

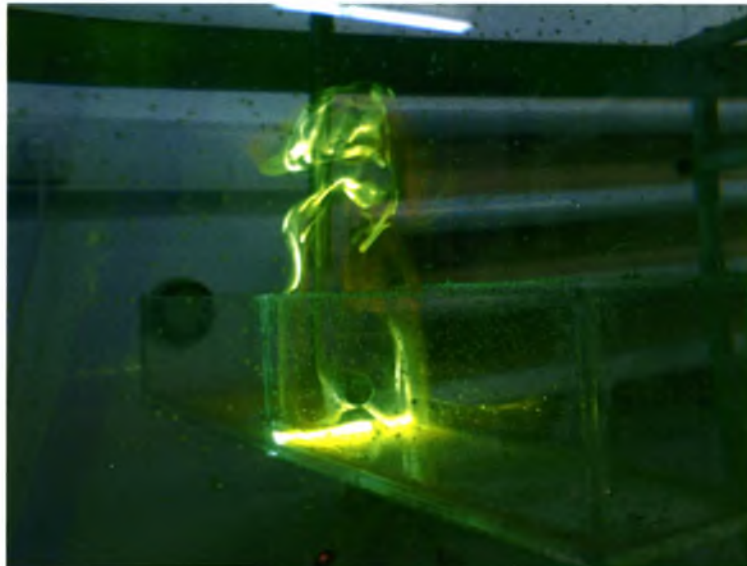
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΧΥΣΗ ΡΥΠΩΝ ΟΜΟΙΟΜΑΤΟΣ ΟΔΙΚΗΣ ΧΑΡΑΔΡΑΣ  
ΣΕ ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ**



Υπό

**ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΑΤΣΑΜΑ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

Απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2009



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

Αριθ. Εισ.: 7823/1  
Ημερ. Εισ.: 08-12-2009  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2009  
ΚΑΤ

© 2009 Κατσαμάς Γεώργιος

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

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σταπουντζή Ερρίκο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου. Είμαι επίσης ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητές κκ Ανδρίτσο Νικόλαο και Σταμάτη Αναστάσιο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ακόμα ευχαριστίες στον Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Παπανικολάου Παναγιώτη που μου παρείχε πληροφορίες, γνώσεις, ιδέες, καθώς και τεχνική υποστήριξη για τα πειράματα της φθορίζουσας ουσίας, τον υποψήφιο Διδάκτορα Καραϊσκό Γρηγόριο για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου παρείχε για την κατασκευή του ταλαντωτικού μηχανισμού, τον τεχνικό του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Βέργο Αθανάσιο για τις πολύτιμες σχεδιαστικές συμβουλές του για την κατασκευή και το σχεδιασμό του Ταλαντωτικού Μηχανισμού. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τις υποψήφιες διδάκτορες του εργαστηρίου κκ. Ζησιμάτου Αφροδίτη και Καπτσιανού Δήμητρα, για την τεχνική τους υποστήριξη. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στη φίλη μου και συνάδελφο Σταματάκη Έλενα Μηχανολόγο Μηχανικό, αποφοίτου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις πολύτιμες συμβουλές της όσο αφορά την εργασία μου καθώς και για την ηθική της υποστήριξη όπου αυτή χρειάστηκε. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, Σαληγγίδου Αφροδίτη, Κοντογεωργάκη Χριστόφορο, Τόλη Ηλία, Σαμαντά Αθανάσιο, Τζανιδάκη Ευάγγελο που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας μου ο κάθε ένας με τον δικό του τρόπο. Ευχαριστώ επίσης όλους όσους ήταν δίπλα μου, όπου τους χρειάστηκα. Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την αδελφή μου Κατσαμά Αικατερίνη, τους γονείς μου, κ Κατσαμά Νικόλαο και Γιαννούλα και τους παππούδες μου, Ψυχογιό Γεώργιο και Αικατερίνη για την υπομονή τους, την υποστήριξή τους είτε αυτή ήταν οικονομική, είτε ηθική, για τις συμβουλές τους και πάνω απ' όλα τους ευχαριστώ για την αγάπη τους. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στον παππού μου, Ψυχογιό Γεώργιο.

Κατσαμάς Γεώργιος

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο.....	10
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	
2.1 Ανάμειξη.....	11
2.2 Τύρβη.....	11
2.2.1 Τυρβώδης Διάχυση.....	13
2.3 Παλλόμενα Πλέγματα.....	15
2.4 Ροή σε οδικές χαράδρες.....	20
2.5 Οπτικοποίηση των ροών και ψηφιακή επεξεργασία.....	22
3. Σχεδιασμός Πειραματικής διάταξης	
3.1 Πλήρης Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης	
3.1.1 Δεξαμενή, Πλέγματα.....	25
3.1.2 Σχεδίαση Ταλαντωτικού Μηχανισμού.....	27
3.1.3 Κατασκευαστικά Μέρη Ταλαντωτικού Μηχανισμού.....	31
3.1.4 Σύστημα Έγχυσης Ρύπου.....	42
3.1.5 Πειραματικά Μοντέλα.....	46
3.1.6 Μετρητικά Όργανα.....	47
3.1.7 Χημικές Ενώσεις Οπτικοποίησης.....	51
3.1.8 Λογισμικό Συλλογής Πειραματικών Δεδομένων.....	52
3.2 Μεθοδολογία Πειραμάτων	
3.2.1 Ταλαντωτικός Μηχανισμός.....	53
3.2.2 Αντλία.....	55
3.2.3 Διάλυμα Ροδαμίνης.....	55
3.2.4 Αγωγιμόμετρο.....	55
4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων κοιλοτήτων	
4.1 LIF.....	57
4.2 Αγωγιμόμετρο.....	64
4.2.1 Ανάλυση χαρακτηριστικών γραφημάτων.....	81
4.3 Συσχέτιση Βήματος εκκαθάρισης με τη συχνότητα ταλάντωσης.....	91
4.4 Μορφή και συμπεριφορά δινών.....	95
4.5 Ανάλυση Χρόνων Δημιουργίας – Διάλυσης Δινών.....	98
5. Προβλήματα - Αντιμετώπιση.....	105
6. Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	108
7. Βιβλιογραφία.....	113



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$\epsilon$ = ρυθμός απώλειας ενέργειας,  $m^2/s^3$

$l_k$ = κλίμακα μήκους Kolmogorov, m

$L$ = μήκος, m

$\nu$ = ιξώδες,  $m^2/s$

$\tau$ = χρόνος, s

$t$ = χρόνος, s

$q$ = RMS ταχύτητα στη x – συνιστώσα m/s

$u$ = RMS ταχύτητα στη x – συνιστώσα m/s

$u$ = RMS ταχύτητα στη y – συνιστώσα m/s

$w$ = RMS ταχύτητα στη z – συνιστώσα m/s

$Re$ = αριθμός Reynolds, αδιάστατο

$U$ = ταχύτητα της ροής, m/sec

$\delta_\theta$ = πάχος απώλειας ορμής, m

$TKE$ = total kinetic energy, συνολική κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας,  $m^2/s^2$

$q$ = ροή ανά όγκο διαλύματος,  $\frac{mol}{m^2 \cdot s}$

$c$ = συγκέντρωση διαλύματος  $\frac{mol}{m^3}$

$D$ = σταθερά μοριακής διάχυσης,  $\frac{m^2}{s}$

$\nabla$  = διαφορικός τελεστής

$f$ = συχνότητα, Hz

$s$  ή  $S$ = εύρος ταλάντωσης, m

$M$ = μέγεθος πλέγματος, m

$H$ = απόσταση πλεγμάτων, m

$\alpha$ = 0.082, βοηθητική σταθερά

$C_1$ = σταθερά

$C_2$ = σταθερά

$C_3$ = σταθερά

$z$ = απόσταση από τη μεσαία θέση του πλέγματος

$W$ = πλάτος μοντέλου κοιλότητας, m

$H$ = ύψος μοντέλου κοιλότητας, m

$f_a$  = αδρανειακή δύναμη, N

$f_{hydrodynamic}$  = υδροδυναμική δύναμη, N

$F$ = υδροδυναμική δύναμη, N

$S_{grid}$ = καθαρή επιφάνεια (μόνο ράβδοι) πλέγματος  $m^2$

$C_D$ = σταθερά οπισθέλκουσας δύναμης, αδιάστατο

$\rho$ = πυκνότητα,  $kg/m^3$

$P$ = ισχύς, W

$S=5$ , συντελεστής

$x_0 = S/2$ , m  
 $m$  = μάζα, kg  
 $V$  = όγκος,  $m^3$   
 $\dot{x}$  = επιτάχυνση,  $m/s^2$   
 $\dot{x}$  = ταχύτητα, m/s  
 $\alpha$  = επιτάχυνση,  $m/s^2$   
 $k$  = σταθερά απόσβεσης, N/m  
 $b$  = συντελεστής τριβής  
 $M_{TOT}$  = συνολική μάζα, kg  
 $r$  = ακτίνα, m  
 $\phi$  = γωνία στροφάλου, ( $^\circ$ )  
 $l$  = μήκος συνδετικής ράβδου, m  
 $\gamma, \chi$  = σύμβολα από εξισώσεις βαθμονόμησης  
 $F_{osc}$  = συχνότητα ταλάντωσης, Hz



## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στην περιοχή της Μηχανικής Ρευστών που πραγματεύεται φαινόμενα ανάμειξης και διάχυσης ουσιών που σχετίζονται με προβλήματα στην βιομηχανία καθώς και στο φυσικό περιβάλλον. Ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατανόηση και η συμπλήρωση της γνώσης των φαινομένων αυτών μέσα από την υπάρχουσα θεωρία και τις παρατηρήσεις προηγούμενων ερευνών καθώς και μέσα από νέα πειράματα τα οποία θα σχεδιαστούν και θα εκτελεσθούν.

Αφορά την έρευνα και την κατανόηση της διασποράς ουσιών σε τυρβώδες ροϊκό πεδίο με μηδενική μέση ταχύτητα γύρω και μέσα σε οδικές χαράδρες που δημιουργούνται στο φυσικό περιβάλλον των πόλεων από την παρουσία των κτιρίων. Οι πειραματικές διατάξεις αποτελούνται κατά κομμάτια από ταλαντευόμενα διπλά πλέγματα σε αντιδιαμετρική διάταξη, από μηχανισμό παραγωγής σχεδόν αρμονικών ταλαντώσεων, από το σύστημα έκλυσης σχεδόν ισοτροπικώς, ρύπου, καθώς και από τρεις διαφορετικές κοιλότητες για την προσομοίωση των οδικών χαραδρών. Η έκλυση του ρύπου είναι συνεχής κατά μικρά χρονικά διαστήματα ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο εμφανής η εξέλιξη των φαινομένων αυτών. Επίσης τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και ο σχεδιασμός των πειραματικών διατάξεων έγιναν με τρόπο ώστε η προσομοίωση των ροών να γίνονται όσο το δυνατόν ακριβέστερα παράγοντας τα μικρότερα δυνατά σφάλματα.

Το κυρίως πειραματικό μέρος αφορά τον τρόπο με τον οποίον γίνεται η διάχυση και η διασπορά του ρύπου (της ουσίας), ή αλλιώς η ανάμειξη, μέσα και γύρω από την κάθε κοιλότητα σε τυρβώδες περιβάλλον που δημιουργείται με την εφαρμογή ταλάντωσης στη διάταξη διπλών πλεγμάτων. Δευτερευόντως υπάρχει και μια παρατήρηση της ροής ανάμεσα σε αυτά απουσίας της κοιλότητας.

Οι μέθοδοι παρατήρησης και μέτρησης των φαινομένων πραγματοποιήθηκαν με δύο τεχνικές. Η πρώτη και κύρια μέθοδος μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε αφορά την έγχυση χρωστικής ουσίας για την ψηφιακή οπτικοποίηση της εικόνας της ροής που συνοψίζεται στη μέθοδο της LIF (Laser Induced Fluorescence), και η δεύτερη μέθοδος αφορά τη μέτρηση της αγωγιμότητας της διαλυμένης ουσίας που εκλύεται με σκοπό την ένδειξη των φαινομένων της διάχυσης και της ανάμειξης αυτής.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κάθε παρατήρηση, ήταν η εξής παρακάτω πρώτα έγινε με προσοχή η μελέτη και κατανόηση προηγούμενων ερευνών, μεθόδων κι εννοιών για την παρούσα περιοχή ενδιαφέροντος της διατριβής, στη συνέχεια η προσεκτική σχεδίαση των πειραματικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν συμπεριλαμβανομένου του στησίματος υλικών hardware και software (ηλεκτρονικός υπολογιστής – προγράμματα), στη συνέχεια η εκτέλεση και

καταγραφή των πειραμάτων σε πραγματικό χρόνο και τέλος η παρατήρηση και σύγκριση των εξαχθέντων αποτελεσμάτων με παλαιότερες έρευνες και διατριβές.

### **1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

Το κίνητρο για την επιλογή του παρόντος κομματιού έρευνας από την μεγάλο εύρους επιστήμης της Μηχανικής των Ρευστών ήταν η προσπάθεια βελτίωσης των μοντέλων οδικών χαραδρών. Στις μεγάλες πόλεις υπάρχει ο συνδυασμός υψηλών κτιρίων – στενών οδών που δημιουργεί τις λεγόμενες ‘οδικές χαράδρες’. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι αδυναμία της ατμοσφαιρικής τύρβης να διεισδύσει σε αυτές και να ανανεώσει τον υπάρχοντα αέρα. Τα βαρύτερα καυσαέρια και μικροσωματίδια σε ένα κλασικό αστικό περιβάλλον, δημιουργούνται από τα μέσα που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος για την εξυπηρέτησή του, εγκλωβίζονται και παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και σε υψηλή συγκέντρωση με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ζωής των κατοίκων. Η έρευνα που πραγματοποιείται αφορά τη συγκέντρωση και το χρονικό διάστημα που κάνουν οι ρύποι να αναμειχθούν και να διαχυθούν εφαρμόζοντας διαφορετικές συνθήκες κάθε φορά.

Οι δυσκολίες και προκλήσεις που προέκυψαν από την εκτίμηση και παρατήρηση των εξελισσόμενων φαινομένων, αφορούσαν την καταγραφή ψηφιακής κινούμενης εικόνας (βίντεο) και επεξεργασίας της, καθώς υπήρχε η απαίτηση για μεγάλη επεξεργαστική ισχύ, μεγάλα μέσα αποθήκευσης καθώς κι επίσης υψηλή ανάλυση του ψηφιακού σήματος που προέκυπτε.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια ανασκόπηση προηγούμενων ερευνών, συνεισφέρει στη συμπλήρωση της γνώσης γύρω από φαινόμενα διασποράς, στη συμπλήρωση των υπάρχοντων υπολογιστικών μοντέλων, και υποβοηθά την κατανόηση μηχανισμών ανάμειξης.

## 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Ανάμειξη

**Ανάμειξη, τι εννοούμε με τον όρο ανάμειξη;** Με τον όρο **ανάμειξη** εννοούμε τη διαδικασία κατά την οποία μειώνεται η κλίση της συγκέντρωσης σε κάθε περιβάλλον, είτε αυτό αφορά υγρό, είτε στερεό, είτε αέριο. Η συγκέντρωση μπορεί να αφορά θερμοκρασία, πυκνότητα, και οποιαδήποτε άλλο στοιχείο. Η ανάμειξη επιτυγχάνεται με την τύρβη η οποία ουσιαστικά η κίνηση συνδετικών δομών, όπως είναι οι δίνες Von Karman, του στοιχείου προς παρατήρηση. Προέρχεται είτε από τυχαίες κατανομές στην κίνηση του ρευστού, είτε από κατανομές τις οποίες δημιουργούμε εμείς, είτε με μηχανικό, είτε με οποιονδήποτε άλλον τρόπο. Η ανάμειξη περιγράφεται από τα δυο χαρακτηριστικά της, την κλίμακα και την έντασή της. Η περιοχή του ενδιαφέροντος της εργασίας είναι η ανάμειξη σε τυρβώδες πεδίο. Για το τυρβώδες πεδίο η κλίμακα της ανάμειξης ουσιαστικά είναι το μέγεθος των δινών. Η ένταση αφορά την τυπική απόκλιση των δινών αυτών.

### 2.2 Τύρβη

Κατά την ανάλυση της ανάμειξης ένας όρος που αναφέρθηκε ήταν ο όρος της **τύρβης**. Την τύρβη τη συναντούμε καθημερινά στη ζωή μας, από το απλό ανακάτεμα του καφέ μέχρι τα νέφη που παρατηρούμε στην ατμόσφαιρα, τα κύματα στη θάλασσα. Κάποια παραδείγματα τυρβώδους ροής φαίνονται όπως παρακάτω:



Εικ.[2.1]: Σύννεφα, ατμοσφαιρική τύρβη




Εικ.[2.2]: Καταράκτης, τυρβώδης ροή

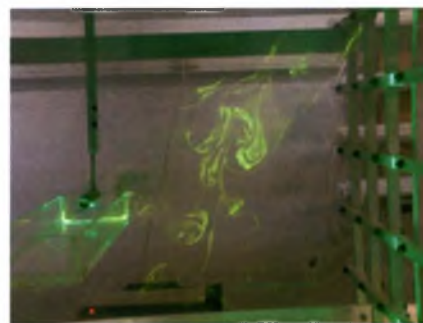


Εικ[2.3]. Καφές, δίνες



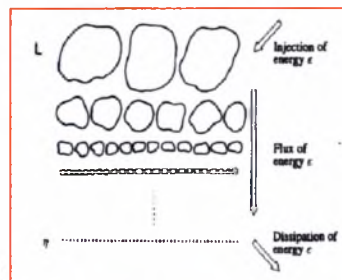
Εικ.[2.4]: Στενό Γιβλατάρ, τυρβώδης ροή, κίνηση κυμάτων από τον Ατλαντικό Ωκεανό  
από , κυμμάτιος=2

ΠΗΓΗ: EUROPEAN SPACE AGENCY, EARTH IMAGES



Εικ.[2.5]: Τυρβώδης ροή σε δεξαμενή

Τι είναι λοιπόν η τύρβη; Τύρβη εννοούμε την κατάσταση της ροής η οποία χαρακτηρίζεται από το χάος και τη στοχαστικότητα των αλλαγών στις ιδιότητες του μέσου. Συναντώνται μικρής κλίμακας αλλαγές στη στιγμιαία διάχυση και μεγάλης κλίμακας αλλαγές στη μετάδοση της ταχύτητας και της διανομής της πίεσης στο διάστημα του χώρου και του χρόνου. Χαρακτηρίζεται από τον αριθμό **Reynolds** ο οποίος δείχνει κατά πόσο τυρβώδης είναι η ροή ή το πεδίο όπου παρατηρείται βάσει της ταχύτητας της ροής. Σε μικρές ταχύτητες, η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή, μπορεί όμως και να υπάρξουν δίνες μεγάλης κλίμακας. Καθώς η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται, η ροή μεταπίπτει σε τυρβώδη κι αρχίζουν να εμφανίζονται ασταθείς δίνες, ευρείας κλίμακας οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Επίσης εμφανίζονται φαινόμενα αντίστασης καθώς δημιουργείται οριακό στρώμα πάνω στην επιφάνεια των σωμάτων που εκτίθενται στη ροή. Η δομή του οριακού στρώματος, καθώς και η θέση που αναπτύσσεται είναι δυνατόν να βοηθήσει στη μείωση της αντίστασης στη ροή. Η κινητική ενέργεια της τύρβης εμπεριέχεται στις μεγάλης κλίμακας δίνες και μεταδίδεται σε αυτές με μικρότερη κλίμακα κατά τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Από τις μικρής κλίμακας δίνες μεταδίδεται στις ακόμα μικρότερης κλίμακας και τελικά φτάνει σε επίπεδο μοριακής διάχυσης όπου εκεί έχει καταστραφεί η κινητική ενέργεια εξαιτίας των δυνάμεων του ιξώδους. Αυτή είναι γνωστή και ως η θεωρία του Richardson Η μοριακή διάχυση που ήδη αναφέρθηκε αναφέρεται σαν μέγεθος στην κλίμακα Kolmogorov. Η κλίμακα της ταχύτητας, του χρόνου και του μήκους που λαμβάνουν χώρα είναι η εξής για κάθε μέγεθος χωριστά. Για το χρόνο,  $\tau_{l_K} = \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}$ , για την ταχύτητα  $u_{l_K} = (\nu\epsilon)^{1/4}$  και για το μήκος  $l_K = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}$ . Προκύπτουν από τη θεωρία K41 του Kolmogorov ο οποίος πήρε την ιδέα από την προαναφερθείσα θεωρία του Richardson. Σχηματικά η



θεωρία αυτή φαίνεται όπως παρακάτω:

Η υπόθεση που έκανε ο Kolmogorov είναι η εξής, η τυπική κλίμακα με χαρακτηριστικό μήκος  $l_K$  είναι πολύ μικρότερη από αυτή με χαρακτηριστικό μήκος  $L$ , όπου και χαρακτηρίζεται από ισοτροπία καθώς και από εξάρτηση από την απώλεια ενέργειας ( $\epsilon$ ) και το ιξώδες ( $\nu$ ).

Η περιοχή του ενδιαφέροντος της διπλωματικής εργασίας είναι η στατική, ομογενής, ισοτροπική τύρβη. Με τον όρο στατική τύρβη εννοούμε την τύρβη η οποία είναι αμετάβλητη αναφορικά με το χρόνο, ομογενή, την τύρβη η οποία είναι αμετάβλητη αναφορικά με το χώρο και ισοτροπική την τύρβη η οποία είναι αμετάβλητη αναφορικά με την περιστροφή.

Ένα μέγεθος που μας δείχνει κατά πόσο τυρβώδης είναι η ροή που μελετούμε, είναι ο αριθμός Reynolds. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως  $Re = \frac{L \cdot U}{\nu}$ , όπου  $L$  μονάδες μήκους (m),  $U$  η ταχύτητα της ροής (m/sec) και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού ( $m^2/sec$ ). Το όριο που διαχωρίζει μια στρωτή ροή από τυρβώδη για σωλήνα κυκλικής διατομής, είναι για  $Re=2300$ . Γενικά αυτό το όριο αλλάζει από ροή σε ροή καθώς μεγάλο ρόλο παίζουν οι διατμητικές δυνάμεις που παραλαμβάνει το ρευστό. Για παράδειγμα ο αριθμός Reynolds σε μια ελεύθερη ροή όπως αυτή του καπνού, είναι μικρότερος και είναι  $Re = \frac{U \delta_\theta}{\nu} = 600$  ( $\delta_\theta$  το πάχος απώλειας ορμής). Το οριακό στρώμα γίνεται ασταθές.

Μια ακόμα σημαντική μεταβλητή για τη μελέτη της τύρβης είναι η Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια (ΤΚΕ). Το μέγεθος που την περιγράφει ανά μονάδα μάζας είναι το εξής παρακάτω:  $TKE = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$ , όπου  $u$ ,  $v$ ,  $w$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στο χώρο. Όπως είπαμε πιο πριν η ενέργεια αυτή χάνεται εξ' αιτίας του ιξώδους. Η τύρβη είναι μια κατάσταση της ροής που καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργειας για να διατηρηθεί. Αν η ενέργεια αυτή σταματήσει να την τροφοδοτεί, τότε χάνεται και το ρευστό ηρεμεί. Στις διάφορες διεργασίες που συναντούμε, είτε στη φύση, είτε στο εργαστήριο καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας που αφορούν μόνο τη διατήρηση της τύρβης. Ένα παράδειγμα μηχανισμού που προσδίδει ενέργεια για τη διατήρηση της τύρβης, είναι ο ήλιος ο οποίος ζεσταίνει τον αέρα, τα ύδατα, τους αλλάζει την πυκνότητα κι έτσι τα αναγκάζει σε κίνηση εξ' αιτίας ανωστικών φαινομένων, ακόμα ένα παράδειγμα, είναι ένα κινούμενο πλέγμα μέσα σε ρευστό που του προσδίδει ενέργεια για τη δημιουργία τύρβης.

### **2.2.1 Τυρβώδης διάχυση**

Ο όρος 'Τυρβώδης Διάχυση' είναι η διαδικασία της ανάμειξης στα πλαίσια ενός συστήματος που οφείλονται σε τυχαίες (τυρβώδεις) κινήσεις. Εμφανίζεται με υψηλό αριθμό Reynolds σε αναφορά της διάτμησης, πιο γρήγορα από τη μοριακή διάχυση και κατά συνέπεια, παίζει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο σε προβλήματα σχετικά με την ανάμειξη και σε συστήματα μεταφοράς, όπως είναι οι προσμείξεις, και η ανάμειξη διαλυμάτων στον τομέα της βιομηχανίας. Μπορεί να αντιμετωπίζεται παρόμοια ως συμβολισμός της μοριακής διάχυσης καθώς και μπορεί να υπάρξει αντιστοιχία του συντελεστή  $D$  (της τυρβώδους διάχυσης) με το συντελεστή  $K$  της μοριακής διάχυσης. Μελετάται με την παρακολούθηση των ροϊκών της στοιχείων στο χωροχρόνο. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εξ' αιτίας της μοριακής διάχυσης περιγράφεται από το νόμο του Fick:

$$q = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

Όπου  $q$  είναι η ροή του διαλύματος ανά όγκο διαλύματος,  $c$  η συγκέντρωση του διαλύματος και  $D$  η σταθερά της μοριακής διάχυσης. Ο νόμος του Fick μπορεί να περιγραφεί στις τρεις διαστάσεις.

$$\vec{q} = -D\vec{\nabla}c$$

Ο ρυθμός μεταφοράς της μάζας σε οποιαδήποτε διεύθυνση εξ' αιτίας της μοριακής διάχυσης είναι ευθέως ανάλογη προς τη συγκέντρωση με κλίση σε αυτή τη κατεύθυνση. Το ρευστό το ίδιο καθώς ρέει προκαλεί ακόμα έναν μηχανισμό μεταφοράς μάζας. Το μέγεθος του μηχανισμού αυτού είναι  $\vec{u}c$  στις τρεις κατευθύνσεις. Η μεταφορά αυτή είναι ευθεία μεταφορά (advective) όπως είναι η κάθε κίνηση που χαρακτηρίζεται από φαινόμενα επίπλευσης. Μαζί με τον όρο της μεταφοράς μάζας εξ' αιτίας της ίδιας της ροής, ο παραπάνω τύπος είναι ο εξής:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} + w\frac{\partial c}{\partial z} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right)$$

Ο όρος της διάχυσης  $D$  αφορά τη σχέση διάχυσης που συνδέει το περιβάλλον του ρευστού με τον ίδιο το διαλύτη. Για συνθήκες με χαμηλούς δείκτες συγκέντρωσης ο συντελεστής είναι σταθερός και η τιμή του λαμβάνεται από πίνακες. Για παράδειγμα ο δείκτης διάχυσης του αλατιού στο νερό είναι περίπου  $1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ . Ο συντελεστής αυτός είναι μεγαλύτερος για τα αέρια που αναμειγνύονται με αέρια:  $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ . Έχοντας έναν συντελεστή διάχυσης  $D$  ο χρόνος διάχυσης είναι ανάλογος με την απόσταση ως εξής:  $t \sim \frac{L^2}{D}$ . Τέλος για την πλήρη κατανόηση του μεγέθους της τυρβώδους διάχυσης θα αναφέρω το παράδειγμα με τον καφέ και τη ζάχαρη. Αν θέλαμε τον καφέ μας σε ένα φλιτζάνι ύψους 5cm, πιο γλυκό με μια συγκεκριμένη ποσότητα ζάχαρης χωρίς να τον ανακατέψουμε, θα έπρεπε να περιμένουμε 30 ημέρες. Προκαλώντας όμως ροή στο φλιτζάνι (κι άρα τύρβη) ο καφές μας θα γίνει πιο γλυκός σε πολύ λιγότερο από ένα λεπτό.

Για την παρακολούθηση και μέτρηση της τυρβώδους διάχυσης, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούταν ως τώρα, με την ανάλυση σήματος που προκύπτει από κάποιον αισθητήρα, δεν είναι ακριβείς. Για παράδειγμα, όπως στην παρακάτω εικόνα, μετρώντας το σήμα από τη συγκεκριμένη ροή,



θα δούμε πολλές διακυμάνσεις, πολλά peaks και πολλά bottoms. Δεν είναι δυνατόν έτσι να γίνει λήψη της συνολικής εικόνας του σήματος για την ανάλυση του φαινομένου αυτού παρά μόνο στο σημείο που μετράει ο αισθητήρας. Με τις νέες μεθόδους όπως αυτή της καταγραφής της φθορίζουσας ουσίας, αλλιώς κι ως Laser Induced Fluorescence (LIF) μπορούμε να μελετήσουμε ακριβώς τη ροή και σε κάθε περιοχή την οποία επιλέγουμε. Η μελέτη, κι ανάλυση αυτής της μεθόδου μέτρησης θα υπάρξει σε επόμενα κεφάλαια.

### 2.3 Παλλόμενα Πλέγματα

Για τη δημιουργία τύρβης, και για τη διατήρησή της, ο μηχανισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτός των παλλόμενων πλεγμάτων. Τα ταλαντευόμενα πλέγματα έχουν χρησιμοποιηθεί από το 1950 για την προσέγγιση ισοτροπικού τυρβώδους πεδίου και πλευρικά ομογενούς τυρβώδους πεδίου μικρής κλίμακας, χωρίς την ύπαρξη ροής με την απουσία των φαινομένων μέσης διάτμησής της. Παλαιότερες μελέτες αφορούσαν τη μείξη κατά μήκος μιας διεπιφάνειας δυο διαφορετικών ρευστών (e.g. Thomson and Turner 1975; Hopfinger and Toly 1976), τη μελέτη της τύρβης στη διεπιφάνεια νερού – αέρα (e.g. Brumley and Jirka 1987), την ανάδευση μερών ουσίας σε τυρβώδες πεδίο (e.g., Tsai and Lick 1986; Huppert et al. 1995) την αποβολή μολυντών ουσιών από ιζήματα (e.g., Connolly et al. 1983; Valsaraj et al.1997) και πολλές άλλες. Ακόμα μερικές έρευνες, χρονολογικά είναι όπως αυτές των, A. Eidelman (2001, 2002), Shy (1997), Schulz (2006), Srdic (1995), Changunda (2008), De Silva (1993), Turner (1968, 1973), Hopfinger and Toly (1976) R. Ben Maad (1992). Βλέπουμε πως η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή τα τελευταία σχεδόν 60 χρόνια. Οι κατασκευές που δημιουργήθηκαν διαφέρουν σε μέγεθος ανάλογα με το πεδίο έρευνας που πραγματοποιείται. Μερικές εικόνες με παλλόμενα πλέγματα φαίνονται όπως παρακάτω:



Εικ.[2.6]: Μηχανισμός Παραγωγής Τύρβης με θάλαμο 75x75x150cm<sup>3</sup>



Εικ.[2.7]: Μηχανισμός του Buchholz με θάλαμο 29x29x58cm<sup>3</sup>



Εικ.[2.8]: Μηχανισμός Επίπλευσης με μέγεθος Πλέγματος 8mm και διαστήματος 18mm



Εικ.[2.9]: Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πλέγματος από το οποίο διέρχεται ήλιο (He II) χαμηλής θερμοκρασίας.

Τα πλέγματα χρησιμοποιούνταν για τη μελέτη φαινομένων ανάμειξης, τυρβώδους μεταφοράς σωματιδίων, τυρβώδους θερμικής διάχυσης και αστάθειας ομαδοποίησης (clustering instability) κατά μήκος ή και όχι των διεπιφανειών σε μια διάσταση. Συμβάλλουν στη δημιουργία μικρής και μεγάλης κλίμακας ανομοιογένειας στη χωρική κατανομή των σωματιδίων. Οι εφαρμογές τους απαντώνται στο φυσικό περιβάλλον (λίμνες ωκεανοί) καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές (δεξαμενές, ρυσnoclines, thermoclines).

Υπάρχουν 2 παραδοσιακές μέθοδοι για την παραγωγή ομογενούς τύρβης. Η μία δημιουργείται από πλέγμα σε ροή αεροσύραγγας η οποία είναι εξαιρετικά δύσκολη εξ' αιτίας των μικρών χρόνων που παρατηρούνται για την όποια εξέλιξη των φαινομένων που μελετούμε, καθώς κι επειδή η ισοτροπία παραβιάζεται επειδή η ροή είναι ως προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η δεύτερη μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται, είναι η παραγωγή τύρβης από ταλαντούμενα πλέγματα. Το πλεονέκτημά της είναι η άνεση στη μελέτη των διαφόρων φαινομένων στην παραγόμενη τύρβη καθώς ο χρόνος παρατήρησης είναι κατά πολύ μεγαλύτερος επειδή η μέση ροή είναι μηδενική. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι κατά τη μελέτη της τύρβης και των φαινομένων της ανάμειξης δεν υπάρχουν φαινόμενα αποκοπής της ροής καθώς δεν υφίσταται ροή προς μια κατεύθυνση.

Μελέτες στην τύρβη όπως των Thompson and Turner, 1975 έδειξαν ότι ο νόμος της κατάπτωσης (της καταστροφής) (decay law) της τύρβης μπορεί να συσχετιστεί με παραμέτρους όπως το μέγεθος πλέγματος, η συχνότητα και το εύρος ταλάντωσής του.

Οι πρώτες μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων ταλάντωσης και της παραγόμενης τύρβης διατυπώθηκαν από τους Thomson και Turner το 1975 και από τους Hopfinger και Toly το 1976. Κύριος σκοπός της έρευνας ήταν η διεπίδυση μερών ουσίας κατά μήκος μιας διεπιφάνειας. Γι' αυτές τις έρευνες χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνες δεξαμενές καθώς και διατάξεις πλεγμάτων σε ένα



επίπεδο αποτελούμενο από τετραγωνικές ράβδους επίσης. Βρέθηκε ότι η κινητική ενέργεια αποδυναμώνεται με τη μεγαλύτερη απόσταση από το πλέγμα στη δύναμη του -2. Η εμπειρική σχέση που διατυπώθηκε από τους Hopfinger & Toly ήταν η παρακάτω:

$$u = c_u c_s^{1.5} f M^2 / z,$$

Όπου  $c_u=0.3$ ,  $f$ ,  $s$  η συχνότητα και το εύρος της ταλάντωσης,  $M$  το μέγεθος πλέγματος,  $z$  η απόσταση από τη μεσαία θέση του πλέγματος και τέλος  $c_s=S/M$ . Η κλίμακα μεγέθους της τύρβης είναι (integral scale)  $l_K = c_o c_s^{0.5} z$  όπου  $c_o=0.25$ . Ο αριθμός Reynolds είναι  $Re=ul_K/\nu$ . Αντικαθιστώντας από τις παραπάνω εξισώσεις τα μεγέθη  $u$  (σε άλλη βιβλιογραφία αναφέρεται ως  $q$ ),  $l_K$ ,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες και για σταθερές  $c_u=0.3$ ,  $c_o=0.25$ ,  $c_s=1$  και  $\nu=0.15\text{cm}^2/\text{s}$  ο αριθμός Reynolds γίνεται  $Re=0.5fM^2$ . Για να μην υπάρξει σύγχυση, οι σταθερές είναι διαφορετικές για κάθε έρευνα. Οι σταθερές οι οποίες δόθηκαν αφορούν έρευνα με ανάπτυξη τύρβης σε αέρα του Eidelman (2001) ο οποίος βασίστηκε στους Tomson and Turner (1975). Μια εξέλιξη της παραπάνω εμπειρικής σχέσης είναι οι παρακάτω που προέκυψαν από έρευνα του Long.

$$u_0 = C_1 S^{3/2} M^{1/2} f \cdot z^{-1}$$

$$w_0 = C_2 S^{3/2} M^{1/2} f \cdot z^{-1}$$

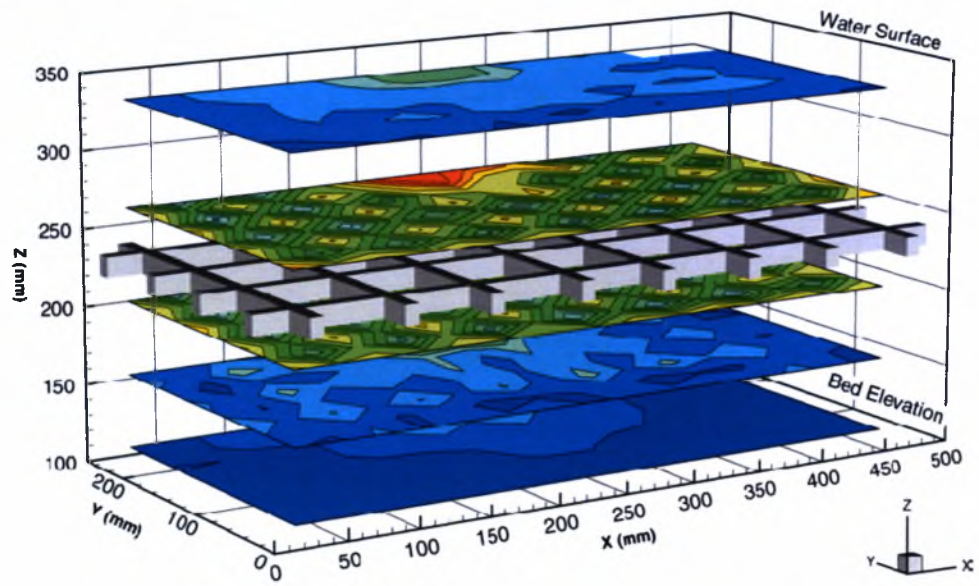
$$l_0 = C_3 z$$

Οι σταθερές  $C$  αναφέρονται στη γεωμετρία του πλέγματος. Για τις προηγούμενες εξισώσεις ο αριθμός Reynolds γίνεται  $R_{l_0} = u_0 l_0 / \nu$ , όπου  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες. Για την ύπαρξη σχεδόν ισοτροπικής τύρβης, η στερεότητα του πλέγματος θα πρέπει να είναι κάτω από 40%, η συχνότητα της ταλάντωσης να είναι κάτω από 7Hz, οι συνθήκες ταλάντωσης θα πρέπει να αποδίδουν μικρές διατμήσεις Reynolds και οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται 2 ως 3 φορές το μέγεθος του πλέγματος (2M-3M) μακριά από το πλέγμα. Αν παραβιαστούν αυτές οι συνθήκες, τότε παύει να ισχύει η γραμμικότητα που ισχύει ανάμεσα στη συχνότητα της ταλάντωσης των πλεγμάτων και στις συνιστώσες της ταχύτητας  $u'$  και  $w'$  και. Ένα ταλαντευόμενο πλέγμα δίνει τιμές  $w_0/u_0=1.1-1.2$  το οποίο είναι άμεσα συγκρινόμενο και με την τύρβη που παράγεται στην αεροσύραγγα. Η ένταση της τύρβης είναι περίπου στο 11% της ταχύτητας των πλεγμάτων που ισούται με  $f \cdot s$  όπως έχει διαπιστωθεί με τη μέθοδο Laser Doppler Velocimetry. Άλλος ένας περιορισμός που αναφέρεται για την ανάπτυξη της επιθυμητής περιοχής της τύρβης είναι η απόσταση μεταξύ των παλλόμενων πλεγμάτων  $H$ . Σύμφωνα με την αναφορά του Shy (1997) για απόσταση πλεγμάτων  $H=10\text{cm}$  υπάρχουν 2 ευδιάκριτες περιοχές της ροής. Η μια είναι αυτή που βρίσκεται κοντά στο πλέγμα (wake πλέγματος) και η άλλη είναι αυτή που υπάρχει σχεδόν ισοτροπία της ροής. Στην προηγούμενη περίπτωση η ροή είναι ομογενής ειδικά στην οριζόντιά της κατεύθυνση και ανομοιογενής στην κάθετη κατεύθυνση. Έτσι οι τάσεις που αναπτύσσονται στη συγκεκριμένη περιοχή είναι μεγάλες εξ' αιτίας αυτής της διαφοράς στις ταχύτητες στην οριζόντια και κάθετη

κατεύθυνση. Για απόσταση πλεγμάτων  $H=6\text{cm}$  η ενεργή ένταση της τύρβης είναι μεγάλη με  $q/fs=21\%$ , επίσης ο λόγος  $(w'_i - u'_i)/q$  είναι περίπου μέχρι 40%. Καθώς το  $H$  αυξάνεται στα  $10\text{cm}$  μια περιοχή ομογενούς τύρβης μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ  $-0.35 \leq z/0.5H \leq 0.35$  κατά την οποία  $q/fs=11\%$  με λόγο  $(w'_i - u'_i)/q$  πολύ μικρότερο από αυτόν των  $6\text{cm}$ . Πάντα σύμφωνα με τον Shy για την περιοχή που μας ενδιαφέρει, οι διακυμάνσεις των μεταξύ, rms ταχυτήτων στην οριζόντια κατεύθυνση και των rms στην κάθετη κατεύθυνση δεν πρέπει να είναι πάνω από 15%. Βρήκε ότι το ύψος της περιοχής ενδιαφέροντος (της περιοχής της ομογενούς τύρβης) είναι  $h=0.48H-1.5$ . Τέλος η διόρθωση που δίνει για την εμπειρική σχέση του Horfingger για στατική τύρβη είναι  $q = 0.89 f S^{1.5} M^{0.5} H^{-1.5}$  ο οποίος δίνει πολύ καλή εκτίμηση τουλάχιστον για  $4 \leq H/M \leq 6$ .

Εισαγωγικά αναφέρθηκε ο όρος της Τυρβώδους Κινητικής Ενέργειας (ΤΚΕ). Δεν αλλάζει κάτι σχετικά με τη διατύπωσή της:  $TKE = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ . Αν αντικατασταθούν οι τιμές των  $u$ ,  $v$ ,  $w$  τότε η σχέση της κινητικής ενέργειας της τύρβης γίνεται  $TKE = \alpha(MS^3 f^2 z^{-2})$ , όπου το  $\alpha$  παίρνει τις τιμές του ανάλογα από τα  $C_1$  και  $C_2$ . Για παράδειγμα κατά DeSilva and Fernando το  $\alpha=0,082$ . Η ΤΚΕ είναι μικρότερη μακριά από το πλέγμα. Η ΤΚΕ είναι περισσότερο επηρεασμένη από το απόρρευμα του πλέγματος. Το μέγεθος της ΤΚΕ που βρίσκεται κοντά στις ράβδους του πλέγματος είναι το τριπλάσιο από αυτό στα ανοίγματά του για μια συχνότητα ταλάντωσης των 3Hz και κατά προσέγγιση η διπλή για μια συχνότητα των 5Hz. Η ΤΚΕ μειώνεται σταδιακά με την απομάκρυνση από το πλέγμα μέχρι την απόσταση των  $z=2M$  ή  $z=4S$ . Η ΤΚΕ είναι ελαφρώς μικρότερη στον οπλισμό του πλέγματος απ' ό,τι στα ανοίγματά του. Γενικά, σε αυτές τις περιοχές, καθώς αυξάνεται η συχνότητα της ταλάντωσης, αυξάνεται και η ΤΚΕ.

Για την ΤΚΕ παρατηρείται ότι υπάρχουν απότομες μεταβολές της κλίσης της κοντά στο πλέγμα, ενώ πιο μακριά η τύρβη είναι πιο ομοιόμορφη. Παρακάτω παρατίθεται μια απεικόνιση της ΤΚΕ από τη μελέτη του J.J. Orlins (2003) και δείχνει τη μεταβολή της ΤΚΕ σε απόσταση με το παλλόμενο πλέγμα ο οποίος μελέτησε την κίνηση σωματιδίων μέσα σε τύρβη.



TKE (m/s)<sup>2</sup> 0.00E+00 4.00E-04 8.00E-04 1.20E-03

Εικ.[2.10]: Απεικόνιση της μεταβολής της ΤΚΕ (J.J. Orlins, 2003) σε απόσταση από παλλόμενο πλέγμα

## 2.4 Ροή σε Οδικές Χαράδρες

Το κύριο σημείο ενδιαφέροντος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η **ροή σε οδικές χαράδρες**. Από τότε που η κίνηση στους δρόμους των πόλεων είναι η κύρια πηγή ρύπανσης, η μοντελοποίηση της ροής σε οδικές χαράδρες έγινε επιτακτική. Οι οδικές χαράδρες στο εργαστήριο μοντελοποιούνται με κοιλότητες τετραγωνικής διατομής κυρίως.

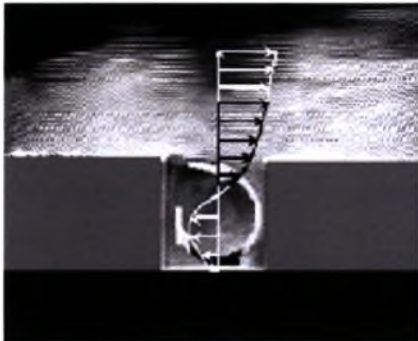
Πολλές έρευνες έχουν γίνει στο παρελθόν που αφορούν ροή σε κοιλότητες. Κάποιες από αυτές αφορούν ασυμπίεστη ροή σε κοιλότητες κι άλλες αφορούν συμπίεστη ροή. Εμάς μας ενδιαφέρει η ασυμπίεστη ροή. Γίνεται προσπάθεια για μια κατανόηση της ποιότητας του περιβάλλοντος των πόλεων όπου επικρατούν συνθήκες ασυμπίεστης ροής. Ενδεικτικά θα αναφέρω μερικές έρευνες που έχουν γίνει στο παρελθόν και που αφορούν αυτό το πεδίο της έρευνας. Κάποιες από αυτές πιο πρόσφατες είναι όπως του *Eric Savory*, Μοντελοποίηση ροής οδικής χαράδρας σε 2 διαστάσεις, *Fluids Research Centre, School of Engineering, Guildford GU2 7XH, United Kingdom, Serge Simöens : Ροή κατά μήκος οδικής χαράδρας και διασπορά από το επίπεδο της οδού, Parts 1,2 (Aug, Dec 2007)*, *Jose Luis Santiago, Σύγκριση μοντέλου ροής σε οδική χαράδρα με αντίστοιχη ροή σε αεροσύραγμα, (June 2005)*, *JONG-JIN BAIK Μοντέλο για Ροή Οδικής Χαράδρας σε αστικό περιβάλλον (Aug. 1999)*, *Cheng-Hsin Chang, Συμπεριφορά Συγκέντρωσης και Διακυμάνσεις στη ροή οδικής χαράδρας (Jun 2003)*, καθώς και κάποιες πιο παλιές όπως των *Sini et al. (1996)*, *Oke (1988)*, *Hosker (1987)*, *Lawson and Ohba, (1993)*, *Taniguchi (1992)*, οι οποίοι αποτέλεσαν τη βάση για τη μεταγενέστερη έρευνα. Άλλο ένα είδος έρευνας που αφορά τη ροή σε κοιλότητες, αφορά την ισορροπία της πυκνότητας μεταξύ καθαρού και αλατώδους νερού προερχόμενο από τη θάλασσα. Ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής ροής των ποταμών και στη μείωση του υδροφόρου ορίζοντα, το νερό της θάλασσας παρεισφρέει μέσω του εδάφους και δημιουργεί ένα στρώμα αλατότητας στο πιο χαμηλό σημείο του ποταμού. Αυτό έχει γίνει αιτία για πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα. Ένα παράδειγμα παρόμοιας έρευνας είναι του *Kirkpatrick (Ιουλ. 2004)*.

Έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον υπολογιστικά μοντέλα για να προβλέψουν τη διασπορά των στοιχείων ενός ρευστού σε αστικό περιβάλλον καθώς κι εργαστηριακά μοντέλα με προσομοίωση ροής σε κανάλι καθώς επίσης κι έχουν εκτελεσθεί μετρήσεις διασποράς ρύπων σε πλήρης κλίμακας μοντέλα τα οποία δεν είναι άλλα από πραγματικά κτήρια σε πόλεις τις Ευρώπης όπως είναι η Στοκχόλμη, το Λονδίνο και το Βερολίνο με την εγκατάσταση επί τόπου μετρητικών σταθμών.

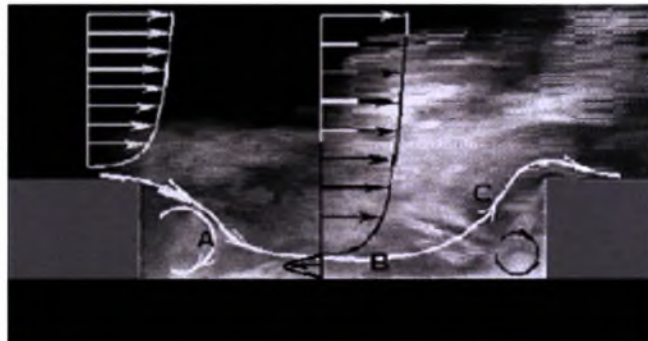
Πολλά πολύπλοκα εργαλεία και πολύπλοκες εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα οποία είναι λιγότερο ή περισσότερο ακριβή. Σε καμία όμως περίπτωση δεν κατάφεραν να περιορίσουν τις σημαντικές αποκλίσεις που εμφανίζουν με την πραγματικότητα και τη φύση της διασποράς στα αντίστοιχα περιβάλλοντα. Μια σημαντική έλλειψη σε αυτόν τον τομέα που παρατηρείται, είναι η έλλειψη γνώσης

για την κλίμακα της τύρβης στο αστικό περιβάλλον καθώς και η διακύμανση κάθε φορά του αέρα στη συγκεκριμένη περιοχή. Επίσης το πρόβλημα της γεωμετρικής αναπαράστασης του περιβάλλοντος αυτού καθιστά τα υπολογιστικά μοντέλα εξαιρετικά ανακριβή.

Στο παρελθόν έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την κατανόηση της διασποράς των ρύπων στις αστικές οδικές χαράδρες με την προσομοίωση μικρότερης κλίμακας μοντέλων σε αεροσύραγγα όπως αυτές των Cermak et al. (1974), Hoydysh et al. (1974), Britter and Hunt (1979). Οι πιο πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι η φύση μιας τέτοιας ροής είναι άμεσα εξαρτώμενη από το λόγο του πλάτους της οδικής χαράδρας (width,  $W$ ) προς το ύψος του κτιρίου (height,  $H$ ). Ο Oke (1987) παρατήρησε πρώτος την ανάπτυξη μιας δίνης σε μια τέτοια οδική χαράδρα με λόγο ύψους προς πλάτους,  $W/H > 1$ , 2 δινών κινούμενων με αντίθετη φορά για  $W/H = 2/3$ , καθώς και για λόγο  $W/H > 1/3$  η συμπεριφορά της ροής είναι η ίδια με αυτή της ύπαρξης μόνο ενός κτιρίου. Πολλά πρόσφατα πειράματα άρχισαν να εκτελούνται σε ανοιχτό κανάλι με υδάτινο περιβάλλον. Μέχρι και σήμερα πολλές έρευνες που έχουν γίνει υποστηρίζουν την αρχή του Oke. Παρακάτω παρατίθενται 2 εικόνες με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δουλειά του Cheng-Hsin Chang (2003) για ταχύτητα αέρα 0.05m/sec ώστε να μην δημιουργείται τύρβη. Για κοιλότητα με λόγο  $W/H = 1$ , παρατηρείται μια δίνη, Εικ.2.11, καθώς και για κοιλότητα με λόγο  $W/H = 4$  παρατηρούνται 2 δίνες αντίθετης φοράς, 2.12.



Εικ.[2.11]: Ροή για κοιλότητα  $W/H=1$



Εικ.[2.12]: Ροή για κοιλότητα  $W/H=4$

Παρατηρούνται τρεις περιοχές ροών. Η μια ροή βοηθάει στην εκκαθάριση της κοιλότητας από τον εκλυόμενο ρύπο, η δεύτερη είναι το απόρρευμα της κοιλότητας, καθώς και η τρίτη ροή είναι το σύνολο των υπόλοιπων ροών που είναι απομονωμένες από την κύρια.

Με την παρούσα έρευνα, οι μορφές των ροών θα μπορέσουν να γίνουν ορατές σε εμάς καθώς και με την υπάρχουσα βιβλιογραφία να βγουν κάποια συμπεράσματα γι' αυτές. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται η μέθοδος της οπτικοποίησης των ροών για την διεξαγωγή της. Θα ακολουθήσει μια περιγραφή της μεθόδου αυτής στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

## 2.5 Οπτικοποίηση ροών και ψηφιακή επεξεργασία

Ένα μέρος της παρούσης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιεί τη μέθοδο της οπτικοποίησης των ροών. Η οπτικοποίηση των ροών είναι η μέθοδος κατά την οποία τα στοιχεία μιας ροής γίνονται ορατά. Η ροή αυτή αφορά είτε ροή σε υδάτινο, είτε σε περιβάλλον αερίων. Οι εξισώσεις Navier – Stokes περιγράφουν ροές. Τα αποτελέσματά τους καθώς και η χρησιμότητά τους δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμες. Εξ' άλλου η πιστότητά τους δεν θα ήταν δυνατόν να ήταν εφικτή αν πρώτα δεν υπήρχαν πειραματικά αποτελέσματα.

Η οπτικοποίηση των ροών έχουν τις ρίζες τους από την εποχή του Leonardo Da Vinci στη μέση του 14<sup>ου</sup> Αιώνα. Αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον εξ' αιτίας της αλματώδους αύξησης της επεξεργαστικής ισχύος των υπολογιστών. Υπάρχει η δυνατότητα, ενώ παλαιότερα δεν υπήρχε, να εξάγουμε τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά συμπεράσματα για μια ροή. Η μελέτη των ιδιοτήτων της ροής χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, στη θεωρητική και στην πειραματική.

Η θεωρητική ανάλυση μιας ροής γίνεται είτε αριθμητικά με την επίλυση εξισώσεων (Navier – Stokes), είτε με προσομοίωση μιας ροής σε Η/Υ ο οποίος επίσης βασίζεται στις ίδιες θεωρητικές αρχές (εξισώσεις) χρησιμοποιώντας βασικές υπολογιστικές μεθόδους. Η πειραματική ανάλυση η οποία αφορά την παρούσα έρευνα, πραγματοποιείται είτε με τη λήψη σημειακών μετρήσεων, είτε με την οπτικοποίηση του πεδίου της.

Η πειραματική ανάλυση μιας ροής που γίνεται με τη μέθοδο της οπτικοποίησης πραγματοποιείται με τρεις τρόπους. Ένας τρόπος είναι η **οπτικοποίηση με επιφανειακή ροή**. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά μιας ροής καθώς αυτή προσεγγίζει μια επιφάνεια. Ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι η έγχυση χρωματισμένου ελαίου στην επιφάνεια την οποία μελετούμε επειδή εμφανίζει η μικρή επιφανειακή τάση που αναπτύσσει βοηθά στη δημιουργία της μορφής των γραμμών ροής. Άλλη μια μέθοδος είναι αυτή της **εισαγωγής ιχνηθέτη**. Οι ιχνηθέτες είναι σωματίδια όπως αυτά του καπνού ή μιας χρωστικής ουσίας αν πρόκειται για υδάτινο περιβάλλον. Προστίθεται σε μια ροή για την ανίχνευση κίνησης του ρευστού. Με τη βοήθεια ενός επιπέδου φωτός (laser) γίνεται ανίχνευση της κίνησης του καπνού η οποία ακολουθεί τη ροή που είναι προς μελέτη. Τέλος διάφορες άλλες οπτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται, είναι όπως αυτές του δείκτη αλλαγής του δείκτη διάθλασης καθώς εξελίσσεται η ροή με την αποκάλυψη των ιδιοτήτων της. Μερικές γνωστές μέθοδοι σε αυτό το επίπεδο είναι αυτές όπως η **σκιαγράφηση, Schlieren φωτογραφία, και interferometry**.

Η μέθοδος της εισαγωγής ιχνηθέτη είναι η μέθοδος κατά την οποία εισάγουμε στη ροή σωματίδια, είτε αυτός είναι καπνός είτε είναι κάποια χρωστική ουσία αν πρόκειται για υδάτινο περιβάλλον όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Η επιλογή του χρησιμοποιούμενου δείκτη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην οπτικοποίηση και

κατά συνέπεια στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Πρέπει να είναι σε θέση να δείχνουν επαρκώς τη συμπεριφορά του πεδίου της ροής και χωρίς να επηρεάζονται από ιξώδεις, αδρανειακές, βαρυτικές και οποιουδήποτε άλλου είδους δυνάμεις. Σε αντίθετη περίπτωση, τα σφάλματα τα οποία δημιουργούμε κατά την μέθοδο της ανάλυσης είναι σημαντικά ώστε να αλλοιώσουν κάποιο πιθανό σήμα ή κάποιο μετρούμενο μέγεθος.

Η περιοχή του ενδιαφέροντός μας περιορίζει τους ανιχνευτές υγρής μορφής. Θα αναφερθούν μερικοί από αυτούς όπως είναι η εισαγωγή διαλύματος γάλακτος. Το διάλυμα γάλακτος ήταν αποτελούμενο από γάλα, αλκοόλη και χρωστική ουσία παρόμοιου ιξώδους με αυτό του νερού. Σε αντικατάσταση του γάλακτος χρησιμοποιήθηκε μια σταθερή λευκή ουσία, το rhodosil το 1979. Νεότερες έρευνες όπως και η παρούσα χρησιμοποιεί φθορίζουσες ουσίες. Μια τέτοια ουσία όπως αυτή που χρησιμοποιείται, είναι η ροδαμίνη 6G.

Για την επιτυχή διεξαγωγή της οπτικοποίησης των ροών θα πρέπει να παρέχεται ο κατάλληλος φωτισμός. Ο χώρος στον οποίον γίνεται το πείραμα θα πρέπει να φωτίζεται επαρκώς με τις όσο το δυνατόν λιγότερες σκιές ώστε να μην έχουμε απώλεια των φαινομένων που παρατηρούνται. Οι μέθοδοι φωτισμού δεν είναι άλλοι από απλές λάμπες πυρακτώσεως, φθορισμού, από φωτισμό με leds καθώς επίσης φωτισμός με επίπεδο φωτός προερχόμενο από laser οι οποίες διεγείρουν τις χρωστικές ουσίες.

Αφού διεγερθούν οι ουσίες, θα πρέπει να γίνει καταγραφή της συμπεριφοράς τους στη ροή (η εικόνα τους) και η μετατροπή σε σήμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας είναι μια μέθοδος που βρίσκει την εφαρμογή της σε πολλές διεργασίες, είτε στη βιομηχανία, είτε στο εργαστήριο, είτε ακόμα στη βιοϊατρική. Μερικά παραδείγματα είναι όπως του *Peter A. Santi (2009)* ο οποίος μελετά τη δομή ιστών και μικροοργανισμών χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο λεπτού επιπέδου φωτός, του *J. K. Lee (Apr. 2008)* ο οποίος μελετά τη ροή σε για εγχύτες καυσίμων σε μεγάλη πίεση σε μια προσπάθεια χαρακτηρισμού τους βασιζόμενος σε προηγούμενες έρευνες των *Shelby et al., 1998*; *Lee and Nishida, 2003a*; *Chryssakis et al., 2003*; *Lee και Nishida, 2003b*. Ακόμα ένας τομέας που χρησιμοποιείται η τεχνική της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας είναι αυτός που αφορά τη ροή στο κύλινδρο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης. Ένα παράδειγμα αυτής της έρευνας αφορούσε το Σχολείο Μηχανικής του Πανεπιστημίου του Brighton στην Αγγλία (*School of Engineering, University of Brighton, England, May 2005*).

Χρησιμοποιώντας τις πιο διαδεδομένες μεθόδους οπτικοποίησης είναι δυνατόν να εξαχθούν ικανοποιητικές πληροφορίες για δισδιάστατες ροές εφ' όσον ο φωτισμός παρέχεται σε ένα λεπτό επίπεδο. Οι πληροφορίες ανακτώνται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή από την επεξεργασία των μεταβολών των δεικτών διάθλασης του φωτός από την εξέλιξη του φαινομένου που παρακολουθούμε. Η μέθοδος αυτή εισάγει πολλά σφάλματα στην περίπτωση τρισδιάστατων ροών.

Η ποσοτική πληροφορία που παρέχει μια εικόνα εκφράζεται μέσω μιας τιμής που έχει κάθε ιχνοστοιχείο της (pixel). Οι τιμές που παίρνει είναι από 0 ως 256 των επιπέδων του γκρι για ασπρόμαυρη εικόνα, και 0 ως 256 των επιπέδων του Κόκκινου, 0 ως 256 Πράσινου και 0 ως 256 Μπλε αντίστοιχα για έγχρωμη εικόνα. Το σήμα που προκύπτει από την ψηφιακή επεξεργασία της εικόνας προέρχεται από σύγκριση των τιμών αυτών με μια τιμή που πήραμε ως αναφορά. Η κάθε τιμή του pixel επεξεργάζεται με στατιστικές μεθόδους (μέση τιμή, διασπορά, εύρος) για την προβολή του σήματος του φαινομένου.

Όπως και κάθε άλλη μέθοδος μέτρησης, έτσι και η ψηφιοποίηση της εικόνας εισάγει κάποια σφάλματα. Μερικές από τις αιτίες που τα εισάγουν, είναι η ποιότητα του παρεχόμενου φωτός από τη χρησιμοποιούμενη συσκευή (laser, λάμπα φθορισμού κ.α) εξ' αιτίας πτώσεων τάσης του παρεχόμενου ρεύματος, υπερθέρμανσης της συσκευής, η μη σωστή τοποθέτηση της πηγής στο μελετώμενο φαινόμενο, κακή ποιότητα φθορίζουσας ουσίας, κακή ποιότητα του νερού ή του αέρα που τίθεται σε ροή και άλλων σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά μπορούν και μειώνονται με τη βοήθεια των προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή επεξεργασία της εικόνας μέσω λειτουργιών όπως αυτών του edge enhancement, line detection (ανίχνευση γραμμής), filtering (φιλτράρισμα). Συνολικά αναφέρονται ως convolution operations (λειτουργίες συνέλιξης).

Τα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή επεξεργασία της εικόνας προέρχονται από τη διδακτορική διατριβή του κ. Γεωργίου Κωνσταντά, και είναι σε μορφή αρχείων LABView.



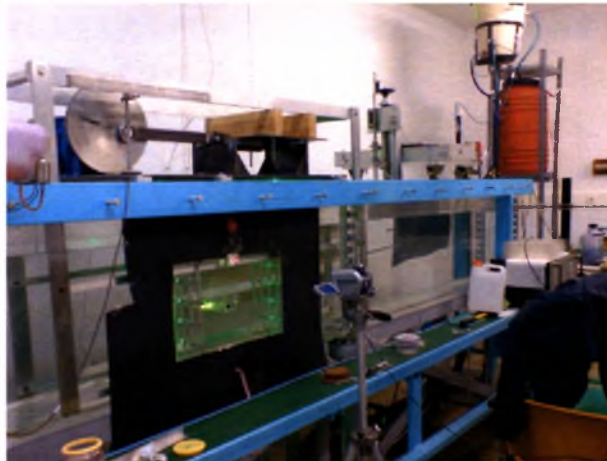
## **3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

### **3.1 ΠΛΗΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

#### **3.1.1. ΥΔΡΟΣΗΡΑΓΓΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ**

##### **ΥΔΡΟΣΗΡΑΓΓΑ**

Το κανάλι δοκιμών (υδροσήραγγα) που εκτελέσθηκαν οι πειραματικές εργασίες είναι διαστάσεων 371x39x60cm (μήκος x πλάτος x βάθος) όπως φαίνεται στην Εικ.[2.1]. Σε προηγούμενες έρευνες χρησιμοποιήθηκαν δεξαμενές διαστάσεων 15x15x30cm και 30x30x60cm Shy (1997), 75x75x150cm και 30x30x60cm, Eidelman, (2001), 50x50x110cm Schluz, (2006) καθώς και μικρότεροι θάλαμοι όπως ο Changunda (2008) οι οποίοι επικεντρώθηκαν στην έρευνα για τον τρόπο με τον οποίον επηρεάζεται η επιπλευστικότητα σωματιδίων διοχετεύοντας ενέργεια σε αυτά.



Εικ.[3.1]: Κανάλι Δοκιμών (Υδροσήραγγα)

##### **ΠΛΕΓΜΑΤΑ**

Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή σχεδόν ιστροπικής τύρβης με την εφαρμογή ταλάντωσής τους, είχαν μέγεθος πλέγματος με ανοίγματα τετραγωνικής διατομής ακμής 62 ή αλλιώς  $M=62\text{mm}$ . Αποτελείται από 12 ράβδους τετραγωνικής διατομής 10mm. Η στερεότητά του ορίζεται ως ο λόγος της ολικής επιφάνειας που καλύπτει προς την επιφάνεια που καλύπτουν οι ράβδοι και είναι 32.4%. Ο λόγος αυτός βρίσκεται μέσα στα όρια της στερεότητας όπως θεωρήθηκαν από προηγούμενες έρευνες οι οποίες ορίζουν στερεότητα μικρότερη από 40% για την παραγωγή ιστροπικής τύρβης. Η μέθοδος κατασκευής τους είχε καθοριστεί από τον κ. Κωνσταντίνο Μαρακάκη σύμφωνα με την προπτυχιακή του διατριβή, Εικ.[3.2], Εικ.[3.3]. Τα πλέγματα απέχουν μεταξύ τους 475mm. Είναι δυνατόν να

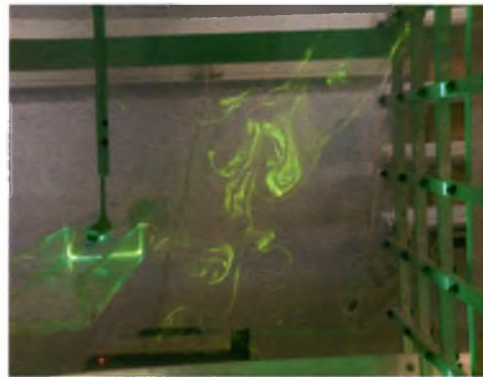
παράξουν ισοτροπική τύρβη σύμφωνα με τη βιβλιογραφία προηγούμενων ερευνών, έντασης

$$u = c_u c_s^{1.5} f \cdot M^2 z^{1/2}$$

όπου  $c_u \approx 0.3$  και  $c_s = S/M$ . Η κλίμακα μεγέθους της τύρβης είναι  $l = c_o c_s^{0.5} z$  όπου  $c_o = 0.25$ . Ο αριθμός Reynolds  $Re = ul/\nu$ , αντικαθιστώντας από τις παραπάνω εξισώσεις και για σταθερές  $c_u = 0.3$ ,  $c_o = 0.25$ ,  $c_s = 1$  και  $\nu = 0.15 \text{ cm}^2/\text{s}$  ο αριθμός Reynolds γίνεται  $Re = 0.5fM^2$ , σύμφωνα με τον A. Eidelman, (2001).



Εικ.[3.2]: Ράβδος Πλέγματος



Εικ.[3.3]: Πλέγμα στα δεξιά

Για τη στερέωσή τους και για τη σύνδεσή τους σε ταλαντωτικό μηχανισμό χρειάστηκε η κατασκευή οπλισμού από συμπαγείς αλουμιένιες ράβδους Εικ.[3.4] η οποία περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο μαζί με τα κατασκευαστικά μέρη του ταλαντωτικού μηχανισμού.

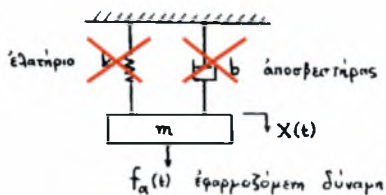


Εικ.[3.4]: Συμπαγής Αλουμιένια Ράβδος Οπλισμού.

### 3.1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

Για την παραγωγή σχεδόν αρμονικής ταλαντευτικής κίνησης, σχεδιάστηκε κατασκευή αποτελούμενη από διφασικό ηλεκτροκινητήρα 2HP, από έκκεντρο καθώς κι από τράπεζα 400x400mm οδηγούμενη από 4 αξονικά ρουλεμάν πάνω σε 2 παράλληλα βάρτρα. Το έκκεντρο αποτελείται από δίσκο 300mm με ανοιγμένα αυλάκια για την επιλογή του επιθυμητού εύρους ταλάντευσης, καθώς και μια μπιέλα που συνδέεται με το τραπέζι ταλάντευσης 400x400mm. Όλη η κατασκευή προσδένεται σε μεγαλύτερων διαστάσεων τραπέζι 1100x600mm. Το μέγιστο εύρος ταλάντωσης που μπορεί να παράγει ο μηχανισμός είναι 110mm και το μικρότερο 40mm. Η μέγιστη συχνότητα είναι στα 10Hz.

Μοντέλο αναπαράστασης του ταλαντωτικού μηχανισμού.



[ΠΗΓΗ]: Ν.Ι. ΚΡΙΚΕΛΗ, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΕΛΕΓΧΟ, 3<sup>Η</sup> ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΑΘΗΝΑ 2000

Η εξίσωση κίνησης που διέπει το σύστημα του ταλαντωτικού μηχανισμού είναι η παρακάτω, όπως προέκυψε από προηγούμενη ανάλυση:

$$f_a(t) + f_{hydrodynamic} = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx$$

Ο όρος της σταθεράς του ελατηρίου δεν ισχύει καθώς δεν υπάρχει κάποιο ελατήριο στη διάταξη. Ο όρος της απόσβεσης είναι οι τριβές που υπάρχουν στα μηχανικά μέρη του μηχανισμού ταλάντωσης. Είναι αμελητέος, η τιμή του είναι αισθητά μικρότερη. Η τιμή  $b$  της απόσβεσης θα υπολογιστεί παρακάτω για την εύρεση τελικά της συνολικής δύναμης, κι άρα της συνολικής ισχύος που απαιτείται για την παραγωγή της αρμονικής ταλαντωτικής κίνησης. Η μάζα  $m$  του συστήματος αποτελείται από την ολική μάζα των κινούμενων μερών του, δηλαδή  $m = m_{gridsys} + m_{oscsys}$ , όπου  $m_{gridsys}$  η μάζα της διάταξης των πλεγμάτων και  $m_{oscsys}$  η μάζα των κινούμενων μερών του ταλαντωτικού μηχανισμού. Θα προστεθεί και η υδροδυναμική συμπεριφορά των πλεγμάτων για την εύρεση της ολικής δύναμης που απαιτείται για τη διεξαγωγή της αρμονικής κίνησης των πλεγμάτων στο νερό.

Οι επί μέρους υπολογισμοί για την υδροδυναμική συμπεριφορά των πλεγμάτων είναι οι παρακάτω:

## Δυνάμεις Οπισθέλκουσας, $Drag_{grids}$

$$Drag_{grids} = \frac{1}{2} \rho \cdot u_o^2 \cdot S_{grid} \cdot c_D \cdot 2, \text{ όπου,}$$

$\rho=998,207\text{kg/m}^3$  η πυκνότητα του νερού σε θερμοκρασία δωματίου ( $20^\circ\text{C}$ )

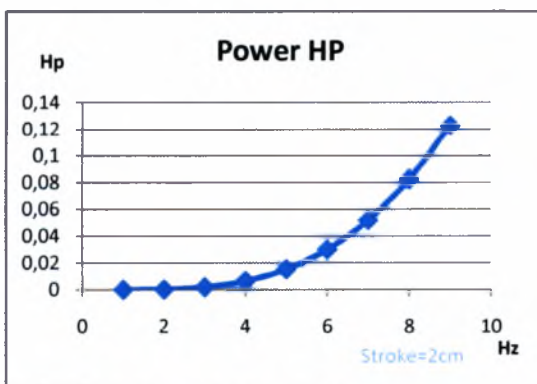
$u_o$  η μέγιστη ταχύτητα της ταλάντωσης σε  $[\text{m/sec}]$ ,  $u_o=2\pi f$ ,  $f$   $[\text{Hz}]$ , η συχνότητα της ταλάντωσης.

$S_{grid}$  η καθαρή επιφάνεια του πλέγματος υπολογιζόμενη από τις ράβδους του σε  $[\text{m}^2]$ , που ισούται με  $0.0666\text{m}^2$

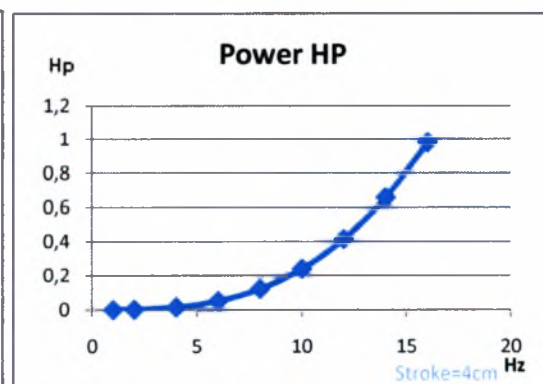
$C_D=2$ , ο συντελεστής οπισθέλκουσας κατ' εκτίμηση.

Για λόγους απλοποίησης η πυκνότητα του νερού έχει ληφθεί ως  $\rho=1000\text{kg/m}^3$ . Η μέγιστη ισχύς που απαιτείται για την κίνηση των πλεγμάτων μέσα στο νερό υπολογίζεται από την απαιτούμενη μέγιστη δύναμη επί την μέγιστη ταχύτητα των πλεγμάτων. Στην παρούσα φάση δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την αρμονική κίνηση. Η μέγιστη ισχύς λοιπόν, λαμβάνεται ως  $P[\text{Watt}]=F[\text{N}]\cdot u_o[\text{m/sec}]$ , όπου  $F[\text{N}]$  είναι η υδροδυναμική δύναμη των πλεγμάτων  $Drag_{grids}$ . Επακολούθως, η ισχύς πολλαπλασιάζεται με συντελεστή  $S=5$  και στο τέλος η νέα ισχύς μετατρέπεται με μονάδες βρετανικών ίππων  $[\text{bhp}]$ .

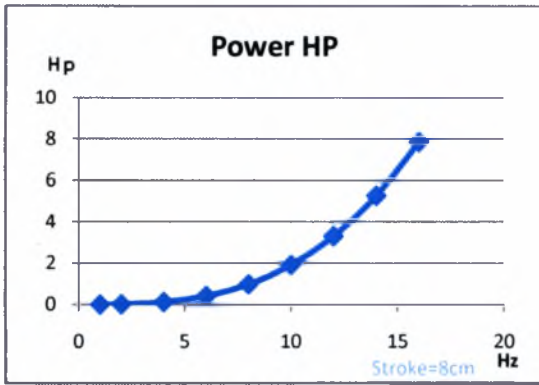
Οι προδιαγραφές για τη σχεδίαση του ταλαντωτικού μηχανισμού προκύπτουν βάσει της συχνότητας και του εύρους ταλάντωσης. Η ελάχιστη συχνότητα ταλάντωσης είναι για  $f_{\min}=0\text{Hz}$  (ακίνησία) και η μέγιστη  $f_{\max}=12\text{Hz}$ . Το ελάχιστο εύρος ταλάντωσης είναι  $s_{\min}=0\text{cm}$  (ακίνησία) και το μέγιστο  $s_{\max}=8\text{cm}$  που αντιστοιχεί σε  $x_o=4\text{cm}$ . Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους για την εύρεση των δυνάμεων κι άρα της ισχύος, προκύπτουν τρία διαγράμματα, Power vs. oscillation frequency  $f$ , για τρεις φάσεις ή συνθήκες λειτουργίας και για εύρη  $\text{stroke}_1=2\text{cm}$ ,  $\text{stroke}_2=4\text{cm}$   $\text{stroke}_3=8\text{cm}$ .



Εικ.[3.5] Ισχύς για  $\text{Stroke}_1=2\text{cm}$

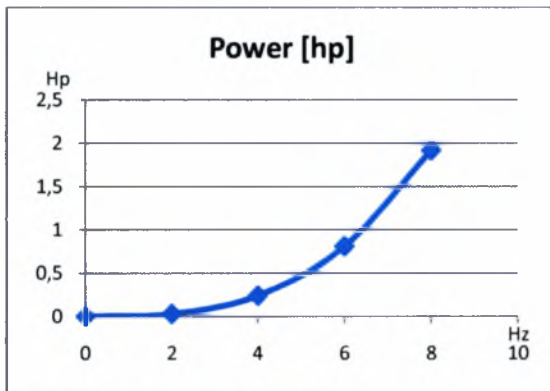


Εικ.[3.6] Ισχύς για  $\text{Stroke}_2=4\text{cm}$



Εικ.[3.7] Ισχύς για Stroke<sub>3</sub>=8cm

Επιπλέον παρατίθεται ακόμα ένα διάγραμμα που εκφράζει τη συμπεριφορά του ταλαντωτικού μηχανισμού σε λειτουργία με υψηλή συχνότητα  $f=10\text{Hz}$ , από τη φάση ακινησίας στη φάση μέγιστου εύρους ταλάντωσης που είναι τα 8cm.



Εικ.[3.8] Ισχύς για Stroke<sub>4</sub>=10cm

### Αδρανειακές Δυνάμεις

Για τον υπολογισμό των αδρανειακών δυνάμεων χρειάστηκε να υπολογιστεί πρώτα η μάζα του συστήματος των πλεγμάτων που διεγείρονται σε ταλάντωση αποτελούμενο από τα 2 πλέγματα και τα επιμέρους τεμάχια για τον οπλισμό του.

Το σύστημα των πλεγμάτων αποτελείται από 12+12 square bars διάστασης 370x10x10, από 2 αλουμινένια τεμάχια διαστάσεων 15.5x50x322 [mm], από 4 αλουμινένια τεμάχια διαστάσεων 15.5x50x1500 [mm].

Η κάθε ράβδος των πλεγμάτων είναι κενή, κι όταν ευρίσκεται σε υδάτινο περιβάλλον, αυτή γεμίζει με νερό. Η ειδική μάζα, εντός νερού βρέθηκε ως εξής: ζυγίστηκε πρώτα εκτός νερού με ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και βρέθηκε η μάζα του  $m_{sb}=43.1\text{gr}$ . Ο όγκος που καταλαμβάνει είναι  $V_{sb}=37\text{cm}^3$ .

$$\text{Η ειδική μάζα ράβδου: } \rho_{sb} = m_{sb} / V_{sb} \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

$$\rightarrow \rho_{sb} = 43.1 / 37 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \rightarrow \rho_{sb} = 1,165 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$



Square bar

Καθώς η ράβδος γεμίζει με νερό, η ειδική μάζα γίνεται εκ νέου,  $\rho_{sb} + \rho_w$  [gr/cm<sup>3</sup>] άρα  $\rho_{sb} = 2,163$ , με  $\rho_w @ 20^\circ C = 0.998$  [gr/cm<sup>3</sup>]. Οι μεταλλικές μπάρες από τις οποίες αποτελούνται τα πλέγματα είναι 24,

δηλαδή από 12 για το κάθε πλέγμα. Το βάρος της κάθε μπάρας χωριστά με νερό είναι περίπου το νέο ειδικό της βάρος επί τον όγκο που καταλαμβάνει η μια μπάρα, δηλαδή,  $m_{sb} = \rho_{sb} \cdot V_{sb}$   $m_{sb} = 37 \cdot 2.163$ , άρα  $m_{sb} = 80.026 \text{gr}$ .

Συνολικά η μάζα των 24 ράβδων είναι  $M_{sb} = 24 \cdot 80.026$ , άρα,  $M_{sb} = 1920.62 \text{gr}$ .

Το πρότυπο τεμάχιο που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη της ειδικής μάζας του είχε



Aluminum Bar

διαστάσεις 500x50x15.5 [mm] και όγκο  $V_{al} = 387.5 \text{cm}^3$ . Το βάρος του μετρήθηκε  $m_{al} = 1003.6 \text{gr}$ . Η ειδική μάζα  $\rho_{al}$  είναι  $\rho_{al} = m_{al} / V_{al}$

$\rho_{al} = 1003.6 / 387.5$  κι άρα,

$\rho_{al} = 2.59 \text{gr/cm}^3$ . Το κάθε τεμάχιο χωριστά, διαστάσεων

15.5x50x322 [mm] έχει όγκο  $V_{AL2} = 249.55 \text{cm}^3$ . Η μάζα του είναι

$m_{AL2} = \rho_{al} \cdot V_{AL2}$ ,  $m_{AL2} = 249.55 \cdot 2.59$ , οπότε,  $m_{AL2} = 646.3 \text{gr}$ . Η ολική μάζα των 2 αλουμινένιων τεμαχίων είναι  $M_{AL2} = m_{AL2} \cdot 2$  κι άρα  $M_{AL2} = 1292,6 \text{gr}$ . Ο όγκος από κάθε τεμάχιο χωριστά, διαστάσεων 15.5x50x950 είναι  $V_{AL4} = 1162,5 \text{cm}^3$ . Οπότε η μάζα του είναι  $m_{AL4} = \rho_{al} \cdot V_{AL4}$  κι άρα  $m_{AL4} = 3010,8 \text{gr}$ . Η ολική μάζα των 4 τεμαχίων είναι  $M_{AL4} = m_{AL4} \cdot 4$  κι άρα  $M_{AL4} = 12043,2 \text{gr}$ .

Η ολική μάζα του συστήματος είναι  $M_{TOT} = M_{sb} + M_{AL2} + M_{AL4}$  δηλαδή

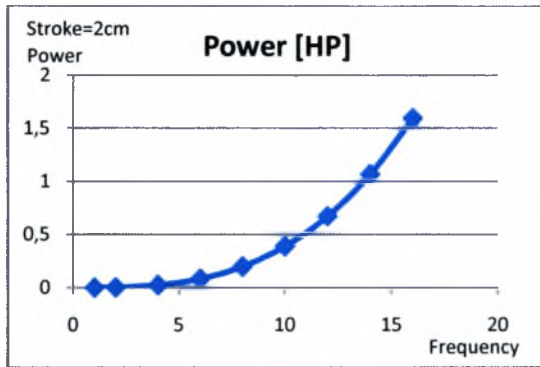
$M_{TOT} = 15719,06 \text{gr}$ . Για λόγους ασφαλείας, την ολική μάζα τη στρογγυλοποιώ ως  $M_{TOT} = 16000 \text{gr}$ .

Από την εξίσωση κίνησης του ταλαντωτικού μηχανισμού

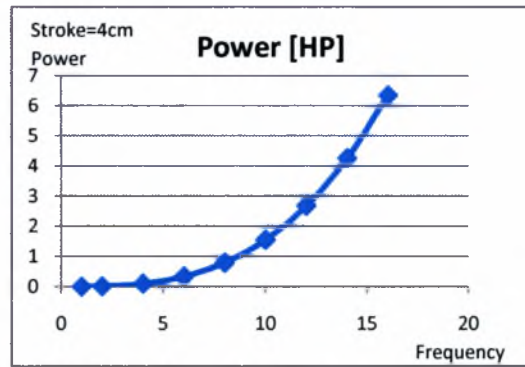
$f_a(t) + f_{hydrodynamic} = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx$  ο όρος που περιγράφει τις αδρανειακές δυνάμεις είναι ο  $m\ddot{x}$ . Αφού υπολογίστηκε η συνολική μάζα του συστήματος και βρέθηκε  $M_{TOT} = 16000 \text{gr}$ , στη συνέχεια υπολογίζεται σε Excel η επιτάχυνση του συστήματος στην κάθε φάση λειτουργίας. Ο όρος της επιτάχυνσης είναι

$$a_o = x_o \cdot (f \cdot 2\pi)^2.$$

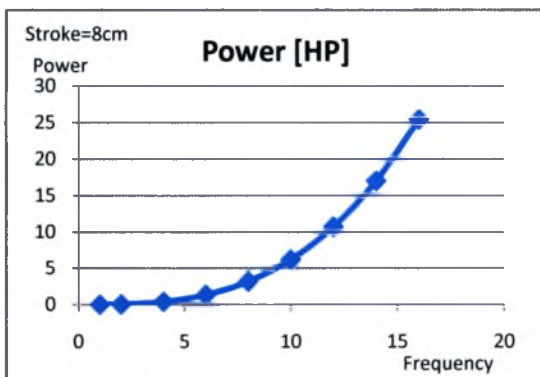
Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε 4 φάσεις λειτουργίας φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικ.[3.9] Ισχύς για stroke=2cm



Εικ.[3.10] Ισχύς για Stroke=4cm



Εικ.[3.11] Ισχύς για Stroke=10cm

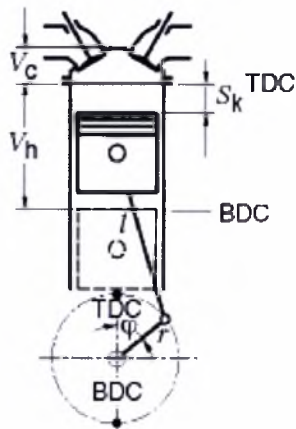
Για 10Hz και για 8cm παλμό η μεγαλύτερη υποδύναμη που απαιτείται είναι Power=7.76Hp

Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί με μέγιστη συχνότητα ταλάντωσης τα 16Hz. Οι προδιαγραφές σχεδίασης του ταλαντωτικού μηχανισμού θα περιορίζεται στα 3Hz. Τα πειράματα απαιτούν μέγιστη συχνότητα τα 2.61Hz και μέγιστο εύρος ταλάντωσης τα 6cm. Οι αδρανειακές δυνάμεις χαρακτηρίζονται ως στιγμιαίες καθ' ότι από τη θέση -62mm ως τη θέση +62mm για την αλλαγή της κατεύθυνσης της κίνησης της ταλάντωσης, ο μηχανισμός 'φρενάρει' κι 'επιταχύνει' στιγμιαία. Αυτές, μπορεί και τις παραλαμβάνει ο τύπου 'βολάν' δίσκος για τη στερέωση της μπιέλας στην τράπεζα ταλάντωσης. Η αναλυτικότερη περιγραφή του, ακολουθεί παρακάτω.

### **3.1.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΑΛΑΝΤΩΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ**

Για την παραγωγή ταλαντωτικής κίνησης μελετάται μηχανισμός αποτελούμενος από έναν ηλεκτροκινητήρα, ένα δίσκο που στερεώνεται μια μπιέλα (συνδετική ράβδος) καθώς κι ένα τραπέζι κινούμενο κατά τη διεύθυνση της ταλάντωσης.

Παρακάτω φαίνεται μια αναπαράσταση του ως σύστημα βολάν – πιστονιού σε κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Η σχέση που συνδέει το εύρος ταλάντωσης με το μήκος  $l$  της συνδετικής ράβδου, με τη γωνία και με την ακτίνα του στροφάλου είναι η παρακάτω:

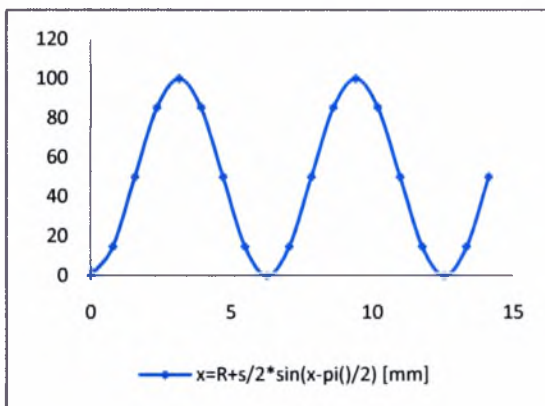
$$S = r \left[ 1 + \frac{l}{r} \cos \phi - \sqrt{\left(\frac{l}{r}\right)^2 - \sin^2 \phi} \right]$$

Το  $S$  αναφέρεται στο Stroke, που είναι το εύρος της ταλάντωσης. Από τη φάση σχεδιασμού του ταλαντωτικού

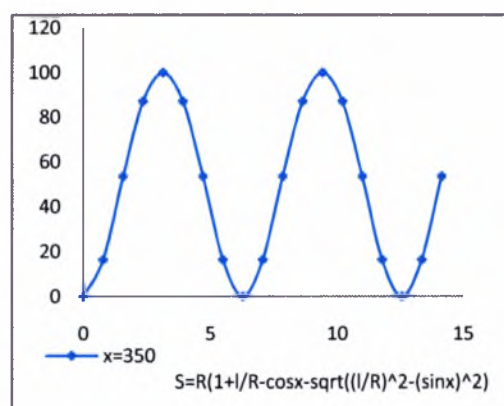
μηχανισμού, το stroke ισούται με 100mm θέτοντας  $r=50\text{mm}$ , δηλαδή το μισό stroke, την ακτίνα του στροφάλου και διαδοχικά  $l=100\text{mm}$ ,  $l=200\text{mm}$ ,  $l=300\text{mm}$ ,  $l=350\text{mm}$  το μήκος της συνδετικής ράβδου, (connecting rod) βρίσκω τις τιμές του Stroke για γωνίες από 0 ως  $4.5\pi$ .

Η καμπύλη του εύρος αποκτά περισσότερο ημιτονοειδή συμπεριφορά καθώς αυξάνει το  $l$ . Γι' αυτό το λόγο πήρα μια βοηθητική εξίσωση ταλάντωσης (ημιτονοειδής) ως μέτρο σύγκρισης της ταλάντωσης που προκύπτει από την παραπάνω σχέση του εύρους με τη βοηθητική  $x = r + \frac{S}{2} \sin\left(x - \frac{r}{\xi}\right)$ .

Οι υπολογισμοί ευρίσκονται σε πίνακες Excel. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα της ταλαντωτικής κίνησης που προκύπτουν για κάθε δυνατό μήκος της μπιέλας (συνδετικής ράβδου).



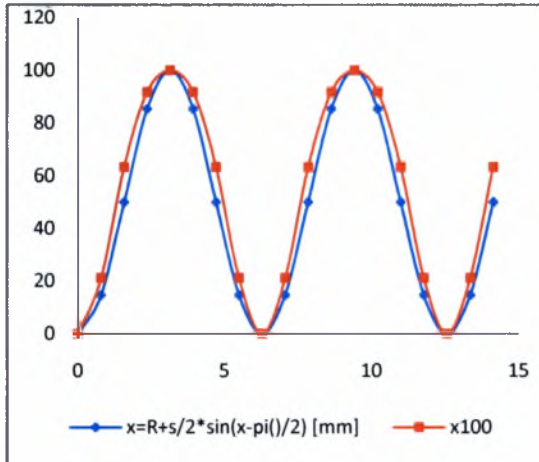
Εικ.[3.12] Αρμονική Κίνηση



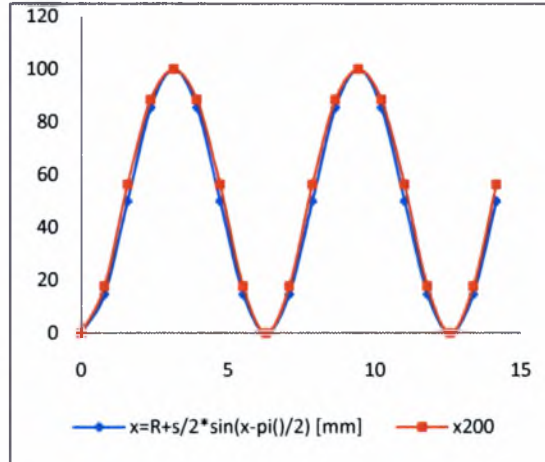
Εικ.[3.13] Κίνηση Μηχανισμού με  $l=350\text{mm}$



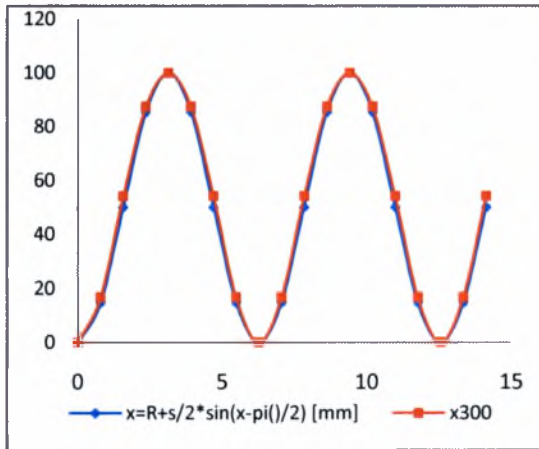
Παρακάτω ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα, μεταξύ αρμονικής και κίνησης μηχανισμού για  $l=100, 200, 300$  και  $350\text{mm}$ .



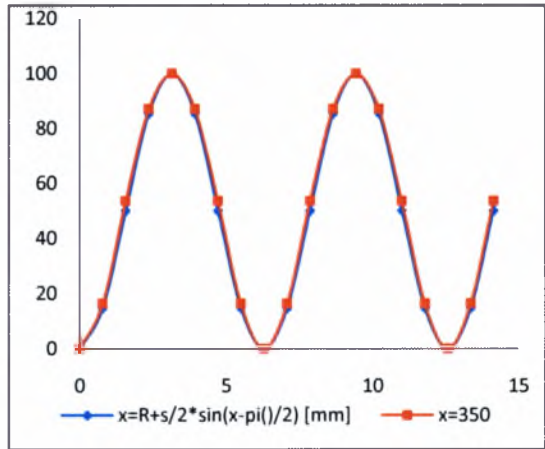
Εικ.[3.14] Κίνηση Μηχανισμού με  $l=100\text{mm}$



Εικ.[3.15] Κίνηση Μηχανισμού με  $l=200\text{mm}$

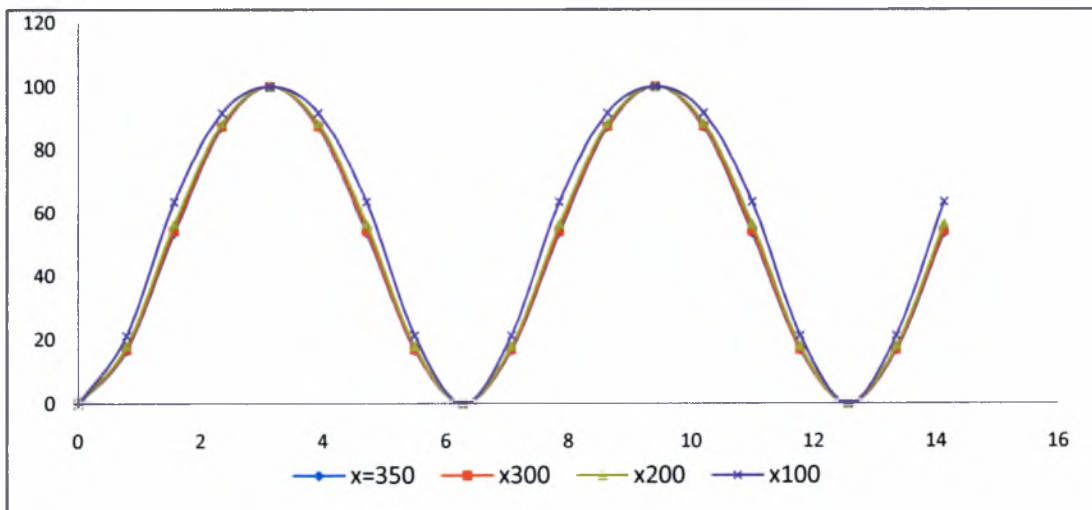


Εικ.[3.16] Κίνηση Μηχανισμού με  $l=300\text{mm}$

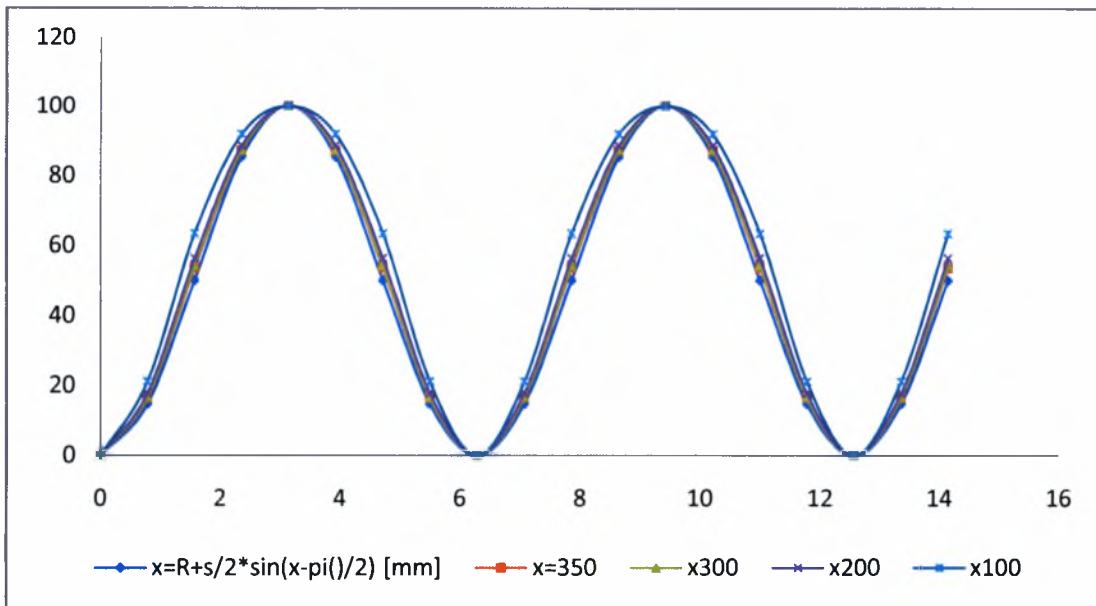


Εικ.[3.17] Κίνηση Μηχανισμού με  $l=350\text{mm}$

Ακολουθούν άλλα δυο συγκεντρωτικά διαγράμματα που φαίνονται οι εξισώσεις κίνησης. Το πρώτο αναφέρεται στις εξισώσεις κίνησης του μηχανισμού και το δεύτερο στις εξισώσεις κίνησης μαζί με την αρμονική κίνηση.



Εικ.[3.18] Συγκεντρωτικό διάγραμμα για  $l=100, 200, 300, 350\text{mm}$



Εικ.[3.19] Συγκεντρωτικό διάγραμμα για  $l=100, 200, 300, 350\text{mm}$  και αρμονική ταλάντωση

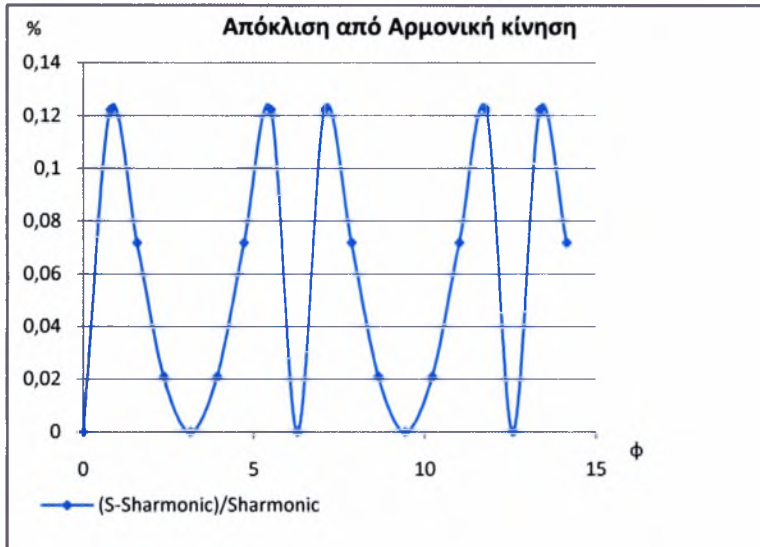
Παρατηρώντας τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι πετυχαίνουμε πολύ καλή προσέγγιση της αρμονικής κίνησης με μήκος συνδετικής ράβδου  $l=350\text{mm}$ .

S harmonic [mm]	S [mm]	(S-S harmonic)/S harmonic
0	0	0
14,64466094	16,43495	0,122249
50	53,58984	0,071797
85,35533906	87,14563	0,020975
100	100	0
85,35533906	87,14563	0,020975
50	53,58984	0,071797
14,64466094	16,43495	0,122249
0	0	0
14,64466094	16,43495	0,122249
50	53,58984	0,071797
85,35533906	87,14563	0,020975
100	100	0
85,35533906	87,14563	0,020975
50	53,58984	0,071797
14,64466094	16,43495	0,122249
0	0	0
14,64466094	16,43495	0,122249
50	53,58984	0,071797

Πίνακας 1: Πίνακας αποκλίσεων από αρμονική κίνηση

Οι αποκλίσεις κυμαίνονται από 12 ως 2%. Θα μπορούσαν να περιορίζονται ακόμα περισσότερο αλλά λόγω περιορισμού χώρου και περιορισμού ισχύος – μεγαλύτερες

αδρανειακές δυνάμεις και περιορισμός αντοχής υλικών – αυτό δεν περισσότερο εφικτό.



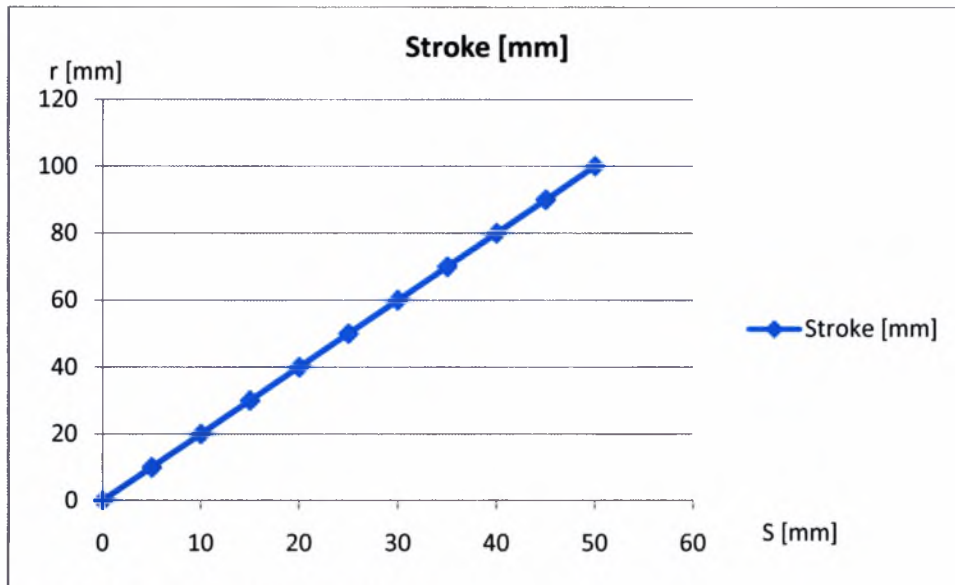
Εικ.[3.20] Διάγραμμα αποκλίσεων από αρμονική κίνηση

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τη διακύμανση του stroke ανάλογα με την ακτίνα του στρόφαλου, Πίνακας 2.

r [mm]	Stroke [mm]
0	0
5	10
10	20
15	30
20	40
25	50
30	60
35	70
40	80
45	90
50	100
60	120

Πίνακας 2. Πίνακας διακύμανσης εύρους ταλάντωσης

Παρακάτω φαίνεται μια γραφική παράσταση του εύρους ανάλογα με το μήκος της ράβδου:

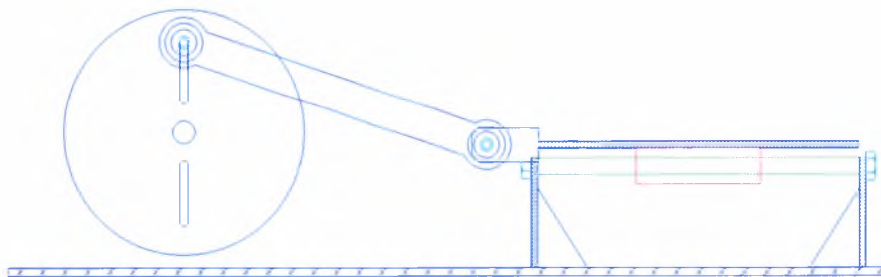


Εικ.[3.21] Διάγραμμα εύρους ταλάντωσης

Ανάλογα με την τοποθέτηση της συνδετικής ράβδου στο στρόφαλο μπορούμε να πάρουμε αντίστοιχα και μεγέθη για τον παλμό (stroke) της ταλάντωσης.

Στις εικόνες που ακολουθούν γίνεται λεπτομερής περιγραφή των σημαντικότερων τεμαχίων που απαρτίζουν τον ταλαντωτικό μηχανισμό μαζί με τη διάταξη των πλεγμάτων.

Ακολουθεί σχέδιο μορφής AutoCad για τον ταλαντωτικό μηχανισμό.



Εικ.[3.22] Σχέδιο Ταλαντωτικού Μηχανισμού

Η πλάκα στην οποία στηρίζεται ο ταλαντωτικός μηχανισμός φαίνεται όπως παρακάτω.



Εικ.[3.23] Πλάκα Στήριξης

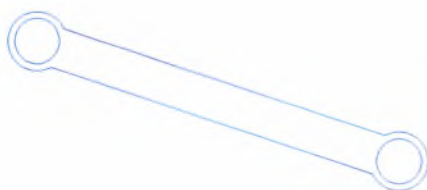
Έχουν διανοιχθεί περισσότερες οπές από τις απαραίτητες για μελλοντική στερέωση μετρητικών και αισθητήριων οργάνων.

Παρακάτω φαίνεται η πλάκα περιστροφής στην οποία στηρίζεται η μπιέλα. Καθώς περιστρέφεται δίνει κίνηση και στο τραπέζι διέγερσης.

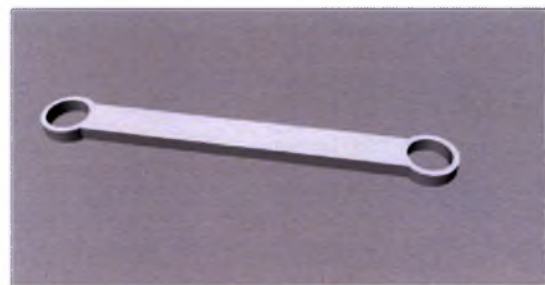


Εικ.[3.24] Πλάκα περιστροφής

Παρακάτω φαίνεται η συνδετική ράβδος που ενώνει το έκκεντρο με το τραπέζι διέγερσης:

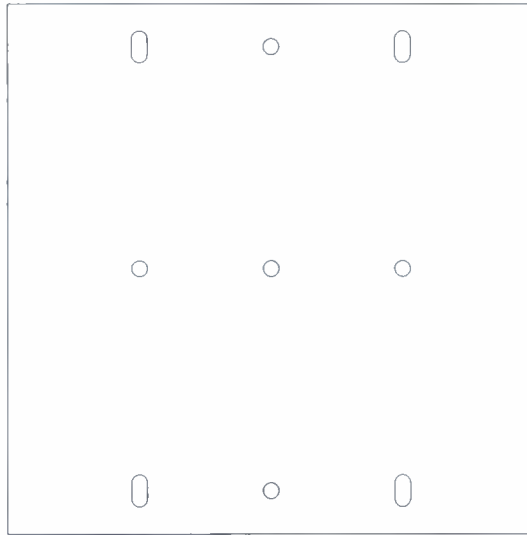


Εικ.[3.24α] Συνδετική ράβδος (AutoCad)



Εικ.[3.24β] Συνδετική ράβδος (3D)

Άλλο ένα σημαντικό τεμάχιο του ταλαντωτικού μηχανισμού είναι η πλάκα διέγερσης.

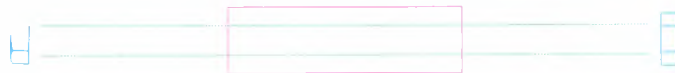


Εικ.[3.25] Πλάκα Ταλάντωσης, κάτοψη



Εικ.[3.26] Πλάκα Ταλάντωσης, πλάγια όψη

Τα βάρια στα οποία γίνεται η κίνηση της ταλάντωσης καθώς και τα αξονικά ρουλεμάν φαίνονται όπως παρακάτω:



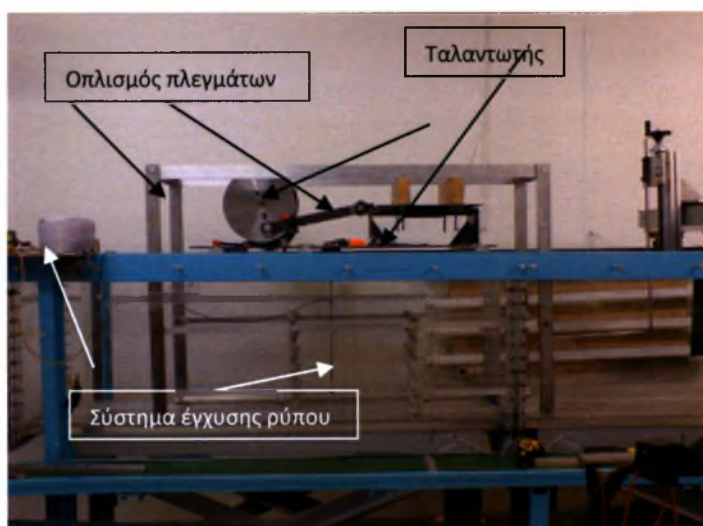
Εικ.[3.27] Βάρια Ταλάντωσης

## Πλέγματα – Οπλισμός

Για τη στερέωση των πλεγμάτων στον ταλαντωτικό μηχανισμό χρειάστηκε η ανακατασκευή του οπλισμού σχεδόν εξ' ολοκλήρου. Κόπηκαν 2 μεγάλες συμπαγείς ράβδοι ορθογωνικής διατομής 50x1,5mm σε μήκος 1500mm οι οποίες συνδέονται με τις προϋπάρχουσες κάθετες ράβδους στα πλέγματα. Το μήκος των στηρίξεων των πλεγμάτων μεγάλωσε στα 1500mm. Οι υπόλοιπες διαστάσεις παρέμειναν αμετάβλητες. Το μήκος των οριζοντίων ράβδων παρέμεινε στα 32,2mm και το ύψος των κάθετων ράβδων παρέμεινε επίσης στα 960mm.

## Διάταξη Μηχανισμού – Πλεγμάτων

Στην επόμενη φωτογραφία φαίνεται ο ταλαντωτικός μηχανισμός μαζί με τη διάταξη των πλεγμάτων καθώς και το σύστημα έγχυσης ρύπου (η λεπτομερής περιγραφή του, ακολουθεί παρακάτω).



Εικ.[3.28] Πειραματική Διάταξη

Παρακάτω ακολουθούν εικόνες με τις λεπτομέρειες του ταλαντωτικού μηχανισμού.



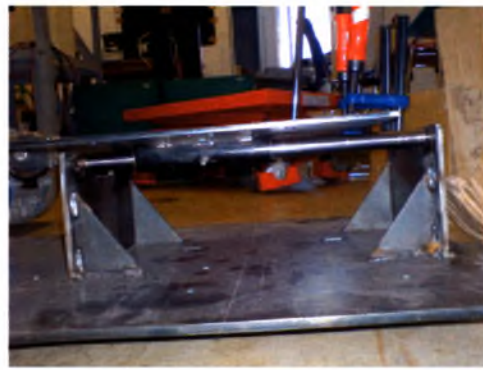
Εικ.[3.29] Πλάκα Ταλάντωσης, Βάκτρα, Μέρος Οπλισμού Πλεγμάτων



Εικ[3.30] Ηλεκτροκινητήρας, Έκκεντρο, Μέρος Οπλισμού Πλεγμάτων.



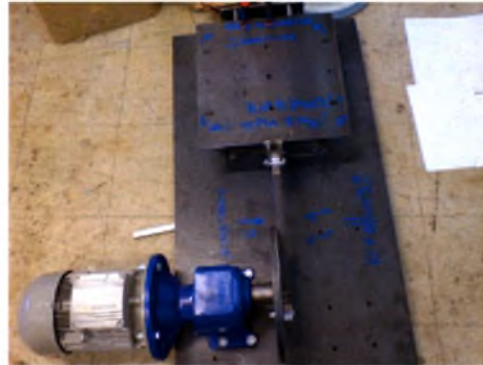
Εικ.[3.31] Ταλαντωτής



Εικ.[3.32] Ρουλεμάν, Βάκτρα, Πλάκα Ταλάντωσης



Εικ.[3.33]: Έκκεντρο, Μπιέλα – Σύνδεση με Πλάκα Ταλάντωσης



Εικ.[3.34]: Ταλαντωτής – Κάτοψη

Ο ταλαντωτής προσδέθηκε στις δοκούς της υδροδεξαμενής και πάνω σε συμπαγείς αλουμιένιες ράβδους ορθογωνικής διατομής 50x15.5 [mm]. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό την όσο δυνατόν μεγαλύτερη αποφυγή στρεβλώσεων που δημιουργούνται από ροπές εξ' αιτίας της εφαρμογής μοχλού στη διάταξη κατά τη λειτουργία της. Η επιλογή του αλουμινίου ως υλικού των ράβδων, χρησιμεύει για την απορρόφηση τυχόν κραδασμών ως μαλακό υλικό. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται ο τρόπος με τον οποίον συνδέεται ο μηχανισμός στις δοκούς της δεξαμενής, Εικ.[3.35], Εικ[3.36].



Εικ.[3.35]: Στήριξη Ταλαντωτή, σημεία α, β, γ



Εικ.[3.36]: Στήριξη Ταλαντωτή, σημεία α, β, γ



## Κίνηση Ταλαντωτή

Την κίνηση στο σύστημα του ταλαντωτή και των πλεγμάτων την παρέχει ηλεκτροκινητήρας SIEMENS D-91056 Erlangen, ισχύος 2.95 BHP με μέγιστες στροφές στον άξονά του στις 1420RPM με ενσωματωμένο μειωτήρα Motonario Τύπου H 061 σχέσης μείωσης στροφών 1:2,57 .



Εικ.[3.37] Ηλεκτρομειωτήρας

## Παροχή Ενέργειας στον Ταλαντωτή

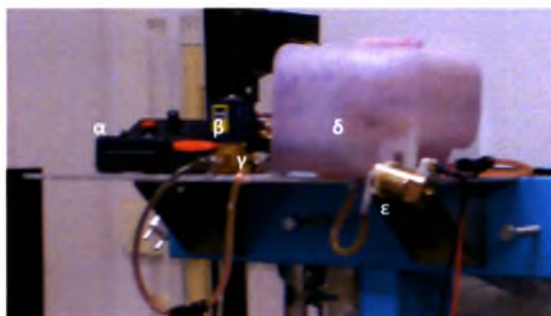
Η παροχή ενέργειας στον ταλαντωτή πραγματοποιήθηκε με τη σύνδεσή του σε μετατροπέα συχνότητας ηλεκτρικού (Inverter) Siemens Micromaster.



Εικ.[3.38] Inverter

### 3.1.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΡΥΠΟΥ

Το σύστημα έγχυσης ρύπου αποτελείται από ένα ρεζερβουάρ για την αποθήκευση του διαλύματος του ρύπου, από αντλία μικρής ισχύος στα 12 Volt, από 2 συστήματα σωληνώσεων καθώς κι από μια διάταξη για την ισότροπη εκτόξευση της ρυπογόνου ουσίας. Η διάταξη έχει την ικανότητα να εκτοξεύει το διάλυμα του ρύπου κατά παλμό και κατά συνεχή τρόπο. Τον παλμό τον καθορίζει ηλεκτροβάννα σε σύνδεση με προγραμματιζόμενο διεγέρτη (Μαρακάκης 2004)

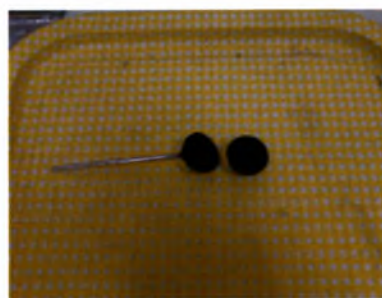


Εικόνα[3.39] α: Προγραμματιζόμενος διεγέρτης  
β: Ηλεκτροβάννα Τύπου ZA30A V24 50Hz 14VA  
γ: Χειροκίνητος διακόπτης για συνεχή ροή με bypass ηλεκτροβάννας  
δ: Ρεζερβουάρ Ρύπου  
ε: Αντλία Εκτόξευσης Ρύπου

Για την ισότροπη εκτόξευση ρύπου αρχικά κατασκευάστηκε ένοσφαιρη σφαίρα διαμέτρου 24mm. Αφού τρυπήθηκε με οπές  $\varnothing 1\text{mm}$ , πληρώθηκε με σφαιρίδια διαμέτρου 1,5mm. Στη συνέχεια συνδέθηκε με ανοξειδωτο σωληνάκι  $\varnothing 3\text{mm}$  κι επομένως με το υπόλοιπο σύστημα έγχυσης. Το σύστημα έγχυσης στηριζόταν σε σωλήνα  $\varnothing 5,5\text{mm}$  ο οποίος κατέληγε σε μαγνήτη. Τέλος, ο μαγνήτης με το σύστημα στερεώθηκε σε μεταλλική πλάκα. Η δοκιμή του δεν μας επέτρεψε τη χρησιμοποίησή του κατά την πειραματική διαδικασία, καθώς αυτό ρηγματώθηκε και τελικά κατέρρευσε. Παρακάτω ακολουθούν εικόνες με το αρχικό σύστημα και την τελική του κατάρρευση.



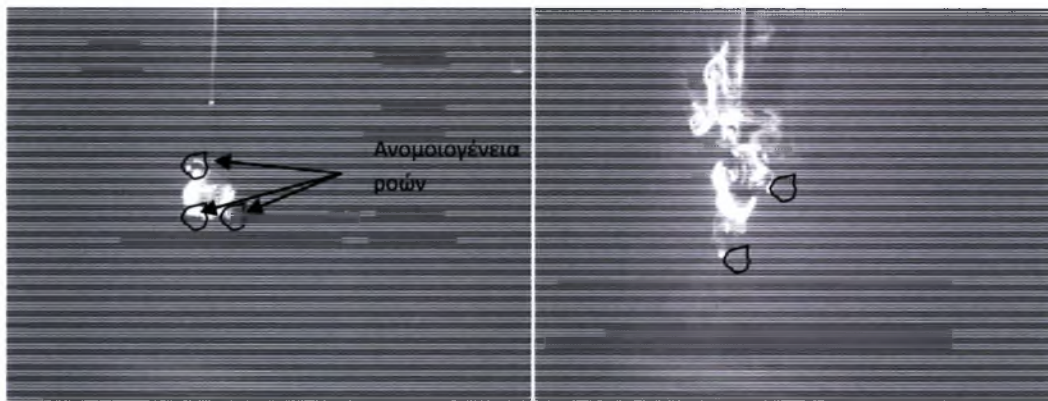
Εικ.[3.40] Σφαίρα με ρήγμα



Εικ.[3.41] Κατάρρευση Σφαίρας.

Κατά τις δοκιμές παρουσιάστηκαν επίσης προβλήματα. Ο ρύπος δεν απελευθερωνόταν ισοτρόπως και ειδικά μετά από την πρώτη του εφαρμογή όπου

τα σφαιρίδια στο εσωτερικά του άρχιζαν να διαβρώνονται με σκοπό την έμφραξη των οπών του. Επίσης οι οπές δεν κατάφεραν να είναι ακριβώς όλες στο ίδιο μέγεθος εξ' αιτίας της αδύνατης στερέωσης της σφαίρας σε σταθερό σημείο. Ένα ακόμα σοβαρό πρόβλημα ήταν η κατανομή τους, δεν ήταν δυνατόν οι οπές να ακολουθούσαν επ' ακριβείας τροχιές μεσημβρινών και ισημερινών.



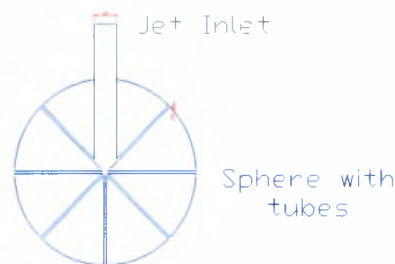
Εικ.[3.41] Ανομοιογένεια Έκλυσης

Εικ.[3.42] Αποτέλεσμα Ανομοιογένειας Έκλυσης

Η δεύτερη ιδέα ήταν να κατασκευαστεί και να τρυπηθεί σφαίρα ίδιας ή και μικρότερης διαμέτρου. Ένα μοντέλο της είναι το εξής παρακάτω:



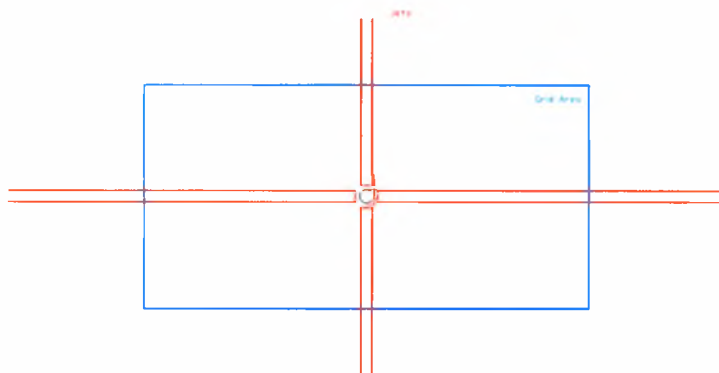
Εικ.[3.43α] Μοντέλο Σφαιριδίου Έκλυσης



Εικ.[3.43β] Μοντέλο Σφαιριδίου Έκλυσης

Οι μικρότερες οπές αντιπροσωπεύουν τα μικροτζέτ της εκτόξευσης ρύπου και η μεγαλύτερη συνεισφέρει στη στερέωση του ανοξειδωτου σωλήνα  $\varnothing 3\text{mm}$ . Οι οπές που θα διανοιγόταν ήταν της τάξης των 100 οπών. Εξ' αιτίας της απουσίας μηχανής CNC που θα βοηθούσε σε αυτή τη διαδικασία, και του υψηλού κόστους της κατασκευής, η ιδέα αυτή εγκαταλείφθηκε.

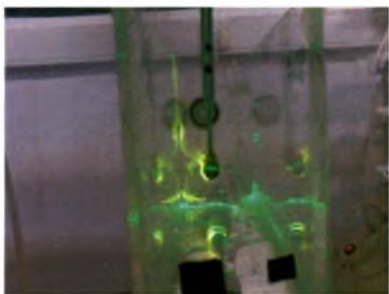
Μια ακόμα ιδέα ήταν η δημιουργία διάταξης από 4 αντιδιαμετρικά σε κατά μέτωπο διάταξη jets που θα εκτόξευαν το ρύπο. Η ιδέα επίσης εγκαταλείφθηκε εξ' αιτίας της πολυπλοκότητας και της αβεβαιότητας της ομαλής λειτουργίας του συστήματος. Παρακάτω φαίνεται η ιδέα σε σχέδιο AutoCad.



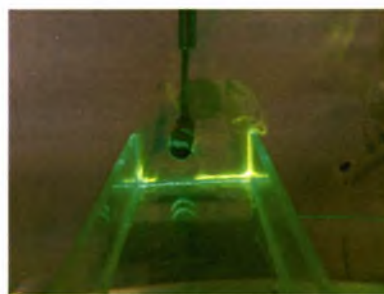
Εικ.[3.44] Διάταξη Αντιδιαμετρικών jet

Μια τέταρτη ιδέα για το σύστημα εκτόξευσης ρύπου ήταν πιο κοντά σε αυτό το οποίο τελικά κατασκευάστηκε. Δυο σωληνάκια  $\varnothing$  3mm θα κατέληγαν σε ένα ενιαίο, διάτρητο κατά μία περιφέρεια  $\varnothing$ 8,6mm.

Τελικά το σύστημα που κατασκευάστηκε αποτελούταν από ανοξείδωτο σωληνάκι διαμέτρου 3mm, στο οποίο στερεώθηκε καθέτως ένα άλλο διαμέτρου 8,6mm από κράμα χαλκού – κασσίτερου, μήκους 30mm. Στην περιφέρεια του κάθετου σωλήνα ανοίχτηκε οπή διαμέτρου 3mm για την εισχώρηση του υπόλοιπου μέρους του συστήματος. Στερεώθηκε επίσης λεπτή σήτα με ανοίγματα 1mm και ο κενός χώρος του εσωτερικού του πληρώθηκε με σφουγγάρι για την ομοιογενή ροή του ρύπου. Τα δυο άκρα του κλείστηκαν με υποξειδική κόλλα. Κατά προσέγγιση αφέθηκε σχισμή πλάτους ενός χιλιοστού από όπου εκλύεται ο ρύπος ισοτρόπως. Το όλο σύστημα στερεώνεται με μαγνήτη σε μεταλλική πλάκα. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται το σύστημα έκλυσης του ρύπου.



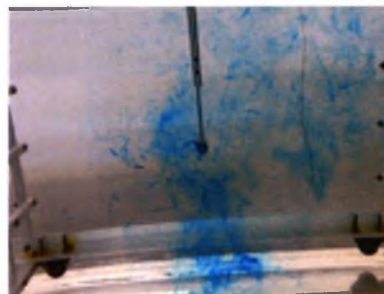
Εικ.[3.45] Σύστημα έκλυσης σε μεγάλη κοιλότητα



Εικ.[3.46] Σύστημα έκλυσης σε μικρή κοιλότητα

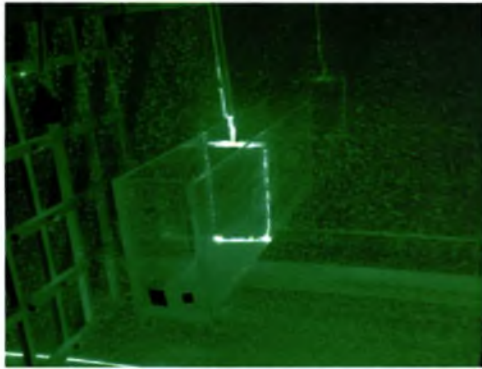


Εικ.[3.47]: Δοκιμή με methylene blue



Εικ.[3.48]: Δοκιμή με methylene blue

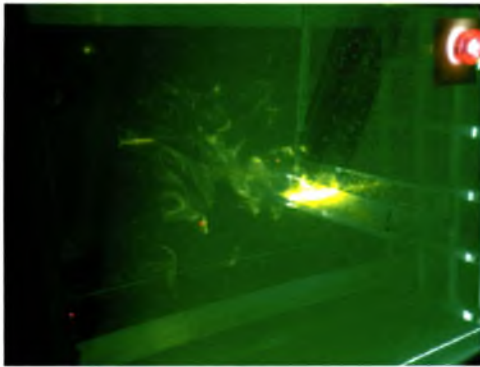
Το δεύτερο σύστημα εκπομπής ρύπου αφορούσε τη δημιουργία 2 αντιδιαμετρικών jets και την εισαγωγή τους στο χείλος της κάθε κοιλότητας με σκοπό σειρά πειραμάτων που αφορούσαν την παρατήρηση της συμπεριφοράς των δινών στο σημείο αυτό. Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται το σύστημα διπλών σωληνίσκων.



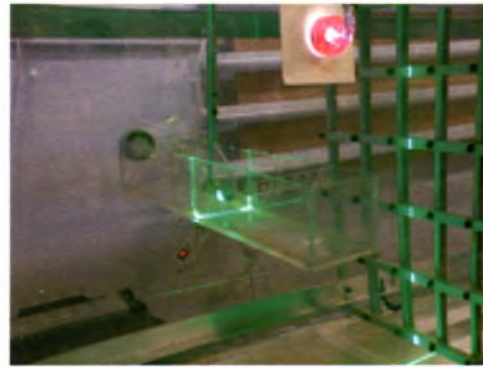
Εικ.[3.49] Διπλοί σωληνίσκοι στο χείλος της Κοιλότητας λίγο πριν την εκτόξευση ρύπου

### 3.1.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

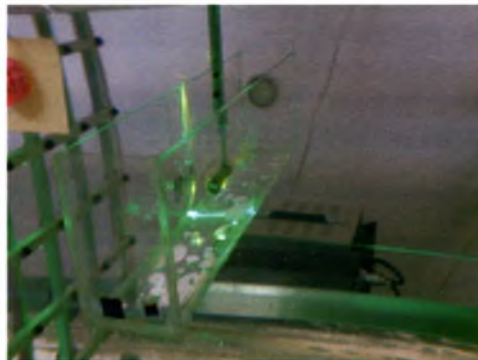
Για την προσομοίωση ροής σε οδικές χαράδρες χρησιμοποιήθηκαν τρεις κοιλότητες. Και οι τρεις καταλάμβαναν όλο τον εγκάρσιο χώρο ανάμεσα στα πλέγματα. Από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη κοιλότητα ο λόγος του πλάτους  $W$  προς το ύψος  $H$  τους είναι 2, 1 και  $1/2$ . Προηγούμενες έρευνες είτε σε πειραματικό στάδιο, είτε σε περιβάλλον υπολογιστικό χρησιμοποιήθηκαν κοιλότητες με λόγο  $W/H$ : 1, 1.5, 2, 2.4 και των JONG-JIN BAIK (1999),  $W/H$ : 0.5 και 1 των Α. KOVAR-PANSKUS. Οι περισσότερες έρευνες έχουν γίνει για οδικές χαράδρες με λόγο κατά κύριο λόγο μεγαλύτερον από αυτόν της μονάδας. Γι' αυτό το λόγο έγινε η επιλογή προσομοίωσης χαράδρας με λόγο μικρότερο της μονάδας. Είναι κατασκευασμένες από διάφανο υλικό Plexiglas το οποίο επιτρέπει την οπτικοποίηση της ροής. Οι τρεις κοιλότητες φαίνονται όπως παρακάτω.



Εικ.[3.50] Κοιλότητα με  $W/H=2$



Εικ.[3.51] Κοιλότητα με  $W/H=1$



Εικ.[3.52] Κοιλότητα με  $W/H=1/2$

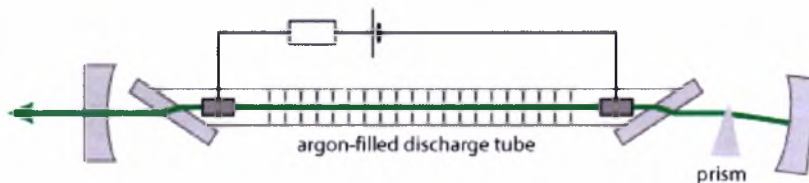
### 3.1.6 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

#### **Πειράματα LIF (Laser Induced Fluorescence)**

Τα στοιχεία για την οπτικοποίηση της ροής συμπεριλάμβαναν Laser για την παραγωγή της ακτίνας, 24εδρο scanner για την παραγωγή του πέπλου φωτός φθορίζουσα ουσία για το συγκεκριμένο μήκος κύματος που παράγει το laser, μια CCD κάμερα για την καταγραφή βίντεο καθώς και πρόγραμμα σε περιβάλλον Labview για την επεξεργασία του βίντεο για τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων.

#### **Argon Ion Laser – Rotating Prism**

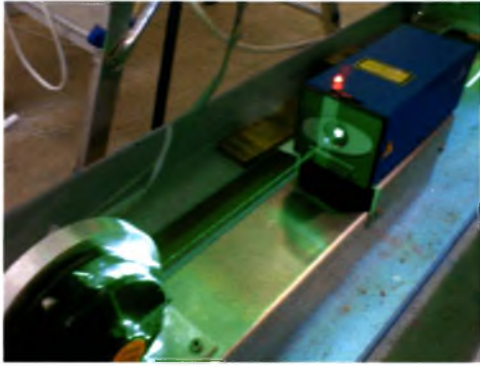
Τα laser τύπου ιόντων αργού είναι ισχυρά laser αερίου πολλαπλής ισχύος. Παράγουν υψηλής ποιότητας οπτική ακτίνα είτε πράσινη είτε μπλε. Το κύριο σημείο αυτού του laser είναι ένας σωλήνας γεμάτος με αέριο αργού στον οποίον προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση ανάμεσα σε 2 κοίλα ηλεκτρόδια και δημιουργεί πλάσμα υψηλής περιεκτικότητας σε ιόντα αργού ( $Ar^+$ ). Γύρω από το σωλήνα μπορεί επιπλέον να τοποθετηθεί σωληνοειδές το οποίο με τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, μπορεί να περιορίσει το πλάσμα αυξάνοντας έτσι την ενέργεια εξόδου. Παρακάτω φαίνεται η αρχή λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης laser.



Εικ.[3.53] ΠΗΓΗ: Encyclopedia of Laser Physics and Technology: Argon Ion Lasers

Μια τέτοια, τυπική συσκευή laser με σωλήνα μήκους 1m μπορεί να αποδώσει ισχύ των 10W ή 20W στην περιοχή του φάσματος του πράσινου στα 514,5nm καταναλώνοντας αρκετές δεκάδες kilowatts σε ηλεκτρική ενέργεια. Το argon ion laser που χρησιμοποιήθηκε είναι ισχύος 1.35Watts με μήκος κύματος στα 532nm και καθώς ήταν μικρής ενέργειας η ψύξη γινόταν με αέρα.

Για την παραγωγή πέπλου φωτός η ακτίνα laser προσέπιπτε σε περιστρεφόμενο 24εδρο πρίσμα έδρασης αέρα με περιστροφή στις 20000rpm κι έχει ειδικά αντανakλαστικά στρώματα για καλύτερη απόδοση. Στις επόμενες εικόνες φαίνονται η διάταξη laser – prism καθώς και οι συσκευές που παρείχαν την ενέργεια σε αυτά.



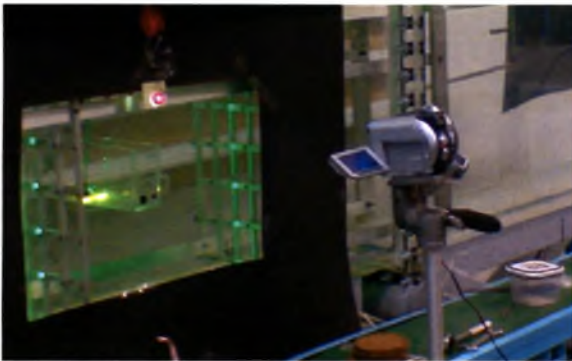
Εικ.[3.54] Ion Argon Laser – Prism



Εικ.[3.55] Τροφοδοτικά: Laser και Prism

### CCD Camera

Για την καταγραφή της οπτικοποίησης χρησιμοποιήθηκε CCD camera τύπου CANON dvd camera στα 25fps ταχύτητας κλείστρου στα 2ms.



Εικ.[3.56] CCD camera

### Πειράματα Μέτρησης Συμπεριφοράς Αλατότητας

Για την επιβεβαίωση της συμπεριφοράς των δινών στο χείλος της κάθε κοιλότητας εκτελέστηκε μια δεύτερη σειρά πειραμάτων με μέτρηση αλατότητας. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν μέτρησης αγωγιμότητας – θερμοκρασίας: Microscale Conductivity Temperature Instrument Model 125 της PME.

Είναι σχεδιασμένο για τη μέτρηση θερμοκρασίας και αγωγιμότητας υδατικών διαλυμάτων τα οποία περιέχουν ιόντα. Παρέχει αναλογική έξοδο ρεύματος  $\pm 5V$  η οποία είναι συνάρτηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας των διαλυμάτων αυτών. Χρησιμοποιείται σε κινούμενα διαλύματα στα οποία η απόκριση του μετρητικού είναι πρωτεύουσας σημασίας όπως και στην περίπτωση των πειραμάτων που εκτελούνται στα πλαίσια της παρούσας έρευνας. Σημαντικό ρόλο παίζει η γείωση των συστημάτων λειτουργίας και των οργάνων μέτρησης για την παρούσα λήψη πληροφοριών του διαλύματος. Θα πρέπει να υπάρχει γείωση στα υπάρχοντα συστήματα για την αποφυγή θορύβου στο μετρητικό όργανο.





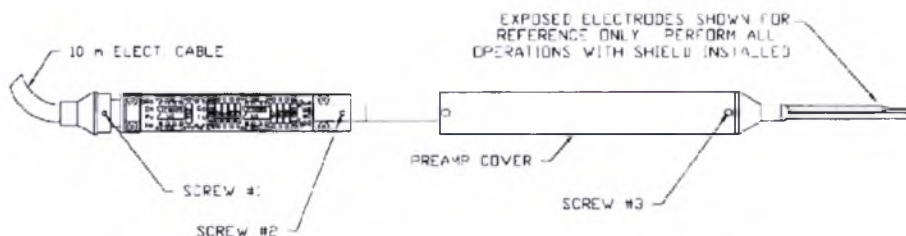
Παρακάτω παρατίθενται ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά του καθώς και φωτογραφίες που φαίνεται η διάταξη του αισθητήρα θερμοκρασίας – αγωγιμότητας καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία που το συνοδεύουν.

CONDUCTIVITY	
Measurement equation	$V_o = G * C + V_{off}$
8 hour calibration stability	Better than 1% of C reading
Time response	-3db at approx. 800 hz
Spatial response	-3db at approx. 4 cyc/cm
Noise	< 1mV RMS 10 Hz to 1 kHz
Output voltage range	+/- 5 volts
Linear conductivity range	0.5 to 800 mS/cm

Εικ.[3.57] ΠΗΓΗ: PME, Microscale Temperature – Conductivity Instrument, Operator' s Manual

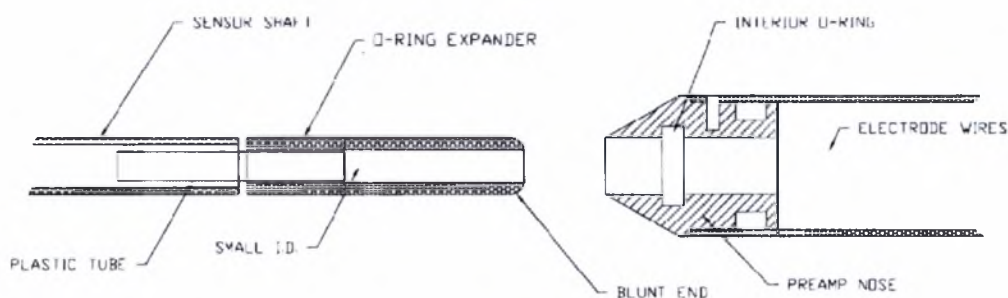
TEMPERATURE	
Measurement equation	$V_o = G \exp (A+B/T) + V_{off}$
8 hour calibration stability	Better than 0.01 deg C
Time response	Approx. 7E-3 seconds
Noise	< 1mV RMS 10 Hz to 200 Hz
Output voltage range	+/- 5 volts
Temperature range	-10 to 100 deg C

Εικ.[3.58] ΠΗΓΗ: PME, Microscale Temperature – Conductivity Instrument, Operator' s Manual  
Πίνακας με τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας του οργάνου



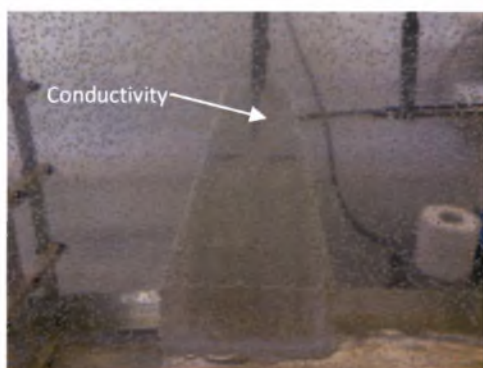
Εικ.[3.59] ΠΗΓΗ: PME, Microscale Temperature – Conductivity Instrument, Operator' s Manual

Σχεδιάγραμμα του αισθητήρα θερμοκρασίας – αγωγιμότητας

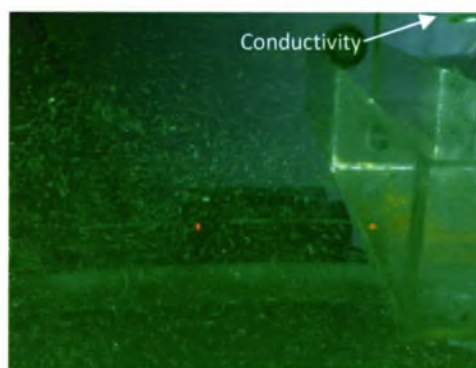


Εικ.[3.60] ΠΗΓΗ: PME, Microscale Temperature – Conductivity Instrument, Operator' s Manual  
Σχεδιάγραμμα του αισθητήρα θερμοκρασίας – αγωγιμότητας, λεπτομέρειά του

Ακολουθούν φωτογραφίες του αισθητήρα καθώς και των συσκευών λειτουργίας του.



Εικ.[3.61] Αισθητήρας Αγωγιμότητας – Θερμοκρασίας



Εικ.[3.62] Laser – Αισθητήρας Αγωγιμότητας – Θερμοκρασίας



Εικ.[3.63] Τροφοδοτικό και Μετατροπέας Τάσης από 240V@50Hz στα 120V@60Hz



Εικ.[3.64] Αισθητήρας Αγωγιμότητας – Θερμοκρασίας

Η έξοδος του αγωγιμόμετρου καταλήγει με διακλάδωση στον παλμογράφο για την επιβεβαίωση της λήψης μέτρησης από το πείραμα που εκτελείται καθώς και στην ψηφιακή κάρτα ανάλυσης σήματος που συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την εξαγωγή των αρχείων με τα στοιχεία του σήματος για την περαιτέρω ανάλυσή τους.



Εικ.[3.65] Ηλεκτρονικός Υπολογιστής Λήψης Δεδομένων



Εικ.[3.66] Παλμογράφος και συσκευή του conductivity temperature instrument

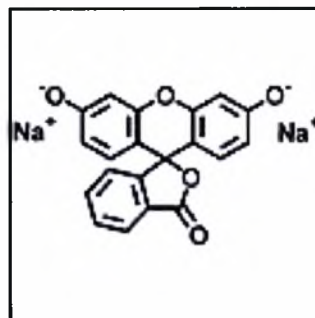
### 3.1.7 ΧΗΜΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### Rhodamine $C_{20}H_{10}O_5Na_2$

Για οπτικοποίηση με τη χρήση του laser ιόντων αργού χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα φλουορεσίνης 6G (fluorescein disodium salt) με χημικό τύπο  $C_{20}H_{10}O_5Na_2$  και μοριακό βάρος 376,28. Καθώς συναντάται με ακτινοβολία στα 532nm αυτή εκπέμπει στα 570nm. Παρακάτω φαίνεται η χημική ένωση της φθορίζουσας ουσίας που χρησιμοποιήθηκε.



Εικ.[3.67] Rhodamine



Εικ.[3.68]: Χημική Ένωση Rhodamine

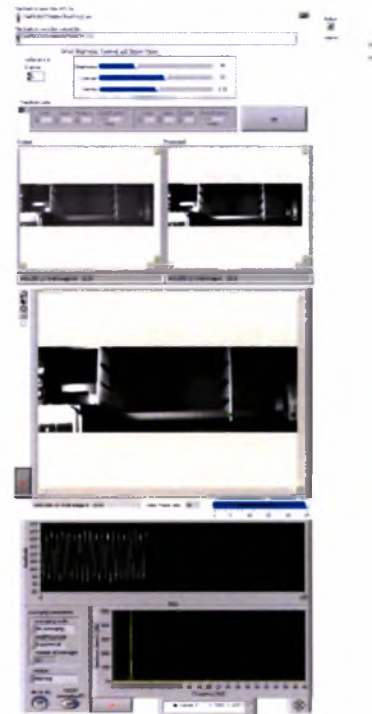
#### Αλάτι NaCl

Για την προσομοίωση ροών για διαφορετικές ποιότητες χρησιμοποιήθηκε διάλυμα χλωριούχου νατρίου σε τρεις διαφορετικές περιεκτικότητες. Οι περιεκτικότητες του αλατιού φαίνονται αναλυτικά στην πειραματική διαδικασία.

### **3.1.8 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Η ανάλυση βίντεο έγινε σύμφωνα με το πρόγραμμα

Calculate\_oscillator\_velocity\_v2.vi σε περιβάλλον Labview του κ. Γ. Κωνσταντά. Το πρόγραμμα επεξεργάζεται βίντεο υπολογίζοντας την ένταση των pixels σε περιοχή του ορισμένη από το χρήστη σε κάθε καρέ του. Τα αποτελέσματα βγαίνουν σε μορφή αρχείου ορισμένο επίσης από το χρήστη. Κατά την επεξεργασία του βίντεο το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να δείχνει επί τόπου το σήμα της έντασης των εικονοστοιχείων (Pixels) που προκύπτουν, καθώς κι έχει τη δυνατότητα να κάνει την ανάλυση fourier του παραγόμενου σήματος δίνοντας τη/ις συχνότητα/ες από διάφορα υπο/συνημίτονα του σήματος.



Εικ.[3.69]: Λογισμικό Labview

## 3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### 3.2.1 ΤΑΛΑΝΤΩΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

Για τη βαθμονόμηση ο ταλαντωτικός μηχανισμός τέθηκε σε κίνηση. Πραγματοποιήθηκε βιντεοσκόπηση σταθερού σημείου επάνω στη διάταξη των πλεγμάτων για κάθε συχνότητα λειτουργίας χωριστά, ξεκινώντας από 3Hz ως 16Hz με βήμα 1Hz. Στη συνέχεια το βίντεο που προέκυψε αναλύθηκε με το πρόγραμμα 'Calculate\_oscillator\_velocity\_v2. Από την ανάλυση προέκυψε το σήμα του βίντεο και τέλος βρέθηκε από αυτό η συχνότητα ταλάντωσης. Για την επιβεβαίωση του σήματος από το βίντεο του μηχανισμού, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της περιφερειακής ταχύτητας της κυκλικής πλάκας του ταλαντωτικού μηχανισμού. Για τη βαθμονόμηση αυτή χρησιμοποιήθηκε συσκευή ταχύμετρου. Μετρήθηκε η περιφερειακή ταχύτητα του δίσκου του ταλαντωτή και κατόπιν βρέθηκε η συχνότητα ταλάντωσης. Παρακάτω φαίνεται αναλυτικά η διαδικασία αυτή.

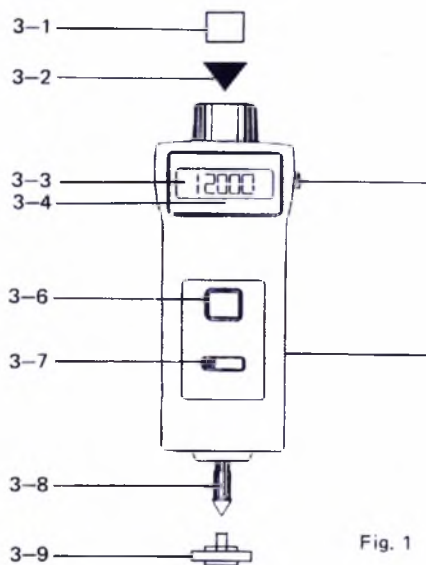


Fig. 1

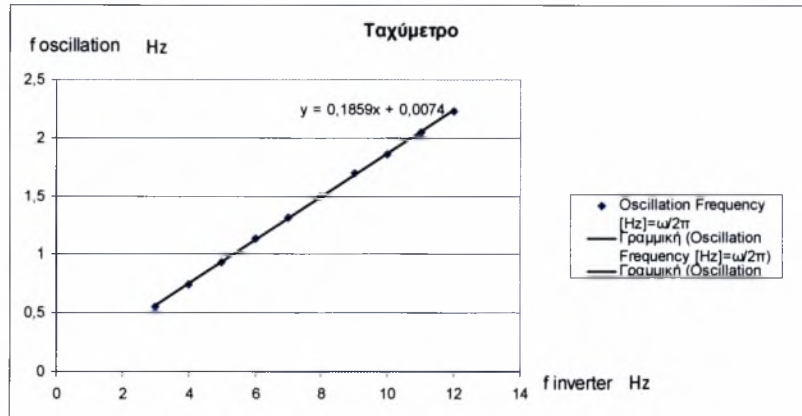
Εικ.[3.70] Ταχύμετρο



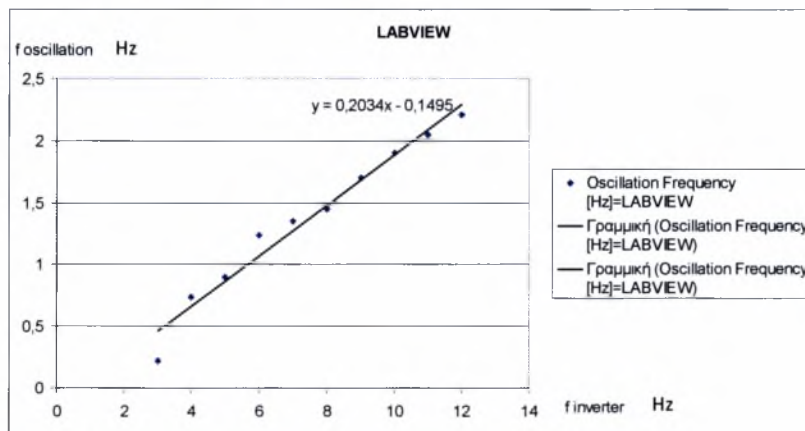
Εικ.[3.71] Ταχύμετρο

Η μέθοδος μέτρησης της συχνότητας με το ταχύμετρο πραγματοποιήθηκε ως εξής: Μετρήθηκε η ταχύτητα του έκκεντρου σε m/min, μετατράπηκε σε m/sec, και σε γωνιακή ταχύτητα ως rad/sec μέσω της σχέσης  $u=\omega/r$  και κατόπιν η γωνιακή πλέον ταχύτητα μετατράπηκε μέσω της σχέσης  $f=\omega/2\pi$  σε συχνότητα περιστροφής, όπου  $f$  η συχνότητα.

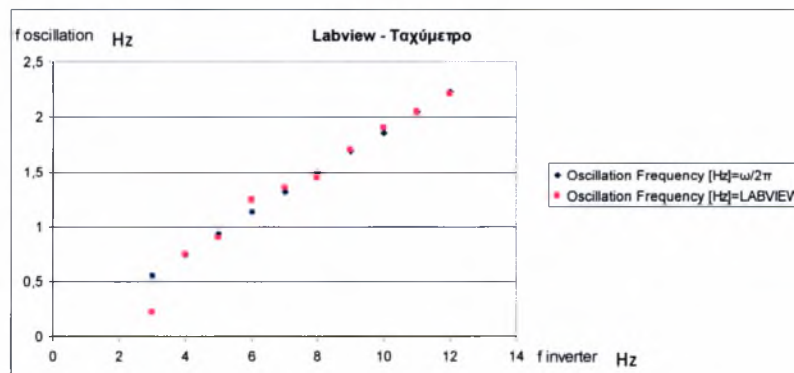
Παρακάτω παρατίθενται τρία γραφήματα με τη βαθμονόμηση του ταλαντωτή: 2 χωριστά γραφήματα για την κάθε μέθοδο βαθμονόμησης καθώς κι ένα συγκριτικό των 2 αυτών μεθόδων.



Εικ.[3.72] Συχνότητα σύμφωνα με ταχύμετρο



Εικ.[3.73] Συχνότητα σύμφωνα με πρόγραμμα Labview



Εικ[3.74]: Συχνότητα σύμφωνα με πρόγραμμα Labview και Ταχύμετρο

Παρατηρώ πως το ταχύμετρο δίνει πιο αξιόπιστη πληροφορία σχετικά με το πρόγραμμα Labview. Η συμπεριφορά του ταχύμετρου είναι πιο κοντά στη γραμμική και φυσιολογική εξέλιξη Συχνότητας Inverter - Συχνότητας Ταλάντωσης. Επίσης παρατηρώντας το συγκριτικό Γράφημα [3], το labview στις μικρές συχνότητες ταλάντωσης έχει αρκετά μεγάλη απόκλιση από τις μετρήσεις με το ταχύμετρο. Ως

βαθμονομημένη συχνότητα ταλάντωσης επιλέγω αυτή που προκύπτει από το ταχύμετρο. Η σχέση που εξάγεται είναι η  $y = 0,1859x + 0,0074$ . Όπου  $y$  είναι η συχνότητα ταλάντωσης, κι όπου  $x$  η συχνότητα λειτουργίας στον Inertec.

### **3.2.2. ΑΝΤΛΙΑ**

Για την εκπομπή ρύπου χρησιμοποιήθηκε σύστημα ρεζερβουάρ – αντλίας. Η ποσότητα ρύπου που εκτόξευόταν μετρήθηκε ως εξής:

- Μοντέλο μικρού σωλήνα:
  - ✓ Αντλία με ανοιχτή παροχή στα 10 sec:
  - ✓ 5Volts, εκτόξευση 2.18mL ρύπου
  - ✓ 10Volts, εκτόξευση 5.14mL ρύπου
- Μοντέλο σωληνίσκων jets
  - ✓ Αντλία με βαρύτητα, εκτόξευση 16.2mL ρύπου. Η υψομετρική διαφορά του ρεζερβουάρ του ρύπου με το σημείο έκλυσής του είναι στα 450mm.
  - ✓ Αντλία με ανοιχτή παροχή στα 10 sec:
  - ✓ 5Volts, εκτόξευση 46.5mL ρύπου
  - ✓ 10Volts, εκτόξευση 103mL ρύπου

### **3.2.3 ΔΙΑΛΥΜΑ ΡΟΔΑΜΙΝΗΣ**

Οι πυκνότητες των διαλυμάτων της ροδαμίνης που έγινε έκλυση στις κοιλότητες ήταν οι εξής παρακάτω.

Αλατότητα 1: Πυκνότητα=1003,3kg/m<sup>3</sup>

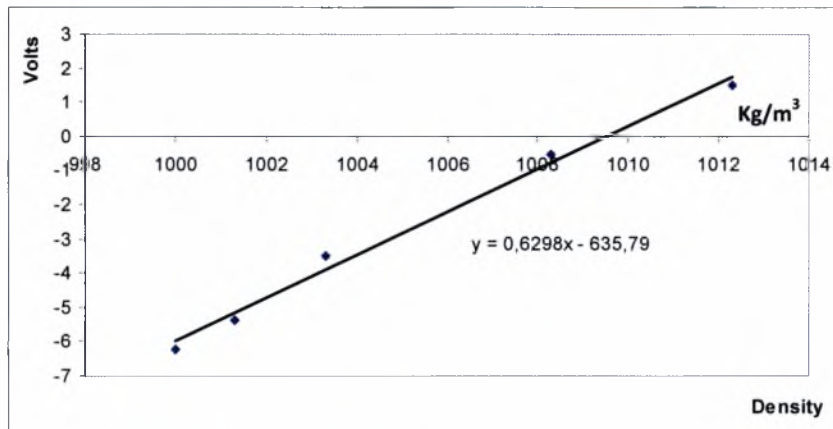
Αλατότητα 2: Πυκνότητα=1006,6kg/m<sup>3</sup>

Αλατότητα 3: Πυκνότητα=1013,2kg/m<sup>3</sup>

### **3.2.4 ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΟ**

Η βαθμονόμηση του αγωγιμόμετρου ακολουθήθηκε ως εξής: Όπως και για την εύρεση της πυκνότητας των διαλυμάτων της ροδαμίνης, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, πληρώθηκε δοκιμαστικός σωλήνας με 300mL καθαρό νερό, στη συνέχεια προστέθηκε ποσότητα αλατιού και ζυγίστηκε το διάλυμα. Μετά διαιρώντας τη μάζα (βάρος) του διαλύματος με τον όγκο του, βρέθηκε η πυκνότητά του και κατόπιν ακολουθήθηκε μέτρηση με το αγωγιμόμετρο.

Το γράφημα της βαθμονόμησης φαίνεται παρακάτω:



Εικ.[3.78] Βαθμονόμηση αγωγιμόμετρου

Φαίνεται ξεκάθαρα η γραμμική συμπεριφορά της πυκνότητας με την έξοδο της διαφοράς δυναμικού από το αγωγιμόμετρο. Το διάλυμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε πρόσεξα ώστε να μην φθάσει σε κορεσμό. Η σχέση η οποία προέκυψε από τη βαθμονόμηση είναι η  $y=0,6298x-635,79$ .



## **4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

### **4.1 LASER INDUCED FLUORESCENCE (LIF)**

Τα πειράματα εκτελέσθηκαν για 3 αλατότητες του διαλύματος της φλουορεσίνης. Τα διαλύματα είναι, χωρίς αλάτι, με μέτρια αλατότητα, καθώς και με δυνατή αλατότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ονομασίες των εκάστοτε αλατοτήτων που χρησιμοποιούνται:

- Αλατότητα 0: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$
- Αλατότητα 1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006.6\text{kg/m}^3$
- Αλατότητα 2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013.2\text{kg/m}^3$

Οι συνθήκες ταλάντωσης ορίστηκαν σύμφωνα με την τελική κατασκευή των πλεγμάτων και του ταλαντωτικού μηχανισμού, εξ' αιτίας μέτρων ασφαλείας που ελήφθησαν για την αποφυγή πιθανού ατυχήματος. Άλλος ένας περιορισμός ήταν η ισχύς που απέδιδε ο μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (inverter) ο οποίος μας περιόριζε στα  $1.8\text{kW}$  αντί των  $2.2\text{kW}$  που ήταν η ισχύς του κινητήρα. Οι συχνότητες ταλάντωσης των πλεγμάτων εφαρμόστηκαν ως εξής:

$F_{INV}$ [Hz]	$F_{OSC}$ [Hz]
4	0,742723068
8	1,499593242
12	2,228169203
16	2,9818

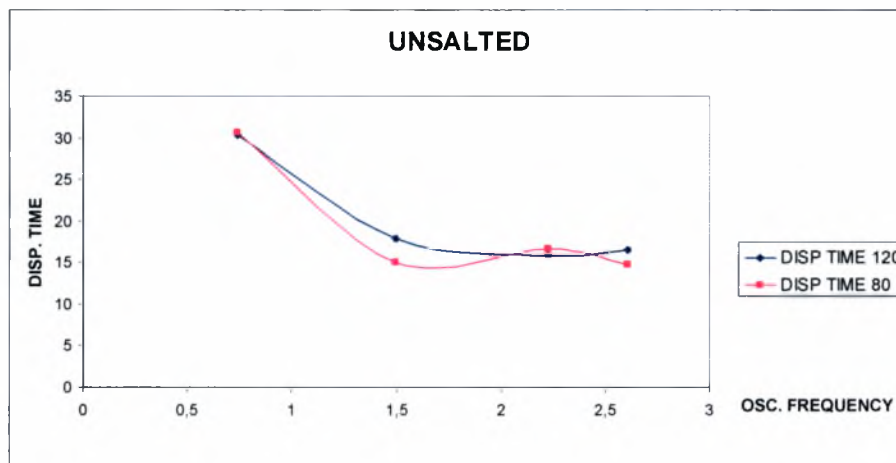
Πίνακας 3: Πίνακας μετατροπής συχνότητας στον Inverter σε συχνότητα ταλάντωσης

Όπου  $F_{inv}$ , είναι η συχνότητα του Inverter κι όπου  $F_{osc}$  είναι η αποδιδόμενη συχνότητα ταλάντωσης από τον ταλαντωτικό μηχανισμό.

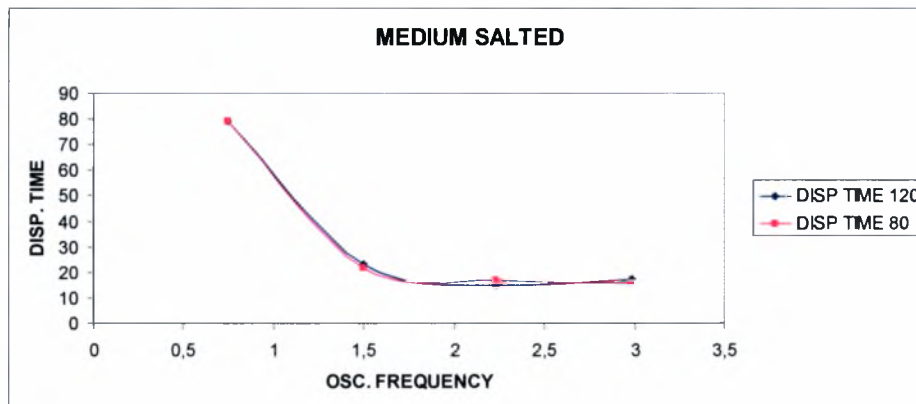
Ο χρόνος διάλυσης του ρύπου παρουσιάζεται μέσω γραφημάτων για τις τρεις αλατότητες, για εύρη ταλάντωσης  $120\text{mm}$  και  $80\text{mm}$  και στις προαναφερθείσες συχνότητες.

## Ορθογώνια κοιλότητα, $W/H=2$

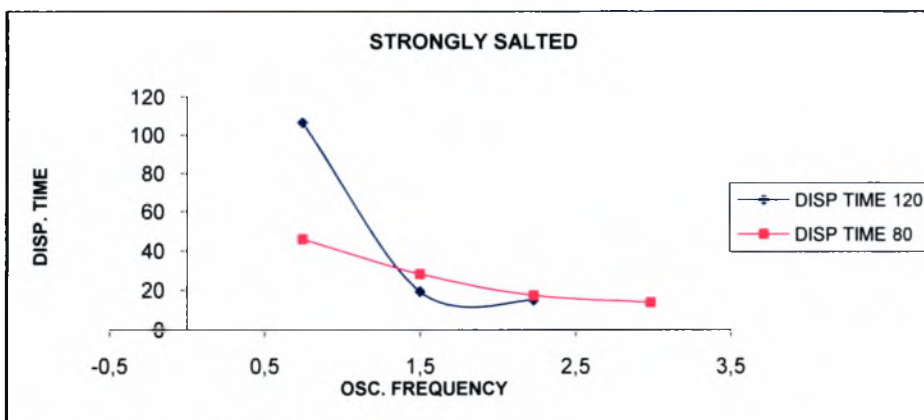
Παρακάτω παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της κοιλότητας με λόγο πλάτους προς ύψους  $W/H=2$ . Η διάσταση του πλάτους είναι διπλάσια από αυτή του ύψους. Παρουσιάζονται οι χρόνοι διάλυσης για κάθε αλατότητα και για κάθε εύρος ταλάντωσης.



Γράφημα 4.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003,3\text{kg/m}^3$

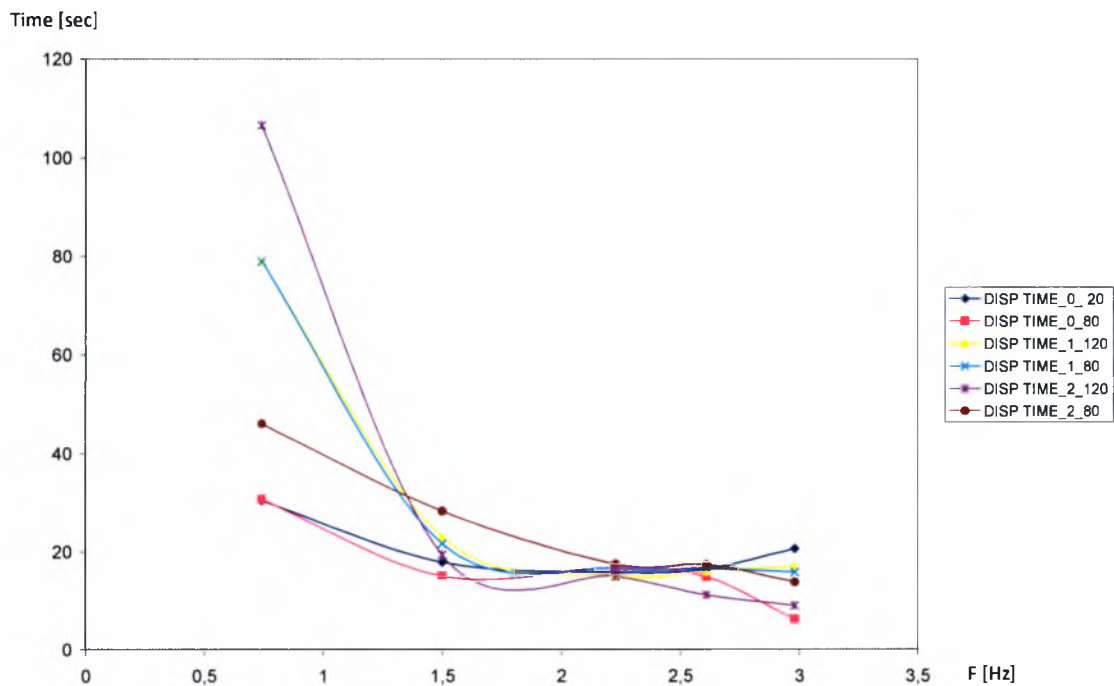


Γράφημα 4.2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006,6\text{kg/m}^3$



Γράφημα 4.3: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013,2\text{kg/m}^3$

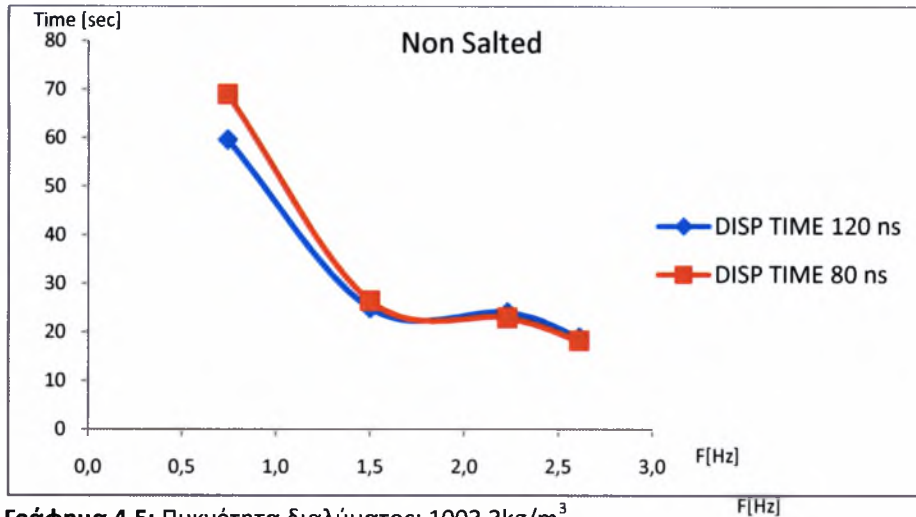
Παρατηρείται το εξής: Μελετώντας τα διαγράμματα διαπιστώνει κανείς ότι για μικρότερο εύρος ταλάντωσης – κι άρα για μικρότερη ένταση της τύρβης – είναι δυνατόν ο χρόνος διάλυσης του ρύπου να είναι μικρότερος. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας φαινομένων συντονισμού εντός του χώρου των πλεγμάτων και γενικότερα της δεξαμενής στην οποία εκτελέσθηκαν τα πειράματα. Η γενική συμπεριφορά που παρουσιάζεται είναι η εκθετική μείωση του χρόνου διάλυσης από μεγαλύτερες προς μικρότερες συχνότητες ταλάντωσης τείνοντας ασυμπτωτικά στην ευθεία των 10sec όπου είναι ο χρόνος έκλυσης του ρύπου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι με τη μεγαλύτερη ένταση της τύρβης αν είχαμε πηγή ρύπου όπου εξέπεμπε στιγμιαία ποσότητα ρύπου, δηλαδή  $dV \rightarrow 0$  τότε ο χρόνος διάλυσης θα ήταν μηδενικός,  $dt \rightarrow 0$ . Παρακάτω παρατίθεται κι ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις συνθήκες ταλάντωσης.



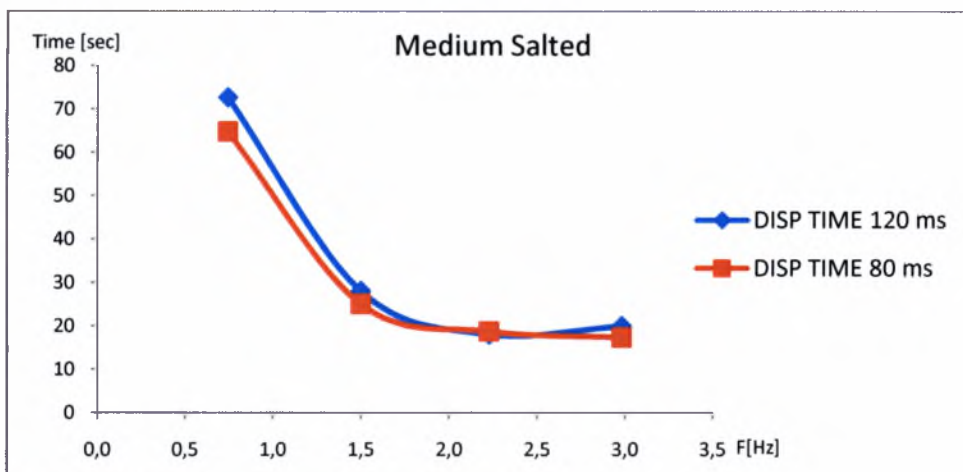
Γράφημα 4.4: Συγκεντρωτικό

## Τετραγωνική κοιλότητα, $W/H=1$

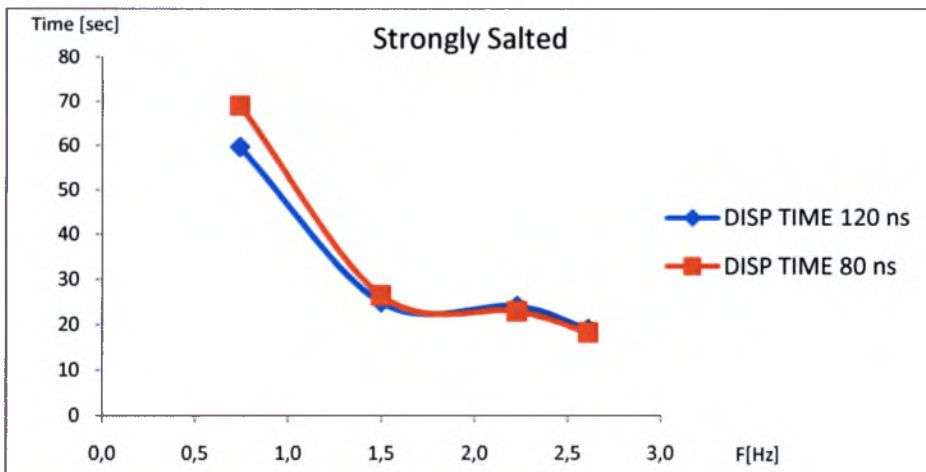
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χρόνοι διάλυσης για την τετραγωνική κοιλότητα στις ακριβώς ίδιες συνθήκες ταλάντωσης πυκνότητας ρύπου.



Γράφημα 4.5: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003,3\text{kg/m}^3$

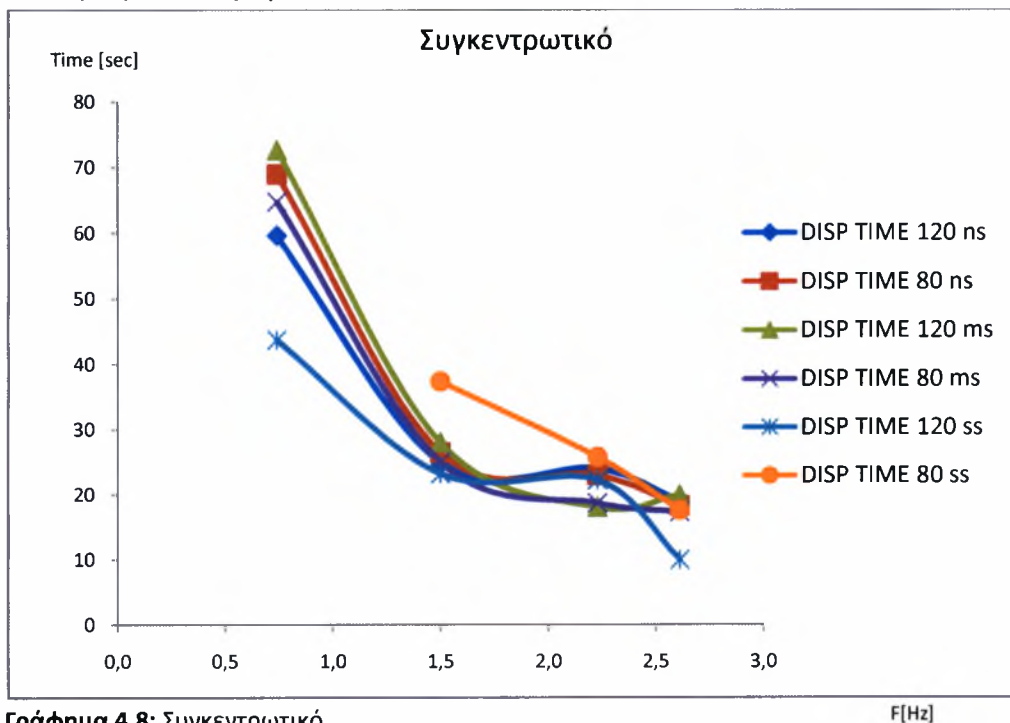


Γράφημα 4.6: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006,6\text{kg/m}^3$



Γράφημα 4.7: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013,2\text{kg/m}^3$

Η γενικότερη συμπεριφορά είναι η μείωση του χρόνου διάλυσης τείνοντας επίσης ασυμπτωτικά στα 10sec που είναι η διάρκεια έκλυσης του ρύπου. Ο ρύπος με τη μεγαλύτερη πυκνότητα παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με τον πιο ελαφρύ ρύπο – δυνατή αλατότητα με μηδαμινή αλατότητα – παρουσιάζοντας αλλαγή στο ρυθμό διάλυσης κατά τη μείωση της έντασης της τύρβης, ενώ η μεσαία αλατότητα τείνει πιο ομαλά στα 10sec χωρίς αλλαγή της κλίσης της μείωσης της διάλυσης. Παρατηρείται επίσης η παρουσία του συντονισμού στο περιβάλλον της δεξαμενής αλλά αυτή τη φορά με μικρότερη ένταση και σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων. Σε αυτό το κομμάτι θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι δυνατόν να σχετίζεται η ομοιότητα της γεωμετρίας της κοιλότητας με το περιβάλλον της δεξαμενής και των πλεγμάτων. Αυτό διαπιστώνεται εύκολα από τη μορφή των γραφημάτων των χρόνων διάλυσης. Παρακάτω παρατίθεται επίσης συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις συνθήκες των πειραμάτων.

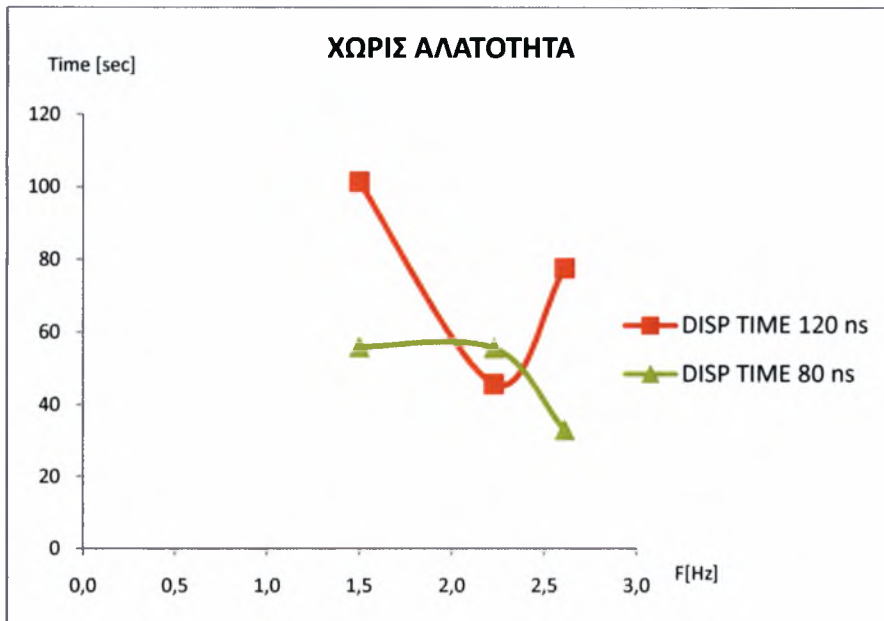


Γράφημα 4.8: Συγκεντρωτικό

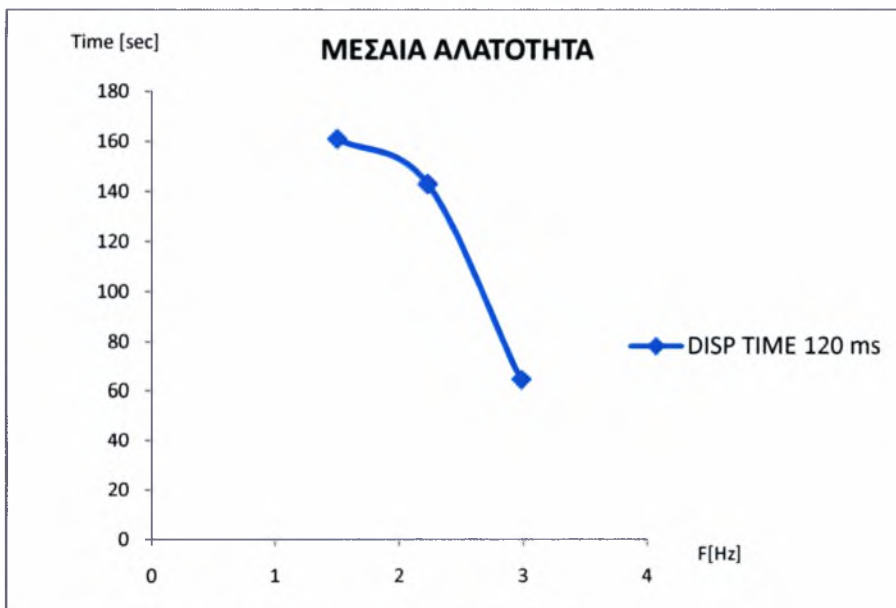
F [Hz]

## Ορθογώνια κοιλότητα, $W/H=1/2$

Για την προσομοίωση της ροής σε οδική χαράδρα χρησιμοποιήθηκε τρίτη κοιλότητα ορθογωνικής διατομής με λόγο  $W/H=1/2$ . Όπως θα φανεί και από τα διαγράμματα που εξήχθησαν, η διάλυση του ρύπου ήταν πολύ αργή ή σχεδόν μηδαμινή.



Γράφημα 4.9: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003,3\text{kg/m}^3$

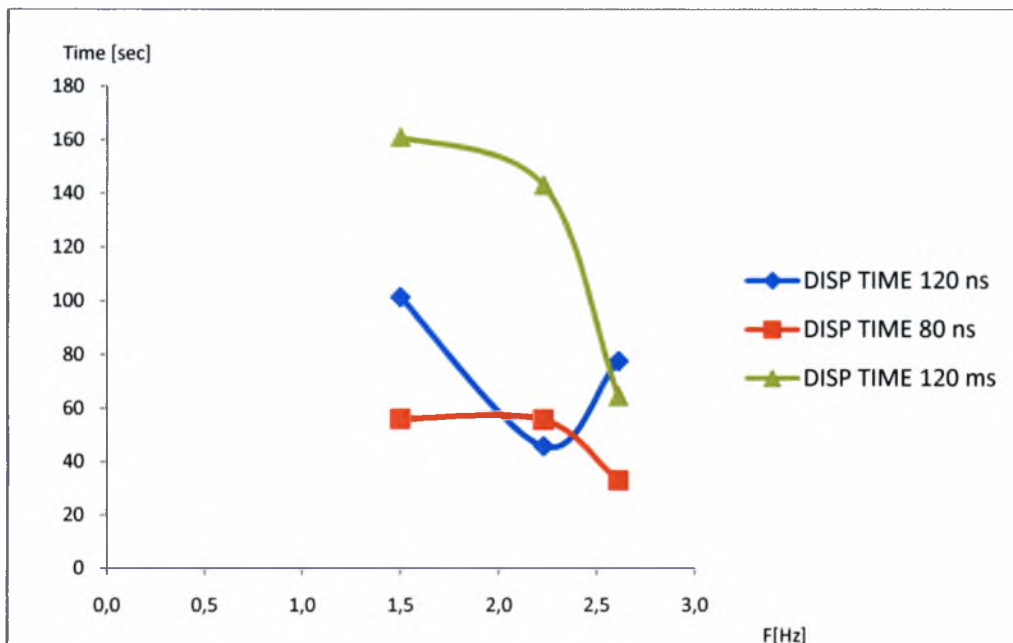


Γράφημα 4.10: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006,6\text{kg/m}^3$

Δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα για πυκνότητα ρύπου στα  $1013,2\text{kg/m}^3$  καθώς ο χρόνος διάλυσης ήταν πολύ μεγάλος – σχεδόν ο ρύπος παρέμενε ανέπαφος – και ξεπερνούσε κατά πολύ τις δυνατότητες λήψης κι επεξεργασίας των βίντεο των πειραμάτων.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα για ρύπο μηδενικής αλατότητας, είναι εμφανές το φαινόμενο του συντονισμού του συνόλου του περιβάλλοντος της δεξαμενής που υπήρξε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Αυτό είναι απολύτως λογικό εξ' αιτίας του μεγέθους της κοιλότητας που επηρέαζε κατά πολύ το ροϊκό πεδίο ανάμεσα στα πλέγματα, το οποίο με τη σειρά του επηρέασε τη διάλυση του ρύπου.

Παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα για τους χρόνους διάλυσης που μπόρεσαν να αποτυπωθούν.



Γράφημα 4.11: Συγκεντρωτικό

Ένα γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από την παρατήρηση των ανωτέρω διαγραμμάτων, είναι ότι με την αύξηση της συχνότητας της ταλάντωσης ο χρόνος διάλυσης μειώνεται άλλοτε παραβολικά κι άλλοτε εκθετικά. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν οι ορθογώνιες κοιλότητες, η μία με λόγο  $W/H=2$  και η άλλη με λόγο  $W/H=1/2$ . Και στις δυο παρατηρήθηκε αλλαγή της κλίσης του ρυθμού διάλυσης του ρύπου. Στην τελευταία κοιλότητα με λόγο  $1/2$  η αλλαγή αυτή είναι πιο έντονη λόγω μεγαλύτερης παρουσίας του φαινομένου του συντονισμού. Στην ορθογώνια κοιλότητα με λόγο  $W/H=1$ , παρατηρήθηκε επίσης συντονισμός, σαφώς μικρότερης έντασης από τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, αν και η γεωμετρία της συνέπιπτε με αυτήν των πλεγμάτων και του συστήματος της δεξαμενής.

Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα ίδια πειράματα εισάγοντας διάταξη μετρητικού με βάση την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος των δοκιμών.

## 4.2. ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΟ

Τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν αναφέρονται στα ίδια πειράματα με αυτά της φλουορεσίνης για τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Σκοπός αυτής της σειράς των πειραμάτων δεν είναι ένδειξη κατά πόσο γρήγορα ή αργά διαλύεται ο ρύπος. Σκοπός της είναι η ένδειξη της συμπεριφορά της διάλυσης του ρύπου καθώς και οι διακυμάνσεις του κατά την εξέλιξη του φαινομένου. Για τη λήψη των μετρήσεων εισάγουμε στο περιβάλλον των δοκιμών διάταξη αγωγιμομέτρου. Είναι δυνατόν να εισάγει σφάλματα κατά τη διάχυση και τη διασπορά του ρύπου καθώς δημιουργεί ένα νέο ροϊκό πεδίο γύρω του.

Όπως και πριν, έτσι κι εδώ τα διαλύματα είναι, χωρίς αλάτι, με μέτρια αλατότητα, καθώς και με δυνατή αλατότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ονομασίες των εκάστοτε αλατοτήτων που χρησιμοποιούνται:

- Αλατότητα 0: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$
- Αλατότητα 1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006.6\text{kg/m}^3$
- Αλατότητα 2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013.2\text{kg/m}^3$

Οι συνθήκες ταλάντωσης ορίστηκαν σύμφωνα με την τελική κατασκευή των πλεγμάτων και του ταλαντωτικού μηχανισμού. Πλέον των συγκεκριμένων συνθηκών που θα παρουσιαστούν παρακάτω δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστούν εξ' αιτίας μέτρων ασφαλείας που ελήφθησαν για την αποφυγή πιθανού ατυχήματος. Άλλος ένας περιορισμός ήταν η περιορισμένη ισχύς που απέδιδε ο μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (inverter) ο οποίος μας περιόριζε στα  $1.8\text{kW}$  αντί των  $2.2\text{kW}$  που ήταν η ισχύς του κινητήρα. Οι συχνότητες ταλάντωσης των πλεγμάτων εφαρμόστηκαν όπως παρακάτω:

FINV	FOSC
4	0,742723068
8	1,499593242
12	2,228169203
16	2,9818

Πίνακας 3: Πίνακας μετατροπής συχνότητας στον Inverter σε συχνότητα ταλάντωσης

Όπου  $F_{inv}$ , είναι η συχνότητα του Inverter κι όπου  $F_{osc}$  είναι η αποδιδόμενη συχνότητα ταλάντωσης από τον ταλαντωτικό μηχανισμό.

Τα εκτελεσθέντα πειράματα αναφέρονται στις 2 κοιλότητες λόγου  $W = \frac{1}{2}$  και 2. Επιπλέον εκτελέστηκε μια νέα σειρά πειραμάτων έκλυσης ρύπου με δυο αντιδιαμετρικούς σωλήνες ή αλλιώς με έκλυση ρύπου διπλού jet και για τις 2 κοιλότητες.



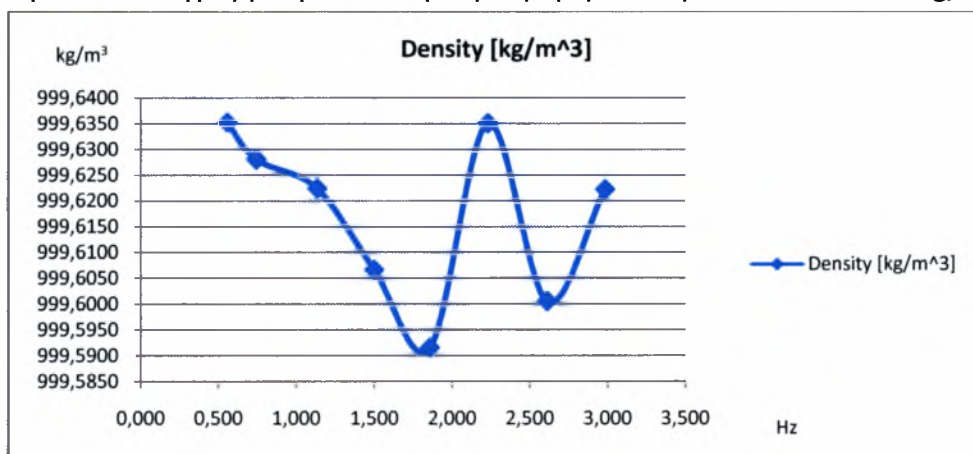
## CAVITY ME ΛΟΓΟ

W/H=2/1

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κοιλότητα με λόγο πλάτους προς εύρος 2 και για έκλυση ρύπου από **μονό σωληνάκι**. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι κι εδώ εκτελούνται τρεις σειρές πειραμάτων για μέση, δυνατή και εξαιρετικά δυνατή αλατότητα.

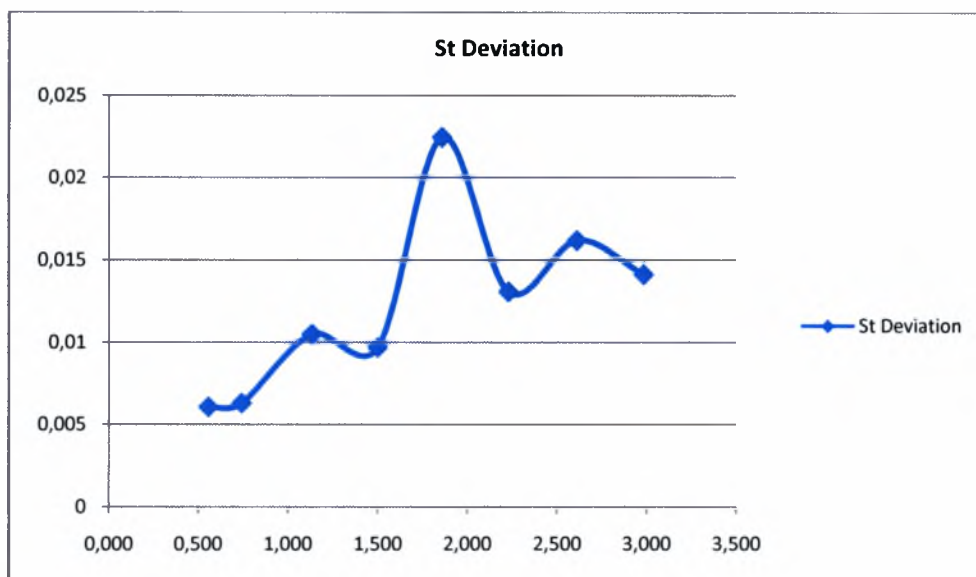
Η πρώτη αλατότητα είναι πυκνότητας διαλύματος  $1003.3\text{kg/m}^3$ . Στη συνέχεια η πυκνότητα που χρησιμοποιείται για το ρύπο είναι  $1006.6\text{kg/m}^3$  και καταλήγουμε όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις στην εξαιρετικά δυνατή αλατότητα στα  $1013.2\text{kg/m}^3$ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η συμπεριφορά του ρύπου στα  $1003.3\text{kg/m}^3$ .



Γράφημα 4.12.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$

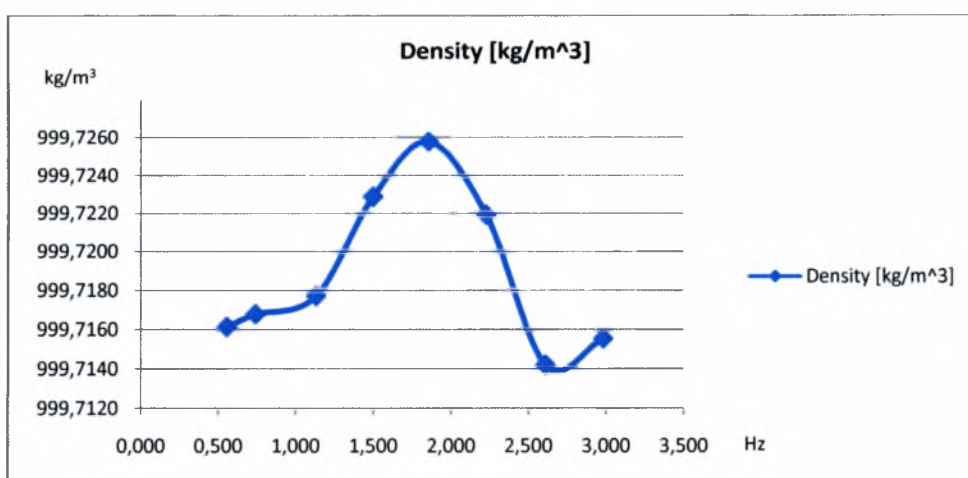
Η συμπεριφορά που παρατηρείται γι' αυτήν την περίπτωση είναι η εξής: Από τη συχνότητα ταλάντωσης των 0.557Hz μέχρι και τα 1.857Hz, ο ρύπος βγαίνει με μικρότερη μέση αλατότητα, που σημαίνει ότι η τύρβη εισχωρεί και διαλύει το ρύπο πριν αυτός βρεθεί στο ελεύθερο περιβάλλον της δεξαμενής. Στα 2.28Hz ο ρύπος δεν εξέρχεται με μικρότερη μέση αλατότητα όπως θα ήταν αναμενόμενο, αλλά με μεγαλύτερη μέση τιμή αλατότητας. Στη συνέχεια, στα 2.610Hz η μέση αλατότητα μειώνεται και πάλι για να αυξηθεί στα 2.982Hz. Το φαινόμενο του συντονισμού του περιβάλλοντος της δεξαμενής είναι και πάλι εμφανές. Για την ακριβέστερη ανάλυση της συμπεριφοράς αυτής, παρουσιάζεται κι ένα διάγραμμα τυπικής απόκλισης της αλατότητας συναρτήσει της ταλάντωσης.



Γράφημα 4.12.2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$

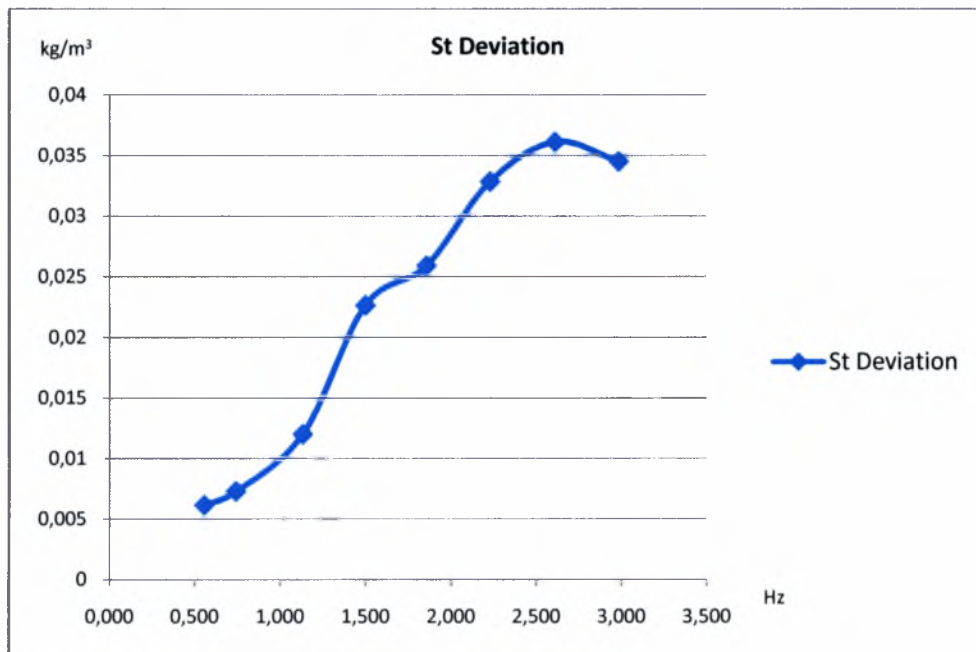
Από το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης παρατηρείται πως στο σημείο που είχαμε τη μικρότερη μέση τιμή της εξερχόμενης αλατότητας, έχουμε τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση αυτής. Αυτό σημαίνει ότι η τύρβη πράγματι καταφέρνει να εισχωρήσει καθαρίζοντας γρήγορα την κοιλότητα. Από αυτή τη συχνότητα μέχρι τα 2.28Hz, ουσιαστικά το γράφημα της τυπικής απόκλισης είναι ο 'αντικατοπτρισμός' της μέσης εξερχόμενης αλατότητας. Στα 1.13Hz παρατηρείται μια κορυφή στην τυπική απόκλιση, και αλλαγή της κλίσης της καμπύλης της μέσης αλατότητας. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη συχνότητα γίνεται πιο γρήγορα ο καθαρισμός της κοιλότητας απ' ό τι στα 1.5Hz. Για ακόμα μια φορά είναι εμφανές το φαινόμενο του συντονισμού του περιβάλλοντος της δεξαμενής και μέσα από το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης.

Στη συνέχεια ακολουθεί η συμπεριφορά του συστήματος για ρύπο μεγαλύτερης πυκνότητας,  $1006.6\text{kg/m}^3$ .



Γράφημα 4.13.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006.6\text{kg/m}^3$

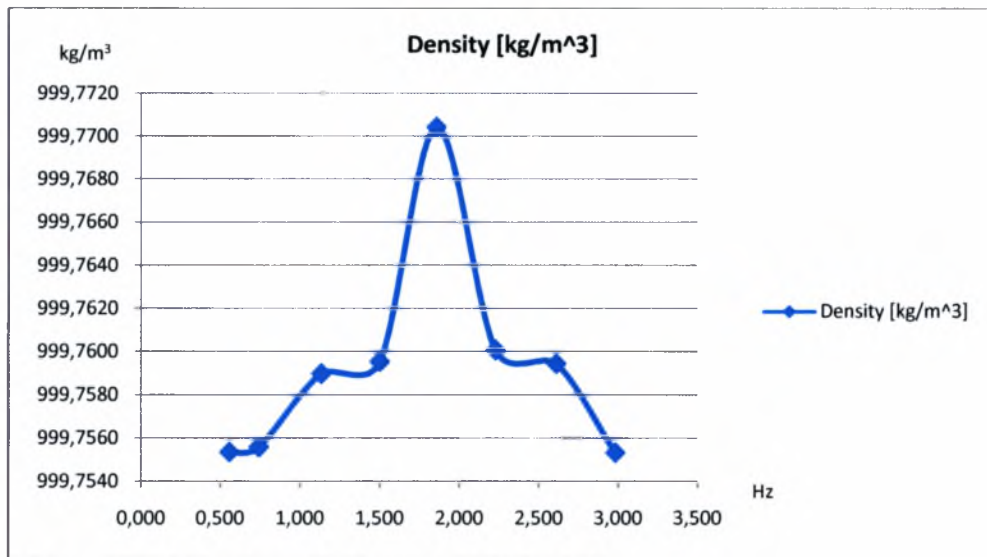
Σε αυτήν την περίπτωση η συμπεριφορά του συστήματος είναι τελείως διαφορετική από τη συνηθισμένη. Σε προηγούμενες περιπτώσεις η μέση εξερχόμενη αλατότητα ξεκινούσε από μεγαλύτερες τιμές προς μικρότερες. Μέχρι τα 1.857Hz η μέση εξερχόμενη αλατότητα αυξάνεται για να μειωθεί και πάλι μέχρι τα 2.61Hz και τέλος να αυξηθεί και πάλι ελάχιστα μεν, στα 2.98Hz. Για ακριβέστερη ανάλυση των αποτελεσμάτων παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της αλατότητας.



Γράφημα 4.13.2: Πυκνότητα διαλύματος: 1006.6kg/m<sup>3</sup>

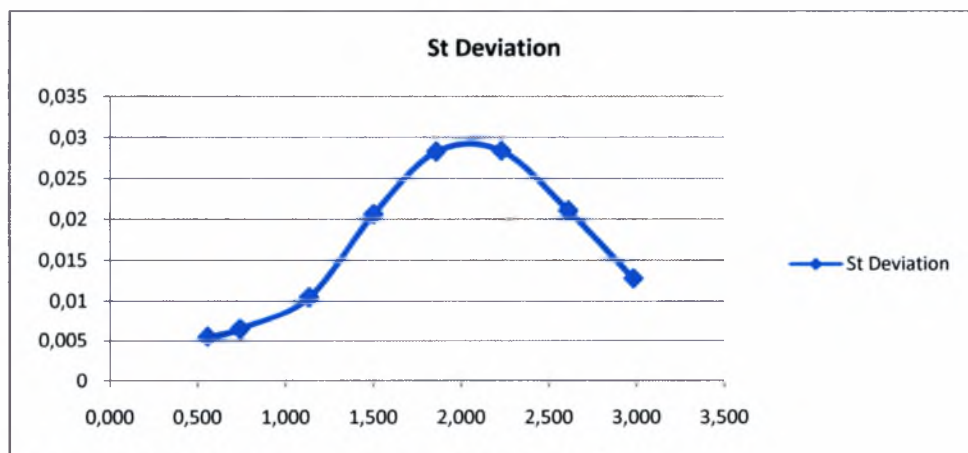
Η τυπική απόκλιση της αλατότητας αυξάνεται μέχρι τα 2.61Hz για να μειωθεί ελάχιστα στα 2.98Hz. Η κλίση της μέχρι τα 1.5Hz αυξάνεται. Μέχρι τα 1.61Hz η κλίση μειώνεται για να αυξηθεί και πάλι μέχρι τα 2.61Hz όπου παρουσιάζεται ένα ολικό μέγιστο. Παρατηρώντας και τα δυο διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι οι διαταραχές που αντιλαμβάνεται το αγωγιμόμετρο είναι πιο έντονες. Η τύρβη έχει τη δύναμη να εισχωρήσει στην κοιλότητα και να την καθαρίσει με αυξανόμενο ρυθμό καθώς αυτή γίνεται πιο έντονη. Στα 2.98Hz φαίνεται να έχει καταφέρει να απορρίψει το ρύπο κατά λίγο περισσότερο διαλυμένο. Στο σημείο με συχνότητα 1.5Hz παρουσιάζεται μια κορυφή στη μέση εξερχόμενη αλατότητα και αλλαγή στην κλίση της τυπικής απόκλισης.

Τέλος η μεγαλύτερη αλατότητα που χρησιμοποιείται είναι  $1013.2\text{kg/m}^3$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Γράφημα 4.14.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013.2\text{kg/m}^3$

Η μέση εξερχόμενη αλατότητα για πυκνό διάλυμα αλατότητας αυξάνεται μέχρι τα 1.61Hz όπου παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη τιμή. Μετά μειώνεται συνεχώς και συμμετρικά με τις ίδιες κλίσεις. Στα 1.857 Hz το διάγραμμα παρουσιάζει ολικό μέγιστο. Απ' ότι μπορεί να δει κανείς σε αυτή τη συχνότητα υπάρχει συντονισμός του περιβάλλοντος της δεξαμενής. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης για τη συγκεκριμένη πυκνότητα του ρύπου.



Γράφημα 4.14.2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013.2\text{kg/m}^3$

Στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης το σημείο για συχνότητα ταλάντωσης 1.857Hz παρουσιάζει κι εδώ ολικό μέγιστο. Οι αποκλίσεις από τη μέση τιμή της αλατότητας είναι έντονες για τη συχνότητα αυτή, αλλά και για τη συχνότητα των 2.28Hz.

Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής. Καθώς αναφερόμαστε σε εξαιρετικά βαρύ ρύπο, η αδύναμη τύρβη δεν μπορεί να τον παρασυρθεί από το

ελάχιστο σημείο της κοιλότητας όπου αυτός κατακάθεται. Οι μικρές αποκλίσεις από τη μέση τιμή είναι στρώματα τα οποία παρασύρονται προς τα έξω, καθώς προκύπτουν από το μηχανισμό της μοριακής διάχυσης. Καθώς καταφέρνει η τύρβη να εισχωρήσει στην κοιλότητα, αρχίζει και συμπαρασύρει όλο και μεγαλύτερη ποσότητα ρύπου. Το σύστημα φτάνει σε ένα μέγιστο με μέγιστη τυπική απόκλιση και μέγιστη μέση εξερχόμενη αλατότητα στα 2Hz περίπου. Αυτό σημαίνει ότι η τύρβη που εισχωρεί στην κοιλότητα, μετά τα 2Hz, αρχίζει και διαλύει το ρύπο ενώ ήδη βρίσκεται στην κοιλότητα και τελικά ο ρύπος που εξάγεται είναι πιο ομοιογενής και πιο αδύναμος.

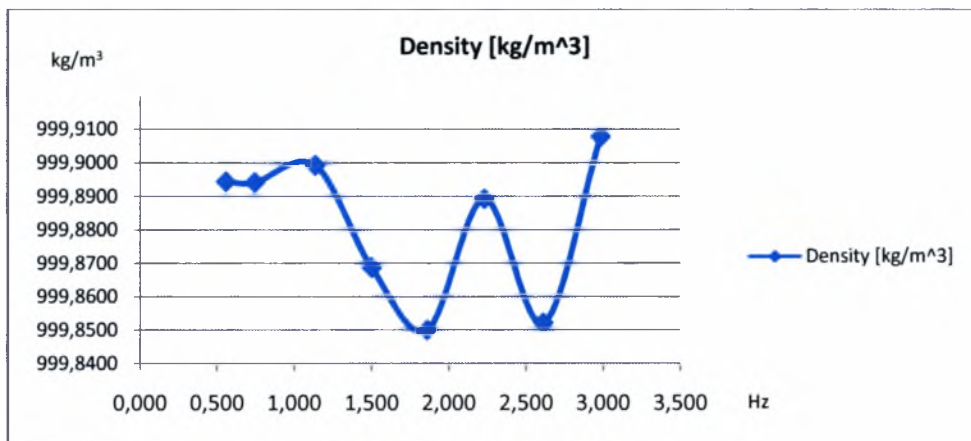
Στις επόμενες παραγράφους, θα δούμε τη συμπεριφορά του ρύπου καθώς εκλύεται από διπλό σωλήνα jet.

## ΔΙΠΛΟ JET

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν από τα πειράματα για κοιλότητα με λόγο εύρους προς πλάτος,  $W/H=2$  με σύστημα έκλυσης ρύπου με **διπλό jet**.

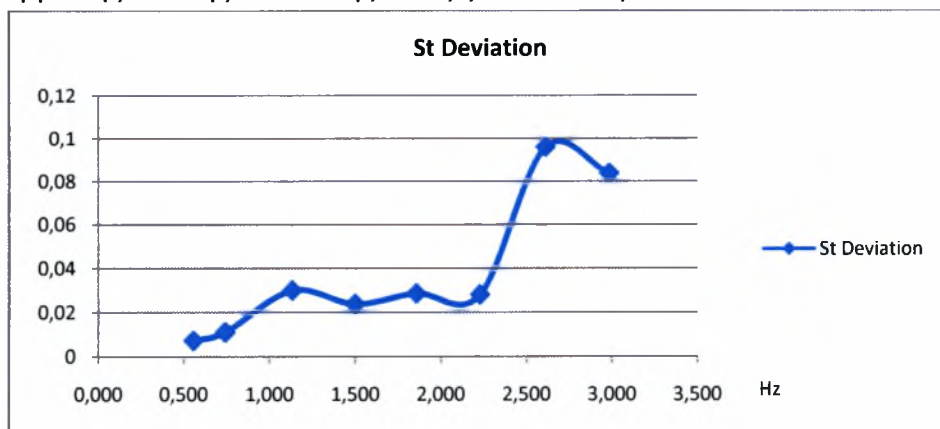
Όπως θα δούμε παρακάτω, τα διαγράμματα της μέσης αλατότητας με την τυπική απόκλιση συμπίπτουν για τη δυνατή, καθώς και για την εξαιρετικά δυνατή αλατότητα.

Το παρακάτω διάγραμμα αναφέρεται για ρύπο μέσης έντασης.



Γράφημα 4.15.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$

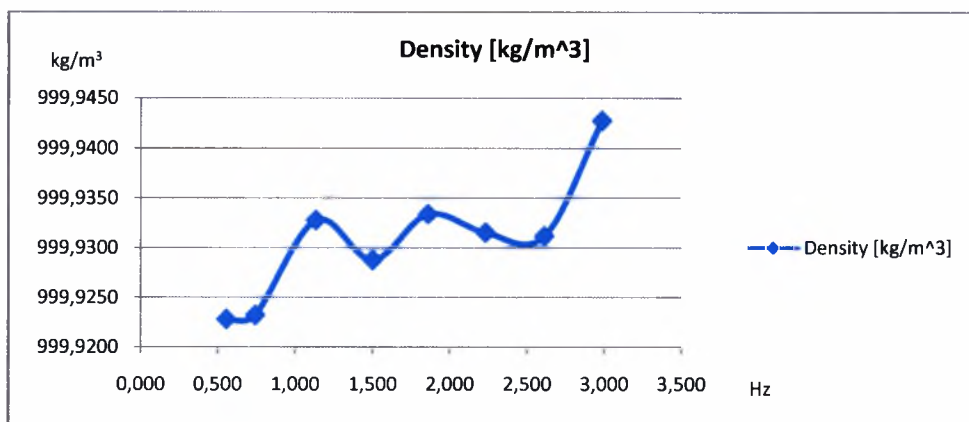
Παρατηρώντας το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται μια δυναμικότητα στη συμπεριφορά του συστήματος. Από την πιο αδύναμη, μέχρι την πιο ισχυρή τύρβη διαπιστώνεται το εξής: Αρχικά η μέση εξερχόμενη αλατότητα αυξάνεται μέχρι τη συχνότητα των 1.134Hz. Στη συνέχεια κάνει μια 'βουτιά' μέχρι τα 1.857Hz όπου και φθάνει στο κατώτερο σημείο της για να ανέβει και πάλι αρκετά στα 2.228Hz. Στα 2.61Hz παρατηρείται ακόμα μια πτώση στη μέση αλατότητα μέχρι τελικά, στην πιο ισχυρή τύρβη του διαλύματος να έχουμε τη μεγαλύτερη μέση αλατότητα. Ο τρόπος με τον οποίο εξέρχεται και διαλύεται ο ρύπος θα φανεί περισσότερο με το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης όπως φαίνεται παρακάτω.



Γράφημα 4.15.2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$

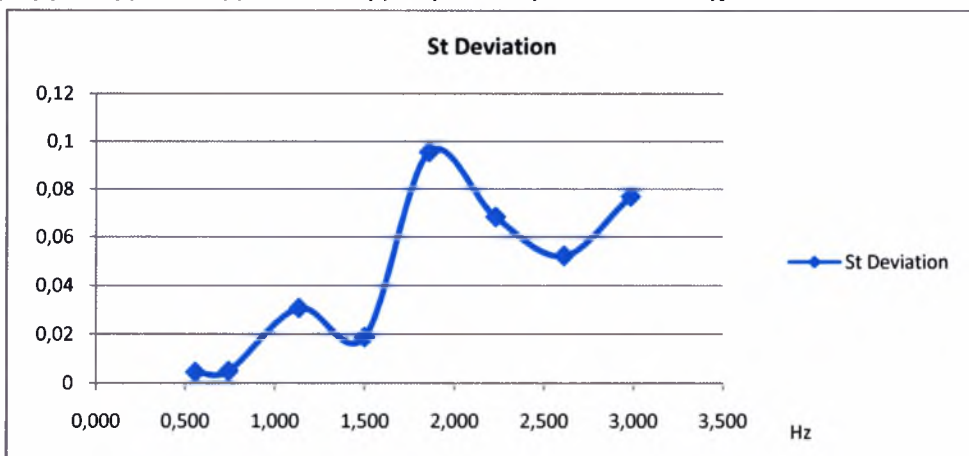
Το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης για τη μέση αλατότητα, είναι παρόμοιας μορφής με αυτό της μέσης εξερχόμενης αλατότητας. Η τυπική απόκλιση από της μικρότερης κλίμακας τύρβη, μέχρι τα 1.134Hz αυξάνεται. Στη συνέχεια αυτή αυξομειώνεται μέχρι το τέλος στα 2.982Hz. Όπως είχε αναφερθεί πιο πριν, με τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση υπάρχουν πολλές διαταραχές της πυκνότητας στο αγωγιμόμετρο. Η τύρβη καταφέρνει και συμπαρασύρει μεγάλα αδιάλυτα κομμάτια ρύπου εκτός της κοιλότητας. Η τύρβη καταφέρνει να εισχωρήσει πιο εύκολα σε αυτήν την κοιλότητα (αυτό διαπιστώθηκε και για το μονό σωληνάκι) και να τον διαλύσει ενώ ήδη βρίσκεται ανάμεσα στα τοιχώματα της. Στις συχνότητες 1.134Hz και 1.610 τον εξάγει ελάχιστα περισσότερο αδιάλυτο (μεγάλη μέση αλατότητα, μεγάλη τυπική απόκλιση).

Ακολουθούν τα διαγράμματα της μέσης εξερχόμενης πυκνότητας για τη δυνατή αλατότητα με  $\rho=1006.6\text{kg/m}^3$  και της τυπικής απόκλισης.



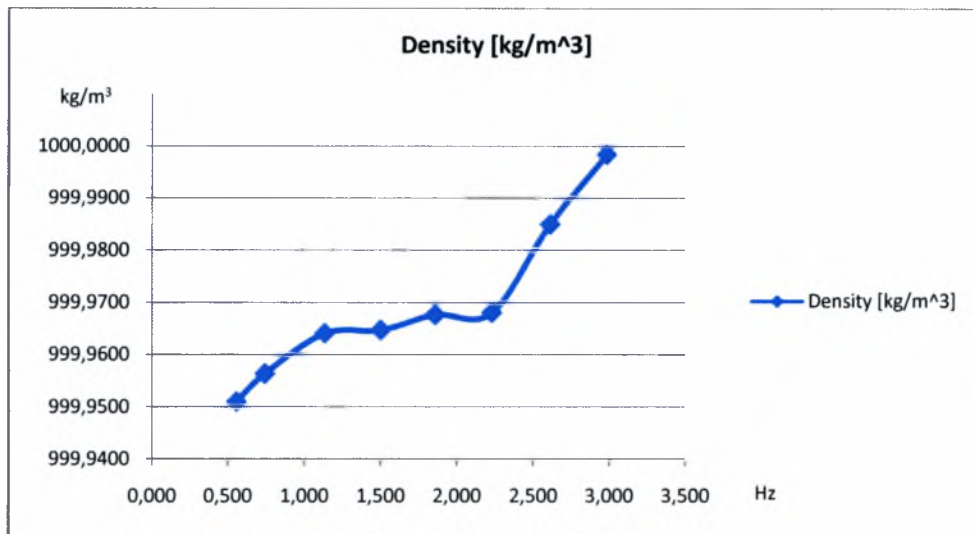
Γράφημα 4.16.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006.6\text{kg/m}^3$

Στα  $1006.6\text{kg/m}^3$  παρατηρείται μια διαφορετική συμπεριφορά στη μέση εξερχόμενη αλατότητα. Καθώς αυξάνεται η τύρβη, υπάρχει μια γενική αύξηση σε αυτήν. Στα 1.5Hz και στα 2.610Hz υπάρχουν 'βυθίσματα'. Αναμένεται οι διαταραχές που φθάνουν στο αγωγιμόμετρο να είναι μικρότερης έντασης. Όπως θα φανεί στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης όντως στις συγκεκριμένες συχνότητες, το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα.



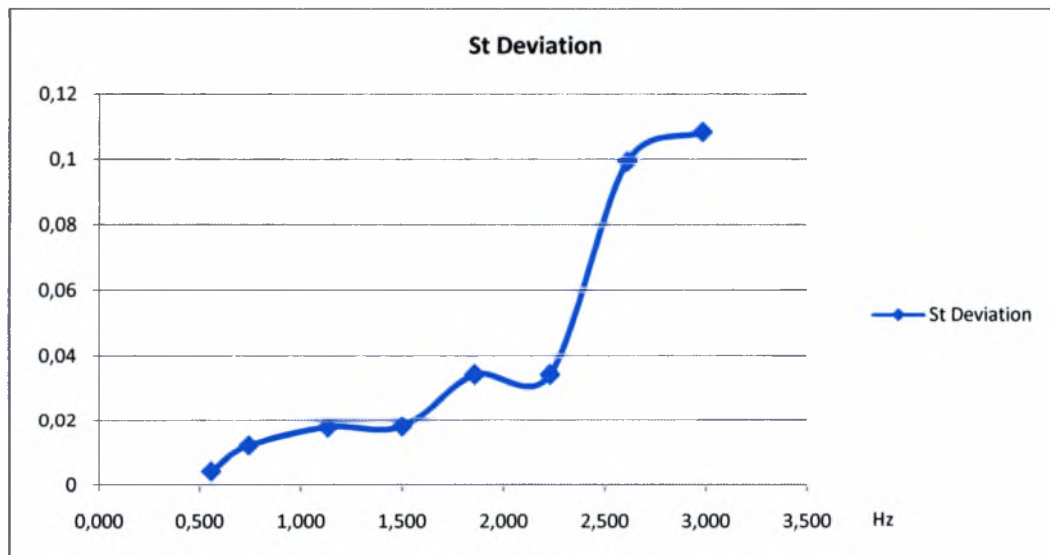
Γράφημα 4.16.2: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006.6\text{kg/m}^3$

Η αμέσως επόμενη πυκνότητα ρύπου αναφέρεται σε αλατότητα 1013.2kg/m<sup>3</sup>.



Γράφημα 4.17.1: Πυκνότητα διαλύματος: 1013.2kg/m<sup>3</sup>

Η συμπεριφορά του διαγράμματος σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης αλατότητας. Η τάση αύξησης ισχύει με τη διαφορά ότι τα βυθίσματα είναι πιο ομαλά, σχεδόν, ανύπαρκτα. Η τυπική απόκλιση της πυκνότητας φαίνεται όπως παρακάτω.



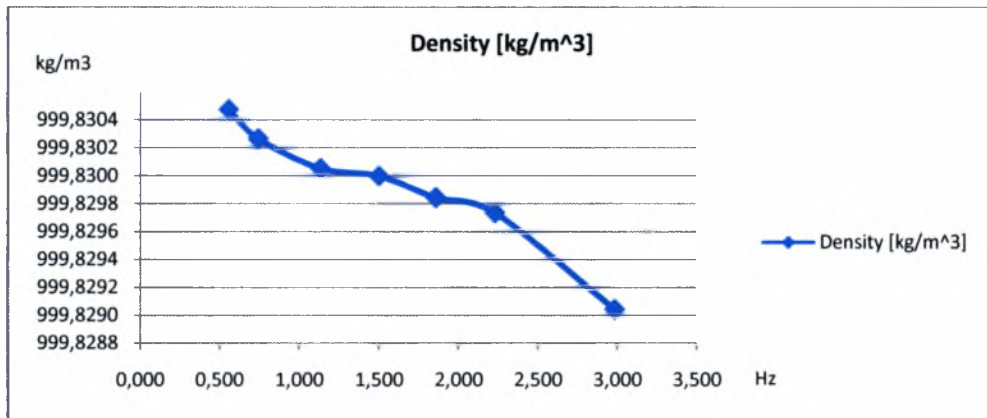
Γράφημα 4.17.2 Πυκνότητα διαλύματος: 1013.2kg/m<sup>3</sup>

Όπως είναι αναμενόμενο, το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης ακολουθεί τις κλίσεις της μέσης εξερχόμενης αλατότητας. Ισχύει ένας 'κανόνας', όσο πιο δυνατή η μέση εξερχόμενη αλατότητα, τόσο πιο έντονες και οι διαταραχές της πυκνότητας. Παρακάτω θα ακολουθήσει η ίδια περιγραφή για κοιλότητα λόχου W/H=1/2



## CAVITY ME ΛΟΓΟ W/H=1/2

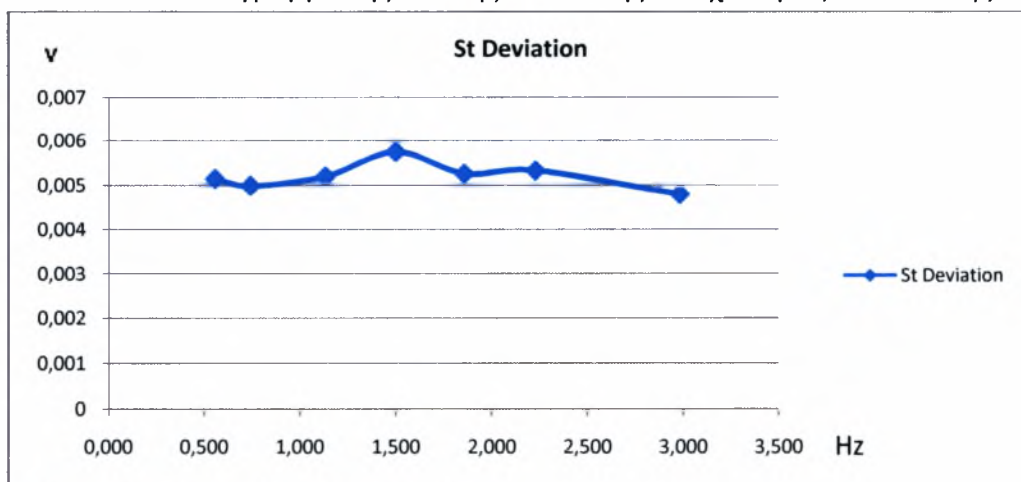
Για κοιλότητα με λόγο  $W/H=1/2$  οι συνθήκες ταλάντωσης παραμένουν ίδιες. Η έκλυση του ρύπου πραγματοποιείται από το σύστημα **μονού σωλήνα**. Η συμπεριφορά σε αυτή την περίπτωση φαίνεται από τα επόμενα διαγράμματα.



Γράφημα 4.18.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$

Στην περίπτωση της έγχυσης με μονό σωληνάκι γίνεται ελάχιστα αντιληπτή η μεταβολή της πυκνότητας. Η τιμή της μειώνεται μόνο στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο της. Παρ' όλα αυτά βλέπουμε μια εικόνα της μείωσης της μέσης αλατότητας με την αύξηση της έντασης της τύρβης. Η ένταση της αλατότητας μειώνεται με διαφορετικές κλίσεις και όχι γραμμικά. Αυτό, όπως και στις άλλες περιπτώσεις, πραγματοποιείται εξ' αιτίας φαινομένων συντονισμού στο σύστημα πλέγματα - δεξαμενή.

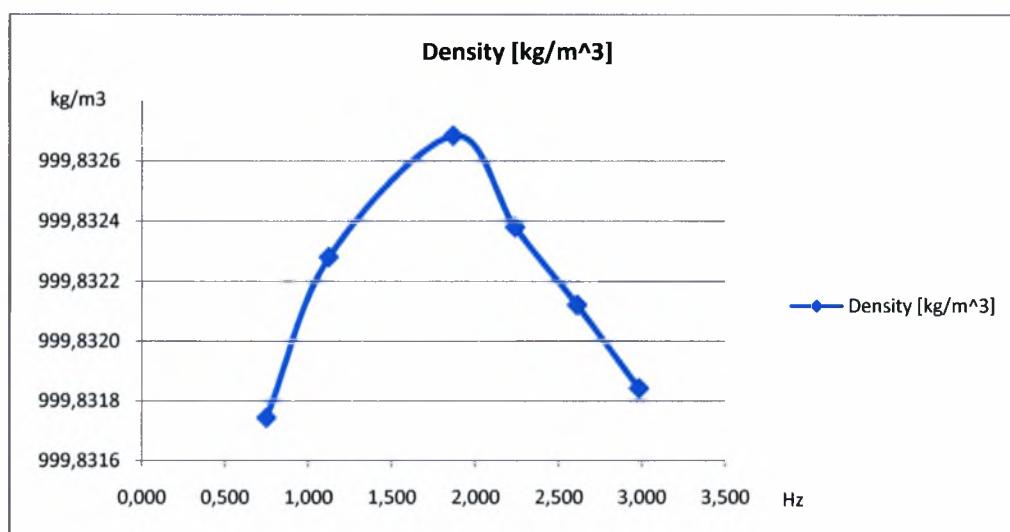
Η εικόνα της συμπεριφοράς του ρύπου με τη συχνότητα της ταλάντωσης μπορεί να φανεί και από το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης – συχνότητας ταλάντωσης.



Γράφημα 4.18.2: Τυπική απόκλιση αλατότητας

Όπως φάνηκε από το διάγραμμα της πυκνότητας, το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της αλατότητας επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που προέκυψε πιο πριν. Το διάγραμμα είναι μια σχεδόν ευθεία, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το αγωγιμόμετρο δεν αντιλαμβάνεται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στην πυκνότητα καθώς διαλύεται ο ρύπος. Αυτό σημαίνει ότι έχει διαλυθεί κατ' ευθείαν με την έξοδό του από το σύστημα έγχυσης. Στα 1.5Hz υπάρχει μια ελάχιστη αύξηση της τυπικής απόκλισης η οποία και πάλι είναι αμελητέα.

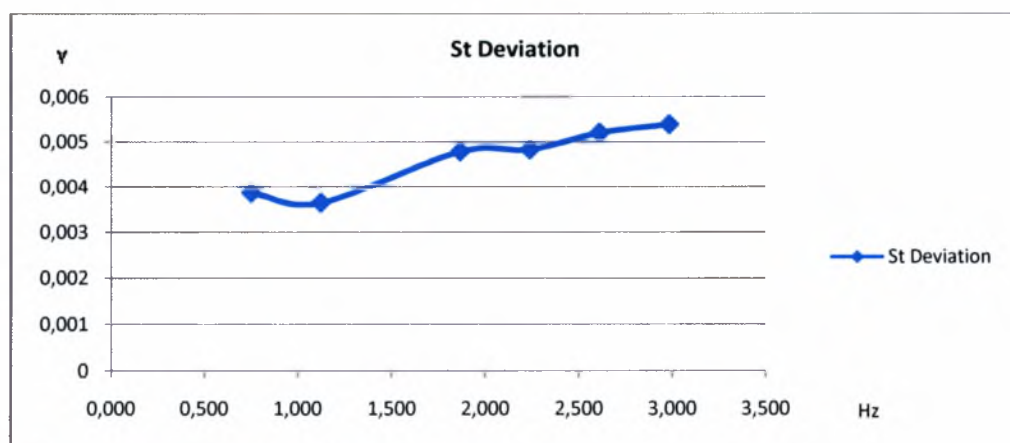
Το επόμενο διάγραμμα αναφέρεται στην αμέσως επόμενη ένταση της αλατότητας με  $D=1006,6\text{kg/m}^3$ .



Γράφημα 4.19.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006,6\text{kg/m}^3$

Σε αυτή την περίπτωση με την αλατότητα στα  $1006,6\text{kg/m}^3$  έχουμε μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά της εξόδου του ρύπου από την κοιλότητα. Στα 1.866Hz ο ρύπος βγαίνει περισσότερο αδιάλυτος απ' ότι σε μικρότερες συχνότητες. Στη συνέχεια η ένταση πέφτει με την αναμενόμενη συμπεριφορά. Και πάλι γίνεται αντιληπτό ότι η διαφορά της έντασης της πυκνότητας είναι μικρή.

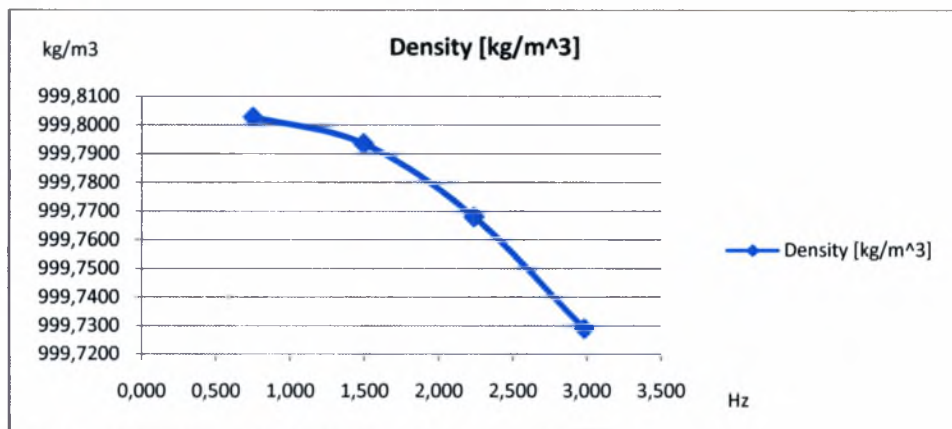
Παρακάτω ακολουθεί και διάγραμμα της συμπεριφοράς της τυπικής απόκλισης.



Γράφημα 4.19.2: Τυπική απόκλιση αλατότητας

Η τυπική απόκλιση σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα ταλάντωσης με διαφορετική κάθε φορά κλίση. Επίσης η συνολική αύξηση είναι αμελητέα. Καθώς φαίνεται ότι το διάγραμμα της πυκνότητας παρουσιάζει ένα ελάχιστο στα 1.866Hz στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης παρατηρείται αλλαγή στην κλίση. Μια λογική ερμηνεία γι' αυτό είναι ότι η τύρβη έχει εισχωρήσει στην κοιλότητα κι έχει καταφέρει να διαλύσει το ρύπο και να τον εξάγει κατά τρόπο ομοιόμορφο χωρίς ιδιαίτερη αλλαγή στην τυπική απόκλιση της πυκνότητας.

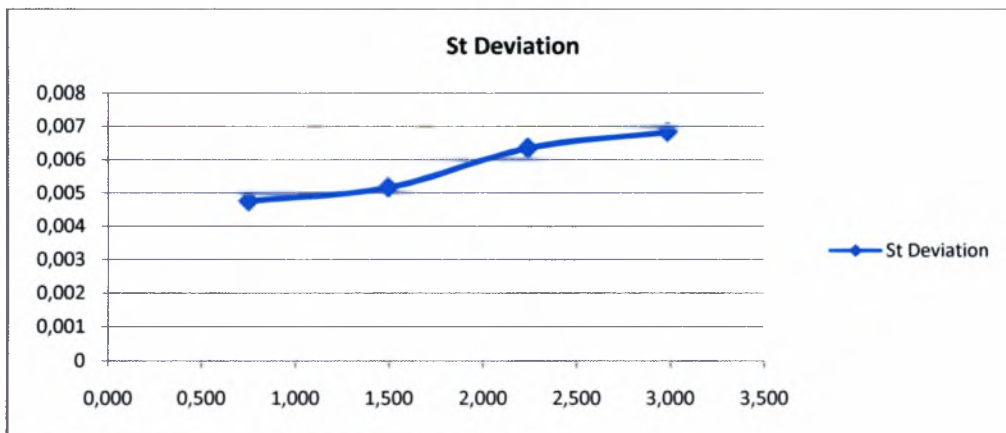
Το επόμενο διάγραμμα αναφέρεται στην τελευταία περίπτωση της εξαιρετικά δυνατής αλατότητας με πυκνότητα διαλύματος στα  $1013.2\text{kg/m}^3$ . Η συμπεριφορά που παρατηρείται είναι η εξής παρακάτω.



Γράφημα 4.20.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013.2\text{kg/m}^3$

Σε αυτήν την περίπτωση η συμπεριφορά που παρατηρείται για τη διάλυση του ρύπου είναι παρόμοια με αυτήν της πρώτης περίπτωσης της μέτριας έντασης. Δεν παρατηρούνται φαινόμενα συντονισμού. Η μεγαλύτερη ανάμειξη του ρύπου με τη μεγαλύτερη συχνότητα γίνεται με την ίδια αρνητική κλίση.

Ακολουθεί διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της αλατότητας.



Γράφημα 4.20.2: Τυπική απόκλιση αλατότητας

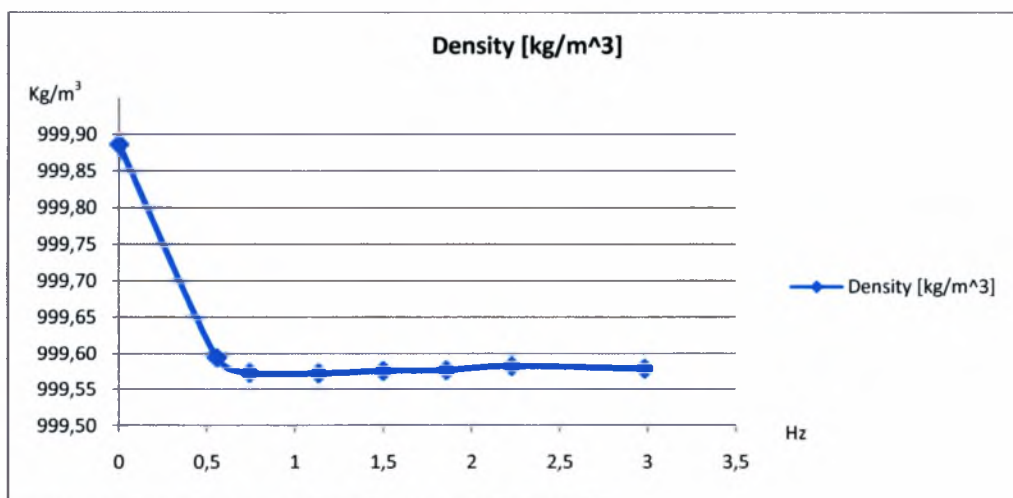
Η μορφή του διαγράμματος της τυπικής απόκλισης είναι ακριβώς η ίδια με αυτήν του διαγράμματος για την αλατότητα στα  $1006.6\text{kg/m}^3$ . Συγκρίνοντας τα 2 αυτά διαγράμματα μεταξύ τους συμπεραίνουμε ότι ναι μεν η τύρβη εισχωρεί το ίδιο στην κοιλότητα και τελικά καταφέρει να διαλύσει το ρύπο πριν τον εξάγει, αλλά καταφέρει συγχρόνως να αυξάνει την τυπική απόκλισή του ρύπου εξ' αιτίας της μεγαλύτερης του πυκνότητάς του. Η πυκνότητα όπως είπαμε πριν είναι  $1013.2\text{kg/m}^3$ .

## ΔΙΠΛΟ JET

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα πειράματα για την κοιλότητα με λόγο βάθους προς ύψος 1/2, καθώς και με έγχυση ρύπου μέσω διπλού σωλήνα jet, φαίνονται όπως παρακάτω για τις αντίστοιχες αλατότητες των  $1003.3\text{kg/m}^3$  για τη μέτρια αλατότητα,  $1006.6\text{kg/m}^3$  για την αμέσως επόμενη, καθώς και  $1013.2\text{kg/m}^3$  για την ισχυρή αλατότητα. Τα διαγράμματα δείχνουν κατά πόσο γρήγορα διαλύεται ο ρύπος με το αλατόνερο από τη συγκεκριμένη κοιλότητα συναρτήσει της εφαρμοσμένης ταλάντωσης σε μονάδες πυκνότητας. Το κατά πόσο γρήγορα διαλύεται, γίνεται αντιληπτό από τη μέση τιμή της πυκνότητας. Καθώς αυτή είναι χαμηλότερη, ο ρύπος διαλύεται πιο γρήγορα, καθώς αυτή είναι υψηλότερη, ο ρύπος διαλύεται πιο αργά. Το αγωγιμόμετρο αντιλαμβάνεται την αλατότητα ως ρεύμα σε διαφορά τάσης. Ο τρόπος λειτουργίας του έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού η διαφορά δυναμικού της εξόδου του αγωγιμομέτρου δίνεται σε μορφή αρχείου δεδομένων, όπως επίσης η μέση τιμή της και η τυπική της απόκλιση. Στη συνέχεια μέσω Excel και Origin εξάγονται τα διαγράμματα με τη διακύμανση της διαφοράς αυτής.

Η διακύμανση της μέσης αλατότητας συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης των πλεγμάτων φαίνονται από τα εξής παρακάτω διαγράμματα.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει το πώς διαλύεται ο ρύπος μετρίας έντασης,  $1003.3\text{kg/m}^3$  με τη συχνότητα ταλάντωσης.



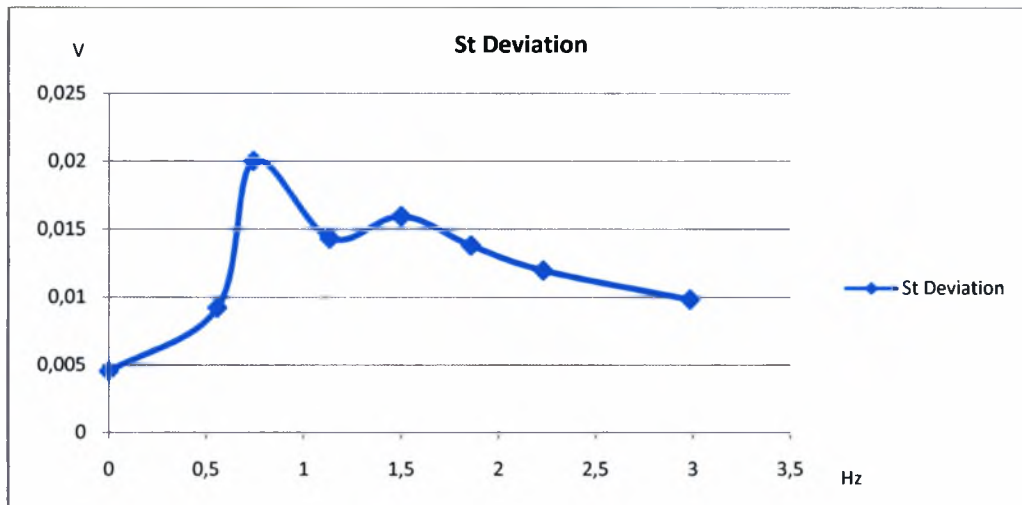
Γράφημα 4.21.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1003.3\text{kg/m}^3$

Από αυτό το διάγραμμα παρατηρείται ότι ο ρύπος διαλύεται αμέσως με την εφαρμογή της ταλάντωσης σε οποιαδήποτε συχνότητα. Ακολουθεί μια ελαφριά κλίση προς τα επάνω, δηλαδή ελαφρώς ο ρύπος εξέρχεται σε μεγαλύτερη ποσότητα αλλά τελικά παραμένει αμελητέα.

Ένα άλλο μέγεθος που μπορεί να μας δείξει κατά πόσο γρήγορα διαλύεται ο ρύπος μέσα από την κοιλότητα είναι η τυπική απόκλιση του μετρούμενου μεγέθους. Δεν

είναι απαραίτητη η μετατροπή σε μονάδες πυκνότητας της διαφοράς δυναμικού που δίνει το αγωγιμόμετρο, καθώς το μέγεθος της τυπικής απόκλισης μας δείχνει τη μέση τετραγωνική απόσταση των τιμών αυτών από τη μέση τιμή του μεγέθους που μας ενδιαφέρει.

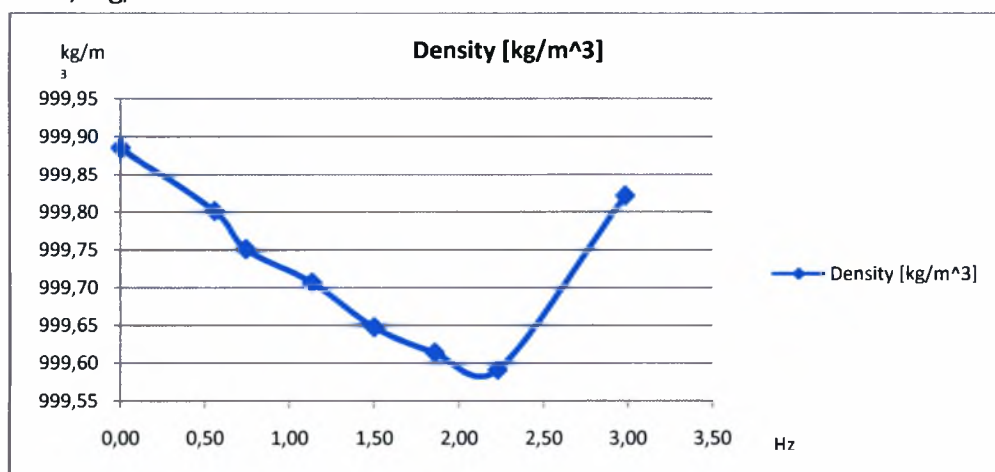
Το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης είναι το εξής παρακάτω:



Γράφημα 4.21.2: Τυπική απόκλιση αλατότητας

Το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης μας δείχνει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της συμπεριφοράς του φαινομένου. Μέχρι τα 1,5Hz ο ρύπος εξέρχεται περισσότερο αδιάλυτος. Από εκεί και πέρα η τυπική απόκλιση μειώνεται συνεχώς, που σημαίνει ότι ο ρύπος εξέρχεται περισσότερο διαλυμένος.

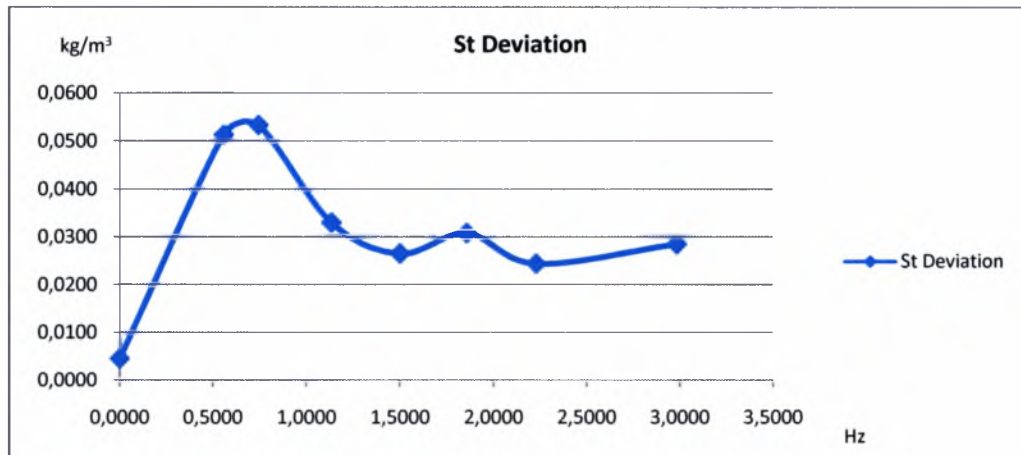
Το επόμενο διάγραμμα αναφέρεται στην αμέσως επόμενη ένταση της αλατότητας για  $1006,6\text{kg/m}^3$ .



Γράφημα 4.22.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1006,6\text{kg/m}^3$

Καθώς γίνεται πιο έντονη η τύρβη με τη μεγαλύτερη συχνότητα ταλάντωσης, ο ρύπος βγαίνει περισσότερο διαλυμένος από την κοιλότητα. Αυτό συμβαίνει μέχρι τα 2,23Hz ταλάντωσης. Στα 3Hz της ταλάντωσης ο ρύπος εξέρχεται αδιάλυτος.

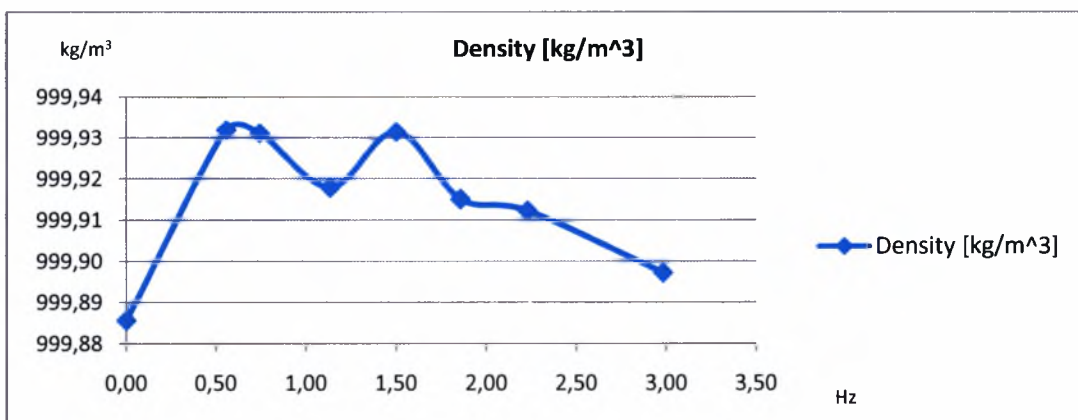
Προφανώς κάποια μεγαλύτερη δίνη συμπάρεσυρε το κομμάτι του ρύπου σχεδόν ανεπηρέαστο.



Γράφημα 4.22.2: Τυπική απόκλιση αλατότητας

Στο παραπάνω διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της αλατότητας παρατηρείται η εξής συμπεριφορά. Κοντά στα 0,5Hz ταλάντωσης έχω τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση των τιμών της διαφοράς δυναμικού στο αγωγιμόμετρο, πράγμα που σημαίνει ότι ο ρύπος βγαίνει περισσότερο αδιάλυτος. Στη συνέχεια έχω μικρή τυπική απόκλιση. Στα 1,87Hz ταλάντωσης η τυπική απόκλιση αυξάνεται ελαφρώς που σημαίνει ότι κατά σύνολο ο ρύπος διέφυγε λίγο περισσότερο αδιάλυτος. Στα 2,23Hz η τυπική απόκλιση μειώνεται ενώ πάλι στα 2,98Hz αυξάνεται. Το φαινόμενο του συντονισμού του περιβάλλοντος της δεξαμενής παίζει κυρίαρχο ρόλο σε αυτή τη συμπεριφορά του διαλύματος του ρύπου.

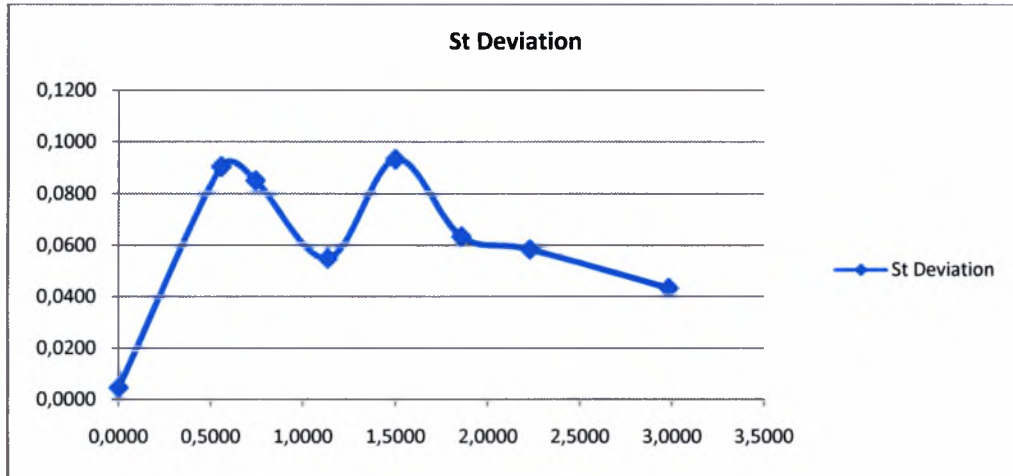
Τέλος, στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η συμπεριφορά της δυνατής αλατότητας με την εφαρμογή της ταλάντωσης. Η πυκνότητα του ρύπου είναι  $1013.2\text{kg/m}^3$ .



Γράφημα 4.23.1: Πυκνότητα διαλύματος:  $1013.2\text{kg/m}^3$

Στην ισχυρή αλατότητα φαίνεται κυκλικότητα στο ρυθμό που εξάγεται ο ρύπος από την κοιλότητα. Στα 0,56Hz ο ρύπος βγαίνει αδιάλυτος ενώ στα 1,13Hz εξέρχεται περισσότερο διαλυμένος. Στα 1,5Hz ο ρύπος εξέρχεται και πάλι αδιάλυτος. Η

ένταση της τύρβης καταφέρνει να διαλύσει το ρύπο ενώ ήδη βρίσκεται στην κοιλότητα με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αποδυνάμωσή του. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης του ρύπου για μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της συμπεριφοράς του.



Γράφημα 4.23.2: Τυπική απόκλιση αλατότητας

Σε αυτήν την περίπτωση το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης δείχνει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά του ρύπου με το διάγραμμα της μέσης τιμής της πυκνότητας. Από αυτό μπορούμε να εξάγουμε ένα συμπέρασμα όσον αφορά το γενικό σύνολο της διάταξης. Για μεγαλύτερες αλατότητες είναι δυνατόν να προκύπτει μεγαλύτερη ακρίβεια στη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Αυτό αφορά την ευαισθησία του αγωγιμομέτρου το οποίο δείχνει καλύτερη ακρίβεια για πιο πυκνά διαλύματα. Η ευαισθησία (gain) μπορεί να αλλάξει ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται.



#### 4.2.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

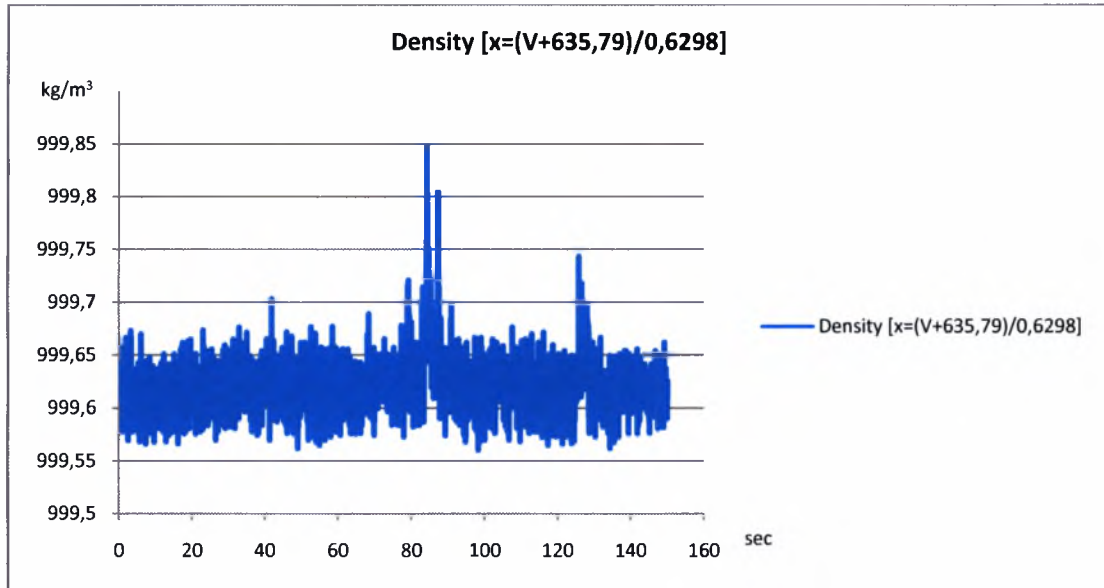
Τα πειράματα που εκτελέστηκαν για τη μέτρηση με το αγωγιμόμετρο, αναφέρονται σε κοιλότητες με λόγο εύρους προς πλάτος  $W/H=2$  και  $W/H=1/2$  για μονό και διπλούς σωληνίσκους έκλυσης ρύπου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν κάποια χαρακτηριστικά γραφήματα από τη συμπεριφορά του ρύπου από την έκλυσή του, μέχρι τη διάλυσή του, όπως μετρούταν με τον αισθητήρα του αγωγιμομέτρου. Όπως και στις μετρήσεις με τη φλουορεσίνη υπήρχαν διαφορετικές συμπεριφορές, αναμενόμενες και μη στη μέτρησή της, ανάλογα, έτσι και με το αγωγιμόμετρο είναι το ίδιο αναμενόμενο να έχουμε κάποιου αντίστοιχου είδους συμπεριφορές με τις ανάλογες συνθήκες. Όπως είχαμε δει, είναι πολύ συχνή η εμφάνιση φαινομένων συντονισμού που δικαιολογεί κάποιες φορές τη γρηγορότερη διάλυση του ρύπου με μικρότερης έντασης τύρβη. Σε αυτή τη σειρά των πειραμάτων, εξ' αιτίας της παρουσίας του αγωγιμόμετρου, αλλάζει το πεδίο της ροής. Το ίδιο το αγωγιμόμετρο δημιουργεί δικό του πεδίο ροής καθώς αυτό βρίσκεται στο περιβάλλον των πλεγμάτων. Η παρουσία του αναμένεται να μην επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη ροή.

Θα παρουσιαστούν για την κάθε κοιλότητα και για την κάθε αλατότητα από 2 επιλεκτικά διαγράμματα διαφορετικής συχνότητας ταλάντωσης, για την ανάλυσή τους. Τα διαγράμματα που προέκυψαν, θα αναρτηθούν στο παράρτημα της παρούσης έρευνας.

Γίνεται υπενθύμιση της αντιστοίχισης της συχνότητας ταλάντωσης στον inverter με τη συχνότητα ταλάντωσης στο πλέγμα όπως προέκυψε από την αντίστοιχη βαθμονόμηση του ταλαντωτικού μηχανισμού.

FINV	FOSC
4	0,742723068
8	1,499593242
12	2,228169203
16	2,9818

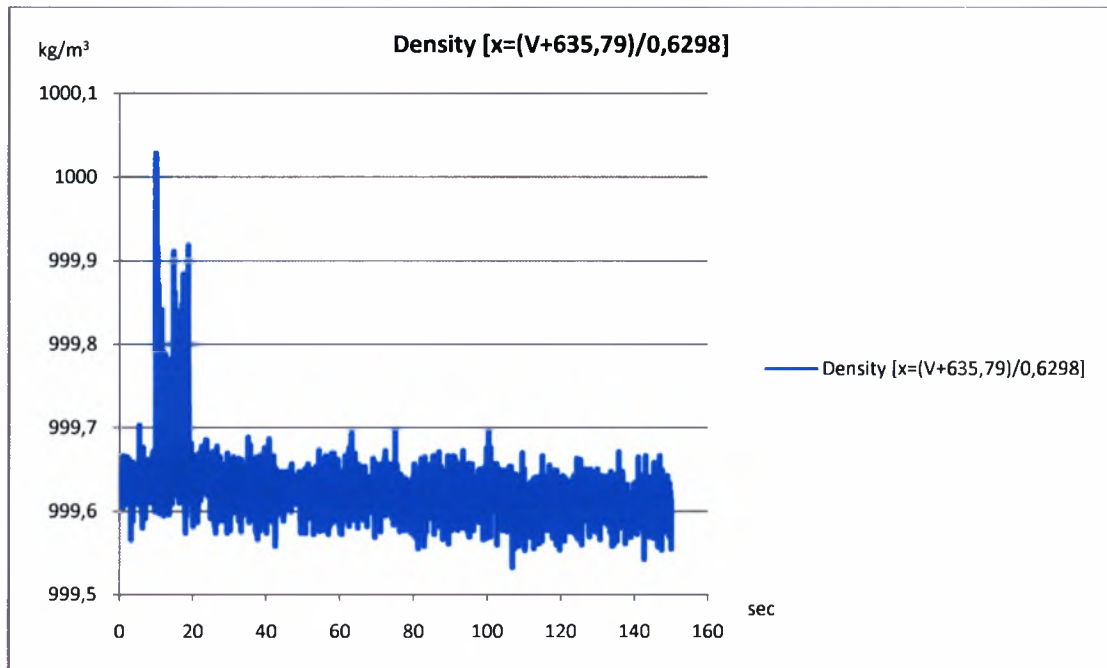
Τα πρώτα 2 διαγράμματα που θα αναλυθούν είναι για την κοιλότητα με λόγο εύρους προς πλάτους  $W/H=2$  και για την μεσαίας έντασης αλατότητα, δηλαδή  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ . Το πρώτο διάγραμμα είναι για συχνότητα ταλάντωσης στον inverter 6Hz.



Γράφημα 4.24 Cavity  $W/H=2$ ,  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ , inverter 6Hz

Παρατηρούμε πως στη χρονική στιγμή ανάμεσα από 80 με 100 sec υπάρχει μια κορυφή στην πυκνότητα που αντιλαμβάνεται το αγωγιμόμετρο. Η ένταση της αλατότητας όπως την αντιλαμβάνεται το αγωγιμόμετρο και σύμφωνα με τη βαθμονόμηση η οποία έγινε, ήταν στα 84,2sec με πυκνότητα διαλύματος  $999,80\text{kg/m}^3$ . Στα 125.69sec εμφανίζεται άλλη μια κορυφή έντασης χαμηλότερης από την αρχική και είναι στα  $999,74\text{kg/m}^3$ . Η απόσταση μεταξύ των κορυφών είναι 41.47sec. Ο χρόνος αυτός συμφωνεί με τα διαγράμματα που προέκυψαν από τα πειράματα με τη μέθοδο της φθορίζουσας ουσίας για τη μέση αλατότητα. Όπως είχε παρατηρηθεί και αναφερθεί στο κεφάλαιο της φθορίζουσας ουσίας, η εξερχόμενη ποσότητα διαλύματος εκτελούνταν τη μια φορά από το δεξί χέιλος της κοιλότητας και την άλλη από το αριστερό. Οι κορυφές που φάνηκαν είναι αναμενόμενες τελικά. Το σημείο το οποίο αξίζει παρατήρησης είναι αυτό της γενικής συμπεριφοράς της καμπύλης. Η καμπύλη εμφανίζει μόνο κορυφές κι όχι εντόνως φθίνουσα τάση όπως θα περίμενε κανείς. Λίγο δεξιά μόνο της πρώτης κορυφής εμφανίζεται μια ελαφρώς φθίνουσα τάση.

Το διάγραμμα που θα ακολουθήσει αναφέρεται στη συχνότητα των 16Hz στον inverter.

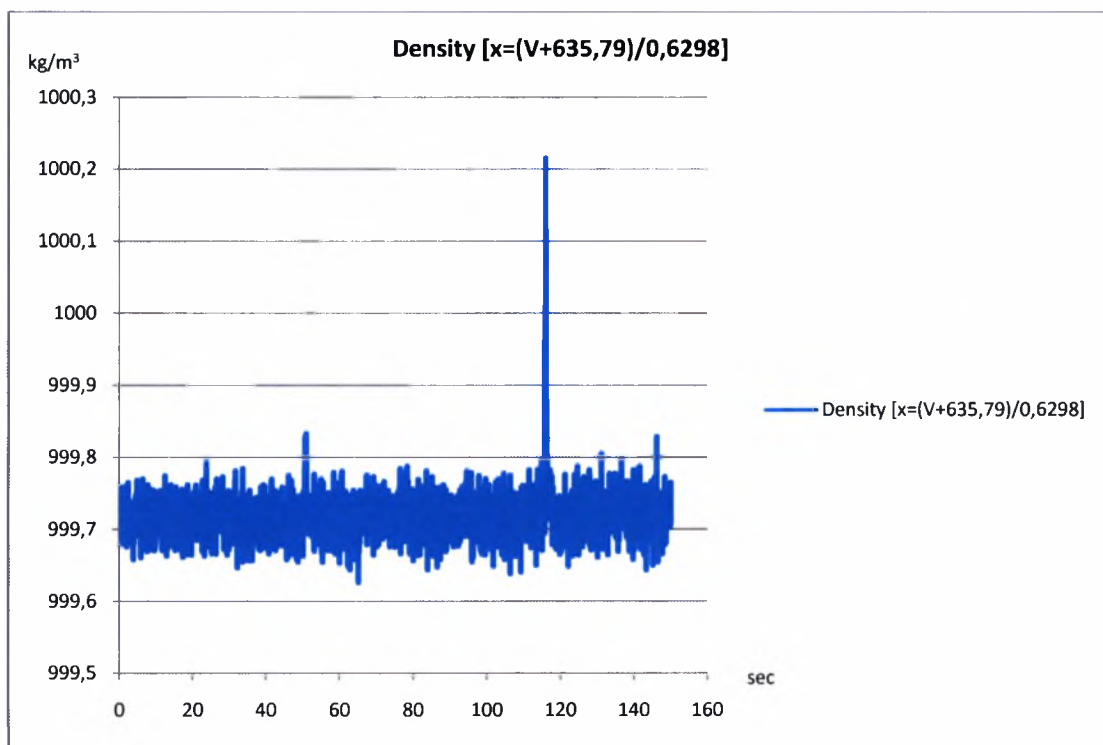


Γράφημα 4.25 Cavity W/H=2,  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ , inverter 16Hz

Σε αυτή την περίπτωση το διάγραμμα έχει τελείως διαφορετική συμπεριφορά από αυτό των 6Hz ταλάντωσης. Στα 9.88sec εκτέλεσης του πειράματος εμφανίζεται μια πρώτη κορυφή στα  $1000.028\text{kg/m}^3$ . Μέχρι τα 18.90sec υπάρχει έντονη εκκαθάριση του ρύπου παρασυρόμενος από το εσωτερικό της κοιλότητας έχοντας ως αποτέλεσμα τις υψηλές τιμές σε αυτό το διάστημα της πυκνότητας. Μέχρι περίπου τα 80sec υπάρχει μια φθίνουσα συμπεριφορά της καμπύλης. Εξ' αιτίας της εντονότερης τύρβης είναι λογική μια τέτοια συμπεριφορά. Αυτό που βλέπουμε εδώ είναι ότι δεν υπάρχει δεύτερη κορυφή στο διάγραμμα. Αυτό σημαίνει ότι ο ρύπος εξήλθε από την κοιλότητα χωρίς ακόμα να προλάβει να βγει πάλι από το χείλος της κοιλότητας όπου βρίσκεται το αγωγιμόμετρο. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι ο ρύπος βγαίνει περισσότερο αδιάλυτος προς την επιφάνεια της κοιλότητας. Θα περίμενε κανείς με τη μεγαλύτερη ένταση της τύρβης η πυκνότητα της κορυφής να ήταν χαμηλότερη από αυτήν στα 6Hz. Μια λογική εξήγηση είναι ότι το αλατόνερο διαλύεται επίσης πολύ γρήγορα και με χαμηλή τύρβη. Άλλη μια εξήγηση είναι ότι στην περίπτωση της έντονης τύρβης η κλίμακα των δινών της τύρβης κατάφερνουν να αποσπασούν αυτό το κομμάτι του ρύπου αδιάλυτο σε σχέση με τα 6Hz.

Τα επόμενα διαγράμματα αναφέρονται σε ρύπο έντονης έντασης ρύπου. Η ανάλυση που θα ακολουθηθεί είναι η ίδια ακριβώς και για όλες τις συνθήκες εκτέλεσης των πειραμάτων. Τα 2 επόμενα διαγράμματα αναφέρονται για την ίδια κοιλότητα εύρους προς πλάτους  $W/H=2$  για ρύπο έντονης έντασης με πυκνότητα

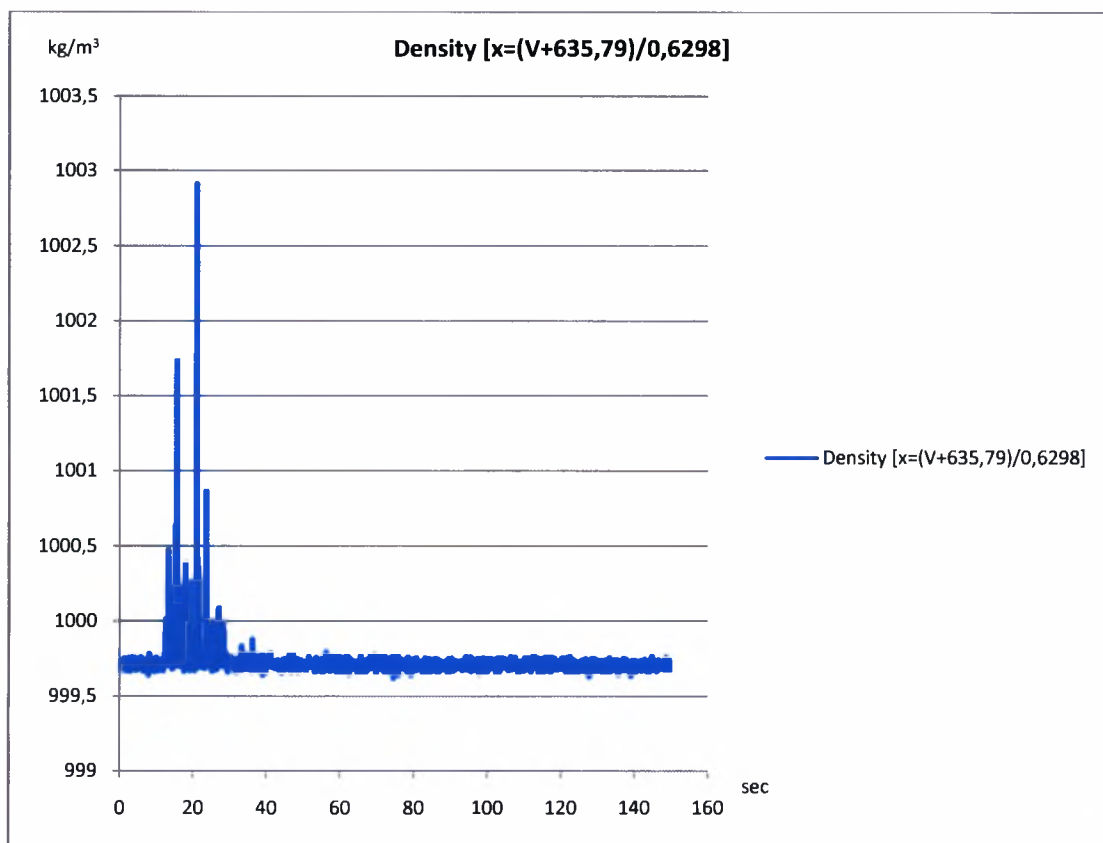
$\rho=1006.6\text{kg/m}^3$ . Το παρακάτω διάγραμμα που παρουσιάζεται αναφέρεται σε συχνότητα ταλάντωσης στον inverter 6Hz πάντα για μονό σωληνίσκο έκλυσης ρύπου.



Γράφημα 4.26. Cavity W/H=2,  $\rho=1006.6\text{kg/m}^3$ , inverter 6Hz

Εδώ η συμπεριφορά του διαγράμματος από την αρχή της ταλάντωσης μέχρι και το τέλος της, είναι ουδέτερη. Παρατηρούνται στο σύνολό του τρεις κορυφές. Η πρώτη εμφανίζεται στα 50.69sec, εντάσεως  $999.82\text{kg/m}^3$  η δεύτερη και ισχυρότερη στα 116.01sec εντάσεως  $1000.21\text{kg/m}^3$  και η τρίτη στα 146.17sec εντάσεως  $999.72\text{kg/m}^3$ . Προφανώς η ένταση της τύρβης που παράγεται στα 6Hz δεν έχει τόση ενέργεια ώστε να καταφέρει να παρασύρει το ρύπο εκτός της κοιλότητας. Μόνο στα 116.01sec κατάφερε και εξήλθε μια μικρή ποσότητα. Προφανώς η διάλυση συνεχίζεται και πέραν των 140sec δειγματοληψίας. Όπως στη φλουορεσίνη, έτσι κι εδώ έχουμε παραμένον ρύπο στον πάτο της κάθε κοιλότητας ο οποίος είναι αδύνατον να διαλυθεί εκτός της κοιλότητας. Αυτό από εκεί και πέρα δεν μπορεί να αναλυθεί για να εξαχθούν δεδομένα εξ' αιτίας περιορισμού της επεξεργαστικής ισχύος των υπολογιστών για μια τέτοια περίπτωση.

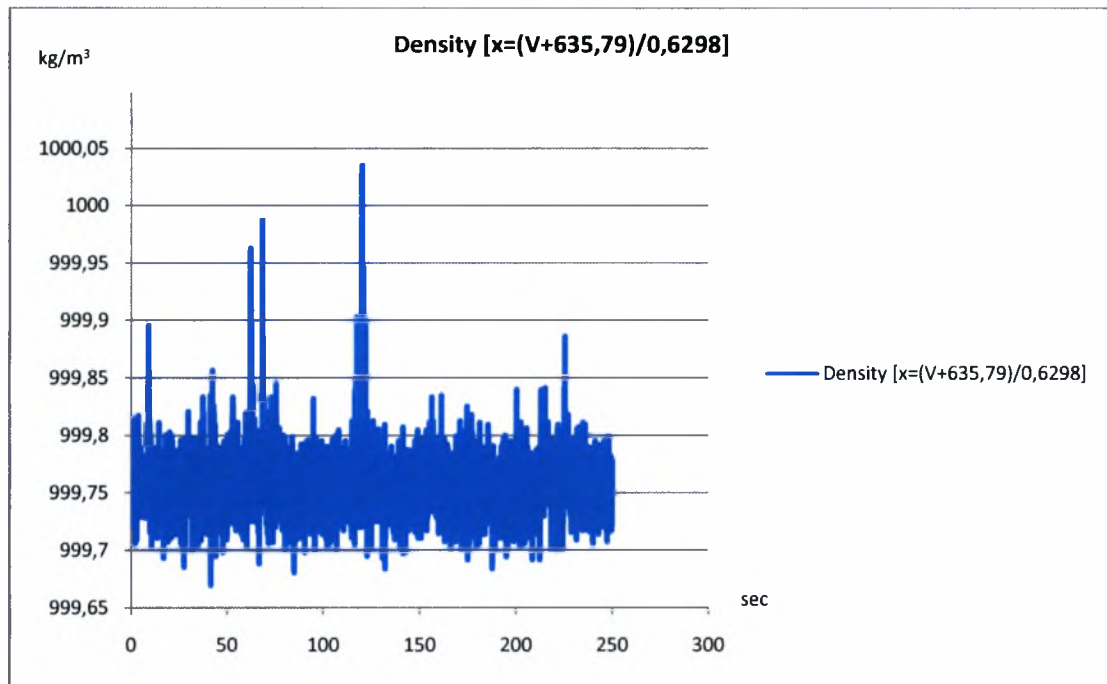
Το επόμενο διάγραμμα που θα δούμε αναφέρεται σε ένταση τύρβης για ταλάντωση στα 16Hz.



Γράφημα 4.27 Cavity W/H=2,  $\rho=1006.6\text{kg/m}^3$ , inverter 16Hz

Για τη δοκιμή στα 16Hz ο ρύπος εξέρχεται για πρώτη φορά από την κοιλότητα στα 13.24sec με ένταση  $1000.23\text{kg/m}^3$ . Στα 15.56sec εξέρχεται η επόμενη ποσότητα ρύπου εντάσεως  $1001.73\text{kg/m}^3$  όπου θα ακολουθήσουν διαδοχικές απομακρύνσεις από την κοιλότητα μέχρι τα 28sec. Η συχνότητα απομακρύνσεων είναι  $1/2,32=0.43\text{Hz}$  που είναι το  $1/7$  της συχνότητας ταλάντωσης των πλεγμάτων που είναι 2.98Hz. Η μεγαλύτερη κορυφή κι άρα η μεγαλύτερη απομάκρυνση ρύπου πραγματοποιείται στα 20.98sec με ένταση  $1002.85\text{kg/m}^3$ . Από τα 27.67sec μέχρι τα 31sec δεν εξέρχεται ρύπος για να αρχίσει πάλι μέχρι τα 36.18sec όπου υπάρχει η τελευταία κορυφή εντάσεως  $999.84\text{kg/m}^3$ . Μέχρι τα 150sec που είναι ο χρόνος δειγματοληψίας, δεν υπάρχει καμία διακύμανση. Αυτό σημαίνει ότι ο ρύπος απομακρύνθηκε πλήρως από την κοιλότητα. Αυτό επαληθεύεται για ακόμα μια φορά από τις μετρήσεις με τη μέθοδο της φθορίζουσας ουσίας.

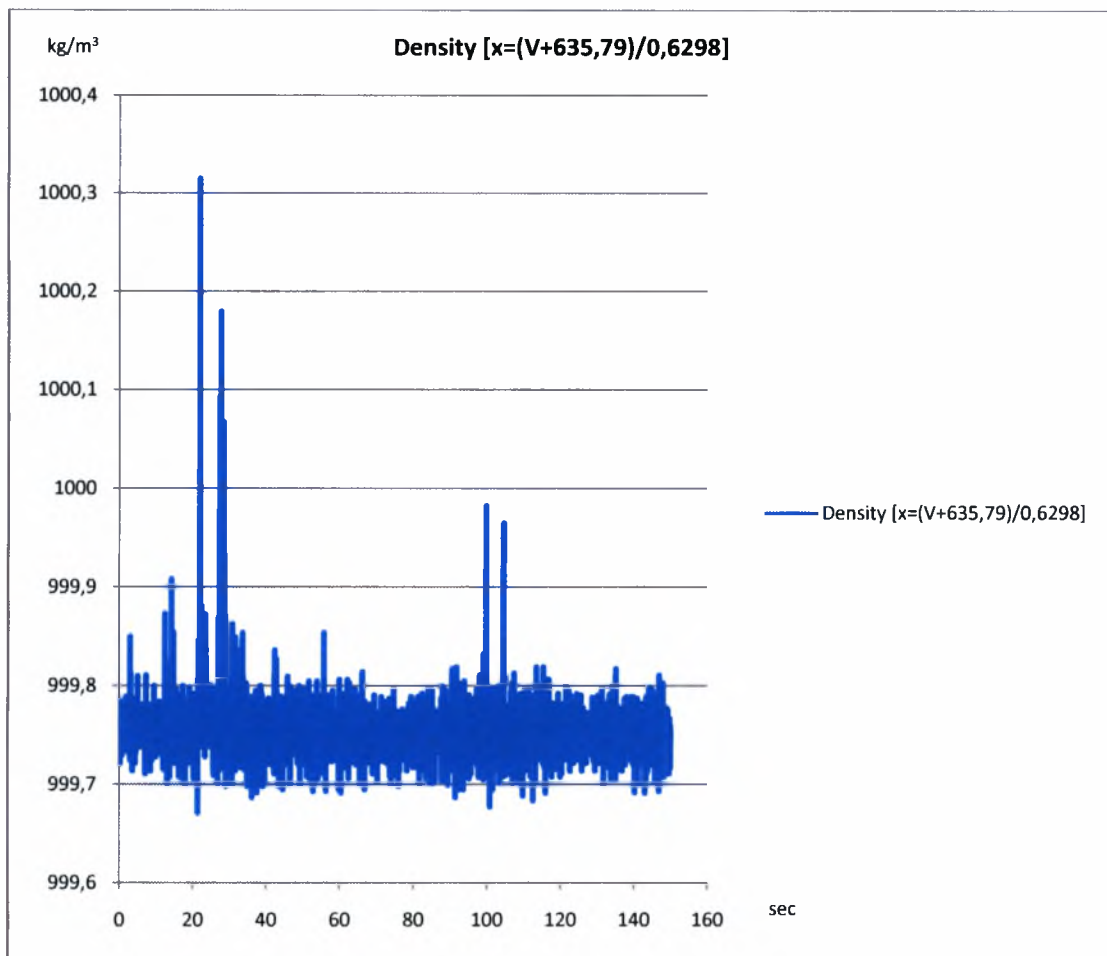
Για την κοιλότητα λόγου W/H=2 θα αναλυθούν τέλος, οι συμπεριφορές για 6Hz και 16Hz των διαγραμμάτων για εξαιρετικά δυνατή ένταση ρύπου. Η πυκνότητα είναι  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ . Εδώ θα περίμενε κανείς να έχουμε πολύ μικρότερα εύρη στις τιμές που αντιλαμβάνεται το αγωγιμόμετρο, αλλά και πολύ μεγαλύτερους χρόνους διάλυσής εξ' αιτίας της πολύ μεγάλης πυκνότητάς του. Παρακάτω παρουσιάζεται η συμπεριφορά του συστήματος για συχνότητα ταλάντωσης 6Hz στον inverter.



**Γράφημα 4.28.** Cavity W/H=2,  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ , inverter 6Hz

Στην περίπτωση του εξαιρετικά δυνατού διαλύματος ρύπου παρατηρούμε ότι έχουμε πολλαπλές κορυφές σε ακανόνιστο χρόνο. Η μεγαλύτερη κορυφή παρατηρείται στα 120.28sec κι έχει ένταση  $1000.03\text{kg/m}^3$ . Η εκκαθάριση πραγματοποιείται σε όλο το χρόνο της δειγματοληψίας. Επίσης παρατηρώντας την τάση της γραφικής παράστασης θα μπορούσε να παρατηρήσει κανείς ότι η καμπύλα παρουσιάζει μια ανεπαίσθητη ημιτονοειδή συμπεριφορά. Η γενικότερη τάση της είναι ουδέτερη.

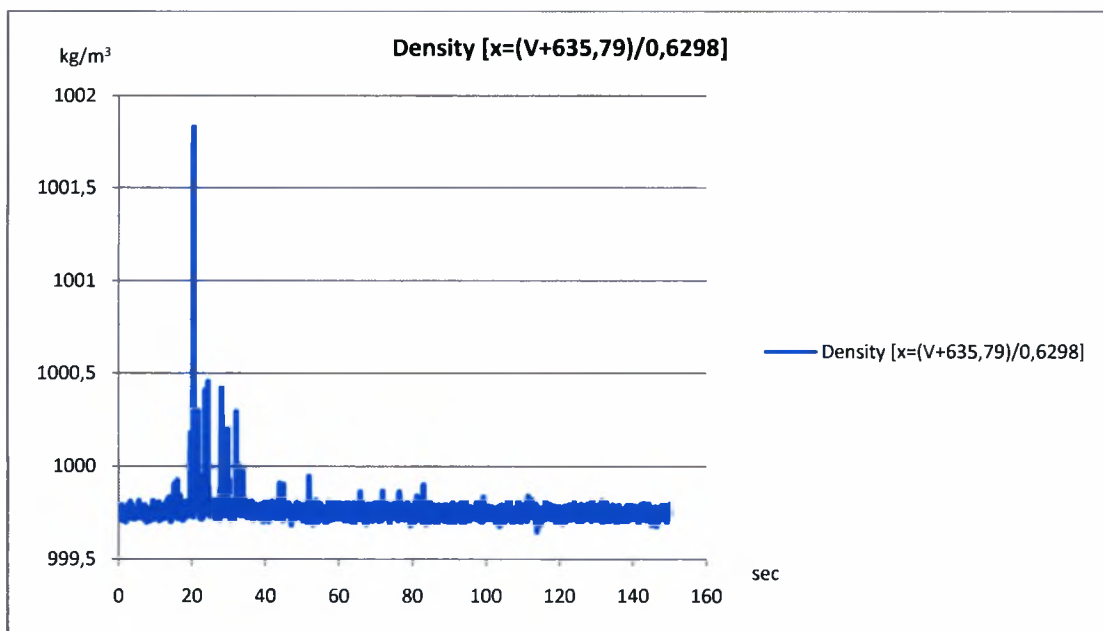
Τέλος για την κοιλότητα αυτή παρακάτω παρουσιάζεται η συμπεριφορά του διαγράμματος για ταλάντωση 16Hz.



Γράφημα 4.29. Cavity W/H=2,  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ , inverter 16Hz

Στο διάγραμμα για 16Hz στον inverter παρατηρούνται και πάλι κορυφές σε τυχαία χρονικά σημεία. Η διαφορά εδώ είναι ότι έχουμε ισχυρή διάχυση του ρύπου στην αρχή της δοκιμής και μετά αυτή επαναλαμβάνεται λίγο αργότερα με μικρότερη βέβαια ένταση. Η εκκαθάριση φαίνεται να γίνεται πιο γρήγορα από τα 6Hz που είναι το λογικό. Η πρώτη φάση πραγματοποιείται στα 20 ως 30sec όπου κι εμφανίζεται μεγαλύτερη κορυφή στα 21.96sec εντάσεως  $1000.31\text{kg/m}^3$ . Η δεύτερη φάση πραγματοποιείται κοντά στα 100sec της δοκιμής. Η πρώτη κορυφή εμφανίζεται στα 99.8sec με ένταση  $999.98\text{kg/m}^3$  και η δεύτερη και μικρότερη στα 104.57sec με ένταση  $999.96\text{kg/m}^3$ . Η τάση της γραφικής απεικόνισης είναι επίσης ουδέτερη κι αυτή τη φορά χωρίς ημιτονοειδή τάση.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι δεν υπάρχουν σημαντικές κορυφές για το μέγεθος της πυκνότητας του ρύπου. Μια εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι η τύρβη δεν έχει τη δύναμη, ή συντονίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην μπορεί να γίνεται η εκκαθάρισή του. Γι' αυτό το λόγο, θα παρατεθεί άλλο ένα διάγραμμα. Έχει επιλεγεί διάγραμμα το οποίο αναφέρεται σε συχνότητα ταλάντωσης 12Hz.

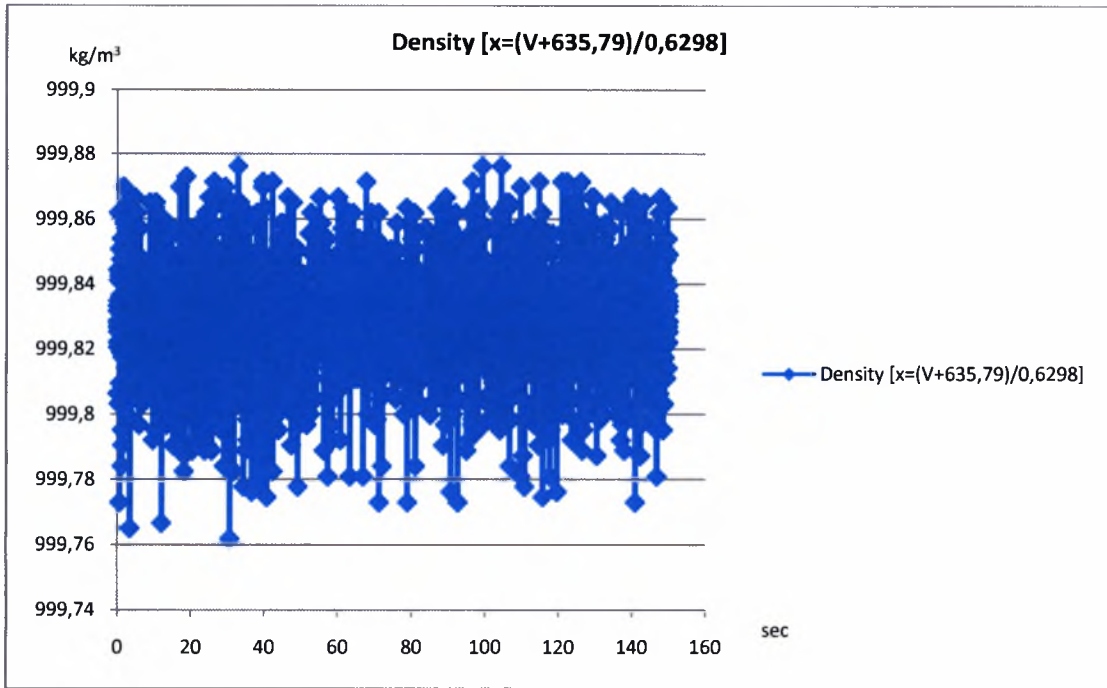


Γράφημα 4.30. Cavity W/H=2,  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ , inverter 12Hz

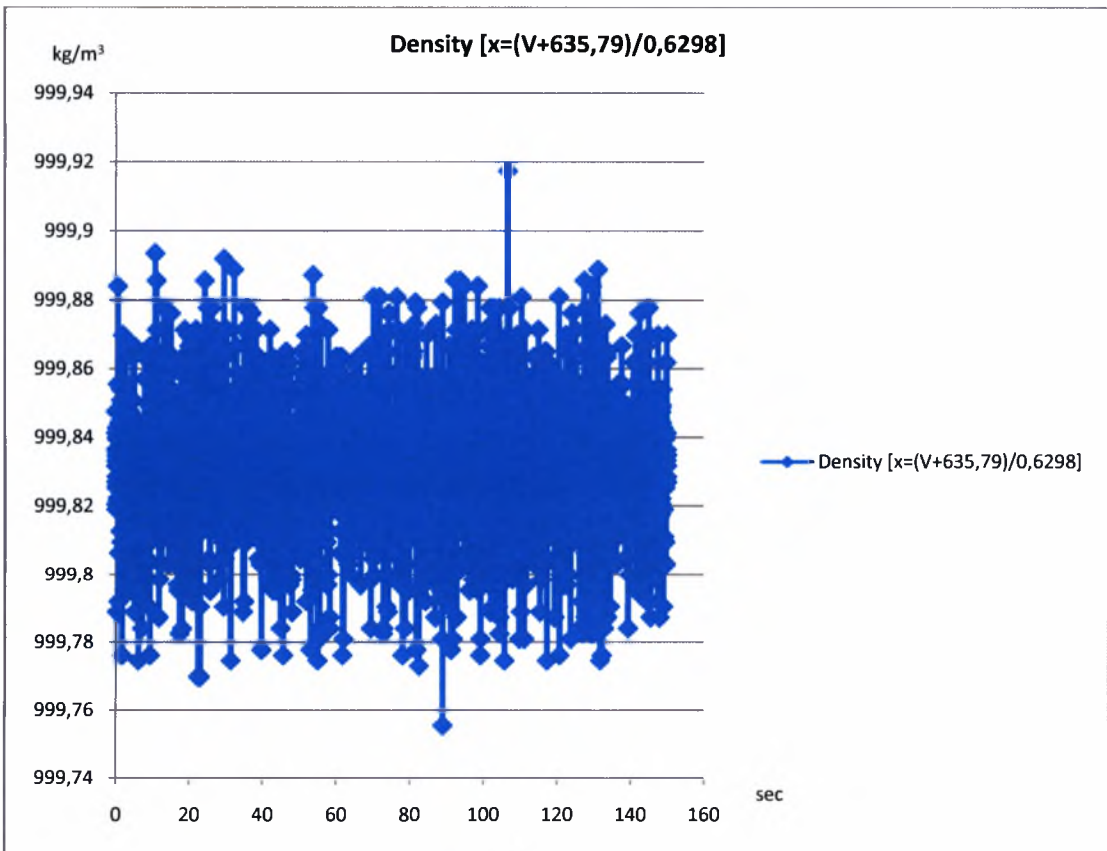
Στην περίπτωση της ταλάντωσης των πλεγμάτων για συχνότητα inverter τα 12Hz παρατηρείται μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά από τα 2 προηγούμενα διαγράμματα. Μπορεί κανείς να δει ότι η εκκαθάριση του ρύπου συμβαίνει κατά κύριο λόγο σε ένα χρονικό όριο από τα 15.08sec ως τα 28.9sec. Από εκεί και πέρα μέχρι το τέλος της δειγματοληψίας συνεχίζεται η εκκαθάριση με σαφώς μικρότερη ένταση. Η μεγαλύτερη κορυφή φαίνεται στα 20.34sec με ένταση  $1001.82\text{kg/m}^3$ . Η συμπεριφορά για τα 12Hz είναι περισσότερο αναμενόμενη από τα 2 προηγούμενα διαγράμματα. Δεν παύει όμως να μην είναι τόσο φυσιολογική για το μέγεθος του αρχικού ρύπου. Απ' ότι φαίνεται το φαινόμενο του συντονισμού παίζει κυρίαρχο λόγο γι' αυτή τη συμπεριφορά των διαγραμμάτων. Στο κεφάλαιο που αναφέρεται για τη μέση διακύμανση του εύρους των τιμών και της μέσης τιμής της πυκνότητας που αντιλαμβάνεται το αγωγιμόμετρο, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η συμπεριφορά για την μεγαλύτερη απ' όλες ένταση ρύπου, και το εύρος αλλά και η μέση τιμή είναι μικρότερη.

Η επόμενη κοιλότητα η οποία θα αναλυθεί είναι με εύρος προς πλάτος W/H=1/2. Σε αυτή την περίπτωση, όπως έχουμε δει από τα διαγράμματα της μέσης τιμής της πυκνότητας και της τυπικής απόκλισης, δεν υπάρχουν αξιόλογες μεταβολές των τιμών. Όπως φάνηκε από τα πειράματα με τη φθορίζουσα ουσία, ο ρύπος παρέμενε στον πάτο της κοιλότητας και δεν ήταν δυνατόν να εκδιωχθεί από την ένταση της τύρβης. Η κοιλότητα με W/H=1/2 είναι μια δύσκολη περίπτωση κοιλότητας για τη διείδυση της τύρβης. Ενδεικτικά θα αναφέρω τρία διαγράμματα από ένα για κάθε ένταση του ρύπου. Όπως θα φανεί από τα διαγράμματα δεν υπάρχουν κορυφές στην αλατότητα, ή έστω αν υπάρχουν, είναι πολύ μικρότερες από την αντίληψη του αγωγιμομέτρου. Τα διαγράμματα αναφέρονται σε ταλάντωση 16Hz.

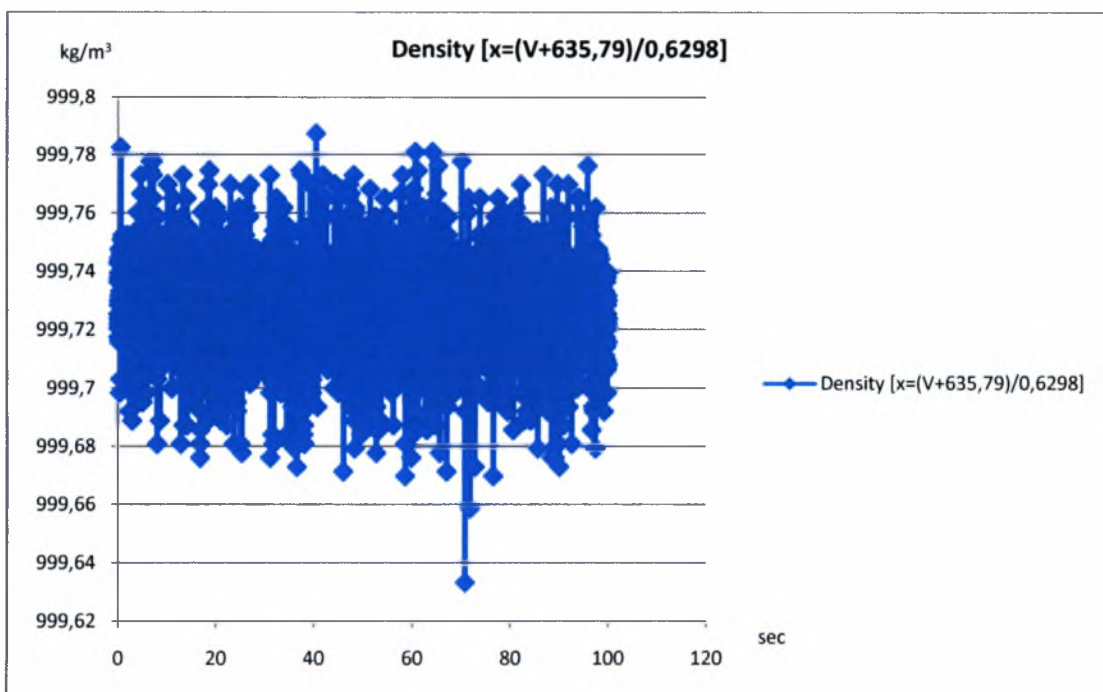




Γράφημα 4.31. Cavity W/H=1/2,  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ , inverter 16Hz



Γράφημα 4.32. Cavity W/H=1/2,  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ , inverter 16Hz



Γράφημα 4.33. Cavity W/H=1/2,  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ , inverter 16Hz

Όπως βλέπουμε από τα τρία διαγράμματα δεν υπάρχει κάποια μεταβολή στην πυκνότητα. Ο θόρυβος που βγάζει ο αισθητήρας σε μονάδες πυκνότητας μεταφράζεται σε  $0.1\text{kg/m}^3$ . Τη στιγμή που ο θόρυβος επικαλύπτει το σήμα, σημαίνει ότι οι μεταβολές στην πυκνότητα, ακόμα και για τη μεγαλύτερη ένταση της πυκνότητας, είναι μικρότερες από  $0.1\text{kg/m}^3$ . Αυτό σημαίνει ότι ούτε σε αυτήν την περίπτωση καταφέρνει να εισέλθει η τύρβη για να εκκαθαρίσει το ρύπο.

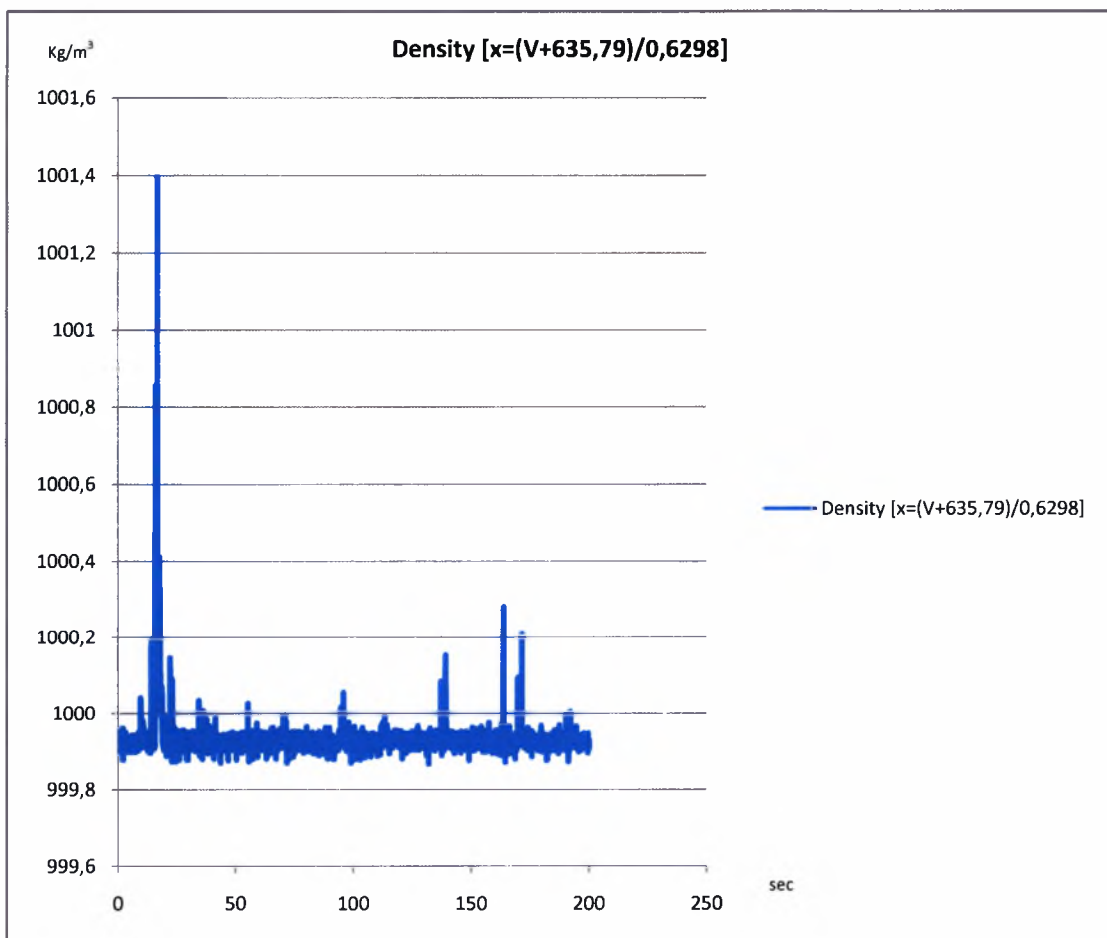
Η συμπεριφορά που παρατηρείται γενικότερα σε όλα τα διαγράμματα, είναι ουδέτερη, δεν υπάρχει αξιόλογη τάση των γραμμών. Επίσης ένα αξιοπρόσεκτο σημείο είναι ότι οι μέσες τιμές των διαγραμμάτων, ακόμα και οι κορυφές τους, είναι πολύ μικρότερες από τον αδιάλυτο ρύπο. Αυτό σημαίνει ότι η διάχυση του ρύπου γίνεται πολύ γρήγορα αλλά η πλήρης διάλυσή του παίρνει σημαντικό χρόνο.

#### 4.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΗΜΑΤΟΣ ΕΚΚΑΘΑΡΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει περιγραφή του τρόπου με τον οποίον απομακρύνεται ο ρύπος από την κοιλότητα. Είναι η ίδια ανάλυση με αυτήν που προηγήθηκε για τα πειράματα με τη φθορίζουσα ουσία. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των δυο μεθόδων μέτρησης καθώς και συζήτηση για το αν υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων καθώς αυτά προκύπτουν. Το συμπέρασμα που εξάχθηκε ήταν ότι το βήμα συγκέντρωσης του ρύπου στο χείλος της δεξαμενής συμφωνούσε με τη συχνότητα της ταλάντωσης, ανεξαρτήτου συχνότητας ταλάντωσης, ανεξαρτήτου πυκνότητας ρύπου κι ανεξαρτήτου λόγου κοιλότητας.

Ενδεικτικά θα γίνει επιλογή κάποιων χαρακτηριστικών διαγραμμάτων από τα πειράματα με το αγωγιμόμετρο καθώς αυτά προκύπτουν από την έκλυση ρύπου με διπλούς σωληνίσκους εκπομπής.

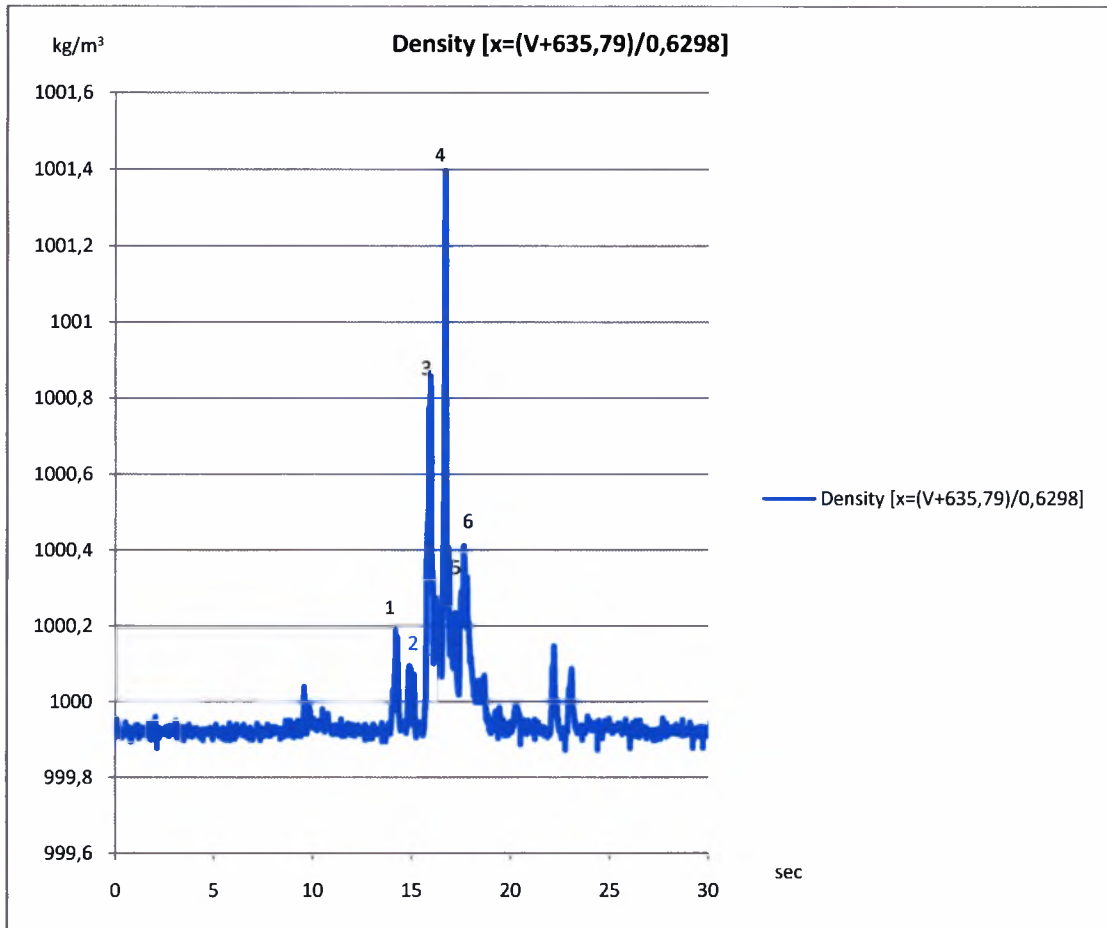
Το διάγραμμα που επιλέχθηκε γι' αυτό το σκοπό αναφέρεται στη συχνότητα στον inverter 6Hz για έντονης έντασης αλατότητα και για λόγο κοιλότητας  $W/H=2$ .



Γράφημα 4.34.1. Cavity  $W/H=2$ ,  $\rho=1006.6\text{kg/m}^3$ , inverter 6Hz

Όπως φαίνεται η τύρβη εκκαθαρίζει την κοιλότητα σε όλη τη χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας σε 8 φάσεις από τις οποίες. Η κορυφή που δείχνει το αγωγιμόμετρο είναι στα 16.67sec με ένταση  $1001.1\text{kg/m}^3$ . Η ποσότητα της

εκλυόμενης ουσίας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν με το μονό σωληνίσκο εξ' αιτίας των αντιστάσεων ροής στο σύστημα που ήταν σχεδόν μηδενικές. Η διάρκεια έκλυσης ρύπου ήταν 10sec αλλά η εξαγωγή του ρύπου γινόταν μόνο με τη βαρύτητα. Επειδή οι ποσότητες δεν είναι οι ίδιες από τη φύση τους δεν μπορούμε να έχουμε συγκριτικά αποτελέσματα του χρόνου διάλυσης του ρύπου με τη μέθοδο της φθορίζουσας ουσίας με το αγωγιμόμετρο. Η σύγκριση επικεντρώνεται στο βήμα με το οποίο εξάγεται ο ρύπος. Για το λόγο αυτό παρατίθεται από το ίδιο διάγραμμα μεγεθυμένο στο χρόνο για να είναι πιο διακριτές οι κορυφές που μεταφράζουν το ίδιο το βήμα.

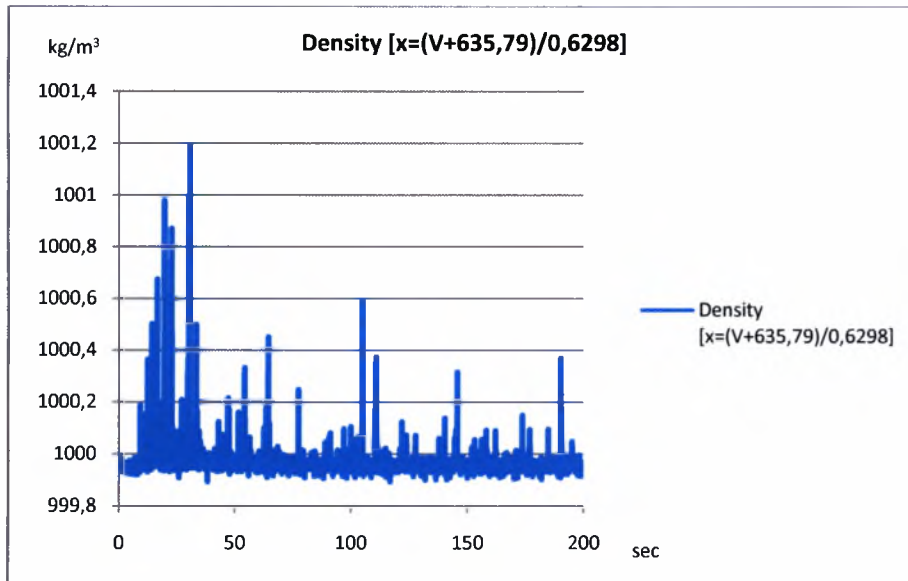


**Γράφημα 4.34.2.** Cavity W/H=2,  $\rho=1006.6\text{kg/m}^3$ , inverter 6Hz, μεγέθυνση

Με την παραπάνω μεγέθυνση βλέπουμε τη συμπεριφορά του ρύπου μέχρι τα 30sec της δειγματοληψίας. Από τα 10sec μέχρι τα 20sec έχουμε διαδοχικές εκκαθαρίσεις του ρύπου. Συμβαίνουν συνολικά 4 εκκαθαρίσεις. Η δεύτερη και τέταρτη εκκαθάριση είναι σχεδόν δίδυμες. Η πρώτη με την τρίτη χαρακτηρίζονται ως εξής: Η πρώτη είναι σχεδόν ανεπαίσθητη και η τρίτη είναι αυτή που βγάζει τη μεγαλύτερη κορυφή. Σε όλη τη διάρκεια των εκκαθαρίσεων, η συχνότητα με τη οποία γίνονται είναι ακαθόριστη. Η διαδοχικότητα που παρατηρούμε είναι στις κορυφές που εμφανίζονται με νούμερα στο διάγραμμα, από 1 ως 6. Το διάστημα από την τρίτη ως την τέταρτη κορυφή, είναι  $15.95\text{sec} - 16.67\text{sec} = 0.72\text{sec}$  ή  $1/0.72=1.38\text{Hz}$

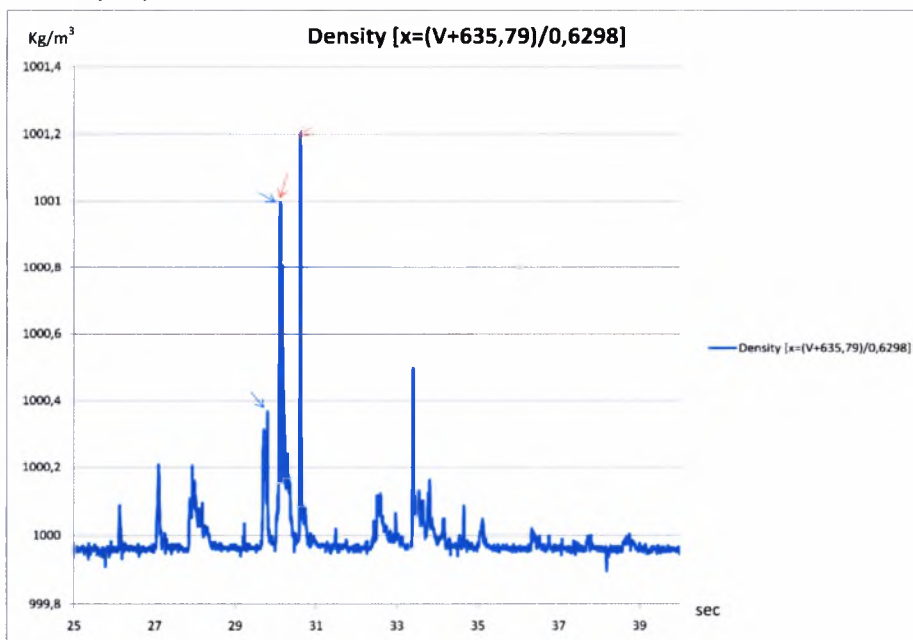
ταλάντωσης που συμφωνεί με τα 6Hz στον ταλαντωτή όπως προκύπτει από τη βαθμονόμηση.

Το επόμενο διάγραμμα αναφέρεται σε αλατότητα  $1013.2\text{kg/m}^3$  για την ίδια κοιλότητα συχνότητας 12Hz.



Γράφημα 4.35.1. Cavity  $W/H=2$ ,  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ , inverter 12Hz

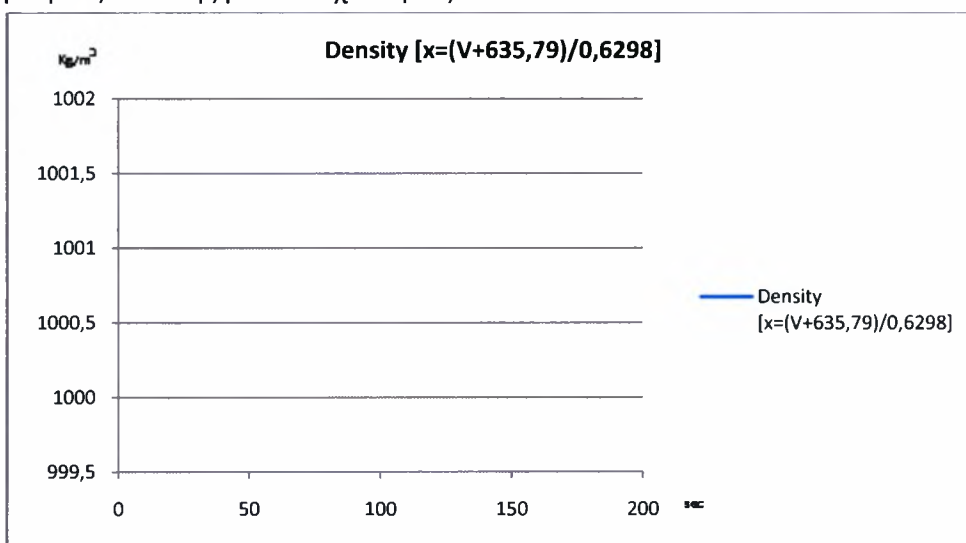
Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η εκκαθάριση πραγματοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της δειγματοληψίας επίσης. Στα 30.6sec με ένταση  $1001.19\text{kg/m}^3$  είναι η υψηλότερη κορυφή. Επίσης το βήμα εκκαθάρισης για το σύνολο του φαινομένου συμβαίνει τυχαία. Παρακάτω παρατίθεται μεγέθυνση χαρακτηριστικού χρονικού διαστήματος για τη μελέτη των δημιουργούμενων δινών από τα χείλη της κοιλότητας.



Γράφημα 4.35.2. Cavity  $W/H=2$ ,  $\rho=1013.2\text{kg/m}^3$ , inverter 12Hz, μεγένθυση

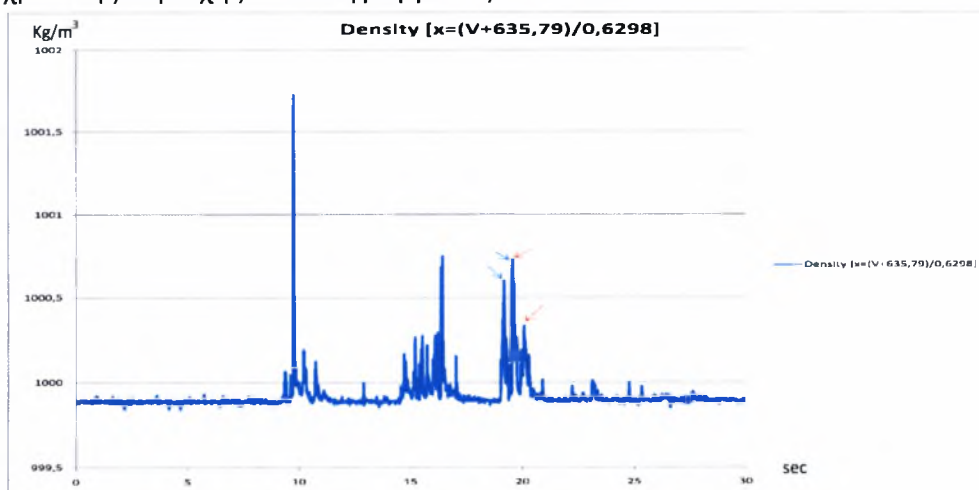
Για το παραπάνω διάγραμμα εξ' αιτίας της ιδιομορφίας του, μετρήθηκαν 2 χρονικά διαστήματα και ελήφθη ο χρονικός μέσος όρος του για την προβολή της συχνότητάς τους. Τα πρώτα μπλε βέλη είναι για το πρώτο διάστημα και τα κόκκινα είναι για το δεύτερο. Το πρώτο διάστημα είναι 0.31sec και το δεύτερο 0.5sec. Ο μέσος όρος τους είναι τα 0.405sec που μεταφράζονται σε 2.47Hz συχνότητας. Η συχνότητα ταλάντωσης είναι τα 12Hz στον inverter. Η συχνότητα ταλάντωσης είναι 2.23Hz που είναι λίγο πιο κάτω από τη συχνότητα εξαγωγής του ρύπου. Παρουσιάζει μια καθυστέρηση στην εξαγωγή η οποία φαίνεται πως προέρχεται από σφάλματα στη μέτρηση του αγωγιμόμετρου, ή σφάλματα κατά την παρατήρηση.

Το επόμενο διάγραμμα που παρατίθεται αναφέρεται στην ίδια κοιλότητα για μέτριας έντασης ρύπο συχνότητας 12Hz.



Γράφημα 4.36.1. Cavity W/H=2,  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ , inverter 12Hz

Η εξέλιξη του ρύπου ακολουθεί τον 'κανόνα' των υπόλοιπων διαγραμμάτων. Η διάλυση του ρύπου συμβαίνει τυχαία κατά την όλη διάρκεια της δειγματοληψίας. Για να δούμε τη συχνότητα των δινών, όπως και πριν, θα γίνει μεγέθυνση μιας χρονικής περιοχής του διαγράμματος.



Γράφημα 4.36.2. Cavity W/H=2,  $\rho=1003.3\text{kg/m}^3$ , inverter 12Hz μεγένθυση

Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, έτσι παρουσιάζεται ένας μέσος όρος για το χρόνο που κάνουν οι δίνες να εξαχθούν διαδοχικά. Ο μέσος όρος των σημειωμένων χρονικών διαστημάτων είναι  $(0.38+0.52)/2=0.45\text{sec}$ . Σε συχνότητα, το διάστημα αυτό είναι  $1/0.45=2.22\text{Hz}$  που συμφωνεί ακριβώς με τη συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων που είναι τα  $2.23\text{Hz}$ . Εξ' αιτίας της ίδιας γεωμετρίας των κοιλοτήτων δεν είναι απαραίτητα να παρουσιαστούν αναλύσεις διαγραμμάτων από τις υπόλοιπες 2 κοιλοότητες καθώς αυτά συμπίπτουν απόλυτα.

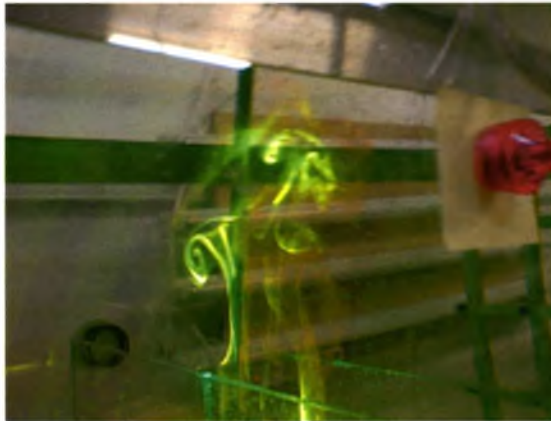
Το συμπέρασμα που τελικά εξάγεται είναι ότι με τη μέθοδο της φθορίζουσας ουσίας, καθώς και με τη μέθοδο του αγωγιμόμετρου, βλέπουμε πως υπάρχει απόλυτη ταύτιση των συχνοτήτων εξαγωγής του ρύπου. Είναι ίδια με τη συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων κι ανεξάρτητη από το εύρος ταλάντωσης, από την πυκνότητα του ρύπου κι από το βάθος της κοιλότητας.

#### **4.4 Μορφή και συμπεριφορά δινών**

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει λόγος για τη μορφή και τη συμπεριφορά της ροής γύρω και μέσα στην κοιλότητα. Το περιβάλλον της διεξαγωγής των πειραμάτων, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από τη δεξαμενή με το νερό, τα πλέγματα και τον οπλισμό τους, τις κοιλοότητες, από το σύστημα έγχυσης ρύπου καθώς και τον αισθητήρα αγωγιμότητας – θερμοκρασίας. Η συμπεριφορά του περιβάλλοντος της περιοχής λήψης δεδομένων διαμορφώνεται σύμφωνα με τα αντικείμενα τα οποία υπάρχουν. Τα πλέγματα, η κοιλότητα, η δεξαμενή και το σύστημα έγχυσης ρύπου είναι μέσα τα οποία σύμφωνα με το σχεδιασμό τους δημιουργούν τις επιθυμητές συνθήκες της προσομοίωσης. Ο αισθητήρας της αγωγιμότητας – θερμοκρασίας και ο οπλισμός των πλεγμάτων είναι μέσα που χρησιμεύουν για την εξαγωγή των δεδομένων και για τη στήριξη της διάταξης των πλεγμάτων αντίστοιχα. Είναι μέσα όμως που επίσης δημιουργούν δικό τους ροϊκό πεδίο επηρεάζοντας το ροϊκό πεδίο σχεδιασμού εισάγοντας σφάλματα. Τα σφάλματα που εισάγονται επηρεάζουν κατ' ελάχιστο το ροϊκό πεδίο γύρω από την κάθε κοιλότητα. Οι κοιλοότητες επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ισοτροπία της τύρβης στο περιβάλλον ανάμεσα στα πλέγματα. Αυτό όμως είναι επιθυμητό. Οι κοιλοότητες προσομοιάζουν ροή σε οδικές χαράδρες S.T. Char and R.L. Lee (Feb.1999). Η τύρβη που παράγεται από τα πλέγματα είναι σχεδόν ισοτροπική όπως η ωκεάνια και της ατμόσφαιρας J.J. Orlins, J.S. Gulliver (2003).

Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της ανάμειξης του ρύπου στο περιβάλλον της δεξαμενής μέσω της παραγόμενης τύρβης, παρατηρούνται δευτερεύουσες ροές, μικροροές, δίνες μέσα κι έξω από τις κοιλοότητες και συμπεριφορές οι οποίες προφανώς σχετίζονται με τα μέσα και τη γεωμετρία που χρησιμοποιούνται. Παρακάτω ακολουθεί μια παρουσίαση της μορφής και της ύπαρξης όλων αυτών των μορφών που περιγράφηκαν πιο πάνω. Μια συνηθισμένη συμπεριφορά ροής

που παρατηρείται, είναι η δημιουργία δινών εναλλάξ, στο ένα και στο άλλο χείλος της κάθε κοιλότητας, ανεξαρτήτου πυκνότητας του ρύπου, ανεξαρτήτου εύρους ταλάντωσης, ανεξαρτήτου συχνότητας. Με την ένταση της τύρβης οι δίνες δημιουργούνται και καταστρέφονται πιο αργά ή πιο γρήγορα. Με την αύξηση της έντασης της τύρβης προφανώς οι δίνες καταστρέφονται πιο γρήγορα. Στη διπλανή φωτογραφία φαίνεται μια δίνη καθώς έχει δημιουργηθεί σε συνθήκες σχεδόν μηδενικής τύρβης. Έχει σταματήσει η ταλάντωση και το περιβάλλον τείνει σε φάση ηρεμίας. Στα δεξιά της φωτογραφίας, στοιχείο 2., έχει δημιουργηθεί μια δίνη η

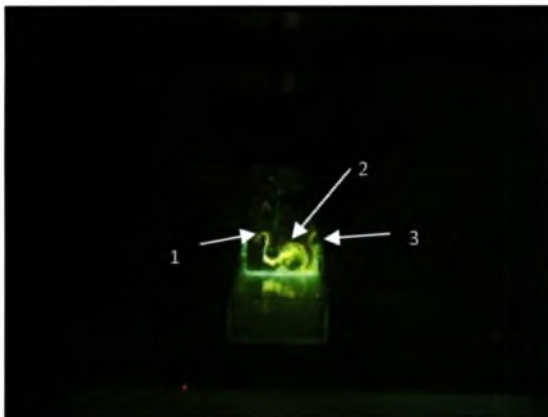


Εικ.[4.37] Διάχυση ρύπου από κοιλότητα

οποία προήλθε από το δεξί χείλος της κοιλότητας κι έχει σπάσει σε δυο μικρότερες κι ακριβώς μετά από μια συχνότητα ταλάντωσης έχει δημιουργηθεί άλλη μια από το αριστερό χείλος της, στοιχείο 1. και τείνει να σπάσει σε δυο μικρότερες. Μάλιστα στο στοιχείο 2 της φωτογραφίας, ακριβώς από κάτω από τις δυο δίνες, δημιουργήθηκαν άλλες

δυο και βρίσκονται στο ίδιο ύψος με τη δίνη από το αριστερό χείλος. Ακριβώς αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται για κάθε ένταση της τύρβης. Ανάλογα, αυτές οι δίνες δημιουργούνται κι αναπτύσσονται πιο γρήγορα κι άλλοτε πιο αργά. Στη συνέχεια θα σπάσουν σε άλλες μικρότερες και ο αριθμός τους αυξάνεται και γίνονται τάξης  $2^n$  μέχρι να φθάσουν σε επίπεδο μοριακής διάχυσης (θεωρία K41 του Kolmogorov).

Παρακάτω θα ακολουθήσουν στιγμιότυπα από τυχαίο βίντεο που ελήφθη για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για περαιτέρω ανάλυση.

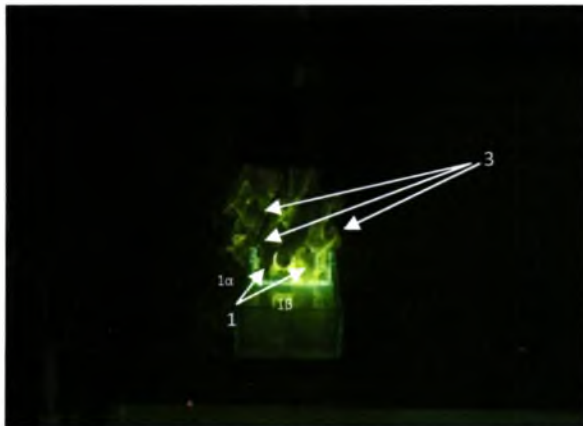


Εικ.[4.38] Small Cavity Frame=3sec

Η πιο πάνω εικόνα αναφέρεται σε μετρήσεις με τη μικρού μεγέθους κοιλότητα για ταλάντωση 8Hz με ρύπο μετρίας έντασης. Καθώς εκλύεται ο ρύπος παρατηρούνται 3 περιοχές δινών. Η έκλυση ξεκίνησε πριν περίπου 3sec. Η μία βρίσκεται αριστερά



της κοιλότητας με τον αριθμό 1, η δεύτερη που είναι μεγαλύτερης κλίμακας, βρίσκεται λίγο πιο δεξιά από το σύστημα έκλυσης ρύπου και μάλιστα όπως φαίνεται έχει το ίδιο μέγεθος με το σωληνάκι που εκλύεται ο ρύπος, αριθμείται με το 2, καθώς και η τρίτη δίνη έχει το μέγεθος της πρώτης, αριθμείται με το νούμερο 3. Η τύρβη έχει ήδη εισχωρήσει στην κοιλότητα και 3 sec μετά την έκλυση του ρύπου έχει αρχίσει η διάλυσή του. Οι δίνες που δημιουργούνται ξεκινούν με το μέγεθος του συστήματος έκλυσης και στη συνέχεια διαιρούνται σε μικρότερες. Με την εκκίνηση του πειράματος, οι δίνες άρχισαν να σχηματίζονται και να διαιρούνται δεξιόστροφα. Στο τέλος της διάλυσής τους, η κυκλοφορία στην κοιλότητα γίνεται αριστερόστροφη. Κατά το χρονικό διάστημα που αλλάζει η ροή, η διάλυση συμβαίνει συμμετρικά στην κοιλότητα. Εμφανίζονται 2 δίνες. Η μία δεξιά από το σύστημα έκλυσης και η άλλη αριστερά με αντίθετες φορές. Στα αριστερά η φορά είναι δεξιόστροφη και στα δεξιά αριστερόστροφη. Στα 7sec απ' όπου είναι και το επόμενο frame η κυκλοφορία έχει έρθει σε ισορροπία και παρατηρείται αυτή η κατεύθυνση των δινών. Στο επόμενο frame στα 7sec ακολουθεί μια ανάλυση για τη μορφή των δινών, εκεί, όπως παρατηρούνται.



Εικ.[4.39] Small Cavity Frame=7sec

Η κυκλοφορία σε αυτό το frame έχει έρθει σε ισορροπία και η διάλυση του ρύπου γίνεται συμμετρικά προς τον άξονα που διέρχεται από το μέσο του συστήματος έκλυσης. Παρατηρούνται 2 μορφές δινών. Η πρώτη ομάδα με τις δίνες είναι η μεγαλύτερης κλίμακας δίνες οι οποίες κινούνται ως εξής: Η δίνη 1α κινείται στο αριστερό μέρος της κοιλότητας δεξιόστροφα και η 1β κινείται με αντίθετη φορά ακριβώς στο δεξί τείχος της κοιλότητας και φαίνεται να έχει το ίδιο μέγεθος με την πρώτη. Η 1α έχει λίγο μικρότερο μέγεθος το οποίο συμβαίνει εξ' αιτίας της τοποθέτησης του συστήματος έκλυσης που μπαίνει στα σφάλματα των πειραμάτων. Η τρίτη ομάδα δινών, συμβολίζεται με τον αριθμό 3 στην εικόνα, αποτελείται από αυτές που βγαίνουν από τα χείλη της δεξαμενής. Βγαίνουν εναλλάξ και με αντίθετες φορές από το δεξί κι αριστερό χείλος της κοιλότητας για να διαιρεθούν σε ακόμα μικρότερες και στο τέλος να διαλυθούν εντελώς, όπου έχει λήξει ουσιαστικά ο χρόνος διάλυσης. Όπως έχει παρατηρηθεί η μορφή των δημιουργούμενων δινών

είναι ακριβώς η ίδια για όλες τις συχνότητες και για τις τρεις αλατότητες. Ανάλογα όμως την αλατότητα και την ένταση της τύρβης, αυτές δημιουργούνται και διαλύονται πιο γρήγορα, ή πιο αργά. Παρακάτω θα ακολουθήσει ανάλυση για τις κοιλότητες της δημιουργίας και της διάλυσης των δινών σε σχέση με τη συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων.

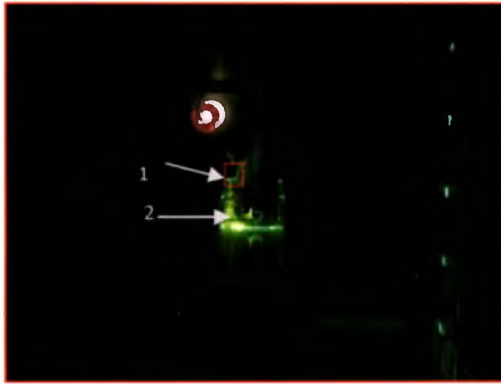
#### 4.5 Ανάλυση χρόνων δημιουργίας – διάλυσης

Για την κοιλότητα λόγου  $W/H=1$  θα ακολουθήσει παρουσίαση των δινών, σε πόσο χρόνο δημιουργούνται, καθώς και σε πόσο χρόνο διαλύονται. Τα στιγμιότυπα που ελήφθησαν από το βίντεο των πειραμάτων αναφέρονται σε ρύπο έντονης έντασης για συχνότητα ταλάντωσης **8Hz** στον inverter που αντιστοιχεί σε **1.45Hz** ταλάντωσης.



Εικ.[4.40] Square Cavity Frame=21.04sec

Το πρώτο στιγμιότυπο είναι στο frame=526 ή αλλιώς στα 21.04sec. Θα παρακολουθήσουμε τη συμπεριφορά της δημιουργούμενης δίνης 1, όπου έχει σημειωθεί με κόκκινο τετράγωνο στην εικόνα, και την καταστροφή της, για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της με τη συχνότητα ταλάντωσης. Όπως βλέπουμε, στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο η προηγούμενη δίνη που είχε δημιουργηθεί έχει ήδη καταστραφεί (δίνη 0) και θα ξεκινήσει να εξάγεται ουσία για τη δημιουργία της δίνης 1. Η ουσία έχει αρχίσει να ανεβαίνει στην κοιλότητα για να φθάσει στο χείλος της όπου θα δημιουργηθεί η δίνη 1 όπως έχει ονομαστεί. Στο επόμενο στιγμιότυπο θα δούμε τη δίνη 1 καθώς θα δημιουργείται.



Εικ.[4.41] Square Cavity Frame=21.44sec

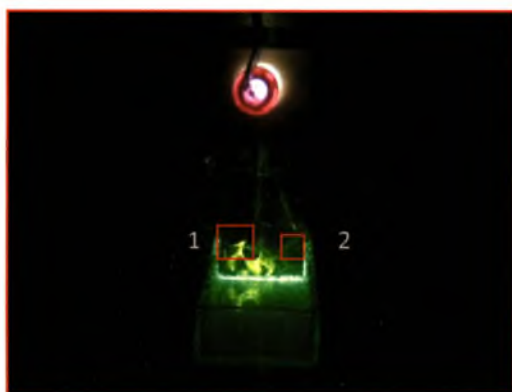
Στα 21.44sec ή στο frame=536 η δίνη 1 δημιουργείται. Στο νούμερο 2 φαίνεται ξεκάθαρα η νέα ποσότητα ουσίας που έχει αρχίσει να ανεβαίνει, για να δημιουργήσει την επόμενη δίνη, όπου θα είναι η δίνη 2. Μεσολαβούν 21.44-21.04=0.4sec. Στη συνέχεια θα δούμε την καταστροφή της δίνης 1 και της σχεδόν διάλυσής της στο περιβάλλον της δεξαμενής.



Εικ.[4.42] Square Cavity Frame=21.72sec

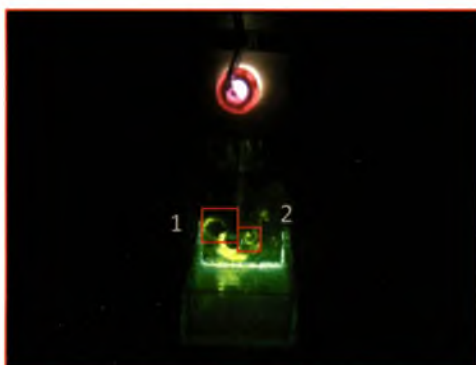
Το στιγμιότυπο αυτό είναι στα 21.72sec ή αλλιώς στο frame=543. Η δίνη 1 έχει κάνει τον κύκλο της, η δίνη 2 αρχίζει να δημιουργείται και η ουσία στο νούμερο 3 έχει αρχίσει να ανεβαίνει για τη δημιουργία της δίνης 3. Μεσολαβούν 21.72-21.44=0.28sec. Το όλο φαινόμενο από την εξαγωγή της ουσίας μέχρι την καταστροφή της δίνης είναι 21.72-21.04=0.68sec που αντιστοιχεί σε συχνότητα  $1/0.68=1.47\text{Hz}$  που είναι πάρα πολύ κοντά στη συχνότητα ταλάντωσης η οποία είναι 1.45Hz.

Η επόμενη κοιλότητα για την οποία θα γίνει λόγος, είναι η μικρή κοιλότητα με λόγο βάθους προς ύψος  $W/H=2$ , για μεγάλης έντασης αλατότητας καθώς και για συχνότητα ταλάντωσης στον inverter στα 10Hz και σε πραγματικής συχνότητας ταλάντωσης στα 1.9Hz.



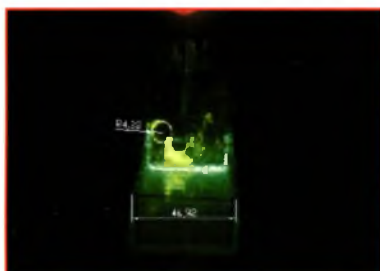
Εικ.[4.43] Cavity W/H=2, frame=9.64sec

Σε αυτό το στιγμιότυπο του βίντεο, για frame=9.64sec ή 241, μπορούμε να διακρίνουμε 2 περιοχές δημιουργίας δινών. Στην περιοχή με τον αριθμό 1 παρατηρούμε τη δημιουργία μιας δίνης, καθώς και στην περιοχή 2 την ύπαρξη άλλης μιας στην οποία έχει γίνει ήδη η ανάμειξή της με το περιβάλλον της δεξαμενής.



Εικ.[4.44] Cavity W/H=2, frame=9.96sec

Σε αυτό το στιγμιότυπο στα 9.96sec ή αλλιώς στο frame 249, παρατηρούμε τη δημιουργία μιας δίνης στην περιοχή 1 που έχει ακτίνα 4.61mm η οποία βρέθηκε με τη βοήθεια του AutoCad ως εξής. Μετρήθηκε το πλάτος της κοιλότητας το οποίο

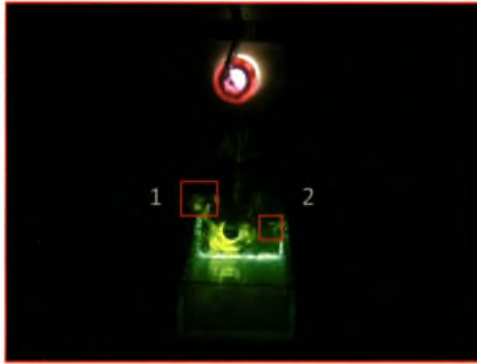


Εικ.[4.45] Ακτίνα δίνης

είναι γνωστό και είναι 5cm και μετά η ακτίνα της δίνης. Με το AutoCad το μήκος της κοιλότητας βρέθηκε να είναι 46.92 και η ακτίνα 4.33. Στη συνέχεια με τη μέθοδο των τριών, βρέθηκε η ακτίνα της δίνης. Δηλαδή,

$$r = \frac{4,33 \cdot 5}{46,92} = 0,461. \text{ Άρα η ακτίνα της δίνης είναι περίπου } 4,61\text{mm} \text{ και είναι λίγο μεγαλύτερη από την}$$

ακτίνα του κυλινδρικού συστήματος του ρύπου. Η δίνη στο δεξί μέρος της κοιλότητας χάθηκε εξ' αιτίας της διάλυσής της. Η διαφορά των δυο στιγμιότυπων είναι 9.96-9.64=0.32sec. Στο επόμενο στιγμιότυπο θα δούμε την εξέλιξη των δημιουργούμενων δινών.



Εικ.[4.46] Cavity W/H=2, frame=10.12sec

Εδώ, στο frame=253 ή αλλιώς στα 10.12sec έχουμε πάλι τις 2 περιοχές με τις δημιουργούμενες δίνες. Στην περιοχή 1 βλέπουμε την προηγούμενη δίνη να έχει διασπαστεί σε δυο μικρότερες ακτίνας 2.1mm, περίπου στο μισό της αρχικής δίνης, και στην περιοχή 2 να προσπαθεί να εξέλθει άλλη μια δίνη. Εδώ η διαφορά είναι  $10.12-9.96=0.16\text{sec}$ , ακριβώς στο μισό του χρόνου για τη δημιουργία της μητρικής δίνης.



Εικ.[4.47] Cavity W/H=2, frame=10.28sec

Σε αυτό το στιγμιότυπο στα 10.82sec ή αλλιώς στο frame=257, θα δούμε την εξέλιξη των δινών από τη δεξιά καθώς και από την αριστερή πλευρά της κοιλότητας. Στην περιοχή 1 οι δυο δίνες που είδαμε πριν διασπάστηκαν σε ακόμα μικρότερες, που δεν είναι διακριτές με το μάτι, καθώς και στην περιοχή 2 δημιουργείται η εξερχόμενη δίνη όπως παρατηρήσαμε από το προηγούμενο στιγμιότυπο. Η διαφορά είναι  $10.28-10.12=0.16\text{sec}$ , όσο ακριβώς ήταν και η προηγούμενη διαφορά.



Εικ.[4.48] Cavity  $W/H=2$ , frame=10.48sec

Στο παρόν στιγμιότυπο βλέπουμε στην περιοχή 1 τη δημιουργία νέας δίνης και τη διάλυση της δίνης που εξήλθε από τα δεξιά της κοιλότητας. Το στιγμιότυπο βρίσκεται στη χρονική στιγμή 10.48sec ή αλλιώς στο frame=262. Η διαφορά από το προηγούμενο είναι  $10.48-10.28=0.20\text{sec}$ . Η χρονική απόσταση εξόδου των δινών από την κοιλότητα είναι  $10.48-9.96=0.52\text{sec}$  ή αλλιώς  $1/0.52=1.92\text{Hz}$  που επίσης συμφωνεί με τη συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων. Σε αυτό το βίντεο επίσης φάνηκε καθαρότερα ο τρόπος με τον οποίο εξέρχονται οι δίνες. Εξέρχονται εναλλάξ, πρώτα από το αριστερό χείλος και μετά από το δεξί χείλος της κοιλότητας.

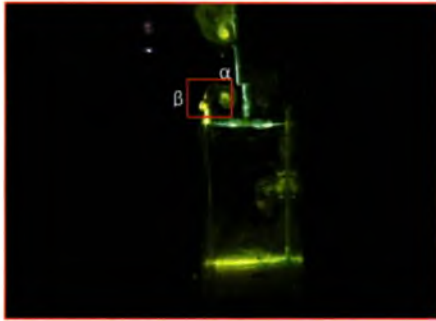
Τέλος θα ακολουθήσει ανάλυση για τη συμπεριφορά των δινών που προκύπτουν από τη διάλυση ρύπου στην κοιλότητα λόγου  $W/H=1/3$  για ένταση ρύπου **δυνατής έντασης** και για έκλυση ρύπου με το σύστημα διπλών σωλήνων στα χείλη της κοιλότητας.



Εικ.[4.49] Cavity  $W/H=1/3$ , frame=7.92sec

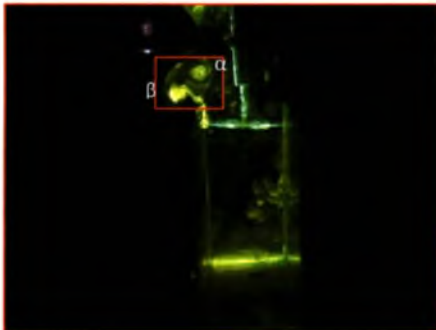
Στο πιο πάνω στιγμιότυπο βλέπουμε την ολοκλήρωση μιας φάσης των δινών που εξέρχονται από τα χείλη της κοιλότητας και τη δημιουργία νέων. Το στιγμιότυπο είναι στα 7.92sec ή αλλιώς στο καρέ 198. Θα μελετήσουμε το χρόνο που διαρκεί μια περίοδος για τη δημιουργία αυτού του συστήματος των δινών καθώς και ταυτόχρονα τη συχνότητα του φαινομένου αυτού. Επίσης θα δούμε σε πόσο χρονικό διάστημα δημιουργείται η κάθε δίνη χωριστά. Στη μικρή περιοχή 1 ακριβώς πάνω στο χείλος της κοιλότητας, φαίνεται η ουσία που είναι έτοιμη να εξέλθει για τη δημιουργία της πρώτης δίνης από το σύστημα των δινών που δημιουργούνται. Στη μεγάλη περιοχή, περιοχή 2, βλέπουμε αυτό το σύστημα των δινών για το οποίο

έγινε λόγος πιο πριν. Σε αυτό, η αριστερή δίνη στροβιλίζεται αριστερόστροφα και η δεξιά, δεξιόστροφα.



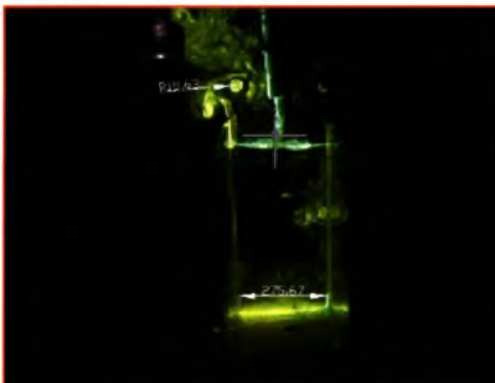
Εικ.[4.50] Cavity W/H=1/3, frame=8.92sec

Εδώ, στα 8.92sec ή αλλιώς στο καρέ 223, έχει δημιουργηθεί η δίνη α κινούμενη δεξιόστροφα, ενώ ταυτόχρονα εξέρχεται ουσία για τη δημιουργία της δίνης β. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί είναι  $7.92-8.92=1\text{sec}$ . Το πλέγμα κινείται από τα αριστερά προς τα δεξιά.



Εικ.[4.51] Cavity W/H=1/3, frame=9.76sec

Σε αυτό το στιγμιότυπο βλέπουμε τη δίνη α να έχει απομακρυνθεί από το χείλος της κοιλότητας και τη δημιουργία της δίνης β αριστερόστροφα καθώς τώρα τα



Εικ.[4.53] Ακτίνα δίνης

πλέγματα κινούνται από δεξιά προς αριστερά. Το στιγμιότυπο βρίσκεται στα 9.72sec ή αλλιώς στο καρέ 243. Μεσολαβούν  $9.76-8.92=0.84\text{sec}$ . Σε αυτό το χρονικό διάστημα βλέπουμε τη δίνη α να έχει αυξήσει το μέγεθός της καθώς κι επίσης να έχει μειώσει την ένταση του ρύπου που εμπεριέχει. Η συχνότητα δημιουργίας αυτών των 2 δινών είναι  $1/0.84=1.14\text{Hz}$ . Σε αυτό το στιγμιότυπο

ταυτόχρονα έχει περάσει μια περίοδος του φαινομένου. Για την ολοκλήρωσή του, το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε, ήταν

$9.76-7.92=1.84\text{sec}$  ή αλλιώς  $1/1.84=0.543\text{Hz}$  που συμφωνεί με τη συχνότητα ταλάντωσης. Χρησιμοποιώντας το AutoCad μπορούμε κι εδώ να βρούμε την ακτίνα της δημιουργούμενης δίνης για να τη συγκρίνουμε με αυτή που δημιουργήθηκε εκλύοντας ρύπο με το σύστημα μονού σωλήνα. Το γνωστό μέγεθος της κοιλότητας είναι το πλάτος της που είναι 5cm. Με το Autocad βρέθηκε να είναι 275.67. Με τη μέθοδο των τριών πάλι:  $r=\frac{18.63 \cdot 5}{275.67} = 0.34\text{cm}$ . Για την ίδια γεωμετρία της κοιλότητας και για διαφορετικό σύστημα έκλυσης βλέπουμε πως η δίνες που δημιουργούνται είναι μικρότερες για διπλό σωλήνα. Ενώ στο προηγούμενο πείραμα η ακτίνα βρέθηκε να είναι 0.46cm τώρα είναι 0.34cm. Η δίνη είναι μικρότερη κατά 12mm. Όπως παρατηρείται, για όλες τις κοιλότητες, για όλες τις αλατότητες η συχνότητα δημιουργίας των δινών στα τοιχώματα συμφωνεί με τη συχνότητα της ταλάντωσης. Ένα σημείο που αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι στη μεγάλη κοιλότητα για μεγάλη περίοδο ταλάντωσης, δημιουργούνται σε μια περίοδο κίνησης των πλεγμάτων αντί για μια δίνη, σύστημα δύο δινών κινουμένων η μια αριστερόστροφα και η άλλη δεξιόστροφα με συχνότητα διπλάσια από αυτή της συχνότητας της ταλάντωσης. Αυτό παρατηρήθηκε χρησιμοποιώντας σύστημα έγχυσης ρύπου 2 σωλήνων. Εκτελέστηκε ακριβώς το ίδιο πείραμα για την τετραγωνική κοιλότητα και η συμπεριφορά που παρατηρήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη καθ' ότι η γεωμετρία στα τοιχώματα και των τριών κοιλοτήτων είναι ακριβώς η ίδια. Δε επηρεάζεται από το βάθος. Στις μεγάλες συχνότητες ταλάντωσης παρατηρούσαμε τη δημιουργία δίνης εναλλάξ των τοιχωμάτων. Με τη χρησιμοποίηση του συστήματος διπλών σωλήνων στα χείλη των κοιλοτήτων φάνηκε με μεγαλύτερη σαφήνεια η εναλλαγή των δινών στα τοιχώματα των μοντέλων. Ο εξαιρετικά μικρός χρόνος για την παρατήρηση του φαινομένου, καθώς και η ένταση της τύρβης εμπόδιζαν στην εξαγωγή του συμπεράσματος αυτού εξ' αρχής. Ο μικρός χρόνος ξεπερνούσε την ανάλυση του βίντεο της κάμερας που είναι 1/25sec για κάθε καρέ, με αποτέλεσμα να χάνονται πληροφορίες όσον αφορά την ανάμειξη – διάχυση του ρύπου.



## **5. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ**

Τα πειράματα που εκτελέσθηκαν για την παρούσα έρευνα αφορούσαν τη μέτρηση, την ψηφιοποίηση και την παρατήρηση φαινομένων διασποράς ρύπου σε ροή οδικής χαράδρας με τρεις διαφορετικούς λόγους ύψους προς πλάτους. Για την προσομοίωση μιας τέτοιας κατάστασης, χρησιμοποιήσαμε τρία μεγέθη από κοιλοτήτων τα οποία είναι ήδη γνωστά. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα έρευνα, σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας, είναι ποικίλα και διαφορετικής φύσης μεταξύ τους.

Προσπαθήσαμε να καταλάβουμε τον τρόπο με τον οποίο επιδρά η ομοιογενής τύρβη στα μοντέλα των κοιλοτήτων που χρησιμοποιήσαμε. Το βίντεο που προέκυψε από ψηφιακή βιντεοκάμερα μας βοήθησε σημαντικά σε αυτό το κομμάτι, κι επίσης η ψηφιοποίησή της μας έδωσε ένα μέγεθος χρόνου στο οποίο συμβαίνει η διάλυση ενός ρύπου ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες. Εκτός όμως από τη μέθοδο της ψηφιοποίησης, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της αγωγιμότητας του διαλύματος για την επιβεβαίωση της ορθότητας του σήματος που παίρναμε από τα διαγράμματα της ψηφιοποίησης. Τα αποτελέσματα από τις 2 μεθόδους ήταν πανομοιότυπα. Για τη λήψη μετρήσεων βάσει της αγωγιμότητας του διαλυόμενου ρύπου, άλλαζε η γεωμετρία του χώρου δοκιμών κι αυτό ήταν δυνατόν να εισάγει σφάλματα στις μετρήσεις. Το μέγεθος των σφαλμάτων που εισήχθησαν δεν ήταν δυνατόν να προκύψει επειδή δεν εκτελέσθηκε μέτρηση του πεδίου των ταχυτήτων στο χώρο δοκιμών.

Η κίνηση των πλεγμάτων ήταν οριζόντια, η τύρβη ήταν ομοιόμορφη και ομογενής ακριβώς στη μέση τους όπου και γινόταν οι δοκιμές σύμφωνα με την προϋπάρχουσα έρευνα. Για την ψηφιοποίηση του βίντεο και για τη λήψη του σήματος της, η μόνη παρεμβολή στο χώρο των δοκιμών ήταν το σύστημα έκλυσης ρύπου. Θα μπορούσε να μην συμπεριληφθεί στα μειονεκτήματα της διάταξης. Οι πηγές εκπομπής ρύπων έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία και καταλαμβάνουν συγκεκριμένο χώρο σε ένα τέτοιο περιβάλλον οδικής χαράδρας. Ένα μειονέκτημα όσον αφορά τις δοκιμές αλατότητας, είναι η παρουσία του αγωγιμόμετρου.

Είχαμε να αντιμετωπίσουμε τις μεγάλες αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονταν κατά την ταλάντωση των πλεγμάτων. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια σχετικά ισχυρή διάταξη για την απορρόφηση όλων αυτών των δυνάμεων. Η ταλάντωση με ηλεκτρομαγνητική τράπεζα διέγερσης φάνηκε αδύνατον να τις απορροφήσει με αποτέλεσμα η κίνηση που παρήγαγε να μην ήταν σχεδόν αρμονική όπως στην παρούσα διάταξη. Καθώς η κίνηση επιλέχθηκε να παράγεται με μηχανικό τρόπο, δεν μπορούσαμε να πάμε σε μικρότερα μεγέθη stroke από το  $\pm 40\text{mm}$ . Ο χρόνος ζωής της κατασκευής αρχικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι η διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Η κατασκευή λειτούργησε χωρίς κανένα πρόβλημα, με την παροχή της κατάλληλης λίπανσης, έφερε σε πέρας τα πειράματα, καθώς και είναι δυνατόν να φέρει σε πέρας μεγάλο ακόμα αριθμό

πειραμάτων. Η οξείδωσή της περιορίζεται με την επίστρωση λίπους (γράσο) πάνω από τις μεταλλικές της επιφάνειες.

Ακόμα ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η αποθήκευση των βίντεο των πειραμάτων που προέκυπταν καθώς και η επεξεργασία τους. Το πρόβλημα αυτό προφανώς αναφέρεται στα πειράματα που αφορούσαν τη μέθοδο της φθορίζουσας ουσίας. Ο αποθηκευτικός χώρος που καταλάμβαναν τα βίντεο ήταν πολύ μεγάλος για ανάλυση βίντεο μόνο 25fps (frames per second). Η αρχική σχεδίαση των πειραμάτων περιελάμβανε λήψη βίντεο με high speed camera, αλλά το πρόβλημα αυτό μας περιόρισε κι έτσι χρησιμοποιήσαμε μια ccd camera. Η επεξεργασία έγινε μέσω κώδικα Labview ο οποίος δεν ήταν δυνατόν να εκτελεστεί σε παλαιότερης τεχνολογίας υπολογιστή.

Για τα πειράματα της αγωγιμότητας, μια σημαντική πρόκληση που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε ήταν αυτή του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Εξ' αιτίας της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα, είχαμε παρεμβολές στο μετρητικό του αγωγιμόμετρου με αποτέλεσμα το σήμα που προέκυπτε από τις δοκιμές να υπερκαλύπτεται. Η πρώτη εξήγηση που μας ήρθε στο νου, ήταν η διάδοσή του μέσω του συστήματος της δεξαμενής και η δεύτερη, ήταν ότι μέσω του ηλεκτρολογικού δικτύου του εργαστηρίου επηρεαζόταν το ρεύμα που περνούσε από τις συσκευές του που το έθεταν σε λειτουργία. Για κάθε περίπτωση χωριστά δοκιμάστηκαν διαφορετικές λύσεις. Για να μειώσουμε το θόρυβο, αρχικά θωρακίσαμε τα καλώδια που χρησιμοποιούνταν για την τροφοδοσία του κινητήρα με μεταλλικό σωλήνα, προσπαθώντας να δημιουργήσουμε κλωβό Faraday. Παρακάτω γίνεται παράθεση δυο εικόνων που αφορούν αυτή την προσπάθεια.

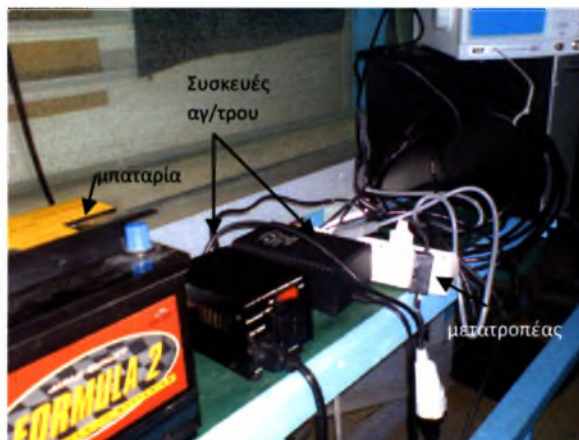


Εικ.[5.1] Θωράκιση καλωδίου τροφοδοσίας κινητήρα



Εικ.[5.2] Απόληξη θωράκισης, εσωτερικό κινητήρα

Αυτή η προσπάθεια φάνηκε ανίκανη να περιορίσει το πρόβλημα που είχαμε. Στη συνέχεια δοκιμάσαμε να αλλάξουμε την τροφοδοσία του μετρητικού. Με μια μπαταρία των 12Volts και με έναν μετατροπέα των 12V σε 230V το μετρητικό πλέον θα τροφοδοτούνταν από αυτό το σύστημα όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικ.[5.3] Τροφοδοσία μετρητικού, φαίνονται μπαταρία, συσκευές Αγωγιμόμετρου, μετατροπέας τάσης.

Επίσης η προσπάθεια αυτή δεν απέδωσε κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα στη μείωση του θορύβου. Η τελική και πιο αποτελεσματική λύση ήταν να αλλάξουμε το σημείο τροφοδοσίας του κινητήρα. Ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε από σημείο εκτός του εργαστηρίου και ο θόρυβος που προέκυπτε ήταν αμελητέος σχετικά με το σήμα των μετρήσεων. Το υλικό της κατασκευής της διάταξης ήταν εξ' ολοκλήρου από μεταλλικά κομμάτια καθώς επίσης και τα πλέγματα. Μια λύση που προτείνεται σε αυτή τη φάση και γι' αυτή τη φύση των πειραμάτων είναι η χρησιμοποίηση υλικών που είναι μονωτές του ηλεκτρισμού όπως πολυμερείς φλάντζες και ράβδοι από υλικό PVC ή από οποιοδήποτε πλαστικό. Ένα τελευταίο σημείο που αξίζει να αναφερθεί είναι η κακή γείωση που παρατηρήθηκε για τις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου μας. Σε παρόμοιες πειραματικές δοκιμές στο παρελθόν έχουν παρατηρηθεί προβλήματα θορύβου σε μετρητικά όργανα.

## **7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση πειραμάτων για ομοίωμα οδικής χαράδρας προέκυψαν ως εξής.

Με το μεγαλύτερο λόγο ύψους προς βάθους (W/H) μοντέλου παρατηρήθηκε γρηγορότερη διάλυση του ρύπου μέσα από αυτό ανεξάρτητα από την πυκνότητα του εκλυόμενου ρύπου. Προτείνεται η δημιουργία περισσότερων μοντέλων για την πλήρη παρατήρηση της επίδρασης του λόγου W/H στη διάλυση του ρύπου.

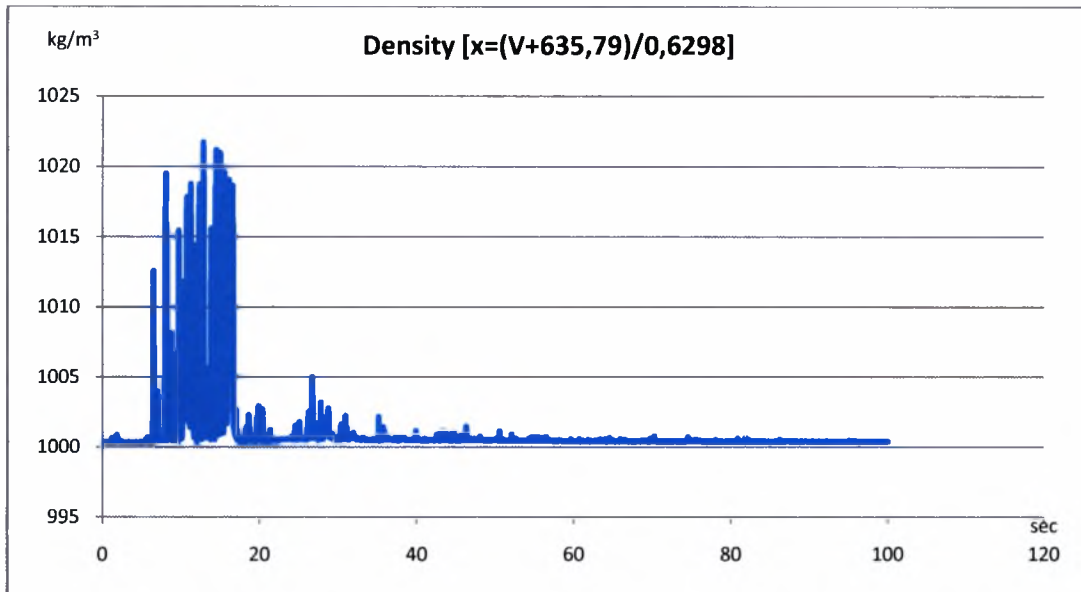
Σημαντικό ρόλο είδαμε πως έπαιξε η πυκνότητα του διαλύματος έκλυσης. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές πυκνότητες διαλυμάτων,  $1003.3\text{kg/m}^3$ ,  $1006.6\text{kg/m}^3$ ,  $1013.2\text{kg/m}^3$ . Με τη μεγαλύτερη πυκνότητα διαλύματος ο χρόνος διάλυσης αυξανόταν. Η αύξηση αυτή δεν μπορούμε να πούμε ότι είναι γραμμική ή εκθετική με ασφάλεια καθώς είχαμε μόνο τρεις διαφορετικές πυκνότητες. Για να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα χρειάζονται περισσότερες ενδιάμεσες πυκνότητες διαλύματος, καθώς και νέες δοκιμές με μόνη παράμετρο την πυκνότητα του διαλύματος.

Η γενική εικόνα που είχαμε για την επίδραση του εύρους ταλάντωσης, ήταν ότι ο ρύπος διαλυόταν πιο γρήγορα με τη μεγαλύτερη τιμή του. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ξεκάθαρα μέσα από τα διαγράμματα ότι σε αρκετές περιπτώσεις είχαμε γρηγορότερη διάλυση του ρύπου με μικρό εύρος ταλάντωσης. Σε μια ενδεχόμενη έρευνα προτείνονται δοκιμές με διαφορετικό εύρος ταλάντωσης κάθε φορά με τη διατήρηση των υπόλοιπων μεγεθών σταθερών, όπως είναι η συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων, η πυκνότητα του ρύπου, ο λόγος W/H του μοντέλου δοκιμών και η θερμοκρασία του διαλύματος.

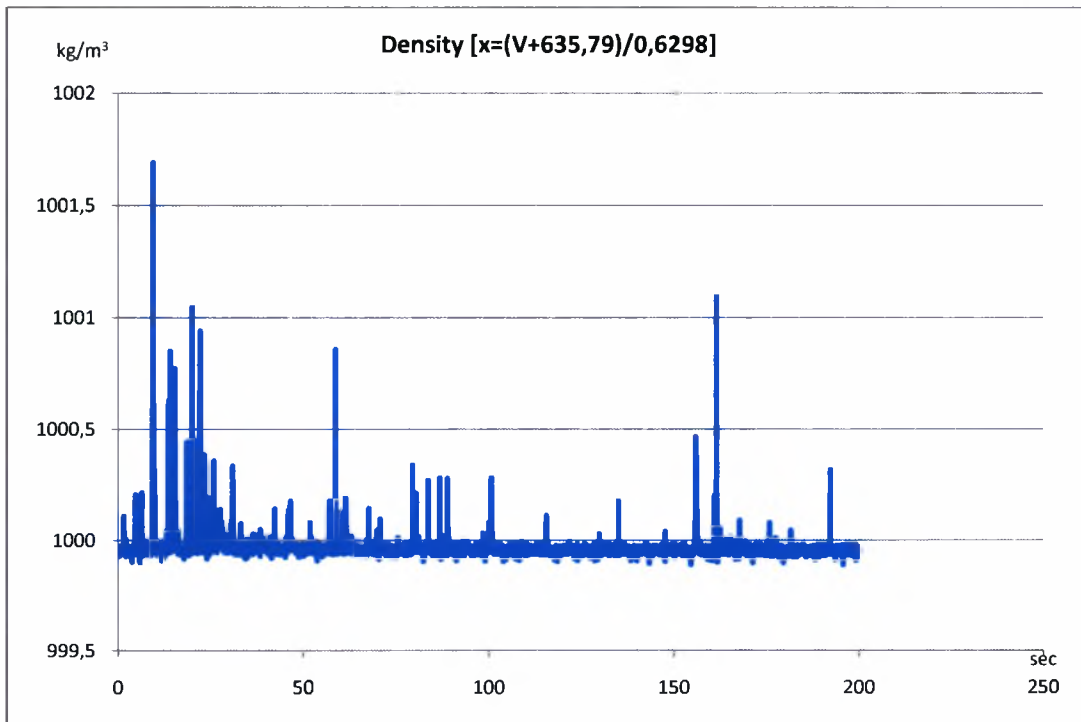
Η κύρια προσπάθεια που καταβλήθηκε ήταν η δημιουργία διαφορετικής έντασης ροής στο χώρο δοκιμών με την αλλαγή της συχνότητας ταλάντωσης των πλεγμάτων. Σαν γενικό συμπέρασμα, η διάλυση του ρύπου γινόταν πιο γρήγορα με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τα διαγράμματα, σε μερικές περιπτώσεις, η διάλυση του ρύπου ήταν πιο αργή από την αμέσως μικρότερη συχνότητα. Φαινόμενα συντονισμού της υδροσήραγγας και του περιβάλλοντος των δοκιμών με την πειραματική διάταξη συνέβαλλαν στο φαινόμενο αυτό. Τα πλέγματα όπως φάνηκε από τις φωτογραφίες δεν ήταν τοποθετημένα στη μεσοκάθετο της δεξαμενής. Η τοποθέτησή τους σε αυτή τη θέση αναμένεται να επηρεάσει τα αποτελέσματα στον τρόπο που συντονίζονται με το περιβάλλον της δεξαμενής.

Η εγκατάσταση των πλεγμάτων έχει σχεδιαστεί για ένα μεγάλο εύρος από πειράματα. Μέσα σε όλα αυτά είχε γίνει μια προσπάθεια να μετρηθεί η διάχυση ζεστού μείγματος ρύπου χρησιμοποιώντας τις κοιλότητες. Ζεστάναμε το μίγμα με το ρύπο του αλατόνευρου περίπου στους  $100^\circ\text{C}$  και το εισάγαμε στο σύστημα έκλυσης. Το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιήθηκε έχει αισθητήρα θερμοκρασίας επίσης.

Παρακάτω θα παραθέσουμε δυο διαγράμματα για απλή σύγκριση με ζεστό ρύπο και με ρύπο θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

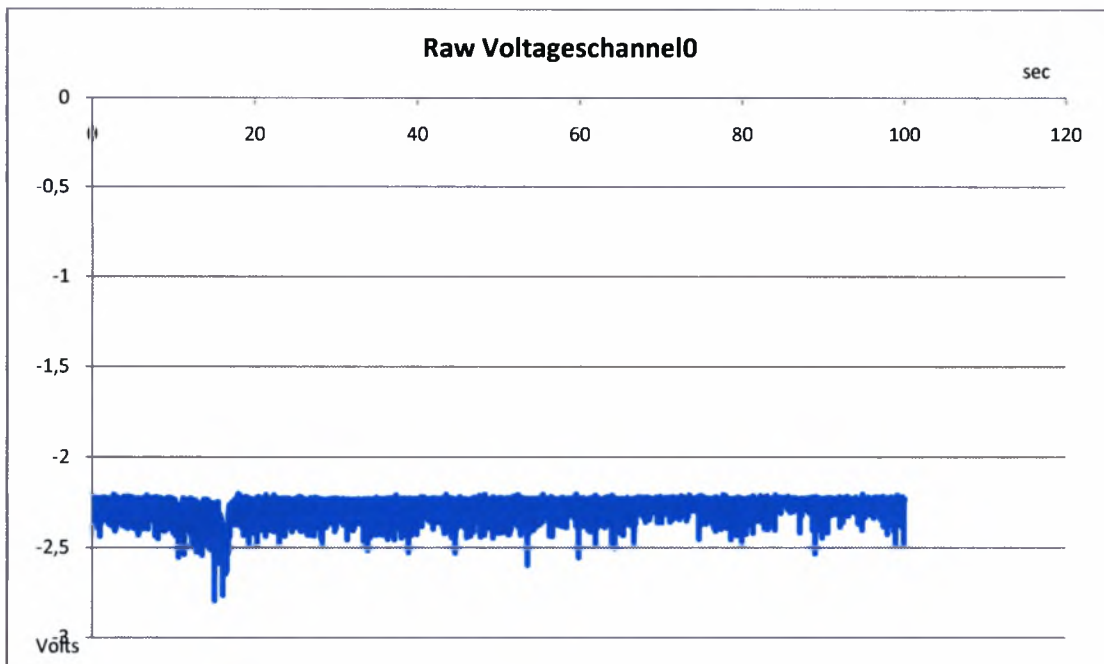


Εικ.[7.1.1]: Έντονη ένταση θερμού ρύπου, 10Hz ταλάντωσης



Εικ.[7.1.2] Έντονη ένταση κανονικής θερμοκρασίας ρύπου, 10Hz ταλάντωσης

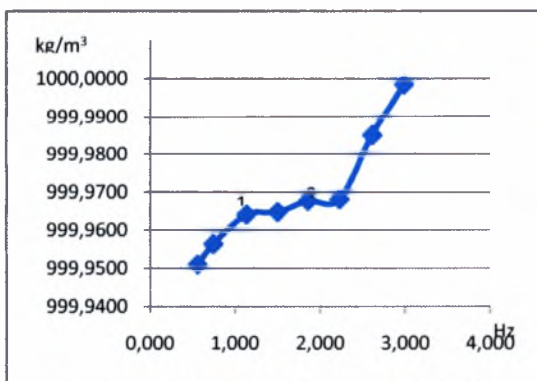
Φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο πιο ζεστός ρύπος διαλύεται πιο γρήγορα από τον ψυχρότερο. Στο διάγραμμα [7.1.2] κανονικής θερμοκρασίας, έχει τελειώσει η δειγματοληψία και ο ρύπος ακόμα δεν έχει διαλυθεί εξ' ολοκλήρου. Στο διάγραμμα [7.1.1] ο ρύπος εξέρχεται πιο έντονος αλλά διαλύεται πιο γρήγορα και συγκεκριμένα στα 56sec έχει διαλυθεί.



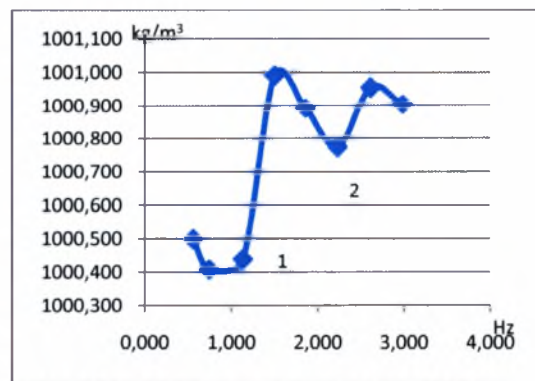
Εικ.[7.2] Έντονη ένταση θερμού ρύπου, 10Hz ταλάντωσης

Τα πιο πάνω διαγράμματα αναφέρονται σε 10Hz ταλάντωσης για ζεστό, έντονης έντασης ρύπου και εύρος ταλάντωσης 120mm. Στα 6.48sec, με ένταση  $1012\text{kg/m}^3$  γίνεται αντιληπτός ο ρύπος από το αγωγιμόμετρο, καθώς και η αλλαγή στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος γίνεται αντιληπτή από τον αισθητήρα θερμοκρασίας στα 14.4sec. Η μεγαλύτερη ένταση αλατότητας συμβαίνει στα 12.84sec με ένταση αλατότητας  $1022\text{kg/m}^3$  καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία στα 15.03sec με θερμοκρασία σε μονάδες τάσης στα  $-2.794\text{Volts}$ . Η θερμοκρασιακή αλλαγή έχει κάποια υστέρηση σε σχέση με την αλλαγή στην αλατότητα.

Στη συνέχεια θα συγκριθούν άλλα 2 διαγράμματα τα οποία αφορούν την εξέλιξη διάλυσης του ρύπου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στους  $100^\circ\text{C}$ .



Εικ.[7.3.1] Ψυχρό διάλυμα, 10Hz (inverter),  $1006.6\text{ kg/m}^3$

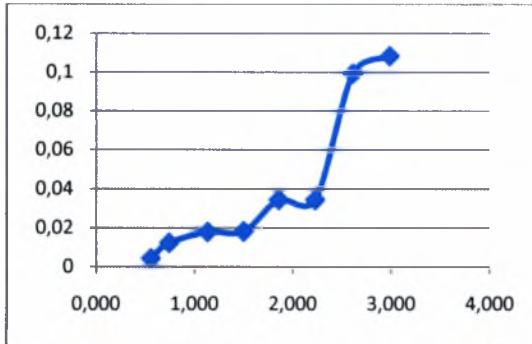


Εικ.[7.3.2] Ζεστό διάλυμα, 10Hz (inverter),  $1006.6\text{ kg/m}^3$

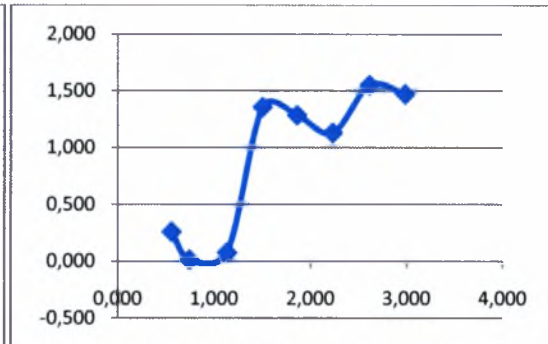
Με την ίδια συχνότητα κι εύρος ταλάντωσης, οι διαφορές στα διαγράμματα της εξέλιξης της μέσης έντασης του ρύπου με τη συχνότητα είναι εμφανείς. Υπάρχει μια ομοιότητα όμως μεταξύ τους. Στα διαγράμματα υπάρχουν δυο σημεία, το σημείο 1

και το σημείο 2. Αν παρατηρήσει κανείς σε αυτά τα σημεία αλλάζει η κλίση της καμπύλης. Τα σημεία αυτά είναι ακριβώς τα ίδια και στα δυο διαγράμματα, είτε με τον κανονικό, είτε με το θερμό ρύπο. Στο διάγραμμα [7.3.2], βλέπουμε πιο έντονες διακυμάνσεις απ' ότι στο [7.3.1]. Επίσης οι μέσες τιμές είναι κατά  $1\text{kg/m}^3$  υψηλότερες.

Παρακάτω θα δούμε και θα συγκρίνουμε την τυπική απόκλιση των τιμών.



Εικ.[7.4.1] Ψυχρό διάλυμα, 10Hz (inverter), 1006.6 kg/m<sup>3</sup>



Εικ.[7.4.2] Ζεστό διάλυμα, 10Hz (inverter), 1006.6 kg/m<sup>3</sup>

Κι εδώ παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά. Οι τιμές της τυπικής απόκλισης για το ζεστό διάλυμα, όπως αυτές προκύπτουν είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές για το διάλυμα κανονικής θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι με το θερμό διάλυμα υπάρχουν πιο έντονες διακυμάνσεις στην αλατότητα εντός του περιβάλλοντος της δεξαμενής, άρα και στη διάλυσή του.

Για την εξαγωγή του θερμού ρύπου, μονώθηκαν οι σωλήνες που φτάνουν ως το σύστημα έκλυσής του για την όσο το δυνατόν μικρότερη θερμοκρασιακή απώλεια. Επίσης χρειάζεται καλύτερη σχεδίαση της εγκατάστασης της έκλυσης επειδή με το θερμό διάλυμα δημιουργούνται επικαθήσεις οι οποίες φράζουν το σωληνίσκο έκλυσης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η έκλυση έγινε με το σύστημα των διπλών σωληνίσκων για ακριβώς αυτό το λόγο. Προτείνεται για τη συνέχεια της παρούσης εργασίας η εκτέλεση πειραμάτων με αλλαγή κάθε φορά της θερμοκρασίας για την εξαγωγή συμπεράσματος για την επίδραση στη διάλυση του ρύπου.

Ένας τομέας ο οποίος είναι σε ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια είναι αυτός της επιπλευστότητας με μεθωλιωμένα σωματίδια. Η μέθοδος με την επίπλευση αφρού είναι μια μέθοδος διαχωρισμού η οποία χρησιμοποιείται σε μια σημαντική μερίδα διεργασιών για τα ορυκτά μεταλλεύματα. Η αναποτελεσματικότητα της επίπλευσης μεταφράζεται ως απώλεια εισοδήματος και αποθεμάτων. Υπάρχουν σημαντικά στοιχεία τα οποία οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η πρόσδοση ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της επαφής μεταξύ των σωματιδίων και των φυσαλίδων ιδιαιτέρως στα λεπτότερα μεγέθη σωματιδίων όπου η επιπλευστότητα είναι φτωχότερη. Η πρόσδοση ενέργειας σε συστήματα επίπλευσης συνήθως παρουσιάζει προβλήματα καθώς οι δεξαμενές ανάδευσης έχουν πολύπλοκα υδροδυναμικά περιβάλλοντα στα οποία λαμβάνουν χώρα δευτερεύουσες

διεργασίες όπως είναι τα αιωρήματα στερεών (suspension solids) η διάχυση αερίων (ή αλλιώς μεταφορά αερίων) όπου είναι αλληλοεξαρτώμενα με τη επίπλευση. Αυτή η έρευνα απαιτεί την πρόσδοση ενέργειας σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από ομογενή και ισότροπη τύρβη. Έτσι για τη βελτίωση της επαφής των μεθυλιωμένων σωματιδίων χαλαζία με τις φυσαλίδες τα πειράματα λαμβάνουν χώρα σε δεξαμενή η οποία χαρακτηρίζεται από συνθήκες ομογενούς και ισότροπης τύρβης δημιουργούμενη από ταλαντευόμενα πλέγματα. Το περιβάλλον της δεξαμενής που διαθέτει το εργαστήριο μπορεί να ανταποκριθεί με μεγάλη ακρίβεια στην προτεινόμενη έρευνα. Η ανάδευση εκτιμάται ότι επηρεάζει τις διεργασίες της επίπλευσης είτε άμεσα είτε έμμεσα διαμέσου της διάσπασης των φυσαλίδων σε μικρότερες, και της διασποράς των σωματιδίων (θεωρία K41 Kolmogorov). Τα μοντέλα για της συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων που λαμβάνουν χώρα σε τυρβώδη πεδία, υποστηρίζουν ότι η ένταση της επίπλευσότητας είναι ανάλογη με την πρόσδοση ενέργειας στα συστήματα αυτά υψωμένα στη δύναμη του 0.50 και του 0.75. Δηλαδή σε αυτά τα συστήματα τα σωματίδια έρχονται σε μεγαλύτερη επαφή με τις φυσαλίδες. Σε αυτό το σημείο δεν είναι ξεκάθαρο πότε η ανάδευση των συστημάτων βοηθά στο χρόνο επαφής των σωματιδίων με τις φυσαλίδες. Όλες οι προηγούμενες μελέτες συμφωνούν ότι η ανάδευση βοηθά στην επαφή των σωματιδίων – φυσαλίδων για μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια αλλά όχι όμως για λεπτότερης φύσης σωματίδια. Εδώ η επιρροή στην αποσταθεροποίηση δείχνει ότι είναι ανάλογη σε δυνάμεις του 0.66 και 1.00 με την πρόσδοση ενέργειας.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα του *Deglon 2008*, είναι ότι η σταθερά της επίπλευσης αυξάνεται γραμμικώς με την αύξηση των μεγεθών των σωματιδίων και ακολουθεί μια αντίστροφη σχέση (inverse power relation) με το μέγεθος της φυσαλίδας. Οι ρυθμοί επίπλευσης αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της έντασης της πρόσδοσης της ενέργειας για όλα τα μεγέθη των σωματιδίων και των φυσαλίδων. Η αύξηση των ρυθμών της επίπλευσης είναι περισσότερο εξαρτώμενη από το μέγεθος των σωματιδίων παρά από το μέγεθος των φυσαλίδων. Για μια έρευνα στα πλαίσια αυτά προτείνεται η δημιουργία πεδίου φυσαλίδων διαφόρων μεγεθών όπως 0.13, 0.24, 0.55, 0.67, 0.75, 0.82 και 1.00mm καθώς εκτελείται ταλάντευση των πλεγμάτων σε διάλυμα νερού – μεθυλιωμένου χαλαζία σε διάφορες συγκεντρώσεις με παράλληλη έκλυση ρύπου (ισοτροπικώς) όπως για παράδειγμα methylene blue ή rhodamine ή κι ενδεχομένως με ‘αλατισμένο’ ρύπο (αλλαγή στην αγωγιμότητα του ρευστού). Συμπεράσματα για χρόνους διάλυσης, ρυθμούς επίπλευσης κι επηρεασμός από το ρύπο σε διάφορες συχνότητες ταλάντωσης.



## Βιβλιογραφία

- [1] **Phd. Alygizakis, Apr.2005:** Έρευνα φαινομένων ανάμειξης μέσω μεγάλων ροϊκών δομών και τύρβης σε διεπιφάνειες υγρού – αερίου, University of Thessaly, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Volos.
- [2] **Oc. Pablo Medina Enriquez Jul. 2002:** Start of Sediment Motion and Resuspension in Turbulent Flows: Applications of Zero-Mean Flow Grid Stirred Turbulence on Sediment Studies, Ciencias Del Mar, Programa De Especialización y Doctorado, Tesis Doctoral
- [3] **W. D. Smyth and J. N. Moum 2001,** College of Oceanic & Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, OR 97330, USA Copyright © 2001 Academic Press, doi:10.1006/rwos.2001.0134
- [4] **Philip J. W. Roberts:** Turbulent Diffusion, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia
- [5] **Stavros Tavoularis 2003,** Diffusion Phenomena in Engineering and Environmental Flows Notes for a Graduate Course University of Thessaly, Volos, Greece, Department of Mechanical Engineering University of Ottawa, Ottawa, Canada July 8-18, 2003
- [6] **Ulrich Platt 2009,** Master Course „Environmental Physics“, MKEP4 6: Transport – Turbulent Diffusion So.Sem. 2009, Institut für Umweltphysik R.424
- [7] **K. Changunda \*, M. Harris, D.A. Deglon, Mar. 2008** Investigating the effect of energy input on flotation kinetics in an oscillating grid flotation cell, Centre for Minerals Research, Department of Chemical Engineering, University of Cape Town, Private Bag Rondebosch, Cape Town 7700, South Africa, Miner. Eng. (2008), doi:10.1016/j.mineng.2008.03.015
- [8] **Eidelman, T. Elperin, A. Kapusta, N. Kleeorin, A. Krein, and I. Rogachevskii, Nov. 2001** Oscillating grids turbulence generator for turbulent transport studies, The Pearsstone Center for Aeronautical Engineering Studies, Department of Mechanical Engineering, Ben Gurion University of the Negev, P. O. Box 653, Beer-Sheva 84105, Israel, Experiments in Fluids 36 (2004) 879–887 DOI 10.1007/s00348-003-0770-2
- [9] **Nian-Sheng Cheng and Adrian Wing-Keung Law MARCH 2001,** MEASUREMENTS OF TURBULENCE GENERATED BY OSCILLATING GRID, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, Vol. 127, No. 3, March 2001

- [10] **H.A. Nichol, L. Skrbek, P.C. Hendry, and P.V.E. McClintock Sep.2003** Flow of He II due to an Oscillating Grid in the Low Temperature Limit Department of Physics, Lancaster University, Lancaster LA1 4YB, UK, Joint Low Temperature Laboratory, Institute of Physics ASCR and Charles University
- [11] **J.J. Orlins, J.S. Gulliver 2003** Turbulence quantification and sediment resuspension in an oscillating grid chamber, *Experiments in Fluids* 34 (2003) 662–677 DOI 10.1007/s00348-003-0595-z
- [12] **Harry E. Schulz, Johannes G. Janzen, Karine Cristiane de O. Souza May 2005,** Escola de Engenharia de São Carlos Vol. XXVIII, No. 2, April-216 June 2006 Universidade de São Paulo – USP 13566-590 São Carlos, SP, Brazil
- [13] **Srdic, H. J. S. Fernando, L. Montenegro 1996,** Environmental Fluid Dynamics Program and Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Arizona State University *Experiments in Fluids* 20 (1996), 395-397 Springer Verlag 1996
- [14] **H. J. S. Fernando, I. P. D. De Silva 1993,** Note on Secondary Flows in Oscillating-Grid mixing-box Experiments, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Arizona State University Arizona State University, Tempe, Arizona, *Phys. Fluids A* Vol. 5 No. 7, July (1993) American Institute of Physics
- [15] **N. Matsunaga, Y. Sugihara, T. Komatsu, A. Masuda 1999,** Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in a homogeneous fluid, 0169-5983/99/\$, The Japan Society of Fluid Mechanics and Elsevier Science B.V.
- [16] **J. Buchholz, A. Eidelman, T. Elperin, G. Grünefeld, N. Kleeorin, A. Krein, I. Rogachevskii, 2004,** Experimental study of turbulent thermal diffusion in oscillating grids *Turbulence, Experiments in Fluids* 36 (2004) 879–887 DOI 10.1007/s00348-003-0770-2
- [17] **S. S. Shy, C. Y. Tang, C. Y. Fann, 1997,** A Nearly Isotropic Turbulence Generated by a Pair of Oscillating Grids, Department of Mechanical Engineering, National Central University, Chung-Li 32054, Taiwan, R.O.C., *Experimental Thermal and Fluid Science* 1997 14:251-262
- [18] **Guillaume de Sercey \*, Graeme Awcock, Morgan Heikal, May 2005,** School of Engineering, University of Brighton, England, Elsevier B.V. doi:10.1016/j.compind.2005.05.026
- [19] **M.P. Kirkpatrick \*, S.W. Armfield, Jul 2004,** Experimental and large eddy simulation results for the purging of salt water from a cavity by an overflow of fresh water, School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia, 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.08.016

[20] **D. H. Lee, H. J. Sung, 1994**, Experimental study of turbulent axisymmetric cavity flow, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Yusong – Taejon, 305-307 Korea, Experiments in Fluids 17 (1994) 272-281, Springer Verlag 2004

[21] **Cheng-Hsin Changa Robert N. Meroney June 2003**, Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 1141–1154

[22] **Michael J. Brown, David Boswell, Gerald Streit, Matt Nelson, Tim McPherson, Timothy Hilton** Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico  
**Eric R. Pardyjak, Suhas Pol, Prathap Ramamurthy, Brad Hansen** University of Utah, Mechanical Engineering, Salt Lake City, Utah  
**Petra Kastner-Klein, James Clark, Andy Moore, Daniel Walker** Oklahoma University, Dept. of Meteorology, Norman, Oklahoma  
**Nicola Felton, Doug Strickland, David Brook** Defence Sciences Technology Laboratory, Porton Down, United Kingdom  
**Marko Princevac, Dragan Zajic** Arizona State University, Environmental Fluid Dynamics, Tempe, Arizona  
**Roger Wayson, John MacDonald, Gregg Fleming** University of Central Florida, Tampa, FL and Volpe, Boston, MA  
**Donny Storwold** US Army Proving Ground, Dugway, Utah

### **JOINT URBAN 2003 STREET CANYON EXPERIMENT J7.3**

[23] **Michael J. Brown, Hari Khalsa, Matt Nelson, David Boswell 2003**, STREET CANYON FLOW PATTERNS IN A HORIZONTAL PLANE: MEASUREMENTS FROM THE JOINT URBAN 2003 FIELD EXPERIMENT, 3.1

[24] **Serge Simoëns, Michel Ayraulta, James M. Wallace, Aug. 2007**, The flow across a street canyon of variable width—Part 1: Kinematic description, Science Direct Atmospheric Environment 41 (2007) 9002–9017

[25] **Serge Simoëns, James M. Wallace, 2008**, The flow across a street canyon of variable width—Part 2: Scalar dispersion from a street level line source, Science Direct, Atmospheric Environment 42 (2008) 2489–2503

[26] **Eric Savory, Alan Robins and Norman Toy**, Wind Tunnel Modelling of 2-D Street Canyon Flow Regimes. A contribution to subproject SATURN (EXP3, led by: B Leitl, MIHU, Hamburg, Germany). *Fluids Research Centre, School of Engineering, Guildford GU2 7XH, United Kingdom.*

[27] **(SECTION 3 - INTRODUCTION TO TURBULENCE, TKE, AND FLUXES,**



[28] EUROPEAN SPACE AGENCY, EARTH IMAGES



[29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence>

[30] [http://en.wikipedia.org/wiki/Flow\\_visualization](http://en.wikipedia.org/wiki/Flow_visualization), Wikipedia, The free encyclopedia

[31] PME, Microscale Temperature – Conductivity Instrument, Operator' s Manual

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000102425



