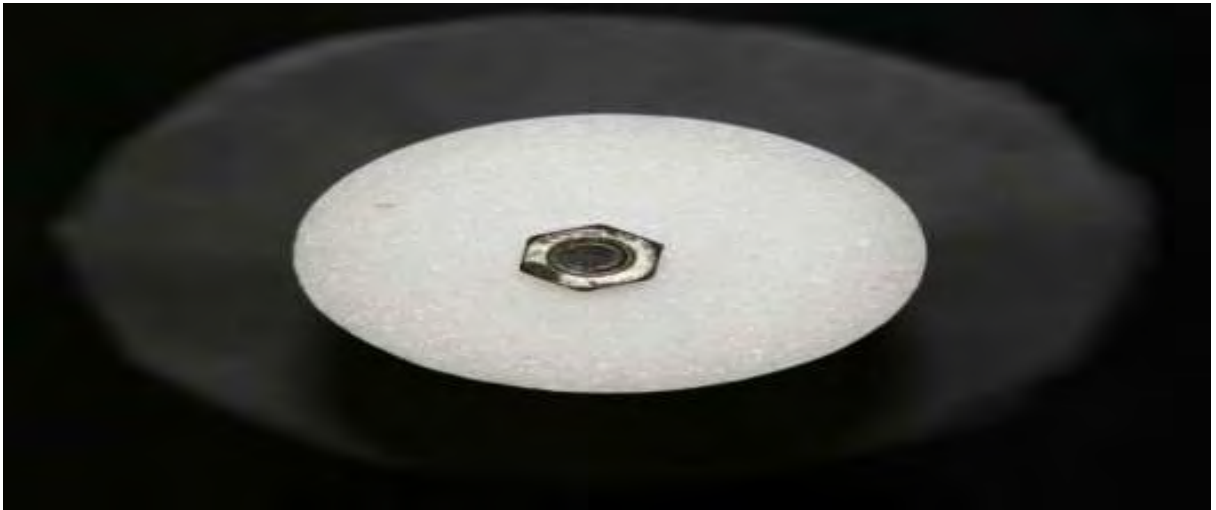


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΕ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

των

ΑΝΔΡΕΑΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΚΟΡΔΑΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων

ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ ΕΡΡΙΚΟΣ

Βόλος, 2016

© 2016 Ιωάννης Κορδάτος, Γιώργος Ανδρεάτος

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής,

(επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος,

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης,

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε και από τη θέση αυτή, να ευχαριστήσουμε τον, κ. Ερρίκο Σταπουντζή, επιβλέποντα καθηγητή μας, για την βοήθεια του στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής και την διόρθωση της. Επιπλέον τον ευχαριστούμε για την άριστη συμπεριφορά του απέναντι μας, καθώς και για την οπτική, που σε πολλά πράγματα μας εμφύσησε, καθ' όλη τη διάρκεια της επίβλεψης της εργασίας μας.

Επίσης, ευχαριστούμε τον κ. Νικόλαο Πελεκάση και τον κ. Αναστάσιο Σταματέλλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και την τιμή που μας κάνουν με τη συμμετοχή τους, στη διόρθωση της.

Στη συνέχεια, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τους Δρ. Γεώργιο Χαραλάμπους και Δρ. Δημήτριο Τζιουρτζούμη για τις μετρήσεις με χρήση LDA (Laser Doppler Anemometer) στην αεροσήραγγα στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών και τον μεταδιδακτορικό φοιτητή Αθανάσιο Μπάρλα για την συγγραφή του κώδικα στη Matlab, που χρησιμοποιήσαμε σε μερικά πειράματα.

Τέλος, αφιερώνουμε αυτή την διπλωματική στους γονείς μας Έλση και Δημήτρη, Αίγλη και Διονύση για την ανοχή, την υλική και ψυχολογική υποστήριξη, που δείχνουν καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μας σε αυτούς τους δύσκολους, οικονομικά και κοινωνικά, καιρούς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μεταφορά μάζας από στερεούς κυλινδρικούς δίσκους καμφοράς, που τοποθετήθηκαν σε τρεις πειραματικές διατάξεις, σε αεροσήραγγα (windtunnel), θάλαμο τύρβης (synthetic jet turbulence chamber) με μηδενική μέση ταχύτητα και σε αεροσυμπιεστή (axisymmetric turbulent jet). Ο ρυθμός μείωσης της καμφοράς ή ρυθμός εξάχνωσης μετρήθηκε, παρακολουθώντας τη μεταβολή του μεγέθους και του σχήματος της καμφοράς. Τοποθέτηθηκε κάμερα από την οποία λαμβάνονταν φωτογραφίες από διαφορετικές οπτικές γωνίες ανά σταθερό χρονικό διάστημα για την παρατήρηση της εξέλιξης της εξάχνωσης. Στη συνέχεια με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων (Imagej, Matlab) έγινε η επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία διαγραμμάτων μείωσης της υδραυλικής διαμέτρου των μοντέλων σε σχέση με το χρόνο. Υπολογίστηκαν οι αριθμοί Sherwood για όλες τις πειραματικές διατάξεις και ερευνήθηκε η εξάρτησή τους από την ένταση της τύρβης. Το συμπέρασμα που αποκομίστηκε ήταν ότι η ένταση της τύρβης αυξάνει τη μεταφορά μάζας.

EFFECT OF TURBULENCE ON MASS TRANSFER OF CYLINDRICAL

DISKS

SUMMARY

Mass transfer from solid cylindrical disks of Camphor has been studied in an a) wind tunnel, in a b) synthetic jet turbulence chamber with zero mean speed and in an c) axisymmetric turbulent jet. Mass decay rates were measured by monitoring the shape of the models. By the means of a photographic camera we are able to capture optical imagery of the phenomenon from different angles in constant intervals during the sublimation procedure. Afterwards, the raw imagery was processed by computer software (ImageJ, Matlab) in order to acquire the data required for the assembly of the hydraulic diameter reduction chart with respect to time. Average Sherwood numbers were computed and their dependence on turbulent intensity was examined. It was found that turbulent intensity increased the rate of mass transfer.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

- Αριθμός Reynolds, $Re = \frac{vL}{\nu}$
- Re_c Αριθμός Reynolds για μετάβαση από στρωτή ροή σε τυρβώδη
- u_i στιγμιαία ταχύτητα (m/s)
- U_i μέση χρονικά τιμή της ταχύτητας (m/s)
- u'_i διακύμανση ταχύτητας (m/s)
- T περίοδος (s)
- D διάμετρος (m)
- ρ πυκνότητα (kg/m^3)
- $\overline{\sigma_{ij}}$ τανυστής τάσης (kg/m s^2)
- ν κινηματικό ιξώδες (m^2/s)
- u, v, w ταχύτητες στους άξονες x, y, z αντίστοιχα (m/s)
- k κυματαριθμός (m^{-1})
- ϵ ρυθμός απώλειας ενέργειας (m^2/s^3)
- L ολοκληρωτική κλίμακα μήκους (m)
- η κλίμακα Kolmogorov (m)
- L_B κλίμακα Batchelor (m)
- U_m κεντρική ταχύτητα σε αξονικά συμμετρική δέσμη ρευστού (m/s)
- b η ανάπτυξη της δέσμη ρευστού (m)
- q ρυθμός θερμότητας (j/s)
- j ρυθμός διάχυση μάζας (mol/s)
- K θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
- D_{AB} διαχυτότητα του A στο B (m^2/s)
- w_a μαζικό κλάσμα (Kg/m^3)
- T θερμοκρασία (K)
- α θερμική διαχυτότητα (m^2/s)
- h_m συντελεστής μεταφοράς μάζας (m/s)
- Sh αδιάστατος αριθμός Sherwood, $Sh=KL/D$

- Pr αδιάστατος αριθμός Prandle
- Nu αδιάστατος αριθμός Nusselt
- Sc αδιάστατος αριθμός Schmidt, $Sc=v/D_{AB}$
- P_{sat} τάση ατμών σε Pa
- P πίεση σε Pa
- R ακτίνα (m)
- V όγκος (m^3)
- h συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W/m^2K)
- U_c ταχύτητα κεντρικής ροϊκής γραμμής αεροσυμπιεστή (m/s)
- U_o μέση ταχύτητα αεροσήραγγας και θαλάμου τύρβης (m/s)
- L_{xu} κλίμακα μήκους της τύρβης (m)
- M μήκος βρόγχου πλέγματος(mesh size) (mm)
- U_{rms} διακύμανση της ταχύτητας (m/s)
- Θ_{rms} διακύμανση της θερμοκρασίας (K)
- f συχνότητα (Hz)
- H_o ύψος καμφοράς (mm)
- D_o διάμετρος καμφοράς (mm)
- F περίμετρος καμφοράς (mm)
- S επιφάνεια καμφοράς (mm)
- D_h υδραυλική διάμετρος καμφοράς, $D_h=4F/S$
- M_a μοριακό βάρος ($gmoI^{-1}$)
- i ένταση της τύρβης, $i=U_{rms}/U_{mean}$
- Sh_o αριθμός Sherwood για μηδενική ένταση τύρβης
- λ παράμετρος για την δημιουργία καμπύλης σε αδιαστατοποιημένο αριθμό Sherwood

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1- Μόνιμη Τυρβώδης ροή ως προς τις μέσες τιμές.....	17
Εικόνα 2.2- Φάσμα τυρβώδους ενέργειας.....	20

Εικόνα 2.3- Προφίλ ταχύτητας τυρβώδους δέσμης ρευστού.....	22
Εικόνα 2.4- Αδιαστατοποιημένο προφίλ ταχυτητας σε αξονικά συμμετρική δέσμη ρευστού από πειραματικά δεδομένα του Trupel.....	23
Εικόνα 2.5- Αδιαστατοποιημένο προφίλ θερμοκρασίας σε αξονικά συμμετρική Δέσμη ρευστού.....	23
Εικόνα 2.6- Μοριακός τύπος καμφοράς.....	24
Εικόνα 2.7- Μεταφορά Μάζας σε σφαίρες.....	28
Εικόνα 2.8- Εξάχνωση σφαιρικής ναφθαλίνης.....	30
Εικόνα 2.9- Σχήμα παραδείγματος 3.....	34
Εικόνα 3.1- Θάλαμος Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης.....	37
Εικόνα 3.2- Στήριξη για τα Πιστολάκια στον Θάλαμο Τύρβη.....	38
Εικόνα 3.3- Αξονοσυμμετρικός Συμπιεστής.....	43
Εικόνα 3.4- Αεροσήραγγα (Windtunnel).....	46
Εικόνα 3.5- Κυλινδρικός Δίσκος Καμφοράς.....	49
Εικόνα 3.6- Βάση στήριξης στην αεροσήραγγα.....	50
Εικόνα 3.7- Βάση στήριξης στον Αεροσυμπιεστή.....	51
Εικόνα 3.8- Βάση στήριξης στον Θάλαμο Τύρβη.....	51
Εικόνα 3.9- Inverter συχνοτήτων Siemens micromaster 420.....	52
Εικόνα 3.10- TSI Anemometer.....	52
Εικόνα 3.11- Πιστολάκια Μαλλιών (Hairdryers).....	53
Εικόνα 3.12- Ηλεκτρονική Ζυγαριά.....	53
Εικόνα 3.13- Πίνακας Ελέγχου για την ρύθμιση της ταχύτητας στην Αεροσήραγγα.....	53
Εικόνα 3.14- Φωτογραφική Κάμερα Canon EOS 1000D.....	54

Εικόνα 5.1- Σχηματική Διάταξη Πειράματος.....	65
---	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.1: Ταχύτητες Συνθετικών Δεσμών Ρευστού για 500W και 1000W, συναρτήσει της απόστασης S πάνω στη διαγώνιο του κύβου.....	38
Διάγραμμα 3.2: Προφίλ Θερμοκρασίας Συνθετικών Δεσμών Ρευστού συναρτήσει της απόστασης S πάνω στη διαγώνιο του κύβου.....	39
Διάγραμμα 3.3: Σύγκριση Ταχύτητας Συνθετικών Δεσμών Ρευστού με 8 πιστολάκια ανοιχτά και με ένα ανοιχτό για ισχύ 1000W.....	40
Διάγραμμα 3.4: Ταχύτητα της κεντρικής ροϊκής γραμμής του αεροσυμπιεστή για συχνότητες 50Hz και 40 Hz σε σχέση με την απόσταση.....	43
Διάγραμμα 3.5: Κεντρική ταχύτητα αεροσυμπιεστή σε συνάρτηση με τη συχνότητα στην έξοδο του αεροσυμπιεστή.....	44
Διάγραμμα 3.6: Διάγραμμα Ταχύτητας (y -άξονας) με Συχνότητα f (x -άξονας) για την αεροσήραγγα.....	47
Διάγραμμα 3.7: Αποτελέσματα Έντασης της τύρβης με τη συχνότητα και ταχύτητα στην αεροσήραγγα για τυρβώδη ροή με πλέγμα.....	47
Διάγραμμα 3.8: Αποτελέσματα Έντασης της τύρβης με ταχύτητα και συχνότητα στην αεροσήραγγα για στρωτή ροή χωρίς πλέγμα.....	48
Διάγραμμα 4.1: Πλάγια όψη για εξάχνωση καμφοράς σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης με ισχύ 500W.....	60
Διάγραμμα 4.2: Πλάγια όψη καμφοράς σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης με ισχύ 1000W.....	60

Διάγραμμα 4.3: Άνω όψη καμφοράς σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης με ισχύ 500W.....	61
Διάγραμμα 4.4: Αποτελέσματα για την εξάχνωση σε Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση 10D και πλάγια όψη.....	61
Διάγραμμα 4.5: Αποτελέσματα για την εξάχνωση καμφοράς σε Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση 10D και άνω όψη.....	62
Διάγραμμα 5.1: Επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταφορά μάζας.....	64
Διάγραμμα 5.2: Αποτελέσματα Μείωσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) με το χρόνο (t) για ροή χωρίς πλέγμα σε απόσταση 1800mm για άνω όψη.....	66
Διάγραμμα 5.3: Αποτελέσματα μείωσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το χρόνο (t) για τη ροή χωρίς πλέγμα με το δοκίμιο σε απόσταση 1800mm για πλάγια όψη.....	67
Διάγραμμα 5.4: Αποτελέσματα μείωσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο (t) με το δοκίμιο σε απόσταση 900mm από το πλέγμα για άνω όψη.....	67
Διάγραμμα 5.5: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το δοκίμιο σε απόσταση 900mm από το πλέγμα για πλάγια όψη.....	68
Διάγραμμα 5.6: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) με το δοκίμιο σε απόσταση 1350mm από το πλέγμα για άνω όψη.....	68
Διάγραμμα 5.7: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το δοκίμιο σε απόσταση 1350mm από το πλέγμα για πλάγια όψη.....	69
Διάγραμμα 5.8: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο(t) με το δοκίμιο σε απόσταση 1800mm από το πλέγμα για άνω όψη.....	69
Διάγραμμα 5.9: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το δοκίμιο σε απόσταση από το πλέγμα 1800mm για πλάγια όψη.....	70
Διάγραμμα 5.10: Αποτελέσματα πτώσης Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) με το χρόνο (t) με το δοκίμιο σε απόσταση από το πλέγμα 2040 mm για άνω όψη.....	70

Διάγραμμα 5.11: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε σχέση με το χρόνο με το δοκίμιο σε απόσταση 2040mm για πλάγια όψη.....	71
Διάγραμμα 5.12: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης για 1000W και άνω όψη.....	72
Διάγραμμα 5.13: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης για 1000W και πλάγια όψη.....	73
Διάγραμμα 5.14: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο(t) για Θάλαμο Τύρβης για 500W και άνω όψη.....	73
Διάγραμμα 5.15: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε σχέση με το χρόνο για Θάλαμο Τύρβης για 500W και πλάγια όψη.....	74
Διάγραμμα 5.16: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο(t) για τον Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση από την έξοδο 7.5D και άνω όψη.....	75
Διάγραμμα 5.17: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε σχέση με το χρόνο(t) για τον Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση από την έξοδο 7.5D και πλάγια όψη.....	75
Διάγραμμα 5.18: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 10D και άνω όψη.....	76
Διάγραμμα 5.19: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 10D και πλάγια όψη.....	76
Διάγραμμα 5.20: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 20D και άνω όψη.....	77
Διάγραμμα 5.21: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 20D και πλάγια όψη.....	77
Διάγραμμα 5.22: Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 25D μετωπικά στην ροή και άνω όψη.....	78

Διάγραμμα 5.23: Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 25D μετωπικά στην ροή και πλάγια όψη.....	78
Διάγραμμα 6.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαχνωμένης Μάζας για όλες τις αποστάσεις για την Αεροσήραγγα με πλέγμα και χωρίς πλέγμα.....	79
Διάγραμμα 6.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαχνωμένης Μάζας σε σχέση με το χρόνο για το Θάλαμο Τύρβης, τον Αεροσυμπιεστή και για εξάχνωση με φυσική συναγωγή.....	81
Διάγραμμα 6.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα μέσω αριθμών Sh σε σχέση με τη διακύμανση της ταχύτητας σε όλες τις πειραματικές διατάξεις.....	83
Διάγραμμα 6.4: Αποτελέσματα αδιαστατοποιημένου Sh με	84

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	14
2.1 Εισαγωγή στην Τύρβη	14
2.2 Χαρακτηριστικά της τύρβης	15
2.3 Προέλευση της τύρβης.....	16
2.4 Φυσικά χαρακτηριστικά τύρβης	17
2.5 Αξονικά Συμμετρικές Δέσμες Ρευστού.....	21
2.6 Εξάχνωση Καμφοράς.....	24
2.7 Αδιάστατοι Αριθμοί και αναλογία μεταφοράς θερμότητας και μάζας	25
2.7.1 Διάχυση Μάζας και Αγωγή Θερμότητας	25
2.7.2 Συντελεστές Μεταφοράς Μάζας στην Εξάχνωση.....	26
2.7.3 Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας στην Εξάχνωση	27
2.8 Αριθμητικά Παραδείγματα	29
Αριθμητικό Παράδειγμα 1: Εξάχνωση σφαιρικής ναφθαλίνης	29
Αριθμητικό Παράδειγμα 2: Εξάχνωση κυλινδρικής ναφθαλίνης	31
Αριθμητικό Παράδειγμα 3: Αναλογία μεταξύ μετάδοσης θερμότητας και μάζας.....	33
Κεφάλαιο 3 Πειραματική Διάταξη	36
3.1 Περιγραφή Πειραματικής διάταξης: Θάλαμος Ισότροπης και Ομοιογενούς Τύρβης	36
3.2 Περιγραφή Πειραματικής διάταξης: Αεροσυμπιεστής	42
3.3 Περιγραφή Πειραματικής διάταξης: Αεροσήραγγα.....	45
3.4 Μοντέλα Καμφοράς.....	48
3.5 Περιφερειακά Όργανα και Συσκευές	51
Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογία Μετρήσεων και Επεξεργασία Δεδομένων	55
4.1 Μέθοδος Μέτρησης για Εξάχνωση Κυλινδρικών Δίσκων Καμφοράς	55
4.2 Μέθοδος Επεξεργασίας Δεδομένων	57
4.3 Επεξεργασία Φωτογραφίας με το ImageJ.....	57

Κεφάλαιο 5 Μετρήσεις και σχολιασμός αποτελεσμάτων	63
5.1 Υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς μάζας και αριθμού Sherwood	63
5.2 Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου για τη διάταξη της Αεροσήραγγας	66
5.3 Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου για διάταξη Θαλάμου Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης	71
5.4 Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου για τη διάταξη του Αεροσυμπιεστή	74
Κεφάλαιο 6 Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση	79
6.1 Αποτελέσματα Εξαχνωμένης Μάζας για όλες τις Πειραματικές Διατάξεις	79
6.2 Αποτελέσματα αριθμών Sherwood	82
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα	85
Παράρτημα 1 - Επεξεργασία Εικόνων με Matlab	86
Παράρτημα 2 - Διόρθωση Δεδομένων με Νευρωνικά Δίκτυα στο Θάλαμο Τύρβης.....	90
Βιβλιογραφία.....	97

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση της τύρβης στην εξάχνωση κυλινδρικών δίσκων καμφοράς σε τρεις πειραματικές διατάξεις: Σε τυρβώδη ροή παραγόμενη από αεροσήραγγα με πλέγμα, σε τυρβώδη ροή παραγόμενη από συνθετικές δέσμες ρευστού (Θάλαμος Τύρβης) και σε τυρβώδη ροή παραγόμενη από αξονοσυμμετρική δέσμη ρευστού (jet). Διεξήχθη έρευνα για την επίδραση της παραγόμενης τύρβης με πειραματικές διατάξεις, στο χρόνο εξάχνωσης των δοκιμίων, καθώς και η επίδρασή της στους συντελεστές μεταφοράς μάζας. Πιο συγκεκριμένα ερευνήθηκε η επίδραση της τύρβης στον αδιάστατο αριθμό Sh. Η εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής έγκειται στη μελέτη του ρυθμού μεταφοράς μάζας από επιφάνειες εξαιτίας της άμεσης συναρμογής της σε πολλές μονάδες παραγωγής χημικής μηχανικής, αλλά και επειδή μας παραθέτει μία εναλλακτική μέθοδο στο να αντλήσουμε πληροφορίες για τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας, λόγω της αναλογίας της μεταφοράς μάζας-μετάδοσης θερμότητας [1],[2]. Τα αποτελέσματα της μεταφοράς μάζας μπορούν να μετατραπούν σε αποτελέσματα μετάδοσης θερμότητας μέσω μιας αναλογίας μεταφοράς θερμότητας/μάζας που υπάρχει λόγω των εξισώσεων που τις περιγράφουν. Σε αυτή τη μέθοδο εξετάζεται επιφάνεια καμφοράς (ασθενικά πτητική ουσία) η οποία μπορεί να εξαχνώνεται σαν τη ναφθαλίνη. Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί εξάχνωσης συνήθως επιτυγχάνονται σε περιοχές υψηλών διαμηθικών τάσεων και επιφανειακών τριβών. Παρόμοιες μελέτες έχουν γίνει από πολλούς ερευνητές, δύο εκ των οποίων ο R.J. Goldstein και H.H Cho [1] οι οποίοι χρησιμοποίησαν ναφθαλίνη σε στερεά μορφή για να υπολογίσουν τους μέσους συντελεστές μεταφοράς μάζας και να εξάγουν συμπεράσματα για τη μετάδοση θερμότητας μέσω αναλογιών. Η μέθοδος εξάχνωσης που χρησιμοποίησαν για τον υπολογισμό των συντελεστών μάζας και του αριθμού Sherwood ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία. Επιλέχθηκε καμφορά έναντι ναφθαλίνης για λόγους υγείας, καθώς στο εργαστήριο δεν υπήρχαν κατάλληλες συνθήκες εξαερισμού και επειδή η καμφορά είναι φυσικό προϊόν με μικρότερη τοξικότητα. Οριακές συνθήκες που είναι δύσκολο να επιτευχθούν σε πειράματα μετάδοσης θερμότητας, όπως αδιαβατικές ή ισόθερμες οριακές συνθήκες, βρίσκονται εύκολα και με οικονομικό κέρδος από αντίστοιχες συνθήκες μεταφοράς μάζας. Για την καμφορά η επιφάνειά της ανταποκρίνεται στις ισόθερμες οριακές συνθήκες

τοιχώματος (όπου η τάση ατμών στην επιφάνεια της καμφοράς είναι ομοιόμορφη) και οι επιφάνειες που δεν εξαχνώνονται αντιστοιχούν σε αδιαβατικές οριακές συνθήκες. Οι κλίσεις θερμοκρασίας και θερμότητας αντιστοιχούν στις κλίσεις συγκέντρωσης και μαζικής ροής. Λόγω διάχυσης και συναγωγής, η απώλεια μάζας συμβαίνει με συνεχόμενο ρυθμό στον όγκο της. Στη συνέχεια μετρήσεις του βαθμού εξάχνωσής της υποδεικνύουν τους τοπικούς ρυθμούς μεταφοράς μάζας. Τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα προωθούν έρευνα για διαφορετικά είδη ροής με αριθμούς $Mach < 1$ ή > 1 , ποικίλων σχημάτων, όπως αεροτομές, κυλινδρικούς δίσκους, σφαίρες και διαφορετικών ειδών ροής [3][4][5][6]. Η παρούσα διπλωματική μελετά την επίδραση της έντασης της τύρβης και της κλίμακας μήκους της τύρβης (Length Scale) στον μέσο αδιάστατο αριθμό Sh για σχήματα κυλινδρικού δίσκου καμφοράς με τη χρήση της τεχνικής εξάχνωσης της καμφοράς.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να γίνει μια περιληπτική επισκόπηση στη θεωρία της τύρβης σαν φυσικό φαινόμενο και στην συνέχεια, μελετάται η φύση της ροής που παράγεται από αξονικά συμμετρικές δέσμες ρευστού (jet). Επίσης, ερευνάται το φαινόμενο της εξάχνωσης της καμφοράς. Επιπλέον, γίνεται εκτενής ανάλυση στον υπολογισμό συντελεστών μάζας και εξετάζεται η σχέση αδιάστατων αριθμών μάζας και θερμότητας. Τέλος, γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένα παραδείγματα.

2.1 Εισαγωγή στην Τύρβη

Κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναδρομή, βλέπουμε ότι 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) ήταν αυτές που διευκρίνησαν το φαινόμενο της μετάβασης. Συγκεκριμένα, ο Reynolds παρατήρησε στα πειράματά του ότι η μετάβαση από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- 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 .

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 [7]. 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 [8],[9], Prandl [10], Von Karman [11] και άλλους. Οι θεωρίες αυτές βασίζονται στην ομοιότητα ανάμεσα στις τυρβώδεις διακυμάνσεις και τις μοριακές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από αταξία. Εκφράσεις/προτάσεις/θέσεις για μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας σχηματίζονται κατ' αναλογία με τις εκφράσεις/προτάσεις 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 [12] ανέπτυξε την ιδέα της ομογενούς και ισότροπης τύρβης μία μαθηματική εξιδανίκευση της τύρβης, με την οποία μπορούν να εξαχθούν προτάσεις για στατιστικές ποσότητες οι οποίες μπορούν να εξηγήσουν σημαντικές πτυχές της τυρβώδους ροής. Στη μελέτη του για διάχυση από συνεχείς κινήσεις σε ομογενή ιστροπικά πεδία Taylor [13], η διάχυση ύλης σε ροϊκό πεδίο, βρέθηκε ότι σχετίζεται με την ταχύτητα διακύμανσης (random velocity) των ροϊκών σωματιδίων. Εκτεταμένη μελέτη της ομογενούς, ιστροπικής τύρβης και της διάχυσης σε ομογενή τύρβη έχει γίνει από τον Batchelor [14]. Εφαρμογή ομογενούς, ιστροπικής τύρβης σε πραγματική τυρβώδη ροή έγινε από τον Kolmogorov [15].

2.2 Χαρακτηριστικά της τύρβης

Είναι δύσκολο να δοθεί ακριβής ορισμός για την τύρβη. Ωστόσο, μπορούν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της [7].

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

- 2) Η διαχυτότητα της τύρβης, προκαλεί ανάμειξη και αυξημένο ρυθμό ορμής, θερμότητας και μεταφοράς μάζας. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας προκαλούν ανάμειξη σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι η μοριακή διάχυση. Έτσι, αν σ' ένα ρευστό η ροή χαρακτηρίζεται από αταξία, αλλά ωστόσο οι διακυμάνσεις της ταχύτητας δεν είναι διασκορπισμένες σε όλη την έκτασή 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 τον μηχανισμό vortex stretching.
- 4) Οι τυρβώδεις ροές παρουσιάζουν πάντα εξασθένηση ενέργειας (dissipation). Επομένως για να διατηρηθεί μία τυρβώδης ροή χρειάζεται συνεχής 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 [7].

2.4 Φυσικά χαρακτηριστικά τύρβης

Διαχωρισμός κατά Reynolds (Reynolds decomposition)

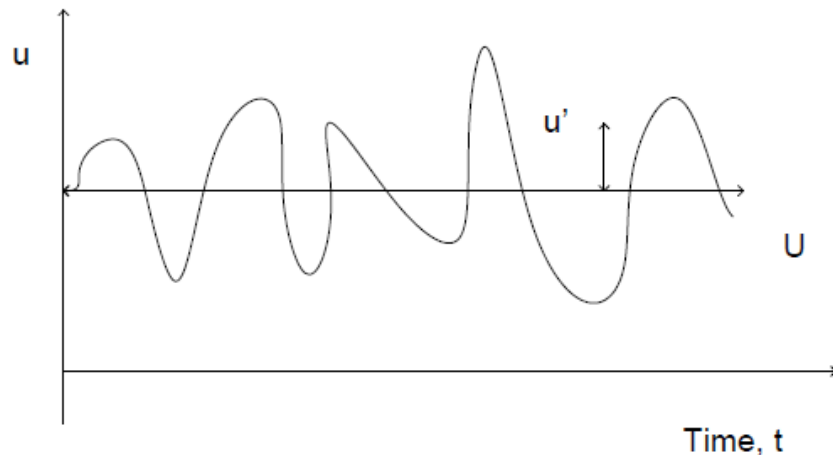
Βασικό χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής είναι η «ακατάστατη» μορφή της μεταβολής των τοπικών υδροδυναμικών μεγεθών, όπως είναι η ταχύτητα και η πίεση, σε συνάρτηση με το χρόνο. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στατιστικοί όροι για την περιγραφή των μεγεθών. Πρώτος ο Reynolds μελέτησε την τυρβώδη κίνηση 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 $u'_i(t)$ [7]. 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 όπου 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 σ' ένα ασυμπιεστο ρευστό είναι:

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

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

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.

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

Άρα οι τυρβώδεις διαταραχές της ταχύτητας είναι ασυμπίεστες.

Ένταση τύρβης

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

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

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 $\sqrt{u'^2}$ είναι παντού η ίδια, η τύρβη λέγεται ομογενής ως προς $\sqrt{u'^2}$ (ένταση κατά τη διεύθυνση x).

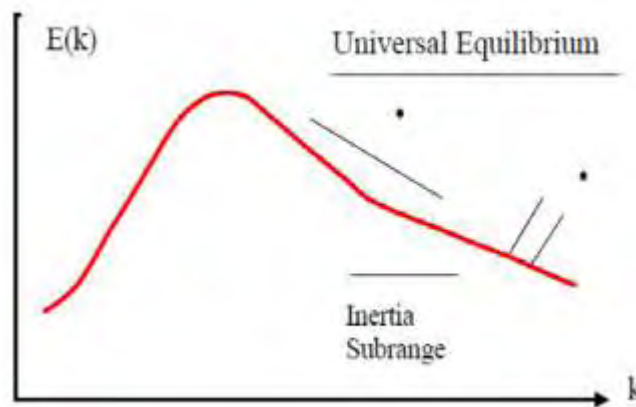
Ισότροπη τύρβη

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 κυματάρθμος. Ενέργεια παράγεται στις μεγάλες κλίμακες από τις μεγάλες δίνες (χαμηλοί κυματάρθμοι). Στη συνέχεια παράγονται όλο και μικρότερες δίνες, μέσω του μηχανισμού vortex

stretching, και με αυτό τον τρόπο η ενέργεια μεταφέρεται σε μεγαλύτερους κυματαριθμούς. Τέλος, η ενέργεια εξασθενεί (dissipated) και μετατρέπεται σε θερμότητα στις μικρές κλίμακες.



Εικόνα 2.2- 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:

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

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.

Η περιοχή όπου κυριαρχεί η μοριακή διάχυση χαρακτηρίζεται από την αντίστοιχη κλίμακα μήκους [7]. 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.

Στα πειράματά μας η τυρβώδης ροή είναι ισότροπη και ομογενής αλλά και ανισότροπη. Ο όρος ομογενής τύρβη σημαίνει ότι οι ιδιότητες και το μέτρο των ταχυτήτων στις τρεις διαστάσεις παραμένει σταθερό. Ο όρος ισότροπη τύρβη δηλώνει ότι το μέτρο των ταχυτήτων στις τρεις διευθύνσεις είναι ίδιο μεταξύ τους.

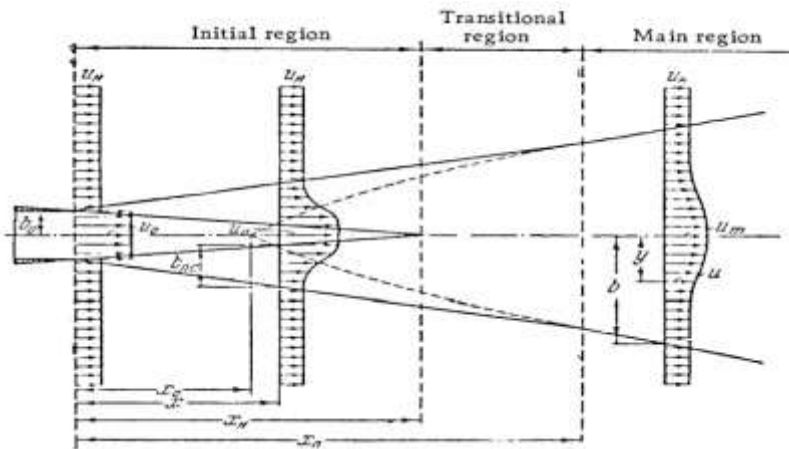
Πληθώρα πειραμάτων έχουν γίνει για να μελετηθεί το φαινόμενο της τύρβης, λόγω της αδυναμίας της να μελετηθεί μέσω αναλυτικών μοντέλων, καθώς η αρχή της επαλληλίας δεν ισχύει.

2.5 Αξονικά Συμμετρικές Δέσμες Ρευστού

Σε μερικά από τα πειράματα που έλαβαν μέρος στη παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν φουσητήρες ρευστού (hairdryers) και ένας αεροσυμπιεστής. Η περιγραφή τους θα γίνει ενδελεχώς στο κομμάτι της Πειραματικής Διάταξη, παρόλα αυτά αξίζει να μελετηθεί η ροή για μία δέσμη που γεννάται από αυτά τα μοντέλα και να αναλυθεί το προφίλ της ταχύτητάς τους, αλλά και της θερμοκρασίας στα πιστολάκια μαλλιών, καθώς η ροή του αεροσυμπιεστή δεν απάγει θερμότητα.

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των τυρβώδων δεσμών ρευστού, όπως φαίνεται από τη θεωρία και μαθηματική ανάλυση, που τα διακατέχει αλλά και από πλήθος πολλών πειραμάτων, είναι η μικρότητα της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας σε οποιοδήποτε τμήμα της δέσμης ρευστού σε σχέση με την διαμήκη συνιστώσα [16]. Ως εκ τούτου αν ο άξονας X είναι ευθυγραμμισμένος

με τον άξονα συμμετρίας του ρεύματος, οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά μήκος τού άξονα Y έχουν αποδειχτεί τόσο μικρές, ώστε μπορούν να αγνοηθούν.



Εικόνα 2.3- Προφίλ ταχύτητας τυρβώδους δέσμης ρευστού

Παρατηρούμε ότι έχουμε 3 στάδια. Στην αρχή η ταχύτητα είναι στρωτή και σταθερή. Στη συνέχεια έχουμε ένα μεταβατικό στάδιο, όπου από στρωτή ροή η ταχύτητα αποκτά διακυμάνσεις και παραβολική μορφή. Τέλος η ροή γίνεται πλήρως ανεπτυγμένη, και για να αποκτήσει η ταχύτητά μας την κρίσιμη τιμή που χρειάζεται για να γίνει τυρβώδης, απαιτείται κάποιο διάστημα X_n . Η ταχύτητα στο κέντρο είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασεως και δίνεται συναρτήσει μιας σταθεράς.

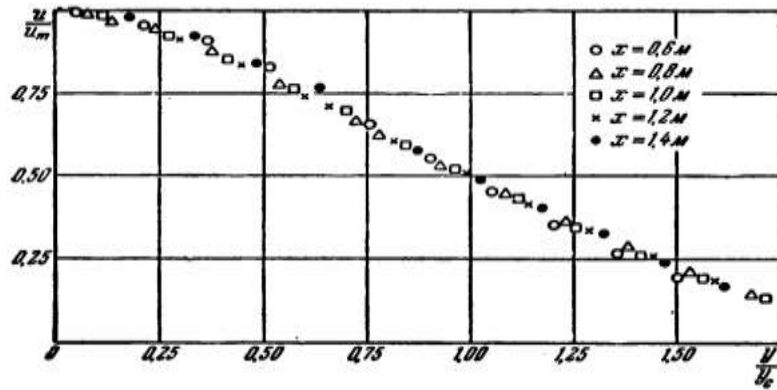
$$U_m = \frac{\text{const}}{x} \quad (2.16)$$

Επίσης, η ταχύτητα σε οποιοδήποτε σημείο αυτής προς στο κέντρο είναι συνάρτηση της απόστασης y προς την απόσταση $x \Rightarrow$

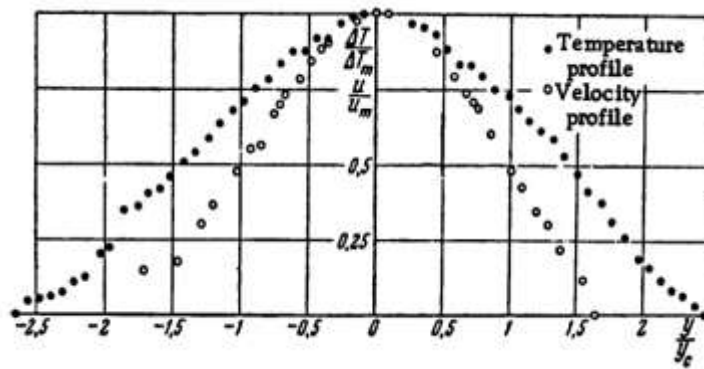
$$\frac{U}{U_m} = f(y/x) \quad (2.17)$$

Και ο ρυθμός ανάπτυξης της δέσμης ρευστού είναι σύμφωνα με τον κανόνα αλυσίδας

$$\frac{db}{dt} = \frac{db}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{db}{dx} U_m \quad (2.18)$$



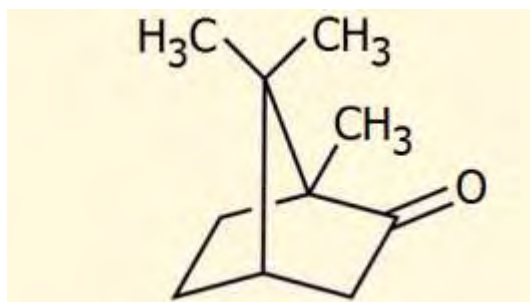
Εικόνα 2.4- Αδιαστατοποιημένο προφίλ ταχύτητας σε αξονικά συμμετρική δέσμη ρευστού από πειραματικά δεδομένα του Trupel [16]



Εικόνα 2.5- Αδιαστατοποιημένο Προφίλ Θερμοκρασίας σε αξονικά συμμετρική δέσμη ρευστού

2.6 Εξάχνωση Καμφοράς

Η καμφορά έχει μοριακό τύπο $C_{10}H_{16}O$ και έχει χρησιμοποιηθεί σ' ένα μεγάλο εύρος πειραμάτων. Η χρησιμότητά της είναι μεγάλη, καθώς έχει εφαρμογή στη φαρμακευτική βιομηχανία, σε απολυμαντικά, σαν απωθητικό εντόμων, άλλα και στα εκρηκτικά. Ο S.A Kareem παρατήρησε την εξάχνωσή της σε συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς ήθελε να βρεθεί ο χρόνος ημιζωής της [17].



Εικόνα 2.6- Μοριακός τύπος Καμφοράς

Παρατηρήθηκε ότι η εξάχνωση της καμφοράς σε φυσική συναγωγή διήρκησε 41 μέρες σε συνθήκες θερμοκρασίας 25 °C. Η φυσική συναγωγή συμπεριλήφθηκε στα πειράματά μας και παρουσιάζεται μαζί με όλα τα αποτελέσματα στο Κεφάλαιο 5.

Φυσικοχημικές Ιδιότητες Καμφοράς

- Εμφάνιση: Λευκοί διαφανείς ή αδιαφανείς κρύσταλλοι με κηρώδη υφή και με χαρακτηριστική διαπεραστική και μάλλον ευχάριστη αρωματική οσμή ("καμφορώδης οσμή")
- Μοριακός τύπος: $C_{10}H_{16}O$
- Σχετική μοριακή μάζα: 152,23
- Σημείο τήξεως: 175-177°C (υπό εξάχνωση)
- Σημείο ζέσεως: 204°C, 70°C στα 4 mm Hg. Εξαχνώνεται σε θερμοκρασία δωματίου (τάση ατμών: 20 mm Hg, στους 20°C)
- Πυκνότητα: 0,99 g/cm³

- Διαλυτότητα: 1,2 g/L (25°C) στο νερό, εξαιρετικά διαλυτή (1000-2000 g/L) στους συνήθεις οργανικούς διαλύτες (αιθανόλη, διαιθυλαιθέρα, ακετόνη, χλωροφόρμιο)
- Αναμιγνύομενη με άλλες στερεές ενώσεις (φαινόλη, μινθόλη, θυμόλη, υδρίτη χλωράλης) παρέχει ευτηκτικά μίγματα (υγρά σε θερμοκρασία δωματίου).
- Σχετικά τοξική ένωση με θανάσιμη δόση για ενήλικες: 50-500 mg/kg. Γενικά, δόση 2 g προκαλεί σοβαρή δηλητηρίαση, ενώ δόση 4 g ουσιαστικώς θεωρείται θανατηφόρα.[18]

2.7 Αδιάστατοι Αριθμοί και αναλογία μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε πολύπλοκες γεωμετρίες με πολύπλοκες συνοριακές συνθήκες, μπορεί να προσδιοριστούν από μετρήσεις συντελεστών μεταφοράς μάζας σε παρόμοιες γεωμετρίες, υπό παρόμοιες συνθήκες ροής, χρησιμοποιώντας πτητικά στερεά όπως: η ναφθαλίνη, η καμφορά και το χλωροβενζόλιο και χρησιμοποιώντας την αναλογία μεταξύ της μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε συνθήκες με χαμηλή μαζική ροή.

2.7.1 Διάχυση Μάζας και Αγωγή Θερμότητας

Η διάχυση θερμότητας σε στερεά σχετίζεται με τη θερμοκρασία του μέσου όπου λαμβάνει χώρα και περιγράφεται από το νόμο Fourier. Αυτός ο νόμος ορίζει ότι η διάχυση θερμότητας εξαρτάται από μία βαθμίδα θερμοκρασίας και η έντασή της εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του μέσου που λαμβάνει χώρα [2].

$$q = -k\nabla T \quad (2.19)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο η διάχυση της μάζας στα στερεά σχετίζεται με το μαζικό κλάσμα του πεδίου και περιγράφεται από το νόμο Fick. Ο οποίος λέει ότι η διάχυση μάζας που συμβαίνει σ' ένα μίγμα δύο συστατικών, εξαρτάται από την κλίση του μαζικού κλάσματος σε ένα από τα δύο

συστατικά [2]. Επιπλέον, η διάχυση μάζας εξαρτάται από τη διαχυτότητα του ενός συστατικού ως προς το άλλο.

$$j = -\rho D_{AB} \nabla w_a \quad (2.20)$$

Η διάχυση μάζας και η αγωγή θερμότητας είναι διαδικασίες μεταφοράς, που προέρχονται από μοριακή δραστηριότητα. Έτσι άλλωστε εξηγείται, ότι οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζουν μία ομοιομορφία. Πιο συγκεκριμένα:

- Το q που είναι η θερμική ροή αντιστοιχεί στο j τη μαζική ροή,
- Το T η θερμοκρασία αντιστοιχεί στο w το κλάσμα μάζας,
- Το K η θερμική αγωγιμότητα του υλικού αντιστοιχεί στη διαχυτότητα του συστατικού.

2.7.2 Συντελεστές Μεταφοράς Μάζας στην Εξάχνωση

Έχοντας τα εργαστηριακά δεδομένα για τη μεταφορά μάζας, το πρώτο βήμα για τον καθορισμό των συντελεστών μεταφοράς μάζας, είναι να υπολογίσουμε τον ρυθμό μεταφοράς μάζας για τους κυκλικούς δίσκους καμφοράς ως εξής:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\Delta m}{\tau} \quad (2.21)$$

Όπου Δm είναι η απώλεια μάζας από την εξαχνωμένη επιφάνεια και τ είναι ο χρόνος που διήρκτησε η εξάχνωση [2].

Η εμφάνιση των απωλειών μάζας, οι οποίες είναι ξένες προς την πορεία των εργαστηριακών δεδομένων παρατηρείται συχνά. Αυτές οι απώλειες συχνά οφείλονται στη φυσική συναγωγή, που υπόκεινται τα τεμάχια καμφοράς κατά την τοποθέτησή τους στην βάση εξάχνωσης ή κατά την ζύγιση τους στο τέλος της διαδικασίας.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ορίζεται ως εξής:

$$h_m = \frac{(dm/dt)A}{\rho(\omega_{nw} - \omega_{nf})} \quad (2.22)$$

Στην παραπάνω σχέση ω_{nw} είναι το κλάσμα μάζας στην επιφάνεια εξάχνωσης και ω_{nf} είναι το μαζικό κλάσμα μακριά από την επιφάνεια εξάχνωσης. Επίσης, η σχέση αυτή μπορεί να εκφραστεί και ως προς την συγκέντρωση μάζας, αντικαθιστώντας απλά το $\rho_n = \omega_n \rho$.

Στη συνέχεια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το νόμο των ιδανικών αερίων για τη συσχέτιση της συγκέντρωσης μάζας ατμού καμφοράς με τη μερική πίεση και θερμοκρασία του.

$$\rho_n = P_n R / T \quad (2.23)$$

Όπου R η σταθερά των ιδανικών αερίων για ατμό καμφοράς.

Τέλος, ο συντελεστής μεταφοράς μάζας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού Sherwood.

$$Sh = \frac{KL}{D} \quad (2.24)$$

2.7.3 Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας στην Εξάχνωση

Στις περισσότερες περιπτώσεις η σχέση μεταξύ μεταφοράς και μετάδοσης μάζας παραμένει η ίδια για τη μεγαλύτερη κατηγορία προβλημάτων. Έτσι, είναι γνωστό ότι ο αριθμός Nusselt δεν εξαρτάται από τον αριθμό Prandtl σε πλήρη ανεπτυγμένη στρωτή ροή μέσα σε αγωγό ανεξάρτητα από τη γεωμετρία της διατομής [2]. Σε αυτή την περίπτωση η ισχυρότερη εξάρτηση είναι μεταξύ του αδιάστατου αριθμού Nusselt και Sherwood.

Ο αριθμός Nusselt για τις περισσότερες εξαναγκασμένες ροές ρευστών για $Pr > 0.7$ παρουσιάζει μια πολύ ήπια εξάρτηση από τον αριθμό Prandtl. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα $Pr = 0.7$ για αέρα και $Pr = 2-10$ για νερό σε προβλήματα μετάδοσης θερμότητας με αμελητέο σφάλμα.

Για εξωτερικές ροές κατά μήκος σωλήνων, τυρβώδεις ροές στο εσωτερικό αγωγών και άλλες ροές εξαναγκασμένης συναγωγής, ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως εξής:

$$Nu = CPr^n Re^m \quad (2.25)$$

Όπου, το n στην παραπάνω σχέση είναι ανάμεσα στο 0.3-0.4 Η αναλογία Colburn για το παράδειγμα που εξετάζουμε θεωρεί ότι $n=0.33$ για αριθμό Prandtl $0.6 < Pr < 60$. Αυτή η τιμή του n έχει επαληθευτεί από πειράματα και θεωρείται μία έγκυρη τιμή για να χρησιμοποιούμε στις περισσότερες περιπτώσεις για ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων ροών με εξαναγκασμένη συναγωγή. Ο Sparrow ο οποίος μελέτησε την παραπάνω σχέση και σε άλλες εφαρμογές όρισε τον αριθμό $n=0.4$ για τυρβώδεις ροές.

Τέλος για ροές με εξαναγκασμένη συναγωγή η εναλλαγή του αριθμού Sh και Nu γίνεται ως εξής:

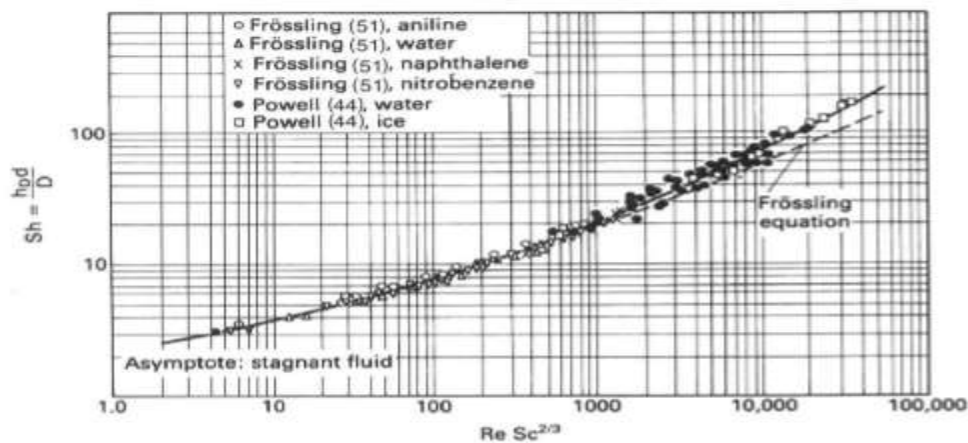
$$Nu = (Pr/Sc)^n Sh \quad (2.26)$$

Όπου ο αριθμός Schmidt για καμφορά βρίσκεται από πίνακες.

Για συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής ο Frössling μελέτησε την εξάτμιση σταγόνων νιτροβενζολίου, ανιλίνης και σφαιρών ναφθαλίνης σε ρεύμα αέρα [19]. Οι σταγόνες ήταν μικρές της τάξεως του 1 mm. Ο Powell έκανε πειράματα εξάχνωσης νερού πάνω σε υγρές σφαίρες και από σφαίρες με πάγο.

Τα πειραματικά αποτελέσματα του Frössling και Powell παρουσιάζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Sh = 2.0(1 + 0.27Re^{0.5}Sc^{0.33}) \quad (2.27)$$



Εικόνα 2.7- Μεταφορά Μάζας σε σφαίρες

Ο Rowe ήταν άλλος ένας που ασχολήθηκε με την αναλογία των αδιάστατων αριθμών μεταφοράς μάζας και θερμότητας ο οποίος προέβλεψε τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Nu = 2 + \beta Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (2.28)$$

$$0.8 > \beta > 0.4$$

$$Sh = \alpha + \beta Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (2.29)$$

$$1 > \beta > 0.3$$

Όπου α συνάρτηση του αριθμού Grashof που τείνει στο 2, όσο ο αριθμός αυτός τείνει στο 0.

2.8 Αριθμητικά Παραδείγματα

Αριθμητικό Παράδειγμα 1: Εξάχνωση σφαιρικής ναφθαλίνης

Να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για να εξαχνωθούν 3 g μίας σφαίρας ναφθαλίνης 4 g, η οποία έρχεται σε επαφή με αέρα με συνθήκες θερμοκρασίας $T=45\text{ }^\circ\text{C}$ και πίεσης $P=1.013\text{ bar}$. Η διαχυτότητα της ναφθαλίνης στον αέρα δίνεται $D_{\alpha\beta}=6.92 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ και η πυκνότητά της είναι $\rho=1140\text{ kg/m}^3$. Τέλος η πίεση κορεσμού στους $45\text{ }^\circ\text{C}$ είναι $P_{\text{sat}}=0.8654\text{ mmHg}$. [20]

Δεδομένα

$M_0=4\text{g}$, αρχική μάζα ναφθαλίνης

$M_1=1\text{g}$, τελική μάζα ναφθαλίνης

$R_0=0.943\text{ cm}$, αρχική ακτίνα ναφθαλίνης

$R_1=0.594\text{ cm}$, τελική ακτίνα ναφθαλίνης

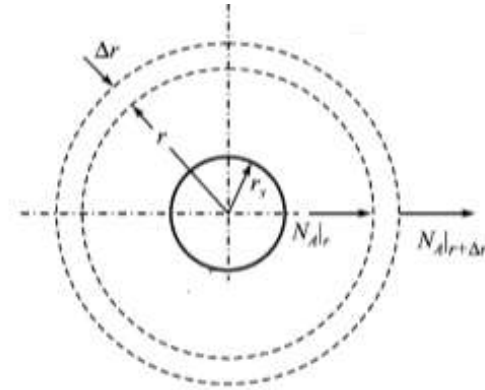
$M_A=128$, μοριακό βάρος ναφθαλίνης

$D_{\alpha\beta}=6.92 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, διαχυτότητα ναφθαλίνης στον αέρα

$T=318\text{ K}$, θερμοκρασία αέρα

$P_{\text{sat}}(318\text{K}) = 0.8654 \text{ mmHg}$, τάση ατμών στους 318 K

Λύση:



Εικόνα 2.8- Εξάχνωση σφαιρικής ναφθαλίνης

Σύμφωνα με το Ισοζύγιο Μάζας στη σφαιρική επιφάνεια έχω :

$$[\text{Είσοδος}] = (4\pi r^2)N_A|_r$$

$$[\text{Εξοδος}] = (4\pi r^2)N_A|_{r+\Delta r}$$

$$[\text{Εξοδος}] - [\text{Είσοδος}] = (4\pi r^2)N_A|_{r+\Delta r} - (4\pi r^2)N_A|_r = 0, \text{ καθώς έχουμε μόνιμες συνθήκες.}$$

Διαιρώ κατά μέλη με Δr και παίρνω το όριο για $\Delta r \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{[\text{Εξοδος}] - [\text{Είσοδος}]}{\Delta r} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dr}(4\pi r^2)N_A = 0 \Rightarrow$$

$$(4\pi r^2)N_A = \text{σταθερό μέγεθος} = W, \quad (1)$$

Είναι γνωστό ότι για διάχυση σε μόνιμες συνθήκες ισχύει :

$$(\text{Επιφάνεια})(\text{Ρυθμός Ροής}) = \text{σταθερό μέγεθος}$$

$$\text{Τώρα έχουμε } N_A = (N_A + N_B) \frac{Pa}{P} - \frac{D_{ab}}{RT} \frac{dPa}{dr} \Rightarrow$$

$N_B = 0$ διότι δεν έχουμε διάχυση από τον αέρα στη ναφθαλίνη \Rightarrow

$$N_A = - \frac{D_{ab}}{RT(P-Pa)} \frac{dPa}{dr} \stackrel{(1)}{\Rightarrow} \frac{dPa}{P-Pa} = \frac{WRT}{4\pi D_{ab}P} \frac{dr}{r^2} \text{ και ολοκληρώνοντας κατά μέλη πέρνουμε:}$$

$$-\int_{P_{as}}^{P_{\infty}} \frac{dPa}{P-Pa} = \int_{r_s}^{\infty} \frac{WRT}{4\pi DabP} \frac{dr}{dr^2} \Rightarrow W = \frac{4\pi DabPr_s}{RT} \ln \frac{P-P_{\infty}}{P-P_{as}} \quad (2)$$

$$[\text{Συγκέντρωση}] = -\frac{d}{dt} \frac{4\pi r_s^3}{3} \frac{\rho_A}{M_A} = W$$

$$\Rightarrow W = -\frac{4\pi\rho_A}{M_A} r_s^2 \frac{dr_s}{dt} \quad \text{όπου } W \text{ ο σταθερός ρυθμός μεταφοράς μάζας με διάχυση}$$

$$\stackrel{(2)}{\Rightarrow} \frac{4\pi DabPr_s}{RT} \ln \frac{P-P_{\infty}}{P-P_{as}} = -\frac{d}{dt} \frac{4\pi r_s^3}{3} \frac{\rho_A}{M_A} \quad \text{λύνοντας ως προς } r_s \text{ και ολοκληρώνοντας ως προς την αρχική}$$

και τελική ακτίνα είναι:

-

$$\int_{r_{so}}^{r_1} r_s dr_s = \frac{D_{AB} P M_A}{RT \rho_A} \ln \frac{P - P_{\infty}}{P - P_{as}} \int_0^{t_1} dt$$

$$r_1^2 - r_0^2 = \frac{2D_{AB} P M_A}{RT \rho_A} \ln \frac{P - P_{\infty}}{P - P_{as}} t_1 \Rightarrow t_1 = 219.5 \text{h,}$$

ο χρόνος που χρειάζεται για να εξαχνωθεί από 4g στα 3g ναφθαλίνης.

Αριθμητικό Παράδειγμα 2: Εξάχνωση κυλινδρικής ναφθαλίνης

Εξάχνωση κυλινδρικής ναφθαλίνης μήκους 20 cm και μάζας 10 g πραγματοποιείται όταν έρχεται σε επαφή με μεγάλο όγκο αέρα θερμοκρασίας $T=45 \text{ }^\circ\text{C}$ και πίεσης $P=1 \text{ atm}$. Το αέριο διαχέεται μέσω ενός στάσιμου φιλμ αέρα πάχους 3mm που περιβάλλει τον κύλινδρο. Να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για να εξαχνωθεί η μισή ναφθαλίνη. Υποθέστε ότι η εξάχνωση συμβαίνει μόνο στην κυλινδρική επιφάνεια και όχι και στις βάσεις του κυλίνδρου καθώς η επιφάνεια τους είναι σχετικά μικρότερη [20].

Δεδομένα

$L=20 \text{ cm}$, μήκος κυλίνδρου

$M_0=10$ g, αρχική μάζα ναφθαλίνης

$M_1=5$ g, τελική μάζα ναφθαλίνης

$D_{αβ}=6.92 \times 10^{-6}$ m²/s, διαχυτότητα ναφθαλίνης στον αέρα

$T=318$ K, θερμοκρασία αέρα

$P=1$ atm, πίεση αέρα

$P_{sat}(318K)=0.8654$ mmHg= 0.00114 atm, τάση ατμών στους 318 K

$r_{c1}=0.3736$ cm, αρχική ακτίνα ναφθαλίνης

$r_{c2}=0.2642$ cm, τελική ακτίνα ναφθαλίνης

$\delta = 3$ mm

Λύση:

Για τον υπολογισμό της αρχικής ακτίνας βρίσκουμε τον αρχικό όγκο και έχουμε :

$$V_0 = \pi r_{c1}^2 L = \frac{10g}{\frac{1.14g}{cm^3}} = 8.772 \text{ cm}^3 \Rightarrow r_{c1} = 0.3736 \text{ cm}$$

Για τον υπολογισμό της τελικής ακτίνας βρίσκω τον τελικό όγκο:

$$V_1 = V_0/2 = 4.386 \text{ cm}^3 = \pi r_{c2}^2 L \Rightarrow r_{c2} = 0.2642 \text{ cm}$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε διάχυση ναφθαλίνης μέσω αέρα, οπότε, όπως έχουμε προαναφέρει, ισχύει :

$$(2\pi r L) N_A = (2\pi r L) \left(-\frac{D_{AB} P}{RT(P-P_A)} \right) \frac{dp_A}{dr} = W$$

όπου W είναι ο ρυθμός εξάχνωσης, δηλαδή ο ρυθμός μεταφοράς μάζας με διάχυση.

Στη συνέχεια γράφουμε τις συνοριακές συνθήκες και παίρνουμε το ορισμένο ολοκλήρωμα:

1. $r = r_c \Rightarrow P_A = P_{as}$
2. $r = r_c + \delta \Rightarrow P_A = 0$ καθώς ο αέρας σε αυτή την ακτίνα δεν περιέχει οριακά ναφθαλίνη,

$$-\int_{P_{as}}^0 \frac{dp_A}{P-P_A} = \int_{r_c}^{r_c+\delta} \frac{RTW}{2\pi D_{AB} P L r} dr \Rightarrow W = \frac{2\pi D_{AB} P \ln P/(P-P_{as})}{RT \ln(1+\delta/r_c)}$$

Γνωρίζουμε ότι η μάζα του κυλίνδρου είναι $m = \pi r_c^2 L \rho_A$ και ο ρυθμός εξάχνωσης μπορεί να

$$\text{γραφεί ως: } W = -\frac{d\left(\frac{m}{M_A}\right)}{dt} = -\frac{d\left(\frac{\pi r_c^2 L \rho_A}{M_A}\right)}{dt} = \frac{-2\pi L \left(\frac{\rho_A}{M_A}\right) r_c dr_c}{dt} \Rightarrow$$

$$\frac{2\pi D_{AB} PL}{RT \ln\left(1 + \frac{\delta}{r_c}\right)} \ln\left(\frac{P}{P - P_{as}}\right) = \frac{-2\pi L \left(\frac{\rho_A}{M_A}\right) r_c dr_c}{dt}$$

Παίρνοντας ορισμένο ολοκλήρωμα κατά μέλη προκύπτει:

$$\int_{-r_{c1}}^{-r_{c2}} r_c \ln\left(1 + \frac{\delta}{r_c}\right) = D_{AB} P M_A \frac{M_A}{RT \rho_A} \ln \frac{P}{P - P_{as}} \int_0^t dt \Rightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{r_{c1}^2}{2} \ln\left(1 + \frac{\delta}{r_{c1}}\right) - \frac{r_{c2}^2}{2} \ln\left(1 + \frac{\delta}{r_{c2}}\right) + \frac{\delta}{2} ((r_{c1} - r_{c2}) - \delta \ln \frac{r_{c1} + \delta}{r_{c2} + \delta})$$

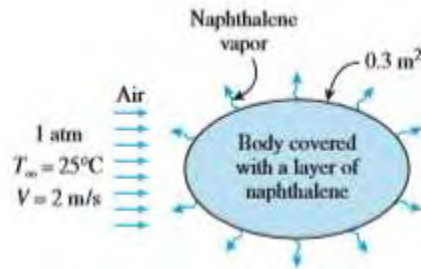
$$= D_{AB} P M_A \frac{M_A}{RT \rho_A} \ln \frac{P}{P - P_{as}} t$$

$$\Leftrightarrow t = 10.35h \text{ ο χρόνος που απαιτείται για να εξαχνωθεί η μισή ναφθαλίνη.}$$

Αριθμητικό Παράδειγμα 3: Αναλογία μεταξύ μετάδοσης θερμότητας και μάζας

Κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου πειράματος που περιλαμβάνει ροή ξηρού αέρα σε συνθήκες 25 ° C και 1 atm που κινείται με ταχύτητα 2m/s προς ένα σώμα το οποίο είναι καλυμμένο με ένα στρώμα ναφθαλίνης. Παρατηρείται ότι 12 g ναφθαλίνης εξαχνώνονται σε 15 min. Η επιφάνεια του σώματος είναι 0.3 m². Το σώμα και ο αέρας διατηρήθηκαν στις παραπάνω

συνθήκες κατά τη διάρκεια της μελέτης. Να βρεθεί ο συντελεστής της μεταφοράς θερμότητας κάτω από τις ίδιες συνθήκες και την ίδια γεωμετρία [21].



Εικόνα 2.9- Σχήμα παραδείγματος 3

Λύση:

Δεδομένα

$D_{AB}=0.61 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, η διαχυτότητα της ναφθαλίνης στον αέρα

$M_A=128.2 \text{ kg/kmol}$, το μοριακό βάρος της ναφθαλίνης

$\rho=1.184 \text{ kg/m}^3$, η πυκνότητα της ναφθαλίνης

$C_p=1007 \text{ J/kgK}$, η ειδική θερμοχωρητικότητα

$\alpha=2.141 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$P_{as}=11 \text{ Pa}$, η τάση ατμών της ναφθαλίνης

Αρχικά υπολογίζουμε τη συγκέντρωση της ναφθαλίνης στην επιφάνεια.

$$W_{as} = \frac{P_{as} M_A}{P M_{air}} = \frac{11}{101,325} \frac{128.2}{29} = 4.8 \times 10^{-4}$$

Ο ρυθμός εξάχνωσης της ναφθαλίνης είναι:

$$M_{\text{εξάχν}} = m/\Delta t = 0.012 \text{ kg}/(15 \times 60 \text{ sec}) = 1.33 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

Και εξ αυτών υπολογίζω το συντελεστή μεταφοράς μάζας h_m

$$h_m = \frac{M_{\varepsilon\xi\alpha\chi\nu}}{\rho A_s (W_{as} - W_\infty)} = \frac{1.33 \times 10^{-5}}{1.184 \text{ kg/m}^3 (0.3 \text{ m}^2) (4.8 \times 10^{-4} - 0)} = 0.0780 \text{ m/s}$$

Και από τη σχέση της αναλογίας μεταφοράς μάζας και μεταφοράς θερμότητας μπορώ να προσδιορίσω τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από την παρακάτω εξίσωση:

$$h_{heat} = \rho C_p h_m \left(\frac{a}{D_{ab}} \right)^{1.5} = 215 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Λόγω της ευκολίας των υπολογισμών, η ναφθαλίνη έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Κεφάλαιο 3

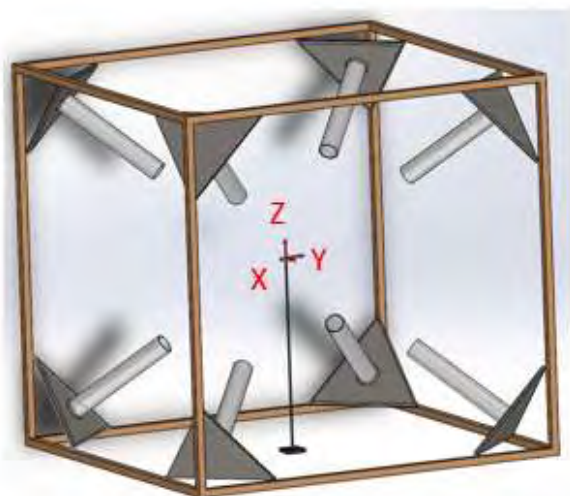
Πειραματική Διάταξη

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις τρεις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα της επίδρασης της τύρβης στην μεταφορά μάζας κυλινδρικών δίσκων Καμφοράς. Επίσης, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των μοντέλων καμφοράς στα πειράματα. Τέλος, αναφέρονται οι συσκευές και τα όργανα μέτρησης που έλαβαν μέρος είτε στην εκπόνηση μετρήσεων είτε στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ρευστοδυναμικής και Στροβιλομηχανών. Αξίζει να αναφερθεί ότι μερικά πειράματα για την επίδραση ανισότροπης θερμής τύρβης στη μεταφορά μάζας έγιναν στα προκάτ στο εργαστήριο Ρευστοδυναμικής, αλλά δεν συμπεριλήφθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

3.1 Περιγραφή Πειραματικής διάταξης: Θάλαμος Ισότροπης και Ομοιογενούς Τύρβης

Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη δημιουργεί τυρβώδη ροή παραγόμενη από συνθετικά δέσμες ρευστού και είναι ένας κύβος όγκου 8 m^3 ο οποίος στις οκτώ κορυφές του έχει φουσητήρες ρευστού (hairdryers) 50Hz και 1000W, οι οποίες είναι προσανατολισμένες προς το κέντρο του. Για την κατασκευή του κύβου κόπηκαν ξύλα μήκους 2m για κάθε μία από τις δώδεκα ακμές του, τα οποία στην συνέχεια με σιδερένια ταφ και γάμα ενώθηκαν μεταξύ τους με βίδες. Επιπροσθέτως, τοποθετήσαμε πάνω στις ακμές του κύβου σε κάθε κορυφή οκτώ ξύλινα τρίγωνα στα οποία το βαρύκεντρο τους είχε κατεύθυνση το κέντρο του κύβου. Για τη στήριξη των συνθετικών δεσμών ρευστού (jets) χρησιμοποιήθηκαν σιδερένια τρίγωνα με οπή στο κέντρο λίγο μεγαλύτερη από 7 cm όπου έμπαιναν οι φουσητήρες (hairdryers). Επίσης στα σιδερένια τρίγωνα ανοίξαμε πάνω τους 2 τρύπες με κοβάλτιο, όπου περάσαμε 2 σιδερένιες ντίζες οι οποίες έδεναν τα ξύλινα τρίγωνα και τα σιδερένια με παξιμάδια. Επιπλέον επειδή τα σιδερένια τρίγωνα ταλαντώνονταν όταν άνοιγαν οι φουσητήρες ρευστού (hairdryers), λόγω του

βάρους τους, προσθέσαμε για την στήριξη της κατασκευής δύο συμπαγή ξύλα, οποία σχημάτιζαν έναν νοητό σταυρό με τις ντίτζες. Επειδή οι φυσητήρες είχαν ελλειπτική διατομή και το προφίλ της ροής που παρήγαγαν δεν ήταν κατάλληλο, κόψαμε σωλήνα PVC διαμέτρου 6 cm, τον οποίο και θερμάναμε με καμινέτο και τον τοποθετήσαμε στην έξοδο από τους φυσητήρες με χρήση σιδερένιων δαχτυλιδιών. Τέλος, χρησιμοποιήσαμε σιδηρόστοκο στην επαφή των φυσητήρων με τα σιδερένια τρίγωνα, ώστε η κατασκευή να είναι σταθερή. Αξίζει να αναφερθεί ότι για να τοποθετηθούν οι φυσητήρες σε κάθε γωνία, ακριβώς προσανατολισμένα προς το κέντρο του κύβου, παίρναμε μετρήσεις με Pilot-Static Anemometer στο κέντρο ταχύτητας (U), θερμοκρασίας (T) ανάλογα με τη γωνία που ήταν τοποθετημένο το πιστολάκι μέχρι να μεγιστοποιηθούν τα δύο μεγέθη. Για την καλύτερη κατανόηση της διάταξης, το σχήμα παρουσιάζεται κάτω.



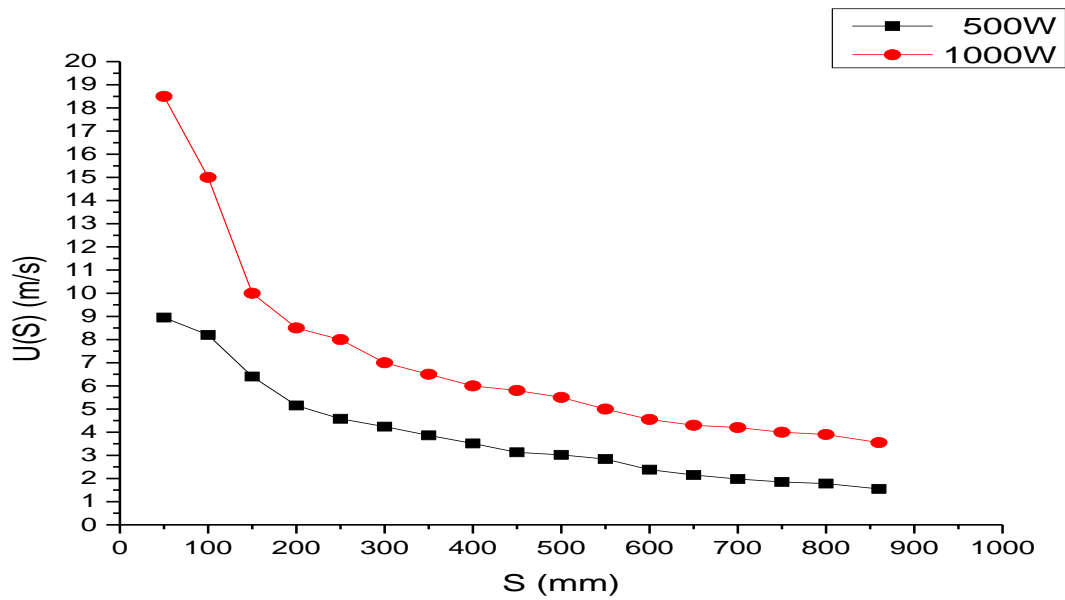
Εικόνα 3.1- Θάλαμος Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης

Αφού έγινε η κατασκευή της πειραματικής διάταξης, στη συνέχεια πήραμε μετρήσεις Ταχύτητας (U) και Θερμοκρασίας (T) με το TSI velocimeter και το Pilot-Static Anemometer στις τέσσερις διαγώνιους του κύβου ανά 5 cm μέχρι το κέντρο του κύβου και εξάγαμε διαγράμματα. Παρατηρήσαμε κατά συνέπεια, ότι το προφίλ της ταχύτητας ήταν διαφορετικό όταν παίρναμε μετρήσεις στη διαγώνιο μ' ένα φυσητήρα ανοιχτό, από το και με τους 8 φυσητήρες ανοιχτούς. Για την παραγωγή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Origin. Τα πειράματα, που διεξήχθησαν στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη για τη μελέτη

της μεταφοράς μάζας, έγιναν για δύο συχνότητες λειτουργίας. Αυτές ήταν 1000W η οποία αντιστοιχεί στη μεγάλη σκάλα από τα πιστολάκια και 500W που αντιστοιχεί στη μικρή σκάλα.

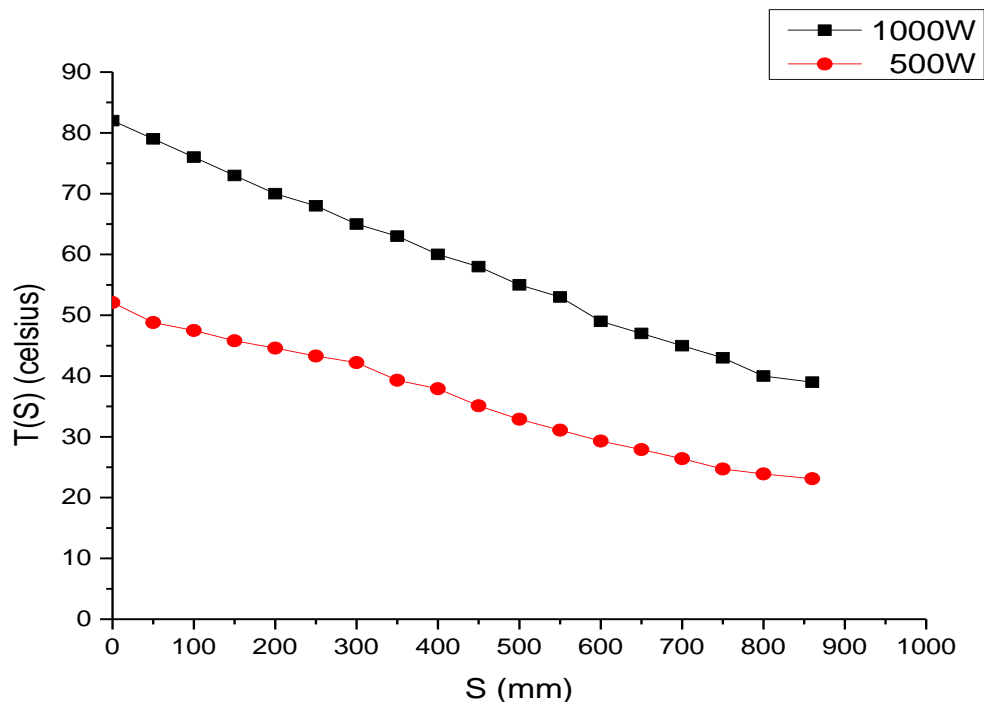


Εικόνα 3.2- Στήριξη για τα Πιστολάκια στον Θάλαμο Τύρβης



Διάγραμμα 3.1: Ταχύτητες Συνθετικών Δεσμών Ρευστού για ισχύ 500W και 1000W συναρτήσει της απόστασης S πάνω στη διαγώνιο του κύβου

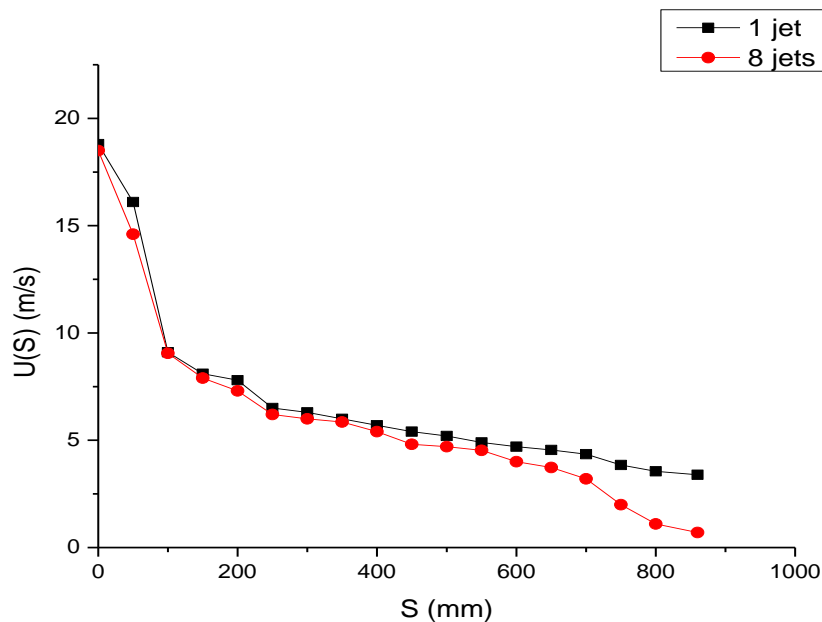
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τη μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με την απόσταση. Μπορούμε δηλαδή, με το παραπάνω να προβλέψουμε την ταχύτητα σε οποιαδήποτε θέση της διαγωνίου μέχρι το κέντρο. Όπως είναι φανερό, η σχέση ταχύτητας και συχνότητας είναι ανάλογη.



Διάγραμμα 3.2: Προφίλ Θερμοκρασίας Συνθετικών Δεσμών Ρευστού συναρτήσει της απόστασης S πάνω στη διαγώνιο του κύβου

Σε αυτό το διάγραμμα βλέπουμε την πτώση της θερμοκρασίας από την έξοδο της συνθετικής δέσμης αέρα μέχρι το κέντρο του Θαλάμου Τύρβης. Σε αντιστοιχία με την ταχύτητα η θερμοκρασία είναι και αυτή ανάλογη με τη συχνότητα λειτουργίας.

Επειδή κάποια δεδομένα μετρήσεων για τη θερμοκρασία και την ταχύτητα έβγαιναν εκτός από την συνολική πορεία των δεδομένων έγινε πρωτόλεια προσπάθεια διόρθωσης των πειραματικών μετρήσεων με Νευρωνικά Δίκτυα (Ιδ. Παράρτημα 2- Διόρθωση Δεδομένων με Νευρωνικά Δίκτυα στο Θάλαμο Τύρβης) .



Διάγραμμα 3.3: Σύγκριση Ταχύτητας Συνθετικών Δεσμών Ρευστού με 8 φουσητήρες ανοιχτούς και με ένα ανοιχτό για ισχύ 1000W

Το παραπάνω διάγραμμα έχει μία ιδιαίτερη σημασία καθώς μας δείχνει κατά πόσο η κατασκευή μας είναι σωστά κατασκευασμένη ως προς τις διαστάσεις. Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα με όλους του φουσητήρες ανοιχτούς, προσεγγίζει πολύ μικρές τιμές, σχεδόν μηδενικές στην περιοχή του κέντρου του κύβου. Επομένως, είναι έγκυρη η θεώρησή μας για Ισότροπη και Ομογενή Τύρβη.

Αντιλαμβάνεται κανείς εύκολα, ότι τα συγκεκριμένα διαγράμματα αλλάζουν για διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Οφείλουμε, έτσι, να αναφέρουμε και τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όπου έγιναν οι άνωθεν μετρήσεις, καθώς και να παραθέσουμε και μερικές ακόμα.

- Για ισχύ 1000W και $T_{\text{περιβ}}=20.6^{\circ}\text{C}$ έχουμε θερμοκρασία στο κέντρο $T_{\text{κέντρο}}=39^{\circ}\text{C}$
- Για ισχύ 500W και $T_{\text{περιβ}}=17.4^{\circ}\text{C}$ έχουμε θερμοκρασία στο κέντρο $T_{\text{κέντρο}}=23.1^{\circ}\text{C}$

Οι παραπάνω μετρήσεις είναι για έναν φουσητήρα ρευστού ανοιχτό.

- Για ισχύ 1000W και $T_{\text{περιβ}}=14.1^{\circ}\text{C}$ έχουμε θερμοκρασία στο κέντρο $T_{\text{κέντρο}}=31.1^{\circ}\text{C}$

- Για ισχύ 500W και $T_{\text{περιβ}}=14.1^{\circ}\text{C}$ έχουμε θερμοκρασία στο κέντρο $T_{\text{κέντρο}}=41.2^{\circ}\text{C}$

Οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν με όλους του φυσήτηρες ανοιχτούς,

Οι ταχύτητες επηρεάζονται και αυτές αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Αναφορά σε αυτές θα γίνει στο συγκεντρωτικό πίνακα 3.1 και για όλες τις διατάξεις, στο τέλος του κεφαλαίου.

Σε αυτή τη ροή έχουμε παραγόμενη τύρβη από ένα θάλαμο με συνθετικές δέσμες αέρα. Το πλεονέκτημα αυτής της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι στο κέντρο του θαλάμου, όπου τοποθετείται ο κυλινδρικός δίσκος καμφοράς σε ειδικά διαμορφωμένη βάση, η μέση ταχύτητα της ροής είναι σχεδόν 0 [22],[23]. Δηλαδή $U_0=0$ και αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα 3.3 αλλά η ένταση της τύρβης μπορεί να αλλάζει ανάλογα με τις ταχύτητες και τις θερμοκρασίες εξόδου των συνθετικών δεσμών αέρα.

Επομένως, σε αυτή τη διάταξη επιχειρείται η απομόνωση της επίδρασης της έντασης της τύρβης στη μεταφορά μάζας του κυλινδρικού δίσκου, εφόσον η επίδραση της συναγωγής είναι ανύπαρκτη, $U_0=0$.

Στην κεντρική περιοχή του Θαλάμου Τύρβης η ροή είναι σχεδόν Ομοιογενής και Ισότροπη. Η ακτίνα αυτής της σφαιρικής περιοχής είναι περίπου $R=150\text{mm}$ πολύ μεγαλύτερη από την διάμετρο της καμφοράς.

Είναι, επίσης, εφικτό να θερμάνουμε τη ροή τοποθετώντας ηλεκτρικές αντιστάσεις στις συνθετικές δέσμες αέρα. Τα δεδομένα της ροής λαμβάνονται από το όργανο μέτρησης TSI Anemometer και παρουσιάζονται συμπυκνμένα με τα αλλά δεδομένα των πειραματικών διατάξεων, ανάλογα με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στον Πίνακα 3.1.

3.2 Περιγραφή Πειραματικής διάταξης: Αεροσυμπιεστής

Σε αυτή τη πειραματική διάταξη έχουμε έναν αεροσυμπιεστή ο οποίος έχει ομαλοποιητή ροής, ώστε η κατανομή της ταχύτητας να γίνεται ομοιόμορφη. Έγινε προέκταση με σωλήνα PVC διαμέτρου $D_j=12\text{cm}$ με σφικτήρες και στη συνέχεια όλο το μήκος του αεροσυμπιεστή δέθηκε με ξύλα, ώστε ο σωλήνας να είναι τελείως παράλληλος ως προς το έδαφος για να μη δημιουργούνται ανωμαλίες στη ροή.

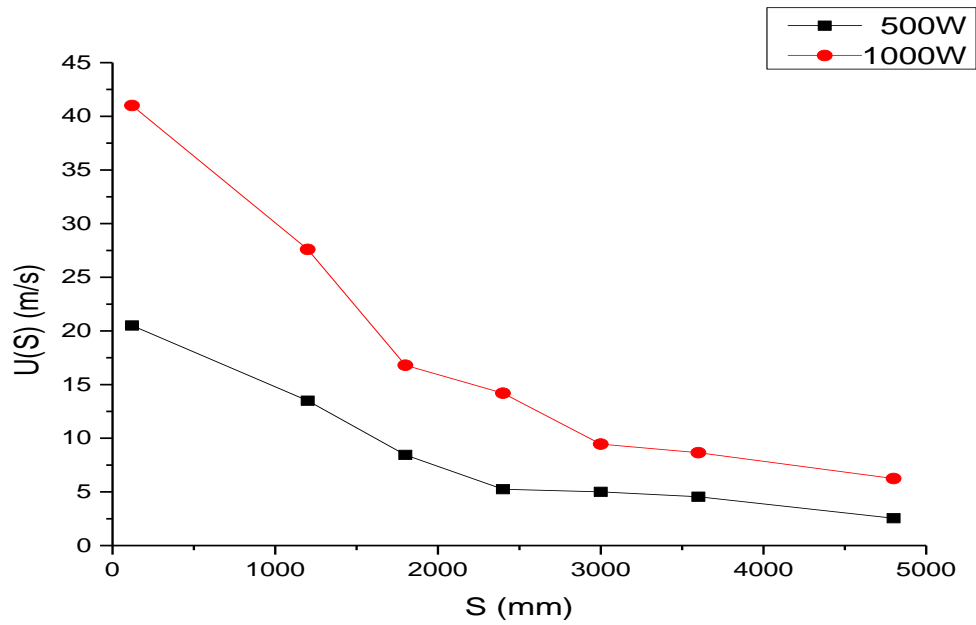
Για τη λειτουργία του αεροσυμπιεστή χρησιμοποιήθηκε Inverter συχνοτήτων Siemens micromaster 420, όπου ρύθμιζε την παραγόμενη ταχύτητα U_c . Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη παράγει τυρβώδη ροή από μία αξονοσυμμετρική κυκλική ροϊκή δέσμη. Το μοντέλο τοποθετήθηκε κατά μήκος της κεντρικής ροϊκής γραμμής της δέσμης ρευστού σε σημεία πολλαπλάσια της διαμέτρου του, αλλά και σε συγκεκριμένο σημείο $X=25D$, όπου η ταχύτητα είναι $U_c=12\text{m/s}$, να είναι η ίδια, δηλαδή, με εκείνη της αεροσήραγγας, ώστε να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων.

Εδώ η ροή είναι τελείως ανισόροπη και η ένταση της τύρβης καθώς και η κλίμακα μήκους της τύρβης (L_{xu}) είναι πολύ αυξημένα μεγέθη [24]. Ο κυλινδρικός δίσκος καμφοράς υφίσταται εξάχνωση (μεταφορά μάζας) υπό την επίδραση ανισότροπης τύρβης.

Έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας της αξονοσυμμετρικής δέσμης ρευστού σε σχέση με την απόσταση για συχνότητες του Inverter 50 Hz και 25 Hz με το Pilot-Static-Anemometer και το TSI velocimeter. Επίσης, μετρήθηκε η ταχύτητα του αεροσυμπιεστή σε απόλυτη σχέση με τη συχνότητα σε ένα συγκεκριμένο σημείο για $X=1D$

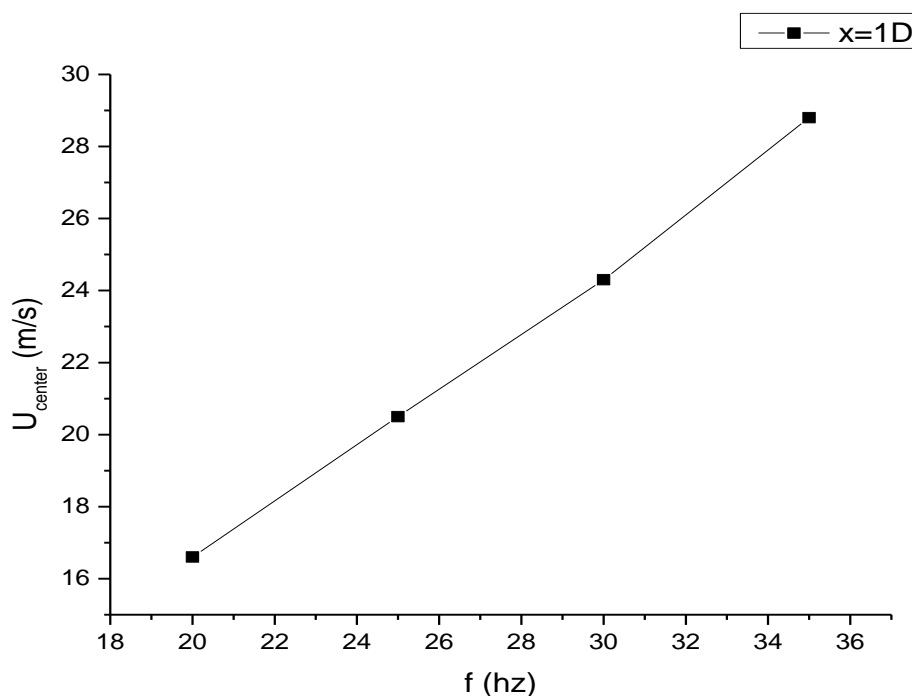


Εικόνα 3.3- Αξονοσυμμετρικός Συμπιεστής



Διάγραμμα 3.4: Ταχύτητα της κεντρικής ροϊκής γραμμής του αεροσυμπιεστή για συχνότητες 50Hz και 25 Hz σε σχέση με την απόσταση

Για τον αεροσυμπιεστή λαμβάνουμε το παραπάνω διάγραμμα που μας δείχνει την μείωση της ταχύτητας σε σχέση με την απόσταση. Περιμέναμε μία τέτοια μεταβολή και το παραπάνω διάγραμμα μας επαληθεύει την θεωρία. Η σχέση της ταχύτητας με τη συχνότητα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα και επαληθεύει ότι τα δεδομένα μας είναι σε σωστή πορεία.



Διάγραμμα 3.5: Κεντρική ταχύτητα αεροσυμπιεστή σε συνάρτηση με τη συχνότητα στην έξοδο του αεροσυμπιεστή

Για τον αεροσυμπιεστή λαμβάνουμε το παραπάνω διάγραμμα που μας δείχνει την ισχυρή εξάρτηση της ταχύτητας με τη συχνότητα λειτουργίας του Inverter. Παρατηρούμε ότι η κλίση είναι σχεδόν γραμμική αρχικά, αλλά στη συνέχεια η κλίση αυξάνεται. Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε μεγαλύτερη συχνότητα, καθώς οι ταχύτητες που προέκυπταν στην έξοδο ήταν πολύ μεγάλες και υπήρχε κίνδυνος να χαλάσει ο αισθητήρας του TSI-Anemometer.

3.3 Περιγραφή Πειραματικής διάταξης: Αεροσήραγμα

Η αεροσήραγμα είναι τύπου αναρρόφησης αέρα με θάλαμο δοκιμών με διαστάσεις 0.52m X 0.72m (πλάτος και ύψος) και μήκος θαλάμου 2.7m. Σε όλα τα πειράματα που διεκπεραιώθηκαν χρησιμοποιήθηκε πλέγμα (grid), εκτός από ένα πείραμα (no-grid) για συγκριτικούς λόγους. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είχε μήκος βρόγχου $M=90\text{mm}$ (mesh size).

Λόγω περιορισμού του κινητήρα της αεροσήραγας, η μέγιστη εφικτή ταχύτητα ήταν $U_o=12\text{m/s}$, η οποία αντιστοιχούσε σε συχνότητα 40 Hz για ροή με πλέγμα και σε 47.3 Hz για ροή χωρίς πλέγμα. Υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds για την αρχική διάμετρο των κυλινδρικών δίσκων καμφοράς όπου $Re=2 \times 10^4$.

Όλα τα πειράματα στην αεροσήραγμα έγιναν για τον παραπάνω αριθμό Reynolds και εξετάστηκε η επίδραση της τύρβης στη μεταφορά μάζας κυλινδρικών δίσκων καμφοράς, λαμβάνοντας υπόψη μας την ένταση της τύρβης $i=U_{rms}/U_o$ που ήταν μεταβλητή. Αυτό επιτεύχθηκε τοποθετώντας το μοντέλο καμφοράς σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της αεροσήραγας στην κεντρική ροϊκή γραμμή, το οποίο ήταν σταθεροποιημένο και ασφαλισμένο σε συγκεκριμένη βάση.

Η μέση ταχύτητα, καθώς και η διακύμανση της ταχύτητας στην αεροσήραγμα, μετρήθηκαν με τα όργανα Pitot-Static-Anemometer και με Hot-Wire. Είναι γνωστό ότι η ένταση της τύρβης μειώνεται με την απόσταση από το πλέγμα [25], ενώ η κλίμακα μήκους της τύρβης (turbulence length scale) αυξάνεται, το οποίο σημαίνει ότι η τύρβη είναι σχεδόν ισότροπη και ομοιογενής στην εγκάρσια διεύθυνση, αλλά ανομοιογενής στη διεύθυνση $-x$ (διαμήκης διεύθυνση).

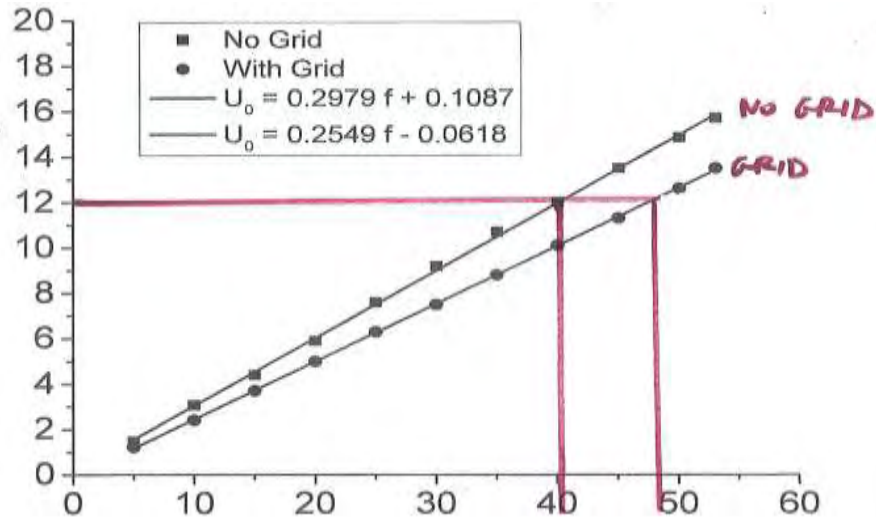
Για σταθερό αριθμό Reynolds η μεταφορά μάζας, όπως αναμενόταν, επηρεάστηκε από την αλλαγή της έντασης της τύρβης, αλλά και από τις αλλαγές της κλίμακας μήκους της τύρβης. Τα δεδομένα της αεροσήραγας βρίσκονται στον πίνακα 3.1.



Εικόνα 3.4- Αεροσήραγγα (Windtunnel)

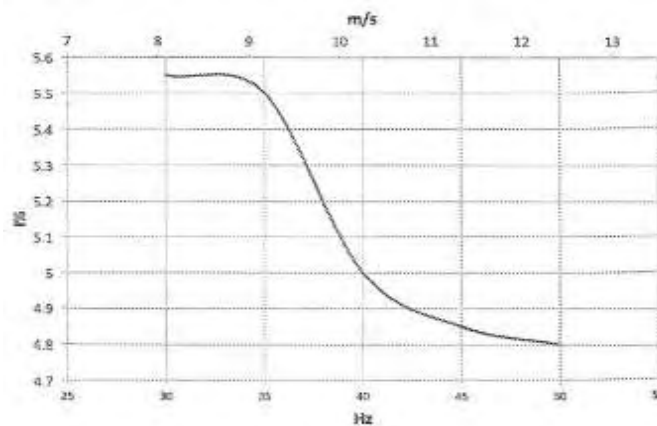
Επίσης μετρήθηκε με hot wire η ένταση της τύρβης για στρωτή ροή, δηλαδή χωρίς πλέγμα (no-grid) και για τυρβώδη ροή με πλέγμα (grid turbulence), αφού πρώτα ταυτοποιήθηκε η ταχύτητα της αεροσήραγγας, ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας της. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται στη συνέχεια. Παρατηρεί κανείς εύκολα, το πόσο μικρή είναι η ένταση της τύρβης χωρίς πλέγμα σε σχέση με αυτή με πλέγμα, όπου ένταση της τύρβης :

$$i = \frac{U_{rms}}{U_{mean}} \quad (3.1)$$

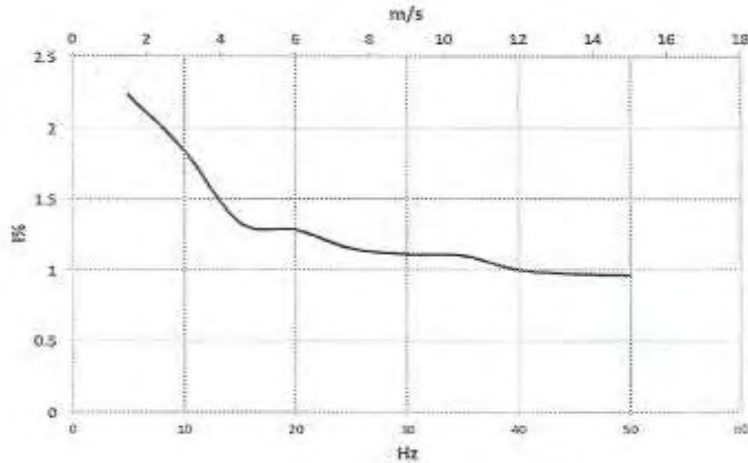


Διάγραμμα 3.6: Διάγραμμα Ταχύτητας (y-άξονας) με Συχνότητα f (x-άξονας) για την αεροσήραγγα

Το ενδιαφέρον στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι η σχέση της ταχύτητας με πλέγμα και χωρίς πλέγμα σε σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας της αεροσήραγγας. Όπως είναι φανερό, έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες όταν έχουμε ροή χωρίς πλέγμα στην αεροσήραγγα. Έτσι, για να φτάσουμε τη ζητούμενη ταχύτητα σε ροή με πλέγμα, χρειαζόμαστε 47.3Hz, ενώ για ροή χωρίς πλέγμα, απαιτούνται 40Hz.



Διάγραμμα 3.7: Αποτελέσματα Έντασης της τύρβης με τη συχνότητα και ταχύτητα στην αεροσήραγγα για τυρβώδη ροή με πλέγμα



Διάγραμμα 3.8: Αποτελέσματα Έντασης της τύρβης με ταχύτητα και συχνότητα στην αεροσήραγγα για στρωτή ροή χωρίς πλέγμα

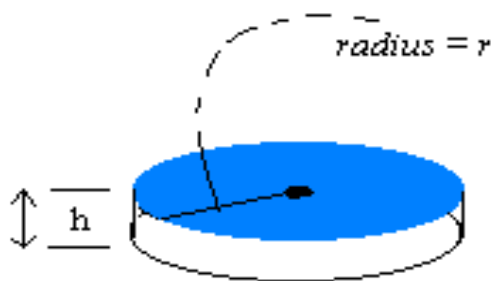
Είδος Ροής	U_0 m/s	U_c m/s	$x/M=10$	$x/M=15$	$x/M=20$	$x/M=25$
Αεροσήραγγα	12 m/s		$i=0.071$ $L_{xu}/D_0=1.20$	$i=0.056$ $L_{xu}/D_0=1.46$	$i=0.048$ $L_{xu}/D_0=1.67$	$i=0.045$ $L_{xu}/D_0=1.78$
Θάλαμος Ισότροπης και Ομογενούς τύρβης	$U_0=0$ (ή έστω προσεγγίζει το 0)		“ΘΕΡΜΗ” $U_{rms}=0.47\text{m/s}$ $\Theta=40^\circ\text{C}$ $\Theta_{rms}=2.5^\circ\text{C}$	“ΗΜΙΘΕΡΜΗ” $U_{rms}=0.26\text{m/s}$ $\Theta=32^\circ\text{C}$ $\Theta_{rms}=1.6^\circ\text{C}$	“ΚΡΥΑ” $U_{rms}=0.79\text{m/s}$ $\Theta=22^\circ\text{C}$	
Αεροσυμπιεστής		12 m/s	$x/D_j=25$ $i=0.119$ $L_{xu}/D_0=4.5$			

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για όλες τις Πειραματικές Διατάξεις

3.4 Μοντέλα Καμφοράς

Για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένας ειδικός τύπος μοντέλου καμφοράς. Αυτό το μοντέλο είναι ένας μικρός κυλινδρικός δίσκος (ταμπλέτα) με αρχική διάμετρο $D_0=25.3$ mm και ύψους $H_0=4.2$ mm. Το συγκεκριμένο μοντέλο πρόκειται για διαφημιστική καμφορά του

εμπορίου, η οποία πωλείται σε καταστήματα οικιακής χρήσης, ως σκωρό-αποθητικό. Έγινε αυτή η επιλογή, λόγω της ανάγκης να έχουμε μεγάλο αριθμό πανομοιότυπων μοντέλων για όλα τα πειράματα, αποφεύγοντας κατεργασίες ή πολύπλοκες διαδικασίες χύτευσης [1]. Τα μειονεκτήματα είναι της σταθερής γεωμετρίας και της αβεβαιότητας σχετικά με τη συνέπεια ως προς τη σύσταση και τις ιδιότητες.



Εικόνα 3.5- Κυλινδρικός Δίσκος Καμφοράς

Μοριακός Τύπος	Πυκνότητα	Μοριακό Βάρος	$Sc=v/D_c$	H_o	D_o	D_c (διαχυτότητα)
$C_{10}H_{16}O$	$\rho=0.992 \text{ g/m}^3$	$152,24 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$	3.2258	4,2 mm	25.3 mm	$\nu(T)/3.2258$

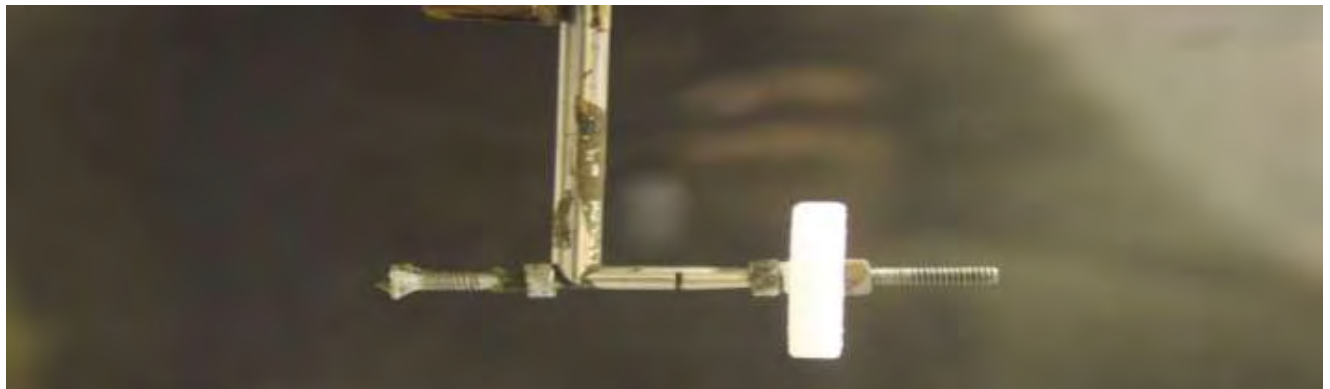
Πίνακας 3.2 : Ιδιότητες Μοντέλου Καμφοράς

Σε αυτή τη μελέτη, υποθέσαμε ότι η καμφορά που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα είχε όμοιες χημικές ιδιότητες με αυτή που χρησιμοποιείται στα εργαστήρια (εργαστηριακή καμφορά). Έτσι μπορούσαμε να αντλήσουμε δεδομένα από βιβλία αναφοράς [26] και εύκολα να βρίσκαμε την τάση ατμών για κάθε δυνατή θερμοκρασία.

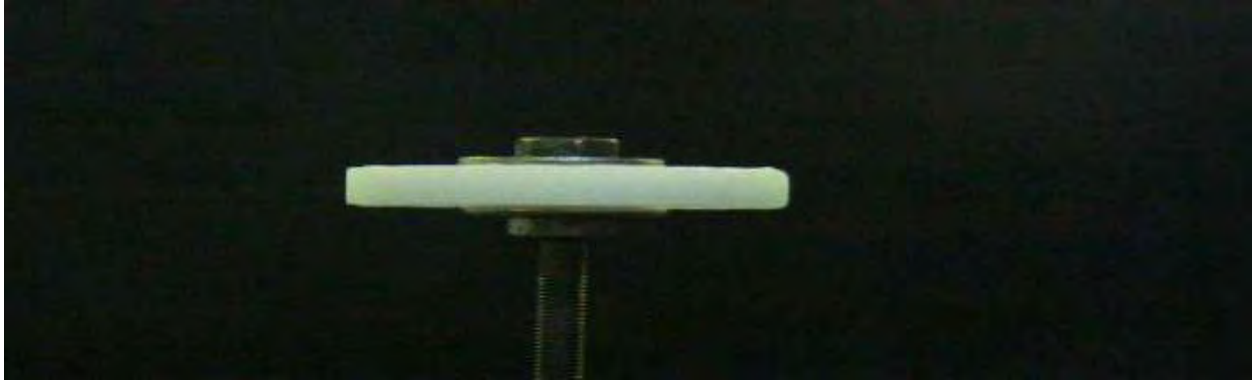
Η πυκνότητα της καμφοράς υπολογίστηκε ζυγίζοντας το δίσκο και διαιρώντας με τον όγκο του. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παραπάνω πίνακα για $m_o=0.002 \text{ kg}$. Η διαχυτότητα της

καμφοράς είναι ίση με το κινηματικό ιξώδες, το οποίο είναι ανάλογο με τη θερμοκρασία, διαιρώντας το με τον αριθμό Schmidt.

Τα μοντέλα στηρίχθηκαν με μία λεπτή ντίζα στο κέντρο τους και ασφαλίστηκαν μ' ένα μικρό παξιμάδι με την κυκλική επιφάνεια κάθετη στη ροή. Ο τρόπος στήριξης άλλαξε, ανάλογα με την πειραματική διάταξη. Στον αεροσυμπιεστή, λόγω της ανισορροπίας της τύρβης και της μεγάλης ορμής της ροής, προστέθηκε και μια ροδέλα για μεγαλύτερη σταθερότητα. Στον Θάλαμο Τύρβης, επειδή η τύρβη είναι θερμή, υπήρχε μετάδοση θερμότητας από το παξιμάδι και τη ροδέλα στην καμφορά, που είχε σαν συνέπεια την περαιτέρω εξάχνωση, το οποίο όμως δεν θέλαμε. Ως εκ τούτου τα αφαιρέσαμε και αφού η ταχύτητα στο κέντρο ήταν 0 δεν είχαμε πρόβλημα σταθερότητας. Είναι αυτονόητο ότι αυτή η μέθοδος στήριξης επηρεάζει τις συνθήκες ροής και τον ρυθμό εξάχνωσης κοντά στο σημείο ασφάλισης (τοπικά στην περιοχή κοντά στο παξιμάδι). Ωστόσο προτιμήθηκε από άλλη μέθοδο, όπου χρησιμοποιήσαμε για στήριξη ένα σετ από βελόνες εξαιτίας ισχυρής ταλάντωσης, λόγω της τυρβώδους ροής.



Εικόνα 3.6- Βάση στήριξης στην αεροσήραγγα



Εικόνα 3.7- Βάση στήριξης στον Αεροσυμπιεστή



Εικόνα 3.8- Βάση στήριξης στον Θάλαμο Τύρβης

3.5 Περιφερειακά Όργανα και Συσκευές

Χρησιμοποιήθηκε Inverter συχνοτήτων Siemens micromaster 420 μέσω του οποίου ρυθμίζονταν οι στροφές του αεροσυμπιεστή και στην συνέχεια καθορίζονταν η ταχύτητα του. Η συχνότητα λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν 50Hz, η οποία ήταν και η μέγιστη συχνότητα.



Εικόνα 3.9- Inverter συχνοτήτων Siemens micromaster 420

Όλες οι μετρήσεις για τις ταχύτητες και τις θερμοκρασίες λήφθηκαν με το όργανο μέτρησης TSI-velocicalc σε όλες τις πειραματικές διατάξεις. Πρόκειται για ένα ευαίσθητο όργανο μέτρησης με πολύ καλή ακρίβεια.



Εικόνα 3.10- TSI Velocimeter

Τα πιστολάκια μαλλιών, που έλαβαν μέρος στη πειραματική διάταξη του Θάλαμου Τύρβης, είναι πιστολάκι του εμπορίου 1000W με δύο σκάλες, η μεγάλη με ισχύ 1000W και η μικρή με ισχύ λειτουργίας 500W.



Εικόνα 3.11- Πιστολάκι Μαλλιών (Hairdryers)



Εικόνα 3.12- Ηλεκτρονική Ζυγαριά



Εικόνα 3.13- Πίνακας Ελέγχου για τη ρύθμιση της ταχύτητας στην Αεροσήραγγα



Εικόνα 3.14- Φωτογραφική Κάμερα Canon EOS 1000D

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία Μετρήσεων και Επεξεργασία

Δεδομένων

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανασκόπηση των μεθόδων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό της εξάχνωσης των κυλινδρικών δίσκων. Επίσης, η κατανόηση του τρόπου επεξεργασίας των δεδομένων των πειραμάτων που αναπτύχθηκαν μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων (image processing) και η μέθοδος περισυλλογής των από τις μετρητικές διατάξεις που έλαβαν μέρος.

4.1 Μέθοδος Μέτρησης για Εξάχνωση Κυλινδρικών Δίσκων Καμφοράς

Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας συμπεραίνεται από την απώλεια μάζας εξαιτίας της εξάχνωσης είτε τοπικά, είτε συνολικά από την επιφάνεια των κυλινδρικών δίσκων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώχθηκαν δύο μέθοδοι καταγραφής της απώλειας μάζας:

- Ζύγισμα,
- Φωτογραφίες από διαφορετικές οπτικές γωνίες.

Εφόσον γινόταν η τοποθέτηση του δοκιμίου καμφοράς, στην ενίοτε πειραματική διάταξη και ξεκινούσε το πείραμα, ανά τακτά και συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ζυγίζαμε το δείγμα σε ηλεκτρονική ζυγαριά.

Η μέθοδος αυτή αν και δοκιμάστηκε δεν ήταν ποιοτικά αποδοτική, καθώς γινόταν σφάλματα, λόγω του μικρού μεγέθους των μοντέλων, που παραμορφώνονταν κατά την εξαγωγή τους από τη βάση τοποθέτησής τους. Επίσης πολλές φορές η καμφορά έσπαγε κατά την εξαγωγή της με αποτέλεσμα την αποτυχία του πειράματος. Ένα άλλο πρόβλημα που προέκυπτε ήταν ότι δεν

μπορούσε να βρεθεί η αρχική θέση της καμφοράς με απότοκο τη μείωση εγκυρότητας των αποτελεσμάτων.

Αν και η μέθοδος του ζυγίσματος είναι μια συχνή μέθοδος, λόγω των παραπάνω, δημιουργήθηκε η επιτακτική ανάγκη μιας επιπλέον μεθόδου καταγραφής δεδομένων, έτσι χρησιμοποιήσαμε μια κάμερα για την παρακολούθηση της εξέλιξης του πειράματος.

Με την εναλλακτική μέθοδο που ακολουθήθηκε παρακολουθήσαμε την εξέλιξη του σχήματος και του μεγέθους των μοντέλων με την πάροδο του χρόνου τραβώντας φωτογραφίες και βίντεο από διαφορετικές οπτικές γωνίες (πάνω, πλάγια, πίσω). Ουσιαστικά, ασφαλίσαμε την κάμερα με ένα τρίποδο σε συγκεκριμένη απόσταση από το δοκίμιο και πολύ προσεχτικά τραβούσαμε φωτογραφίες ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οι δυσκολίες που προέκυψαν με αυτήν τη μέθοδο ήταν πρακτικού περιεχομένου, καθώς πολλές φορές ανάλογα με την πειραματική διάταξη, δημιουργούνταν πρόβλημα σταθερότητας της κάμερας -ιδιαίτερα στην παρακολούθηση του μοντέλου από την πάνω όψη (top view)- καθώς λόγω βάρους της κάμερας χανόταν εύκολα η αρχική θέση τοποθέτησής της. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε στην πορεία καθώς ασφαλιζόταν η κάμερα με σφιγκτήρες. Στη συνέχεια συλλέγονταν οι φωτογραφίες, μέχρι το πείραμα να λάβει τέλος, δηλαδή να εξαχνωθεί σχεδόν όλη η καμφορά, ακολουθούσε η διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, όπου υπολογίζονταν η μείωση των διαστάσεων των δοκιμίων και κατ' επέκταση ο όγκος και η υπολειπόμενη μάζα.

Η σύγκριση με τη μέθοδο του ζυγίσματος έδειξε να συμφωνεί σε κάποια πειράματα. Τα πιο αξιόπιστα δεδομένα ήταν αυτά που λήφθηκαν πριν το μοντέλο να αρχίσει να παραμορφώνεται ασύμμετρα. Τέλος, όταν το μοντέλο συρρικνώνονταν οι συνθήκες ροής άλλαζαν σημαντικά την εξάχνωση, λόγω της ντίζας και του παξιμαδιού.

4.2 Μέθοδος Επεξεργασίας Δεδομένων

Η ψηφιακή επεξεργασία των φωτογραφιών έγινε με τη χρήση των προγραμμάτων ImageJ και Matlab, όπου κύριος ρόλος τους είναι να μετατρέπουν τα pixels κάθε φωτογραφίας της καμφοράς σε διάσταση μήκους με αποτέλεσμα στο τέλος του πειράματος να μπορούμε να βρούμε τη μείωση του εμβαδού και της περιμέτρου της καμφοράς σε σχέση με τις αρχικές της διαστάσεις, και κατά συνέπεια την επίδραση της τύρβης στην εξάχνωση των δοκιμίων. Προτιμήθηκε η χρήση του ImageJ. Σε αυτή την ενότητα του Κεφαλαίου 4 θα γίνει μια περιληπτική παρουσίαση και περιγραφή της επεξεργασίας των δεδομένων με αυτά τα προγράμματα. Η διαδικασία αυτή είχε ως στόχο την εξαγωγή διαγράμματος για τη μείωση της υδραυλικής διαμέτρου του κυλινδρικού δίσκου καμφοράς με την πάροδο του χρόνου. Όπου:

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

D_h : Υδραυλική Διάμετρος

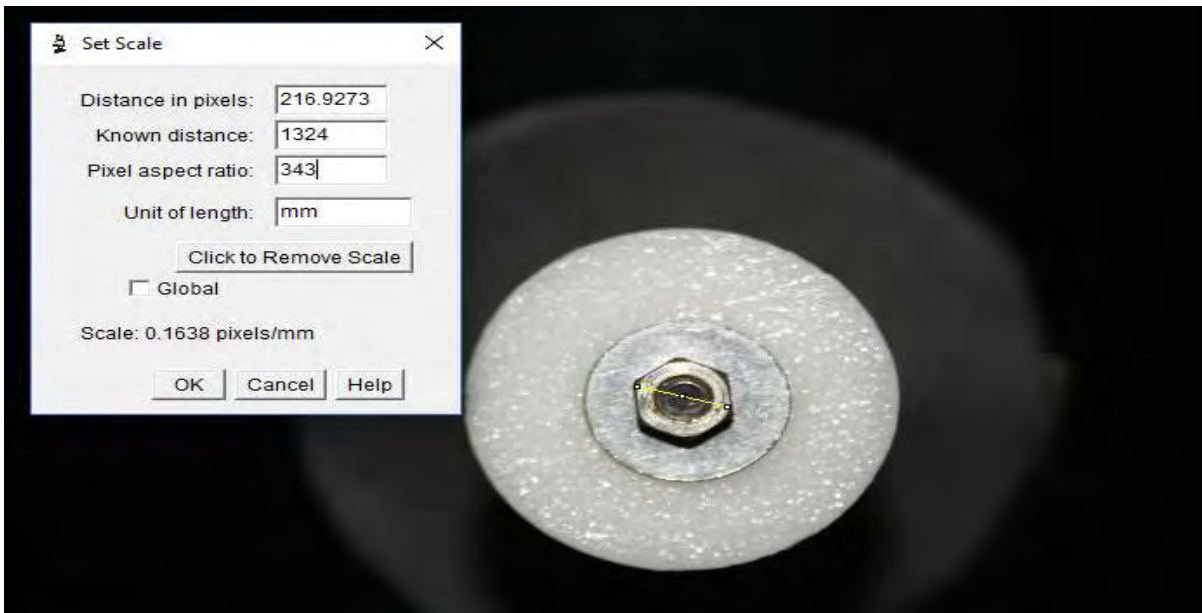
F : Περίμετρος Καμφοράς

S : Επιφάνεια Καμφοράς

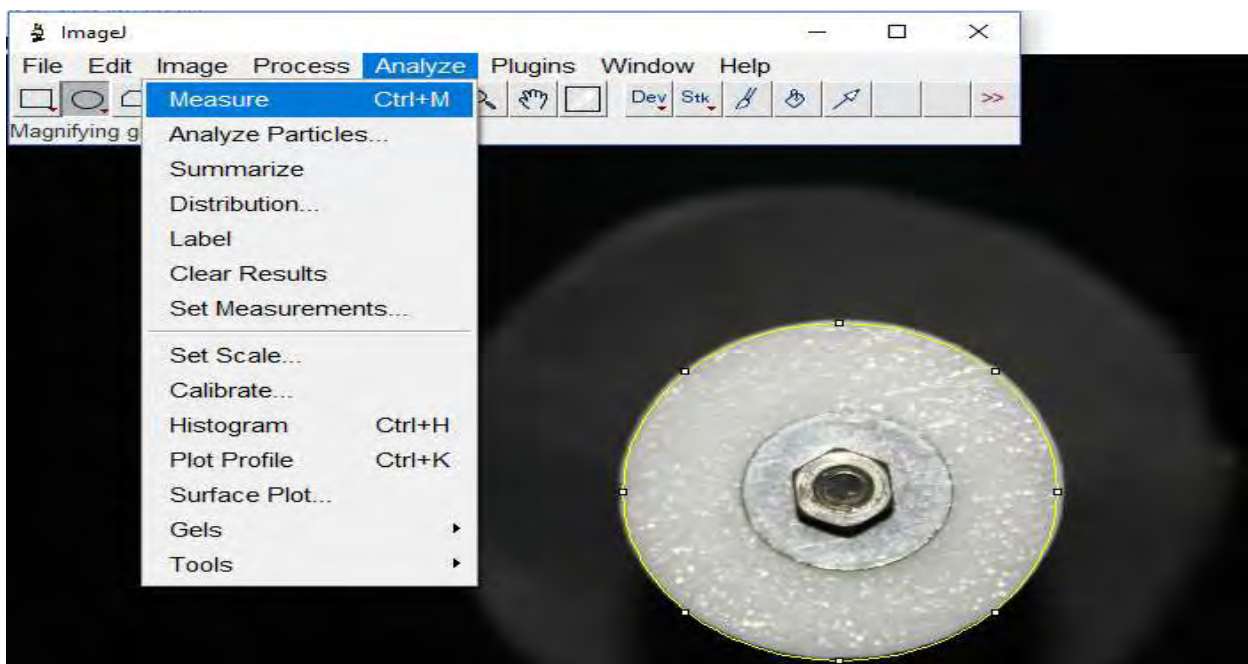
4.3 Επεξεργασία Φωτογραφίας με το ImageJ



Αρχικά ανοίγουμε την φωτογραφία με το πρόγραμμα και πηγαίνουμε στο «Analyze» και στη συνέχεια στο «Set Scale» όπου εδώ ορίζουμε μία αναλογία pixels και mm.



Εδώ, παίρνουμε μία γνωστή απόσταση που είναι το παξιμάδι και βλέπουμε σε πόσα «pixels» αυτή η απόσταση αντιστοιχεί.



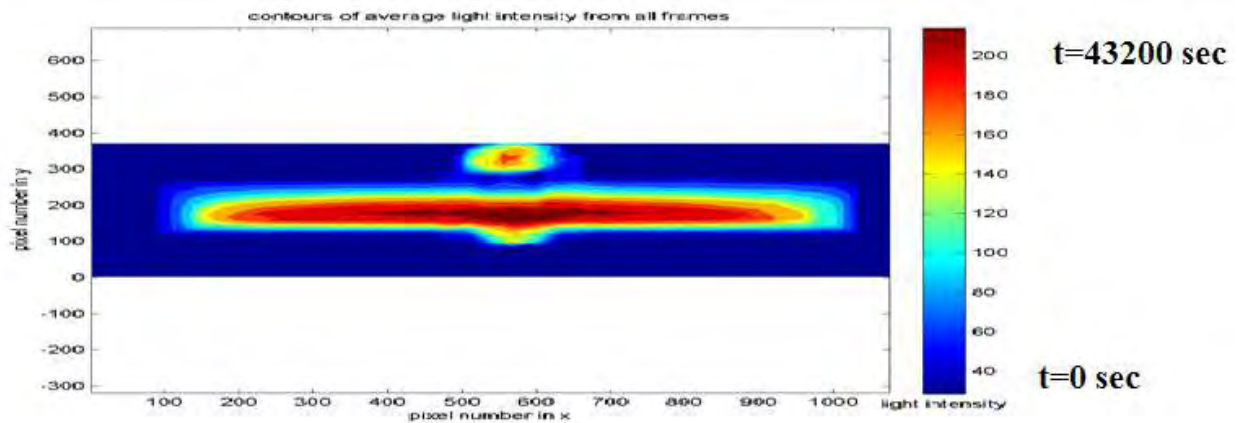
Στη συνέχεια επιλέγουμε την επιφάνεια της καμφοράς μέσω του κυκλικού εργαλείου του λάσου από το πρόγραμμα, πατάμε «Measure» και παίρνουμε την επιφάνεια (Area) και την περίμετρο (Perimeter) της καμφοράς σε αυτή τη φωτογραφία. Συνεχίζουμε για όλες τις φωτογραφίες και αποθηκεύουμε τα αποτελέσματα στο Excel.

	A	B	C	D	E	F	G
1		Area	Mean	Min	Max	Perim.	Hh
2	1	92.539	169.638	15	236	51.783	7,148,214,665
3	2	87.779	168.713	13	238	51.008	6,883,547,679
4	3	86.245	166.29	15	253	50.609	6,816,574,127
5	4	84.477	134.682	7	245	50.343	6,712,114,892
6	5	83.257	165.058	4	252	50.09	6,648,592,533
7	6	82.213	153.742	13	249	49.788	6,605,045,392
8	7	80.689	157.57	12	253	49.737	6,489,253,473
9	8	78.311	152.399	17	255	49.559	6,320,627,938
10	9	77.032	145.526	12	250	49.448	623,135,415
11	10	75.921	135.647	1	235	48.576	6,251,729,249
12	11	71.08	142.158	3	233	48.29	5,887,761,441
13	12	68.538	132.079	2	246	47.901	5,723,304,315
14	13	65.6	140.115	3	246	47.28	5,549,915,398
15	14	63.424	134.884	13	233	47.25	5,369,227,513
16	15	62.644	139.725	3	252	47.176	5,311,514,329
17	16	58.556	139.948	3	248	46.23	5,066,493,619
18	17	53.506	140.625	1	244	45.037	475,218,154
19	18	51.481	133.932	1	251	44.803	4,596,210,075
20	19	49.863	137.085	2	251	44.023	4,530,631,715
21	20	46.663	141.086	3	253	43.456	429,519,514
22	21	43.175	141.435	2	251	42.62	4,052,088,221
23	22	40.65	142.179	2	252	42.306	3,843,426,464

Στο Excel υπολογίζουμε την υδραυλική διάμετρο s' ένα κελί για κάθε φωτογραφία (μεταβλητή H_h) και μετά πηγαίνουμε στο Origin και παράγουμε το διάγραμμα μείωσης της υδραυλικής διαμέτρου με το χρόνο. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι σχετικά απλό και έχει αρκετά καλή ακρίβεια για αυτό και προτιμήθηκε. Το αρνητικό του, κυρίως, είναι ότι είναι πολύ χρονοβόρο λόγω της χειροκίνητης διαδικασίας.

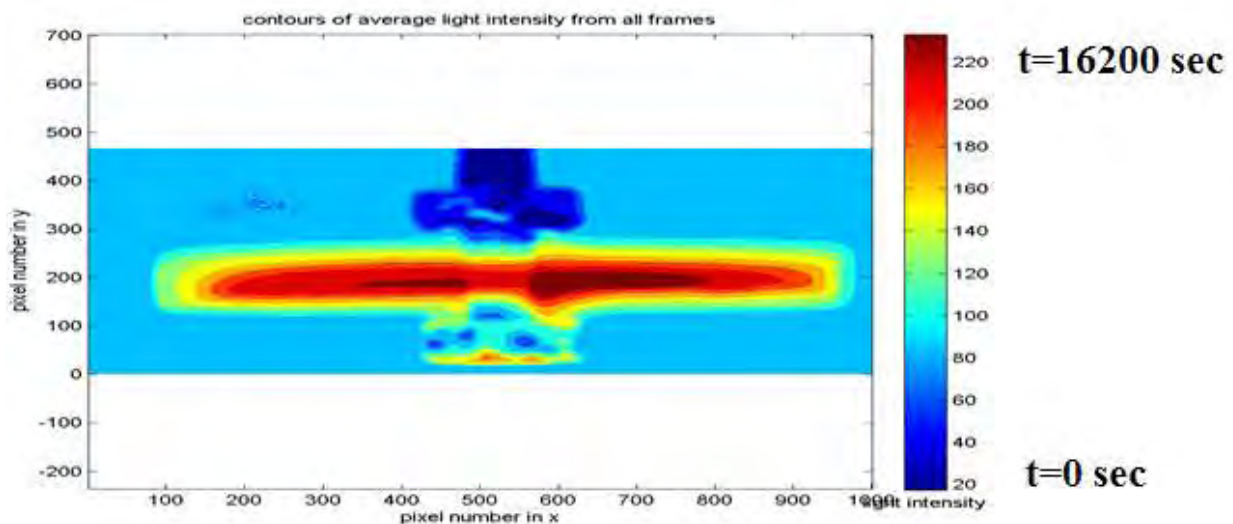
Επίσης, για την οπτικοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε και ο κώδικας του μεταδιδακτορικού φοιτητή Αθανάσιου Μπάρλα για image processing, που μετράει την ένταση του φωτός για κάθε φωτογραφία και παράγει τη μείωση της υδραυλικής διαμέτρου. Χρησιμοποιήσαμε τον κώδικα αυτό μόνο για την πειραματική διάταξη του Θαλάμου Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης και για ένα πείραμα στον Αεροσυμπιεστή στην απόσταση 10D. Τα αποτελέσματα από την Matlab χρησιμοποιήθηκαν μόνο για συγκριτικούς λόγους, καθώς το πρόγραμμα που κυρίως, χρησιμοποιήσαμε ήταν το Imagej (Ιδ. Παράρτημα 1- Επεξεργασία Εικόνων με Matlab) . Μερικά αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Το πλεονέκτημα αυτών των διαγραμμάτων είναι ότι συνοψίζουν την πορεία του πειράματος, δηλαδή όλων των φωτογραφιών και δείχνουν την εξέλιξη του φαινομένου της εξάχνωσης, όπου η περιοχή με την

χαμηλότερη φωτεινότητα (μπλέ) είναι αυτή που εξαχνώθηκε πρώτη και αυτή με την υψηλότερη(κόκκινη) αυτή που εξαχνώθηκε τελευταία.



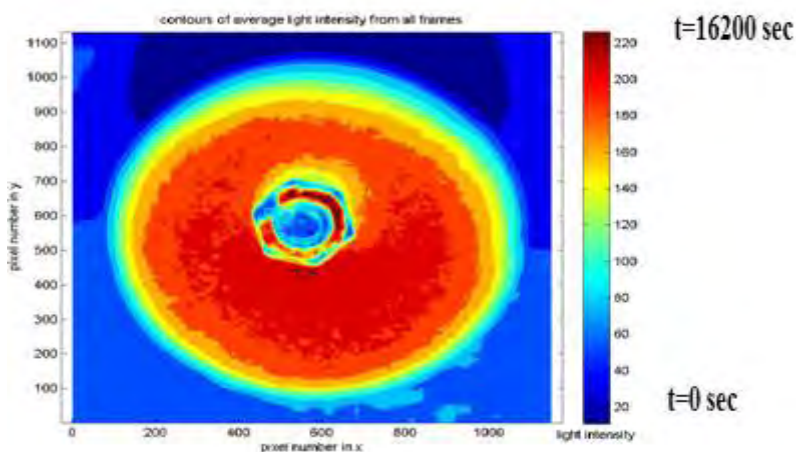
Διάγραμμα 4.1: Πλάγια όψη για εξαχνωση καμφοράς σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης με ισχύ 500W

Παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα το πόσο ομαλά έγινε η εξαχνωση της καμφοράς. Η εξαχνωση έχει γίνει περιμετρικά χωρίς να υπάρχουν δείγματα ανωμαλίας, καθώς η διάμετρος της καμφοράς μειώνεται σιγά- σιγά ανά κάθε εσωτερικό στρώμα μάζας.



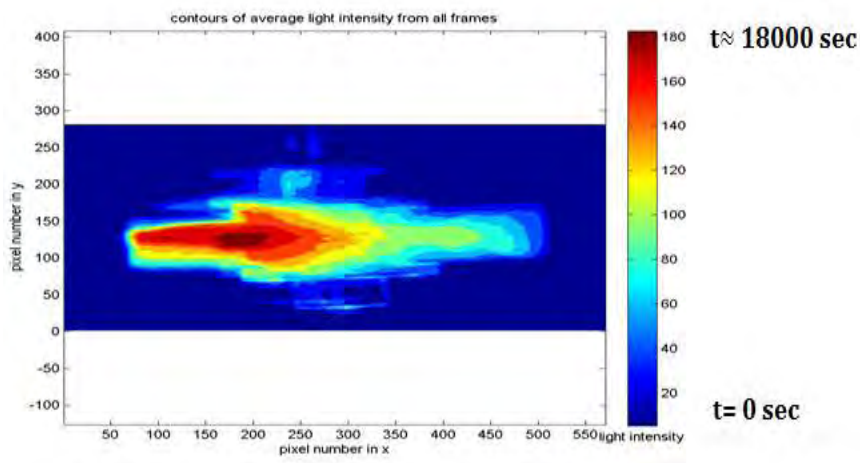
Διάγραμμα 4.2: Πλάγια όψη καμφοράς σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης με ισχύ 1000W

Εδώ, η εξάχνωση της καμφοράς συμβαίνει πιο βίαια, παρόλα αυτά επειδή ουσιαστικά η καμφορά μειώνεται, τελείως, ομοιόμορφα στο θάλαμο τριβής, η εξάχνωση της μάζας της καμφοράς συμβαίνει και εδώ περιμετρικά. Καθώς δε η ένταση της τύρβης είναι μεγαλύτερη η εξάχνωση του δοκιμίου κατά συνέπεια, διαρκεί λιγότερο από τα 25Hz.

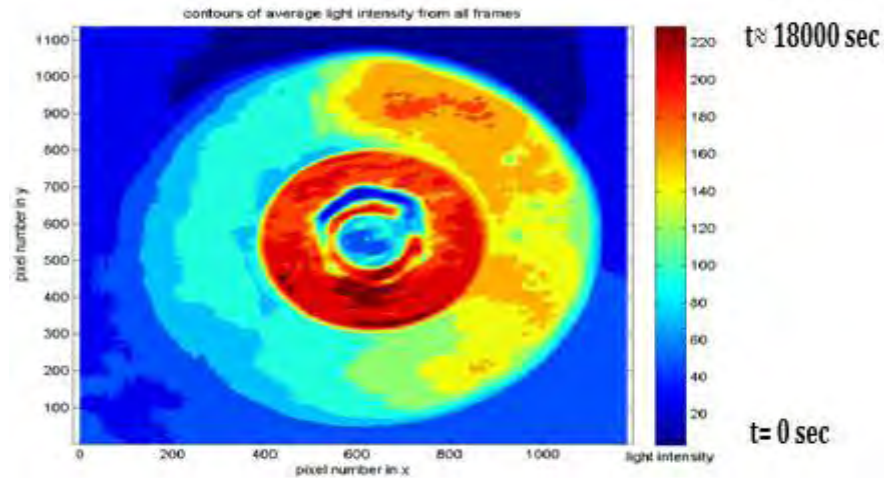


Διάγραμμα 4.3: Άνω όψη καμφοράς σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης με ισχύ 1000W

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα έχουμε την άνω όψη του προηγούμενου διαγράμματος που μας δίνει τα ίδια συμπεράσματα με τα προηγούμενα, αλλά γίνεται και κατανοητό ότι ένα κομμάτι της εξάχνωσης συμβαίνει στα πλάγια του δοκιμίου, ενώ άλλο κομμάτι της εξάχνωσης συμβαίνει στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.4: Αποτελέσματα για την εξάχνωση σε Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση 10D και πλάγια όψη



Διάγραμμα 4.5: Αποτελέσματα για την εξάχνωση καμφοράς σε Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση $10D$ και άνω όψη

Τα αποτελέσματα του Αεροσυμπιεστή διαφέρουν πολύ από το Θάλαμο Τύρβης, καθώς σ' αυτό το πείραμα το μεγαλύτερο κομμάτι της εξάχνωσης συμβαίνει, όπως είναι αναμενόμενο από την πλευρά που ο αέρας του αεροσυμπιεστή χτυπάει την καμφορά. Σε αντίθεση με τον Θάλαμο Τύρβης που η εξάχνωση είναι σχεδόν ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο της καμφοράς.

Κεφάλαιο 5

Μετρήσεις και σχολιασμός αποτελεσμάτων

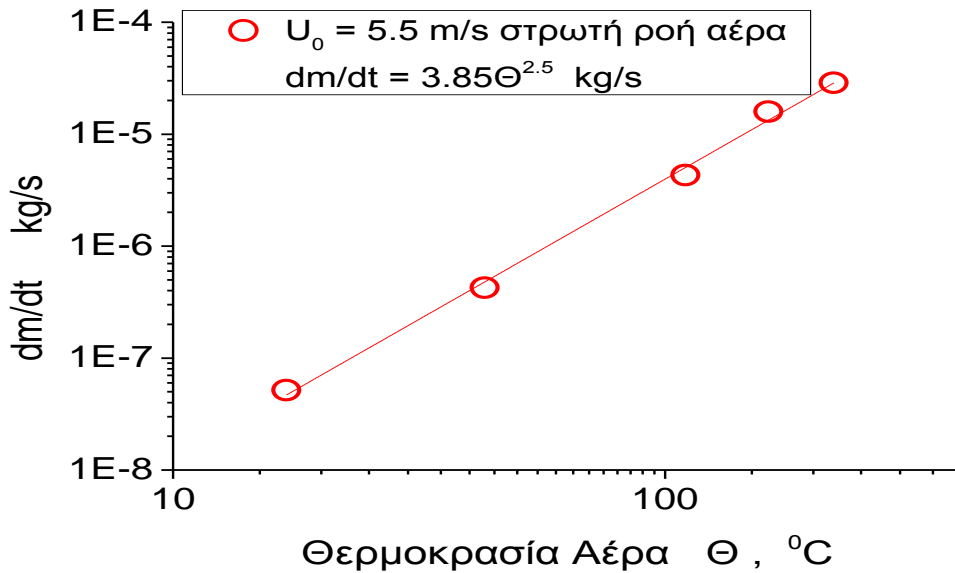
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται σχολαστικά τα αποτελέσματα από όλα τα πειράματα που διεκπεραιώθηκαν για την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Δηλαδή, παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα πτώσης της υδραυλικής διαμέτρου για το Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης, τον Αεροσυμπιεστή και την Αεροσήραγγα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για το ρυθμό μεταφοράς μάζας για όλες τις πειραματικές διατάξεις. Τα διαγράμματα προέκυψαν από το πρόγραμμα ImageJ και έγιναν με χρήση του προγράμματος Origin. Επίσης αναλύεται η μέθοδος υπολογισμού του αριθμού Sherwood και των συντελεστών μεταφοράς μάζας.

5.1 Υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς μάζας και αριθμού Sherwood

Υπάρχουν αναλυτικές εκφράσεις για το φαινόμενο της εξάχνωσης, λόγω φυσικής συναγωγής για ποικίλα σχήματα (σφαίρα, κύλινδρος) [20]. Εδώ ο μέσος συντελεστής μεταφοράς μάζας h_m θα υπολογιστεί από την μέτρηση της απώλειας μάζας και τις μοριακές ιδιότητες των ρευστών που εμπλέκονται, δηλαδή του αέρα και της καμφοράς σε μορφή ατμού [26]. Οι μοριακές ιδιότητες των ρευστών, όπως είναι ευρέως γνωστό, επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, όπως επίσης και η διαδικασία εξάχνωσης στο σύνολό της. Έτσι, πραγματοποιήθηκε ακόμα ένα πείραμα για να βρεθεί η σχέση του ρυθμού μεταφοράς μάζας της καμφοράς με τη θερμοκρασία, που είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αντιστοίχου διαγράμματος.

Τοποθετήθηκε καμφορά μπροστά από ρεύμα ζεστού αέρα ταχύτητας $U_0=5.5$ m/s και χαμηλής έντασης τύρβης i και βρέθηκε ότι ο ρυθμός εξάχνωσης της μάζας dm/dt είναι ισχυρή συνάρτηση με εκείνη της θερμοκρασίας του αέρα :

$$\frac{dm}{dt} = 3.85\theta^{2.5} \quad (5.1)$$



Διάγραμμα 5.1: Επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταφορά μάζας

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας h_m ορίζεται από τη βιβλιογραφία ως εξής:

$$h_m = \frac{dm}{dt} \frac{1}{\rho A (W_{cs} - W_{c\infty})} \text{ [m/s]} \quad (5.2)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και A η επιφάνεια που εξαχνώνεται. Εδώ το A λαμβάνεται ίσο με την αρχική ολική επιφάνεια του δίσκου. Δηλαδή:

$$A = 2 \frac{\pi D_0^2}{4} + \pi D_0 H_0 \quad (5.3)$$

Το συγκεκριμένο εμβαδό περιλαμβάνει την μπροστά και την πίσω επιφάνεια όπου οι συνθήκες ροής είναι διαφορετικές, αλλά είναι ένα πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της μέσης μεταφοράς μάζας. Το W_{cs} και $W_{c\infty}$ είναι το κλάσμα (ποσοστό) μάζας της καμφοράς (ατμού) στην επιφάνεια του μοντέλου και στο άπειρο αντίστοιχα. Υποτίθεται ότι το $W_{c\infty}$ θα είναι μηδέν εάν στο ρευστό

μέσο δεν υπάρχει ατμός καμφοράς, μία λογική υπόθεση για την αεροσήραγγα και τον αεροσυμπιεστή. Αυτή η υπόθεση θα μπορούσε να επικριθεί στην περίπτωση των συνθετικών δεσμών αέρα, εάν λόγω της έντονης εξάχνωσης η συγκέντρωση της καμφοράς (ατμός) στον περιβάλλοντα αέρα αυξάνονταν σε πολύ ισχυρά επίπεδα.

Στο Θάλαμο Τύρβης η τυρβώδης ανάμειξη είναι πολύ ισχυρή, επομένως είναι ρεαλιστική η αποδοχή της εγκυρότητας αυτής της υπόθεσης δηλαδή $W_{c\infty} = 0$, όπως και για την τυρβώδη ροή της συνθετικής δέσμης αέρα.

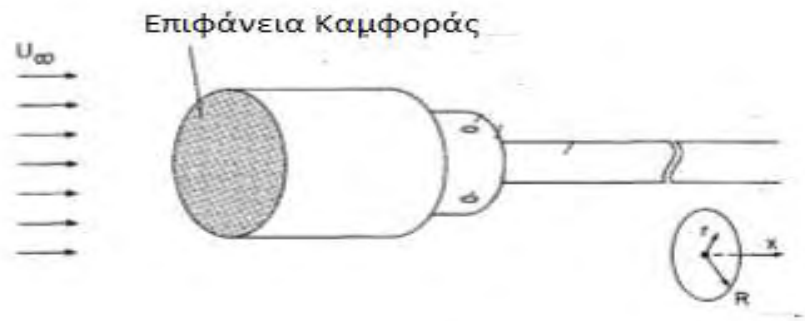
Το κλάσμα μάζας W_{cs} στην επιφάνεια όπως είναι γνωστό εξαρτάται από την τάση ατμών της καμφοράς P_c , την πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα P_a και τα μοριακά βάρη της καμφοράς (ατμού) και του αέρα αντίστοιχα. Γενικά ισχύει:

$$W_{cs} = \frac{P_c}{P_a} \frac{152.24g/mol}{29g/m} \quad (5.4)$$

Για κάθε πείραμα καταγράφεται η θερμοκρασία κοντά στην εξαχνωμένη επιφάνεια και υπολογίζεται η τάση ατμών της καμφοράς P_c για την δεδομένη θερμοκρασία, από τη βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό Sherwood από την εξίσωση:

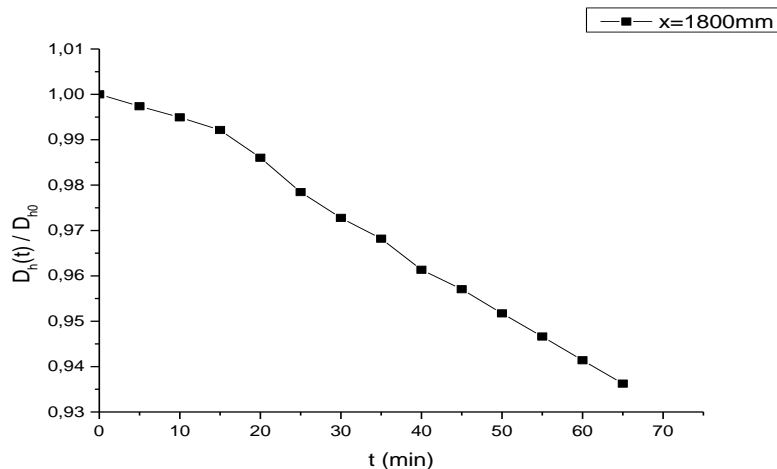
$$Sh = h_m \frac{D_0}{D_c} \quad (5.5)$$



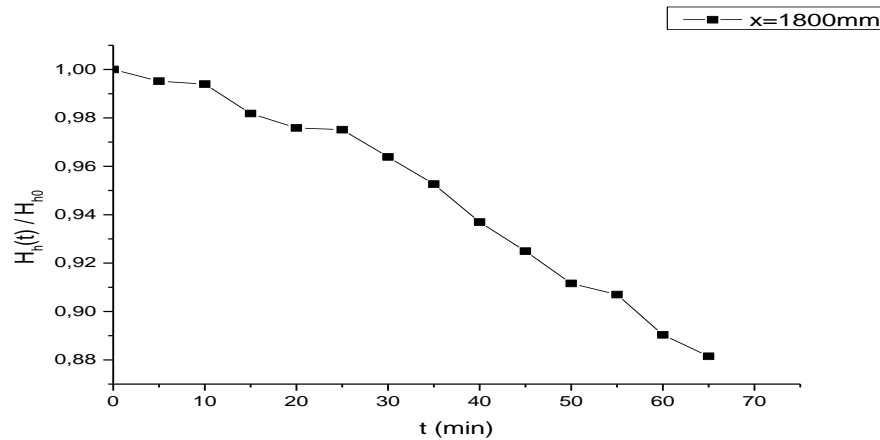
Εικόνα 5.1- Σχηματική Διάταξη Πειράματος

5.2 Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου για τη διάταξη της Αεροσήραγγας

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μείωσης της υδραυλικής διαμέτρου στην αεροσήραγγα σε όλες τις αποστάσεις όπου έγινε η εξάχνωση της καμφοράς, δηλαδή στα 900mm, 1350mm, 1800mm, 2040mm από την έξοδο. Αναφέρεται σε κάθε πείραμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος του χώρου. Οι φωτογραφίες για κάθε πείραμα λαμβάνονταν κάθε 10 λεπτά με χρονόμετρο ώστε να υπάρχει συνάφεια στα πειράματα. Τέλος συμβολίσαμε με D_h την υδραυλική διάμετρο για τα πειράματα, που φωτογραφίζαμε από πάνω (top view) και H_h την υδραυλική διάμετρο για τα πειράματα, που φωτογραφίζαμε από πλάγια.

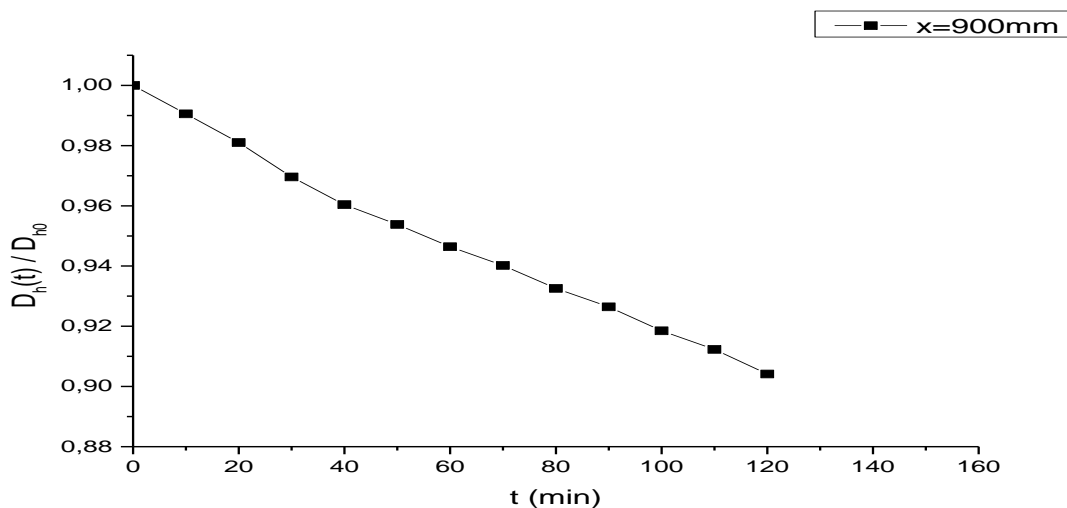


Διάγραμμα 5.2: Αποτελέσματα Μείωσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) με το χρόνο (t) για ροή χωρίς πλέγμα σε απόσταση 1800mm για άνω όψη

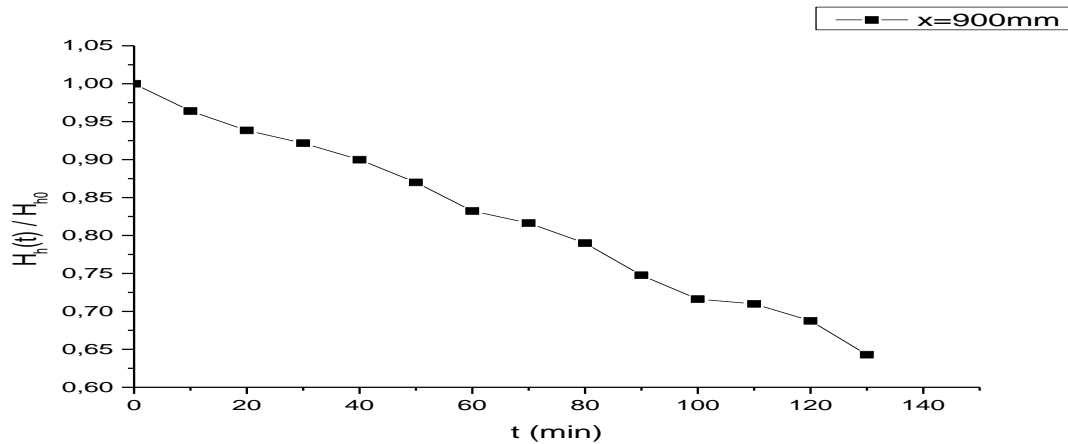


Διάγραμμα 5.3: Αποτελέσματα μείωσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το χρόνο (t) για τη ροή χωρίς πλέγμα με το δοκίμιο σε απόσταση 1800mm για πλάγια όψη

Τα συγκεκριμένα πειράματα έγιναν για θερμοκρασία Περιβάλλοντος $\Theta=13^\circ\text{C}$. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία σχεδόν σταθερή κλίση πτώσης της υδραυλικής διαμέτρου. Εδώ η ένταση της τύρβης δεν είναι τόσο μεγάλη, επομένως η μεταφορά μάζας οφείλεται, κυρίως, σε συναγωγή, λόγω της ταχύτητας του αέρα.

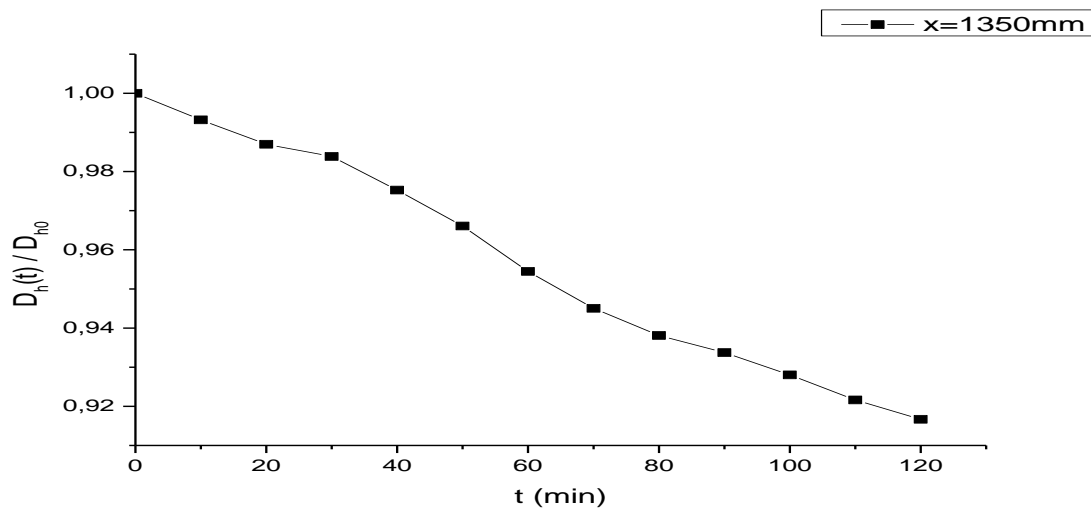


Διάγραμμα 5.4: Αποτελέσματα μείωσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο (t) με το δοκίμιο σε απόσταση 900mm από το πλέγμα για άνω όψη

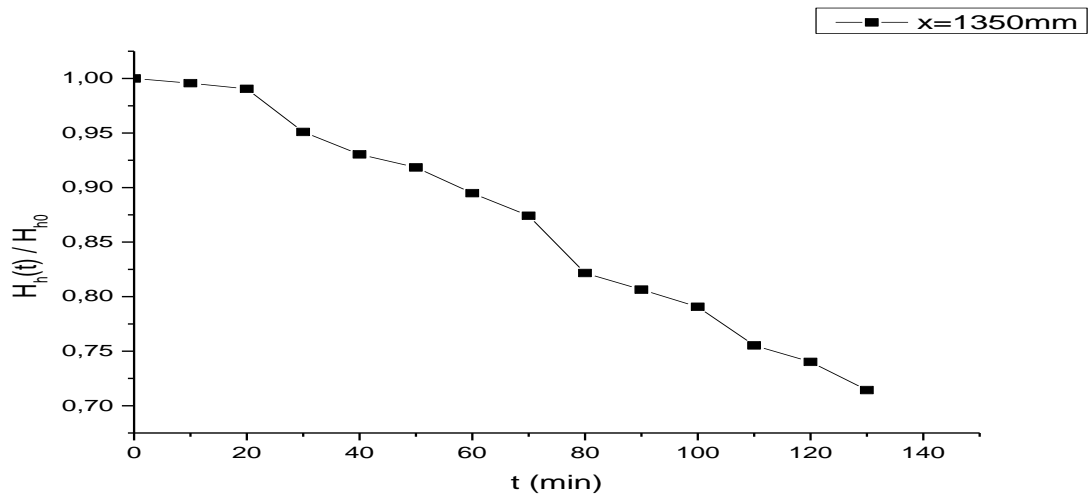


Διάγραμμα 5.5: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το δοκίμιο σε απόσταση 900mm από το πλέγμα για πλάγια όψη

Στην συγκεκριμένη απόσταση η ένταση της τύρβης είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα να έχουμε έντονα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και γρήγορη πτώση της διαμέτρου. Η ένταση της τύρβης μειώνεται με την απόσταση, όπως είναι γνωστό, στην αεροσήραγγα. Στο συγκεκριμένο πείραμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν $\Theta=11^\circ\text{C}$.

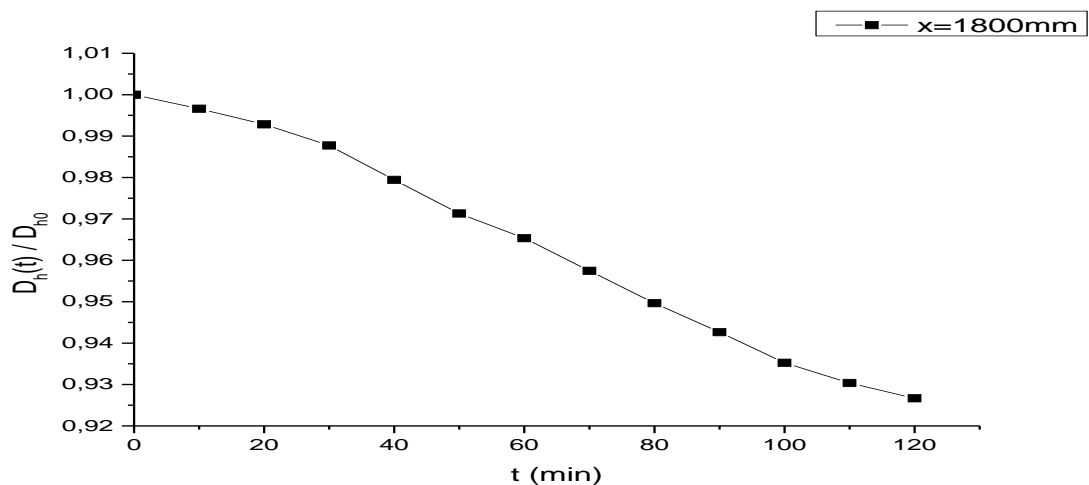


Διάγραμμα 5.6: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) με το δοκίμιο σε απόσταση 1350mm από το πλέγμα για άνω όψη

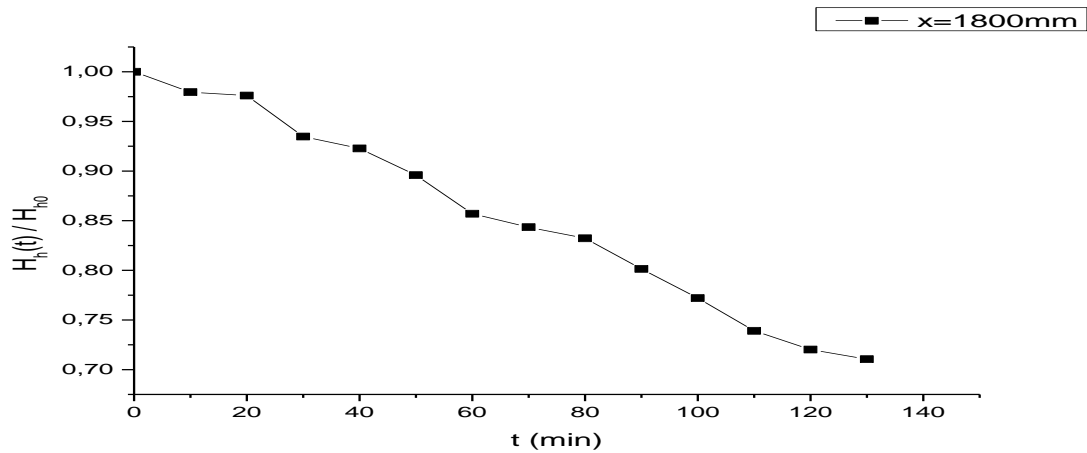


Διάγραμμα 5.7: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το δοκίμιο σε απόσταση 1350mm από το πλέγμα για πλάγια όψη

Όσο μεγαλώνει η απόσταση στην οποία τοποθετούμε το δοκίμιο, η εξάχνωση συμβαίνει πιο αργά, διότι η ένταση της τύρβης μειώνεται. Παρατηρείται δηλαδή μικρή αύξηση της κλίσης της μείωσης της υδραυλικής διαμέτρου με τον χρόνο. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος του χώρου που έγινε το πείραμα είναι $\Theta=11^\circ\text{C}$.

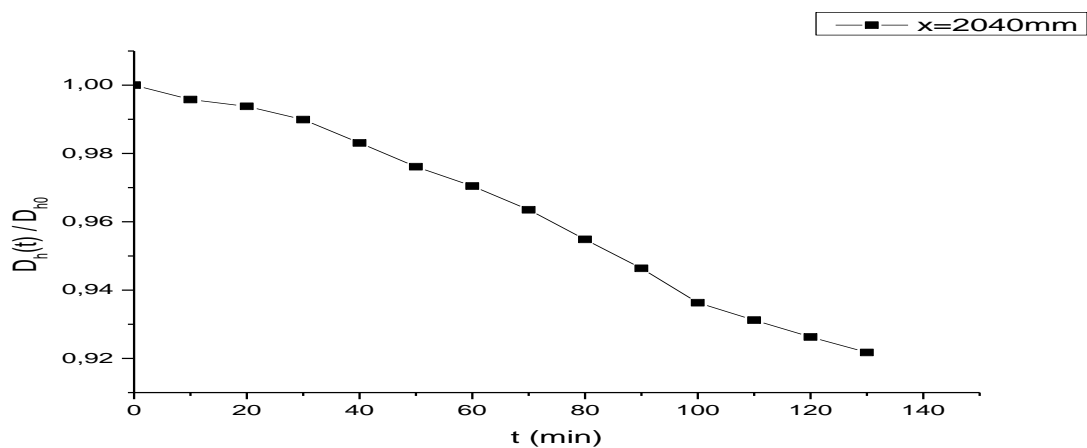


Διάγραμμα 5.8: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο (t) με το δοκίμιο σε απόσταση 1800mm από το πλέγμα για άνω όψη

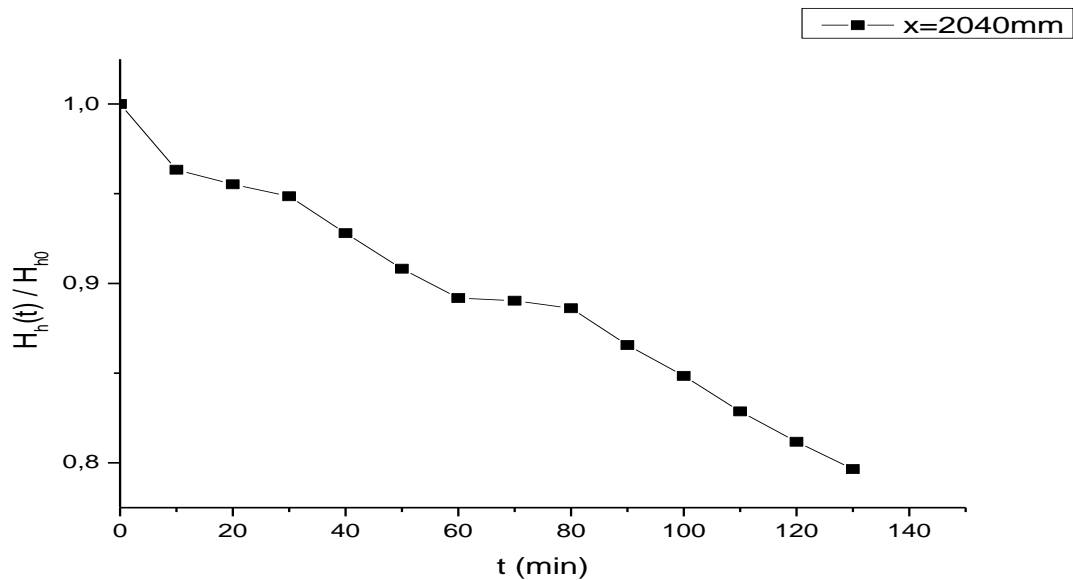


Διάγραμμα 5.9: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) με το δοκίμιο σε απόσταση από το πλέγμα 1800mm για πλάγια όψη

Για το παραπάνω πείραμα η Θερμοκρασία Περιβάλλοντος ήταν $\Theta=11^\circ\text{C}$. Η μείωση της κλίσης συνεχίζει κανονικά. Μικρές ανωμαλίες, που υπεισέρχονται μπορεί να οφείλονται σε ανομοιογένεια των δοκιμίων, καθώς οι διαστάσεις τους δεν ήταν ακριβώς ίδιες. Επίσης, τα δοκίμια κατά την κράτηση τους στο εργαστήριο, πολλές φορές, εξαχνώνονταν σε μικρή κλίμακα.



Διάγραμμα 5.10: Αποτελέσματα πτώσης Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) με το χρόνο (t) με το δοκίμιο σε απόσταση από το πλέγμα 2040mm για άνω όψη



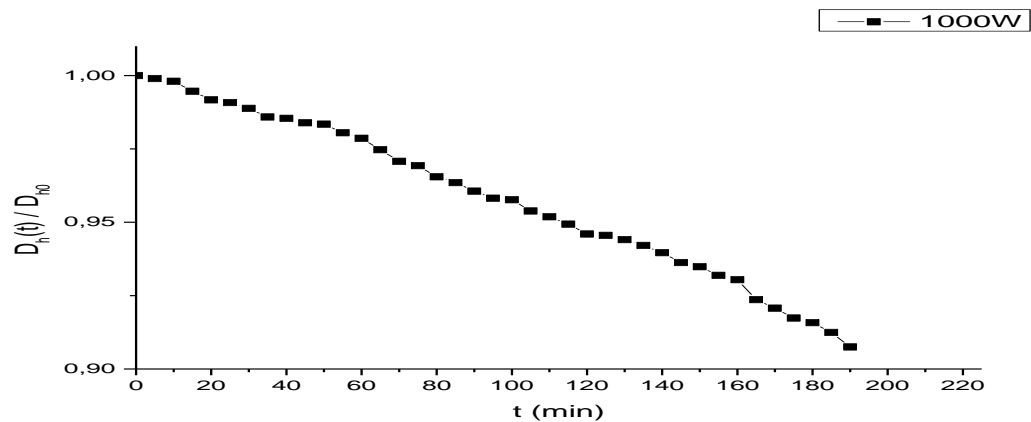
Διάγραμμα 5.11: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε σχέση με το χρόνο με το δοκίμιο σε απόσταση 2040mm για πλάγια όψη

Εδώ, κατά την εξέλιξη του φαινομένου παρατηρείται σε κάποια σημεία μείωση της κλίσης της υδραυλικής διαμέτρου. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν η εξαχνωση δεν γίνεται ομοιόμορφα, έχουμε πολλές φορές αύξηση της περιμέτρου, καθώς λειώνει η καμφορά και γίνεται πιο λεπτή. Πάντα, βέβαια, έχουμε υπόψη μας την πιθανότητα λάθους αποτελέσματος λόγω δυσκολίας της επεξεργασίας των φωτογραφιών. Το παραπάνω πείραμα έγινε για θερμοκρασία περιβάλλοντος $\Theta=11^\circ\text{C}$.

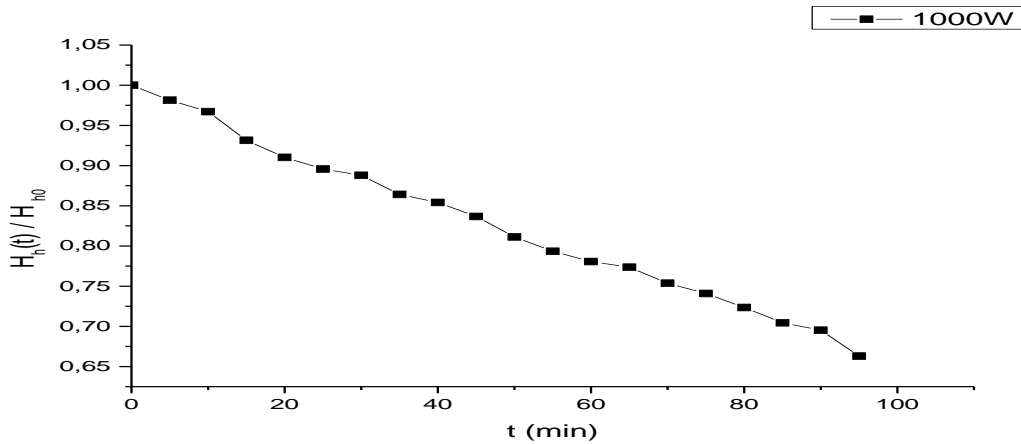
5.3 Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου για διάταξη Θαλάμου Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μείωσης της υδραυλικής διαμέτρου στο Θάλαμο Τύρβης για ισχύ λειτουργίας 500W (μικρή σκάλα) και 1000W(μεγάλη σκάλα) των συνθετικών δεσμών αέρα. Αναφέρεται σε κάθε πείραμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος του χώρου, καθώς και θερμοκρασία πάνω στην εξαχνωμένη επιφάνεια. Οι

φωτογραφίες για κάθε πείραμα λαμβάνονταν κάθε 5 λεπτά για τα 1000W και κάθε 10 λεπτά για τα 500W με χρονόμετρο, ώστε να υπάρχει συνάφεια στα πειράματα. Τέλος συμβολίσαμε με D_h την υδραυλική διάμετρο, για τα πειράματα που φωτογραφίζαμε από πάνω (top view) και H_h την υδραυλική διάμετρο, για τα πειράματα που φωτογραφίζαμε από πλάγια.



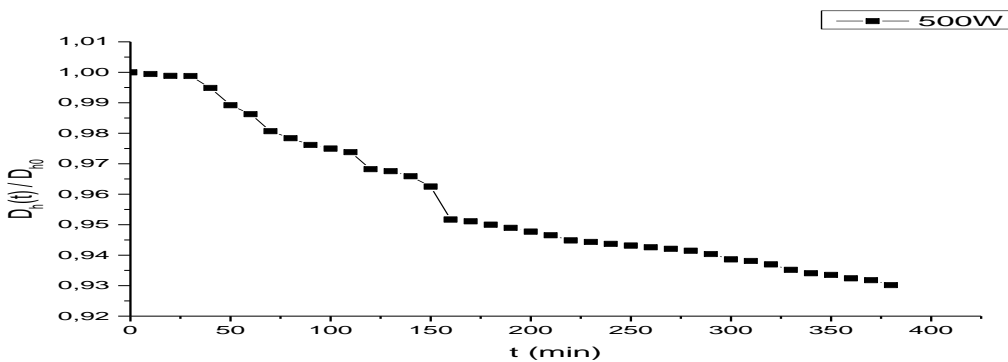
Διάγραμμα 5.12: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης για 1000W και άνω όψη



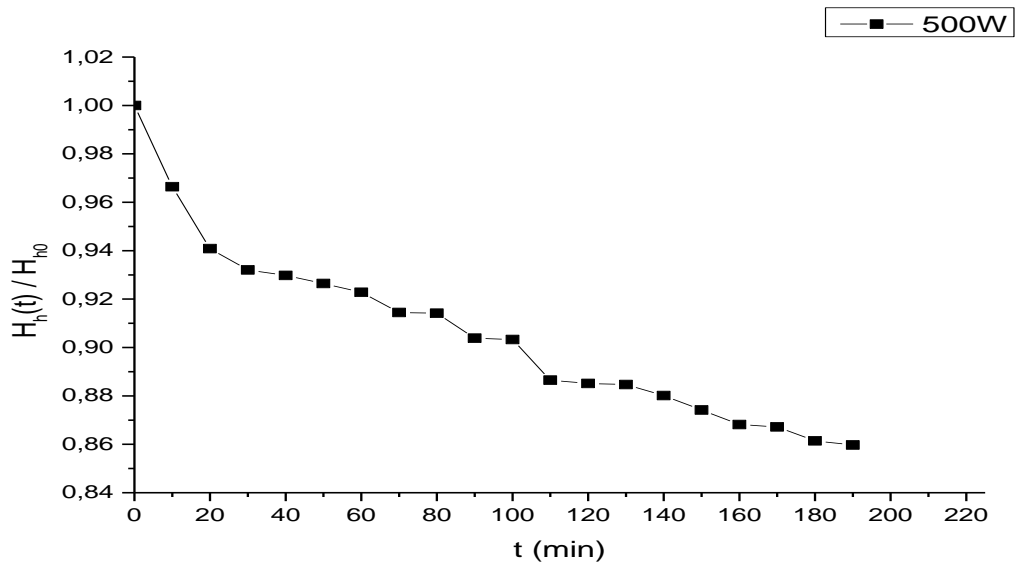
Διάγραμμα 5.13: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης για 1000W και πλάγια όψη

Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε για τη μεγάλη σκάλα από τα πιστολάκια μαλλιών και θερμοκρασία που μετρήθηκε στο κέντρο με το Pilot-Static Anemometer ήταν 40°C . Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν $\Theta=23.1^{\circ}\text{C}$. Η U_{rms} ήταν 0.47m/s και η $\Theta_{\text{rms}}=2.5^{\circ}\text{C}$.

Παρατηρήσαμε, ότι η μείωση της υδραυλικής διαμέτρου συμβαίνει σχεδόν γραμμικά. Μειώσαμε το χρόνο που φωτογραφίζαμε, για την καλύτερη παρατήρηση του φαινομένου, καθώς εδώ έχουμε Θερμή Τύρβη, που επιδρά στην εξέλιξη της εξάχνωσης.



Διάγραμμα 5.14: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο (t) για Θάλαμο Τύρβης για 500W και άνω όψη



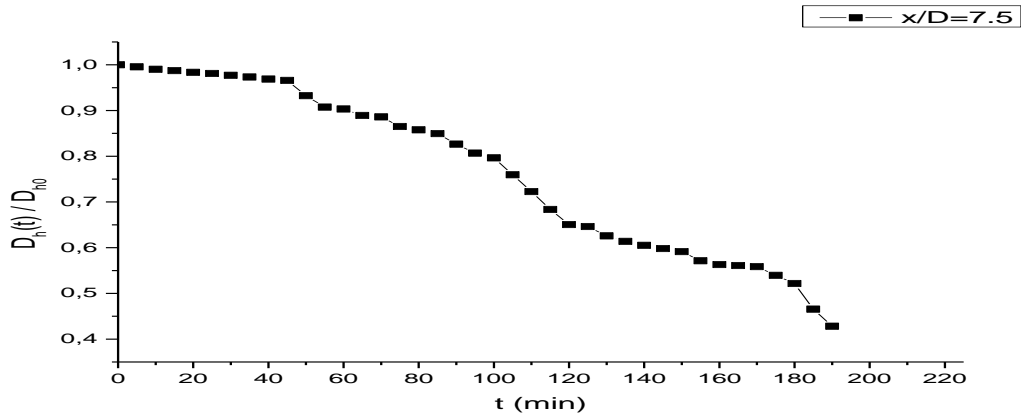
Διάγραμμα 5.15: Αποτελέσματα πτώσης της Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε σχέση με το χρόνο για Θάλαμο Τύρβης για 500 W και πλάγια όψη

Στά 500W η τύρβη δεν είναι τόσο θερμή με αποτέλεσμα η εξάχνωση να είναι πιο ομαλή και να συμβαίνει πιο αργά. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο χρόνος εξάχνωσης ήταν πάνω από 12 ώρες για να εξαφανιστεί όλο το δοκίμιο. Εδώ η U_{rms} είναι 0.26m/s και η θερμοκρασία στο κέντρο του θαλάμου είναι 32°C. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την πραγματοποίηση του πειράματος ήταν 17.5°C.

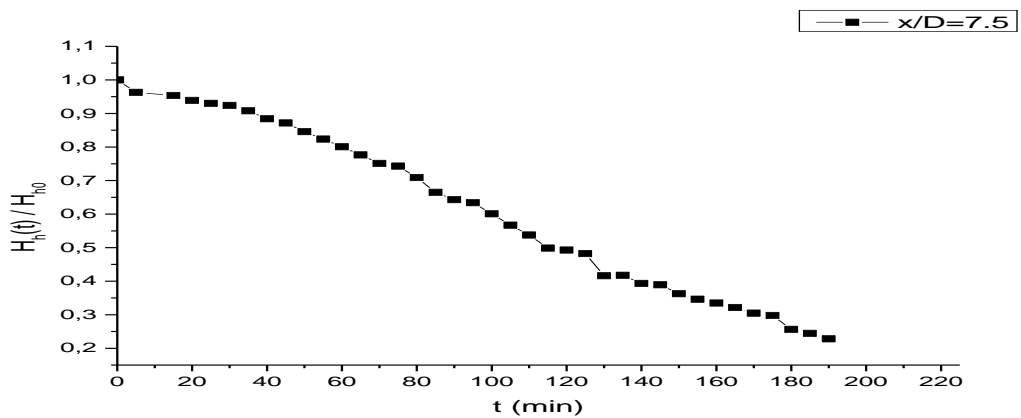
5.4 Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου για τη διάταξη του Αεροσυμπιεστή

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μείωσης της υδραυλικής διαμέτρου στον Αεροσυμπιεστή για συχνότητα 50Hz. Το πείραμα διεξήχθη σε 3 αποστάσεις 7.5D, 10D, 20D. Αναφέρεται σε κάθε πείραμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος του χώρου. Οι φωτογραφίες για κάθε πείραμα λαμβάνονταν κάθε 5 λεπτά. Τέλος συμβολίσαμε με D_h την

υδραυλική διάμετρο για τα πειράματα που φωτογραφίζαμε από πάνω (top view) και H_h την υδραυλική διάμετρο για τα πειράματα που φωτογραφίζαμε από πλάγια.



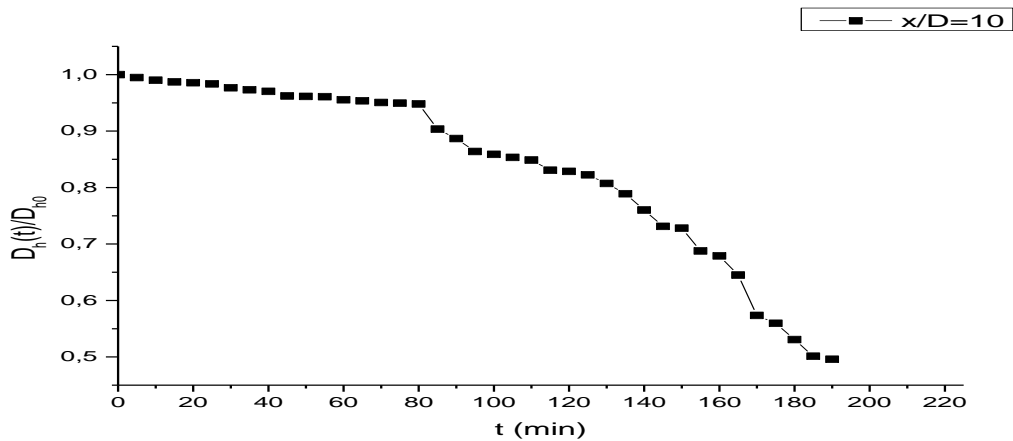
Διάγραμμα 5.16: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) σε σχέση με το χρόνο (t) για τον Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση από την έξοδο $7.5D$ και άνω όψη



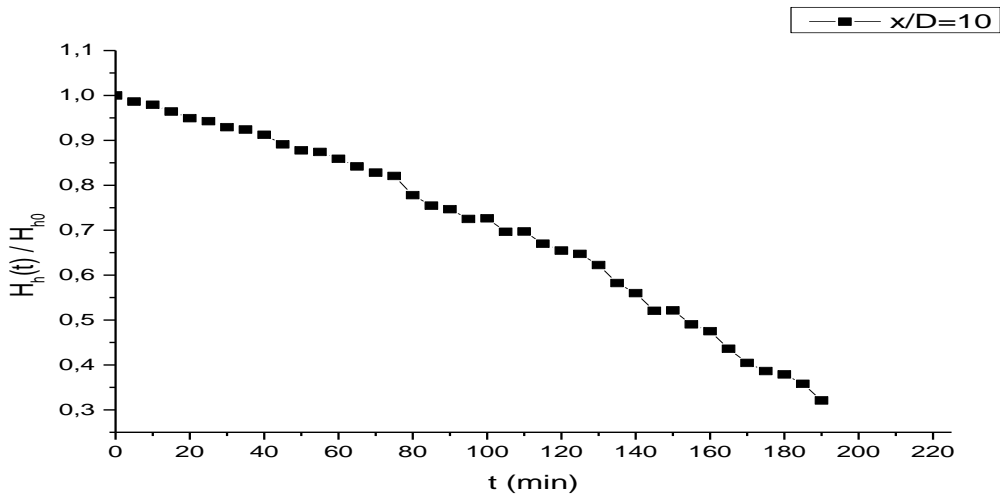
Διάγραμμα 5.17: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) σε σχέση με το χρόνο (t) για τον Αεροσυμπιεστή με το δοκίμιο σε απόσταση από την έξοδο $7.5D$ και πλάγια όψη

Στον αεροσυμπιεστή η τύρβη είναι ανισότροπη και αυτό φαίνεται στην εξάχνωση του κυλινδρικού δοκιμίου. Η ένταση της τύρβης σε αυτή την απόσταση είναι πολύ μεγάλη και ουσιαστικά το δοκίμιο εξαχνώνεται βίαια από την πλευρά της εξόδου του αεροσυμπιεστή. Στην άνω όψη παρατηρούνται κάποιες ανωμαλίες στη μείωση της υδραυλικής διαμέτρου, καθώς το δοκίμιο σε κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια του πειράματος, έγινε αποκόλληση μάζας, από την

ορμή του ρευστού του αεροσυμπιεστή, γι' αυτό παρατηρήθηκαν και απότομες μειώσεις. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου ήταν $\Theta=12^{\circ}\text{C}$.



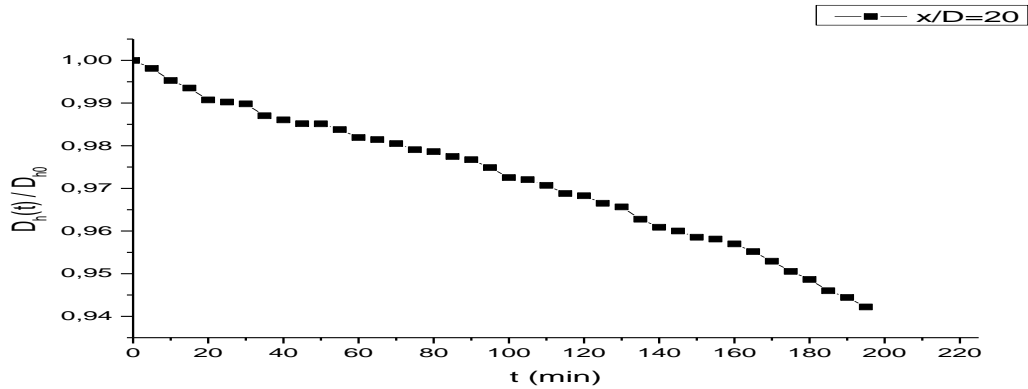
Διάγραμμα 5.18: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο $10D$ και άνω όψη



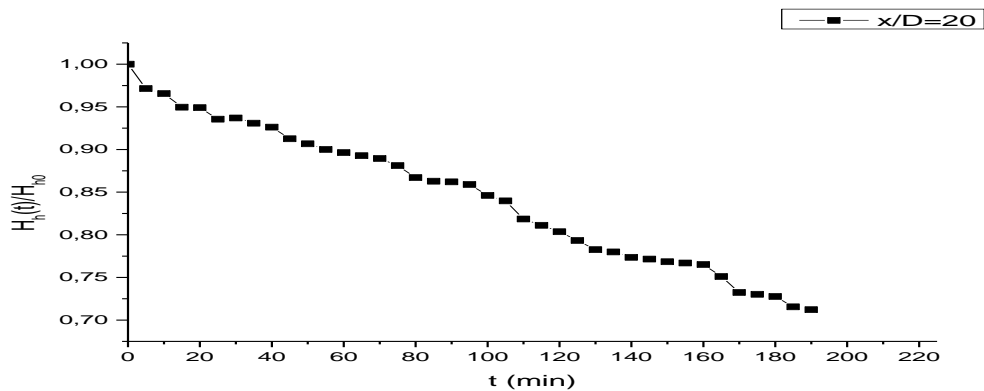
Διάγραμμα 5.19: Υδραυλικής Αδιαστατοποιημένης Διαμέτρου (H_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο $10D$ και πλάγια όψη

Επίσης, παρατηρήσαμε ότι, όσο μεγαλώνει η απόσταση του δοκιμίου από την έξοδο, μειώνεται η ένταση της τύρβης και αυξάνεται η κλίμακα της (Length Scale), το οποίο προκαλεί ταλάντωση στην βάση του δοκιμίου και δυσχεραίνει τις συνθήκες του πειράματος. Η εξάχνωση, παρόλα

αυτά, συμβαίνει πιο ομαλά και βλέπουμε ότι η κλίση του διαγράμματος είναι αρκετά απότομη, και επομένως, η μεταφορά μάζας ενεργοποιείται γρήγορα, καθώς έχει μεγάλο ρυθμό. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου ήταν $\Theta=10^{\circ}\text{C}$.

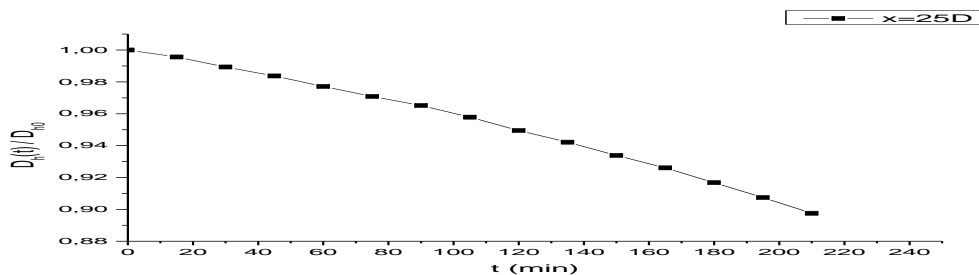


Διάγραμμα 5.20: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (D_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο $20D$ και άνω όψη

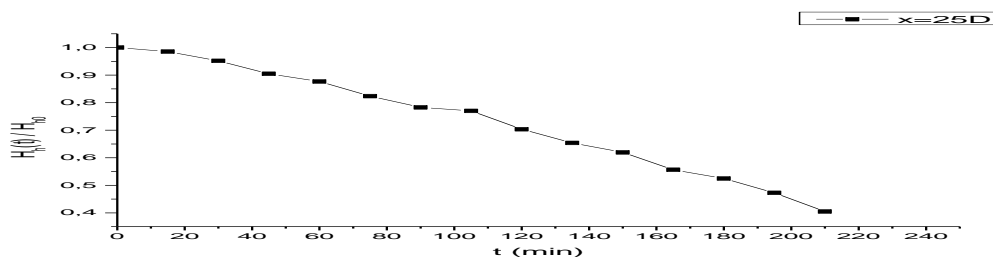


Διάγραμμα 5.21: Αποτελέσματα Αδιαστατοποιημένης Υδραυλικής Διαμέτρου (H_h) και χρόνου (t) σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο $20D$ και πλάγια όψη

Σ' αυτή την απόσταση, η κλίμακα της τύρβης έχει αυξηθεί τόσο πολύ, που η βάση δεν μπορούσε να μείνει σταθερή και δέθηκε με σφικτήρες. Η κλίση της υδραυλικής διαμέτρου είναι μειωμένη σε σχέση με τις μικρότερες αποστάσεις. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν $\Theta=11^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5.22: Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 25D μετωπικά στην ροή και άνω όψη



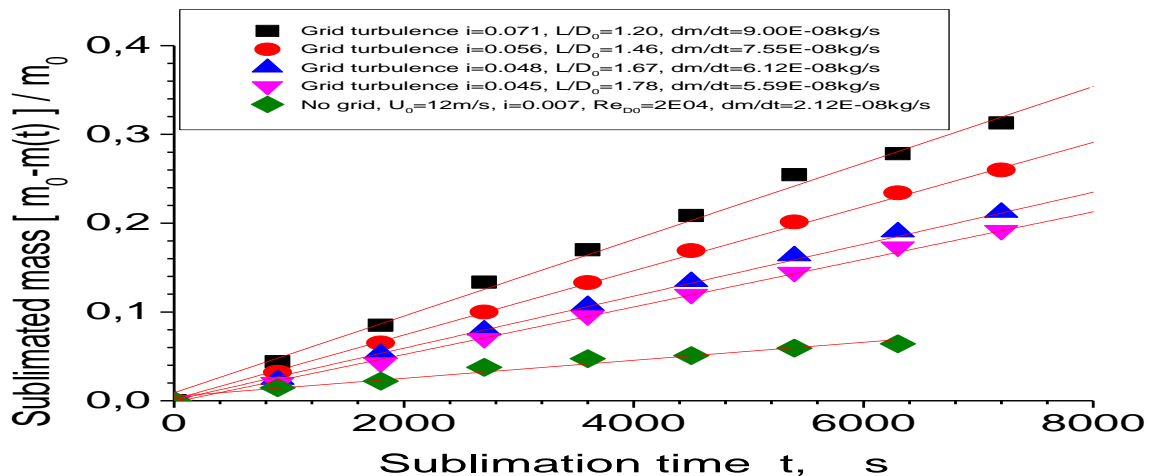
Διάγραμμα 5.23: Αποτελέσματα Υδραυλικής Διαμέτρου σε Αεροσυμπιεστή για απόσταση δοκιμίου από την έξοδο 25D μετωπικά στην ροή και πλάγια όψη

Κεφάλαιο 6

Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση

Στο παρόν υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ρυθμού μεταφοράς μάζας για όλα τα πειράματα. Τα δεδομένα διαγράμματα δημιουργήθηκαν από τα προηγούμενα αποτελέσματα του προγράμματος Imagej, όπου υπολογιζόταν η μείωση της επιφάνειας της καμφοράς για την εύρεση της υδραυλικής διαμέτρου. Έτσι, εφόσον γνωρίζαμε τη μείωση της επιφάνειας με το χρόνο, βρίσκαμε την μείωση του όγκου με το χρόνο και κατ' επέκταση την μείωση της μάζας των δοκιμίων [28]. Οι μετρήσεις της έντασης της τύρβης και της κλίμακας μήκους της τύρβης, καθώς και της διακύμανσης της ταχύτητας και της θερμοκρασίας δεν έγινε από εμάς, αλλά είχε πραγματοποιηθεί από τον Δρ. Γεώργιο Χαραλάμπους και τον Δημήτρη Τζουρτζούμη με χρήση LDA.

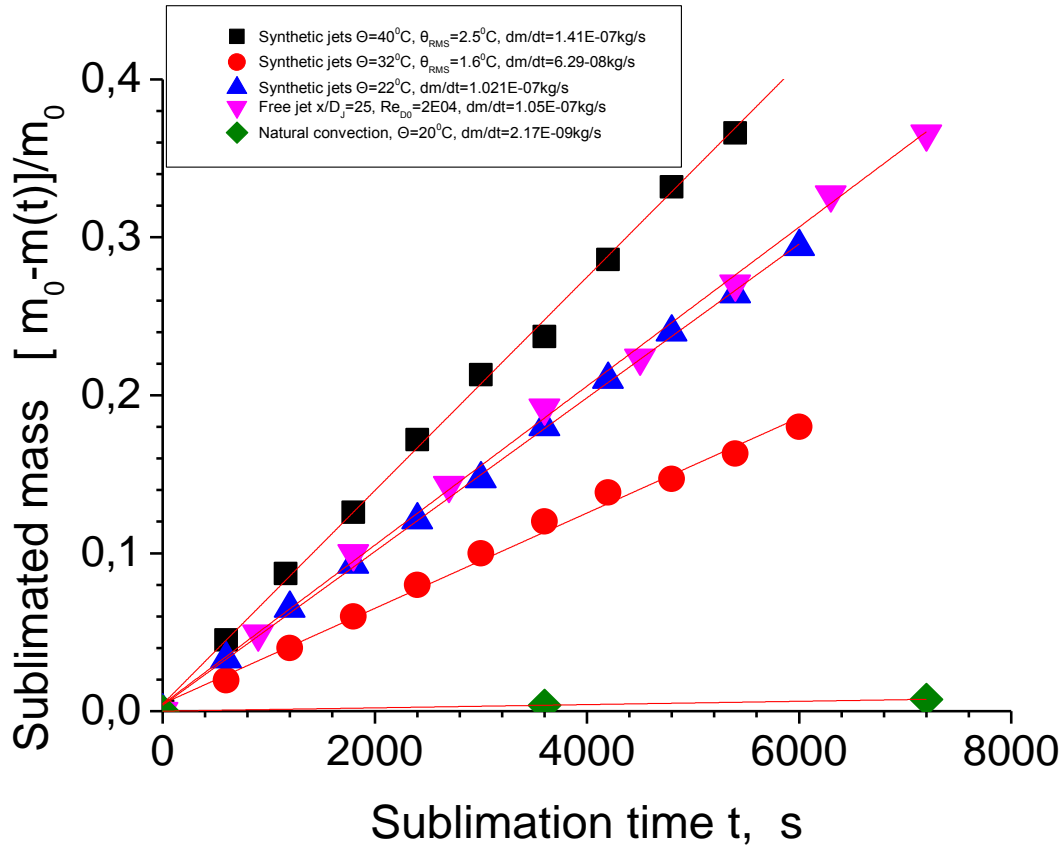
6.1 Αποτελέσματα Εξαχνωμένης Μάζας για όλες τις Πειραματικές Διατάξεις



Διάγραμμα 6.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαχνωμένης Μάζας για όλες τις αποστάσεις για την Αεροσήραγγα για πλέγμα και χωρίς πλέγμα [28]

Η ποσότητα της εξαχνωμένης μάζας της καμφοράς $m_0 - m(t)$ στα πειράματα που διεξήχθησαν στην αεροσήραγγα σε τύρβη με πλέγμα, φαίνονται στο παραπάνω συγκεντρωτικό διάγραμμα, αδιαστατοποιημένα με τη συνολική αρχική μάζα. Η ταχύτητα του ρεύματος της αεροσήραγγας είναι $U_0 = 12 \text{ m/s}$. Ο αριθμός Reynolds για την τύρβη βασισμένος στην κλίμακα μήκους L_{xu} και για τη διακύμανση της ταχύτητας U_{rms} κυμαίνεται, από 1734 στην αρχική θέση $x/M = 10$ μέχρι 1621 στην τελευταία θέση $x/M = 25$, αποδεικνύοντας την ύπαρξη μιας ισχυρής αδρανειακής δύναμης. Επομένως, η τύρβη αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά μάζας κι αυτό απεικονίζεται στα αποτελέσματα dm/dt .

Ο ρυθμός μείωσης της μάζας επίσης, σχεδόν, υποδιπλασιάζεται όταν η ένταση της τύρβης πέφτει από 0.071 σε 0.045. Ωστόσο ο ρόλος της αυξανόμενης κλίμακας μήκους της τύρβης (Length Scale) θα πρέπει επίσης, να ληφθεί υπόψη, από την στιγμή που είναι γνωστό ότι προκαλεί μείωση του ρυθμού της μεταφοράς μάζας. Η εξαχνωση σε ονομαστικά ομαλή ροή χωρίς το πλέγμα (στρωτή) είχε ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση του ρυθμού μεταφοράς μάζας σε $2.12 \times 10^{-8} \text{ Kg/s}$. Η έντασης της τύρβης σε αυτή την περίπτωση ήταν 0.007 από προηγούμενες μετρήσεις με hot wire. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι η τιμή της εξαχνωμένης μάζας μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συρρίκνωση του μεγέθους του κυλινδρικού δίσκου δεν μεταβάλλει, σημαντικά, την ροή γύρω από αυτό. Ο υπολογισμός του ρυθμού μείωσης της μάζας έγινε με βάση τα αρχικά στάδια της εξαχνωσης, όταν δηλαδή, το σχήμα του δίσκου διατηρούσε τη συμμετρία του.



Διάγραμμα 6.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξάχνωσης Μάζας σε σχέση με το χρόνο για το Θάλαμο Τύρβης, τον Αεροσυμπιεστή και για εξάχνωση με φυσική συναγωγή [28]

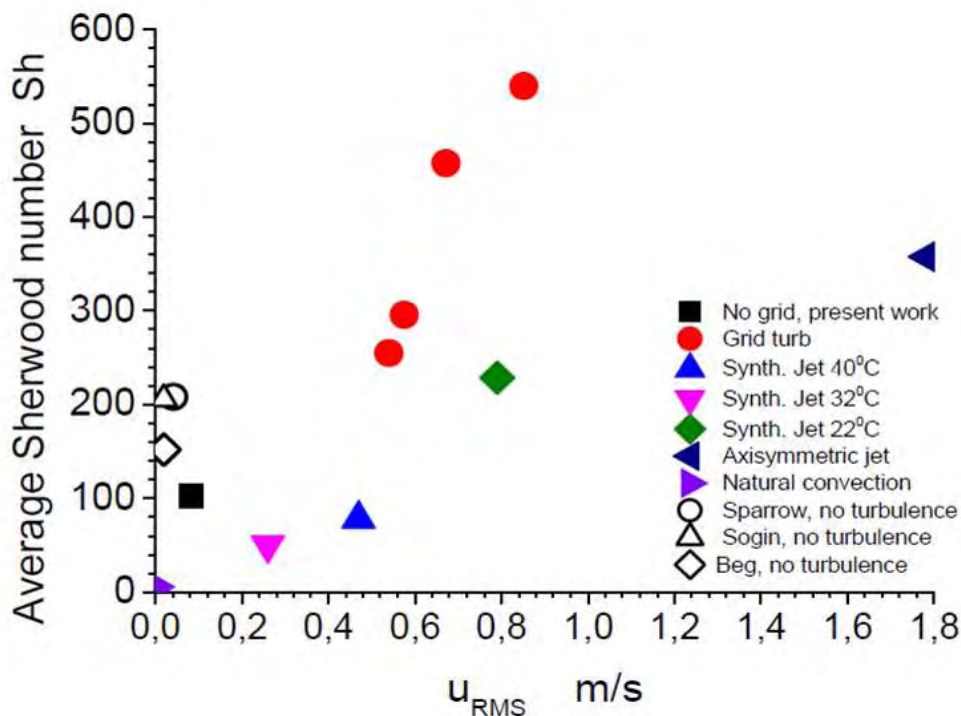
Η πορεία της εξάχνωσης στην εγκατάσταση των συνθετικών δεσμών αέρα και στην αξονοσυμμετρική δέσμη ρευστού απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα για όλα τα πειράματα του Θαλάμου Τύρβης, αλλά, για μια μόνο απόσταση στην αξονοσυμμετρική δέσμη ρευστού (Αεροσυμπιεστής), καθώς, εκεί, η ταχύτητα ήταν ίδια με την αεροσήραγγα. Η Θερμική τύρβη για τον Θάλαμο Τύρβης με $\Theta=40^{\circ}\text{C}$ παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εξάχνωση και επιδεικνύει το μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς μάζας. Ωστόσο, όπως θα δείξουμε αργότερα ο αδιάστατος αριθμός Sherwood δεν ακολουθεί την ίδια πορεία, λόγω του συντελεστή διάχυσης της μάζας D_c . Εκτός από τις διαφορετικές διακυμάνσεις ταχυτήτων U_{rms} οι συνθετικές δέσμες αέρα έχουν και διαφορετικές διακυμάνσεις θερμοκρασιών Θ_{rms} , γεγονός το οποίο αναμένεται να επηρεάσει επίσης, το ρυθμό μεταφοράς μάζας. Παρατηρήθηκε, ότι οι συνθετικές δέσμες αέρα στο Θάλαμο Τύρβης χωρίς θέρμανση (22°C) με το υψηλότερο επίπεδο διακύμανσης ταχυτήτων $U_{rms}=0.75$

m/s, οδηγεί σε τιμές του dm/dt συγκρίσιμες με αυτές στην αεροσήραγγα και για παραπλήσιες U_{rms} (0.85m/s), ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η ταχύτητα στο κέντρο του Θαλάμου είναι $U_0=0$. Φαίνεται, επομένως, ότι οι τυρβώδεις διακυμάνσεις γύρω από το μοντέλο είναι ικανές να προκαλέσουν σημαντική μεταφορά μάζας, δηλαδή, η τύρβη ενισχύει τη διαδικασία της εξάχνωσης και επιπλέον, ότι η αξονοσυμμετρική δέσμη ρευστού με το μεγαλύτερο U_{rms} (Συγκεντρωτικός Πίνακας 3.1), δεν οδηγεί σε σημαντικούς ρυθμούς μεταφοράς μάζας. Είναι γνωστό ότι μαζί με τις μεγάλες διακυμάνσεις ταχύτητας η αξονοσυμμετρική δέσμη ρευστού έχει διακυμάνσεις εγκάρσιων ταχυτήτων v, w μικρότερου μεγέθους, λόγω της ανισότροπης φύσης του, αλλά και σημαντικά μεγάλες κλίμακες μήκους της τύρβης, που ενεργούν σε αντίθετη κατεύθυνση από την ένταση της τύρβης στην μεταφορά μάζας. Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται, επίσης, και η μεταφορά μάζας κυλινδρικών δίσκων καμφοράς, που οφείλεται σε φυσική συναγωγή, η οποία είναι σχεδόν δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τις συνθετικές δέσμες αέρα. Η μεταφορά μάζας με συναγωγή και η μεταφορά μάζας με τις συνθετικές δέσμες ρευστού, μοιράζονται το κοινό στοιχείο της μηδενικής μέσης ταχύτητας γύρω από το μοντέλο. Εν τούτοις η μεταφορά μάζας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις σχεδόν ισοτροπικές και ομοιογενείς διακυμάνσεις της ταχύτητας.

6.2 Αποτελέσματα αριθμών Sherwood

Από την εξίσωση (5.5) και λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες τιμές των συντελεστών διάχυσης μάζας για ατμούς καμφοράς, οι αριθμοί Sh υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.3. Η επίδραση της τυρβώδους διακύμανσης της ταχύτητας στη μεταφορά μάζας, φαίνεται αμφότερα, για την παραγόμενη τύρβη στην αεροσήραγγα με πλέγμα και για τις συνθετικές δέσμες αέρα και τον αξονοσυμμετρικό συμπιεστή, καθώς και για φυσική συναγωγή. Όπως παρουσιάζεται εδώ τα δεδομένα δεν διαμορφώνουν μία ενιαία καμπύλη τουλάχιστον για την τύρβη με πλέγμα και για τον αξονοσυμμετρικό συμπιεστή, όπου οι αριθμοί Reynolds για το μοντέλο μας είναι ίδιοι (=20000), από τη στιγμή που η κλίμακα μήκους της τύρβης (Length Scale), η ανισοροπία και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την μεταφορά μάζας. Σε αυτή τη μελέτη, δεν υπάρχουν

επαρκή δεδομένα που να επιτρέπουν να ληφθούν υπόψη αυτές οι επιδράσεις. Τα διαθέσιμα στοιχεία που υπάρχουν στη βιβλιογραφία είναι για διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα, όπως κυλίνδρους, επίπεδες επιφάνειες, αεροτομές και σφαίρες, τα οποία αναφέρονται σε τοπικούς αριθμούς Sh και όχι μέσους. Όταν ένας δίσκος εξετάζεται, συνήθως η μεταφορά μάζας περιορίζεται μόνο στην μετωπική περιοχή ενώ στην παρούσα εργασία η μεταφορά μάζας πραγματοποιείται σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου. Τα εν λόγω δεδομένα για ομαλή ροή και αριθμό $Reynolds=20000$, παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα για δίσκους που τοποθετήθηκαν για μεταφορά μάζας μόνο στην εμπρόσθια επιφάνεια [3], [5], [6]. Τα αποτελέσματα τους βρίσκονται σε ποιοτική συμφωνία με τις δοκιμές στην αεροσήραγγα και χωρίς πλέγμα.



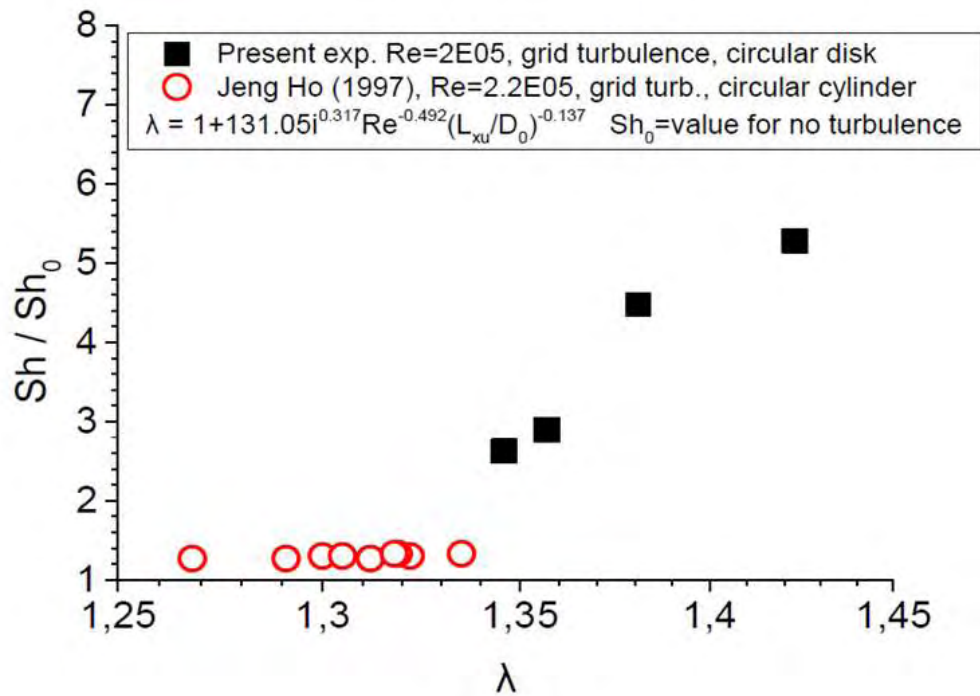
Διάγραμμα 6.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα μέσω των αριθμών Sh σε σχέση με τη διακύμανση της ταχύτητας σε όλες τις πειραματικές διατάξεις [3], [5], [6], [28]

Προσπαθήσαμε να χρησιμοποιήσουμε υπάρχουσες συσχετίσεις, για διαφορετικά σχήματα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κλίμακας μήκους και της έντασης της τύρβης.

Στο παρακάτω διάγραμμα χρησιμοποιείται η παράμετρος λ , που μπορεί να δημιουργήσει ενιαία καμπύλη, για τον αδιαστατοποιημένο αριθμό Sh/Sh_0 στην εξάχνωση κυλινδρικών δίσκων ναφθαλίνης, σε τύρβη με πλέγμα [29]. Αυτή η παράμετρος δίνεται ως:

$$\lambda = 1 + 131.05i^{0.317} Re^{-0.492} \left(\frac{L_{xu}}{D_0}\right)^{-0.137} \quad (6.1)$$

Το Sh_0 ορίζεται, ως η τιμή του αριθμού Sh για σχεδόν μηδενική ένταση της τύρβης. Χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα για τύρβη με πλέγμα των πειραμάτων μας, όπου Sh_0 η τιμή για τύρβη χωρίς πλέγμα με $i=0.007$. Τα δεδομένα δεν εκτίνονται σε επαρκές φάσμα, προκειμένου να συναχθεί οριστικό συμπέρασμα.



Διάγραμμα 6.4: Αποτελέσματα αδιαστατοποιημένου Sh με λ [28]

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Πειράματα εξάχνωσης στερεών δίσκων καμφοράς, εκτεθειμένων σε διαφορετικά είδη τυρβώδους ροής, έδειξαν ότι οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι ο κυρίαρχος παράγοντας για την ενίσχυση της μεταφοράς μάζας. Η τύρβη με πλέγμα σε αεροσήραγγα μπορεί να αυξήσει τους αριθμούς Sh , μπορεί να αυξήσει σχεδόν μία τάξη μεγέθους σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές, σε ομοιόμορφη ροή με ίδιο αριθμό Re . Ακόμα και αν δεν υπάρχει η μέση ταχύτητα $U_o=0$, οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας ενεργούν, ώστε να αυξηθεί ο αριθμός Sherwood. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η αυξημένη η κλίμακα μεταφοράς τύρβης τείνει να επηρεάσει τη μεταφορά μάζας, σε αντίθετη κατεύθυνση (μείωση). Αυτό συμπεραίνεται από διαπιστώσεις επίδρασης της κλίμακας μήκους της τύρβης, στην μεταφορά θερμότητας στο εμπρόσθιο σημείο στασιμότητας, διαφόρων τύπων σώματος. Για τους στερεούς δίσκους, που εξετάζονται στην παρούσα έρευνα, η μάζα μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, τουλάχιστον κατά περιόδους, όταν σχεδόν το $1/3$ της συνολικής μάζας έχει εξαχνωθεί.

Σε σταθερής ροής θερμαινόμενο αέρα και χαμηλών επιπέδων τύρβης, ο ρυθμός εξάχνωσης της μάζας αυξάνει με την θερμοκρασία στη δύναμη του 2.5 (εξίσωση 5.1).

Η μείωση του όγκου από την οποία έχει συναχθεί η μείωση της μάζας, υπολογίστηκε με την λήψη στιγμιότυπων του μοντέλου σε καθορισμένους χρόνους και στη συνέχεια επεξεργάζονταν τα στιγμιότυπα ψηφιακά. Δεν αναφέρονται αποτελέσματα ζύγισης στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, λόγω της δυσκολίας εφαρμογής της στα πειράματα. Παρόλα αυτά υπήρχε μια καλή συμφωνία με τη μέθοδο ζύγισης, με την προϋπόθεση ότι το μοντέλο δεν είχε παραμορφωθεί σημαντικά από την τυρβώδη ροή.

Παράρτημα 1 - Επεξεργασία Εικόνων με Matlab

Ο κώδικας της Matlab για image processing που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

```
%%  
% Image processing script  
% - Reads single or multiple image frame files  
% - Creates matrix of light intensity for a given focus area  
% - Plots iso-contoures of light intensity  
% - Plots light intensity for a frame slice  
% - Calculates and plots FFT of light intensity for a single point  
% - Calculates and plots mean hydraulic radius  
% - Saves data in txt files  
% Thanasis Barlas 27/5/2013  
  
clear all; close all; clc; % clearing data  
  
%%  
% define user input parameters  
  
xl = 330; % focus area left corner x coordinate (in pixels)  
xr = 970; % focus area right corner x coordinate (in pixels)  
yl = 500; % focus area left corner y coordinate (in pixels)  
yr = 1070; % focus area right corner y coordinate (in pixels)  
frame = 5859; % single frame number to process  
frame_file = 'jpg'; % frame file type (string)  
contour_nr = 10; % number of iso-contours to plot  
frame_slice_x = 100; % x coordinate of vertical frame slice (in pixels) (numbering starting at left corner of focus  
area)  
frame_range = [5859:5930]; % frame number range (array)  
point_x = 100; % x coordinate of point of interest (in pixels)  
point_y = 100; % y coordinate of point of interest (in pixels)  
Fs = 100; % sampling frequency of frames (in Hz)  
  
%%  
% read image frame, create matrix of light intensity, calculate average value, plot iso-contoures of  
% light intensity (for a single frame and for the average from all frames), plot light intensity at  
% a given vertical slice (for a single frame and for the average from all frames), calculate and plot  
% FFT of light intensity for a single point for all frames and save data in txt  
  
file = sprintf('IMG_%0.4i',frame); % set file name  
% a1 = imread(file,frame_file);  
% figure(1);  
% image(a1);  
a = double(imread(file,frame_file)); % read image  
% l1 = a1(xl:xr,yl:yr,:);  
% figure (2);  
% image(l1);  
I = a(xl:xr,yl:yr); % create matrix of intensity for given focus area
```

```

% create 3D matrix with light intensity of all frames
for i=1:length(frame_range)
    file = sprintf('IMG_%0.4i',frame_range(i));
    a = double(imread(file,frame_file));
    I = a(xl:xr,yl:yr);
    I_all(:,i) = I;
end

% calculate matrix of average light intensity from all frames
for i=1:size(I_all,1)
for j=1:size(I_all,2)
    I_av(i,j)=mean(I_all(i,j,:));
end
end

% create array of average light intensity from all frames for a given point
I_x_y = squeeze(I_all(point_x,point_y,:));

% calculate FFT of average light intensity from all frames for a given point
L = length(I_x_y);
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of I_x_y
Y = fft(I_x_y,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% make contour plot of light intensity for a single frame
figure(1)
contourf(I,contour_nr,'LineStyle','none');
xlabel('pixel number in x');
ylabel('pixel number in y');
title(['contours of light intensity at frame ',num2str(frame)]);
colormap(jet);
colorbar;
h1=colorbar;
xlabel(h1,'light intensity');
axis equal;

% make contour plot of average light intensity from all frames
figure(2)
contourf(I_av,contour_nr,'LineStyle','none');
xlabel('pixel number in x');
ylabel('pixel number in y');
title('contours of average light intensity from all frames');
colormap(jet);
colorbar;
h2=colorbar;
xlabel(h2,'light intensity');
axis equal;

% plot light intensity at a certain vertical frame slice for a single frame
figure(3)
plot(I(:,frame_slice_x));
xlabel('pixel number in y')

```

```

ylabel('light intensity')
title(['light intensity at a vertical frame slice at x=',num2str(frame_slice_x),' at frame ',num2str(frame)]);

% plot average light intensity at a certain vertical frame slice from all frames
figure(4)
plot(I_av(:,frame_slice_x));
xlabel('pixel number in y');
ylabel('light intensity');
title(['average light intensity at a vertical frame slice at x=',num2str(frame_slice_x),' from all frames']);

% plot average light intensity at a certain point from all frames
figure(5)
plot(I_x_y);
xlabel('frame number');
ylabel('average light intensity');
title(['average light intensity at a point at x=',num2str(point_x),' and y=',num2str(point_y)]);

% plot FFT of average light intensity at a certain point from all frames
figure(6)
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title(['single-sided amplitude spectrum of light intensity at a point at x=',num2str(point_x),' and
y=',num2str(point_y)]);
xlabel('frequency (Hz)');
ylabel('light intensity amplitude');

% save in ASCII files: light intensity matrix, average light intensity matrix, light intensity at vertical slice,
% average light intensity at vertical slice, light intensity at certain point, FFT of light intensity at certain point
A=I;
save(['results_light_intensity_matrix_for_frame',num2str(frame),'.dat'],'A','-ascii','-tabs');
B=[I_av];
save(['results_average_light_intensity_matrix.dat'],'B','-ascii','-tabs');
C=[I(:,frame_slice_x)];
save(['results_average_light_intensity_for_vertical_slice_at_x_',num2str(frame_slice_x),'for
frame',num2str(frame),'.dat'],'C','-ascii','-tabs');
D=[I(:,frame_slice_x)]
save(['results_light_intensity_for_vertical_slice_at_x_',num2str(frame_slice_x),'.dat'],'D','-ascii','-tabs');
E=[I_x_y];
save(['results_light_intensity_for_point_at_x_',num2str(point_x),'and y',num2str(point_y),'.dat'],'E','-ascii','-tabs');
F=[f 2*abs(Y(1:NFFT/2+1))];
save(['results_FFT_of_light_intensity_for_point_at_x_',num2str(point_x),'and y',num2str(point_y),'.dat'],'F','-ascii',
'-tabs');

%%
% calculate and plot mean hydraulic radius for a range of image frames, and
% calculate and plot on screen the average mean hydraulic radius from all frames

for j=1:length(frame_range)
    file = sprintf('IMG_%0.4i',frame_range(j));
    a = double(imread(file,frame_file));
    I = a(xl:xr,yl:yr);
    [x y] = find(I==I);

% change reference frame to the center of focus area

```

```

x2=x+xl-2;
y2=y+yl-2;
yf=y2-435;
xf=311-x2;
matr = [x2 y2 l(:)];
matr2 = [xf yf l(:)];

% change coordinates from cartesian to polar
r=sqrt(xf.^2+yf.^2);
[a a1] = size(matr2);
for i=1:a

    if yf(i)>=0 & xf(i)>=0
        w=abs(xf(i)./yf(i));
        angle(i) = (180/pi)*atan(w);
    elseif yf(i)<0 & xf(i)>0,
        w=abs(xf(i)./yf(i));
        angle(i) = (180/pi)*atan(w)+90;
    elseif yf(i)<0 & xf(i)<0
        w=abs(xf(i)./yf(i));
        angle(i) = (180/pi)*atan(w)+180;
    else
        w=abs(xf(i)./yf(i));
        angle(i) = (180/pi)*atan(w)+270;
    end
end
% sort angle from low to high value
[angleb ii] = sort(angle);
l2 = l(:);
l3 = l2(ii);
r2 = r(ii);

matr3 = [angle' r l(:)];
matr4 = [angleb' r2 l3];
% interpolation
[angle2,rad2] = meshgrid(0:1:360,0:1:245);
[xi,yi]=pol2cart(angle2,rad2);
[X,Y] = pol2cart(angleb(1:end-1),(r2(1:end-1))');
lint = griddata(X,Y,l3(1:end-1),xi,yi);
rm(j) = sum(sum(lint.*rad2))/sum(sum(lint));
end
% calculate average hydraulic radius from all frames and print value on screen
rm_av = mean(rm);
disp(['The average hydraulic radius from all frames is ',num2str(rm_av)]);

% plot mean hydraulic radius for every frame
figure(7)
plot(rm);
xlabel('frame number');
ylabel('mean hydraulic radius');
title('mean hydraulic radius for every image frame');

```

Παράρτημα 2 - Διόρθωση Δεδομένων με Νευρωνικά

Δίκτυα στο Θάλαμο Τύρβης

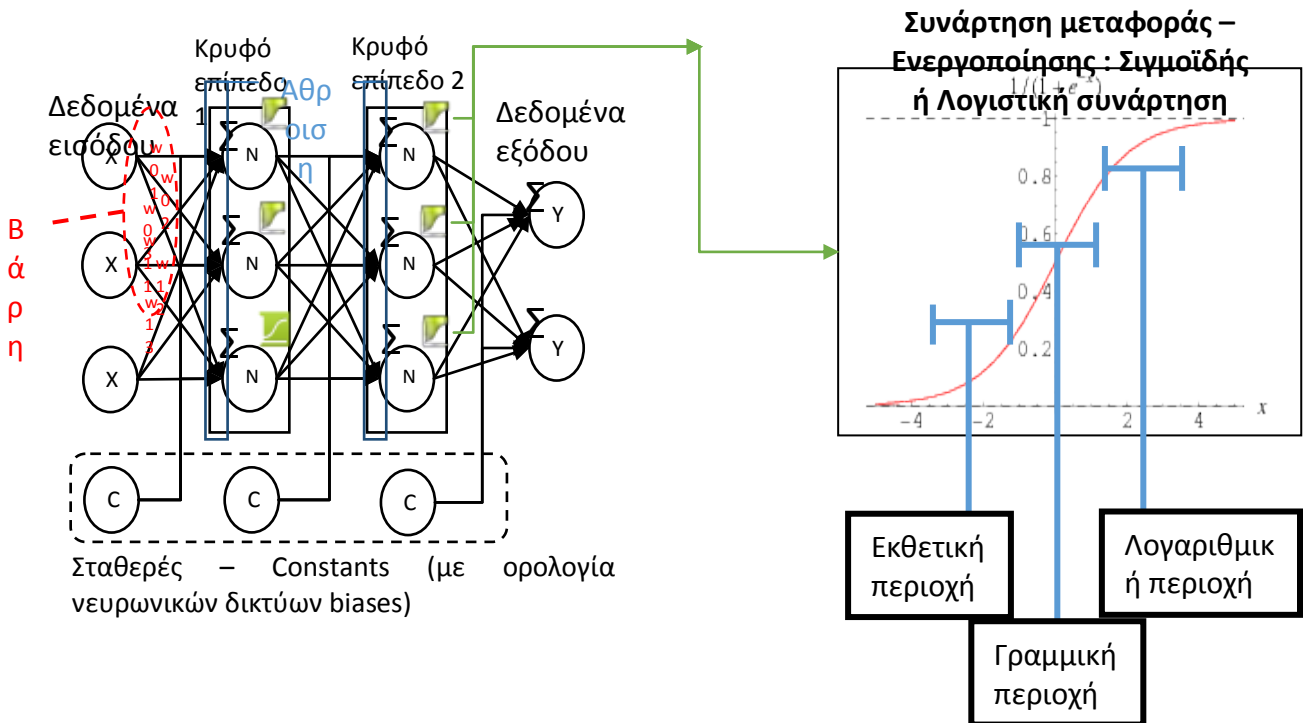
Πολλές φορές τα δεδομένα που αντλούσαμε από μετρήσεις, μέσω των οργάνων παρουσίαζαν κάποιες ανωμαλίες, σε σχέση με τη συνολική τους πορεία. Έτσι αποφασίστηκε να βρεθεί μέθοδος διόρθωσης των δεδομένων. Παρακάτω παρουσιάζεται η διόρθωση των πειραματικών στοιχείων του θερμοκρασιακού προφίλ και του προφίλ ταχύτητας για το Θάλαμο Ισότροπης και Ομογενούς Τύρβης.

Υπολογιστικό μοντέλο νευρωνικών δικτύων

- Τα νευρωνικά δίκτυα είναι υπολογιστικές δομές δεδομένων που ανάγονται στην γενική κατηγορία των κατευθυντικών γράφων.
- Η αρχιτεκτονική αναφορά τους αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά μέρη:
 1. Δεδομένα / Διάσταση δεδομένων εισόδου,
 2. Δεδομένα / Διάσταση δεδομένων εξόδου,
 3. Συνδεσμολογία – γράφος ακμών – κόμβων – πλήθος κόμβων και τοποθέτηση τους,
 4. Συνάρτηση μεταφοράς «ενεργοποίησης» (activation function),
 5. Βάρη μεταφοράς μεταξύ των επιπέδων «layers» (αποτέλεσμα learning-fitting)
- Χρήση νευρωνικών δικτύων:
 1. Προσέγγιση / παλινδρόμηση πολύπλοκων συναρτήσεων
 2. Κατηγοριοποίηση δεδομένων,
 3. Ομαδοποίηση δεδομένων – εκμάθηση χαρακτηριστικών,
 4. Αφαίρεση σφαλμάτων θορύβου από δεδομένα.

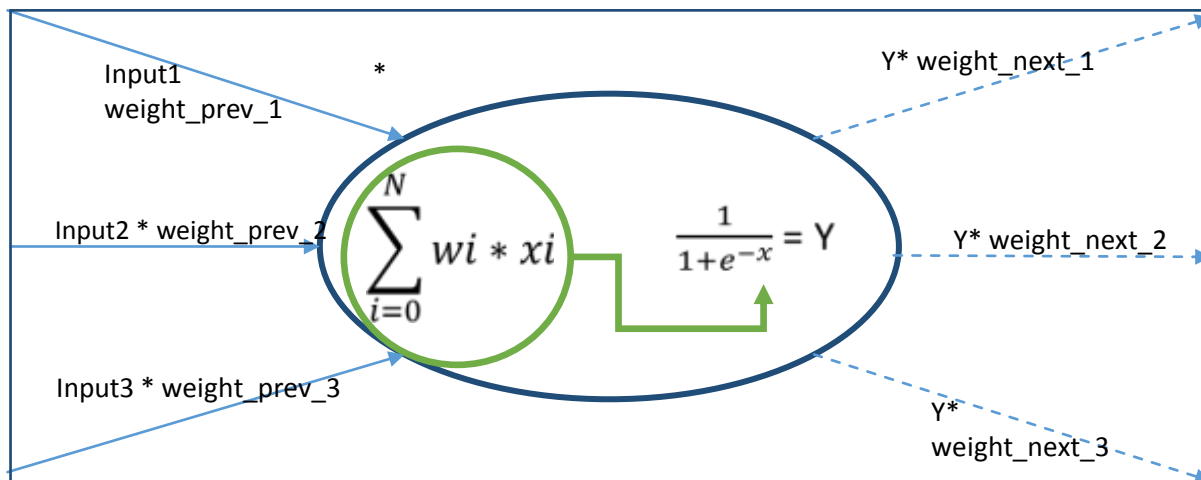
Γενική αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου

Προσέγγιση συνάρτησης $f(x_1, x_2, x_3) := (y_1, y_2)$



Διαδικασία ανά νευρώνα

Τα δεδομένα εισόδου καταφθάνουν σε κάθε νευρώνα, όπου αθροίζονται, αφού πρώτα έχουν πολλαπλασιαστεί με τα ατομικά τους βάρη.



Η τιμή Y πολλαπλασιάζεται με τα επόμενα βάρη και προωθείται στο επόμενο layer από νευρώνες, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία μέχρι να καταλήξει στο τέλος .

Αυτή η τιμή του αθροίσματος τοποθετείται στην συνάρτηση ενεργοποίησης και έχει ως έξοδο μία τιμή.

Δημιουργία του Μοντέλου – Εκμάθηση συστήματος

- Το νευρωνικό δίκτυο είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο γενικού τύπου το οποίο χρειάζεται μία μεθοδολογία εκμάθησης
- Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις εκμάθησης του νευρωνικού δικτύου στη βιβλιογραφία, οι οποίες είναι γενικά οι εξής:
 - Machine Learning τεχνικές (π.χ. reinforcement learning),
 - Ανάλυση του προβλήματος σε επιμέρους γραμμικά προβλήματα και επίλυσή τους με βελτιστοποίηση και γραμμικό προγραμματισμό (π.χ. cplex),
 - Γενική επίλυση του προβλήματος, σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, ως προς το σφάλμα πρόβλεψης (π.χ. επίλυση με γενετικούς αλγορίθμους).

Για την αυτοματοποιημένη επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος βασιστήκαμε στην ενσωματωμένη ρουτίνα εκμάθησης του MatLab, η οποία είναι η επίλυση με οπίσθια διέλευση του γράφου (backpropagation)

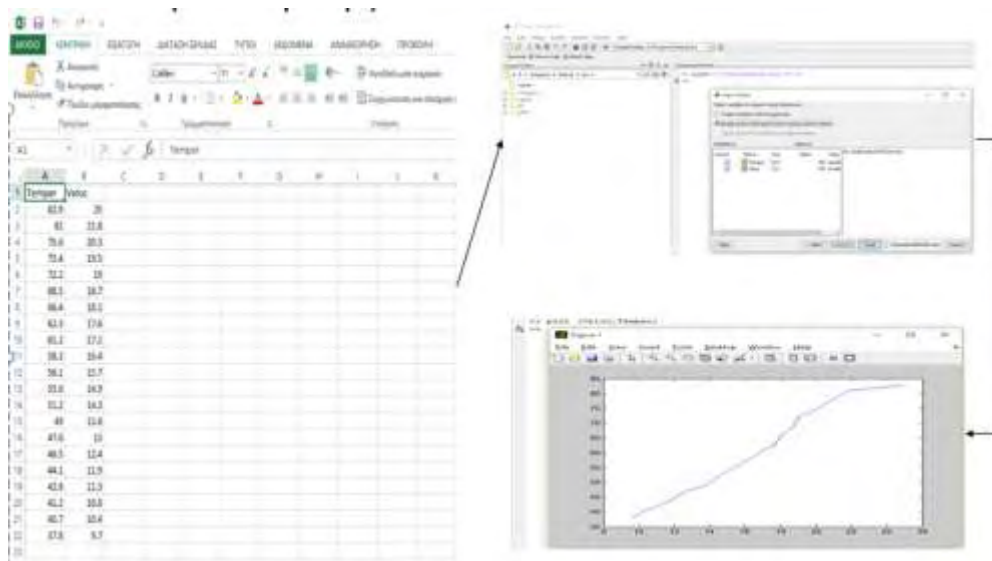
Μεθοδολογία χρήσης MatLab

- Μορφοποίηση δεδομένων εισόδου για MatLab,
- Εισαγωγή δεδομένων στο MatLab ως διανύσματα,
- Έναρξη οδηγού δημιουργίας νευρωνικού δικτύου,
- Τοποθέτηση παραμέτρων νευρωνικού δικτύου,
- Εκμάθηση – παρακολούθηση σφάλματος και σχετικών μετρικών με την εκμάθηση,
- Αποθήκευση αποτελεσμάτων και νευρωνικού δικτύου,
- Χρήση νευρωνικού δικτύου για αναπαραγωγή του μοντέλου.

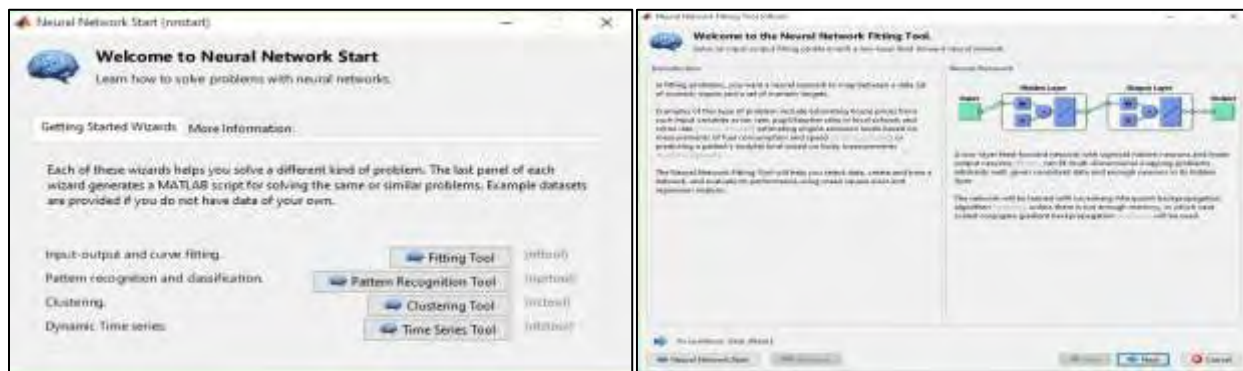
Διαδικασία εκμάθησης

Μορφοποιούμε τα δεδομένα σε μία απλή μορφή τιμών διαχωριζόμενων από κόμμα (.csv) και τα εισάγουμε στο matlab με drag-and-drop και ακολουθώντας τον οδηγό εισαγωγής

- Αξονικές Πειραματικές Μετρήσεις ανά 3.9-4 cm T,u,
- Απόσταση X τελ. μέχρι το κέντρο 86cm.

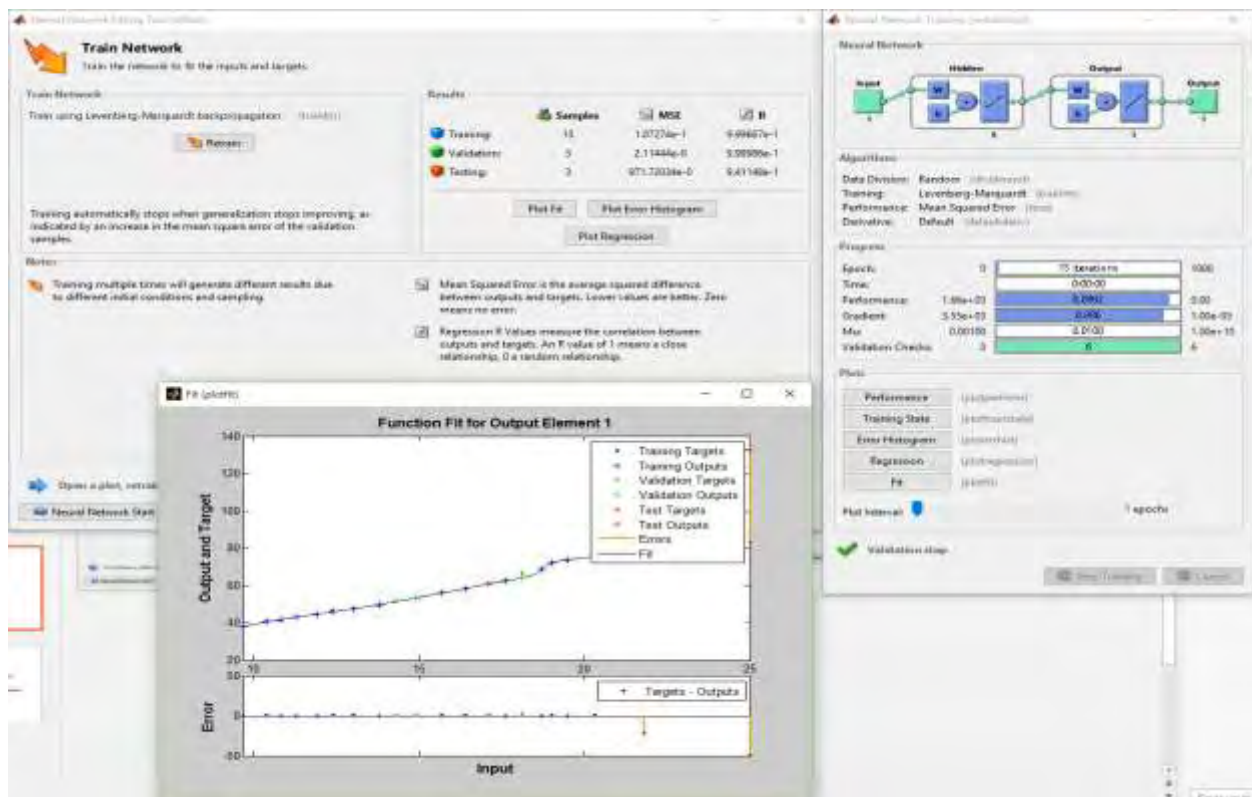


Ακολουθούμε τα βήματα του οδηγού νέου νευρωνικού δικτύου για την επιλογή της μεθόδου – των τιμών εισόδου εξόδου και την αναλογία δεδομένων για εκπαίδευση – επαλήθευση – έλεγχο (training set – validation set – Test set pivot).





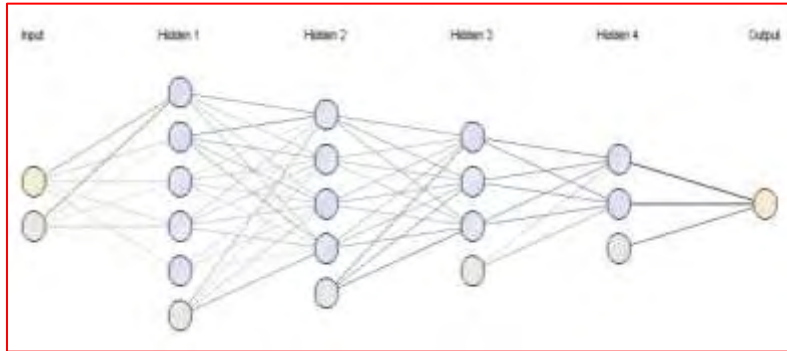
Παρακολουθούμε την διαδικασία εκμάθησης σε γραφικές παραστάσεις και μετρικές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος Mean Square Error στο training set, validation set και testing set. Εκπαιδεύουμε μέχρι την επιθυμητή ακρίβεια.



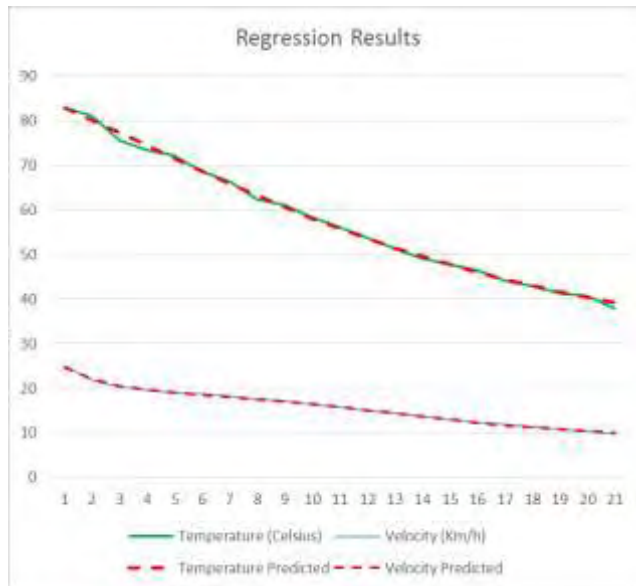
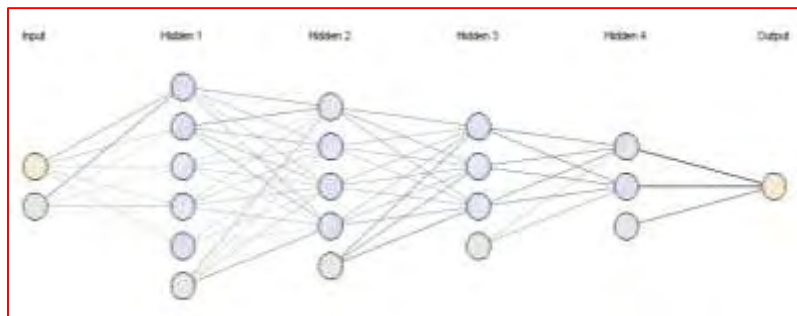
Εξάγουμε τα αποτελέσματα και παρακολουθούμε το μοντέλο στους υπολογισμούς του.

Άξονες Διαγράμματος: Θερμοκρασία(Y), Ταχύτητα(X)

Αποτελέσματα για $f(x) = T$ (εκμάθηση ως προς το T)



Αποτελέσματα για $f(x) = u$ (εκμάθηση ως προς το u)



Θερμοκρασία	Ταχύτητα
82.7503175	24.78059374
80.0304176	22.13766576
77.21630546	20.57776622
74.35135812	19.63351477
71.47765468	19.00165232
68.63327571	18.50725231
65.85054832	18.05152351
63.15525778	17.57906836
60.5666598	17.06030919
58.0980427	16.48269052
55.75758893	15.84641516
53.5493351	15.16204565
51.47409569	14.44827965
49.53027614	13.72900936
47.71454628	13.02959457
46.02237421	12.37299198
44.44843595	11.77669547
42.98692239	11.25120147
41.63176539	10.80011423
40.37680232	10.4214479
39.21589488	10.10944844

Διορθωμένα Διαγράμματα ταχύτητας και θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση(χ-άξονας)

Βιβλιογραφία

- [1] R. J. Goldstein and H. H. Cho, “A review of mass transfer measurements using Naphthalene sublimation”, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, vol. 10, pp. 416-434, 1995.
- [2] P.R. Souza Mendes, “The Naphthalene sublimation technique”, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, vol. 4, pp. 510-523, 1991.
- [3] E.M. Sparrow and G.T. Geiger, “Local and average transfer characteristics for a disk situated perpendicular to a uniform flow”, *Journ. Heat Transfer*, vol. 107, pp. 321-326, 1985.
- [4] H.H. Sogin, “Sublimation from disks to air streams flowing normal to their surfaces”, *ASME Trans, J. Heat Transfer*, vol. 80, pp. 61-71, 1958.
- [5] H.H. Sogin, “An improved correlation of stagnation point mass transfer from Naphthalene circular disks facing uniform air streams”, *ASME Trans, J. Heat Transfer*, vol. 113, pp. 772-773, 1991.
- [6] S.A. Beg, “Forced convective mass transfer from circular disks” *Warme und Stoffubertragung*, vol. 6, pp45-51, 1973.
- [7] A. Zisimatoy, “Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση φαινομένων ανάμειξης σε τυρβώδη ροϊκά πεδία με στρωματοποίηση και περιστροφή”, 2011.
- [8] G.I. Taylor “Eddy motion in the atmosphere” *Phil. Trans. R. Soc. London* A215 1–26
- [9] G.I. Taylor “The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion” *Proc. R. Soc. London* A135 685–706, 1932.
- [10] L. Prandle ‘Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz’ *Zs. angew Math.Mech.* 5 136–139,1925.
- [11] Kármán Th. Von, “Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz”, *Proc. 3rd International Congress on Applied Mechanics (Stockholm)*; “Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz”, I, Ed. C. W. Oseen and W. Weibull, eds.), (AB Sveriges Lifografiska Tryckenier), 1931, 85–93,
- [12] Taylor G.I. ‘Statistical theory of turbulence’ I-III. *Proc. R. Soc. London* A151 421–464.
- [13] Taylor G.I. ‘Diffusion by continuous movements’ *Proc. Lond. Math. Soc.* 20 196–211, 1921.
- [14] Batchelor G.K.’‘The Theory of Homogeneous Turbulence’’. Cambridge: Cambridge University Press 197 pp, 1956.

- [15] Kolmogorov A.N “Energy dissipation in locally isotropic turbulence”. Doklady AN SSSR 32 19–21, 1941.
- [16] G.N. Abramovich, Theory of Turbulent Jets, 1936, Ch.1, MIT Press, 1936.
- [17] S.A Kareem, ”Kinetics of Camphor decomposition in ambient condition”, 2000.
- [18] Wikipedia Link for Camphor: <https://en.wikipedia.org/wiki/Camphor>
- [19] P. Coulson and B. Richardson, 6th edition Chemical Engineering, 1999.
- [20] B. Dutta, “Principles of mass transfer and separation processes”, 2009.
- [21] Y.A. Cengel, Heat and Mass Transfer, 2011.
- [22] H. Stapountzis H.G. Charalampous, D. Tziourzioumis, A. Stamatelos, “Diffusion in synthetic jet generated turbulence”. 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013, Nagoya, Japan, 2013.
- [23] H. Stapountzis, N. Tsandouklas, T. Demetriades, “Effects of Synthetic Jet Turbulence on Heated Line Plumes”, Proceedings of the International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow, Prague, Czech Republic, August 11-12, 2014.
- [24] I. Wygnanski and H. Fiedler, “Some measurements in the self-preserving jet”, Journ. Fl. Mech. Vol. 38, pp. 577-612, 1969.
- [25] H. Stapountzis, B.L. Sawford, J.C.R. Hunt and R.E. Britter, “Structure of the temperature field downwind of a line source in grid turbulence”, Journ. Fl. Mech. vol.186, pp. 401-424, 1986.
- [26] Handbook of Chemistry and Physics, 97th Edition, 2016.
- [27] Y. A Cengel. and A. J., Ghajar, Heat and Mass Transfer - Fundamentals and Applications, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 2010.
- [28] H. Stapountzis, G. Andreatos, I. Kordatos, “Effect of turbulence on mass transfer of cylindrical disks”, 2016.
- [29] C.-J. Ho, “Effect of length scale on heat transfer from cylinder in cross flow”, M.Sc. Texas Tech.Univ. Mech. Eng. Dept. Dec. 1979.
- [30] Matlab Neural Network Toolbox <https://www.mathworks.com/products/neural-network/>