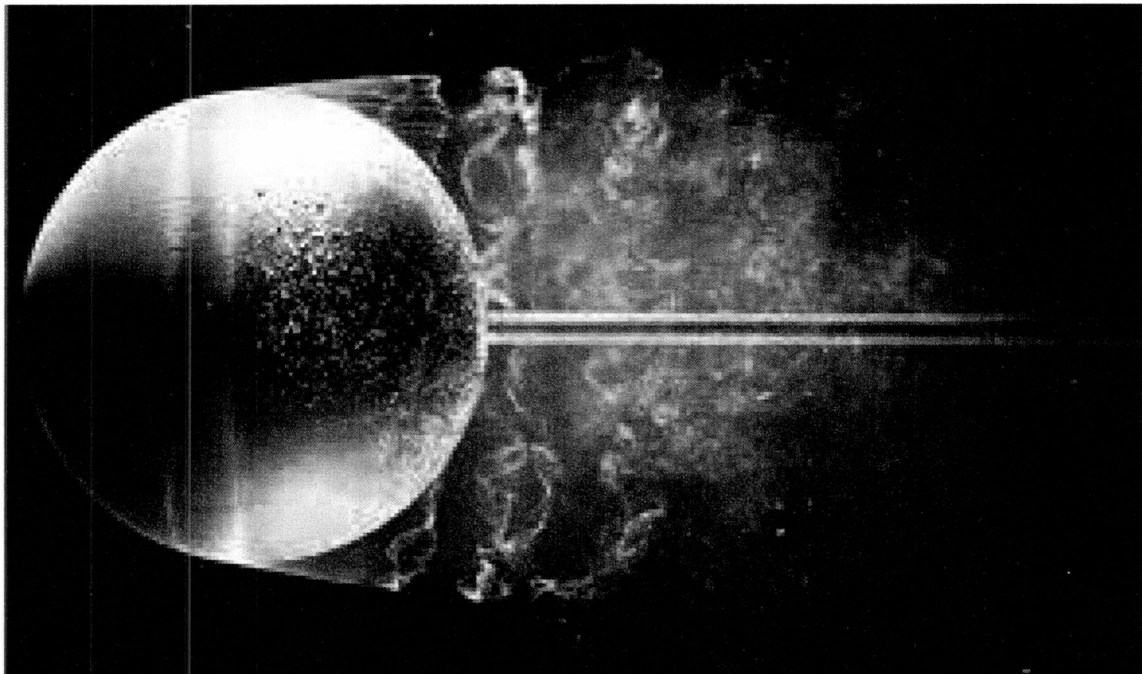


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ
ΣΕ ΠΕΔΙΟ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΤΥΡΒΗΣ**

των

ΜΑΡΓΕΛΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΣΤΡΑΒΑ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Επιβλέπων

ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ ΕΡΡΙΚΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ Καθηγητής

ΣΤΑΜΑΤΕΛΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Καθηγητής

ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ ΕΡΡΙΚΟΣ Αναπληρωτής καθηγητής (επιβλέπων)



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

Αριθ. Εισ.: 14738/1
Ημερ. Εισ.: 16-10-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2016
ΜΑΡ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Ερρίκο Σταπουντζή, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την βοήθεια, τις γνώσεις, την παρότρυνση αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επίσης την εξεταστική επιτροπή των κ. Ανδρίτσου Νικολάου και Σταματέλλου Αναστασίου, καθηγητών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.

Επιπλέον, ευχαριστούμε τον μηχανοτεχνίτη του τμήματος κ. Βέργο Αθανάσιο για τη βοήθεια στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Ευχαριστήσουμε επίσης τον μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Νικόλαο Τσαντούκλα του οποίου η συμβολή στο πρόγραμμα Matlab ήταν αμέριστη.

Ευχαριστούμε επίσης, όλους τους φίλους και φίλες μας για την συμπαράσταση, την ανοχή όλο το διάστημα της εργασίας, καθώς και τη βοήθεια που λίγο πολύ όλοι μας προσφέρανε.

Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να μην ευχαριστήσουμε, τις οικογένειές μας για όλα τα εφόδια που μας έχουν προσφέρει κατά τη διάρκεια των σπουδών μας και όχι μόνο, καθώς επίσης και για την συνεχή υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της ομοιογενούς και ισότροπης τύρβης σε σφαιρικά δοκίμια. Τα πειράματα που διεξήχθησαν περιλάμβαναν οργανικά και ανόργανα δοκίμια. Τα οργανικά δοκίμια αποτελούνται από στερεό διάλυμα γλυκόζης ενώ τα ανόργανα από διαλύματα καθαρού νερού, αλατόνερου καθώς επίσης και ροδαμίνης τύπου 6G σε μορφή πάγου.

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει υδροσήραγγα, στην οποία παράγεται τύρβη μέσω δύο παλλόμενων πλεγμάτων. Τα πλέγματα, ταλαντώνονται στην οριζόντια διεύθυνση μέσω ηλεκτροκινητήρα, οι στροφές του οποίου ρυθμίζονται μέσω inverter στροφών. Η μέτρηση του ροϊκού πεδίου με τη μέθοδο LDA (Laser Doppler Anemometer) έδειξε ότι επικρατούν συνθήκες ισότροπης και ομοιογενούς τύρβης.

Για τα δοκίμια, που τοποθετούνταν στο κέντρο της παλλόμενης διάταξης, λαμβάνονταν συνεχώς φωτογραφίες (frames) ώστε να διαπιστώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα η διάμετρος και συνεπώς η ακτίνα τους. Σύμφωνα με τα πειράματα, διαπιστώθηκε πως η ακτίνα των σφαιρικών δοκιμίων μειωνόταν με την ένταση του τυρβώδους πεδίου και το είδος τους.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν και κάποια ενδεικτικά πειράματα όπου τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ορθογωνική κοιλότητα και οι συνθήκες που επικρατούσαν απήχαν σημαντικά από τις άλλες περιπτώσεις πειραμάτων. Ενδεικτικά επίσης ήταν και τα πειράματα με δοκίμια διαλυμάτων ροδαμίνης όπου έγινε χρήση laser. Τα δεδομένα που ελήφθησαν δεν παρουσίασαν διαφορές, όμως η συγκεκριμένη μέθοδος κατέστησε δυνατή την οπτικοποίηση του φαινομένου της διάχυσης των ουσιών στο τυρβώδες πεδίο.

Στη συνέχεια αναλύεται εκτενώς ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε η πειραματική διάταξη, καθώς επίσης και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Έπειτα, αναφέρονται οι τεχνικές με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για τα δοκίμια και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στο τελικό στάδιο γίνεται μια προσπάθεια να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα με τη βοήθεια των γραφημάτων που προέκυψαν μελετώντας παράλληλα τη θεωρία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 | 11 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 11 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 | 15 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ | 15 |
| 2.1 Εισαγωγή | 15 |
| 2.2 Χαρακτηριστικά της τύρβης..... | 16 |
| 2.3 Προέλευση της τύρβης..... | 17 |
| 2.4 Φυσικά χαρακτηριστικά τύρβης | 17 |
| 2.5 Θεωρία Kolmogorov | 24 |
| 2.5.1 Φάσμα ενέργειας Kolmogorov..... | 27 |
| 2.6 Πειραματικοί μηχανισμοί παραγωγής τύρβης | 28 |
| 2.7 Τύρβη παλλόμενου πλέγματος (grid stirred turbulence)..... | 28 |
| 2.8 Τήξη του πάγου | 38 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | 44 |
| ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ | 44 |
| 3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης..... | 44 |
| 3.1.1 Δεξαμενή νερού..... | 45 |
| 3.1.2 Πλέγματα | 47 |
| 3.1.3 Σύστημα ταλάντωσης πλεγμάτων | 48 |
| 3.1.4 Περιφερειακά όργανα και συσκευές..... | 50 |
| 3.2 Περιγραφή των πειραματικών δοκιμών | 53 |
| 3.2.1 Ανόργανα δοκίμια | 53 |
| 3.2.2 Οργανικά δοκίμια | 54 |
| 3.3 περιγραφή μετρητικών διατάξεων..... | 55 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | 58 |
| ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ | 58 |
| 4.1 Λήψη..... | 58 |
| 4.2 Επεξεργασία δεδομένων..... | 60 |
| 4.2.1 Επεξεργασία εικόνων..... | 60 |
| 4.2.2 Επεξεργασία Video | 61 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.3 Κώδικας ευρέσεως ακτίνας δοκίμιου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. | 66 |
| 4.2.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μέσω Microsoft Excel | 72 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | 76 |
| ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 76 |
| 5.1. Αποτελέσματα για δοκίμια ανάλατου πάγου | 76 |
| 5.1.1 Ανάλατος πάγος χωρίς κοιλότητα | 76 |
| 5.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για ανάλατο δοκίμιο πάγου | 81 |
| 5.1.3 Δοκίμια Ανάλατου πάγου σε κοιλότητα | 82 |
| 5.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα..... | 87 |
| 5.2 Αποτελέσματα για δοκίμια πάγου με περιεκτικότητα σε άλας σύστασης 1020 | 89 |
| 5.2.1 δοκίμια πάγου με σύσταση 1020 σε άλας χωρίς κοιλότητα | 89 |
| 5.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλατισμένα δοκίμια πάγου χωρίς κοιλότητα | 94 |
| 5.3 Αποτελέσματα για σφαιρίδιο γλυκόζης..... | 95 |
| 5.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκίμιο γλυκόζης χωρίς κοιλότητα..... | 100 |
| 5.4 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων..... | 102 |
| 5.4.1 Σύγκριση πειραμάτων ανάλατου δοκίμιου (ελεύθερο) με ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα..... | 102 |
| 5.4.2 Σύγκριση πειραμάτων ανάλατου σφαιριδίου με αλατισμένο σφαιρίδιο πάγου | 105 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 | 111 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 111 |
| 6.1 Ανόργανα δοκίμια χωρίς προσθήκη άλατος | 111 |
| 6.1.1 Ανόργανα δοκίμια χωρίς προσθήκη άλατος απουσία κοιλότητας..... | 111 |
| 6.1.2 Ανόργανα δοκίμια χωρίς προσθήκη άλατος παρουσία κοιλότητας..... | 111 |
| 6.2 Δοκίμια με περιεκτικότητα σε άλας | 112 |
| 6.3 Δοκίμια γλυκόζης..... | 112 |
| 6.4 Μειονεκτήματα της πειραματικής μεθόδου | 113 |
| 6.5 Προτάσεις βελτιστοποίησης για μελλοντική έρευνα | 114 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 | 115 |
| Βιβλιογραφία | 115 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 117 |

Κατάλογος συμβόλων

- T θερμοκρασία (K)
- h θερμική αγωγιμότητα : $[J/(s \cdot m^2 \cdot K)]$
- Q θερμότητα : (J)
- t χρόνος : (s)
- R ακτίνα : (m)
- A επιφάνεια : (m^2)
- ρ πυκνότητα : (kg/m^3)
- λ λανθάνουσα θερμότητα : (J/kg)
- m μάζα : (Kg)
- Pr αδιάστατος αριθμός Prandtl
- Ra: αδιάστατος αριθμός Rayleigh
- Nu: αδιάστατος αριθμός Nusselt
- Gr: αδιάστατος αριθμός Grashof
- Re αριθμός Reynolds, $Re = vud$
- u_i στιγμιαία ταχύτητα (m/s)
- U_i μέση χρονικά τιμή της ταχύτητας (m/s)
- u_i' διακύμανση ταχύτητας (m/s)
- T περίοδος (s)
- ρ πυκνότητα (kg/m^3)
- σ_{ij} τανυστής τάσης ($kg/m \cdot s^2$)
- ν κινηματικό ιξώδες (m^2/s)
- u, v, w ταχύτητες στους άξονες x,y,z αντίστοιχα (m/s)
- L ολοκληρωτική κλίμακα μήκους (m)
- D: συντελεστής μοριακής διάχυσης (m^2/s)
- q ρυθμός μεταφοράς μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου ($kg/m^2 \cdot s$)
- M mesh size (απόσταση ανάμεσα στα κέντρα δύο διάκενων) (m)
- S εύρος ταλάντωσης (m)
- f συχνότητα ταλάντωσης (Hz)
- u' τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου της τυρβώδους ταχύτητας (root mean square velocity rms) (m/s)
- z απόσταση από πλέγμα (m)

Κατάλογος διαγραμμάτων

| | |
|---|----|
| Διάγραμμα 3.1- Αντιστοιχία συχνοτήτων Inverter – πλεγμάτων | 49 |
| Διάγραμμα 5.1- Ανάλατο σφαιρίδιο πάγου σε 0 Hz..... | 77 |
| Διάγραμμα 5.2- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 0,69 Hz | 78 |
| Διάγραμμα 5.3- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,06 Hz | 78 |
| Διάγραμμα 5.4- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε 1,42 hz | 79 |
| Διάγραμμα 5.5- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,94 hz..... | 79 |
| Διάγραμμα 5.6- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 2,33 hz | 80 |
| Διάγραμμα 5.7- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 2,73 hz | 80 |
| Διάγραμμα 5.9- Καμπύλη Χρόνου διάλυσης-Συχνότητας | 82 |
| Διάγραμμα 5.11- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 0,69 Hz..... | 83 |
| Διάγραμμα 5.14- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 2,33 hz..... | 85 |
| Διάγραμμα 5.16- Συγκριτικό διάγραμμα Ακτίνας-Χρόνου για ανάλατο δοκίμιο πάγο | 87 |
| Διάγραμμα 5.17- Καμπύλη Χρόνου διάλυσης-Συχνότητας | 88 |
| Διάγραμμα 5.18- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 0 Hz | 89 |
| Διάγραμμα 5.19- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 0,69 Hz | 90 |
| Διάγραμμα 5.20- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,06 Hz | 90 |
| Διάγραμμα 5.21- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,42 Hz | 91 |
| Διάγραμμα 5.22- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,94 Hz | 92 |
| Διάγραμμα 5.23- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 2,33 Hz | 92 |
| Διάγραμμα 5.24- Αλατισμένο δοκίμιο σε συχνότητα 2,73 Hz | 93 |
| Διάγραμμα 5.25- Συγκριτικό διάγραμμα Ακτίνας-Χρόνου για αλατισμένο δοκίμιο πάγου..... | 94 |
| Διάγραμμα 5.26- Καμπύλη Χρόνου διάλυσης-Συχνότητας | 95 |
| Διάγραμμα 5.27- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 0 Hz..... | 96 |
| Διάγραμμα 5.29- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 1,06 Hz..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Διάγραμμα 5.30- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 1,42 Hz..... | 98 |
| Διάγραμμα 5.31- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 1,94 Hz..... | 98 |
| Διάγραμμα 5.32- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 2,33 Hz..... | 99 |
| Διάγραμμα 5.33- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 2,73 Hz..... | 99 |
| Διάγραμμα 5.34- Συγκριτικό διάγραμμα Ακτίνας-Χρόνου για δοκίμιο γλυκόζης.... | 100 |
| Διάγραμμα 5.35- Διάγραμμα καμπύλης Ακτίνας-Συχνότητας | 100 |
| Διάγραμμα 5.36- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 0 Hz..... | 102 |
| Διάγραμμα 5.37- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 0.69 Hz..... | 103 |
| Διάγραμμα 5.38- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 1.06 Hz..... | 103 |
| Διάγραμμα 5.39- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 1.42 Hz..... | 104 |
| Διάγραμμα 5.40- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 2.33 Hz..... | 104 |
| Διάγραμμα 5.41- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 2.73 Hz..... | 105 |
| Διάγραμμα 5.42- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 0 Hz..... | 106 |
| Διάγραμμα 5.43- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 0.69 Hz..... | 106 |
| Διάγραμμα 5.44- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 1.06 Hz..... | 107 |
| Διάγραμμα 5.45- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 1.42 Hz..... | 108 |
| Διάγραμμα 5.46- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 1.94 Hz..... | 108 |
| Διάγραμμα 5.47- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 2.33 Hz..... | 109 |
| Διάγραμμα 5.48- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 2.73 Hz..... | 110 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της τύρβης είναι το πιο πολύπλοκο πρόβλημα της φυσικής και συνάμα το πιο συχνά εμφανιζόμενο. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες, κυρίως με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών, για την μελέτη και την κατανόησή του. Σε αυτό συνέβαλαν σημαντικά οι πειραματικές προσομοιώσεις τυρβώδων πεδίων, σε μικρή κυρίως κλίμακα, και η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν το φαινόμενο για τα πειράματα αυτά. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν αργότερα για την περιγραφή του φαινομένου σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας με αξιόλογα αποτελέσματα. Στη σύγχρονη ιστορία, η επιστήμη έχει προχωρήσει σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την μελέτη τυρβώδων ροών στο περιβάλλον καθώς επίσης και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Ο επιστημονικός όρος της τύρβης περιγράφει ορισμένες πολύπλοκες και απρόβλεπτες κινήσεις ενός ρευστού. Μια τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από χαώδεις ή τυχαίες μεταβολές του πεδίου ροής του ρευστού. Πιο συγκεκριμένα, η πίεση και η ταχύτητα στο πεδίο ροής μεταβάλλονται απότομα και τυχαία για κάθε σημείο του χώρου που καταλαμβάνει το πεδίο ροής κατά τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Τα περισσότερα είδη της ροής των ρευστών είναι τυρβώδη. Στρωτές ροές παρουσιάζονται κυρίως σε ροές πάνω από στερεές επιφάνειες κοντά στην επιφάνεια, χαρακτηριστικό παράδειγμα η ροή κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα ενός αγωγού. Οι διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται κοντά στο τοίχωμα είναι οι μέγιστες, με αποτέλεσμα η ταχύτητα της ροής κοντά στο σύνορο να είναι χαμηλή, κατά συνέπεια ο αριθμός Reynolds, που περιγράφεται παρακάτω, να είναι μικρός και η ροή στρωτή. Βέβαια όσο πιο απομακρυσμένα είναι τα σώματα του ρευστού από τα τοιχώματα η ροή μεταβαίνει σταδιακά από στρωτή σε τυρβώδη. Στρωτή ροή εμφανίζεται επίσης σε ροές ρευστών υψηλού ιξώδους όπου η ταχύτητα ροής είναι εξαιρετικά χαμηλή. Υπάρχουν πολλές

εφαρμογές τυρβώδους ροής όπως για παράδειγμα η κίνηση του νερού σε ένα ποταμό ή οι άνεμοι που πνέουν πάνω από τις πόλεις. Σε πιο επιστημονικές εφαρμογές, τυρβώδη είναι τα οριακά στρώματα που αναπτύσσονται στα φτερά των αεροσκαφών, η μεταφορά πετρελαίου μέσω αγωγών, η ροή μέσω αντλιών και στροβίλων, καθώς επίσης και ροές ατμοσφαιρικών ρευμάτων και ρευμάτων στους ωκεανούς. Φαίνεται λοιπόν ότι η μελέτη της τύρβης έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στο πρόβλημα της τύρβης μέσα από θεωρητική και εργαστηριακή έρευνα, γεωφυσικές παρατηρήσεις και υπολογιστικές μετρήσεις. Στο παρελθόν, οι περισσότερες πειραματικές μελέτες πάνω στην τύρβη, έγιναν σε αεροσήραγγες και υδροδεξαμενές, στις οποίες η μέση ροή περνούσε μέσω ενός πλέγματος το οποίο ήταν κάθετα τοποθετημένο στη ροή. Το μειονέκτημα αυτών των διατάξεων, ήταν ότι η τύρβη εξασθενούσε γρήγορα, και επομένως η πρακτική εφαρμογή τους ήταν περιορισμένη. Μία εναλλακτική πρόταση ήταν η παραγωγή τύρβης σε υδροδεξαμενή από παλλόμενο πλέγμα. Η τύρβη που παράγεται με αυτόν τον τρόπο χαρακτηρίζεται θεωρητικά πιο απλή, και θεωρείται ότι είναι ομοιογενής, ισότροπη και με μηδενική μέση ταχύτητα. Η ένταση της τύρβης καθορίζεται από την ταχύτητα του ρευστού και κατά επέκταση του παλλόμενου πλέγματος. Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται για τη μελέτη της επίδρασης της τύρβης σε διάφορα φυσικά φαινόμενα. Τέτοια παραδείγματα είναι οι διαδικασίες ανάμιξης σε στρωματοποιημένη ροή, διαδικασίες μεταφοράς αερίου σε διεπιφάνειες νερού-αερίου, ανάμιξη ιζήματος (sediment suspension) κ.α., έχουν γίνει ωστόσο και πολλές μελέτες για την κατανόηση των ιδιοτήτων της τύρβης που παράγεται από παλλόμενο πλέγμα.

Εξαιτίας της ανομοιομορφίας και της τυχαιότητας, η τύρβη περιγράφεται με διάφορες στατιστικές μέσες συναρτήσεις. Μια τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από έντονη ανάμειξη καθώς επίσης και μεγάλο αριθμό Reynolds. Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος αριθμός που ορίζεται ως το πηλίκο αδρανειακών δυνάμεων προς δυνάμεις ιξώδους και αναλύεται διεξοδικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Αν ανατρέξουμε στο παρελθόν και τη βιβλιογραφία, η τύρβη είχε παρατηρηθεί από τον Leonardo da Vinci σαν μια ξεχωριστή συμπεριφορά των ρευστών πριν από περίπου 500 χρόνια. Οι πρώτες βέβαια αξιόλογες προσπάθειες για μια μαθηματική περιγραφή του φαινομένου έγιναν στις αρχές του περασμένου αιώνα. Συγκεκριμένα την δεκαετία του 1930 ο G.I. Taylor εισήγαγε τυπικές στατιστικές μεθόδους, που αργότερα θα συνδράμουν στην μαθηματική ανάλυση της ισότροπης ομοιογενούς

τύρβης. Αργότερα, στη δεκαετία του 1940 ο Kolmogorov με κάποιες δημοσιεύσεις του, θα δώσει κάποια σημαντικά αποτελέσματα πάνω στη θεωρία της τύρβης. Η θεωρία του Kolmogorov που είναι γνωστή πλέον ως «θεωρία K41», αποτελεί σημαντική επιτυχία στη στατιστική ανάλυση της τύρβης μιας και παρέχει μια πρώτη πρόβλεψη, για το ενεργειακό φάσμα της τρισδιάστατης ομοιογενούς τύρβης.

Η θεωρία του Kolmogorov είχε βαθιά επίδραση στους μετέπειτα ερευνητές που εξέτασαν το φαινόμενο της ομοιογενούς και ισότροπης τύρβης και εξακολουθεί να αποτελεί τη βάση για πολλές μετέπειτα θεωρίες. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η περίπτωση της τρισδιάστατης, ομοιογενούς ισότροπης τύρβης είναι εξιδανικευμένη και δεν συναντάται πρακτικά στη φύση. Οι περιστροφικές και ανωστικές δυνάμεις τείνουν να καταστείλουν τις κατακόρυφες κινήσεις, και να δημιουργήσουν μια ανισοτροπία μεταξύ των κάθετων και οριζόντιων κατευθύνσεων. Η παρουσία ενός ρευστού μέσου με κάποιο συγκεκριμένο προσανατολισμό μπορεί πάλι προκαλεί ανισοτροπίες στην ταχύτητα και τα πεδία πίεσης. Μια τυρβώδης ροή είναι ομοιογενής αν δεν παρουσιάζονται χωρικές κλίσεις σε οποιαδήποτε μέση ποσότητα. Δηλαδή οποιαδήποτε στατιστική ποσότητα που περιγράφει την ροή δεν είναι χωρική συνάρτηση.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετοί επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με την μελέτη και την προσπάθεια κατανόησης της τύρβης και της τυρβώδους συμπεριφοράς γενικότερα, εκτελώντας διάφορα πειράματα και εξάγοντας κάποια αποτελέσματα και συμπεράσματα μελετώντας την τύρβη σε διάφορες μορφές. Ο Birouk, ο οποίος το 2001 έκανε μια προσπάθεια να μελετήσει πειραματικά την ισότροπη τύρβη σε χαμηλό αριθμό Reynolds. Μετά τον Birouk οι επόμενοι που ασχολήθηκαν με την προσπάθεια κατανόησης της τυρβώδους συμπεριφοράς ήταν οι επιστήμονες W.Hwang και J.K.Eaton (2004). Αυτοί οι δύο ασχολήθηκαν και έβγαλαν κάποια αποτελέσματα παράγοντας ομοιογενή και ισότροπη τύρβη χωρίς μέση ροή. Τα αποτελέσματα της τύρβης έδειξαν ότι η ταχύτητα rms ήταν της τάξης των 0,85 (m/s). Επίσης οι μέσες ταχύτητες ήταν στο 10% των ταχυτήτων rms. Επιπλέον η ροή ήταν αρκετά ισότροπη με αναλογία ισοτροπίας από 0,88 έως 1,24. Αργότερα, το 2007, οι J.de Jong και L.Cao ασχολήθηκαν με την εκτίμηση του ποσοστού σκέδασης με ρ_{in} στην ισότροπη τύρβη αλλά τα αποτελέσματα που έβγαλαν δεν ήταν και τόσο ικανοποιητικά και αυτό γιατί το μεγαλύτερο ποσοστό λάθους παρατηρήθηκε στην μέθοδο φασματικής τοποθέτησης. Τα επόμενα χρόνια έως το 2009, τέσσερις ακόμα ερευνητές, οι Charles Goepfert, Jean-Louis Marie, Delphine Chareyron και Michel Lance ασχολήθηκαν με τον χαρακτηρισμό ενός συστήματος που παράγει ομοιογενές και ισότροπο τυρβώδες πεδίο με την χρήση

ελεύθερων συνθετικών δεσμών. Το συμπέρασμα το οποίο προέκυψε ότι η τύρβη είναι περισσότερο έντονη σε ένα σφαιρικό κέλυφος γύρω από το γεωμετρικό κέντρο της ροής(κέντρο κύβου) με διάμετρο 40 mm.

Στην παρούσα εργασία η πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται για τη μελέτη της συμπεριφοράς οργανικών και ανόργανων δοκιμίων σφαιρικού σχήματος στην τυρβώδη ροή που παράγεται. Συγκεκριμένα, στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της εντάσεως της τύρβης στο χρόνο που απαιτείται για το λιώσιμο σφαιρικών δοκιμίων πάγου, πάγου με περιεκτικότητα σε χλωριούχο νάτριο και δοκιμίων μίγματος γλυκόζης. Επίσης, γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων τα οποία βρίσκονται σε κοιλότητα τοποθετημένη κάθετα στο κέντρο της ροής. Τέλος μέσω των πειραμάτων με τη μέθοδο LIF, έγινε οπτικοποίηση τη συμπεριφοράς των δοκιμίων σε όλο το φάσμα εντάσεων του τυρβώδους πεδίου τόσο εντός όσο και εκτός της κοιλότητας. Η κατανόηση βασικών παραμέτρων της τυρβώδους ροής, καθώς και τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν τη διαδικασία με την οποία λιώνουν τα δοκίμια και διαχέονται προς το εργαζόμενο μέσο, έχει εφαρμογή στη μελέτη του λιώσιματος των παγετώνων, καθώς επίσης και τη διασπορά στερεών ρύπων στη θάλασσα.

Στο τυρβώδες ροϊκό πεδίο που παράγεται από δύο παλλόμενα πλέγματα και με τη συνεχή λήψη στιγμιότυπων των δοκιμίων με κάμερα καθ'ολη τη διάρκεια των πειραμάτων, μελετήθηκε η σταδιακή μείωση της διαμέτρου και ο χρόνος που απαιτείται για το πλήρες λιώσιμο των δοκιμίων. Έγινε μελέτη της επίδρασης της τύρβης στο εσωτερικό ορθογωνικής κοιλότητας, και οπτικοποίηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων μέσα και έξω από αυτή. Έγινε τέλος εμβάθυνση στους μηχανισμούς διάλυσης, τόσο του πάγου όσο και της στερεής γλυκόζης στο νερό.

Τα πειράματα έγιναν σε υδροδεξαμενή όπου τοποθετήθηκαν δύο πλέγματα οποία ταλαντώνονταν οριζόντια μέσα στο νερό. Τα δοκίμια όπως και η κοιλότητα τοποθετήθηκαν κάθετα και στο κέντρο της ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναδρομή, πρώτος ο Hagen το 1839 παρατήρησε τη μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Ο Hagen διαπίστωσε την εμφάνιση τύρβης με την αύξηση της ταχύτητας, των διαστάσεων και τη μείωση του ιξώδους, δεν έδωσε όμως το κριτήριο της μετάβασης. Συστηματικά πειράματα και θεωρητικές μελέτες του Osborne Reynolds (1842-1912) διευκρίνησαν το φαινόμενο της μετάβασης. Συγκεκριμένα, ο Reynolds παρατήρησε στα πειράματα του ότι η μετάβαση από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι:

A) Η ένταση της κινητικής ενέργειας της ροής ή αλλιώς το μέγεθος των δυνάμεων αδράνειας.

B) Το μέγεθος του μοριακού ιξώδους του ρευστού, που δρα ανασταλτικά, περιορίζοντας τις διαταραχές της ροής.

Γ) Τα στερεά τοιχώματα που περιορίζουν τη ροή

Οι επιδράσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη με τον αριθμό Reynolds που σε σωλήνα με διάμετρο d γράφεται:

Από φυσική άποψη, ο αριθμός Reynolds μπορεί να θεωρηθεί σαν λόγος δύο αντικρουόμενων δυνάμεων, δηλαδή των δυνάμεων αδράνειας, που σχετίζονται με τη μεταβολή της ποσότητας κινήσεως της ροής και των δυνάμεων λόγω ιξώδους. Είναι δηλαδή:

$$Re = \frac{\text{αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{δυνάμεις ιξώδους}} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (2.1)$$

Για κάθε ειδικό πρόβλημα ροής υπάρχει ένας κρίσιμος αριθμός Reynolds Re_c , τέτοιος ώστε όταν:

$Re < Re_c$ η ροή είναι στρωτή

$Re > Re_c$ η ροή είναι τυρβώδης

Θεωρίες για τυρβώδεις ροές έχουν αναπτυχθεί από τον Taylor (1915, 1932), Prandl (1925), Von Karman (1930) και άλλους. Οι θεωρίες αυτές βασίζονται στην ομοιότητα ανάμεσα στις τυρβώδεις διακυμάνσεις και τις μοριακές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από αταξία. Εκφράσεις για μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας σχηματίζονται κατ' αναλογία με τις εκφράσεις για διάχυση της ύλης, ιξώδη μεταφορά της ορμής και μεταφορά θερμότητας λόγω της τυχαίας κίνησης των μορίων.

Οι θεωρίες για τυρβώδεις ροές μεγάλης κλίμακας, αν και χρησιμοποιούνται ευρέως, είναι ημιεμπειρικές. Περισσότερο λεπτομερείς θεωρίες υπάρχουν για συγκεκριμένες περιοχές. Ο Taylor (1930) ανέπτυξε τη ιδέα της ομογενούς και ισότροπης τύρβης, μία μαθηματική εξιδανίκευση της τύρβης, με την οποία μπορούν να εξαχθούν εκφράσεις για στατιστικές ποσότητες οι οποίες μπορούν να εξηγήσουν σημαντικές πτυχές της τυρβώδους ροής. Στη μελέτη του για διάχυση από συνεχείς κινήσεις σε ομογενή ισοτροπικά πεδία Taylor (1921), η διάχυση ύλης σε ροϊκό πεδίο, βρέθηκε ότι σχετίζεται με τη ταχύτητα διακύμανσης (random velocity) των ροϊκών σωματιδίων. Εκτεταμένη μελέτη της ομογενούς, ισοτροπικής τύρβης και της διάχυσης σε ομογενή τύρβη έχει γίνει από τον Batchelor (1949,1956). Εφαρμογή ομογενούς, ισοτροπικής τύρβης σε πραγματική τυρβώδη ροή έγινε από τον Kolmogorov (1941). Ποιο λεπτομερής αναφορά στη θεωρία του Kolmogorov γίνεται σε επόμενη παράγραφο.

2.2 Χαρακτηριστικά της τύρβης

Είναι δύσκολο να δοθεί ακριβής ορισμός για την τύρβη. Ωστόσο, μπορούν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της τύρβης .

1) Η τύρβη είναι τυχαία και χαοτική. Για αυτό το λόγο η προσέγγιση της τύρβης γίνεται με στοχαστικές μεθόδους.

2) Η διαχυτότητα της τύρβης, η οποία προκαλεί ανάμειξη και αυξημένο ρυθμό ορμής, θερμότητας και μεταφοράς μάζας, είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό της τύρβης. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας προκαλούν ανάμειξη σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ότι η μοριακή διάχυση. Έτσι, αν σε ένα ρευστό η ροή χαρακτηρίζεται από αταξία, αλλά ωστόσο οι διακυμάνσεις της ταχύτητας δεν είναι διασκορπισμένες σε όλη την έκταση του, τότε η ροή του ρευστού δεν χαρακτηρίζεται τυρβώδης.

3) Η τύρβη είναι περιστροφική και τρισδιάστατη. Χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα μεταβαλλόμενης στροβιλότητας. Οι στροβιλώδεις αυτές κινήσεις, που ονομάζονται δίνες, εμφανίζονται από τις μεγάλες κλίμακες μέχρι τις μικρότερες όπου κυριαρχεί η

μοριακή διάχυση. Οι μικρότερες κλίμακες της τύρβης δημιουργούνται από το μηχανισμό 'vortex stretching'.

4) Οι τυρβώδεις ροές παρουσιάζουν πάντα εξασθένηση ενέργειας (dissipation). Επομένως για να διατηρηθεί μία τυρβώδης ροή χρειάζεται συνεχή τροφοδοσία ενέργειας.

5) Η τύρβη είναι συνεχές φαινόμενο. Η μικρότερη κλίμακα της τύρβης είναι πολύ μεγαλύτερη από τις μοριακές κλίμακες.

6) Η τύρβη είναι ιδιότητα της ροής και όχι του ρευστού.

2.3 Προέλευση της τύρβης

Η τύρβη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σχετίζεται με υψηλούς αριθμούς Reynolds. Η τύρβη είναι αποτέλεσμα της μη γραμμικής φύσης της συναγωγής (advection) η οποία δημιουργεί αλληλεπίδραση ανάμεσα σε διαφορετικής κλίμακας κινήσεις. Έτσι, μια αρχική διαταραχή με δεδομένο χαρακτηριστικό μήκος τείνει να εξαπλωθεί σε μεγαλύτερες και σε μικρότερες κλίμακες. Αυτή η εξάπλωση περιορίζεται στις μεγάλες κλίμακες από όρια ή από δυνάμεις, ενώ στις μικρές κλίμακες από το ιξώδες. Αν οι κλίμακες εκτείνονται σε μεγάλο εύρος τότε η ροή παίρνει πολύπλοκη μορφή.

2.4 Φυσικά χαρακτηριστικά τύρβης

Διαχωρισμός κατά Reynolds (Reynolds decomposition)

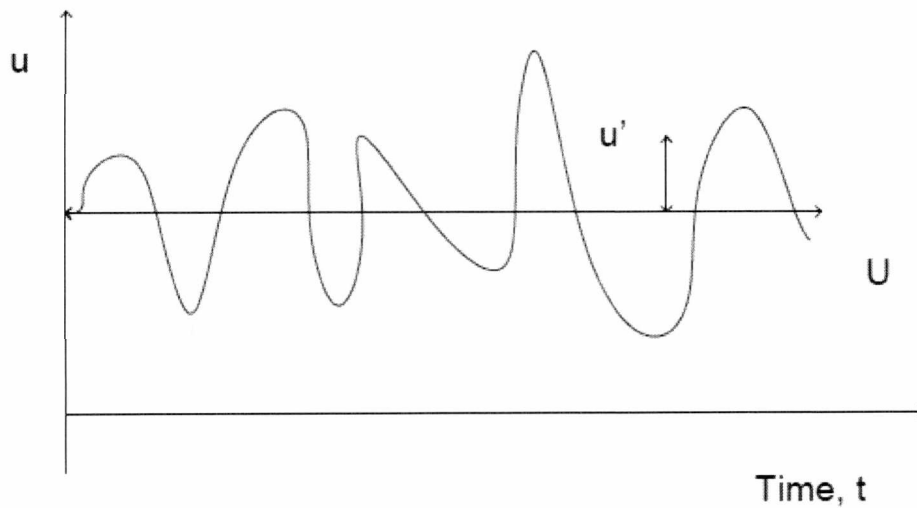
Βασικό χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής είναι η 'ακατάστατη' μορφή της μεταβολής των τοπικών υδροδυναμικών μεγεθών, όπως είναι η ταχύτητα και η πίεση, σε συνάρτηση με το χρόνο. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στατιστικοί οροί για την περιγραφή των μεγεθών. Πρώτος ο Reynolds μελέτησε την τυρβώδη κίνηση ως μια διασπορά γύρω από μία μέση τιμή. Έτσι, η στιγμιαία ταχύτητα $u_i(t)$ είναι δυνατόν να αναλυθεί σε άθροισμα μίας μέσης τιμής $U_i(t)$ και μίας διαταραχής $u'_i(t)$. Είναι δηλαδή:

$$u_i(t) = U_i(t) + u'_i(t) \quad (2.2)$$

Όπου:

$U_i(t)$ = είναι η μέση χρονικά τιμή της ταχύτητας

$u'_i(t)$ = η ταχύτητα διαταραχής που εμφανίζει διακυμάνσεις τυχαίας ή στοχαστικής μορφής.



Εικόνα 2.1- Μόνιμη τυρβώδης ροή ως προς τις μέσες τιμές

Η μέση ταχύτητα U_i μπορεί να υπολογιστεί σαν ολοκλήρωμα της μορφής:

$$U_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_i dt \quad (2.3)$$

όπου T μία χρονική περίοδος τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη μεγαλύτερη περίοδο των τυχαίων διαταραχών.

- Όταν η μέση χρονικά τιμή των υδροδυναμικών μεγεθών (π.χ. στην περίπτωση της ταχύτητας η U_i είναι σταθερή, τότε η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται ως 'μόνιμη ως προς τις μέσες τιμές', όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.
- Όταν η μέση χρονικά τιμή των υδροδυναμικών μεγεθών δεν είναι σταθερή, τότε έχουμε 'μη μόνιμη τυρβώδη ροή ως προς τις μέσες τιμές'.

Η μέση τιμή της διακύμανσης u'_i είναι εξ ορισμού μηδέν:

$$\overline{u'_i} = 0 \quad (2.4)$$

Σε πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιείται η μέση χρονικά τιμή, καθώς οι μετρήσεις γίνονται σε συγκεκριμένα σημεία σε στατιστικά σταθερό πεδίο ροής (συνήθως όμως ανομοιογενές). Σε ένα ανομοιογενές ρευστό μία μέση χρονικά τιμή όπως η U_i είναι συνάρτηση της θέσης οπότε η χρήση μέσης χωρικής τιμής είναι ανώφελη. Για να έχει

νόημα η μέση χρονική τιμή θα πρέπει το παραπάνω ολοκλήρωμα να είναι ανεξάρτητο από το t , δηλαδή θα πρέπει η μέση ροή να είναι σταθερή:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

Εξισώσεις κίνησης

• Οι εξισώσεις κίνησης σε ένα ασυμπίεστο ρευστό είναι:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\sigma_{ij}} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{εξίσωση συνέχειας} \quad (2.7)$$

Όπου $\overline{\sigma_{ij}}$ είναι ο τανυστής τάσης (stress tensor).

Εφαρμόζοντας το διαχωρισμό κατά Reynolds (Reynolds decomposition) στις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0. \quad (2.8)$$

δηλαδή η μέση ροή είναι ασυμπίεστη.

$$\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.9)$$

δηλαδή οι τυρβώδεις διαταραχές της ταχύτητας είναι ασυμπίεστες.

Εξίσωση ορμής

Από τις εξισώσεις Navier Stokes, χρησιμοποιώντας τη Reynolds decomposition και την εξίσωση συνέχειας προκύπτει τελικά:

$$\frac{DU_i}{Dt} = \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = X_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\Sigma_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (2.10)$$

$\Sigma_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}$ = τανυστής τάσης σε τυρβώδη ροή

Η παραπάνω εξίσωση είναι η εξίσωση ορμής (Reynolds momentum equation). Η εξίσωση ορμής για τυρβώδη ροή είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για στρωτή ροή, με τη διαφορά ότι εδώ εμφανίζεται ο όρος $-\overline{\rho u_i u_j}$ στον τανυστή τάσης. Ο όρος αυτός ονομάζεται τανυστής τάσεων Reynolds (Reynolds stress tensor) ή τανυστής τυρβωδών τάσεων και αντιπροσωπεύει τις επιπλέον τάσεις μέσα στο ρευστό λόγω των τυρβωδών διαταραχών της ταχύτητας.

Τυρβώδης κινητική ενέργεια

Μια εξίσωση για την μέση κινητική ενέργεια που περιλαμβάνει τόσο τις μέσες όσο και τις τυρβώδεις συνιστώσες της ροής είναι η παρακάτω:

μέση κινητική ενέργεια:

$$\underbrace{\frac{D}{Dt} \left[\frac{1}{2} \overline{u^2} \right]}_{\substack{\text{συνολική} \\ \text{μεταβολή} \\ \text{μέσης} \\ \text{κινητικής} \\ \text{ενέργειας}}} = \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{\left[-\frac{\overline{p u_j}}{\rho} + 2\nu \overline{u_i S_{ij}} - \overline{u_i u_j' u_i'} \right]}_{\text{μεταφορά}} - \underbrace{2\nu \overline{S_{ij} S_{ij}}}_{\substack{\text{ιξώδης} \\ \text{απώλεια} \\ \text{(dissipation)}}} + \underbrace{\overline{u_i u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\substack{\text{απώλεια} \\ \text{λόγω} \\ \text{τύρβης}}} \quad (2.11)$$

Όπου $S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right]$ είναι η γωνιακή παραμόρφωση.

Από την εξίσωση (2.11) φαίνεται ότι η συνολική μεταβολή της μέσης κινητικής ενέργειας είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης φαινομένων όπως η μεταφορά, η ιξώδης απώλεια και η απώλεια λόγω τύρβης. Ο κυρίαρχος όρος στο δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης είναι η απώλεια λόγω τύρβης. Όπως έχει αναφερθεί, η μέση ροή τροφοδοτείται με ενέργεια στις μεγάλες κλίμακες. Η ιξώδης απώλεια είναι ασήμαντη για τη μέση ροή καθώς οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μικρές. Οι όροι της κίνησης αντιπροσωπεύουν τη ‘χωρική κίνηση’ της μέσης κινητικής ενέργειας.

Το ισοζύγιο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι:

Τυρβώδης κινητική ενέργεια:

$$\frac{D}{Dt} \left[\frac{1}{2} \overline{u_i'^2} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\frac{\overline{p' u_j'}}{\rho} + 2\nu \overline{u_i' s_{ij}} - \frac{1}{2} \overline{u_i'^2 u_j'} \right] - 2\nu \overline{s_{ij} s_{ij}} + \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$$

Ολική μεταβολή τυρβώδους κινητικής ενέργειας

μεταφορά

ιξώδης απώλεια

Παραγωγή διατμητικών τάσεων

(2.12)

Όπου $S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$ είναι η γωνιακή παραμόρφωση λόγω τύρβης. Ο

όρος που αντιπροσωπεύει την παραγωγή διατμητικών τάσεων είναι παρόμοιος με τον όρο της απώλειας λόγω τύρβης στην εξίσωση της μέσης κινητικής ενέργειας. Αυτοί οι όροι αναφέρονται σε μεταφορά κινητικής ενέργειας από τις μέσες προς τις τυρβώδεις κλίμακες.

Στην εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας η ιξώδης απώλεια δεν είναι ασήμαντη. Η απώλεια της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι σημαντική στην τυρβώδη ροή, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους. Τέλος, οι όροι της μεταφοράς αναφέρονται σε ‘χωρική κίνηση’ της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Ένταση τύρβης

Ένταση τύρβης κατά τους άξονες x, y, z είναι οι αντίστοιχες ποσότητες:

$$\sqrt{\overline{u^2}}, \sqrt{\overline{v^2}}, \sqrt{\overline{w^2}} = \text{ένταση τύρβης}$$

οι παραπάνω ποσότητες είναι οι μέσες τετραγωνικές τιμές (root mean square, rms) των u^2, v^2, w^2 .

Ομογενής τύρβη

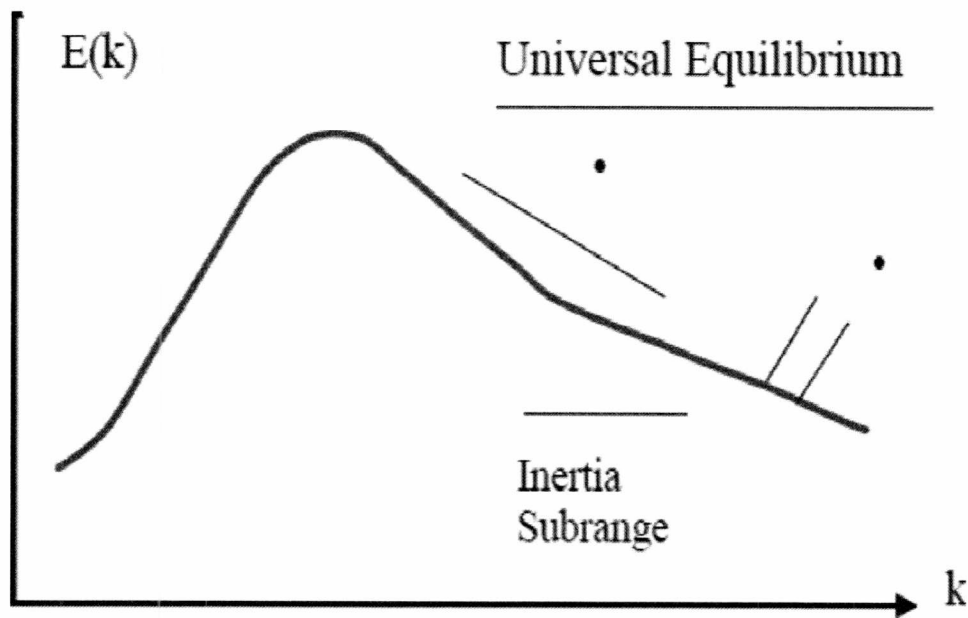
Η τυρβώδης ροή λέγεται ομογενής ως προς κάποιο μέγεθος, όταν η μέση τιμή αυτού του μεγέθους είναι σε κάθε σημείο του χώρου η ίδια. Π.χ. όταν η ποσότητα $\sqrt{\overline{u^2}}$ είναι παντού η ίδια, η τύρβη λέγεται ομογενής ως προς $\sqrt{\overline{u^2}}$ (ένταση κατά τη διεύθυνση x).

Ισότροπη τύρβη

Η τυρβώδης ροή λέγεται ισότροπη ως προς κάποιο μέγεθος, όταν η τιμή του δεν αλλάζει με περιστροφή του συστήματος των αξόνων. Π.χ. η τυρβώδης ροή λέγεται ισότροπη ως προς την ένταση όταν σε κάθε σημείο ισχύει $\overline{u^2} = \overline{v^2} = \overline{w^2}$.

Φάσμα ενέργειας της τύρβης

Οι διαταραχές της ταχύτητας (velocity fluctuations) σε μία ροή με υψηλό αριθμό Reynolds εξαπλώνονται σε όλες τις χωρικές (και χρονικές) κλίμακες του ροϊκού πεδίου. Ένα τυπικό φάσμα ενέργειας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου $E(k)$ είναι το φάσμα ενέργειας και k είναι ο κυματαριθμός. Ενέργεια παράγεται στις μεγάλες κλίμακες από τις μεγάλες δίνες (χαμηλοί κυματαριθμοί). Στη συνέχεια παράγονται όλο και μικρότερες δίνες, μέσω του μηχανισμού vortex stretching, και με αυτό τον τρόπο ενέργεια μεταφέρεται σε μεγαλύτερους κυματαριθμούς. Τέλος, η ενέργεια εξασθενεί (dissipated) και μετατρέπεται σε θερμότητα στις μικρές κλίμακες.



Σχήμα 1- φάσμα τυρβώδους ενέργειας

Οι μεγάλες κλίμακες περιορίζονται από τις γεωμετρικές διαστάσεις της ροής, π.χ. η διάμετρος ενός σωλήνα, οι διαστάσεις μιας δεξαμενής. Οι μεγάλες κλίμακες ονομάζονται ολοκληρωτικές (integral) κλίμακες μήκους και χρόνου.

Ο ρυθμός εξασθένησης (απώλειας) ενέργειας (dissipation rate ϵ) είναι περίπου ίσος με το ρυθμό παραγωγής ενέργειας που λαμβάνει χώρα στις μεγάλες κλίμακες και είναι της τάξης:

$$\epsilon \approx \overline{u^3} \quad (2.13)$$

u : είναι η απόκλιση της ταχύτητας στις μεγάλες κλίμακες

L : είναι η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους

Είναι αξιοσημείωτο, ότι ο ρυθμός απώλειας ενέργειας (ϵ) είναι ανεξάρτητος από το ιξώδες του ρευστού και εξαρτάται μόνο από τις μεγάλες κλίμακες κίνησης της ροής. Αντιθέτως, η κλίμακα όπου συμβαίνει η απώλεια ενέργειας εξαρτάται έντονα από το ιξώδες του υγρού. Πρόκειται για τη μικρότερη κλίμακα κίνησης και ονομάζεται μικροκλίμακα Kolmogorov. Δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (2.14)$$

ν : είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Ξεχωριστή αναφορά στην κλίμακα Kolmogorov και γενικότερα στη θεωρία Kolmogorov γίνεται σε επόμενη παράγραφο.

Η περιοχή όπου κυριαρχεί η μοριακή διάχυση χαρακτηρίζεται από την αντίστοιχη κλίμακα μήκους. Αυτή η κλίμακα ονομάζεται Batchelor και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

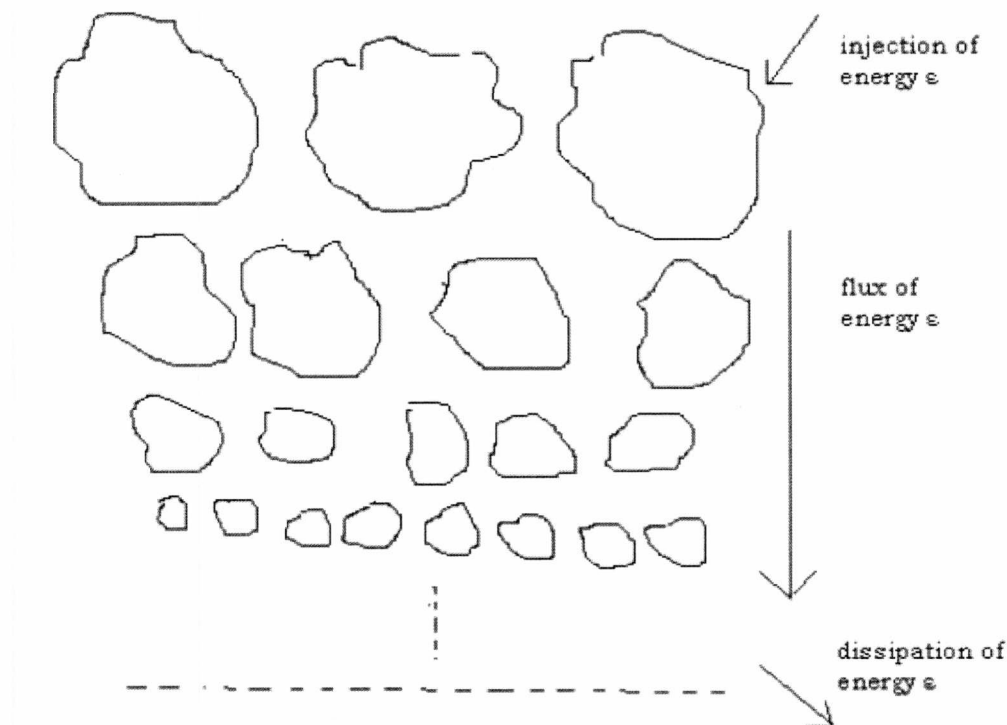
$$L_B \sim \left(\frac{\nu D^2}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (2.15)$$

D: συντελεστής μοριακής διάχυσης.

2.5 Θεωρία Kolmogorov

Όσο ο αριθμός Reynolds είναι μικρός, οι μη γραμμικότητες (non linearities) είναι ασήμαντες, η ροή είναι στρωτή και περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier – Stokes οι οποίες μπορούν να επιλυθούν και να μας δώσουν τις παραμέτρους για το πεδίο ροής. Όσο όμως αυξάνει ο αριθμός Reynolds τότε οι μη –γραμμικότητες γίνονται μεγάλες, στη ροή εμφανίζονται στρόβιλοι (vortices) και δίνες (eddies), οπότε η ροή παύει να είναι στρωτή, γίνεται τυρβώδης και οι εξισώσεις Navier-Stokes δεν ανταποκρίνονται σε αυτή την περίπτωση ροής.

Μία σημαντική προσπάθεια για την εξιχνίαση του προβλήματος της τύρβης έγινε το 1941 από τον Andrei N. Kolmogorov με τη θεωρία του για ομογενή, ιστροπική και μόνιμη τυρβώδη ροή, αλλιώς γνωστή ως θεωρία K41. Η θεωρία του αναφέρεται στο ενεργειακό φάσμα της τύρβης και βασίζεται σε ιδέα του Richardson για σταδιακή εξασθένηση της ενέργειας (cascade) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2- Εξασθένηση ενέργειας (energy cascade)

Σύμφωνα με τη θεωρία του Kolmogorov, το τυρβώδες ροϊκό πεδίο αποτελείται από δίνες διαφορετικών διαστάσεων (βλ. Σχήμα 3). Η ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα παράγει τις μεγάλες δίνες, οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε μικρότερες δίνες. Με αυτό τον τρόπο η ενέργεια χάνεται από τις μεγάλες κλίμακες και περνάει στις μικρότερες. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι τις μικρότερες κλίμακες όπου οι μικρότερες δίνες εξαφανίζονται υπό την επίδραση του μοριακού ιξώδους. Εκεί υπάρχει η μικροκλίμακα Kolmogorov (η) όπου η ενέργεια χάνεται μέσω του ιξώδους. Σε αυτήν την κλίμακα η τύρβη εξαρτάται από το ρυθμό καταστροφής της ενέργειας από τις μοριακές δυνάμεις (ε) ανά μονάδα μάζας και χρόνου ($m^2 \cdot sec^{-3}$) και από το ιξώδες ν ($m^2 \cdot sec^{-1}$)

Στην κλίμακα Kolmogorov οι κλίμακες ταχύτητας, μήκους και χρόνου δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}, \text{ κλίμακα μήκους Kolmogorov} \quad (2.16)$$

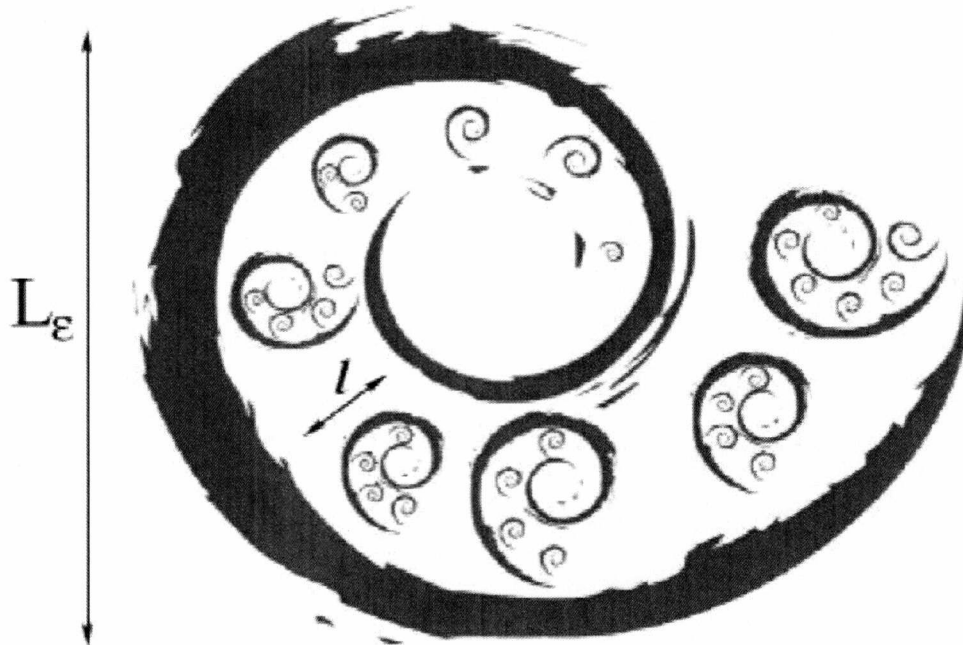
$$u = (\nu\varepsilon)^{1/4}, \text{ κλίμακα ταχύτητας Kolmogorov} \quad (2.17)$$

$$\tau = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/4}, \text{ κλίμακα χρόνου Kolmogorov} \quad (2.18)$$

Ο αριθμός Reynolds στην κλίμακα Kolmogorov ισούται με μονάδα:

$$Re = \frac{nu}{\nu} = 1 \quad (2.19)$$

Αυτό δείχνει πόσο ισχυρή είναι η παρουσία των ιξωδών δυνάμεων σε αυτή την κλίμακα



Σχήμα 3- Απεικόνιση δινών διαφόρων μεγεθών

Η τάξη μεγέθους της κλίμακας Kolmogorov και Batchelor φαίνεται στο παράδειγμα που ακολουθεί.

Σε ανοικτό κανάλι το οποίο έχει βάθος 200 mm η μέση ταχύτητα ροής είναι 50 mm/s ενώ η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους είναι περίπου το μισό του βάθους δηλ. 100 mm. Το ρευστό είναι νερό στους 200°C ενώ το κινηματικό ιξώδες του είναι $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Με αυτά τα δεδομένα οι κλίμακες μήκους και χρόνου Kolmogorov είναι 0,7 mm και 0,6 sec. Θεωρώντας ότι η χημική ουσία που χρησιμοποιείται ως δείκτης στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει διαχυτότητα $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ τότε η κλίμακα Batchelor είναι 0,02 mm, 35 φορές μικρότερη από την κλίμακα Kolmogorov.

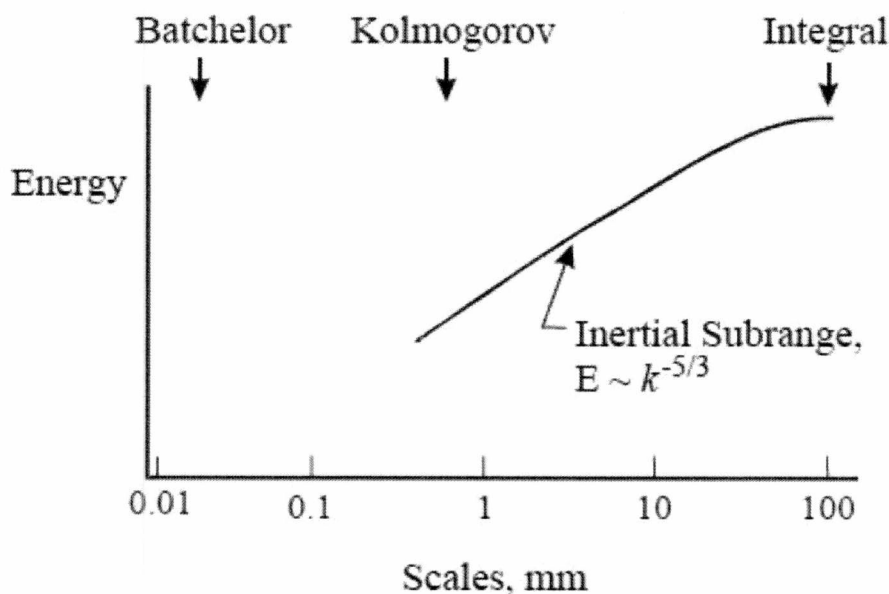
2.5.1 Φάσμα ενέργειας Kolmogorov

Ο κυματαριθμός μίας δίνης που έχει διάσταση L δίνεται από τον τύπο:

$$K=2\pi L \quad (2.20)$$

Το ενεργειακό φάσμα περιγράφει την τυρβώδη κινητική ενέργεια συναρτήσει της κλίμακας μήκους ή του κυματαριθμού. Από το φάσμα φαίνεται το ποσό της ενέργειας που εμπεριέχεται σε κάθε κλίμακα μήκους.

Ο Kolmogorov θεώρησε ότι η τυρβώδης ανάμιξη γίνεται σε μία περιοχή κυματαριθμών από K_{min} έως K_{max} . Η τυρβώδης ανάμιξη μεταφέρει ενέργεια στις μικρές κλίμακες μήκους δηλαδή στους μεγάλους κυματαριθμούς. Σε κάποια περιοχή, από K_{max} έως K_k , όπου K_k είναι ο κυματαριθμός που αντιστοιχεί στην κλίμακα Kolmogorov, η πτώση ενέργειας λόγω ιξωδών δυνάμεων δεν είναι σημαντική. Πέρα από το K_k , το ενεργειακό φάσμα επηρεάζεται από το ιξώδες του υγρού. Επομένως, το ενεργειακό φάσμα μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή περιλαμβάνει τις μεγάλες κλίμακες κίνησης και είναι η περιοχή όπου το σύστημα τροφοδοτείται με ενέργεια (energy subrange), ενώ η δεύτερη περιοχή περιλαμβάνει τις μικρές κλίμακες κίνησης όπου η ενέργεια χάνεται λόγω ιξώδους (dissipation subrange). Ανάμεσα σε αυτές τις δύο περιοχές, από K_{max} έως K_k όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η περιοχή όπου τόσο οι ιξώδεις όσο και οι μεγάλης κλίμακας δυνάμεις δεν είναι σημαντικές. Αυτή η περιοχή ονομάζεται inertial subrange.



Σχήμα 4- Τυπικό ενεργειακό φάσμα τυρβώδους ροής για ανοικτό κανάλι (open channel flow)

Στο Σχήμα 4 φαίνεται ένα τυπικό ενεργειακό φάσμα $E(k)$ όπου η ενέργεια είναι συνάρτηση της κλίμακας μήκους. Όπως φαίνεται, οι μεγάλες κλίμακες μήκους έχουν την περισσότερη ενέργεια, η κατανομή της οποίας σε αυτή την περιοχή, εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες. Οι μικρές κλίμακες μήκους έχουν πολύ μικρότερη ενέργεια. Στο inertial subrange η τύρβη εξαρτάται από το ρυθμό απώλειας ενέργειας (ε) και τον κυματάρημο (k). Σε αυτή την περιοχή ισχύει για την ενέργεια:

$$E(k) \approx \varepsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad (2.21)$$

παραπάνω τύπος είναι γνωστός ως ο '-5/3 νόμος του Kolmogorov' (-5/3 law of Kolmogorov).

Στο Σχήμα 4 φαίνεται και η κλίμακα Batchelor, η οποία είναι περισσότερο από μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την κλίμακα Kolmogorov.

2.6 Πειραματικοί μηχανισμοί παραγωγής τύρβης

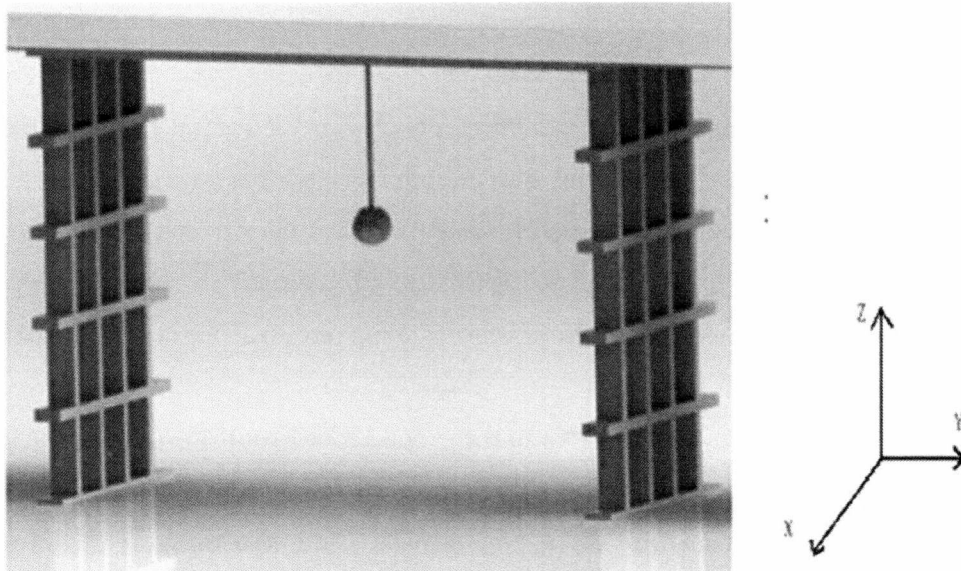
Όπως αναφέρθηκε, στη φύση οι περισσότερες ροές είναι τυρβώδεις. Για την πλήρη κατανόηση τους, γίνονται εργαστηριακά πειράματα στα οποία αναπαράγεται τύρβη με τεχνητό τρόπο. Σημαντικότεροι τρόποι παραγωγής τύρβης είναι τυρβώδης ροή σε κανάλι, σε κυλίνδρους που ταλαντώνονται, παλλόμενα πλέγματα. Η ροή σε κανάλι σχετίζεται με τη ροή σε τυρβώδες οριακό στρώμα, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ένα κανάλι σαν ένα μεγάλο οριακό στρώμα.

2.7 Τύρβη παλλόμενου πλέγματος (grid stirred turbulence)

Στη φύση δεν υπάρχουν ομογενείς ή ισότροπες τυρβώδεις ροές. Το οριακό στρώμα είναι κλασική περίπτωση μη ομογενούς και μη ισότροπης ροής. Οι έννοιες όμως της ομοιογένειας και ισοτροπικότητας είναι πολύ χρήσιμες στη θεωρητική διερεύνηση της τυρβώδους ροής. Η ισότροπη τύρβη, είναι η πιο απλή περίπτωση τυρβώδους ροής, καθώς απαιτείται ο ελάχιστος αριθμός παραμέτρων και εξισώσεων για την περιγραφή της. Μέχρι ένα σημείο, η ισοτροπική τύρβη μπορεί να περιγραφεί θεωρητικά και αποτελεί μια βάση για την κατανόηση πιο πολύπλοκων μορφών τυρβώδους ροής. Από πρακτικής άποψης, η ισοτροπική τύρβη είναι υποθετική καθώς οι πραγματικές ροές δεν πληρούν τις συνθήκες ισοτροπίας.

Ένας τρόπος για να παραχθεί ισοτροπική τύρβη είναι με την ταλάντωση πλεγμάτων. Η τύρβη παλλόμενου πλέγματος είναι κατάλληλη για μελέτες στην περιβαλλοντική μηχανική καθώς παρέχει ιδανικές συνθήκες για μελέτη των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των ρύπων. Η τύρβη που παράγεται από παλλόμενα πλέγματα χαρακτηρίζεται από μηδενική μέση ταχύτητα, από ομοιογένεια και ισοτροπία. Ωστόσο, αν και η τύρβη παλλόμενου πλέγματος θεωρείται σχετικά απλή περίπτωση τύρβης, εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του πλέγματος, από το εύρος και τη συχνότητα ταλάντωσης.

Τα πλέγματα χρησιμοποιούνται για τη μελέτη τυρβώδους ανάμιξης, για διασπορά σε ομογενή, στρωματοποιημένα, ή περιστρεφόμενα ρευστά. Η πιο απλή περίπτωση είναι όταν το πλέγμα είναι ακίνητο και η ροή περνάει μέσα από αυτό. Η τύρβη που δημιουργείται είναι αποτέλεσμα της κίνησης του ρευστού ενάντια στην αντίσταση που προβάλλεται από τις ράβδους του πλέγματος. Ωστόσο, στα περισσότερα εργαστηριακά πειράματα, η τύρβη δημιουργείται από πλέγματα που ταλαντώνονται μέσα σε δεξαμενή. Το πλεονέκτημα της τύρβης που παράγεται από παλλόμενα πλέγματα είναι ότι η μέση ταχύτητα ροής είναι περίπου μηδενική. Πρώτος ο Rouse (1939) χρησιμοποίησε αυτόν τον τρόπο παραγωγής τύρβης για τη μελέτη sediment suspension (διασπορά ιζήματος). Από τότε, έχουν γίνει πολλά πειράματα με παλλόμενα πλέγματα για τη μελέτη των ιδιοτήτων της τυρβώδους ροής. Ένα πλέγμα (συνήθως τετραγωνικής διατομής) με mesh size M (απόσταση ανάμεσα στα κέντρα δύο διακενών) που ταλαντώνεται με εύρος ταλάντωσης S και συχνότητα f , μέσα σε μία δεξαμενή, παράγει τύρβη μακριά από το πλέγμα. Η τύρβη δημιουργείται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των δεσμών ροής (jet flow) από τις ράβδους των πλεγμάτων. Η μέση ταχύτητα της ροής είναι μηδέν και η τύρβη εξασθενεί όσο αυξάνεται η απόσταση από το πλέγμα.



Εικόνα 2.2- Παλλόμενα πλέγματα με δοκίμιο στο κέντρο

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφηκε αναλυτικά από τους Thompson και Turner (1975), των οποίων η δουλειά αποτελεί σταθμό στη μελέτη των ιδιοτήτων της τύρβης παλλόμενου πλέγματος. Στα πειράματα που έκαναν προσπάθησαν να συσχετίσουν στοιχεία του ροϊκού πεδίου, όπως τυρβώδεις ταχύτητες και κλίμακες μήκους, με εξωτερικές παραμέτρους όπως συχνότητα και πλάτος ταλάντωσης.

Μελέτησαν τη σταθερή ροή που παράγεται από το παλλόμενο πλέγμα. Από τα πειράματα προέκυψε ότι όταν ένα πλέγμα ταλαντώνεται με εύρος ταλάντωσης το οποίο είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάμετρο της ράβδου, σε μία δεξαμενή όπου η μέση χωρική ταχύτητα είναι μηδέν, τότε παράγονται ομοιόμορφες δέσμες ροής (jet flow) των οποίων τα κέντρα περνούν από τα σημεία όπου διασταυρώνονται οι ράβδοι. Οι δέσμες αυτές αποτελούν τη σταθερή ροή και η μορφή τους εξαρτάται από τη γεωμετρία του πλέγματος. Μακριά από το πλέγμα η ομοιομορφία αυτή χάνεται για δύο λόγους. Κάθε δέσμη καταρρέει και γίνεται τυρβώδης ενώ υπάρχει και αλληλεπίδραση των δεσμών μεταξύ τους. Η ροή που παράγεται από το παλλόμενο πλέγμα χαρακτηρίζεται από 3 διαδοχικά στάδια.

- Αρχικά δημιουργούνται ημιστατικές δέσμες ροής (jet flow) πίσω από κάθε ράβδο του πλέγματος. Η μορφή και η ένταση της ροής σε αυτή την περιοχή εξαρτάται από τη διατομή των ράβδων και το εύρος ταλάντωσης, ενώ μπορεί να υπάρχει και εξάρτηση στο ιξώδες.

- Στο δεύτερο στάδιο, οι δέσμες αλληλεπιδρούν και 'καταρρέουν' παράγοντας τύρβη.

• Στο τελευταίο στάδιο, η τύρβη καταρρέει όσο αυξάνεται η απόσταση από το πλέγμα. Οι τυρβώδεις ταχύτητες μετρήθηκαν σε ροή με μέση ταχύτητα μηδέν, χρησιμοποιώντας ένα 'hot film' και βρέθηκε ότι η εξάρτηση από τη συχνότητα f , το εύρος ταλάντωσης s και την απόσταση από το πλέγμα z είναι η εξής:

$$u' = 1.4 f S^{2.5} z^{-1.5} \quad (2.22)$$

όπου u' είναι τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου της τυρβώδους ταχύτητας (root mean square velocity rms) $u' = \langle u(t)^2 \rangle^{1/2}$.

Η ολοκληρωτική (integral) κλίμακα μήκους αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση από το πλέγμα:

$$L \sim z \quad (2.23)$$

Όπου L : είναι η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους. Συνέχεια στη δουλειά των Thompson και Turner (1975), αποτελεί η πειραματική εργασία των Hopfinger και Toly (1976) οι οποίοι μελέτησαν την τύρβη που παράγεται από ένα παλλόμενο πλέγμα, επιβεβαίωσαν τη γραμμική εξάρτηση της κλίμακας μήκους από την απόσταση και κατέληξαν στη παρακάτω έκφραση για τη χωρική μεταβολή της ταχύτητας:

$$\frac{u}{fS} = C S^{1/2} M^{1/2} z^{-1} \quad (2.24)$$

$$C = 2.5 \times 10^{-1}$$

u = οριζόντια τυρβώδης (rms) ταχύτητα

f = συχνότητα ταλάντωσης πλέγματος

S =εύρος ταλάντωσης πλέγματος

z = απόσταση από πλέγμα

M = mesh size

Όπως φαίνεται, οι Hopfinger και Toly κατέληξαν σε παρόμοια έκφραση με τους Thompson και Turner (1975) για τη μεταβολή της ταχύτητας με την απόσταση από το πλέγμα. Ωστόσο, για τους Thompson και Turner η ταχύτητα $u \sim z^{-1.5}$ ενώ για τους

Hopfinger και Toly $u \sim z^{-1}$. Η διαφορά στον εκθέτη του z οφείλεται στο γεγονός ότι η εξαγωγή αυτού του νόμου εξαρτάται από τη επιλογή της virtual origin, επομένως οποιαδήποτε αλλαγή στη virtual origin αλλάζει και τον εκθετικό νόμο.

Η χωρική μεταβολή της ταχύτητας επιβεβαιώθηκε και από τους Atkinson et al. (1987) οι οποίοι μελέτησαν την τύρβη που παράγεται από ένα παλλόμενο πλέγμα σε δεξαμενή. Για τη μέτρηση της τυρβώδους ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ένα Laser Doppler Anemometer (LDA). Διαπιστώθηκε ότι, οι μετρήσεις ταχύτητας με LDA συγκλίνουν αρκετά με τις μετρήσεις των Thompson και Turner(1975) και Hopfinger και Toly (1976) οι οποίες έγιναν με hot film. Βρέθηκε ότι η οριζόντια ταχύτητα μεταβάλλεται με την απόσταση z από το πλέγμα εκθετικά:

$$u \sim z^{-1.3} \quad (2.25)$$

Ο εκθέτης στον παραπάνω τύπο είναι κοντά με την αντίστοιχη τιμή του στους προτεινόμενους εκθετικούς νόμους των Thompson και Turner(1975) και των Hopfinger και Toly (1976):

$$u = 1.4 f S^{2.5} z^{-1.5} \text{ Thompson και Turner (1975)}$$

$$u/fS = C S^{1/2} M^{1/2} z^{-1} \text{ Hopfinger και Toly (1976)}$$

Επίσης από τους υπολογισμούς τους κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για απόσταση από το πλέγμα z μικρότερη από $2M$, η ροή δεν ήταν τυρβώδης. Η απόσταση των $2M$ προτάθηκε επίσης από τους Hopfinger και Toly (1976) ως η ελάχιστη απόσταση από το πλέγμα στην οποία εμφανίζεται τυρβώδης ροή.

Τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαίωσαν οι Cheng και Law (2001) οι οποίοι μελέτησαν την τύρβη που παράγεται από ένα παλλόμενο πλέγμα. Για τη μέτρηση της κάθετης και οριζόντιας συνιστώσας της τυρβώδους ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της digital particle image velocimetry (DPIV). Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δίνει πληροφορίες για το ροϊκό πεδίο σε ένα επίπεδο εν αντιθέσει με τις σημειακές τεχνικές μέτρησης ταχύτητας όπως το laser Doppler anemometry (LDA).

Από τις παραπάνω μετρήσεις επίσης διαπιστώθηκε ότι ο μηχανισμός δημιουργίας τύρβης είναι παρόμοιος με αυτό που παρατηρήθηκε από Thompson και Turner(1975) και Hopfinger και Toly (1976). Υπάρχουν δύο είδη ροής που παράγονται από την ταλάντωση του πλέγματος: οι δέσμες (jets) και τα απορρεύματα (wakes). Τα jets δημιουργούνται στα κενά του πλέγματος ενώ τα wakes δημιουργούνται εκατέρωθεν των ράβδων. Η μορφή της ροής δηλ. αν θα επικρατούν jets ή wakes, εξαρτάται από τη γεωμετρία του πλέγματος. Για πλέγμα με μεγάλη solidity (grid solidity είναι ο λόγος του εμβαδού που καταλαμβάνουν οι ράβδοι προς το συνολικό εμβαδό του πλέγματος) τα jets δημιουργούν τύρβη μακριά από το πλέγμα. Αντιθέτως για πλέγμα με μικρή στιβαρότητα (solidity), όπως στη συγκεκριμένη μελέτη, η τύρβη δημιουργείται κυρίως από την αλληλεπίδραση των wakes. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι ομοιογενής τύρβη επιτυγχάνεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 3 mesh sizes M από τη θέση ισορροπίας του πλέγματος.

Ένας άλλος στόχος των Cheng και Law ήταν να μελετηθεί η χωρική μεταβολή της τυρβώδους ταχύτητας και να συγκριθεί με τον εκθετικό νόμο των Hopfinger και Toly (1976):

$$u/fS = C S^{1/2} M^{1/2} z^{-1}$$

Τελικά, από υπολογισμούς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τυρβώδης κινητική ενέργεια μεταβάλλεται εκθετικά με την απόσταση:

$$k^2 \sim z^{-2} \tag{2.26}$$

Άρα και η τυρβώδης ταχύτητα μειώνεται με την απόσταση από το πλέγμα σύμφωνα με τον εκθετικό νόμο των Hopfinger και Toly.

Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Orins και Gulliver(2003) οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα κάθετα παλλόμενο πλέγμα για τη μελέτη διασποράς ιζήματος (sediment suspension) σε τυρβώδη ροή. Οι μετρήσεις των μέσων και rms ταχυτήτων έγιναν με ένα Laser Doppler Velocimeter και διαπιστώθηκε ότι η μέση ταχύτητα είναι περίπου μηδέν, ενώ οι μετρήσεις των rms ταχυτήτων προσεγγίζουν τα ευρήματα των

Hopfinger και Toly (1976) σε αποστάσεις μακριά από το πλέγμα όπως προβλέπεται από προηγούμενες μελέτες.

Η ισότροπη τύρβη που παράγουν τα παλλόμενα πλέγματα έχει γίνει αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές. Οι De Silva και Fernando(1994) μελέτησαν την ικανότητα ενός παλλόμενου για παραγωγή ισότροπης τύρβης. Για τις μετρήσεις της τυρβώδους ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ένα Laser Doppler anemometer (LDV). Έγιναν δύο πειράματα, ένα για stationary turbulence και ένα για decaying turbulence. Οι μετρήσεις στη stationary turbulence έδειξαν ότι, σε απόσταση 4-5 εύρη ταλάντωσης (strokes) μακριά από το πλέγμα ο λόγος της κάθετης προς την οριζόντια συνιστώσα της τυρβώδους ταχύτητας είναι $w_0/u_0 = 1.18$, δηλαδή παράγεται περίπου ισότροπη τύρβη, ενώ η χωρική μεταβολή της ταχύτητας ακολουθεί τον εκθετικό νόμο (2.22).

Η παραγωγή decaying turbulence έγινε σταματώντας την ταλάντωση του πλέγματος από αρχικά στάσιμη (stationary) τύρβη τη χρονική στιγμή $t=0$, με αποτέλεσμα η τύρβη να εξασθενεί (decay turbulence). Από μετρήσεις της χρονικής εξασθένησης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας βρέθηκε ότι η κινητική ενέργεια δεν μειώνεται από την στιγμή που σταματά η ταλάντωση του πλέγματος, αλλά αρχικά υπάρχει μία περιοχή όπου παραμένει σταθερή. Στη συνέχεια, υπάρχει μία περίοδος εξασθένησης όπου η rms ταχύτητα φθίνει με το χρόνο $u^2 \sim t^{-1}$, και μία τελική περίοδος όπου ο νόμος εξασθένησης είναι $u^2 \sim t^{-\frac{5}{2}}$. η ύπαρξη της αρχικής περιόδου όπου η τυρβώδης κινητική ενέργεια παραμένει σταθερή, οφείλεται στο χρόνο που χρειάζονται οι δίνες για να προσαρμοστούν στην έλλειψη πηγής ενέργειας (παλλόμενο πλέγμα). Δηλαδή, αν και η παροχή εξωτερικής μηχανικής ενέργειας στο ροϊκό πεδίο σταματά, ωστόσο η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας συνεχίζεται από non linear vortex stretching processes μέχρι οι δίνες στη μικροκλίμακα του ιξώδους να 'καταλάβουν' την αλλαγή στην παροχή ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε, ένα παλλόμενο πλέγμα παράγει σε ικανοποιητικό βαθμό ομογενή και ισότροπη τύρβη, ωστόσο όσο αυξάνεται η απόσταση από το πλέγμα η τυρβώδης εντάσεις (turbulent intensity) μειώνονται. Για να αποφευχθεί η μείωση της τυρβώδους εντάσεως οι Shy et al. (1996) και οι Villiermaux et al. (1995) σε ανεξάρτητες μελέτες, εισήγαγαν τα διπλά παλλόμενα πλέγματα για τη δημιουργία ισότροπης τύρβης.

Συγκεκριμένα, οι Shy et al. (1996) παρήγαγαν ισότροπη τύρβη από δύο παλλόμενα πλέγματα με σκοπό την πειραματική προσομοίωση της τυρβώδους καύσης (premixed turbulent combustion) χρησιμοποιώντας υδατικές αυτοκαταλυτικές αντιδράσεις

(aquatic autocatalytic reactions). Στη μελέτη τους, δύο οριζόντια πλέγματα ταλαντώνονται κάθετα εκτός φάσης και στην περιοχή ανάμεσα τους δημιουργείται ισότροπη τύρβη όπου η μέση ταχύτητα είναι μηδέν και οι τυρβώδεις εντάσεις είναι περίπου 11% της ταχύτητας ταλάντωσης των πλεγμάτων όπως μετρήθηκαν από Laser Doppler Velocimetry.

Σε άλλη ανεξάρτητη μελέτη, οι Villermaux et al. (1995) εισήγαγαν τη χρήση 2 πλεγμάτων που ταλαντώνονται σε φάση για να μελετήσουν διάφορες δομές στροβίλων (intense vertical structures) σε ισότροπη τύρβη. Διαπίστωσαν ότι η τύρβη που δημιουργείται στο χώρο ανάμεσα στα πλέγματα είναι περισσότερο ομογενής και χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με τη αντίστοιχη που παράγεται από ένα πλέγμα. Θεωρώντας ότι οι νόμοι (2.22) και (2.23) αλλάζουν σε αυτή την περίπτωση, πρότειναν ότι η ενέργεια ανά χρόνο που παράγεται στο σύστημα

$\varepsilon = \frac{u'^2}{L/u'} = \frac{u'^3}{L}$ από κάθε πλέγμα είναι αθροιστική. Επομένως, σε ένα συγκεκριμένο σημείο μέσα στη ροή, η μείωση της ενέργειας (dissipation) ανά μονάδα μάζας ε_{eff} είναι:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{u'_1{}^3}{L_1} + \frac{u'_1{}^3}{L_2} \quad (2.27)$$

όπου $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ είναι η συνεισφορά από κάθε πλέγμα.

Στην κεντρική περιοχή ανάμεσα στα πλέγματα, οι δύο χρονικές κλίμακες L_1, L_2 λόγω συμμετρίας είναι ίσες καθώς τα δύο πλέγματα είναι ίδια. Επίσης, καθώς η χρονική κλίμακα εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του πλεγματος, ισχύει ο τύπος (2.23) και επίσης ισχύει $L_1 = L_2 = L$. Τέλος, θεωρώντας ότι $\varepsilon_{eff} = \frac{u'_{eff}{}^3}{L}$ όπου u'_{eff} είναι η τυρβώδης ταχύτητα με τα δύο πλέγματα, προκύπτει τελικά:

$$u'_{eff} = 2^{1/3} u' \quad (2.28)$$

όπου u' είναι ο τύπος (2.22) για ένα πλέγμα.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα από τη χρήση δύο παλλόμενων πλεγμάτων είναι ότι παράγεται ομογενής και ισότροπη τύρβη και δεν υπάρχει εξασθένηση όπως στην περίπτωση του ενός πλέγματος.

Η παραπάνω θεωρητική εκτίμηση των Villiermaux et al. (1995) ότι η ενέργεια που παράγεται από κάθε πλέγμα είναι αθροιστική επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους Shy et al. (1997) οι οποίοι μελέτησαν την τύρβη που παράγεται από δύο παλλόμενα πλέγματα. Μετρήσεις μέσης και rms ταχύτητας για τις τρεις συνιστώσες u,v,w έγιναν με ένα Laser Doppler Anemometer στο χώρο ανάμεσα στα πλέγματα.

Η εξασθένηση της ταχύτητας (ένταση της τύρβης) με την απόσταση από τα πλέγματα φαίνεται στο σχήμα 2.7 από το οποίο προκύπτει ότι η ένταση q μεταβάλλεται ως εξής σε σχέση με την απόσταση:

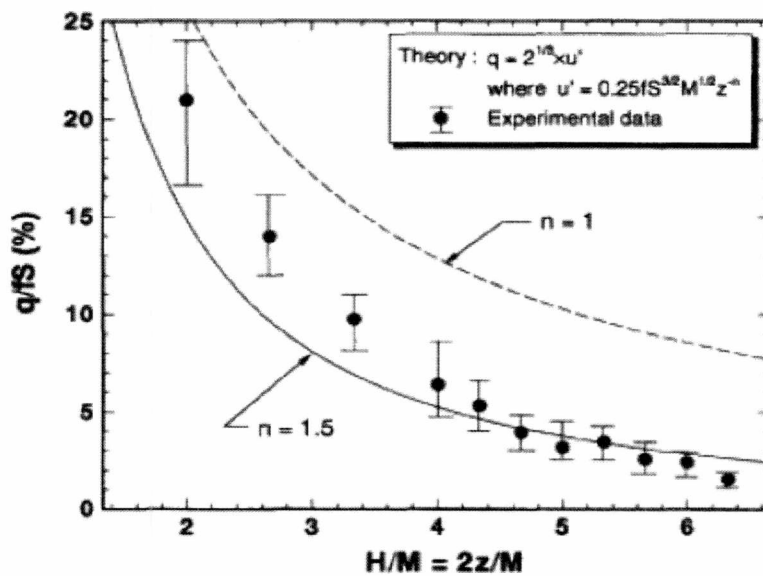
$$q = 0.89 f S^{1.5} M^{0.5} H^{-1.5} \quad (2.29)$$

όπου q είναι η ένταση της τύρβης $q = \sqrt{\frac{u^2 + v^2 + w^2}{3}}$ και H είναι η κάθετη απόσταση από το πλέγμα.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι πειραματικές μετρήσεις των Shy et al. (1997) προσεγγίζουν τη θεωρητική πρόβλεψη των Villiermaux et al. (1995):

$$q = 2^{1/3} u'$$

Από τις μετρήσεις των ταχυτήτων υπολογίστηκε το eulerian frequency spectra, όπου ήταν εμφανής η κλίση -5/3 όπως προβλέπεται από τη θεωρία.



Εικόνα 2.3- Μεταβολή της έντασης της τύρβης σε σχέση με την απόσταση από το πλέγμα Shy et al. (1997)

Στην εργασία των De Silva, και Fernando (1994) που αναφέρθηκε προηγουμένως βασίζεται η μελέτη των Fernando et al. (1996) οι οποίοι προχώρησαν στην παραγωγή ισότροπη τύρβης από δύο παλλόμενα εκτός φάσης πλέγματα. Μελέτησαν τις ιδιότητες της τύρβης που παράγεται από δύο πλέγματα τετραγωνικής διατομής που ταλαντώνονται οριζόντια και εκτός φάσης ενώ χρησιμοποίησαν ένα fiber optic Laser Doppler Velocimeter για τη μέτρηση των ταχυτήτων.

Το κάθε πλέγμα ξεχωριστά παράγει ένα πεδίο ταχυτήτων το οποίο χωρικά εξασθενεί, ωστόσο τα δύο αυτά πεδία μαζί δημιουργούν ένα σχεδόν ομογενές πεδίο στο χώρο ανάμεσα στα πλέγματα. Από τις μετρήσεις των r.m.s. ταχυτήτων $(\overline{u_1^2})^{1/2}$, $(\overline{u_3^2})^{1/2}$ (όπου οι ταχύτητες u_1 , u_3 αναφέρονται στην οριζόντια x και κάθετη z διεύθυνση αντίστοιχα) φαίνεται ότι $(\overline{u_1^2})^{1/2} / (\overline{u_3^2})^{1/2} \approx 1$. Οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι στο χώρο ανάμεσα στα πλέγματα μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγεται ισότροπη τύρβη.

Διπλά παλλόμενα πλέγματα χρησιμοποίησαν οι Buchholz et al. (2004) για τη μελέτη θερμικής διάχυσης (thermal diffusion) σε τυρβώδη ροή. Το τυρβώδες ροϊκό πεδίο μετρήθηκε με ένα Particle Image Velocimetry (PIV). Τα πειραματικά αποτελέσματα

έδειξαν ότι υπήρχε μια ασθενής μέση ροή στο χώρο ανάμεσα στα πλέγματα, ωστόσο η rms ταχύτητα ήταν 5 φορές μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα στο κέντρο της περιοχής ανάμεσα στα πλέγματα. Η rms ταχύτητα ήταν αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση από το πλέγμα, ανάλογη με τη συχνότητα ταλάντωσης των πλεγμάτων, ενώ η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους ήταν ανάλογη με την απόσταση από το πλέγμα επαληθεύοντας τα ευρήματα των Hopfinger και Toly (1976).

Την ισότροπη φύση της τύρβης που παράγεται από διπλά παλλόμενα πλέγματα επιβεβαίωσαν και οι Schulz και Janzen (2006) χρησιμοποιώντας την τεχνική DPIV (Digital Particle Image Velocimetry).

2.8 Τήξη του πάγου

Το λιώσιμο στερεών αντικειμένων συναντάται σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία καθώς επίσης και στο περιβάλλον. Χαρακτηριστικά παραδείγματα, το λιώσιμο του πάγου στους εναλλάκτες θερμότητας, η διάλυση στερεών ουσιών σε υγρά, το λιώσιμο κρυστάλλων πυριτίου σε εφαρμογές μικροηλεκτρονικής, στην τεχνολογία χύτευσης μετάλλων, στην απόψυξη των κατεψυγμένων τροφίμων, αλλά και στην τήξη των παγόβουνων στην επιστήμη που έχει ως αντικείμενο μελέτης τους παγετώνες, στην ανάπτυξη κρυστάλλων κ.λπ.

Λόγω της επίδρασης της αλλαγής στη φάση, τα χαρακτηριστικά μεταφοράς ορμής, θερμότητας και μάζας μεταξύ των φάσεων είναι αισθητά διαφορετικά από εκείνα μεταξύ δύο φάσεων, χωρίς να υπάρχει αλλαγή φάσης, ειδικά εάν η μεταφορά ενισχύεται από εξαναγκασμένη συναγωγή και από την παρουσία τύρβης.

Σύμφωνα με την εργασία των Hu H., Argyropoulos (1996), ένα κινούμενο όριο αναπτύσσεται μεταξύ των φάσεων, το οποίο πρέπει να προσδιορίζεται στο χώρο και το χρόνο. Η θερμική ενέργεια απελευθερώνεται σε αυτό το όριο, με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Δεδομένου ότι η ανάμιξη του τήγματος με τη ροή του ρευστού τροφοδοσίας δεν είναι σε θερμική ισορροπία και η λανθάνουσα θερμότητα δεν απομακρύνεται μόνο με αγωγή, οι μαθηματικές συνθήκες στο όριο είναι μη γραμμικές, καθιστώντας τη λύση των λεγόμενων «προβλημάτων κινούμενου ορίου κατά Stefan» πολύ δύσκολη, ακόμη και σε μία διάσταση.

Η απλούστερη περίπτωση είναι να υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία στο στερεό είναι ομοιόμορφη και ίση με τη θερμοκρασία τήξης. Ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση, για παράδειγμα, εάν ο πάγος λιώνει σε μια δεξαμενή στάσιμων υδάτων, προκύπτει μια

περαιτέρω περιπλοκή λόγω της ανώμαλης θερμικής διαστολής του νερού περίπου στους 4 °C, η οποία προκαλεί ένα φαινόμενο που ονομάζεται συναγωγή καθ' αντιστροφή (convective inversion).

Εάν κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης υπάρχουν υγρά που αποτελούνται από περισσότερα του ενός χημικά είδη (για παράδειγμα τήξη του πάγου σε αλατούχο νερό), τότε η φυσική συναγωγή θα οφείλεται στην ταυτόχρονη δράση των θερμικών και διαλυτικών κινητήριων δυνάμεων. Πολλά δυαδικά υγρά μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές μοριακές διαχυτότητες για τη θερμότητα και τη μάζα, τέτοιου είδους συναγωγή αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως «διπλά διαχυτική συναγωγή» (double diffusive convection) Beckermann C., Viskanta R. (1988).

Το λιώσιμο αντικειμένων σφαιρικού σχήματος έχει λάβει πολλή προσοχή, λόγω της ευκολίας που παρέχει τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο. Η μελέτη της ελεύθερης θερμικής συναγωγής από την τήξη σφαίρας πάγου σε μια δεξαμενή νερού, σύμφωνα με Schenk J., Schenkels F. (1968) έδειξε ότι για θερμοκρασίες νερού πάνω από περίπου 5,3 °C ο συνολικός αριθμός Nusselt και ο ρυθμός τήξης αυξάνεται με τη θερμοκρασία του νερού.

Στην κορυφή της σφαίρας σχηματίζεται ένα οριακό στρώμα το οποίο ρέει προς τα κάτω, και διαχωρίζεται λίγο μπροστά από το χαμηλότερο σημείο σταθερότητας. Στη συνέχεια, τα διατμητικά στρώματα σχηματίζουν ένα νέφος, το λεγόμενο πλούμιο, που παρουσιάζει καθοδική κίνηση.

Σε πειράματα των McLeod D.S., Riley D.S. et al. όπου μια κέρινη σφαίρα τήκεται σε ζεστό νερό, οι ρυθμοί τήξης αυξήθηκαν σχεδόν γραμμικά σε σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής $\Delta\theta = (\theta_{ice} - \theta_{amb})$, ενώ η καθοδική κίνηση του πλουμίου έγινε τυρβώδη και το κάτω μέρος της σφαίρας παρουσίασε διάβρωση.

Για θερμοκρασίες νερού κάτω από 4 °C παρατηρήθηκε το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή οι συνολικοί Nu και οι ρυθμοί τήξης του πάγου μειώθηκαν καθώς η θερμοκρασία του νερού αυξήθηκε από 0 °C έως 4 °C, ενώ ο σχηματισμός του οριακού στρώματος ξεκίνησε στο κατώτερο μέρος της σφαίρας και ο διαχωρισμός εμφανίστηκε κοντά στην κορυφή. Για θερμοκρασίες νερού μεταξύ 4 και 5,3 °C η κατεύθυνση της ροής δεν είναι μοναδική και δεν υπάρχει οριακό στρώμα.

Τα πειράματα των Vanier C.R., Tien C. (1970) έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των Schenk J., Schenkels F. Ο βαθμός τήξεως ήταν ανάλογος με τη μέση τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ νερού και πάγου και αντιστρόφως ανάλογη προς τη διάμετρο σφαίρας D0. Κατά τη διάρκεια των

πειραμάτων το σφαιρικό σχήμα μεταβλήθηκε σε επίμηκες σφαιροειδές με κύριο άξονα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η διαβρωμένη περιοχή στη βάση των δοκιμίων σχηματίζει μια γωνία περίπου 38° από το κέντρο. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην ισχυρή κυκλοφορία των απορευμάτων του οριακού στρώματος.

Κατά τη μελέτη του Hao και Tao,[10], αναλύεται η ροή νερού γύρω από μια σφαίρα αποτελούμενη από πάγο εκτίθεται σε εξαναγκασμένη και μικτή συναγωγή η οποία έχει ποσοτικοποιηθεί με τη χρήση συστημάτων PIV. Ο χαρακτηρισμός ολόκληρου του πεδίου ροής γύρω από την παγωμένη σφαίρα επιτυγχάνεται με υπολογιστική ρευστομηχανική και οπτικοποίηση της τήξης με τη χρήση σφαιρών πάγου εμποτισμένων με μπογιά. Η κίνηση του λιωμένου πάγου και η μίξη του με την κυρίως ροή αναλύονται ποιοτικά με αυτό τον τρόπο.

Το μοτίβο της ροής γύρω από μια σφαίρα πάγου που τήκεται στα αρχικά στάδια είναι χαρακτηριστικά περιστροφική και ποιοτικά όμοια με τη ροή γύρω από μία σφαίρα ίδιου μεγέθους που δεν τήκεται, όπου έχουμε ισόθερμο στερεό και τον σχηματισμό και διαχωρισμό οριακού στρώματος. Η κύρια διαφορά είναι η αλληλεπίδραση του λιωμένου πάγου με την κύρια ροή. Το μίγμα αυτό του λιωμένου πάγου που προστίθεται στη ροή επάγει και μια διάχυση θερμότητας η οποία μεταβάλλει το οριακό στρώμα και γειτονικά το ροϊκό πεδίο ποσοτικά, κυρίως στα μεταγενέστερα στάδια της τήξης.

Η στροβιλότητα στο απόρρευμα επιφέρει μια μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του πάγου και του νερού στο πίσω μέρος της σφαίρας. Για αυτό το λόγο ο τοπικός συντελεστής τήξης αυξάνεται κάνοντας έτσι την επιφάνεια, που έρχεται σε επαφή με τα απορρεύματα, πιο επίπεδη. Στη συνέχεια το μοτίβο της ροής γύρω από το παγωμένο σώμα έχει επίσης αλλάξει σαν αποτέλεσμα της αλλαγής της γεωμετρίας της εξωτερικής επιφάνειας λόγω της ροής. Ο διαχωρισμός του οριακού στρώματος συμβαίνει εκεί όπου η γωνία μεταξύ του υπό τήξη σώματος ευθυγραμμίζεται με την εγκάρσια στην κυρίως ροή κατεύθυνση.

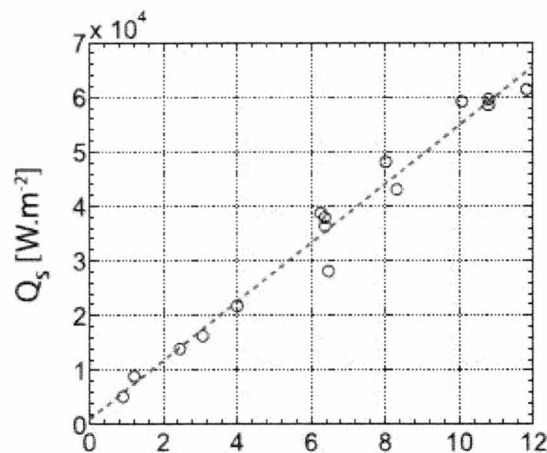
Όταν η ταχύτητα της κύριας ροής αυξάνεται η επιρροή από την ύπαρξη μια παγωμένης σφαίρας αυξάνεται κυρίως όταν η ροή γίνεται ισχυρότερη. Συνεπώς το σημείο της αποκόλλησης οριακού στρώματος μετακινείται ψηλότερα. Οι στροβιλισμοί στο πίσω μέρος της σφαίρας γίνονται πιο έντονοι και η περιοχή που καταλαμβάνουν μεγαλύτερη. Η επίδραση της συναγωγής στη ροή γύρω από την σφαίρα πάγου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παράμετρος (Gr/Re^2) . Για το μεγαλύτερο εύρος πειραμάτων η φυσική συναγωγή δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όταν $(Gr/Re^2) > 0,682$. Όσο μεγαλύτερη είναι η φυσική συναγωγή τόσο μεγαλύτερη είναι η πίσω επιφάνεια της σφαίρας που

καλύπτεται από το λιωμένο νερό της τήξης και τόσο πιο χαμηλά το απόρρευμα μετακινείται. Η φυσική συναγωγή επίσης , μειώνει την ισχύ της στροβιλότητας της ροής στο απόρρευμα .

Οι Machicoane και Bonaventure και Volk,[11], στη διατριβή τους το 2013 μελέτησαν τον φαινόμενο της τήξης σφαιρικών δοκιμίων πάγων σε στροβιλώδη τυρβώδη ροή. Το κατέστησαν δυνατό χρησιμοποιώντας πειραματική διάταξη παραγωγής ροής Von-Karman αποτελούμενης από δύο περιστρεφόμενους δίσκους ,με οκτώ ίσιες λεπίδες, οι οποίοι περιστρέφονταν με σταθερή συχνότητα Ω . Οι δίσκοι ήταν τοποθετημένοι στα άκρα της πειραματικής διάταξης και στο κέντρο αυτής η τύρβη είναι ομογενής και ισότροπη με έντονη μέση ταχύτητα u_z . Οι δύο εντάσεις τύρβης που μελετήθηκαν ήταν $u'/U \approx 10\%$ και $u'/U \approx 20\%$ όπου u' είναι το μέτρο της διακυμάνσεως της ταχύτητας στις τρεις διευθύνσεις και U η ταχύτητα περιστροφής των δίσκων. Από σειρά φωτογραφιών των πειραμάτων μέσω επεξεργασίας εικόνας μπόρεσε να προσδιοριστεί η μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας Q_s στην επιφάνεια της σφαίρας. Από την παρακάτω εξίσωση του Stefan ο όρος της αγωγής παραλείφτηκε καθώς ο μέσος όρος της κλίσης της θερμοκρασίας είναι μηδέν ($\frac{\partial T}{\partial n} = 0$) λόγω θερμοποίησης στη σφαίρα.

$$\rho_p L_f \frac{dV}{dt} = \lambda_{th} S \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) - h(T_{water} - T_0)S \quad (2.30)$$

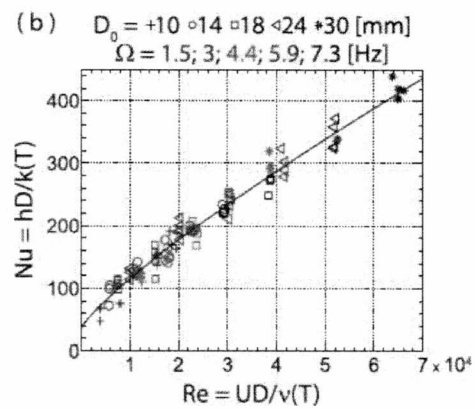
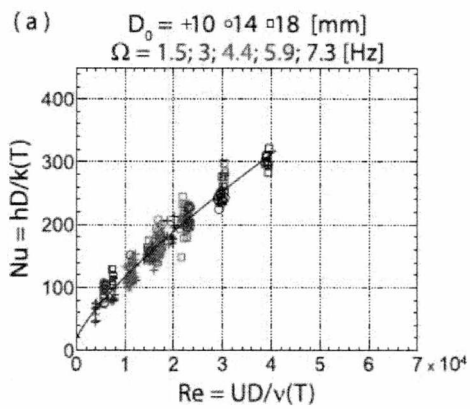
Η μελέτη κατέληξε ότι η ποσότητα $Q_s = \rho_p L_f \frac{dR}{dt}$ είναι περίπου ίση με την ποσότητα $Q_s = h(T_w - T_s)$ όπου T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας της σφαίρας, T_w , η θερμοκρασία του νερού, L_f η ενθαλπία τήξης και $\frac{dR}{dt}$ η μέση ταχύτητα λιώσιματος. Προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 2.1 Συνολική ροή θερμότητας Q_s για διάφορες θερμοκρασίες ροής νερού

Το Διάγραμμα 1 δείχνει τη μέτρηση της συνολικής ροής θερμότητας για διάφορες θερμοκρασίες ροής και σταθερή συχνότητα περιστροφής. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή είναι η γραμμική προσαρμογή της $Q_s = h(T_w - T_s)$ όπου $h=5380 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ και $T_s=-0,2 \text{ C}$.

Αρχικά μελετήθηκε η τήξη η τήξη των σφαιρικών παγωμένων δοκιμίων και συγκρίθηκαν οι περιπτώσεις: τήξη με μηδενική μέση ταχύτητα $u'/U \approx 20\%$ και τήξης σε ισχυρή μέση ταχύτητα ροής με $u'/U \approx 10\%$. Η εξέλιξη του αριθμού Nusselt σε συνάρτηση του αριθμού Reynolds περιγράφεται στα διαγράμματα που ακολουθούν για τις δύο περιπτώσεις. Στις δύο αυτές περιπτώσεις ο αριθμός Nu είναι τάξης μεγέθους [100 , 400] για Re τάξης μεγέθους [5×10^3 , 65×10^3]. Παρόλο που οι δύο ροές είναι πολύ διαφορετικές, με διαφορετικές τιμές μέσων και rms ταχυτήτων , βρέθηκε ο αριθμός Nu να είναι ίδιας τάξης μέτρου και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό αντικατοπτρίζει τις αδύναμες επιπτώσεις της τοπικής έντασης τύρβης για μεταφορά μάζας και θερμότητας σε τόσο πλήρως τυρβώδεις ροές. Και για τις δύο περιπτώσεις βρήκαμε τον αριθμό Nu σε συνάρτηση του αριθμού Re να περιγράφεται ικανοποιητικά από μία εμπειρική σχέση που συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία $Nu \approx a + \beta Re^\gamma$. Στη περίπτωση μας προκύπτει ότι $\gamma=0.84$ και 0.78 αντίστοιχα. Ο τοπικός αριθμός Re υπολογισμένος με ταχύτητα rms κυμαίνεται μεταξύ [1400 , 23500] και [1250, 20400] αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2.2- Αριθμός Nu για τήξη με μηδενική μέση ταχύτητα $u'/U \approx 20\%$ (α) και τήξης σε ισχυρή μέση ταχύτητα ροής με $u'/U \approx 10\%$ (β)

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας είναι κυρίως να εξετασθεί η επίδραση της ομογενούς και ισότροπης τύρβης στην τήξη σφαιρικών δοκιμίων πάγου, διαφόρων συστάσεων, καθώς επίσης και η οπτικοποίηση της ροής γύρω από τα δοκίμια για διάφορες εντάσεις της τύρβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη και οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη της πειραματικής διαδικασίας. Γίνεται επίσης αναφορά στις διαστάσεις και τις προδιαγραφές των συσκευών. Η εγκατάσταση της διάταξης, καθώς και η πραγματοποίηση των πειραμάτων, έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών στο ΠΡΟΚΑΤ κτίριο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.

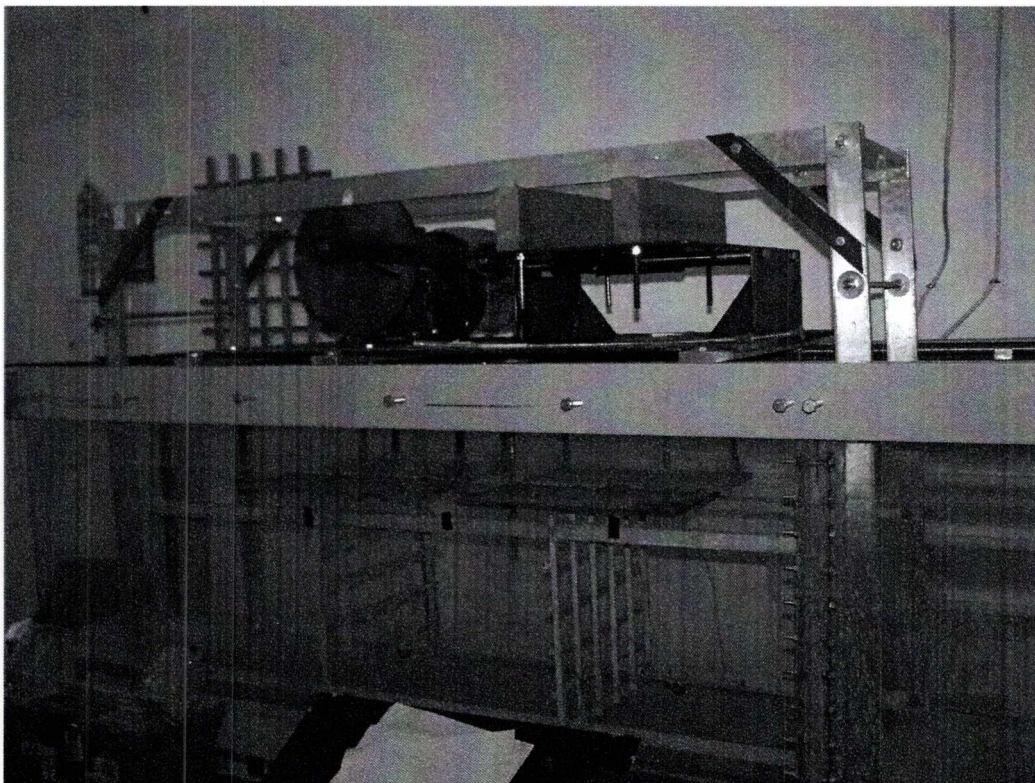
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Τα πειράματα στηρίχθηκαν στη μέθοδο του παλλόμενου πλέγματος όπου για τη δημιουργία ισότροπης και ομοιογενούς τύρβης χρησιμοποιούνται πλέγματα τα οποία ταλαντώνονται κατά την οριζόντια διεύθυνση. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα υδροδεξαμενή του εργαστηρίου η οποία τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα σταθερότητας. Τα δύο πλέγματα τετραγωνικού σχήματος ταλαντώνονται μέσω ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος ρυθμίζεται μέσω ενός inverter στροφών. Η μετάδοσης της κίνησης γίνεται μέσω έγκεντρου και διωστήρα, ένα σύστημα το οποίο παράγει εκτός από ταλάντωση του πλέγματος και αρκετούς κραδασμούς. Στο πλαίσιο αυτό έγιναν εργασίες αναστήλωσης του συστήματος, ώστε τα πλέγματα να ταλαντώνονται όσο το δυνατόν πιο ευθύγραμμα χωρίς αποκλίσεις από την οριζόντια διεύθυνση.

Στην περιοχή πάνω από τα πλέγματα τοποθετήθηκαν μεταλλικές πλάκες οι οποίες αποτρέπουν τον σχηματισμό δινών που θα επηρέαζαν το ροικό πεδίο όπου τα πειράματα έλαβαν χώρα και θα καθιστούν την παραγόμενη τύρβη, ισότροπη. Στις πλάκες αυτές σχηματίστηκε ένα διάκενο κυκλικής διατομής το οποίο λειτουργεί σαν οδηγός για την τοποθέτηση των δοκιμών στη σωστή θέση, δηλαδή στο μέσο του

διαστήματος μεταξύ των δύο πλεγμάτων στο σωστό ύψος και και βάθος, με άλλα λόγια στο κέντρο της παραγόμενης ομοιογενούς και ισότροπης τύρβης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σφαιρικής διατομής, στερεά διαλύματα ζάχαρης, πάγου, πάγου με διαλυμένη ποσότητα άλατος, καθώς επίσης και όλων των παραπάνω με προστιθέμενη ποσότητα ροδαμίνης.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα τμήμα της υδροδεξαμενής με εγκατεστημένα τα πλέγματα. Το σύστημα ταλάντωσης με τον ηλεκτροκινητήρα, το έκκεντρο και τον διωστήρα, τις μεταλλικές πλάκες που συνδράμουν στην ισοτροπία της τυρβώδους ροής και τον οδηγό πάνω στον οποίο τοποθετήθηκαν τα δοκίμια.

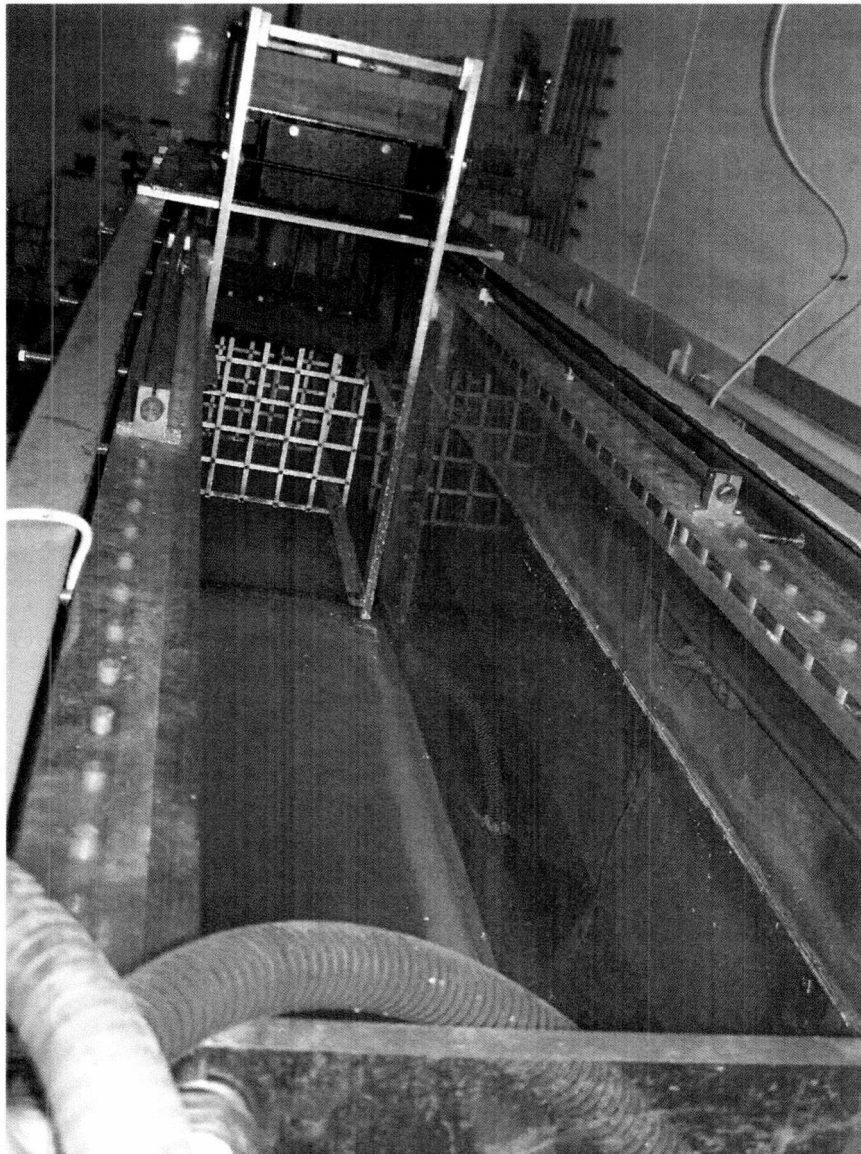


Εικόνα 3.1- Υδροδεξαμενή με παλλόμενα πλέγματα

3.1.1 Δεξαμενή νερού

Η δεξαμενή νερού στην οποία έγιναν όλα τα πειράματα, έχει μήκος 371cm, εύρος 39 cm και 60 cm βάθος. Είναι κατασκευασμένη από Plexiglas και το πάχος των τοιχωμάτων είναι 1.7 cm. Στον πυθμένα της υπάρχουν 2 βάνες από τις οποίες αδειάζει το νερό από τη δεξαμενή. Η δεξαμενή βρίσκεται σε ύψος 82 cm από το πάτωμα του

εργαστηρίου. Σε κάθε σειρά πειραμάτων η δεξαμενή γέμιζε με νερό ποσότητας περίπου 800 λίτρων.



Εικόνα 3.2- Εσωτερικό της υδροδεξαμενής

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε προερχόταν από γεώτρηση για να μην γίνεται άσκοπη σπατάλη πολύτιμων υδάτινων πόρων. Αυτό βέβαια είχε σαν αποτέλεσμα την παρουσία διαφόρων μικροσωματιδίων. Στις σειρές πειραμάτων, με σκοπό την οπτικοποίηση της ροής, με τη χρήση laser και ροδαμίνης, τα μικροσωματίδια παρεμβάλλονταν στις δέσμες φωτός κάνοντας την προσπάθεια δυσχερή λόγω της θολής όψης. Στις σειρές πειραμάτων όπου έγινε χρήση ροδαμίνης το νερό χρειαζόταν αλλαγή έπειτα από έναν

αριθμό πειραμάτων, καθώς η ποσότητα ροδαμίνης που είχε διαχυθεί στο νερό της δεξαμενής παρεμπόδιζε την περαιτέρω οπτικοποίηση του φαινομένου.

3.1.2 Πλέγματα

Στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν 2 παλλόμενα σε φάση πλέγματα. Το κάθε πλέγμα αποτελείται από 12 ράβδους αλουμινίου τετραγωνικής διατομής 1x1 cm και είναι πορώδες κατά 70%, δηλαδή των εμβαδόν των διάκενων προς το συνολικό εμβαδόν του πλέγματος ισούται με 0,7, ενώ το μέγεθος του διάκενου (mesh size) είναι $M=62$ mm. Τα δύο πλέγματα βρίσκονται σε απόσταση $L=475$ mm μεταξύ τους και προσαρμόστηκαν στο σύστημα ταλάντωσης με μία κατασκευή από συμπαγείς ράβδους αλουμινίου πάχους 1.5 cm και πλάτους 5 cm. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταλλικές ντίζες διαμέτρου 6mm ώστε τα πλέγματα να βρίσκονται απολύτως ευθυγραμμισμένα.



Εικόνα 3.3- Εσωτερική όψη των πλεγμάτων

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η ένταση της τύρβης είναι ανάλογη της συχνότητας ταλάντωσης του πλέγματος. Η ένταση της τύρβης δίνεται από τον τύπο

u_{rms} η οριζόντια, rms τυρβώδης ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας ταλάντωσης του πλέγματος f . Συγκεκριμένα οι Hopfinger και Toly (1976) πρότειναν την παρακάτω εμπειρική σχέση

$$u_{rms} = C f S^{1.5} M^{0.5} z^{-1}$$

Όπου

C = πειραματική σταθερά, αδιάστατη

f = συχνότητα πλέγματος, Hz

S = πλάτος ταλάντωσης, m

z = κάθετος άξονας συντεταγμένων, m

Ενώ η ένταση της τύρβης δίνεται από τη σχέση

$$I = \frac{u_{rms}}{U}$$

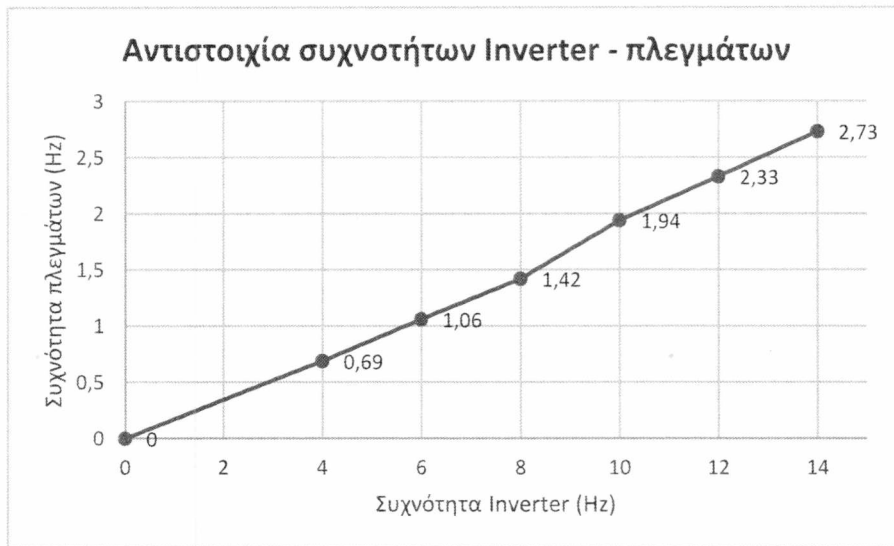
όπου U η μέση ταχύτητα και είναι αδιάστατο μέγεθος.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η συχνότητα είναι άμεσα εξαρτημένη από τη συχνότητα ταλάντωσης του πλέγματος.

3.1.3 Σύστημα ταλάντωσης πλεγμάτων

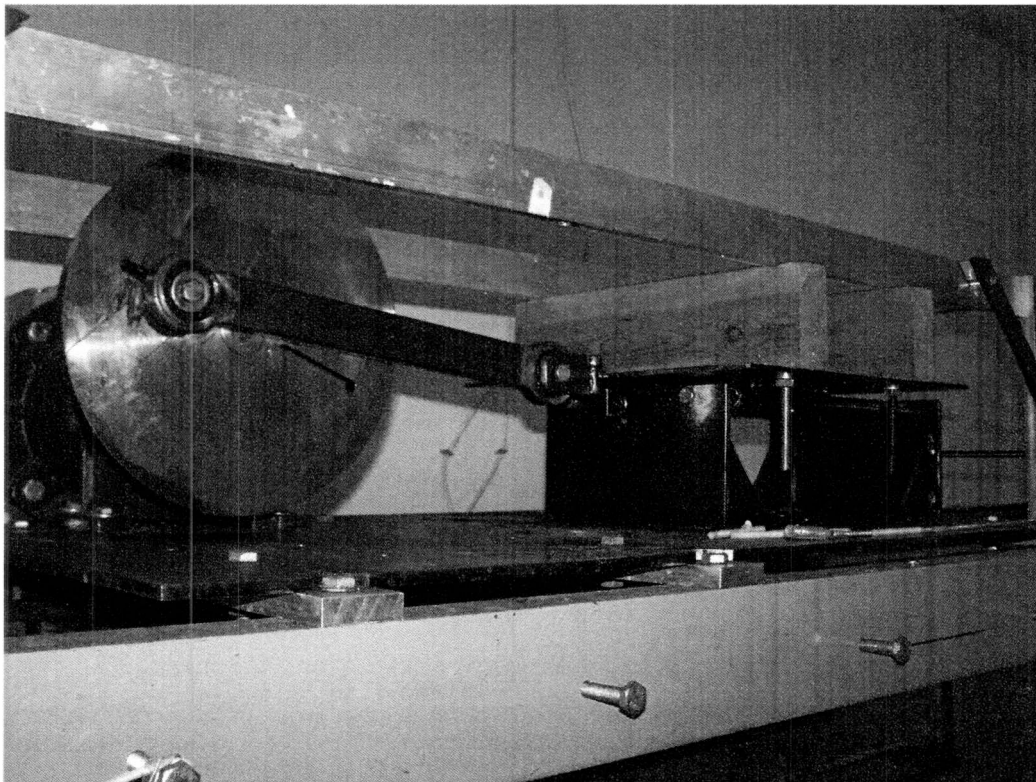
Για την παραγωγή σχεδόν αρμονικής ταλαντωτικής κίνησης, χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα κατασκευή αποτελούμενη από διφασικό ηλεκτροκινητήρα 2.2 kW, από έκκεντρο καθώς κι από τράπεζα 400x400 mm οδηγούμενη από 4 αξονικά ρουλεμάν πάνω σε 2 παράλληλα βάρια. Το έκκεντρο αποτελείται από δίσκο 300 mm με ανοιγμένα αυλάκια για την επιλογή του επιθυμητού εύρους ταλάντωσης, καθώς και ένα διωστήρα που συνδέεται με το τραπέζι ταλάντωσης 400x400 mm. Όλη η κατασκευή προσδένεται σε μεγαλύτερων διαστάσεων τραπέζι 1100x600 mm πάνω στο οποίο δημιουργήθηκε μια οπή κυκλικής διατομής για την εφαρμογή των δοκιμίων. Οι στροφές του κινητήρα ρυθμίζονταν με τη χρήση inverter ανάλογα με τις απαιτήσεις των πειραμάτων. Οι συχνότητες inverter που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 4, 6, 8, 10, 12 και 14 hz αντίστοιχα. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την αντιστοιχία των

συχνότητων inverter με τις αντίστοιχες συχνότητες ταλάντωσης των πλεγμάτων (grid frequency).



Διάγραμμα 3.1- Αντιστοιχία συχνότητων Inverter – πλεγμάτων

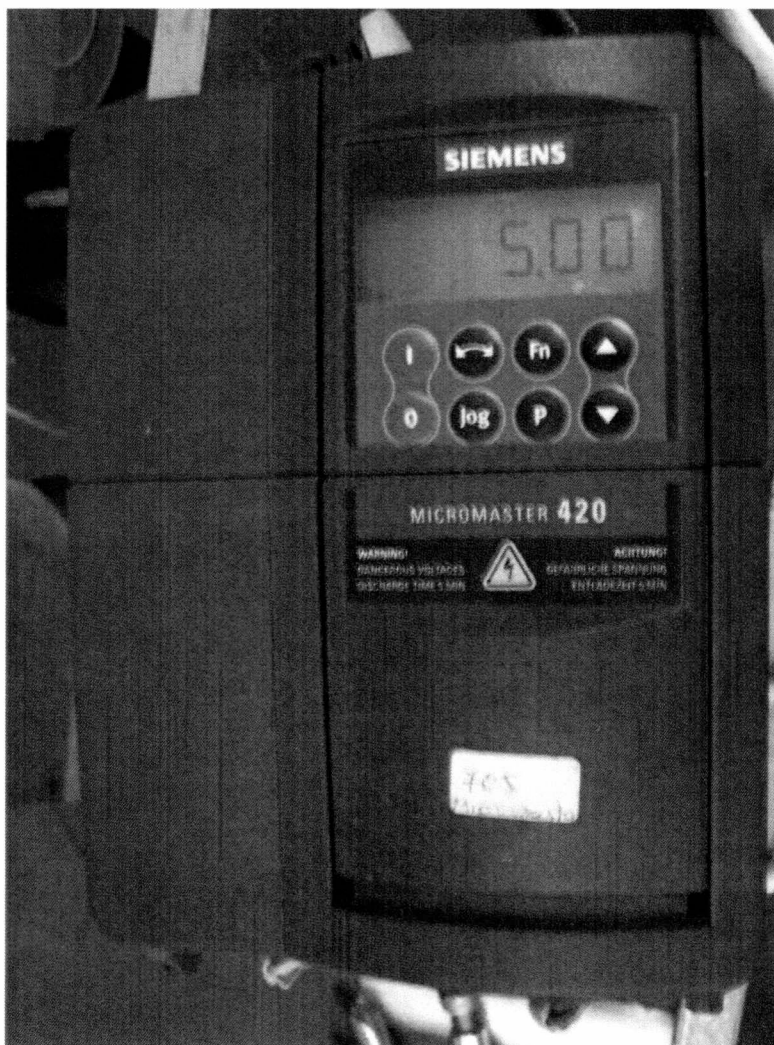
Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι οι συχνότητες ταλάντωσης των πλεγμάτων εξαρτώνται από την ρύθμιση της εκκεντρότητας του συστήματος.



Εικόνα 3.4- Σύστημα ταλάντωσης του πλέγματος

3.1.4 Περιφερειακά όργανα και συσκευές

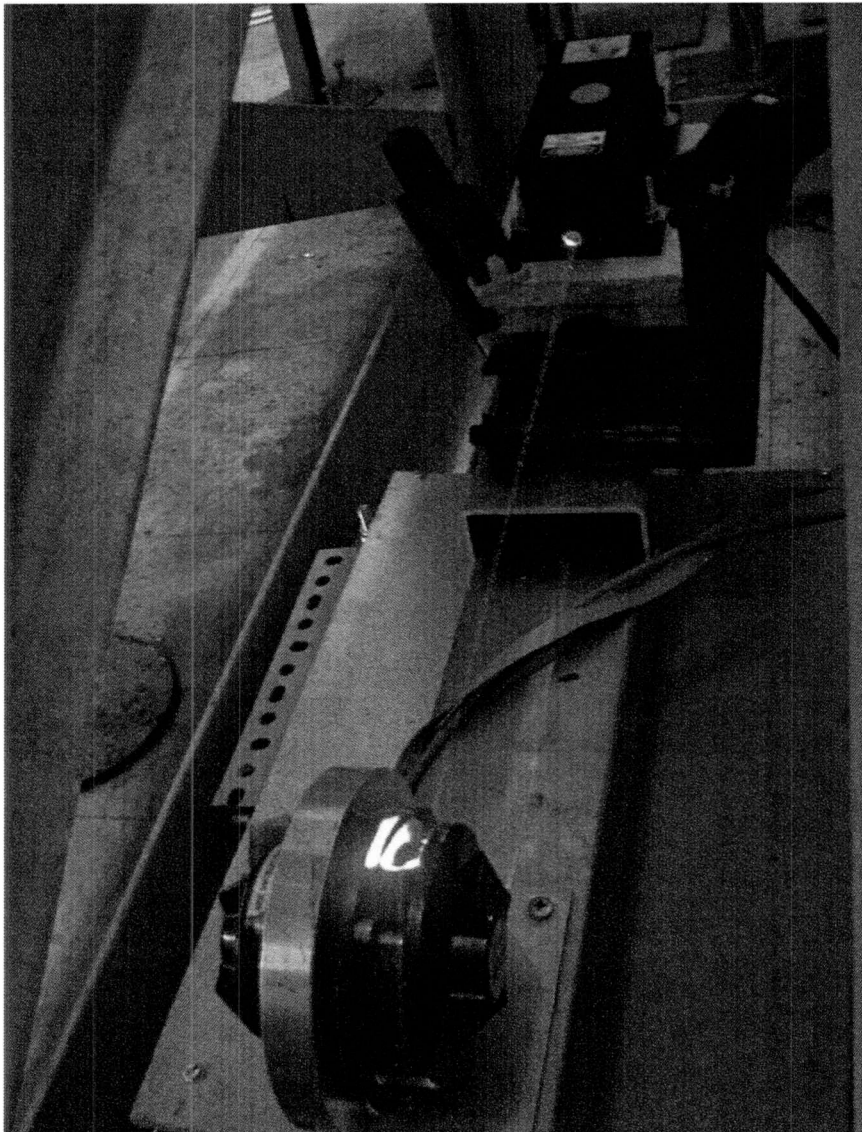
Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν πέραν της πειραματικής διάταξης και άλλα όργανα και συσκευές. Το inverter συχνοτήτων είναι ένα Siemens micromaster 420 μέσω του οποίου ρυθμίζονται οι στροφές του ηλεκτροκινητήρα και κατ' επέκταση η συχνότητα ταλάντωσης του πλέγματος.



Εικόνα 3.5- Inverter συχνοτήτων

Για τα πειράματα όπου επιχειρήθηκε οπτικοποίηση του φαινομένου έγινε χρήση argon-ion laser dpssl ισχύος 1.5 W με εκπομπή μήκους κύματος 532 nm και συχνότητα 10000 Hz. Το laser χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με περιστρεφόμενο κάτοπτρο σχηματίζοντας φωτεινό επίπεδο πάχους 3mm. Τέλος χρησιμοποιήθηκε και ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος της εταιρίας V&A για την λειτουργία του περιστρεφόμενου κατόπτρου. Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη frames

κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, είναι μία ψηφιακή κάμερα Canon dvd camcorder PAL DC21 με ταχύτητα λήψης 25 frames per second και frame analysis 720x576.



Εικόνα 3.6- Σύστημα laser - περιστρεφόμενου κατόπτρου



Εικόνα 3.7- Τροφοδοτικό περιστρεφόμενου κατόπτρου

3.2 Περιγραφή των πειραματικών δοκιμίων

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σφαιρικού σχήματος. Τα πειράματα χωρίστηκαν σε δύο βασικές κατηγορίες, πειράματα με οργανικής φύσεως δοκίμια και πειράματα με ανόργανα δοκίμια. Στις σειρές πειραμάτων όπου έγινε προσπάθεια για οπτικοποίηση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκαν ανόργανα δοκίμια.

3.2.1 Ανόργανα δοκίμια

Για την κατασκευή δοκιμίων πάγου χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά μπαλάκια ring pong στα οποία ανοίχθηκε οπή διαμέτρου 6mm. Πάνω στην οπή τοποθετήθηκε πλαστικό παξιμάδι που λειτουργεί σαν οδηγός για την προσαρμογή ντίζας. Στα μπαλάκια προστέθηκε νερό και μερικές σταγόνες υδατικού διαλύματος methyl blue περιεκτικότητας 2% για τον οπτικό διαχωρισμό των δοκιμίων από το νερό της δεξαμενής. Στη συνέχεια αφού το διάλυμα τοποθετήθηκε στα μπαλάκια προσαρμόστηκε στην οπή ένα τμήμα πλαστικής ντίζας διαμέτρου 6mm. Τα μπαλάκια τοποθετήθηκαν στον καταψύκτη για τον σχηματισμό πάγου. Η θερμοκρασία των δοκιμίων μετά την εξαγωγή τους από τον καταψύκτη ήταν $-17,5^{\circ}\text{C}$.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την κατασκευή δοκιμίων πάγου με περιεκτικότητα σε αλάτι. Η μόνη διαφορά σε σχέση με τα απλά δοκίμια πάγου ήταν το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα αντί για νερό χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα άλατος περιεκτικότητας 2% w/v και μερικές σταγόνες methyl blue.

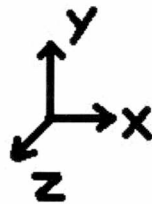
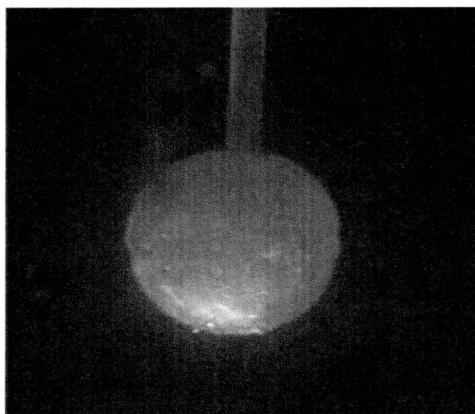
Τέλος για τα πειράματα οπτικοποίησης της συμπεριφοράς των δοκιμίων στο τυρβώδες πεδίο, χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα ροδαμίνης 6G. Συγκεκριμένα, 2g ροδαμίνης σε μορφή σκόνης διαλύθηκε σε 1 λίτρο νερού με μερικές σταγόνες methyl blue και το διάλυμα αυτό καταψύχθηκε. Επειδή κατά τη διαδικασία στερεοποίησης αυτού του διαλύματος στον καταψύκτη προέκυψε ίζημα ροδαμίνης, έγινε προσπάθεια διάλυσης αρχικά της ροδαμίνης με λίγες σταγόνες καθαρού οιοπνεύματος και έπειτα περαιτέρω διάλυση στο νερό. Αυτό βέβαια είχε σαν αποτέλεσμα να παραχθούν ασταθή δοκίμια που έλιωναν αμέσως καθιστώντας αδύνατη τη μελέτη της συμπεριφοράς τους. Έτσι επιλέχθηκε τελικώς η αρχική διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων ροδαμίνης.

Στα δοκίμια προσαρμόστηκε κατά την κατασκευή τους μια πλαστική ντίζα και κάθε φορά βιδώνονταν σε έναν μεταλλικό οδηγό. Στην κορυφή του τοποθετήθηκε ένας κυλινδρικός μαγνήτης που εφαρμοζόταν πάνω στη μεταλλική τράπεζα. Αυτή η διάταξη

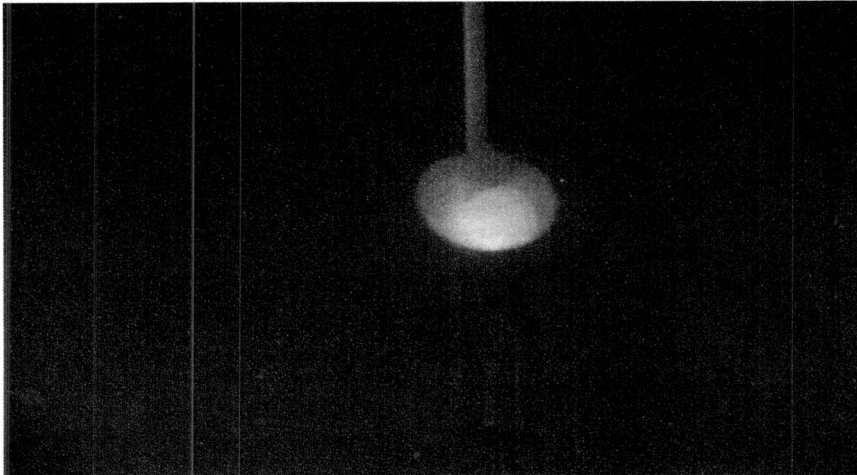
σε συνδυασμό με τις μεταλλικές πλάκες οδηγούς προσανατόλιζε τα δοκίμια στο κέντρο της παραγόμενης ισότροπης τύρβη. Ενδεικτικά τα δοκίμια πάγου έχουν πυκνότητα $\rho = 0,998 \text{ kg/m}^3$, όσο δηλαδή και ο πάγος στους 0°C, η θερμική αγωγιμότητα των δοκιμίων πάγου είναι W/mK , το σημείο τήξης εμφανίζεται στους 0°C και το σημείο βρασμού στους 100°C. Η προσθήκη άλατος κατά την Παρασκευή των δοκιμίων φαίνεται να προκαλεί ταπείνωση του σημείου τήξεως καθώς επίσης και ανύψωση του σημείου ζέσεως. Η ανύψωση και ταπείνωση των σημείων ζέσεως και τήξεως αντίστοιχα φαίνεται να εξαρτάται από τις ποσότητες των δύο συστατικών, χλωριούχου νατρίου και νερού. Ενδεικτικά το σημείο τήξεως του χλωριούχου νατρίου παρουσιάζεται στους 801°C το σημείο ζέσεως στους 1413°C η διαλυτότητα του στο νερό στους 20°C είναι 359g/L και η πυκνότητα του είναι 2165 g/cm³.

3.2.2 Οργανικά δοκίμια

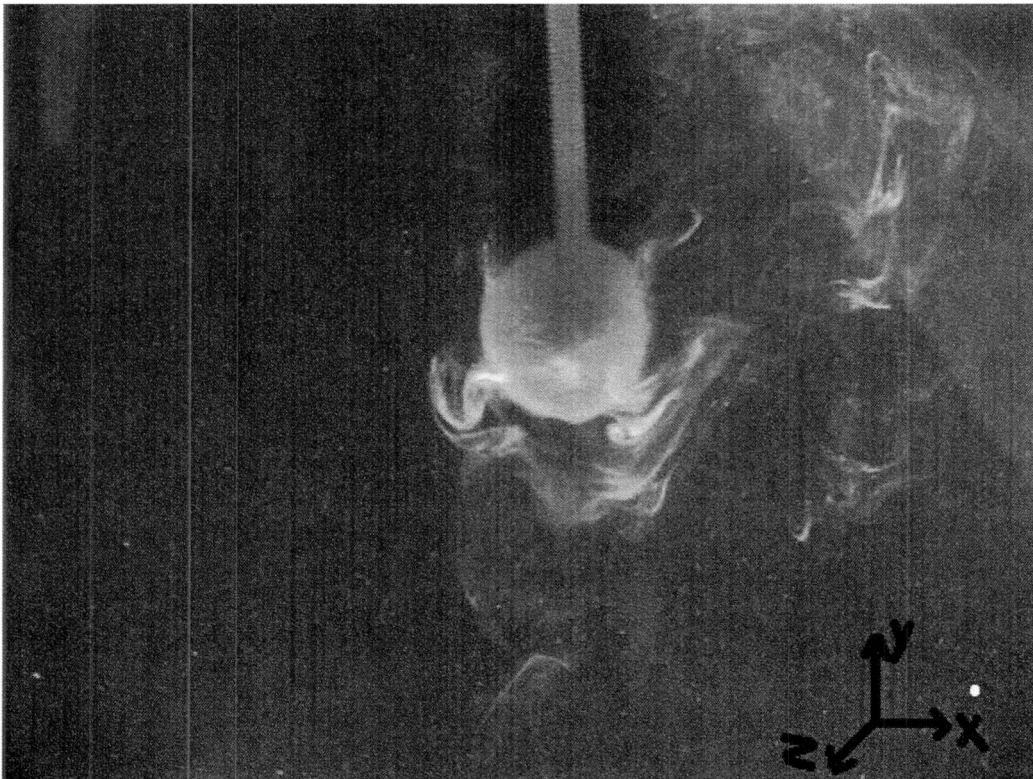
Στις σειρές πειραμάτων που απαιτούνταν οργανικά δοκίμια έγινε χρήση γλειφιτζουριών του εμπορίου. Τα δοκίμια αυτά αποτελούνται από ένα μίγμα ζάχαρης και σιροπιού γλυκόζης. Τα δοκίμια αυτά είχαν διάμετρο και προσαρμόζονταν στον οδηγό με μονωτική ταινία. Στις σειρές πειραμάτων με οργανικά δοκίμια δεν έγινε προσπάθεια οπτικοποίησης της συμπεριφοράς των σε τυρβώδη ροή, καθώς η προσθήκη ροδαμίνης σε αυτά ήταν αδύνατη. Το κύριο συστατικό των οργανικών δοκιμίων είναι η γλυκόζη. Η διαλυτότητα της γλυκόζης σε νερό θερμοκρασίας 20°C είναι 1,54g ανά 1.1L νερού, το σημείο τήξεως παρουσιάζεται στους 146°C και η πυκνότητα της προσδιορίζεται στα 1,54g/cm³.



Εικόνα 3.8- Οργανικό δοκίμιο



Εικόνα 3.9 - Ανόργανο δοκίμιο κατά την αρχική του φάση



Εικόνα 3.10- Ανόργανο δοκίμιο ροδαμίνης

3.3 περιγραφή μετρητικών διατάξεων

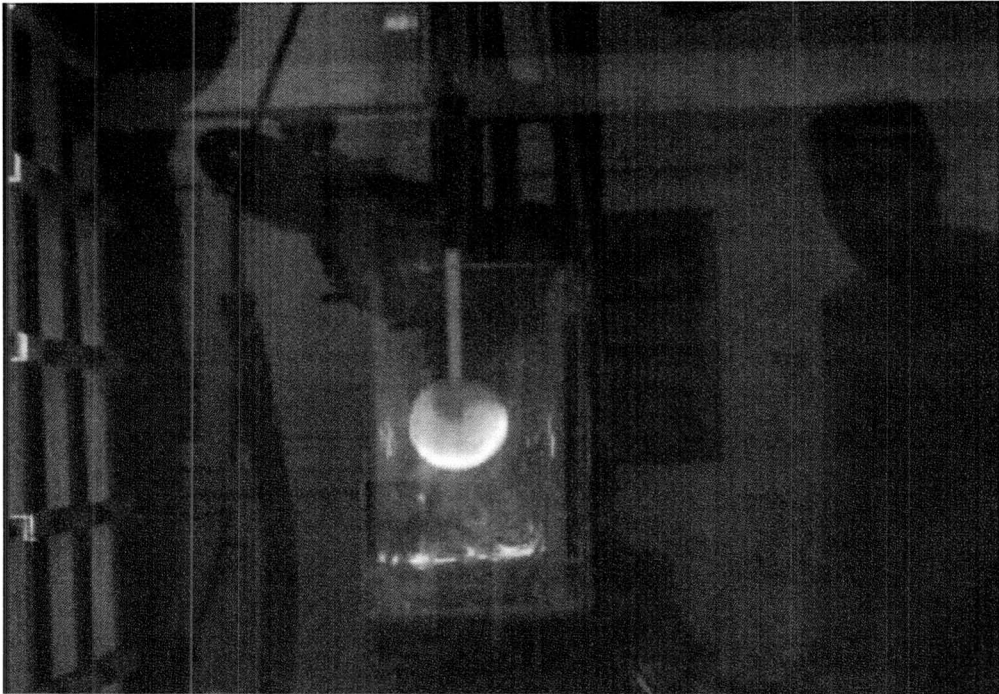
Για την συλλογή των πειραματικών δεδομένων έγινε χρήση κάμερας η οποία σταθεροποιήθηκε σε μικρή απόσταση από την δεξαμενή. Σε κάθε σειρά πειραμάτων πραγματοποιούνταν λήψεις frames ανά λεπτό ή ανά 30s ανάλογα με το χρόνο που απαιτείται για να λιώσουν τα δοκίμια.

Συγκεκριμένα, για τα ανόργανα δοκίμια πάγου ελήφθησαν επτά frames κάθε λεπτό. Ο φωτισμός που χρησιμοποιήθηκε προερχόταν από μια λάμπα φθορίου η οποία τοποθετήθηκε ακριβώς κάτω από την υδροδεξαμενή. Έτσι με τη συμβολή και το methyl blue τα δοκίμια ξεχώριζαν χρωματικά από το υπόλοιπο υγρό της δεξαμενής και σε κάθε frame φαινόταν ξεκάθαρα τα όρια του δοκιμίου. Τα frames αυτά επεξεργάστηκαν έπειτα μέσω Matlab. Για τα ανόργανα δοκίμια υδατικού διαλύματος με προσθήκη άλατος, ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία με τη διαφορά ότι σε μεγαλύτερες συχνότητες ταλάντωσης του πλέγματος γινόταν λήψη φωτογραφικών στιγμιότυπων ανά 30s μιας και η προσθήκη του άλατος συνέβαλλε στο ταχύτερο λιώσιμο των δοκιμίων.

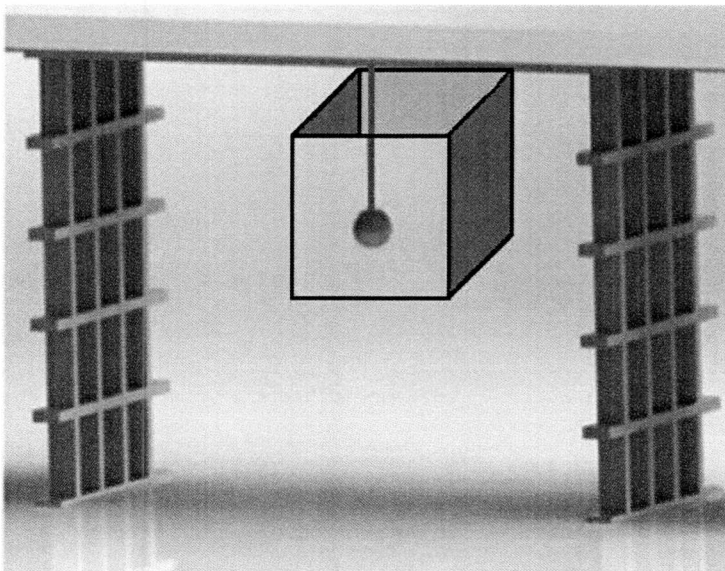
Στα πειράματα όπου έγινε χρήση ροδαμίνης 6G τη θέση της λάμπας φθορίου πήρε το σύστημα laser – περιστρεφόμενου κατόπτρου. Το πάχος του φωτεινού επιπέδου που σχηματίστηκε ήταν 3mm και έτεμνε το δοκίμιο κάθετα στο κέντρο του. Έτσι ανά πάσα στιγμή λαμβάνονταν πληροφορίες σχετικά με τη διάμετρο του δοκιμίου καθώς και τη διάχυση της ροδαμίνης στο τυρβώδες πεδίο. Κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων ο φωτισμός του εργαστηρίου ήταν ανενεργός για να επιτευχθεί καλύτερη ποιότητα των φωτογραφικών λήψεων.

Τέλος για τα οργανικά δοκίμια, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με τις σειρές πειραμάτων των ανόργανων, μόνο που ο όγκος των δεδομένων που εξήχθησαν ήταν σημαντικά μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείτο πολύ περισσότερος χρόνος για την πλήρη διάλυση των οργανικών δοκιμίων σε σχέση με τα ανόργανα δοκίμια πάγου. Αν τυπικά ο χρόνος πλήρους διάλυσης ενός ανόργανου ήταν της τάξης των 5-6 λεπτών, ο χρόνος για την περάτωση ενός πειράματος με οργανικό δοκίμιο ήταν περίπου 40-45 λεπτά.

Όλες οι σειρές πειραμάτων εκτός από ελεύθερη επιφάνεια δοκιμίου, πραγματοποιήθηκαν και με τα δοκίμια τοποθετημένα σε ορθογωνική κοιλότητα. Η κοιλότητα είχε διαστάσεις 39.5 cm μήκος, πλάτος 5 cm και ύψος=10 cm. Ο τρόπος συλλογής των πειραματικών δεδομένων από αυτά τα πειράματα έγινε αρχικά με βιντεοσκόπηση και έπειτα εξαγωγή των frames από το βίντεο.



Εικόνα 3.11- Πείραμα σε ορθογωνική κοιλότητα



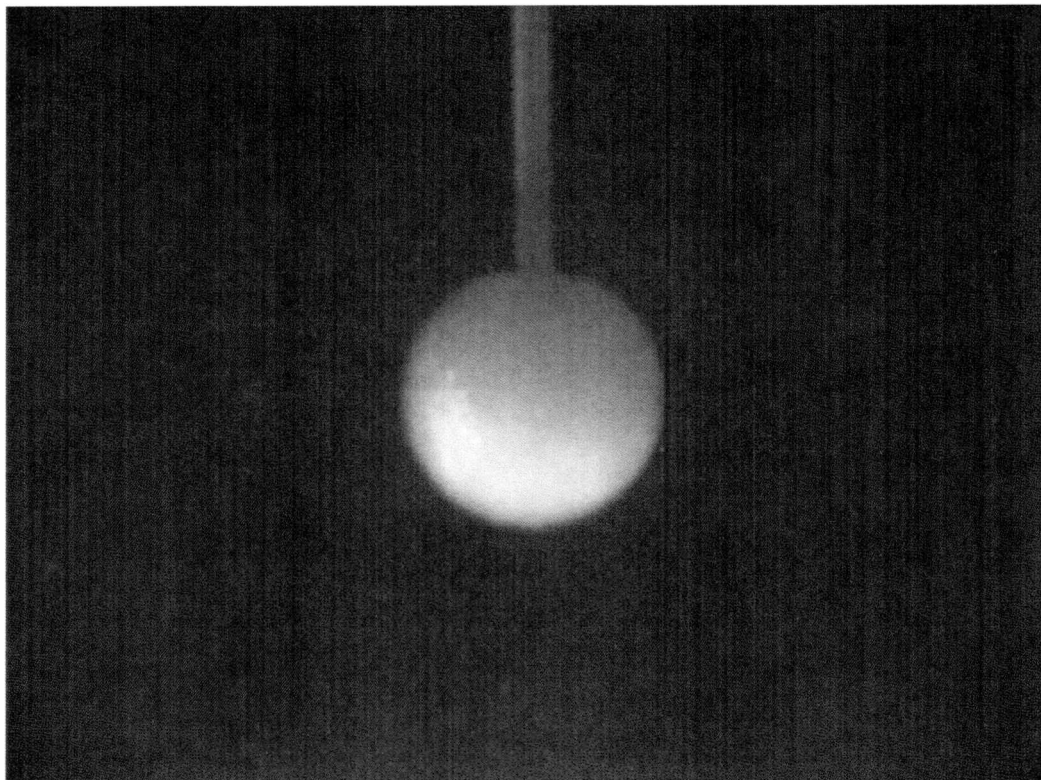
Εικόνα 3.12- Πειραματική διάταξη παρουσία ορθογωνικής κοιλότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Λήψη

Για την καταγραφή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις σειρές των πειραμάτων έγινε χρήση Video Camera, μέσω της οποίας γίνεται απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο της μίας όψης του δοκιμίου (frontal view).



Περιγραφή της δημιουργίας δοκιμίων

Για τη δημιουργία των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ως καλούπια μπαλάκια του πινγκ πονκ. Έγινε διάτρηση οπής μεγέθους τεσσάρων χιλιοστών στην κορυφή τους και προσκολλήθηκε σε εκείνο το σημείο πλαστικό παξιμάδι διαμέτρου 4mm. Στην συνέχεια το καλούπι πληρώθηκε με το αντίστοιχο υλικό (νερό ή αλατόνερο ή μίγμα ροδαμίνης) και βιδώθηκε στο παξιμάδι μέχρι το μέσω του ύψους του καλουπιού ντίζα πάχους Φ4 mm. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν για μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου μία ημέρα στην κατάψυξη σε θερμοκρασία -18 βαθμούς έτσι ώστε να δημιουργηθεί στερός πάγος. Στην συνέχεια μετά την στερεοποίηση του υλικού καταστρέψαμε το εξωτερικό περίβλημα έτσι ώστε να μείνει ένα καθαρό σφαιρικό δοκίμιο πάγου.

Η διαδικασία προετοιμασίας για την έναρξη των πειραμάτων είχε ως εξής:

- Προετοιμασία δεξαμενής: Πριν την έναρξη κάθε πειράματος έγινε καθαρισμός της δεξαμενής με χρήση βούρτσας και καθαριστικών για την αποφυγή όσον το δυνατόν περισσότερων ρύπων που μπορούσαν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα του πειράματος. (Χρόνος καθαρισμού 20'-30')
- Πλήρωση δεξαμενής: Η δεξαμενή γεμίστηκε με 650 λίτρα από νερό δικτύου. (χρόνος διαδικασίας 45')
- Αναμονή 2 ωρών για την ηρεμία του νερού της δεξαμενής και την διάλυση των φυσαλίδων που προέκυψαν.
- Ρύθμιση της κάμερας στο μπροστινό μέρος της δεξαμενής. (εστίαση, απόσταση λήψης και ρύθμιση για αποτύπωση 8 καρέ με κάθε λήψη .
- Τοποθέτηση δοκιμίου στην δοκό στήριξης και προγραμμογή του στο μέσο του χώρου ανάμεσα από τα πλέγματα.
- Τοποθέτηση των μεταλλικών πλακών πάνω από το δοκίμιο για την αποφυγή δημιουργίας κυματισμού
- Ρύθμιση inverter στην επιθυμητή συχνότητα και έναρξη του πειράματος.
- Η καταγραφή έγινε είτε με την λήψη φωτογραφιών είτε με λήψη βίντεο ανάλογα με το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πείραμα.

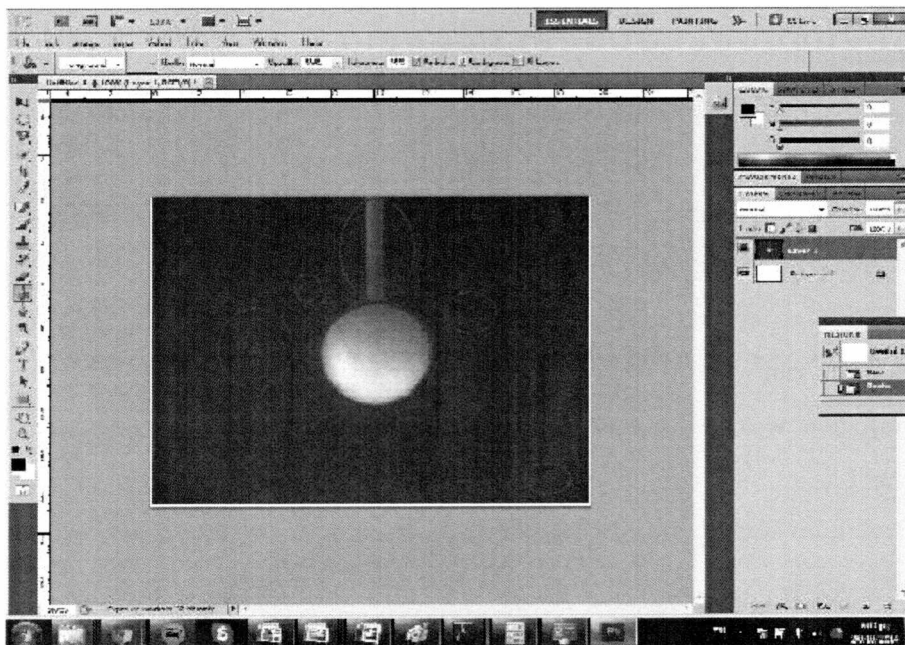
4.2 Επεξεργασία δεδομένων

Στην ενότητα που ακολουθεί πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή της επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Τα δεδομένα διαχωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, δεδομένα εικόνας καθώς επίσης και δεδομένα σε μορφή ψηφιακού video.

4.2.1 Επεξεργασία εικόνων

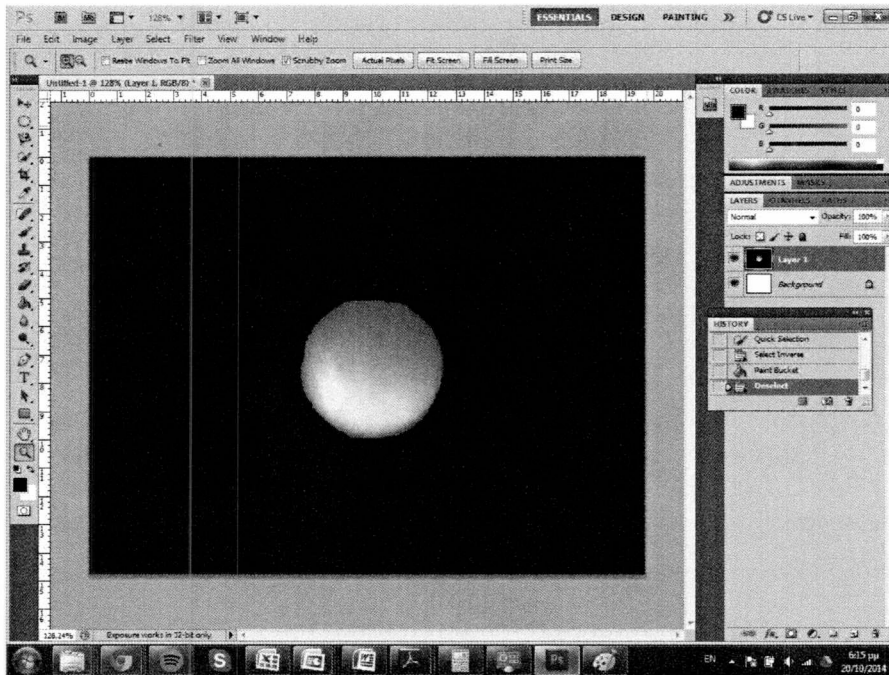
Τα δεδομένα που προέκυψαν, υποβλήθηκαν σε κάποια επεξεργασία ώστε να χρησιμοποιηθούν στον κώδικα της Matlab και να προκύψουν όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα.

Όσον αφορά τα δεδομένα που προέκυψαν με την λήψη φωτογραφικών στιγμιότυπων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Photoshop σε πρώτο χρόνο. Με το Photoshop καθαρίστηκε η περιοχή γύρω από το δοκίμιο, γιατί η κακή ανάλυση της camera και η φωτεινότητα από τον φωτισμό του πειράματος, ενδεχομένως να επηρεάζαν το τελικό αποτέλεσμα για την προσέγγιση των διαστάσεων του δοκιμίου την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Έτσι διατηρήθηκε μόνο το αντικείμενο ενδιαφέροντος για να επεξεργαστεί περαιτέρω μέσω Matlab και σε όλο τον υπόλοιπο χώρο προσαρμόστηκε μαύρη απόχρωση ώστε να επισημανθεί ως δευτερεύουσας σημασίας από τον κώδικα.



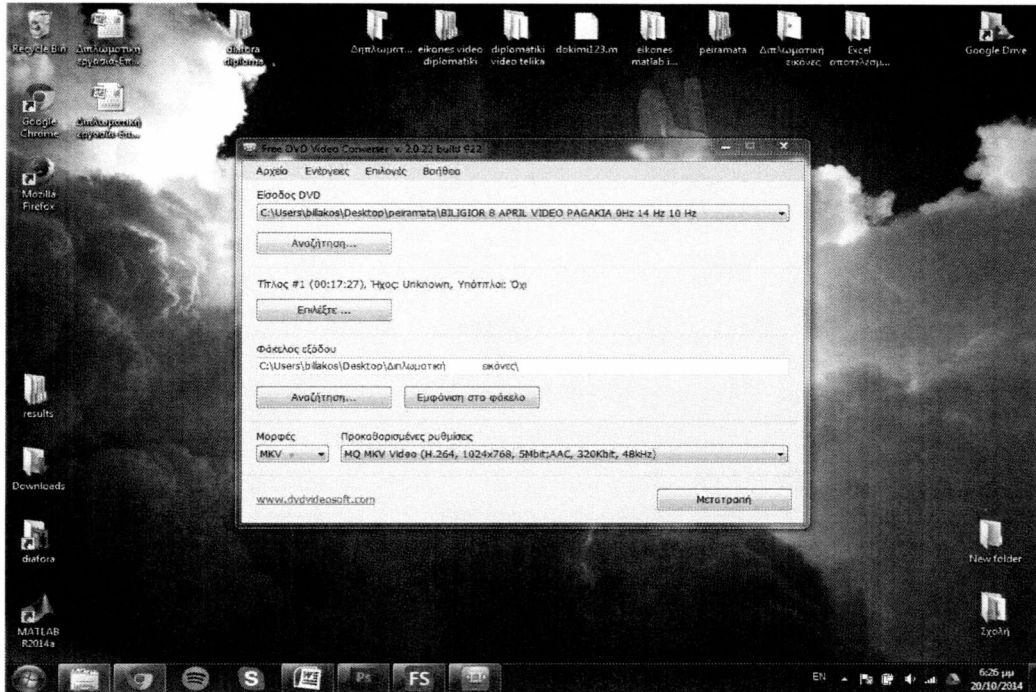
Στην παραπάνω εικόνα επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα τα στοιχεία που έπρεπε να αφαιρεθούν με επεξεργασία και με μπλε το επιθυμητό δεδομένο. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε ένα από τα καρτέ του εκάστοτε πειράματος.

Παρακάτω βλέπουμε το τελικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας



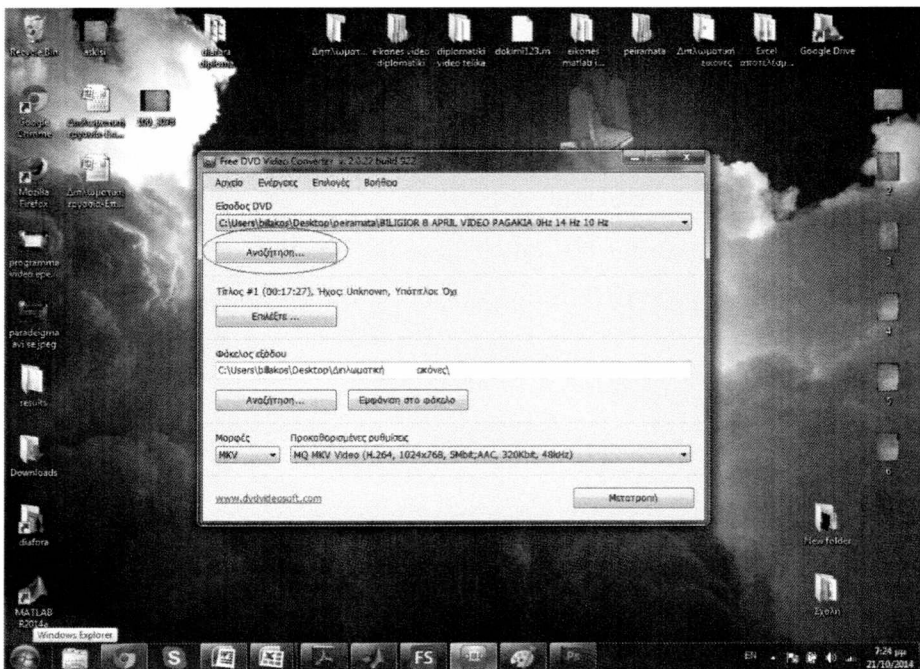
4.2.2 Επεξεργασία Video

Τα δεδομένα που προέκυψαν από την καταγραφή video σε μονάδα miniDVD υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μέσω του προγράμματος DVD Video Soft Studio . αρχικά μετατράπηκαν από αρχεία DVD σε αρχεία .avi για την διευκόλυνση της χρήσης τους.

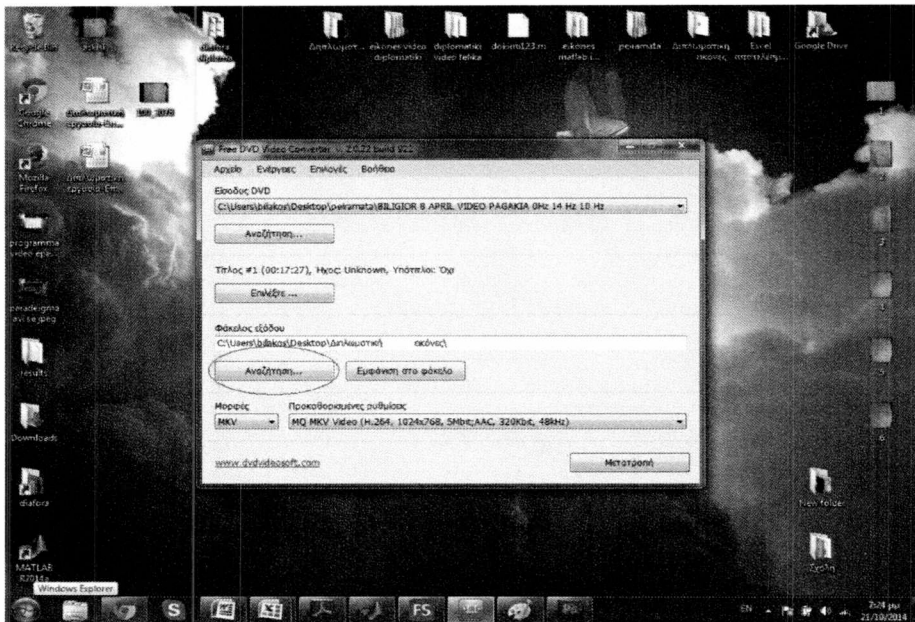


Για την μετατροπή των αρχείων αυτών σε τύπου.avi ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

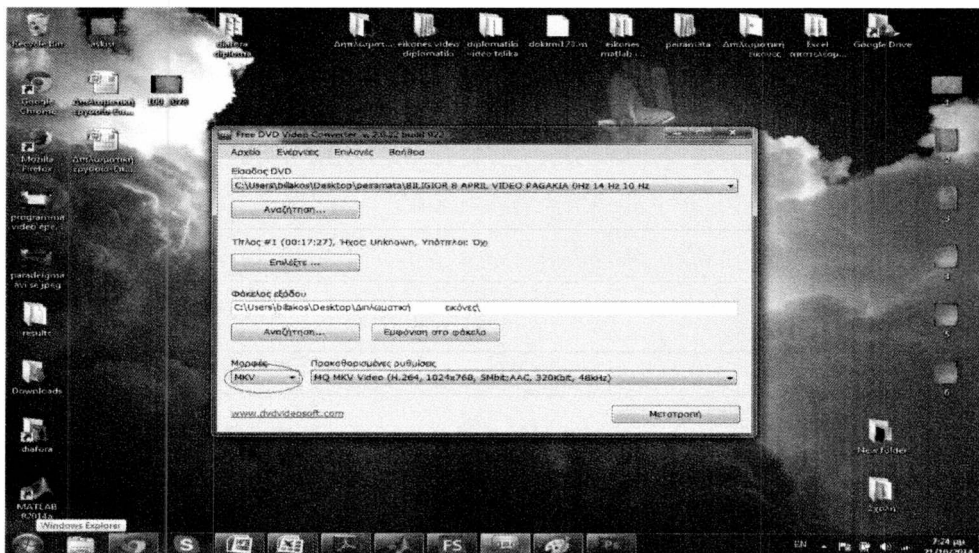
Πατώντας στο πεδίο "Είσοδος DVD" επιλέγεται "Αναζήτηση" και εντοπίζεται ο φάκελος που εμπεριείχε το αρχείο DVD που θέλουμε να μετατρέψουμε σε .avi



Στην συνέχεια στο πεδίο "Φάκελος εξόδου" χρησιμοποιώντας την εντολή "Αναζήτηση" επιλέγεται το μέρος αποθήκευσης του εξαγόμενου αρχείου.



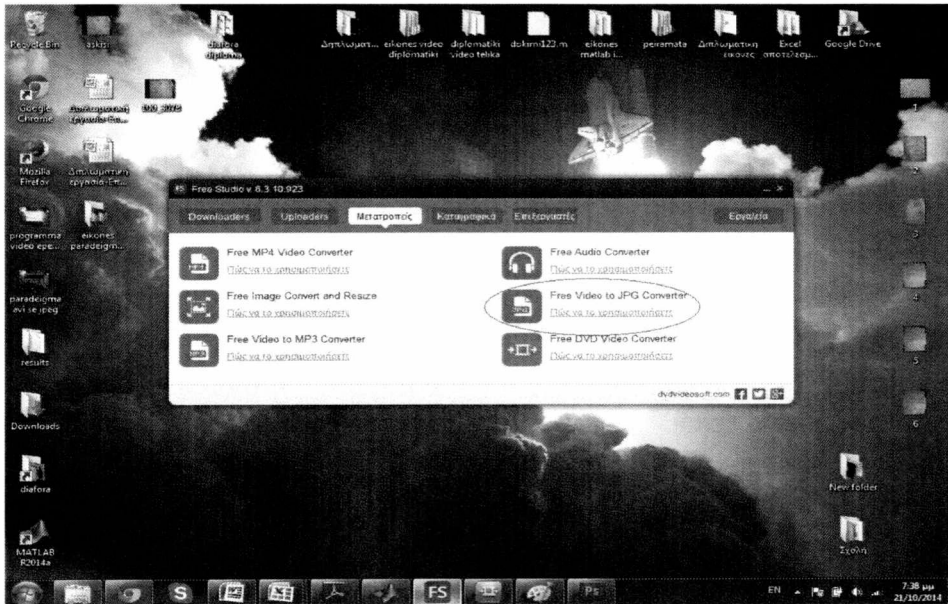
Αμέσως μετά στο πεδίο "Μορφές" γίνεται η επιλογή του τύπου του αρχείου εξόδου. Στην παρούσα εργασία τα αρχεία μετατράπηκαν σε .avi.



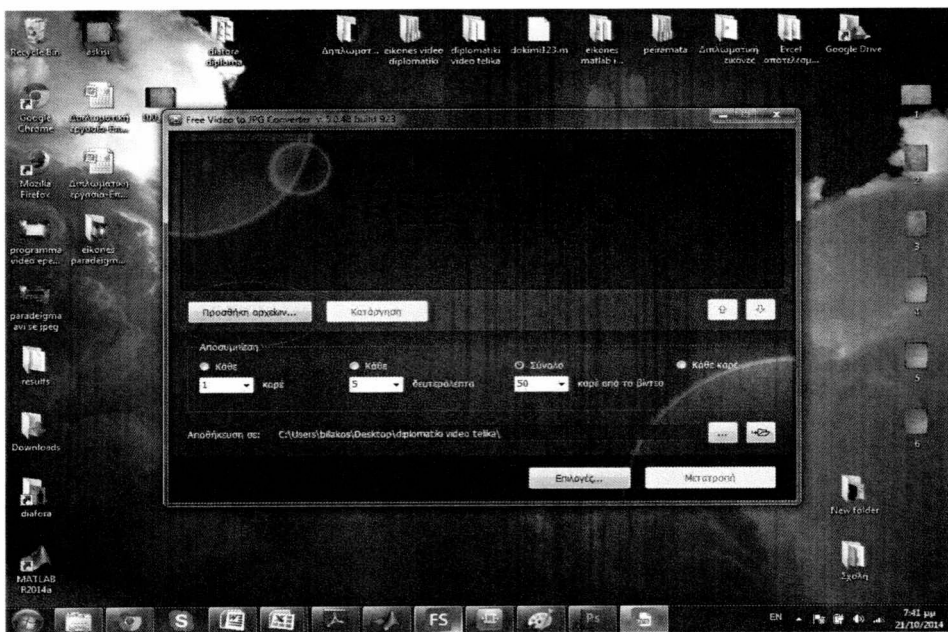
Έτσι μετά από αυτή την διαδικασία αναζητώντας στον φάκελο που επιλέχθηκε θα εντοπίζεται το αρχείου εξόδου σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ζητήθηκαν.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε λήψη στιγμιότυπων από το video. Τα αρχεία ήταν τύπου .jpg και η λήψη έγινε ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η διαδικασία αυτή έγινε

μέσω του ίδιου προγράμματος επιλέγοντας στην αρχική σελίδα "Free video to .JPG converter."

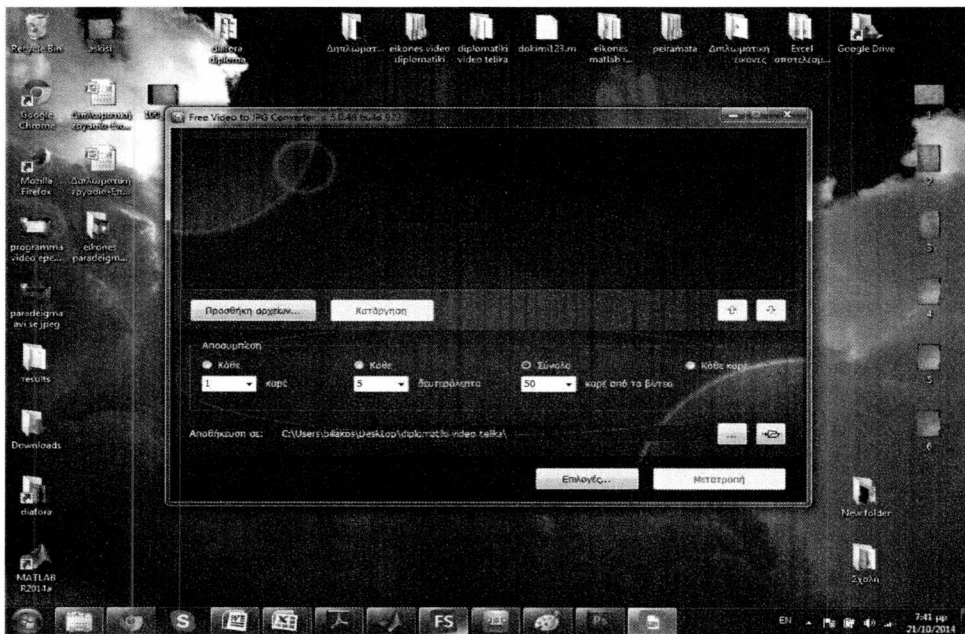


Επιλέγοντας την "Προσθήκη αρχείων" εντοπίζεται ο φάκελος που περιέχει τα επιθυμητά αρχεία video προς μετατροπή.



Μέσω του πεδίου "Αποσυμπίεση" έγινε η επιλογή του επιθυμητού αριθμού στιγμιότυπων με 4 διαφορετικούς τρόπους.

- Επιλέγοντας ανά πόσα καρέ χρειάζεται στιγμιότυπο. Επιλέγοντας την 1η επιλογή "κάθε" και τον αριθμό τον καρέ που προβάλλονται μέχρι το επιθυμητό στιγμιότυπο.
- Επιλέγοντας το χρονικό διάστημα που θα μεσολαβεί ανάμεσα σε κάθε στιγμιότυπο. Επισημαίνοντας την 2η επιλογή "κάθε" και σημειώνοντας τον χρόνο που θα μεσολαβεί μεταξύ των στιγμιότυπων.
- Επιλέγοντας την εντολή "Συνολικά" και προσδιορίζοντας τον συνολικό αριθμό στιγμιότυπων που επιθυμείται να εξαχθεί από το σύνολο του χρόνου του video.
- Τέλος επιλέγοντας την εντολή "κάθε καρέ" η έξοδος του προγράμματος είναι όλα τα καρέ που τράβηξε η video camera.

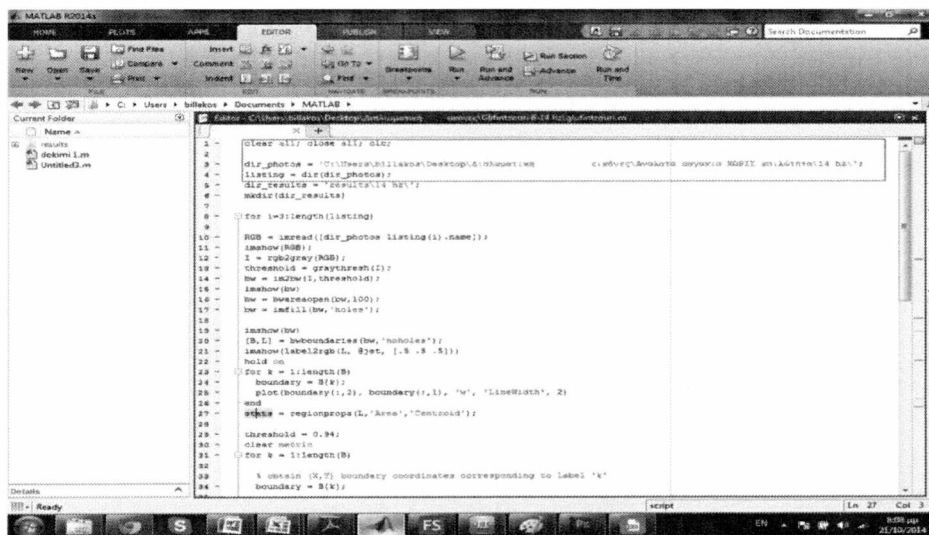


Τέλος πατώντας την εντολή "Μετατροπή" το πρόγραμμα μετατρέπει το βίντεο σε στιγμιότυπα σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ζητήθηκαν.

4.2.3 Κώδικας ευρέσεως ακτίνας δοκιμίου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Για την μελέτη της επίδρασης της τύρβης στον χρόνο διάλυσης σφαίρας πάγου ήταν αναγκαία η χρήση ενός κώδικα Matlab, ο οποίος θα είχε σαν είσοδο τα φωτογραφικά καρέ των δοκιμίων ενός πειράματος και θα έδινε σαν αποτέλεσμα την ακτίνα του δοκιμίου στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία ξεκινάει με την εύρεση του φακέλου που περιέχει τα στιγμιότυπα του συγκεκριμένου πειράματος.



```
1 clear all; close all; clc;
2 dir_photo = 'C:\Users\billakos\Desktop\diagnostika\img';
3 dir_photo = 'C:\Users\billakos\Desktop\diagnostika\img';
4 listing = dir(dir_photo);
5 dir_results = 'RESULTS\1\';
6 mkdir(dir_results);
7
8 for i=1:length(listing)
9
10     RGB = imread([dir_photo listing(i).name]);
11     imshow(RGB);
12     I = rgb2gray(RGB);
13     threshold = graythresh(I);
14     bw = im2bw(I,threshold);
15     imshow(bw);
16     bw = imzopen(bw,100);
17     bw = imfill(bw, 'holes');
18
19     imshow(bw);
20     [B,L] = bwboundaries(bw, 'noholes');
21     imshow(label2rgb(L, [0 0 0 1], 'b'));
22     hold on;
23     for k = 1:length(B)
24         boundary = B(k);
25         plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineStyle', 2);
26     end
27     sprops = regionprops(L, 'Area', 'Centroid');
28
29     threshold = 0.94;
30     clear sprops;
31     for k = 1:length(B)
32
33         % obtain (X,Y) boundary coordinates corresponding to label 'k'
34         boundary = B(k);
```

Ακολούθως γίνεται δημιουργία φακέλου στο οποίο τοποθετούνται τα αποτελέσματα εικόνων μετά από την επεξεργασία μέσω του κώδικα.

```
1 - clear all; close all; clc;
2
3 - dir_photos = 'C:\Users\billakos\Desktop\inhouse\14';
4 - listing = dir(dir_photos);
5 - dir_results = 'results\14.txt';
6 - mkdir(dir_results);
7
8 - for i=1:length(listing)
9
10 - RGB = imread([dir_photos listing(i).name]);
11 - imshow(RGB);
12 - I = rgb2gray(RGB);
13 - threshold = graythresh(I);
14 - bw = im2bw(I,threshold);
15 - imshow(bw);
16 - bw = imopen(bw,100);
17 - bw = imfill(bw,'holes');
18
19 - imshow(bw);
20 - [B,L] = bwboundaries(bw,'noholes');
21 - imshow(label2rgb(L, @set, [5 5 5]));
22 - hold on
23 - for k = 1:length(B)
24 - boundary = B(k);
25 - plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'k', 'LineWidth', 2)
26 - end
27 - @area = regionprops(L,'Area','Centroid');
28
29 - threshold = 0.94;
30 - clear matrix;
31 - for k = 1:length(B)
32
33 - % obtain (X,Y) boundary coordinates corresponding to label 'k'
34 - boundary = B(k);
```

Αμέσως μετά γίνεται εύρεση του κυκλικού σχήματος στην εικόνα και καθαρισμός της από περιττές λεπτομέρειες.

```
1 - clear all; close all; clc;
2
3 - dir_photos = 'C:\Users\billakos\Desktop\inhouse\14';
4 - listing = dir(dir_photos);
5 - dir_results = 'results\14.txt';
6 - mkdir(dir_results);
7
8 - for i=1:length(listing)
9
10 - RGB = imread([dir_photos listing(i).name]);
11 - imshow(RGB);
12 - I = rgb2gray(RGB);
13 - threshold = graythresh(I);
14 - bw = im2bw(I,threshold);
15 - imshow(bw);
16 - bw = imopen(bw,100);
17 - bw = imfill(bw,'holes');
18
19 - imshow(bw);
20 - [B,L] = bwboundaries(bw,'noholes');
21 - imshow(label2rgb(L, @set, [5 5 5]));
22 - hold on
23 - for k = 1:length(B)
24 - boundary = B(k);
25 - plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'k', 'LineWidth', 2)
26 - end
27 - @area = regionprops(L,'Area','Centroid');
28
29 - threshold = 0.94;
30 - clear matrix;
31 - for k = 1:length(B)
32
33 - % obtain (X,Y) boundary coordinates corresponding to label 'k'
34 - boundary = B(k);
```

Στην συνέχεια γίνεται εύρεση του εμβαδού της επιφάνειας του κυκλικού σχήματος σε κάθε στιγμιότυπο και αποθηκεύεται στην μεταβλητή "erifaneia".

```

1 gluflintzoum.m
2 % calculate the roundness metric
3
4 for k = 1:length(B)
5     % obtain (X,Y) boundary coordinates corresponding to label 'k'
6     boundary = B(k);
7
8     % compute a simple estimate of the object's perimeter
9     delta_sq = diff(boundary).^2;
10    perimeter = squeeze(sum(sqrt(sum(delta_sq,2))));
11
12    % obtain the area calculation corresponding to label 'k'
13    area = stata(k).Area;
14
15    % compute the roundness metric
16    metric(k) = 4*pi*area/perimeter^2;
17
18    % display the results
19    metric_string = sprintf('%2.2f',metric(k));
20
21    % mark objects above the threshold with a black circle
22    if metric(k) > threshold
23        centroid = stata(k).Centroid;
24        plot(centroid(1),centroid(2),'ko');
25    end
26
27    text(boundary(1,2)-35,boundary(1,1)+13,metric_string,'Color','y',...
28         'FontSize',14,'FontWeight','bold');
29
30 end
31
32 [roundness(index), index] = max(metric);
33
34 epifaneia(index) = stata(index).Area;
35
36 title(['Metrics closer to 1 indicate that ',...
37       'the object is approximately round']);

```

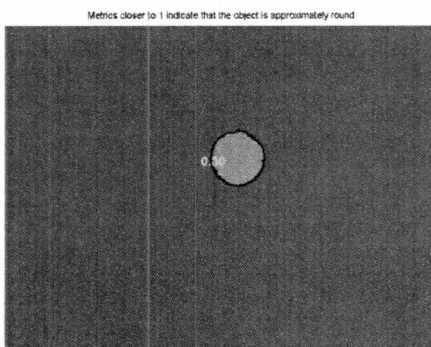
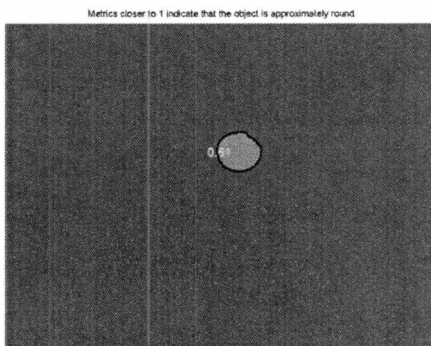
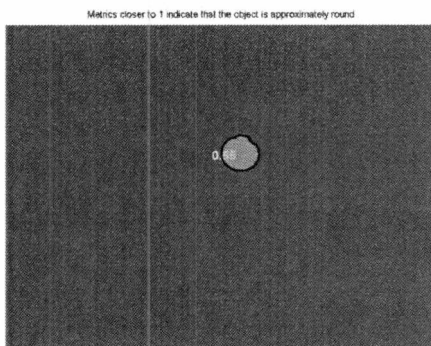
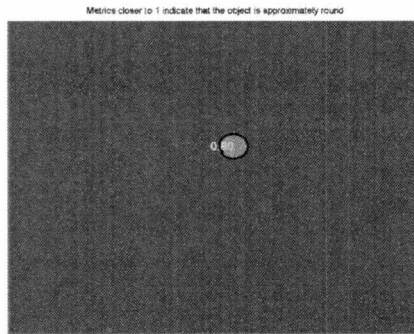
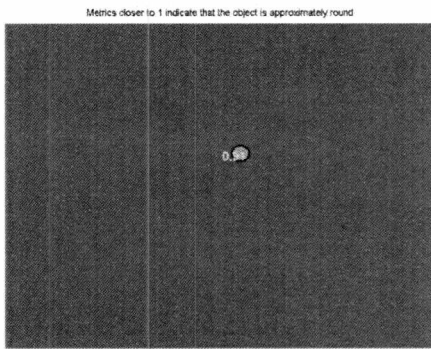
Τέλος έχουμε την έυρεση της ακτίνας του σφαιρικού αντικειμένου την κάθε χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα τοποθετούνται στην μεταβλητή "r".

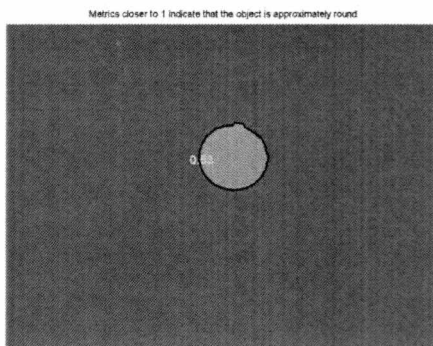
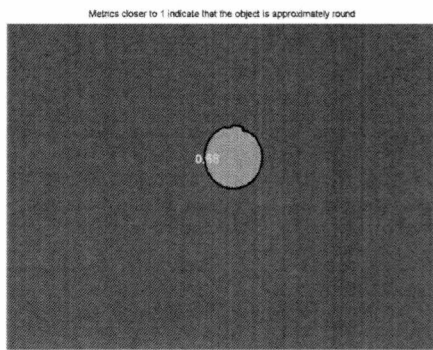
```

43 % compute the roundness metric
44 metric(k) = 4*pi*area/perimeter^2;
45
46 % display the results
47 metric_string = sprintf('%2.2f',metric(k));
48
49 % mark objects above the threshold with a black circle
50 if metric(k) > threshold
51     centroid = stata(k).Centroid;
52     plot(centroid(1),centroid(2),'ko');
53 end
54
55 text(boundary(1,2)-35,boundary(1,1)+13,metric_string,'Color','y',...
56      'FontSize',14,'FontWeight','bold');
57
58 end
59
60 [roundness(index), index] = max(metric);
61
62 epifaneia(index) = stata(index).Area;
63
64 title(['Metrics closer to 1 indicate that ',...
65       'the object is approximately round']);
66
67 saveas(gcf,[dir_results num2str(i) '.jpg']);
68 close all;
69
70 end
71
72 r = sqrt(epifaneia./pi);

```

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα από την επεξεργασία ορισμένων στιγμιοτύπων από το πείραμα "Αλατισμένα Χωρίς κοιλότητα 4 hz".





Παραπάνω παρουσιάζονται τα αντικείμενα που εντόπισε στις εικόνες ο κώδικας, έτσι όπως συντάχθηκε, και δίπλα ο αριθμός που δηλώνει την κυρτότητα των αντικειμένων που αναγνωρίστηκαν. Όσο ο αριθμός της κυρτότητας τείνει στη μονάδα τόσο τα αντικείμενα προσεγγίζουν το κυκλικό σχήμα.

Η έξοδος του κώδικα είχε ως δεδομένα δύο πίνακες. Ο πρώτος πίνακας είχε ως στοιχεία τις τιμές της μεταβλητής "επιφάνεια" και ο άλλος πίνακας τις τιμές της μεταβλητής "r" που αντιστοιχούν στο αντίστοιχο στιγμιότυπο.

MATLAB R2014a

HOME PLOTS APPS VARIABLE VIEW

Open Rows Columns Transpose

New from Selection Print 1 Insert Delete Sort

VARIABLE SELECTION EDIT

C:\Users\billakos\Desktop\Ανάλυση των εικόνων\Gifintzouri 6-14 hz

Current Folder

Name

- 6 hz
- 6 hz t
- 8 hz
- 8 hz t
- 10 hz
- 10 hz t
- 12 hz
- 12 hz t
- 14 hz
- 14 hz t
- results
- glufintzouri.m
- glufintzouri new.m
- Αποτελέσματα αναρίθμηση Γλυκό...

Variables - epifanes

1x9 double

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 1 |
|----|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|----|----|---|
| 1 | 0 | 0 | 49778 | 39777 | 32150 | 19272 | 14831 | 8370 | 3193 | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | |

Editor - C:\Users\billakos\Desktop\Ανάλυση των εικόνων\Gifintzouri 6-14 hz\glufintzouri.m

```

42
43 % compute the roundness metric
44 metric(k) = 4*pi*area/perimeter^2;
45
46 % display the results
47 metric_string = sprintf('%2.2f',metric(k));
48
49 % mark objects above the threshold with a black circle
50 if metric(k) > threshold
51     centroid = stats(k).Centroid;
52     plot(centroid(1),centroid(2),'ko');
53 end
54
55 text(boundary(1,2)-35,boundary(1,1)+13,metric_string,'Color','y',...
56     'FontSize',14,'FontWeight','bold');
57

```

9:24 μμ
21/10/2014

MATLAB R2014a

HOME PLOTS APPS VARIABLE VIEW

Open Rows Columns Transpose

New from Selection Print 1 Insert Delete Sort

VARIABLE SELECTION EDIT

C:\Users\billakos\Desktop\Ανάλυση των εικόνων\Gifintzouri 6-14 hz

Current Folder

Name

- 6 hz
- 6 hz t
- 8 hz
- 8 hz t
- 10 hz
- 10 hz t
- 12 hz
- 12 hz t
- 14 hz
- 14 hz t
- results
- glufintzouri.m
- glufintzouri new.m
- Αποτελέσματα αναρίθμηση Γλυκό...

Variables - r

1x7 double

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 1 |
|----|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---|---|----|----|---|
| 1 | 125.8130 | 112.5229 | 101.1616 | 78.3228 | 68.7085 | 51.6164 | 31.8805 | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | |

Editor - C:\Users\billakos\Desktop\Ανάλυση των εικόνων\Gifintzouri 6-14 hz\glufintzouri.m

```

42
43 % compute the roundness metric
44 metric(k) = 4*pi*area/perimeter^2;
45
46 % display the results
47 metric_string = sprintf('%2.2f',metric(k));
48
49 % mark objects above the threshold with a black circle
50 if metric(k) > threshold
51     centroid = stats(k).Centroid;
52     plot(centroid(1),centroid(2),'ko');
53 end
54
55 text(boundary(1,2)-35,boundary(1,1)+13,metric_string,'Color','y',...
56     'FontSize',14,'FontWeight','bold');
57

```

9:25 μμ
21/10/2014

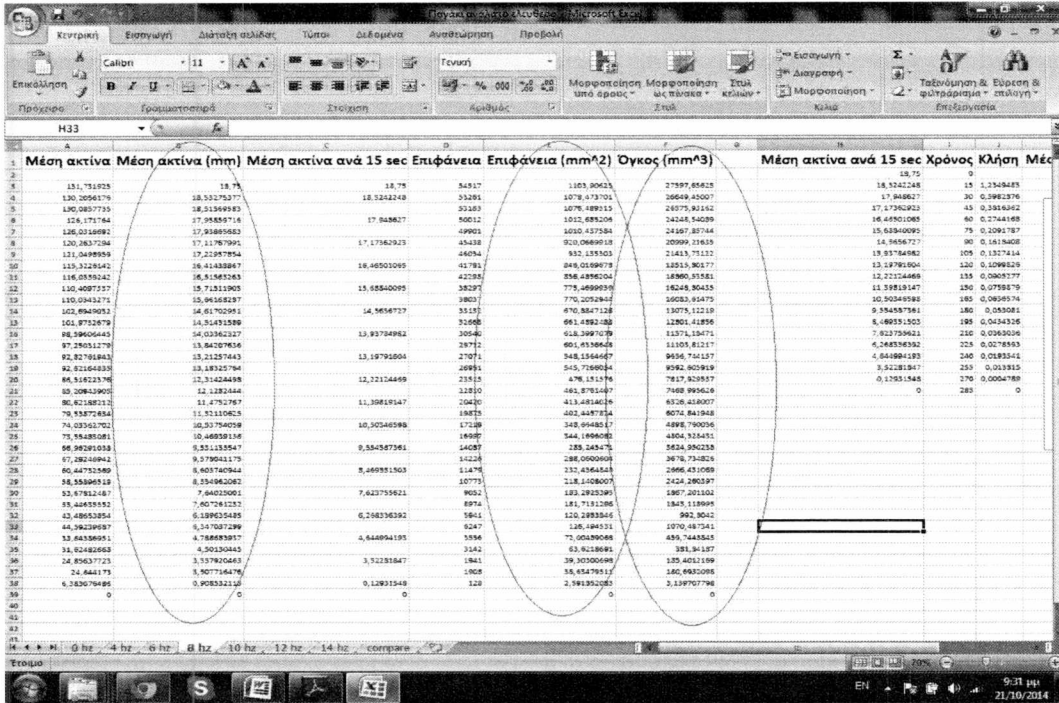
4.2.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μέσω Microsoft Excel

Τα δεδομένα από τον κώδικα της Matlab, εισήχθησαν στο Microsoft Excel για περαιτέρω επεξεργασία και εξαγωγή διαγραμμάτων, μέσω των οποίων εξάγονται στη συνέχεια χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά τα αποτελέσματα εισάγονται σε ένα αρχείο excel. Για κάθε πείραμα υπάρχει ξεχωριστή καρτέλα και για κάθε ομάδα πειραμάτων υπάρχει ξεχωριστό αρχείο.

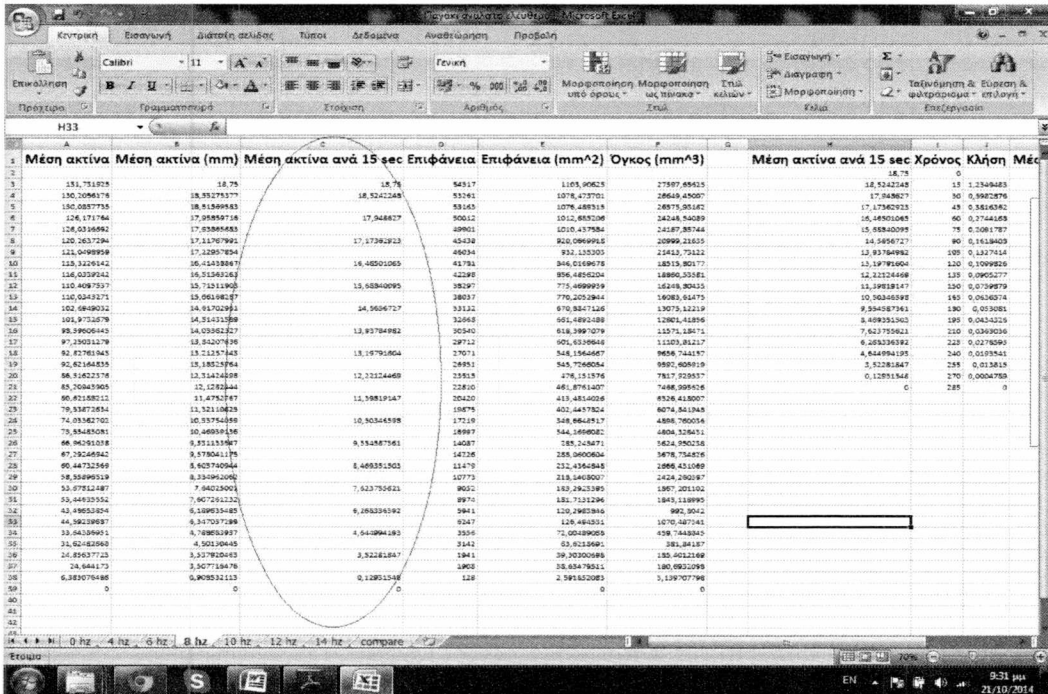
| Μέση ακτίνα | Μέση ακτίνα (mm) | Μέση ακτίνα ανά 15 sec | Επιφάνεια | Όγκος (mm ³) | Μέση ακτίνα ανά 15 sec | Χρόνος | Κλίση Μέσ |
|-------------|------------------|------------------------|-----------|--------------------------|------------------------|-------------|---------------|
| 1 | 551,929523 | 18,73 | 54517 | 1103,80423 | 27597,65623 | 18,75 | 0 |
| 2 | 150,2056176 | 18,51278377 | 53281 | 1078,475761 | 28648,45007 | 17,5488217 | 36 0,1382876 |
| 3 | 130,0897739 | 18,51206583 | 53180 | 1076,499113 | 28579,81952 | 17,17919021 | 43 0,2812562 |
| 4 | 128,0116964 | 17,98897716 | 50912 | 1016,485109 | 24148,30089 | 18,48901089 | 60 0,1764589 |
| 5 | 120,2437299 | 17,11767991 | 49438 | 1010,437584 | 24187,83704 | 18,68840089 | 79 0,2091787 |
| 6 | 121,0608969 | 17,22987854 | 49824 | 920,0969945 | 20999,18353 | 18,3659727 | 96 0,1618408 |
| 7 | 115,3228242 | 16,41438897 | 41781 | 952,1350051 | 21413,78112 | 18,93786882 | 105 0,1527814 |
| 8 | 116,039242 | 16,51585183 | 42288 | 858,4896204 | 18880,83581 | 12,22124668 | 135 0,0602777 |
| 9 | 130,4097337 | 15,71213803 | 38297 | 775,4699939 | 18148,80435 | 12,39839167 | 150 0,078879 |
| 10 | 130,0248171 | 15,68188187 | 38037 | 770,2052844 | 18083,61475 | 10,50344599 | 185 0,0634974 |
| 11 | 107,6440931 | 14,61702991 | 33132 | 678,8547129 | 13079,13219 | 9,15487361 | 180 0,053031 |
| 12 | 101,972679 | 14,51421859 | 32068 | 661,4991489 | 12801,41856 | 9,499251803 | 189 0,0412109 |
| 13 | 98,9906048 | 14,02382317 | 30540 | 618,9597079 | 11571,18471 | 7,823785621 | 210 0,0486396 |
| 14 | 97,23031278 | 13,84207816 | 29712 | 601,8330649 | 11103,81217 | 9,18334392 | 233 0,0278999 |
| 15 | 90,82781943 | 13,51297443 | 27071 | 548,1564687 | 9696,744157 | 4,84494183 | 248 0,0195841 |
| 16 | 92,02184933 | 13,18327784 | 24991 | 545,7168054 | 9592,605919 | 3,93281847 | 253 0,02313 |
| 17 | 86,51823276 | 12,31424486 | 23515 | 476,151579 | 7817,929537 | 0,12931546 | 270 0,0004759 |
| 18 | 89,3084909 | 12,1782444 | 22810 | 481,8741697 | 7486,958516 | 0 | 285 0 |
| 19 | 90,6218612 | 11,4782797 | 20920 | 613,4516028 | 8926,418907 | | |
| 20 | 79,5387484 | 11,32110825 | 19878 | 402,4457824 | 6074,841948 | | |
| 21 | 74,93362702 | 10,53794029 | 17219 | 342,6948217 | 4898,740036 | | |
| 22 | 72,75838081 | 10,46939136 | 16907 | 344,1998081 | 4804,138411 | | |
| 23 | 66,98291038 | 8,53133847 | 14087 | 288,248471 | 3624,860238 | | |
| 24 | 67,38249943 | 8,378041173 | 14226 | 288,0900004 | 3678,734828 | | |
| 25 | 60,44752969 | 8,003740844 | 11479 | 232,0584848 | 2868,039099 | | |
| 26 | 50,35986519 | 6,324962082 | 10772 | 128,1403007 | 2424,260397 | | |
| 27 | 53,87812487 | 7,64029001 | 9082 | 185,2923969 | 1847,201102 | | |
| 28 | 53,4443592 | 7,907708122 | 8971 | 181,7131299 | 1943,219999 | | |
| 29 | 43,48033874 | 6,199634895 | 5964 | 120,2963446 | 993,8042 | | |
| 30 | 44,39236887 | 6,247037289 | 6247 | 124,484531 | 1070,487541 | | |
| 31 | 33,81438993 | 4,789682997 | 3596 | 72,00489098 | 459,7448933 | | |
| 32 | 31,62482668 | 4,903304848 | 3142 | 65,8218691 | 381,84187 | | |
| 33 | 24,85437723 | 3,317005483 | 1841 | 39,30200999 | 183,4021399 | | |
| 34 | 24,844173 | 3,307716478 | 1808 | 38,85479111 | 180,6432098 | | |
| 35 | 6,882078487 | 0,908532113 | 122 | 2,981302083 | 3,139707794 | | |
| 36 | | 0 | | | 0 | | |
| 37 | | 0 | | | 0 | | |
| 38 | | 0 | | | 0 | | |
| 39 | | 0 | | | 0 | | |
| 40 | | 0 | | | 0 | | |
| 41 | | 0 | | | 0 | | |
| 42 | | 0 | | | 0 | | |
| 43 | | 0 | | | 0 | | |
| 44 | | 0 | | | 0 | | |
| 45 | | 0 | | | 0 | | |
| 46 | | 0 | | | 0 | | |
| 47 | | 0 | | | 0 | | |
| 48 | | 0 | | | 0 | | |

Στη συνέχεια έγινε μετατροπή των αποτελεσμάτων από pixels, το μετρικό σύστημα του προγράμματος Matlab, σε μονάδες του S.I με βάση την αναλογία. Κατ' επέκταση η ακτίνα μετατράπηκε σε m, η επιφάνεια σε m^2 και όγκος της σφαίρας σε m^3 στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές.

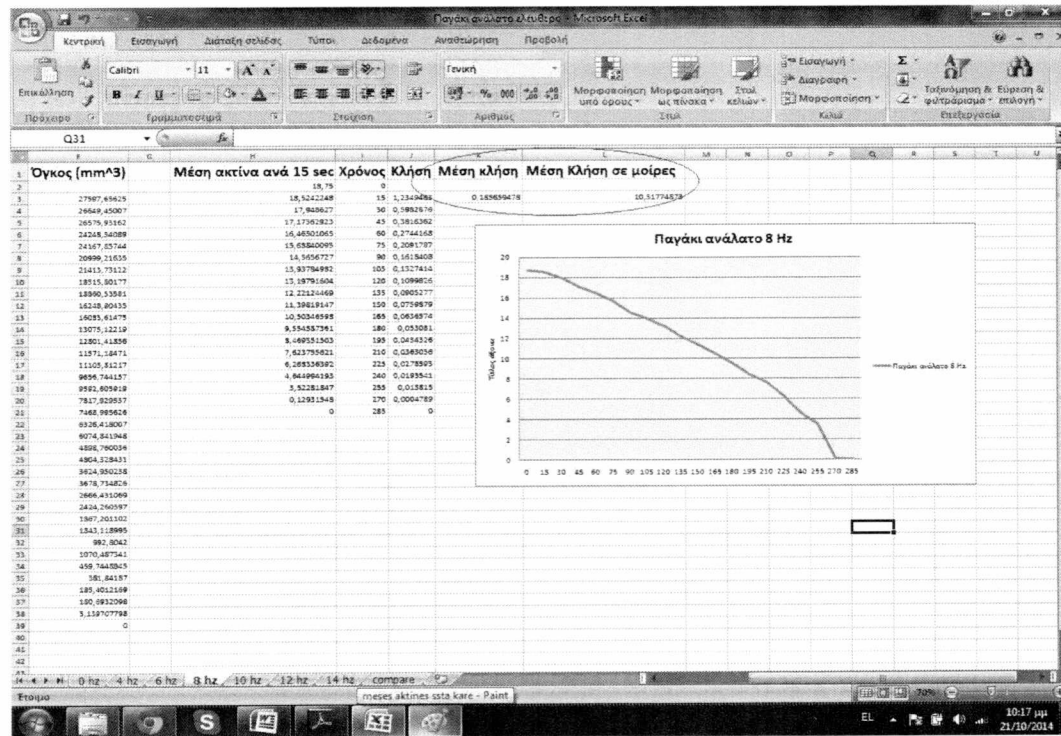
- Ακτίνα: $r_i(mm) = \frac{r_0(mm) \times r_i(pixels)}{r_0(pixels)}$
- Επιφάνεια $A_i(mm^2) = \pi \times r_i^2(mm)$
- Όγκος $V_i(mm^3) = \frac{4}{3} \times \pi \times r_i^3(mm)$



Κατά τη διαδικασία της συλλογής των δεδομένων μέσω φωτογραφικών frames γίνονται συλλογή τριών έως 8 διαδοχικών στιγμιότυπων. Η διαδικασία αυτή αποσκοπούσε στην όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση του δοκιμίου. Για διευκόλυνση στην μετέπειτα επεξεργασία, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος όλων των τιμών που προέκυπταν από τα διαδοχικά στιγμιότυπα, για την κάθε χρονική στιγμή. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με την συνάρτηση [=Average()] του προγράμματος Excel.



Για την εύρεση της κλίση μίας καμπύλης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $[\tan(a)=y/x]$, στη συνέχεια υπολογίστηκε ο αριθμητικός μέσος όρος πάλι με τη βοήθεια της συνάρτησης $[=Average()]$ και βρέθηκε η μέση κλίση της κάθε καμπύλης. Η τιμή αυτή μετατράπηκε σε μοίρες μέσω της συνάρτησης του $[=DEGREES(atan())]$ του Excel.

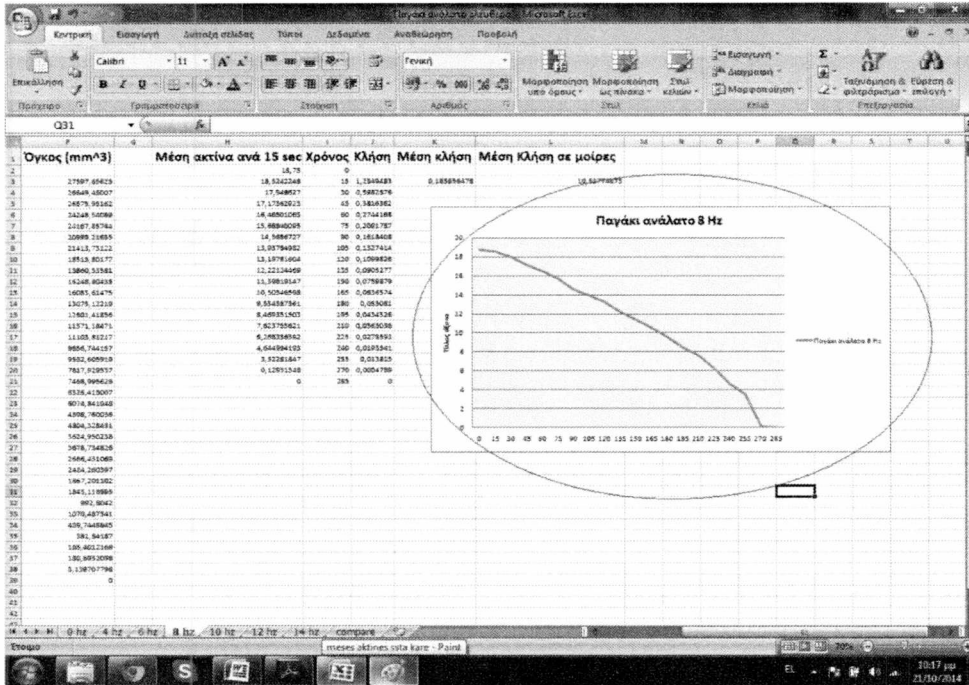


Τέλος έγινε εξαγωγή των διαγραμμάτων όπου στον άξονα y παρουσιάζεται η ακτίνα $r(t)$ και στον άξονα x ο χρόνος t.

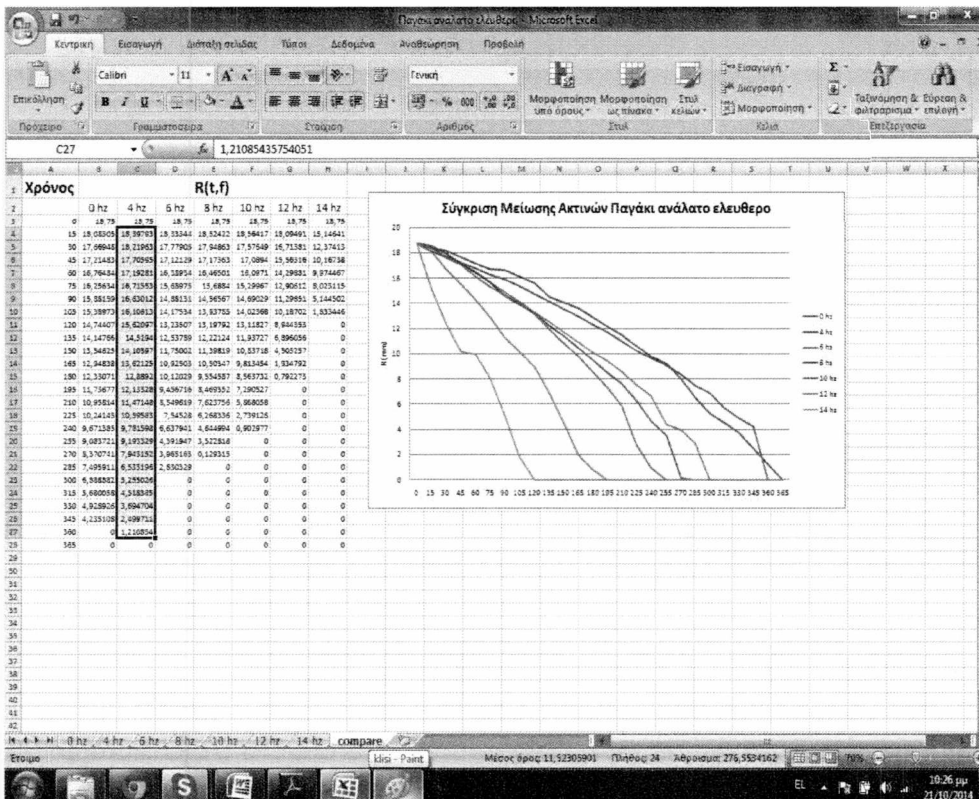
Με τη χρήση διαφορετικού κώδικα στο πρόγραμμα Matlab θα μπορούσε να εξαχτεί κάθε φορά το εμβαδό S του κυκλικού στοιχείου, καθώς επίσης και η περίμετρος F και μέσω του τύπου

$$D_h = \frac{4F}{S} \quad (4.1)$$

να εξαχτεί η υδραυλική διάμετρος D_H . Έτσι τα διαγράμματα θα εξαγονταν με βάση της υδραυλικής διαμέτρου αντί της ακτίνας. Ο κώδικας της συγκεκριμένης εργασίας προτιμήθηκε του εναλλακτικού, λόγω τις ευκολίας που παρέχει στην επεξεργασία του μεγάλου όγκου των δεδομένων του πειράματος και προσφέρει την ίδια ακρίβεια αποτελεσμάτων. Ο κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα.



Τέλος πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των διαγραμμάτων που προέκυψαν από κάθε σειρά πειραμάτων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

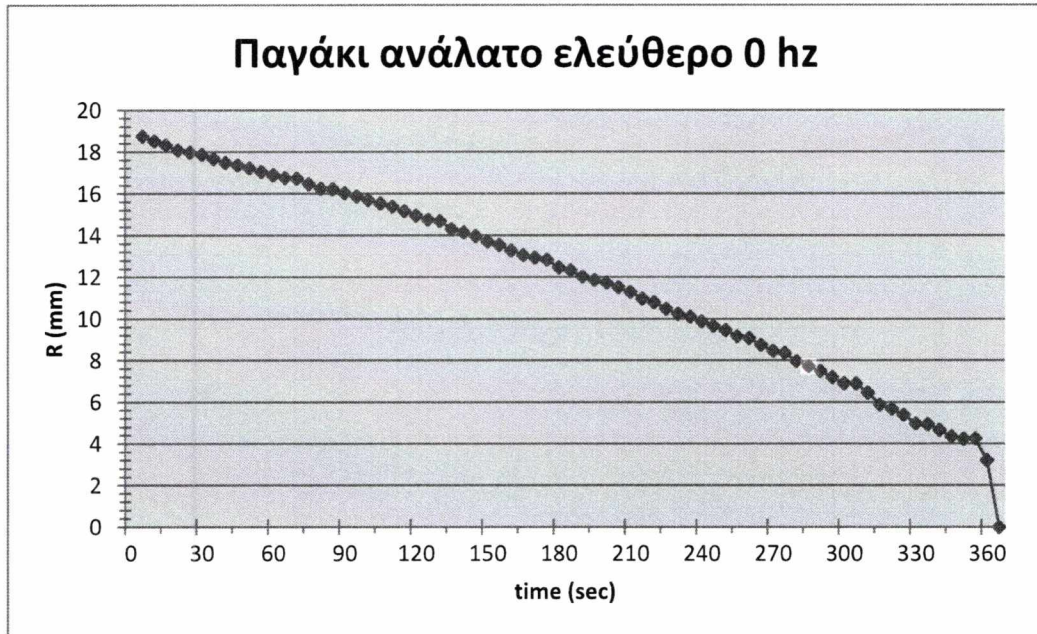
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, μέσω διαγραμμάτων. Αρχικά παρουσιάζεται η συμπεριφορά κάθε περίπτωσης δοκιμίων σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων που εξετάστηκαν, και στη συνέχεια γίνονται συγκρίσεις μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την ακτίνα των δοκιμίων σε mm, και ο οριζόντιος τη χρονική στιγμή σε sec (εκτός από την περίπτωση του σφαιριδίου γλυκόζης όπου δίνεται σε min). Στο τέλος εργασίας παρουσιάζονται στο παράρτημα όλες οι τιμές και όλα τα διαγράμματα συγκεντρωτικά.

5.1. Αποτελέσματα για δοκίμια ανάλατου πάγου

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με δοκίμια πάγου, χωρίς περιεκτικότητα άλατος, με τη μορφή διαγραμμάτων. Διακρίνονται δύο κατηγορίες πειραμάτων, η πρώτη περιλαμβάνει δοκίμια τα οποία διαλύονται σε ορθογωνική κοιλότητα και η δεύτερη δοκίμια που διαλύονται 'ελεύθερα' εκτός κοιλότητας.

5.1.1 Ανάλατος πάγος χωρίς κοιλότητα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα πειράματα, όπου τα δοκίμια ήταν απλός πάγος, παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγραμμάτων. Σε κάθε συχνότητα που μελετήθηκε αντιστοιχεί ένα διάγραμμα. Με τον όρο ελεύθερο αναφέρεται η κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχει παρουσία κοιλότητας. Τα πειράματα που διεξήχθησαν σε κοιλότητα παρατίθενται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.



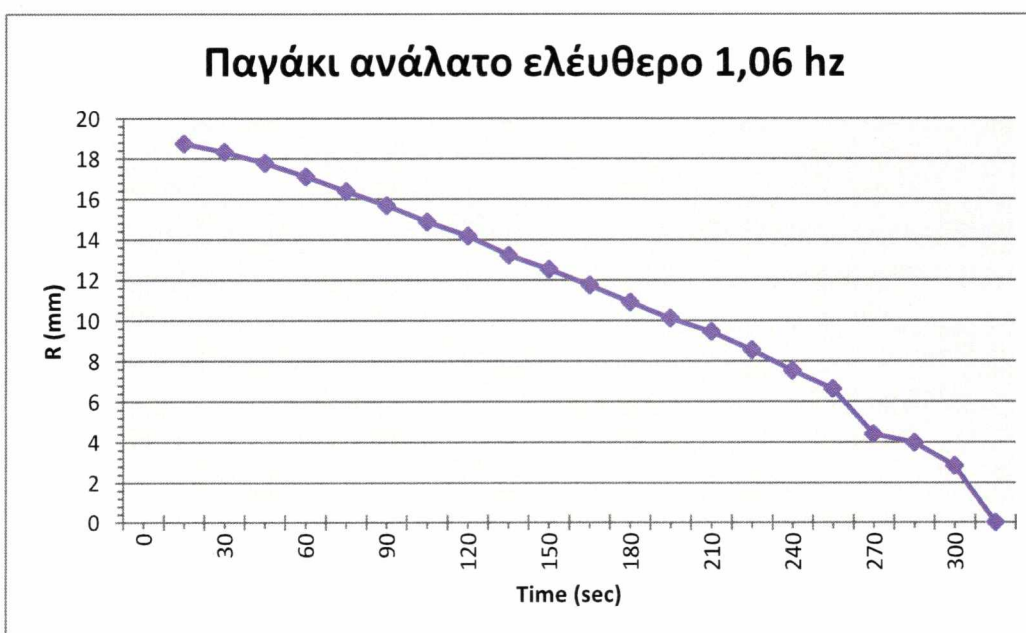
Διάγραμμα 5.1- Ανάλατο σφαιρίδιο πάγου σε 0 Hz

Το παραπάνω πείραμα διεξήχθη σε στάσιμο νερό θερμοκρασίας 18 °C και το δοκίμιο βρισκόταν σε θερμοκρασία -2 °C , ο χρόνος που απαιτήθηκε για την πλήρη διάλυση του συγκεκριμένου δοκιμίου ήταν 360 sec. Η κλίση του διαγράμματος πέραν του χρόνου των 345 sec παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στον εγκλωβισμό φυσαλίδων οξυγόνου κατά την παραγωγή των δοκιμίων. Οι φυσαλίδες αυτές αναγνωρίζονται από τον κώδικα σαν φωτεινά σημεία (bright spots) και κατ' επέκταση τμήμα του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι φυσαλίδες διαλύονται γρήγορα με αποτέλεσμα την απότομη μείωση της ακτίνας αυξάνοντας έτσι την κλίση του διαγράμματος. Μια άλλη προσέγγιση είναι αποκόλληση τμήματος του δοκιμίου λόγω ατελειών στη συνοχή του με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται απότομη μείωση της ακτίνας από τον κώδικα.



Διάγραμμα 5.2- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 0,69 Hz

Σε αυτή την περίπτωση στο περιβάλλον ρευστό δημιουργήθηκε κυματισμός, λόγω της ταλάντωσης του πλέγματος σε συχνότητα 0,69 hz. Παρατηρείται πως για τις ίδιες συνθήκες απαιτούνται κάποια δευτερόλεπτα παραπάνω ώστε το δοκίμιο να διαλυθεί πλήρως.



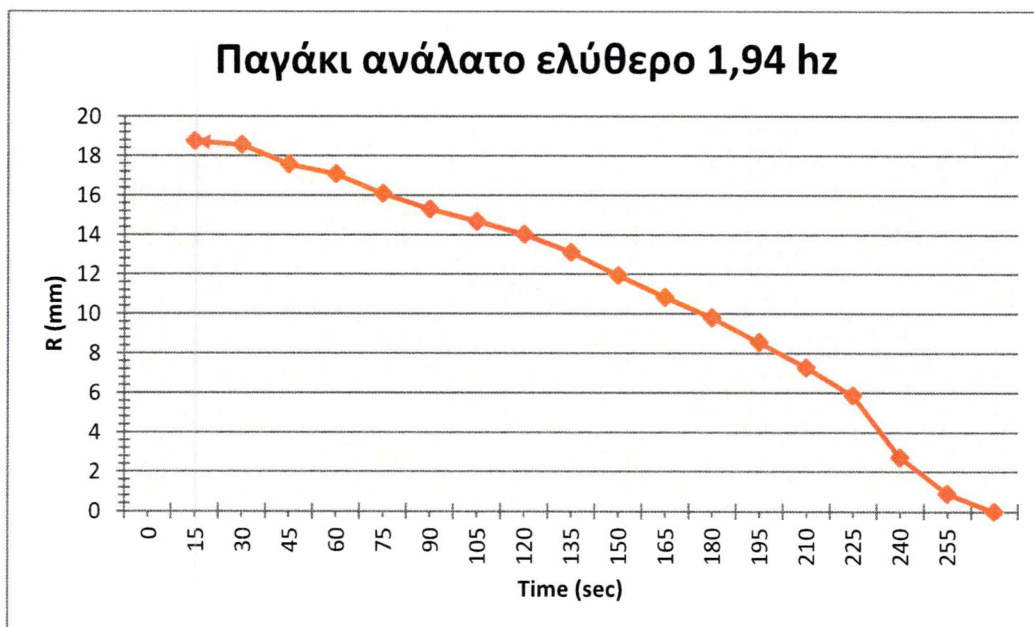
Διάγραμμα 5.3- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,06 Hz

Στη συχνότητα των 1,06 Hz παρατηρείται πως ο χρόνος για την τήξη του δοκιμίου μειώνεται σε κάτι παραπάνω από 300 sec.



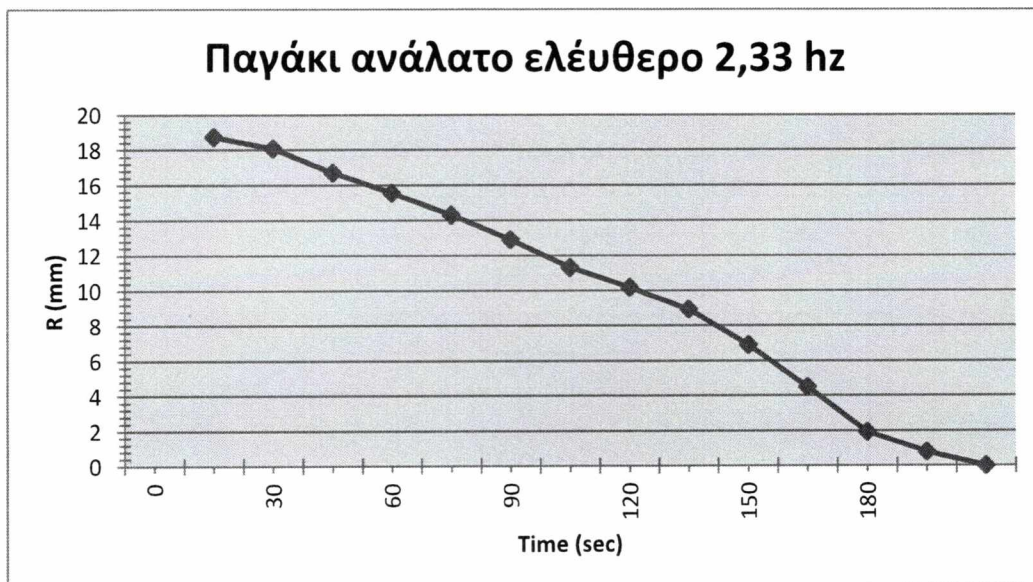
Διάγραμμα 5.4- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε 1,42 hz

Παρατηρείται η συνεχής μείωση του χρόνου που απαιτείται για την πλήρη τήξη του δοκιμίου. Επίσης επιβεβαιώνεται πως η ένταση της παραγόμενης τύρβης, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα ταλάντωσης του πλέγματος, έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το χρόνο πλήρους διάλυσης.

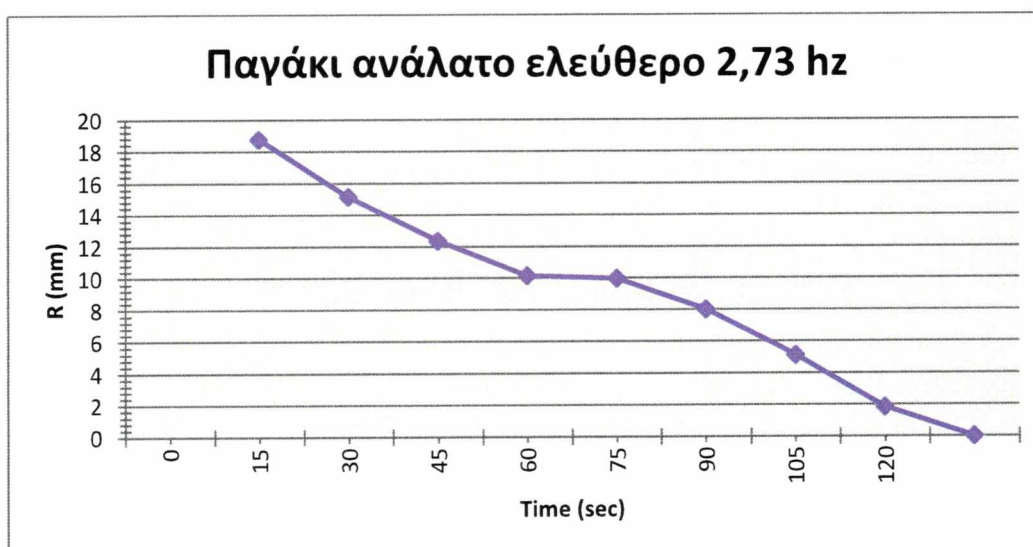


Διάγραμμα 5.5- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,94 hz

Ο χρόνος διάλυσης συνεχίζει πτωτικά.



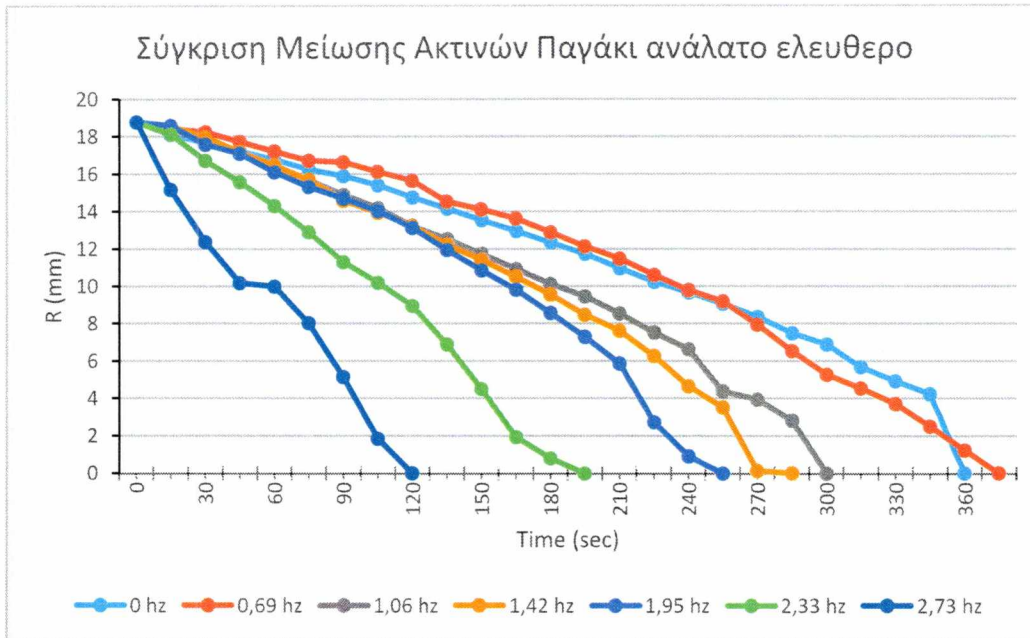
Διάγραμμα 5.6- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 2,33 hz



Διάγραμμα 5.7- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 2,73 hz

Σε αυτό το πείραμα η επιρροή της τυρβώδους εντάσεως στο χρόνο τήξεως του δοκιμίου φαίνεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη, καθώς ο χρόνος που απαιτείται είναι προσεγγιστικά 30% μειωμένος σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο των 0 Hz.

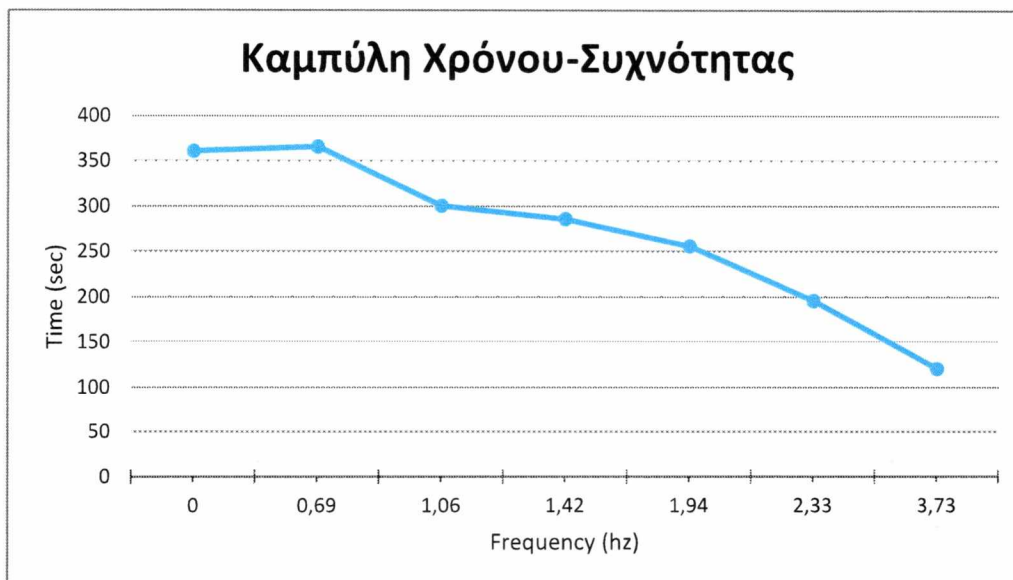
5.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για ανάλατο δοκίμιο πάγου



Διάγραμμα 5.8- Συγκριτικό διάγραμμα ακτίνας σε σχέση με τον χρόνο

Το παραπάνω διάγραμμα είναι συγκεντρωτικό και παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε όλες τις σειρές πειραμάτων πάγου χωρίς περιεκτικότητα άλατος. Παρατηρείται το γεγονός που αναφέρεται παραπάνω, ότι σε υψηλότερες συχνότητες ταλάντωσης η διαδικασία πλήρους διάλυσης του δοκιμίου μειώνεται χρονικά. Σε χαμηλότερες δε συχνότητες ταλάντωσης η επίδραση της έντασης της τύρβης είναι μικρότερης κλίμακας.

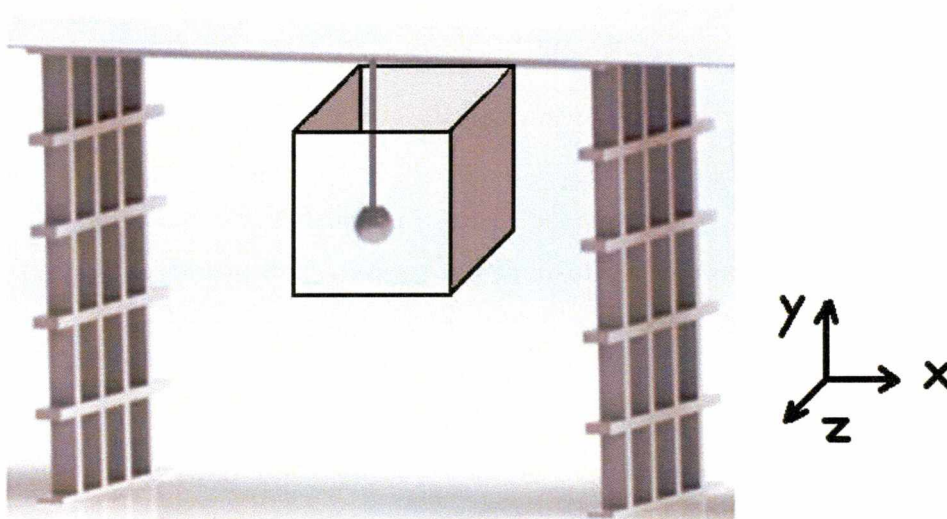
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η καμπύλη που σχηματίζεται μεταξύ χρόνου διάλυσης και συχνότητας ταλάντωσης πλέγματος. Παρατηρείται ότι η κλίση της καμπύλης μετά τη συχνότητα των 1,06 Hz είναι αισθητά πιο απότομη.



Διάγραμμα 5.9- Καμπύλη Χρόνου διάλυσης-Συχνότητας

5.1.3 Δοκίμια Ανάλατου πάγου σε κοιλότητα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με δοκίμια πάγου χωρίς περιεκτικότητα σε άλας, τα οποία τοποθετήθηκαν σε κοιλότητα ορθογωνικής διατομής. Όπως και στα παραπάνω διαγράμματα ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την ακτίνα σε mm του δοκιμίου και ο οριζόντιος τον χρόνο σε sec.

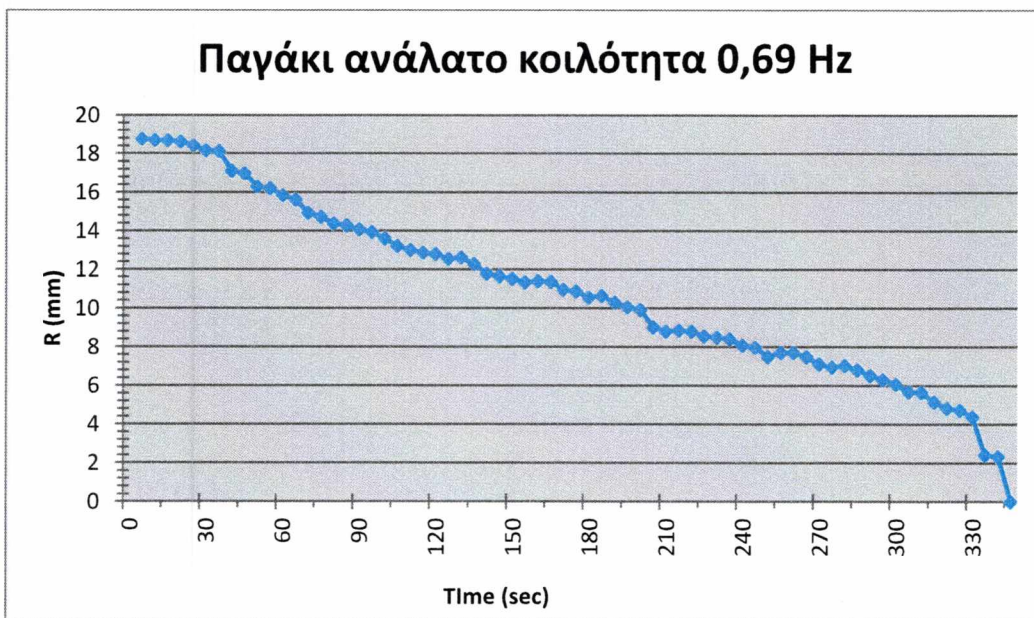


Εικόνα 5.1- Δοκίμιο σε κοιλότητα ορθογωνικής διατομής



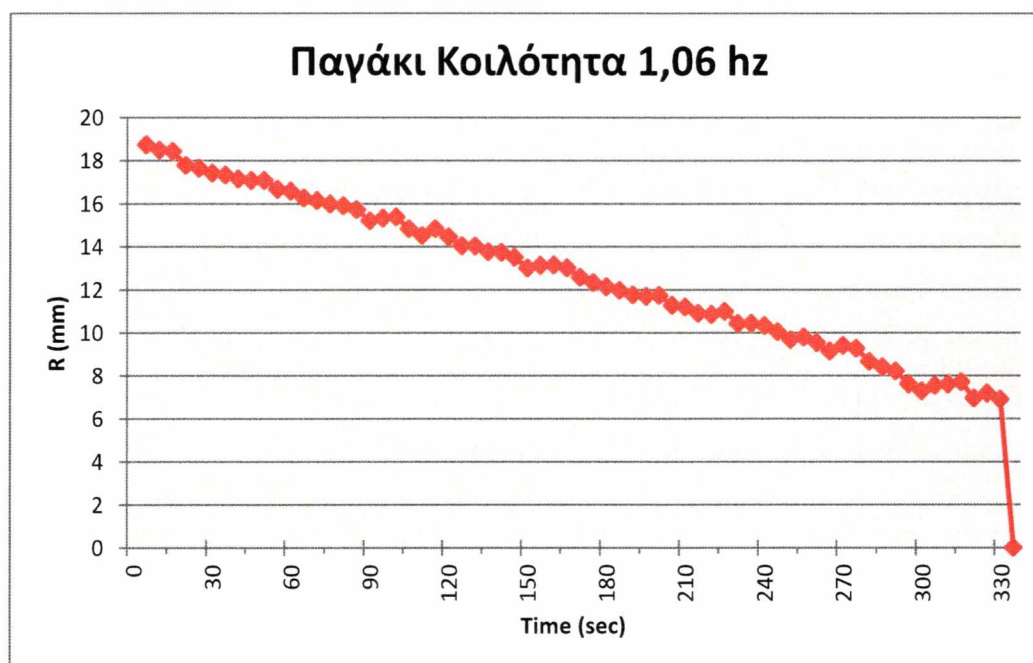
Διάγραμμα 5.10- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα συχνότητα 0 Hz

Οι συνθήκες του πειράματος είναι ίδιες. Η θερμοκρασία του ρευστού είναι $T_{\text{ρερού}} = 18$ °C και του δοκιμίου $T_{\text{πάγου}} = -2$ °C. Το δοκίμιο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρευστό έχει την ίδια θερμοκρασία χωρίς την παρουσία τύρβης. Οι συνθήκες λοιπόν στις οποίες υποβάλλεται το δοκίμιο είναι ίδιες με αυτές του πειράματος 'ελεύθερου ανάλατου πάγου σε συχνότητα 0 Hz'.



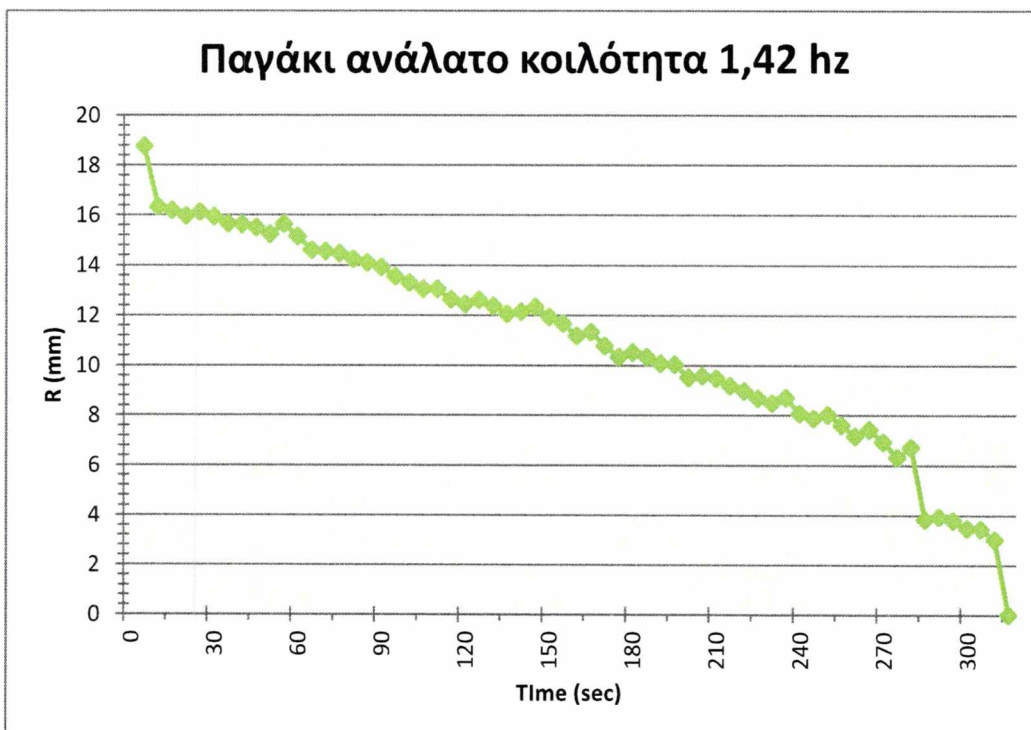
Διάγραμμα 5.11- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 0,69 Hz

Στο συγκεκριμένο πείραμα παρουσιάζεται μια μικρής κλίμακας μείωση στο χρόνο που απαιτείται για την πλήρη διάλυση του δοκιμίου. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ακτίνα αρχικά μειώνεται με αρκετά χαμηλό ρυθμό, αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η παρουσία της κοιλότητας μειώνει την επίδραση της τύρβης στο δοκίμιο καθώς η ροή του ρευστού στο εσωτερικό της δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Έτσι, η ροή στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι αρχικά μεταβατική και η ταχύτητα του ρευστού στα κατώτερα στρώματα της κοιλότητας είναι πρακτικά μηδενική. Έτσι η συμπεριφορά του δοκιμίου προσεγγίζει την συμπεριφορά του πειράματος με μηδενική συχνότητα για το χρονικό διάστημα από 0 έως 30 sec.



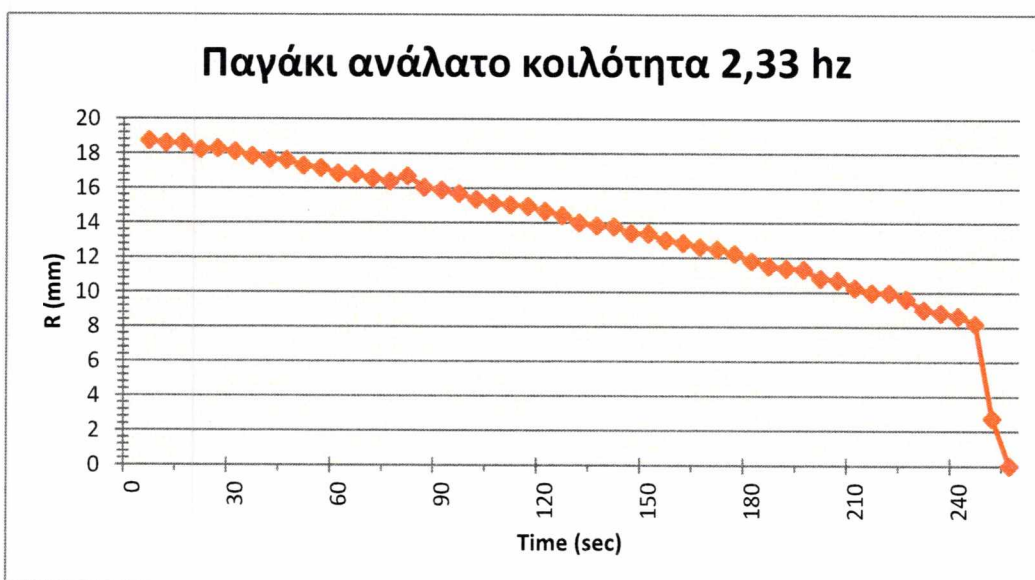
Διάγραμμα 5.12- Ανάλυτο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 1,06 hz

Η χρονική μείωση για την πλήρη τήξη του δοκιμίου είναι μικρής κλίμακας και παρατηρείται πάλι το φαινόμενο της απότομης μείωσης της ακτίνας.



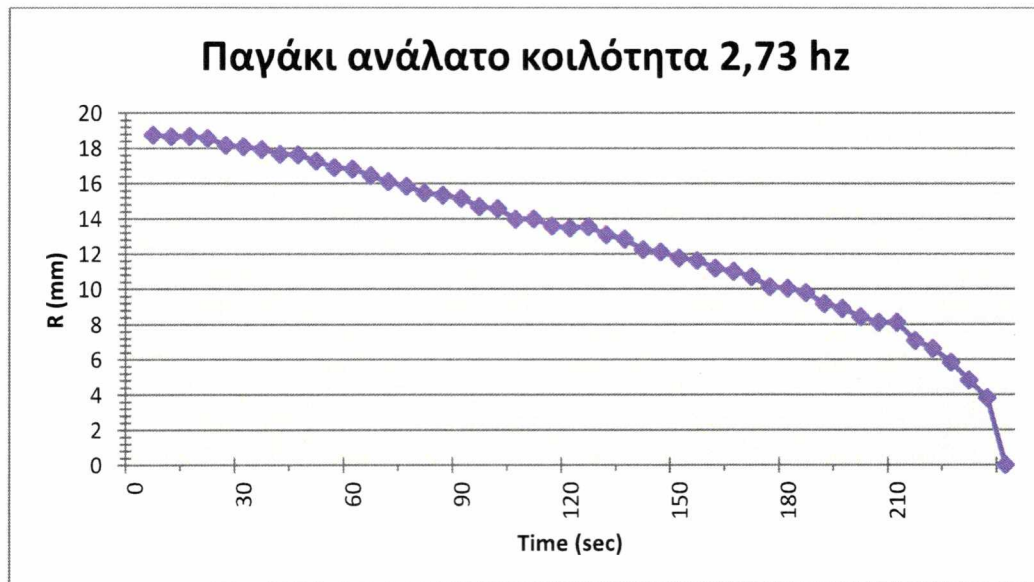
Διάγραμμα 5.13- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 1,42 hz

Στο πείραμα συχνότητας 1,42 hz φαίνεται ότι η αποκόλληση τμήματος του δοκιμίου προέκυψε σε δύο φάσεις. Η πρώτη αποκόλληση προέκυψε μετά την πάροδο 270 sec και η δεύτερη 40sec αργότερα. Ενδεχομένως να συνέβη και άλλη μια αποκόλληση στα πρώτα δευτερόλεπτα του πειράματος.



Διάγραμμα 5.14- Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 2,33 hz

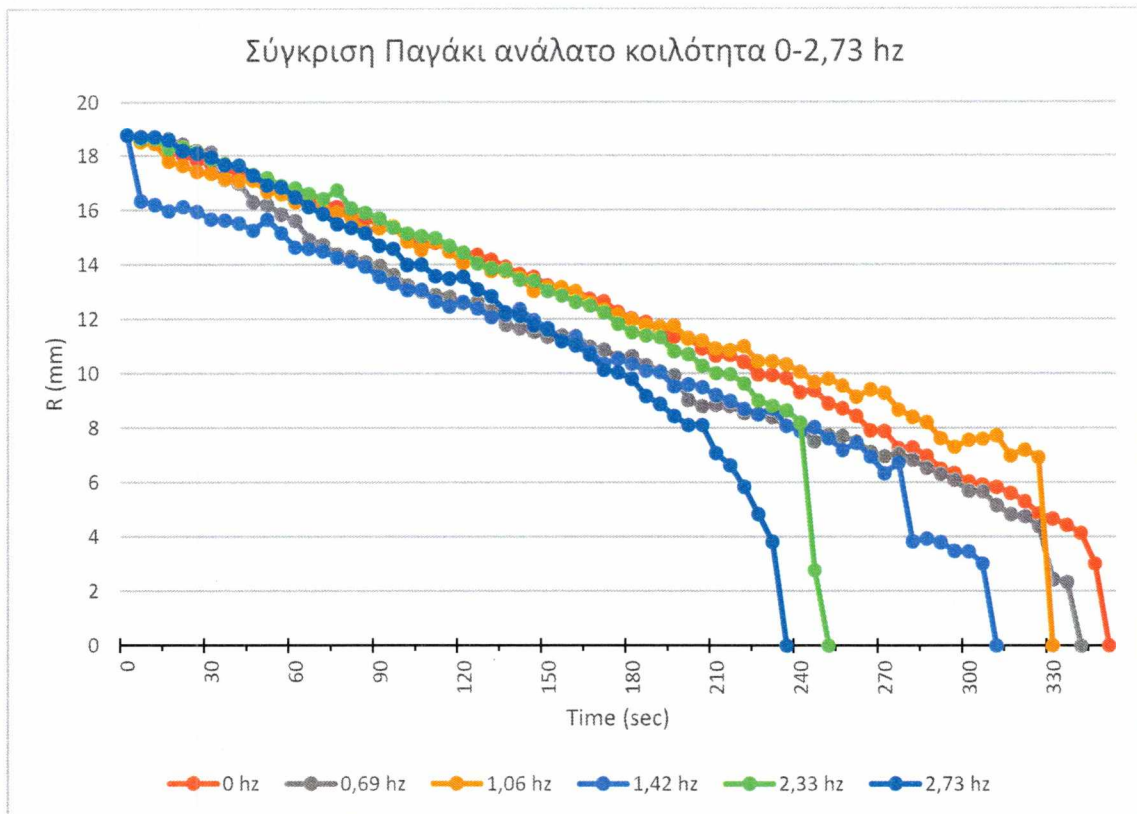
Η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος 5.14 είναι σαφώς πιο απότομη σε σχέση με το πείραμα συχνότητας 1,42 hz και ο χρόνος που παρενέβη ώστε να διαλυθεί το δοκίμιο είναι αισθητά μικρότερος.



Διάγραμμα 5.15 Ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα σε συχνότητα 2,73 hz

Παρατηρείται ότι ο χρόνος συνεχίζει να μειώνεται κατά κανόνα και η κλίση της καμπύλης στο τελευταίο στάδιο του πειράματος παρουσιάζει κάποια εξομάλυνση, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι απότομες κλίσεις που παρουσιάζονται στα διαγράμματα, είναι προϊόν των ατελειών που προκύπτουν κατά την παρασκευή των δοκιμίων.

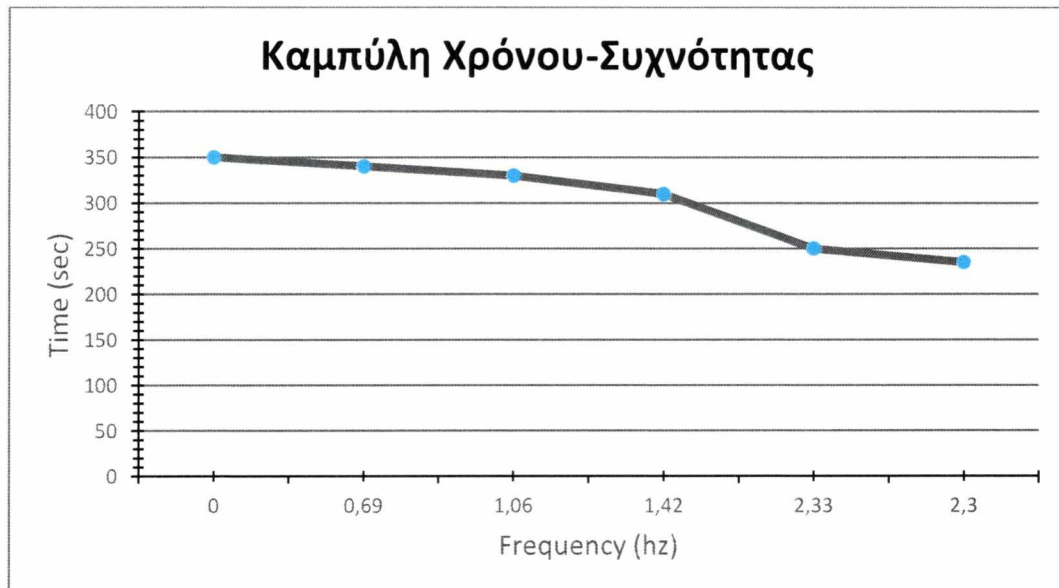
5.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα



Διάγραμμα 5.16- Συγκριτικό διάγραμμα Ακτίνας-Χρόνου για ανάλατο δοκίμιο πάγο

Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα φαίνεται ότι, μέχρι το χρονικό διάστημα των 210 sec, οι καμπύλες των πειραμάτων ακολουθούν παρόμοια πορεία, με την παρουσία βέβαια των αναμενόμενων διακυμάνσεων. Οι αποκλίσεις που προκύπτουν μεταξύ των καμπυλών από αυτό το χρονικό όριο και έπειτα είναι σημαντικές και η ταχύτητα τήξης αυξάνεται ραγδαία. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων με αποτέλεσμα, την εξασθένιση των δεσμών μεταξύ των μορίων του πάγου, επιταχύνοντας έτσι την τήξη. Επίσης η αύξηση της εντάσεως της τύρβης ενισχύει σημαντικά τη μεταφορά μάζας με αποτέλεσμα η διάλυση των δοκιμίων να είναι σημαντικά συντομότερη. Ακόμη μια παρατήρηση που προκύπτει από το συγκεντρωτικό διάγραμμα είναι πως εμφανίζεται μια κρίσιμη ακτίνα, της τάξης

περίπου των 2-3 mm, όπου η αστοχία της αποκόλλησης τμήματος του δοκιμίου είναι συχνότερη.



Διάγραμμα 5.17- Καμπύλη Χρόνου διάλυσης-Συχνότητας

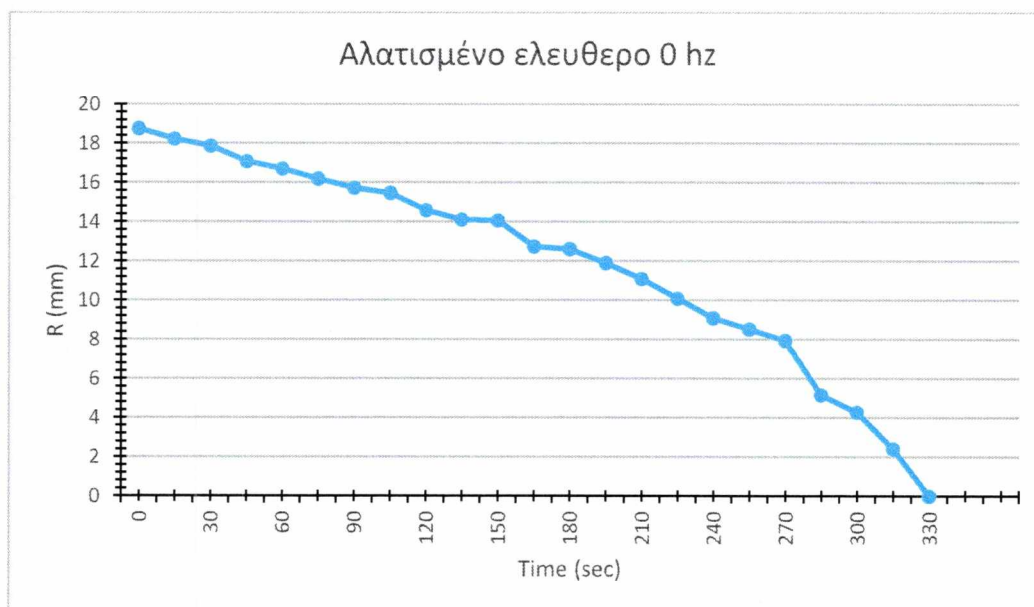
Το διάγραμμα 5.18 καθιστά εμφανή την επίδραση της κοιλότητας στο τυρβώδες πεδίο. Σε σύγκριση με το διάγραμμα 5.9 φαίνεται πως η καμπύλη παρουσιάζει μικρότερη κλίση, γεγονός που επιδεικνύει πως η παρουσία της κοιλότητας περιορίσει τη ταχύτητα πλήρους διάλυσης σε υψηλές συχνότητες.

5.2 Αποτελέσματα για δοκίμια πάγου με περιεκτικότητα σε άλας σύστασης 1020

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων διαχωρίζεται πάλι στις δύο κατηγορίες που αναφέρονται στην παρουσία ή όχι κοιλότητας.

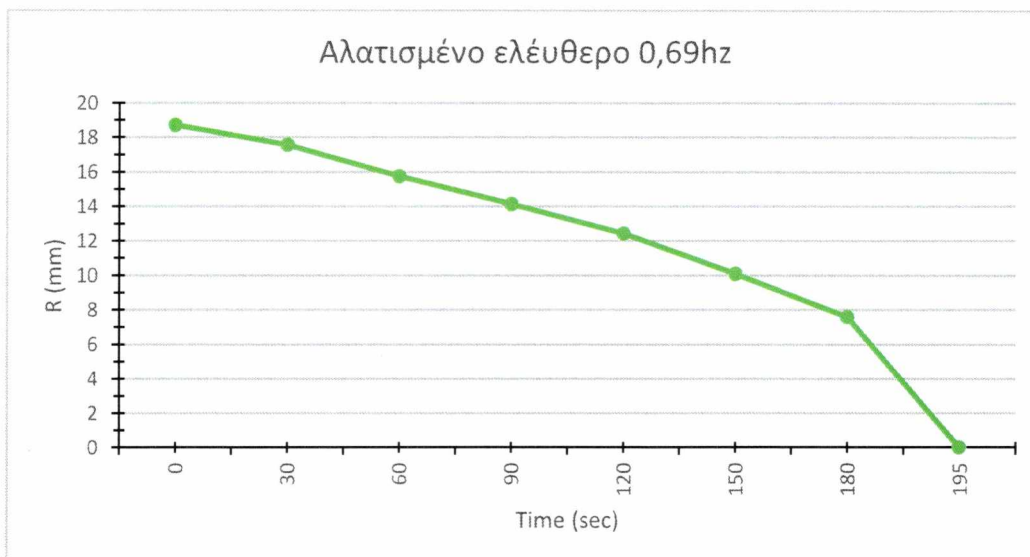
5.2.1 δοκίμια πάγου με σύσταση 1020 σε άλας χωρίς κοιλότητα

Στην προσεχή ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με δοκίμια πάγου κατασκευασμένα από υδατικό διάλυμα άλατος (NaCl) περιεκτικότητας 2%. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις πειραμάτων ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την ακτίνα του δοκιμίου και ο οριζόντιος τον χρόνο διάλυσης.



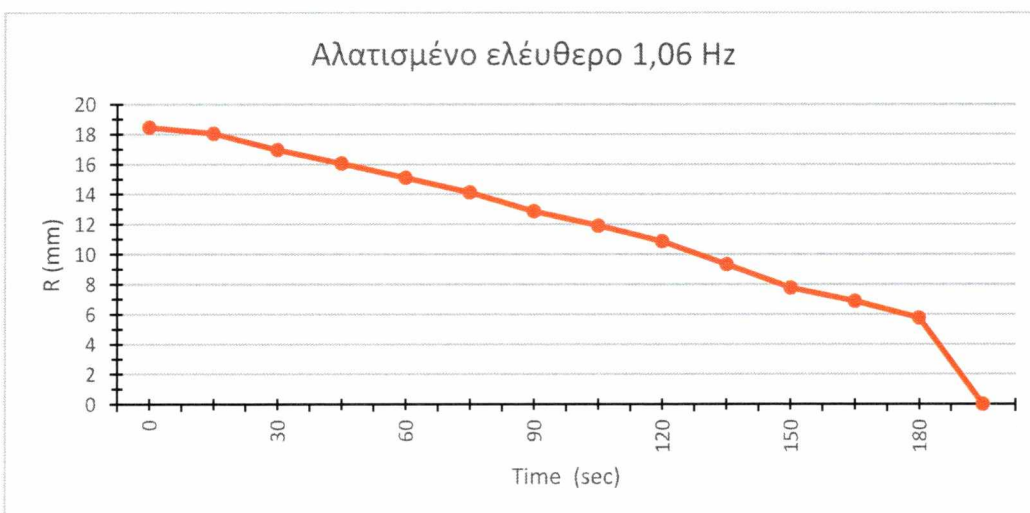
Διάγραμμα 5.18- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 0 Hz

Παρατηρείται πως ο χρόνος της πλήρους διάλυσης του δοκιμίου σε κατάσταση ηρεμίας του ρευστού ανέρχεται σε 330 sec.



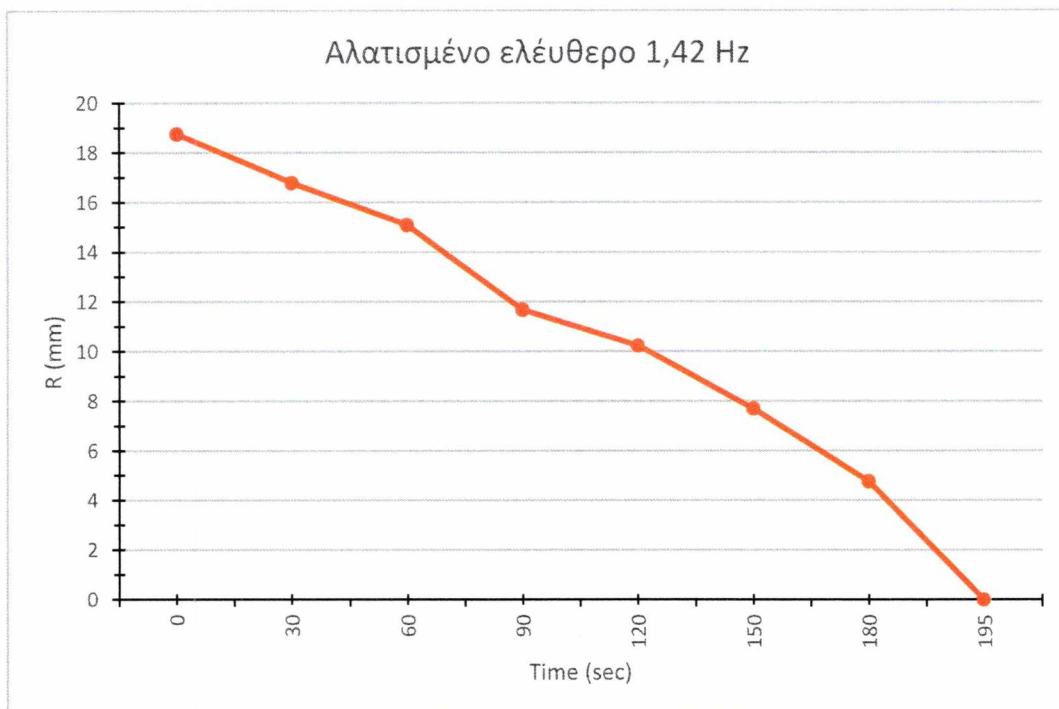
Διάγραμμα 5.19- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 0,69 Hz

Ο απαιτούμενος χρόνος διάλυσης του δοκιμίου σε συνθήκες τυρβώδους κίνησης του ρευστού παρουσιάζει μεγάλη χρονική απόκλιση. Επίσης η καμπύλη εμφανίζει κάποια εξομάλυνση σε σχέση με τις προηγούμενες σειρές πειραμάτων οι καμπύλες των οποίων παρουσίαζαν αρκετά ‘σκαμπανεβάσματα’. Αντίθετα η καμπύλη του διαγράμματος 5.20 φαίνεται να αποτελείται από τέσσερις επιμέρους γραμμικές καμπύλες οι οποίες εντοπίζονται στα χρονικά διαστήματα από 0 έως 30 sec, από 30 έως 120 sec, από 120 έως 180 sec και τέλος από 180 μέχρι 195 sec όπου και το δοκίμιο έχει διαλυθεί πλήρως.



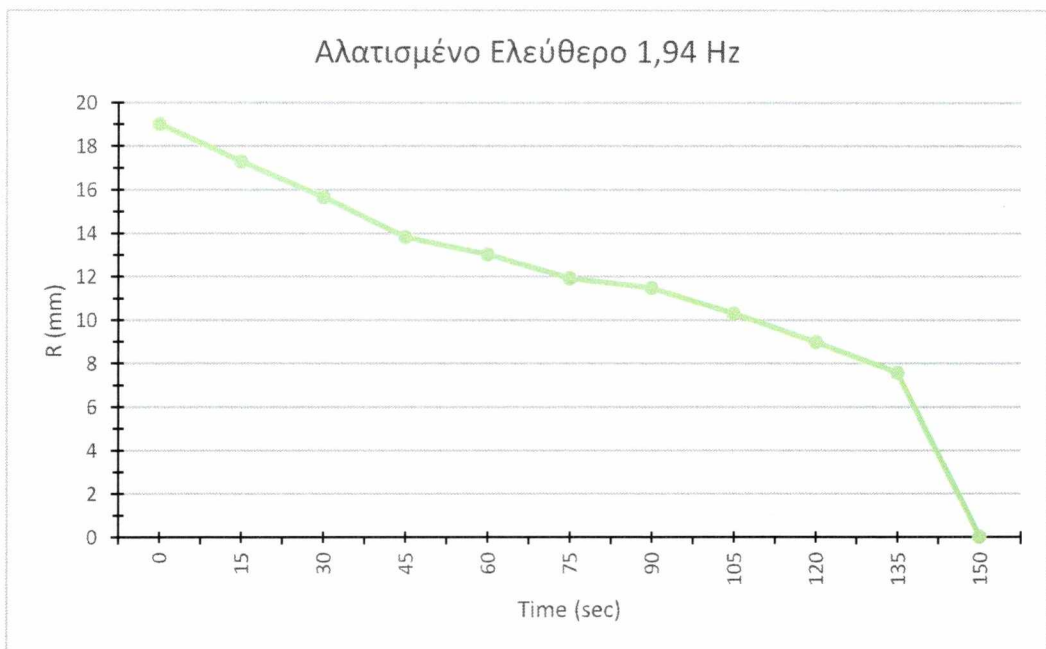
Διάγραμμα 5.20- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,06 Hz

Η καμπύλη του παραπάνω διαγράμματος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με το διάγραμμα 5.19, η καμπύλη είναι ομαλή και ο χρόνος τήξης διαμορφώνεται πάλι περίπου στα 195 sec.



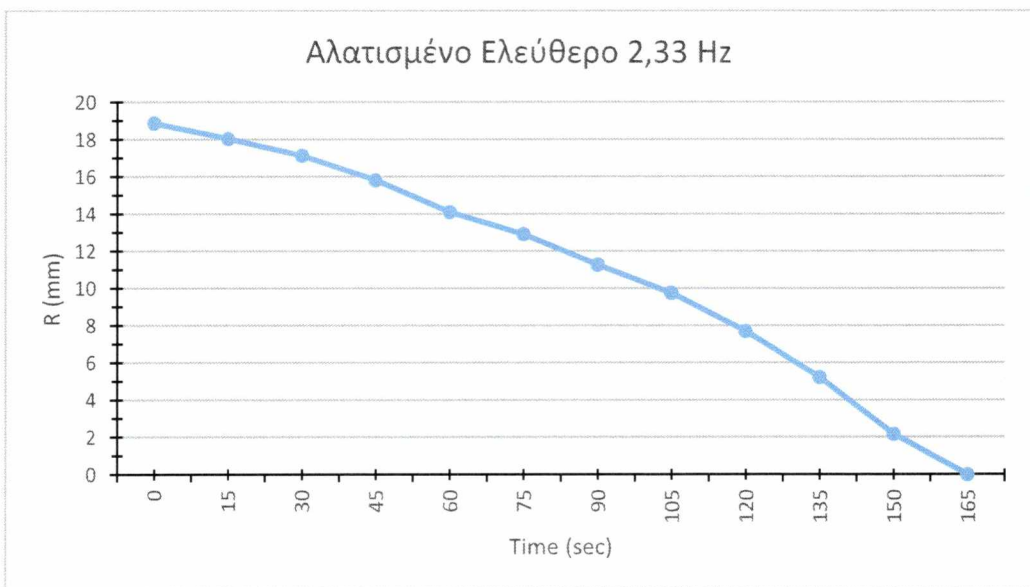
Διάγραμμα 5.21- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,42 Hz

Ο απαιτούμενος χρόνος διάλυσης στα πειράματα συχνότητας 0,69 , 1,06 και 1,42 Hz είναι ίδιος, τα δοκίμια διαλύθηκαν πλήρως μετά την πάροδο 195 sec. Στα τελευταία δευτερόλεπτα της διεξαγωγής του πειράματος όταν η ακτίνα του δοκιμίου ήταν αρκετά μικρή, παρουσιάστηκε το φαινόμενο της αποκοπής του υπολείποντος δοκιμίου από τον φορέα (ντίζα) στον οποίο ήταν προσαρμοσμένο με αποτέλεσμα το δοκίμιο να απομακρύνεται από το πεδίο παρατήρησης. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός όπου το δοκίμιο στη συχνότητα των 0,69 Hz τη χρονική στιγμή των 180 sec, παρουσιάζει μεγαλύτερη διάμετρο από το αντίστοιχο των 1,06 Hz την ίδια χρονική στιγμή και αυτό κατά σειρά μικρότερη διάμετρο από το δοκίμιο των 1,42 Hz.



Διάγραμμα 5.22- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 1,94 Hz

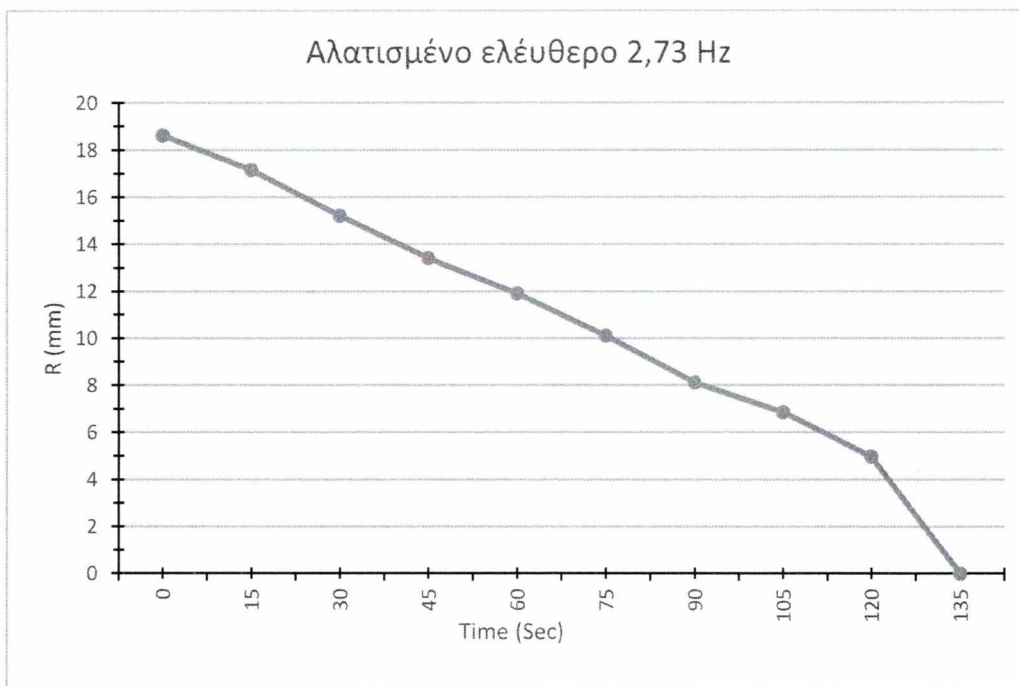
Στο συγκεκριμένο πείραμα ο απαιτούμενος χρόνος είναι αισθητά μειωμένος, με την επίδραση της τύρβης να είναι αρκετά πιο έντονη.



Διάγραμμα 5.23- Αλατισμένο δοκίμιο πάγου σε συχνότητα 2,33 Hz

Συγκρίνοντας το διάγραμμα 5.24 με το 5.23 προκύπτει ότι ο χρόνος τήξης του δοκιμίου σε συχνότητα 2,33 Hz είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των 1,94 Hz. Το γεγονός

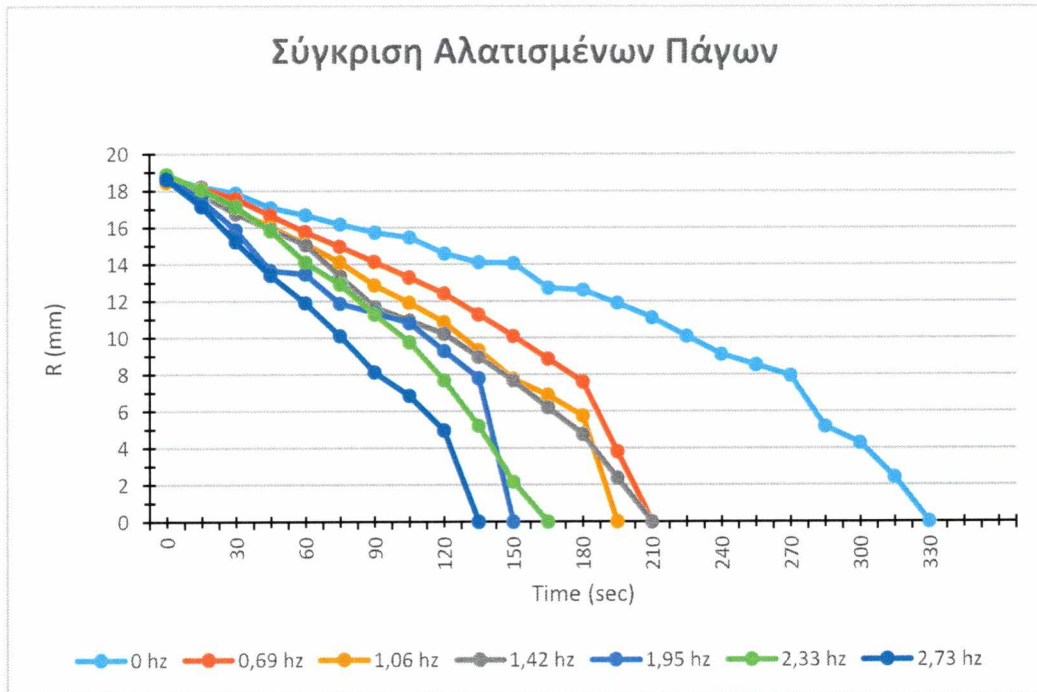
αυτό είναι αδύνατο μιας και η εντονότερη τύρβη θα επιφέρει διάλυση σε συντομότερο χρονικό διάστημα, ιδίως σε υψηλές συχνότητες. Το γεγονός αυτό οδηγεί με βεβαιότητα στο συμπέρασμα ότι προέκυψε αστοχία αποκόλλησης του δοκιμίου στο πείραμα των 1,94 Hz. Παρόλα αυτά η κλίση της καμπύλης μπορεί να δώσει ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την ταχύτητα της τήξης του σφαιριδίου.



Διάγραμμα 5.24- Αλατισμένο δοκίμιο σε συχνότητα 2,73 Hz

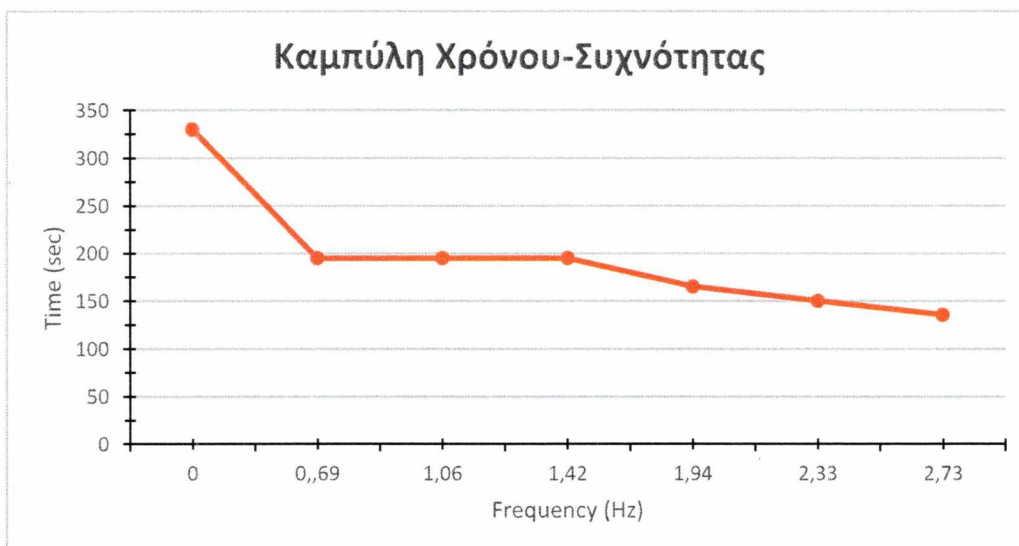
Το συμπέρασμα που εξάγεται παρατηρώντας την καμπύλη του τελευταίου πειράματος δοκιμίων με περιεκτικότητα άλατος, είναι το αναμενόμενο, η περαιτέρω μείωση δηλαδή του απαιτούμενου χρόνου διάλυσης.

5.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλατισμένα δοκίμια πάγου χωρίς κοιλότητα



Διάγραμμα 5.25- Συγκριτικό διάγραμμα Ακτίνας-Χρόνου για αλατισμένο δοκίμιο πάγου

Με το παραπάνω συγκεντρωτικό διάγραμμα γίνεται αντιληπτό πως το δοκίμιο που διαλύεται σε στάσιμο ρευστό, απαιτεί περισσότερο χρόνο για την πλήρη διάλυση του σε σχέση με τα δοκίμια που διαλύθηκαν υπό την επίδραση τυρβώδους πεδίου. Επίσης οι χρόνοι τήξης για τα δοκίμια των συχνοτήτων 0,69 , 1,06 και 1,42 Hz έχουν σχετικά μικρή απόκλιση. Το ίδιο παρατηρείται και για τα δοκίμια των συχνοτήτων 1,94 , 2,33 και 2,73 Hz. Οι σημαντικότερες διαφορές στους χρόνους εντοπίστηκαν κατά τη μετάβαση από την κατάσταση ηρεμίας του ρευστού (0Hz) σε τυρβώδη ροή καθώς επίσης και από τη συχνότητα των 1,42 Hz στις υψηλότερες συχνότητες.

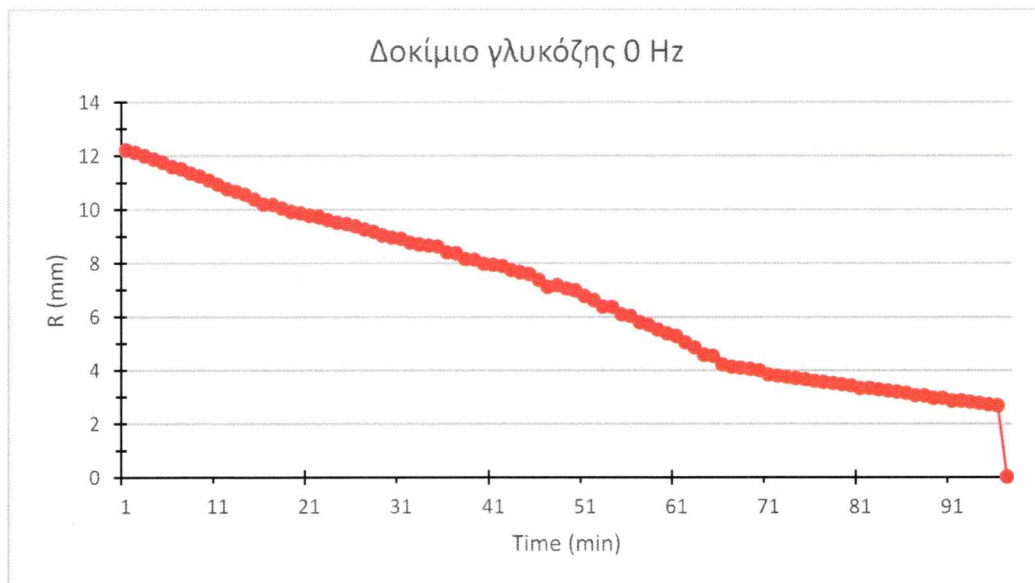


Διάγραμμα 5.26- Καμπύλη Χρόνου διάλυσης-Συχνότητας

5.3 Αποτελέσματα για σφαιρίδιο γλυκόζης

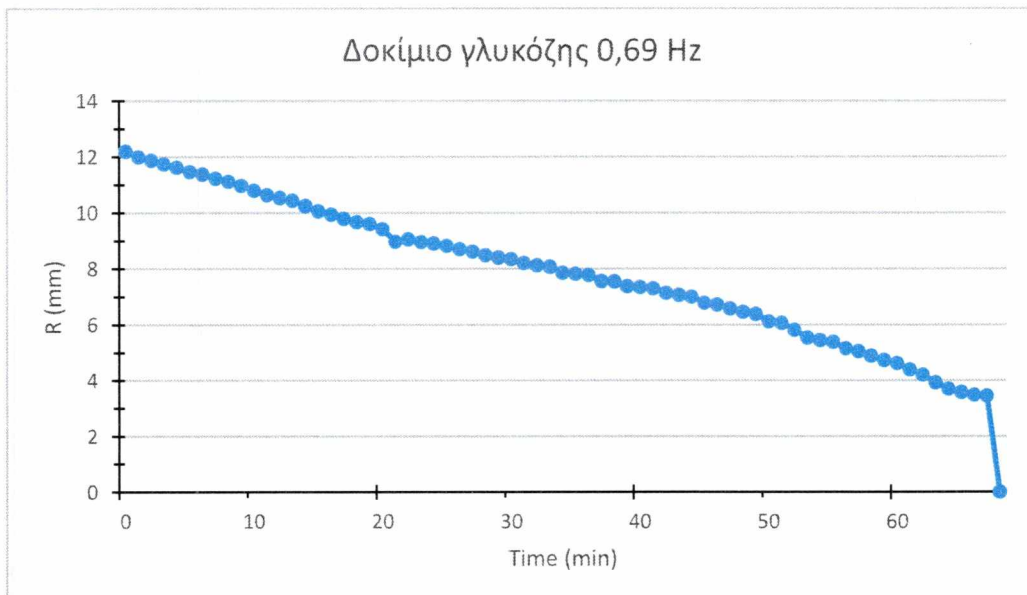
Τα ακόλουθα διαγράμματα διαφοροποιούνται σε σχέση με αυτά που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες καθώς η φύση των δοκιμίων και κατ' επέκταση η συμπεριφορά τους μεταβάλλεται σημαντικά. Τα δοκίμια που μελετώνται σε αυτή την ενότητα είναι παρασκευασμένα από μίγμα γλυκόζης. Η κύρια διαφορά τους σε σχέση με τα δοκίμια πάγου είναι ο απαιτούμενος χρόνος για την διάλυσή τους, ο οποίος είναι τόσο μεγαλύτερος ώστε μετρήθηκε σε λεπτά. Οι σειρές πειραμάτων με δοκίμια γλυκόζης πραγματοποιήθηκαν μόνο εκτός κοιλότητας, καθώς ο χρόνος διεξαγωγής τους είναι υπερβολικά υψηλός, όπως επίσης και ο όγκος των δεδομένων που προκύπτουν.

5.3.1 Σφαιρίδιο γλυκόζης χωρίς κοιλότητα



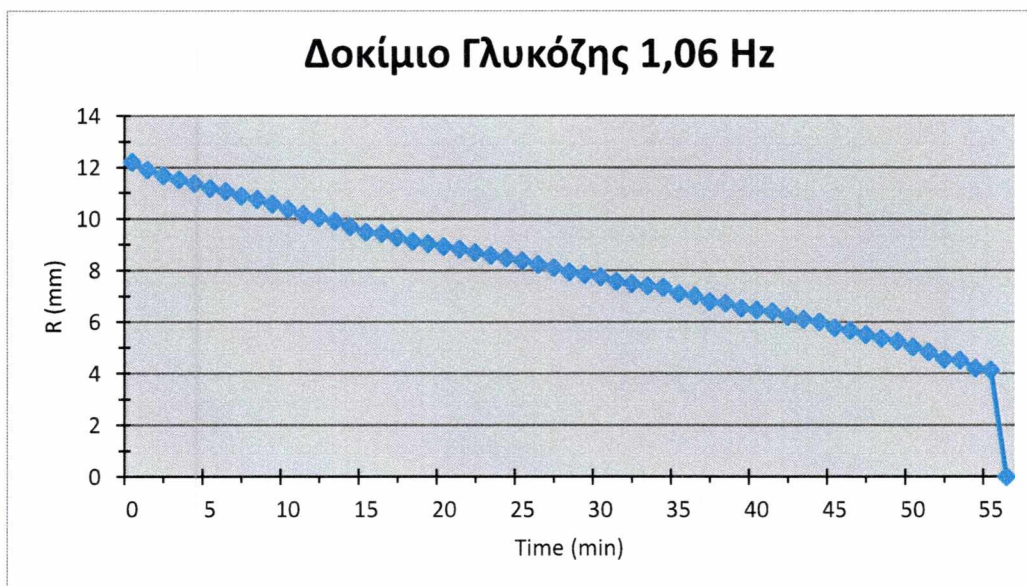
Διάγραμμα 5.27- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 0 Hz

Ο χρόνος που διανύθηκε μέχρι την πλήρη διάλυση του δοκιμίου σε μηδενική συχνότητα ήταν 97 λεπτά. Για τα αντίστοιχα δοκίμια πάγου και πάγου με περιεκτικότητα άλατος σε μηδενική συχνότητα, ο χρόνος πλήρους διάλυσης ήταν 6 και 5,5 περίπου λεπτά. Η χαώδης αυτή απόκλιση, παρόλο που τα δοκίμια γλυκόζης είχαν μικρότερη αρχική ακτίνα, αποδίδεται στους ισχυρότερους δεσμούς που υφίστανται μεταξύ των μορίων του δοκιμίου καθώς επίσης και στη μικρότερη θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταξύ δοκιμίου και ρευστού. Τα δοκίμια πάγου τοποθετήθηκαν στην πειραματική διάταξη σε θερμοκρασία $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ τα αντίστοιχα γλυκόζης σε θερμοκρασία δωματίου δηλαδή 20 με $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στην περίπτωση των σφαιριδίων πάγου η θερμοκρασιακή βαθμίδα ήταν $|T_{\text{νερού}} - T_{\text{πάγου}}| = |18 - (-2)| = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ για τα αντίστοιχα γλυκόζης ισχύει ότι $|T_{\text{νερού}} - T_{\text{γλυκ}}| = |18 - 20| = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



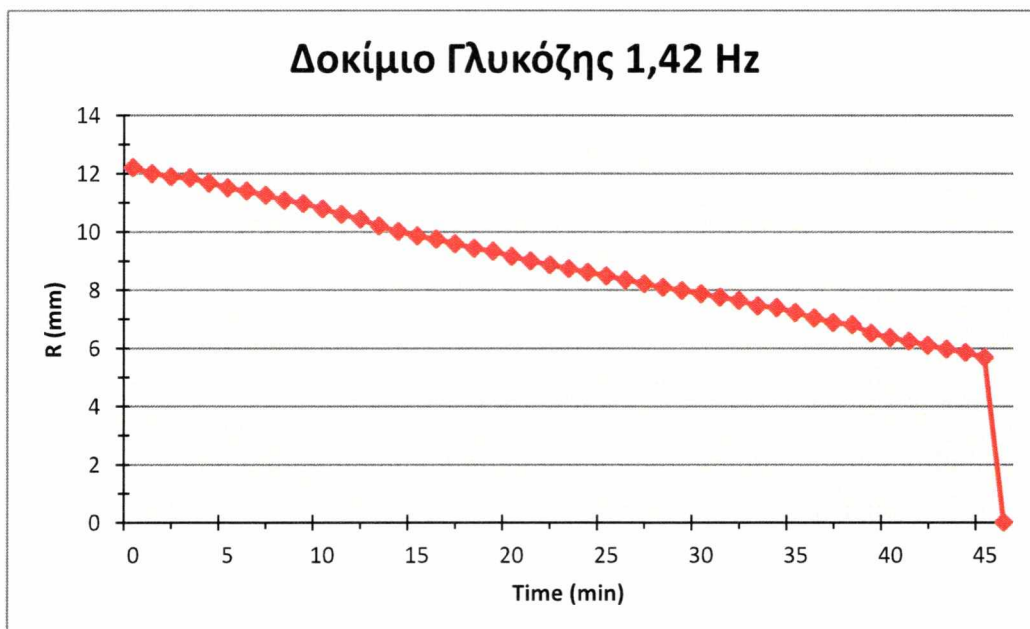
Διάγραμμα 5.28- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 0,69 Hz

Στο πείραμα με συχνότητα 0,69 Hz παρατηρείται σημαντική μείωση στον απαιτούμενο χρόνο διάλυσης. Η μείωση αυτή αγγίζει το 33% σε σχέση με το χρόνο του πειράματος των 0 Hz.



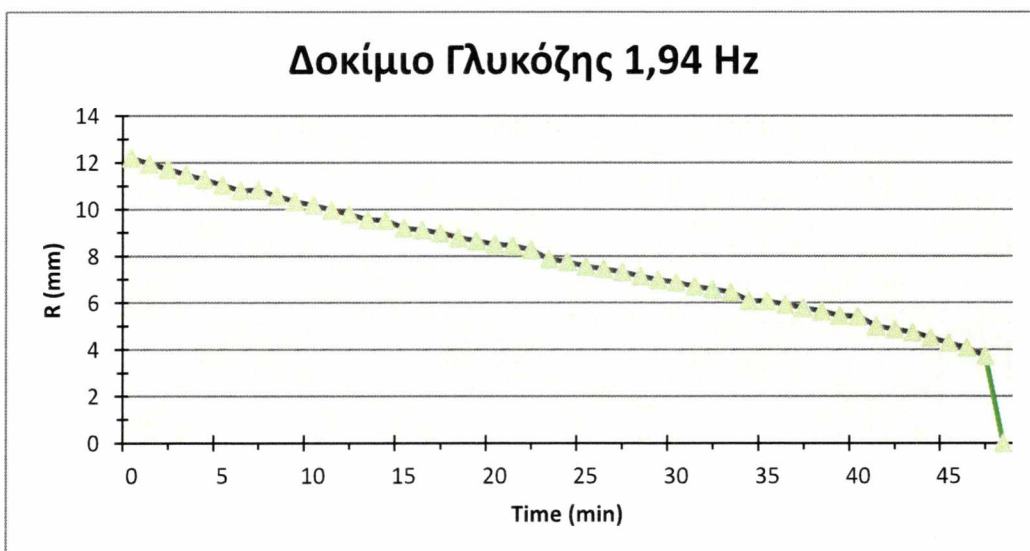
Διάγραμμα 5.29- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 1,06 Hz

Η αύξηση της συχνότητας από 0.69 σε 1.06 Hz συνέβαλλε σε περαιτέρω μείωση του χρόνου τήξης κατά 10 min.



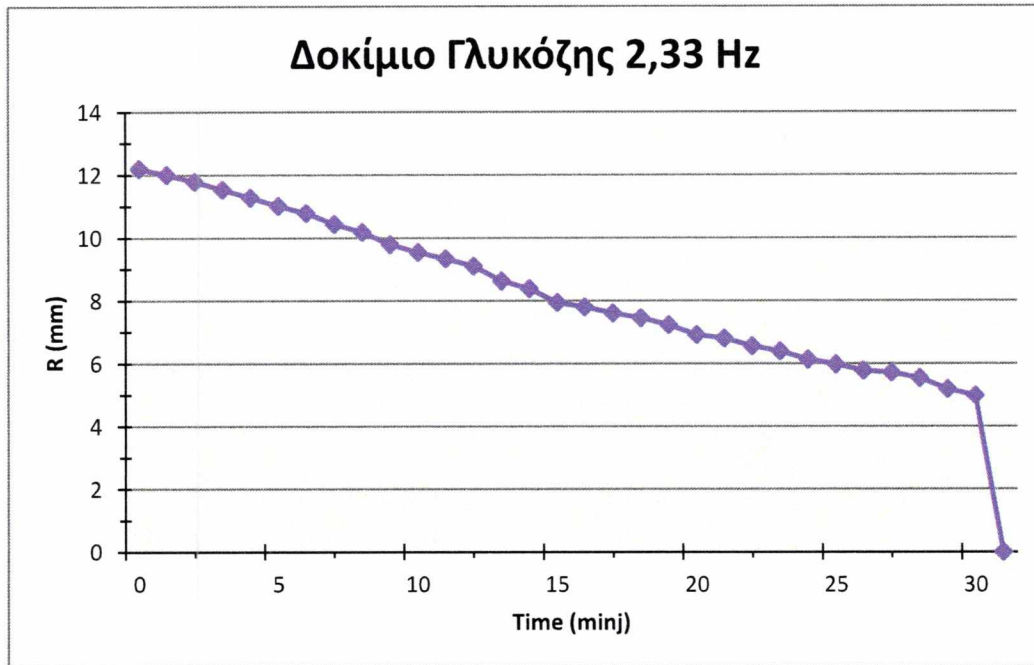
Διάγραμμα 5.30- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 1,42 Hz

Ο χρόνος διάλυσης μειώθηκε επιπλέον 10 min ποσοστό ίδιο ακριβώς σε σχέση με τα δύο προηγούμενα πειράματα.



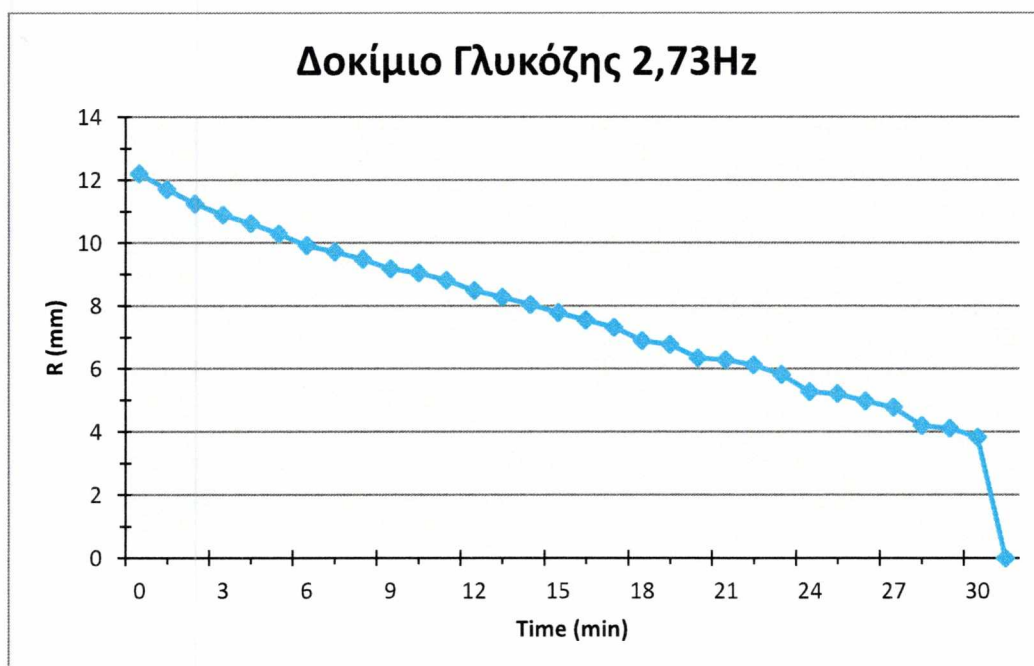
Διάγραμμα 5.31- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 1,94 Hz

Στο συγκεκριμένο πείραμα προκαλεί εντύπωση η μικρή αύξηση του χρόνου διάλυσης παρά την αύξηση της εντάσεως της τύρβης, γεγονός που επιβεβαιώνει την εμφάνιση αστοχίας στα προηγούμενα πειράματα. Η κλίση της καμπύλης βέβαια αποδεικνύει πως η διάλυση του δοκιμίου είναι τελικά ταχύτερη σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα.



Διάγραμμα 5.32- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 2,33 Hz

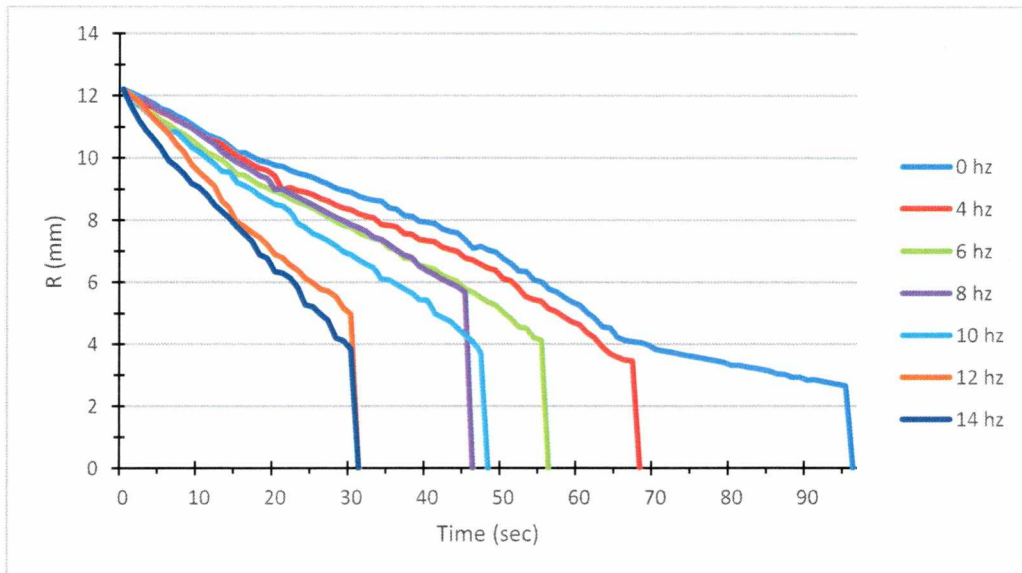
Στη συχνότητα των 2,33 Hz επιβεβαιώνεται αυτό που συμβαίνει κατά κανόνα, η περαιτέρω μείωση δηλαδή του χρόνου διάλυσης.



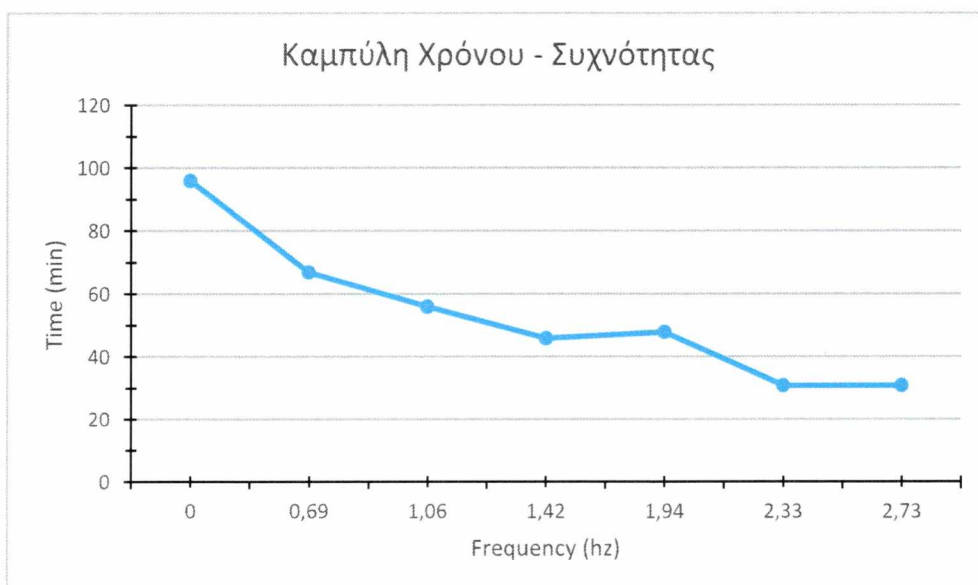
Διάγραμμα 5.33- Δοκίμιο γλυκόζης σε συχνότητα 2,73 Hz

Η συμπεριφορά του δοκιμίου είναι περίπου ίδια με το προηγούμενο πείραμα και χρόνος διάλυσης παρέμεινε στα 31 min.

5.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκίμιο γλυκόζης χωρίς κοιλότητα



Διάγραμμα 5.34- Συγκριτικό διάγραμμα Ακτίνας-Χρόνου για δοκίμιο γλυκόζης
Από το συγκριτικό διάγραμμα 5.34 παρατηρείται πως οι καμπύλες όλων των διαγραμμάτων, κατά τις τελευταίες χρονικές στιγμές των πειραμάτων, παρουσίασαν κατακόρυφη κλίση. Το γεγονός αυτό είναι προϊόν της αστοχίας που αναφέρθηκε και στις σειρές πειραμάτων με δοκίμια πάγου, της αποκόλλησης δηλαδή τμήματος του δοκιμίου.



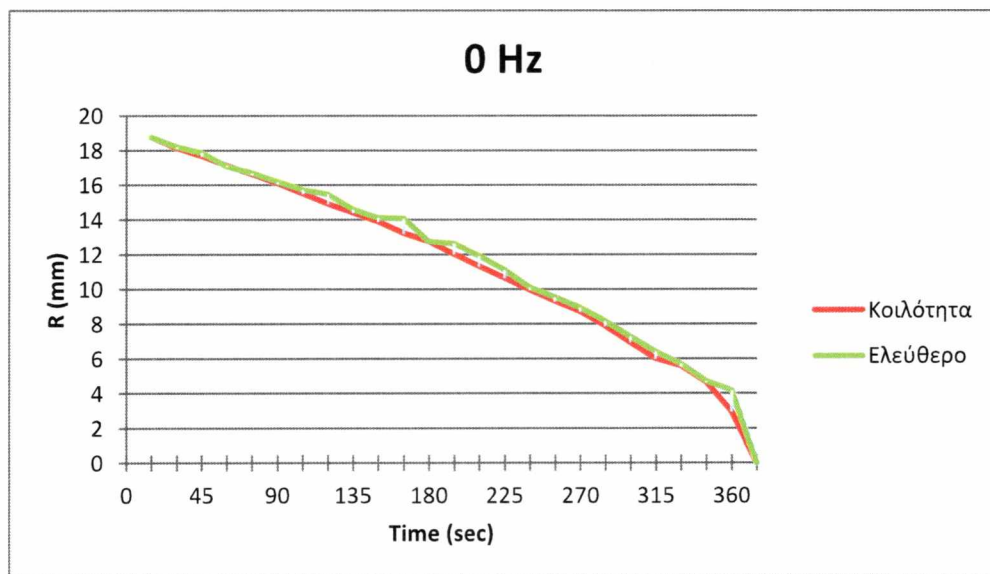
Διάγραμμα 5.35- Διάγραμμα καμπύλης Ακτίνας-Συχνότητας

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως για τα δοκίμια γλυκόζης ο χρόνος τήξης μειώνεται συνεχώς μέχρι το πείραμα των 1.42 Hz. Εν συνέχεια η απόκλιση στο χρόνο διάλυσης μεταξύ των πειραμάτων 1.42 και 1.94 Hz, όπως επίσης και μεταξύ των πειραμάτων 2.33 και 2.73 Hz είναι ελάχιστη. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, για τα δοκίμια γλυκόζης ενδεχομένως να υπάρχουν κρίσιμες τιμές της έντασης της τύρβης πέρα από τις οποίες η επίδραση στα δοκίμια δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Η ανοδική τάση που εμφανίζεται στη κλίση της καμπύλης του διαγράμματος 5.35, μεταξύ 1.42 και 1.94 Hz, αποδίδεται στην αστοχία του δοκιμίου καθώς οι κλίσεις των δύο αυτών πειραμάτων παρουσιάζουν διαφορά. Οι καμπύλες των πειραμάτων σε συχνότητες 1.06 και 1.42 Hz καθιστούν ορατό το γεγονός ότι τα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά καθώς οι κλίσεις του είναι πρακτικά ίδιες καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Η μείωση της ακτίνας φαίνεται να πραγματοποιείται με ταχύτερο ρυθμό στο πείραμα των 1.94 Hz, γεγονός φυσιολογικό καθώς το φαινόμενο της εξαναγκασμένης συναγωγής συμμετέχει ενεργότερα στη διάλυση του δοκιμίου, λόγω της μεγαλύτερης έντασης της τύρβης. Κρίσιμο σημείο φαίνεται να εμφανίζεται μεταξύ των συχνοτήτων 2.33 και 2.73 Hz, καθώς η περεταίρω αύξηση της τυρβώδους έντασης δεν φαίνεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκιμίων με τις κλίσεις των καμπυλών να είναι σχεδόν ίδιες.

5.4 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων

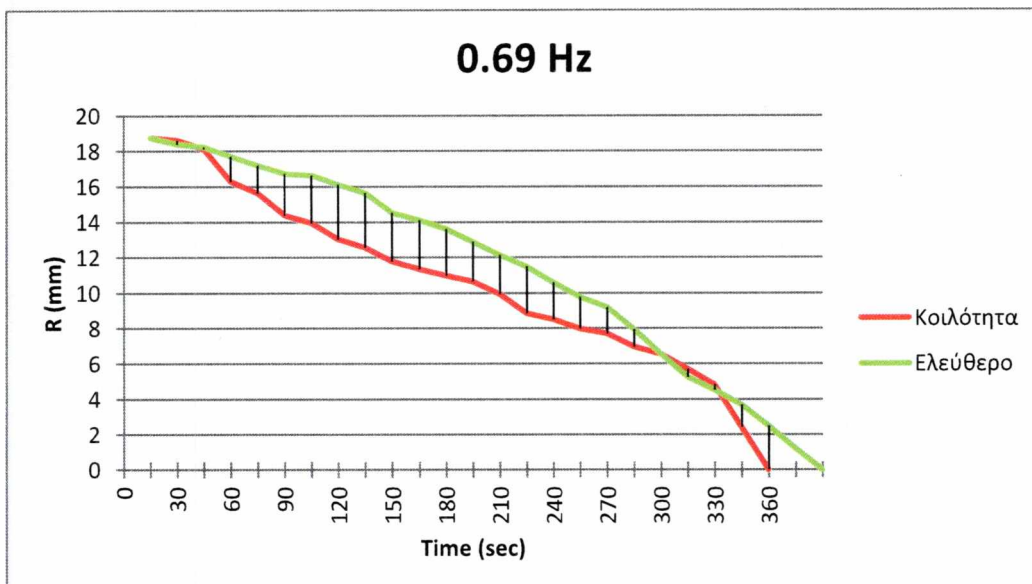
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με την παρουσία ή μη κοιλότητας.

5.4.1 Σύγκριση πειραμάτων ανάλατου δοκιμίου (ελεύθερο) με ανάλατο δοκίμιο πάγου σε κοιλότητα



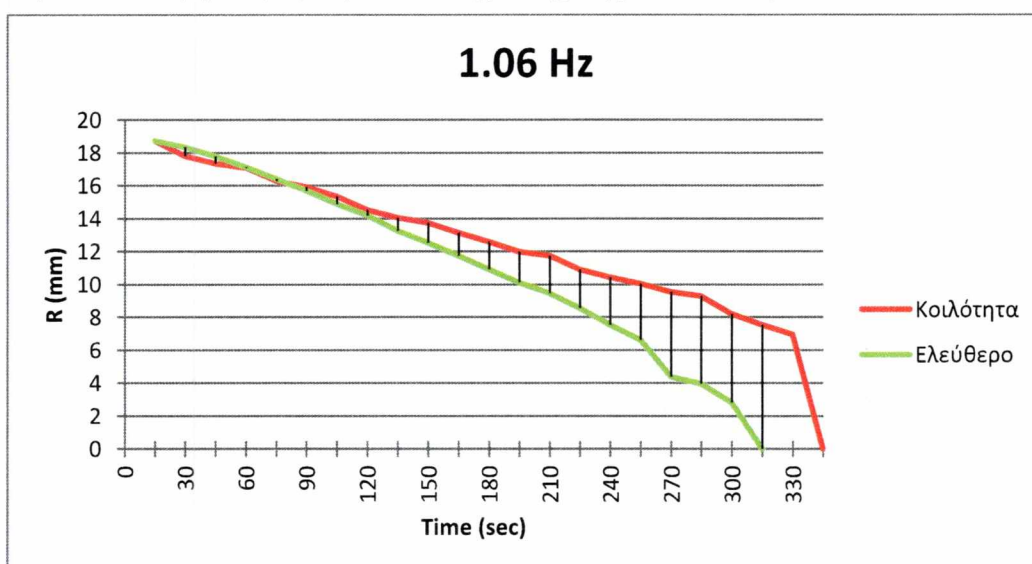
Διάγραμμα 5.36- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 0 Hz

Από το διάγραμμα 5.36 είναι εμφανές πως δεν υπάρχουν χρονικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο πειραμάτων. Επίσης οι κλίσεις των δύο καμπυλών επιδεικνύουν πως ο ρυθμός διάλυσης των δοκιμίων είναι ίδιος. Στο πείραμα όπου η κοιλότητα ήταν απύσχα, παρουσιάστηκαν πολλές αλλά μικρές διακυμάνσεις, σε αντίθεση με το δοκίμιο στην κοιλότητα του οποίου η καμπύλη παρουσιάζεται ομαλότερη.



Διάγραμμα 5.37- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 0.69 Hz

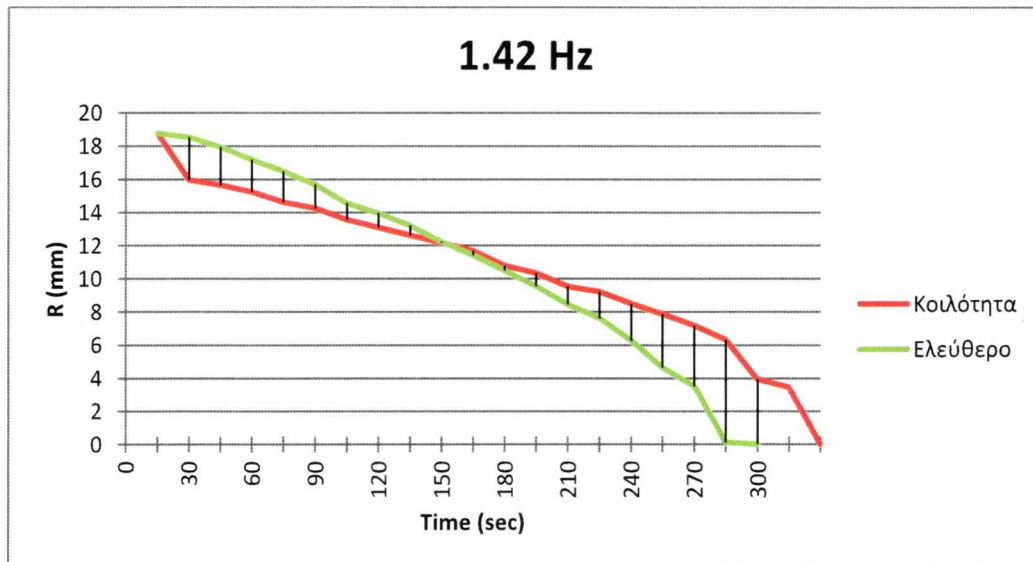
Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει ότι παρόλο που τα δύο δοκίμια παρουσίαζαν ίδια συμπεριφορά κατά τα πρώτα 30 sec των πειραμάτων, το δοκίμιο στην κοιλότητα παρουσίασε υψηλότερο ρυθμό διάλυσης σε σχέση με το ελεύθερο.



Διάγραμμα 5.38- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 1.06 Hz

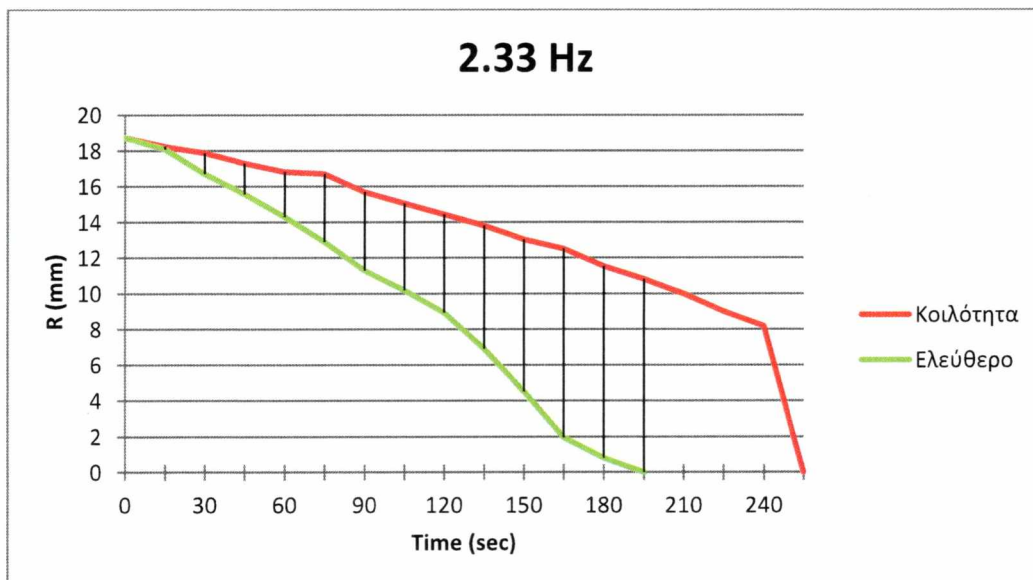
Η σύγκριση αυτή καθιστά εμφανή την επίδραση της τύρβης καθώς η συχνότητα αυξάνεται, διότι ο ρυθμός διάλυσης στο ελεύθερο δοκίμιο είναι υψηλότερος σε σχέση με αυτό στην κοιλότητα. Προκύπτει λοιπόν ως συμπέρασμα ότι η κοιλότητα εμποδίζει

την εισαγωγή τυρβωδών ρευμάτων ρευστού στο εσωτερικό της, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση της διάλυσης του δοκιμίου.



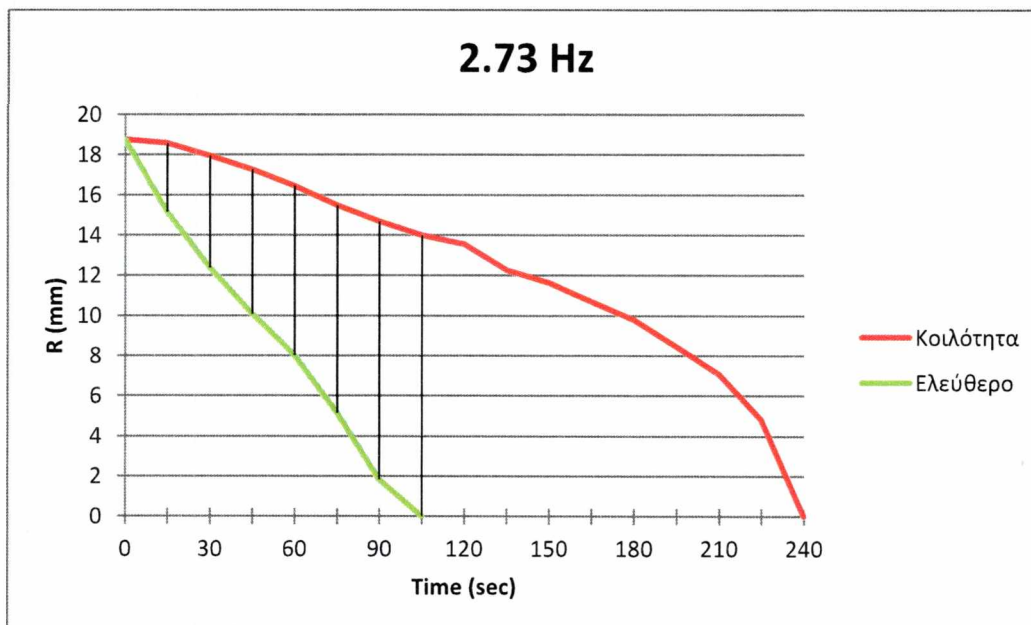
Διάγραμμα 5.39- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 1.42 Hz

Το διάγραμμα 5.39 παρουσιάζει την περαιτέρω μείωση του χρόνου διάλυσης του ελεύθερου δοκιμίου, αυξάνοντας την απόκλιση σε σχέση με το δοκίμιο στην κοιλότητα.



Διάγραμμα 5.40- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 2.33 Hz

Στο παραπάνω διάγραμμα η επίδραση της κοιλότητας στο χρόνο πλήρους διάλυσης γίνεται εμφανέστερη.

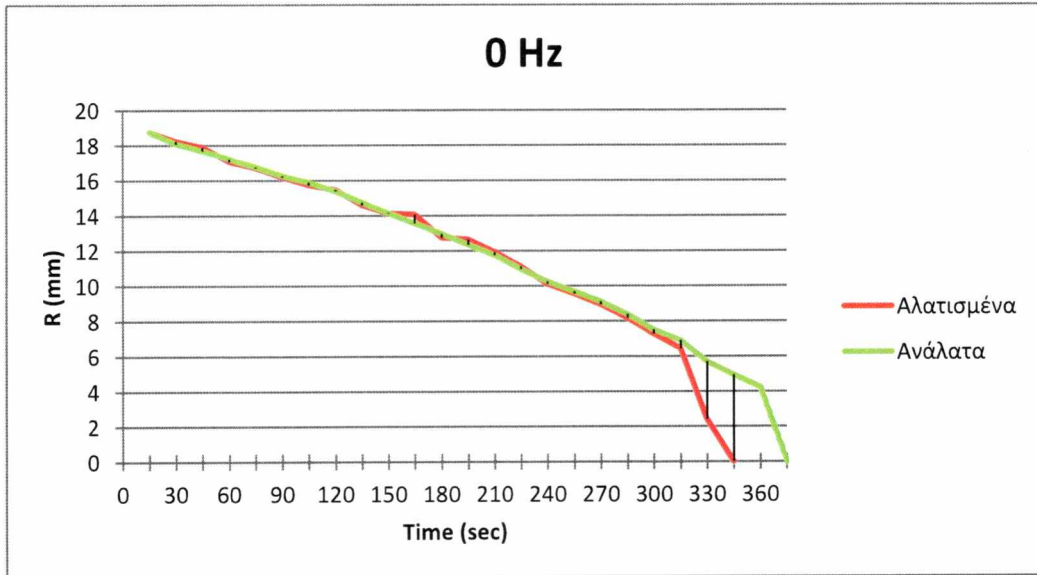


Διάγραμμα 5.41- Σύγκριση ανάλατων δοκιμίων, ελεύθερο και σε κοιλότητα σε συχνότητα 2.73 Hz

Στην τελευταία σύγκριση η απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών έχει αυξηθεί ακόμη περισσότερο, με τον απαιτούμενο χρόνο του δοκιμίου στην κοιλότητα να είναι υπερδιπλάσιος του ελευθέρου. Γενικεύοντας, από τη συνολική εικόνα των συγκρίσεων μεταξύ δοκιμίων σε κοιλότητα και ελευθέρων, προκύπτει πως όσο αυξάνεται η συχνότητα και κατ' επέκταση η ένταση της τύρβης τόσο θα ανοίγει η ψαλίδα μεταξύ των καμπυλών τους. Επιβεβαιώνεται τελικά το συμπέρασμα ότι η κοιλότητα δυσχεραίνει την είσοδο τυρβωδών ρευμάτων καθυστερώντας την διάλυση των δοκιμίων.

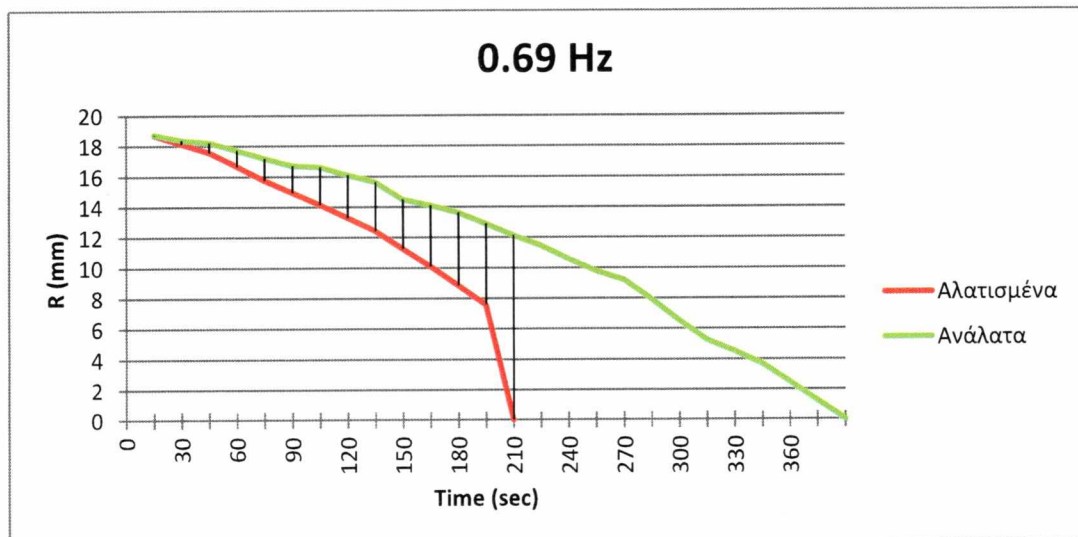
5.4.2 Σύγκριση πειραμάτων ανάλατου σφαιριδίου με αλατισμένο σφαιρίδιο πάγου

Στην ενότητα που ακολουθεί πραγματοποιείται σύγκριση των διαγραμμάτων που προέκυψαν κατά την πειραματική ανάλυση δοκιμίων πάγου και δοκιμίων πάγου με περιεκτικότητα 20% σε άλας.



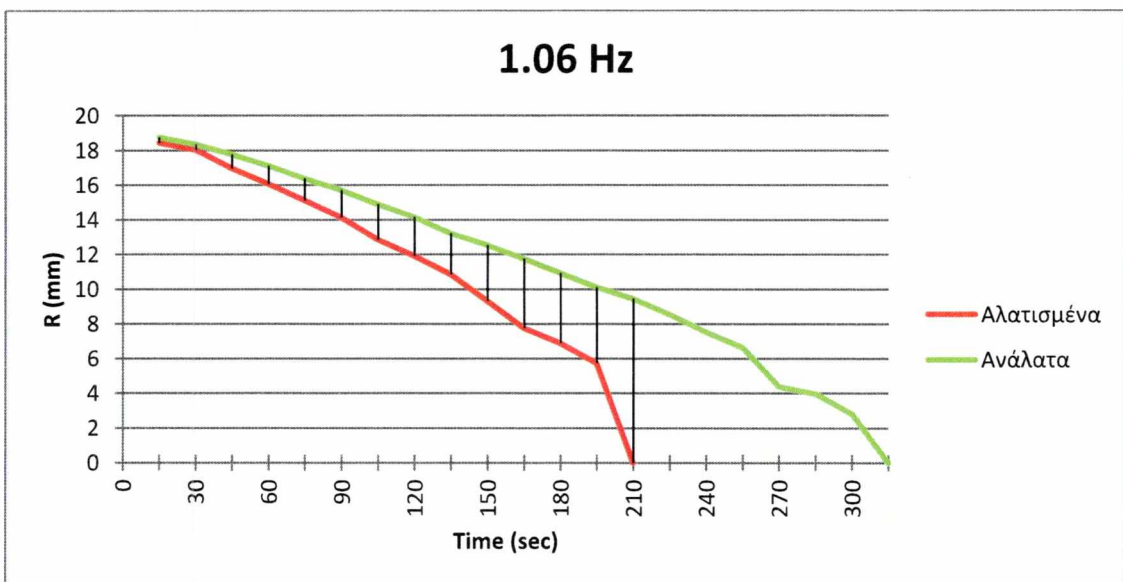
Διάγραμμα 5.42- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 0 Hz

Από τη σύγκριση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε συχνότητα 0 Hz, δηλαδή σε άτριβο ροϊκό πεδίο, προκύπτει ότι τα δύο δοκίμια είχαν παρόμοια συμπεριφορά έως το χρονικό διάστημα των 300 sec. Έπειτα από αυτή τη χρονική στιγμή παρατηρείται απόκλιση στη συμπεριφορά των δοκιμίων. Συγκεκριμένα η κλίση της καμπύλης του δοκιμίου με περιεκτικότητα σε άλας αυξάνεται, γεγονός που οφείλεται στην ταχύτερη διάλυση του σε σχέση με το ανάλατο δοκίμιο.



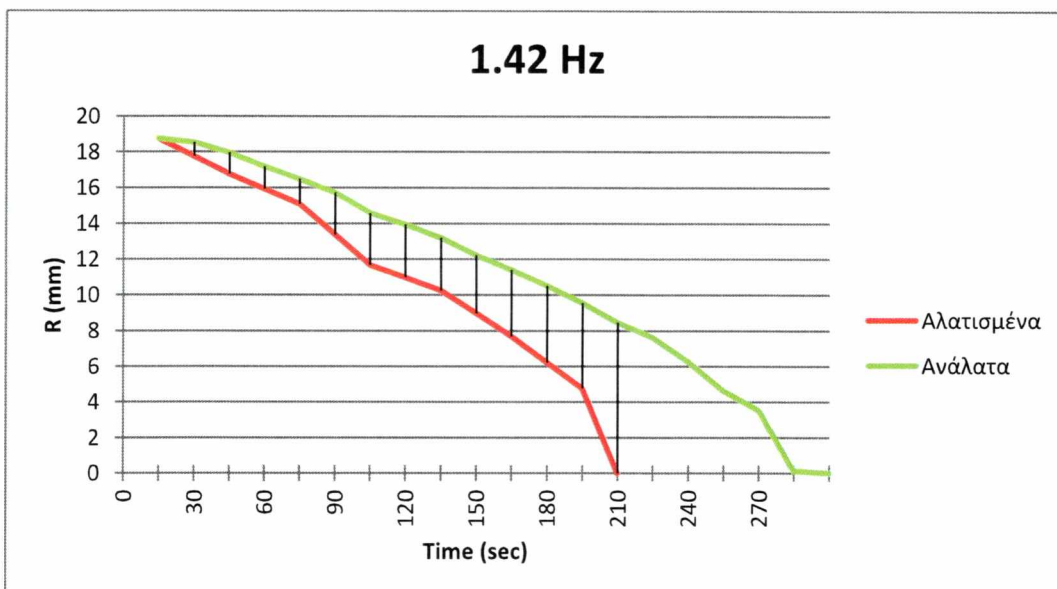
Διάγραμμα 5.43- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 0.69 Hz

Στη συχνότητα των 0.69 Hz οι καμπύλες των δοκιμίων παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Το δοκίμιο πάγου χωρίς περιεκτικότητα σε άλας φαίνεται να εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του πειράματος στη συχνότητα των 0 Hz με τη διαφορά ότι ο χρόνος διάλυσης έχει αυξηθεί ελάχιστα. Αντίθετα η καμπύλη του αλατισμένου δοκιμίου παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από το αντίστοιχο πείραμα των 0 Hz με τον απαιτούμενο χρόνο να μειώνεται στα 210 sec και την κλίση της καμπύλης να αυξάνεται. Η παρουσία του άλατος είναι εμφανές ότι επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο διάλυσης, καθιστώντας τους δεσμούς που σχηματίζονται μεταξύ των μορίων κατά την παραγωγή του δοκιμίου πιο χαλαρούς.



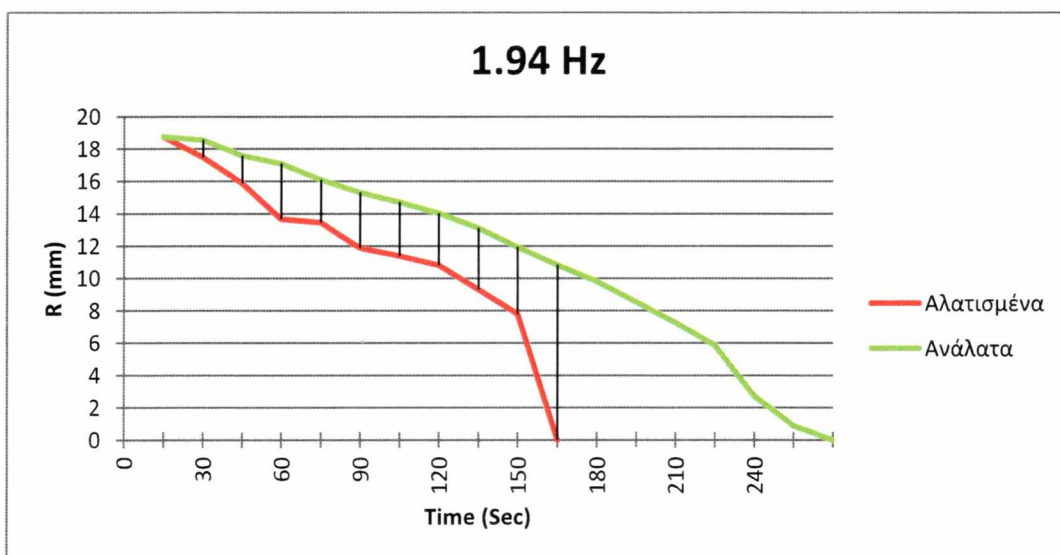
Διάγραμμα 5.44- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 1.06 Hz

Η συμπεριφορά των δοκιμίων στην επόμενη σύγκριση φαίνεται να είναι αντίστροφη. Ο χρόνος διάλυσης για τα δοκίμια με άλας φαίνεται να παραμένει σταθερός στα 210 sec με την καμπύλη να συμπεριφέρεται ανάλογα με αυτή των 0.69 Hz. Αντίθετα ο χρόνος του ανάλατου παρουσιάζει μείωση.



Διάγραμμα 5.45- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμών πάγου σε συχνότητα 1.42 Hz

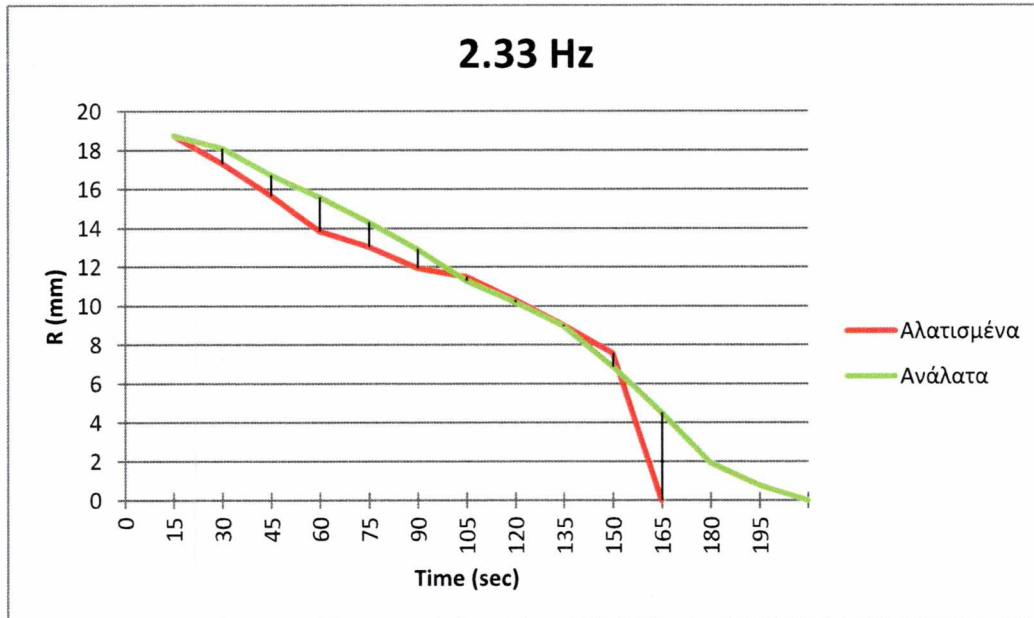
Ο χρόνος τήξης του αλατισμένου δοκιμίου παραμένει για τρίτο συνεχόμενο πείραμα σταθερός και ίσος με 210 sec, ενώ ο αντίστοιχος του ανάλατου δοκιμίου παρουσίασε μια μικρής κλίμακας μείωση. Οι καμπύλες για τα δύο δοκίμια συνεχίζουν να παρουσιάζουν απόκλιση.



Διάγραμμα 5.46- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμών πάγου σε συχνότητα 1.94 Hz

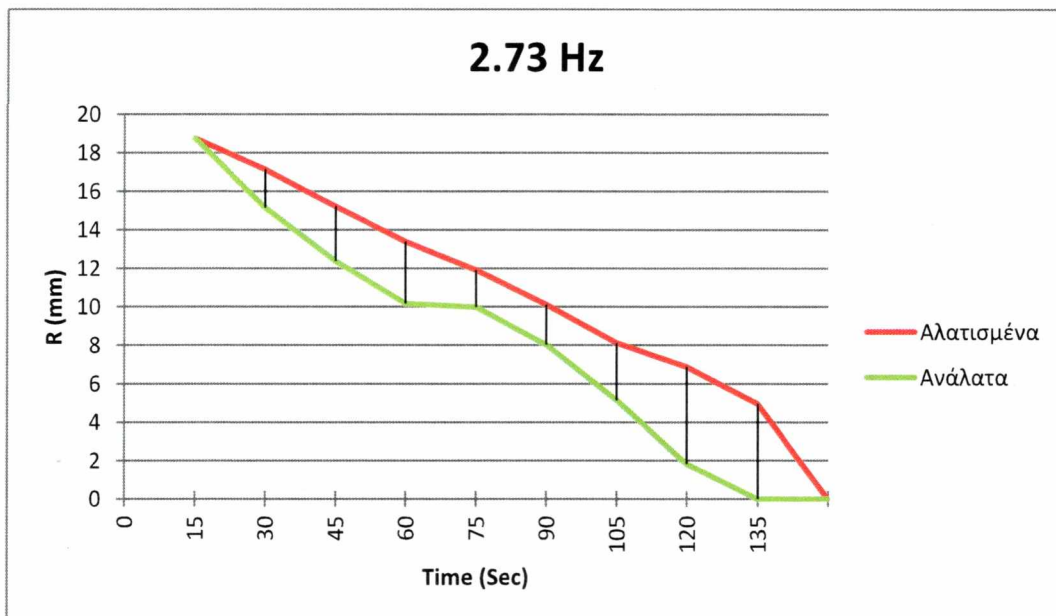
Η συχνότητα των 1.94 Hz φαίνεται κομβική καθώς το δοκίμιο άλατος παρουσιάζει μείωση στο χρόνο διάλυσης ύστερα από τρία πειράματα στασιμότητας. Η μείωση αυτή

είναι της τάξης των 30 sec. Η συμπεριφορά αντιθέτως του ανάλατου δοκιμίου είναι αναμενόμενη καθώς ο χρόνος παρουσιάζει πάλι μείωση όπως σε όλα τα πειράματα εκτός από αυτό των 0.69 Hz όπου ο χρόνος οριακά αυξήθηκε.



Διάγραμμα 5.47- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 2.33 Hz

Οι αποκλίσεις στη συμπεριφορά των δοκιμίων στη συχνότητα των 2.33 Hz φαίνεται να εξαλείφονται καθώς οι καμπύλες τους φαίνεται να τέμνονται σε δύο χρονικά σημεία. Η ψαλίδα ανάμεσα στους χρόνους διάλυσης φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση της έντασης της τύρβης. Η περαιτέρω αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης του πλέγματος καθιστά ξεκάθαρο πως η προσθήκη άλατος χαλαρώνει την ισχύ των δεσμών μεταξύ των μορίων το δοκιμίου. Το γεγονός αυτό προκύπτει καθώς η κλίση στις τελευταίες στιγμές του πειράματος προσεγγίζει την κατακόρυφη και πιθανότατα προκύπτει αποκόλληση τμήματος το δοκιμίου.



Διάγραμμα 5.48- Σύγκριση ανάλατων και αλατισμένων δοκιμίων πάγου σε συχνότητα 2.73 Hz

Η τελευταία σύγκριση που προκύπτει από τη σύγκριση των δοκιμίων σε συχνότητα 2.73 Hz, εμφανίζει άλλη μια αντιστροφή ως προς τη συμπεριφορά των δοκιμίων. Ο χρόνος τήξης του ανάλατου δοκιμίου είναι για πρώτη φορά μικρότερος από τον αντίστοιχο του αλατισμένου δοκιμίου. Οι καμπύλες και των δύο δοκιμίων φαίνεται να ακολουθούν παρόμοια πτωτική πορεία, με την καμπύλη του ανάλατου δοκιμίου να εμφανίζει μεγαλύτερη κλίση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση ομογενούς ισότροπης τύρβης διαφόρων εντάσεων σε δοκίμια οργανικής και ανόργανης σύστασης. Δύο παλλόμενα πλέγματα σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους δημιουργούσαν το τυρβώδες πεδίο στο κέντρο τη διάταξης που ήταν τοποθετημένη στο εσωτερικό μιας υδροσύραγγας. Μετρήθηκε ο χρόνος πλήρους διάλυσης των δοκιμίων και ελήφθησαν φωτογραφικά στιγμιότυπα καθ' όλη τη διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων τα οποία επεξεργάστηκαν μετέπειτα με κώδικα ανεπτυγμένο στο πρόγραμμα Matlab.

6.1 Ανόργανα δοκίμια χωρίς προσθήκη άλατος

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των ανόργανων δοκιμίων πάγου χωρίς περιεκτικότητα σε άλας.

6.1.1 Ανόργανα δοκίμια χωρίς προσθήκη άλατος απουσία κοιλότητας

Τα πειράματα που διεξήχθησαν με ανάλατα δοκίμια πάγου απουσία κοιλότητας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος πλήρους διάλυσης μειώνεται συνεχώς όσο υπόκεινται σε συνεχόμενα υψηλότερες συχνότητες. Με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης του πλέγματος αυξάνεται κατά συνέπεια και η ένταση της τύρβης με αποτέλεσμα ο χρόνος διάλυσης των δοκιμίων να μειώνεται αισθητά.

6.1.2 Ανόργανα δοκίμια χωρίς προσθήκη άλατος παρουσία κοιλότητας

Στις σειρές πειραμάτων όπου πραγματοποιήθηκαν σε ορθογωνική κοιλότητα παρατηρήθηκε πως σε χαμηλές συχνότητες η συμπεριφορά των δοκιμίων προσεγγίζει αυτή του πειράματος των 0 Hz. Σε υψηλότερες συχνότητες παρατηρήθηκε πως η εισαγωγή των τυρβωδών ρευμάτων στο εσωτερικό της κοιλότητας είχε επίδραση στο

χρόνο διάλυσης των δοκιμίων. Σε αυτές τις σειρές πειραμάτων φαίνεται να πως παρουσιάστηκε το φαινόμενο αστοχίας των δοκιμίων κατά τα τελικά στάδια της διεξαγωγής των πειραμάτων. Οι αστοχίες αυτές μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων η θερμοκρασία των δοκιμίων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα την χαλάρωση των δεσμών που συγκρατούν τα μόρια μεταξύ τους επιταχύνοντας κατ' αυτό τον τρόπο την διάλυση. Μια λεπτομερέστερη παρατήρηση των διαγραμμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα πως υπάρχει κάποια κρίσιμη ακτίνα της τάξης των 2-3mm πέραν την οποίας η εμφάνιση αστοχίας είναι συχνότερο φαινόμενο. Σε γενικές γραμμές η παρουσία κοιλότητας επηρέασε τον χρόνο διάλυσης, αυξάνοντάς τον ιδιαίτερα στις υψηλότερες συχνότητες άνω των 1.06 Hz.

6.2 Δοκίμια με περιεκτικότητα σε άλας

Στα πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια σφαίρες πάγου με περιεκτικότητα 20% σε άλας (NaCl), παρατηρήθηκε πως σε κατάσταση ηρεμίας τα δοκίμια διαλύονται πλήρως σε χρόνο μειωμένο κατά 30s σε σχέση με τα ανάλατα δοκίμια. Η παρουσία του άλατος φαίνεται πως εξασθενεί και αυτή τους δεσμούς που σχηματίζονται κατά την παραγωγή των δοκιμίων με αποτέλεσμα η εμφάνιση αστοχιών να είναι συχνότερη. Σε συχνότητες 0.69, 1.06 καθώς επίσης και 1.42 Hz ο χρόνος διάλυσης παραμένει σταθερός στα 195s γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως η περαιτέρω αύξηση της εντάσεως της τύρβης δεν επηρέασε ιδιαίτερα την χρονική εξέλιξη του πειράματος. Βέβαια η συχνότητα των 1.42 Hz φαίνεται να συμπεριφέρεται σαν κρίσιμο σημείο, καθώς περεταίρω αύξηση της φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο διάλυσης των δοκιμίων. Συγκριτικά με τα ανάλατα δοκίμια η επίδραση της εντάσεως της τύρβης φαίνεται να επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τα δοκίμια με άλας, καθώς ο χρόνος διάλυσης είναι μειωμένος στα αλατισμένα με εξαίρεση το πείραμα των 2.73 Hz όπου τα ανάλατα δοκίμια διαλύονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

6.3 Δοκίμια γλυκόζης

Τα πειράματα με δοκίμια γλυκόζης οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι υφιστάμενοι δεσμοί μεταξύ των μορίων των δοκιμίων είναι εξαιρετικά ισχυρότεροι σε σχέση με αυτός που σχηματίζονται στα ανόργανα δοκίμια. Οι απαιτούμενοι χρόνοι πλήρους

διάλυσης τόσο μεγαλύτεροι, ώστε μετρήθηκαν σε λεπτά, γεγονός που επιβεβαιώνει την προηγούμενη διαπίστωση περί δεσμών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ο χρόνος τήξης του δοκιμίου γλυκόζης σε κατάσταση ηρεμίας του ρευστού ήταν 97 min σε αντίθεση με τον χρόνο των ανόργανων δοκιμίων που κυμάνθηκε στα 5,5 με 6 min. Η θερμοκρασιακή βαθμίδα, που είναι σαφώς πολύ χαμηλότερη σε σχέση με αυτή των δοκιμίων πάγου, ενδεχομένως να ήταν μια από τις αιτίες επιβράδυνσης της διάλυσης των δοκιμίων. Όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν με δοκίμια γλυκόζης παρουσίασαν αστοχία. Τέλος, και στην περίπτωση των δοκιμίων γλυκόζης φαίνεται πως υπάρχουν κρίσιμες τιμές της εντάσεως της τύρβης, όπου η περαιτέρω αύξηση των είτε επηρεάζει σημαντικότερα είτε ελάχιστα τον χρόνο διάλυσης των δοκιμίων.

6.4 Μειονεκτήματα της πειραματικής μεθόδου

Η πλήρωση της υδροσύραγγας όπου διεξήχθησαν τα πειράματα πραγματοποιείται με την προσθήκη 650 λίτρων νερού. Για εξοικονόμηση πολύτιμων υδάτινων πόρων πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα στην ίδια ποσότητα νερού. Στα πειράματα με δοκίμια γλυκόζης, η επαναλαμβανόμενη διάλυση των δοκιμίων στην ίδια ποσότητα νερού κατέστησε τα νερά θολά αυξάνοντας ελάχιστα την περιεκτικότητά τους σε γλυκόζη. Η διαφορά συγκέντρωσης γλυκόζης μπορεί να μην επηρέασε ιδιαίτερα τον μηχανισμό της διάλυσης, ωστόσο επηρέασε τη διαύγεια του νερού καθιστώντας τα δοκίμια λιγότερο ευδιάκριτα και την επεξεργασία των στιγμιότυπων δυσχερή. Επιπλέον η προέλευση του νερού είναι από γεώτρηση, με αποτέλεσμα την ύπαρξη διαφόρων μικροσωματιδίων τα οποία κατά την επεξεργασία διακρίνονται ως φωτεινά σημεία από τον κώδικα της Matlab, καθιστώντας την επεξεργασία των frames χρονοβόρα, καθώς αφαιρέθηκαν χειροκίνητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αναγνώριση των ορίων των δοκιμίων από τον κώδικα ήταν δυσχερής καθώς κατά την παραγωγή των δοκιμίων πάγου, εγκλωβίζονταν φυσαλίδες οξυγόνου στο εσωτερικό του δοκιμίου οι οποίες κατά τη διάρκεια ενός πειράματος διαλύονταν γρήγορα μειώνοντας δραματικά την ακτίνα του. Η κατάσταση αυτή συγκαταλέγεται στις αστοχίες, όπως επίσης και η αποκόλληση τμήματος του δοκιμίου. Ένα ακόμη μειονέκτημα της μεθόδου που ακολουθήθηκε είναι ότι η θερμοκρασία του νερού δεν ήταν πάντα σταθερή. Τις θερμότερες ημέρες του καλοκαιριού η θερμοκρασία του νερού ήταν περίπου 20-22 °C σε αντίθεση με τις ημέρες του χειμώνα όπου το νερό είχε θερμοκρασία 14-15 °C. για λόγους ασφαλείας το πλέγμα τίθετο σε κίνηση ύστερα από

την απομάκρυνση των ερευνητών με αποτέλεσμα τα δοκίμια να παραμένουν για κάποια δευτερόλεπτα αδρανή στην πειραματική διάταξη, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαμέτρου των δοκιμίων κατά κάποια ελάχιστα δέκατα του χιλιοστού πριν ξεκινήσει η καταγραφή στιγμιοτύπων. Τέλος κάποια ελάχιστη μετατόπιση της video camera προκαλούσε προβλήματα στην εστίαση με τα δοκίμια άλλοτε να φαίνονται μικρότερα και άλλοτε μεγαλύτερα. Το πρόβλημα αυτό βέβαια αντιμετωπίστηκε με σύγκριση της πραγματικής διαμέτρου με την αντίστοιχη σε pixels.

6.5 Προτάσεις βελτιστοποίησης για μελλοντική έρευνα

Θα ήταν χρήσιμη η εγκατάσταση ενός φίλτρου στην παροχή του νερού ώστε να αποφεύγεται η είσοδος μικροσωματιδίων στον πειραματικό χώρο. Αυτή η πρόταση είναι οικονομικότερη σε σχέση με τη επαναλαμβανόμενη χρήση απιονισμένου νερού υψηλής καθαρότητας που θα εκτόξευε το κόστος. Το χρησιμοποιημένο νερό θα ήταν χρήσιμο να φιλτράρεται και να επαναχρησιμοποιείται ώστε να εξοικονομείται σημαντική ποσότητα υδάτινων πόρων. Επίσης ο προγραμματισμός της video camera ώστε να λαμβάνει αυτόματα στιγμιότυπα ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα προσέφερε εξαιρετική ακρίβεια στη χρονική απόσταση μεταξύ των frames. Για την ελαχιστοποίηση της επιρροής των αστοχιών των δοκιμίων που προέκυπταν κατά την πειραματική διαδικασία, θα ήταν χρήσιμη η αύξηση της ακτίνας των δοκιμίων. Η χρήση δοκιμίων μεγαλύτερης διαμέτρου θα αύξανε τον χρόνο διάλυσης τους, με αποτέλεσμα να καταγράφεται η συμπεριφορά τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μειώνοντας τις διακυμάνσεις που εμφανίζονταν στα διαγράμματα και καθιστώντας την αναγνώριση οποιασδήποτε αστοχίας πιο εύκολη υπόθεση. Τέλος για τους μεταγενέστερους ερευνητές που επιθυμούν να ασχοληθούν με την περαιτέρω έρευνα πάνω στην επίδραση ομογενούς και ισότροπης τύρβης, προτείνεται η μελέτη διαφορετικής φύσεως δοκιμίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Βιβλιογραφία

1. Ερρίκος Σταπουντζής, Σημειώσεις για το μάθημα Φαινόμενα Τύρβης, (2008)
2. Tennekes, H. and Lumely, J.L., A First course in Turbulence. MIT Press, Cambridge, MA (1973)
3. Α.Θ. Παπαϊωάννου, Μηχανική των ρευστών, Τόμος Ι, Β' Έκδοση (2002)
4. Streeter/Wylie/Bedford, Μηχανική των ρευστών, (2009)
5. Arkady Tsinober, An informal introduction to turbulence, (2001)
6. Adrian Biran & Mosche Breiner , Matlab 6 για Μηχανικούς, (2003)
7. Madjid Birouk ,Brahim Sahr and Iskender Gokalp, An Attempt to Realize Experimental Isotropic Turbulence at Low Reynolds Number, (2003)
8. Batchelor G.K. (1956) 'The Theory of Homogeneous Turbulence'. Cambridge: Cambridge University Press
9. Cheng, N.S. and Law, A.W.K. (2001) "Measurements of Turbulence Generated by Oscillating Grid", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 3
10. Davidson P. (2004) 'Turbulence: an introduction for scientists and engineers'. In Oxford University Press New York, NY: Oxford University Press.
11. DeSilva P. D and Fernando H. J. S. (1994) "Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence," Phys. Fluids 6, 2455
12. Kolmogorov A.N. (1941) 'Local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers' Doklady AN SSSR
13. Shy, S.S, Tang, C.Y. & Fann, S.Y. (1997) "A nearly isotropic turbulence generated by a pair of vibrating grids", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14
14. Thompson, S. M., and Turner, J. S. (1975) "Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid." J. Fluid Mech., Cambridge, U.K., 67
15. Villermaux, E., Sixou, B. & Gagne, Y. (1995) "Intense vortical structures in grid-generated turbulence", Phys. Fluids, Vol. 7, pp. 2008-2013
16. Hu H., Argyropoulos S.A. (1996). Mathematical modelling of solidification and melting: a review. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., vol. 4
17. Merck H. J. (1954). The influence of melting and anomalous expansion on thermal convection in laminar boundary layers. App. Sci. Res., vol. 4

18. Beckermann C., Viskanta R. (1988). Double-diffusive convection due to melting. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 31
19. Schenk J., Schenkels F.A.M. (1968). Thermal free convection from an ice sphere in water. *Appl. Sci. Res.*, vol. 19
20. McLeod D.S., Riley D.S., Sparks R.J. (1996). Melting of a sphere in hot liquid. *J. Fluid Mech.*, vol. 3
21. Vanier C.R., Tien C. (1970). Free convection melting of ice spheres. *AIChE Journ.*, vol. 16
22. Hao Y.L., Tao Y.X. (2001). Melting of a solid sphere under forced and mixed convection: Flow characteristics. *ASME Journ. Heat Transfer*, vol. 123
23. Machicoane N., Bonaventure J., Volk R. (2013). Melting dynamics of large ice balls in a turbulent swirling flow. *Physics of Fluids*, vol. 25
24. Ζησιμάτου Α. (2011). Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση φαινομένων ανάμειξης σε τυρβώδη ροϊκά πεδία με στρωματοποίηση και περιστροφή
25. Yunus A. Cengel (2005). Μεταφορά θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤLAB

```
clear all; close all; clc;

dir_photos = 'C:\Users\billakos\Desktop\Δηλωματική\BILIGIOR 8-5-14
SALT1020 4-6HZ30SEC 8-10-12-14HZ15SEC\1\';

listing = dir(dir_photos);
dir_results = 'results\1\';
mkdir(dir_results)

for i=3:length(listing)

RGB = imread([dir_photos listing(i).name]);

imshow(RGB);

I = rgb2gray(RGB);

threshold = graythresh(I);

bw = im2bw(I,threshold);

imshow(bw)

bw = bwareaopen(bw,100);

bw = imfill(bw,'holes');

imshow(bw)

[B,L] = bwboundaries(bw,'noholes');

imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]))

hold on

for k = 1:length(B)

    boundary = B(k);

    plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'w', 'LineWidth', 2)

end

stats = regionprops(L,'Area','Centroid');

threshold = 0.94;

clear metric

for k = 1:length(B)
```

```

% obtain (X,Y) boundary coordinates corresponding to label 'k'
boundary = B{k};

% compute a simple estimate of the object's perimeter
delta_sq = diff(boundary).^2;
perimeter = squeeze(sum(sqrt(sum(delta_sq,2))));

% obtain the area calculation corresponding to label 'k'
area = stats(k).Area;

% compute the roundness metric
metric(k) = 4*pi*area/perimeter^2;

% display the results
metric_string = sprintf('%2.2f',metric(k));

% mark objects above the threshold with a black circle
if metric(k) > threshold

    centroid = stats(k).Centroid;

    plot(centroid(1),centroid(2),'ko');
end

text(boundary(1,2)-35,boundary(1,1)+13,metric_string,'Color','y',...
     'FontSize',14,'FontWeight','bold');

[roundness(i), index] = max(metric);

epifaneia(i) = stats(index).Area;

title(['Metrics closer to 1 indicate that ',...
      'the object is approximately round']);

saveas(gcf,[dir_results num2str(i) '.jpg'])
close all;
End

r = sqrt(epifaneia./pi);

r = r(3:length(listing));

t = 0:15:7*15;

plot(t,r)

```



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000135194