three velocity components  $u$  (dotted),  $v$  (dashed) and  $w$  (solid curve) as functions of the vertical coordinate  $z$ . Results for several experiments are shown together.

Σχήμα 6.41

Δεν μπορούμε να συγκρίνουμε τα γραφήματα της ταχύτητας σε συνάρτηση με την απόσταση Z στα πειράματα των Mann, Ott και Andersen με τα γραφήματα των Volts-Z στην δικιά μας εργασία και αυτό γιατί η σχέση που συνδέει τα Volts του Hot-film με την ταχύτητα δεν είναι γραμμική. Για το λόγο αυτό συγκρίνουμε την τυπική απόκλιση της ταχύτητα με την τυπική απόκλιση των Volts. Μελετώντας λοιπόν το γράφημα που πρόκυψε για την τυπική απόκλιση των Volts στα δικιά μας πειράματα παρατηρούμε μια ομοιότητα στην μορφή των γραφημάτων με αυτά των Mann, Ott και Andersen.

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζουμε πάλι την τυπική απόκλιση των Volts σε συνάρτηση με την κατακόρυφη απόσταση Z, για 3.1 Hz ταλάντωσης, όπου ο άξονας των X είναι από 20 mm έως -40 mm για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση με τα αποτελέσματα των Mann, Ott και Andersen.

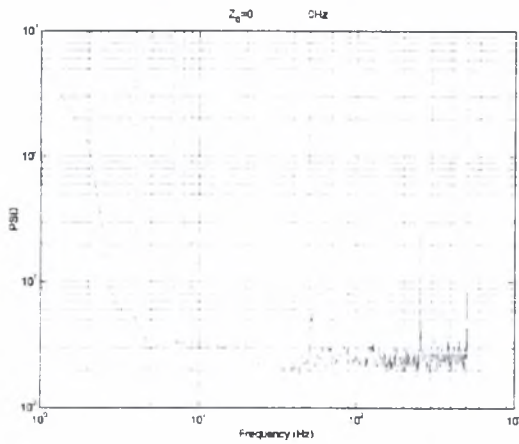


Σχήμα 6.42

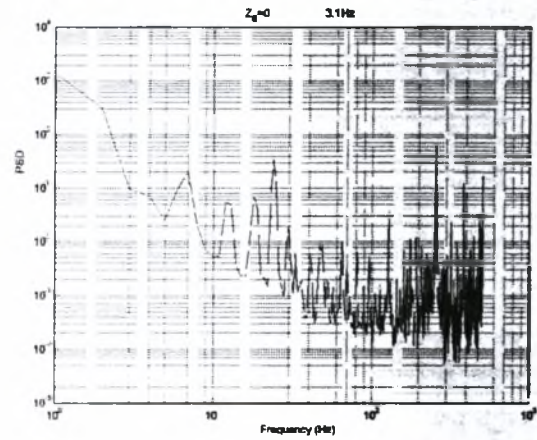
Τα διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD-Hz) που προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων στη διεύθυνση ταλάντωσης Z παρουσιάζονται παρακάτω:

### 6.3.6 Στη θέση $Z_0=0$ cm έχουμε

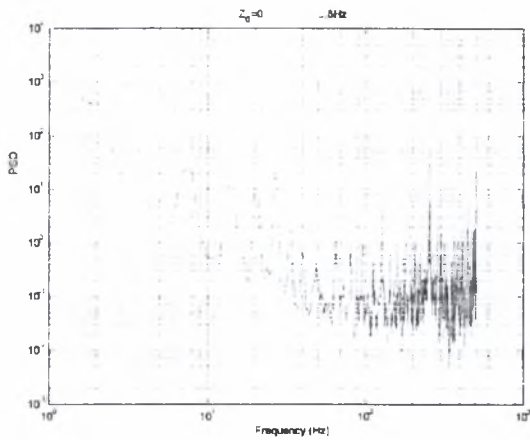
Χωρίς Ταλάντωση και  $Z=0$



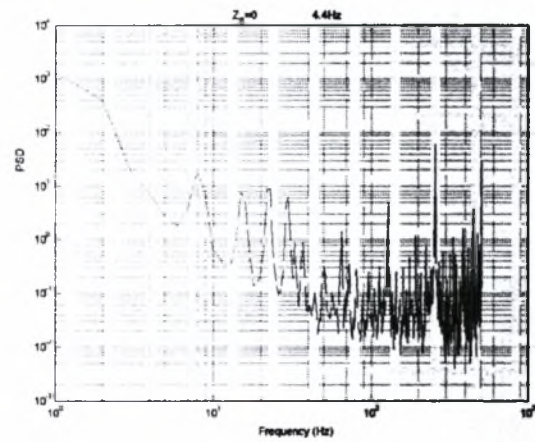
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $Z=0$



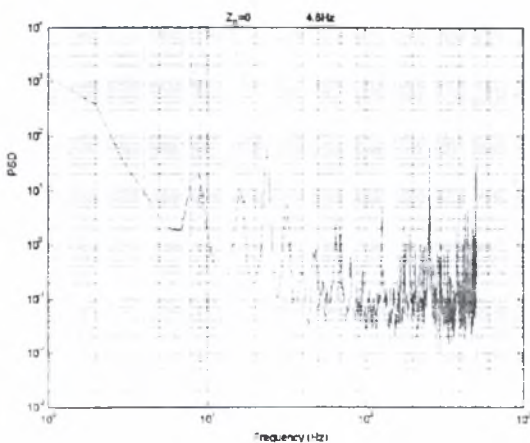
Με ταλάντωση 3.8Hz και  $Z=0$



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $Z=0$



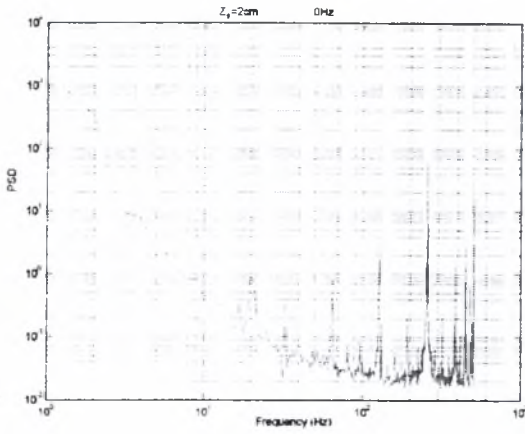
Με ταλάντωση 5.2Hz και  $Z=0$



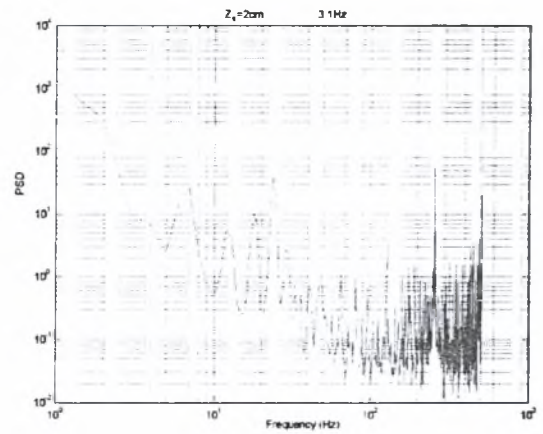


### 6.3.7 Στη θέση $Z_1=+2$ cm έχουμε

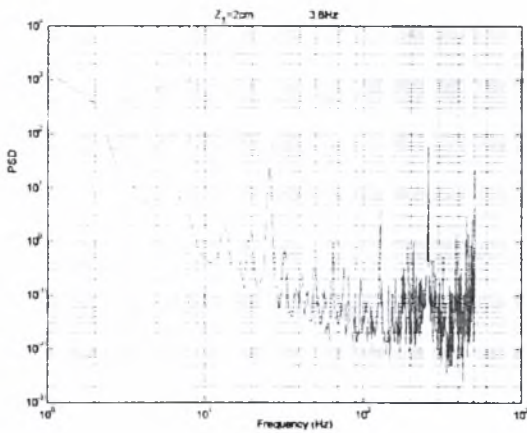
Χωρίς Ταλάντωση και  $Z=+2$  cm



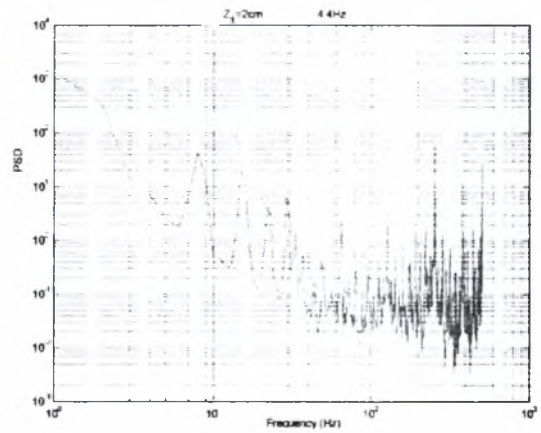
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $Z=+2$  cm



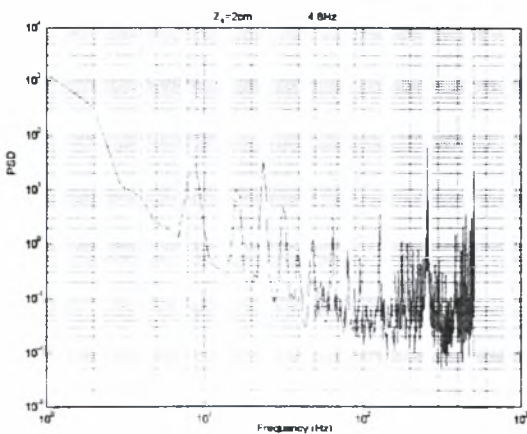
Με ταλάντωση 3.8Hz και  $Z=+2$  cm



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $Z=+2$  cm



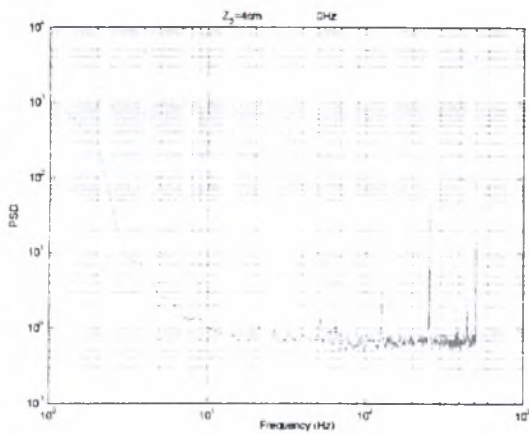
Με ταλάντωση 5.2Hz και  $Z=+2$  cm



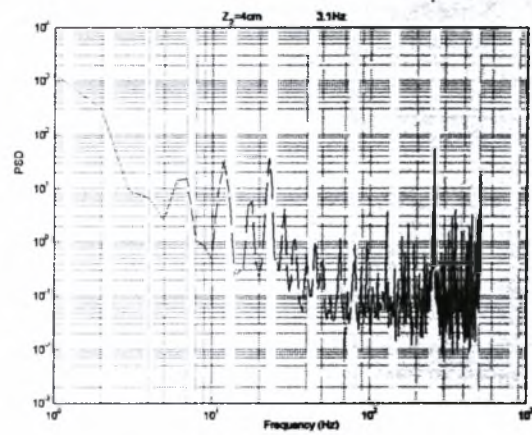


### 6.3.8. Στη θέση $Z_2=+4$ cm έχουμε

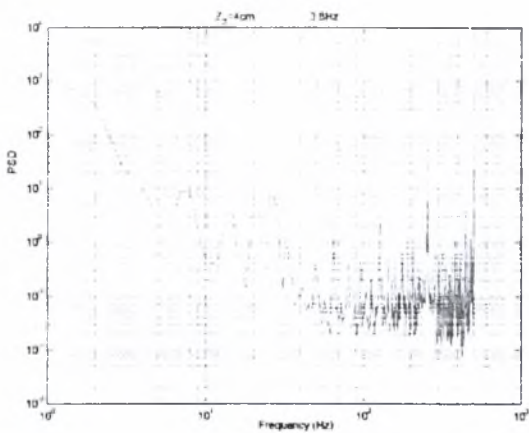
Χωρίς Ταλάντωση και  $Z=+4$  cm



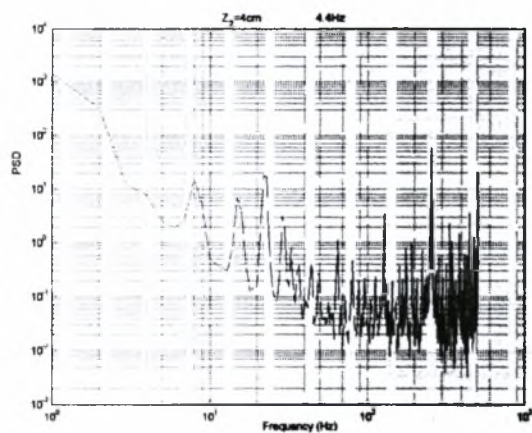
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $Z=+4$  cm



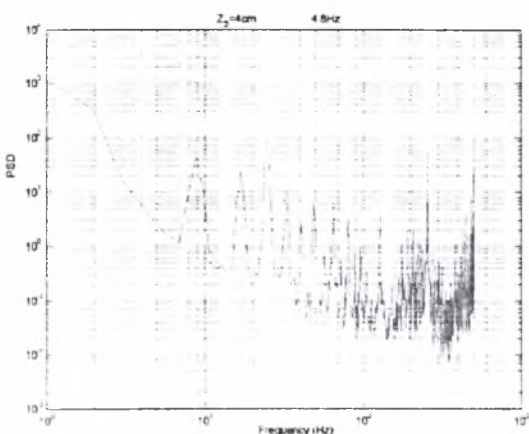
Με ταλάντωση 3.8Hz και  $Z=+4$  cm



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $Z=+4$  cm

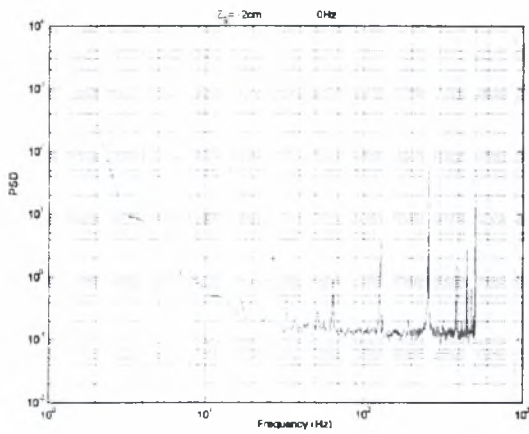


Με ταλάντωση 5.2Hz και  $Z=+4$  cm

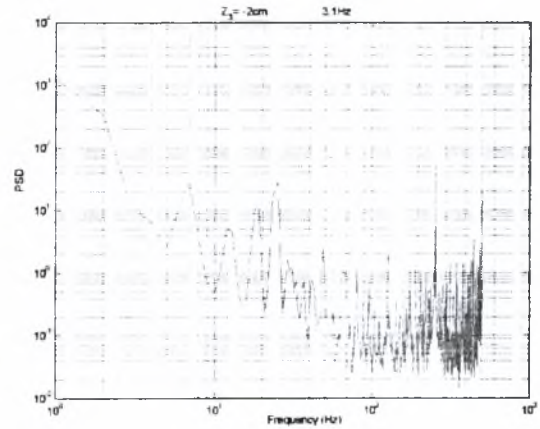


### 6.3.9 Στη θέση $Z_3=-2$ cm έχουμε

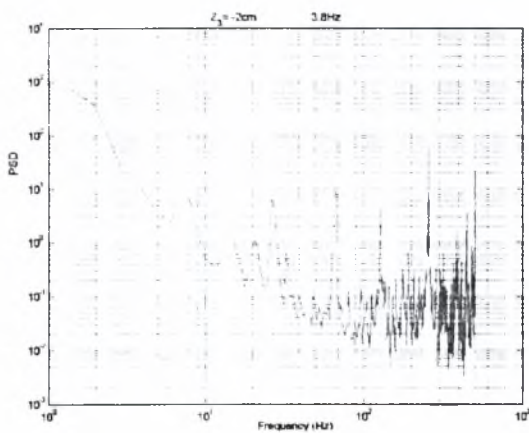
Χωρίς Ταλάντωση και  $Z=-2$  cm



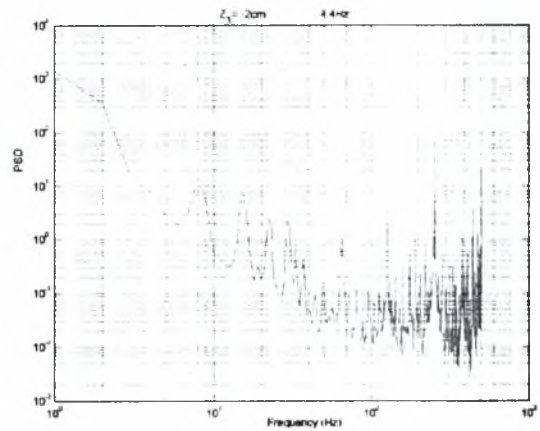
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $Z=-2$  cm



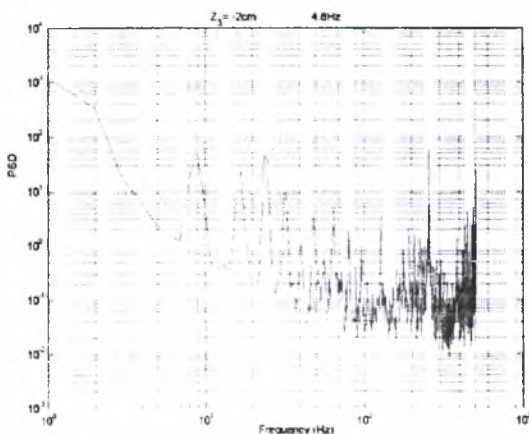
Με ταλάντωση 3.8Hz και  $Z=-2$  cm



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $Z=-2$  cm

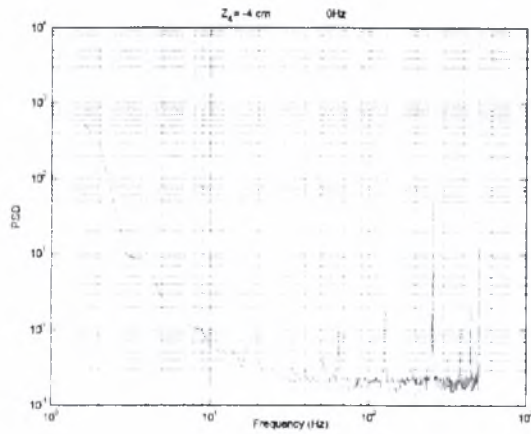


Με ταλάντωση 5.2Hz και  $Z=-2$  cm

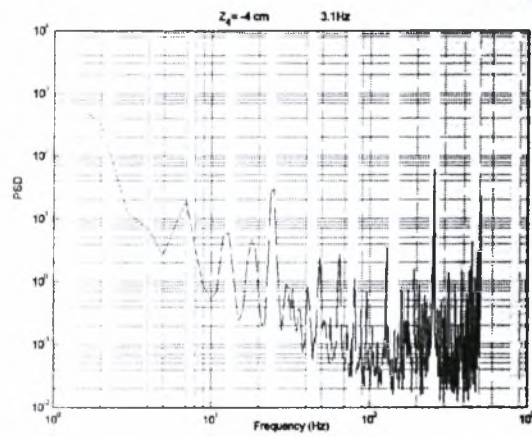


### 6.3.10 Στη θέση $Z_4=-4$ cm έχουμε

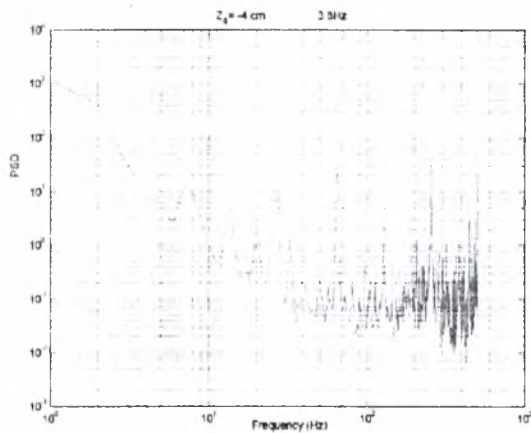
Χωρίς Ταλάντωση και  $Z=-4$  cm



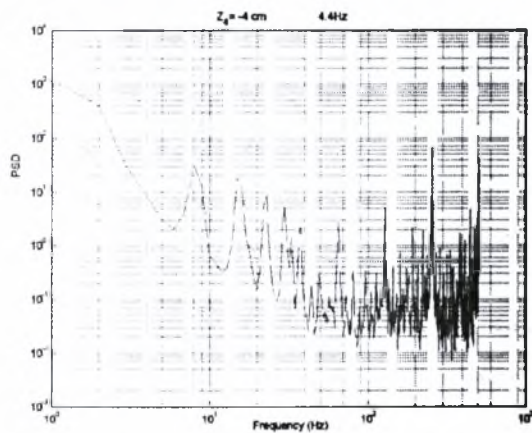
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $Z=-4$  cm



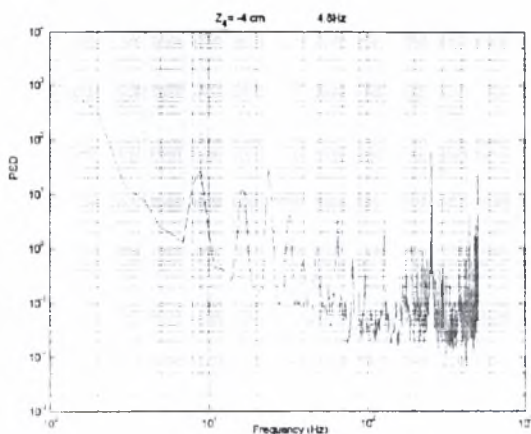
Με ταλάντωση 3.8Hz και  $Z=-4$  cm



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $Z=-4$  cm

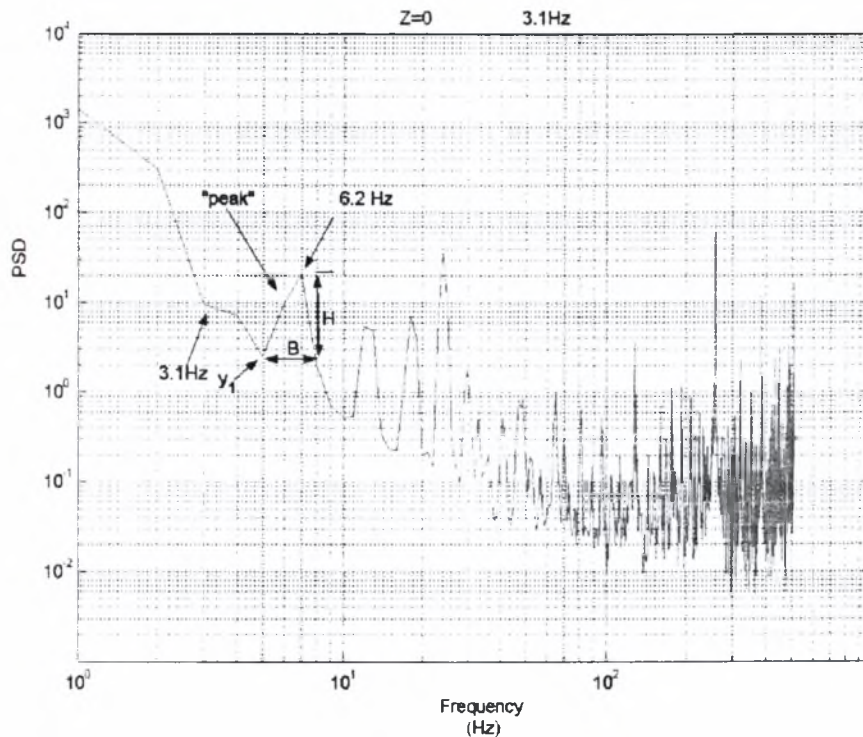


Με ταλάντωση 5.2Hz και  $Z=-4$  cm





## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Σχήμα 6.43

Μελετώντας τα διαγράμματα που προέκυψαν πιο πάνω παρατηρούμε ότι για συχνότητα ταλάντωσης 3.1 Hz, το πλάτος B του πρώτου 'peak' στο οποίο και θα αναφερόμαστε από δω και κάτω, είναι σταθερό για όλα τις κατακόρυφες θέσεις Z που μελετήσαμε με τιμή περίπου από  $10^{0,7} - 10^{0,9}$ . Επιπλέον, όλα τα Z έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης  $y_1$  που σύμφωνα με τα διαγράμματα είναι περίπου  $PSD=10^{0,45}$ . Το ύψος H του 'peak' για  $Z=+2\text{ cm}$  και  $Z=-2\text{ cm}$  ταυτίζεται, ενώ στη θέση  $Z=0\text{ cm}$ , δηλαδή στο κέντρο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή.

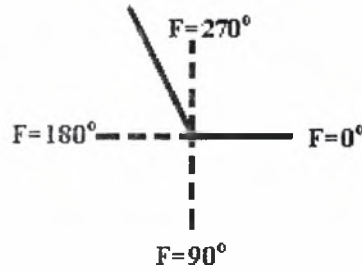
Για συχνότητα ταλάντωσης 3,8 Hz και πάλι το πλάτος B παραμένει σταθερό με τιμή όμως από  $10^{0,77} - 10^{0,95}$ , ενώ το ύψος του 'peak' ταυτίζεται όπως και πριν για  $Z=+2\text{ cm}$  και  $Z=-2\text{ cm}$ . Όλα τα Z έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης  $y_1$  που σύμφωνα με τα διαγράμματα είναι περίπου  $PSD=10^{0,37}$  και τέλος σε αντίθεση με την προηγούμενη συχνότητα το μέγιστο ύψος εδώ το συναντάμε στη θέση  $Z=+4\text{ cm}$ .

Στη συχνότητα των 4,4 Hz παρατηρούμε ότι τόσο το πλάτος όσο και το σημείο εκκίνησης  $y_1$  παραμένουν σταθερά για όλες ανεξαρτήτως τις θέσεις με τιμές  $10^{0,77} - 10^{0,975}\text{ cm}$  και  $10^{0,27}\text{ cm}$  αντίστοιχα. Για  $Z=0, -2$  και  $+4\text{ cm}$  το ύψος του 'peak' εμφανίζει την ίδια τιμή που ισούται με  $PSD=10^{1,18}$ .

Τέλος, για 5,2 Hz το πλάτος και πάλι είναι σταθερό με τιμή  $10^{0,845} - 10^{1,015}$ , ενώ για το ύψος παρατηρούμε ότι για  $Z=-2, +4\text{ cm}$  και  $Z=-4, +2\text{ cm}$  αντίστοιχα οι τιμές είναι ίδιες.

## 6.4 Μελέτη στην Ακτινική διεύθυνση R

Στην θέση  $Z=0$  περιστρέφουμε το Hot film ανά  $90^\circ$  ( σταθερό  $Z$ )  $F=0^\circ$ ,  $F=90^\circ$ ,  $F=180^\circ$  και  $F=270^\circ$  για να δούμε πως συμπεριφέρεται το σήμα. για ταλάντωση με  $0\text{ Hz}$ ,  $3.1\text{Hz}$ ,  $3.8\text{Hz}$ ,  $4.4\text{Hz}$  και  $5.2\text{Hz}$  στον μηχανισμό ταλάντωσης.

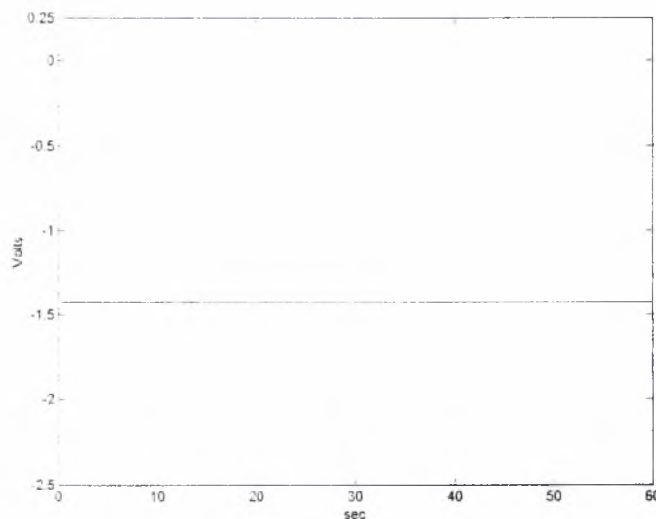


Σχήμα 6.44

Τα αποτελέσματα που πήραμε δίνονται παρακάτω σε γραφήματα Volts-χρόνου.

### 6.4.1 Στη θέση $F=0^\circ$ cm έχουμε

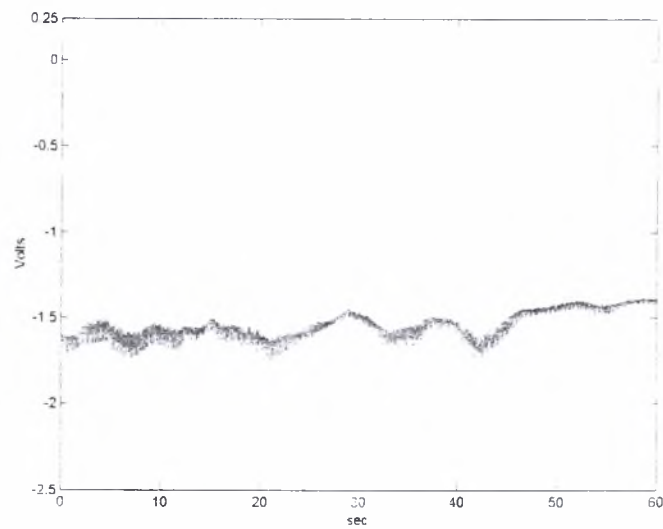
#### 6.4.1.1 Χωρίς Ταλάντωση και $F=0^\circ$



Σχήμα 6.45

Το γράφημα είναι όπως αναμενόταν σταθερό στα  $-1,4\text{ Volts}$

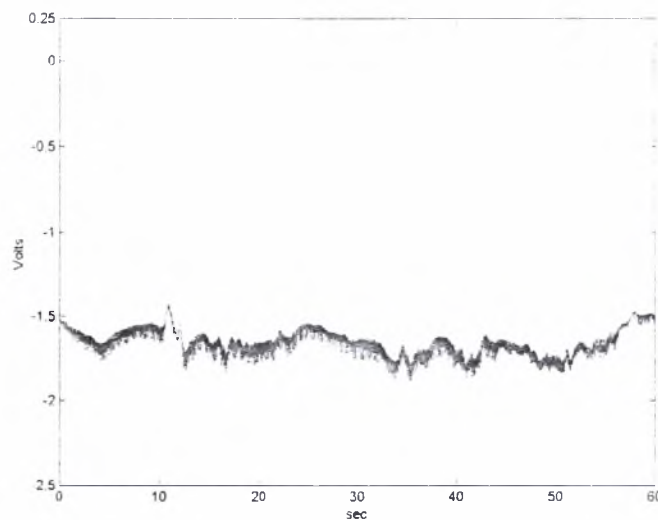
#### 6.4.1.2 Με ταλάντωση 3.1Hz και $F=0^0$



Σχήμα 6.46

Παρατηρούμε ότι οι πρώτες επιρροές από το πλέγμα είναι από το  $-1.7$  έως τα  $-1.4$  Volts. Τα πρώτα 20 sec το πάχος της γραμμής είναι μεγαλύτερο γιατί έχουμε περισσότερες μεταβολές στην μονάδα του χρόνου.

#### 6.4.1.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $F=0^0$

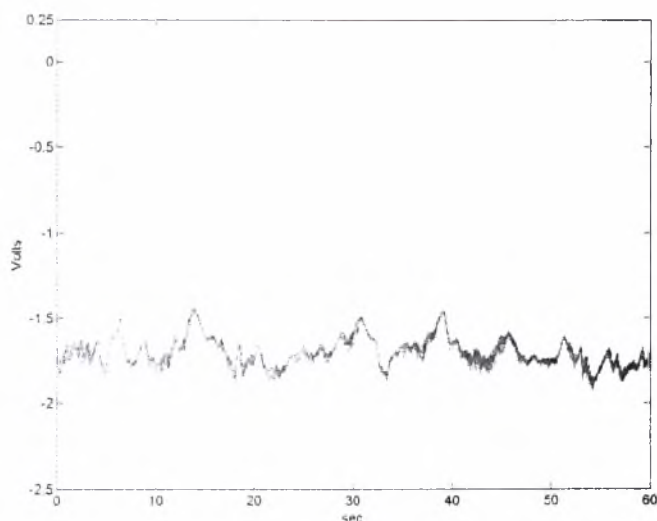


Σχήμα 6.47

Οι τιμές κυμαίνονται γύρω από το  $-1.6 \pm 0.1$  Volt .



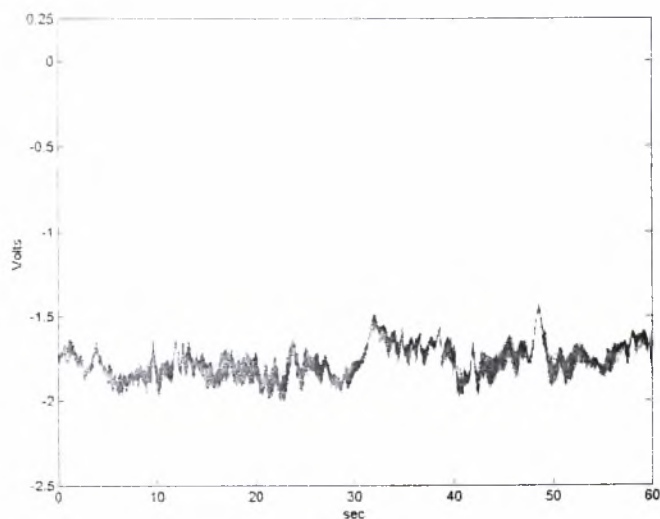
#### 6.4.1.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $F=0^\circ$



Σχήμα 6.48

Την χρονική στιγμή  $t=0$  sec παρατηρούμε ότι το γράφημα ξεκινάει από την τιμή  $-1.6$  Volts και έχει μια διακύμανση από  $-1.8$  έως  $-1.4$  Volts. Το πάχος της γραμμής είναι μικρότερο από τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις κάτι που δηλώνει ότι οι μεταβολές συμβαίνουν σε μεγαλύτερη χρονική διάρκεια από ότι πριν.

#### 6.4.1.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $F=0^\circ$

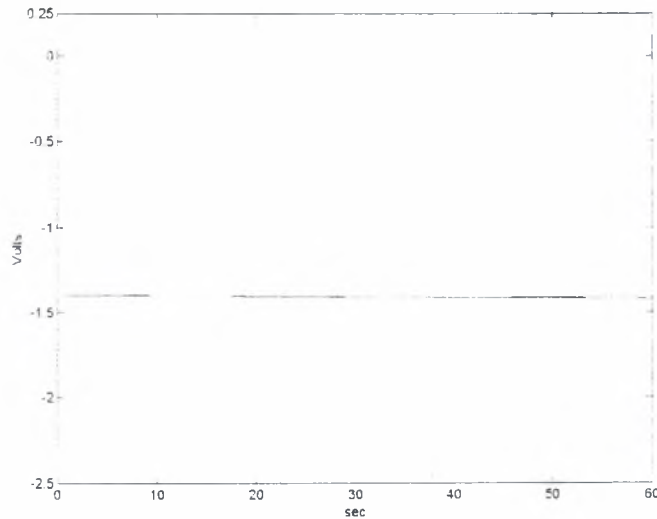


Σχήμα 6.49

Την χρονική στιγμή  $t=0$  η τιμή είναι  $1,7$  volts. Οι διακυμάνσεις σε αυτή την περίπτωση είναι από  $-1.9$  μέχρι  $-1.4$  Volts. Το πάχος της γραμμής και οι πολλές καμπύλες μας δείχνουν ότι η επιρροή των  $5.2$  Hz επηρεάζουν πιο έντονα την περιοχή μελέτης.

## 6.4.2 Στη θέση $F=90^\circ$ έχουμε

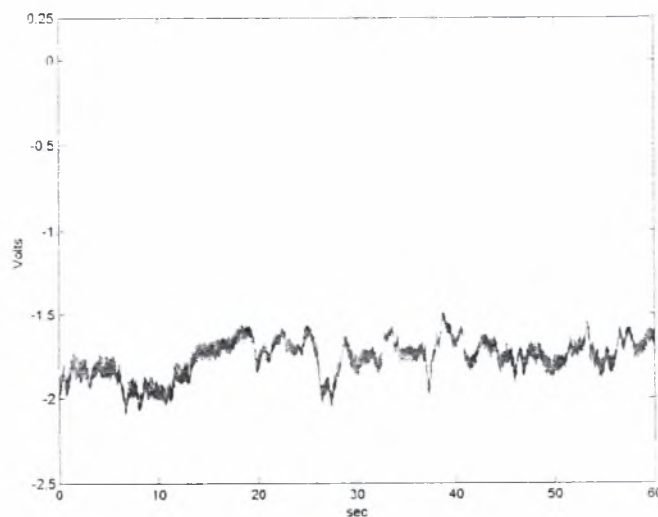
### 6.4.2.1 Χωρίς Ταλάντωση και $F=90^\circ$



Σχήμα 6.50

Όπως και το προηγούμενο γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,4$  Volts

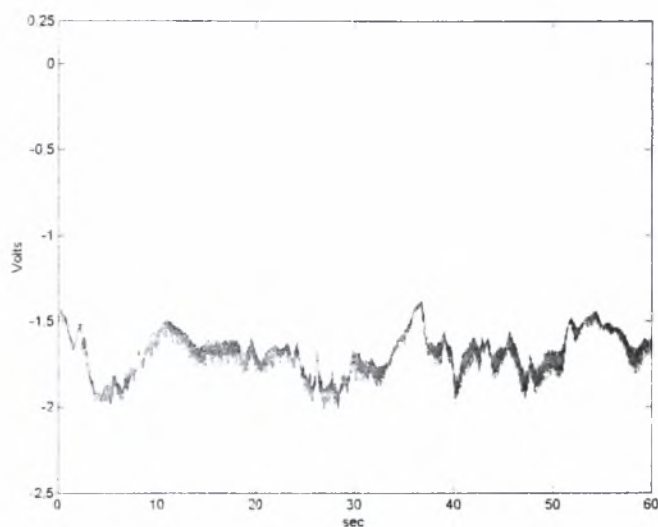
### 6.4.2.2 Με ταλάντωση 3.1Hz και $F=90^\circ$



Σχήμα 6.51

Στην περίπτωση αυτή οι διακυμάνσεις είναι από  $-2.0$  μέχρι  $-1.5$ . Το γράφημα παρουσιάζει μεγαλύτερη ανομοιομορφία σε σχέση με την περίπτωση  $F=0$  και 3.1Hz

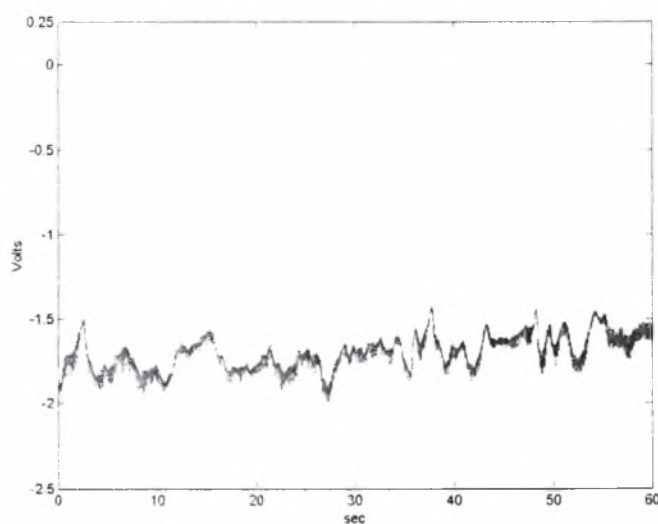
### 6.4.2.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $F=90^\circ$



Σχήμα 6.52

Οι τιμές κυμαίνονται από το  $-1.4$  έως το  $-2.0$  Volts. Το γράφημα παρουσιάζει μεγαλύτερη ανομοιομορφία σε σχέση με την περίπτωση  $F=0$  και  $3.8$  Hz

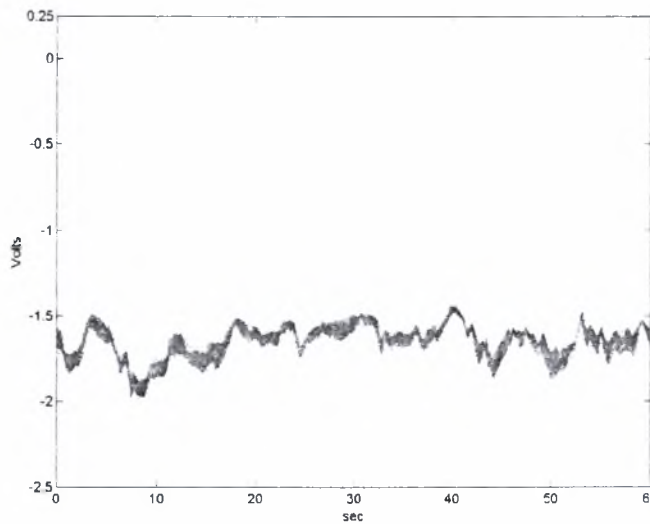
### 6.4.2.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $F=90^\circ$



Σχήμα 6.53

Η διακύμανση των τιμών είναι από  $-1.9$  έως  $-1.5$  Volts. Το γράφημα έχει πιο ομαλή μορφή σε σχέση με την περίπτωση  $4.4$ Hz και  $F=0^\circ$ .

### 6.4.2.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $F=90^\circ$

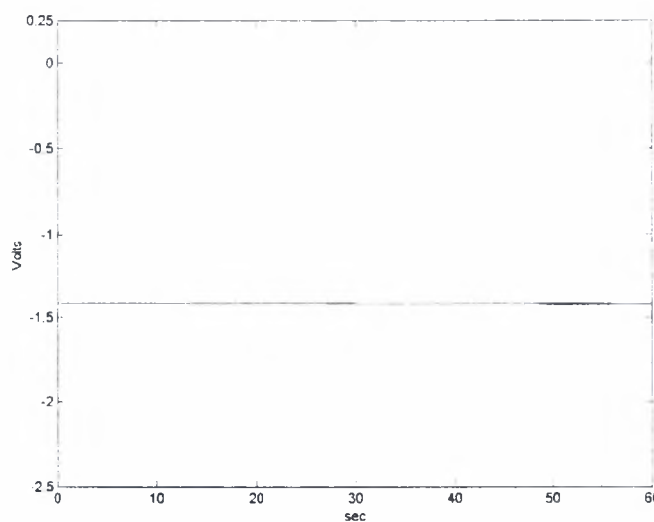


Σχήμα 6.54

Η διακύμανση των τιμών είναι από  $-1.9$  έως  $-1.5$  Volts . Σε σχέση με το  $F=0$  και  $5.2$  Hz έχει λιγότερες καμπύλες.

### 6.4.3 Στη θέση $F=180^\circ$ έχουμε

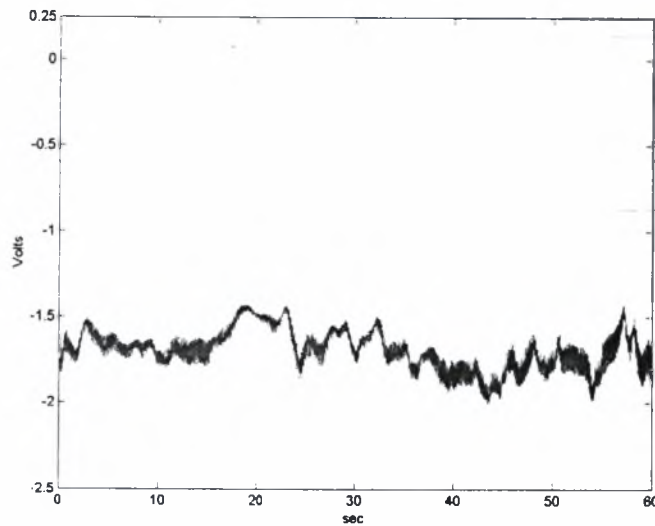
#### 6.4.3.1 Χωρίς Ταλάντωση και $F=180^\circ$



Σχήμα 6.55

Όπως και πριν το γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,4$  Volts

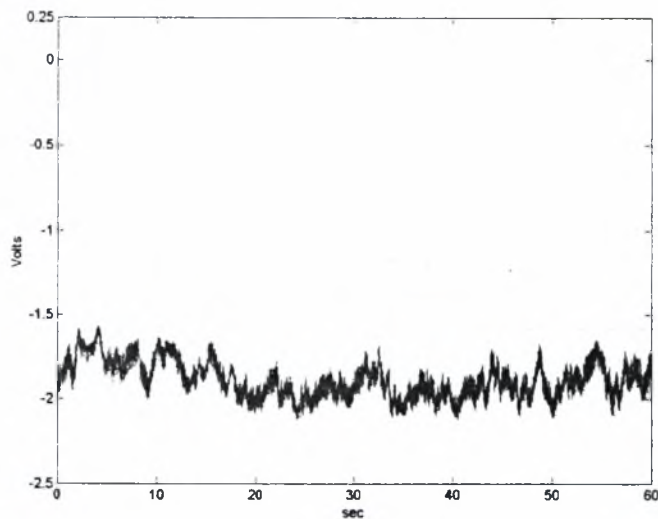
### 6.4.3.2 Με ταλάντωση 3.1Hz και $F=180^\circ$



Σχήμα 6.56

Η διακύμανση των τιμών είναι από  $-1.9$  έως  $-1.4$  Volts . Η εκκίνηση του γραφήματος στο  $-1.7$  Volts .

### 6.4.3.3 Με ταλάντωση 3.8Hz και $F=180^\circ$

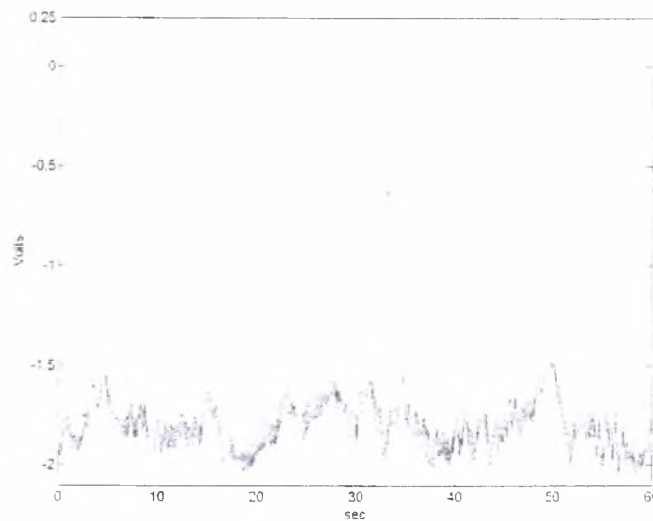


Σχήμα 6.57

Το πάχος της γραμμής είναι μεγάλο κάτι που δείχνει ότι έχουμε πολλές διακυμάνσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι τιμές που περνούμε είναι γύρω από το  $-1.8$  Volts με  $\pm 2$  Volts.



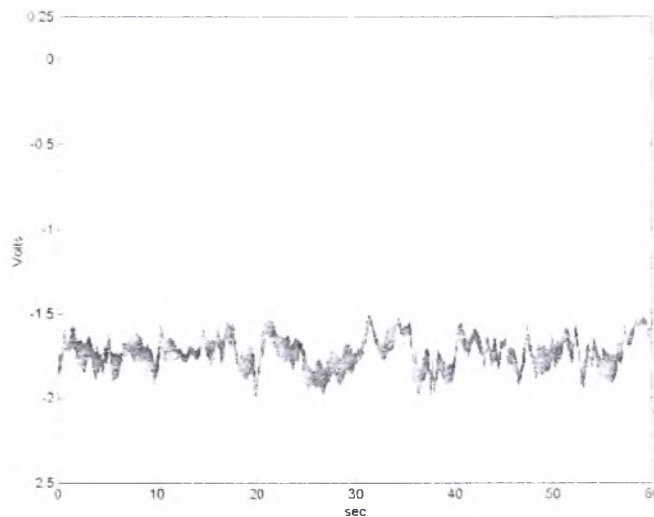
#### 6.4.3.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $F=180^\circ$



Σχήμα 6.58

Έντονες διακυμάνσεις από  $-2.1$  έως  $-1.6$  Volts .

#### 6.4.3.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και $F=180^\circ$

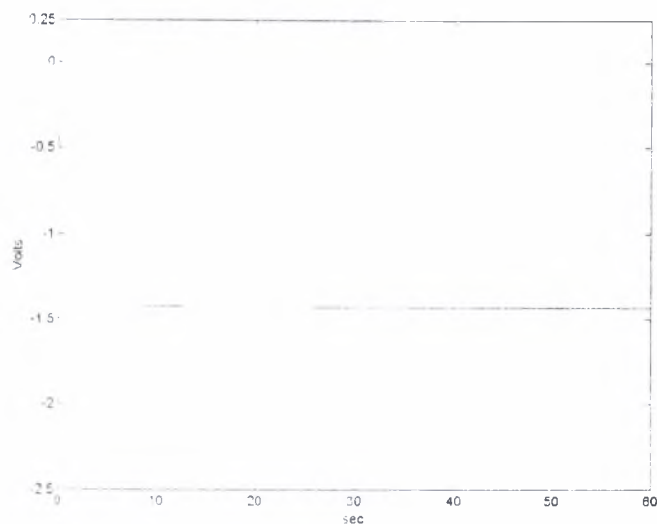


Σχήμα 6.59

Στην περίπτωση αυτή έχουμε πολλές κορυφές και μεγάλο πάχος στο γράφημα κάτι που δείχνει ότι πολλές εναλλαγές σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι τιμές κυμαίνονται από  $-1.8$  μέχρι  $-1.6$  Volts .

## 6.4.4 Στη θέση $F=270^{\circ}$ έχουμε

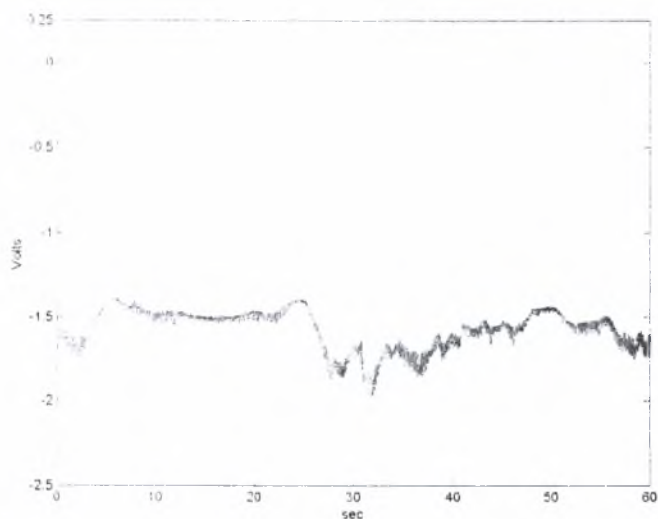
### 6.4.4.1 Χωρίς Ταλάντωση και $F=270^{\circ}$



Σχήμα 6.60

Το γράφημα είναι σταθερό στα  $-1,4$  Volts

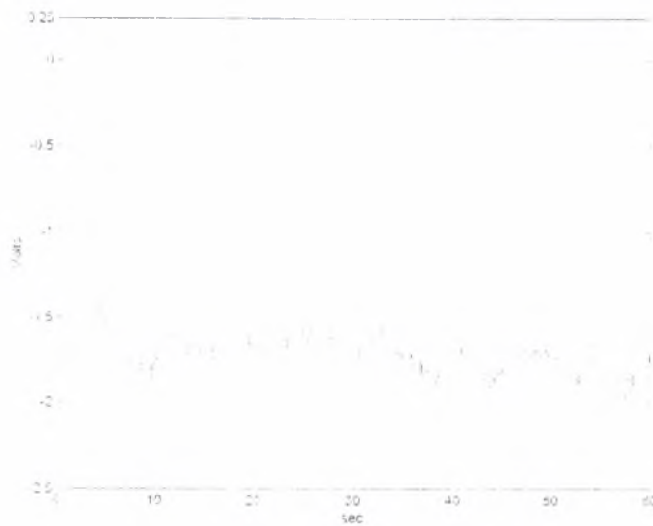
### 6.4.4.2 Με ταλάντωση $3,1\text{Hz}$ και $F=270^{\circ}$



Σχήμα 6.61

Από τη χρονική στιγμή 10 sec μέχρι 20 sec έχουμε μια 'σχετική' σταθερότητα. Οι τιμές σε όλο το γράφημα είναι κυμαίνονται από  $-2.0$  έως  $-1.4$ .

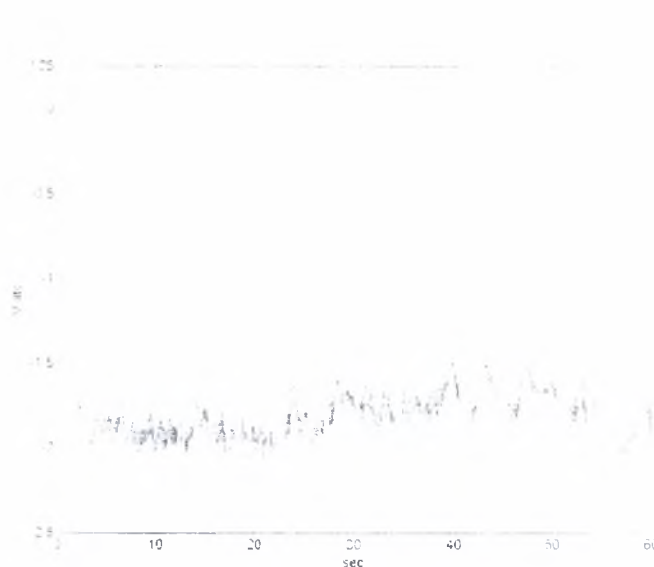
#### 6.4.4.3 Με ταλάντωση 3,8Hz και $F=270^\circ$



Σχήμα 6.62

Στο γράφημα αυτό έχουμε έντονες διακυμάνσεις από  $-1.8$  μέχρι τα  $-1.6$  Volts.

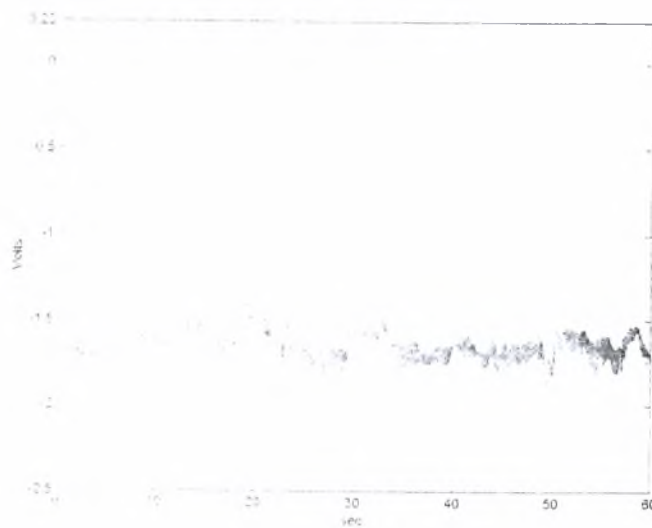
#### 6.4.4.4 Με ταλάντωση 4.4Hz και $F=270^\circ$



Σχήμα 6.63

Οι τιμές κυμαίνονται από  $-2.1$  έως  $-1.5$  Volts. Η εναλλαγή των τιμών γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα

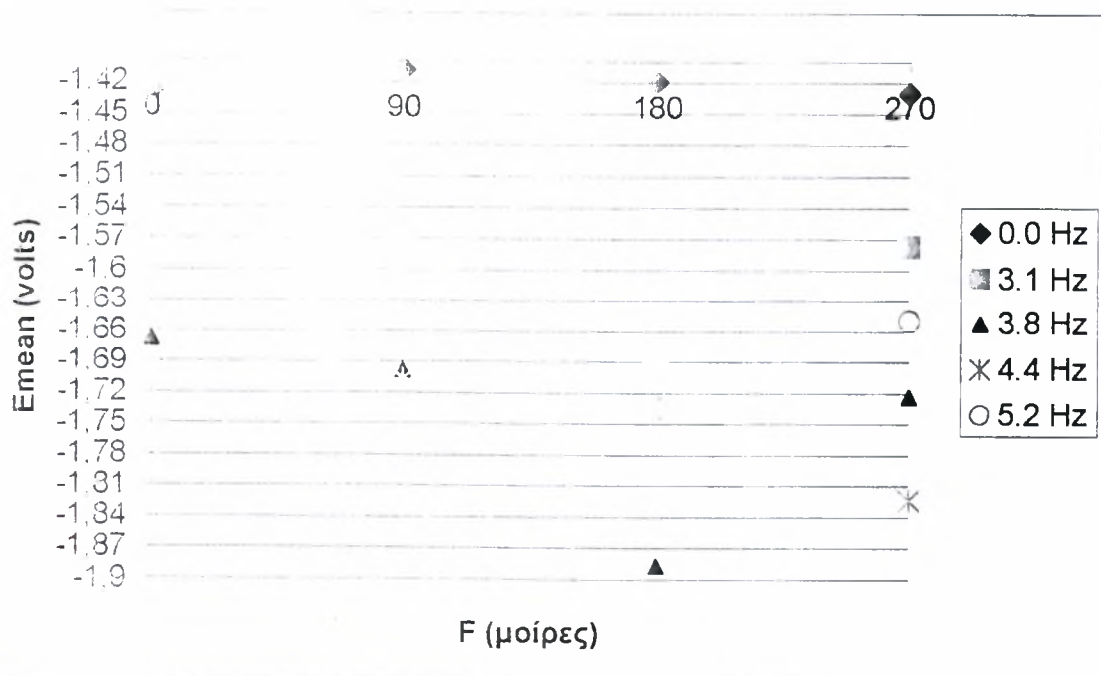
6.4.4.5 Με ταλάντωση 5.2Hz και  $F=270^\circ$



Σχήμα 6.64

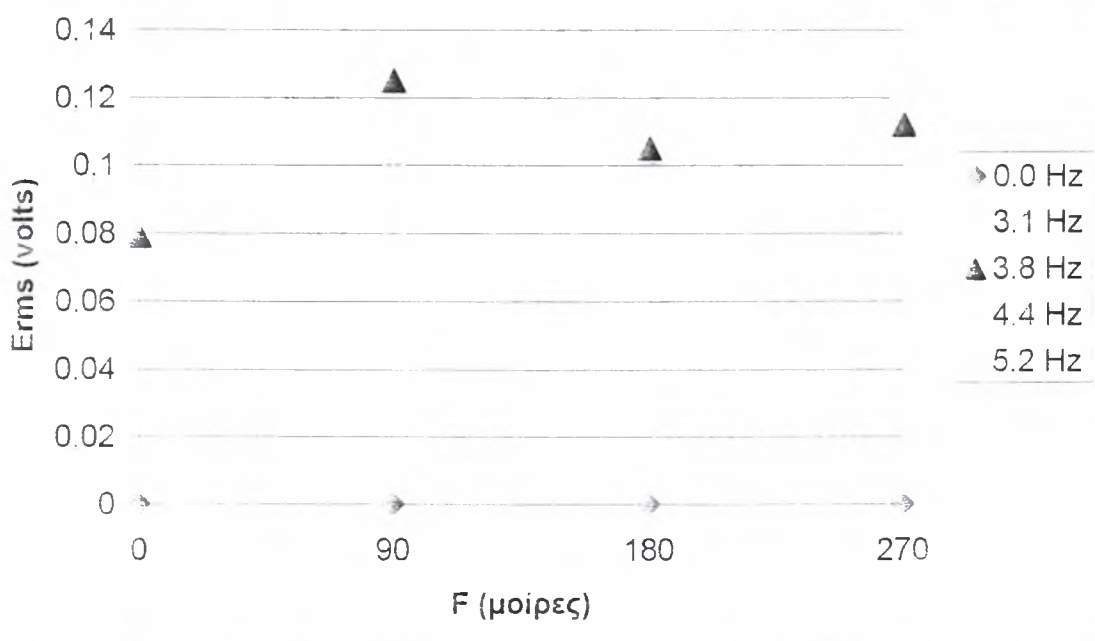
Οι μετρήσεις σε αυτό το γραφήμα είναι από  $-1.5$  volts έως  $-1.9$  volts.

Το γράφημα της μεταβολής της μέσης τιμής των Volts συναρτήσει της γωνίας  $F$  είναι το εξής:



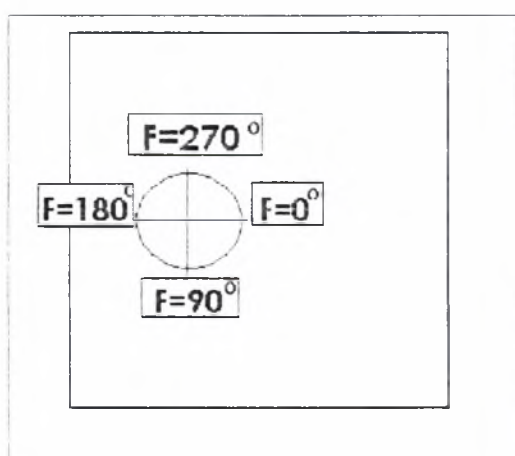
Σχήμα 6.65

Το γράφημα της μεταβολής της τυπικής απόκλισης των Volts συναρτήσει της γωνίας  $F$  είναι το εξής:



Σχήμα 6.66

Η τυπική απόκλιση για τις θέσεις  $F=90^\circ$  και  $F=270^\circ$  παρατηρούμε ότι έχουν την ίδια μεταβολή ως προς τη γωνία μελέτης  $F=180^\circ$ . Οι θέσεις  $F=0^\circ$  και  $F=180^\circ$  δεν δίνουν ομοιόμορφες μεταβολές αυτό μπορεί οφείλεται στο ότι δεν είναι σε συμμετρική θέση στο χώρο των πειραματικών μετρήσεων. Όπως φαίνεται στην κάτωτη του παρακάτω σχήματος.

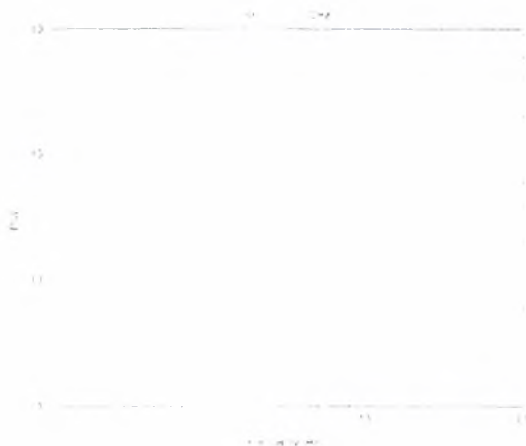


Σχήμα 6.67

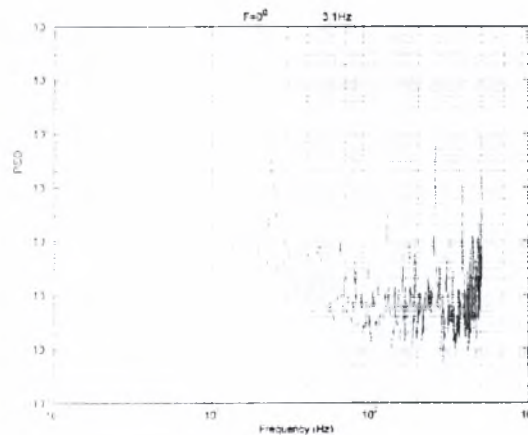
Τα διαγράμματα πυκνότητας φάσματος ισχύος (PSD-Hz) που προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων στη ακτινική διεύθυνση  $R$  παρουσιάζονται παρακάτω:

### 6.4.5 Στη θέση $F=0^0$ cm έχουμε

Χωρίς Ταλάντωση και  $F=0^0$



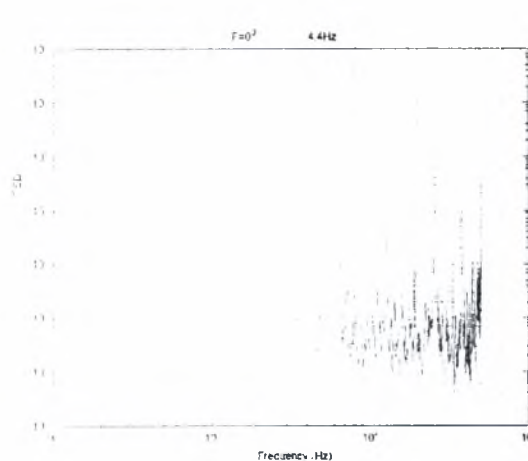
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $F=0^0$



Με ταλάντωση 3.8Hz και  $F=0^0$



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $F=0^0$



Με ταλάντωση 5.2Hz και  $F=0^0$





### 6.4.6 Στη θέση $F=90^{\circ}$ έχουμε

Χωρίς Ταλάντωση και  $F=90^{\circ}$



Με ταλάντωση 3.1Hz και  $F=90^{\circ}$



Με ταλάντωση 3.8Hz και  $F=90^{\circ}$



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $F=90^{\circ}$



Με ταλάντωση 5.2Hz και  $F=90^{\circ}$

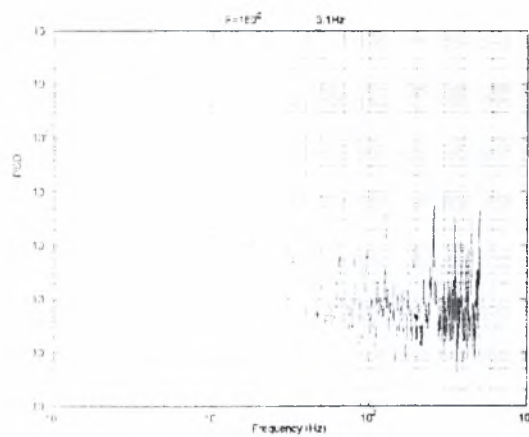


### 6.4.7 Στη θέση $F=180^\circ$ έχουμε

Χωρίς Ταλάντωση και  $F=180^\circ$



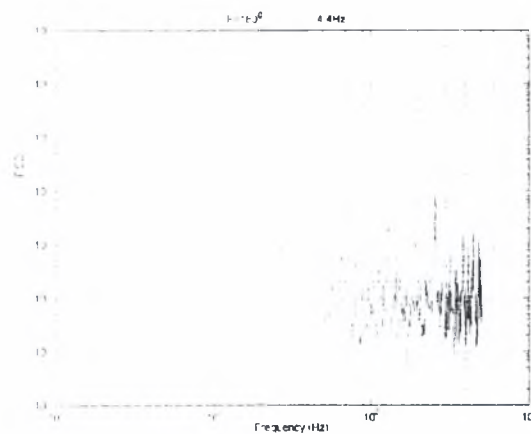
Με ταλάντωση 3.1Hz και  $F=180^\circ$



Με ταλάντωση 3.8Hz και  $F=180^\circ$



Με ταλάντωση 4.4Hz και  $F=180^\circ$

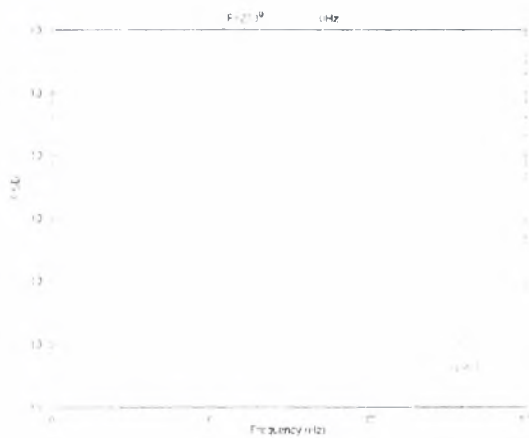


Με ταλάντωση 5.2Hz και  $F=180^\circ$

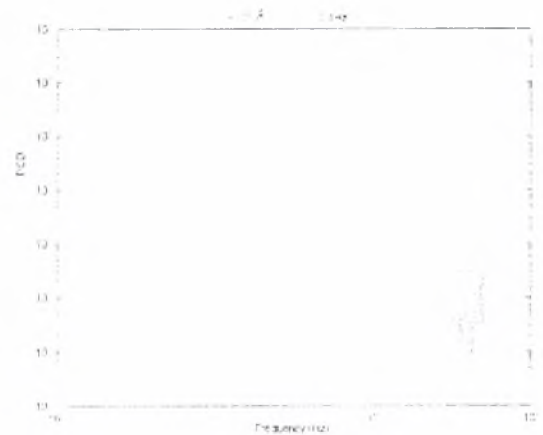


### 6.4.8 Στη θέση $F=270^{\circ}$ έχουμε

Χωρίς Ταλάντωση και  $F=270^{\circ}$



Με ταλάντωση 3.1Hz και  $F=270^{\circ}$



Με ταλάντωση 3.8Hz και  $F=270^{\circ}$



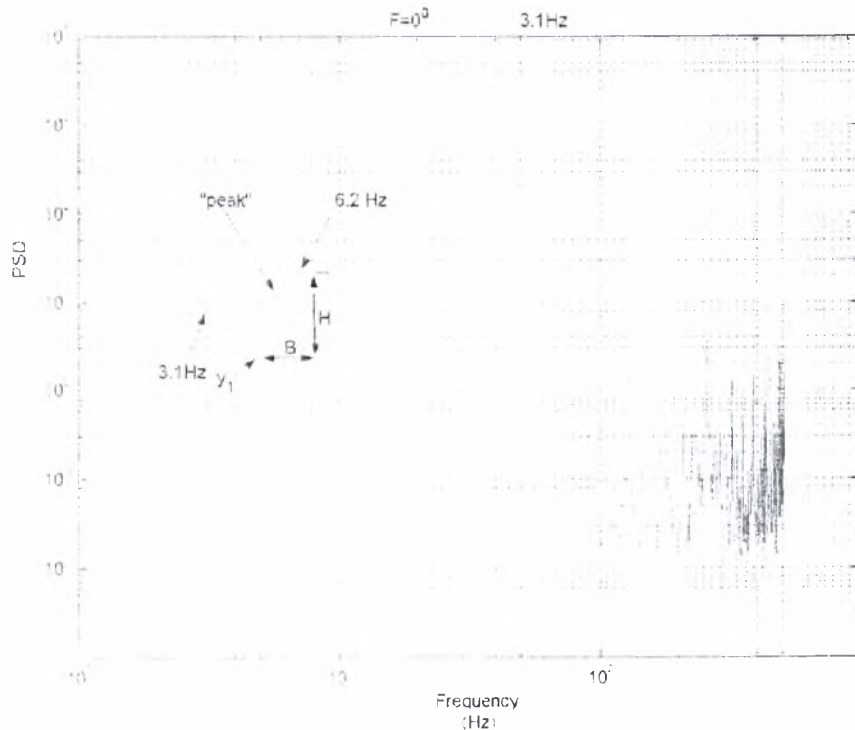
Με ταλάντωση 4.4Hz και  $F=270^{\circ}$



Με ταλάντωση 4.8Hz και  $F=270^{\circ}$



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Σχήμα 6.68

Μελετώντας τα διαγράμματα που προέκυψαν πιο πάνω παρατηρούμε ότι για συχνότητα ταλάντωσης 3.1 Hz, το πλάτος B του πρώτου 'peak' στο οποίο και θα αναφερόμαστε από δω και κάτω, είναι σταθερό για όλες τις γωνίες που μελετήσαμε με τιμή περίπου από  $10^{0.7} - 10^{0.87}$ . Επιπλέον, όλες οι γωνίες έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης  $y_1$  που σύμφωνα με τα διαγράμματα είναι περίπου  $PSD=10^{0.45}$ . Το ύψος του 'peak' για  $F=90^\circ$  και  $F=270^\circ$  ταυτίζεται, ενώ για  $F=0^\circ$  και  $F=180^\circ$  εμφανίζεται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα.

Για συχνότητα ταλάντωσης 3,8 Hz και πάλι το πλάτος B παραμένει σταθερό με τιμή όμως από  $10^{0.77} - 10^{0.93}$ , ενώ το ύψος H του 'peak' ταυτίζεται για  $F=90^\circ$  και  $F=180^\circ$  αυτή τη φορά. Το μέγιστο ύψος το συναντάμε σε γωνία  $F=0^\circ$ .

Στη συχνότητα των 4,4 Hz παρατηρούμε ότι τόσο το ύψος όσο και το πλάτος παραμένουν σταθερά για όλες ανεξαρτήτως τις γωνίες με τιμές  $B=10^{1.2} - 10^{0.3}$  και  $H=10^{0.96} - 10^{0.77}$  αντίστοιχα.

Τέλος, για 5,2 Hz το πλάτος και πάλι είναι σταθερό με τιμή  $10^{0.91} - 10^{0.99}$ , ενώ για το ύψος H παρατηρούμε μια αυξητική τάση καθώς προχωράμε σε μεγαλύτερες γωνίες.

## Κεφαλαίο 7

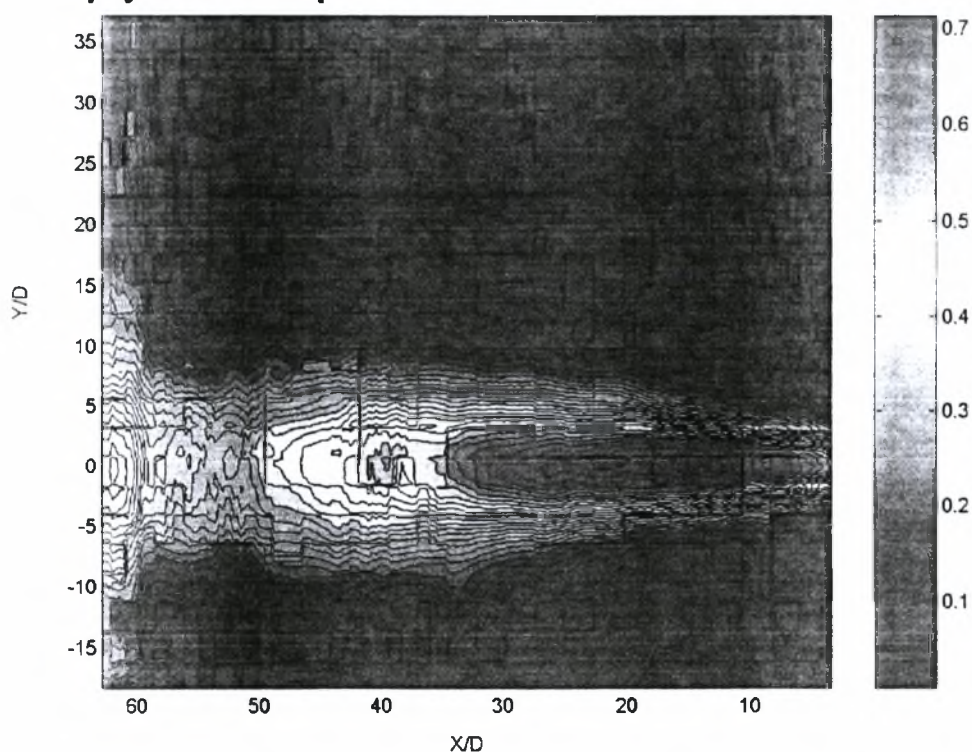
Στο κεφαλαίο αυτό μελετάμε τη διάχυση της χρωστικής ουσίας με την παρουσία τύρβης. Ο τρόπος διεξαγωγής των πειραμάτων περιγράφεται αναλυτικά σε κάθε παράγραφο στην συνέχεια της εργασίας.

### 7.1 Μελέτη επιρροής πλεγμάτων σε συνεχές jet με την μέθοδο της οπτικοποίησης

Με την μέθοδο οπτικοποίησης μελετήσαμε την επιρροή που ασκούν τα παλλόμενα πλεγμάτων σε συνεχές jet . Η χρωστική ουσία που χρησιμοποιήσαμε είναι όπως έχουμε προαναφέρει το methyl blue. Η παροχή ήταν στα  $3 \times 10^{-6}$  (cm<sup>2</sup>/sec).

Οι μετρήσεις που πήραμε ήταν : α) χωρίς ταλάντωση πλεγμάτων , β) με ταλάντωση πλεγμάτων στα 3.1 Hz και γ) με ταλάντωση πλεγμάτων στα 5.2 Hz. Παρακάτω δίνονται οι ισοϋψείς καμπύλες για της τρεις περιπτώσεις και τα διαγράμματα  $I_{mean}$ - X/D και Y/D-  $I_{mean}$ . Οι ισοϋψείς καμπύλες δίνονται σε αδιάστατες κλίμακες X/D και Y/D ως προς τη διάμετρο του jet (D=3mm). Το  $I_{mean}$  είναι η ένταση της φωτεινότητας

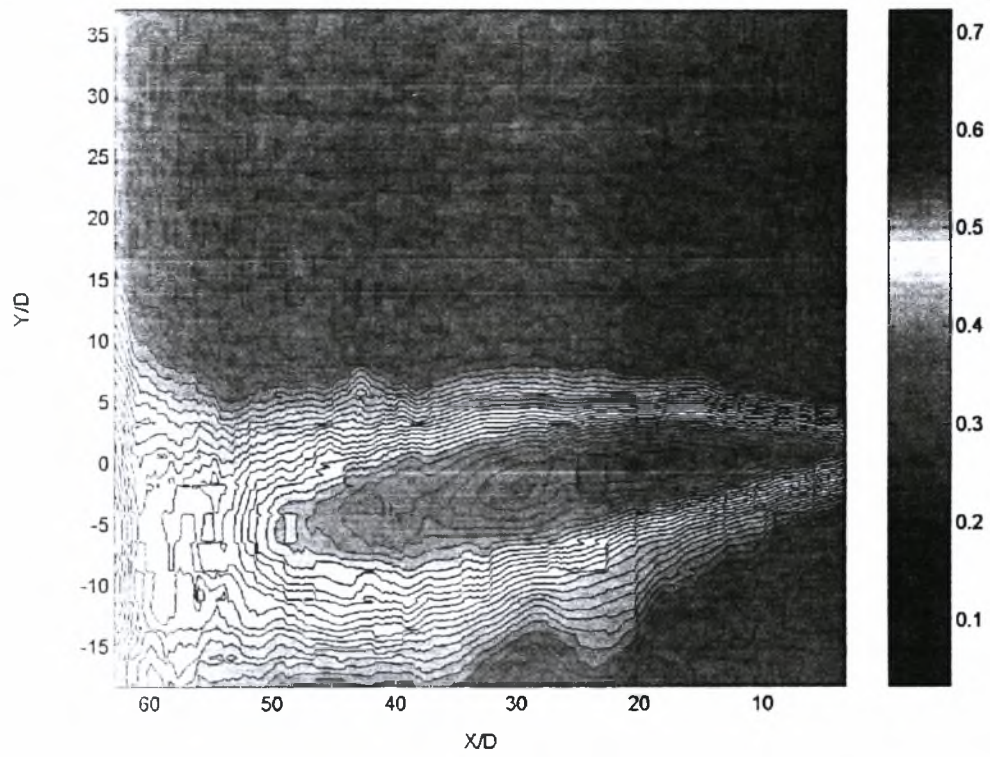
#### • Χωρίς ταλάντωση



Σχήμα 7.1

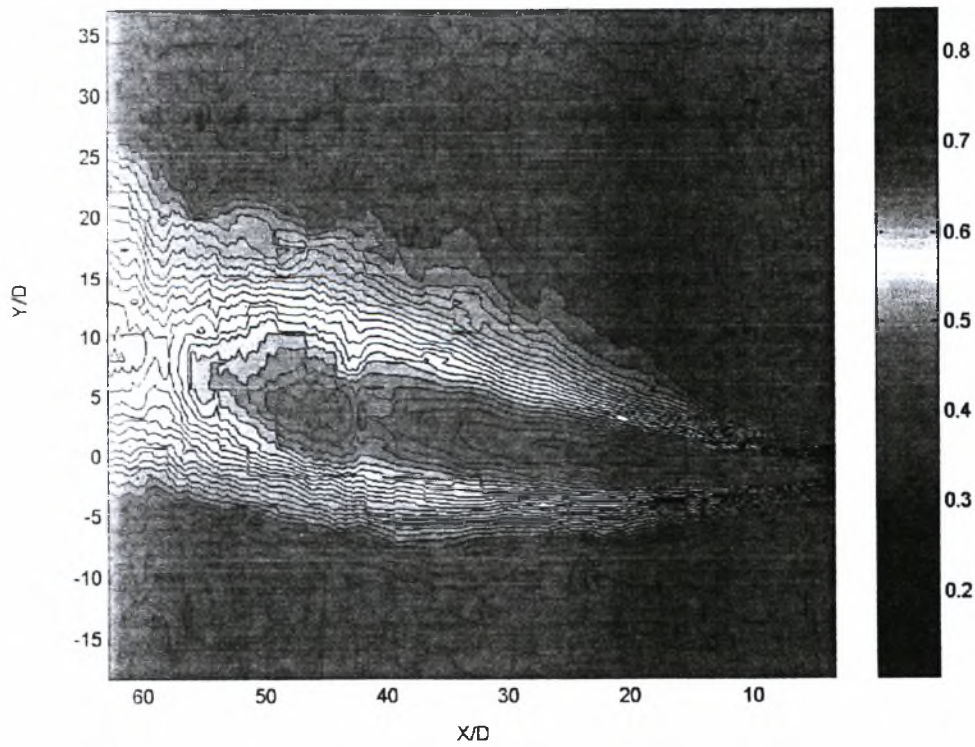


- Με ταλάντωση 3.1 Hz



Σχήμα 7.2

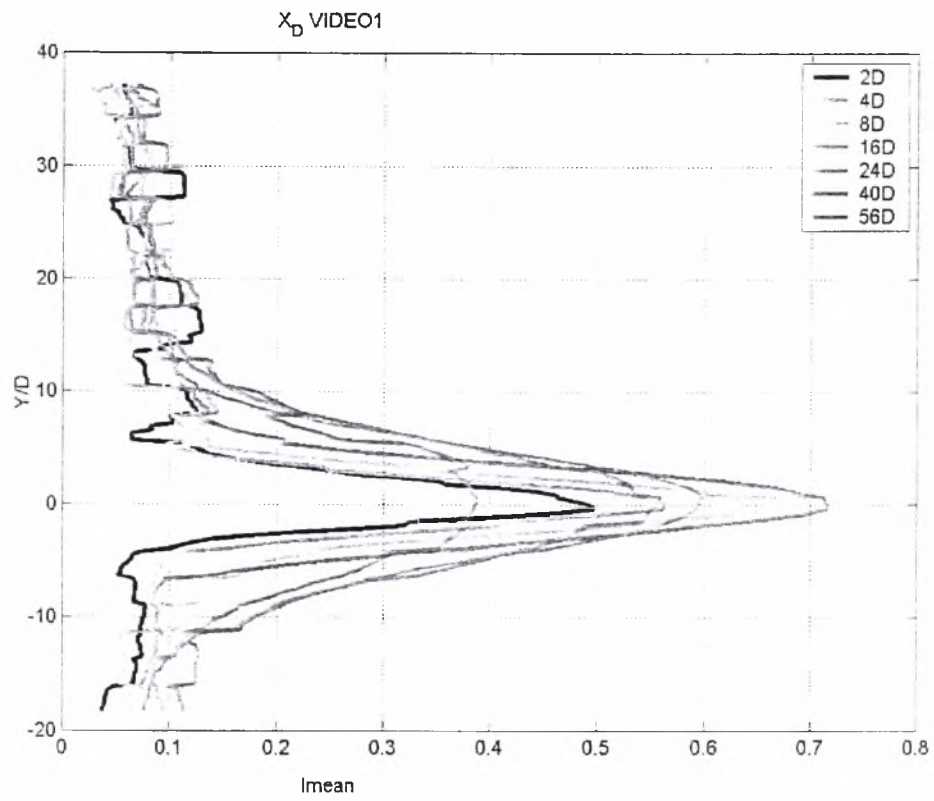
- Με ταλάντωση 5,2 Hz



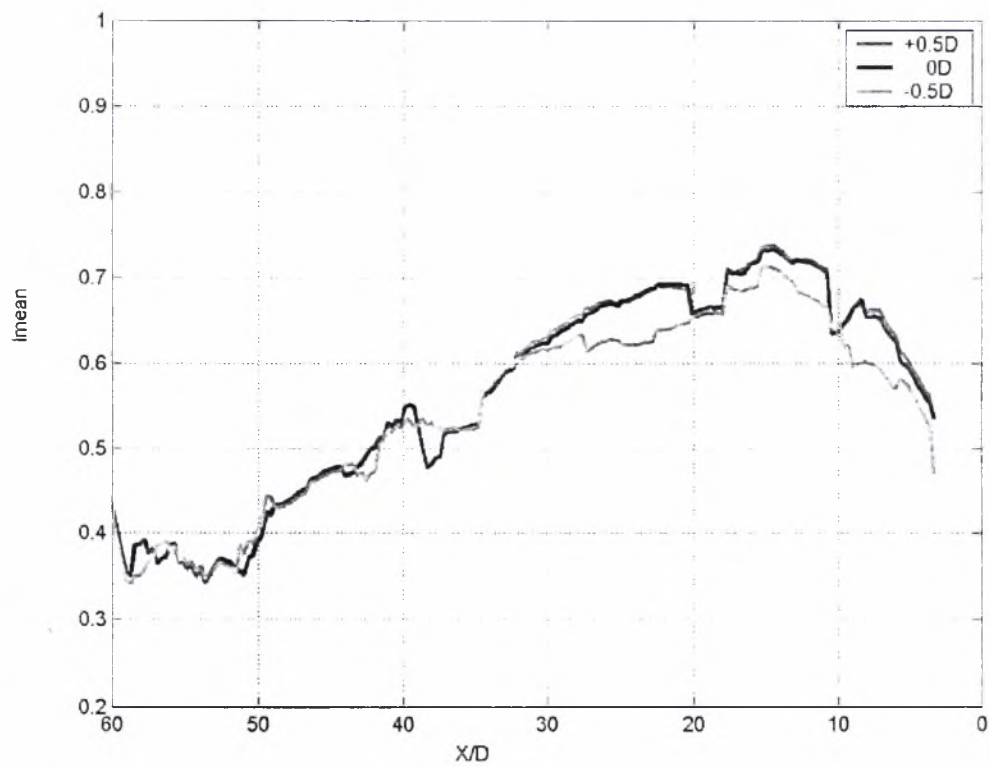
Σχήμα 7.3



- Χωρίς ταλάντωση

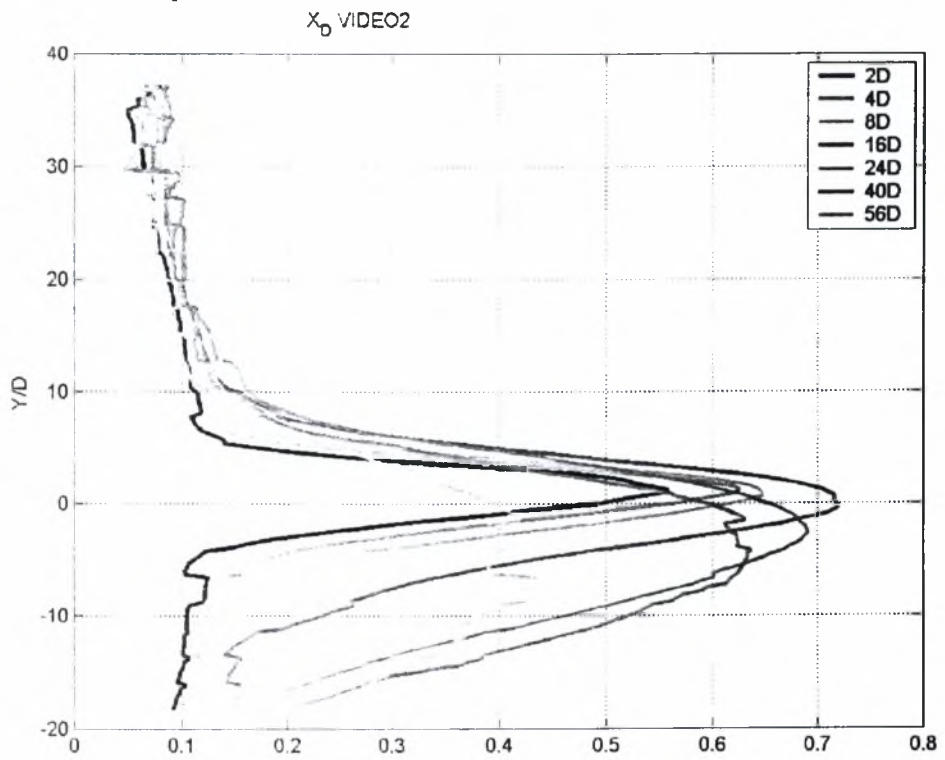


Σχήμα 7.4

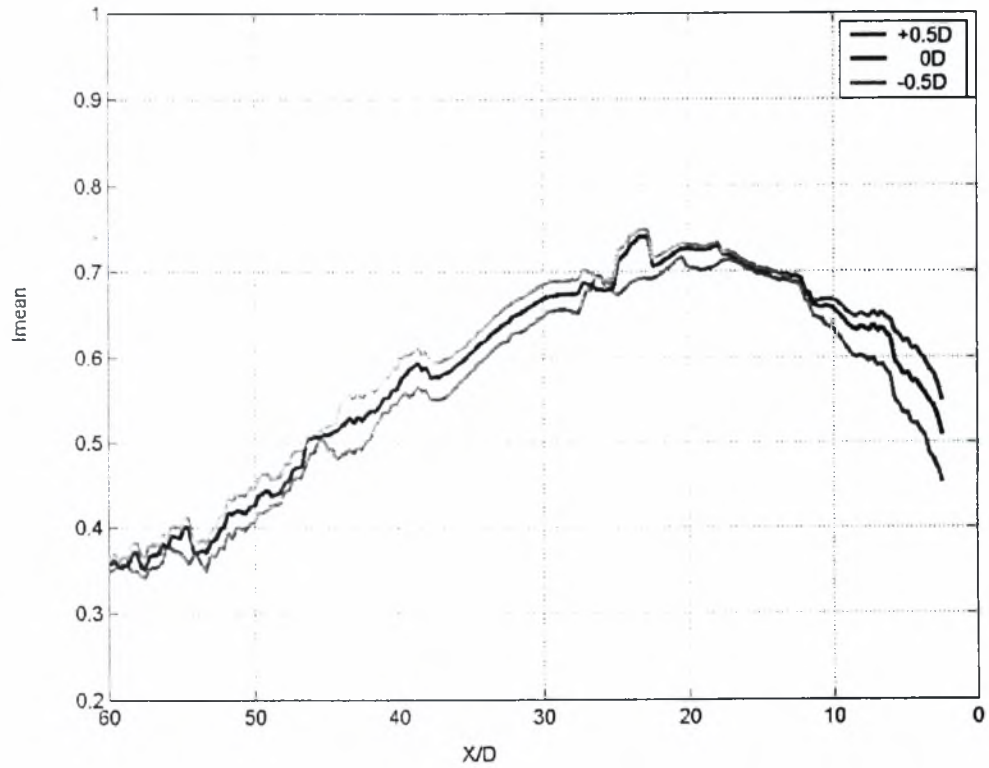


Σχήμα 7.5

- Με ταλάντωση 3.1 Hz

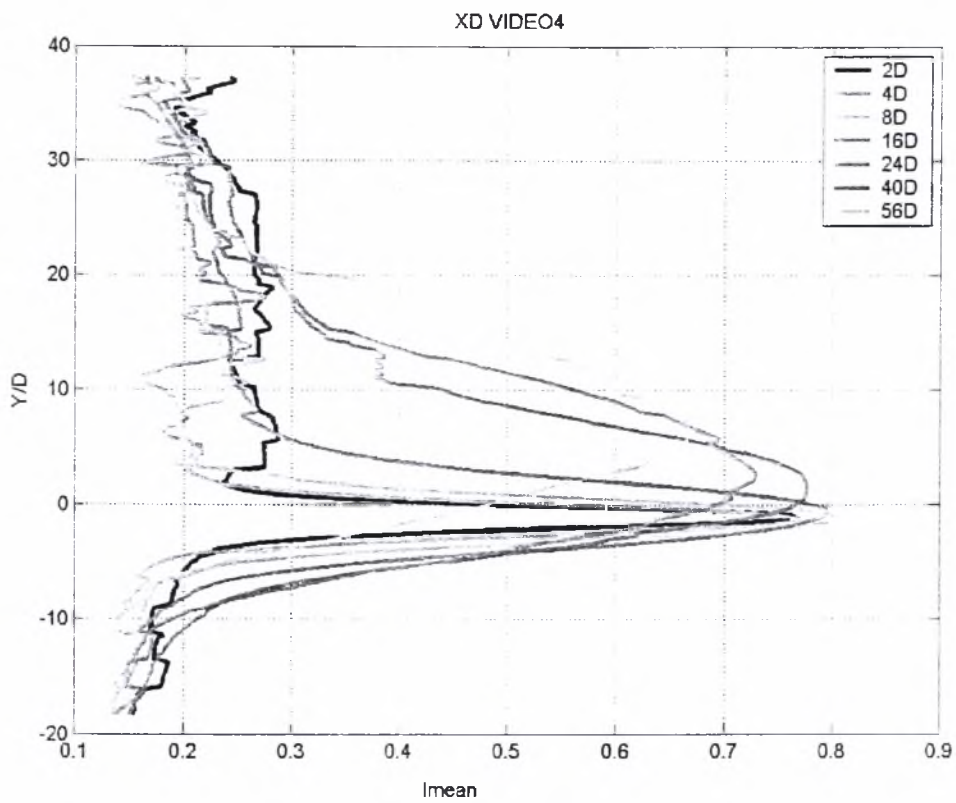


lmean  
Σχήμα 7.6

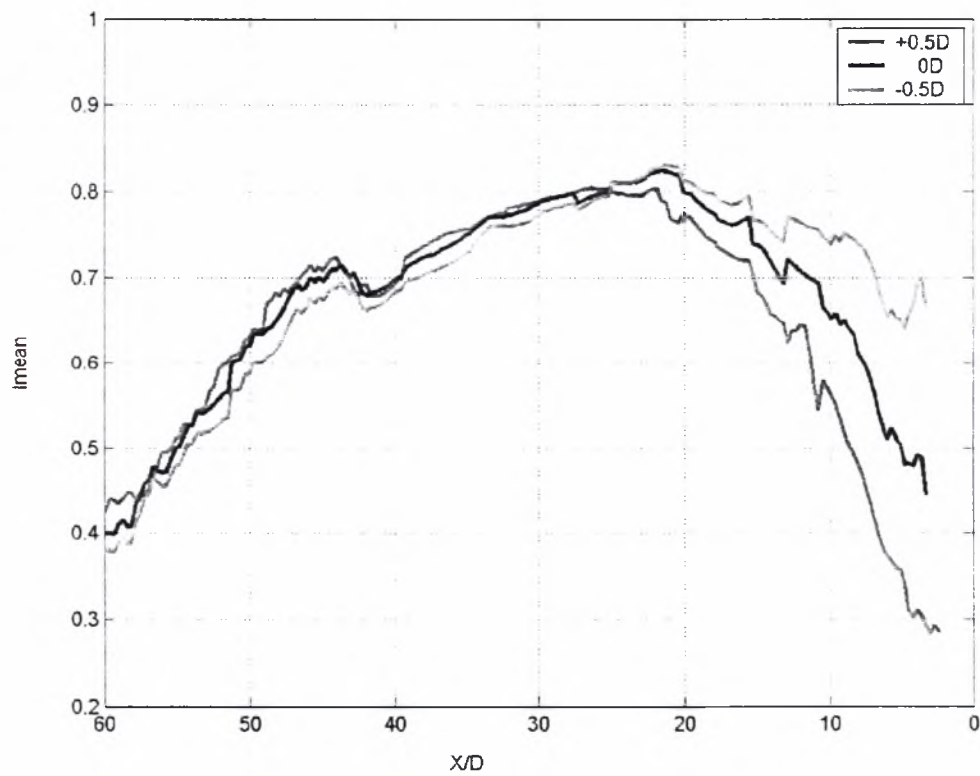


Σχήμα 7.7

- Με ταλάντωση 5,2 Hz

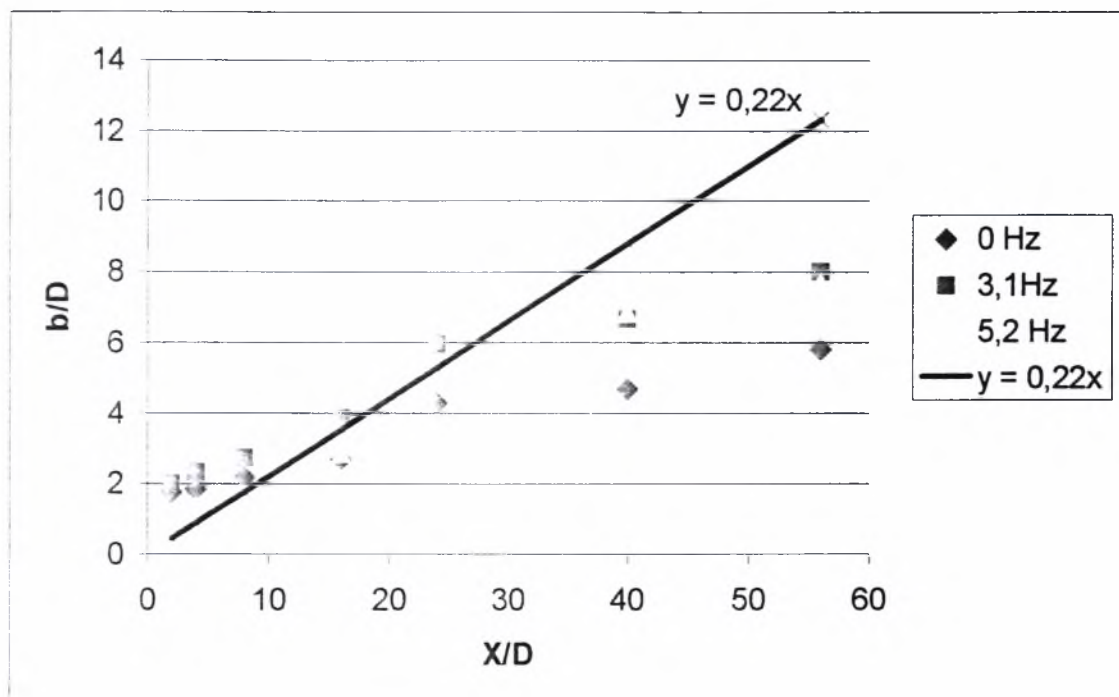


Σχήμα 7.8



Σχήμα 7.9

Η εγκάρσια απόσταση στην οποία η μέση φωτεινότητα  $I_{mean}$  γίνεται  $I_{mean} / 2$ , καλείται εύρος της δέσμης (Jet Width)  $b$  και η γενική μορφή δίνεται από τη σχέση :  $b = \text{const} \cdot x$  (οπου  $\text{const}$  σταθερά). Από την θεωρία για συμμετρικές ως προς τους άξονες δέσμες το  $\text{const} = 0.22$ . Για τις τρεις περιπτώσεις που μελετάμε με την μέθοδο της οπτικοποίησης οι τιμές που μετρήσαμε για το εύρος της δέσμης σε διαφορετικές αποστάσεις  $X/D$  δίνονται σε ένα συγκεντρωτικό γράφημα.

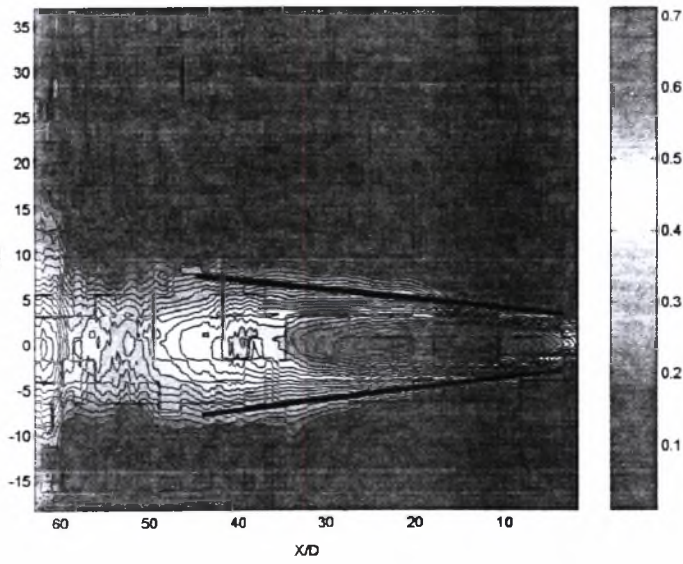


Σχήμα 7.10

Ακόμα μελετήσαμε κατά πόσο η δέσμη της χρωστικής ουσίας είναι τυρβώδης και πως αυτή επηρεάζεται από την επίδραση της ταλάντωσης. Από την θεωρία το άνοιγμα μιας τυρβώδους δέσμης είναι  $\theta = 17^\circ$  κάτι που ισχύει και στην δική μας περίπτωση όπου δεν έχουμε ταλάντωση. Όταν έχουμε ταλάντωση με 3.1Hz το άνοιγμα της δέσμης είναι  $\theta = 30,88^\circ$  και ακόμα μεγαλύτερη επίδραση έχουμε όταν η ταλάντωση έχει συχνότητα 5.2Hz όπου το άνοιγμα της δέσμης είναι  $\theta = 36,06^\circ$ .



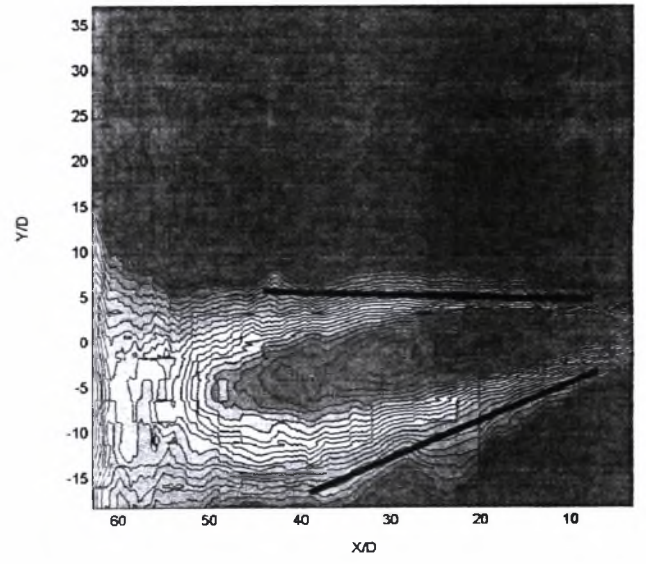
Χωρίς ταλάντωση



$\theta=17.1413^\circ$

Σχήμα 7.11

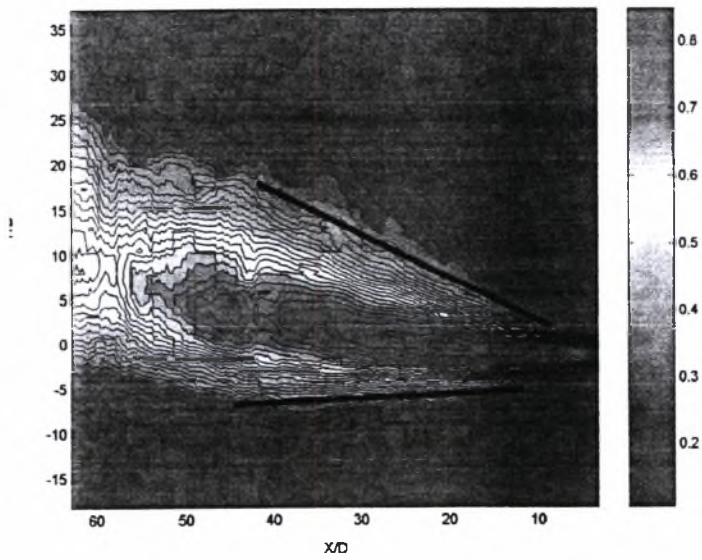
Συχνότητα 3.1 Hz



$\theta=30.88^\circ$

Σχήμα 7.12

Συχνότητα 5.2 Hz



$\theta=36.06^\circ$

Σχήμα 7.13

## ΣΧΟΛΙΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Βλέπουμε ότι όταν δεν υπάρχει η ταλάντωση των πλεγμάτων το πλέγμα είναι σε συμμετρική μορφή ως προς την αρχή των αξόνων (0,0).

Θα περίμενε κανείς η μέση φωτεινότητα να είχε την μεγαλύτερη τιμή στις καμπύλες  $Y/D - I_{mean}$  στην γραμμή 2D και να μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση. Αντιθέτως έχουμε αύξηση της φωτεινότητας καθώς αυξάνει η απόσταση μέχρι το 16 D .

Στις ισοϋψείς καμπύλες για την ταλάντωση με 3.1 και 5.2 Hz αντίστοιχα παρατηρούμε ένα φαινόμενο που το συναντήσαμε πολλές φορές κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, την έλξη των ουσιών προς τα κάτω και προς τα πάνω αντίστοιχα. Η έλξη αυτή δεν σχετίζεται άμεσα με κάποια από τις συχνότητες και αυτό γιατί όταν εμφανιζόταν το φαινόμενο αυτό δοκιμάσαμε επί τόπου με άλλες συχνότητες και υπήρχε ακόμα ίδιας μορφής έλξη . Το φαινόμενο αυτό μπορεί να το αποδώσει κάνεις στην διάσπαση των μικρών jet που δημιουργούνται στα διάκενα των πλεγμάτων και στη επακόλουθη δημιουργία τυρβώδους ροής ( όπως φαίνεται στην αναφορά για την παραγόμενη τύρβη από παλλόμενα πλέγματα.)

Τα διαγράμματα της μέσης φωτεινότητας ακολουθούν σε μορφή τις ισοϋψείς καμπύλες αντίστοιχα.

Επιπλέον, στο διάγραμμα του εύρους της δέσμης συναρτήσει της απόστασης X από το jet ,χαράζοντας την  $y = 0,22x$  , ευθεία που προκύπτει από τη θεωρία για τυρβώδεις δέσμες ,παρατηρούμε ότι η δέσμη μας ακολουθεί την θεωρία αυτή για απόσταση 24 D. Από τα 24 D και μετά η δέσμη αποκλίνει από τη θεωρητική και για τις τρεις συχνότητες ταλάντωσης, με μεγαλύτερη απόκλιση αυτή των 5.2 Hz. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε πειραματικά σφάλματα (π.χ κακός φωτισμός κατά τη διάρκεια των πειράματα) .

Τέλος από τις ισοϋψείς καμπύλες παρατηρούμε ότι όταν δεν έχουμε ταλάντωση του πλέγματος το άνοιγμα της δέσμης γίνεται κατά γωνία  $\theta = 17^\circ$  ,οπότε σύμφωνα με τη θεωρία η ροή είναι τυρβώδης . Θέτοντας σε λειτουργία τα πλέγματα το άνοιγμα της δέσμης μας μεγαλώνει και μάλιστα ακολουθώντας την αύξηση των συχνοτήτων ταλάντωσης.



## **7.2 Μελέτη επιρροής πλεγμάτων σε διάχυση ουσιών με τη μέθοδο της οπτικοποίησης.**

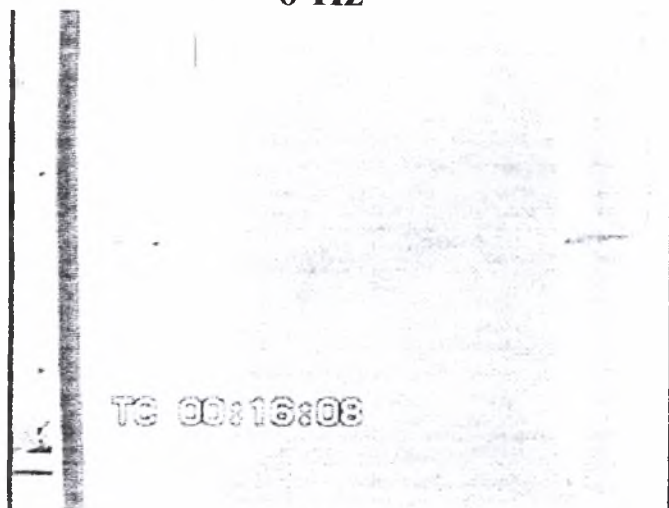
### **7.2.1 Μελέτη διάχυσης με λήψη κάθετη στη ροή**

Στην περίπτωση αυτή τοποθετούμε την κάμερα κάθετα στη ροή .

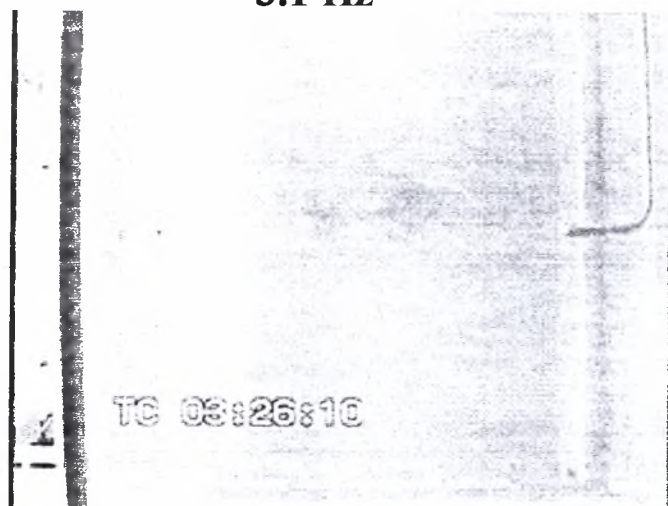
Διοχετεύουμε  $5,5 \times 10^{-3}$  lt methyl blue στο χώρο των πειραματικών δοκιμών με ταχύτητα 1,837264 m/sec και για χρόνο 0.47sec (10 frame από τα 24). Η μελέτη του φαινομένου διαρκεί 10 sec και γίνεται για 3.1,3.8 ,4.4 και 5,2 Hz συχνότητες ταλάντωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι λήψεις που κάναμε σε 5 χρονικές στιγμές. Η κάθε χρονική στιγμή απέχει από την επόμενη 2 sec.

# 1<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

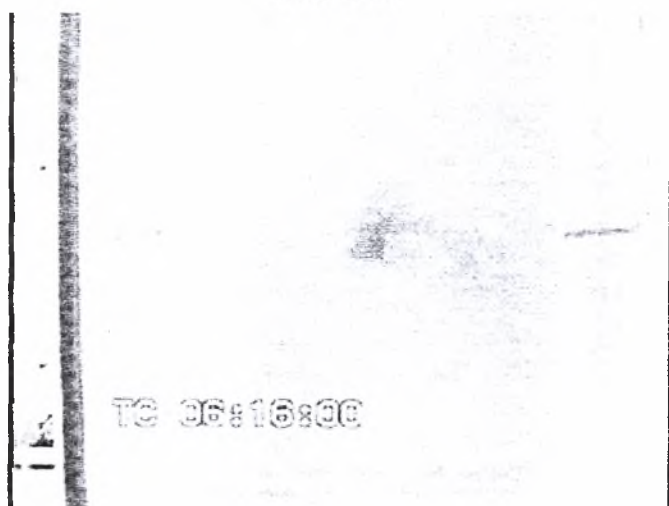
0 Hz



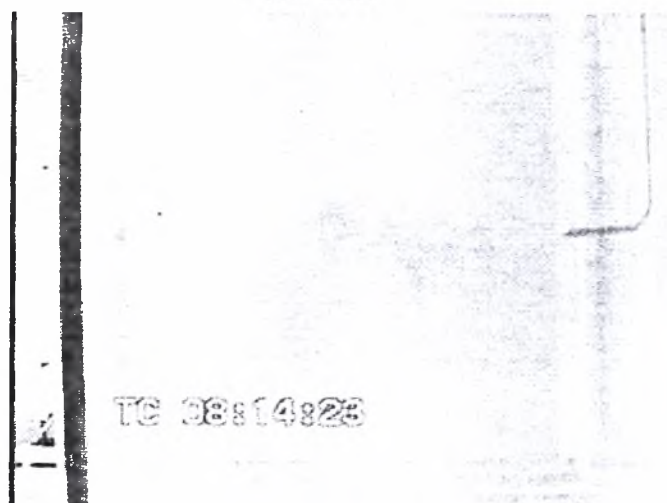
3.1 Hz



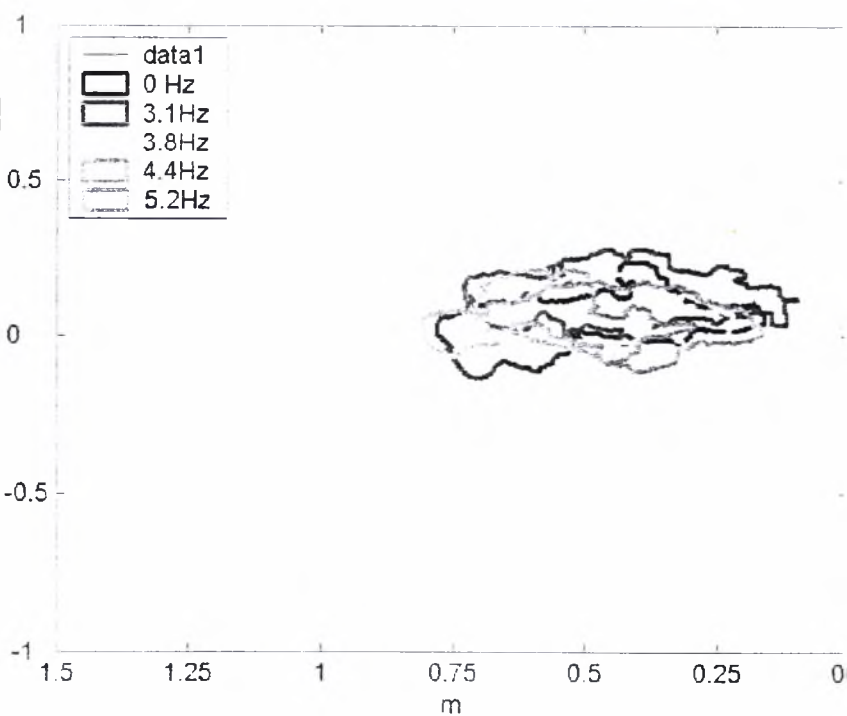
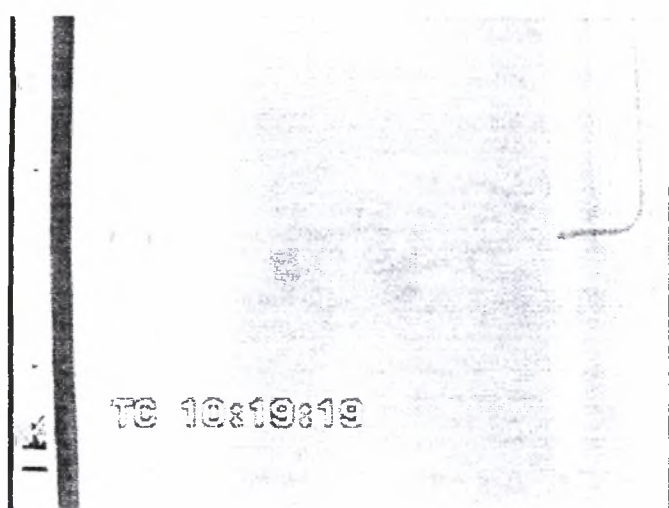
3.8 Hz



4.4 Hz



5.2 Hz

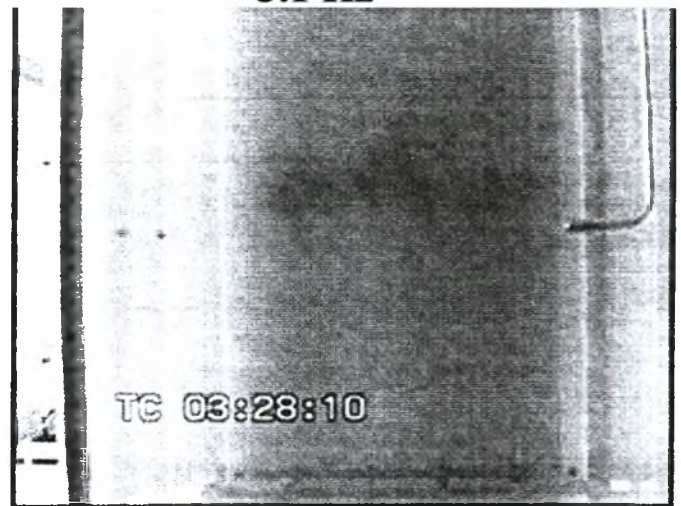


2<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

0 Hz



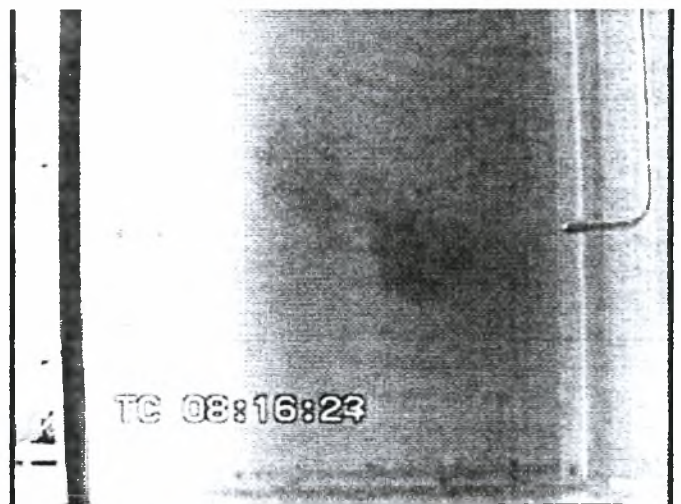
3.1 Hz



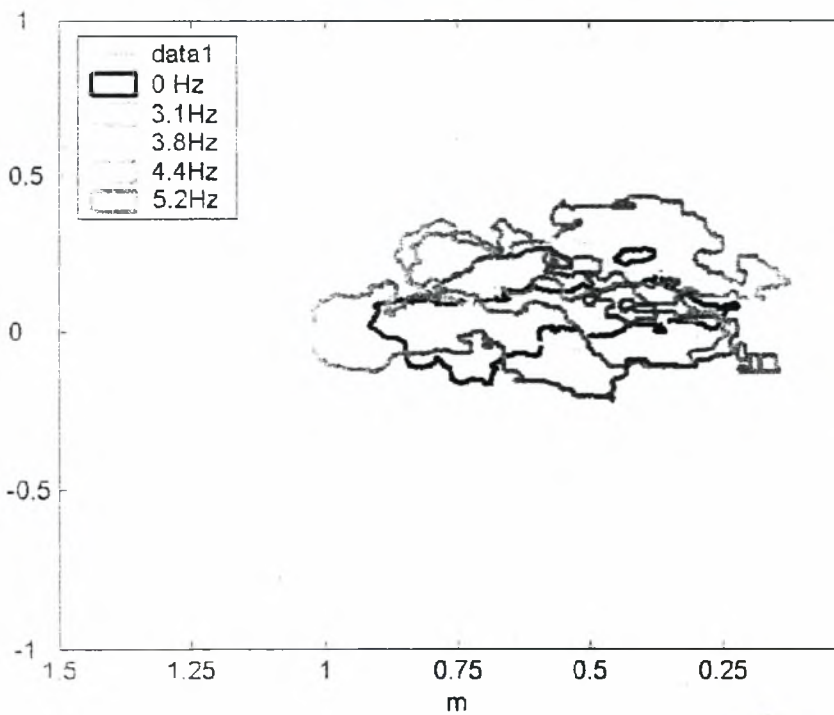
3.8 Hz



4.4 Hz



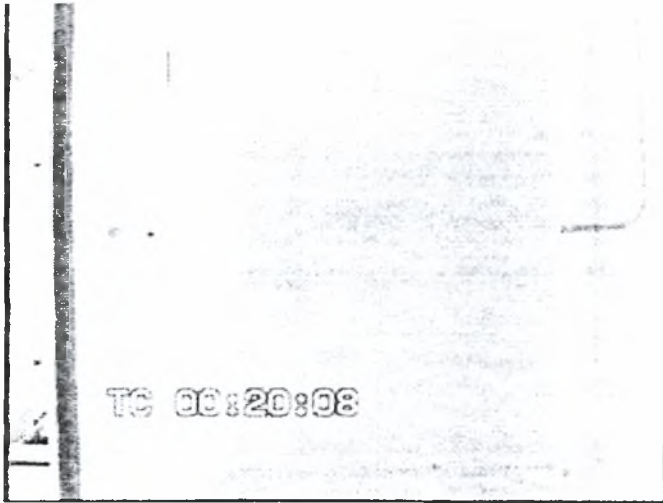
5.2 Hz



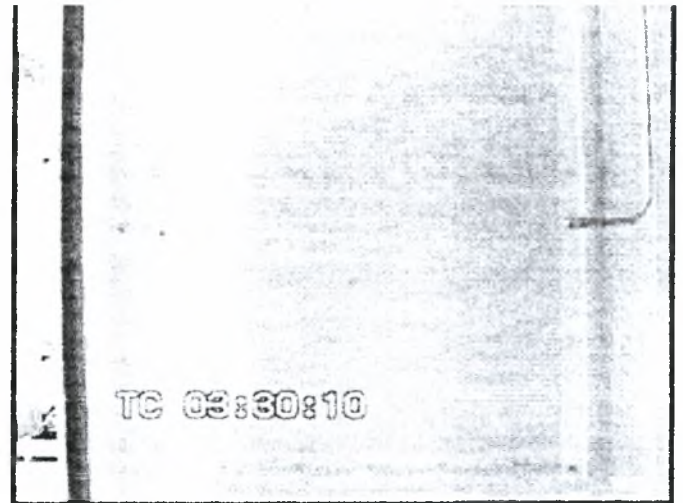


### 3<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

0 Hz



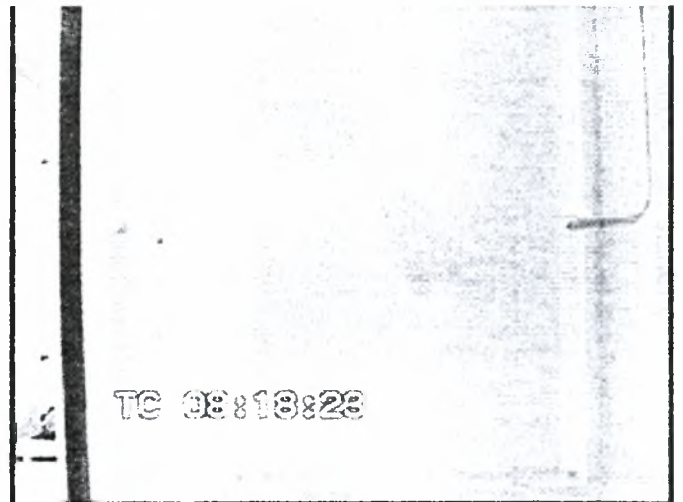
3.1 Hz



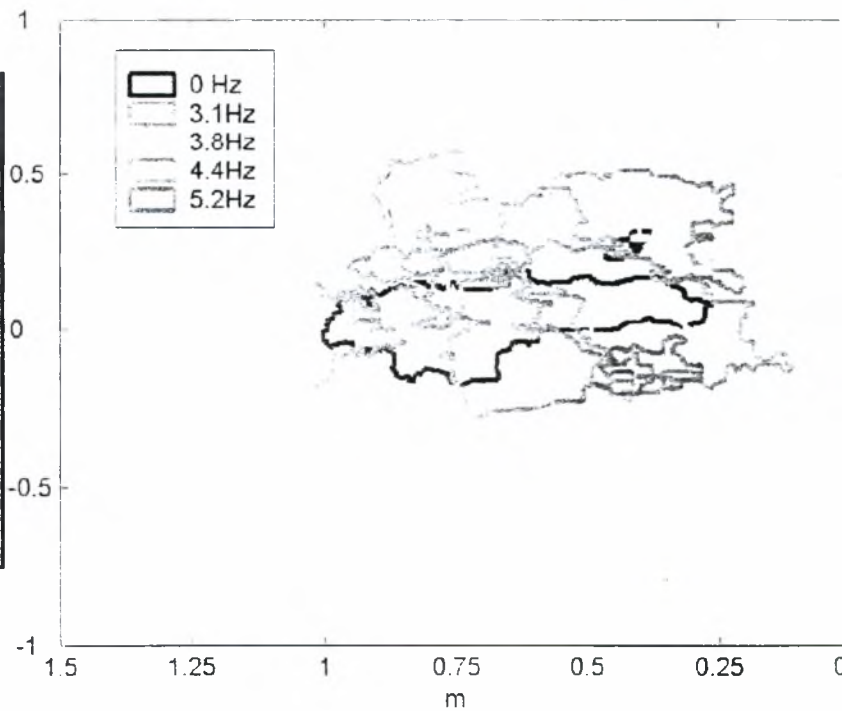
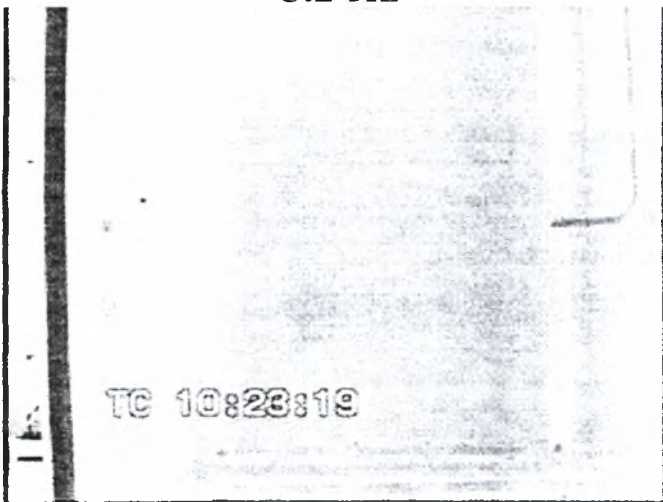
3.8 Hz



4.4 Hz

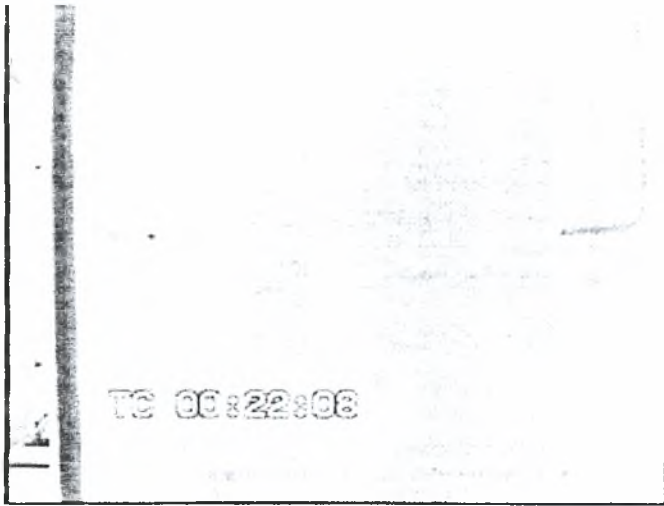


5.2 Hz



4<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

0 Hz



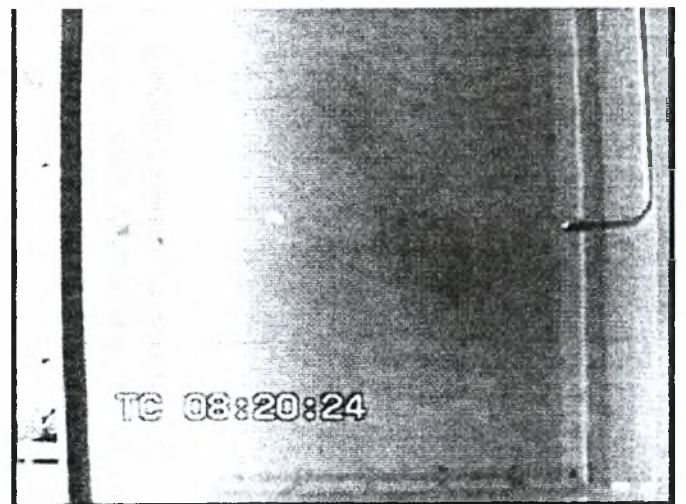
3.1 Hz



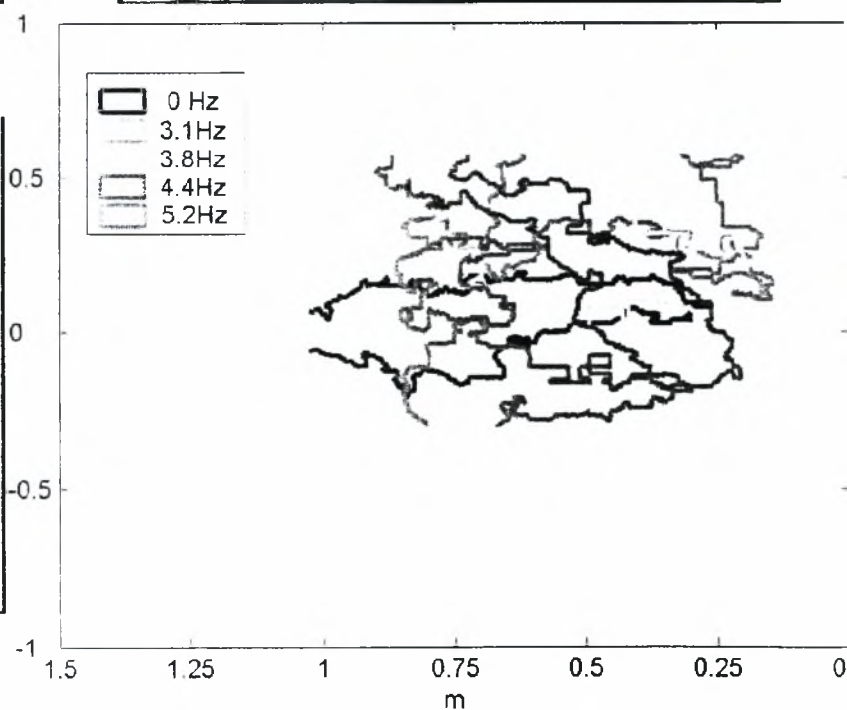
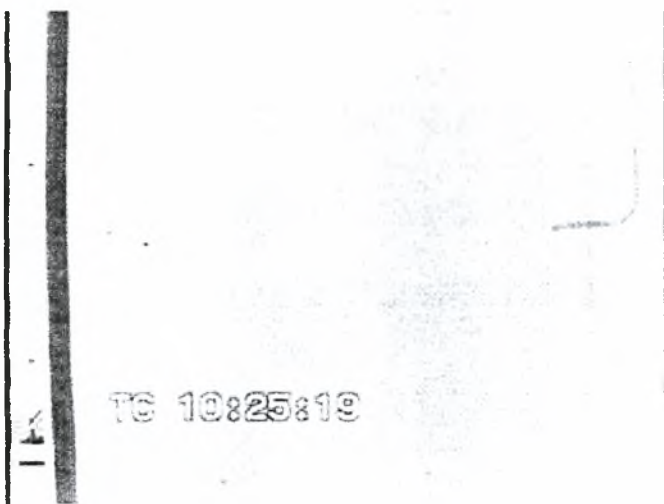
3.8 Hz



4.4 Hz



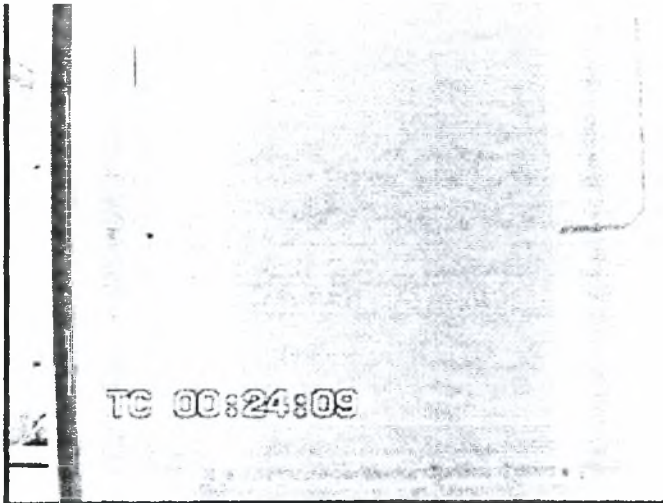
5.2 Hz



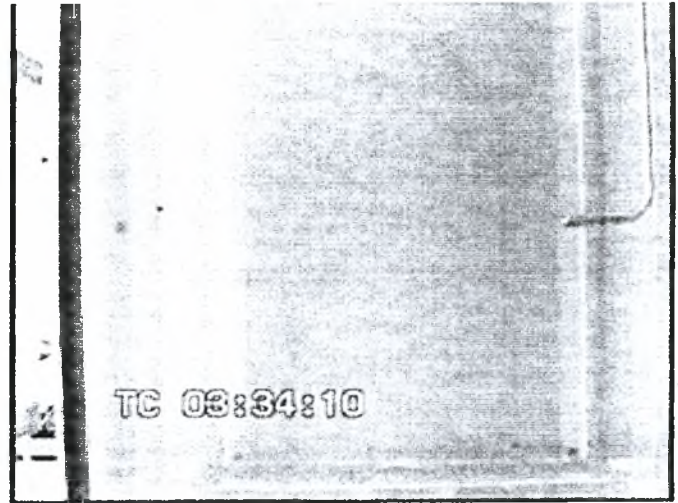


5<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

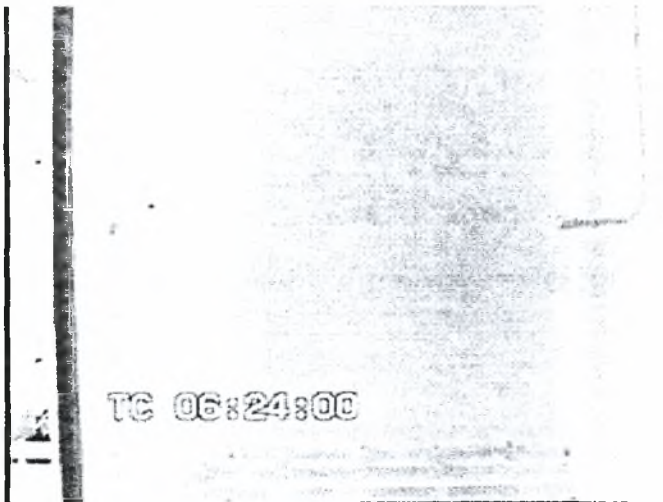
0 Hz



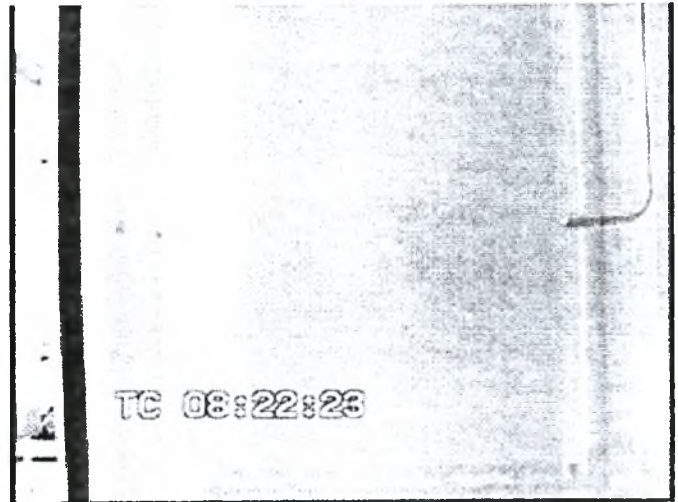
3.1 Hz



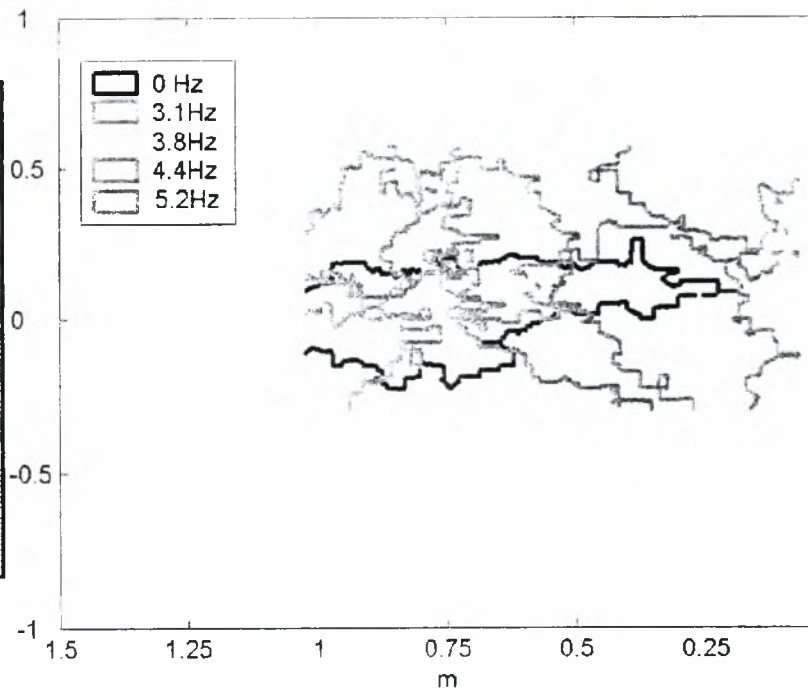
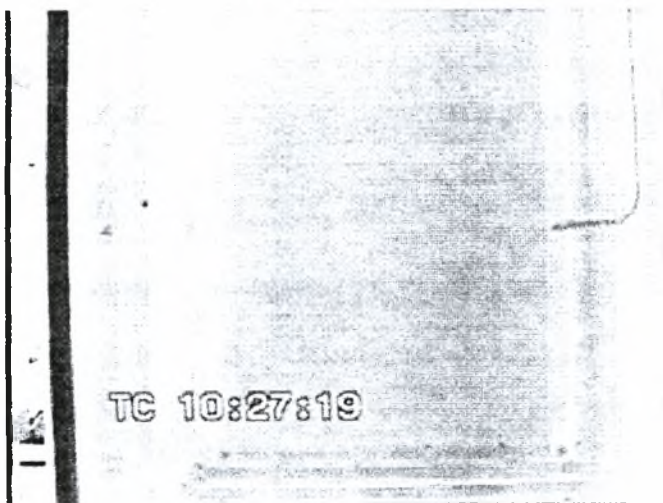
3.8 Hz



4.4 Hz



5.2 Hz



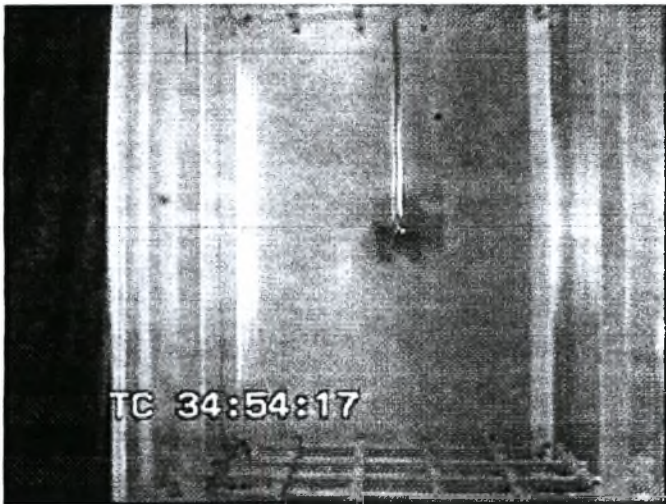


### **7.2.2 Μελέτη διάχυσης με λήψη παράλληλη στη ροή**

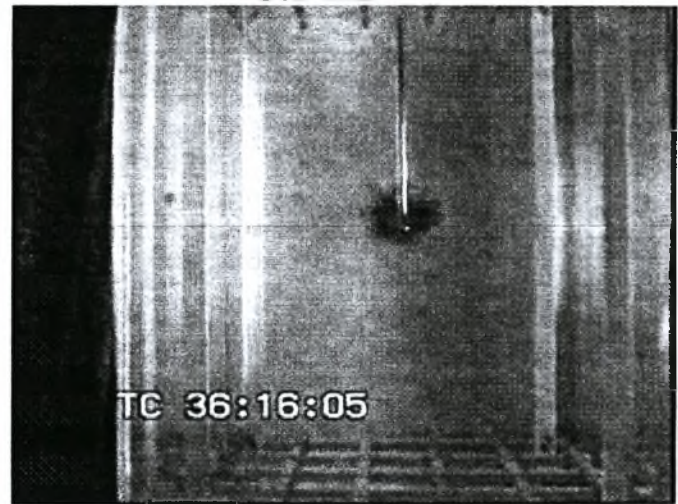
Η περίπτωση αυτή διαφέρει από την προηγούμενη μόνο στη διεύθυνση στην οποία γίνεται η λήψη των βίντεο. Έτσι εδώ τοποθετούμε την κάμερα κάθετα στη ροή . Διοχετεύουμε και πάλι  $5,5 \times 10^{-3}$  lt methyl blue στο χώρο των πειραματικών δοκιμών με ταχύτητα 1,837264 m/sec και για χρόνο 0.47sec (10 frame από τα 24) . Η μελέτη του φαινομένου διαρκεί 10 sec και γίνεται για 3.1,3.8 ,4.4 και 5,2 Hz συχνότητες ταλάντωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι λήψεις που κάναμε σε 5 χρονικές στιγμές, η κάθε μια από τις οποίες απέχει από την επόμενη 2 sec.

# 1<sup>H</sup> χρονική στιγμή

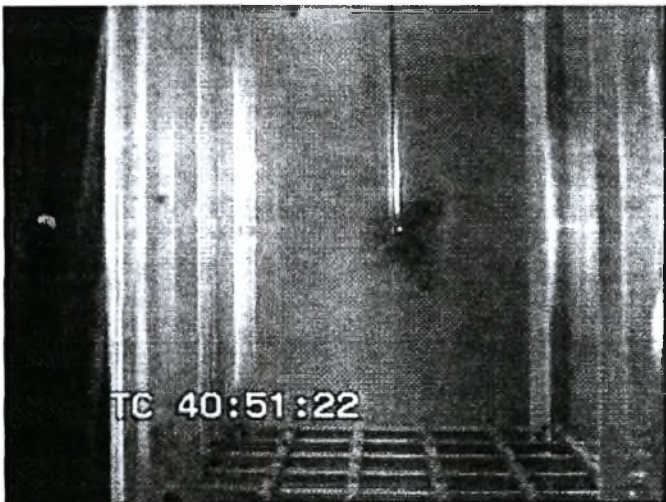
0 Hz



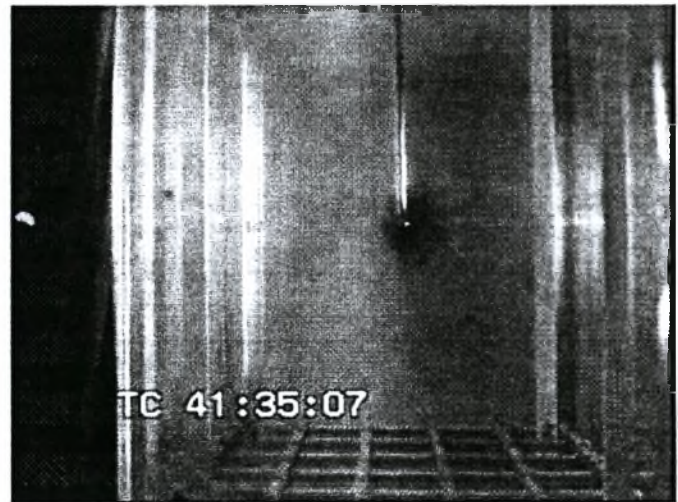
3.1 Hz



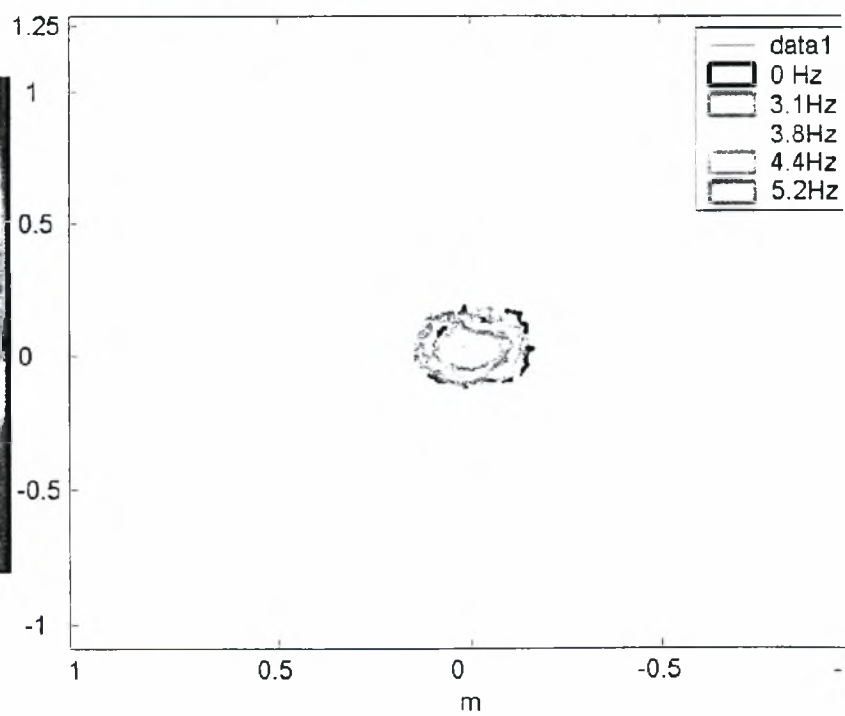
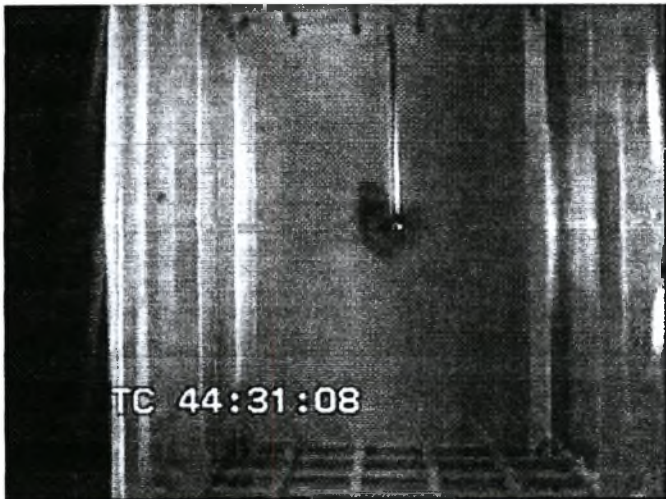
3.8 Hz



4.4 Hz



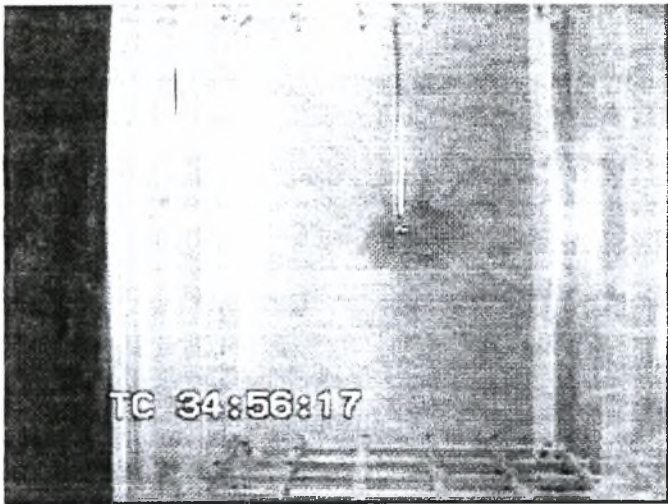
5.2 Hz



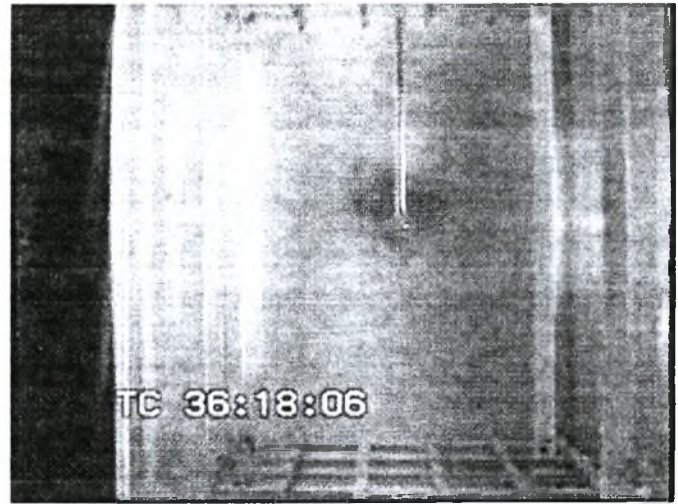


2<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

0 Hz



3.1 Hz



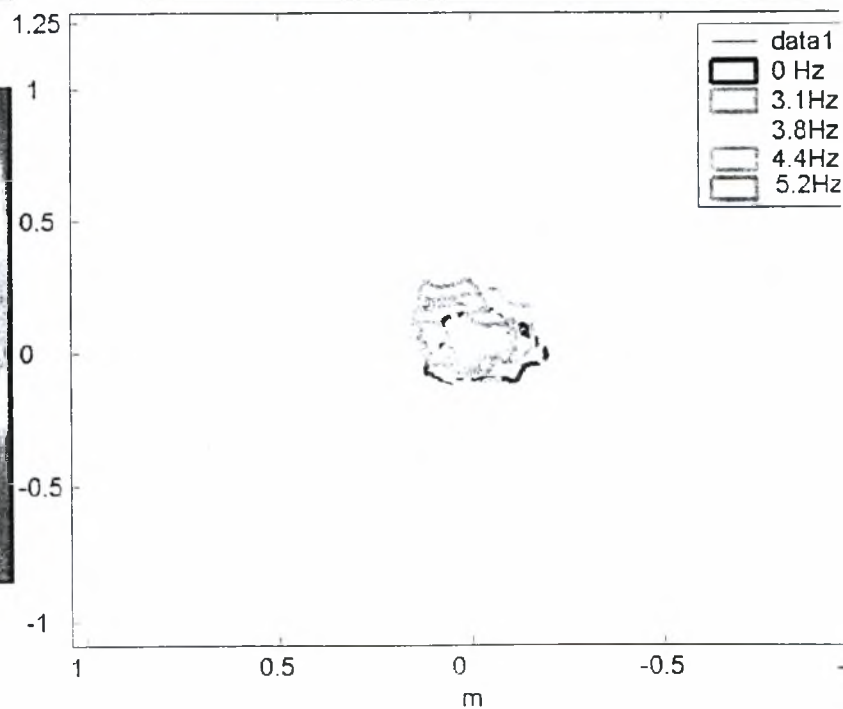
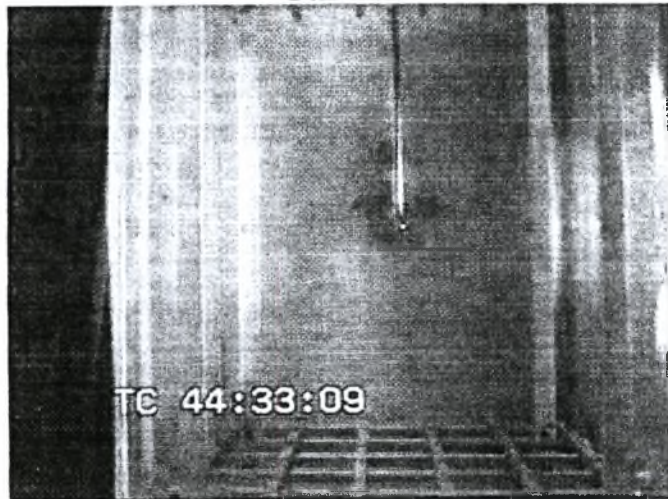
3.8 Hz



4.4 Hz



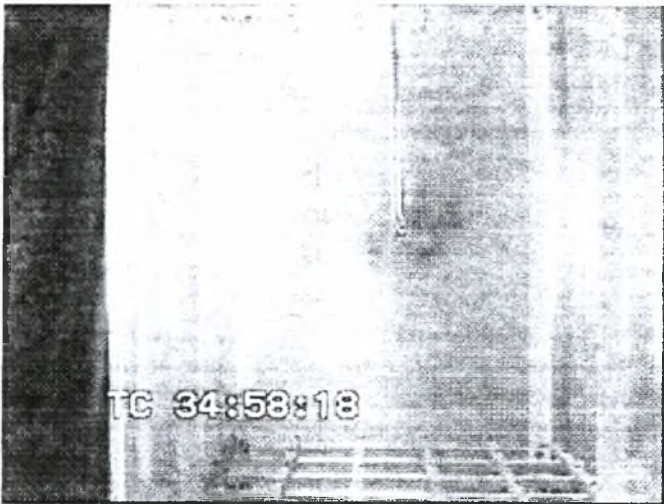
5.2 Hz



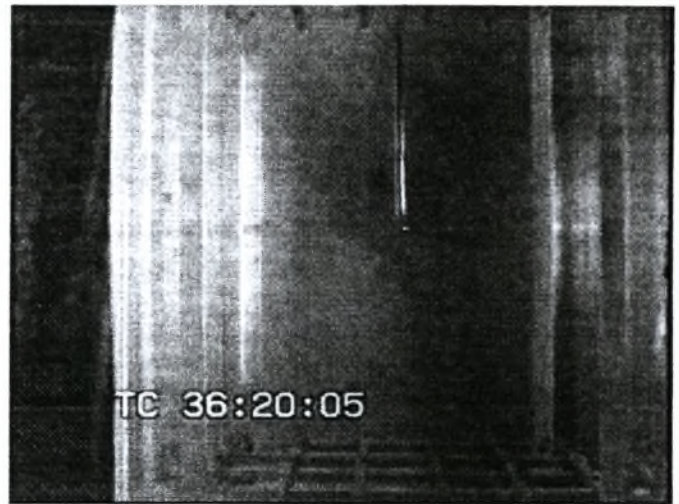


### 3<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

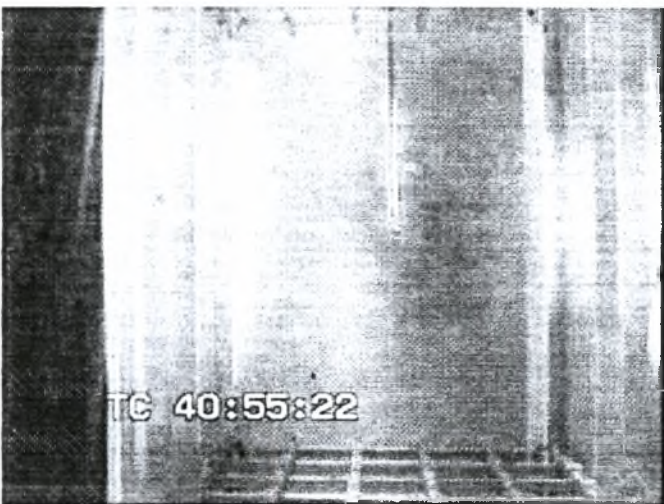
0 Hz



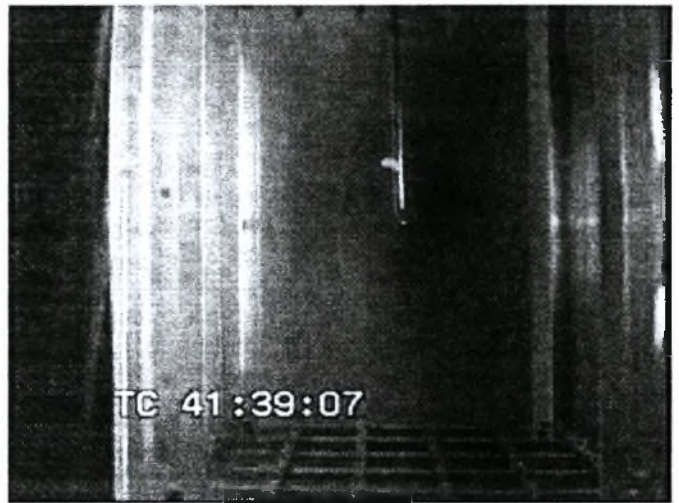
3.1 Hz



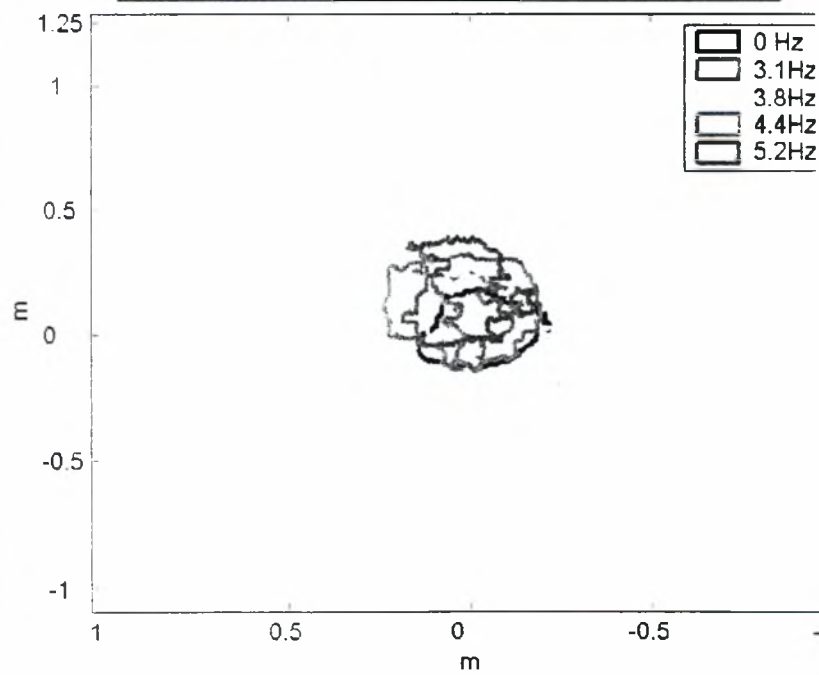
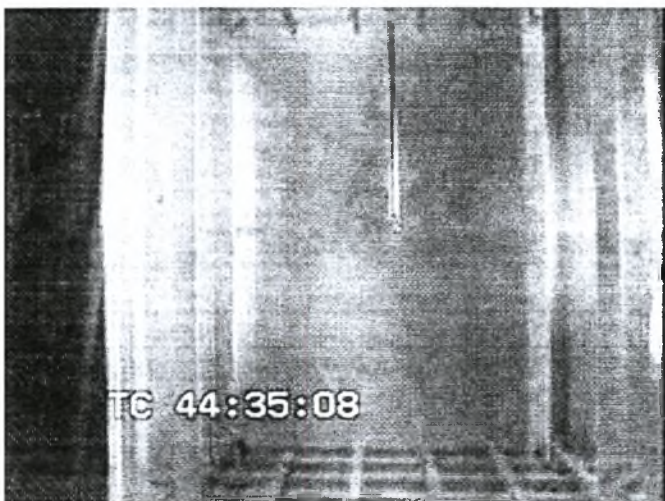
3.8 Hz



4.4 Hz



5.2 Hz



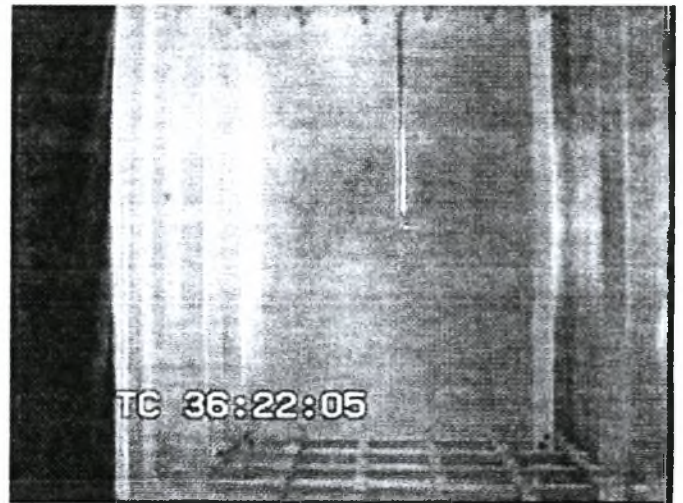


4<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ

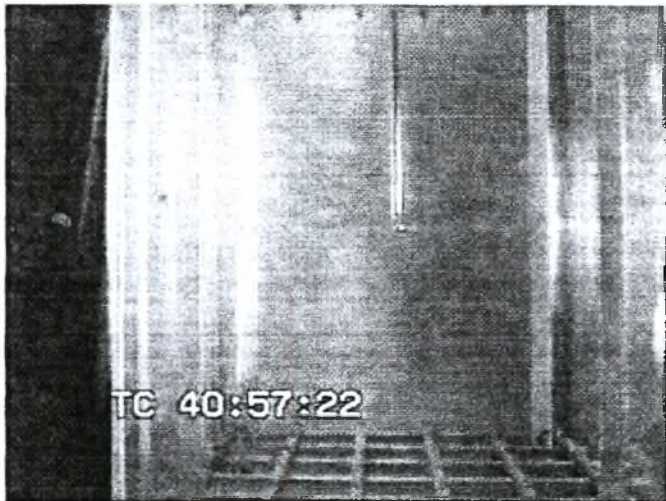
0 Hz



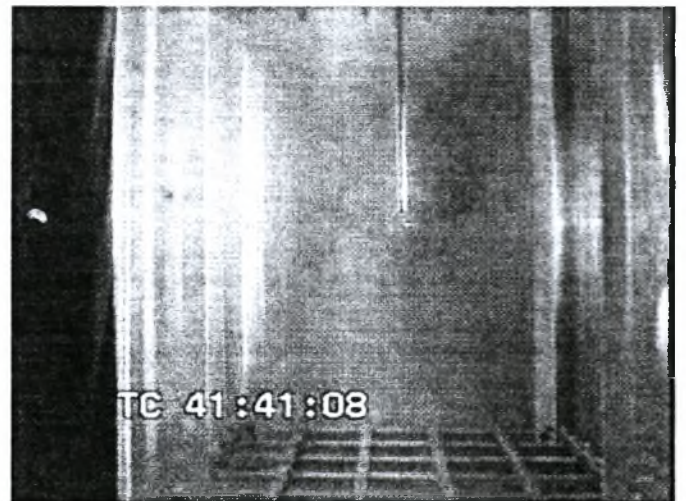
3.1 Hz



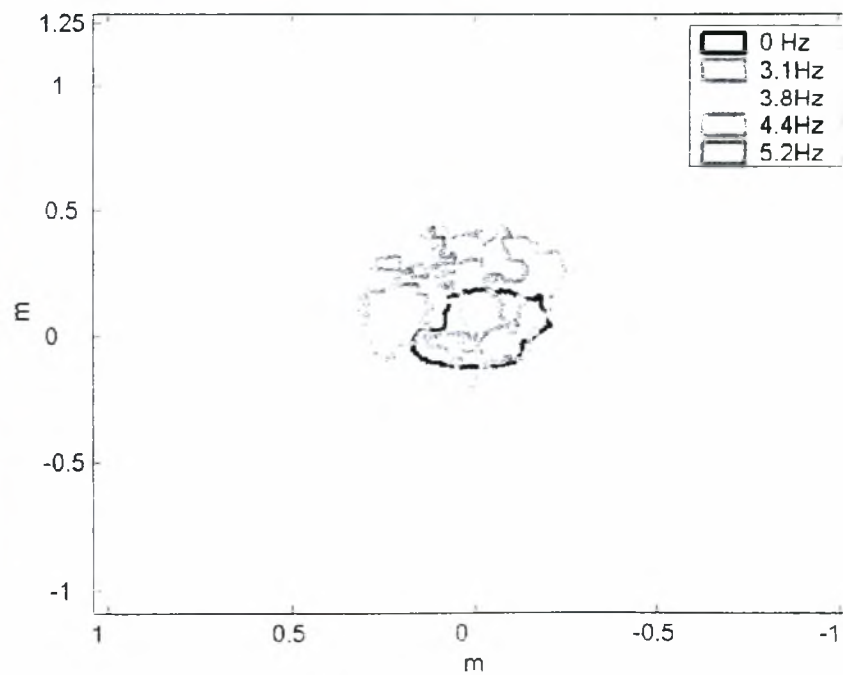
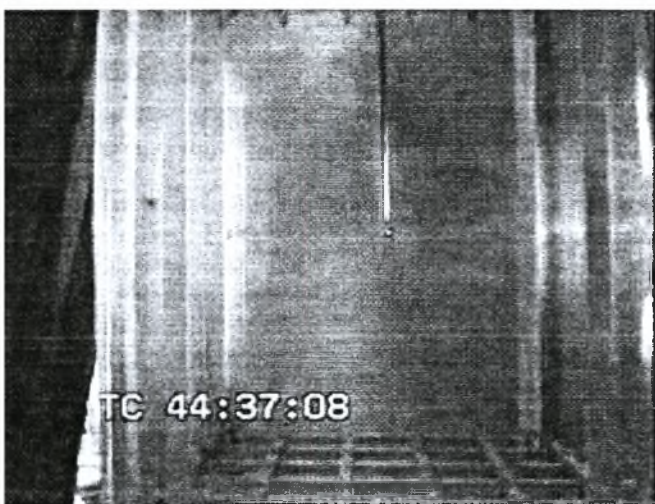
3.8 Hz



4.4 Hz



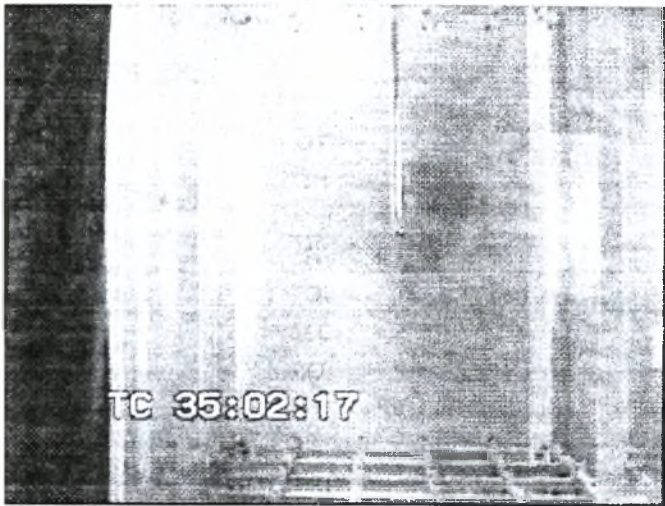
5.2 Hz



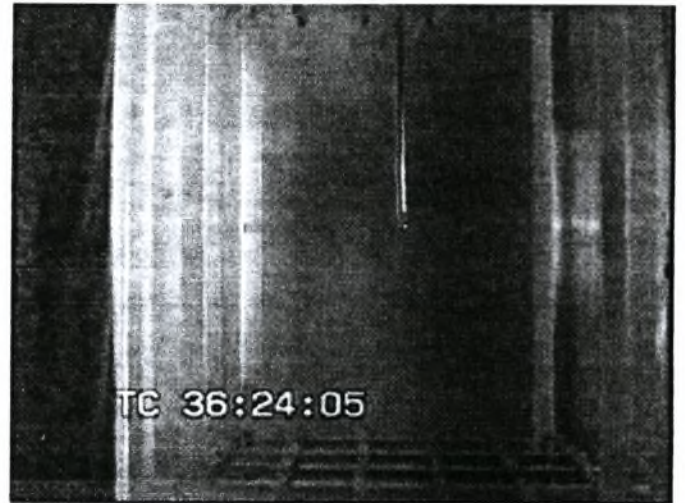


5<sup>η</sup> χρονική στιγμή

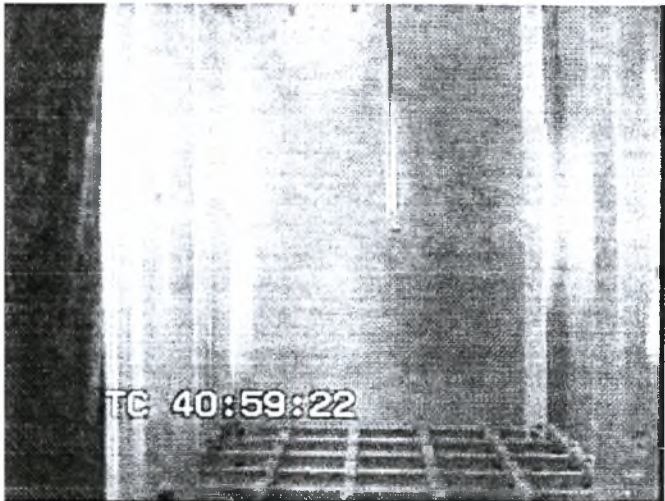
0 Hz



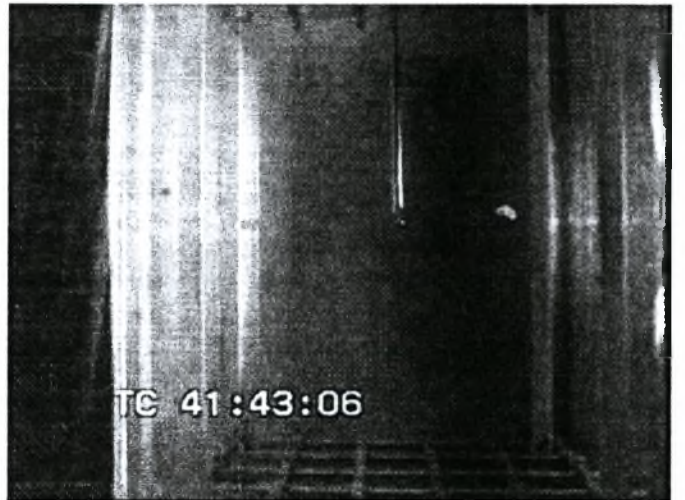
3.1 Hz



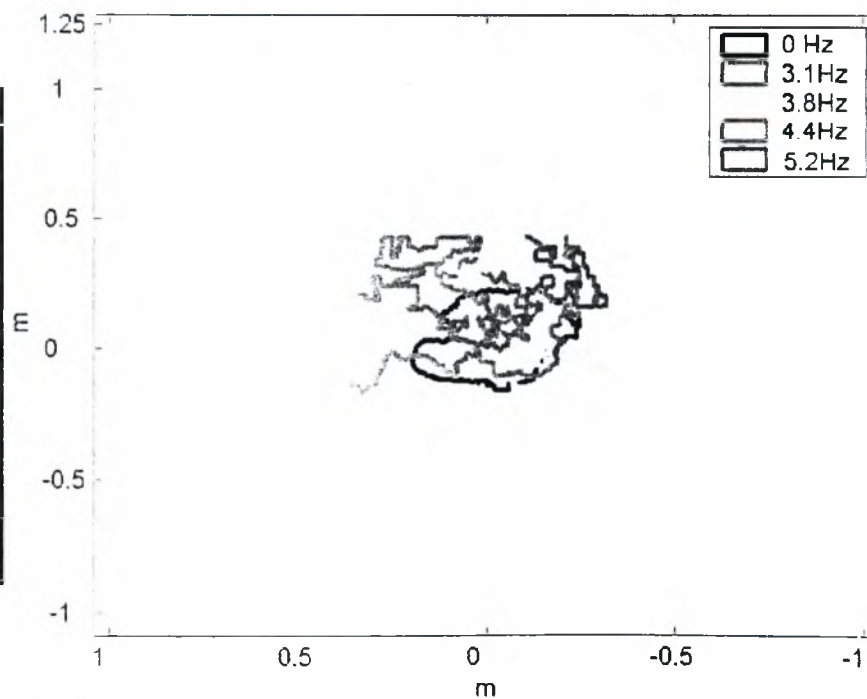
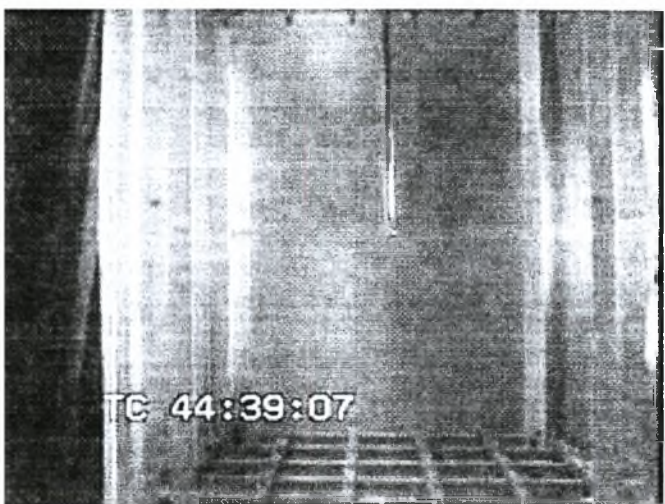
3.8 Hz



4.4 Hz



5.2 Hz



## **7.3 Συγκριτική μελέτη διάγνωσης στη διεύθυνση ταλάντωσης Z**

### **7.3.1 Ταλάντωση με συχνότητα 3.1 Hz**

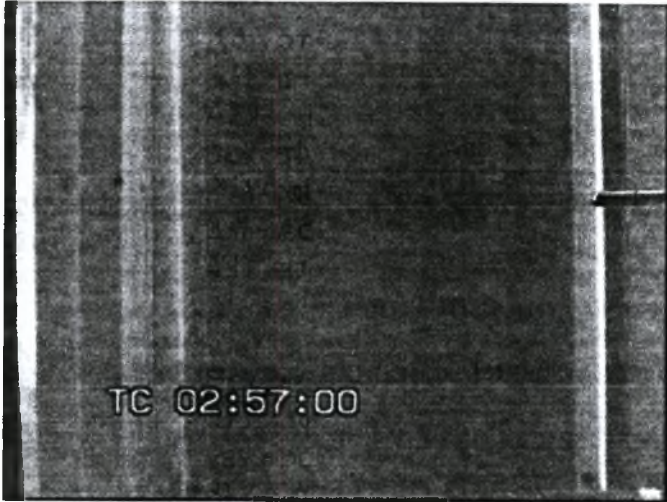
Στην περίπτωση αυτή τοποθετούμε την κάμερα κάθετα στη ροή .

Διοχετεύουμε  $5,5 \times 10^{-3}$  lt methyl blue στο χώρο των πειραματικών δοκιμών με ταχύτητα 1,837264 m/sec και για χρόνο 0.47sec (10 frame από τα 24). Η μελέτη του φαινομένου διαρκεί 10 sec όπου γίνονται λήψεις σε 4 θέσεις, η πρώτη στο κέντρο και οι υπόλοιπες 2 ,4 και 8 cm κάτω από αυτό, με συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων 3.1 Hz.. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται παρακάτω σε 5 χρονικές στιγμές ανά δύο sec η κάθε μια.

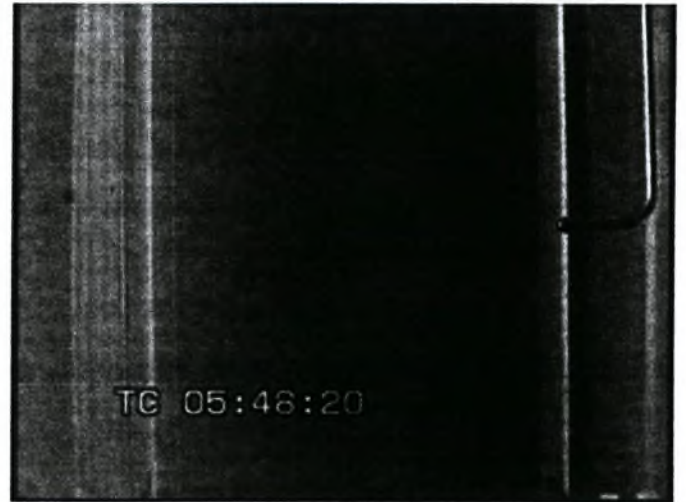


1<sup>H</sup> ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ  
Ταλάντωση 3,1 Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

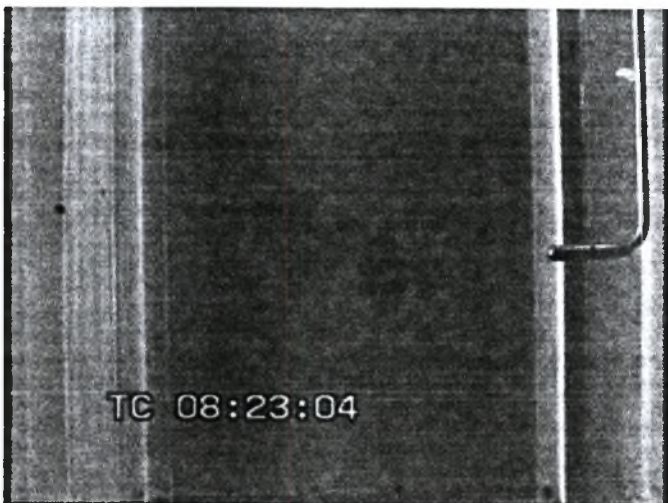
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



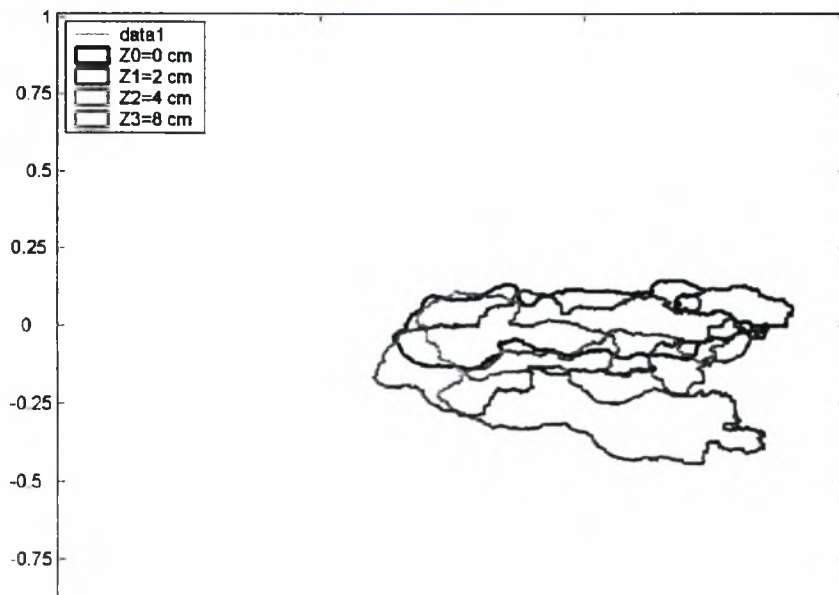
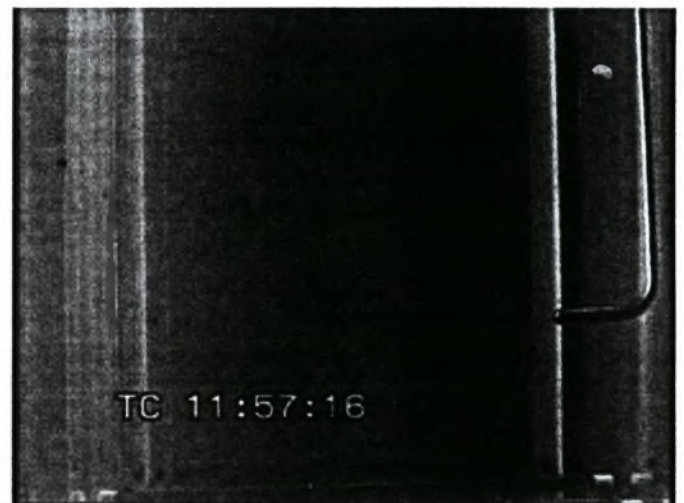
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm

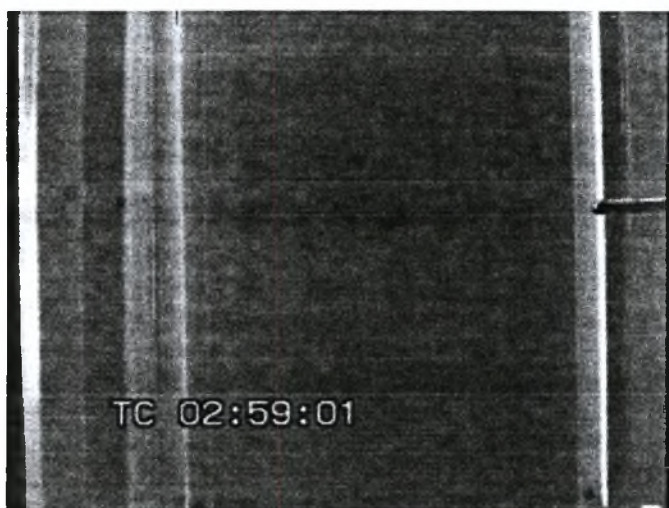


Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm

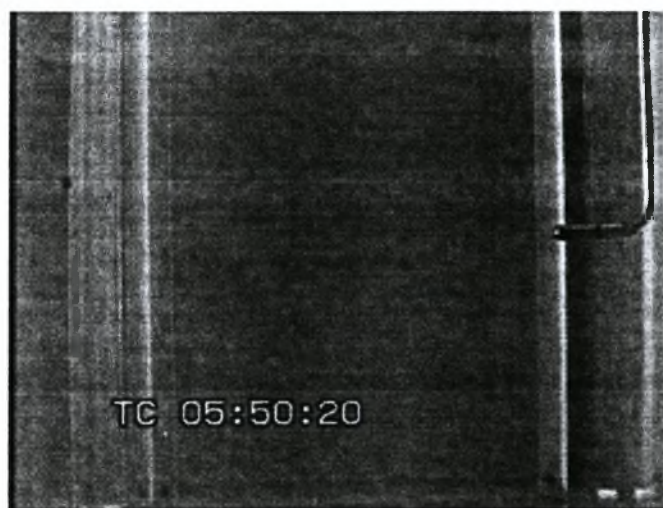


2<sup>H</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 3,1 Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

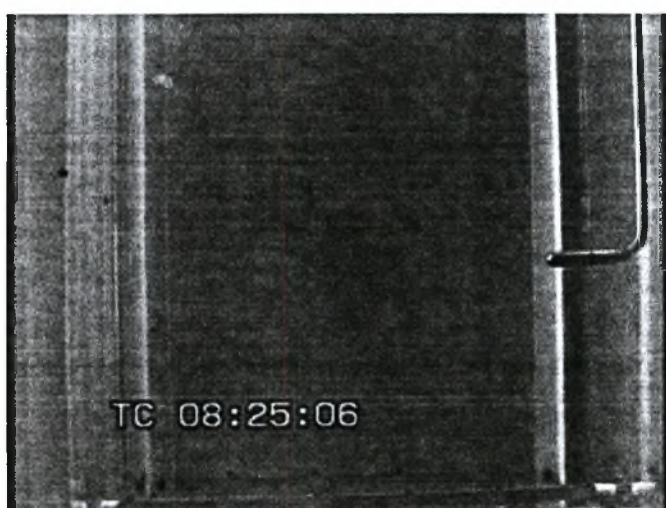
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



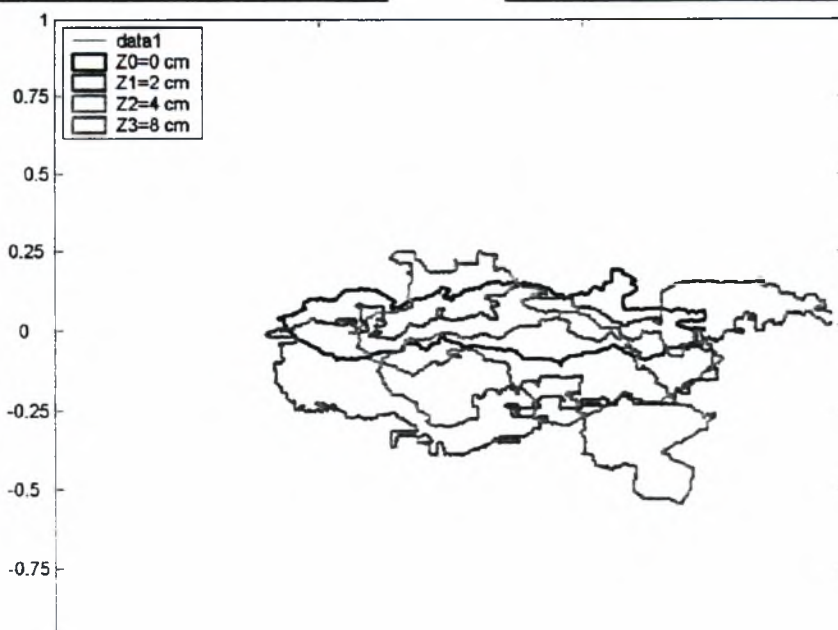
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



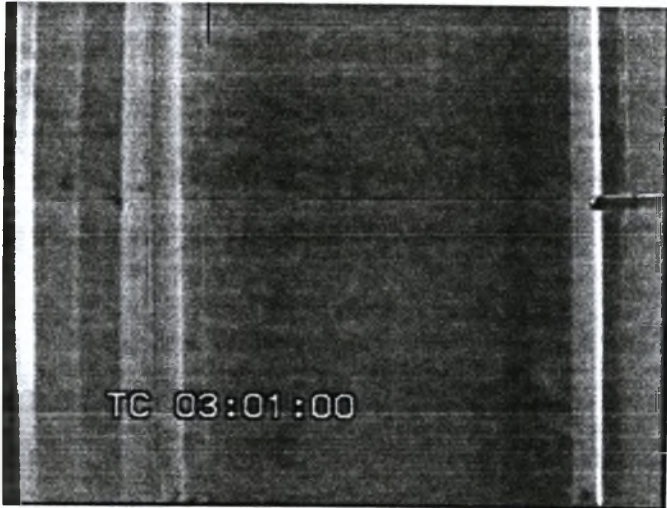
Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm



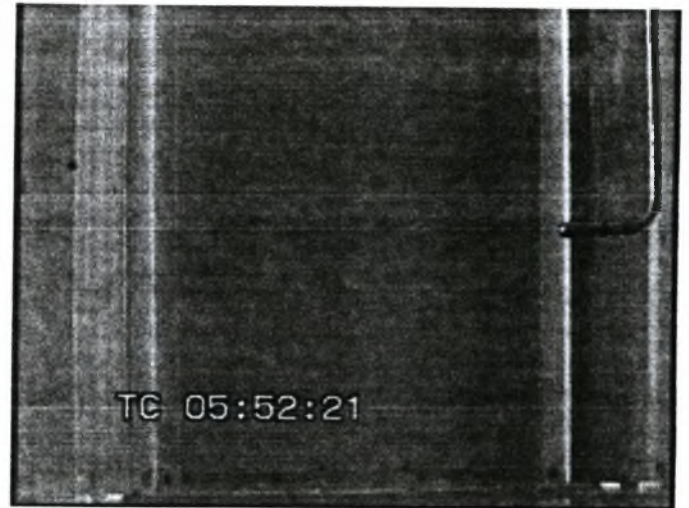


3<sup>η</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 3,1 Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

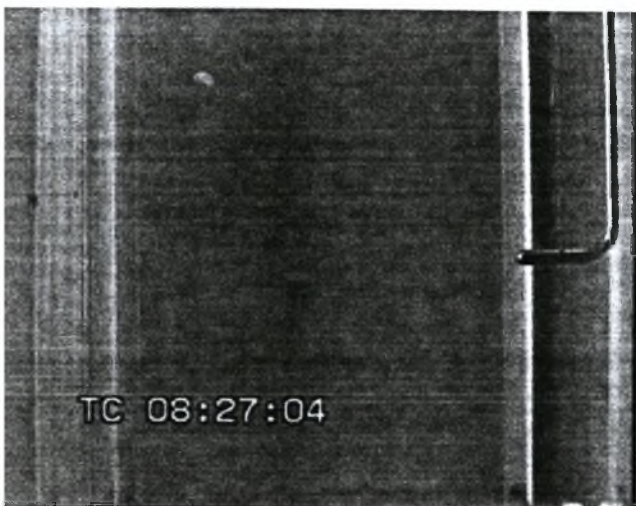
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



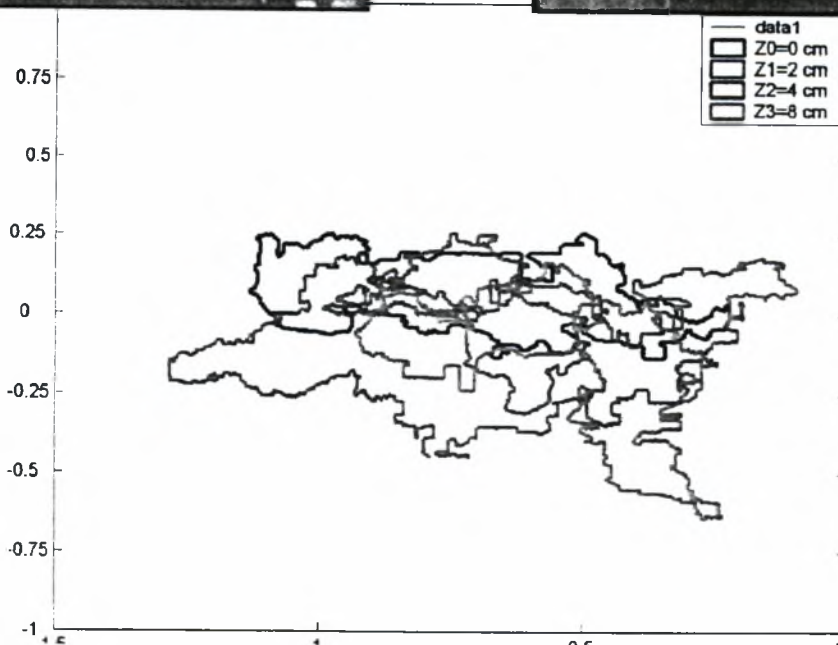
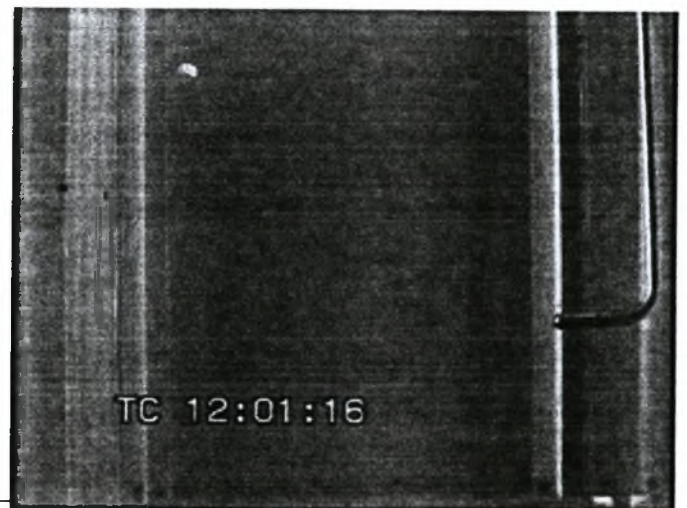
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



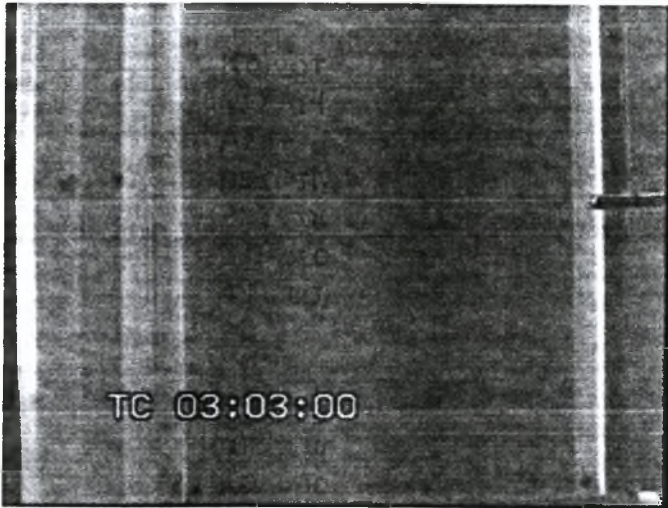
Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm





4<sup>H</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 3,1 Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

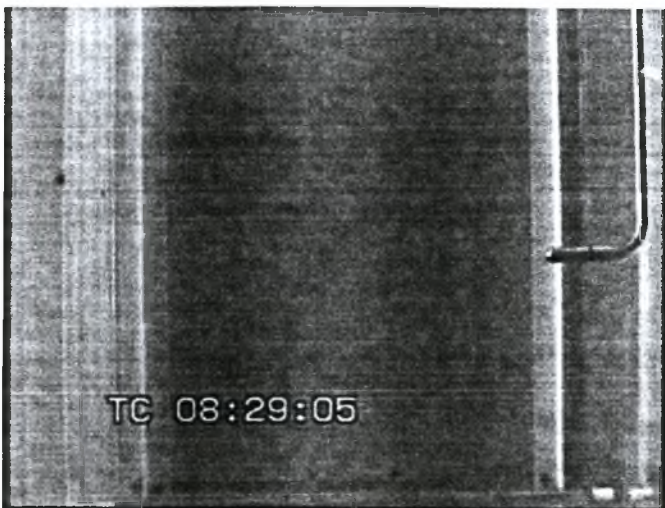
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



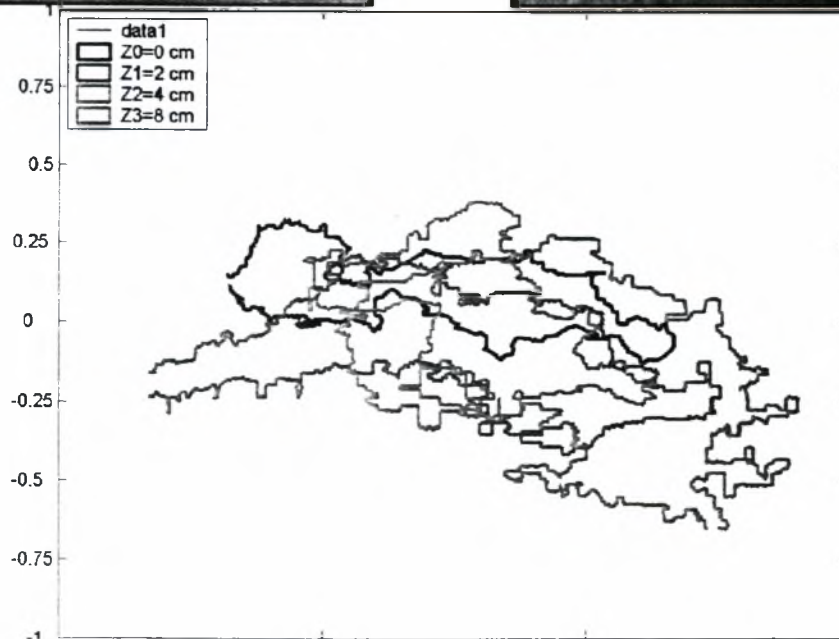
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm

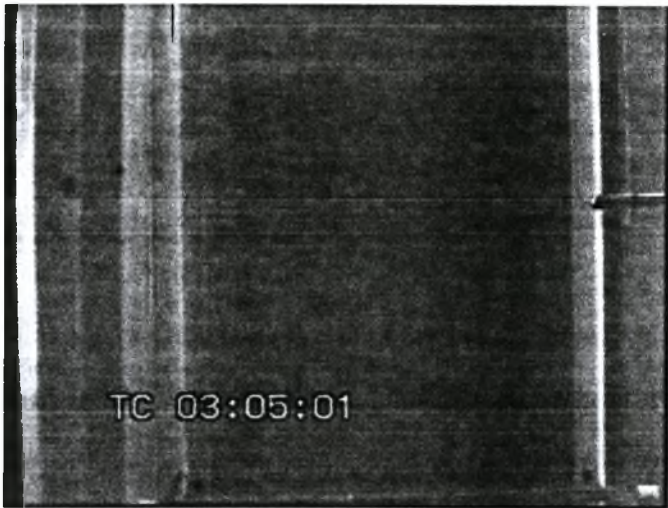


Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm

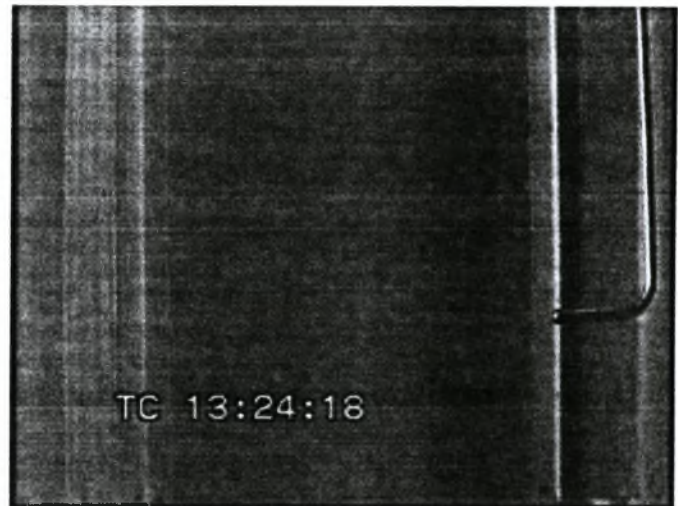


5<sup>η</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 3,1 Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



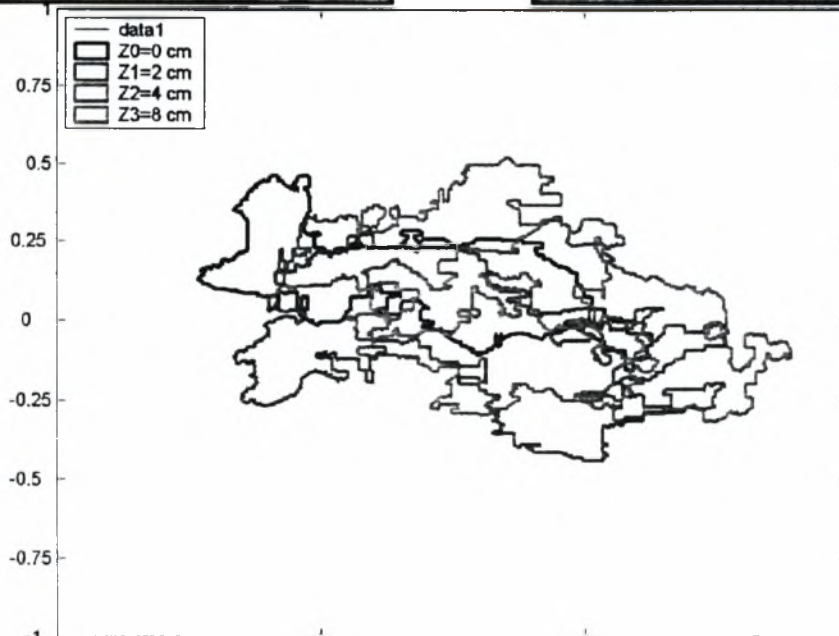
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm



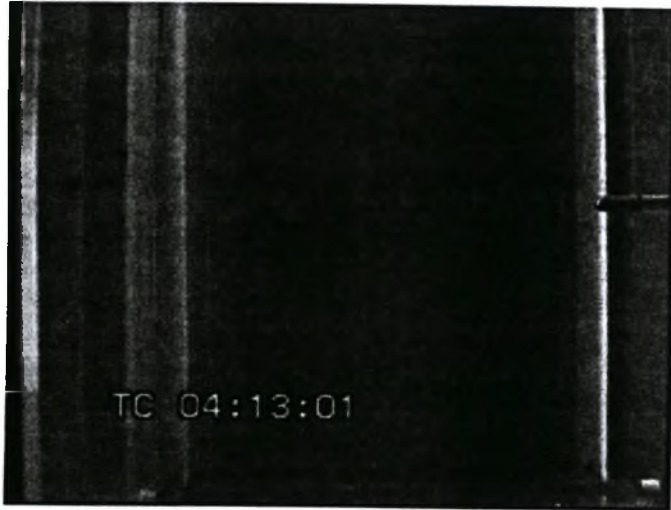


### **7.3.2 Ταλάντωση με συχνότητα 5.2 Hz**

Η περίπτωση αυτή διαφέρει από την προηγούμενη μόνο στη συχνότητα ταλάντωσης που πραγματοποιείται η λήψη ,η οποία εδώ είναι 5.2Hz. Έτσι τοποθετούμε την κάμερα και πάλι κάθετα στη ροή . Διοχετεύουμε  $5,5 \times 10^{-3}$  lt methyl blue στο χώρο των πειραματικών δοκιμών με ταχύτητα 1,837264 m/sec και για χρόνο 0.47sec (10 frame από τα 24). Η μελέτη του φαινομένου διαρκεί 10 sec όπου γίνονται λήψεις σε 4 θέσεις, η πρώτη στο κέντρο και οι υπόλοιπες 2 ,4 και 8 cm κάτω από αυτό. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται παρακάτω σε 5 χρονικές στιγμές ανά δύο sec η κάθε μια.

1<sup>H</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 5.2Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

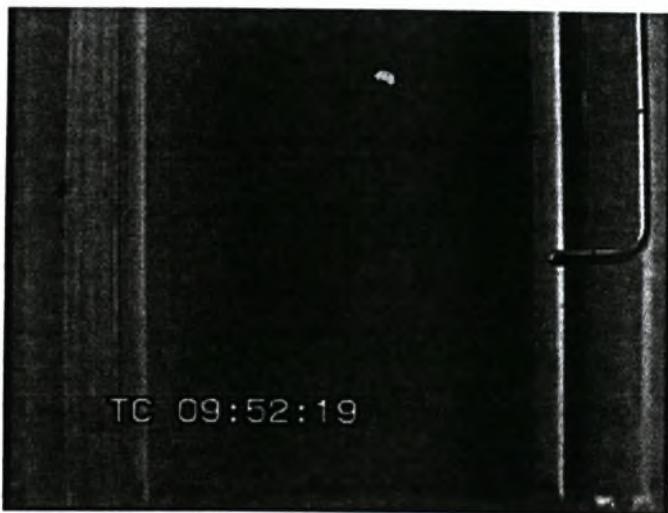
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



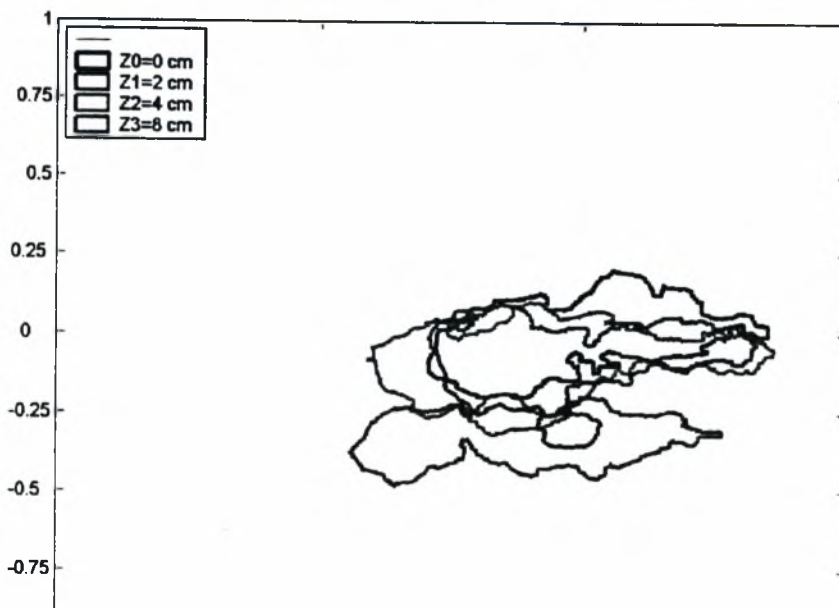
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm

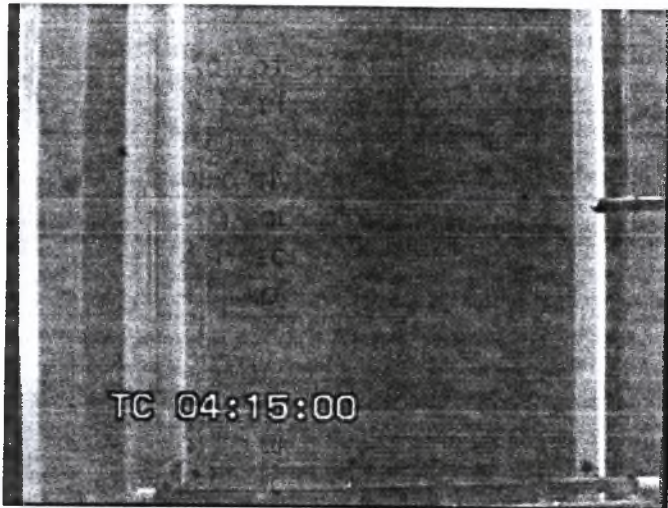


Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm



2<sup>η</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 5.2Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

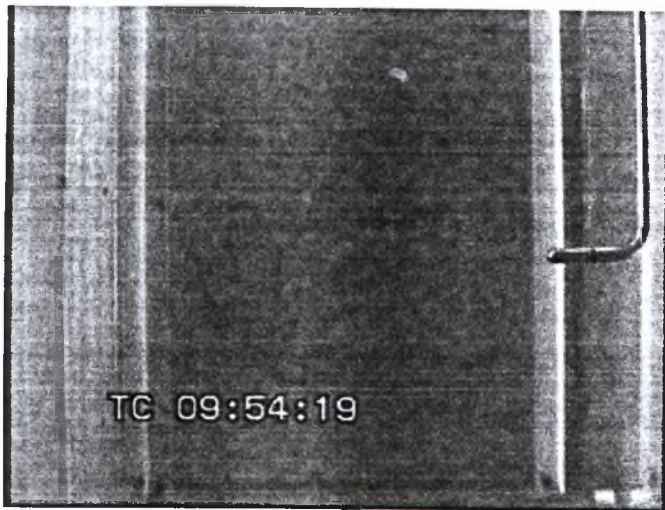
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



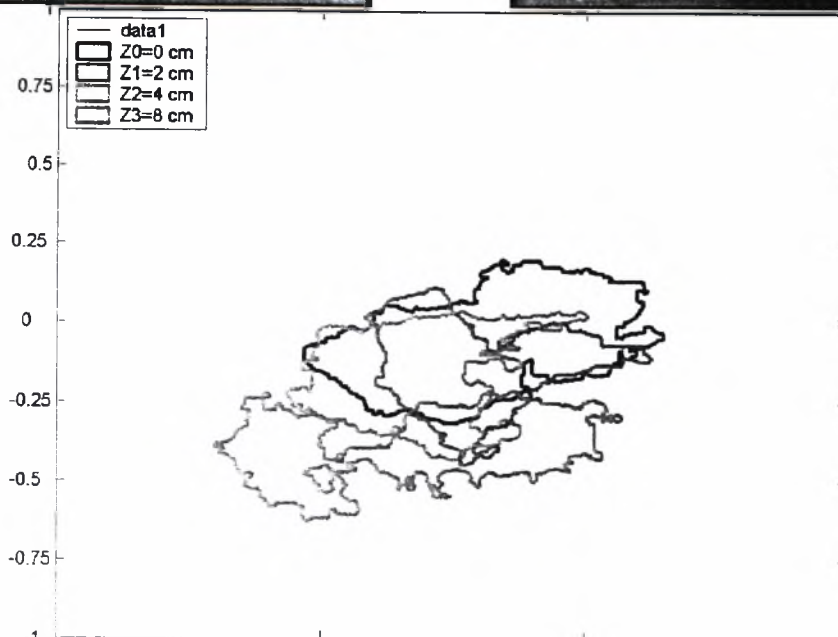
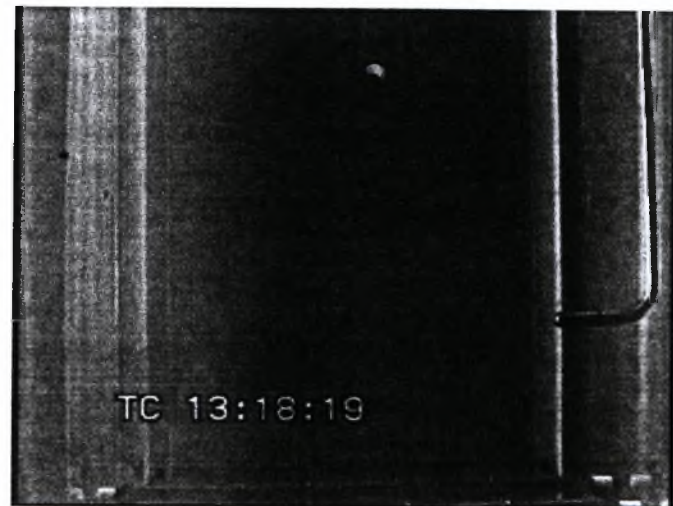
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



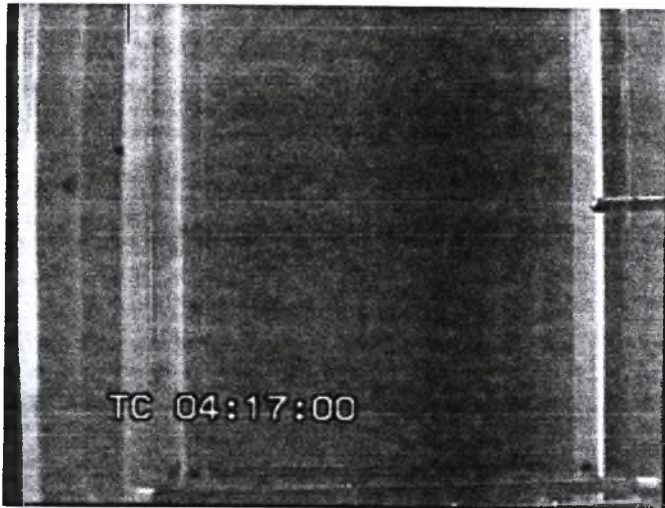
Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm



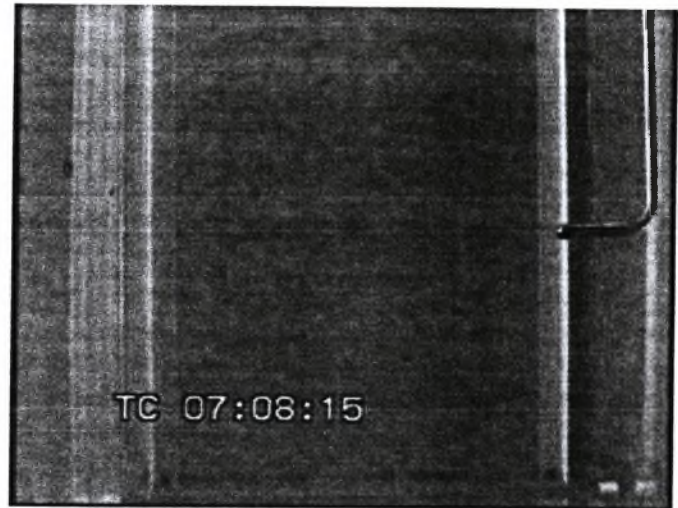


3<sup>η</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 5.2Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



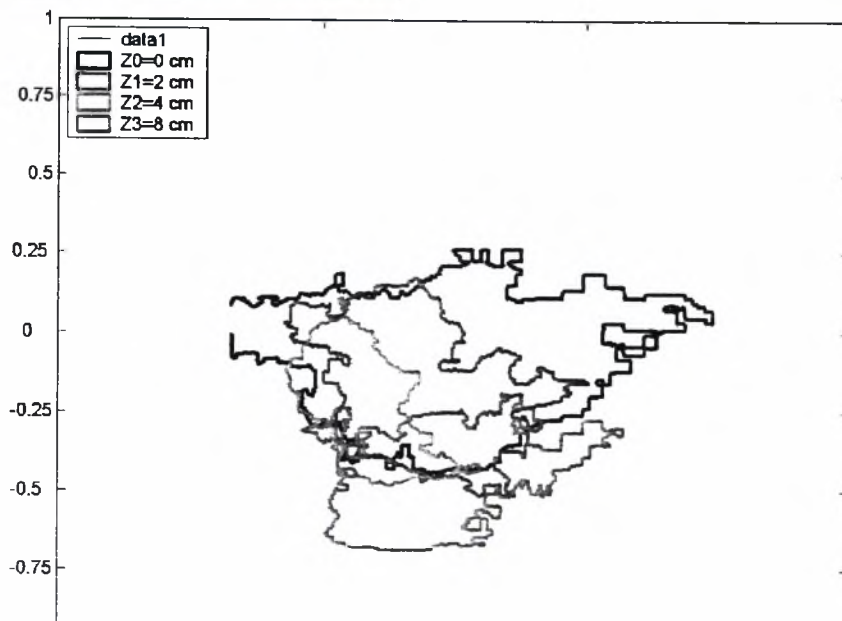
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



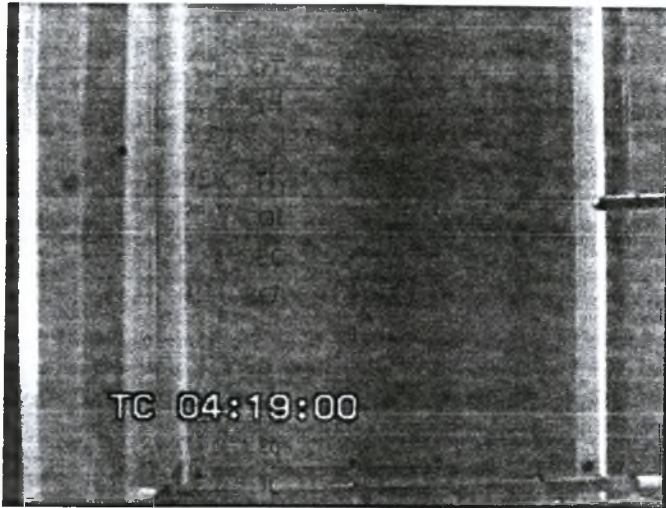
Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm





4<sup>H</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 5.2Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

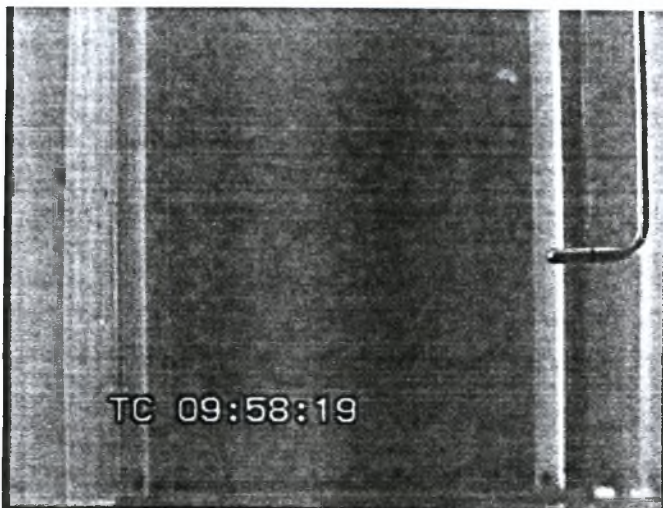
Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



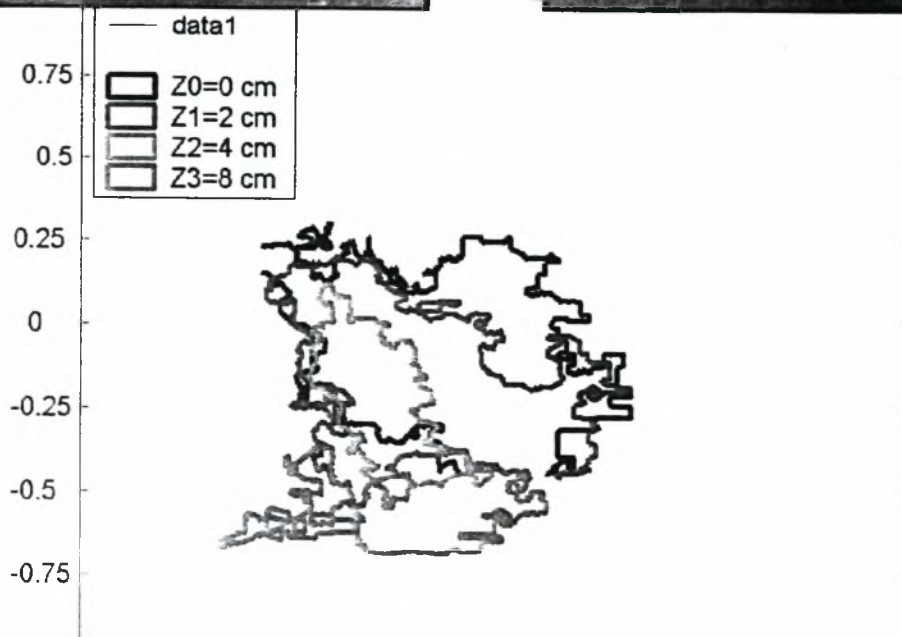
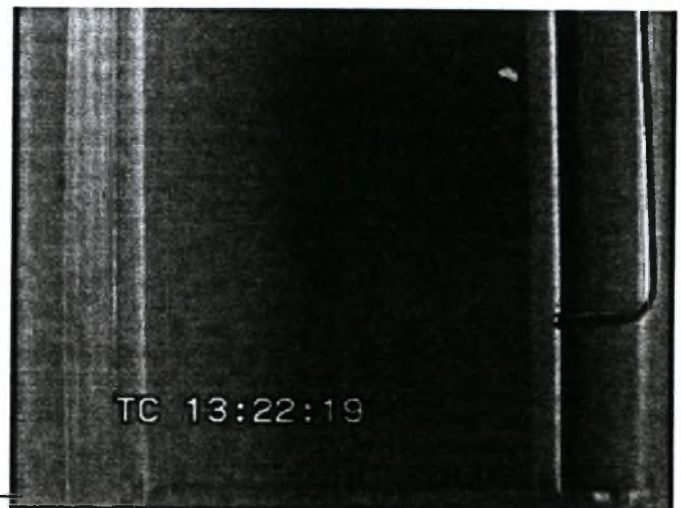
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



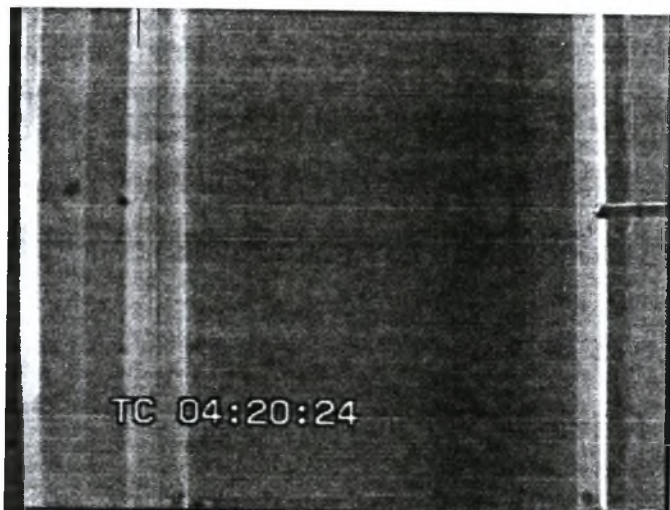
Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm



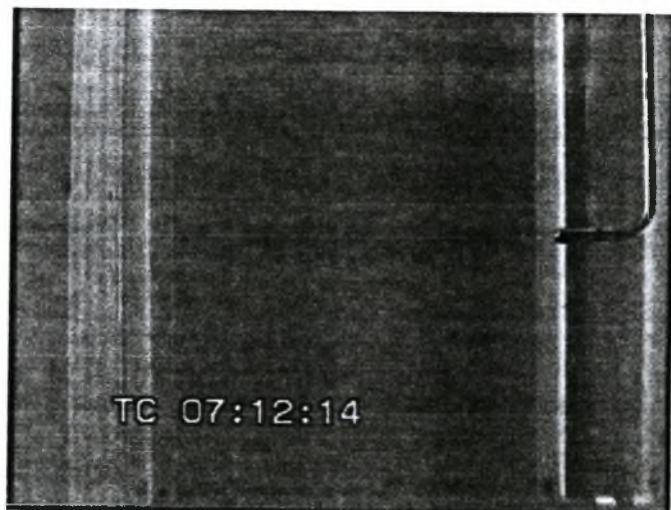


5<sup>η</sup> χρονική στιγμή  
Ταλάντωση 5.2Hz & Χρώμα 5,5x10<sup>-3</sup>lt

Θέση Jet Z<sub>0</sub>=0cm



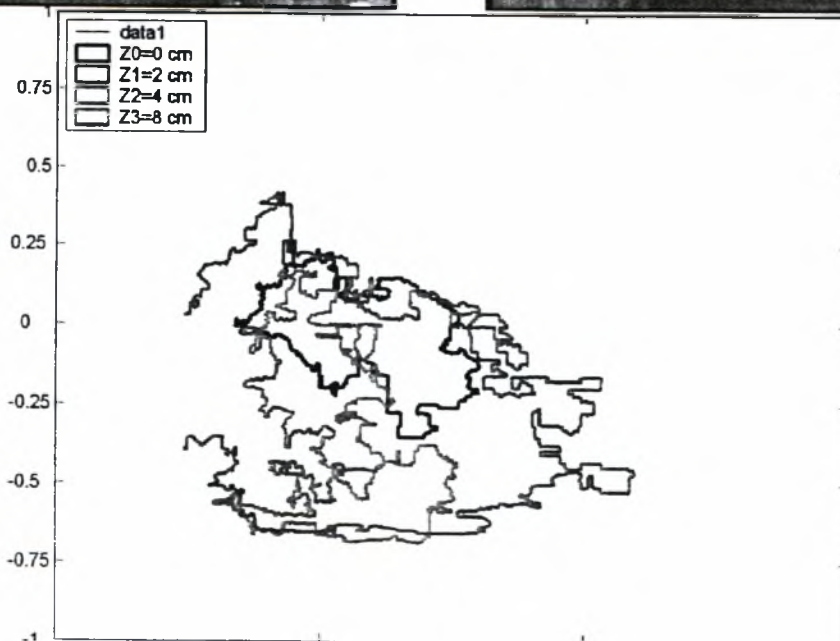
Θέση Jet Z<sub>1</sub>=2cm



Θέση Jet Z<sub>2</sub>=4cm



Θέση Jet Z<sub>3</sub>=8cm



## Συμπεράσματα

Δημιουργήθηκε μια τυρβώδη ροή με παλλόμενα πλέγματα που έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- 1) Καλή ομοιομορφία στην ένταση της τύρβης (rms) στο κεντρικό χώρο ανάμεσα στα δυο παλλόμενα πλέγματα.
- 2) Σχετικά καλή ομοιομορφία στην ακτινική διεύθυνση R γύρω από το κεντρικό σημείο μέτρησης.
- 3) Η διασπορά της χρωστικής ουσίας μέσα σε αυτή τη τυρβώδη ροή αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας που πάλλονται τα πλέγματα. Αυτό συμφωνεί με την βιβλιογραφία που λέει ότι η ένταση της τύρβης αυξάνει με τη συχνότητα ταλάντωσης και όπως γνωρίζουμε η τύρβη δημιουργεί μεγαλύτερη διασπορά.

Η διάταξη στην οποία έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) Λόγω της κατακόρυφης ταλάντωσης τα μετρητικά όργανα παρεμβάλλονται ανάμεσα στα πλέγματα της διάταξης . Ακόμα δεν είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί κάποιος μετρητικός αισθητήρας με διαστάσεις μεγαλύτερες από το μέγεθος του διάκενου του πλέγματος. Για να μην υπάρχει αυτό το πρόβλημα πρέπει τα πλέγματα να πάλλονται κατά την οριζόντια διεύθυνση.
- 2) Τα πλέγματα βρίσκονται σε φάση κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας δευτερογενούς ροής η οποία γίνεται αντιληπτή από την αργή κίνηση της χρωστικής ουσίας προς απάνω και προς τα κάτω.



## Βιβλιογραφία

- Allen, J.R.L., (1970).** Physical Processes of Sedimentation. George Allen & Unwin, London.
- Bagnold, R.A., (1956).** The flow of cohesionless grains in fluids. Phil Trans Roy Soc Lond, No. 964, Vol. 149, pp 235-297.
- Barnett, P.R.O., Watson J., Connelly D., (1984).** A multiple corer for taking virtually undisturbed samples from shelf, bathyal and abyssal sediments. Oceanologica Acta 7 : 399-408
- Basset, A.B., (1888).** On the motion of a sphere in a viscous fluid. Phil Trans Roy Soc Lond, Ser A, Vol 179, pp 43-63.
- Batchelor, G.K., (1953).** The theory of homogeneous turbulence. Cambridge University Press, London.
- Cao, Z., (1997).** Turbulent bursting-based sediment entrainment function. J. Hydraulic Engineering, Vol. 123, No. 3, pp 233-236.
- Cole, B.E., Thompson, J.K., Cloern, J.E., (1992).** Measurement of filtration rates by infaunal bivalves in a recirculating Hume, Mar. Biol. 113, pp. 219-225.
- Crespo, D. and Redondo, J.M., (1989).** A simple experiment on the interaction between gravity currents and sediment transport. Rev. Geofísica, 45, pp 203-210.
- Dalziel, S.B., (1993).** Rayleigh-Taylor instability: Experiments with image analysis. Dyn. of Atmospheres and Oceans, 20, pp.127-153.
- Engclund, F. and Hansen, E., (1972).** A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Fernando, H.J.S., (1991).** Turbulent mixing in stratified fluids. Annu. Rev. Fluid Mech., 23, pp 455-493.
- Gibbs, R.J., Mathews, M.D. and Link, D.A., (1971).** The relationship between sphere size and settling velocity. J. Sed. Petrology, Vol 41, pp 7-18.
- Hanes, D.M. and Inman, D.L., (1985).** A dynamic yield criterion for granular-fluid flows. J. Geophys. Res., Vol 90, No B5, 3670-3674.
- Hopfinger, E.J. and Toly, J.A. (1976).** Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. J. Fluid Mech., vol. 78, part 1, pp. 155-175
- Hunt, J.C.R. and Graham, J.M.R., (1978).** Free-stream turbulence near plane boundaries. J. Fluid. Mech., Vol. 84, part 2, pp 209-235.
- Huppert, H.E., Turner, J.S. and Halvorth, M.A., (1995).** Sedimentation and entrainment in dense layers of suspended particles stirred by an oscillated grid. J. Fluid Mech. vol. 289, pp. 263-293.
- Jones, S.E., Jago, C.F. and Simpson, J.H., (1996).** "Modeling Suspended Sediment Dynamics in Tidally Stirred and Periodically Stratified Waters: Progress and Pitfalls". Mixing in Estuaries and Coastal

Seas. Coastal and Estuarine Studies Volume 50, Pag. 302-324. American Geophysical Union.

**Kit, E., Strang, E. J., and Fernando, H. J. S.: (1997)** Measurement of turbulence near shear-free density interfaces, *J. Fluid Mech.*, 334, 293–314.

**Kundu, P., (1990)**. Fluid Mechanics. Academic Press, Inc.

**Linden, P.F., (1973)**. The interaction of vortex rings with a sharp density interface: a model for turbulent entrainment. *J. Fluid Mech.*, 60, pp 467-480.

**Madsen, O.S. and Grant, W.D. (1976)**. Sediment transport in the coastal environment. Report No209, Ralph M Parsons Lab, MIT.

Magnus, G , (1853). Poggendorfs annale der physikund chemie, Vol 88, No 1.

**Mann, J., Ott, S. and Andersen, J. S., (1999)**. Experimental study of relative, turbulent diffusion. Technical Report Rise-R-1036(EN), Riso National Laboratory.

**Matas, J. and Redondo, J.M., (2000)**. Some observations of entrainment in grid stirred stratified flows. *Advances in Turbulence*, Redondo J.M. and A. Babiano (eds).

**Redondo, J. M., Enriquez, P.M, (2002.)**. Start of Sediment Motion and Resuspension in Turbulent Flows: Applications of Zero-Mean Flow Grid Stirred Turbulence on Sediment Studies.

**Redondo, J. M., Sanchez, M.A., (2000)**. Laboratory measurements of sediment liftoff thresholds and vertical fluxes in the Gulf of Lyons. *Advances in Turbulence*. Redondo J.M. and A. Babiano (eds).

**Redondo, J.M., (1987)**. Difusion turbulenta en fluidos estratificados. Ph.D. Thesis, University of Barcelona.

**Redondo, J.M., Sanchez, M.A., Castilla, R., (1995)**. Lift Off and Entrapment of Sediments.- Coastal Dynamics '95. Proceedings of the International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments (1995, Gdansk, Poland). Edited by William R. Dally and

**Rvszard B. Zeidler.Rouse, H. and Dodu, J., (1955)**. Turbulent diffusion across a density discontinuity. *La Houille Blanch* 10, pp. 314-321.

**Sanchez, M.A. and Redondo, J.M., (1998)**. Observations from grid stirred turbulence. *Applied Scientific Research* 59: 243-254.

**Schraven, A., (2001)**. Comparing ADV and visual measurements. Technical Report. UPC-Erasmus. Barcelona

**Shaaff, E., (1999)**. Remise en suspension des sediments du Golfe du Lion: Experiences et moderation. D.E.A. Sciences de l'Environnement Marin. Universite de la Mediterranee. U.F.R. Sciences.

**Shields, A., (1936)**. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitt Preuss Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, No 26. Berlin.

- Silvester, R. and Hsu, J.R.C., (1993).** Coastal stabilization: Innovative concepts. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Swart, D.H., (1974).** Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydr. Lab. Publ., No 131.
- Tennekes, H. and Lumley, J.L., (1990).** A first course in turbulence. the MIT Press. U.S.A.
- Thompson, S.M. and Turner, J.S., (1975).** Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. J. Fluid Mech., vol. 67, part 2, pp. 349-368.
- Thorpe, (1966).** Internal gravity waves. PhD Thesis Cambridge University.
- Tsai, C. H. and Lick, W. (1986).** A portable device for measuring sediment resuspension. J. Great Lakes Res. 12(4) 314 - 321.
- Turner, J.S., (1968).** The influence of molecular diffusivity on turbulent entrainment across a density interface. J. Fluid Mech., vol. 33, part4, pp. 639-656
- Turner, J.S., (1973).** Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge University Press,
- Virto, L., (1991).** Mecanica de Fluids. Fonaments I. Edicions Universitat [Politechnica Catalunya.
- Xuequan, E. and Hopfinger, E.J., (1987).** Stratification by solid particle suspensions. Proc. IUTAM symposium. USC USA. pp. 1-8.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$b$  = εύρος δέσμης (jet)

$c_1$  = σταθερά

$c_2$  = σταθερά

$c_3$  = σταθερά

const = σταθερά

$D$  = διάμετρος jet (mm)

$d$  = διατομή ράβδων (cm)

$F$  = γωνία (μοίρες)

HF = Hydrogen Fluoride

$I_{\text{mean}}$  = μέση φωτεινότητα

$L$  = μήκος

$M$  = μέγεθος διακένου πλέγματος (Mesh size)

PSD = πυκνότητα φάσματος

$Q$  = παροχή ρευστού ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$R$  = ωμική αντίσταση ( $\Omega$ )

$Re$  = αριθμός Reynolds ( $Lu/v$ )

RGB = (Red),(Green),(Blue)

$s$  = εύρος ταλάντωσης (mm)

$t$  = χρόνος (sec)

$u$  = ταχύτητα (m/s)

$V_{\text{mean}}$  = μέση τιμή (volts)

$V_{\text{rms}}$  = τυπική απόκλιση (volts)

$Z$  = κατακόρυφη απόσταση από το κέντρο των πλεγμάτων (cm)

$z$  = κατακόρυφη απόσταση από τα πλέγματα (cm)

$\Delta r$  = απόσταση μορίων

$\delta_{\theta}$  = πάχος απώλειας ορμής

$\varepsilon$  = ποσότητα σκέδασης ενέργειας



$\theta$  = άνοιγμα δέσμης (μοίρες )

$\nu$  = κινηματικό ιξώδες ( $m^2/s$ )

$\omega$  = συχνότητα ταλάντωσης (Hz)

$\langle \varepsilon \rangle$  = dissipation απώλεια ενέργειας

CONVGRAY.m

```
%% This is an .m file for image processing
% This .m file calculate the mean radiation intense of each pixel for each Re
number in flat area
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,s,n]=textread('Input_convgray.txt','%s%f%f%f','headerlines',2);
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'jpg'));
c = fspecial('gaussian',n(j),s(j));
convpinakas=conv2(pinakas,c,'same');
eikona=uint8(convpinakas);
imwrite(eikona,strcat('conv',first1,int2str(num)),'.jpg')
clear pinakas convpinakas c eikona
    end
clear firstV first1 num
end
toc
```

## GraphFFTgray2.TXT

GraphFFTgray2.m

```

tic
clear
echo off
[nameimage,xstart,xend,pacex,ystart,yend,pacey]...
=textread('Input_graphFFTgray2.txt','%s%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameimage)
nameimageV=nameimage(i);
nameim=char(nameimageV);
load(nameim)
for x=xstart(i)-xinitial(1)+1:pacex(i):xend(i)-xinitial(1)+1
    for y=ystart(i)-yinitial(1)+1:pacey(i):yend(i)-yinitial(1)+1
        figure(y)
        for t=1:Nimages(1)
            Powerfftnewpinakasxoyotpoint(t)=Powerfftnewpinakasxoyot(t,x,y);
        end
        grid on

plot(frequencyt(1:(fix(t/2)+1)),Powerfftnewpinakasxoyotpoint(1:(fix(t/2)+1)),'b'
)
        grid on
        %legend('Blue',1);
        %axis([tvector(1) tvector(end) 0. 1.])
        xlabel('Frequency (Hz)')
        ylabel('PS')
        title(strcat('FFT-GRAPH X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'
Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)))

saveas(y,strcat('GRAPH_FFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2str
(y+yinitial(1)-1),'.','fig'))

saveas(y,strcat('GRAPH_FFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2str
(y+yinitial(1)-1)),'bmp')
        close
        figure(y)
        grid on

loglog(frequencyt(1:(fix(t/2)+1)),Powerfftnewpinakasxoyotpoint(1:(fix(t/2)+1)),'
b')
        grid on
        %legend('Blue',1);
        %axis([tvector(1) tvector(end) 0. 1.])
        xlabel('Frequency (Hz)')
        ylabel('P.S')
        title(strcat('LOGFFT-GRAPH X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'
Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)))

saveas(y,strcat('GRAPH_LOGFFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2
str(y+yinitial(1)-1),'.','fig'))

saveas(y,strcat('GRAPH_LOGFFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1),'_Y=',int2
str(y+yinitial(1)-1)),'bmp')
        close
        clear Powerfftnewpinakasxoyotpoint
    end
end
clear nameimageV nameim x y t xinitial yinitial xfinal yfinal frequencyt
Powerfftnewpinakasxoyot
end
clear
toc

```

## gray2.TXT

```

gray2.m
% This is an .m file for image processing
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,time,distance,x,y,xs,xe,ys,ye,xo,yo,xf,yf]...
    =textread('Input_gray2.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
bath=double(imread('convA','jpg'))';
[k,m]=find(bath(xo:xf,yo:yf)==min(min(bath(xo:xf,yo:yf))));
xmin=xo+k(1)-1;
ymin=yo+m(1)-1;
clear k m
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
for num=1:Nimages(j)
pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'jpg'))';
[k,m]=find(pinakas(xo:xf,yo:yf)==min(min(pinakas(xo:xf,yo:yf))));
xpinakasmin=xo+k(1)-1;
ypinakasmin=yo+m(1)-1;
dx=xpinakasmin-xmin;
dy=ypinakasmin-ymin;
clear k m xpinakasmin ypinakasmin
if dx>0 & dy>0
for k=1:384-dx
for m=1:288-dy
pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m+dy);
end
end
pinakasnew(384-dx+1:384,288-dy+1:288)=0;
end
if dx<0 & dy<0
for k=1:384+dx
for m=1:288+dy
pinakasnew(k-dx,m-dy)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(1:-dx,1:-dy)=0;
end
if dx>0 & dy<0
for k=1:384-dx
for m=1:288+dy
pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k+dx,m);
end
end
pinakasnew(384-dx+1:384,1:-dy)=0;
end
if dx<0 & dy>0
for k=1:384+dx
for m=1:288-dy
pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m+dy);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288-dy+1:288)=0;
end
if dx>0 & dy==0
for k=1:384-dx
for m=1:288
pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m);
end
end
pinakasnew(384-dx+1:384,288)=0;
end
if dx<0 & dy==0
for k=1:384+dx
for m=1:288

```



gray2.TXT

```
pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288)=0;
end
if dx==0 & dy>0
for k=1:384
for m=1:288-dy
pinakasnew(k,m)=pinakas(k,m+dy);
end
end
pinakasnew(384,288-dy+1:288)=0;
end
if dx==0 & dy<0
for k=1:384
for m=1:288+dy
pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(384,1:-dy)=0;
end
if dx==0 & dy==0
pinakasnew=pinakas;
end
clear pinakas
tempinakas=bath(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j))-pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j));
newpinakas(:,:,num)=tempinakas;
clear pinakasnew tempinakas k m dx dy
end
%-----The Ratio Between Pixel And mm-----
analogx=x(j)/384.;
analogy=y(j)/288.;
for i=1:384
xvector(i)=i*analogx+distance(j);
end
clear i
for i=1:288
yvector(i)=i*analogy;
end
%-----The Vector Of Time In Sec-----
tvector=(time(j):time(j):Nimages(j)*time(j));
%-----Save-----
%-----
save(strcat('c:\MATLAB6p1\work\',strcat('gray2_',first1)), 'time', 'distance'...
, 'xvector', 'yvector', 'tvector', 'newpinakas', 'xs', 'xe', 'ys', 'ye', 'Nimages')
clear num first1 firstV xvector yvector tvector i analogx analogy newpinakas
end
clear
toc
```

meanfot.m

```

% This is an .m file for image processing
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,time,x,y,diam,xaxis,yaxis,xs,xe,ys,ye,xo,xf,yo,yf,xpixels,pacex,xp
ixele,ypixels,pacey,ypixele,cd]...

=textread('Input_meanfot.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f',
headerlines',2);
bath=double(imread('convA','jpg'))';
[k,m]=find(bath(xo(1):xf(1),yo(1):yf(1))==min(min(bath(xo(1):xf(1),yo(1):yf(1)))
));
xmin=xo(1)+k(1)-1;
ymin=yo(1)+m(1)-1;
clear k m
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
        pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'jpg'))';
        [k,m]=find(pinakas(xo(1):xf(1),yo(1):yf(1))==min(min(pinakas(xo(1):xf(1),yo(1):y
f(1)))));
        xpinakasmin=xo(1)+k(1)-1;
        ypinakasmin=yo(1)+m(1)-1;
        dx=xpinakasmin-xmin;
        dy=ypinakasmin-ymin;
        clear k m xpinakasmin ypinakasmin
        if dx>0 & dy>0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288-dy
                    pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m+dy);
                end
            end
            pinakasnew(384-dx+1:384,288-dy+1:288)=0;
        end
        if dx<0 & dy<0
            for k=1:384+dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k-dx,m-dy)=pinakas(k,m);
                end
            end
            pinakasnew(1:-dx,1:-dy)=0;
        end
        if dx>0 & dy<0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k+dx,m);
                end
            end
            pinakasnew(384-dx+1:384,1:-dy)=0;
        end
        if dx<0 & dy>0
            for k=1:384+dx
                for m=1:288-dy
                    pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m+dy);
                end
            end
            pinakasnew(1:-dx,288-dy+1:288)=0;
        end
        if dx>0 & dy==0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288
                    pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m);
                end
            end
        end
    end
end

```

## meanfot.TXT

```

end
pinakasnew(384-dx+1:384,288)=0;
end
if dx<0 & dy==0
for k=1:384+dx
for m=1:288
pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288)=0;
end
if dx==0 & dy>0
for k=1:384
for m=1:288-dy
pinakasnew(k,m)=pinakas(k,m+dy);
end
end
pinakasnew(384,288-dy+1:288)=0;
end
if dx==0 & dy<0
for k=1:384
for m=1:288+dy
pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(384,1:-dy)=0;
end
if dx==0 & dy==0
pinakasnew=pinakas;
end
clear pinakas
tempinakas=bath(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j))-pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j));
%-----SYGENTROSH-----
%newpinakas(:, :, num)=tempinakas;
megisto=max(max(tempinakas));
adiastfot(:, :, num)=tempinakas/megisto;
clear pinakasnew tempinakas k m dx dy
end
%-----The Ratio Between Pixel And mm-----
meanadiastfot=mean(adiastfot,3);
analogx=x(j)/384.;
analogy=y(j)/288.;
k=1;
for i=xs(j):xe(j)
xvector(k)=(-(k-1)*analogx+(xaxis(j)-xs(j))*analogx)/diam(j);
k=k+1;
end
clear i k
k=1;
for i=ys(j):ye(j)
yvector(k)=((yaxis(j)-ys(j))*analogy-(k-1)*analogy)/diam(j);
k=k+1;
end
%-----The Vector Of Time In Sec-----
tvector=(time(j):time(j):Nimages(j)*time(j));
%-----Save-----
%-----
for i=ypixels(j)-ys(j)+1:pacey(j):ypixel(j)-ys(j)+1
figure(i)
plot(xvector,meanadiastfot(:,i));
grid on
xlabel('X/D')
ylabel('I mean')
title(strcat('GRAPH_MEANFOT_Y=', num2str(i+ys(j))))
saveas(i, strcat('GRAPH_MEANFOT_Y=', num2str(i+ys(j)), '. ', 'fig'))
close
end
clear i
for i=xpixels(j)-xs(j)+1:pacex(j):xpixel(j)-xs(j)+1

```

meanfot.TXT

```

figure(i)
plot(meanadiastfot(i,:),yvector);
grid on
xlabel('I mean')
ylabel('Y/D')
title(strcat('GRAPH_MEANFOT_X=',num2str(i+xs(j))))
saveas(i,strcat('GRAPH_MEANFOT_X=',num2str(i+xs(j))','.','fig'))
close
end
figure(1)
[cm,hm]=contour(xvector,yvector,meanadiastfot',cd);
%contourf(xvector,yvector,meanadiastfot',10);
%tim=clabel(cm,hm);
xlabel('X/D')
ylabel('Y/D')
colorbar
saveas(1,strcat('ContourMeanfot','.','fig'))
close
save(strcat('C:\MATLAB6p1\work',strcat('meanfot_',first1)),'time','diam'...
,'xaxis','yaxis','xvector','yvector','tvector','meanadiastfot','megisto','adiast
fot','xs','xe','ys','ye','Nimages')
clear num first1 firstv i k newpinakas
end
toc
clear

```



Production\_of\_FFT\_gray2.TXT

```

Production_of_FFT_gray2.m
%This is an .m file for image processing
%This .m file calculate the FFT of h(xo,yo,t) in each xo
%-----
tic
clear
%-----Data Reading-----
%-----
%-----
[names,xinitial,xfinal,yinitial,yfinal,numberofphotos,timedelay]=textread('Input
_of_FFT_gray2.txt','%s%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(names);
nameSV=names(i);
namSV=char(nameSV);
load(namSV);
f1=1;
for m=xinitial(i)-xs(1)+1:xfinal(i)-xs(1)+1
    f2=1;
    for n=yinitial(i)-ys(1)+1:yfinal(i)-ys(1)+1
        for j=1:numberofphotos(i);
newpinakasxoyo(j)=newpinakas(m,n,j);
end
fftnewpinakasxoyot=fft(newpinakasxoyo');
Powerfftnewpinakasxoyot(:,f1,f2)=(fftnewpinakasxoyot.*
conj(fftnewpinakasxoyot))/2;
clear j fftnewpinakasxoyot newpinakasxoyo
f2=f2+1;
end
f1=f1+1;
end
frequent=(0:numberofphotos(i))/(numberofphotos(i)*timedelay(i));
frequencyt=frequent';
Powerfftnewpinakasxoyot(1,,:,)=0.;
%-----Save-----
save(strcat('C:\MATLAB6p1\work\',strcat('fft_',namSV)),...
'Powerfftnewpinakasxoyot','frequencyt','xinitial','yinitial','xfinal','yfinal','
Nimages');
clear j newpinakas fftnewpinakasxoyot newpinakasxoyo frequencyt namSV namesV
frequent Powerfftnewpinakasxoyot m n f1 f2
end
clear
toc

```



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074134

