

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών

Θέμα:

**‘Ανάπτυξη Οπτικής Τεχνικής για τη Μελέτη της
Ροής Λεπτού Υγρού Υμένα’**

Επιμέλεια : Καραγιάννης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

Βόλος, Οκτώβριος 1999

αρ. εισ. 179/ΜΑ.....



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 657/1
Ημερ. Εισ.:
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
1999
ΚΑΡ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
Εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών

Θέμα:

**‘Ανάπτυξη Οπτικής Τεχνικής για τη Μελέτη της
Ροής Λεπτού Υγρού Υμένα’**

Επιμέλεια : Καραγιάννης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

Βόλος, Οκτώβριος 1999

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ένα δύσκολο έργο. Στην προσπάθεια αυτή όμως δεν στάθηκα μόνος, είχα την αμέριστη συμπαράσταση κάποιων ανθρώπων, τους οποίους νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω.

Τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου, για την συνεχή βοήθεια που μου προσέφερε αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Τον υποψήφιο διδάκτορα Μιχάλη Βλαχογιάννη, ο οποίος εκτός από άψογος συνεργάτης μου στάθηκε και ως πραγματικός φίλος. Χωρίς την συμπαράστασή του θα ήταν αδύνατη η εκπόνηση αυτής της μελέτης.

Τους γονείς μου, για την συνεχή βοήθεια αλλά και για την κατανόηση που έδειξαν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, από τους οποίους διδάχθηκα πολλά και οι οποίοι έμειναν κοντά μου στις καλές αλλά και στις κακές στιγμές.

..... Στον Γιάννη και
στον Μάριο.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μια πρώτη προσπάθεια περιγραφής και ποιοτικής μελέτης των δημιουργούμενων κυμάτων με τη χρήση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό, όταν κατά τη ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα επιβληθούν εξωτερικές διαταραχές. Παρόλο που η θεωρητική επίλυση του προβλήματος δεν αποτελεί τον στόχο αυτής της εργασίας, δίδονται οι απλές αναλυτικές σχέσεις που διέπουν τη θεωρία του υγρού υμένα.

Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method) αποτελεί μια μέθοδο μέτρησης του πάχους του υμένα με ακρίβεια μικρομέτρου (μm). Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας, με τη βοήθεια της οποίας υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της έντασης του ορατού φωτός που εκπέμπεται εξαιτίας του υγρού υμένα. Για τον φθορισμό του υμένα είναι απαραίτητη η εισαγωγή κατάλληλης χρωστικής ουσίας.

Για την επίτευξη του σκοπού της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη και διεξήχθη πλήθος μετρήσεων, κατά τις οποίες μεταβάλλονταν κάθε φορά οι παράμετροι του πειράματος. Χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα με διαφορετικά ιζώδη (καθαρό νερό, νερό-γλυκερίνη με 10%, 20%, 30%, 50 % σύσταση κατά βάρος), γωνίες κλίσης του επίπεδου καναλιού (1° - 7°), διαφορετικές συχνότητες επιβολής εξωτερικών διαταραχών (0,16 Hz – 1 Hz), καθώς και μέσοι αριθμοί Re από Re=22 έως Re=200.

Αποδείχθηκε η ικανοποιητική λειτουργία της πειραματικής διάταξης καθώς και της μεθόδου μέτρησης. Αναλύθηκε η συμπεριφορά των δημιουργούμενων κυμάτων σε σχέση με την μεταβολή των παραμέτρων του προβλήματος και στη συνέχεια μετρήθηκαν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των κυμάτων, όπως η συχνότητα εμφάνισής τους, το ύψος και η μέση ταχύτητά τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	7
2.1. ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	7
2.2. ΘΕΩΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	11
2.3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	14
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	20
3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	20
3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ.....	23
3.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ.....	24
3.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ.....	24
3.5. ΨΗΦΙΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	25
3.6. ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ.....	28
3.6.1. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΟΥ.....	28
3.6.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ.....	29
3.7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	32
3.8. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	37
4. ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	41
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	76

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο τοίχωμα αποτελεί ένα φαινόμενο με ποικίλες θεωρητικές προσεγγίσεις, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζεται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Η προαναφερθείσα ροή εμφανίζεται σε συσκευές, όπως συμπυκνωτές και εξατμιστήρες, αλλά και σε στήλες απορρόφησης με δομημένα πληρωτικά υλικά.

Η δημιουργία κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ενώ ταυτόχρονα βρίσκει και μεγάλη πρακτική εφαρμογή, αφού η επιρροή των κυματισμών θεωρείται καθοριστική για τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας τα οποία λαμβάνουν χώρα σε βιομηχανικές συσκευές διεργασιών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια περιγραφής και ποιοτικής μελέτης των δημιουργούμενων κυμάτων με τη χρήση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό, όταν κατά τη ροή λεπτού υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα επιβληθούν εξωτερικές διαταραχές. Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής με θέμα: ‘Φαινόμενα μεταφοράς κατά τη ροή υγρού υμένα σε κυματοειδές τοίχωμα’ του υποψήφιου διδάκτορα Μιχάλη Βλαχογιάννη.

Στη προσπάθεια αυτή δε δίνεται έμφαση στη θεωρητική ανάλυση του προβλήματος, αλλά σε μια πειραματική διαδικασία μέτρησης του υμένα. Ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας δεν ήταν παρών σε όλα τα στάδια της μελέτης, αλλά ασχολήθηκε σε όλα τα στάδια κατασκευής της πειραματικής διάταξης, με την πιστοποίηση της διαδικασίας, καθώς και με τη συλλογή των πρώτων ποιοτικών πειραματικών αποτελεσμάτων, με τα οποία ασχολείται και η παρούσα διπλωματική εργασία.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.1. ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Θεωρείται διδιάστατη ροή κατά μήκος ενός κεκλιμένου τοιχώματος, με γωνία κλίσης φ ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση. Η ροή αναλύεται σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων όπου, ο x άξονας έχει την κατεύθυνση του τοιχώματος και ο y άξονας είναι κάθετος στην επιφάνεια του τοιχώματος.

Το πρόβλημα περιγράφεται από την εξίσωση της συνέχειας και από τις εξισώσεις Navier-Stokes καθώς πληρούνται οι προϋποθέσεις: *ασυμπίεστη ροή, νευτωνικό ρευστό, σταθερό ιζώδες.*

α. Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \Rightarrow \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

β. Εξισώσεις Navier-Stokes (κατά τις διευθύνσεις x, y):

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.2, \alpha)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} \right) \quad (2.3, \alpha)$$

Επειδή η ροή είναι μόνιμη και διδιάστατη, ισχύουν τα εξής:

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} = 0, \frac{\partial U_y}{\partial t} = 0, U_z = 0$$

Όποτε οι εξισώσεις (2.2.α), (2.3.α) \Rightarrow

$$\rho \left(U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) \quad (2.2, \beta)$$

$$\rho \left(U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) \quad (2.3, \beta)$$

γ. Οριακές Συνθήκες:

1^η. Η ταχύτητα στην επιφάνεια του τοιχώματος είναι μηδενική. Τη συνθήκη αυτή την ονομάζουμε 'συνθήκη μη-ολίσθησης' και ισχύει για $y=0 \Rightarrow U_x=U_y=0$

2^η. Η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού υμένα είναι μηδέν, δηλαδή:

$$y = h \Rightarrow \underline{u} \cdot \underline{n} = \underline{0} \quad (2.4)$$

3^η. Από την ισορροπία δυνάμεων στην επιφάνεια του υγρού υμένα έχουμε:

I. Στην εφαπτομενική κατεύθυνση η συνθήκη εκφράζεται ως εξής:

$$\Sigma \underline{F}_t=0 \Rightarrow \sigma_{ij} n_i t_j = 0 \quad (2.5.a) \quad \text{ή} \quad (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{t} = 0 \quad (2.5.b)$$

Όπου, $\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}$ είναι η δύναμη που ασκείται στην ελεύθερη επιφάνεια και $(\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{t}$ είναι η συνιστώσα της δύναμης στην t- κατεύθυνση (εφαπτομενική)

II. Στην κάθετη κατεύθυνση, η συνιστώσα της δύναμης είναι:

$$\sigma^{(2)}_{ij} n_i n_j - \sigma^{(1)}_{ij} n_i n_j = T \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.6.a)$$

Κατόπιν, παραγωγίζοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes (2.2.β), (2.3.β) ως προς y και x αντίστοιχα και εισάγοντας την ροική συνάρτηση Ψ καταλήγουμε στις εξισώσεις:

$$U_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}, U_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[\frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y \partial x} + \nu \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial^3 \Psi}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 \Psi}{\partial y^3} \right] \quad (2.8.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\frac{\partial \Psi}{\partial y} \left(-\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial x} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y \partial x} + \nu \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{\partial^3 \Psi}{\partial y^2 \partial x} - \frac{\partial^3 \Psi}{\partial x^3} \right] \quad (2.8.b)$$

Αφαιρώντας την (2.8.β) από την (2.8.α) και απαλείφοντας όρους καταλήγουμε στην εξίσωση που περιγράφει την διδιάστατη ροή συναρτήσει της ροικής συνάρτησης. Στη συνέχεια αδιαστατοποιούμε την εξίσωση χρησιμοποιώντας τις εξής αδιάστατες παραμέτρους: $\Psi' = \Psi/q$, $x' = x/h$, $y' = y/h$. Τελικά:

$$\frac{\partial \Psi'}{\partial y'} \cdot \frac{\partial (\nabla^2 \Psi')}{\partial x'} - \frac{\partial \Psi'}{\partial x'} \cdot \frac{\partial (\nabla^2 \Psi')}{\partial y'} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 (\nabla^2 \Psi') \quad (2.9)$$

Όπου ο αριθμός Reynolds είναι: $\text{Re} = \frac{\rho \cdot q}{\mu} = \frac{\rho^2 \cdot g_x \cdot h^3}{3\mu^2}$ (2.10)

Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν μια συνήθης πρακτική για την επίλυση πολλών προβλημάτων της Μηχανικής των Ρευστών. Στη παρούσα διπλωματική εργασία δε δίδεται έμφαση στη θεωρητική ανάλυση αλλά σε μια πειραματική διαδικασία μέτρησης του πάχους του υμένα. Ωστόσο δίδονται οι απλές αναλυτικές λύσεις της θεωρίας υγρού υμένα.

Θεωρώντας ότι έχουμε μόνιμη, στρωτή ροή και με βάση τις παραπάνω παραδοχές (ομοιόμορφο πάχος υμένα, επίπεδο τοίχωμα) προκύπτει:

α. Εξίσωση συνέχειας (ασυμπίεστη ροή, $\rho = \text{ct}$)

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (2.11.α)$$

και επειδή το ρευστό κινείται μόνο κατά την διεύθυνση x, έχουμε:

$$U_y = U_z = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{οπότε } \frac{\partial U_x}{\partial x} = 0 \quad (2.11.β)$$

β. Εξισώσεις Navier-Stokes (κατά τις διευθύνσεις x,y)

Προϋποθέσεις εφαρμογής τους: Νευτωνικό ρευστό, σταθερό ιξώδες

$$0 = -\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \quad (2.13)$$

$$0 = -\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial y} + \rho \cdot g_y \quad (2.14)$$

Έτσι:

$$(2.13) \Rightarrow \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} = -\rho \cdot g_x \Rightarrow \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} = -\frac{g_x}{\nu} \Rightarrow \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{g_x}{\nu} \cdot y + C_1 \Rightarrow \quad (2.15)$$

$$\Rightarrow U_x(y) = -\frac{g_x}{\nu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2 \quad (2.16)$$

Οριακές συνθήκες:

Για $y=h \Rightarrow \frac{\partial U_x}{\partial y} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{g_x}{\nu}$ (2.17)

και για $y=0 \Rightarrow U_x(y=0) = 0 \Rightarrow C_2=0$ (2.18)

Οπότε:
$$U_x(y) = \frac{g_x}{\nu} \cdot \left(y \cdot h - \frac{y^2}{2} \right)$$
 (2.19)

Η σχέση (2.19) αντιπροσωπεύει την κατανομή της ταχύτητας κατά την διεύθυνση του άξονα y .

Η μέση τιμή της ταχύτητας προκύπτει με ολοκλήρωση και η μέγιστη τιμή θέτοντας $y=h$. Έτσι:

$$\bar{U} = \frac{g_x \cdot h^2}{3 \cdot \nu} \quad (2.20)$$

$$U_o = \frac{g_x \cdot h^2}{2 \cdot \nu} \quad (2.21)$$

Η προαναφερθείσα ροή περιγράφεται από δύο ανεξάρτητες αδιάστατες παραμέτρους: Τον αριθμό

Reynolds, $Re = \frac{\bar{U} \cdot h}{\nu}$ (2.22) και τον αριθμό Kapitza $\gamma = T/\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3}$ (2.23), όπου \bar{U} : η μέση

ταχύτητα, h : το πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt, ρ : η πυκνότητα του ρευστού, T : η

επιφανειακή τάση και g : η επιτάχυνση της βαρύτητας. Ο όρος $(\bar{U} \cdot h)$ αποτελεί την ογκομετρική

παροχή ανά μονάδα πλάτους. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο αριθμός Weber ,

$We = T/\rho \cdot \bar{U}^2 \cdot h$ (2.24) αντί του αριθμού Kapitza.

2.2 ΘΕΩΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Η θεωρία ευστάθειας αποτελεί ένα κεφάλαιο. Ταυτόχρονα όμως είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εξηγηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ωστόσο θα δοθούν οι γενικές αρχές και θα περιγραφεί με τον απλούστερο δυνατό τρόπο.

Η ροή ενός νευτωνικού ρευστού μέσα σε έναν σωλήνα, γνωρίζουμε ότι είναι στρωτή για αριθμό $Re < 2000$ και τυρβώδης για αριθμό $Re > 2000$. Ακόμη όμως και για πολύ μικρούς αριθμούς Re το προκύπτων παραβολικό πεδίο ταχυτήτων δεν ισχύει διότι η ροή γίνεται ασταθής, λόγω των διαταραχών. Σε κάθε ροή ενός ρευστού η ύπαρξη διαταραχών είναι αναπόφευκτη, οι διαταραχές μπορεί να οφείλονται σε φυσικά αίτια (ακουστικός θόρυβος, ταλαντώσεις κ.τ.λ.) ή μπορεί να οφείλονται και στην ίδια τη ροή. Γενικότερα οι διαταραχές χαρακτηρίζονται από την συχνότητά τους, το μήκος κύματος και την περιοδικότητά τους.

Μια ροή χαρακτηρίζεται ευσταθής όταν οι διαταραχές (είτε αυτές οφείλονται σε φυσικά αίτια είτε στην ίδια τη ροή) αποσβένονται. Αντιθέτως η ροή χαρακτηρίζεται ασταθής όταν έστω και μία από τις προκύπτουσες διαταραχές ενισχύεται.

Θεωρώντας ότι το πεδίο ταχυτήτων της βασικής ροής είναι $\bar{U}(\bar{x})$, τότε το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων για την ασταθή ροή θα είναι:

$$\bar{u}(\bar{x}, t) = \bar{U}(\bar{x}) + \bar{u}'(\bar{x}, t) \quad (2.25)$$

$$P = P(\bar{x}) + p(\bar{x}, t) \quad (2.26)$$

Όπου $\bar{U}(\bar{x})$: Το πεδίο ταχυτήτων της βασικής ροής.

Η βασική ροή ικανοποιεί τις εξισώσεις συνέχειας (2.1) και τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής (εξ. Navier-Stokes).

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0$$

$$\bar{U} \cdot \nabla \bar{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \bar{U}$$

$$\text{Οπότε: } \nabla \cdot (\bar{U} + \bar{u}') = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \bar{u}' = 0$$

$$\text{Και: } \frac{\partial \bar{u}'}{\partial t} + \bar{u}' \cdot \nabla \bar{U} + \bar{U} \cdot \nabla \cdot \bar{u}' = \frac{1}{\rho} \nabla p' + \nu \cdot \nabla^2 \bar{u}' \quad (\text{γραμμική εξίσωση}) \quad (2.27)$$

Η λύση έχει σταθερούς συντελεστές ως προς το χρόνο. Δηλαδή θα έχει την μορφή:

$$\bar{u}' = \tilde{u}(\bar{x}) e^{-i\sigma t} \Rightarrow \bar{u}' = (u_R + iU_i) e^{-i\sigma_R} \cdot e^{\sigma_I t} \quad (2.28)$$

Όπου $e^{-i\sigma_R}$: Όρος περιοδικότητας

$e^{\sigma_I \cdot t}$: Όρος ενίσχυσης ή απόσβεσης.

Άρα αν $\sigma_I > 0$, η ροή είναι ευσταθής ενώ αν $\sigma_I < 0$, η ροή είναι ασταθής.

Στην περίπτωση όπου η ροή είναι διδιάστατη και πλήρως ανεπτυγμένη εισάγεται η ροϊκή συνάρτηση, απαλείφεται η πίεση και προκύπτει μια εξίσωση ως προς Ψ' (η εξίσωση συνέχειας 2.1 ικανοποιείται εξ' ορισμού). Τελικά προκύπτει, με παρόμοιο τρόπο, ότι :

$$\Psi'(\bar{x}, t) = \tilde{\Psi}(x, y) e^{i\sigma \cdot t} = f(y) e^{i \cdot k \cdot x} e^{-i \cdot \sigma \cdot t} = f(y) e^{i(k \cdot x - \sigma_R \cdot t)} e^{\sigma_I \cdot t} \quad (2.29)$$

Όπου $e^{i(k \cdot x - \sigma_R \cdot t)}$: Κύμα με μήκος $L = \frac{2\pi}{k}$ και ταχύτητα $c = \frac{\sigma_R}{k}$

Αν k πραγματικός και σ μιγαδικός, η προκύπτουσα αστάθεια είναι χρονική ενώ σε αντίθετη περίπτωση η αστάθεια είναι χωρική. Για παράδειγμα, αν το k είναι μιγαδικός προκύπτει :

$$\Psi'(x, t) = f(y) e^{i(k_R \cdot x - \sigma \cdot t)} e^{-k_I \cdot x}$$

Αν το μιγαδικό μέρος του k (k_I) < 0 , η αστάθεια ενισχύεται με την απόσταση ενώ αν το $k_I > 0$, η αστάθεια αποσβένει με την απόσταση. Η τελική εξίσωση που προκύπτει (με τη βοήθεια της ροϊκής συνάρτησης) είναι η εξίσωση Ors-Sommerfeld:

$$f''' - 2k^2 f'' + k^4 f = \frac{ik}{v} [(U - c)(f'' - k^2 f) - U'' f] \quad (2.30)$$

Καθορίζοντας την παράμετρο $k = \frac{2\pi}{L}$, η εξίσωση Ors-Sommerfeld γίνεται ομογενής με ομογενείς παραγώγους. Πρόκειται για ένα πρόβλημα ιδιοτιμής. Η ανάλυση της εξίσωσης Ors-Sommerfeld αποτελεί αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας και ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Μια ακόμη περίπτωση εξέτασης της ευστάθειας αποτελεί το πρότυπο Kelvin-Helmholz το οποίο εξετάζει την αστάθεια στην επιφάνεια δύο ρευστών τα οποία θεωρεί ότι έχουν μηδενικό

ιξώδες. Η θεώρηση μηδενικού ιξώδους απλοποιεί την επίλυση των εξισώσεων, με βασική παραδοχή ότι το πλάτος της διαταραχής είναι πάρα πολύ μικρό.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις συνοψίζονται στα εξής:

Όταν το μήκος κύματος της διαταραχής είναι εξαιρετικά μεγάλο, δηλαδή ο κυματαριθμός είναι πολύ μικρός, είναι οι βαρυτικές δυνάμεις οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω ανάπτυξη ή όχι της διαταραχής. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το μήκος κύματος της διαταραχής είναι πάρα πολύ μικρό, σημαντικότερο ρόλο παίζει η επιφανειακή τάση, η οποία σταθεροποιεί τις δημιουργούμενες 'ρυτιδώσεις' (ripples).

2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν στη διάθεσή μας είναι ελάχιστα. Η πιο παρεμφερής εργασία είναι αυτή των Liu et all [1], οι οποίοι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό (Fluorescence method), μέτρησαν την πρωταρχική αστάθεια (primary instability) ενός λεπτού υγρού υμένα κατά τη ροή σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Η προαναφερθείσα μέθοδος μετρά το πάχος του υμένα με ακρίβεια μερικών μικρομέτρων (μm). Συνίσταται στη χρησιμοποίηση πηγής υπεριώδους φωτός παράλληλα προς το κεκλιμένο επίπεδο, ενώ με την εισαγωγή κατάλληλης χρωστικής ουσίας το ρευστό φθορίζει, υπό την επίδραση του υπεριώδους φωτός. Μια ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης καταγράφει την ένταση του φωτός. Η ένταση του φωτός στο επίπεδο απεικόνισης εξαρτάται γραμμικά από το τοπικό πάχος του υμένα και με την παραδοχή σταθερής έντασης του προσπίπτοντος υπεριώδους φωτός, η ένταση του φωτός στο επίπεδο απεικόνισης θα είναι ίση με :

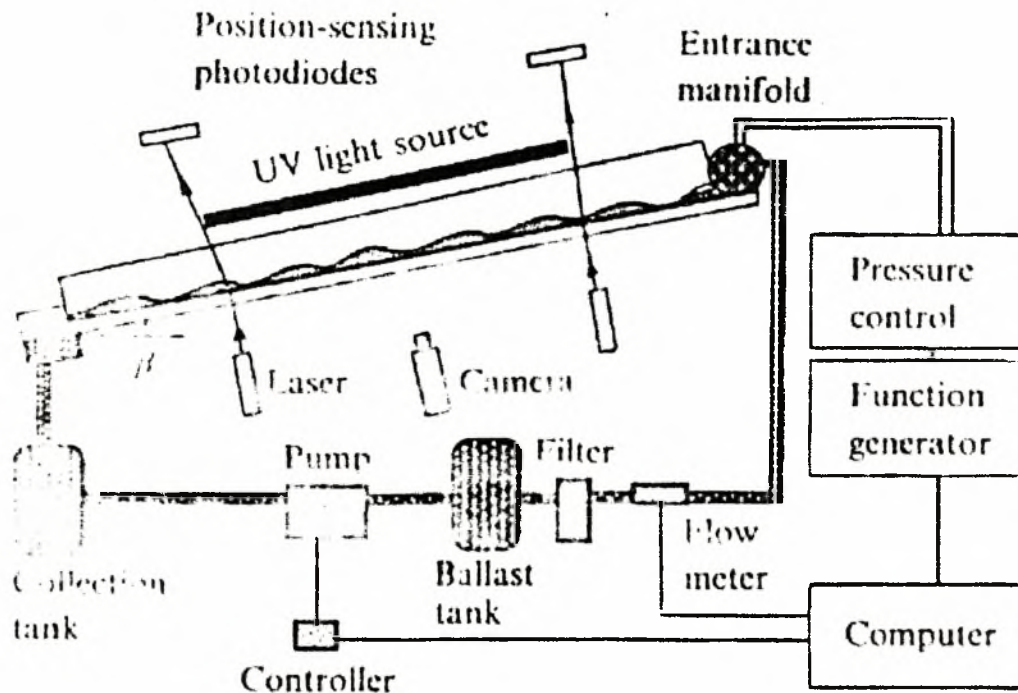
$$I(x,y,t) = K \cdot I_0(x,y) \cdot h(x,y,t) \quad (2.30)$$

Το K είναι μια σταθερά, το $I_0(x,y)$ εξαρτάται από τον φωτισμό (μετριέται κατά την βαθμονόμηση της διάταξης με υμένα σταθερού πάχους), ενώ το $I(x,y,t)$ είναι η ένταση του φωτός στο επίπεδο απεικόνισης. Μέσω της ψηφιακής κάμερας μετριέται η ένταση του φωτός (ψηφιακή μετατροπή του σήματος που φθάνει στην κάμερα) και αποτυπώνει στον υπολογιστή με τη μορφή διαγράμματος την μεταβολή του πάχους του υμένα $h(x,y,t)$ κατάντη της ροής (downstream distance).

Στην πειραματική διάταξη των Liu et all (σχ. 2.1) επιβλήθηκε εξωτερική διαταραχή στη ροή υγρού υμένα και μετρήθηκαν οι κρίσιμοι αριθμοί Re συναρτήσει της γωνίας κλίσης β του επιπέδου καναλιού. Πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι η αρχική αστάθεια ήταν μεταφερόμενη και τα κύματα διατηρούνταν από την εξωτερική διαταραχή. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος και η μορφή των παραγόμενων κυμάτων εξαρτάται από την εξωτερική φόρτιση.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από ένα ορθογώνιο κανάλι διαστάσεων $200\text{cm} \times 50\text{cm} \times 10\text{cm}$, κατασκευασμένο από Plexiglas. Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν νερό και διάλυμα νερού – γλυκερίνης (50% κ.β.) ενώ η μεταβολή της γωνίας κλίσης του επιπέδου καναλιού ήταν μεταξύ 0° και 35° μοιρών.

Στο σχ. 2.1 φαίνονται οι εικόνες των πειραμάτων των Liu et all καθώς και τα προφίλ του πάχους του υμένα κατάντη της ροής. Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν διάλυμα νερού – γλυκερίνης και η γωνία κλίσης του επιπέδου καναλιού ήταν $\beta=4.6^\circ$. Στο σχ. 2.2.a παρατηρούνται

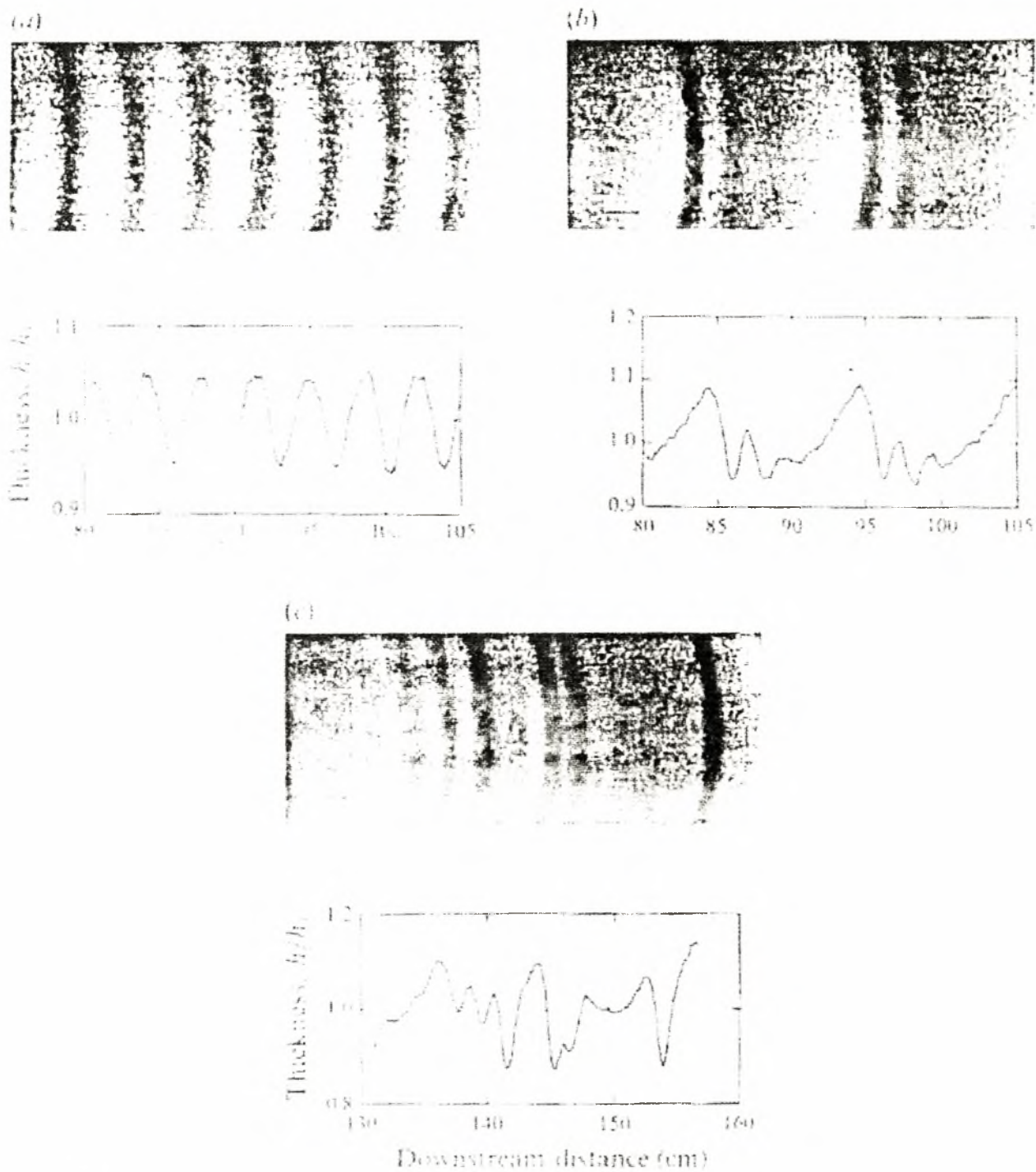


Σχ. 2.1 : Πειραματική διάταξη των Liu et all [1]

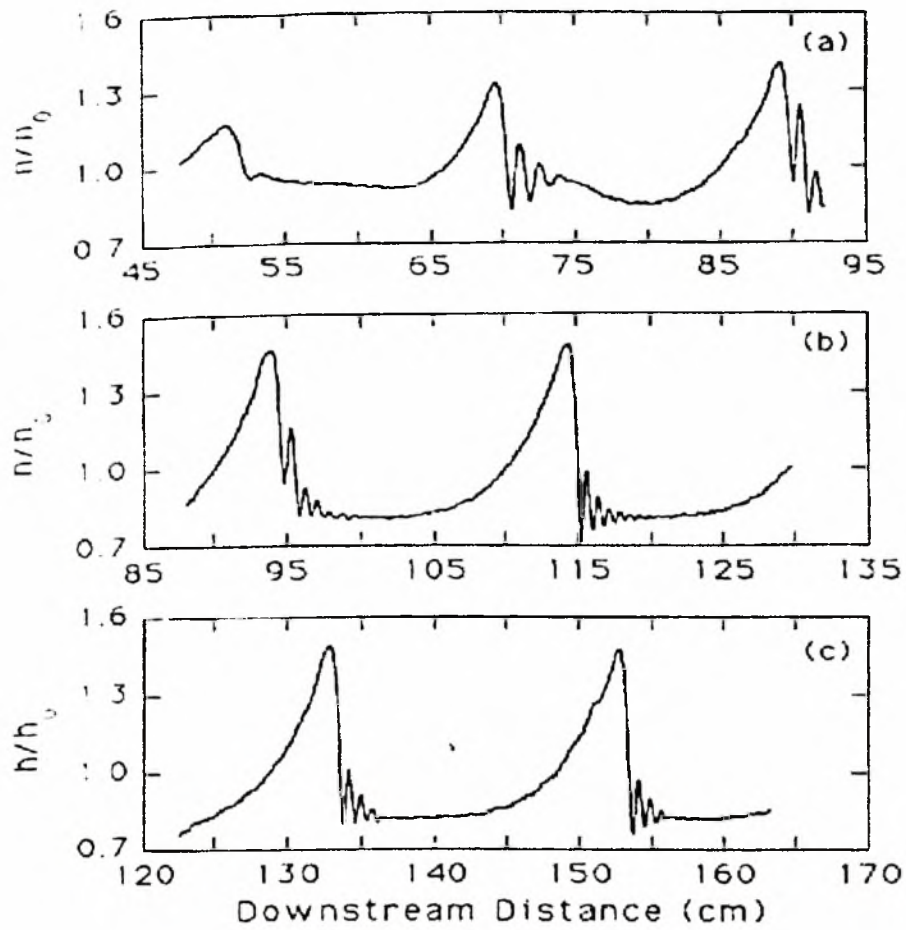
τα κύματα που δημιουργήθηκαν με την επιβολή εξωτερικής διαταραχής συχνότητας $\nu=5.5$ Hz και για αριθμό $Re = 25$. Στο σχήμα 2.2.b φαίνεται η μη γραμμική εξέλιξη κυμάτων χαμηλής συχνότητας, επίσης παρατηρείται ο σχηματισμός δευτερευόντων κυμάτων πριν τα κύρια (συχνότητα επιβολής διαταραχής $\nu = 2$ Hz, $Re = 25$) ενώ στο σχήμα 2.2.c απεικονίζεται η εξέλιξη των φυσικών κυμάτων (δημιουργήθηκαν χωρίς την επιβολή εξωτερικής διαταραχής), για $Re = 57$.

Παρόμοια στο σχ. 2.3 παρουσιάζονται τρία προφίλ πάχους υμένα σε αύξουσα απόσταση από το σημείο δημιουργίας τους. Η συχνότητα εξωτερικής διαταραχής είναι $\nu=1.5$ Hz, η γωνία κλίσης είναι $\beta=6.4^\circ$ και ο αριθμός Re είναι $Re=29$. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν την εξέλιξη του μοναχικού κύματος σε σχέση με την απόσταση. Στο σχ. 2.4 απεικονίζονται τα μοναχικά κύματα (στα οποία οι συνθήκες είναι ίδιες με αυτές του σχήματος 2.3) σε απόσταση 123 cm από το σημείο δημιουργίας τους.

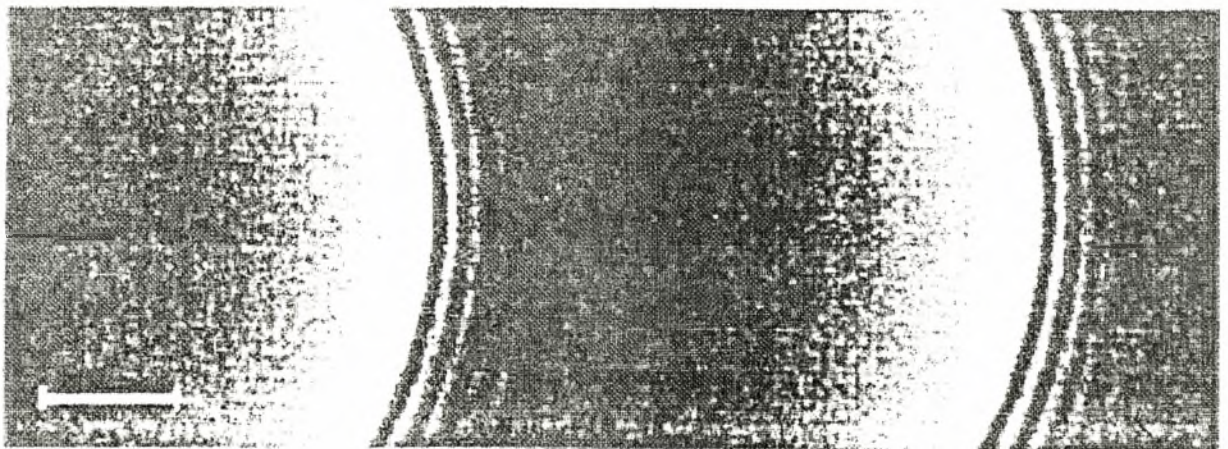
Οι Liu et all χρησιμοποιώντας ψηφιακή κάμερα με μεγάλο εύρος λήψης είχαν τη δυνατότητα να δουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός μεγάλου μοναχικού κύματος και των δευτερευόντων κυμάτων (σχ. 2.5). Όπως φαίνεται και από το σχήμα, το μεγάλο κύμα 'φθάνει' τα δευτερεύοντα μοναχικά κύματα, τα απορροφά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καινούργιου μοναχικού κύματος.



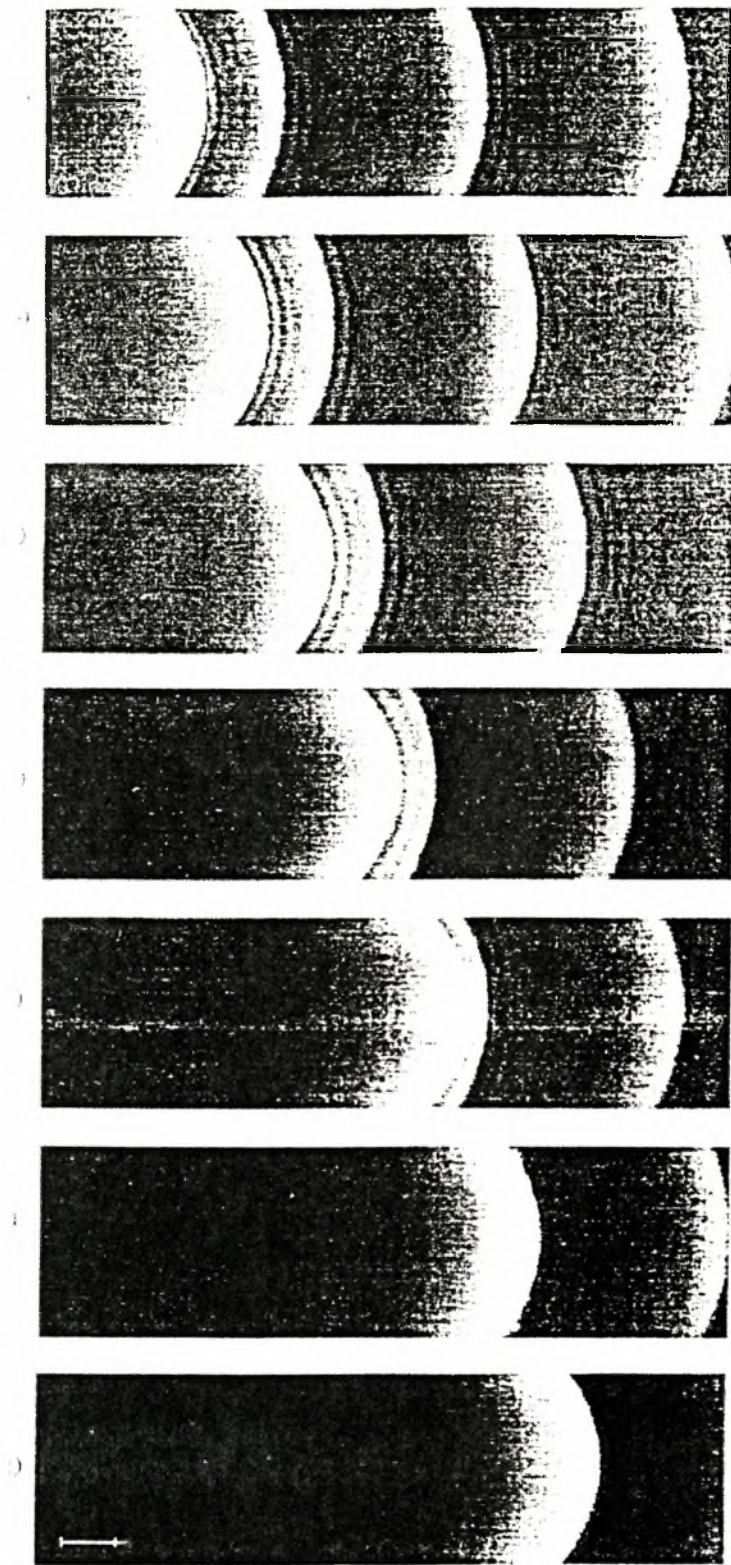
Σχ. 2.2 : Απεικόνιση κυμάτων και αναπαράσταση του προφίλ του πάχους του υμένα από τους Liu et al



Σχ. 2.3 : Προφίλ πάχους υμένα σε αύξουσα απόσταση από το σημείο δημιουργίας τους

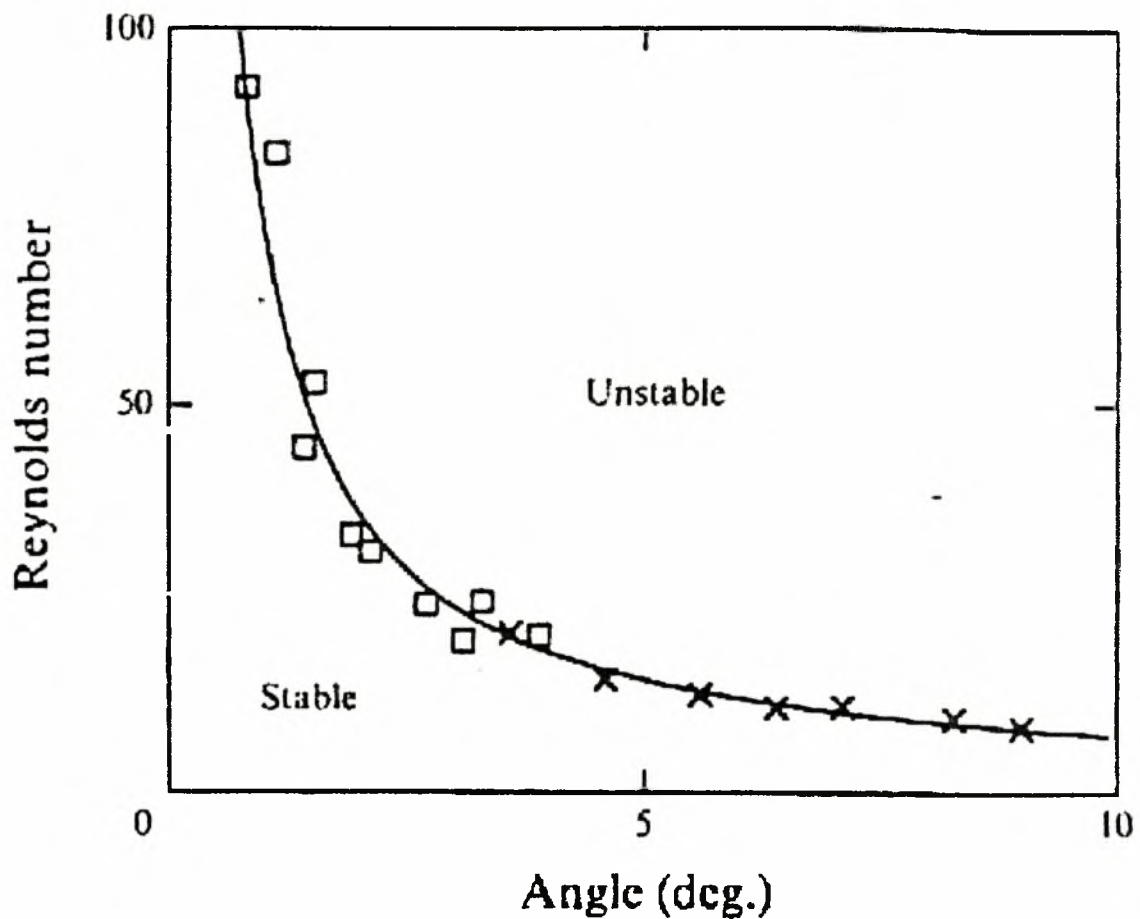


Σχ. 2.4 : Απεικόνιση σολιτονικών κυμάτων (στα οποία οι συνθήκες είναι ίδιες με αυτές του σχήματος 2.3) σε απόσταση 123 cm από το σημείο δημιουργίας τους.



Σχ. 2.5 : Διαδοχικές εικόνες που δείχνουν την αλληλεπίδραση του κύριου μοναχικού κύματος (solitary wave) με τα δευτερεύοντα κύματα

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι οι Liu et al κατασκεύασαν την καμπύλη ευστάθειας (σχ. 2.6), για την σειρά πειραμάτων που διεξήγαγαν, η οποία δείχνει την εμφάνιση του κρίσιμου αριθμού Re , ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης β του επίπεδου καναλιού, για τον οποίο ο υγρός υμένας είναι ευσταθής.



Σχ. 2.6 : Εμφάνιση κρίσιμου αριθμού Re ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης β του επίπεδου καναλιού για την σειρά μετρήσεων των Liu et al

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε με τη χρήση της πειραματικής διάταξης η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 3.1. Η διάταξη αποτελείται από τα εξής μέρη:

Από το επίπεδο κανάλι ροής. Ως υλικό κατασκευής του καναλιού χρησιμοποιήθηκε το Plexiglas ώστε η απορρόφηση του ορατού φωτός να είναι η ελάχιστη δυνατή. Οι διαστάσεις του καναλιού, οι οποίες προέκυψαν από εμπειρικούς κανόνες είναι:

Μήκος Καναλιού = 1m

Πλάτος Καναλιού = 40cm

Ύψος Καναλιού = 3cm

Με την βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία είναι δυνατή η δημιουργία εως και 67° γωνίας κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Το δοχείο υπερχειλίσσης και η δεξαμενή συλλογής του ρευστού. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δύο αυτών δοχείων είναι το Plexiglas. Ο ρόλος της δεξαμενής συλλογής αποτελεί την αρχή και το τέλος του κύκλου ροής του ρευστού. Το διάλυμα αρχικά τοποθετείται στην δεξαμενή συλλογής ενώ στη συνέχεια το διάλυμα αντλείται και οδηγείται στο δοχείο υπερχειλίσσης. Μετά το τέλος του πειράματος συλλέγεται και πάλι στην ίδια θέση.

Το δοχείο υπερχειλίσσης χρησιμοποιείται για την δημιουργία μιας καθορισμένης υψομετρικής διαφοράς μεταξύ αυτού και του επιπέδου ροής του υγρού υμένα ώστε να επιτυγχάνεται ροή του υμένα σε μόνιμες συνθήκες.

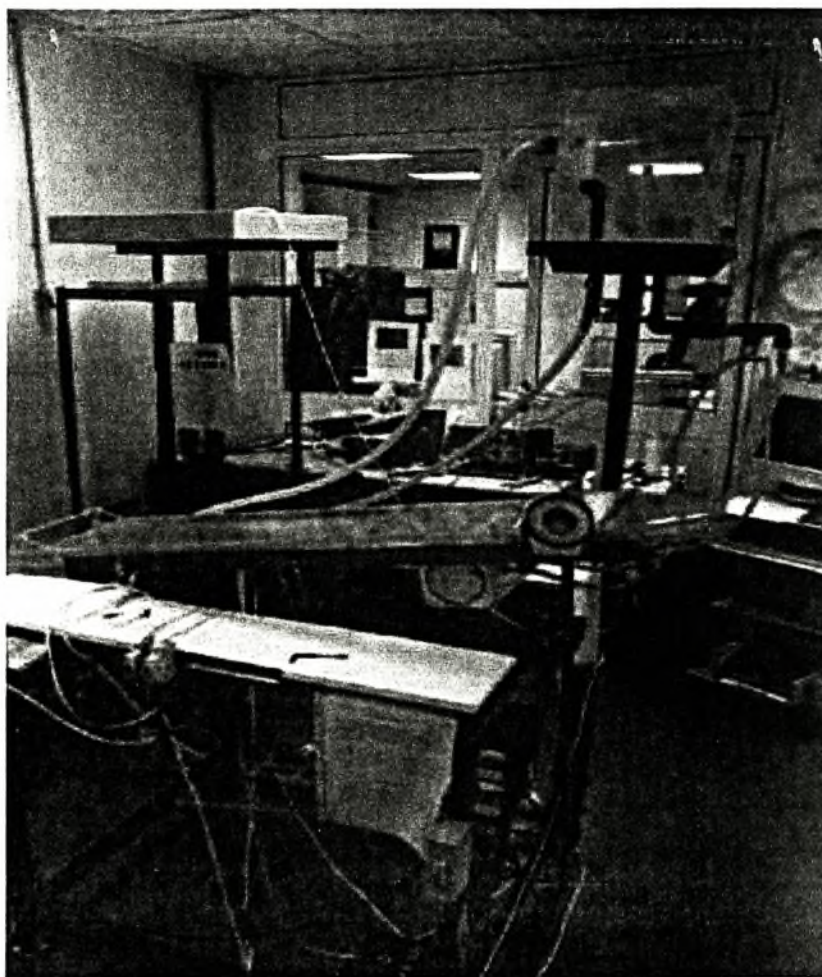
Η ροή του διαλύματος από την δεξαμενή συλλογής προς το δοχείο υπερχειλίσσης πραγματοποιείται με την βοήθεια αντλίας της οποίας η ηλεκτρική τροφοδοσία γίνεται μέσω ενός τροφοδοτικού μεταβαλλόμενης έντασης και τάσης. Έτσι είναι δυνατόν να ελεγχθεί η παροχή του ρευστού προς το δοχείο υπερχειλίσσης για την αποφυγή δημιουργίας φουσαλίδων αλλά και ταλαντώσεων.

Αναγκαία κρίθηκε και η κατασκευή ενός δευτερεύοντος δοχείου υπερχειλίσσης, το οποίο είναι κάθετο στην κατεύθυνση ροής του ρευστού. Ουσιαστικά αποτελεί το τμήμα της διάταξης όπου επιτυγχάνεται η δημιουργία του υγρού υμένα, μέσω της υπερχειλίσσης του από το δοχείο. Το υλικό

κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε είναι το Plexiglas και η θέση του στην πειραματική διάταξη είναι πριν το πρωτεύων κανάλι ροής .

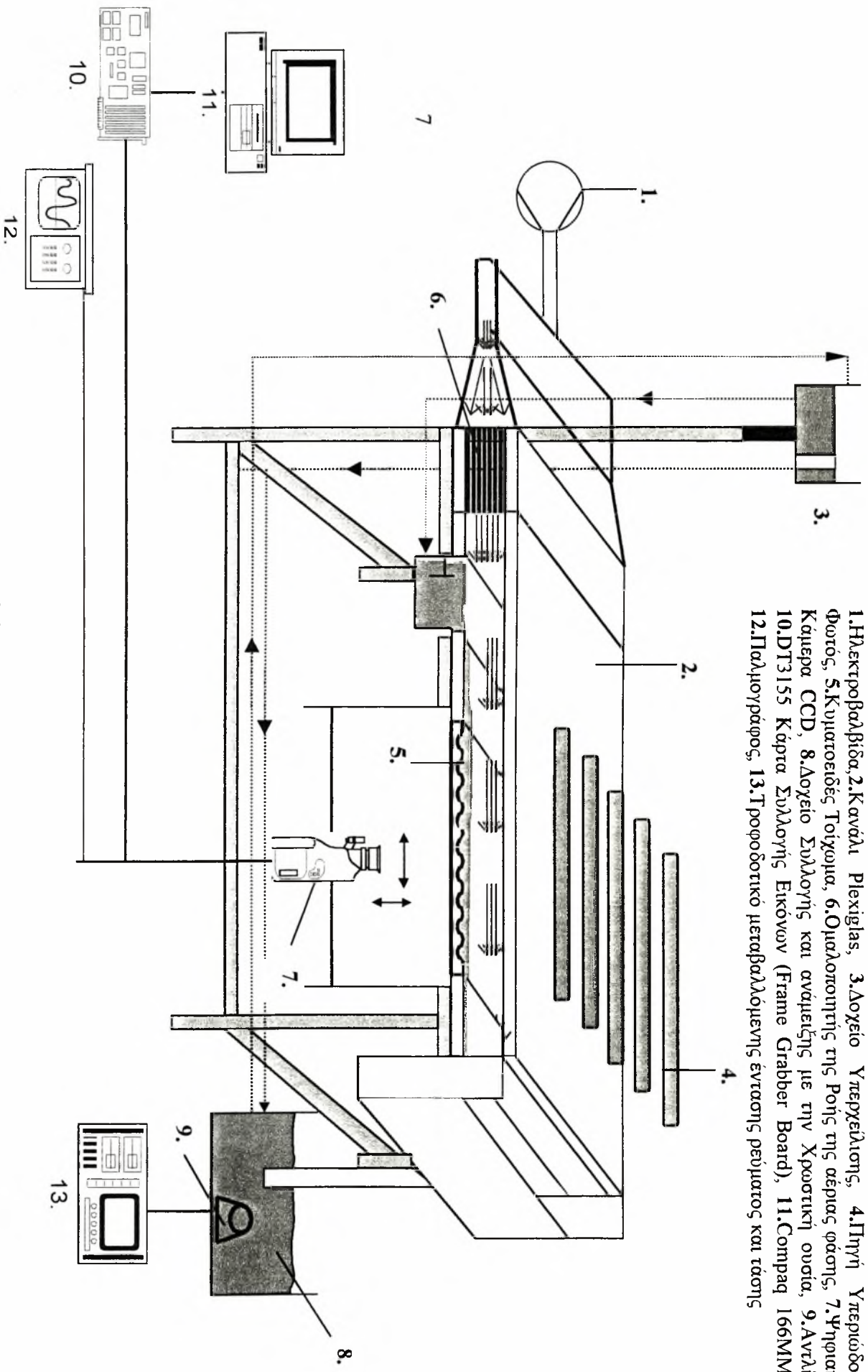
Το διάλυμα διοχετεύεται σ' αυτήν τη θέση μέσω κατάλληλης συνδεσμολογίας βανών – ακροφυσίων – ελαστικών σωλήνων. Μέσω της προαναφερθείσας συνδεσμολογίας είναι δυνατή η ρύθμιση της ροής και η δημιουργία λεπτού υμένα ομοιόμορφου πάχους (λίγο πριν την εισαγωγή του στο επίπεδο κανάλι). Ουσιαστικά όταν το δευτερεύον δοχείο υπερχειλίζει τότε υπερχειλίζει και το πάχος του δημιουργούμενου υμένα είναι συνάρτηση της παροχής του ρευστού.

Τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης (πηγή υπεριώδους φωτός, ψηφιακή κάμερα, κάρτα συλλογής εικόνων κ.τ.λ) αποτελούν το αντικείμενο ανάλυσης του επόμενου κεφαλαίου. Στο σχήμα 3.2 που ακολουθεί, περιγράφεται η πειραματική διάταξη αναλυτικά.



Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη

1. Ηλεκτροβαλβίδα, 2. Κανάλι Plexiglas, 3. Δοχείο Υπεργείλισης, 4. Πηγή Υπεριώδους Φωτός, 5. Κυματοειδές Τοίχωμα, 6. Ομαλοποιητής της Ροής της αέρας φάσης, 7. Ψηφιακή Κάμερα CCD, 8. Δοχείο Συλλογής και ανάμειξης με την Χρωστική ουσία, 9. Ανάλια, 10. DT3155 Κάβρα Συλλογής Εικόνων (Frame Grabber Board), 11. Compaq 166MMx, 12. Πλαγιογράφος, 13. Τροφοδοτικό μεταβαλλόμενης έντασης πενήματος και τάσης



Σχήμα 3.2: Πειραματική Διάταξη

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ

Η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method) αποτελεί μια μέθοδο μέτρησης του πάχους του υμένα με ακρίβεια μικρομέτρου (μm). Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας, με την βοήθεια της οποίας υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της έντασης του ορατού φωτός που εκπέμπεται εξαιτίας του φθορισμού του υμένα. Για τον φθορισμό του υμένα είναι απαραίτητη η εισαγωγή κατάλληλης χρωστικής ουσίας.

Η επιλογή της πηγής υπεριώδους φωτός (λαμπτήρες φθορισμού) εξαρτάται από την εκλογή της χρωστικής ουσίας. Κάθε χρωστική ουσία απορροφά υπεριώδες φως και εκπέμπει ορατό φως (πρασινοκίτρινο) σε ένα συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος. Έτσι επιλέγοντας εκ των προτέρων χρωστική ουσία, συγκεκριμενοποιούμε τις απαιτήσεις μας όσον αφορά την πηγή υπεριώδους φωτός.

Όταν το υπεριώδες φως διαπεράσει τον υμένα, τότε το υγρό και η χρωστική ουσία απορροφούν μέρος αυτού. Η σχέση που δίνει την ένταση του φωτός που θα απορροφηθεί όταν αυτό διανύει μια απόσταση l , δίνεται από τον τύπο:

$$I(l) = I_0 \exp(-Kvl) \quad (3.2.1)$$

I_0 : εξαρτάται από τον τοπικό φωτισμό και υπολογίζεται κατά την βαθμονόμηση της διάταξης.

l : η διανυόμενη απόσταση εσωτερικά του υμένα.

Kv : ο συντελεστής απορρόφησης (ο οποίος είναι εξαιρετικά χαμηλός για το νερό).

Συνεπώς, αφού ο συντελεστής Kv είναι πολύ μικρός η υπόθεση σταθερής έντασης φωτός είναι βάσιμη και η εξίσωση που την διέπει είναι η εξής:

$$I(x,y,t) = K * I_0(x,y) * h(x,y,t) \quad (3.2.2)$$

K : είναι μια σταθερά

$I(x,y,t)$: είναι η ένταση του φωτός

$h(x,y,t)$: είναι το τοπικό πάχος υμένα

Καθώς το διάλυμα φθορίζει, εκπέμπει ορατό φως, το οποίο λαμβάνει η ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης (CCD) που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο τοίχωμα. Το σήμα που φτάνει στην κάμερα μετατρέπεται σε ψηφιακό και με την χρήση κατάλληλης κάρτας συλλογής εικόνων (frame grabber board) αλλά και κατάλληλου λογισμικού είναι δυνατή η μέτρηση του τοπικού πάχους του υμένα συναρτήσει της κατάντη αποστάσεως.

Η περιοχή μέτρησης του τοπικού πάχους του υμένα εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ κάμερας και τοιχώματος αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά που συνθέτουν τον φακό.

3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ

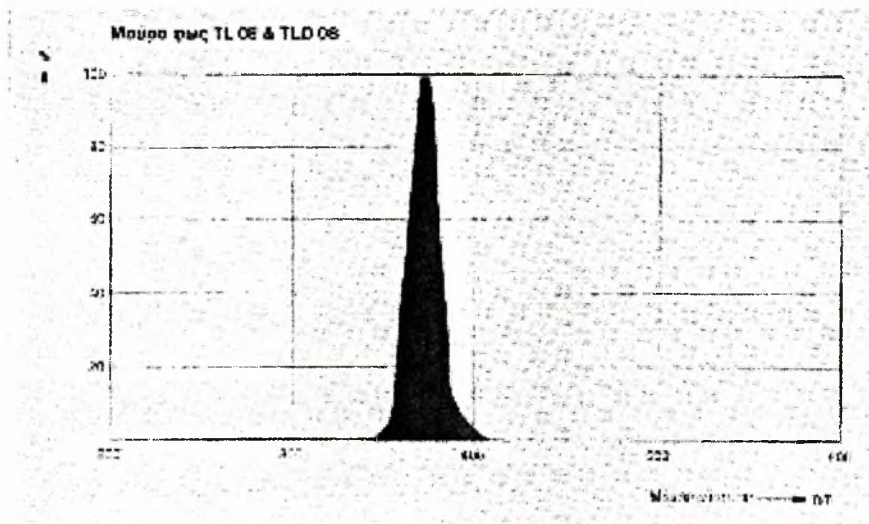
Μικρή συγκέντρωση χρωστικής ουσίας (100-300 ppm) στο νερό είναι αρκετή για τον πλήρη φθορισμό του διαλύματος, πράγμα το οποίο αποδεικνύεται στη συνέχεια. Η επιλεγθείσα χρωστική ουσία είναι η ουρανίνη ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$), η οποία εκπέμπει πράσινο-κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 515-550 nm όταν απορροφά το υπεριώδες φως. Οι ιδιότητες του ρευστού δεν επηρεάζονται με τη διάλυση της χρωστικής ουσίας μια και η συγκέντρωσή της είναι εξαιρετικά χαμηλή. Η ποσότητα της χρωστικής ουσίας που απαιτείται, υπολογίστηκε από πειραματικά δεδομένα με την εξής διαδικασία :

Δημιουργώντας κατάλληλα διαλύματα και με την βοήθεια ανάλογου λογισμικού είναι δυνατή η δημιουργία διαγραμάτων της έντασης του εκπεμπόμενου φωτός $I(x,y)$ σε συνάρτηση με την απόσταση (line profile) για συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής y . Τέτοια προφίλ απεικονίζονται στο σχήματα 3.3.1 και 3.3.2 και χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της εξάρτησης του εκπεμπόμενου φωτός από την συγκέντρωση της χρωστικής ουσίας στο διάλυμα και τη θέση του διαφράγματος. Διαπιστώθηκε ότι η συγκέντρωση χρωστικής ουσίας, μεγαλύτερη της οποίας υφίσταται κορεσμός του φθορίζοντος φωτός είναι τα 350 ppm.

3.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ (ΠΗΓΗ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΦΩΤΟΣ)

Η πηγή φθορισμού αποτελείται από 3-4 λαμπτήρες (TLK 40W Phillips) μαύρου φωτός, με εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter) για την ελάττωση των ταλαντώσεων της έντασης του υπεριώδους φωτός. Η κατεύθυνσή τους είναι παράλληλα με τη ροή και συμμετρικά τοποθετημένοι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή κατανομή έντασης του υπεριώδους φωτός. Στο σχήμα 3.4.1 απεικονίζεται η φασματική κατανομή των λαμπτήρων TLD 18W Philips η οποία είναι παρόμοια μ' αυτή των TLK 40W .

Τελικά προτιμήθηκαν οι λαμπτήρες TLK 40W λόγω μεγαλύτερης έντασης εκπομπής ακτινοβολίας, ένταση ακτινοβολίας ικανή να διαπεράσει την πλάκα plexiglass προυπόθεση απαραίτητη για την ομαλή διεξαγωγή του πειράματος .



Εκπομπή Ακτινοβολίας = 2.2W

Εκπομπή Ορατού Φωτός = 1.1W

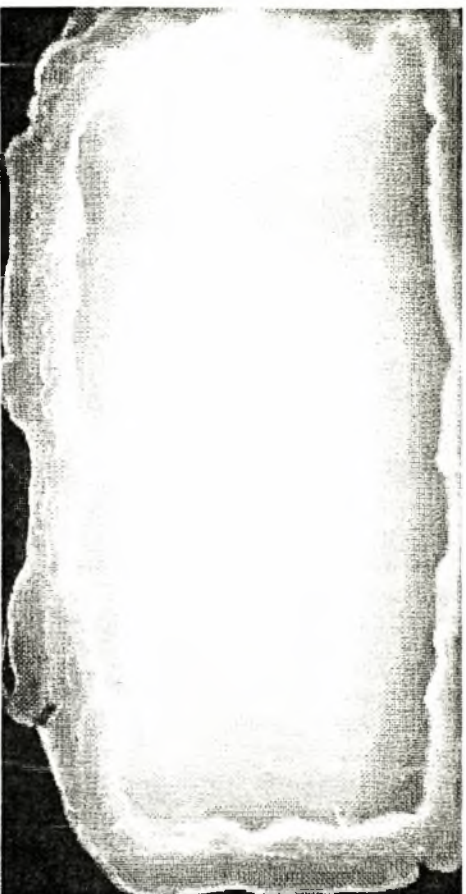
Εκπομπή UVA = 2.8W

Σχήμα 3.4.1: Φασματική κατανομή λαμπτήρα TLD 18.

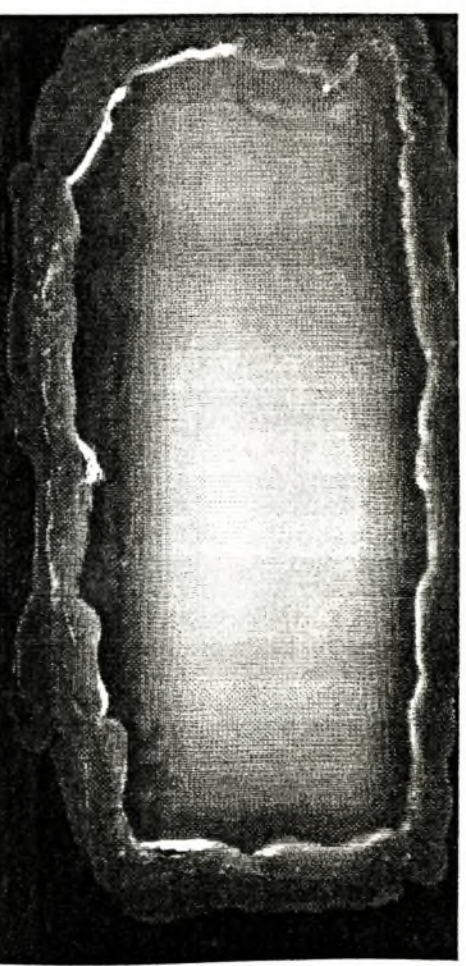
3.5 ΨΗΦΙΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

Μια ψηφιακή κάμερα CCD (Sony XC-77/77CE) χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή εικόνων. Η συγκεκριμένη κάμερα έχει πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0.5lux) και πολύ καλή αναλογία σήματος-θορύβου (50 dB), ενώ λαμβάνει 50 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Με τον κατάλληλο φακό εστίασης η περιοχή παρατήρησης αναμένεται να είναι 10 X 12 cm.

Η συλλογή και αποθήκευση των εικόνων πραγματοποιείται μέσω μιας κάρτας συλλογής εικόνων (DT3155 Frame Grabber Board – Data Translation) και του κατάλληλου λογισμικού. Η κάρτα επιτυγχάνει μεταφορά 30 εικόνων/δευτ. για συχνότητα 60 Hz ή 25 εικ./δευτ. για συχνότητα 50 Hz. Η ικανότητα αποθήκευσης των εικόνων (χωρητικότητα 454 Kb έκαστο) είναι συνάρτηση της διαθέσιμης μνήμης του υπολογιστή και της ταχύτητας του σκληρού δίσκου. Οι εισερχόμενες εικόνες ψηφιοποιούνται σε 640 x 480 pixels ή 768 x 576 pixels με ανάλυση 8bits. Οι δυνατότητες αποθήκευσης της κάρτας συλλογής εικόνων, ανάλογα με τη διαθέσιμη μνήμη από τον υπολογιστή, είναι 75 εικόνες – 24 MB – 640 x 480 pix. ή 50 εικόνες – 24 MB – 768 x 576 pix.



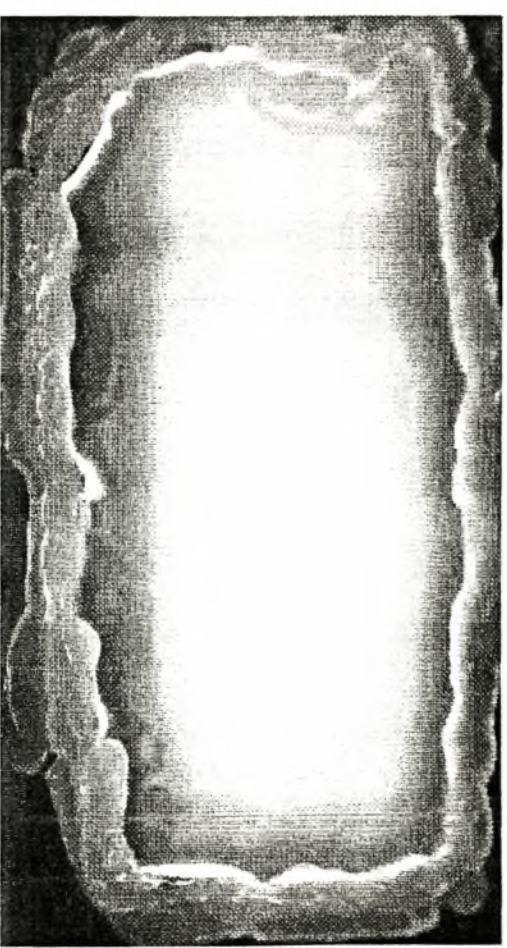
a. Οπτική παρατήρηση διαλύματος 400ppm (συγκ. Χρως. Ουσίας) - Κλίμακα διαφράγματος 1"



b. Οπτική παρατήρηση διαλύματος 200ppm (συγκ. Χρως. Ουσίας) - Κλίμακα διαφράγματος 1"

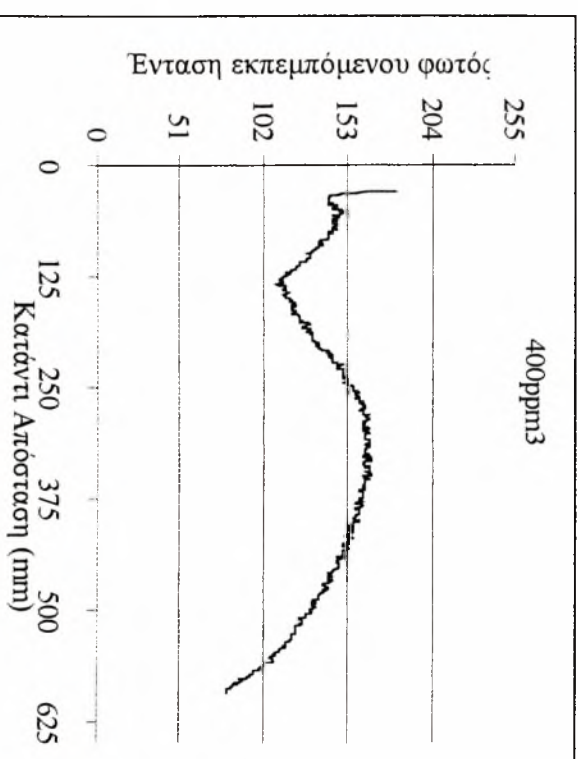
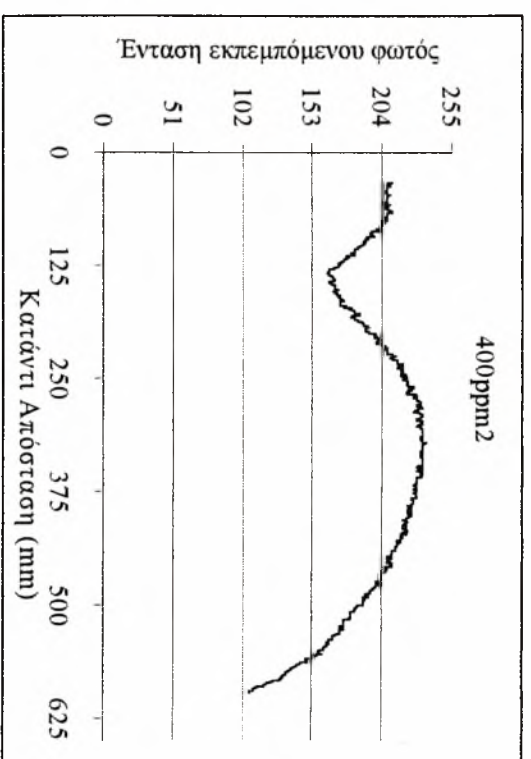
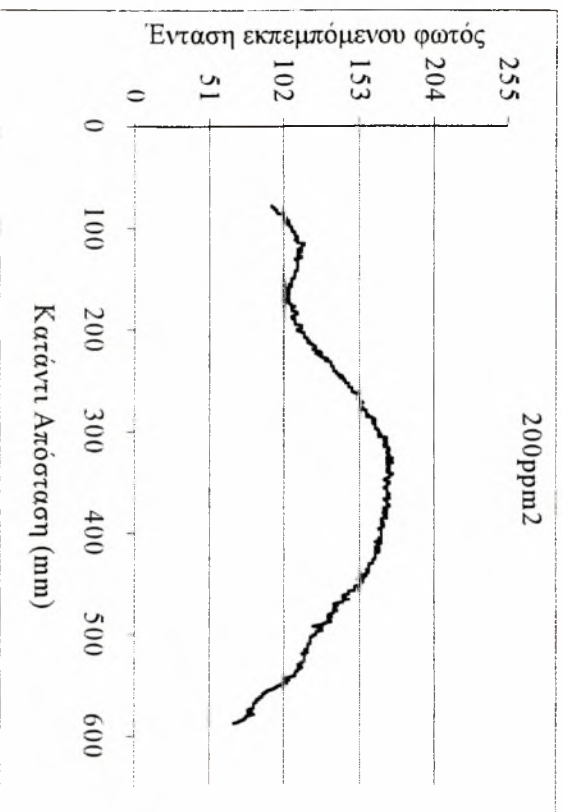
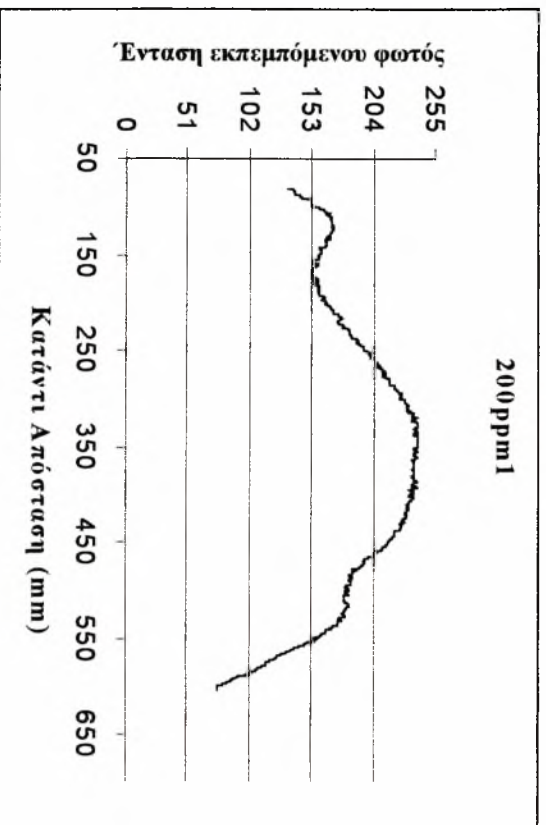


c. Οπτική παρατήρηση διαλύματος 400ppm (συγκ. Χρως. Ουσίας) –Διάφραγμα πλήρως ανοικτό



c. Οπτική παρατήρηση διαλύματος 200ppm (συγκ. Χρως. Ουσίας) –Διάφραγμα πλήρως ανοικτό

Σχήμα 3.3.1: Παραμετρική ανάλυση (μέσω οπτικής παρατήρησης) της συγκέντρωσης της χρωστικής ουσίας ως προς τη θέση του διαφράγματος.



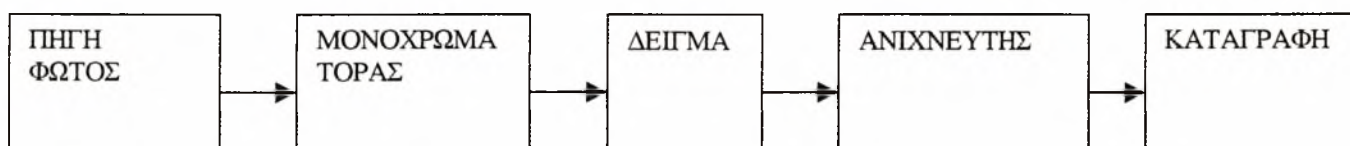
Σχήμα 3.3.2: Προφίλ της εκπεμπόμενης έντασης του φωτός συναρτήσει της κατόντη αποστάσεως για διαφορετικές συγκεντρώσεις χρωστικής ουσίας και θέσεις του διαφράγματος.

3.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ

3.6.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΟΥ

Για την επιλογή των οπτικών φίλτρων καθώς και για τον καθορισμό των απαιτήσεων μας όσον αφορά την χρωστική ουσία χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο της εταιρίας SHIMADZU model UV-2401PC, (UV-VIS RECORDING SPECTROPHOTOMETER) οπότε κρίθηκε απαραίτητο να γίνει περιγραφική ανάλυση της λειτουργίας της συσκευής .

Το φασματοφωτόμετρο είναι μια συσκευή η οποία αναλύει το πολυχρωματικό φως σε μονοχρωματικό, διαφόρων μηκών κύματος. Κατόπιν μετρά την απορρόφηση του φωτός από το δείγμα σαν συνάρτηση του μήκους κύματος. Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα ενός φασματοφωτόμετρου.



Σχημα3.6.1: Σχηματική παράσταση φασματοφωτόμετρου

Η πηγή είναι μια λάμπα που εκπέμπει ακτινοβολία συνεχούς μήκους κύματος. Ο μονοχρωμάτορας επιτρέπει την πρόσπτωση επί του δείγματος ακτινοβολίας μόνο ενός μήκους κύματος ενώ η υπόλοιπη εκτρέπεται προς άλλη κατεύθυνση. Η μέτρηση της ενέργειας ή της έντασης του εξερχόμενου φωτός γίνεται με τον ανιχνευτή, ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια αυτή σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια στην συνέχεια και πριν το σήμα φτάσει στον καταγραφέα αναγκαί είναι η ενίσχυσή του και η μετατροπή του σε μια μορφή εύκολα ερμηνεύσιμη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ενισχυτές. Το ενισχυμένο πλέον σήμα οδηγείται στα λεγόμενα όργανα ανάγνωσης όπου γίνεται η καταγραφή και η μέτρηση αυτού.

Τα φασματοφωτόμετρα ακολουθούν δύο βασικούς σχεδιασμούς. Σ'αυτούς που χρησιμοποιείται απλή δέσμη ακτινοβολίας και σ'αυτούς (όπως στην περίπτωση μας) που χρησιμοποιείται διπλή δέσμη. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή διαχωρίζεται σε δύο

δέσμες ίσης έντασης ή ενέργειας. Η πρώτη διέρχεται του προς ανάλυση δείγματος ενώ η δεύτερη μέσω του δεύτερου δείγματος το οποίο αποτελείται μόνο από διαλύτη και είναι αυτό το οποίο θα θέσει την βάση (BASE-LINE) για να γίνει η σύγκριση. Αυτόματα εκτελείται η αφαίρεση των δύο αυτών εντάσεων, ούτως ώστε να καταγράφονται μόνο οι αλλαγές στην ένταση, που οφείλονται στην προς ανάλυση ουσία .

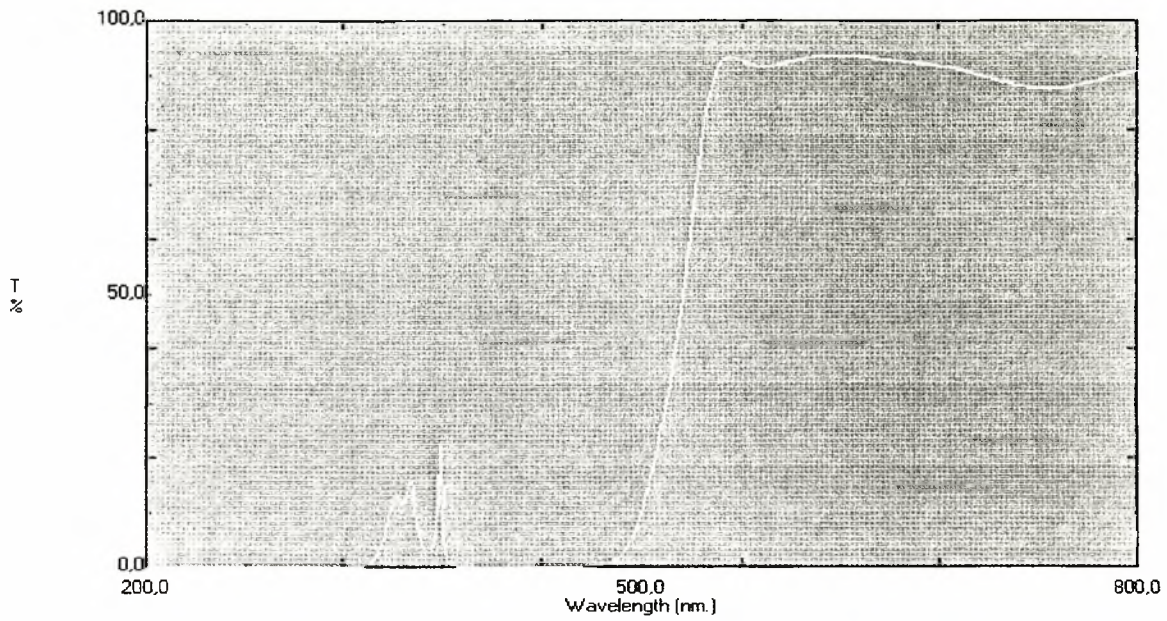
Εφόσον ολοκληρωθεί η καταγραφή των αλλαγών αυτών, οι οποίες αποτελούν το συνολικό ποσό απορροφούμενης ακτινοβολίας για ένα συνεχές φάσμα μήκους κύματος (200-900) nm, έχει πλέον δημιουργηθεί η καμπύλη απορρόφησης της εξεταζόμενης ουσίας. Η χρησιμότητα της καμπύλης αυτής είναι μεγάλη αφού στη μέτρηση του εμβαδού της βασίζεται η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την χρήση των αρχών της φασματοφωτομετρίας.

3.6.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

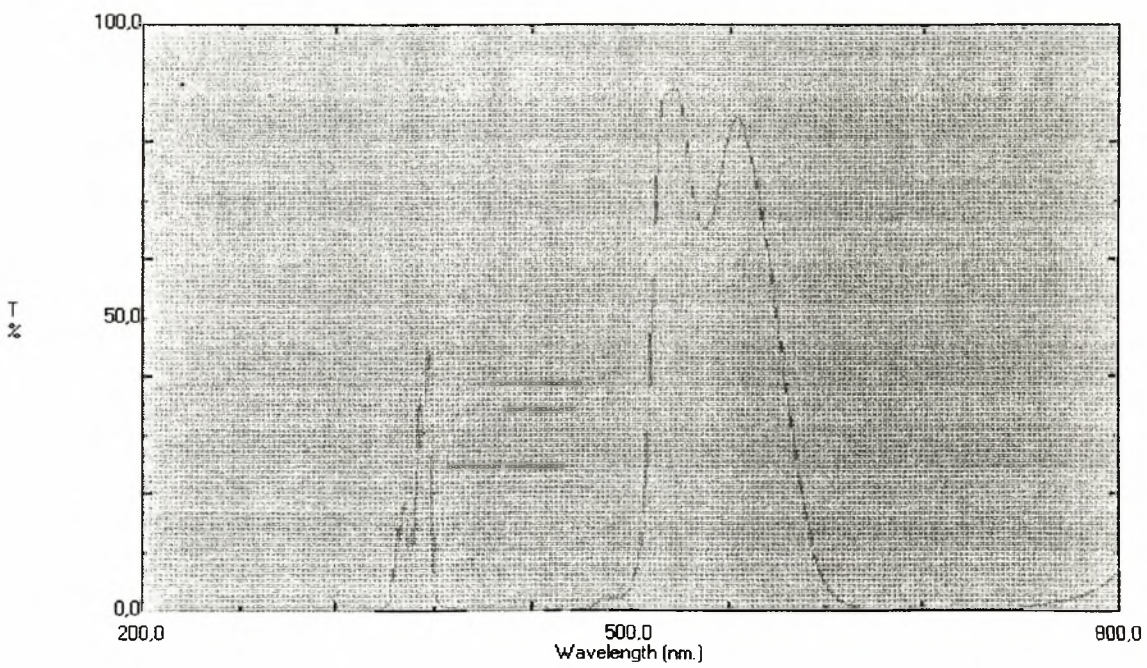
Για την επιλογή των κατάλληλων φίλτρων εξετάστηκαν διάφορα φίλτρα με αρχικό γνώμονα τα διαγράμματα φασματικών κατανομών των προμηθευτριών εταιριών. Στην συνέχεια και αφού επεξεργάστηκαν τα διαγράμματα φασματικών κατανομών, επιλέχθηκαν ορισμένα τα οποία θεωρήθηκαν ότι πιθανόν ήταν κατάλληλα για χρήση. Ακολούθησε η διαδικασία επιβεβαίωσης η οποία έλαβε χώρα στο φασματοφωτόμετρο.

Αρχικά τέθηκε η βάση σύγκρισης (BASE-LINE) η οποία θεωρήθηκε ως η ένταση απορρόφησης ακτινοβολίας του αέρα. Παράλληλα τοποθετούνταν στη συσκευή κάθε φορά το προς ανάλυση φίλτρο και στην συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων .

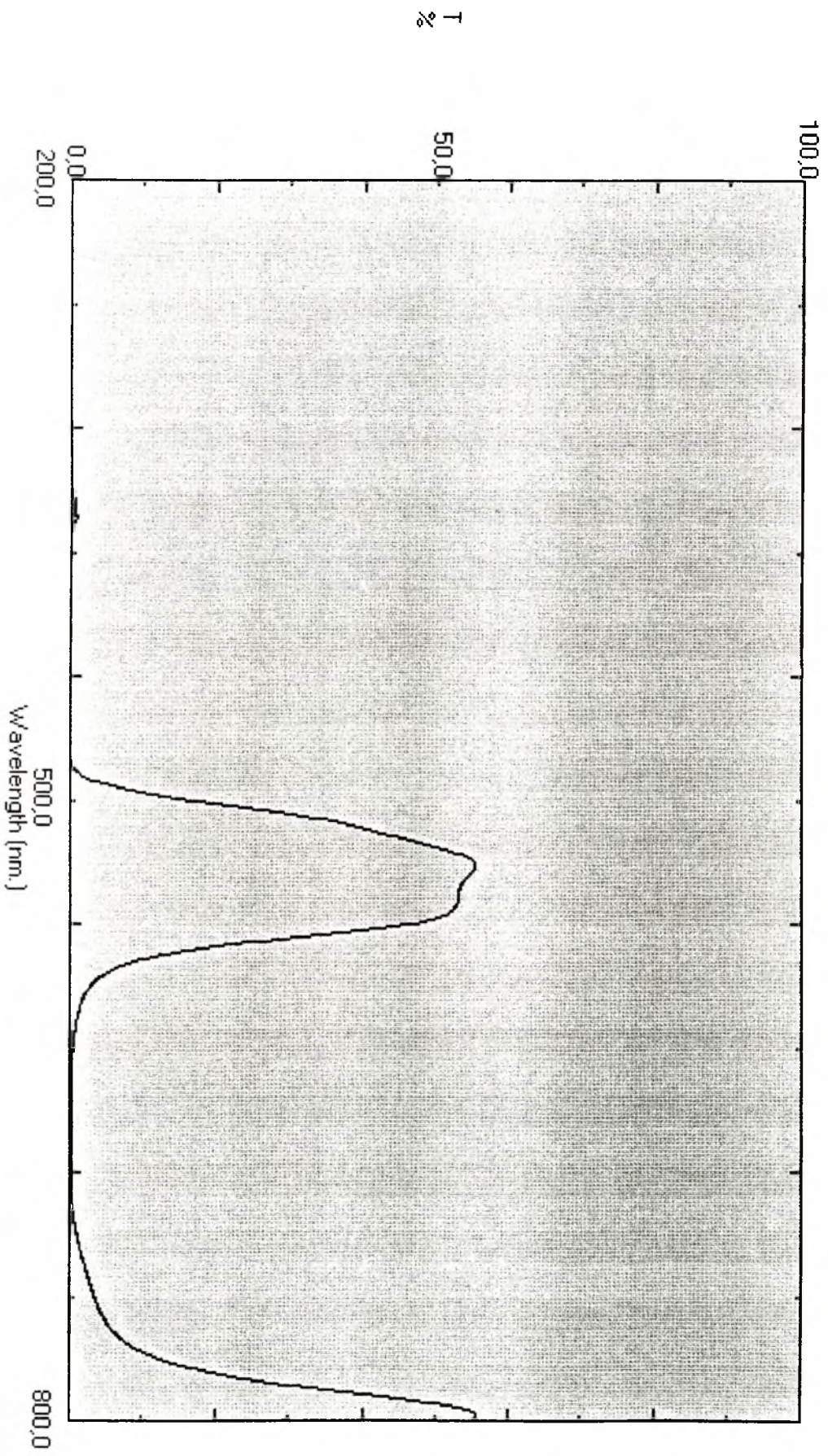
Μέσω αυτής της διαδικασίας βρέθηκε πως στην συγκεκριμένη περίπτωση θα ήταν βέλτιστο να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός yellow subtractive και green corrector. Το αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού φαίνεται στα επόμενα σχήματα (3.6.2.α,β,γ).



Σχήμα 3.6.2.α: Διάγραμμα φασματικής κατανομής οπτικού φίλτρου yellow subtractive.



Σχήμα 3.6.2.β: Διάγραμμα φασματικής κατανομής οπτικού φίλτρου green corrector



Σχήμα 3.6.2.γ: Διάγραμμα φασματικής κατανομής συνδιασμού οπτικών φίλτρων green corrector-yellow subtractive.

3.7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η επεξεργασία των εικόνων αποτελεί το ουσιαστικό τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η διαδικασία της ψηφιακοποίησης της εικόνας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού (MATLAB). Δημιουργήθηκε κατάλληλος κώδικας (Παράρτημα Α) για την μετατροπή των εικόνων σε πίνακα και την περαιτέρω επεξεργασία. Η διαδικασία της επεξεργασίας της εικόνας αλλά και της συλλογής των δεδομένων, περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Λαμβάνει χώρα η προετοιμασία του διαλύματος απεσταγμένου νερού και γλυκερίνης (καθορισμένης σύστασης) ή καθαρού νερού.

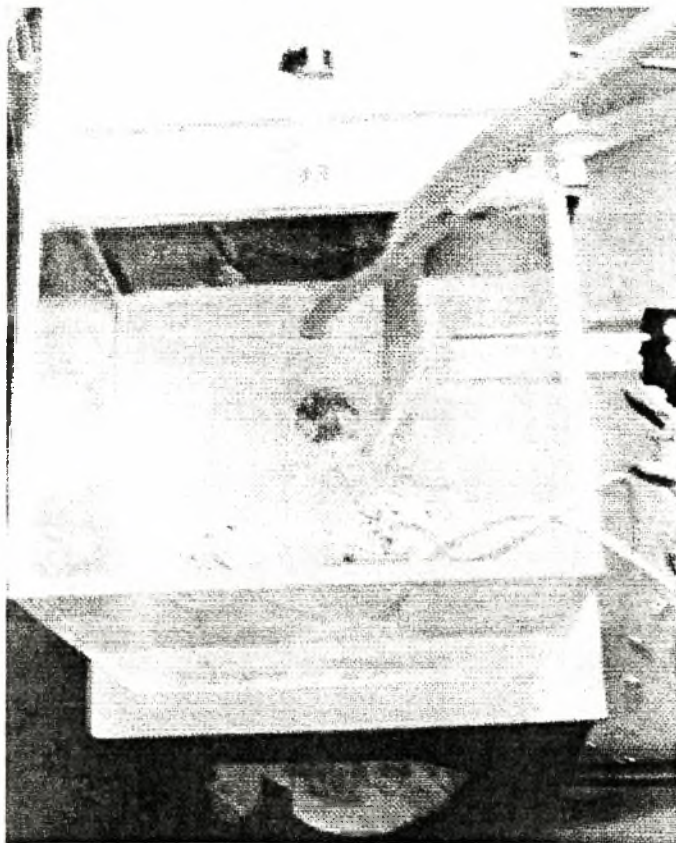
Βήμα 2^ο: Το διάλυμα τοποθετείται στο δοχείο συλλογής και ανάμιξης (σχ 3.7.1).

Βήμα 3^ο: Με την βοήθεια των αντλιών το διάλυμα ρέει προς το δοχείο υπερχειλίσης (σχ3.7.2).

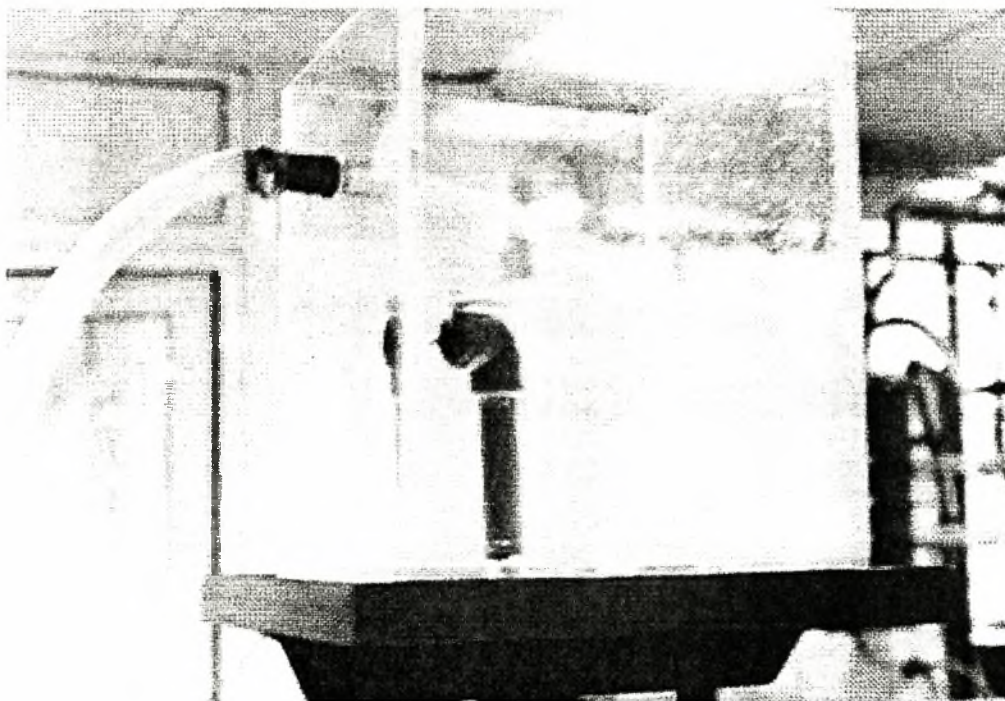
Βήμα 4^ο: Από το δοχείο υπερχειλίσης και με την χρήση κατάλληλης συνδεσμολογίας συστήματος βανών-ακροφυσίων-ελαστικών σωλήνων και λόγω υψομετρικής διαφοράς, το ρευστό οδηγείται στο δευτερεύων κανάλι υπερχειλίσης (σχ3.7.3).

Βήμα 5^ο: Από το δευτερεύων κανάλι υπερχειλίσης το ρευστό λόγω υπερχειλίσης ρέει πάνω στην πλάκα Plexiglas και καταλήγει στο δοχείο συλλογής (σχ3.7.4). Τα βήματα 1 έως 5 αποτελούν τον κύκλο ροής του διαλύματος, συγκεκριμένης συγκέντρωσης σε χρωστική ουσία .

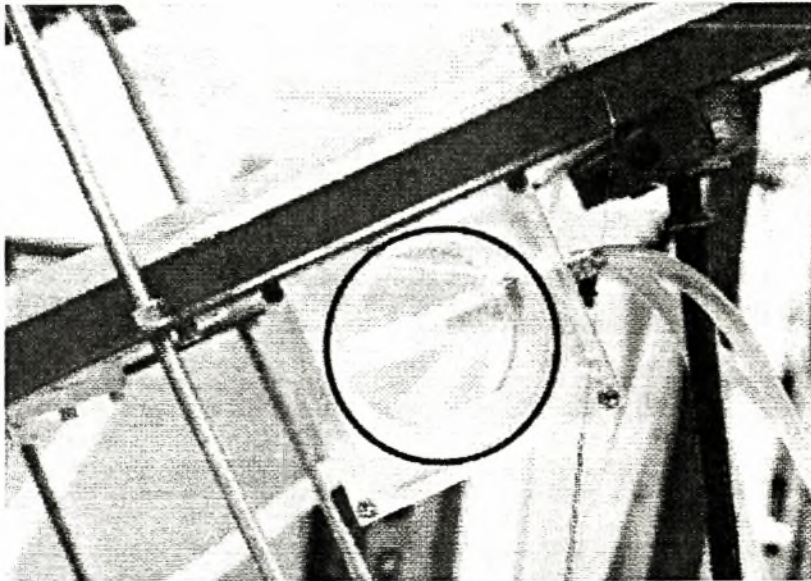
Βήμα 6^ο: Ενεργοποίηση των πηγών ακτινοβολίας φωτός (λαμπτήρες TLK 40W).



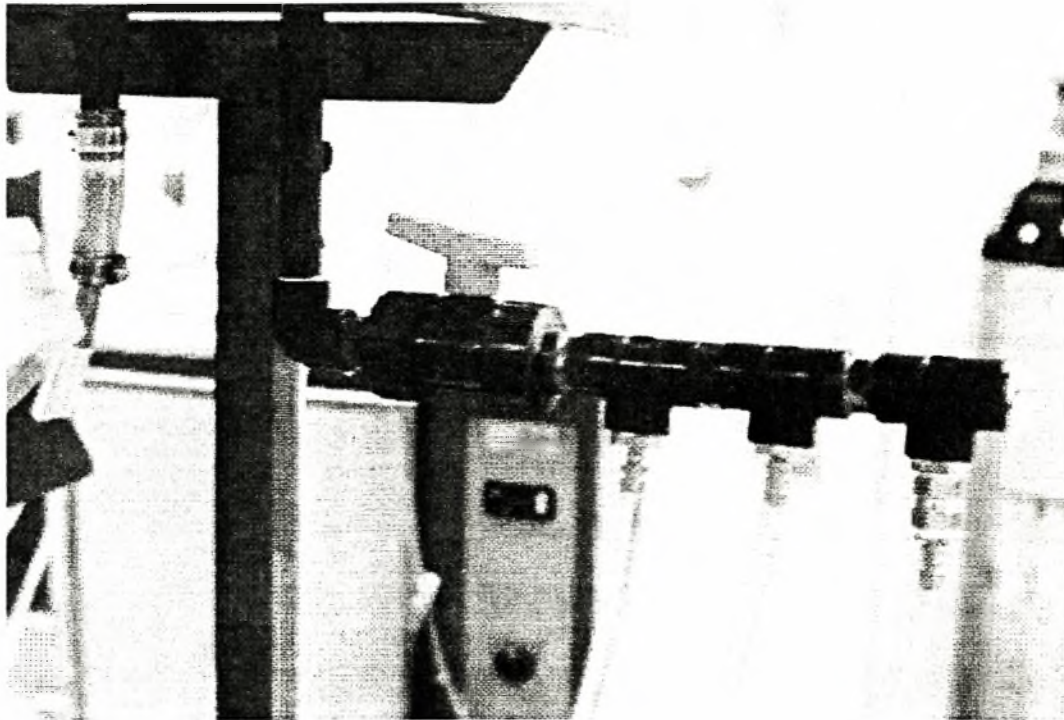
Σχήμα 3.7.1.: Δοχείο συλλογής και ανάμιξης



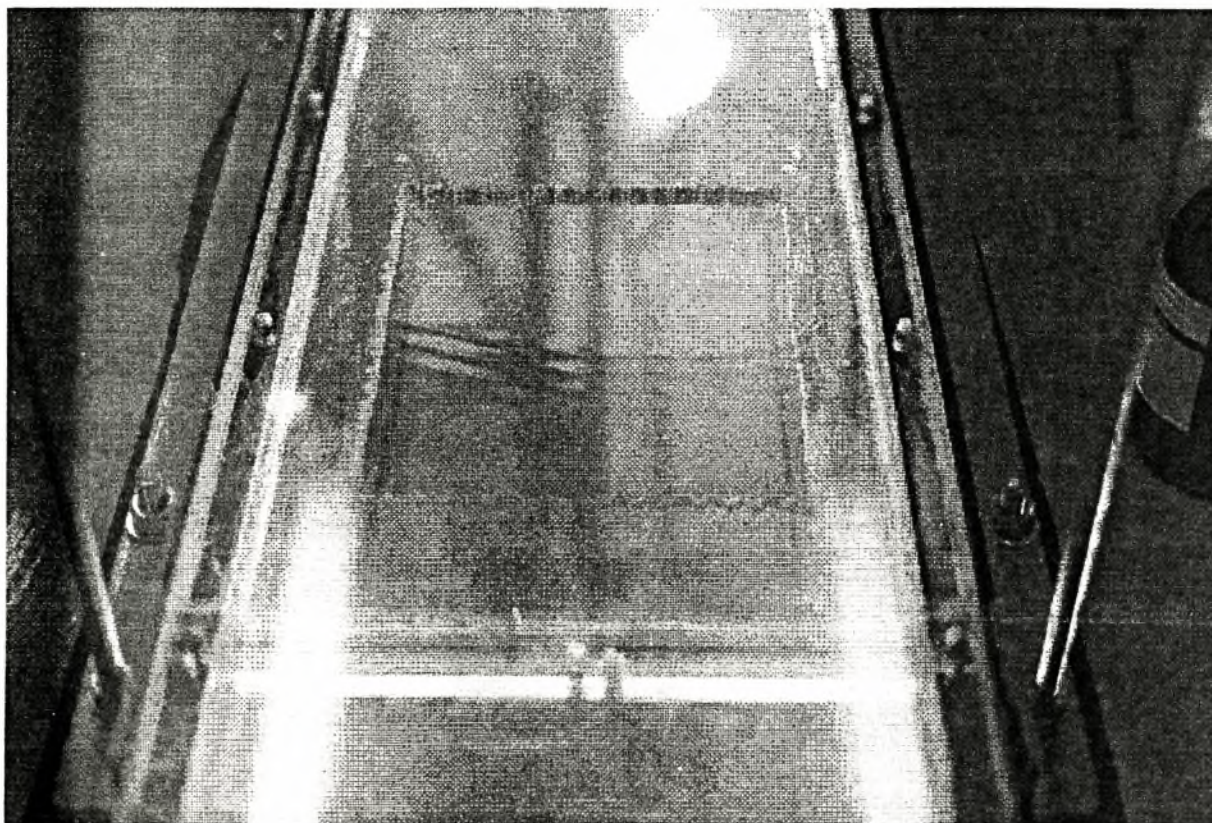
Σχήμα 3.7.2: Δοχείο υπερχείλισης



Σχήμα 3.7.3: Δευτερεύων κανάλι υπερχείλισης.



Σχήμα 3.7.4: Συνδεσμολογία συστήματος βανών-ακροφυσίων-ελαστικών σωλήνων



Σχήμα 3.7.5: Δημιουργία μοναχικών κυμάτων (solitary waves)

Η χρωστική ουσία τοποθετείται στο δοχείο συλλογής και ανάμιξης. Η συγκέντρωσή της στο διάλυμα, όπως έχει προαναφερθεί, είναι συγκεκριμένη οπότε η ποσότητα που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την ποσότητα του διαλύματος.

Στην συνέχεια και αφού έχει διαλυθεί η χρωστική ουσία, με την ανακυκλοφορία του διαλύματος, με την χρήση της προαναφερθείσας συνδεσμολογίας προσεγγίζεται η επιθυμητή παροχή, με ογκομετρική μέτρηση ή κατά βάρος μέτρηση (για επιβεβαίωση) και επαναχρησιμοποίηση των βανών καθορίζουμε απόλυτα την παροχή .

Γνωρίζοντας την παροχή, είναι δυνατός ο υπολογισμός του αριθμού Re και στη συνέχεια ο υπολογισμός του πάχους του υμένα, με βάση τη θεωρία υγρού υμένα (βιβλιογραφία σχέση 2.10). Οπότε αφού έχουν ελεγχθεί όλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν το πείραμα ακολουθεί η λήψη φωτογραφιών.

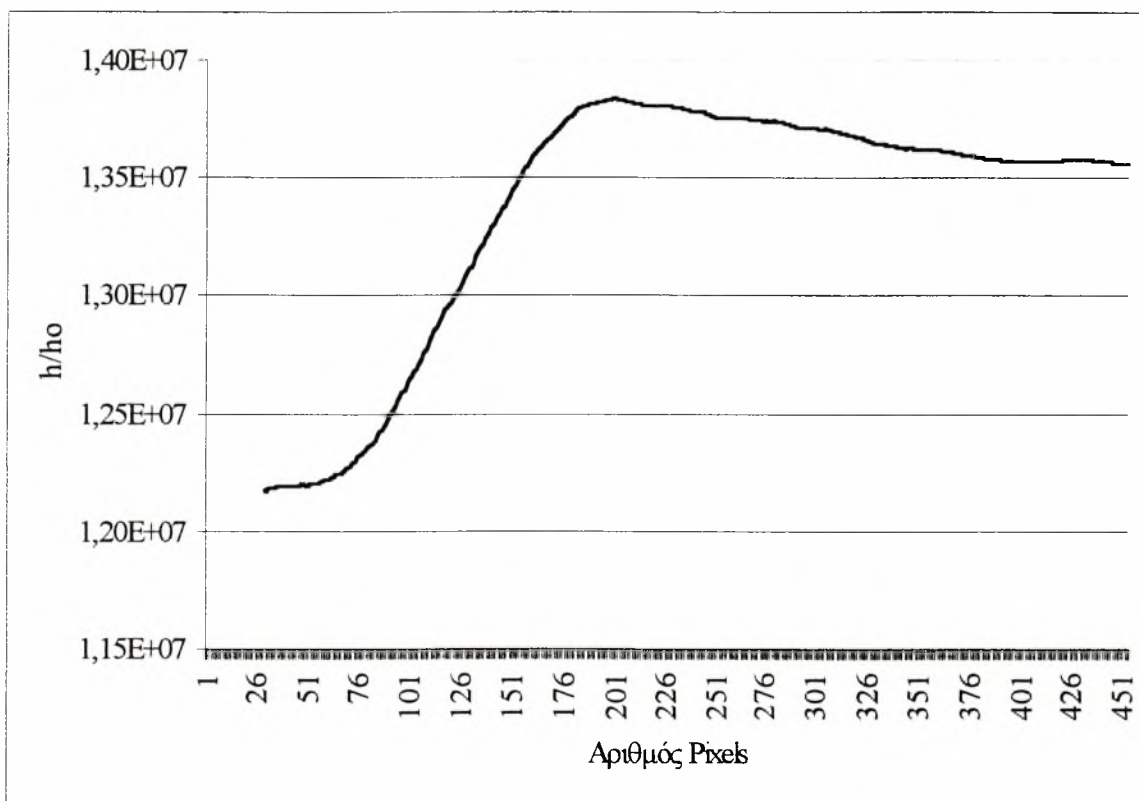
Στο επόμενο στάδιο εξέλιξης του πειράματος σειρά έχει η δημιουργία διαταραχών στη ροή του ρευστού και ο σχηματισμός μοναχικών κυμάτων (solitary waves) κατά το μήκος της ροής.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ηλεκτροβαλβίδα με χρονοδιακόπτη, ο συνδυασμός των οποίων έχει ακρίβεια 0,2 sec. Η επιλογή της ηλεκτροβαλβίδας οφείλεται στο ότι με την

συγκεκριμένη συσκευή είναι δυνατή η επίτευξη μικρών συχνοτήτων (έγιναν πειράματα με συχνότητα διαταραχής από 0.166 Hz έως 1 Hz) και λόγω ευκολίας στην χρήση της καθώς στο χαμηλό κόστος απόκτησης αλλά και λειτουργίας της.

Προγραμματίζοντας τον χρονοδιακόπτη της ηλεκτροβαλβίδας δημιουργούνται διαταραχές στην επιφάνεια του ρευστού το οποίο βρίσκεται στο δοχείο υπερχειλίσσης. Ως αποτέλεσμα έχουμε την δημιουργία μοναχικών κυμάτων κατά το μήκος της ροής πάνω από το κανάλι plexiglass (σχ.3.7.5). Ακολούθως υπολογίζεται η μέση παροχή, με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, καθώς και ο μέσος αριθμός Re.

Το είδος των διαταραχών που δημιουργείται είναι ένα είδος «υδραυλικού άλματος», η μορφή του οποίου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχημα 3.7.6: Αναπαράσταση κύματος της μορφής υδραυλικού άλματος .

Με βάση τον προγραμματισμό της ηλεκτροβαλβίδας (χρόνος που η ηλεκτροβαλβίδα είναι ανοιχτή σε σχέση με τον χρόνο που είναι κλειστή), ρυθμίζεται πέρα από το μήκος του κύματος της διαταραχής, και το πλάτος των κυμάτων.

Η λήψη φωτογραφιών είναι το επόμενο βήμα το οποίο περιγράφεται στην συνέχεια.

3.8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ

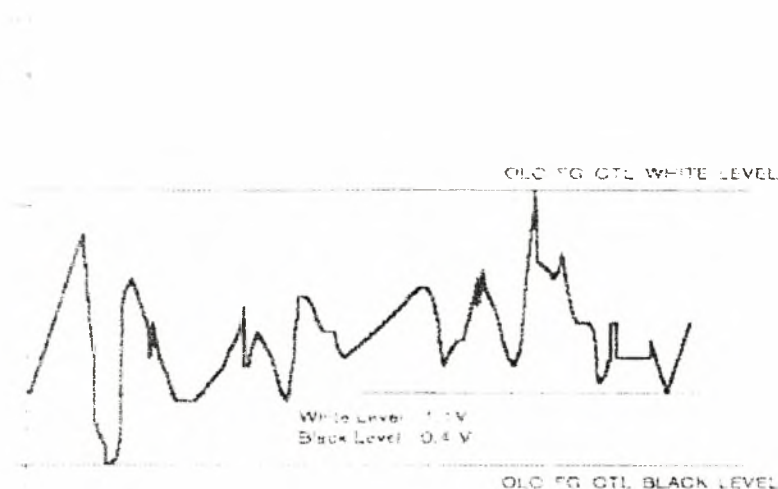
Για την επεξεργασία της εικόνας καθώς και για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του σχήματος 3.8.1 Στην συνέχεια περιγράφονται οι συσκευές που περιλαμβάνει η διάταξη καθώς και οι λειτουργίες που εκτελεί κάθε μια από αυτές.

Την ψηφιακή κάμερα CCD υψηλής ανάλυσης, μέσω της οποίας λαμβάνονται οι εικόνες και μετριέται η φωτεινότητα σε LUX.

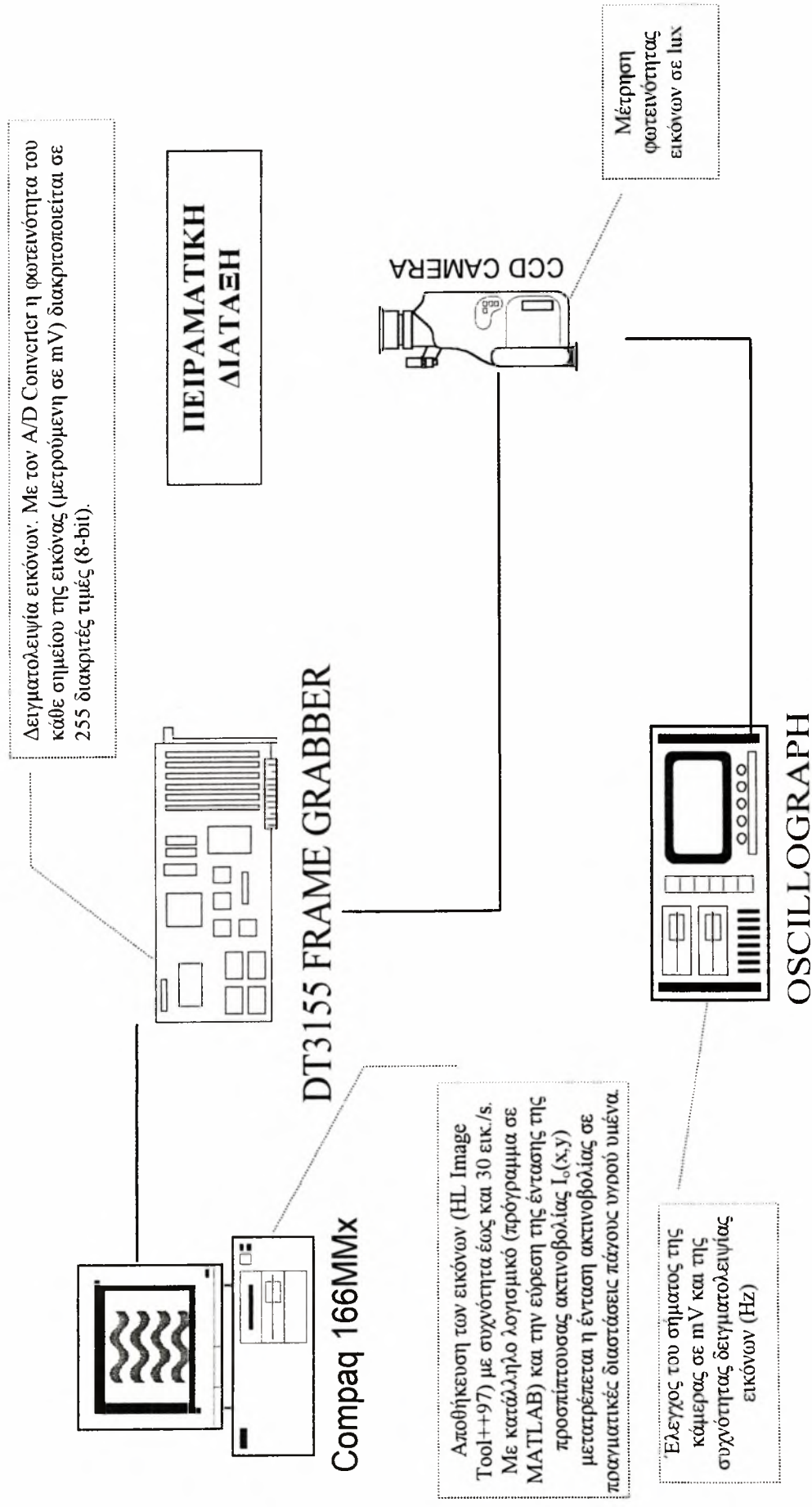
Τον εικονολήπτη (frame grabber), οι λειτουργίες που γίνονται σ' αυτή την συσκευή είναι οι εξής: Μετατρέπεται το σήμα που δέχεται από την κάμερα σε ηλεκτρικό (μετρούμενο σε mV) και στην συνέχεια μέσω του A/D Converter το σήμα διακριτοποιείται σε 255 διακριτές τιμές.

Τον παλμογράφο, μέσω του οποίου γίνεται έλεγχος του σήματος της κάμερας (σε mV) και της συχνότητας δειγματοληψίας εικόνων (Hz).

Επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι η αποθήκευση των εικόνων στον H/Y με τελικό σκοπό την επεξεργασία τους με κατάλληλο λογισμικό (MATLAB). Η αποθήκευση των εικόνων γίνεται με την χρήση του HL IMAGE TOOL 97++. Με την βοήθεια του προαναφερθέντος λογισμικού σε πρώτο στάδιο καθορίζονται τα WHITE και BLACK LEVELS της ψηφιακοποίησης, δηλαδή επιλέγονται τα επίπεδα μαύρου και λευκού επιπέδου περιορίζοντας έτσι την περιοχή της διακριτοποίησης (σχ.3.8.2). Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η βελτιστοποίηση της ανάλυσης της εικόνας. Στην συνέχεια γίνεται η αποθήκευση των φωτογραφιών με ρυθμό 10 εικόνες το δευτερόλεπτο (frames per second).



Σχήμα 3.8.2. Περιορισμός της περιοχής διακριτοποίησης



Σχήμα 3.8.1: Διάγραμμα συλλογής δεδομένων

Η επεξεργασία της εικόνας βασίζεται στην δυνατότητα μετατροπής της σε πίνακα διακριτών τιμών, μέσω κατάλληλου λογισμικού (MATLAB).

Ανάλογα με το είδος της κάθε εικόνας (αριθμός pixels) είναι δυνατή η μετατροπή της σε αντίστοιχο πίνακα όπου κάθε pixel είναι και ένα σημείο του πίνακα. Έτσι μία εικόνα 576x768 pixels μετατρέπεται στον αντίστοιχο πίνακα, με 576 γραμμές και 768 στήλες, όπου κάθε στοιχείο του πίνακα δίνει την διακριτοποιημένη ένταση του φωτισμού, στο συγκεκριμένο σημείο. Η διαδικασία επεξεργασίας αναλύεται στα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1^ο: Αποθήκευση εικόνων 576x768 pixels.

Βήμα 2^ο: Δημιουργία του αντίστοιχου πίνακα (MATLAB) $\Pi(i,j) = \Pi(576,768)$

Βήμα 3^ο: Δημιουργία του πίνακα θορύβου (NOISE MATRIX). $\text{NOISE}(576,768)$.

Για την αφαίρεση του θορύβου (offset, θερμικός) λαμβάνουμε μια σειρά εικόνων με τα ελάχιστα δυνατά white και black levels ώστε να αφαιρεθεί ο θόρυβος από την παιρεταιίρω επεξεργασία.

Βήμα 4^ο: Έυρεση της σταθεράς $K \cdot I_o$ της σχέσης 3.2.2.

Η έυρεση της σταθεράς $K \cdot I_o$ είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία της τεχνικής διότι αποτελεί την ένταση που εκπέμπεται από τον υμένα όταν αυτός είναι ευσταθής και επίπεδος συνθέτει δηλαδή την βάση σύγκρισης των επόμενων μετρήσεων (BASE-LINE).

Στην συνέχεια λαμβάνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός εικόνων και με την διαδικασία του frame averaging, της σύγκρισης δηλαδή με την BASE-LINE, δημιουργείται ο τελικός πίνακας:

$$I_o \text{ new}(i,j) = I_o(i,j) - \text{NOISE}(i,j) \quad \text{για κάθε } i,j. \quad (\text{σχ. 3.8.1})$$

Όπου $I_o \text{ new}(i,j)$: Ο προκύπτων πίνακας του frame averaging.

$I_o(i,j)$: Ο πίνακας που δημιουργήθηκε κατά την συλλογή των εικόνων σε επίπεδο ευσταθή υμένα.

Βήμα 5^ο: Υπολογισμός της αναλογίας h/h_o .

Σύμφωνα με την σχέση 3.2.2 έχουμε $I = K \cdot I_o \cdot h$ και $I_o = K \cdot I_o \cdot h_o$. Άρα $h/h_o = I/I_o$.

Όπου h : Το τοπικό πάχος υμένα

h_o : Το πάχος του ευσταθούς υμένα.

I, I_o : Οι αντίστοιχες εντάσεις εκπομπής υπεριώδους φωτός που λαμβάνονται από την κάμερα με την μορφή εικόνων (Bitmap). Αφού η κάθε εικόνα έχει μετατραπεί στον ανάλογο πίνακα $\Pi(i,j)$ με $i=1$ έως 576 και $j=1$ έως 768 .

Τελικά θα ισχύει:

$$\mathbf{h}/\mathbf{h}_0 = \mathbf{\Pi}(i,j) / \mathbf{I}_0 \mathbf{new}(i,j). \quad (\text{σχ. 3.8.2})$$

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας περιλαμβάνει την μετατροπή των διακριτών τιμών σε mVolts.

Με την επιλογή των white και black levels είναι δυνατή η μετατροπή των διακριτών τιμών (0-255) σε mVolts τότε:

$$\mathbf{q} = (\mathbf{W.L} - \mathbf{B.L}) / 255 \quad (\text{σχ. 3.8.3})$$

Όπου q: η μετατροπή κάθε διακριτής τιμής σε mVolt.

Δηλαδή, έστω $\mathbf{\Pi}(i,j)$ ο δημιουργούμενος πίνακας διακριτών τιμών, τότε η μετατροπή της έντασης του φωτός θα είναι :

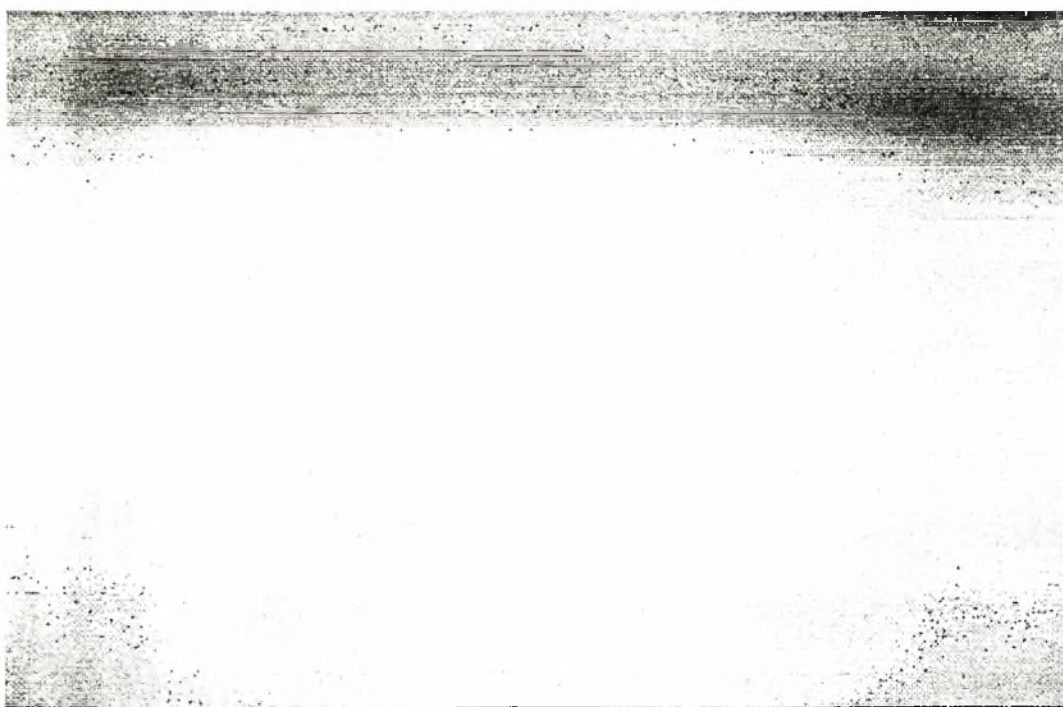
$$\mathbf{\Pi}_{\mathbf{new}}(i,j) = \mathbf{\Pi}(i,j) * \mathbf{q} + \mathbf{B.L}(i,j) - \mathbf{noise} \quad (\text{σχ. 3.8.4})$$

4. ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

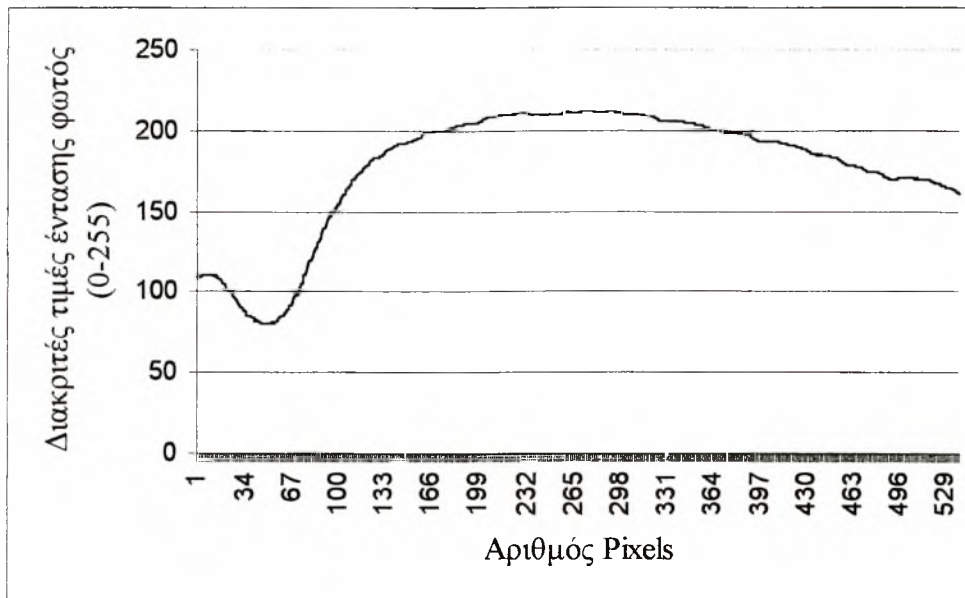
Σκοπός αυτής της πρώτης παρουσίασης των αποτελεσμάτων είναι ουσιαστικά η απόδειξη της σωστής λειτουργίας της συσκευής καθώς και της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό. Ακολουθεί η επεξήγηση των δεδομένων και μία αναφορά στις δυνατότητες της πειραματικής διαδικασίας.

Συγκεκριμένα αποδεικνύεται πως η εξωτερική διαταραχή που επιβάλλεται στο ρευστό (μέσω της ηλεκτροβαλβίδας), έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία κυμάτων η συχνότητα των οποίων είναι η ίδια με την συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής.

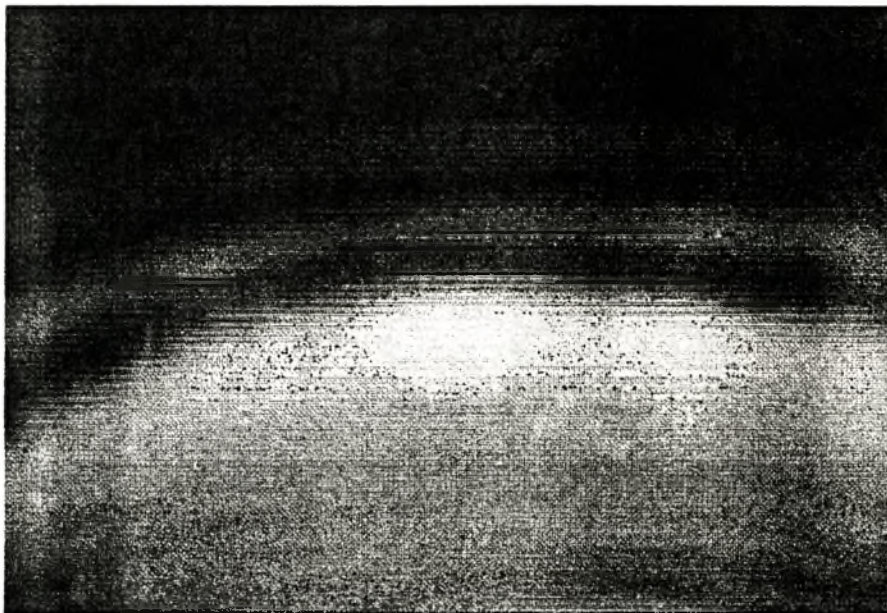
Στην συνέχεια δίδονται μερικές φωτογραφίες διδιάστατων κυμάτων (2D) συνοδευόμενες από τα line profile, μέσω των οποίων είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων.



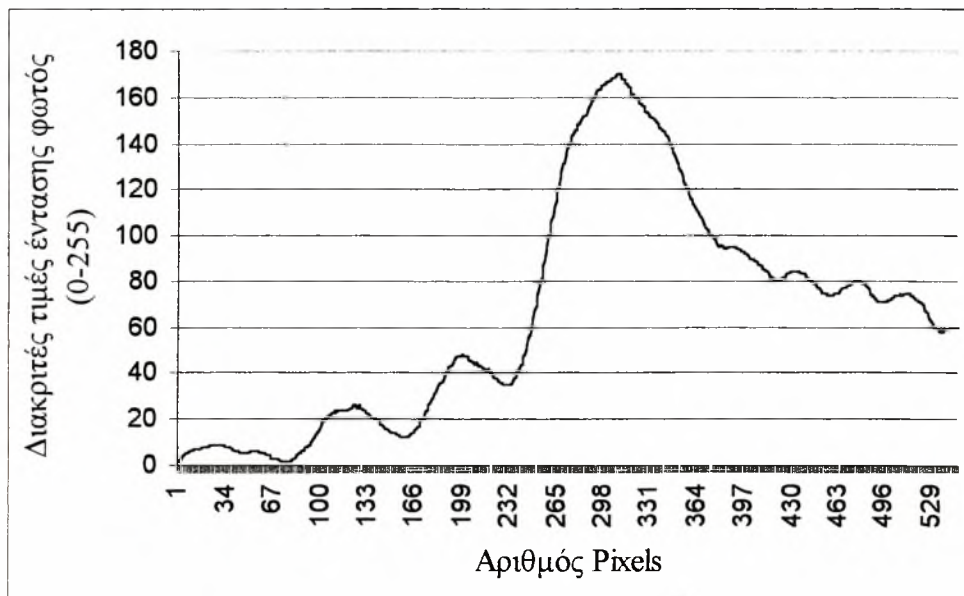
Σχήμα 4.1: Ένταση φωτισμού κατά μήκος μιάς γραμμής εγκάρσια στην ροή. Συνθήκες μέτρησης: $Q=900 \text{ Kg/min}$, $\nu=0,25\text{Hz}$, θέση μέτρησης: 252mm . Διάλυμα: Καθαρό νερό



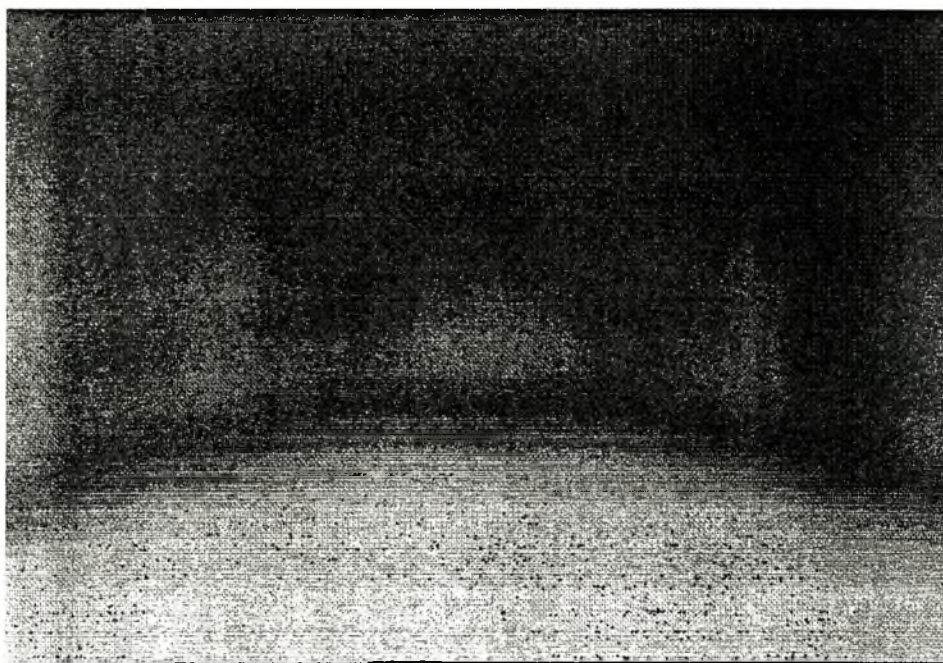
Σχήμα 4.2: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής (line profile). Αναφέρεται στην εικόνα 4.1



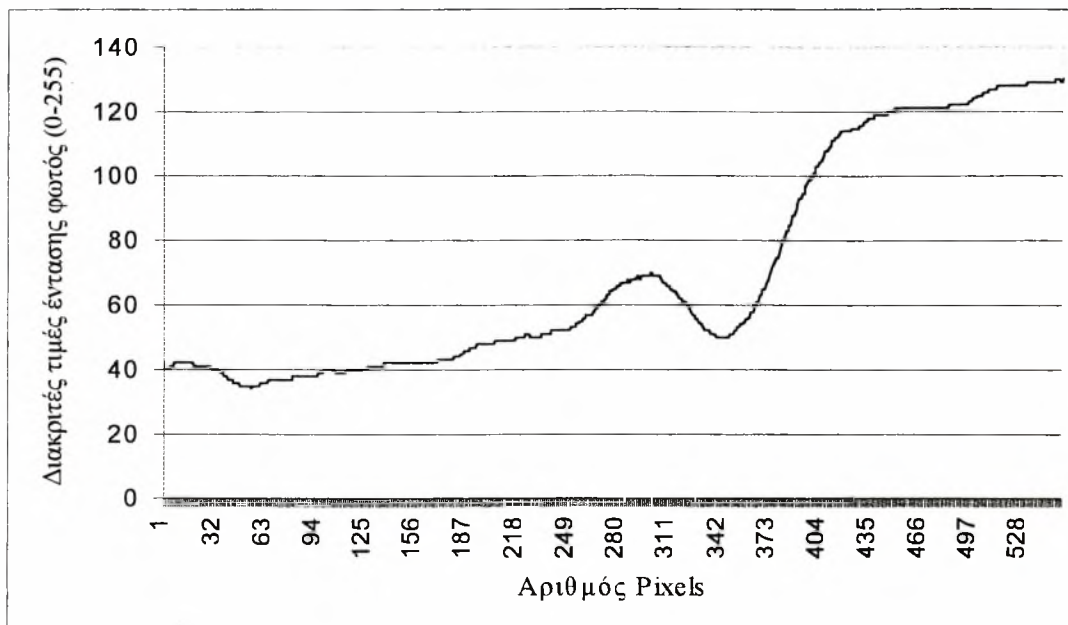
Σχήμα 4.3: Ένταση φωτισμού κατά μήκος μιάς γραμμής εγκάρσια στην ροή. Συνθήκες μέτρησης: $Q=960 \text{ Kg/min}$, $\nu=0,25\text{Hz}$, θέση μέτρησης: 252mm . Διάλυμα: Καθαρό νερό



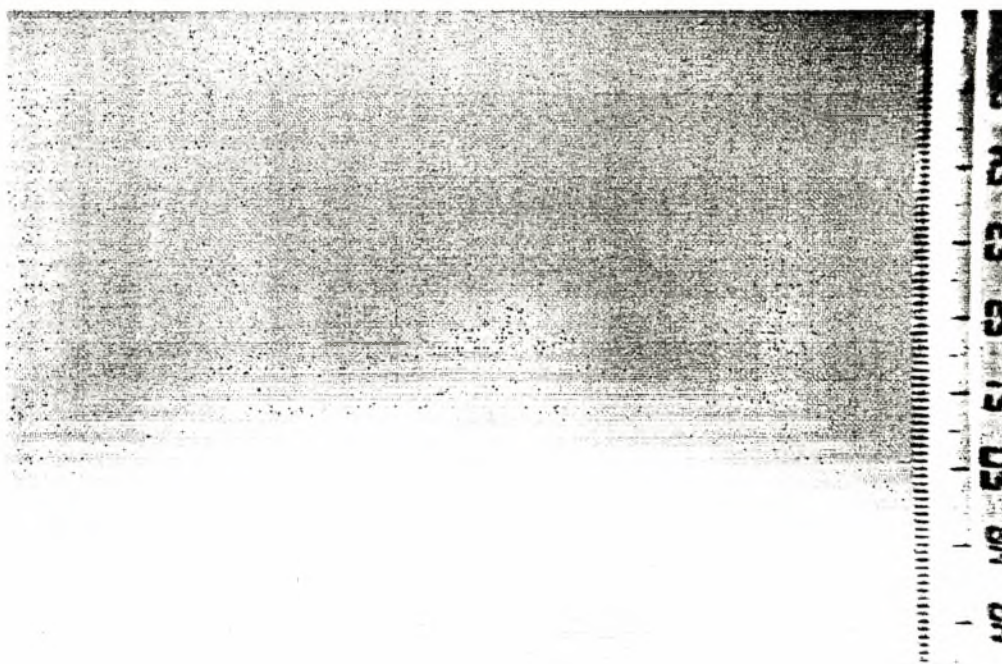
Σχήμα 4.4: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής (line profile). Αναφέρεται στην εικόνα 4.3



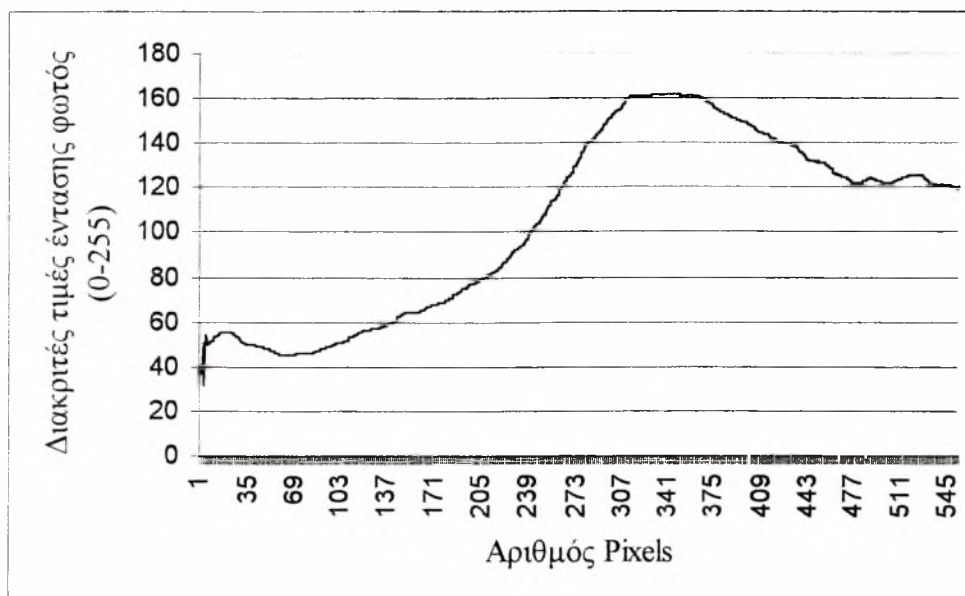
Σχήμα 4.5: Ένταση φωτισμού κατά μήκος μιάς γραμμής εγκάρσια στην ροή. Συνθήκες μέτρησης: $Q=810 \text{ Kg/min}$, $\nu=0,2\text{Hz}$, θέση μέτρησης: 522mm . Διάλυμα: 20% γλυκερίνη.



Σχήμα 4.6: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής (line profile). Αναφέρεται στην εικόνα 4.5



Σχήμα 4.7: Ένταση φωτισμού κατά μήκος μιάς γραμμής εγκάρσια στην ροή. Συνθήκες μέτρησης: $Q=1300 \text{ Kg/min}$, $\nu=1\text{Hz}$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: 20% γλυκερίνη



Σχήμα 4.8: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής (line profile). Αναφέρεται στην εικόνα 4.7

Οι παραπάνω εικόνες παρέρχονται από διαφορετικές σειρές μετρήσεων όπου οι παράμετροι διεξαγωγής κάθε σειράς μετρήσεων ήταν διαφορετικοί. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

Η γωνία κλίσης του επίπεδου καναλιού με το οριζόντιο επίπεδο.

Η συχνότητα των επιβαλλόμενων διαταραχών.

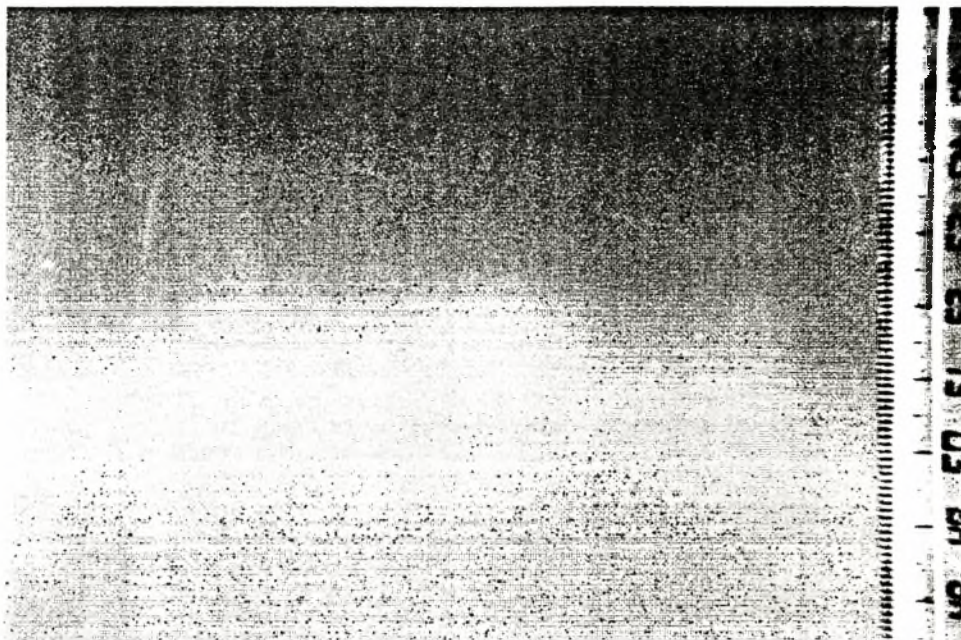
Η κατά βάρος σύσταση του διαλύματος.

Η ρύθμιση των black και white levels.

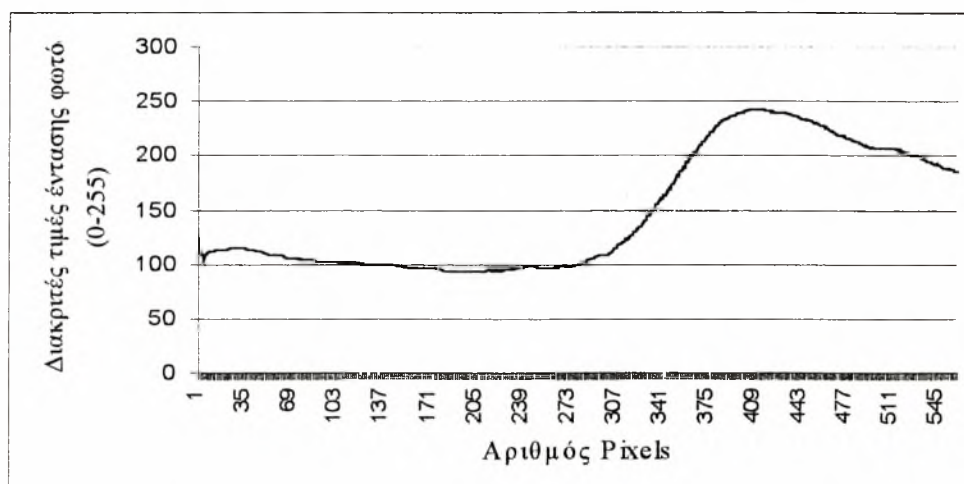
Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται καθαρά ο καθοριστικός ρόλος ρύθμισης των white και black levels. Η κατάλληλη ρύθμιση των ορίων αυτών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία εικόνων υψηλής ευκρίνειας.

Οι διακυμάνσεις στην φωτεινότητα (αποχρώσεις) είναι το αποτέλεσμα του φθορισμού του διαλύματος και δίνουν πληροφορίες για το πάχος του υμένα. Σε όσα σημεία της εικόνας η απόχρωση πλησιάζει το άσπρο χρώμα, σημαίνει ότι σ'αυτή την περιοχή υπάρχει έντονος φθορισμός δηλαδή υπάρχει μεγαλύτερη ένταση εκπεμπόμενου φωτός άρα έχουμε μεγαλύτερο πάχος υμένα. Εκτός από την οπτική παρατήρηση, με την κατασκευή του line profile είναι δυνατή η συλλογή ακριβών στοιχείων σχετικά με την μορφή και το πάχος του υμένα.

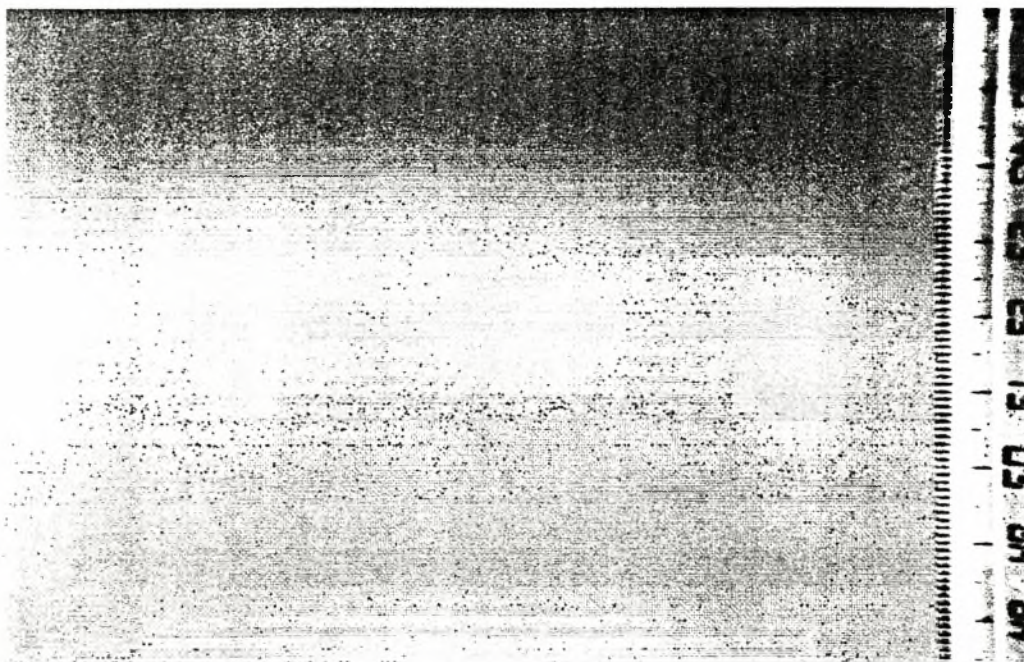
Ακολουθεί μια σειρά συνεχών εικόνων στις οποίες οι παράμετροι του πειράματος παραμένουν σταθεροί (σχ 4.9-11-13).



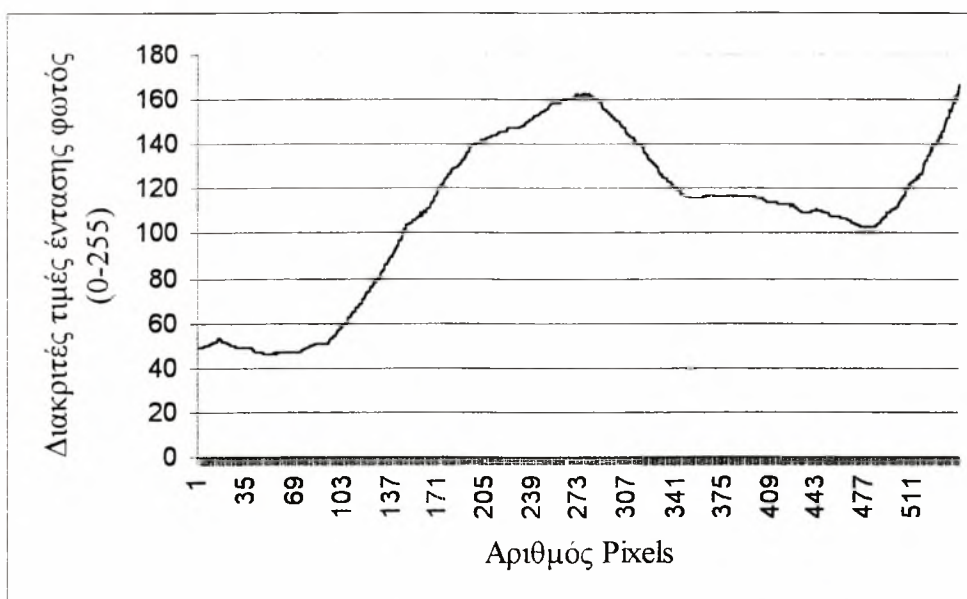
Σχήμα 4.9: Απεικόνιση κύματος την χρονική στιγμή: $t=0$



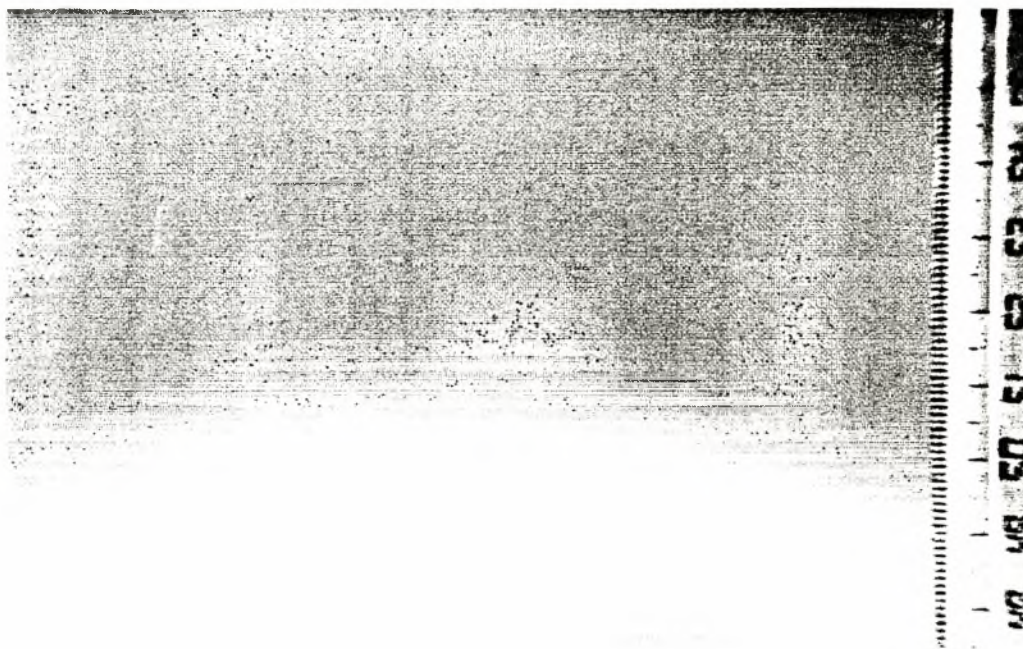
Σχήμα 4.10: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής (line profile). Αναφέρεται στην εικόνα 4.9



Σχήμα 4.11: Απεικόνιση κύματος την χρονική στιγμή: $t=1$



Σχήμα 4.12: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής (line profile). Αναφέρεται στην εικόνα 4.11



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση κύματος την χρονική στιγμή: $t=2$

Στις παραπάνω συνεχόμενες εικόνες αποτυπώνεται η κίνηση του κύματος. Την χρονική στιγμή $t=0$, εμφανίζεται στην εικόνα το κύμα την χρονική στιγμή $t=1$, το κύμα κινείται προς το τέλος της εικόνας ενώ την χρονική στιγμή $t=2$ έχει απομακρυνθεί από τα όρια λήψης της κάμερας ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται το επόμενο κύμα.

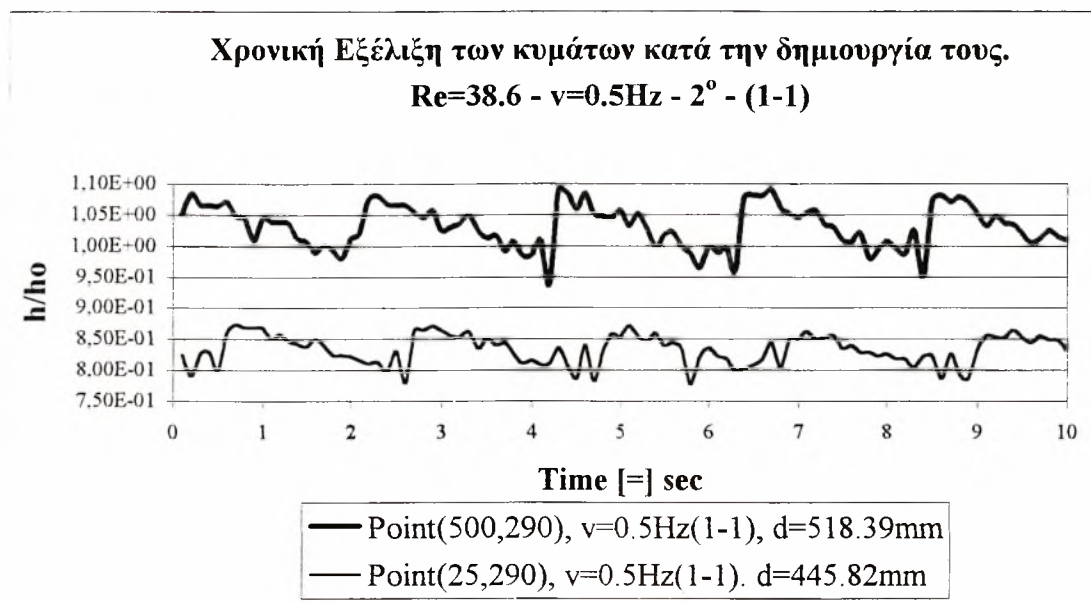
Η χρήση του χάρακα στις εικόνες επιτρέπει την μετατροπή των pixels σε cm (είναι γνωστό ότι μία εικόνα αποτελείται από 576×768 pixels)

Από τα δεδομένα των παραπάνω εικόνων φαίνεται η μορφή των δημιουργούμενων κυμάτων καθώς και η κίνησή τους κατάντη της ροής. Με την βοήθεια μίας σειράς από συνεχόμενες εικόνες (άνω των 100) είναι εφικτή η μέτρηση της ταχύτητας του κύματος. Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής :

Δημιουργώντας το διάγραμμα εξάρτησης του ύψους του υμένα σε σχέση με τον χρόνο, σε δύο διαφορετικά σημεία εντός της ίδιας εικόνας, υπολογίζεται με απλή παρατήρηση το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί για την μετακίνηση της κορυφής του μοναχικού κύματος μεταξύ των δύο θέσεων..

Στην συνέχεια παρατίθεται ένα διάγραμμα όπου εμφανίζεται η ροή του διαλύματος στον άξονα x, σε δύο διαφορετικά σημεία ($V1, V2$) τα οποία απέχουν καθορισμένη απόσταση μεταξύ

τους. Οι παράμετροι του πειράματος είναι γνωστοί. Χρησιμοποιήθηκε καθαρό νερό ως διάλυμα, η γωνία κλίσης του καναλιού ήταν 2° , ενώ η συχνότητα των επιβαλλόμενων διαταραχών είναι 0,5 Hz (σχ.4.14).

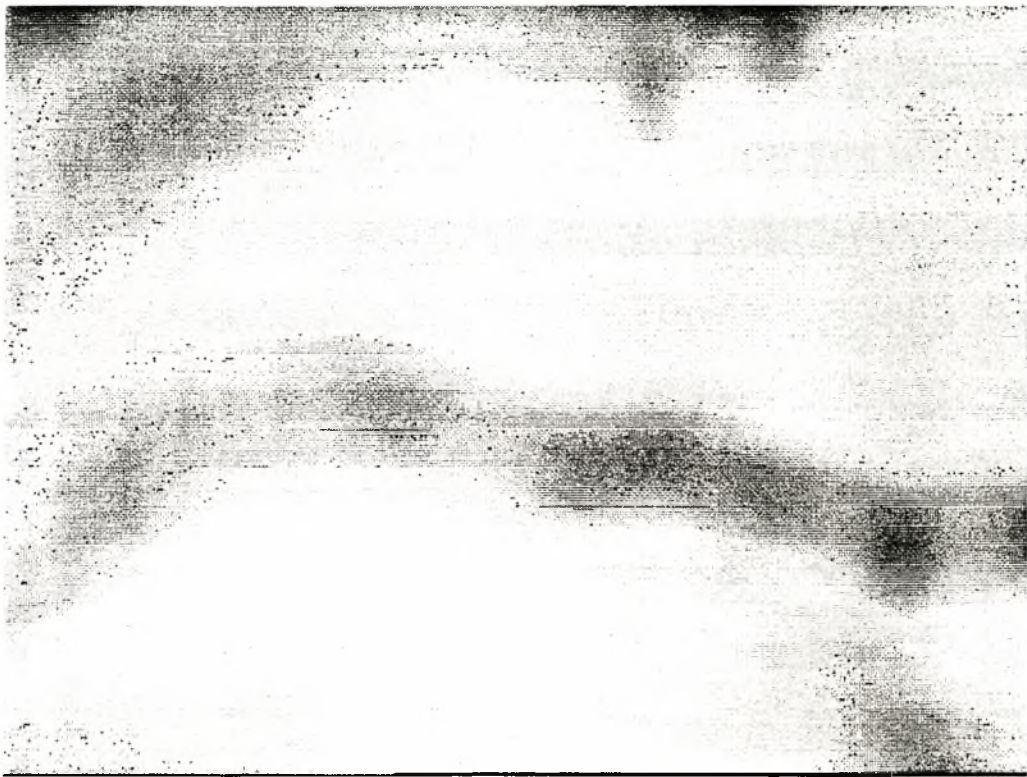


Σχήμα.4.14

Η προγραμματισμένη συχνότητα διαταραχών, όπως έχει προαναφερθεί, είναι 0.5 Hz και από το σχήμα 4.14 φαίνεται η εμφάνιση πέντε κυμάτων σε χρονικό διάστημα $t=10$ sec. Δηλαδή η συχνότητα των δημιουργούμενων διαταραχών είναι 0.5 Hz, όση είναι και η συχνότητα της εξωτερικής διαταραχής, δηλαδή η εξωτερική διαταραχή μεταφέρεται πλήρως στον υμένα.

Πειράματα που έγιναν με διαφορετικά διαλύματα, γωνία κλίσης του καναλιού και συχνότητα επιβαλλόμενων διαταραχών επιβεβαίωσαν τα προαναφερθέντα αποτελέσματα.

Εώς τώρα έγινε αναφορά μόνο για διδιάστατα κύματα, τα παραπάνω συμπεράσματα όμως ισχύουν και για τρισδιάστατα κύματα (σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15: Ένταση φωτισμού κατά μήκος μιάς γραμμής εγκάρσια στη ροή τριδιάστατου κύματος

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά την πρώτη αναφορική παρουσίαση των δυνατοτήτων της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό και την απόδειξη σωστής λειτουργίας της ακολουθεί λεπτομερή παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται μία πρώτη προσπάθεια περιγραφής και μελέτης των δημιουργούμενων κυμάτων με την χρήση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό, όταν κατά την ροή λεπτού υμένα πάνω σε επίπεδο τοίχωμα, επιβληθούν εξωτερικές διαταραχές. Για τον σκοπό αυτό έγινε πλήθος πειραμάτων στα οποία μεταβάλλονταν κάθε φορά οι παράμετροι διεξαγωγής τους.

Χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα με διαφορετικές συστάσεις (καθαρό νερό, νερό-γλυκερίνη με 10%, 20%, 30%, 50%, σύσταση κατά βάρος), διαφορετικές γωνίες κλίσης του επίπεδου καναλιού (1° - 7°), διαφορετικές συχνότητες επιβολής διαταραχών (1Hz-0,16Hz) καθώς και για μέσους αριθμούς Re από Re=22 έως Re=200. Όλες οι εικόνες έχουν παρθεί σε απόσταση 522 mm από το σημείο υπερχειλίσης, δηλαδή το σημείο γέννησης των κυμάτων.

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων παρατηρήθηκε η δημιουργία διδάστιων μοναχικών κυμάτων αλλά και κύματα της μορφής “υδραυλικού άλματος”. Στην συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση που είχε στην εξέλιξη των κυμάτων η μεταβολή των προαναφερθέντων παραμέτρων.

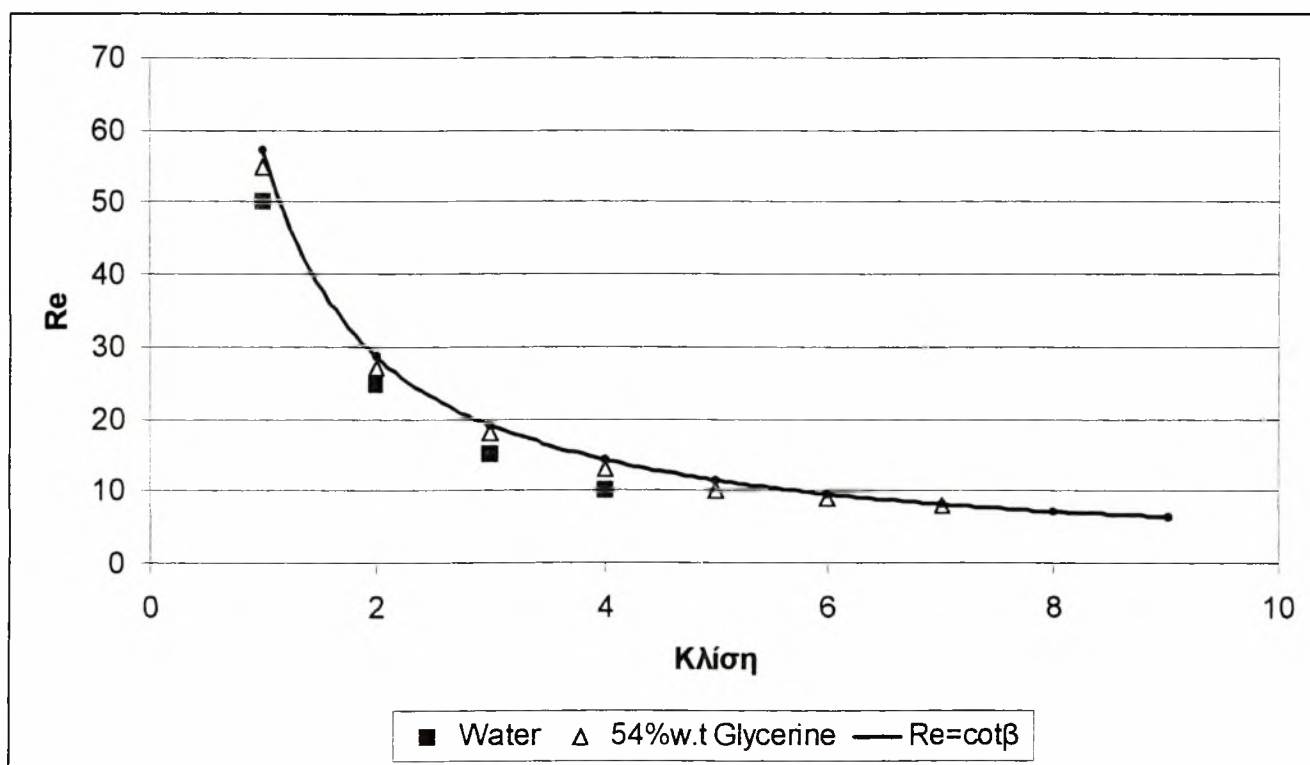
Ο ολικός όγκος των πειραμάτων είναι τεράστιος και η παρουσίασή του ξεφεύγει από τον σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θεωρήθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί ένα μέρος των πειραμάτων, μέσω του οποίου θα γίνει κατανοητός ο τρόπος που επιλέχτηκε για την οργάνωση της διαδικασίας αλλά και για την καταγραφή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια αφορούν διάλυμα καθαρού νερού, για γωνία κλίσης του επίπεδου καναλιού 2° και 4° μοίρες, για μέσους αριθμούς Re από Re=47 έως Re=153 και συχνότητες επιβολής διαταραχών από $\nu = 0,16$ Hz έως $\nu = 1$ Hz, (με διαφορετικούς χρόνους προγραμματισμού της ηλεκτροβαλβίδας). Ολόκληρη η σειρά των μετρήσεων παρατίθεται στο παράρτημα Β, στο κεφάλαιο αυτό επιλέχτηκε ένα μέρος των μετρήσεων μέσω του οποίου επιτράπηκε η εξαγωγή συμπερασμάτων. Στο πίνακα που ακολουθεί (πιν. 5.1) αναφέρεται η ονομασία και οι παράμετροι των πειραμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια.

Q (παροχή) Kg/min	Μέσος αριθμός Re	Όνομα πειράματος	Σχήμα	Συχνότητα εξωτερικών διαταραχών (ν) σε Hz	Χρόνος προγραμματισμού ηλεκτροβαλβίδας σε sec (ανοιχτή- κλειστή)	Κλίση επίπεδου καναλιού σε μοίρες	Απόσταση σε mm	Είδος διαταραχής
57,6 Kg/min	57	Expv1Re57B	Σχήμα 5.2	1 Hz	0,5 sec-0,5 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
2,165 Kg/min	144	Expv1Re144B	Σχήμα 5.3	1 Hz	0,5 sec-0,5 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
0,8 Kg/min	53	v05#11Re53B	Σχήμα 5.4	0,5 Hz	1 sec-1 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,88 Kg/min	125	v05#11Re125B	Σχήμα 5.5	0,5 Hz	1 sec-1 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,48 Kg/min	99	v05#0515Re99B	Σχήμα 5.6	0,5 Hz	0,5 sec-1,5 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,06 Kg/min	70	v025#13Re70B	Σχήμα 5.7	0,25 Hz	1 sec-3 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,095 Kg/min	73	v016#0555Re73B	Σχήμα 5.8	0,16 Hz	0,5 sec-5,5 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
2,04 Kg/min	136	v016#0555Re136B	Σχήμα 5.9	0,16 Hz	0,5 sec-5,5 sec	2°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
0,92 Kg/min	61	4v016#15Re61B	Σχήμα 5.10	0,16 Hz	1 sec-5 sec	4°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,62 Kg/min	108	4v016#15Re108B	Σχήμα 5.11	0,16 Hz	1 sec-5 sec	4°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,055 Kg/min	70	4v016#15Re70B	Σχήμα 5.12	0,16 Hz	1 sec-5 sec	4°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
0,7 Kg/min	47	4v0,25#13Re47B	Σχήμα 5.13	0,25 Hz	1 sec-3 sec	4°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
1,05 Kg/min	70	4v0,25#13Re70B	Σχήμα 5.14	0,25 Hz	1 sec-3 sec	4°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα
0,77 Kg/min	51	4v0,5#11Re51B	Σχήμα 5.15	0,5 Hz	1 sec-1 sec	4°	522 mm	Ηλεκτροβαλβίδα

Πίνακας 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων

Εκτός από την πιστοποίηση καλής εφαρμογής της μεθόδου, όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφ. 4, ένας ουσιαστικός έλεγχος της ευστάθειας του υμένα είναι η δημιουργία της καμπύλης ευστάθειας. Ουσιαστικά διαπιστώνεται η ευστάθεια ή μη του υμένα σε διαφορετικές κλίσεις του καναλιού με βάση τον αριθμό Reynolds. Για τη δημιουργία της καμπύλης ευστάθειας οι διαταραχές που δίδονταν στο σύστημα ήταν χειροκίνητες (δημιουργία ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας) ή μέσω του συστήματος που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (ηλεκτροβαλβίδα). Και στις δύο περιπτώσεις γινόταν έλεγχος του πάχους του υμένα στη θέση δημιουργίας του καθώς και στο τελικό σημείο μέτρησης. Η εξαφάνιση ή η μείωση του πλάτους των δημιουργούμενων διαταραχών αποτέλεσε το κριτήριο ευστάθειας. Στο παρακάτω σχήμα δίδεται η καμπύλη ευστάθειας, η οποία συγκρινόμενη τόσο με τη θεωρητική πρόβλεψη όσο και με τα ανάλογα πειραματικά αποτελέσματα (σχήμα 2.6, Liu et al) βρίσκεται σε συμφωνία.



Σχήμα 5.1: Καμπύλη ευστάθειας του υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re

Στα σχήματα που ακολουθούν αναπαρίσταται η χρονική εξέλιξη μίας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση ροής και η χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1, V2) που απέχουν απόσταση 75 mm, το V1 προηγείται χρονικά του V2 δηλαδή το κύμα φτάνει πρώτα στο σημείο V1 και μετά στο V2.

Οι διάφορες αποχρώσεις οι οποίες εμφανίζονται στα διαγράμματα, σχετίζονται με το πάχος του υμένα (colour-bar). Όταν η απόχρωση πλησιάζει την κόκινη περιοχή σημαίνει ότι το πάχος του υμένα είναι υψηλό άρα παρατηρείται την κορυφή του κύματος ενώ όταν η απόχρωση του κύματος πλησιάζει την πράσινη περιοχή συνεπάγεται ότι το πάχος του υμένα είναι μικρό άρα φαίνεται το τέλος του κύματος. Οι αποχρώσεις της κίτρινης περιοχής δείχνουν ένα μέσο πάχος υμένα. Στα τρισδιάστατα σχήματα εμφανίζεται το μπλέ χρώμα στο κάτω μέρος του σχήματος. Η απόχρωση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη του θορύβου και σε ατέλειες της οπτικής μεθόδου. Στην συνέχεια αναφέρονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό.

Τα σχήματα 5.2-5.9 αναφέρονται για την σειρά μετρήσεων με γωνία κλίσης 2° μοιρών. Αρχικά παρατηρείται η εμφάνιση διδιάστατων κυμάτων με διαφορετικό μήκος και πλάτος καθώς και συχνότητα εμφάνισης, η οποία είναι ίδια με την συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής.

Από τα διαγράμματα χρονικής εξέλιξης του ύψους των διαταραχών φαίνεται ότι τα κύματα συνεχίζουν να εξελίσσονται αφού $V1 > V2$ και το V1 προηγείται χρονικά του V2. Από το σχήμα 5.2 παρατηρείται ότι για μικρούς αριθμούς $Re=57$ και συχνότητα $\nu=1$ Hz (0,5 sec-0,5 sec), το πλάτος του εμφανιζόμενου κύματος είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το ύψος του.

Στο σχήμα 5.3 και για παραμέτρους ίδιους μ'αυτούς του σχήματος 5.2, $\nu=1$ Hz (0,5 sec-0,5 sec), αλλά για αριθμό $Re=144$ φαίνεται μια αύξηση στο ύψος του κύματος ενώ το πλάτος μειώνεται. Ακόμη διακρίνεται ότι η γραμμή έναρξης του κύματος (wave insertion line) δεν είναι ομαλή πράγμα που σημαίνει ότι το κύμα αρχίζει να 'σπάει'

Για αριθμό $Re=53$ (σχ.5.4), το πλάτος της εξωτερικής διαταραχής φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του κύματος. Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.4 και 5.2 διαπιστώνεται ότι το πλάτος του δημιουργούμενου κύματος ακολουθεί το πλάτος της επιβαλλόμενης διαταραχής.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.5 και 5.3 φαίνεται ότι για παρόμοιους αριθμούς Re (σχ.5.5 $Re=125$, σχ.5.3 $Re=144$) αλλά παρατείνοντας τον χρόνο που η ηλεκτροβαλβίδα παραμένει ανοιχτή από 0,5 sec σε 1 sec επιτυγχάνεται μεγαλύτερο πλάτος κύματος. Αυτό συμβαίνει γιατί παρατείνοντας τον χρόνο που η ηλεκτροβαλβίδα παραμένει ανοιχτή ουσιαστικά μεγαλώνει το πλάτος της εξωτερικής διαταραχής και η αύξηση αυτή επηρεάζει ανάλογα και το πλάτος του κύματος.

Στο σχήμα 5.6 οι παράμετροι του πειράματος είναι $\nu=0,5 \text{ Hz}$ ($0,5 \text{ sec}^{-1}$, $1,5 \text{ sec}$) και $Re=99$. Δεν παρατηρείται καμία γενικότερη μεταβολή στη συμπεριφορά του κύματος, ωστόσο συγκρίνοντας τα σχήματα 5.6 και 5.5 διαπιστώνεται αλλαγή στο πλάτος του κύματος.

Όταν το πλάτος της επιβαλλόμενης διαταραχής ελατώνεται (αλλά διατηρείται η ίδια συχνότητα) το πλάτος του κύματος ακολουθεί την μείωση ενώ το ύψος του δεν παρουσιάζει μεταβολή.

Κατόπιν μειώνοντας την συχνότητα διαταραχής (σχ.5.7, $\nu=0,25$) κανονικά θα έπρεπε να σημειωθεί μείωση στο πλάτος του κύματος (σε σχέση με το σχ.5.6) αλλά δεν παρατηρείται η αναμενόμενη μεταβολή γιατί ταυτόχρονα αυξάνεται ο χρόνος που η ηλεκτροβαλβίδα παραμένει ανοιχτή-1sec, (σχ.5.6,- 0,5sec) και μειώνεται ο μέσος αριθμός $Re=70$ (ενώ στο σχήμα 5.6 ο μέσος αριθμός $Re=99$), δύο παράγοντες που ευνοούν την αύξηση του πλάτους του κύματος. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι μια αύξηση στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κυμάτων δηλαδή στην συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων. Αυτό δείχνει για άλλη μια φορά ότι η εξωτερική διαταραχή είναι πλήρως μεταφερόμενη.

Το ύψος του κύματος είναι ανάλογο του αριθμού Re και συγκρίνοντας το σχήμα 5.7 με τα προηγούμενα σχήματα διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός Re το ύψος του κύματος (h/h_0) αυξάνει. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση του αριθμού Re συμβάλει στην 'συμπύκνωση' του κύματος της μορφής 'υδραβλικού άλματος' με επακόλουθο την αύξηση του h/h_0 .

Αλλάζοντας την συχνότητα διαταραχής ακόμη περισσότερο σε $\nu=0,16$ (σχ.5.8) και διατηρώντας τον αριθμό $Re=73$ στα ίδια επίπεδα με αυτόν του σχήματος 5.7 ($Re=70$) διαπιστώνεται ότι το ύψος του κύματος δεν μεταβάλλεται αισθητά, ωστόσο είναι εμφανής η μεταβολή του ύψους του κύματος κατάντι της ροής. Πιο συγκεκριμένα ενώ στη θέση V1 το μέγιστο ύψος είναι 1,3 h_0 στη θέση V2 (75 mm κατάντι της ροής) το μέγιστο αυξάνεται σε 1,35 h_0 . Αυτό σημαίνει ότι για τη συγκεκριμένη κλίση και στο σημείο του καναλιού όπου γίνονται οι μετρήσεις το δημιουργούμενο κύμα δεν έχει αποκτήσει την μέγιστη τιμή του εξακολουθεί δηλαδή να αναπτύσσεται. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό σε όλα τα προηγούμενα σχήματα.

Η αύξηση του ύψους του δημιουργούμενου κύματος σε σχέση με την τιμή του αριθμού Re επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 5.9, όπου όλες οι συνθήκες είναι ίδιες μ'αυτές του σχήματος 5.8 αλλά από την τιμή του αριθμού Re . Το μέγιστο ύψος του κύματος για $Re=73$ (σχ. 5.8) είναι $h=1,35 h_0$ ενώ για αριθμό $Re=136$ (σχ. 5.9) είναι $h=1,45 h_0$.

Συμπερασματικά μπορεί να επισημανθεί ότι αυξάνοντας τον αριθμό Re , ανάλογα αυξάνεται το ύψος του κύματος ενώ η τιμή του πλάτους μειώνεται. Η αύξηση της τιμής του αριθμού Re επηρεάζει και την γραμμή έναρξης του κύματος (wave inception line) η οποία χάνει την ομαλότητά της και δημιουργούνται 'σπασίματα'. Επίσης παρατείνοντας τον χρόνο που η ηλεκτροβαλβίδα

παραμένει ανοιχτή ουσιαστικά μεγαλώνει το πλάτος της εξωτερικής διαταραχής και η αύξηση αυτή επηρεάζει ανάλογα και το πλάτος του κύματος. Ενώ για την συγκεκριμένη γωνία κλίσης του επίπεδου καναλιού και στο σημείο του καναλιού όπου γίνονται οι μετρήσεις το δημιουργούμενο κύμα δεν έχει αποκτήσει την μέγιστη τιμή του εξακολουθεί δηλαδή να εξελίσσεται.

Στην συνέχεια γίνεται αναφορά για την σειρά μετρήσεων στις 4^ο μοίρες κλίσης του επίπεδου καναλιού.

Στα 3 πρώτα σχήματα (5.10-5.11-5.12) έχουν διατηρηθεί όλοι οι παράμετροι σταθεροί εκτός του αριθμού Re, παρατηρείται εξάρτηση του ύψους του κύματος σε σχέση με την τιμή του αριθμού Re ενώ το πλάτος του κύματος παραμένει σταθερό.

Στο σχήμα 5.13 επισημάνεται, πίσω από το κύριο κύμα, η ύπαρξη τριών μικρότερων κυμάτων. Το κύριο κύμα έχει μέγιστο ύψος $h=1,5$ ho ενώ στα μοναχικά κύματα που ακολουθούν το μέγιστο ύψος μειώνεται προοδευτικά με $h_2=1,35$ ho, $h_3=1,22$ ho και $h_4=1,15$ ho.

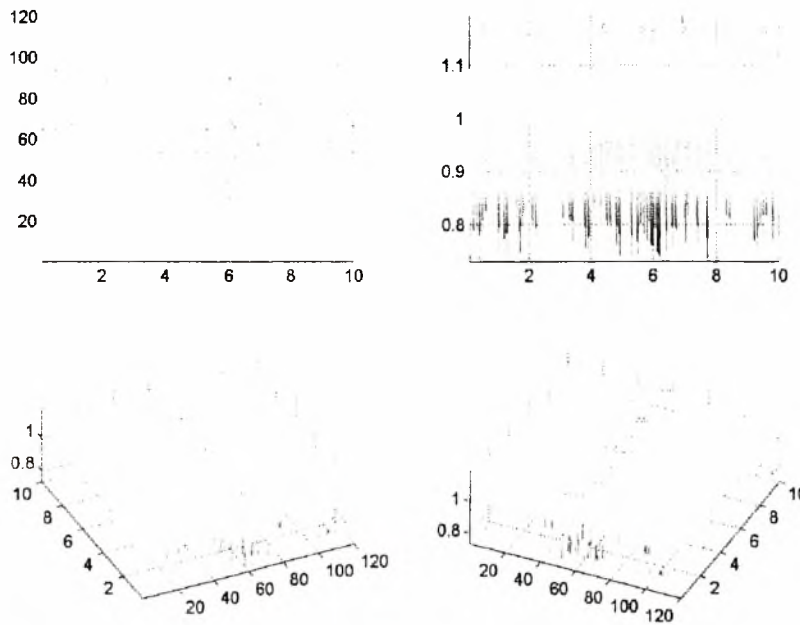
Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι στη θέση V1 το ύψος του κύματος έχει την μέγιστη τιμή του ενώ στη θέση V2 η τιμή του ελατώνεται. Αυτό σημαίνει ότι το μοναχικό κύμα που δημιουργήθηκε έχει φτάσει σε μόνιμη κατάσταση.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.14 και 5.13 παρατηρείται ότι οι παράμετροι είναι ίδιοι ($v=0,25$ και 1 sec-3 sec), εκτός του αριθμού Re που είναι $Re=47$ στο σχήμα 5.13 και $Re=70$ στο σχήμα 5.14. Το μέγιστο ύψος για $Re=47$ είναι $h=1,51$ ho ενώ για $Re=70$ είναι $h=1,7$ ho. Επιβεβαιώνεται έτσι το γεγονός ότι αύξηση του αριθμού Re συνεπάγεται αύξηση του ύψους του κύματος.

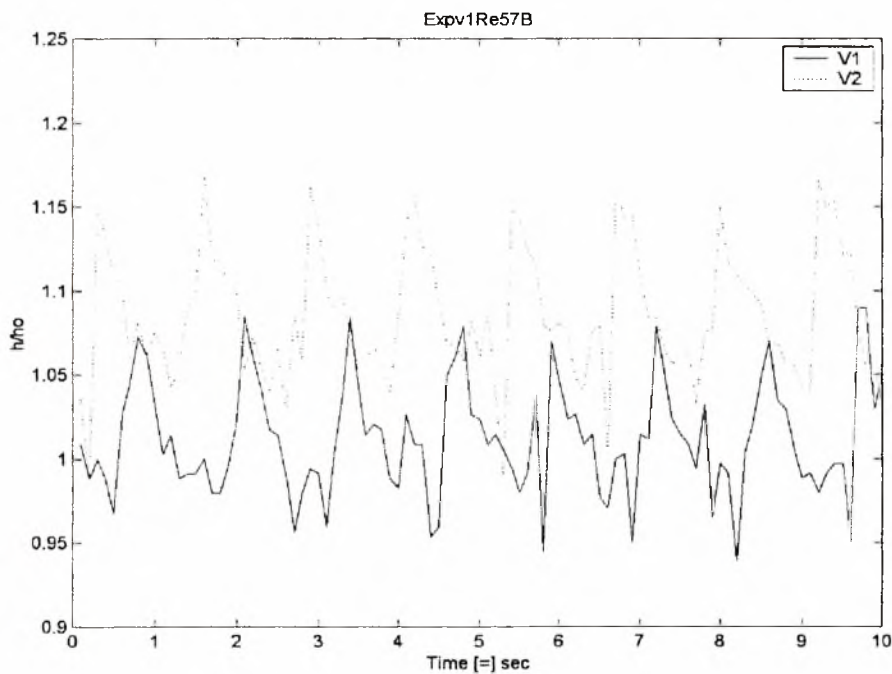
Στα σχήματα 5.13 και 5.15, όπου το πλάτος της εξωτερικής διαταραχής είναι το ίδιο (1 sec-1 sec) οι αριθμοί Re παρόμοιοι (σχ.5.13- $Re=47$ και σχ.5.15- $Re=51$), όμως η συχνότητα της εξωτερικής διαταραχής είναι $v=0,25$ Hz, 5.13 και $v=0,5$ Hz αντίστοιχα.. Η διαφορά στο ύψος είναι εμφανής στο σχήμα 5.13 το μέγιστο ύψος είναι $h=1,51$ ho ενώ στο σχήμα 5.15 παραμένει κάτω από $h=1,45$ ho. Η εξήγηση που δίνεται είναι η εξής:

Στο σχήμα 5.13 ο χρόνος που μεσολαβεί για την εμφάνιση κύριου κύματος είναι 4 sec ($v=0,25$ Hz) ενώ στο σχήμα 5.15 είναι 2,2 sec ($v=0,16$ Hz) στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος είναι αρκετός για την εξέλιξη του κυρίως αλλά και των δευτερευόντων κυμάτων, ενώ στην δεύτερη περίπτωση (σχήμα 5.15) το χρονικό διάστημα είναι μικρό, γεγονός που έχει ως συνέπεια την αλληλεπίδραση του κυρίου κύματος με τα δευτερεύοντα με αποτέλεσμα την αποτυχία πλήρους εξέλιξης των κυμάτων.

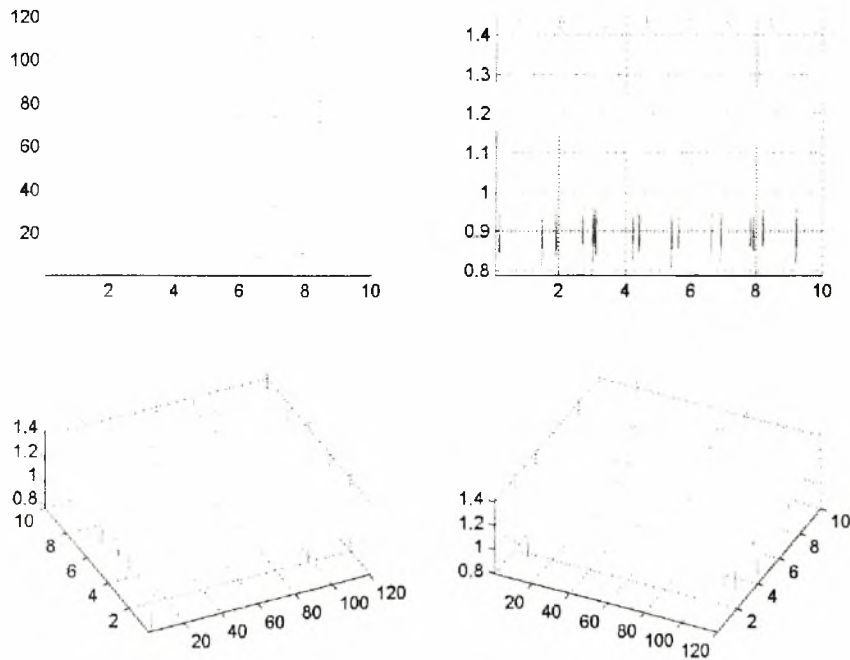
Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα με την βοήθεια των οποίων έγιναν οι παραπάνω παρατηρήσεις και ακολουθεί (σχ.5.16) ο πίνακας στον οποίο έχουν υπολογιστεί η μέση ταχύτητα των κυμάτων και το μέγιστο ύψος τους στις θέσεις V1 και V2, για την συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων.



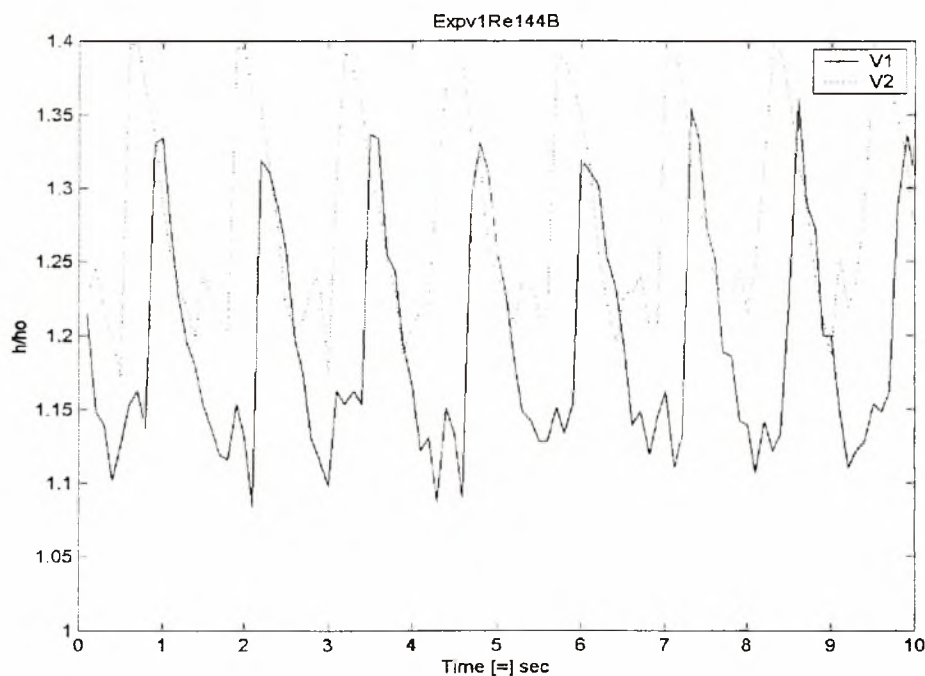
Σχήμα 5.2.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $Re=57$, Θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό.



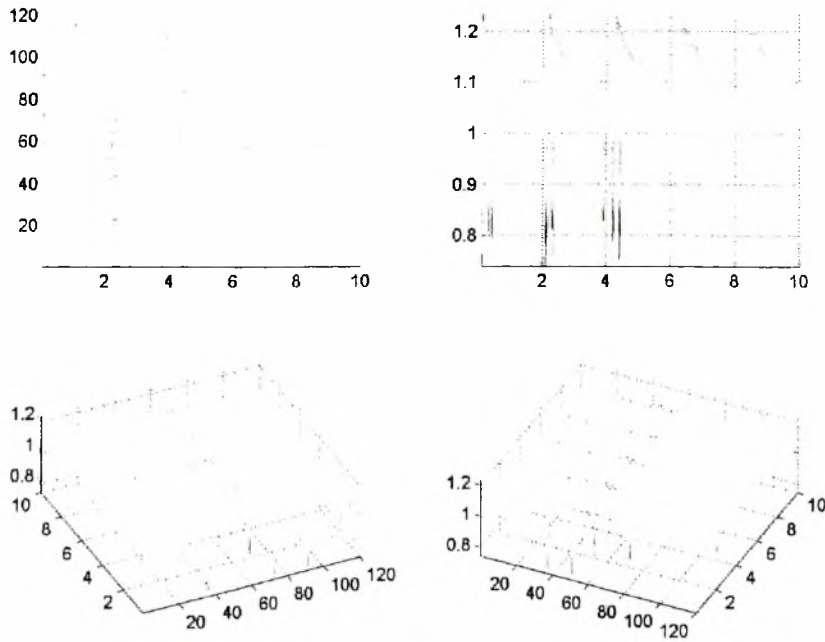
Σχήμα 5.2.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=57$, $\nu=1\text{Hz}(0,5-0,5)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$.



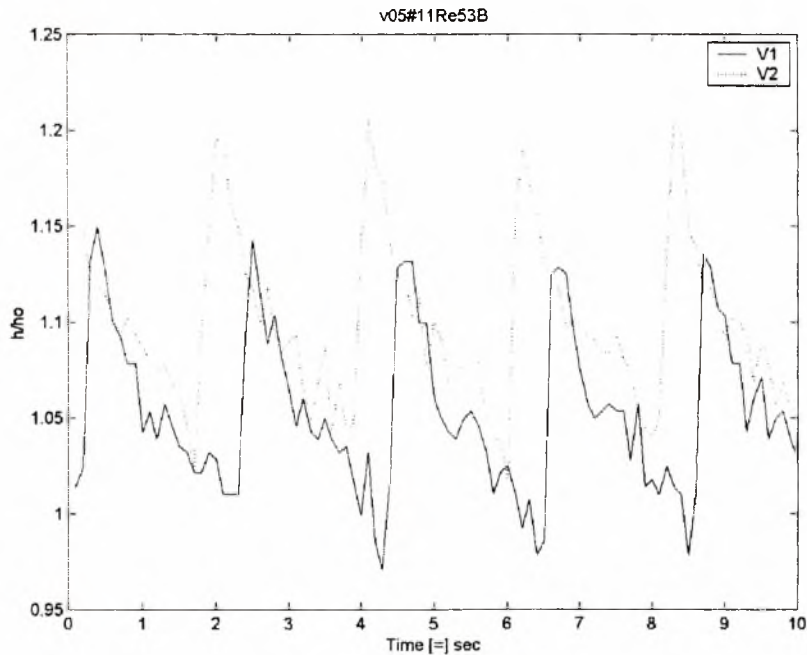
Σχήμα 5.3.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $Re=144$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



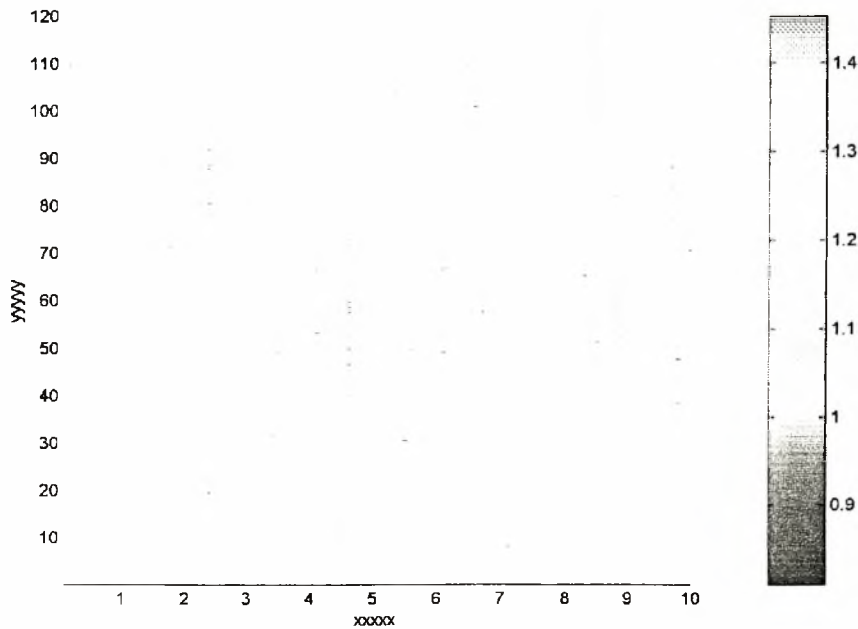
Σχήμα 5.3.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=144$, $\nu=1\text{Hz}(0,5-0,5)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$



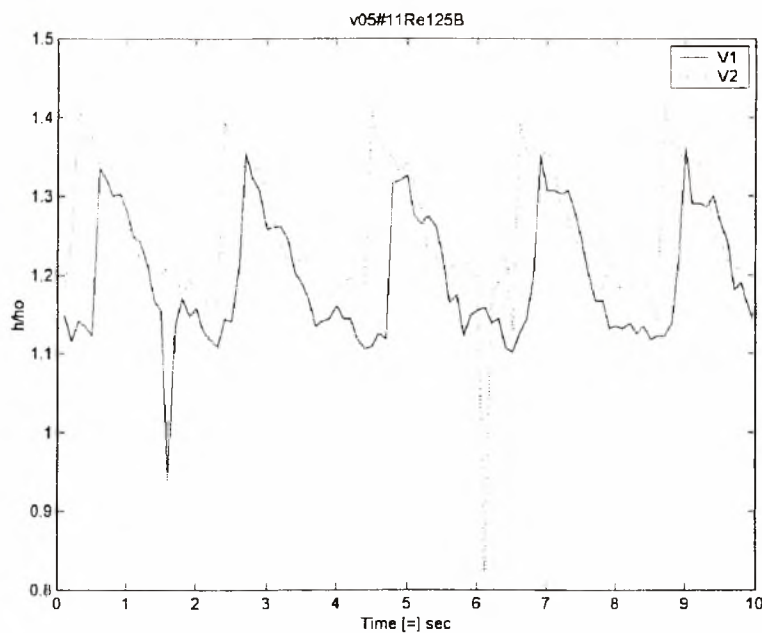
Σχήμα 5.4.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $Re=53$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



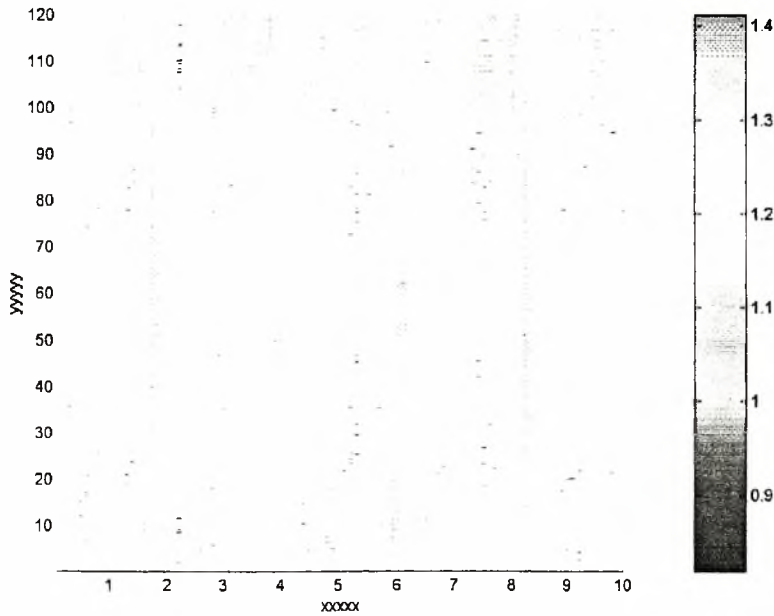
Σχήμα 5.4.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=53$, $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$



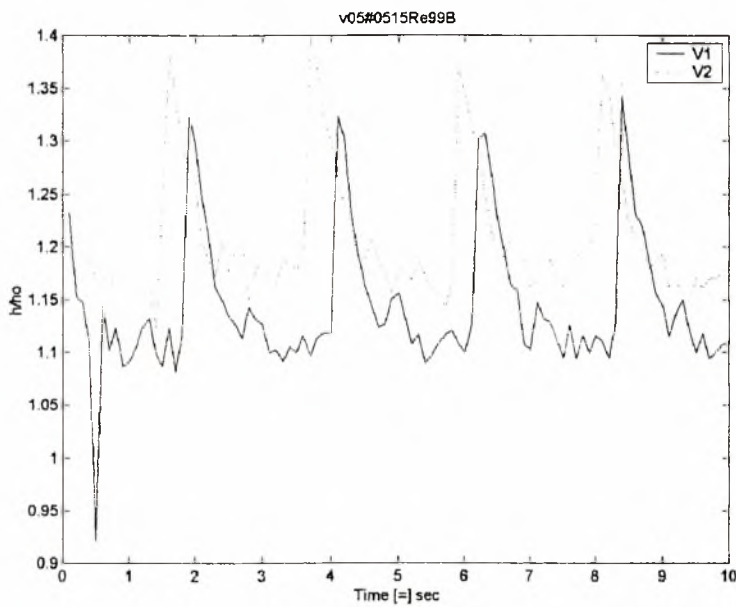
Σχήμα 5.5.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=125$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



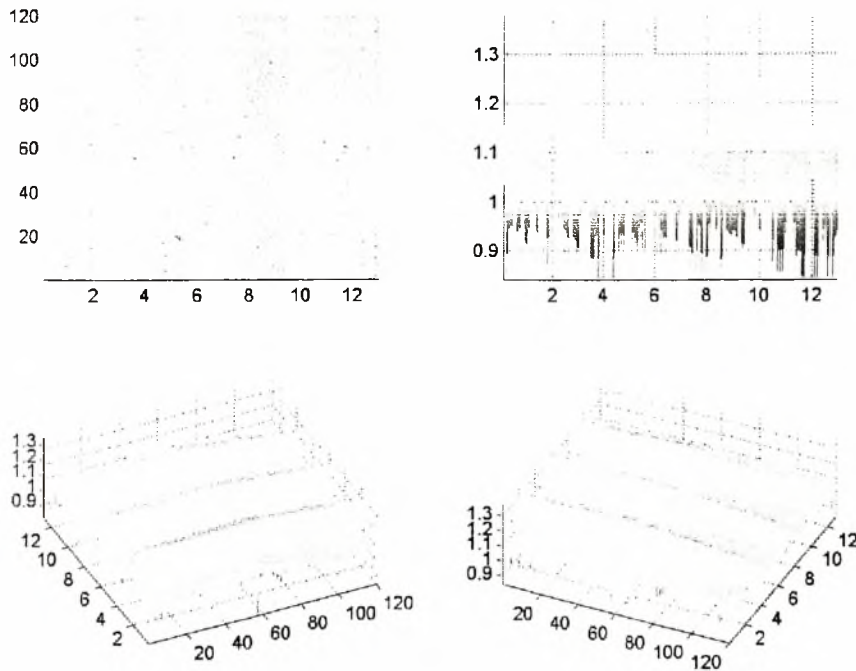
Σχήμα 5.5.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $\text{Re}=125$, $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$



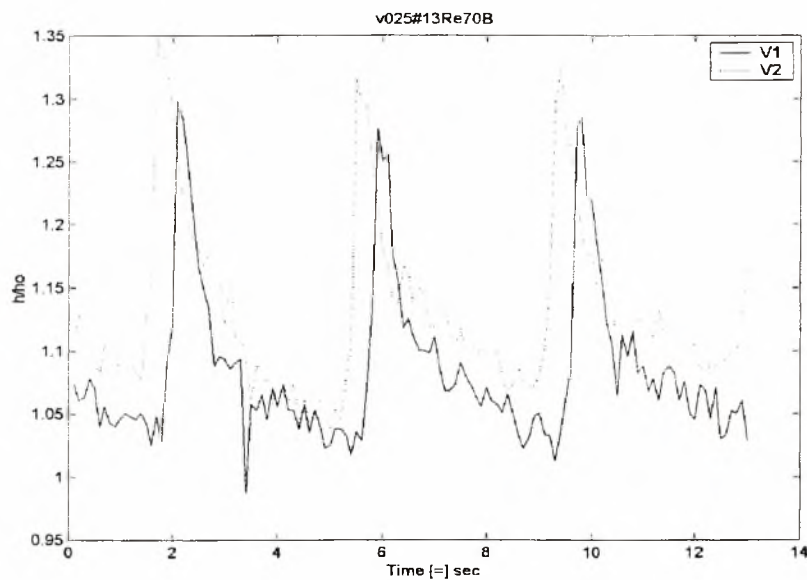
Σχήμα 5.6.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(0,5-1,5)$, $Re=99$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



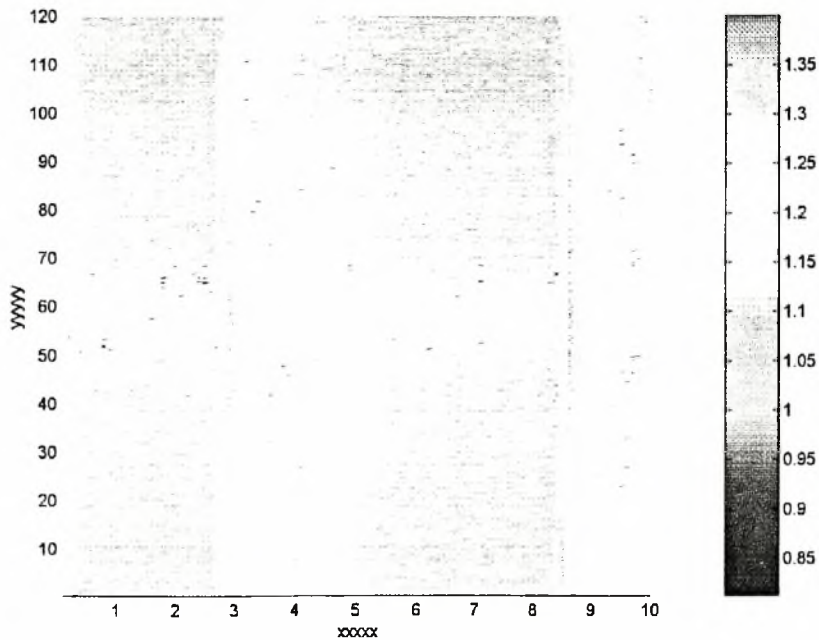
Σχήμα 5.6.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=99$, $\nu=0,5\text{Hz}(0,5-1,5)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$



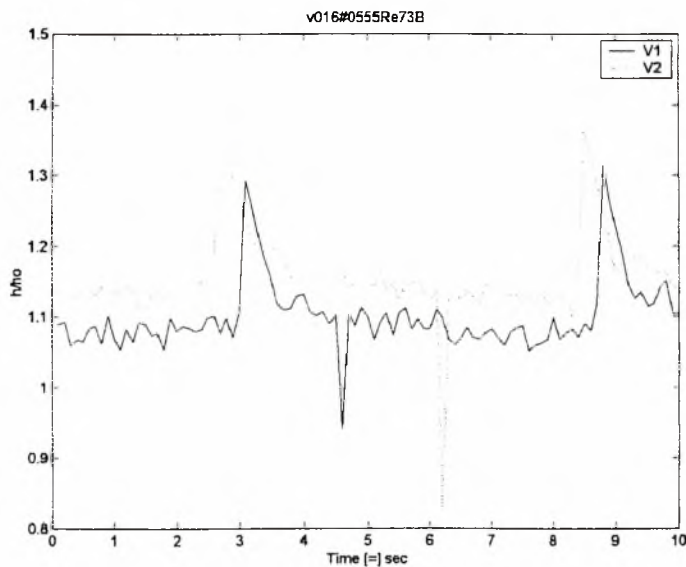
Σχήμα 5.7.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $Re=70$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



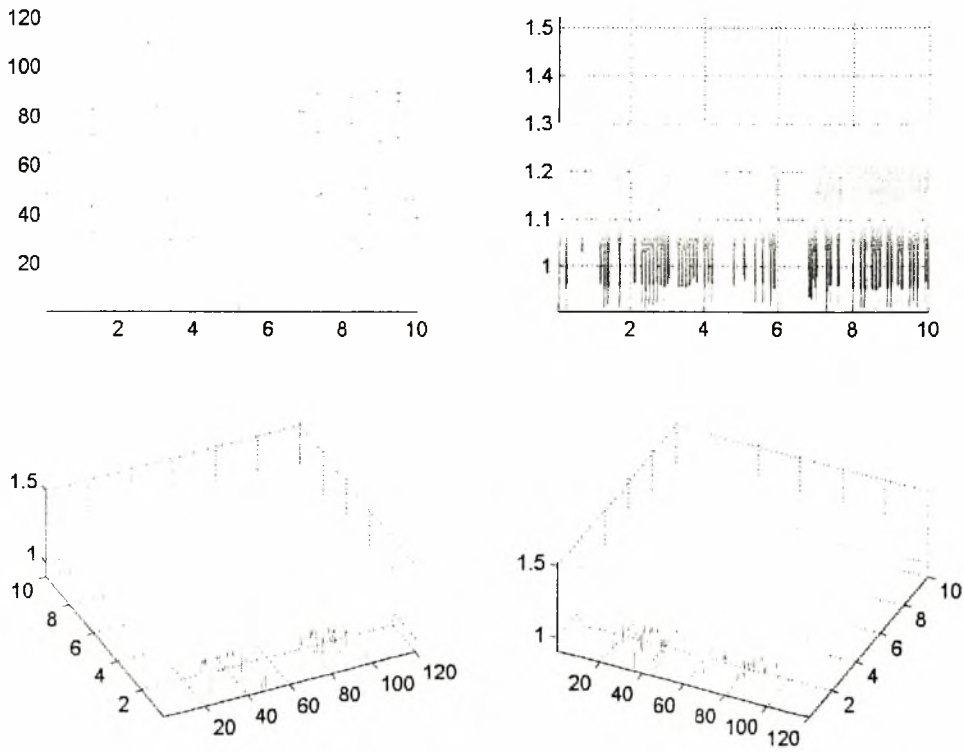
Σχήμα 5.7.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 73mm, $Re=70$, $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$



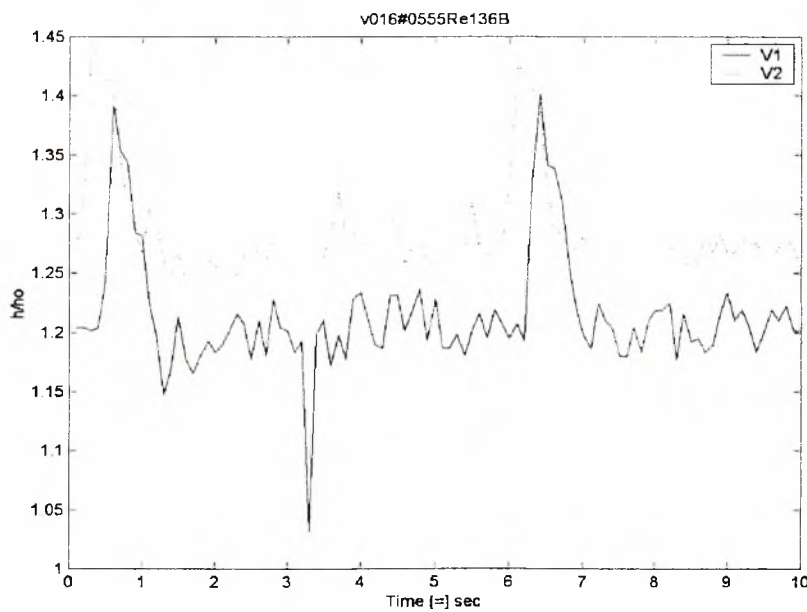
Σχήμα 5.8.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(0,5-5,5)$, $Re=73$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



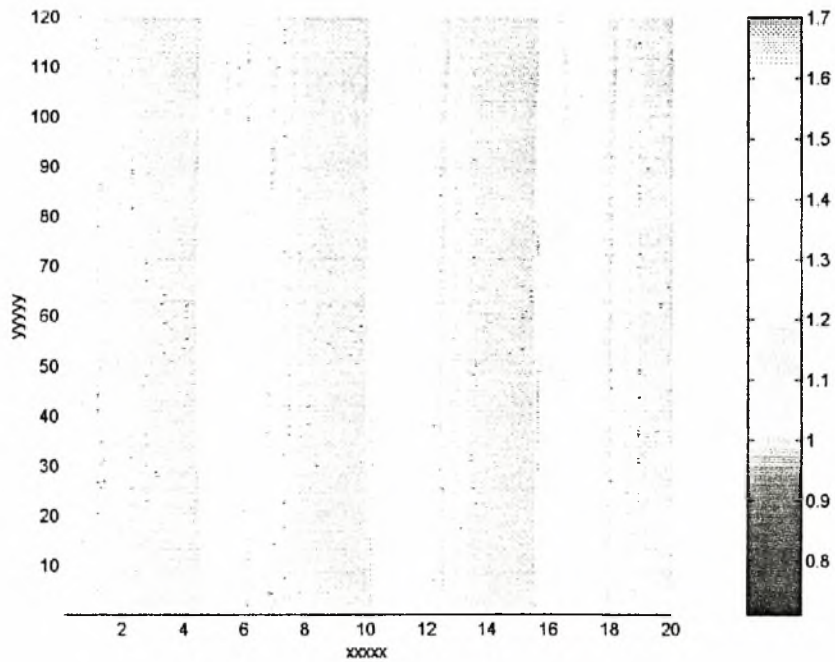
Σχήμα 5.8.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1, V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=73$, $\nu=0,16\text{Hz}(0,5-5,5)$ Διάλυμα: Νερό, $D=522\text{mm}$



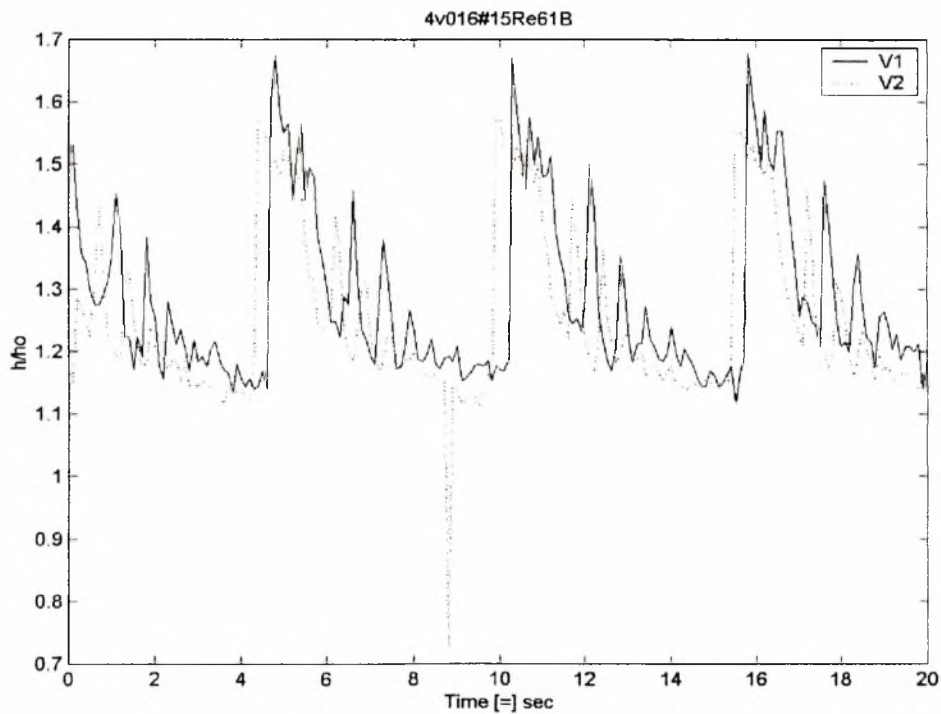
Σχήμα 5.9.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(0.5-5.5)$, $Re=136$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



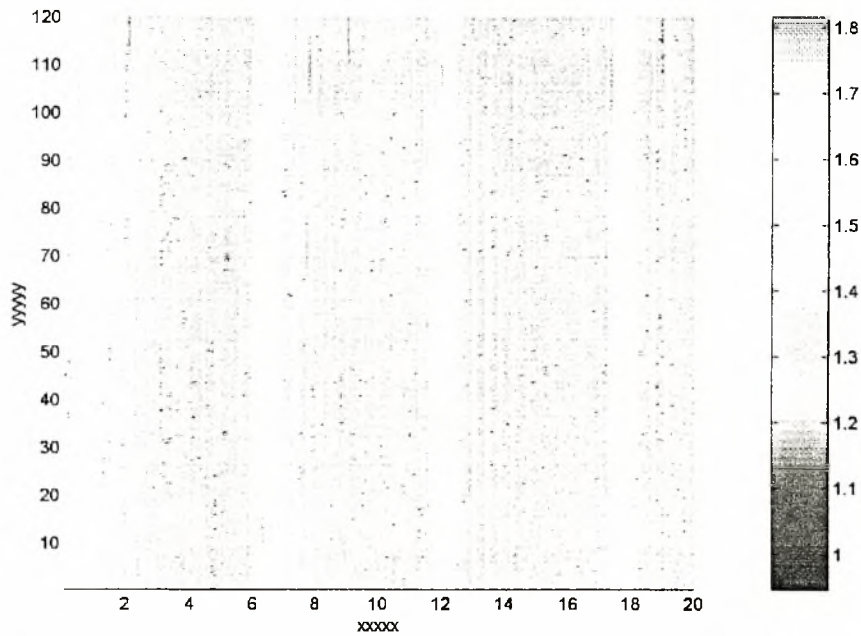
Σχήμα 5.9.β Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=136$, $\nu=0,16\text{Hz}(0,5-5,,5)$. Διάλυμα:Νερό, $D=522\text{mm}$



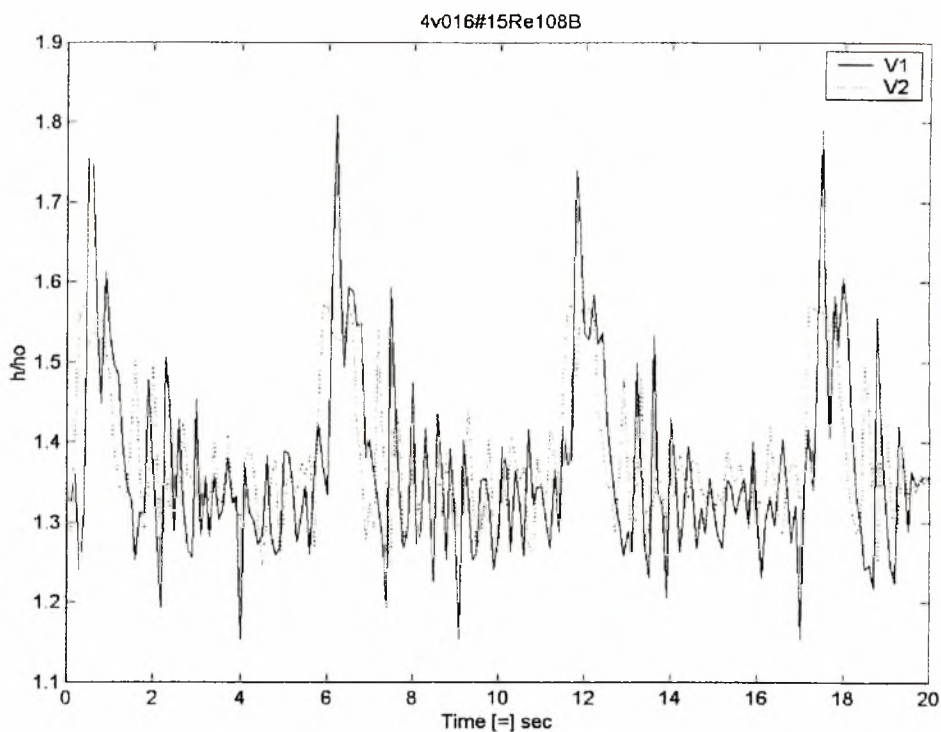
Σχήμα 5.10.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}$ (1-5), $Re=61$
 θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



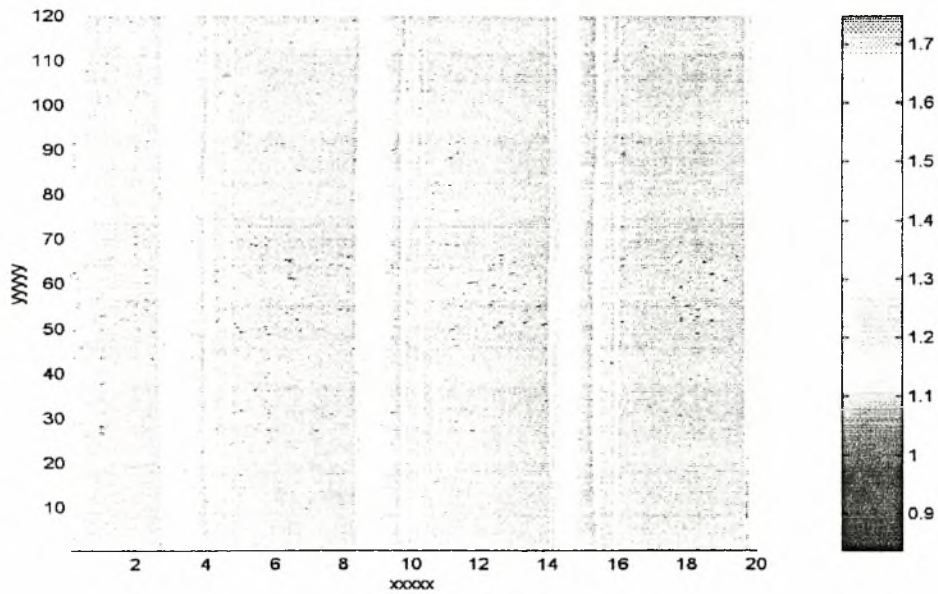
Σχήμα 5.10.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=61$, $\nu=0,16\text{Hz}$ (1-5) Διάλυμα: Καθαρό νερό, $D=522\text{mm}$



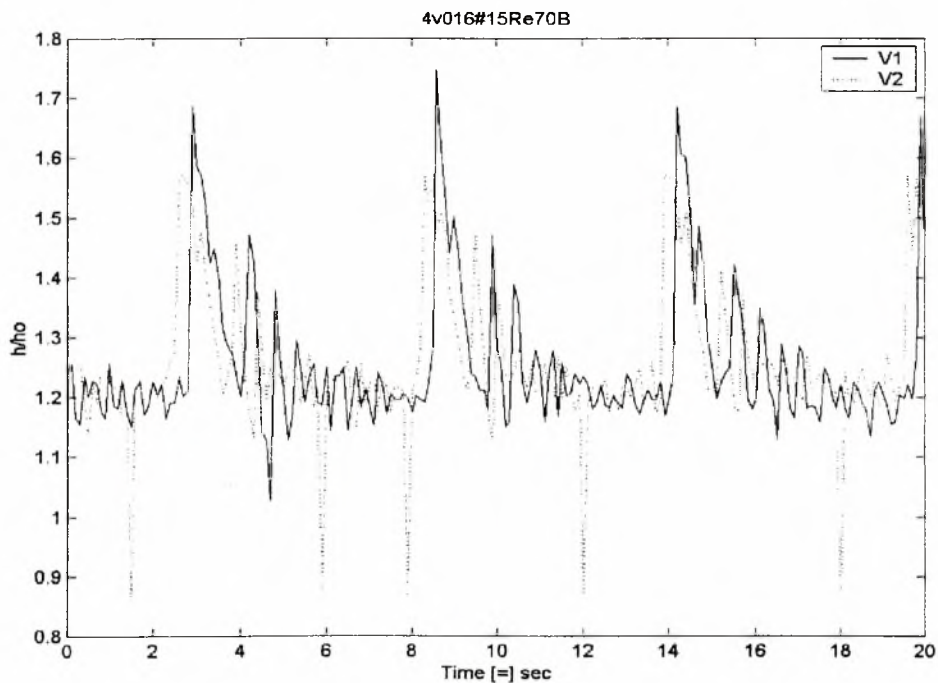
Σχήμα 5.11.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}$ (1-5), $\text{Re}=108$ θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



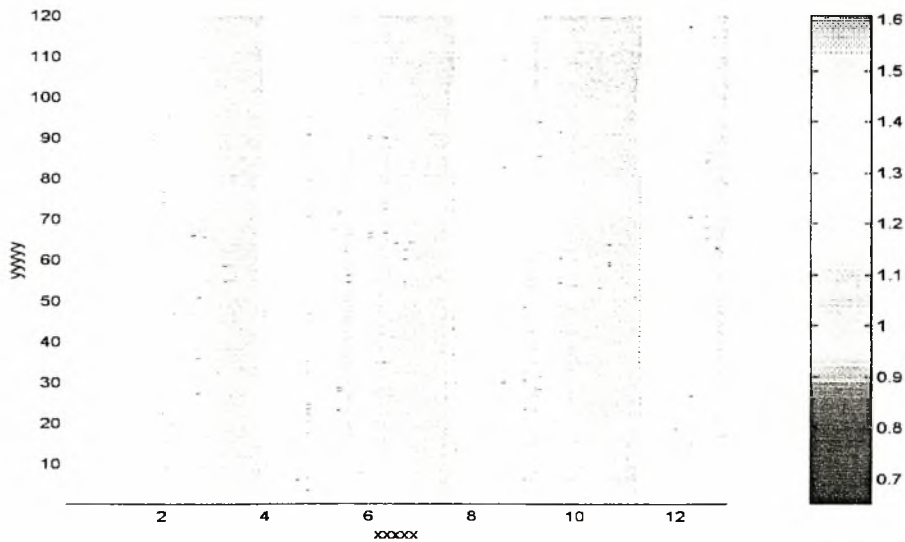
Σχήμα 5.11.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $\text{Re}=108$, $\nu=0,16\text{Hz}$ (1-5) Διάλυμα: Καθαρό νερό, $D=522\text{mm}$



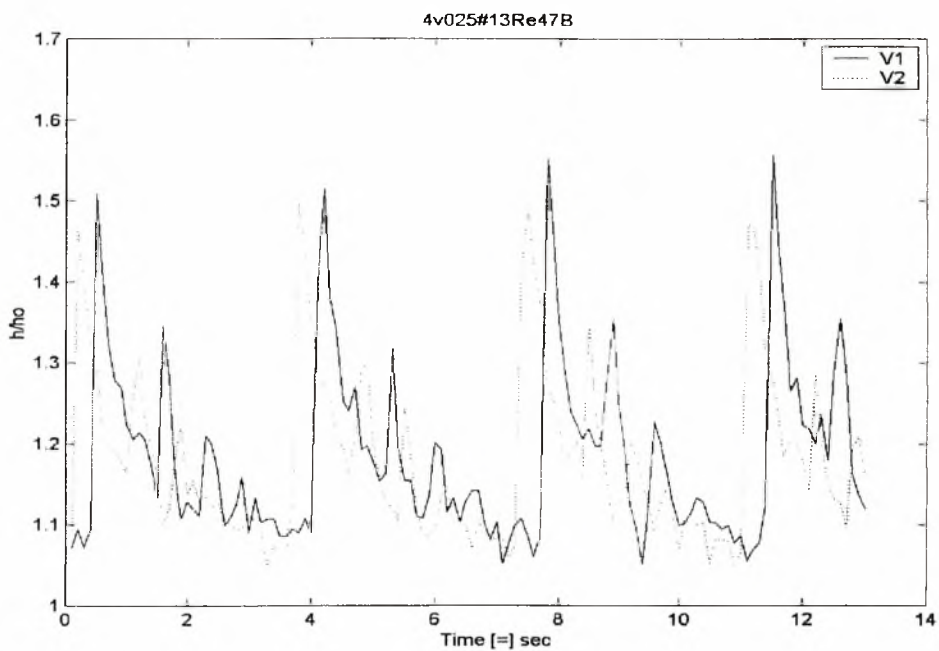
Σχήμα 5.12.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(1-5)$, $\text{Re}=70$ θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



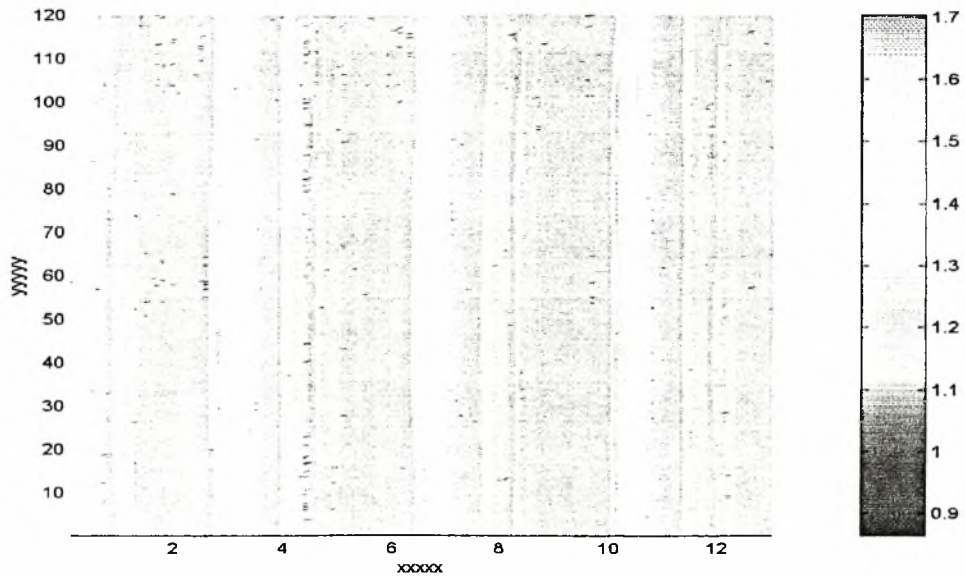
Σχήμα 5.12.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $\text{Re}=70$, $\nu=0,16\text{Hz}(1-5)$ Διάλυμα: Καθαρό νερό, $D=522\text{mm}$



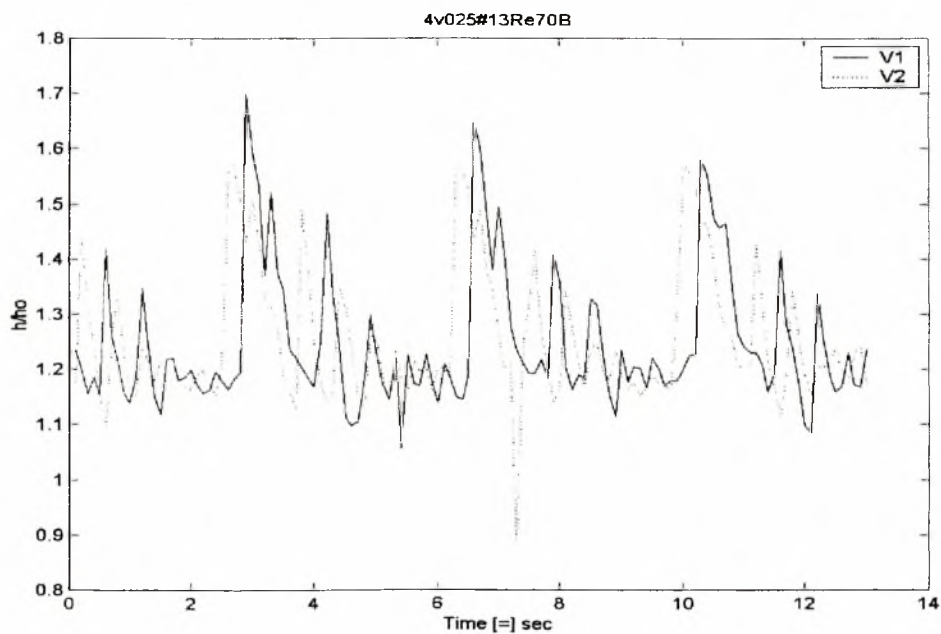
Σχήμα 5.13.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $\text{Re}=47$
 θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



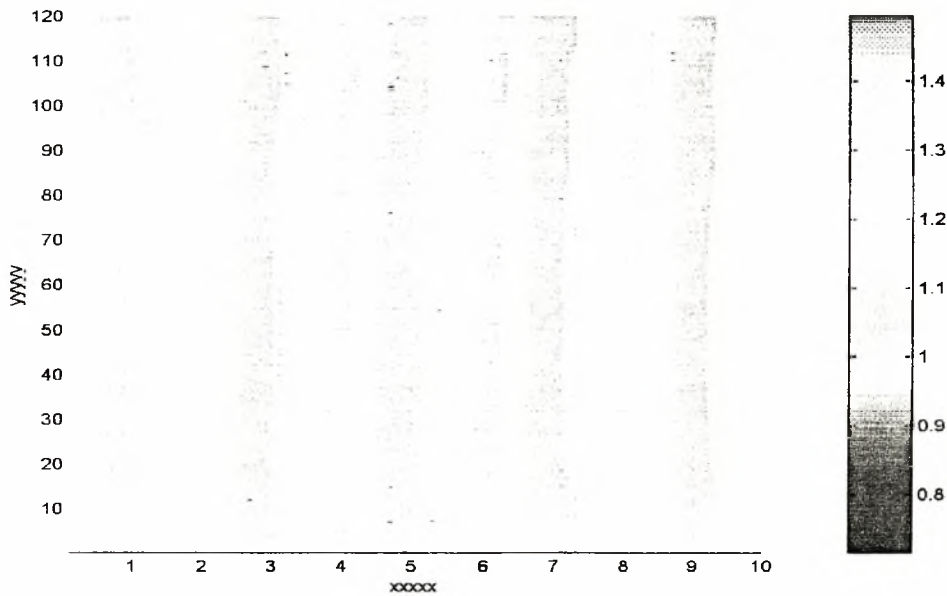
Σχήμα 5.13.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $\text{Re}=47$, $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$ Διάλυμα: Καθαρό νερό, $D=522\text{mm}$



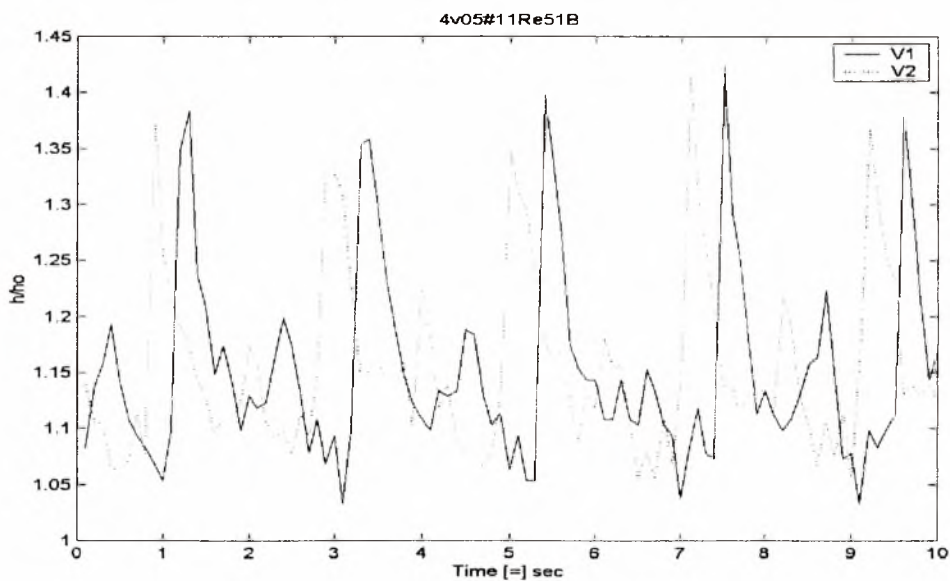
Σχήμα 5.14.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $Re=70$
θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



Σχήμα 5.14.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=70$, $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$ Διάλυμα: Καθαρό νερό , $D=522\text{mm}$



Σχήμα 5.15.α: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=51$ θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



Σχήμα 5.15.β: Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $\text{Re}=51$, $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$ Διάλυμα: Καθαρό νερό , $D=522\text{mm}$

Όνομα αρχείου	$\overline{\Delta t}$ (sec)	Δx (cm)	h_1	h_2
Expv1Re57B	0.5	8	1.077 h_o	1.16 h_o
Expv1Re144B	0.235	8	1.332 h_o	1.398 h_o
v05#11Re53B	0.5	8	1.21 h_o	1.32 h_o
v05#11Re125B	0.3	8	1.353 h_o	1.41 h_o
v05#0515Re99B	0.31	8	1.32 h_o	1.385 h_o
v025#13Re70B	0.41	8	1.28 h_o	1.33 h_o
v016#0555Re73B	0.35	8	1.3 h_o	1.36 h_o
v016#0555Re136B	0.3	8	1.4 h_o	1.44 h_o
4v016#15Re61B	0.28	8	1.673 h_o	1.563 h_o
4v016#15Re108B	0.1	8	1.77 h_o	1.57 h_o
4v016#15Re70B	0.2	8	1.697 h_o	1.58 h_o
4v025#13Re47B	0.325	8	1.532 h_o	1.48 h_o
4v025#13Re70B	0.22	8	1.64 h_o	1.57 h_o
4v05#11Re51B	0.4	8	1.388 h_o	1.376 h_o

Σχ. 5.16 : Παράθεση αποτελεσμάτων μέτρησης της μέσης ταχύτητας κύματος και μέγιστου ύψους κύματος

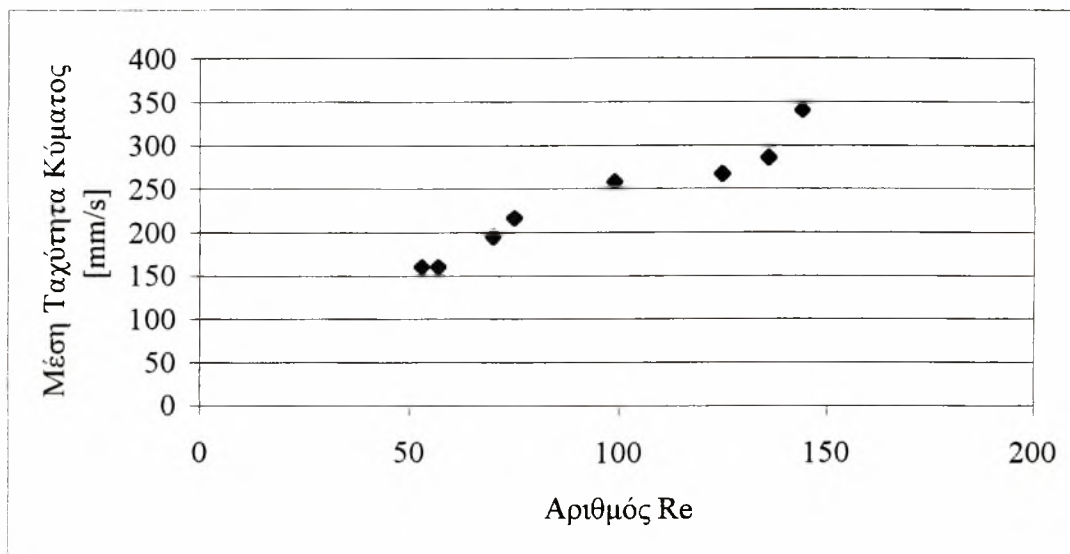
Όπου $\overline{\Delta t}$: ο μέσος χρόνος που απαιτείται από το κύμα να διανύσει την απόσταση από το σημείο V1 στο σημείο V2.

Δx : η απόσταση μεταξύ των σημείων V1 και V2.

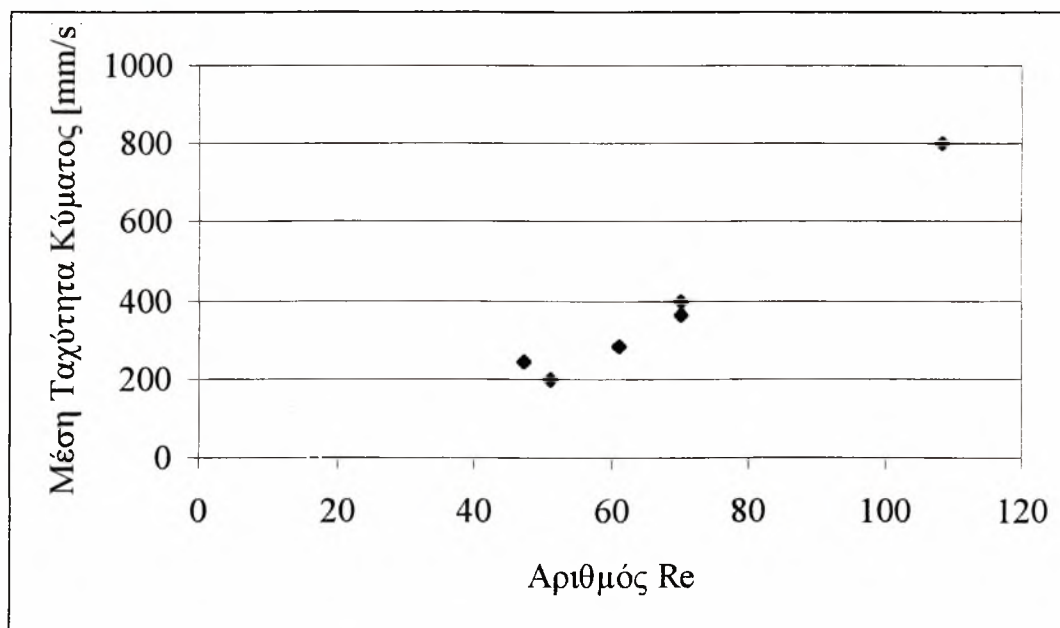
h_1 : το μέγιστο ύψος κύματος στο σημείο V1.

h_2 : το μέγιστο ύψος κύματος στο σημείο V2.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα καθώς και τα δεδομένα των προηγούμενων διαγραμμάτων κατασκευάστηκαν τα παρακάτω σχήματα (σχ. 5.17 και 5.18) για 2° και 4° κλίσης του επίπεδου καναλιού, τα οποία παρουσιάζουν την μέση ταχύτητα του κύματος σε σχέση με τον μέσο αριθμό Re.



Σχ. 5.17: Μέση ταχύτητα κύματος σε σχέση με τη μεταβολή του μέσου αριθμού Re, για κλίση του επίπεδου καναλιού ίση με 2°.



Σχ. 5.18: Μέση ταχύτητα κύματος σε σχέση με τη μεταβολή του μέσου αριθμού Re, για κλίση του επίπεδου καναλιού ίση με 4°.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την παρούσα μελέτη. Αξίζει να σημειωθεί πως ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι μια πρώτη προσπάθεια περιγραφής και μελέτης των δημιουργούμενων κυμάτων με τη χρήση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό, όταν κατά τη ροή λεπτού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα επιβληθούν εξωτερικές διαταραχές. Η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την θεωρητική ανάλυση του προβλήματος ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για αυτό και τα συμπεράσματα έχουν ποιοτικό χαρακτήρα. Όλα τα συμπεράσματα που ακολουθούν αναφέρονται για την συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων, η οποία αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.

Αποδείχθηκε ότι η συσκευή λειτουργεί. Δηλαδή η κατασκευή της πειραματικής διάταξης καθώς και η χρήση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό επιτρέπουν την παρατήρηση του λεπτού υγρού υμένα αλλά και των δημιουργούμενων κυμάτων. Επιπλέον, παρέχονται οι δυνατότητες για την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου.

Κατασκευάστηκε η καμπύλη ευστάθειας για τη σειρά μετρήσεων που επιλέχθηκε να παρουσιαστεί. Δόθηκε έτσι ένα μέτρο ελέγχου ευστάθειας του υμένα, τόσο για την πιστοποίηση της μεθόδου, όσο και ως αναγκαία προϋπόθεση για τη θεωρητική και πειραματική μελέτη του προβλήματος.

Διαπιστώθηκε ότι η εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή είναι πλήρως μεταφερόμενη στον υμένα. Ουσιαστικά αποδείχθηκε ότι η επιβολή μιας εξωτερικής διαταραχής έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μοναχικών κυμάτων, η συχνότητα των οποίων είναι ίδια με τη συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής.

Παρατηρήθηκε η εξέλιξη του ύψους των δημιουργούμενων κυμάτων σε σχέση με την μεταβολή του μέσου αριθμού Re . Κατασκευάστηκαν τα ανάλογα διαγράμματα και διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του μέσου αριθμού Re έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του ύψους των δημιουργούμενων κυμάτων.

Βρέθηκε ότι για τη συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων, στις 2° κλίσης του επίπεδου καναλιού και σε απόσταση 522 mm από το σημείο δημιουργίας των κυμάτων, αυτά δεν είχαν φθάσει σε μόνιμη κατάσταση δηλαδή εξακολουθούσαν να αναπτύσσονται. Αντίθετα στις 4° κλίση και για την ίδια απόσταση τα δημιουργούμενα κύματα είχαν επέλθει σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (δηλαδή το μοναχικό κύμα απέκτησε το τελικό του ύψος).

Η μεταβολή του μέσου αριθμού Re και της γωνίας κλίσης του επίπεδου καναλιού επηρέασε και τη γραμμή έναρξης των δημιουργούμενων κυμάτων (wave inception line). Στις 2° κλίση διαπιστώθηκε ότι η γραμμή έναρξης των κυμάτων χάνει την ομαλότητά της σε σχετικά υψηλούς

αριθμούς Re ενώ στις 4° κλίσης του επίπεδου καναλιού η δημιουργία ‘σπασίματος’ (απώλεια ομαλότητας) της γραμμής έναρξης των κυμάτων παρατηρείται σε πολύ μικρότερους αριθμούς Re .

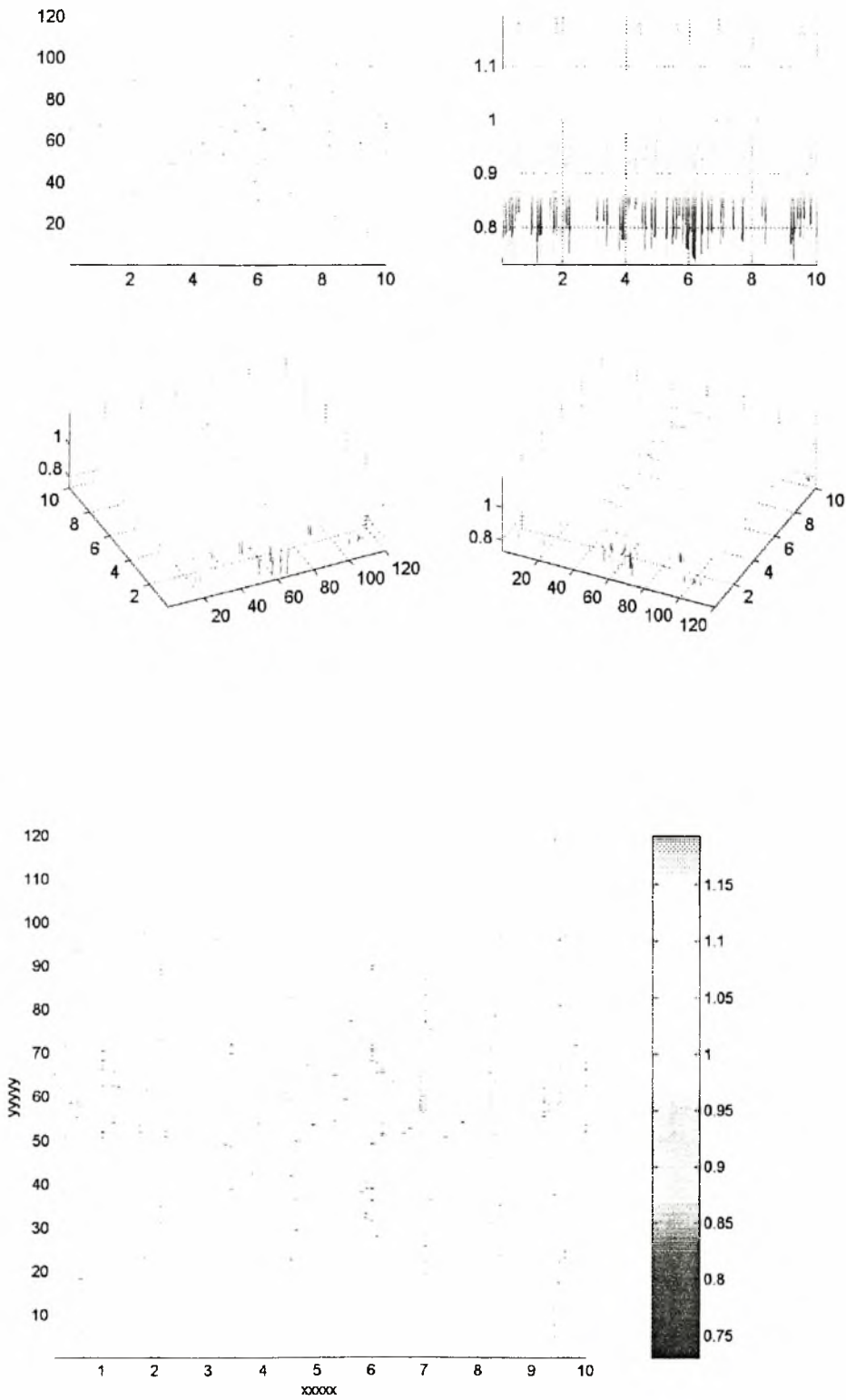
Παρατείνοντας τον χρόνο όπου η ηλεκτροβαλβίδα παραμένει ανοιχτή, ουσιαστικά αυξάνεται το πλάτος της εξωτερικής διαταραχής με ανάλογη επιρροή στο ύψος του κύματος. Με την κατασκευή του διαγράμματος της χρονικής εξέλιξης του ύψους των διαταραχών είναι δυνατή η μέτρηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των κυμάτων, όπως το μέγιστο ύψος τους και η μέση ταχύτητά τους. Φαίνεται ότι η μέση ταχύτητα του κύματος αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Re αλλά και με την αύξηση της κλίσης του καναλιού (επίδραση αδρανειακών δυνάμεων).

Γενικότερα, διαπιστώθηκε η επίδραση μιας εξωτερικής διαταραχής στη δημιουργία μοναχικών κυμάτων. Λόγω αστάθειας του υμένα αλλά και διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα, φάνηκε η δημιουργία περισσότερων μοναχικών κυμάτων πέρα του δημιουργούμενου. Επίσης, το είδος της δημιουργούμενης διαταραχής είναι τέτοιο που απαιτείται γωνία κλίσης άνω των 4° ώστε το δημιουργούμενο κύμα να αποκτήσει τη τελική μορφή. Παρατηρήθηκαν και τρισδιάστατες δομές οι οποίες όμως δεν αναλύθηκαν καθόλου λόγω δυσκολίας αντιμετώπισης.

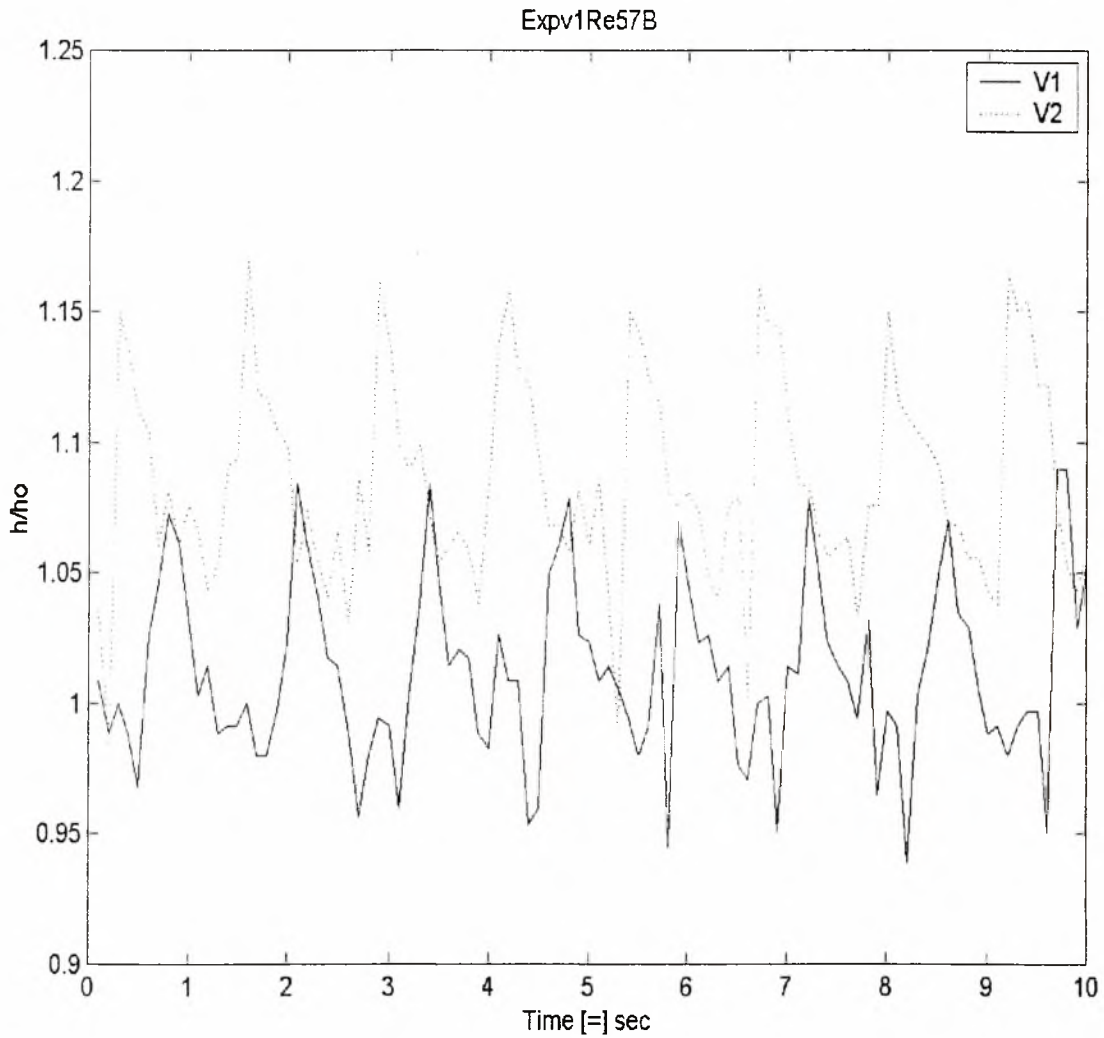
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Liu Y. ,Paul J. D. ,Gollub J. P. , ‘Measurements of the primary instabilities of film flows’, J. Fluid Mech. , vol. 250, pp 69-101, 1993.
2. Liu Jun, ‘Nonlinear Dynamics of Wavy Film Flows’, PhD Thesis, 1994, Univ. of Pennsylvania.
3. Liu Jun & J.P. Gollub, ‘Solitary Wave Dynamics of Film Flows’, Phys. Fluids, Vol. 6, No. 5, pp 1702, 1994
4. Παπαιωάννου Α. ‘Μηχανική των Ρευστών’, Τόμος Α & Β, Δ. Μαυρομάτη, 1993
5. Πίττας Ι., ‘Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας’, 1996

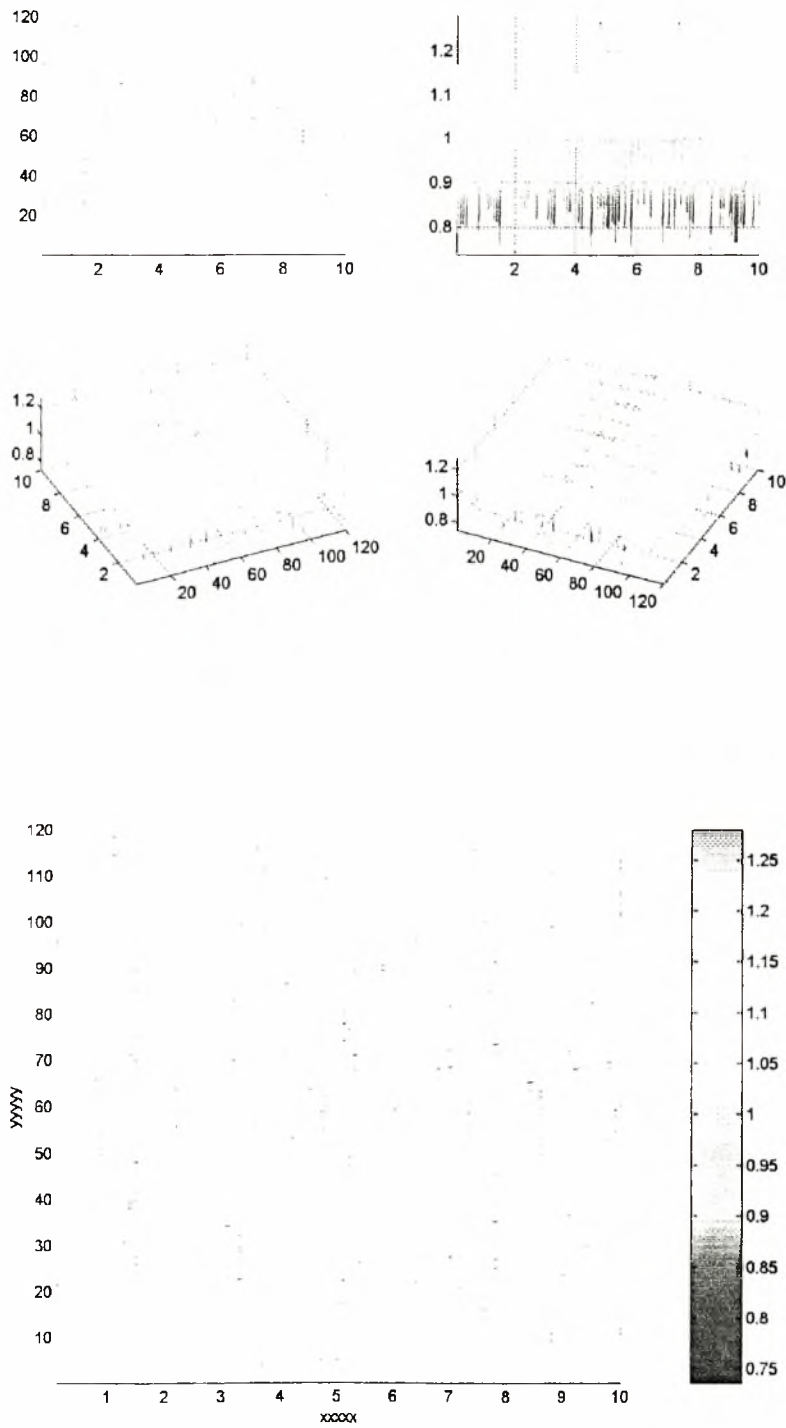
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



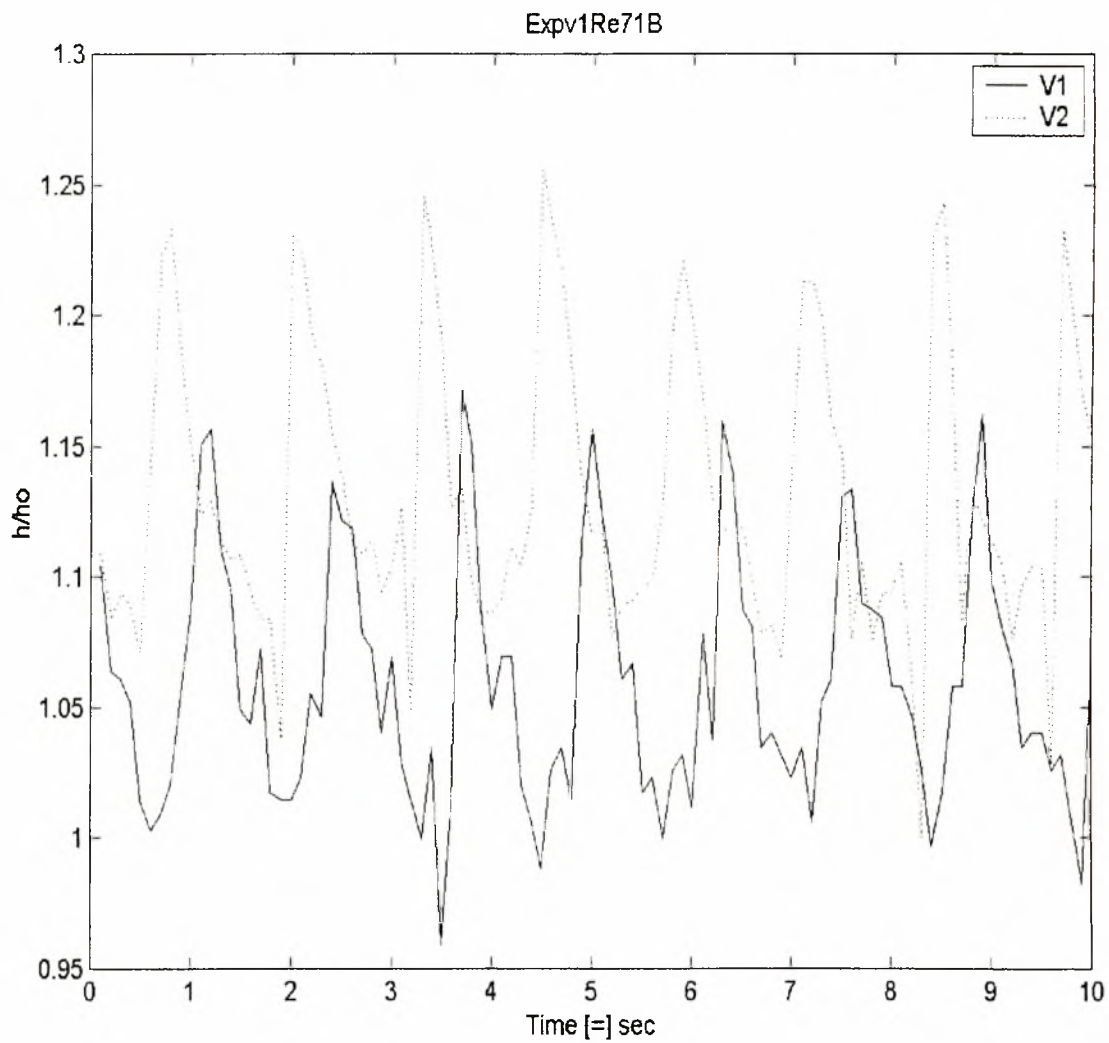
Σχήμα 1 : Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $Re=57$, Θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό.



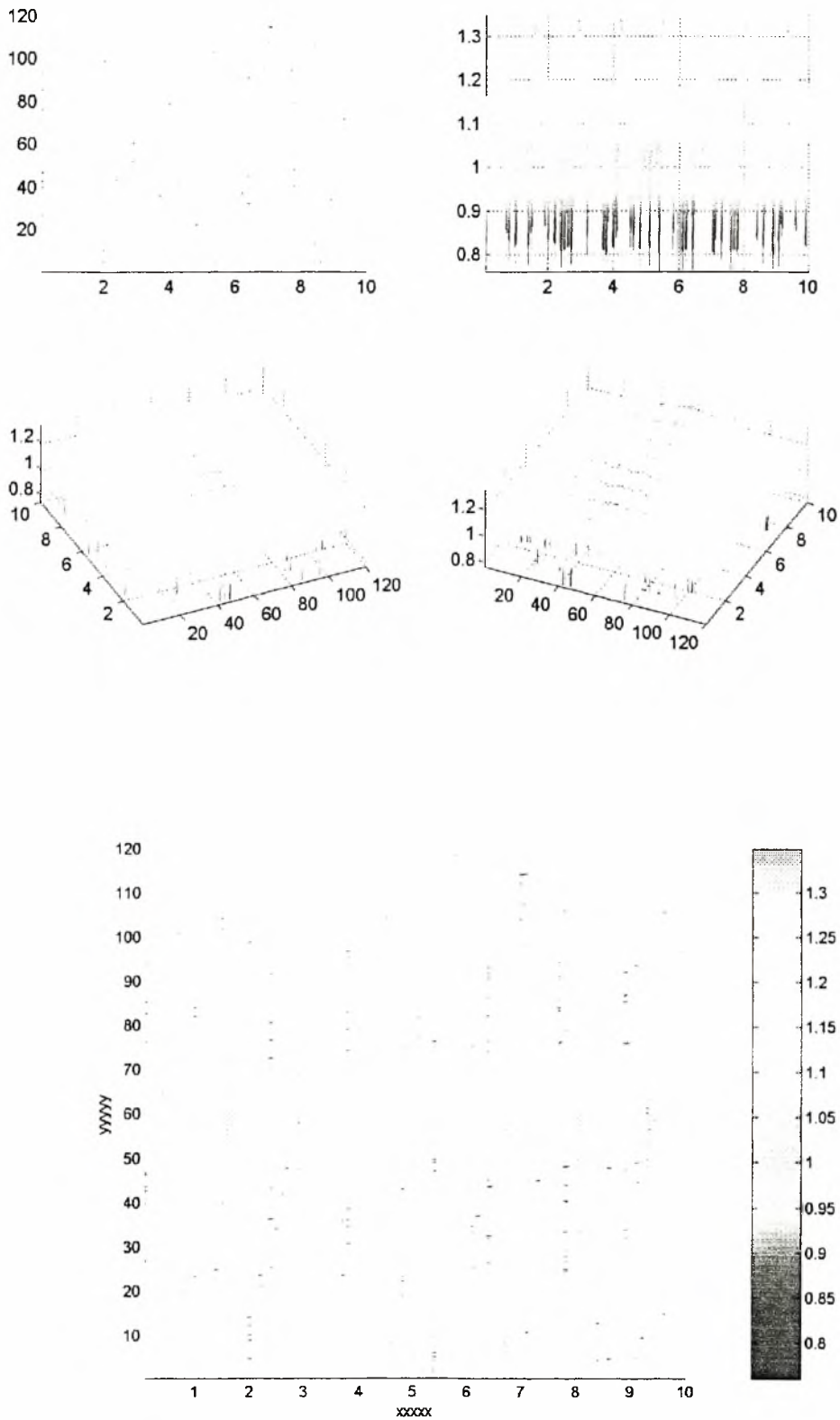
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=57$, $\nu=1Hz(0,5-0,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$.**



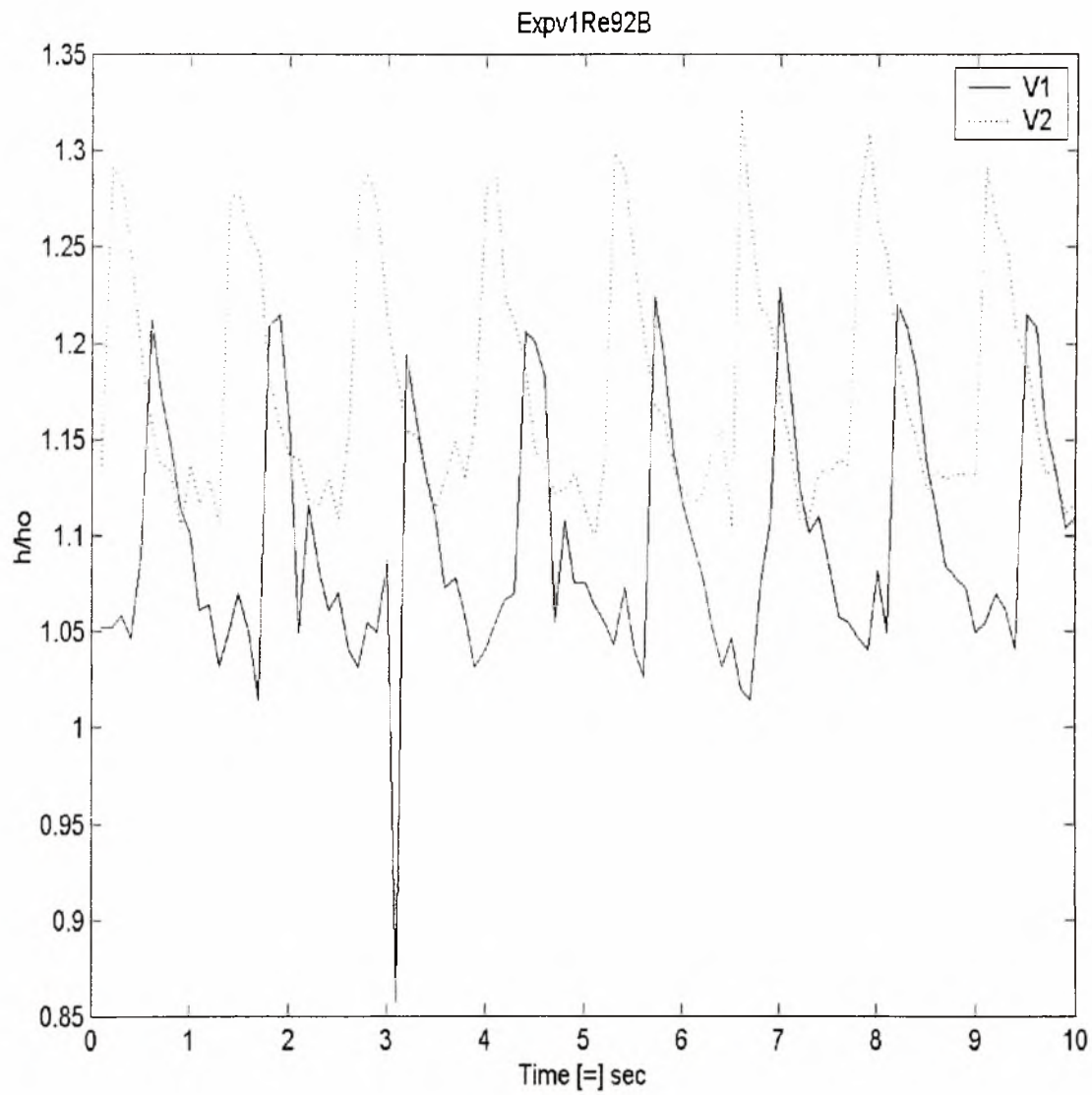
Σχήμα 2 : Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile,) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $Re=71$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



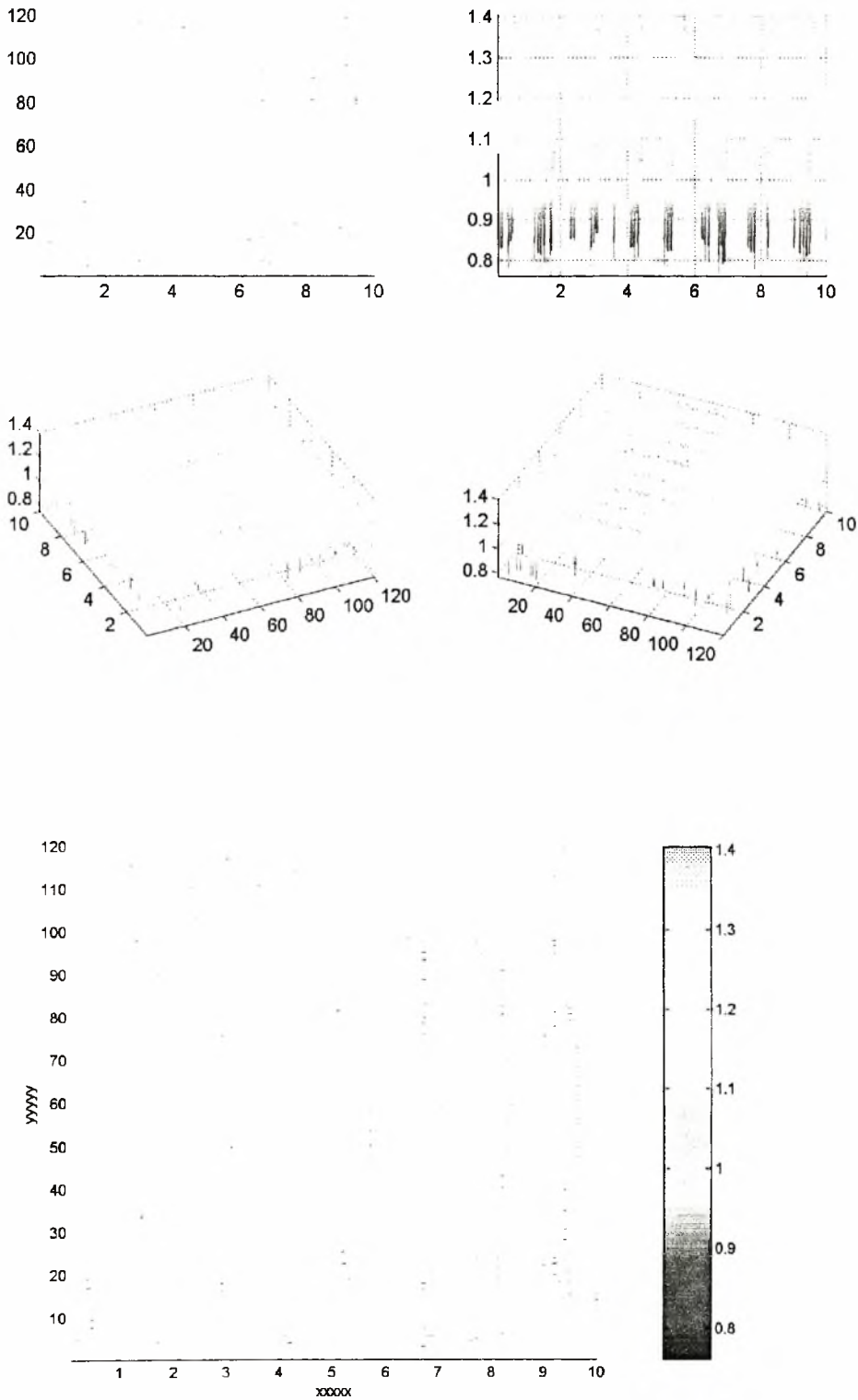
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=71$, $\nu=1Hz(0,5-0,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



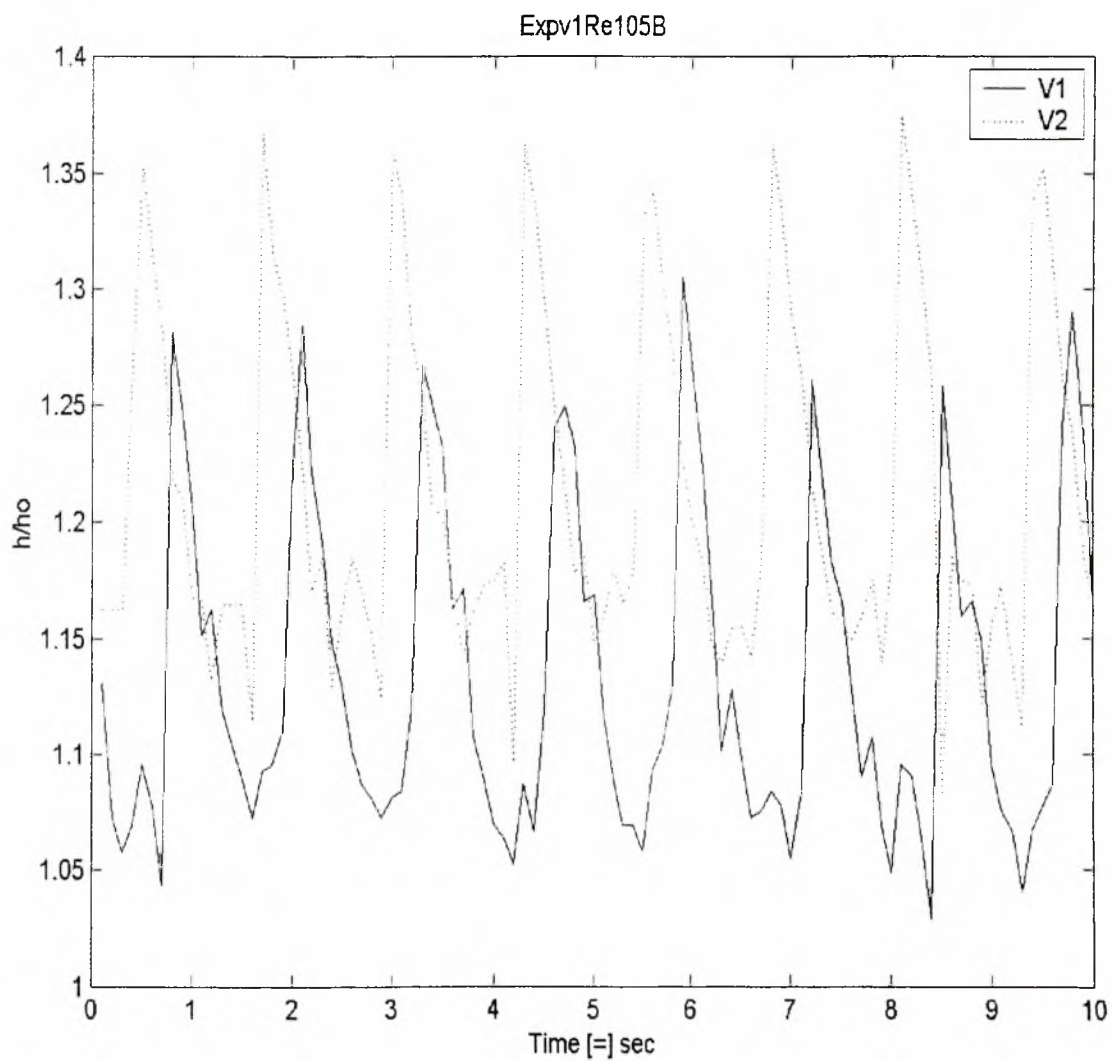
Σχήμα 3 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $\text{Re}=92$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



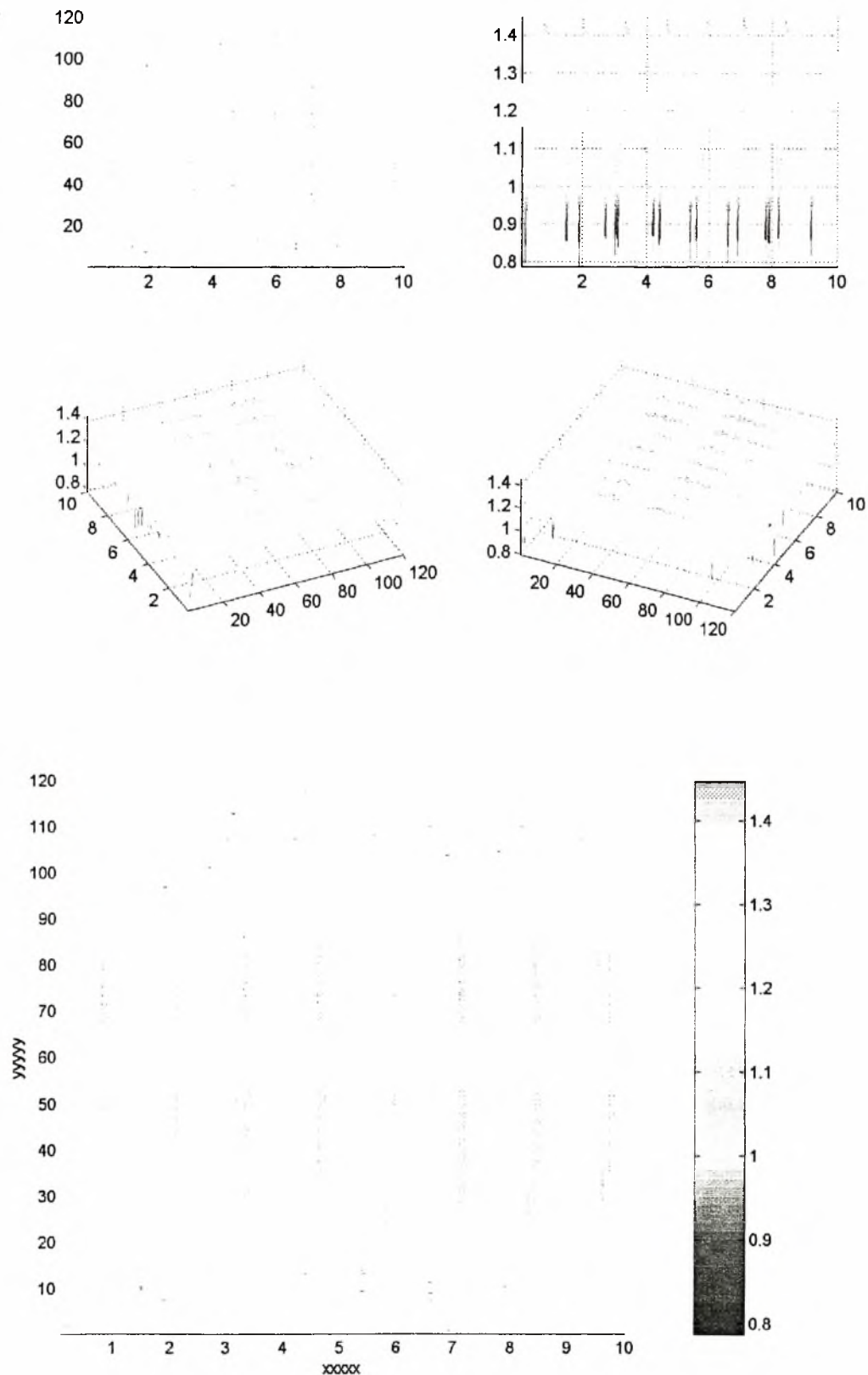
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, Re=92, $\nu=1\text{Hz}(0,5-0,5)$
 Διάλυμα: Νερό, D=522mm**



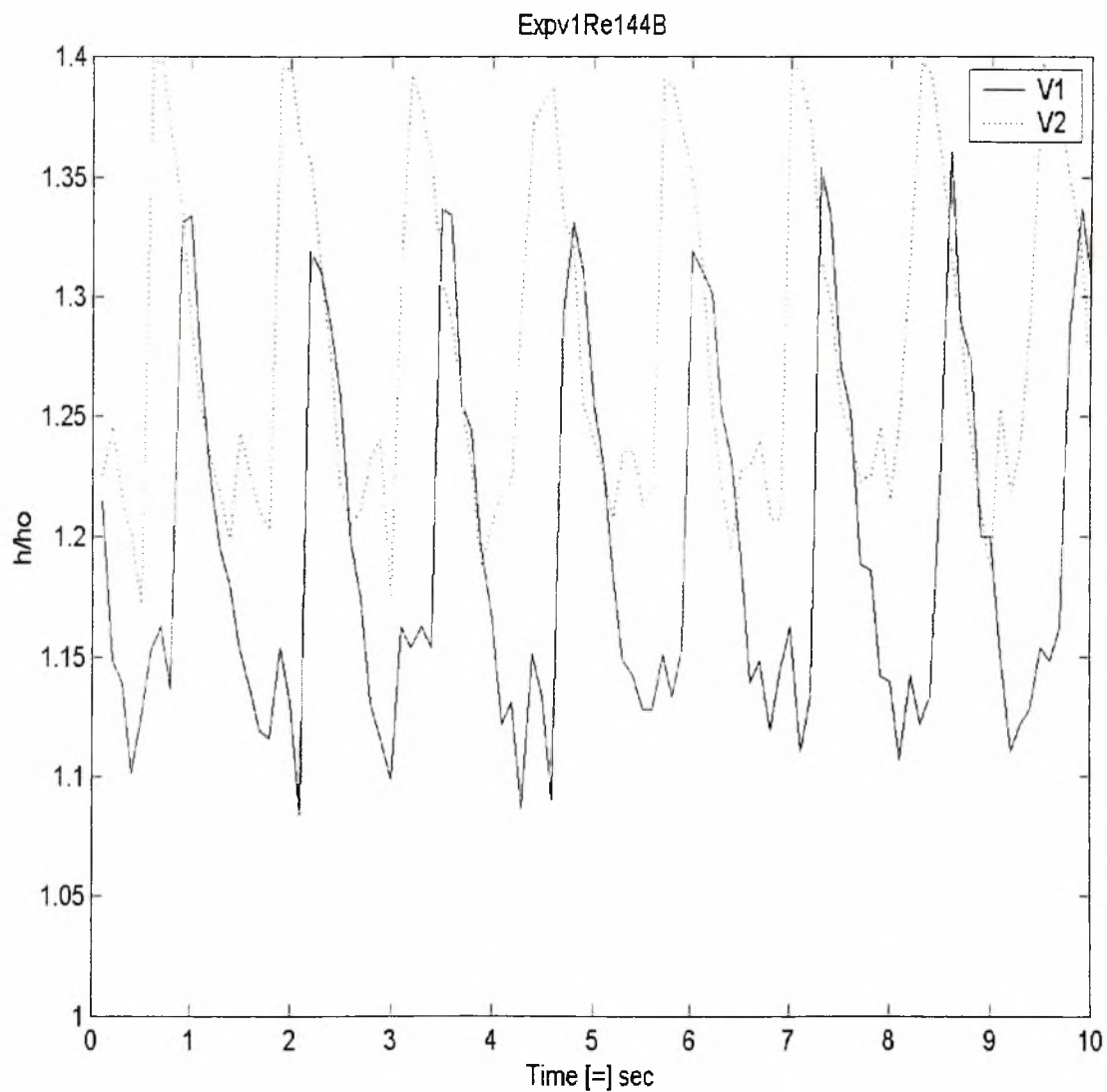
Σχήμα 4 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $Re=105$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



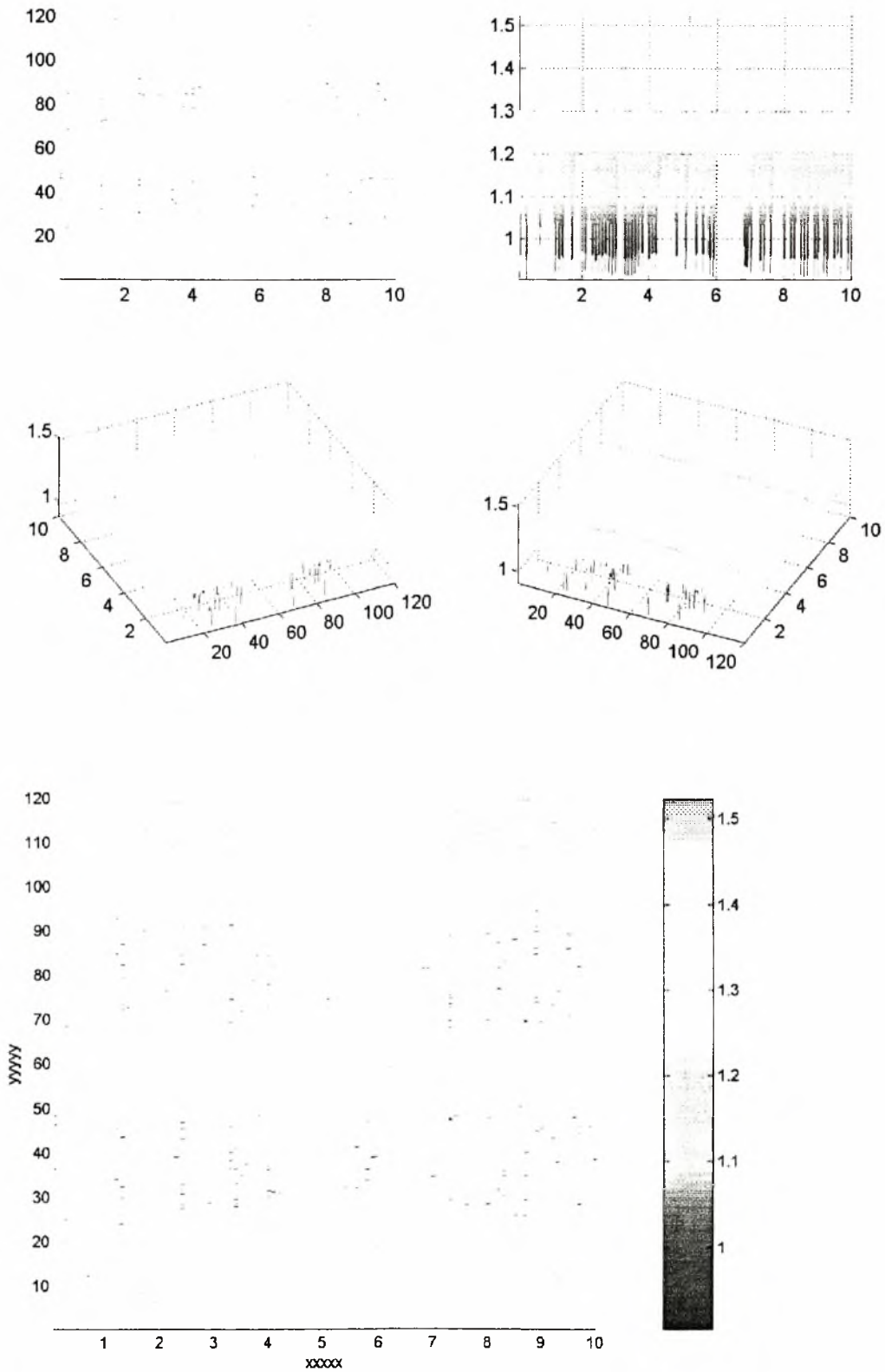
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=105$, $\nu=1Hz(0,5-0,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



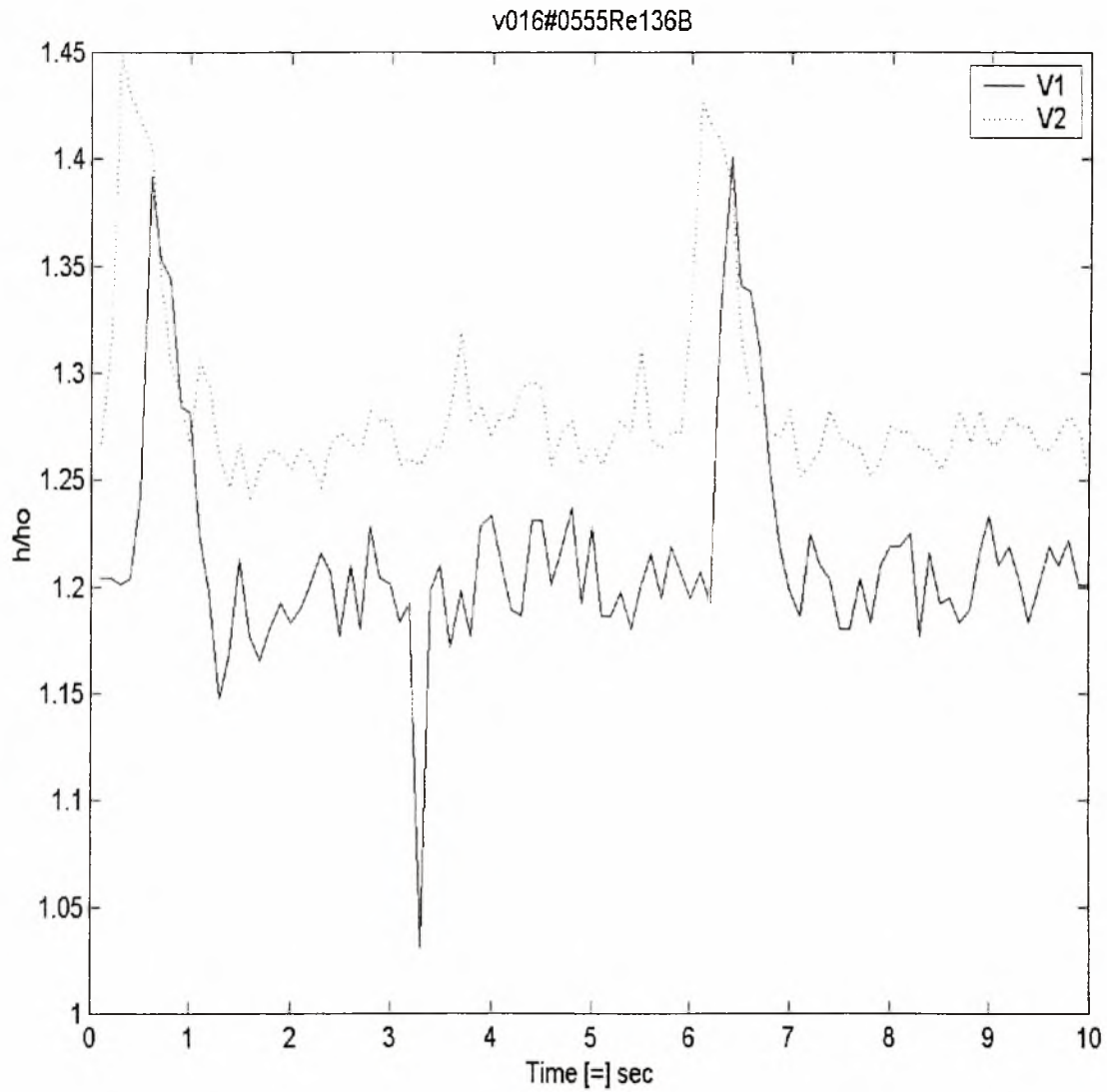
Σχήμα 5 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=1\text{Hz}(0.5-0.5)$, $\text{Re}=144$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



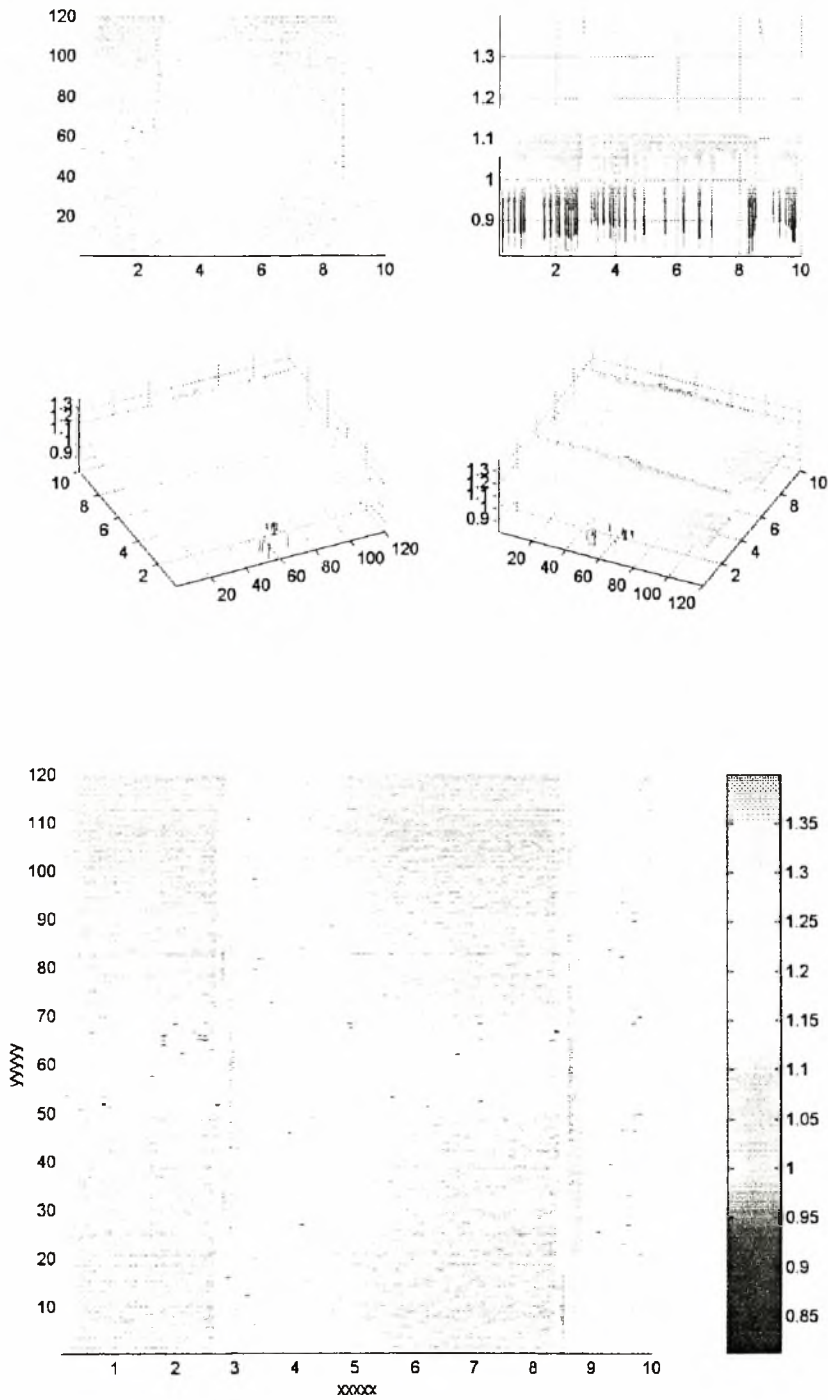
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=144$, $\nu=1Hz(0,5-0,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



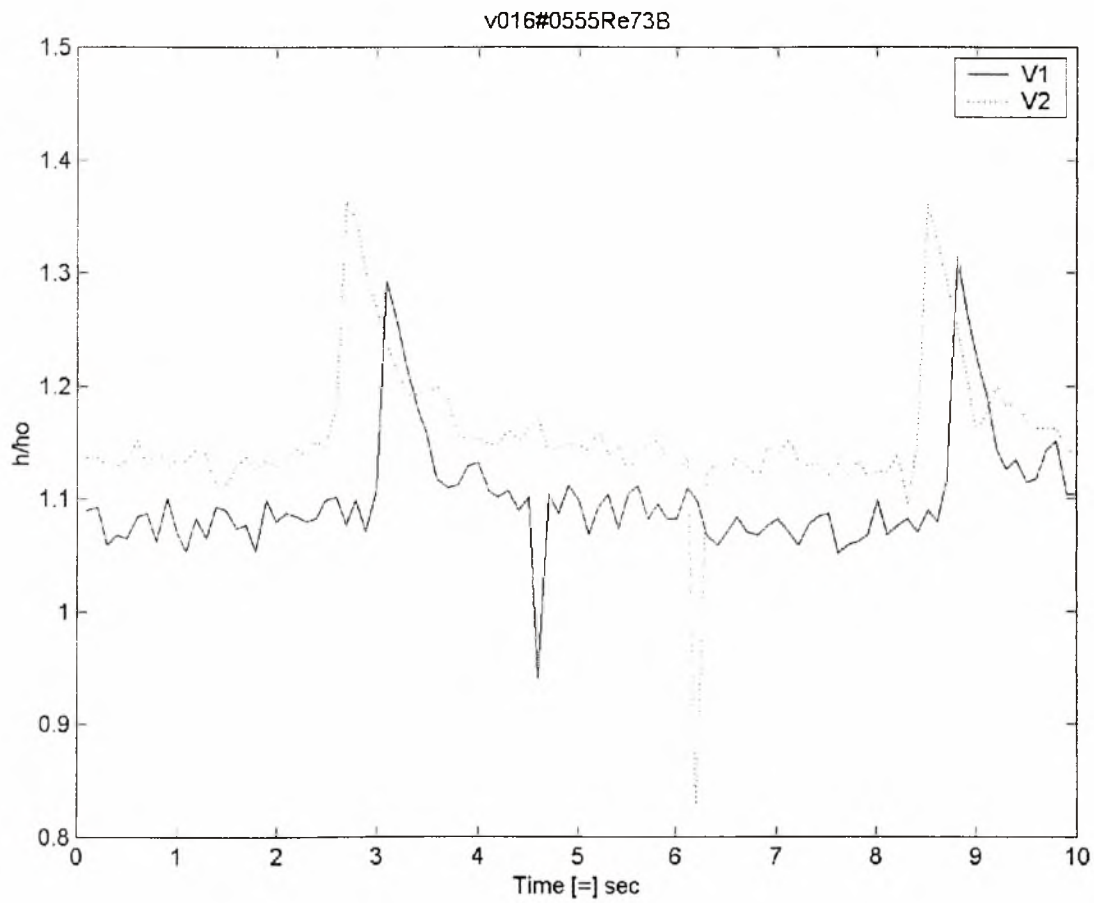
Σχήμα 6 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(0.5-5.5)$, $\text{Re}=136$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



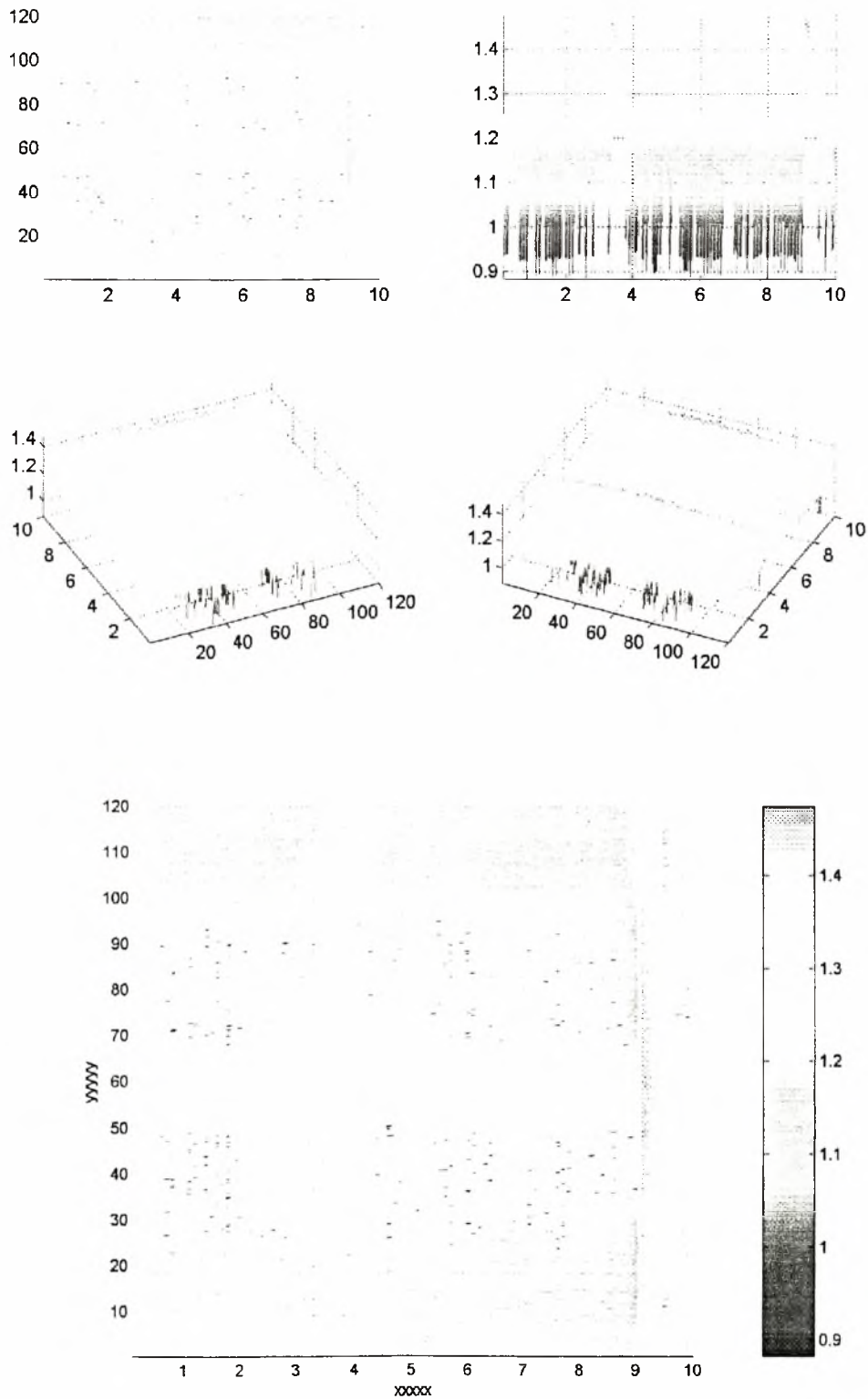
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=136$, $\nu=0,16Hz(0,5-5,,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



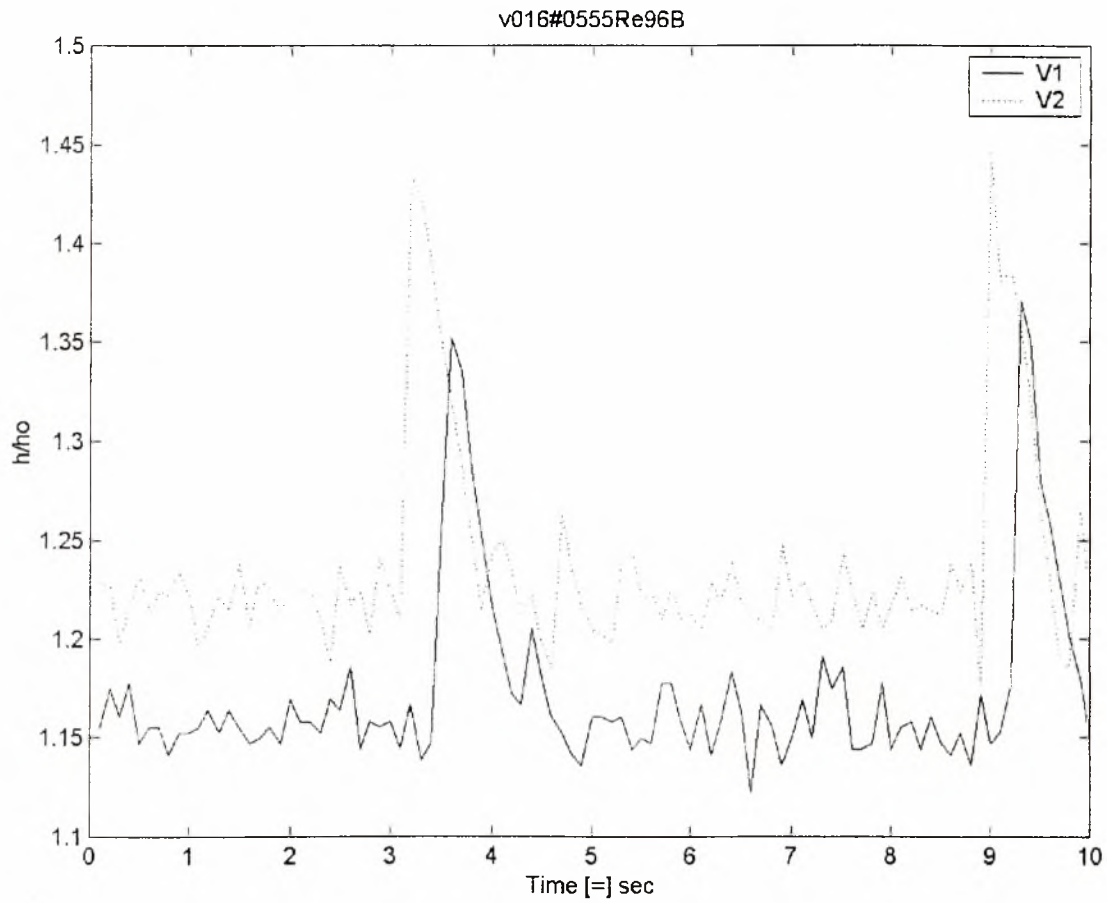
Σχήμα 7 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(0.5-5.5)$, $Re=73$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



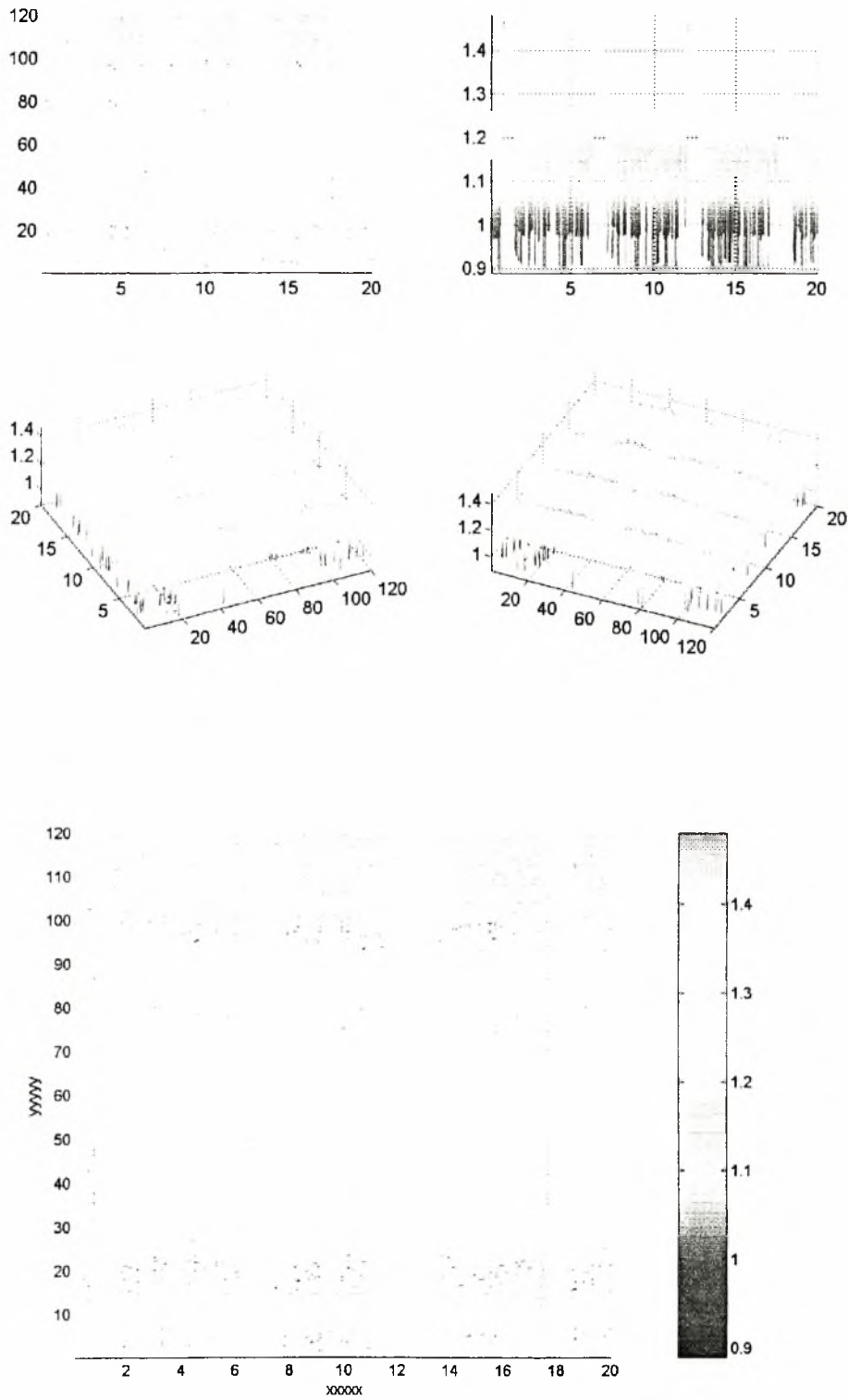
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=73$, $\nu=0,16Hz(0,5-5,,5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



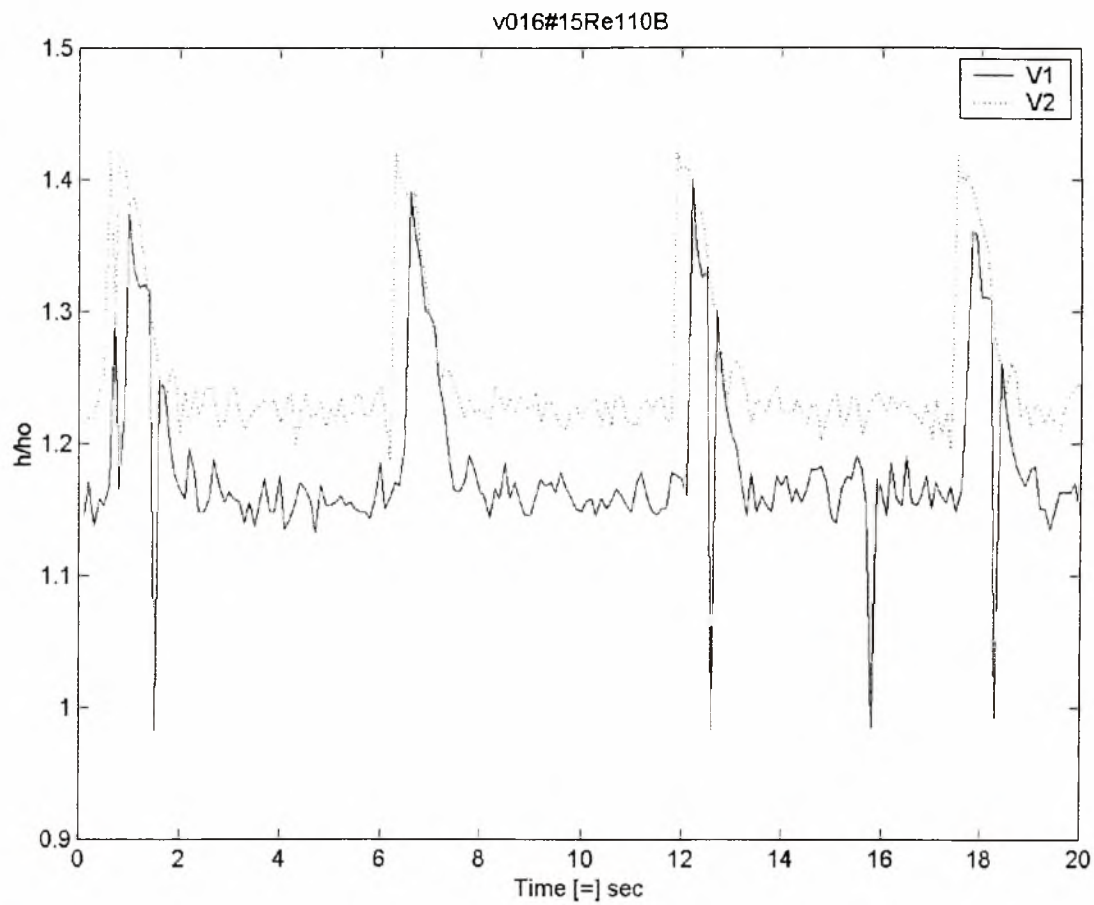
Σχήμα 8 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(0.5-5.5)$, $Re=96$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



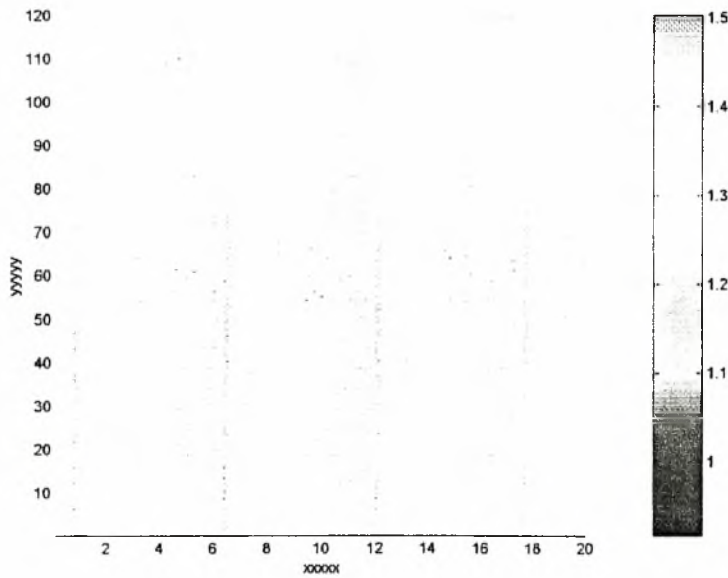
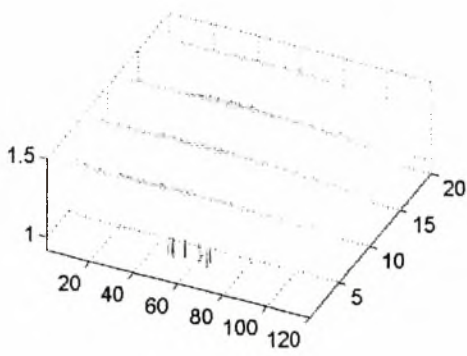
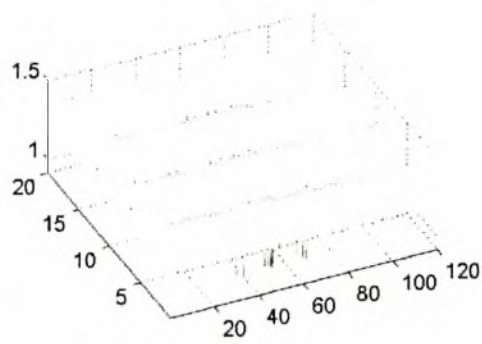
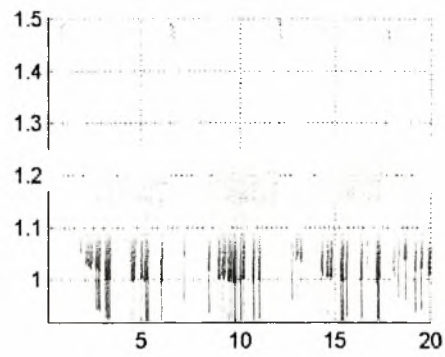
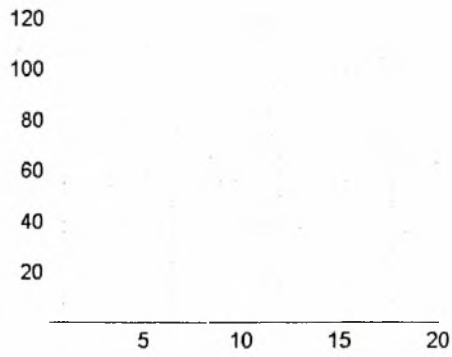
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=96$, $\nu=0,16Hz(0,5-5,,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



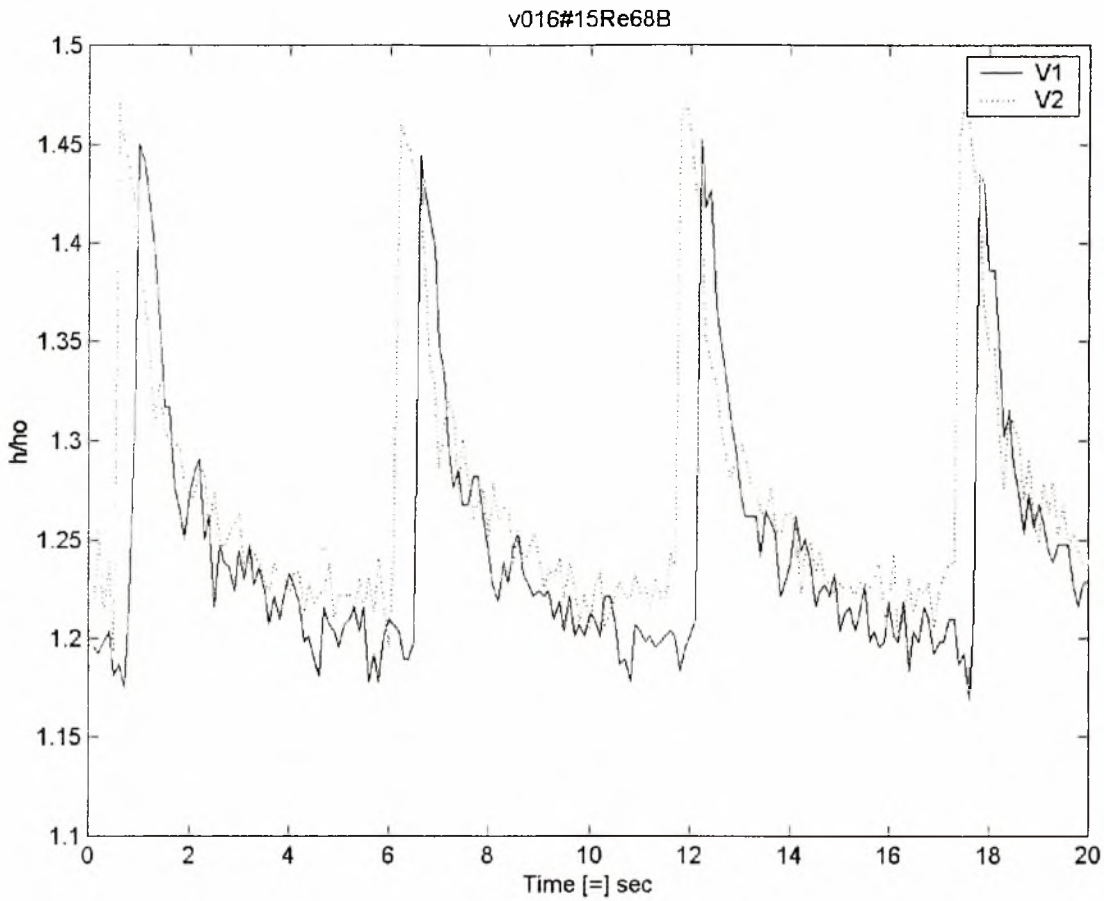
Σχήμα 9 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(1-5)$, $Re=110$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



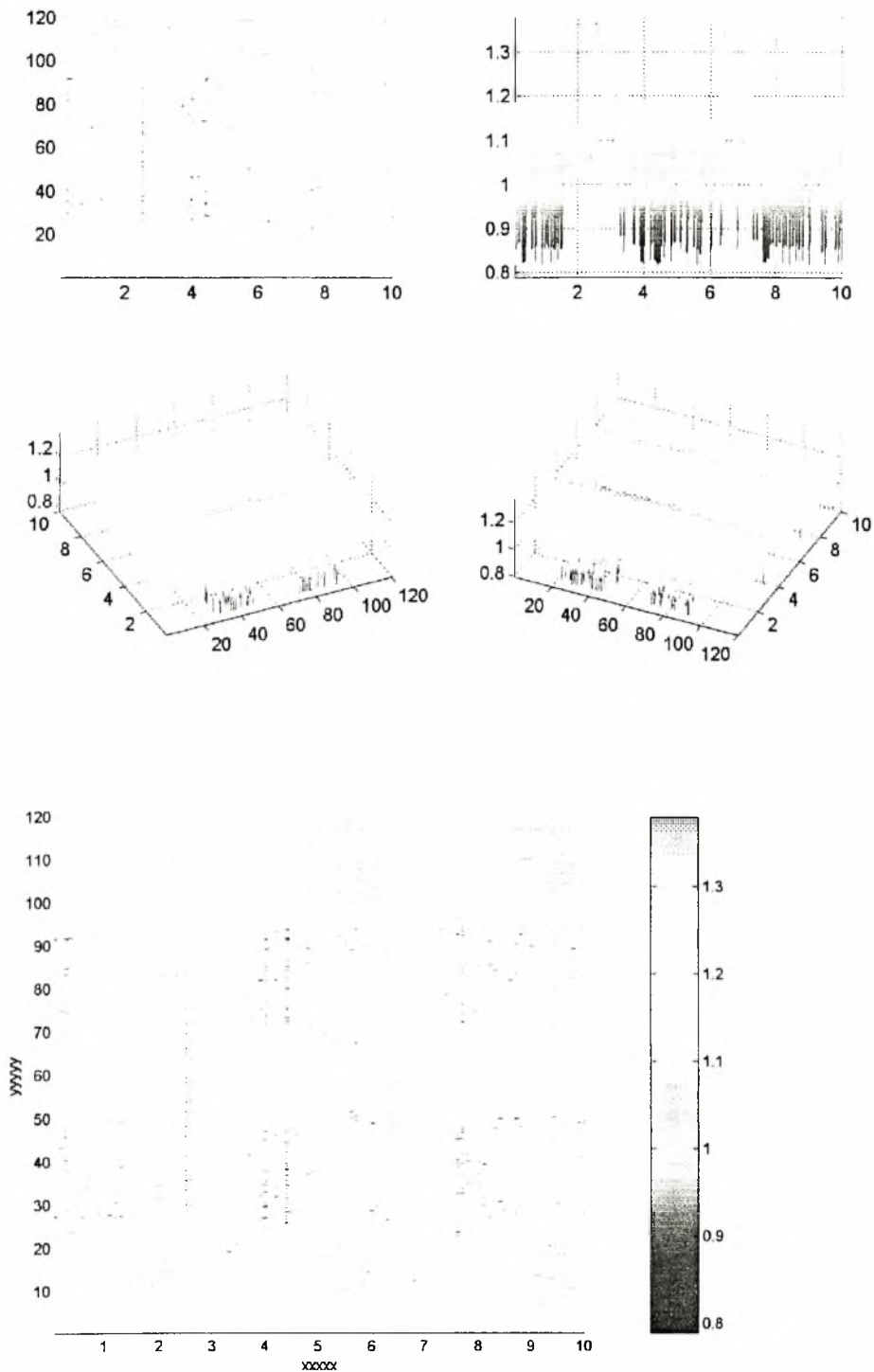
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=110$, $\nu=0,16Hz(1-5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



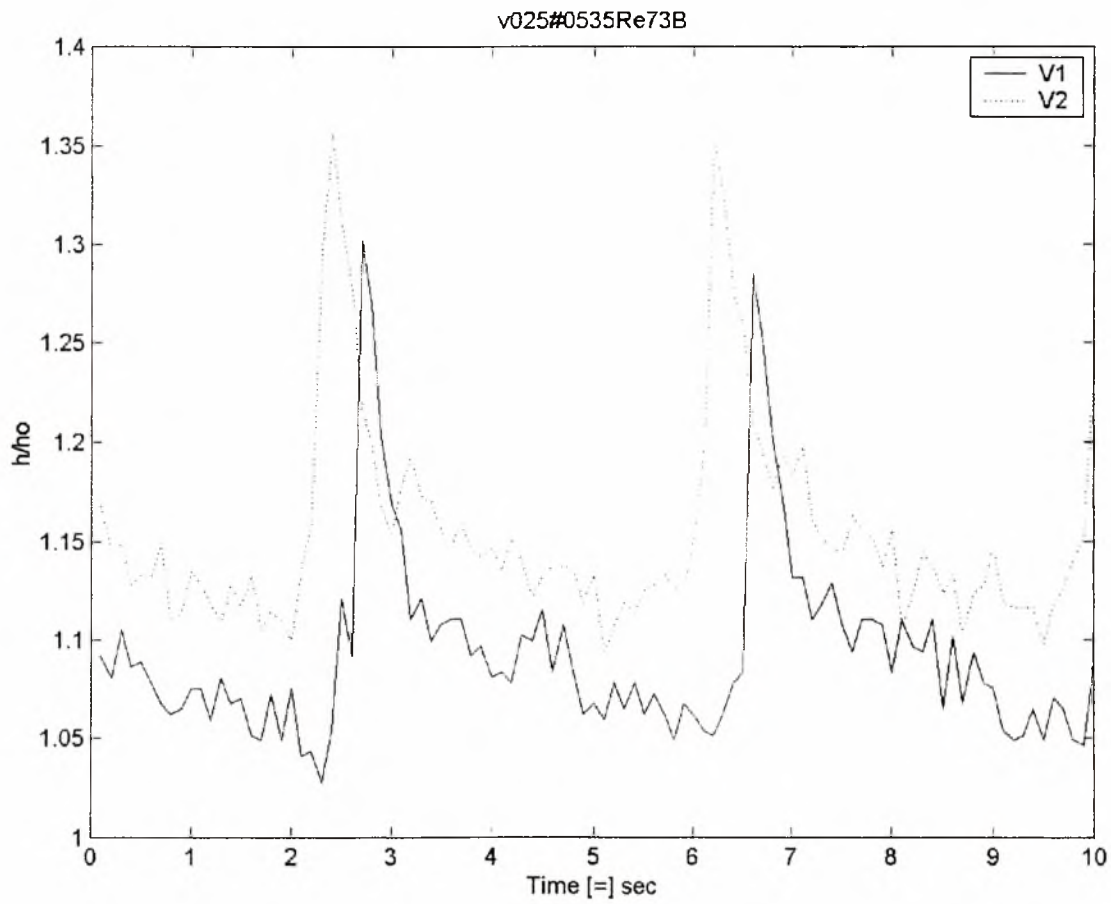
Σχήμα 10 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(1-5)$, $Re=68$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



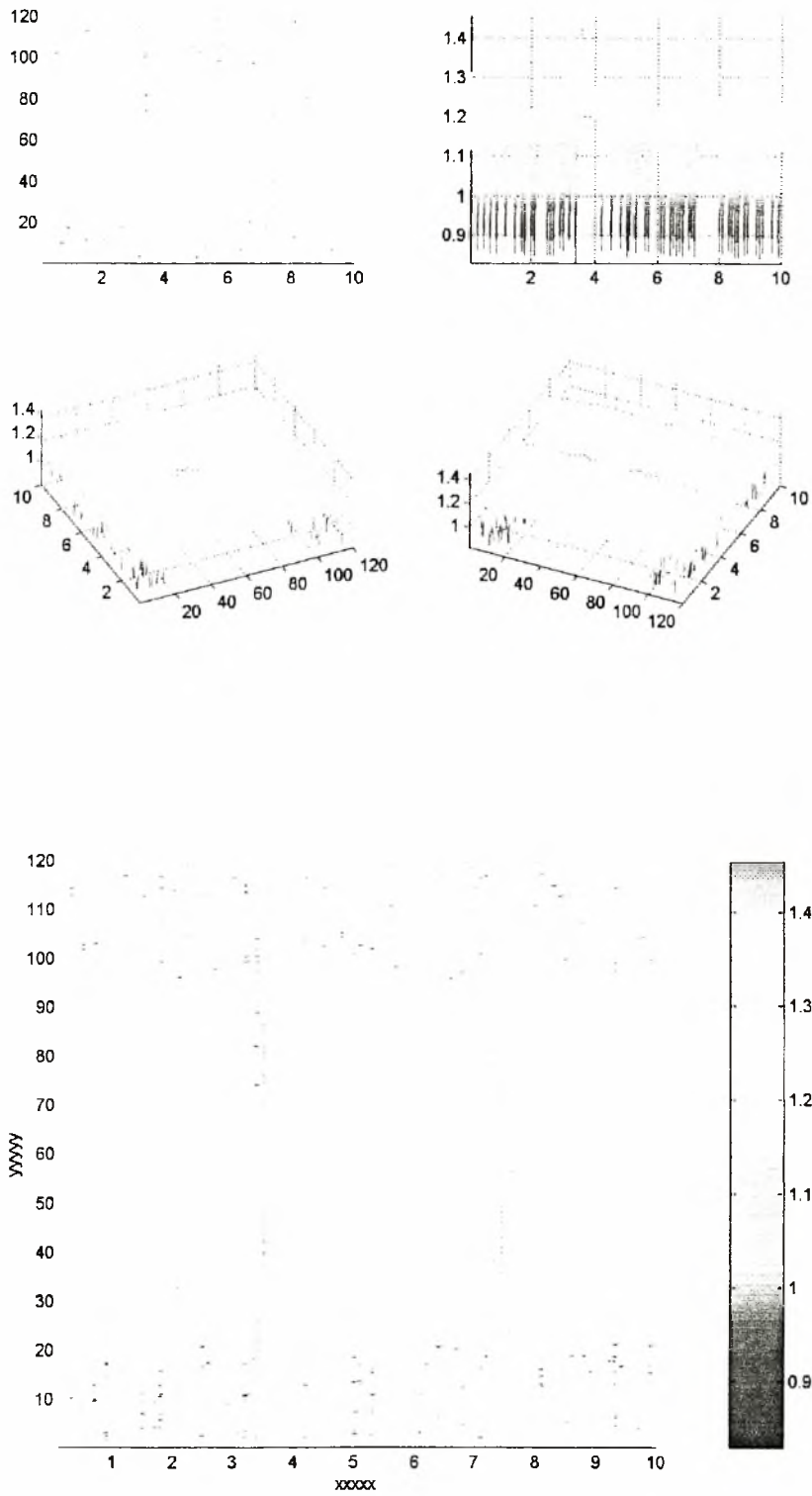
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=68$, $\nu=0,16Hz(1-5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



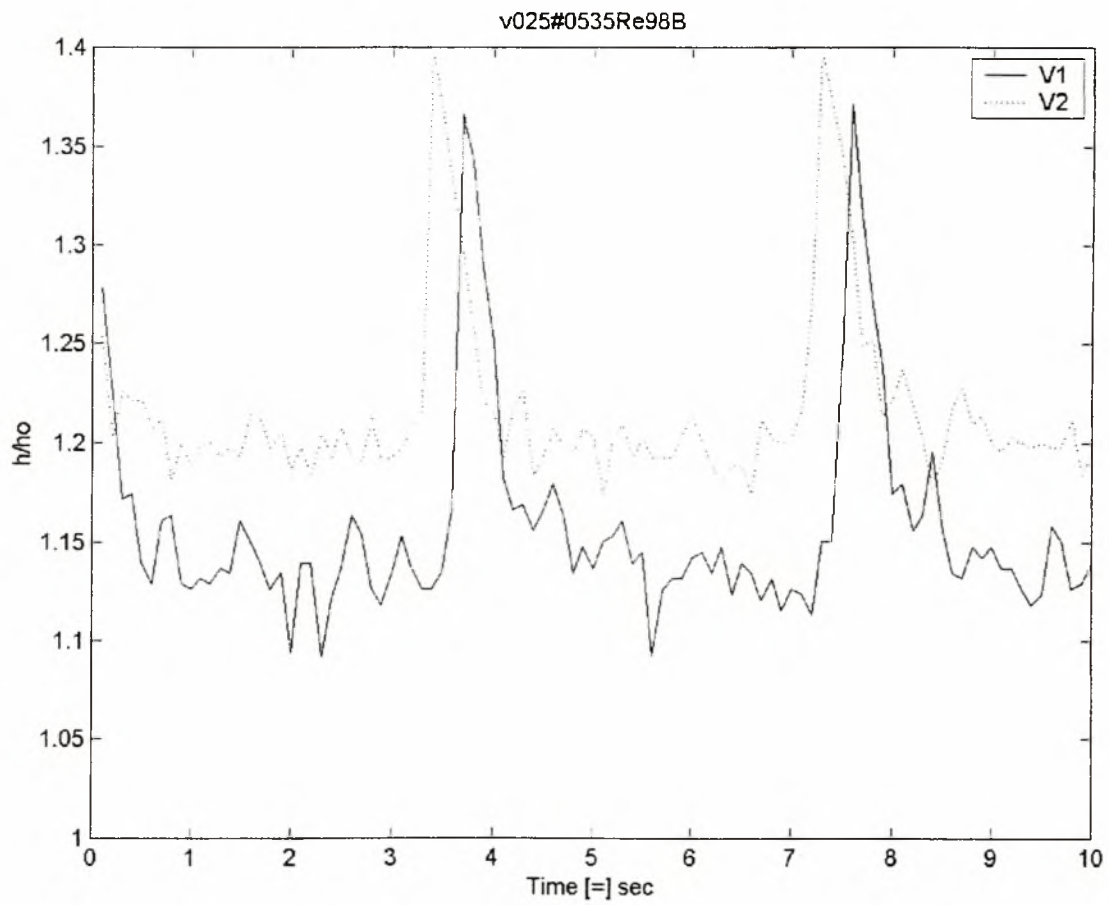
Σχήμα 11 Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(0,5-3,55)$, $Re=73$, θέση μέτρησης: 522mm. Δ λ υλμα: Καθαρό νερό



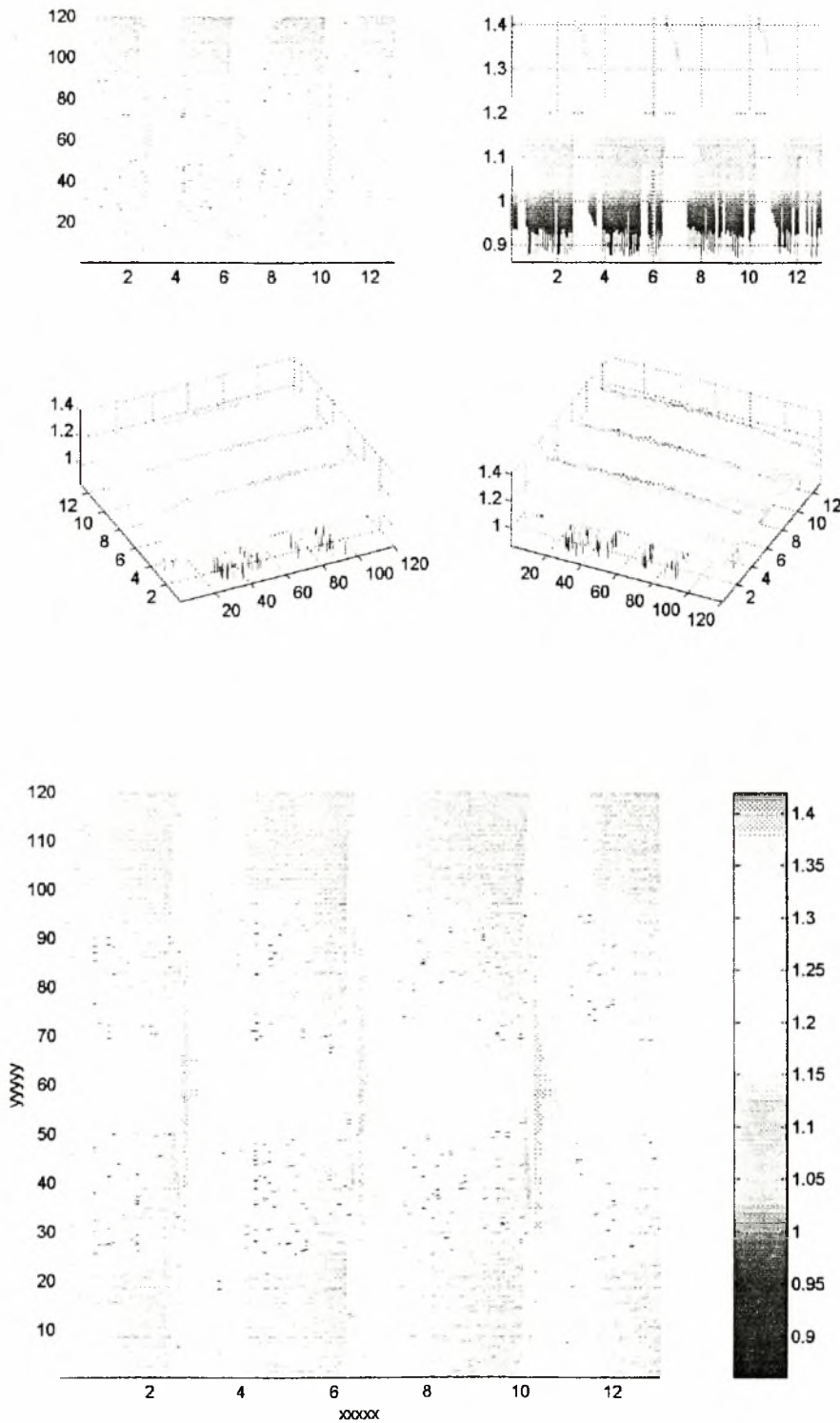
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=73$, $\nu=0,25Hz(0,5-3,5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



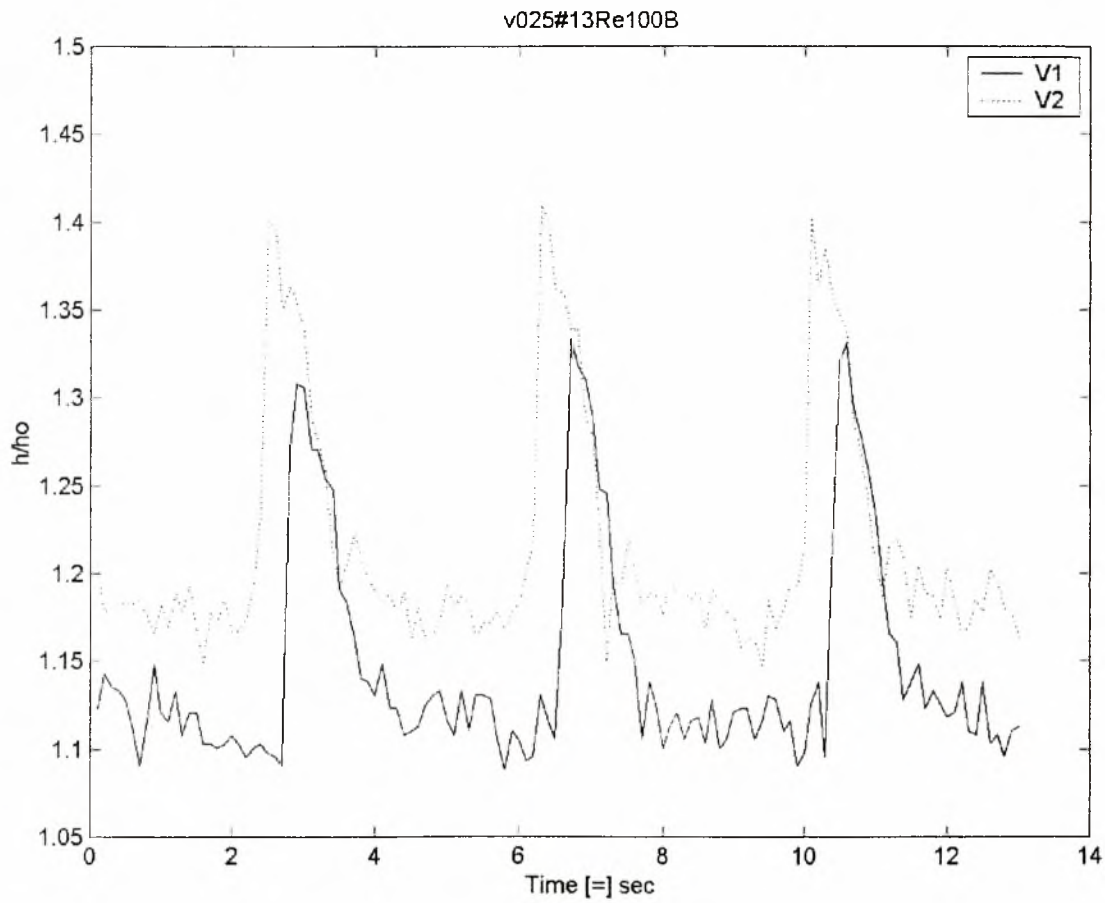
Σχήμα 12 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(0,5-3,55)$, $\text{Re}=98$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



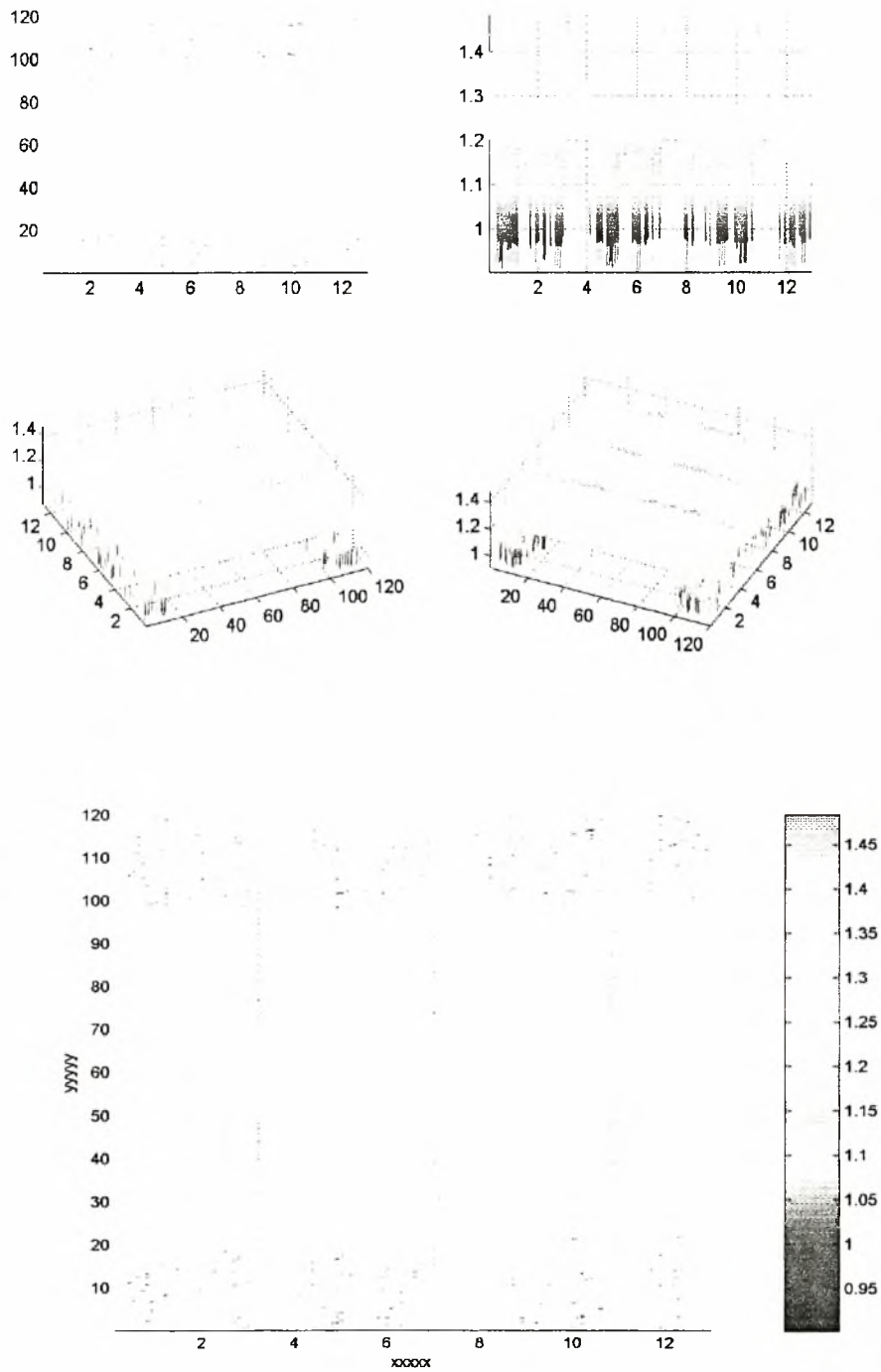
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 73mm, $Re=98$, $\nu=0,25Hz(0,5-3,5)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



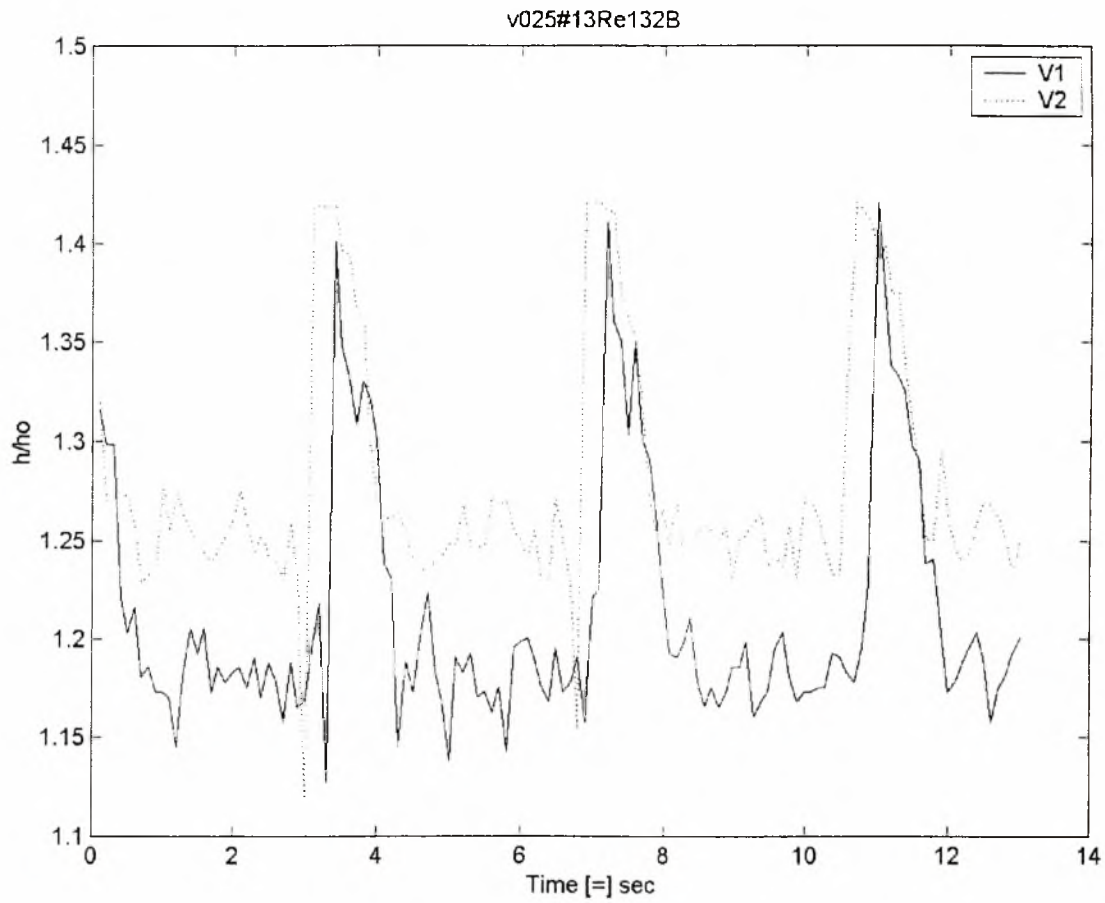
Σχήμα 13 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $Re=100$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



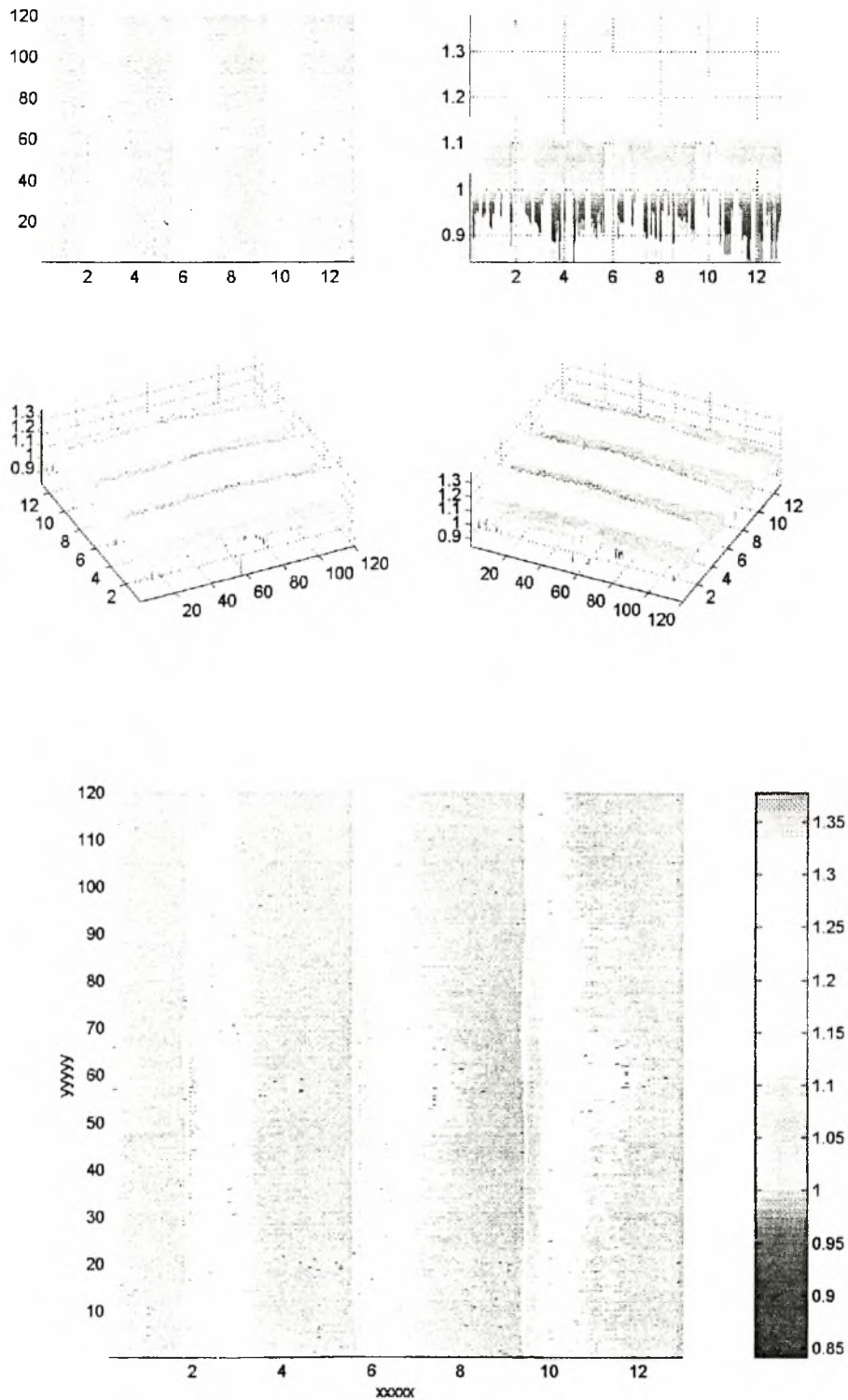
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 73mm, $Re=100$, $\nu=0,25Hz(1-3)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



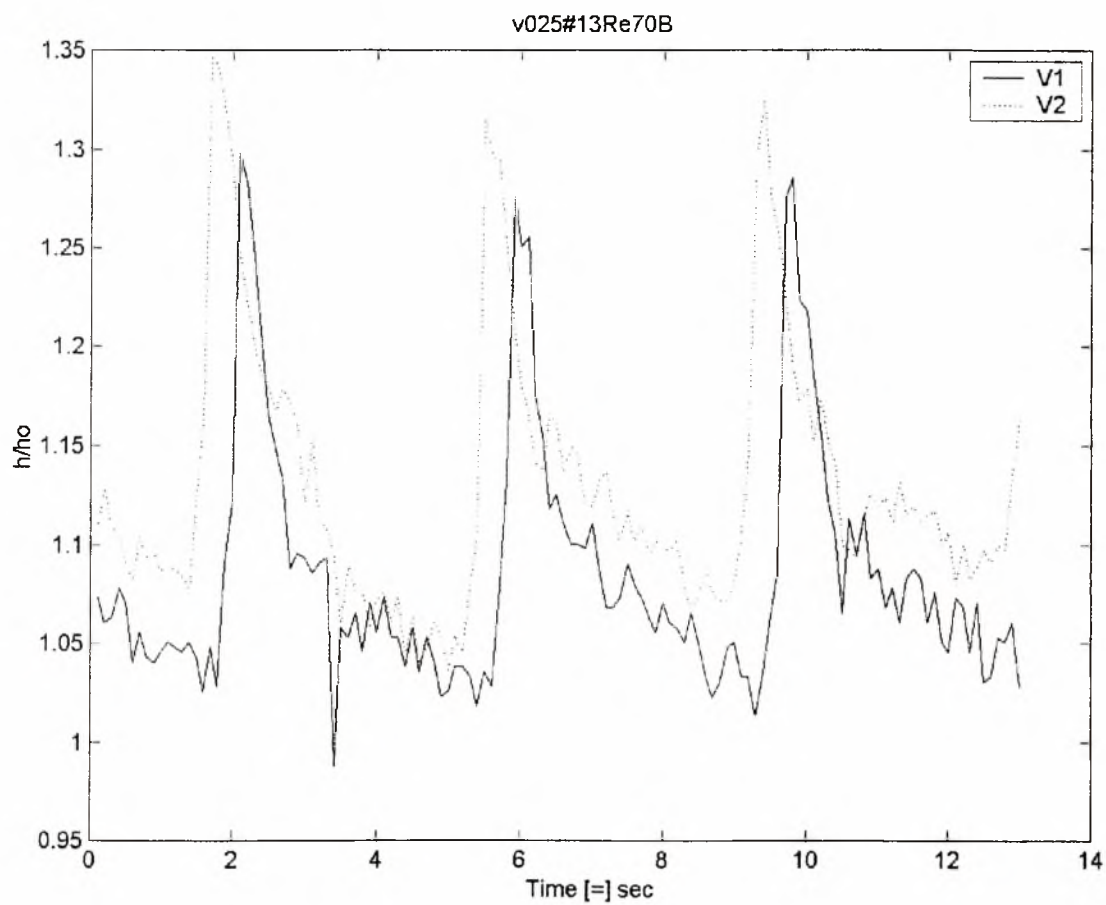
Σχήμα 14 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $Re=132$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



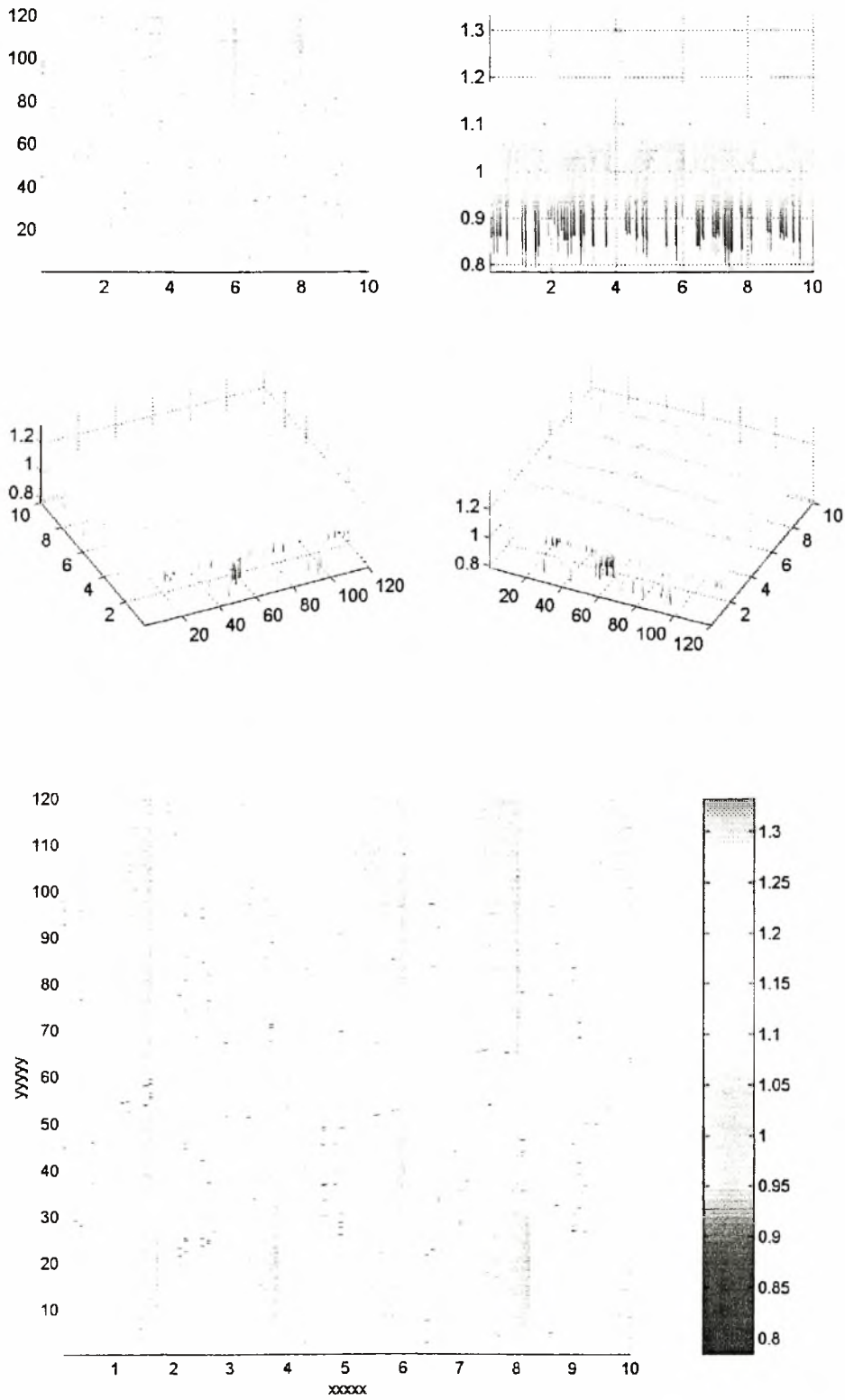
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 73mm, $Re=132$, $\nu=0,25Hz(1-3)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



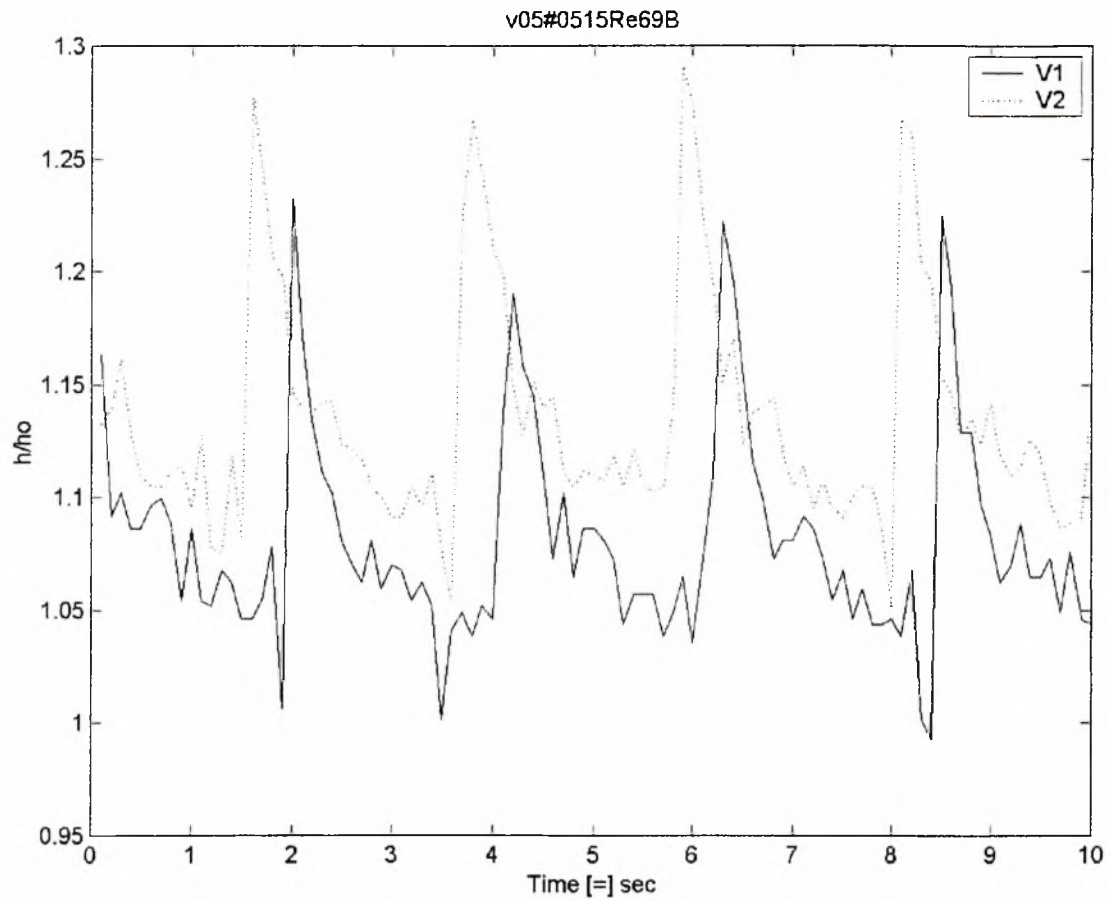
Σχήμα 15 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $Re=70$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



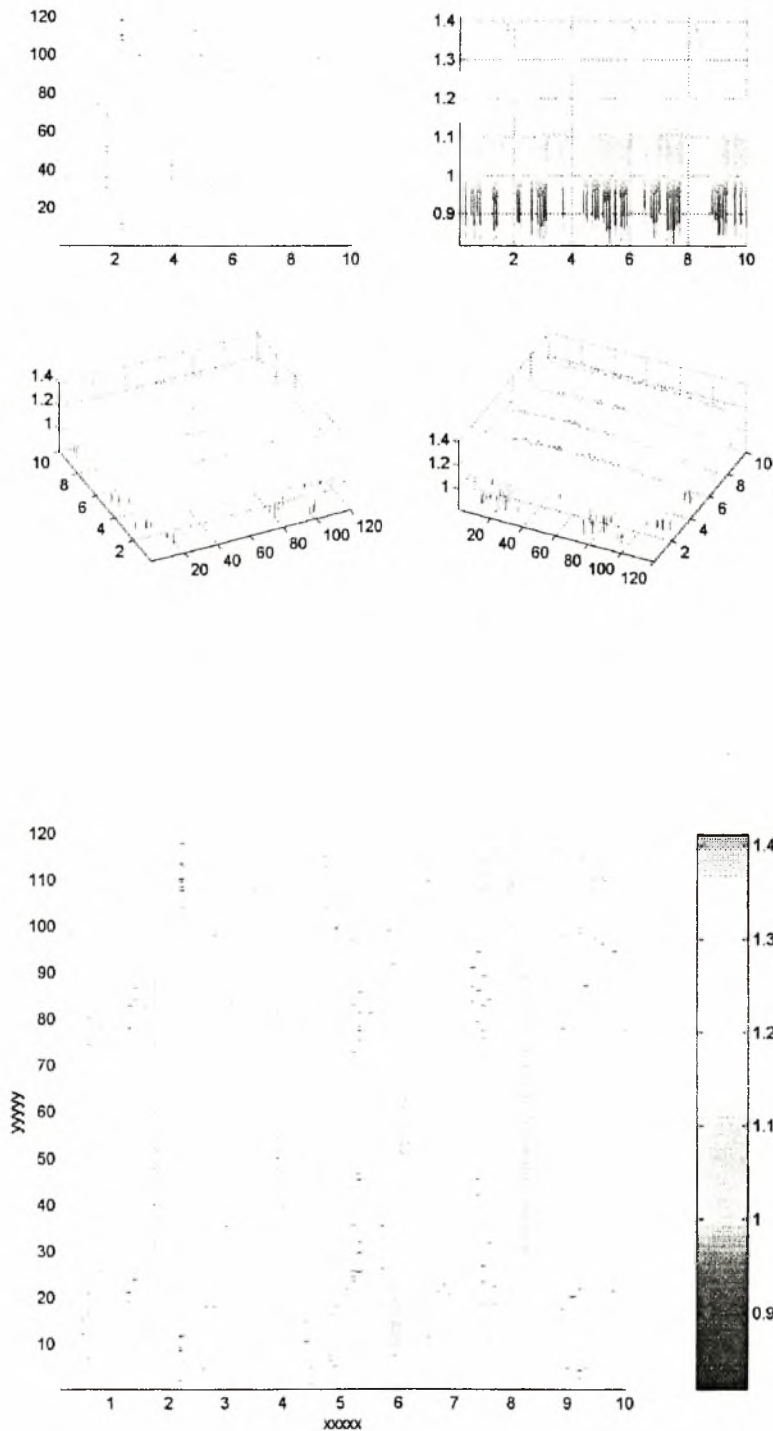
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 73mm, $Re=70$, $\nu=0,25Hz(1-3)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



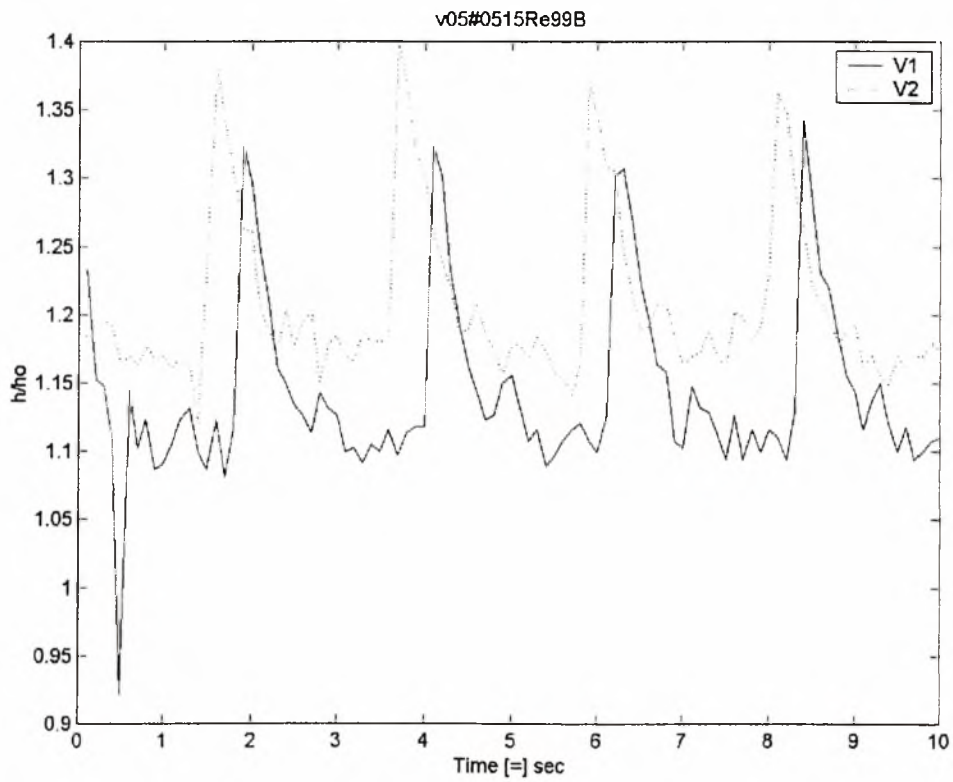
Σχήμα 16 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(0,5-1,5)$, $Re=69$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



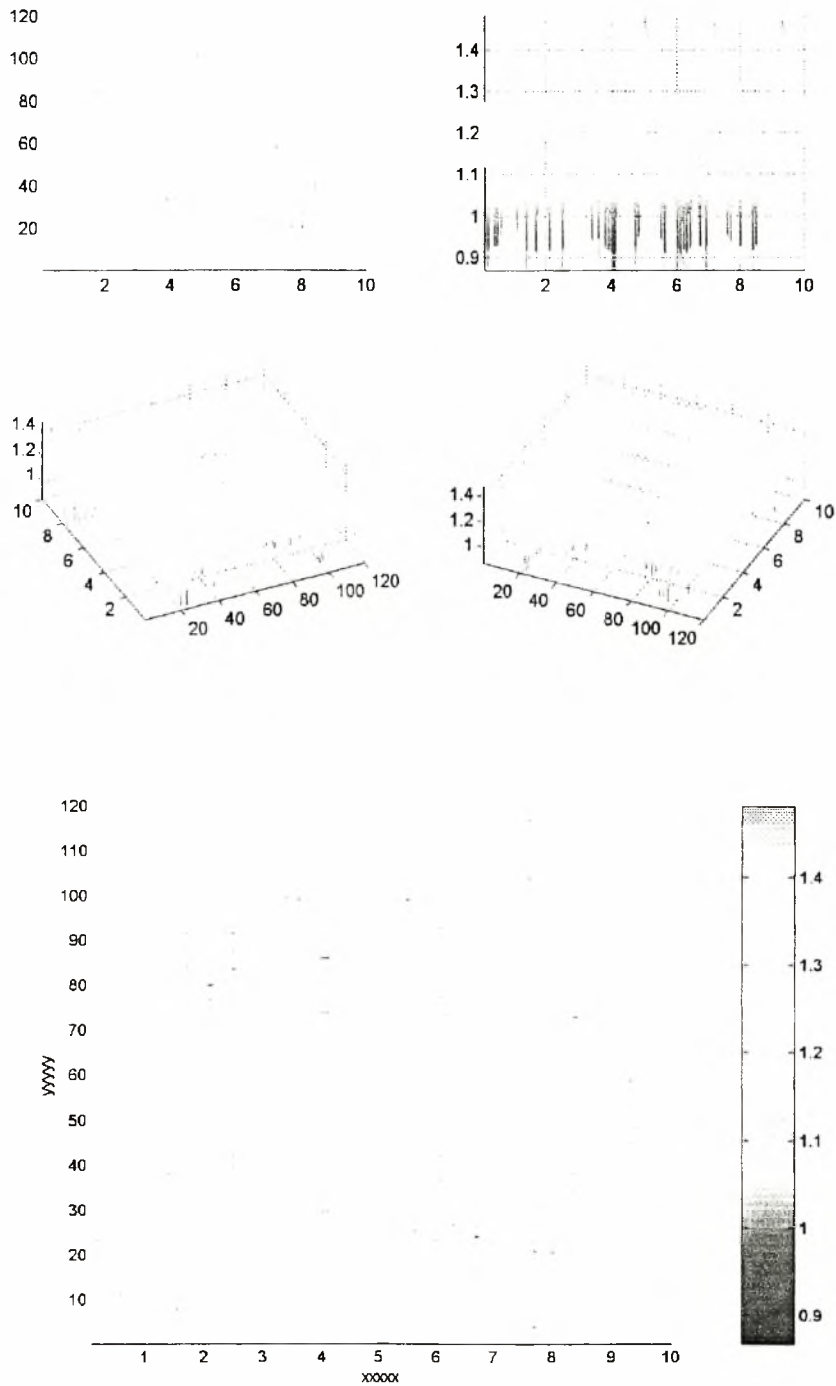
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 73mm, $Re=69$, $\nu=0,5Hz(0,5-1,5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



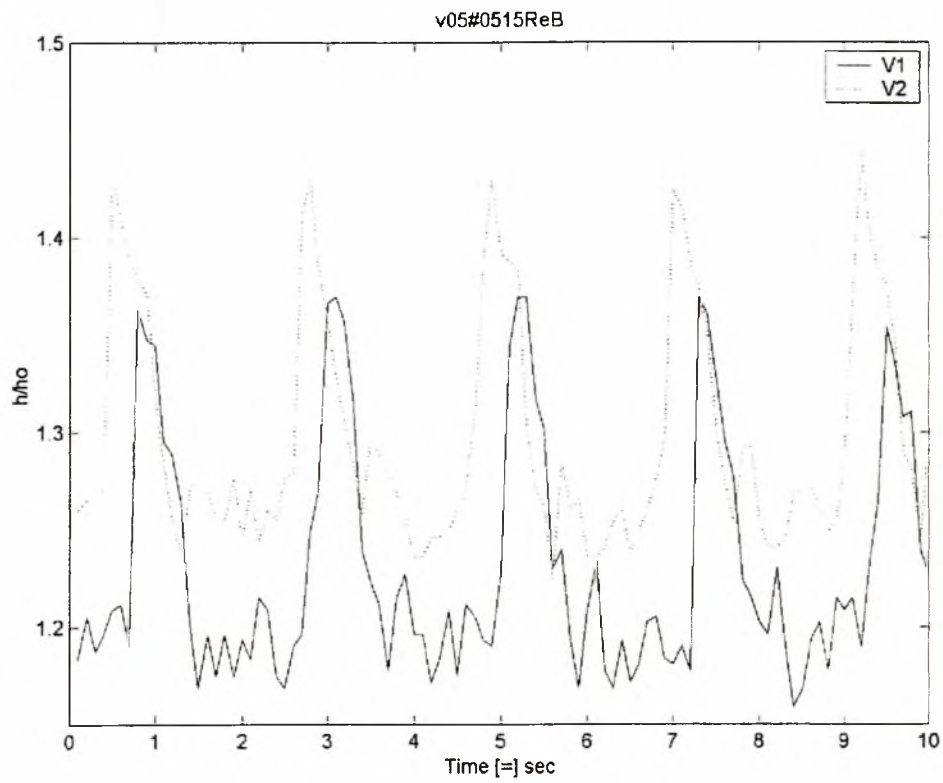
Σχήμα 17 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(0,5-1,5)$, $\text{Re}=71$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



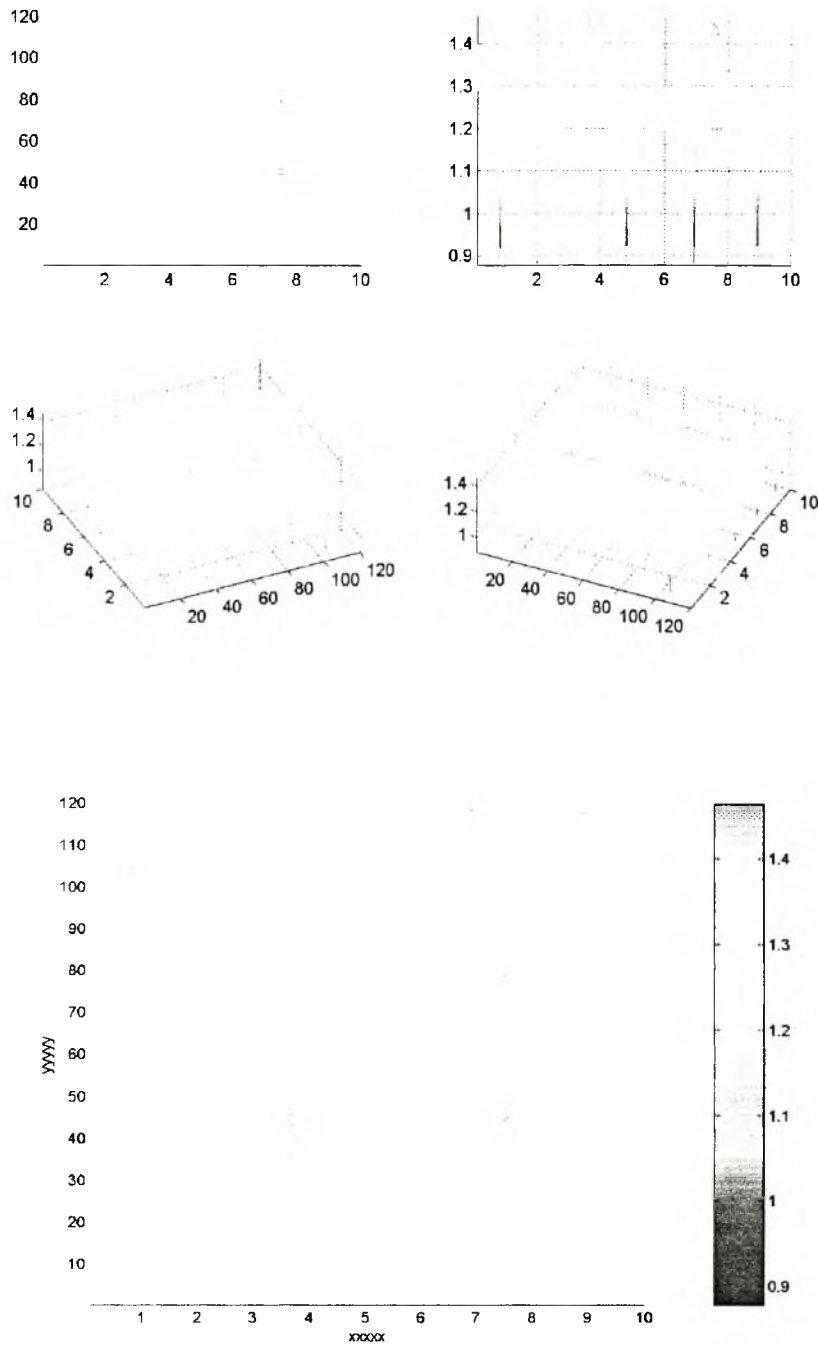
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=71$, $\nu=0,5Hz(0,5-1,5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



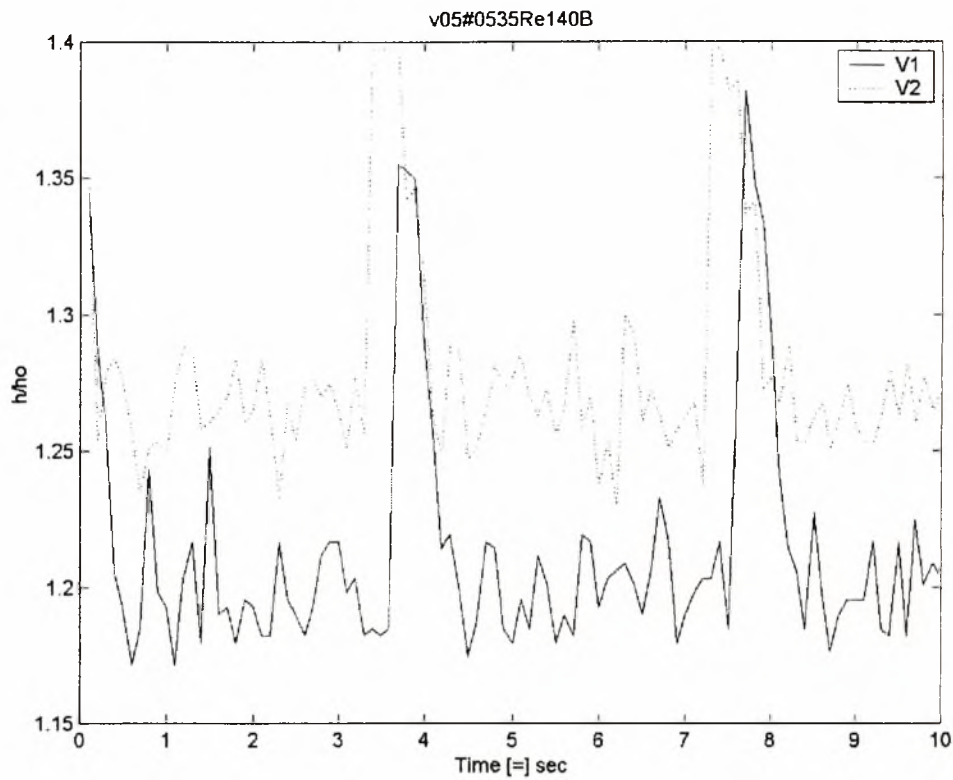
Σχήμα 18 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(0,5-1,5)$, $\text{Re}=71$, θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



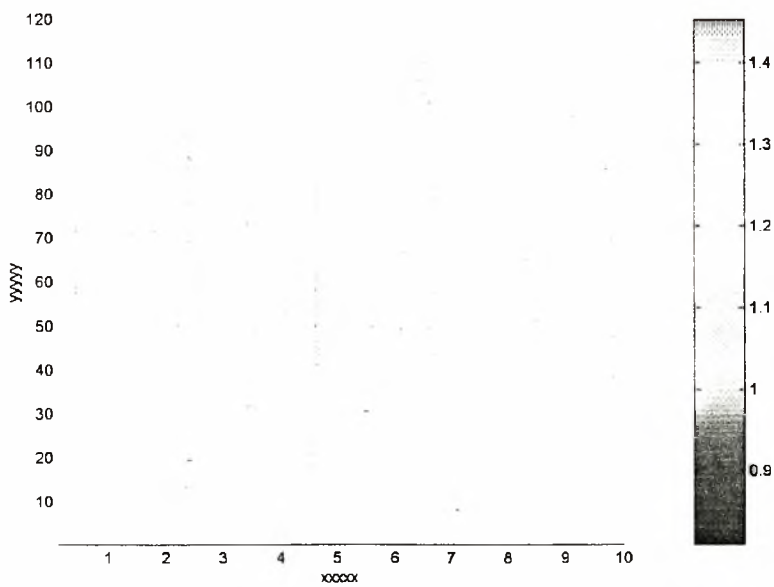
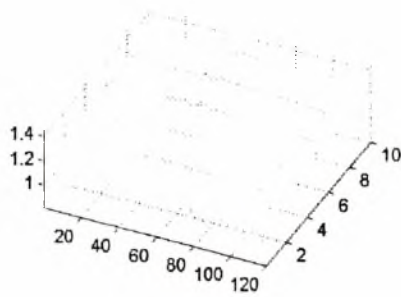
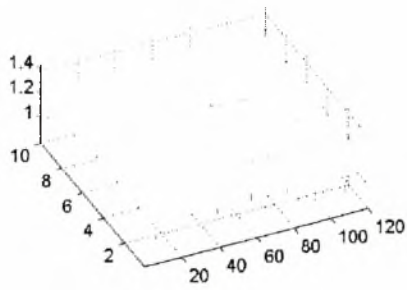
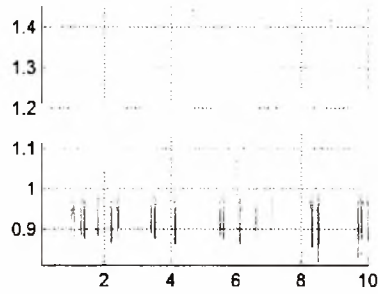
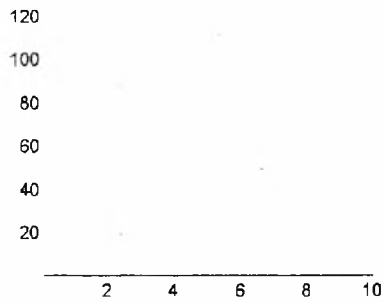
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=71$, $\nu=0,5Hz(0,5-1,5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



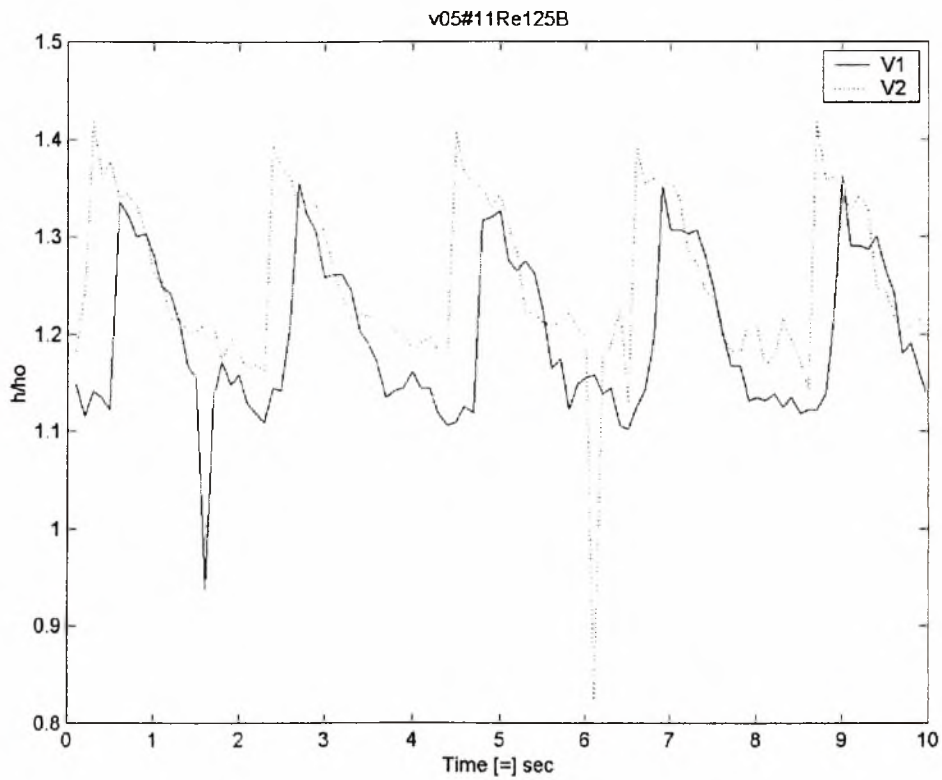
Σχήμα 19 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(0,5-3,5)$, $Re=140$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



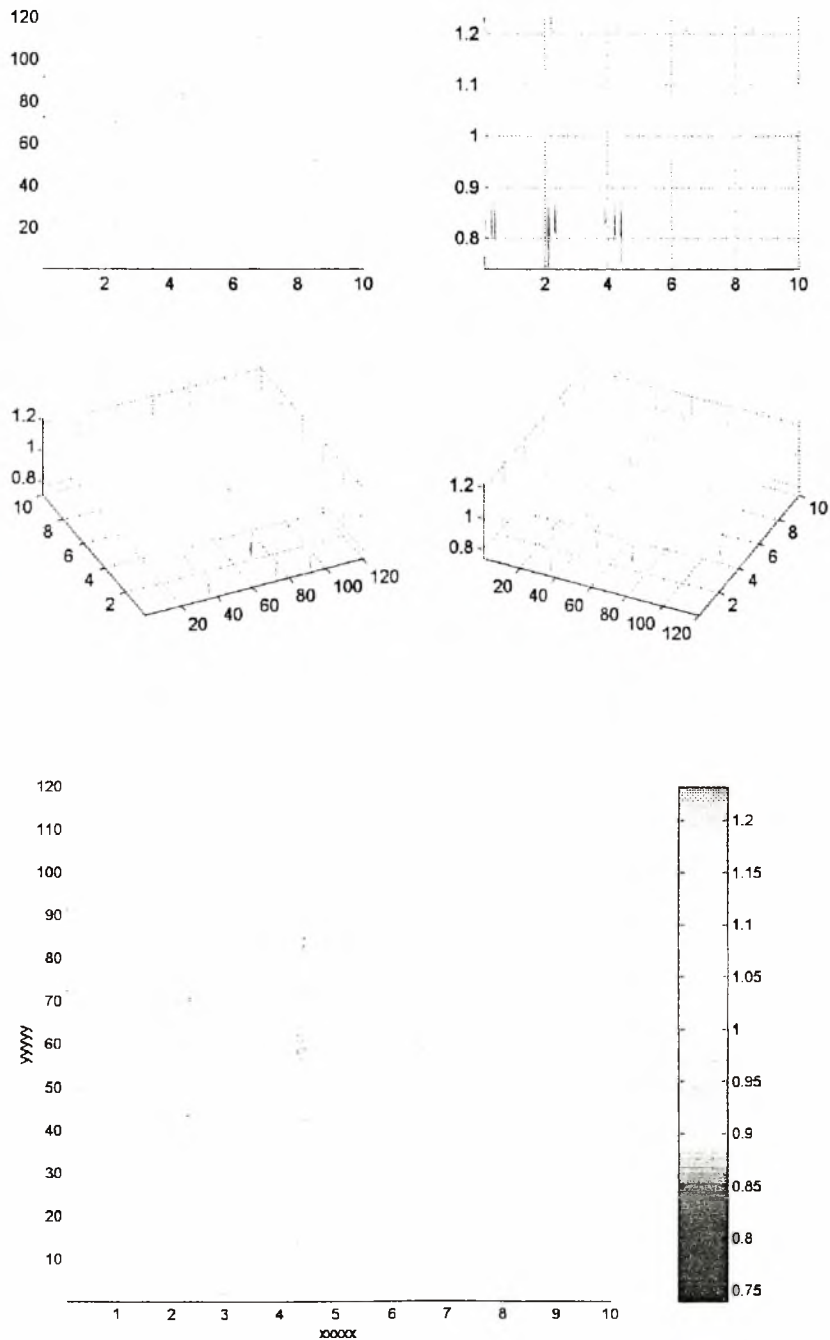
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=140$, $\nu=0,5Hz(0,5-3,5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



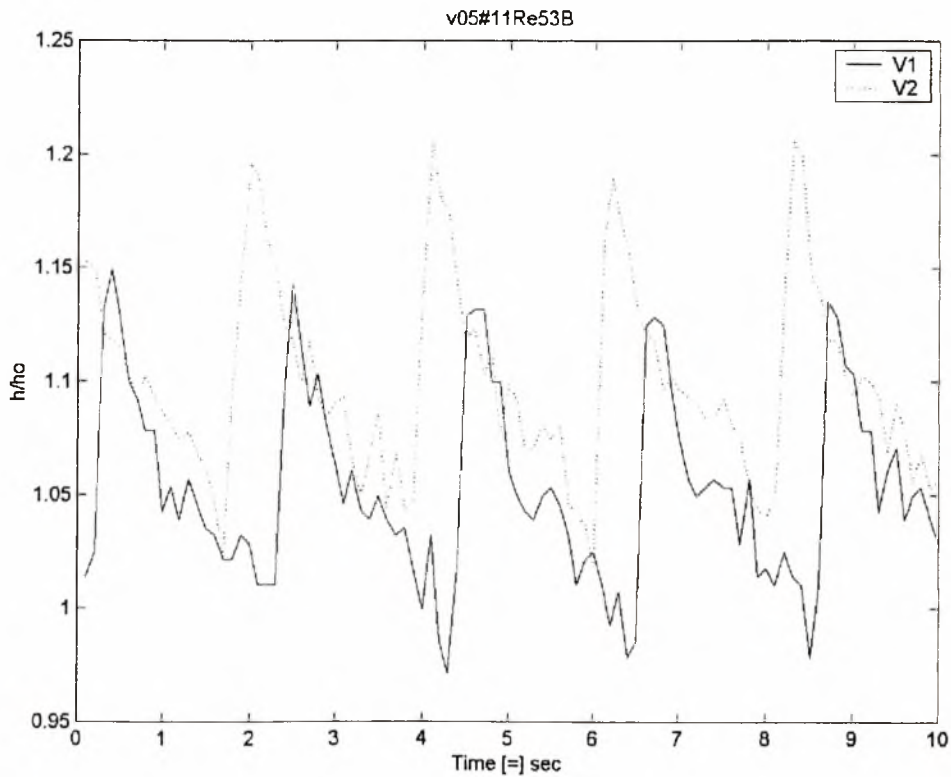
Σχήμα 20 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=125$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



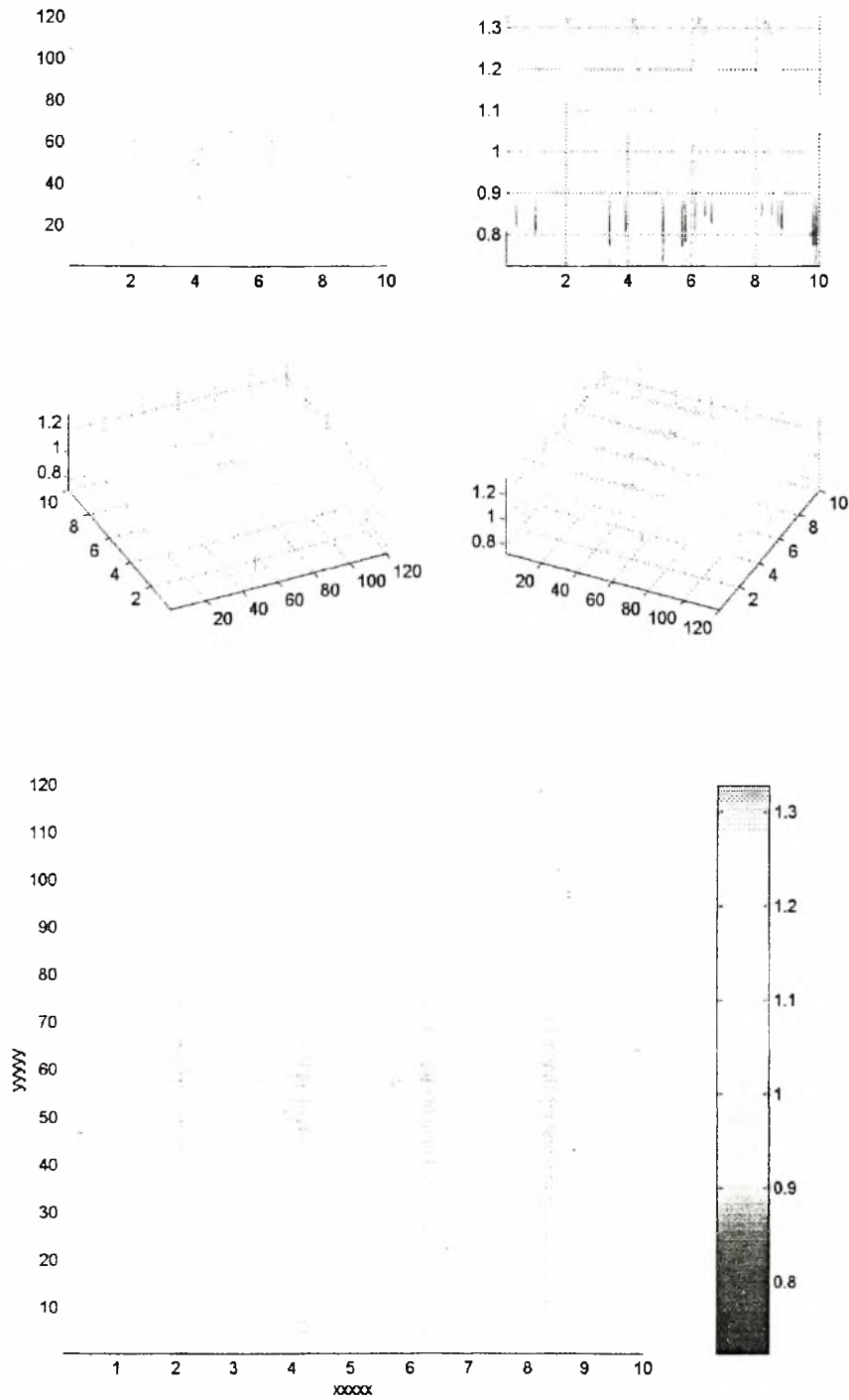
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=125$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



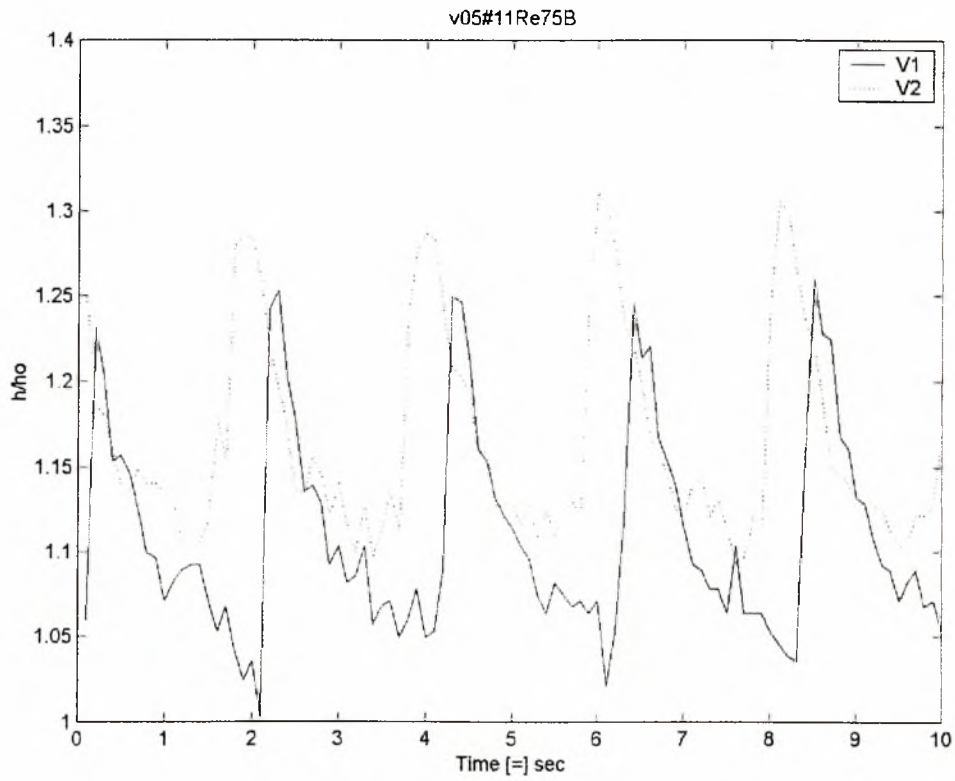
Σχήμα 21 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=53$, θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



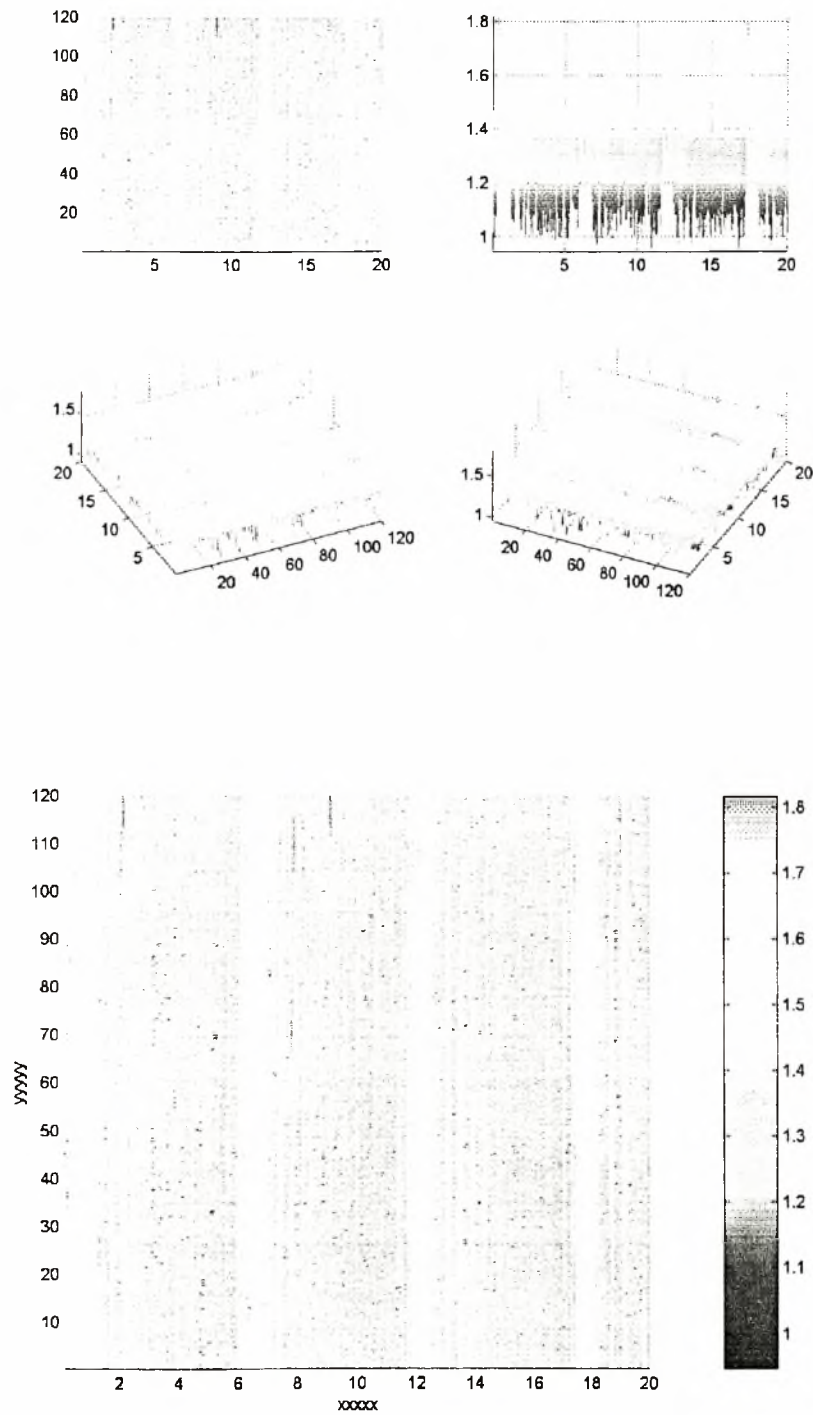
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=53$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



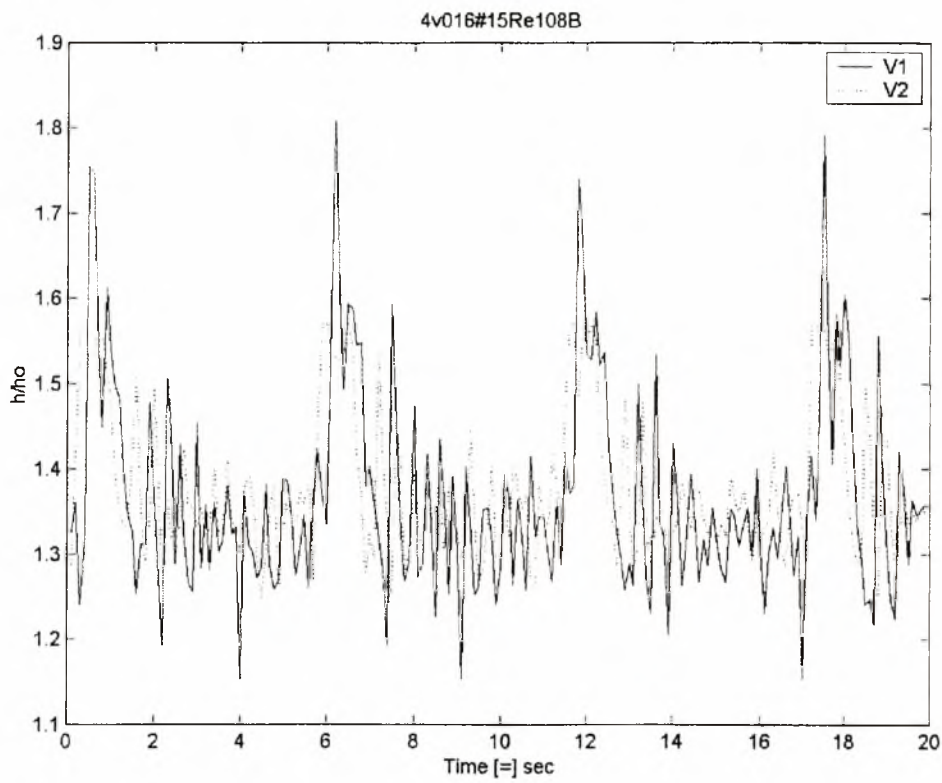
**Σχήμα 22 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=75$
θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



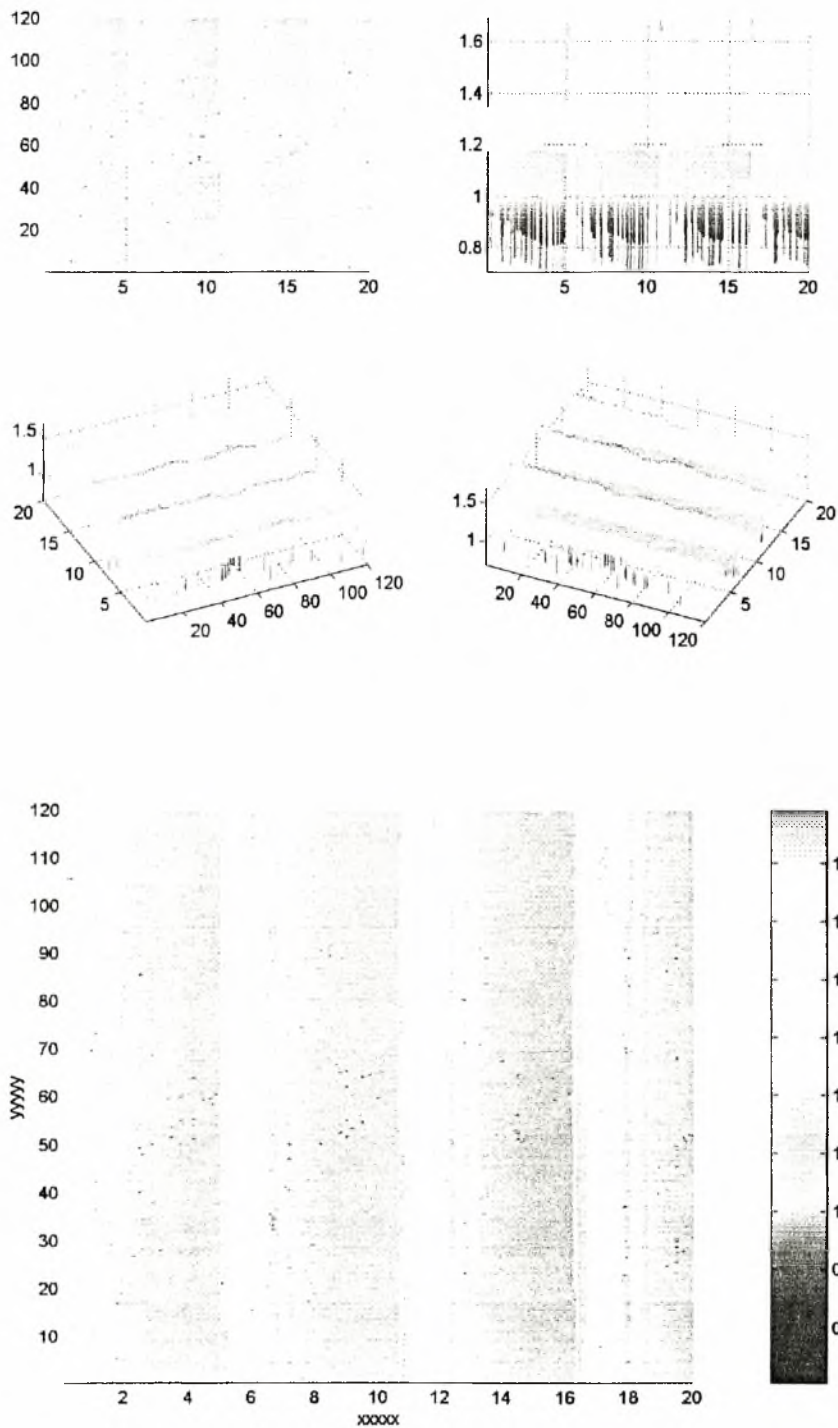
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=75$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



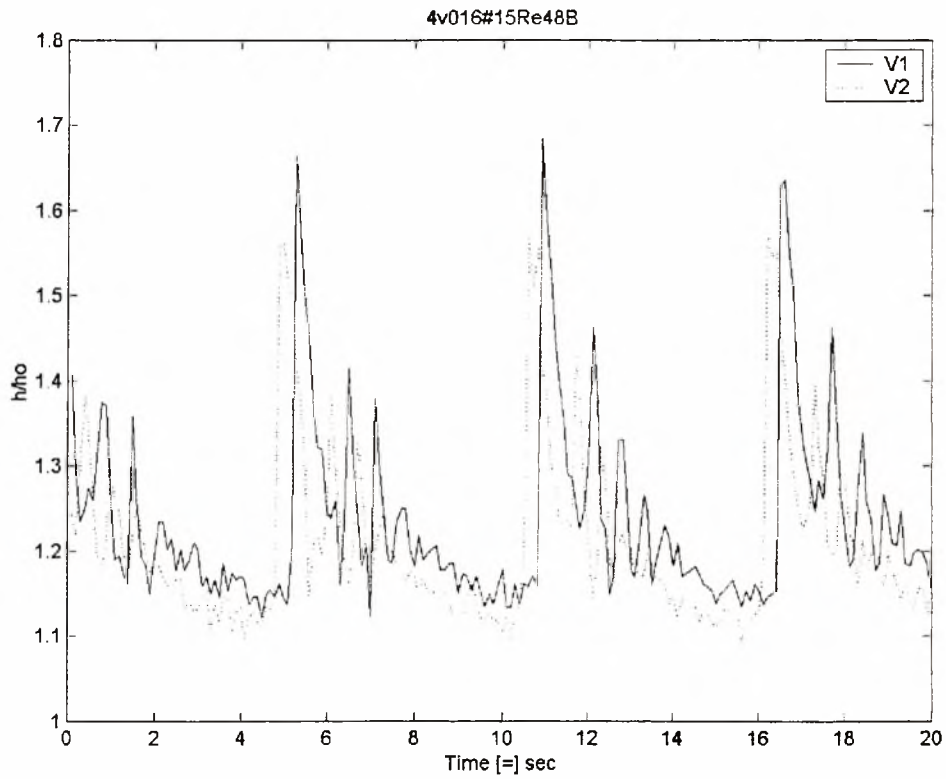
**Σχήμα 23: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}$ (1-5), $Re=108$
θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



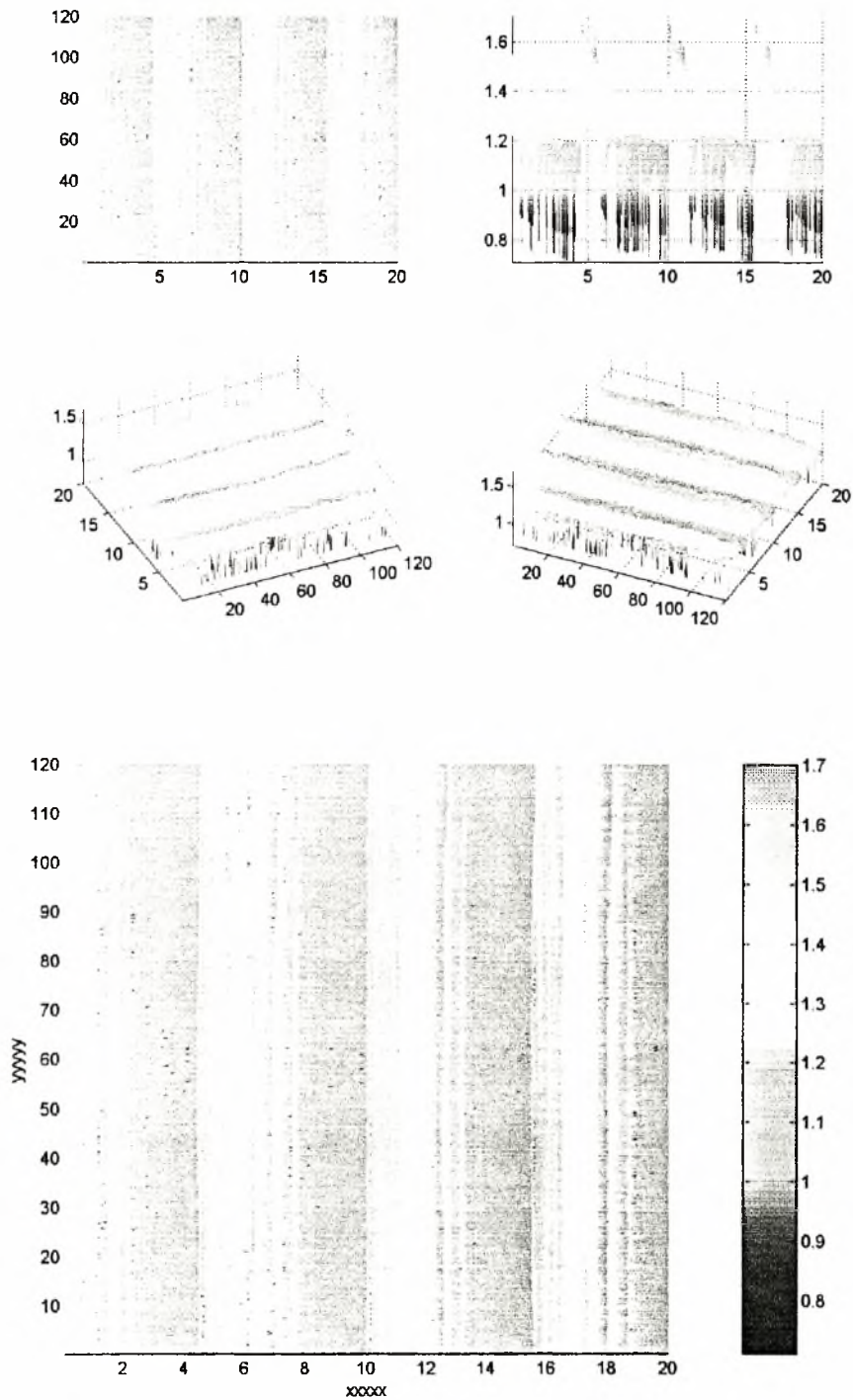
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=108$, $\nu=0,16Hz(1-5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



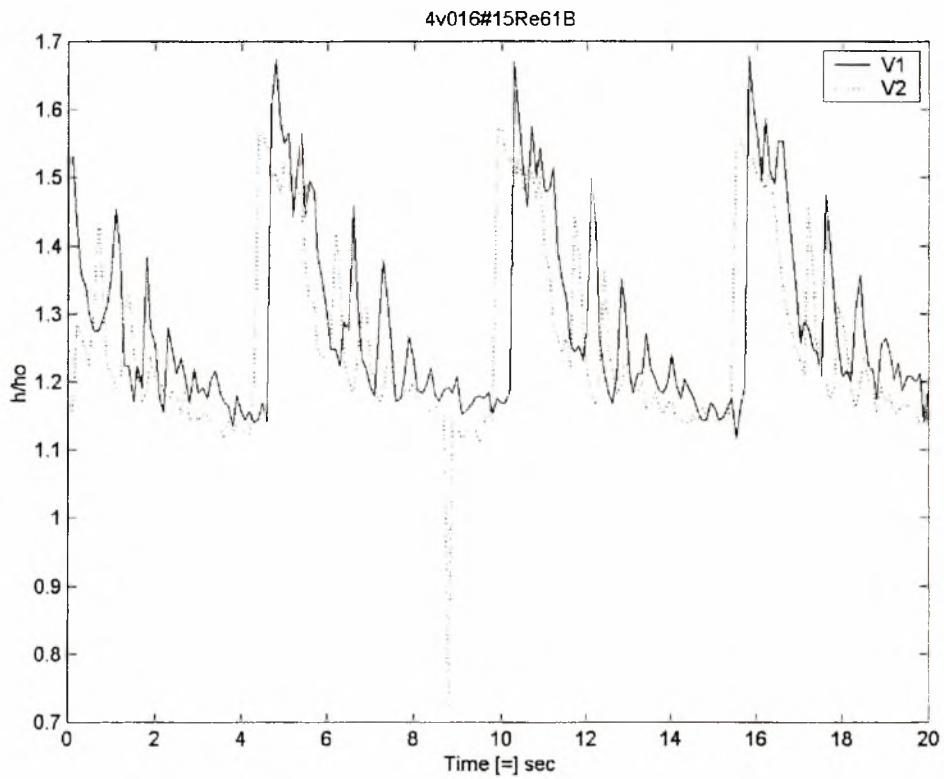
Σχήμα 24: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(1-5), \text{Re}=48$
 θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



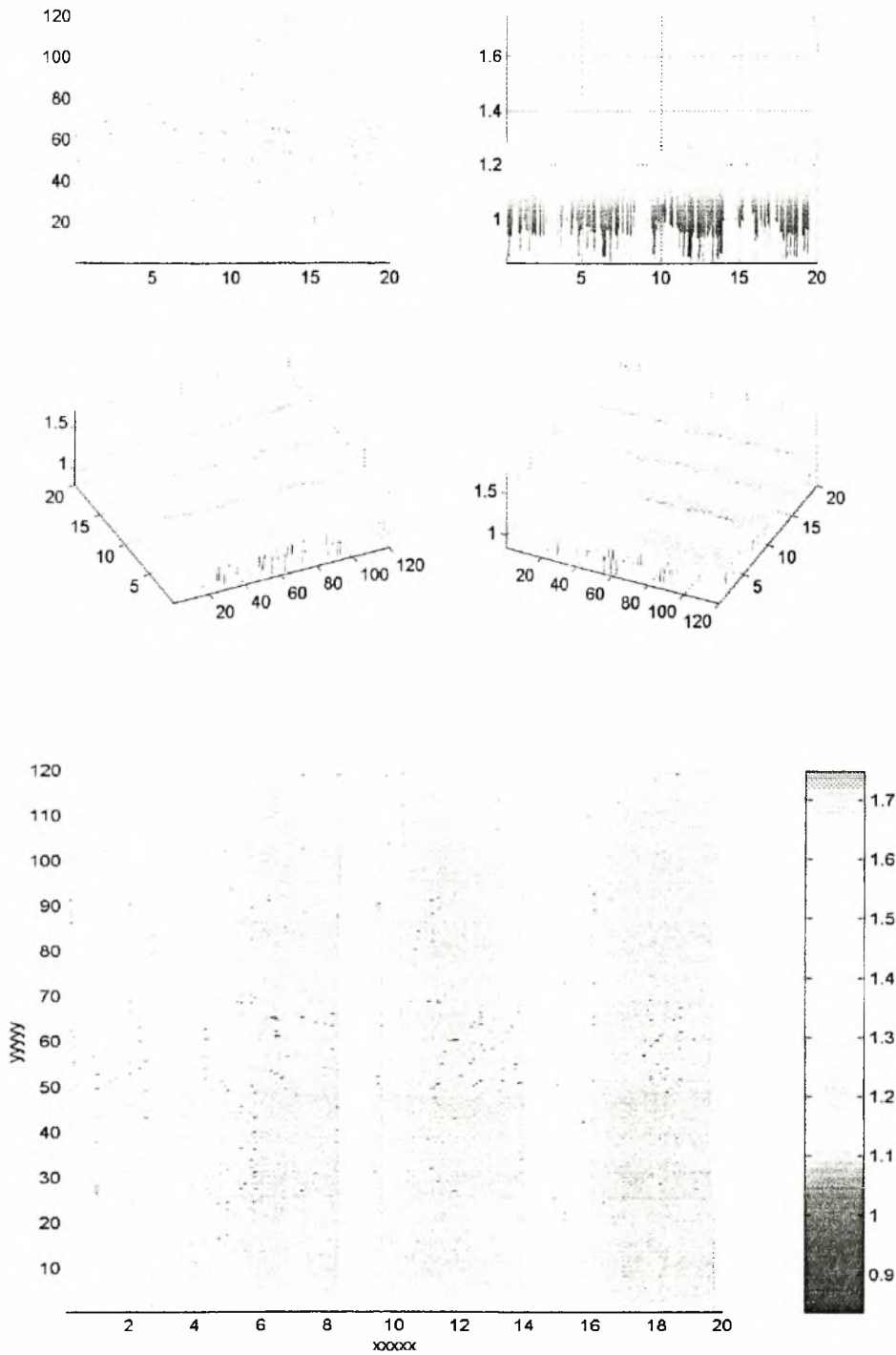
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=48$, $\nu=0,1Hz(1-5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



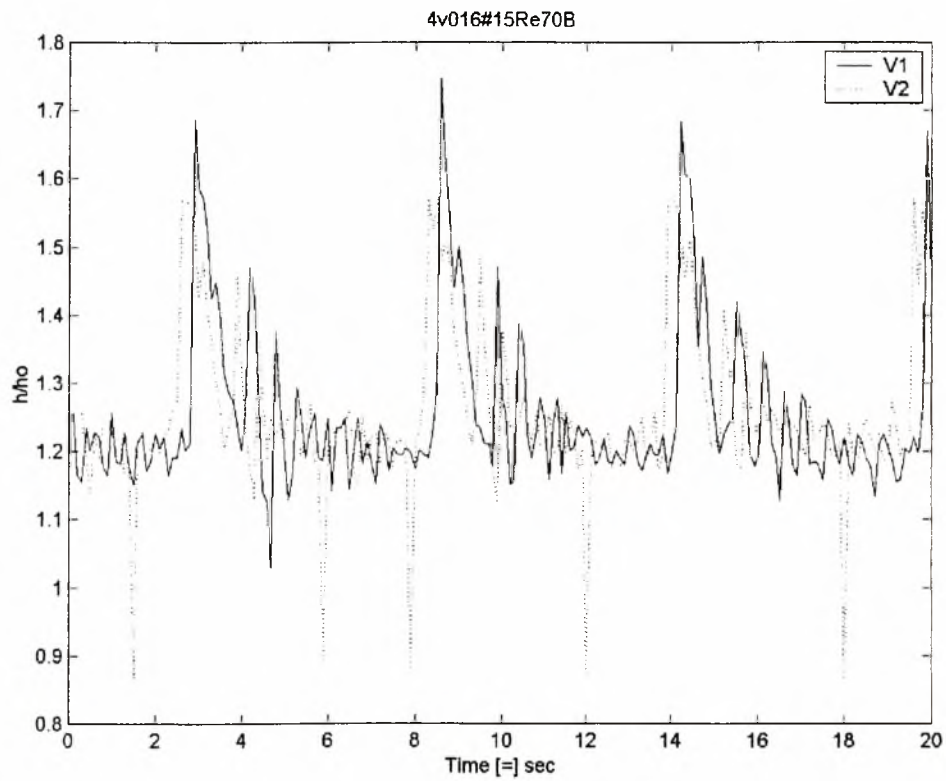
**Σχήμα 25 : Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}$ (1-5), $\text{Re}=61$
θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



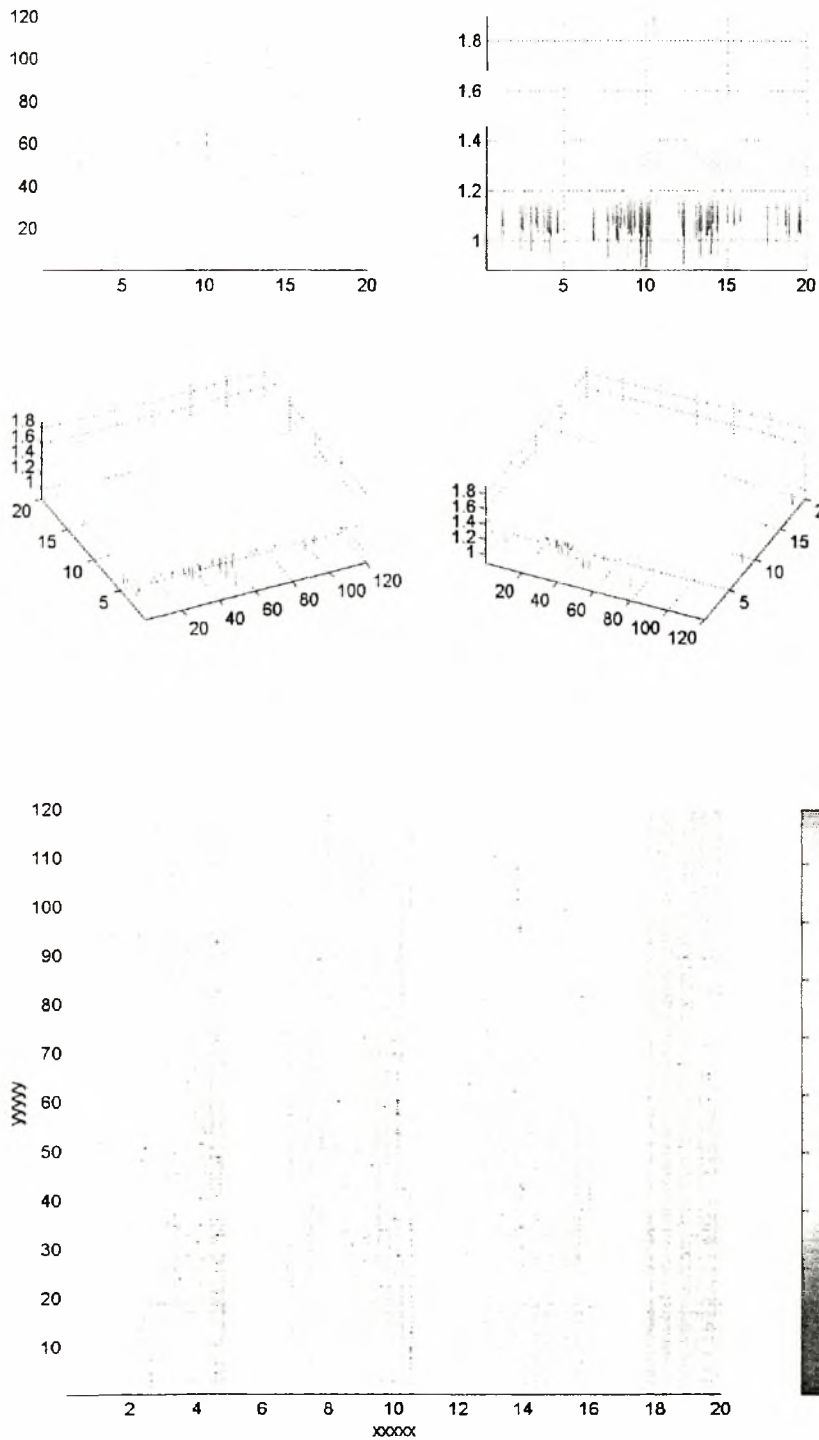
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, Re=61, $\nu=0,16\text{Hz}(1-5)$
Διάλυμα: Νερό, D=522mm**



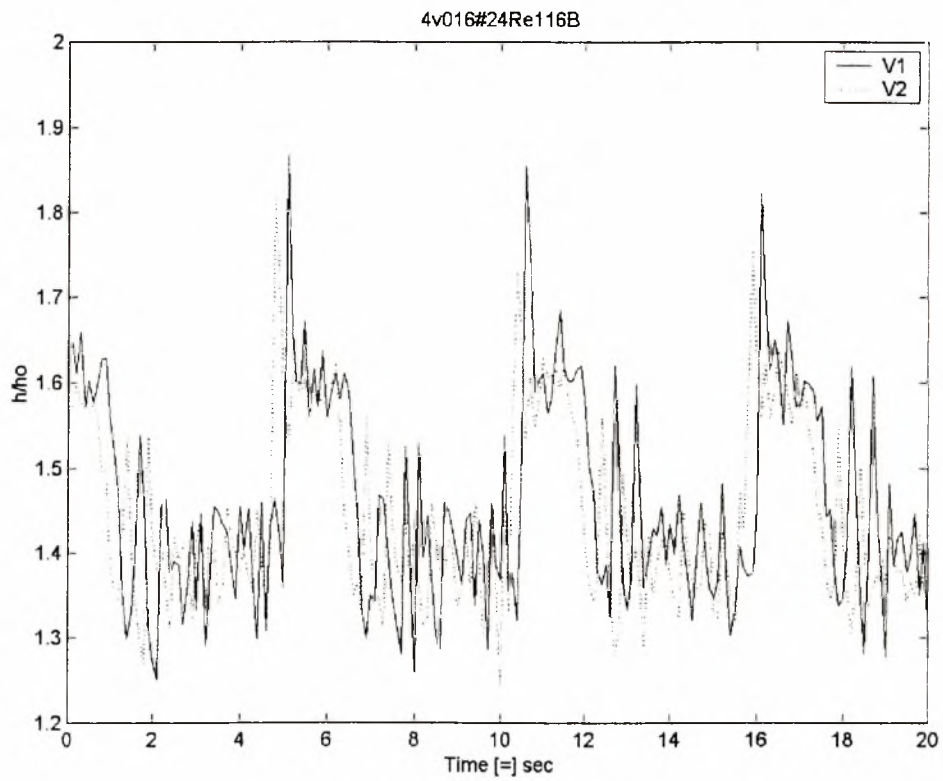
Σχήμα 26 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(1-5)$, $\text{Re}=70$
 θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



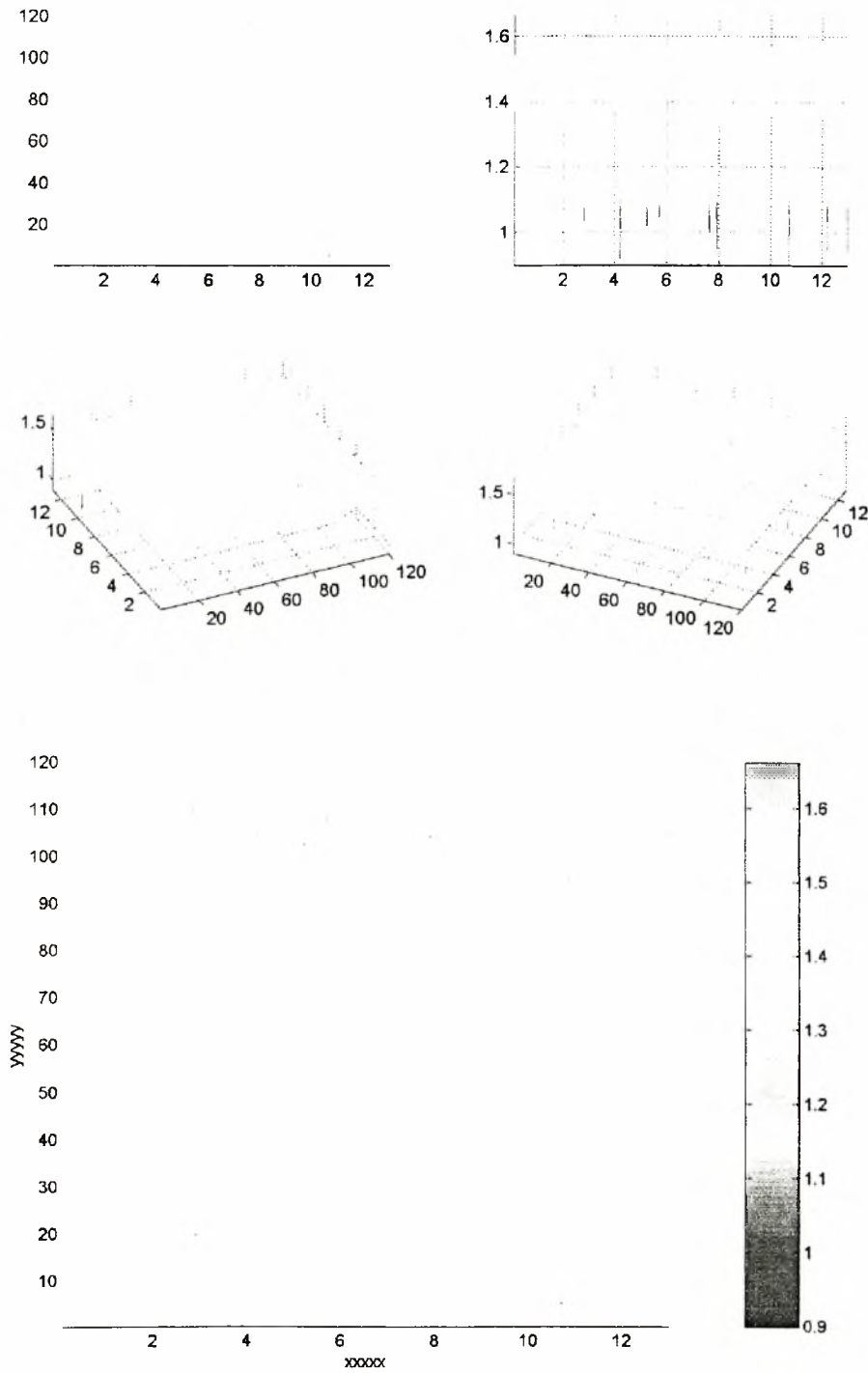
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=70$, $\nu=0,16Hz(1-5)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



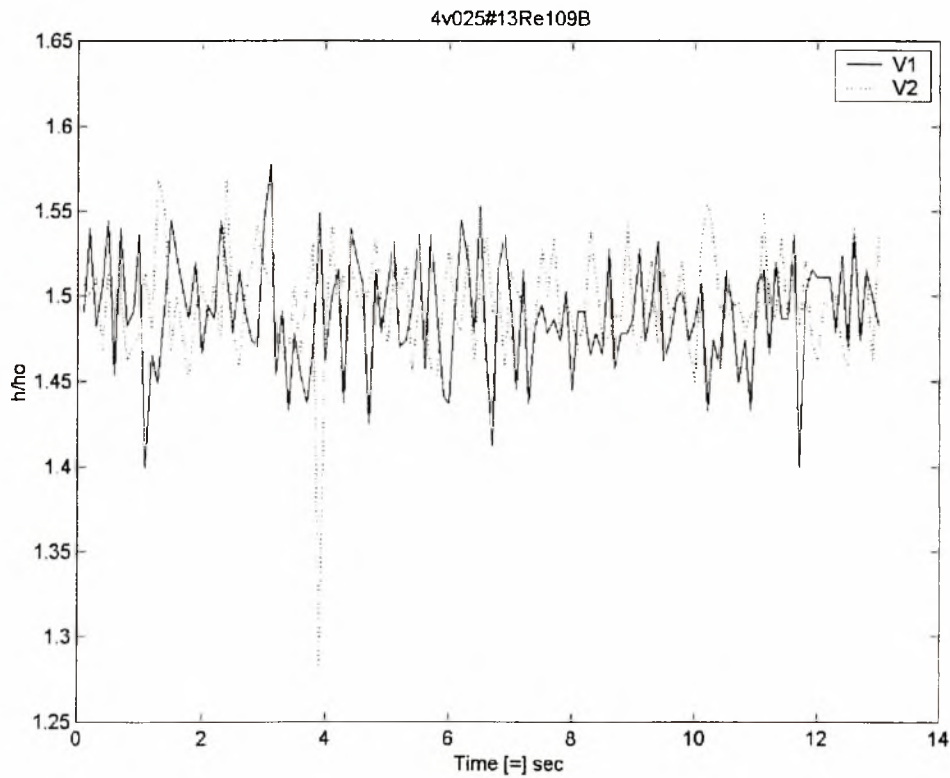
Σχήμα 27 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,16\text{Hz}(2-4)$, $Re=116$
θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



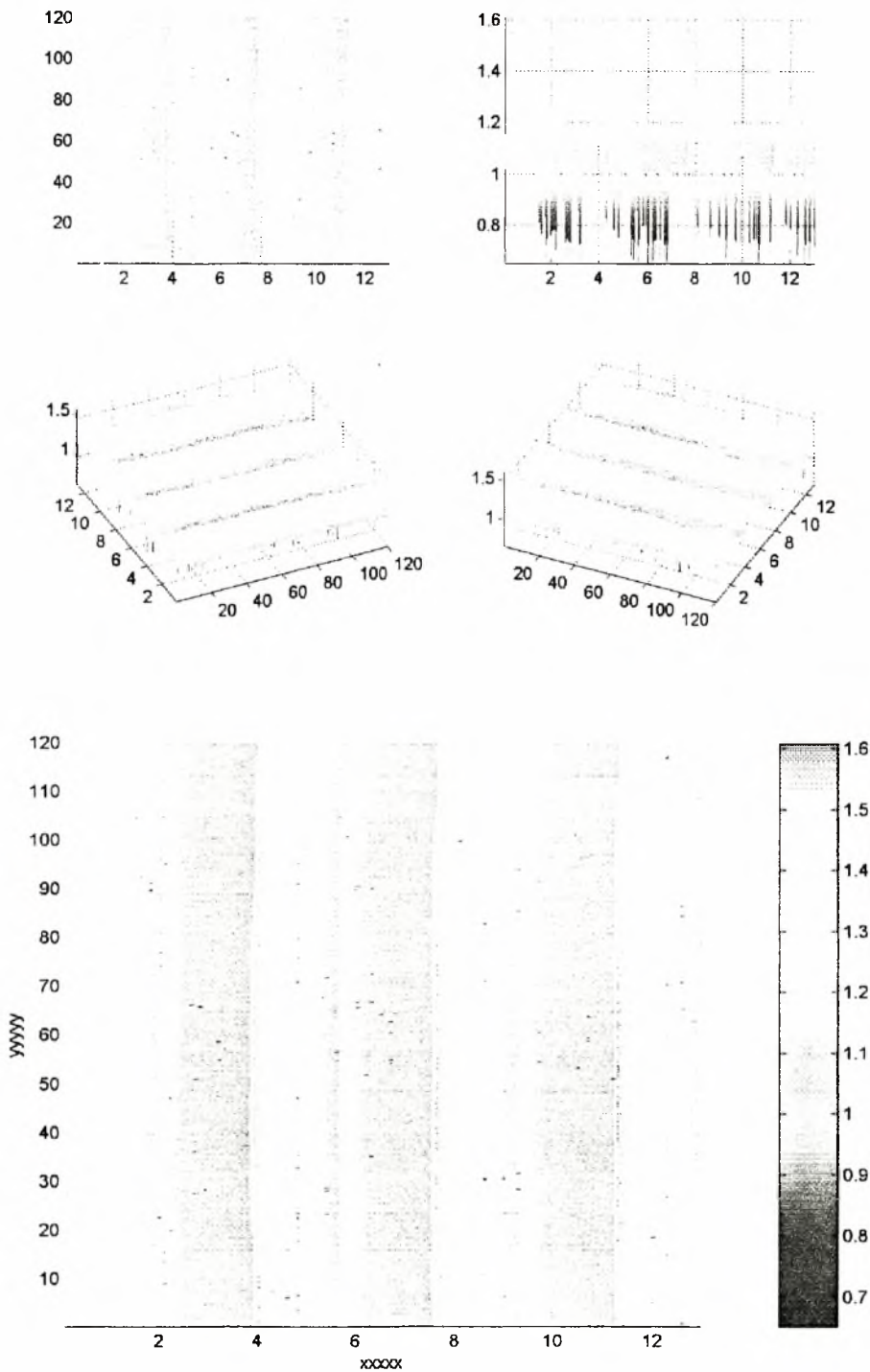
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=116$, $\nu=0,16Hz(2-4)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



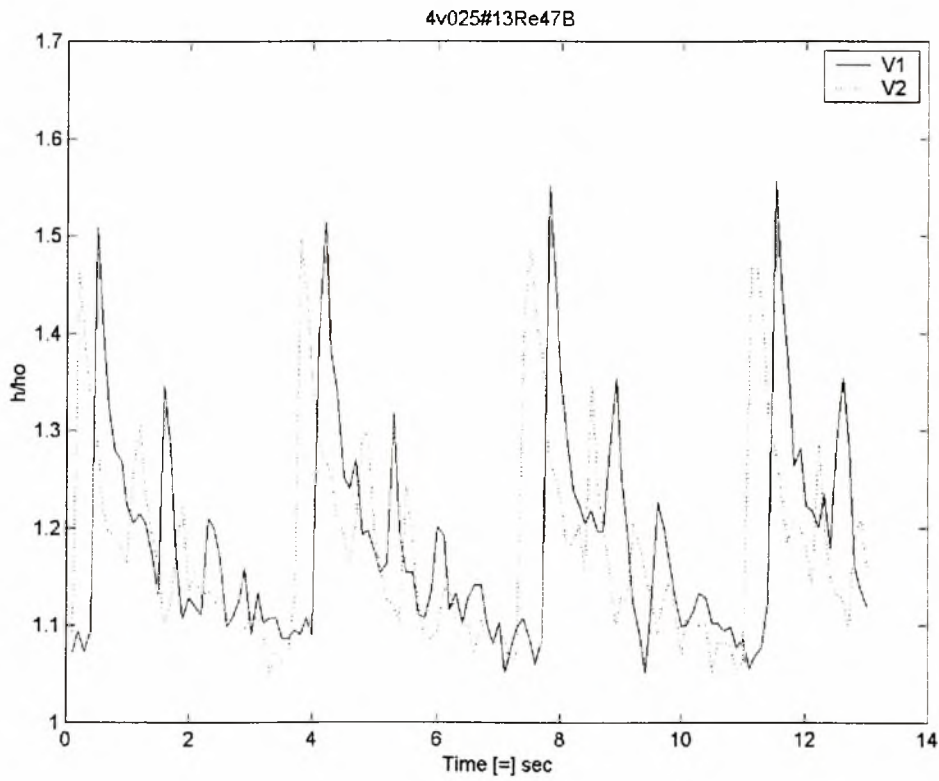
Σχήμα 28: Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $Re=109$
θέση μέτρησης: 522mm. Διάλυμα: Καθαρό νερό



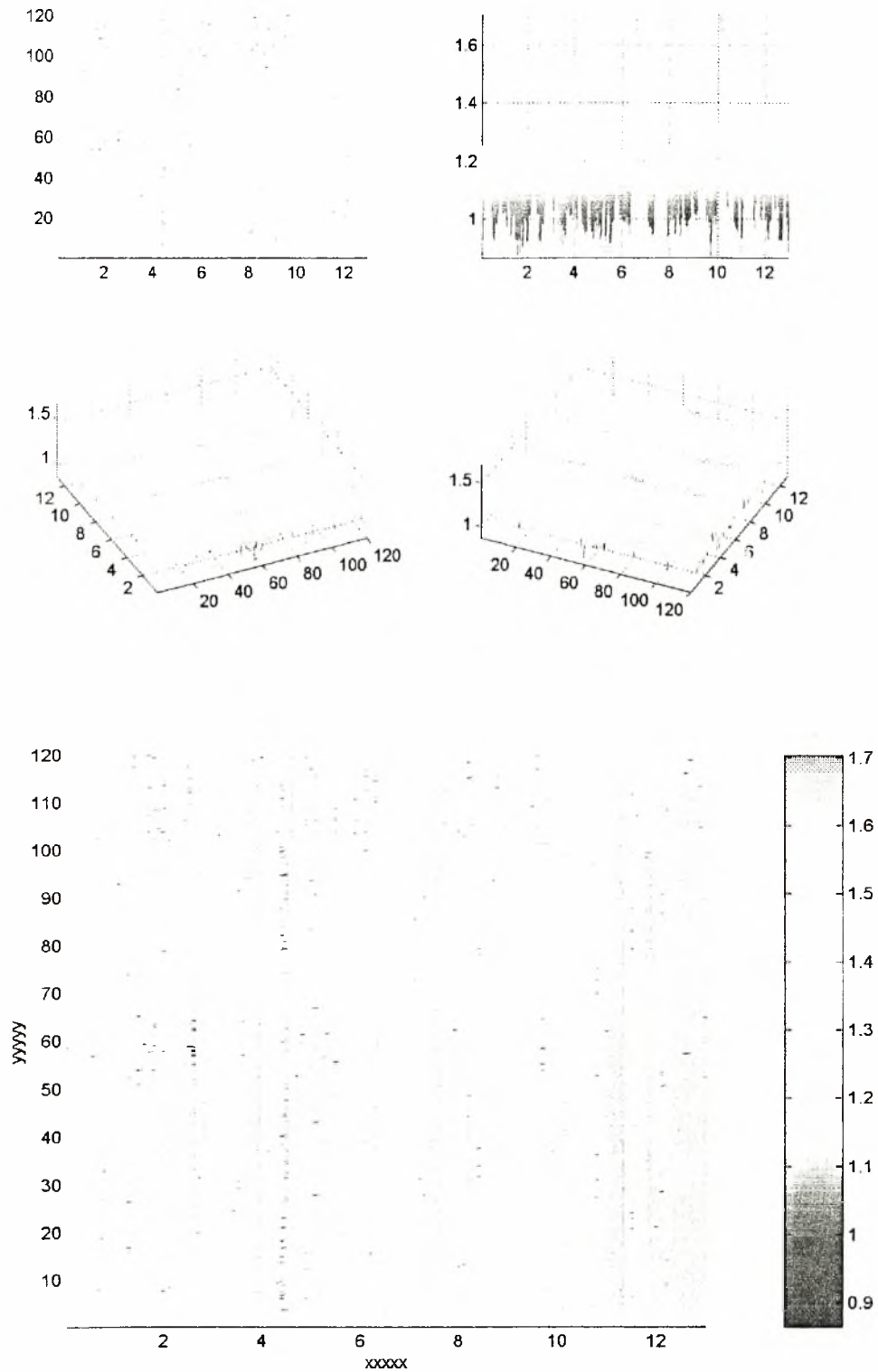
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=109$, $\nu=0,25Hz(1-3)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



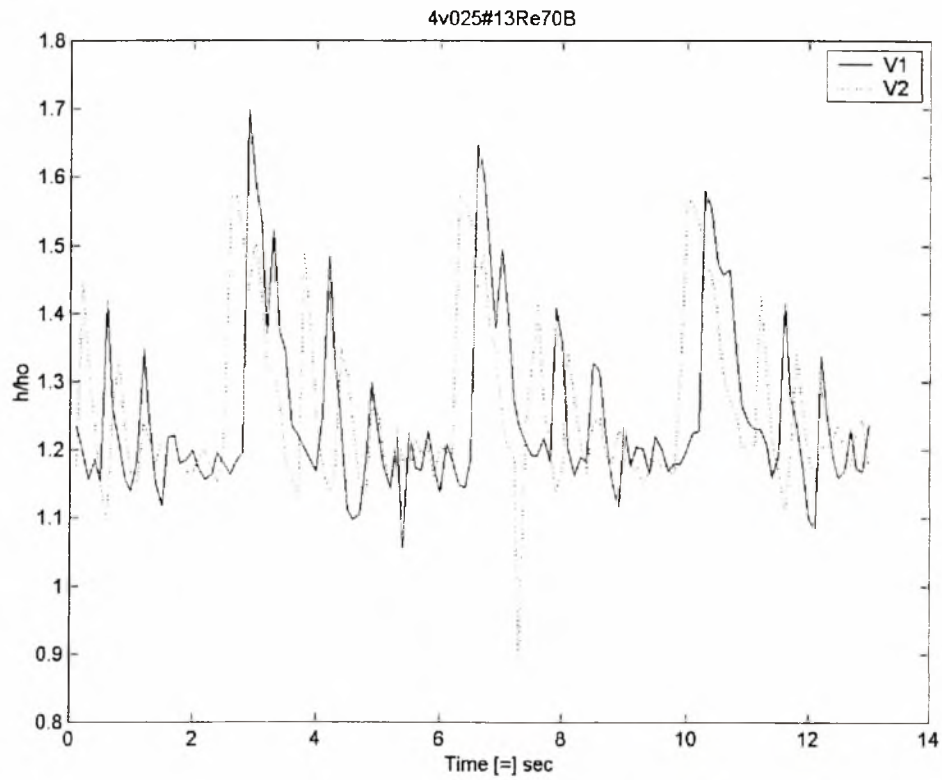
Σχήμα 29 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $\text{Re}=47$
θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



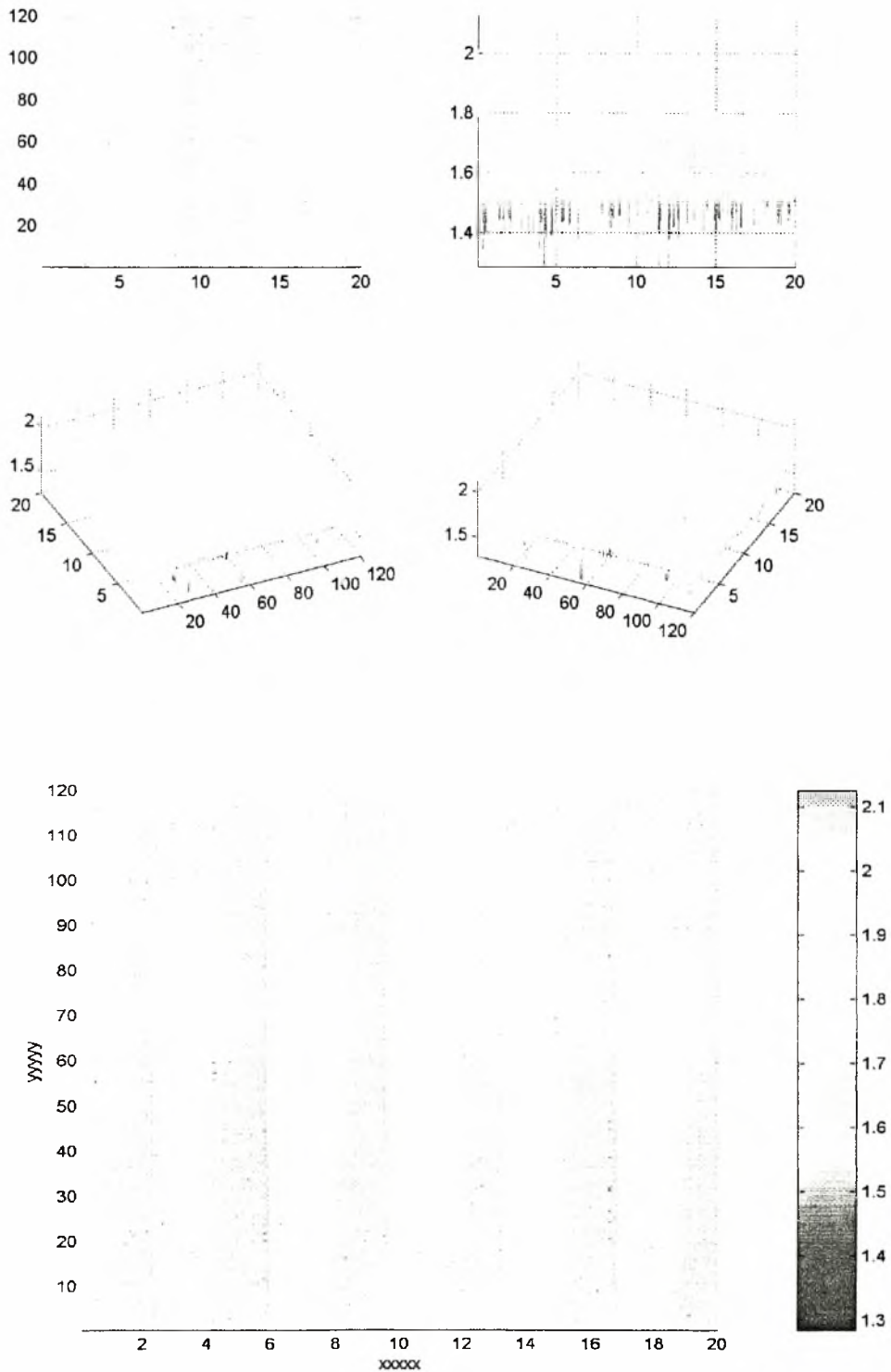
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=47$, $\nu=0,25Hz(1-3)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



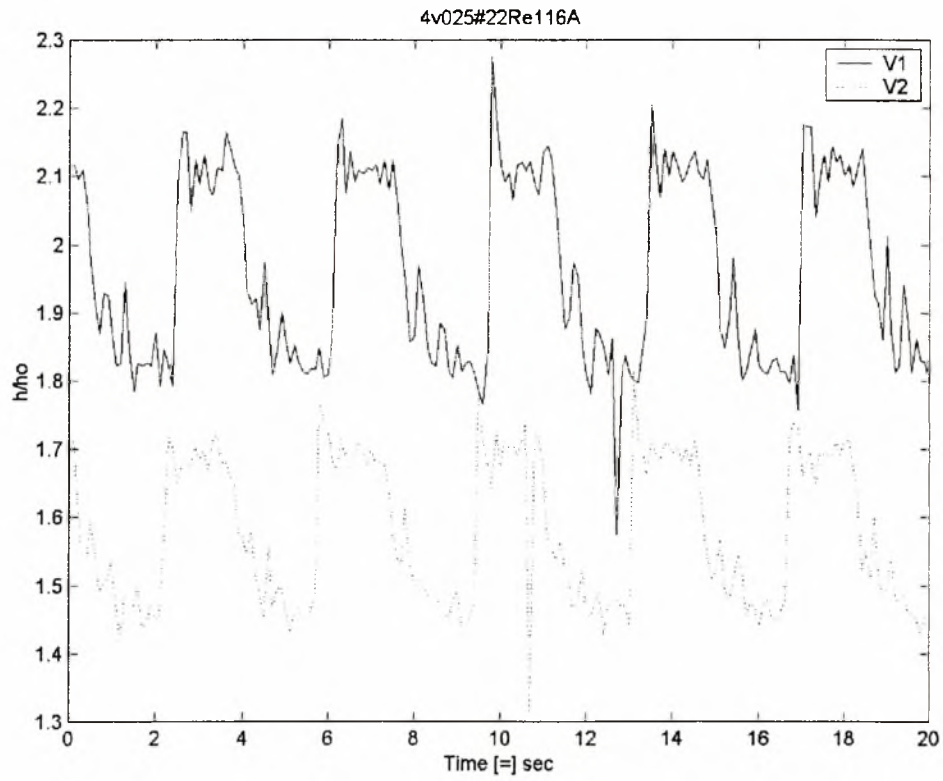
Σχήμα 30 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(1-3)$, $\text{Re}=70$
θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



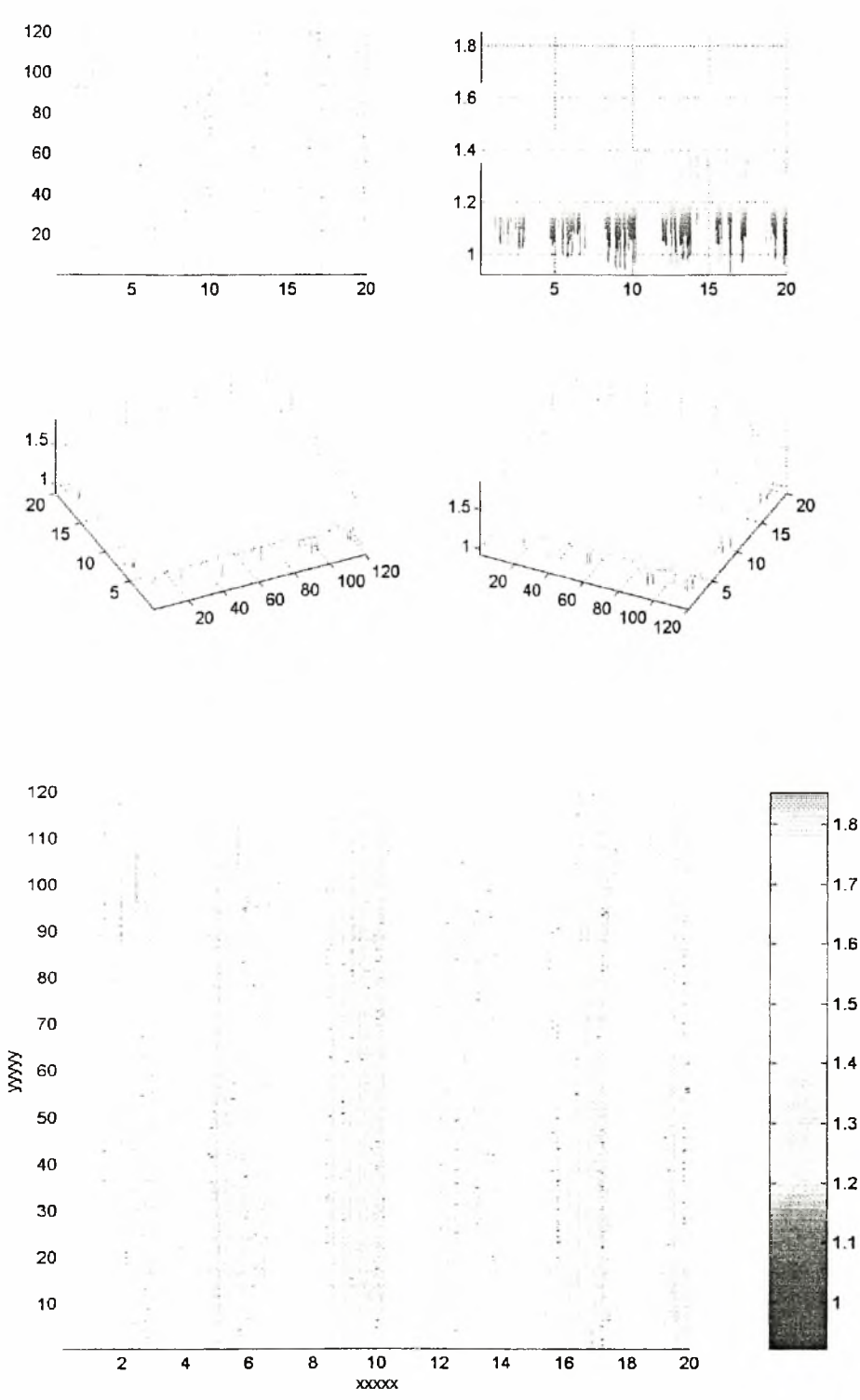
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=70$, $\nu=0,25Hz(1-3)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



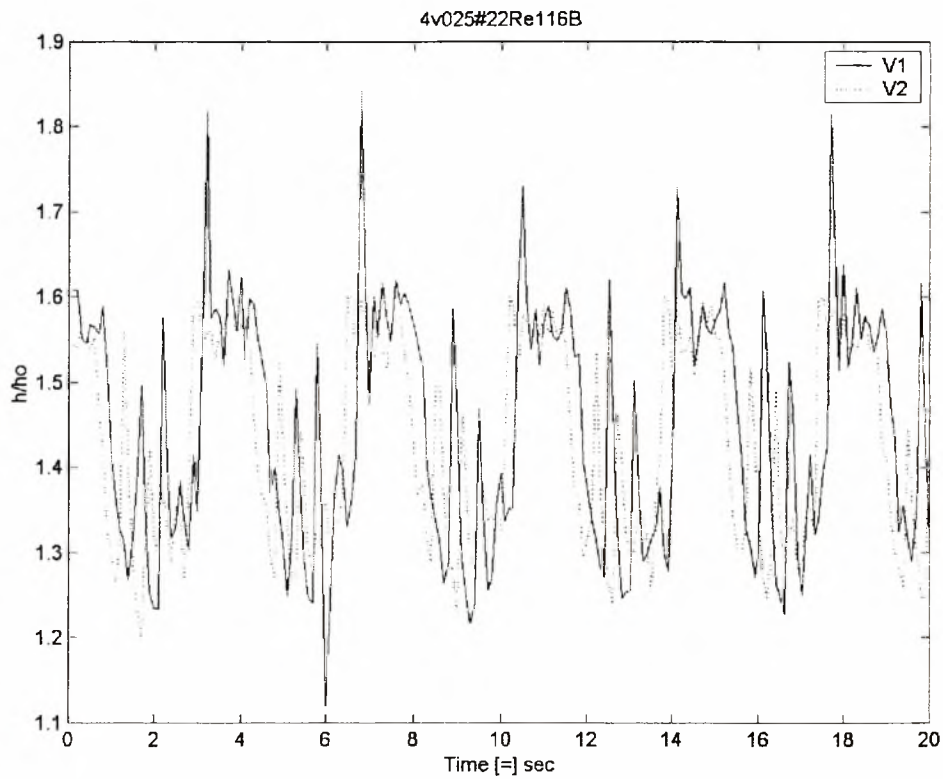
Σχήμα 31 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile)κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(2-2)$, $\text{Re}=116$
 θέση μέτρησης:252mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



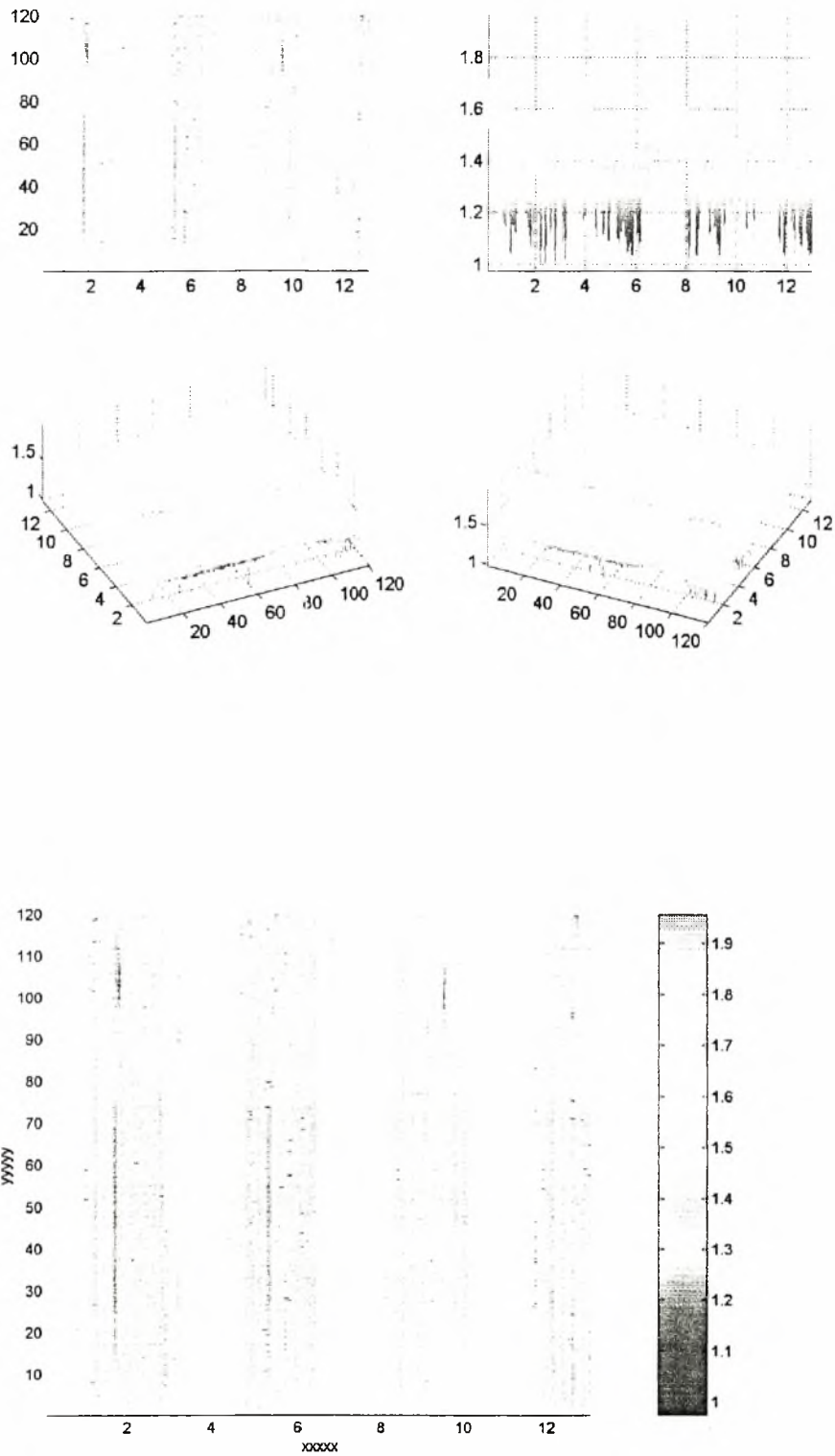
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=116$, $\nu=0,25Hz(2-2)$
Διάλυμα: Νερό, $D=116mm$**



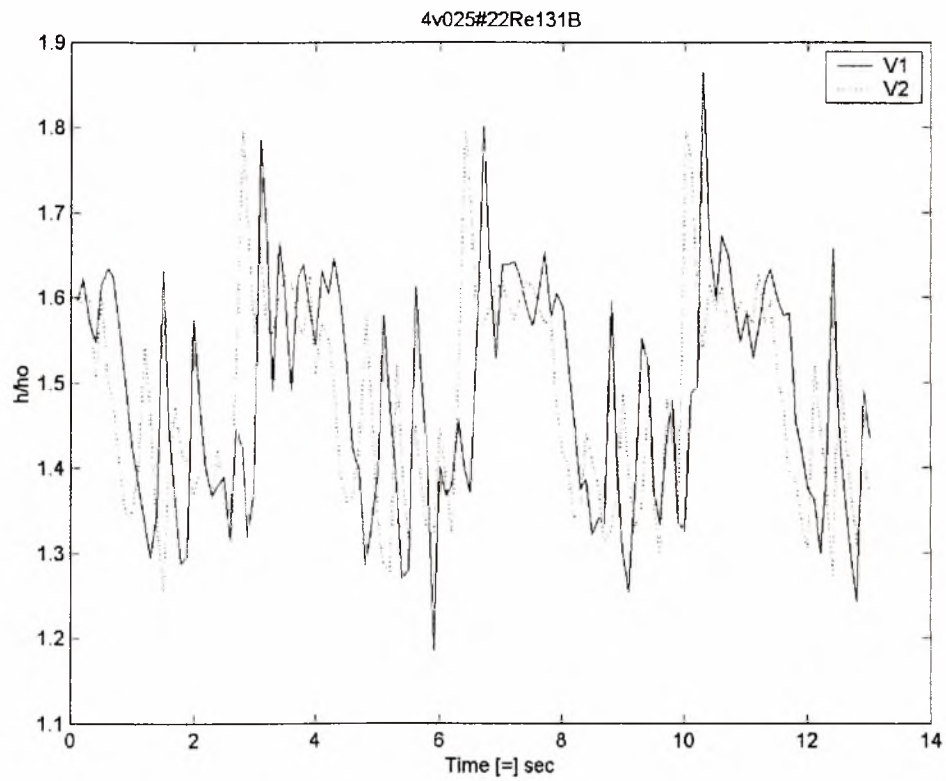
**Σχήμα 32 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile)κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(2-2)$, $\text{Re}=116$
θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



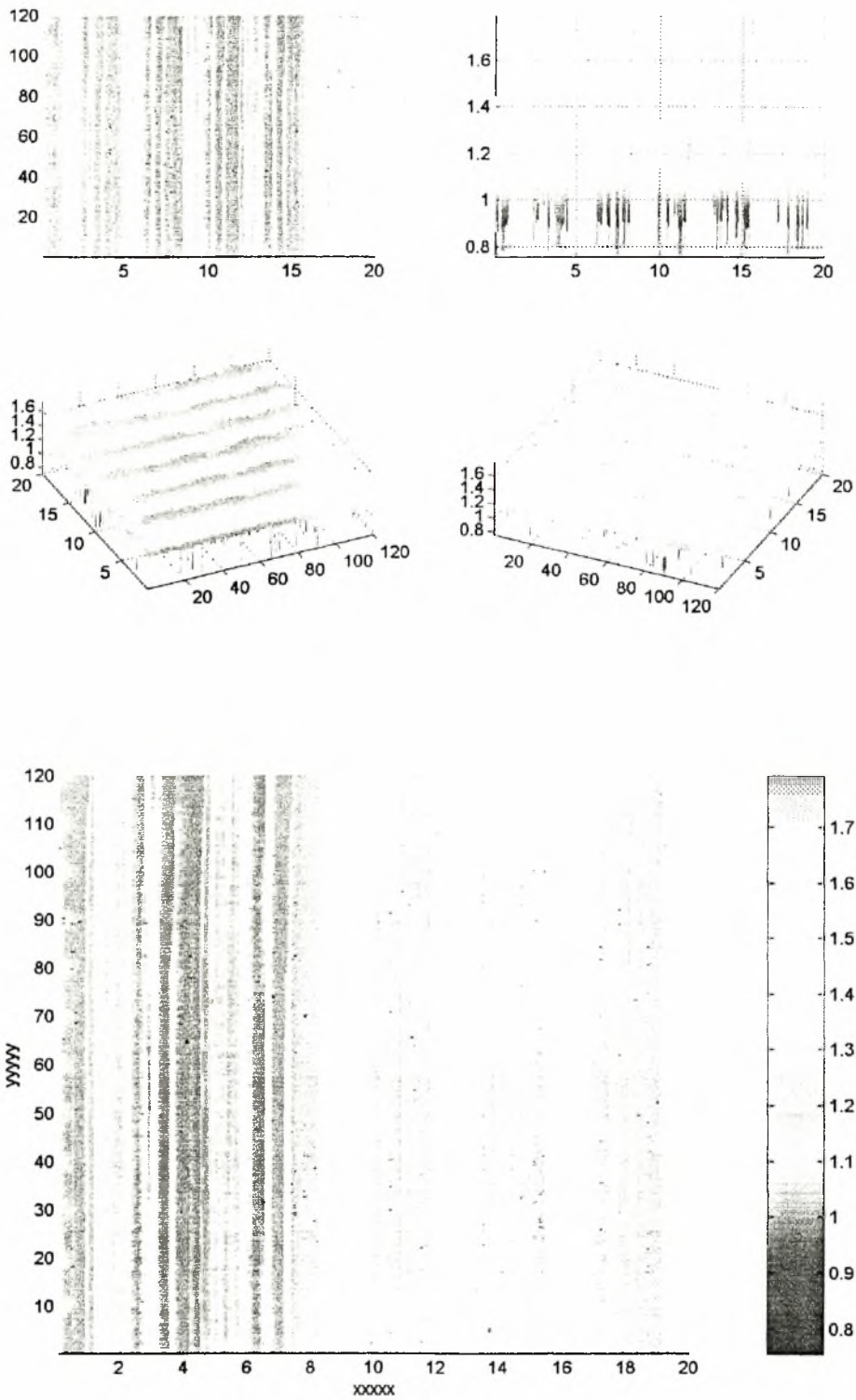
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, Re=116, $\nu=0,25\text{Hz}(2-2)$
Διάλυμα: Νερό, D=522mm**



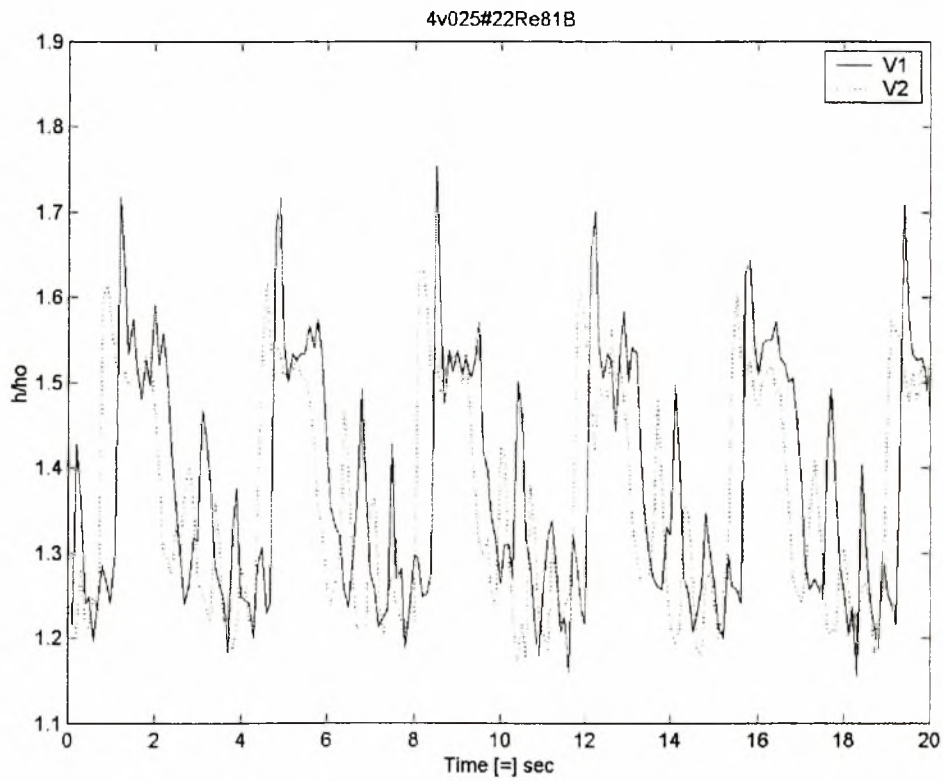
Σχήμα 33 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(2-2)$, $\text{Re}=131$
 θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



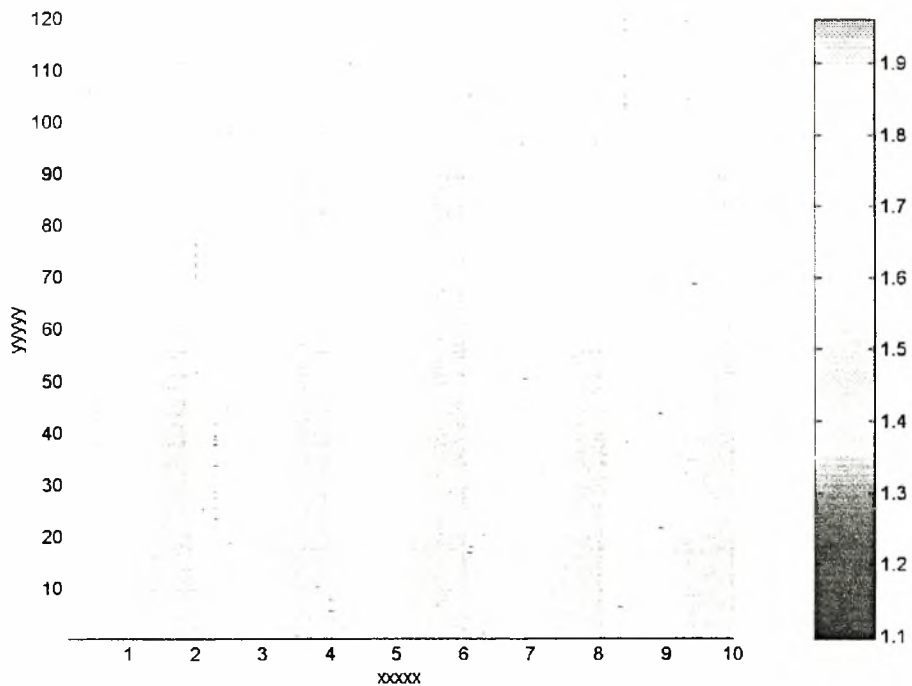
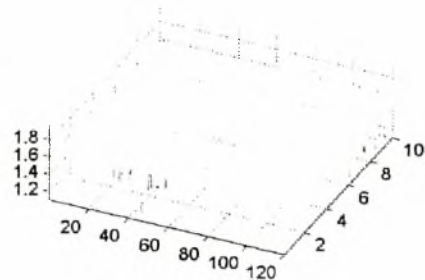
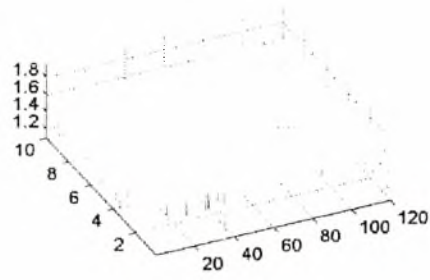
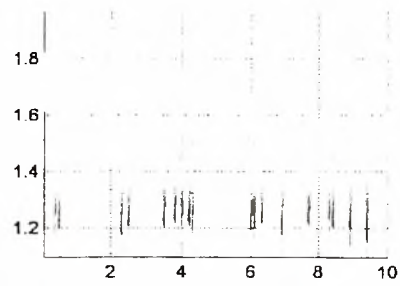
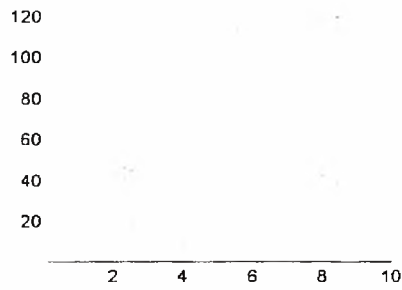
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=131$, $\nu=0,25Hz(2-2)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



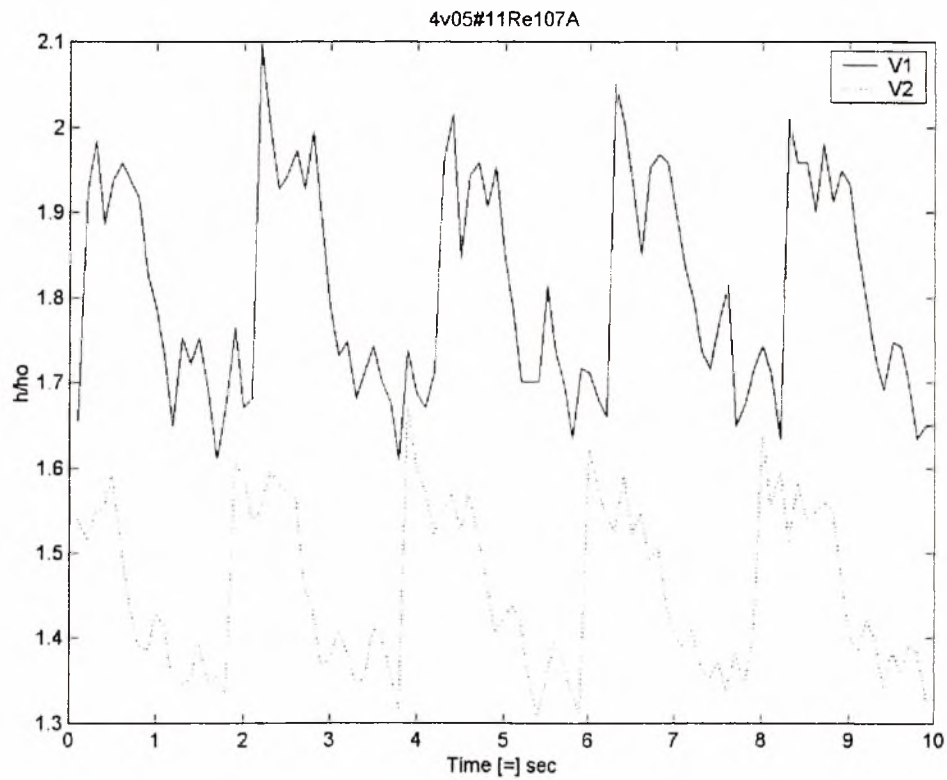
Σχήμα 34 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,25\text{Hz}(2-2)$, $\text{Re}=81$
 θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



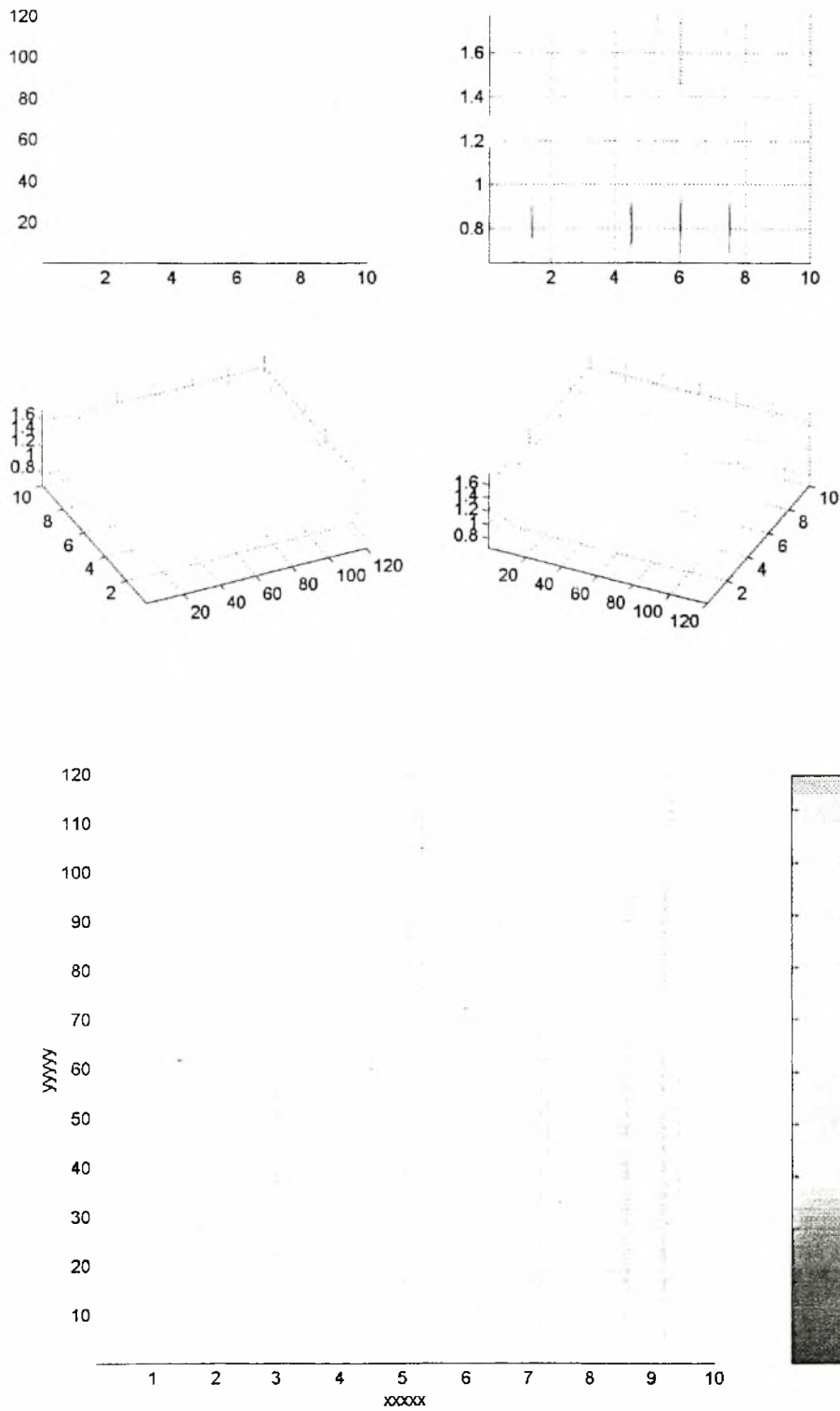
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=81$, $\nu=0,25Hz(2-2)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



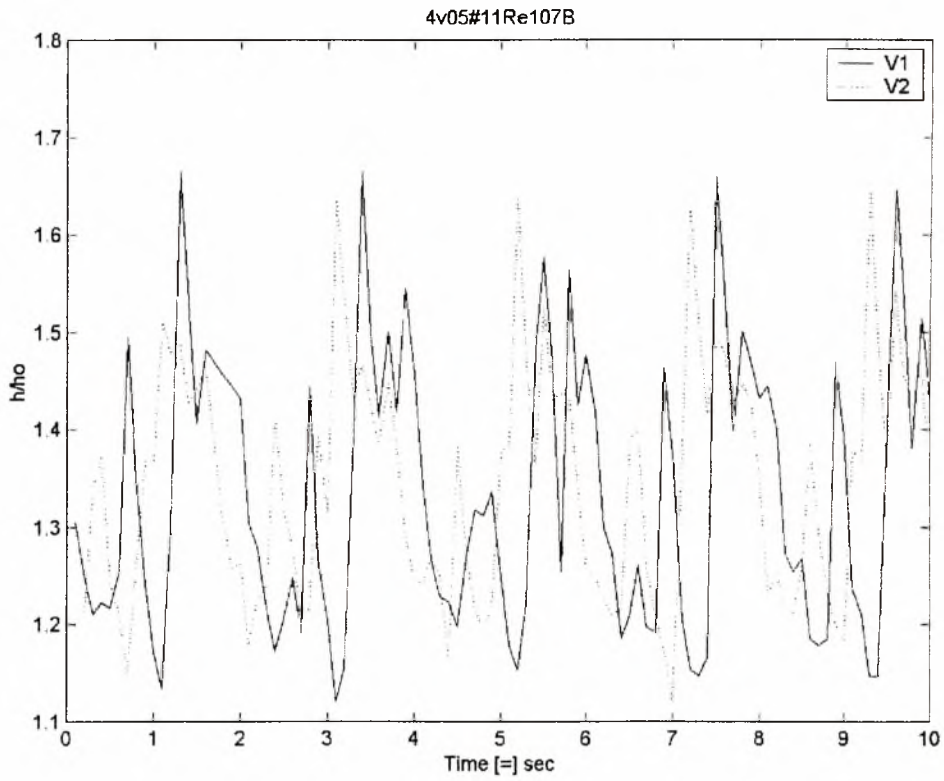
**Σχήμα 35 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=107$
θέση μέτρησης:252mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



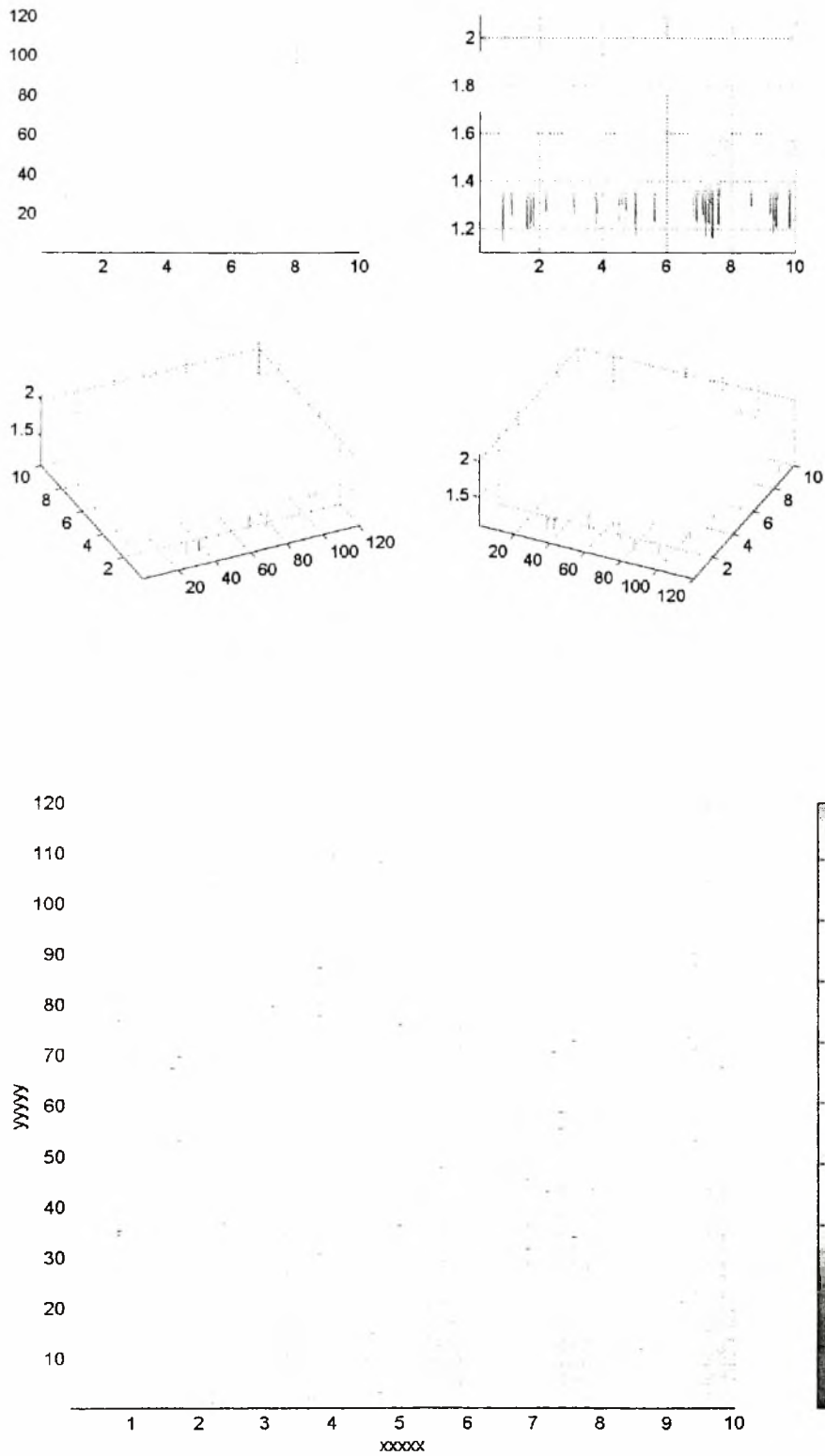
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
 που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=81$, $\nu=0,25Hz(1-1)$
 Διάλυμα: Νερό, $D=252mm$**



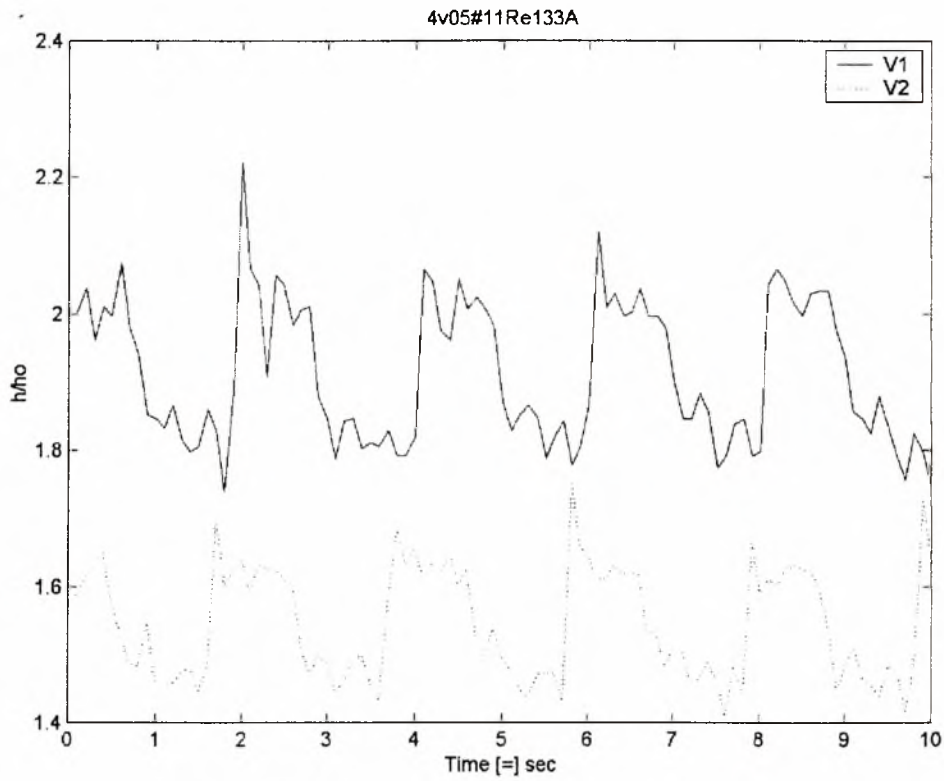
Σχήμα 36 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=107$
 θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



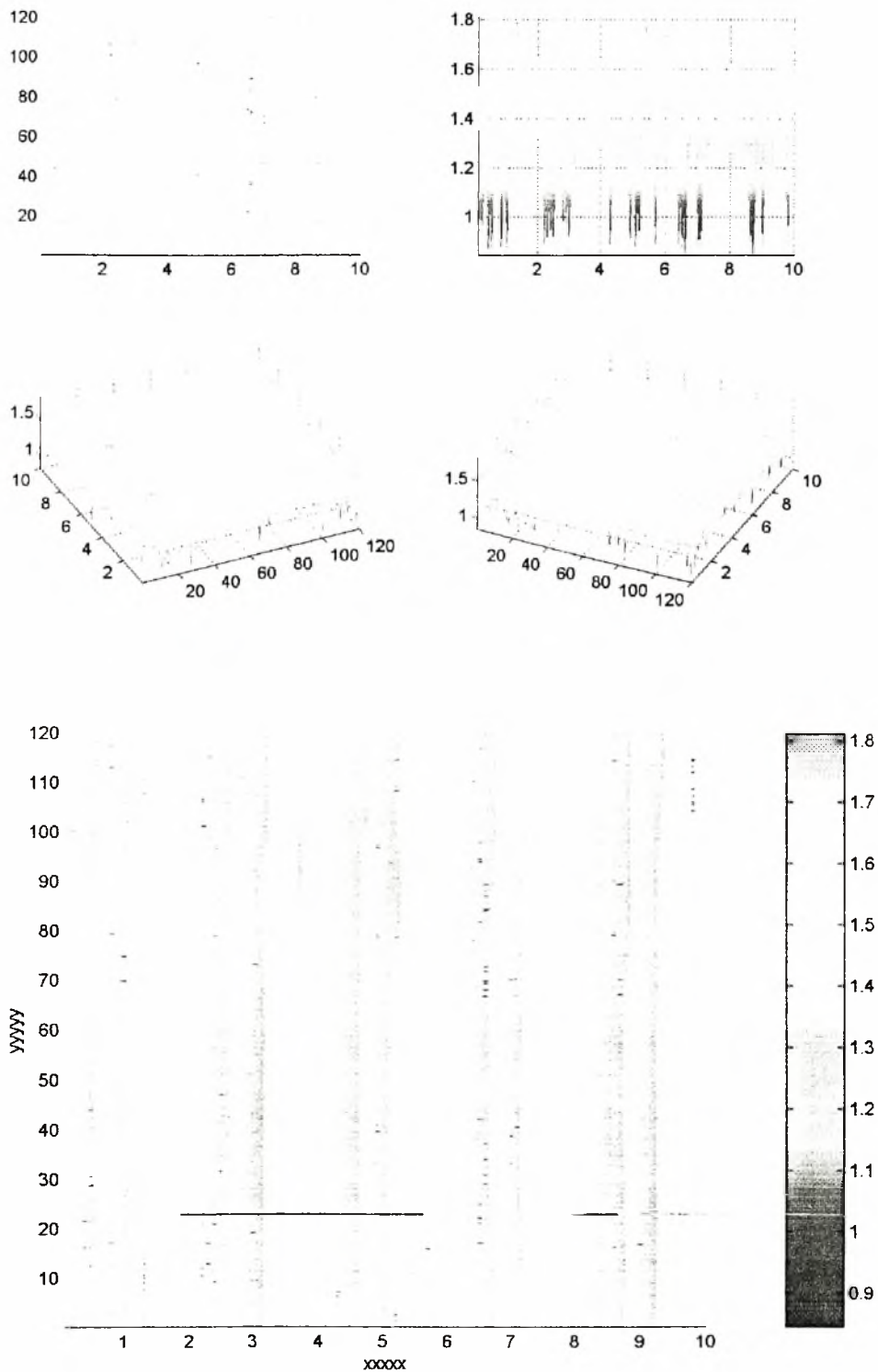
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=107$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



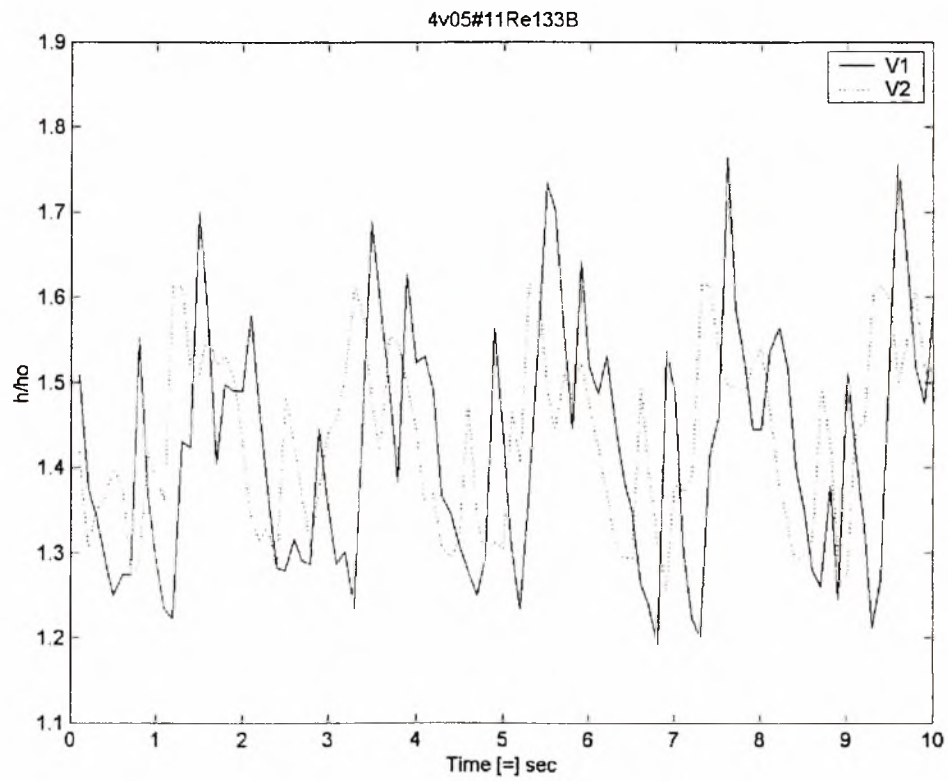
**Σχήμα 37 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1), \text{Re}=133$
θέση μέτρησης:252mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



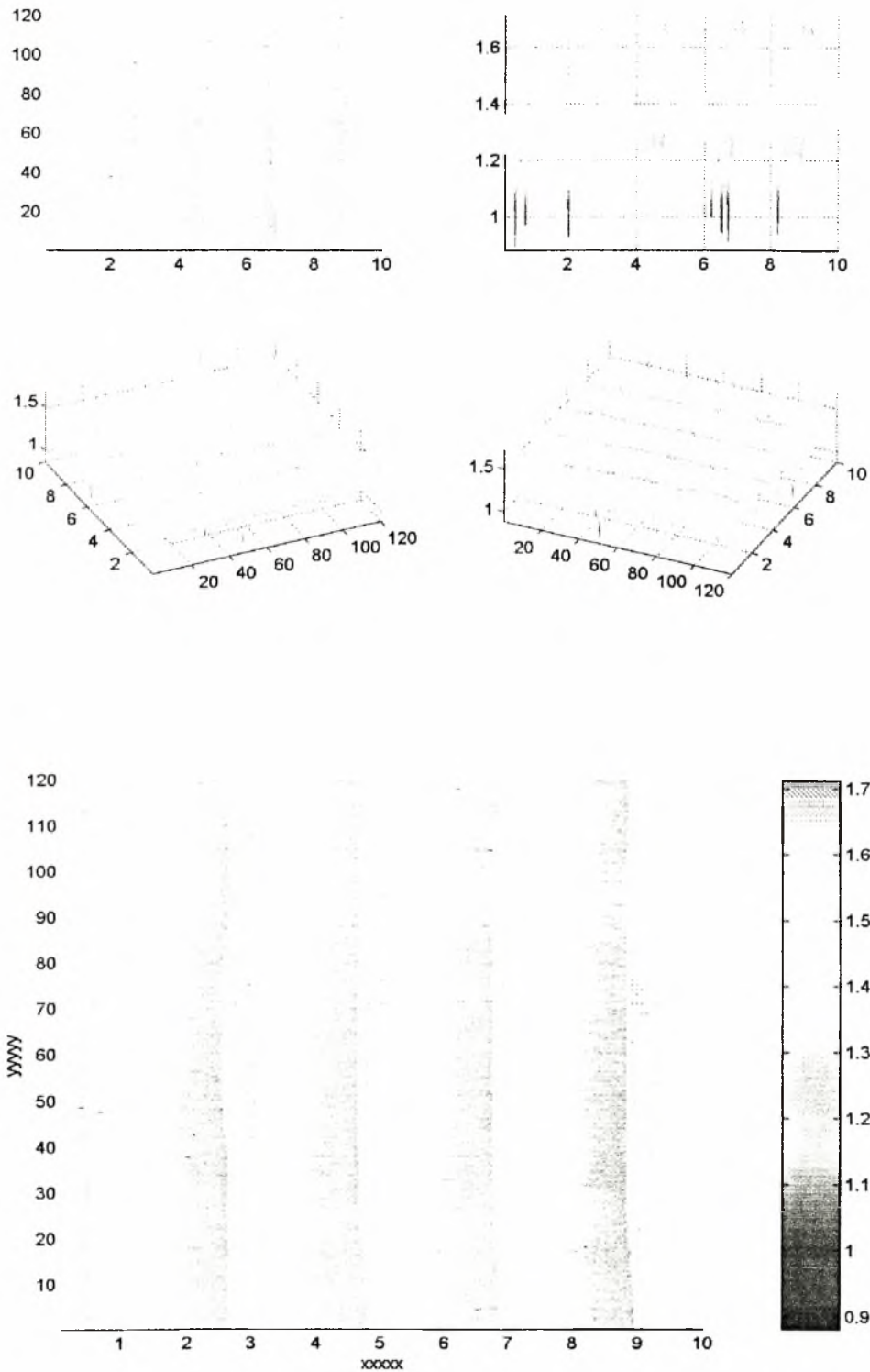
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=133$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=252mm$**



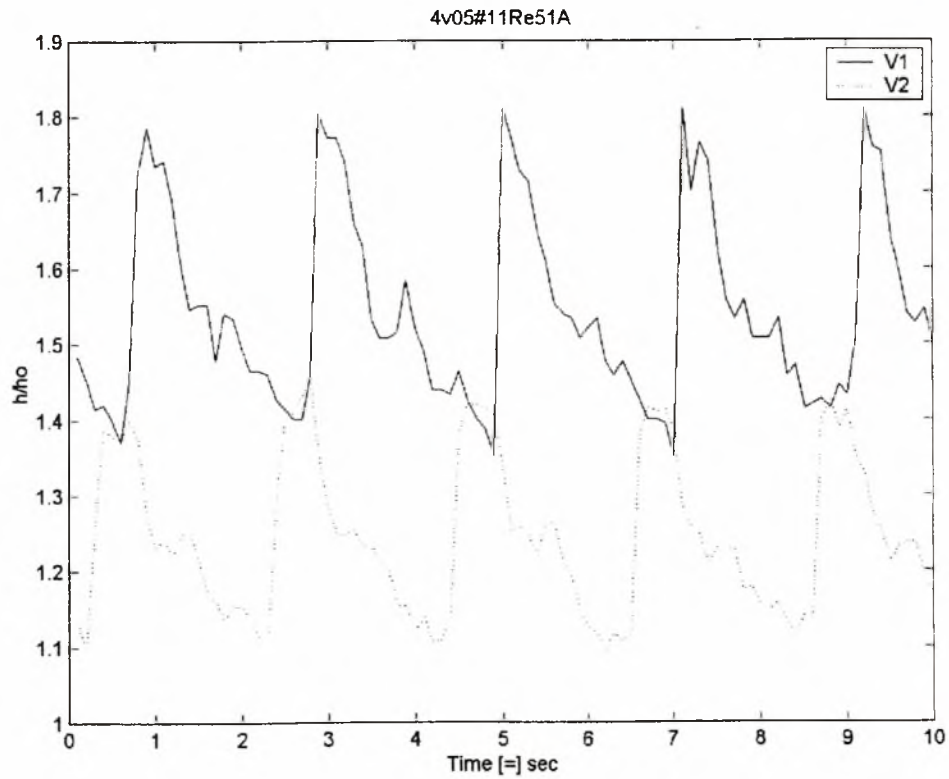
Σχήμα 38 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1), \text{Re}=133$ θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



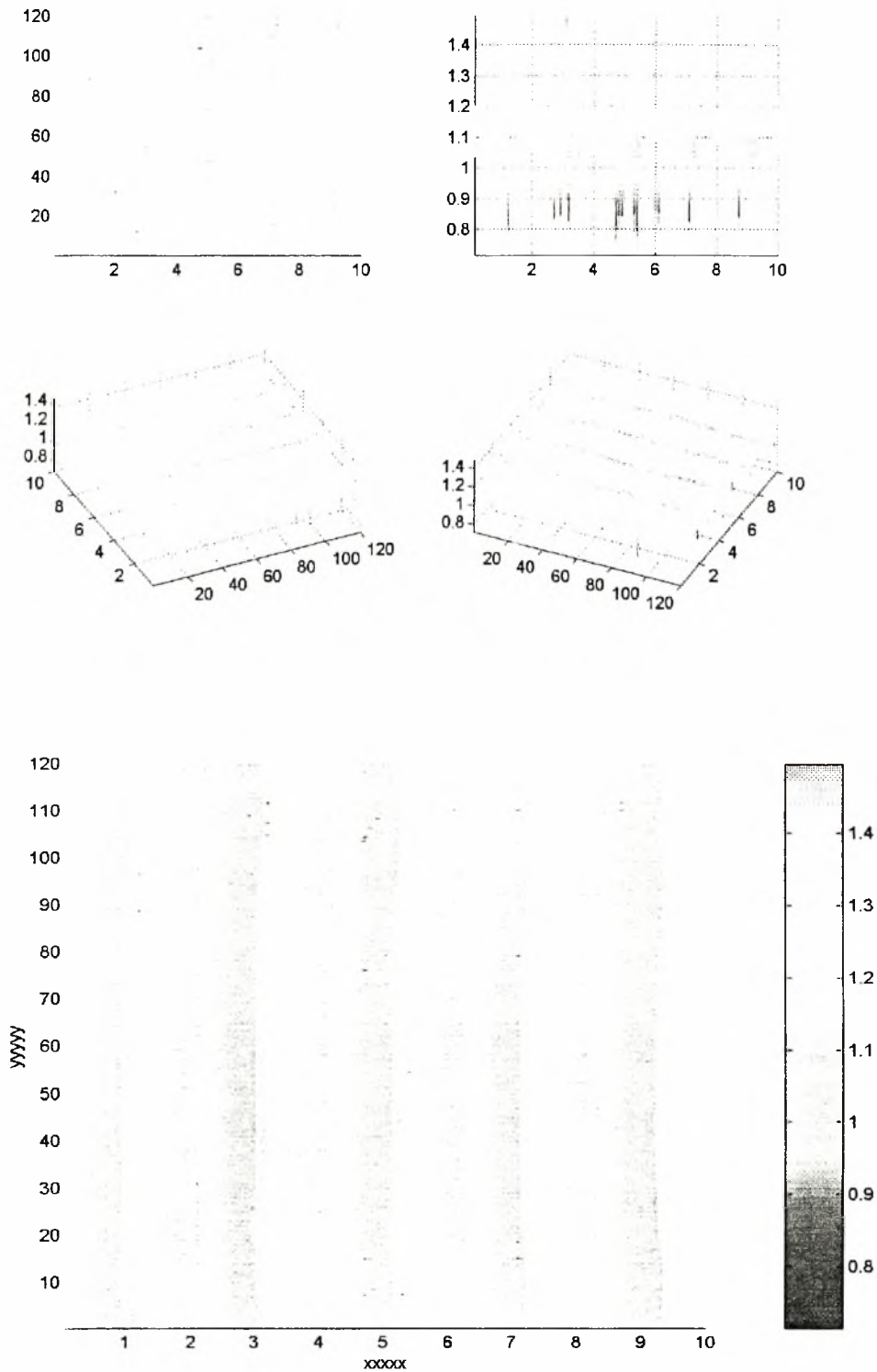
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=133$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**



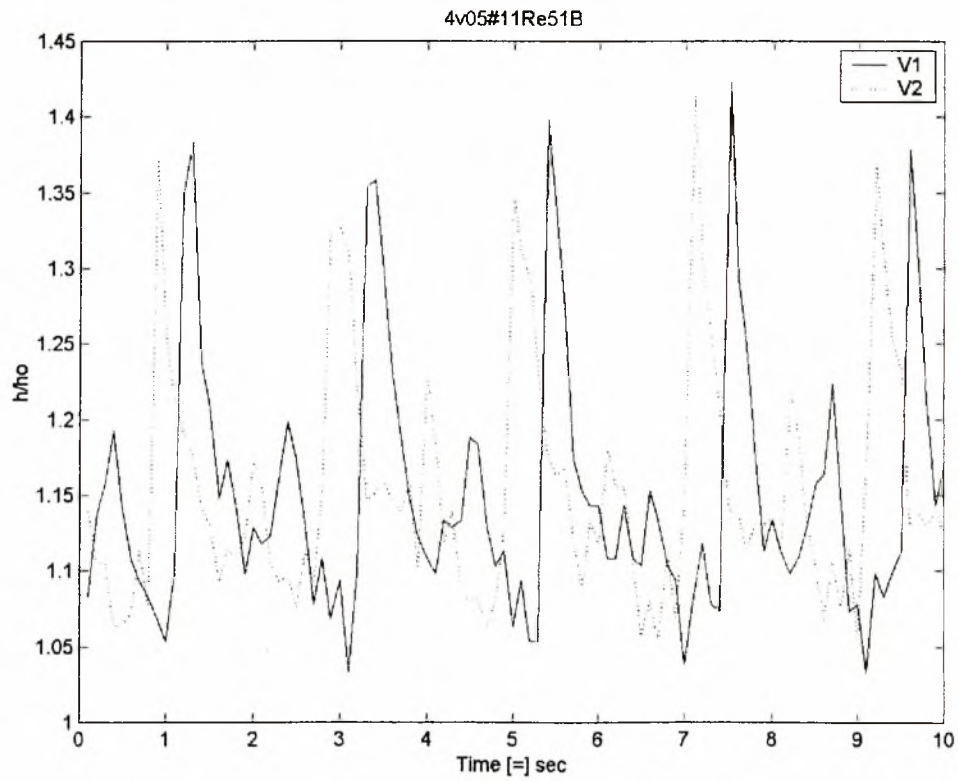
Σχήμα 39 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=51$
 θέση μέτρησης:252mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



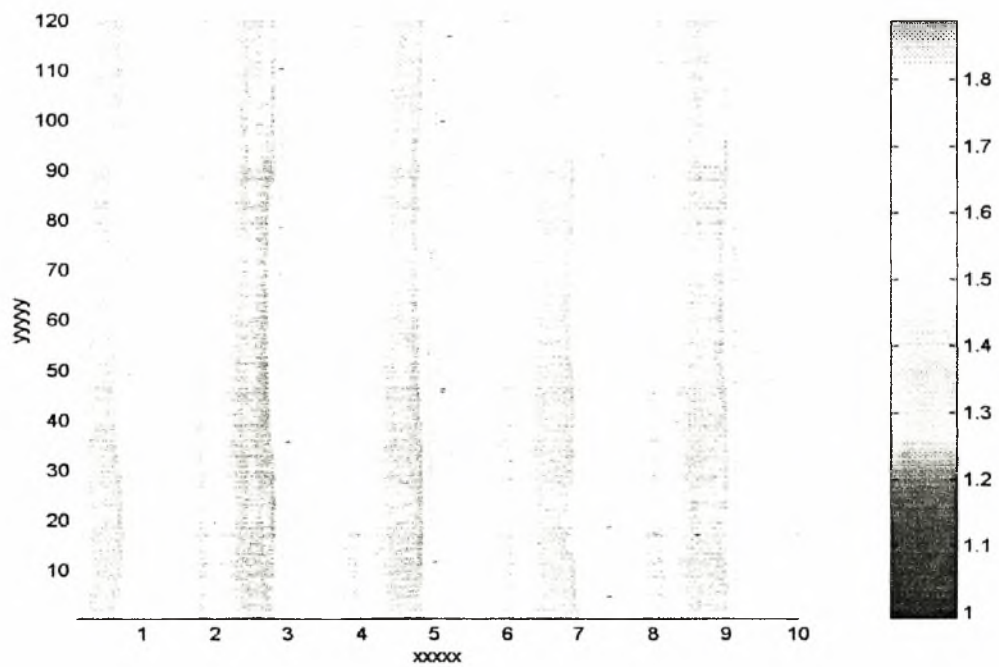
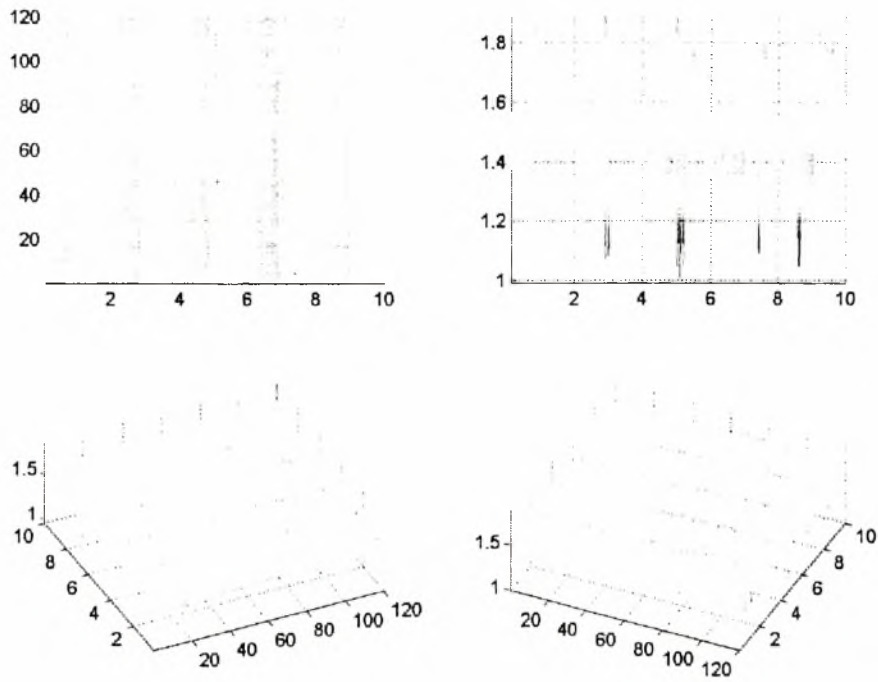
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=51$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=252mm$**



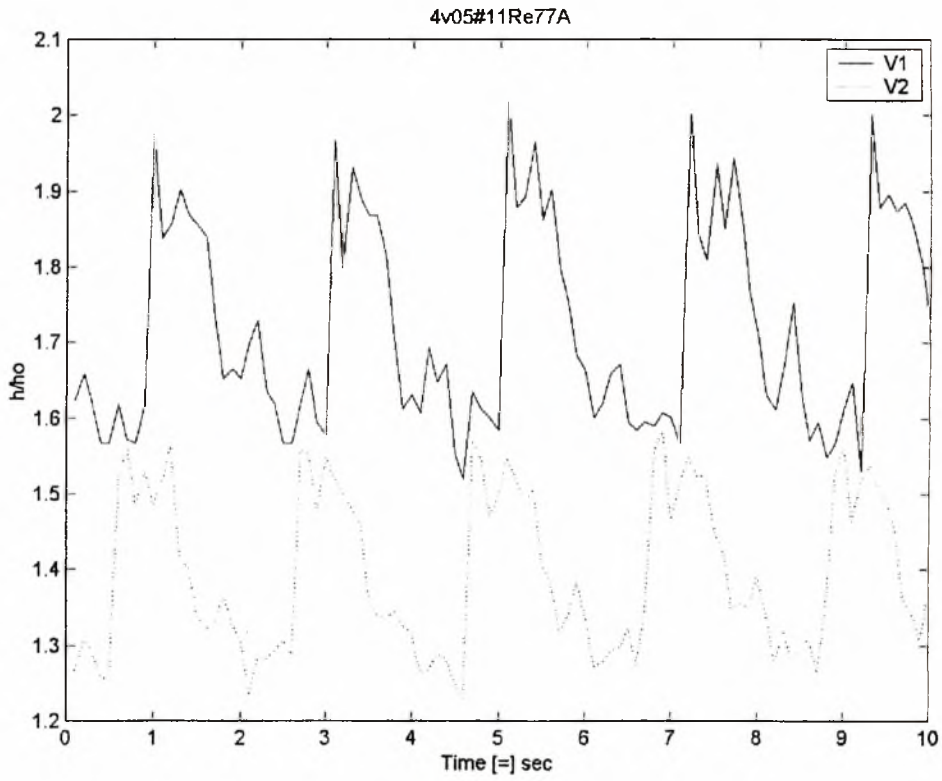
Σχήμα 40 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $\text{Re}=51$
 θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



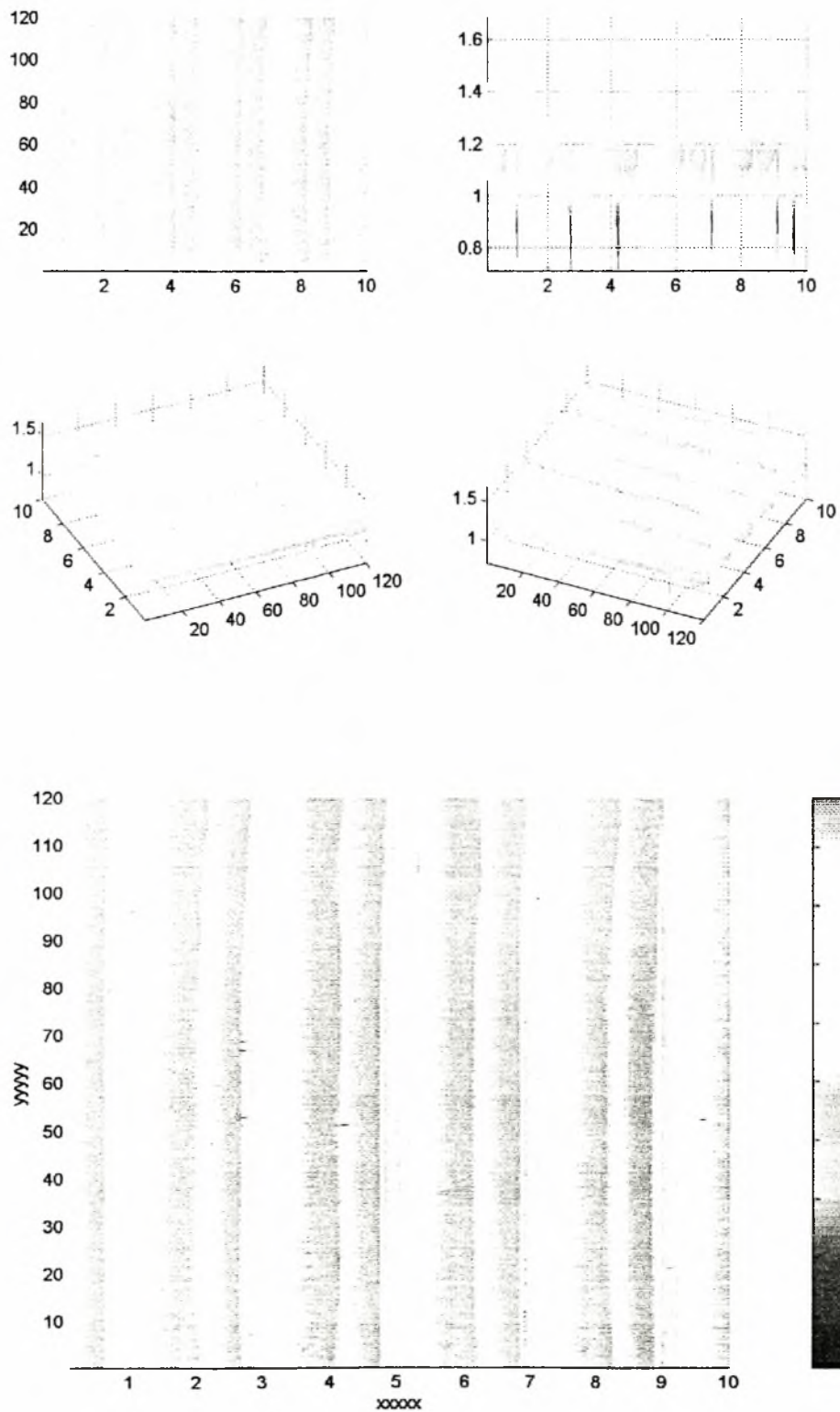
**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, Re=51, $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, D=522mm**



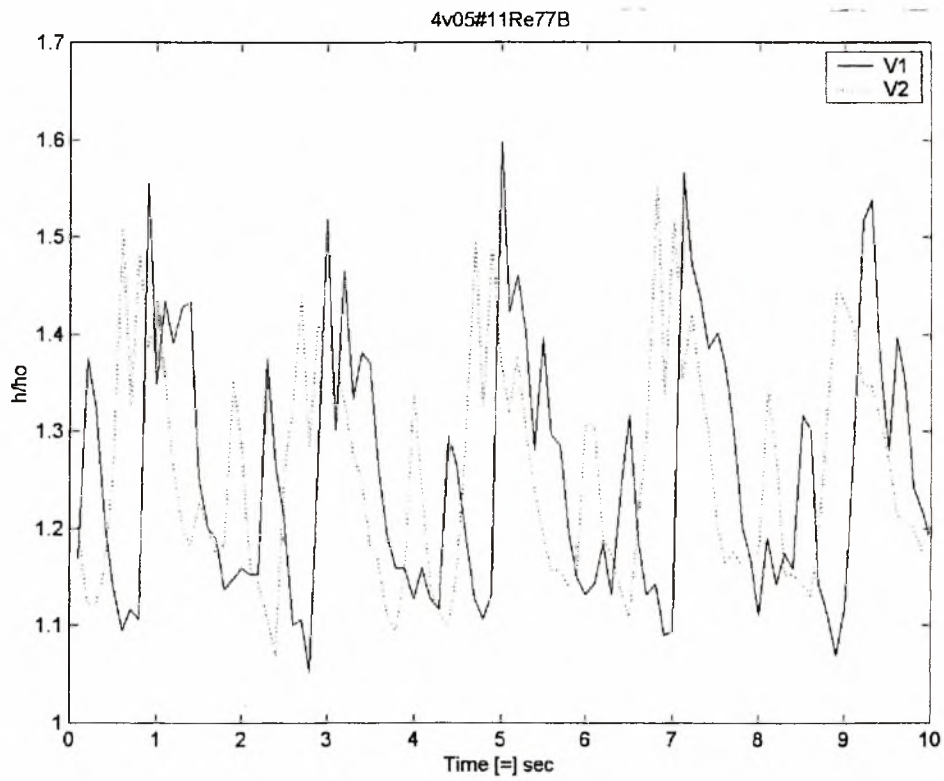
**Σχήμα 41 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(1-1)$, $Re=77$
θέση μέτρησης:252mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό**



**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=77$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=252mm$**



Σχήμα 42 :Χρονική εξέλιξη μιας γραμμής (line profile) κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Χρονική διάρκεια 10sec. Συχνότητα διαταραχής: $\nu=0,5\text{Hz}(2-2), \text{Re}=77$
 θέση μέτρησης:522mm. Διάλυμα:Καθαρό νερό



**Χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων(V1,V2)
που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=77$, $\nu=0,5Hz(1-1)$
Διάλυμα: Νερό, $D=522mm$**

