

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΥΡΒΗΣ ΜΕΣΩ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΡΟΪΚΩΝ
ΛΕΣΜΩΝ ΚΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ**

υπό

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΤΣΑΝΤΟΥΚΛΑ

Διπλωματούχου Μηχανικού Αεροσκαφών Σχολής Ικάρων, 2011

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2014

© 2006 Νικόλαος Τσαντούκλας

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κ Αναστάσιο Σταματέλλο, Νικόλαο Ανδρίτσο, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον διδάκτορα του τμήματος Δημήτριο Τζιουρτζιούμη για τη συνεισφορά του στην εκτέλεση των πειραμάτων και στην πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε στο χειρισμό της Θερμοκάμερας. Ευχαριστώ τον προπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Θοδωρή Δημητριάδη για την πολύτιμη βοήθειά του στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Ευγνωμονώ την οικογένειά μου για την ψυχολογική στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί, αναφέρεται στην πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της ομοιογενούς κι ισότροπης τύρβης με σχεδόν μηδενική μέση ταχύτητα στη μετάδοση θερμότητας γύρω από κυλινδρική θερμαινόμενη αντίσταση. Η εγκατάσταση στην οποία έγιναν τα πειράματα, ήταν ένας ανοιχτός θάλαμος στον οποίον είχαν τοποθετηθεί οχτώ μεγάφωνα, με ακροφύσια στην έξοδο τους, σε σχήμα κύβου και σε γωνία τέτοια ώστε να δείχνουν όλα το κέντρο του. Η συγκεκριμένη διάταξη δημιουργήθηκε στο εργαστήριο στομηχανικής του τμήματος και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη διπλωματική εργασία των Μπαλοδήμου και ΗλίαΜπαλοδήμος,. Η θερμαινόμενη αντίσταση ετοποθετείτο κατά τρόπο ώστε το μέσο της να συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου. Η πρωτοτυπία της εργασίας συνίσταται σε δύο άξονες. Πρώτον, μελετάται η μετάδοση θερμότητας γύρω από κυλινδρικό αγωγό σε τυρβώδη ροή με μέση ταχύτητα σχεδόν μηδενική σε αντίθεση με την εκτεταμένη έως τώρα έρευνα που αφορά τη μελέτη του φαινομένου σε ροές κάθετες στο διαμήκη άξονα του κυλίνδρου κατά πλειοψηφία και σπανιότερα παράλληλες σε αυτόν, και στις δύο περιπτώσεις χαρακτηριζόμενες από ευμέγεθες μέτρο ταχύτητας. Δεύτερον μελετάται και γίνεται σύγκριση για τη συμπεριφορά θερμικού ανωστικού πλουμίου από σημειακή πηγή με και χωρίς την παρουσία εξωτερικής ομογενούς κι ισότροπης τύρβης. Σε πρώτη φάση αναλύονται τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης τυρβώδους ροής μέσω οπτικοποίησης της ροής(flow visualisation) κι επεξεργασίας της εικόνας. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του τυρβώδους πεδίου στην επιφανειακή θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη θερμαινόμενη αντίσταση μέσω θερμογραφίας. Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τη μελέτη του ανωστικού πλουμίου που δημιουργείται στο μέσο του θερμαινόμενου αγωγού (σημειακή πηγή) και την επίδραση της τύρβης σε αυτό. Οι μετρήσεις γίνονται με τη χρήση θερμοστοιχείων. Καθόλο το μήκος του συγγράματος γίνεται εκτεταμένη ανάλυση στα τεχνικά εργαλεία, λογισμικά και μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία προς εξοικείωση των αναγνωστών και των φιλόδοξων συνεχιστών-ερευνητών. Επιπρόσθετα, ένας μεγάλος αριθμός

εικόνων και γραφημάτων παρέχει μια εμπειριστατωμένη άποψη για τη συμπεριφορά των εξεταζομένων φαινομένων κάθε φορά.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	19
2.1 Η τυρβώδης ροή	19
2.1.1 Η φύση της τύρβης	19
2.1.2 Σημείο απαρχής της τύρβης	20
2.2 Δημιουργία ομογενούς και ισότροποπης τύρβης	20
2.2.1 Συνθετικά jet	22
2.2.2 Πειραματικές διατάξεις με τη χρήση ηχείων	24
2.2.2.1 Πείραμα Hwang, Eaton[8]	24
2.2.2.2 Πείραμα Goepfert-Marie-Delphine[9]	25
2.3 Θερμική κάμερα	26
2.3.1 Θερμική ακτινοβολία	26
2.3.2 Αρχή λειτουργίας θερμοκάμερας	29
2.4 Μετάδοση θερμότητας	31
2.4.1 Θερμική αγωγή	31
2.4.2 Συναγωγή	32
2.4.3 Ακτινοβολία	33
2.4.4 Ηλεκτρική κυλινδρική θερμική αντίσταση	33
2.4.5 Εξαναγκασμένη συναγωγή	34
2.4.5.1 Εξαναγκασμένη συναγωγή γύρω από κυλίνδρους	35
2.5 Θερμικό πλούμιο γύρω από θερμαινόμενη σημειακή πηγή	36
2.5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	36
2.5.2 Ανασκόπηση κύριων ερευνών [12]	39
2.5.3 Ταλάντωση του πλουμίου πάνω από οριζόντια σημειακή πηγή	43
2.5.4 Ταχύτητα του πλουμίου πάνω από θερμαινόμενη σημειακή πηγή	46
ΜΕΛΕΤΗ ΚΙ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΠΕΔΙΟΥ	48

3.1	Πειραματική μεθοδολογία	48
3.2	Επεξεργασία της εικόνας κι εξαγωγή των αποτελεσμάτων	51
3.2.1	Επεξεργασία της εικόνας	51
3.3	Ψηφιακή ανάλυση των εικόνων με τη χρήση Matlab	55
3.4	Αποτελέσματα της οπτικοποίησης της ροής	57
3.4.1	Γραφήματα μέσης τιμής της φωτεινότητας για κάθε συχνότητα	57
3.4.2	Γραφήματα τιμής φωτεινότητας για κάθε συχνότητα στο 100 frame	64
3.4.3	Διακύμανη της φωτεινότητας στο γεωμετρικό κέντρο $x=125$, $y=100$ (pixels) για κάθε συχνότητα	71
3.4.4	Υδραυλική ακτίνα	76
3.4.5	Κέντρο Βάρους	77
3.4.6	Χρόνοι μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση (transient times)	79
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ- ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ-ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ		81
4.1	Πειραματική διάταξη	81
4.2	Υπολογιστική μεθοδολογία - διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων	82
4.3	Επεξεργασία με ThermaCAM Researcher Professional 2.8 SR-3	82
4.3.1	Επιλογή σημείων προς μελέτη	86
4.4	Αποτελέσματα μετρήσεων	90
4.4.1	Θερμοκρασιακά εύρη	90
4.4.2	Ρυθμός ψύξης κατά την κατάργηση της ηλεκτρικής ισχύος	95
4.4.3	Χρόνος μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση	99
4.4.4	Εύρεση συναρτησιακής σχέσης κατά τη θέρμανση	102
ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΥΜΙΟΥ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ		104
5.1	Αντίσταση σιδήρου διαμέτρου 6.5 mm	106
5.1.1	Φυσική συναγωγή κι ανωστικό πλούμιο	106
5.1.2	Μελέτη της κυματομορφής του θερμικού πλουμίου	108
5.1.3	Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και συντελεστής αυτοσυσχέτισης	114
5.1.4	Φάσμα θερμοκρασίας (Power spectral density)	131

5.1.5	Οπτικοποίηση της ροής	141
5.1.6	Επίδραση της τύρβης στο θερμικό πλούμιο	143
5.2	Αντίσταση χρωμονικελίνης $d=0.1\text{ mm}$	149
5.2.1	Οπτικοποίηση της ροής	160

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 163

6.1	Συμπεράσματα	163
6.2	Προτάσεις	163

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 165

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 167

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1 Χαρακτηριστικά ισχύος και συχνότητας μεγαφώνων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή τύρβης.....	49
Πίνακας 5-1 Ιδιότητες του αέρα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.....	110

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Πειραματική διάταξη του Birouk (χρήση κυβικού θαλάμου με 8 ανεμιστήρες).....	22
Εικόνα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα πειράματος Glezer i: a) πλάγια όψη β) κάτοψη ii) φωτογραφία του συνθετικού jet για $ReU_0 = 5383$, $f = 1140\text{ Hz}$	24
Εικόνα 2.3 Πειραματική διάταξη Hwang και Eaton[8]	25
Εικόνα 2.4 Πειραματική διάταξη Goepfert-Marie-Delphine[9] με τη χρήση 6 ηχείων.....	26
Εικόνα 2.5 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	27
Εικόνα 2.6 ακτινοβολούμενη θερμορροή ανά μονάδα επιφανείας του μέλανος σώματος σε συνάρτηση του μήκους κύματος για έναν ριθμο θερμοκρασιών[3].....	28

Εικόνα 2.7 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της θερμοκάμερας	30
Εικόνα 2.8 Υπολογισμός αριθμού Nu για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο	36
Εικόνα 2.9 Θεωρητικό μοντέλο διδιάστατου στρωτού πλουμίου Fujii [23]	38
Εικόνα 2.10 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά δεδομένα από την εργασία των Schorr-Gebhart [22]	38
Εικόνα 2.11 α) αδιάστατα εγκάρσια προφίλ της κατακόρυφης συνιστώσας πάνω από σημειακή πηγή β) μεταβλητότητα της ταχύτητας στην κεντρική γραμμή του πλουμίου κατά το ημικπέτασμα της πηγής (Hickman[16])	47
Εικόνα 3.1 Ροικό πεδίο με χρήση ηλεκτρικού καπνογόνου χωρίς την χρήση μεγαφώνων	50
Εικόνα 3.2 Ροικό πεδίο με τη χρήση καπνογόνου υπό την επίδραση συνθετικής ομογενούς κι ισότροπης τύρβης με τη χρήση των μεγαφώνων	50
Εικόνα 3.3 no-power ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	57
Εικόνα 3.4 40 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	58
Εικόνα 3.5 50 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	59
Εικόνα 3.6 60 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	60
Εικόνα 3.7 80 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	61
Εικόνα 3.8 100 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	62
Εικόνα 3.9 120 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	63
Εικόνα 3.10 140 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μέση τιμή των frames	64
Εικόνα 3.11 no-power ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	65

Εικόνα 3.12 40 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	65
Εικόνα 3.13 50 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	66
Εικόνα 3.14 60 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	67
Εικόνα 3.15 80 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	68
Εικόνα 3.16 100 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	69
Εικόνα 3.17 120 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	70
Εικόνα 3.18 140 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame	71
Εικόνα 3.19 no-power ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames	72
Εικόνα 3.20 40 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	73
Εικόνα 3.21 50 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	73
Εικόνα 3.22 60 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	74
Εικόνα 3.23 80 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	74
Εικόνα 3.24 100 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	75
Εικόνα 3.25 120 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	75
Εικόνα 3.26 140 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσεως των frames.....	76
Εικόνα 3.27 Μέση υδραυλική ακτίνα συναρτήσεως της συχνότητας των μεγαφώνων.....	77

Εικόνα 3.28 οριζόντια συνιστώσα x του κέντρου βάρους συναρτήσει της συχνότητας των μεγαφώνων	78
Εικόνα 3.29 κατακόρυφη συνιστώσα y του κέντρου βάρους συναρτήσει της συχνότητας των μεγαφώνων	79
Εικόνα 3.30 Χρόνοι μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση κατά το άνοιγμα και το σβήσιμο των μεγαφώνων συναρτήσει της συχνότητας	80
Εικόνα 4.1 α) αντίσταση $d=6.5\text{ mm}$ β) γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.....	81
Εικόνα 4.2 interface ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR-3	83
Εικόνα 4.3 εισαγωγή IR video στο λογισμικό επεξεργασίας.....	83
Εικόνα 4.4 ρύθμιση των παραμέτρων.....	84
Εικόνα 4.5 α) μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος β)θερμοκρασιακόεύρος με auto adjust scale	86
Εικόνα 4.6 ρύθμιση θερμοκρασιακού εύρους	86
Εικόνα 4.7 ανίχνευση θερμοκρασίας σε μια περιοχή	87
Εικόνα 4.8 ορισμός περιοχών 1x1 pixel κατά μήκος της αντίστασης προς μελέτη.....	88
Εικόνα 4.9 ορισμός της μέσης θερμοκρασίας για κάθε επιλεγμένη περιοχή προς καταγραφή και κατασκευή το αντίστοιχου διαγράμματος	88
Εικόνα 4.10 κατασκευή των διαγραμμάτων για τις συναρτήσεις που επιλέχθηκαν	89
Εικόνα 4.11 αποθήκευση της χρονοσειράς των συναρτήσεων που καταγράφηκαν	89
Εικόνα 4.12 αποθήκευση των ρυθμίσεων για τη συγκεκριμένη επεξεργασία προς μελλοντική χρήση για άλλο IR video.....	90
Εικόνα 4.13 no power ελάχιστη -μέση -μέγιστη αδιάστατη θερμοκρασία για το κέντρο της αντίστασης	91
Εικόνα 4.14 no power-40-60 Hz μέση απόλυτη θερμοκρασία για το κέντρο της αντίστασης.....	92
Εικόνα 4.15 no power-40-60 Hz μέση απόλυτη θερμοκρασία μέση τιμή όλων των σημείων πάνω στην αντίσταση	93
Εικόνα 4.16 no power-40-60 Hz μέγιστη θερμοκρασία στη μόνιμη κατάσταση για κάθε διακριτή θέση πάνω στην αντίσταση.....	94

Εικόνα 4.17 40-60 Hz διαφορά των μέγιστων θερμοκρασιών από την περίπτωση χωρίς τύρβη για κάθε διακριτή θέση πάνω στην αντίσταση.....	95
Εικόνα 4.18 no power-40-60Hz θερμοκρασία σε συνάρτηση με το χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα για το κέντρο της αντίστασης.....	96
Εικόνα 4.19 no power- 40-60 Hz εκθέτης n σε συνάρτηση με τις διακριτές οριζόντιες θέσεις.....	98
Εικόνα 4.20 no power χρονική παράγωγος της θερμοκρασίας για το κέντρο της αντίστασης.....	100
Εικόνα 4.21 no power-40-50 Hz χρονική παράγωγος της θερμοκρασίας ύστερα από την προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης 4ου βαθμού.....	101
Εικόνα 4.22 no power-40-60 Hz χρόνος μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση για κάθε διακριτή θέση πάνω στην αντίσταση	102
Εικόνα 4.23 no power-40-60Hz σταθερά k εκθετικού μοντέλου που περιγράφει τη φάση της θερμομανσης σε συνάρτηση με την οριζόντια θέση	103
Εικόνα 5.1 τοποθέτηση αντίστασης χρωμονικελίνης $d=0.1$ mm και θερμοστοιχείο χρωμίου-αλουμινίου $d=0.5$ mm προσαρμοσμένο στη διάταξη βερνιέρου	105
Εικόνα 5.2 μετατροπέας μmo dtrans TO2 LCD	105
Εικόνα 5.3 Κατανομή θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ύψος $d=6.5$ mm, $P=162$ W	106
Εικόνα 5.4 αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με το ύψος και προσαρμογή αντιστοιχού εκθετικού μοντέλου.....	107
Εικόνα 5.5 $P=73.6, 113,258$ W αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με το ύψος στην κεντρική γραμμή πάνω από την αντίσταση	108
Εικόνα 5.6 $P=73.6, 113,258$ W σχετική μεταβλητότητα των θερμοκρασιών ως συνάρτηση με το ύψος για την κεντρική γραμμή πάνω από την αντίσταση	109
Εικόνα 5.7 $P=73.6, 113,258$ W Πλάτος της κυματομορφής ως συνάρτηση του αριθμού Grashof.....	110
Εικόνα 5.8 $P=73.6, 113,258$ W συχνότητα μεγάλων θερμοκρασιακών κλιμάκων ως συνάρτηση του ύψους για την κεντρική γραμμή πάνω από την αντίσταση.....	111

Εικόνα 5.9 P=162 W αδιάστατη θερμοκρασία ως συνάρτηση του ύψους για διαφορετικές εγκάρσιες αποστάσεις απο την αντίσταση	112
Εικόνα 5.10 P=162 W αδιάστατη θερμοκρασία ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης x για διαφορετικές εγκάρσιες τιμές του ύψους z	113
Εικόνα 5.11 P=162 W σχετική μεταβλητότητα της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης x για διαφορετικές εγκάρσιες τιμές του ύψους z	113
Εικόνα 5.12 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=0	115
Εικόνα 5.13 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=1 mm	116
Εικόνα 5.14 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=2 mm	117
Εικόνα 5.15 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=4 mm	118
Εικόνα 5.16 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=8 mm	119
Εικόνα 5.17 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=15 mm.....	120
Εικόνα 5.18 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=25 mm.....	121
Εικόνα 5.19 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=40 mm.....	122
Εικόνα 5.20 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=60 mm.....	123
Εικόνα 5.21 P=162 W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος z=80 mm.....	124
Εικόνα 5.22 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος z=0	125
Εικόνα 5.23 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος z=1 mm	125
Εικόνα 5.24 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος z=2 mm	126

Εικόνα 5.25 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=4$ mm	127
Εικόνα 5.26 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=8$ mm	128
Εικόνα 5.27 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=15$ mm	128
Εικόνα 5.28 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=25$ mm	129
Εικόνα 5.29 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=40$ mm	129
Εικόνα 5.30 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=60$ mm	130
Εικόνα 5.31 P=162 W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=80$ mm	130
Εικόνα 5.32 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=0$	132
Εικόνα 5.33 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=1$ mm	133
Εικόνα 5.34 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=2$ mm	134
Εικόνα 5.35 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=4$ mm	135
Εικόνα 5.36 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=8$ mm	136
Εικόνα 5.37 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=15$ mm..	137
Εικόνα 5.38 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=25$ mm..	138
Εικόνα 5.39 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=40$ mm..	139
Εικόνα 5.40 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=60$ mm..	140
Εικόνα 5.41 P=162 W power spectral density (psd) για ύψος $z=80$ mm..	141
Εικόνα 5.42 α) πλούμιο χωρίς τύρβη β) 40 Hz γ) 100 Hz δ) 300 Hz	142
Εικόνα 5.43 θερμικό πλούμιο στην αρχή στρωτό και στη συνέχεια ασταθές και τυρβώδες.....	143
Εικόνα 5.44 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την κατακόρυφη απόσταση z για όλες τις περιπτώσεις με ή χωρίς την επίδραση τύρβης μεγαφώνων, κεντρική γραμμή, P=162 W	144
Εικόνα 5.45 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την κατακόρυφη και την οριζόντια αποσταση αντίστοιχα για τύρβη 40 Hz	146

Εικόνα 5.46 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την κατακόρυφη και την οριζόντια απόσταση αντίστοιχα για τύρβη 50 Hz	147
Εικόνα 5.47 40, 50 Hz Ένταση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων ως συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης $U_{mean}=0$ m/s.....	148
Εικόνα 5.48 Ένταση διακυμάνσεων ως συνάρτηση με την εγκάρσια απόσταση x για πλεγματική τύρβη $U_{mean}=4.35$ m/s Stapountzis [13]	148
Εικόνα 5.49 Αντίσταση χρωμονικελίνης $d=0.1$ mm ερυθροπυρωμένη	150
Εικόνα 5.50 Labview interface $z=0$ mm, $x=3$ mm	151
Εικόνα 5.51 Labview interface επιβολή τύρβης 120 Hz	152
Εικόνα 5.52 no power θερμοκρασία σε συνάρτηση με την εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2$ mm	153
Εικόνα 5.53 no power αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2$ mm	154
Εικόνα 5.54 40 Hz αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2$ mm	154
Εικόνα 5.55 120 Hz αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2$ mm	155
Εικόνα 5.56 200 Hz αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2$ mm	155
Εικόνα 5.57 $z=0$ θερμοκρασία σε συνάρτηση με την απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz	156
Εικόνα 5.58 $z=0.5$ mm θερμοκρασία σε συνάρτηση με την απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz.....	157
Εικόνα 5.59 $z=2$ mm θερμοκρασία σε συνάρτηση με την απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz	157
Εικόνα 5.60 Διακυμάνσεις της ταχύτητας στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου δοκιμών όπως μετρήθηκαν στη διπλωματική εργασία του Μπαλοδήμου[21]	158
Εικόνα 5.61 $z=0$ αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz.....	159
Εικόνα 5.62 $z=0.5$ mm αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz.....	159

Εικόνα 5.63 $z=2$ mm αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz.....	160
Εικόνα 5.64 Θερμικό στρωτό πλούμιο για την αντίσταση της χρωμονικελίνης $d=0.1$ mm.....	161
Εικόνα 5.65 α) επιβολή τύρβης 40 Hz β) επιβολή τύρβης 100 Hz.....	161

Εισαγωγή

Οι ελεύθερες δέσμες πλουμίων συναντώνται παντού στη φύση. Οι περισσότερες συχνές μορφές πλουμίων έχουν την εφαρμογή τους στις περιβαλλοντικές επιστήμες. Ηφαιστειογενείς εκρήξεις, έκλυση καυσαερίων από καμινάδες εργοστασίων ή σπιτιών, εκροή λυμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα, υδροφόρες αναβλύσεις στον πυθμένα των θαλασσών, υπόγειες εκλύσεις αερίων από το εσωτερικό της γης ουσιαστικά χαρακτηρίζονται από τον όρο θερμικά ανωστικά πλούμια. Ο όρος αυτός συνοδεύεται από το μηχανισμό της φυσικής συναγωγής που τον διέπει κι αναφέρεται στην ανωστική κίνηση θερμής μάζας ρευστού προς περιοχές με μικρότερη πυκνότητα. Η μελέτη των πλουμίων παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω των προβλέψεων που μπορούν να γίνουν κι αφορούν μετεωρολογικά φαινόμενα και περιβαλλοντικά ζητήματα όπως η διασπορά ρύπων στο περιβάλλον. Αξίζει να αναφερθεί δε ότι παρουσία θερμικών πλουμίων μπορεί να αναζητηθεί και σε οποιαδήποτε περίπτωση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού εμφανίζει μεγάλες θερμοκρασιακές χωρικές μεταβολές μεταξύ των εξαρτημάτων του.

Κάθε πλούμιο παρουσιάζεται ως στρωτό αρχικά και στη συνέχεια η αυξημένη ορμή του το οδηγεί στην αστάθεια και στην τυρβώδη συμπεριφορά (αύξηση του αριθμού **Reynolds**). Για την περίπτωση της φυσικής συναγωγής υιοθετούνται δυο αντιπροσωπευτικότεροι αδιάστατοι αριθμοί, οι **Grashof** και **Rayleigh**. Η τυρβώδης ροή έχει σημαίνουσα σημασία στα φαινόμενα μεταφορά θερμότητας και μάζας που εξετάζουμε διότι εμφανίζει αυξημένες δυνατότητες διασποράς κι αναμειξιμότητας. Ένα άλλο κρίσιμο γνώρισμα που έχει ως σκοπό να προσομοιώσει η συγκεκριμένη εργασία είναι η αλληλεπίδραση του πλουμίου με το εξωτερικό του περιβάλλον, στρωτό η τυρβώδες. Αναφέρεται ως παράδειγμα το γεγονός ότι τα πλούμια των εργοστασίων εξαγονται στο τυρβώδες ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

Η χρήση ηλεκτρικά θερμαινόμενων σημειακών πηγών για τη δημιουργία ανωστικών πλουμίων γύρω από αυτές έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα από την επιστημονική κοινότητα για την πειραματική διερεύνηση του φαινομένου. Η κυριότερη έρευνα έχει έως τώρα εστιαστεί στην μελέτη του μηχανισμού της

φυσικής συναγωγής σε ελεύθερα ανωστικά πλούμια. Η δημιουργία κι επίδραση ομογενούς κι ισότροπης τύρβης με σχεδόν μηδενική ταχύτητα στο πλούμιο αποτελεί μια καινοτόμα πορεία. Η σύνδεση δε του θερμικού πεδίου που αναπτύσσεται γύρω από την πηγή με την επίδραση του τυρβώδους πεδίου στην επιφανειακή θερμοκρασία της πηγής αποτελεί κρίσιμο συστατικό. Μια τέτοια μελέτη δύναται ταυτόχρονα να επεκταθεί και στη μεταβατική συμπεριφορά που αναπτύσσει ένα μηχανολογικό στοιχείο υπό την επίδραση μεταβαλλόμενης ροής γύρω από αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, πρόοδος δύναται να συντελεσθεί στην ανάπτυξη μεθόδων θερμικών κατεργασιών και στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά στοιχείων που υπόκεινται σε θερμική κόπωση κι ερπυσμό υπό χρονικά μεταβαλλόμενα τυρβώδη θερμικά πεδία.

Η δημιουργία της ομογενούς κι ισότροπης τύρβης αφήνει πίσω της τη χρήση πλεγμάτων και παράγεται πλέον με τη χρήση συνθετικών jets, όπως είναι η χρήση μεγαφώνων σε κυβικό θάλαμο που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα πειραματική διατριβή. Παράλληλα, η αξιοπιστία των διμεταλλικών θερμοστοιχείων για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του πλουμίου έρχεται να συμπληρωθεί από τη χρήση της θερμοκάμερας, η οποία εκμεταλλεύεται την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία της πηγής και προσφέρει ένα χρονικά οικονομικότερο μέσο για την απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου της μεταλλικής επιφάνειας.

Η σύνδεση των χαρακτηριστικών του τυρβώδους πεδίου με το αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο συνιστούν κρίσιμο παράγοντα της μελέτης. Πέραν των μετρήσεων που πραγματοποιούνται ένα χρήσιμο εργαλείο αποτελεί η οπτικοποίηση του πεδίου κι εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω επεξεργασίας της εικόνας.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Η τυρβώδης ροή

Οι περισσότερες ροές στην φύση είναι τυρβώδεις. Παραδείγματα αποτελούν το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, υποθαλάσσια ρεύματα (gulf stream), το οριακό στρώμα στις πτέρυγες αεροσκάφους, τα απορεύματα πλοίων, αυτοκινήτων κι αεροσκαφών. Η μίξη κι η καύση βασίζονται στην τύρβη. Η στρωτή ροή αποτελεί εξαίρεση (π.χ. η ροή λιπαντικού γύρω από έναν τριβέα). Εκφάνσεις της τύρβης συνιστούν η αύξηση των διακυμάνσεων της πίεσης (θόρυβος), η αύξηση της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας λόγω της φθοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και μετατροπής της σε θερμότητα, κι η αύξηση της ικανότητας ανάμειξης και μεταφοράς της ορμής και της μάζας.

2.1.1 Η φύση της τύρβης

Ακριβής ορισμός για την τύρβη δεν υπάρχει. Από την άλλη πλευρά όμως είναι δυνατό να αποδόσουμε τα χαρακτηριστικά της.

Τυχαιότητα: Δεν καθίσταται εφικτό να μελετηθεί η τύρβη με τη φιλοσοφία αιτίου-αποτελέσματος(ντετερμινιστικά), αλλά βασιζόμαστε σε στατιστικές (στοχαστικές μεθόδους).

Διαχυτότητα: Παρέχει υψηλούς ρυθμούς διάχυσης της ορμής, της θερμότητας και της μάζας, συνήθως χρήσιμα χαρακτηριστικά στις εφαρμογές μας.

Υψηλοί αριθμοί Reynolds: Σημείο εκκίνησης της τύρβης είναι συνήθως μια αποσταθεροποίηση σε υψηλό αριθμό Re. Η τυχαιότητα κι ο μη γραμμικός χαρακτήρας των εξισώσεων Navier-Stokes καλύπτονται από υποανάπτυκτο ακόμη μαθηματικό υπόβαθρο, ώστε να υποστηριχθεί μια ακριβής λύση του προβλήματός μας

Vorticity fluctuation (three dimensional): Οι στρόβιλοι που δημιουργούνται διακυμαίνονται συνεχώς κι αλληλεπιδρούν στις τρεις διαστάσεις.

Dissipation (φθορά): Η τύρβη χάνεται λόγω της εσωτερικής τριβής (ιξώδους) και σιγά σιγά η κινητική της ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική.

Συνέχεια: Μεταχειριζόμαστε την τύρβη προσεγγίζοντας την ρευστομηχανικά κι όχι μοριακά. Η τυρβώδης ροή είναι ροή. Μελετώνται τα χαρακτηριστικά της σαν συνολική κίνηση (σχήμα στο χώρο) κι όχι ως συγκεκριμένο ρευστό. Για αυτό το λόγο οι θεωρητικοί ομαδοποιούν τις τυρβώδεις ροές κι όχι τα ρευστά.

2.1.2 Σημείο απαρχής της τύρβης

Εμφανίζεται σε μεγάλα Re όταν υπάρξει αστάθεια. Ως παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή στο εσωτερικό ενός αγωγού σε $Re = U \cdot D / \nu = 2000$ και για ένα οριακό στρώμα για $Re = U \cdot \delta / \nu = 600$, (δ : displacement thickness)

Για να διατηρείται η τύρβη χρειαζόμαστε μια πηγή ενέργειας όπως είναι ο μηχανισμός της άνωσης στη φυσική συναγωγή που αποτελεί την αιτία της δημιουργίας του ατμοσφαιρικού τυρβώδους οριακού στρώματος ή η διάτμηση της ροής. Η τύρβη δε, μπορεί να αντισταθμιστεί με διάφορους τρόπους όπως είναι η εφαρμογή μαγνητικών πεδίων αντίρροπων στις δυνάμεις που την παράγουν ή μέσω θερμοκρασιακής αναστροφής για την φυσική συναγωγή.

2.2 Δημιουργία ομογενούς και ισότροπης τύρβης

Οι περισσότερες τυρβώδεις ροές στη φύση είναι πολύ περίπλοκες. Κατα συνέπεια είναι επιθυμητό να εξετάσουμε απλές τυρβώδεις ροές για την ανάπτυξη στατιστικών θεωριών της τύρβης. Η πιο ιδανική μορφή τύρβης είναι η ομογενής κι ισότροπη τύρβη. Με τον όρο ομογενή εννοείται ότι οι ιδιότητές της και χαρακτηριστικότερα το μέτρο των ταχυτήτων, στατιστικά παραμένει

σταθερό στον τρισδιάστατο χώρο. Με τον όρο ισότροπη εννοείται ότι οι συνιστώσες της ταχύτητας προς τις τρεις διευθύνσεις έχουν παρόμοιο μέτρο.

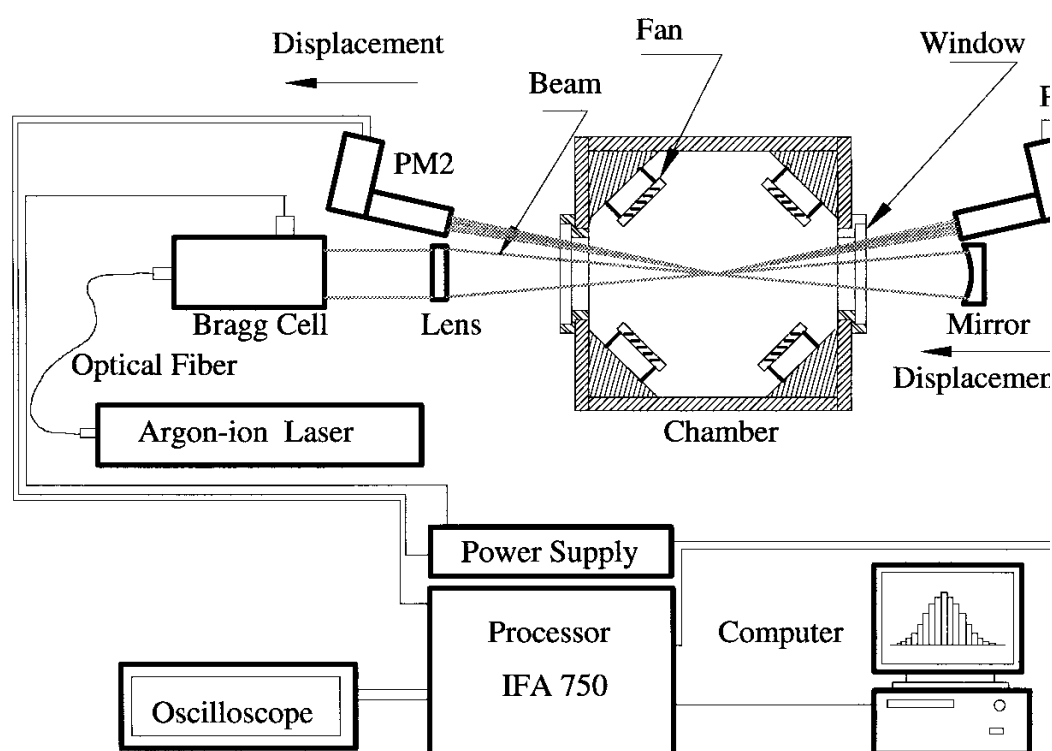
Με την ταχεία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, αριθμητικές προσομοιώσεις της ομογενούς και ισότροπης τύρβης, έχουν γίνει δημοφιλείς μέθοδοι έρευνας. Παρά τις αυξημένες όμως πηγές υπολογιστικής ισχύος, ο αριθμός των χρονικών βημάτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι ακόμη περιορισμένος. Συνεπώς, οι πειραματικές μέθοδοι προσέγγισης παραμένουν ακόμη δημοφιλείς.

Η κύρια προσέγγιση δημιουργίας ισότροπης τύρβης είναι η χρήση πλέγματος σε αεροσήραγγα που παράγει σχεδόν ισότροπη τύρβη με ένταση που χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα της ελεύθερης ροής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος. Παρά την επιτυχία της σε συγκεκριμένες εφαρμογές, η συμβατική τύρβη πλέγματος εμφανίζει συγκεκριμένους περιορισμούς που είναι δύσκολο να ξεπεραστούν. Πρώτον, είναι δύσκολο να επιτευχθούν πολύ υψηλοί αριθμοί **Reynolds**, διότι η ταχύτητα δεν μπορεί να αυξηθεί επ' άπειρω. Δεύτερον, ακόμη κι αν επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες, οι εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησής της δεν επαρκούν.

Ενώ με τη χρήση πλέγματος επιτυγχάνεται η ομογενής κι ισότροπη τύρβη σε συγκεκριμένη απόσταση από το πλέγμα, παρολαυτά διακρίνεται από μια κυρίαρχη αξονική συνιστώσα της ταχύτητας. Έχουν γίνει διάφορες πειραματικές προσπάθειες στο χώρο της μηχανικής ρευστών και της κάυσης για τη δημιουργία ομογενούς κι ισότροπης τύρβης με μηδενική ταχύτητα σε μια οριοθετημένη συσκευή. Η πιο συνήθης προσέγγιση υπήρξε η χρήση ενός ταλαντευόμενου πλέγματος σε μια δεξαμενή νερού ή αέρα. Η χωρική φθορά της τύρβης μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση ενός ακόμη αντίστοιχου πλέγματος, δημιουργώντας έτσι ομογενή τύρβη ανάμεσα. Μια βελτιωμένη πρόταση αποτέλεσε η χρήση 4 περιστρεφόμενων πλεγμάτων σε μια δεξαμενή νερού, δημιουργώντας έτσι σχετικά ομογενή τύρβη στο κέντρο με όχι μηδενικές όμως έτσι μέσες ταχύτητες. Αδυναμία των πλεγμάτων εν γένει είναι η ανισοτροπία που παρατηρείται στη δημιουργούμενη τύρβη.

Μια εναλλακτική πρόταση για την δημιουργία για εμάς τυρβώδους πεδίου είναι η χρήση ενός κλειστού δοχείου αέρα, ο οποίος αναδεύεται από ανεμιστήρες. Πρωτοπόρος υπήρξε ο **Semenov**, ο οποίος τοποθέτησε

ανεμιστήρες σε διαστήματα 90° στην περιφέρεια ενός σφαιρικού θαλάμου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται δημιουργία τύρβης με μέση ταχύτητα αρκετά μικρή σε σχέση με τις αρχικές διακυμάνσεις σε δισδιάστατο όμως επίπεδο. Η γεωμετρική συμμετρία επιτυγχάνεται στις τρεις κατευθύνσεις με την τοποθέτηση **8 ανεμιστήρων** στις κορυφές ενός κυβικού θαλάμου. Εφαρμοστής μιας τέτοιας διάταξης υπήρξε ο **Birouk**[7] κι οι συνεργάτες του με σκοπό τη δημιουργία ισότροπης τύρβης σε χαμηλούς αριθμούς **Reynolds**. Στόχος τους ήταν η μελέτη της εξάτμισης υγρών σταγονιδίων υπό την επιδραση του αυτού πεδίου.



Εικόνα 2.1 Πειραματική διάταξη του Birouk (χρήση κυβικού θαλάμου με 8 ανεμιστήρες)

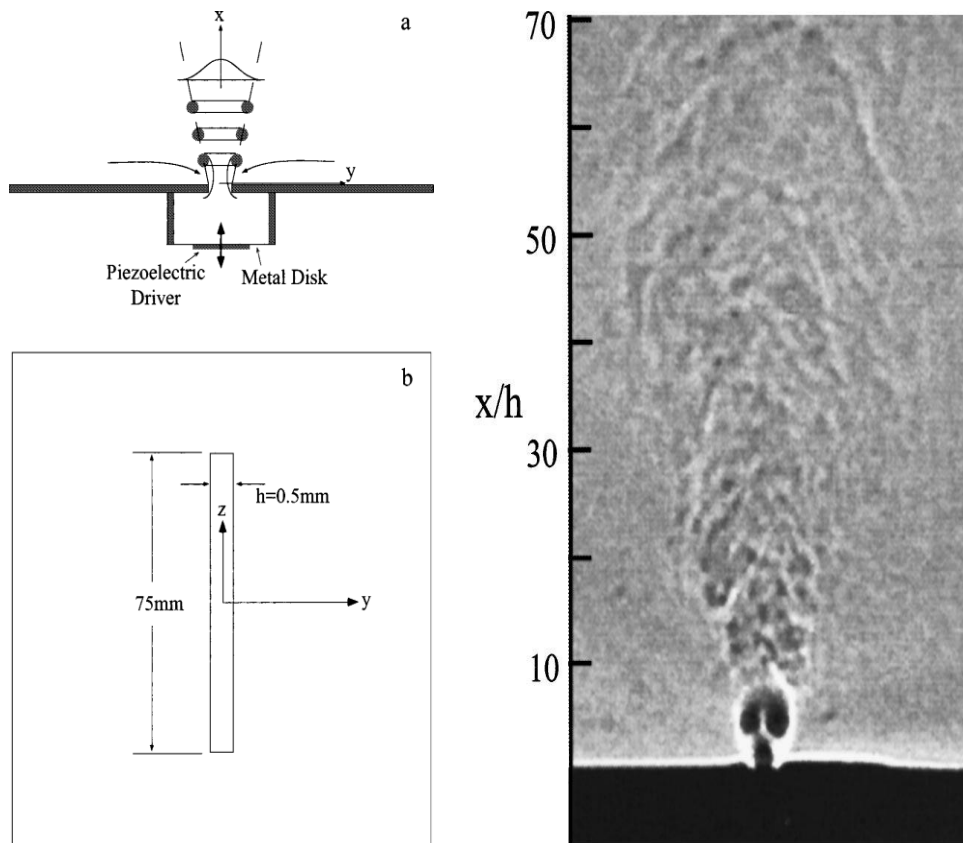
Εναλλακτική πρόταση στους ανεμιστήρες αποτελεί η χρήση ηχείων που λειτουργούν ως παραγωγοί **συνθετικών jet**. Σε αυτό το σημείο πριν επεκταθούμε πιο συγκεκριμένα στις διατάξεις με ηχεία, κρίνεται χρήσιμο για τον αναγνώστη να γίνει μια σύντομη αναφορά στην έννοια του συνθετικού jet.

2.2.1 Συνθετικά jet

Χαρακτηριστικό των συνθετικών jet είναι ότι δημιουργούνται από το εργαζόμενο ρευστό του συστήματος ροής, στο οποίο αναπτύσσονται, μεταφέροντας έτσι ορμή στο ροϊκό πεδίο, δίχως καθαρή έγχυση μάζας στα όρια του συστήματος.

Είναι γνωστό εδώ και καιρό ότι η ροή κίνησης σε ένα ρευστό μπορεί να προκληθεί δίχως προσθήκη μάζας με την εκπομπή ήχου (συχνά αναφερόμενη κι ως ακουστική ροή) ή ταλαντεύοντας τα όρια ενός ήρεμου μέσου. Ακουστικά ροϊκά αποτελέσματα επάγονται από την απόσβεση του ήχου και την καταστροφή της ακουστικής ενέργειας. Σε αυτή τη φιλοσοφία βασίζεται και το δημιουργηθέν τυρβώδες πεδίο της εκπονηθείσας εργασίας.

Οι ροϊκές κινήσεις προκαλούμενες από ταλαντώσεις στερεών ορίων έχουν γίνει το αντικείμενο πληθώρας μελετών κι ιδίως οι αρμονικές ταλαντώσεις ενός κυλίνδρου κάθετα στον άξονά του. Παράδειγμα μιας τέτοιας διάταξη είναι η δημιουργία ενός jet, με σκοπό τη μελέτη ενός δισδιάστατου πεδίου σε μια επίπεδη πλάκα που περικλείει μια τελείως στεγανοποιημένη κοιλότητα. Ο βυθός της μετακινείται περιοδικά δημιουργώντας κίνηση. Στις ακμές της κοιλότητας, οι στρόβιλοι που δημιουργούνται αποκολλώνται κι απομακρύνονται. Κατά την κάθοδο, πραγματοποιείται αναπλήρωση του αέρα από τη ελεύθερη ροή. Με τον τρόπο αυτό, δίχως παροχή μάζας ο υδροδυναμικός παλμός κι η μάζα κάθε στροβίλου είναι μη μηδενικά επάγοντας μεταφορά ορμής. Μια τέτοια διάταξη χρησιμοποιήθηκε από τους (Barton L. Smith και Ari Glezer)[10] κι απεικονίσεις δίνονται ευθύς αμέσως:



Εικόνα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα πειράματος Glezer i: α) πλάγια όψη β) κάτοψη ii) φωτογραφία του συνθετικού jet για $ReU_o = 5383$, $f = 1140$ Hz

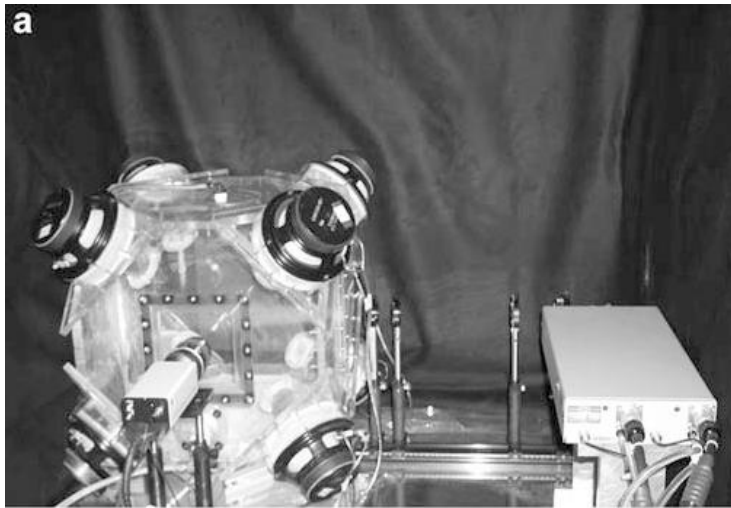
2.2.2 Πειραματικές διατάξεις με τη χρήση ηχείων

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση των ηχείων ως παραγωγών συνθετικών jet, αποτέλεσε εξέλιξη της χρήσεως των ανεμιστήρων. Μια τέτοια διάταξη, κάνει τη συσκευή μας πιο εύρωστη και χωρίς την παρουσία κινούμενων μηχανικών μερών. Τα επίπεδα της τύρβης προσαρμόζονται με την τάση του ενισχυτή. Σταθερή τύρβη δύναται να μελετηθεί με συνεχή λειτουργία των ηχείων και μεταβατική με σβήσιμό τους, κάνοντας έτσι την υπόθεση του Taylor μη χρειαζόμενη.

2.2.2.1 Πείραμα Hwang, Eaton[8]

Οι Hwang και Eaton[8] επέτυχαν τη δημιουργία ομογενούς κι ισότροπης τύρβης με πολύ μικρή μέση ταχύτητα ($<10\%$ των διακυμάνσεων) χρησιμοποιώντας particle image velocimetry για τις μετρήσεις τους. Ο θάλαμος

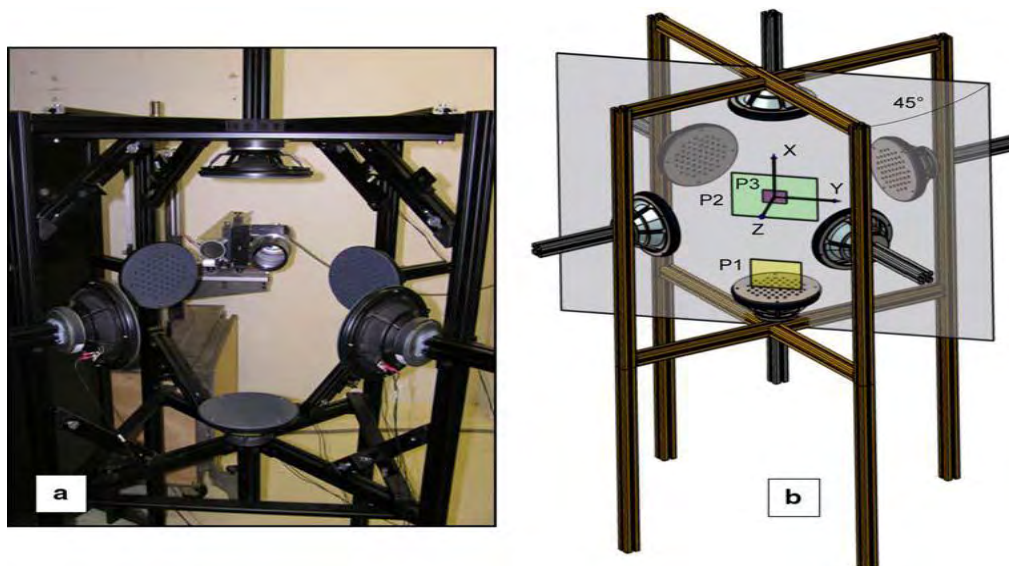
της τύρβης ήταν κυβικός **410x410 mm** κατασκευασμένος από plexiglass με **8 woofers** στις γωνίες. Οι μεμβράνες των ηχείων πιέζουν τον αέρα έξω από το χωνί μέσω μιας οπής, δημιουργώντας 8 συνθετικά jets που οδηγούν σε πολύ ισχυρή τύρβη στο κέντρο του θαλάμου. Μεταβλητές για το πείραμα υπήρξαν το πλάτος και η συχνότητα των ηχητικών σημάτων των ηχείων.



Εικόνα 2.3 Πειραματική διάταξη Hwang και Eaton[8]

2.2.2.2 Πείραμα Goepfert-Marie-Delphine[9]

Επεξέτειναν την ιδέα των Hwang, Eaton αυτή τη φορά όμως σε ένα ανοικτό χώρο. Στόχος η συμπερίληψη της κάθετης συνιστώσας της βαρύτητας κι η διευκόλυνση εισαγωγής σταγονιδίων. Επιλέχθηκε δε η τοποθέτηση **6 ηχείων** ένα σε κάθε πλευρά του κύβου αντί στις 8 κορυφές.



Εικόνα 2.4 Πειραματική διάταξη Goepfert-Marie-Delphine[9] με τη χρήση 6 ηχείων

2.3 Θερμική κάμερα

Η θερμική κάμερα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των σωμάτων. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην θερμική ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα.

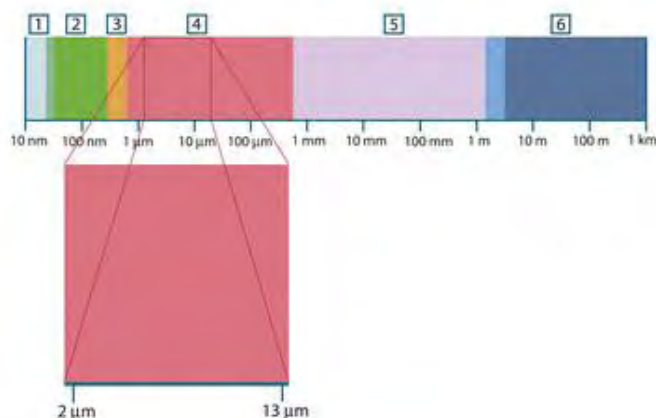
2.3.1 Θερμική ακτινοβολία

Ακτινοβολία λέγεται η μετάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ή τη συχνότητά τους, όπου η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος.

$$c = \lambda \cdot f, \quad 2-1$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός, λ το μήκος κύματος και f η συχνότητα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται τυχαία σε έναν αριθμό περιοχών μήκους κύματος που λέγονται μπάντες και διαχωρίζονται από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να παράξουν και να ανιχνεύσουν την ακτινοβολία. Δεν

υπάρχει ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στην ακτινοβολία στις διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όλες καθορίζονται από τους ίδιους νόμους κι οι μόνες διαφορές είναι οι διαφορές στα μήκη κύματος.



The electromagnetic spectrum. 1: X-ray; 2: UV; 3: Visible; 4: IR; 5: Microwaves; 6: Radiowaves.

Εικόνα 2.5 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η **θερμογραφία**[18] κάνει χρήση της υπέρυθρης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ακτινοβολία στην περιοχή αυτή που αφορά μήκη κύματος **0.1** έως **100 μm** όταν πέσει πάνω σε ένα σώμα, το θερμαίνει και για αυτό λέγεται θερμική ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, επειδή η ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος από **0.38** έως **0.76 μm** ερεθίζει το οπτικό νεύρο, μπορούμε να δούμε τη θερμική ακτινοβολία σε αυτή τη ζώνη σαν φως. Επιπρόσθετα όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία.

Όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω σε ένα σώμα, ένα κλάσμα (**α**) απορροφάται, ένα άλλο κλάσμα (**ρ**) ανακλάται, και το υπόλοιπο (**τ**) μεταδίδεται μέσα στο σώμα:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad 2-2$$

Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του **1 mm**. Για αυτά τα αδιαφανή υλικά ισχύει :

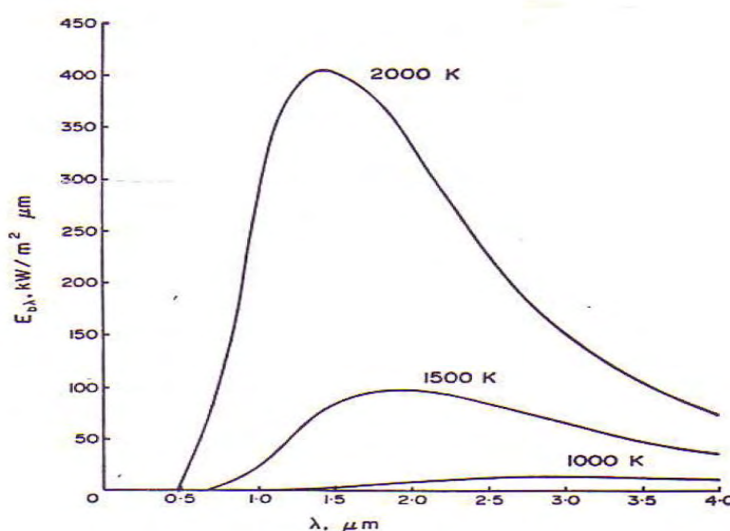
$$\alpha + \rho = 1 \quad 2-3$$

Ονομάζουμε μέλαν σώμα εκείνο το οποίο εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην απόλυτη θερμοκρασία του, ενώ

αντίστοιχα απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του. Ο ρυθμός που ακτινοβολεί ενέργεια ένα μέλαν σώμα, είναι ανάλογος της 4ης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του:

$$E_{b\lambda} = \sigma T^4, \quad 2-4$$

όπου $E_{b\lambda}$ η θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας, σ η σταθερά Boltzman: $5,67 \cdot (T/1000)^4 \text{ kW/m}^2\text{K}^4$ και T η απόλυτη θερμοκρασία. Στο σχήμα δίνεται η κατανομή στο φάσμα της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος.



Εικόνα 2.6 ακτινοβολούμενη θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας του μέλανος σώματος σε συνάρτηση του μήκους κύματος για έναν ριθμο θερμοκρασιών[3]

Εάν η θερμοκρασία του σώματος δεν ξεπερνά τους 500° C, τα ποσοστό της ακτινοβολίας που βρίσκεται στην ορατή περιοχή, είναι πρακτικά αμελητέο. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, αρχίζει να ακτινοβολεί το σώμα στο σκοτάδι, στην αρχή σε σκοτεινό κόκκινο χρώμα (700°C), στη συνέχεια σε βυσσινί (900°C), μετά πορτοκαλί (1100°C), και τέλος λευκό (1400°C και άνω, όπου η εκπεμπόμενη ενέργεια καλύπτει όλο το ορατό φάσμα).

Ο συντελεστής εκπομπής μιας πραγματικής πραγματικής επιφάνειας, ορίζεται σαν το πηλίκο της εκπεμπόμενης θερμορροής προς αυτήν που θα εξέπεμπε μιά αντίστοιχη μαύρη επιφάνεια στην ίδια θερμοκρασία και για συγκεκριμένη γωνία εκπομπής φ .

$$\varepsilon = \varepsilon(\lambda, \varphi, T) \quad 2-5$$

$$E_{b\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma T^4 \quad 2-6$$

Για συγκεκριμένο μήκος κύματος κάνουμε λόγο για τον μονοχρωματικό συντελεστή εκπομπής ε_λ . Ο νόμος του **Kirchoff** διατυπώνεται ως εξής:

Ο μονοχρωματικός συντελεστής εκπομπής μιάς επιφάνειας είναι ίσος με το μονοχρωματικό συντελεστή απορρόφησης, ανεξαρτήτως της διαφοράς θερμοκρασιών που αντιστοιχούν στην εκπεμπόμενη (T1) και στην προσπίπτουσα (T2) ακτινοβολία.

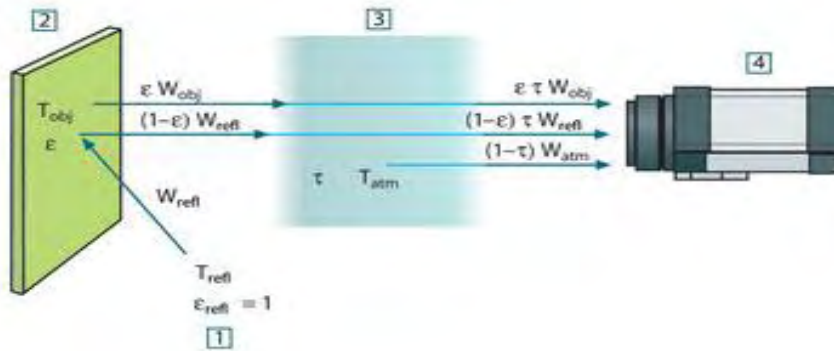
$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad 2-7$$

Με βάση τις παραπάνω θεωρητικές γνώσεις για τη φύση της θερμικής ακτινοβολίας μπορούμε να προχωρήσουμε σε μια σύντομη περιγραφή της αρχής λειτουργίας της θερμοκάμερας.

2.3.2 Αρχή λειτουργίας θερμοκάμερας

Η κάμερα λαμβάνει την ακτινοβολία όχι μόνο από το αντικείμενο που μας ενδιαφέρει. Συλλέγει επίσης την ακτινοβολία από το περιβάλλον μέσω της ανάκλασης από το αντικείμενο. Οι συνεισφορές αυτές της ακτινοβολίας μπορούν να εξασθενήσουν ως ένα βαθμό από την ατμόσφαιρα. Σε αυτό το σημείο όμως έρχεται να προστεθεί μια ακόμη συνεισφορά ακτινοβολίας, αυτή της ατμόσφαιρας.

Η περιγραφή που θα ακολουθήσει, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, είναι μια αρκετά καλή περιγραφή πραγματικών συνθηκών. Αυτά που αγνοούνται είναι για παράδειγμα η διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας και σκόρπιες ακτινοβολίες έξω από το πεδίο θέασης. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να κάνουμε τις μετρήσεις μας, εξασφαλίζοντας χαμηλή στάθμη φωτισμού. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει βασίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 2.7 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της θερμοκάμερας

Ας θεωρήσουμε ότι η λαμβάνουσα θερμική ακτινοβολία \mathbf{W} από ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας T_{source} σε μια κοντινή απόσταση παράγει μια ισχύ εξόδου U_{source} που είναι ανάλογη της ισχύς εισόδου.

$$U_{\text{source}} = C \cdot W_{\text{source}}, \quad 2-8$$

με C μια σταθερά.

Η αντίστοιχη θερμική ακτινοβολία ενός σώματος θα είναι τότε $\epsilon \cdot \mathbf{W}_{\text{source}}$.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να συγκεντρώσουμε τους τρεις όρους της συλλεγόμενης ακτινοβολίας.

- Εκπομπή από το αντικείμενο $= \epsilon \cdot \tau \cdot \mathbf{W}_{\text{object}}$, όπου ϵ ο συντελεστής εκπομπής, τ ο συντελεστής διάδοσης της ατμόσφαιρας και T_{object} η θερμοκρασία του αντικειμένου.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία από εξωτερικές πηγές $= (1-\epsilon) \cdot \mathbf{W}_{\text{refl}}$, όπου $(1-\epsilon)$ ο συντελεστής ανάκλασης του αντικειμένου. Οι εξωτερικές πηγές έχουν θερμοκρασία T_{refl} .
- Εκπομπή από τη ατμόσφαιρα $= (1-\tau) \cdot \tau \cdot \mathbf{W}_{\text{atm}}$, όπου $(1-\tau)$ ο συντελεστής εκπομπής της ατμόσφαιρας και T_{atm} η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Κατά συνέπεια η συνολική λαμβανόμενη ακτινοβολία μπορεί να γραφεί:

$$U_{\text{tot}} = \epsilon \cdot \tau \cdot U_{\text{obj}} + (1-\epsilon) \cdot \tau \cdot U_{\text{refl}} + (1-\tau) \cdot U_{\text{atm}} \leftrightarrow$$

$$U_{\text{obj}} = \frac{1}{\epsilon \cdot \tau} \cdot U_{\text{tot}} - \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot U_{\text{refl}} - \frac{1-\tau}{\epsilon \cdot \tau} \cdot U_{\text{atm}}, \quad \text{όπου} \quad 2-9$$

U_{obj} : η υπολογιζόμενη ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας T_{obj} , η οποία μπορεί να μετατραπεί απευθείας στη ζητούμενη θερμοκρασία του αντικειμένου.

- U_{tot} : η πραγματική μετρούμενη από τη θερμοκάμερα ισχύς εξόδου
- U_{refl} : η θεωρητική ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T_{refl} σύμφωνα με τη διακρίβωση
- U_{atm} : η θεωρητική ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T_{atm} σύμφωνα με τη διακρίβωση

Συνοψίζοντας, τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης για τον υπολογισμό είναι:

- ❖ ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου ε
- ❖ η σχετική υγρασία
- ❖ η ατμοσφαιρική θερμοκρασία
- ❖ η απόσταση του αντικειμένου
- ❖ η θερμοκρασία των αντικειμένων στο άμεσο περιβάλλον

2.4 Μετάδοση θερμότητας

Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με τρεις τρόπους: αγωγή (**conduction**), συναγωγή (**convection**) κι ακτινοβολία (**radiation**). Οι τρεις παραπάνω τρόποι απαιτούν την ύπαρξη κάποιας θερμοκρασιακής διαφοράς κι έχουν την κατεύθυνση από το μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας προς εκείνο με τη χαμηλότερη.

2.4.1 Θερμική αγωγή

Η θερμική αγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας από τα περισσότερα ενεργητικά σωματίδια μιας ουσίας στα γειτονικά, λιγότερο ενεργητικά, ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων. Η ουσιώδης εξίσωση που περιγράφει τη θερμική αγωγή βρίσκει τα ίχνη της στο έργο του **J**.

Fourier στις αρχές του 19ου αιώνα. Σύμφωνα με το νόμο του Fourier η θερμοροή q (ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας) δίνεται από:

$$q = -k \nabla T, \quad 2-10$$

όπου k είναι η θερμική αγωγιμότητα. Η χρήση ενός μονόμετρου μεγέθους k φανερώνει ότι δεν υπάρχει προτιμώμενη κατεύθυνση για τη θερμική αγωγή, δηλαδή η θερμική ροή είναι παράλληλη με τη διαφορά θερμοκρασίας. Υλικά για τα οποία ισχύει το γεγονός αυτό, περιλαμβάνουν πολλά στερεά και τα περισσότερα ρευστά ονομάζονται ισότροπα. Σε διαφορετική περίπτωση όπως λόγου χάρη σύνθετα ινώδη υλικά και το ξύλο, χαρακτηρίζονται από θερμική αγωγιμότητα που παίρνει τη μορφή τένσορα. Στην περίπτωση μονοδιάστατης θερμικής αγωγής στην x κατεύθυνση η ροή θερμότητας παίρνει τη μορφή:

$$Q = -k \cdot A \frac{dT}{dx}, \quad 2-11$$

όπου A η επιφάνεια.

2.4.2 Συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς ενέργειας μεταξύ μιας επιφάνειας ενός στερεού και του γειτονικού σε αυτή υγρού ή αερίου, το οποίο βρίσκεται σε κίνηση, και εμπλέκει τη συνδυασμένη δράση της θερμικής αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής. Απουσία οποιασδήποτε κίνησης, η μεταφορά θερμότητας επιτελείται μέσω αμιγούς αγωγής.

Η συναγωγή αποκαλείται εξαναγκασμένη συναγωγή (**forced convection**), εάν το ρευστό υποχρεώνεται να ρεύσει εντός σωλήνα, ή πάνω από την επιφάνεια μέσω χρήσης κάποιας εξωτερικής διάταξης ή ενός ευρύτερου αερίου ρεύματος. Σε αντίθεση με αυτό, συναγωγή αποκαλείται ελεύθερη συναγωγή (**free convection**), ή φυσική συναγωγή (**natural convection**), εάν η κίνηση του ρευστού προκαλείται από δυνάμεις που αφείλονται στη διαφορά πυκνότητας λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο ρευστό. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας Q_{conv} καθορίζεται από το νόμο ψύξης του **Newton**, ο οποίος εκφράζεται ως:

$$Q = h \cdot A(T_{\text{επιφ}} - T_{\text{όγκου}}), \quad 2-12$$

όπου **h** είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής (**convection heat transfer coefficient**) και όγκο (**bulk**) ονομάζουμε τον όγκο του ρευστού μακριά από την επιφάνεια του στερεού.

2.4.3 Ακτινοβολία

Ακτινοβολία (**radiation**) είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από την ύλη με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτεί κάποιο παερμβαλλόμενο μέσο. Κάθε σώμα σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Παρότι η ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο, συνήθως θεωρείται επιφανειακό φαινόμενο, για στερεά τα οποία είναι αδιαφανή στη θερμική ακτινοβολία, όπως είναι π.χ τα μέταλλά, το ξύλο και τα πετρώματα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πραγματική επιφάνεια γράφεται ως:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma A T_{\text{επιφ}}^4, \quad 2-13$$

όπου ε ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας. Για μια επιφάνεια μικρού σχετικά εμβαδού **A**, η οποία περιβάλλεται από το περιβάλλον σε θερμοκρασία **T_{περιβ}**, ο συνολικός ρυθμός μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας καθορίζεται από τη σχέση:

$$Q_{\text{ακτιν}} = \varepsilon \cdot \sigma A (T_{\text{επιφ}}^4 - T_{\text{περιβ}}^4) \quad 2-14$$

2.4.4 Ηλεκτρική κυλινδρική θερμική αντίσταση

Σε αυτό το σημείο θα παρατεθεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το θερμικό ισοζύγιο για μια ηλεκτρικά θερμαινόμενη αντίσταση με ρυθμό H_v [**W/m³**]. Θεωρείται ότι το περιβάλλον είναι ο εξωτερικός ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας. Επιπλέον θεωρείται ότι λόγω του γεγονότος ότι το υλικό θεωρείται ομογενές και τα άκρα του είναι αδιαβατικά μονωμένα, το φαινόμενο είναι μονοδιάστατο. Το ισοζύγιο ενέργειας σε κυλινδρικές συντεταγμένες γράφεται:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{H_v}{k}, \quad 2-15$$

με οριακές συνθήκες:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{h}{k}(T - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma(T^4 - T^\infty), \quad r=R \quad 2-16$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r=0 \quad 2-17$$

κι αρχική συνθήκη:

$$T=0, \quad t=0$$

Η παραπάνω ομάδα εξισώσεων μπορεί να απλοποιηθεί για συγκεκριμένες περιπτώσεις και να μας δώσει λύσεις:

Η μόνιμη κατάσταση (**steady state**) παρουσιάζει ενδιαφέρον.

Αρχικά εάν αγνοηθεί η παράμετρος της ακτινοβολίας, η λύση που μας δίνεται είναι:

$$T = T_\infty + \frac{H_v R^2}{4k} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] + \frac{H_v R}{2h} \quad 2-18$$

Στην περίπτωση δε που ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας **k** της αντίστασης είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με τον συντελεστή συναγωγής **h**, επιτρέπεται να θεωρήσουμε ότι όλη η αντίσταση θα καταλαμβάνεται από μια ομοιόμορφη θερμοκρασία **T** κι η σχέση που θα συνδέει τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής κι ακτινοβολίας με την παρεχόμενη ισχύ θα είναι η ακόλουθη:

$$H_v \cdot V = A \cdot [h(T - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma(T^4 - T^\infty)] \quad 2-19$$

, όπου

$$A = 2\pi R \cdot L$$

$$V = \pi r^2 \cdot L$$

Η παραπάνω προσέγγιση μας επιτρέπει να λαμβάνουμε τη θερμοκρασία της αντίστασης, να τροφοδοτούμε με παροχή ισχύος και να εξάγουμε τον αντίστοιχο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

2.4.5 Εξαναγκασμένη συναγωγή

Η ροή γύρω από σώματα συναντάται συνεχώς στην πράξη κι υπάρχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της που μας ενδιαφέρουν άμεσα, όπως η οπισθέλκουσα δύναμη που αποτελεί ένα μέτρο της αντίστασης στην κίνηση ενός

σώματος κι ο ρυθμός ψύξης ενός μετάλλου ή πλαστικού που διαρρέεται από ένα ζεστό ρευστό ή αντίθετα ο βαθμός στον οποίο θερμαίνεται ένα κατασκευαστικό στοιχείο κατά τη λειτουργία μιας διάταξης.

Για την πρώτη περίπτωση, η οπισθέλκουσα δύναμη εκφράζεται από τον συντελεστή C_D και η μεταφορά θερμότητας από το συντελεστή συναγωγής h . Τα δύο αυτά μεγέθη είναι δυνατό να αποτυπωθούν με τη βοήθεια κάποιων αδιάστατων αριθμών που περιγράφουν τη ροή. Τέτοιοι αριθμοί είναι οι εξής:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}, \quad Pr = \frac{\mu C_p}{k}, \quad Nu = \frac{h D}{k}, \quad 2-20$$

όπου U ή ταχύτητα της ελεύθερης ροής, μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού και D η χαρακτηριστική διάσταση στην οποία εξελίσσεται το φαινόμενό μας. Πιο συγκεκριμένα, $C_D=f(Re)$ και $Nu=f(Re, Pr)$. Οι συγκεκριμένες σχέσεις διαφοροποιούνται δε ανάλογα με το είδος της ροής. Οι τοπικοί συντελεστές συναγωγής και τριβής είναι υψηλότεροι σε τυρβώδη από ότι σε στρωτή ροή. Για αυτό το λόγο πρέπει να τίθεται κάποιο κριτήριο για το χαρακτηρισμό της ροής. Το κριτήριο αυτό δεν είναι άλλο από τον αριθμό Re . Για μια επίπεδη πλάκα ο κρίσιμος αριθμός Re εντοπίζεται στην τιμή **2300** ενώ για τη ροή γύρω από έναν κύλινδρο, ο κρίσιμος αριθμός Re είναι ίσος με **$2 \cdot 10^5$** . Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω συντελεστές τροποποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική τραχύτητα της επιφάνειας.

2.4.5.1 Εξαναγκασμένη συναγωγή γύρω από κυλίνδρους

Η ροή γύρω από κυλίνδρους και πιο συγκεκριμένα κάθετά στο διαμήκη άξονά τους έχει μελετηθεί πολλάκις στο παρελθόν από διάφορους μελετητές εξαιτίας του ενδιαφέροντος που έχει ειδικά στην περιοχή των εναλλακτών θερμότητας.

Η ροή γύρω από ένα κυλινδρικό αντικείμενο αλλάζει βάση του αριθμού (Re). Για κυλινδρική διατομή:

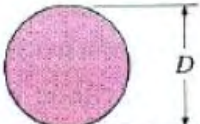
$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}, \quad 2-21$$

όπου D η διάμετρος του κυλίνδρου και ο χαρακτηριστικός αριθμός στον οποίο η ροή μεταπίπτει από στρωτή σε τυρβώδη είναι $2 \cdot 10^5$. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι για εξωτερική-εξαναγκασμένη ροή γύρω από σώματα κυλινδρικής ή άλλης διατομής ισχύει γενικά:

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = C \cdot (Re)^m \cdot (Pr)^n \quad 2-22$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}, \quad 2-23$$

όπου T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας του κυλίνδρου. Στην εικόνα δίνονται τυπικές συσχετίσεις για τον αριθμό Nu.

Διατομή κυλίνδρου	Ρευστό	Τιμές του Re	Αριθμός Nusselt
Κύκλος 	Αέριο ή υγρό	0.4–4 4–40 40–4000 4000–40,000 40,000–400,000	$Nu = 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}$

Εικόνα 2.8 Υπολογισμός αριθμού Nu για εγκάρσια ροή γύρω από κύλινδρο

Μια πολύ χρήσιμη σχέση για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού Nusselt για την εγκάρσια ροή επί της εξωτερικής επιφάνειας ενός κυλίνδρου είναι:

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 \cdot \sqrt{Re} \cdot (Pr)^{1/3}}{[1 + (0.4 / Pr)^{2/3}]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad 2-24$$

Κατά συνέπεια υπολογίζοντας τον αριθμό Nu μας δίνεται η δυνατότητα κάθε φορά να υπολογίσουμε τον συντελεστή συναγωγής για τον υπολογισμό της αντίστοιχης θερμοροής.

2.5 Θερμικό πλούμιο γύρω από θερμαινόμενη σημειακή πηγή

2.5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ο μηχανισμός για την ανωστική κίνηση της μάζας του ρευστού όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή είναι οι φυσική συναγωγή. Οι κύριες σχέσεις που διέπουν τη μορφή της δέσμης του πλουμίου δίνονται ευθύς αμέσως:

$$F = \frac{ag}{\rho_o C_p} \frac{heat}{time} = ag\bar{T}'\bar{w}\pi R^2 \quad 2-25$$

F: ανωστική δύναμη (buoyant force)

\bar{T} : μέση θερμοκρασία στο συγκεκριμένο ύψος

\bar{w} : μέση ανωστική ταχύτητα στο συγκεκριμένο ύψος

R: ακτίνα διατομής του πλουμίου στο συγκεκριμένο ύψος

$g' = agT'$: μειωμένη επιτάχυνση βαρύτητας

$$R = 0.157z$$

$$\bar{w} = 2.14 \frac{F^{1/3}}{z^{1/3}} \quad 2-26$$

$$u = 0.13\bar{w}$$

$$w = 4.27 \frac{F^{1/3}}{z^{1/3}} \exp\left(-\frac{81.6r^2}{z^2}\right) \quad 2-27$$

$$Pr = \rho\nu C_p / k \quad 2-28$$

Αριθμός Prandtl: λόγος μεταφοράς ορμής/ μεταφορά θερμότητας

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad 2-29$$

Αριθμός Grashof: λόγος δυνάμεων άνωσης προς ιξώδεις δυνάμεις

Κρίσιμος αριθμός Grashof για μετάπτωση σε τυρβώδη ροή για κάθετη
επίπεδη πλάκα: 10^9 [4]

$$Ra_L = Gr_L Pr^{0.83} \quad 2-30$$

Κρίσιμος αριθμός Rayleigh: $\log_{10} Ra = 9.8$ [6]

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = \bar{h}D / k \quad 2-31$$

Υπολογισμός αριθμού Nusselt για οριζόντιο κύλινδρο

Για ένα διδιάστατο πλούμιο το θεωρητικό μοντέλο δίδεται από τον **Fujii**
υπό την μορφή των παρακάτω εξισώσεων:

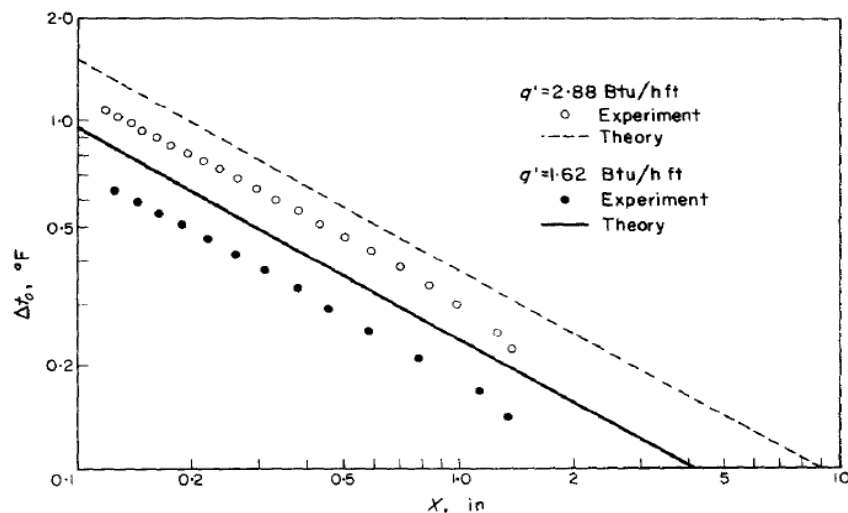
$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= g\beta(T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ u \frac{\partial(T - T_{\infty})}{\partial x} + v \frac{\partial(T - T_{\infty})}{\partial y} &= a \frac{\partial^2(T - T_{\infty})}{\partial y^2}, \end{aligned} \right\}$$

with following boundary conditions:

$$\begin{aligned} y = 0 : v &= 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial(T - T_{\infty})}{\partial y} = 0; \\ y = \infty : u &= 0, \quad T = T_{\infty}. \end{aligned}$$

Εικόνα 2.9 Θεωρητικό μοντέλο διδιάστατου στρωτού πλουμίου Fujii [23]

Μια σύγκριση με τα αποτελέσματα της θεωρίας έρχονται να κάνουν οι Schorr και Gebhart [22] σε εργαζόμενο ρευστό όμως σιλικόνη με $Pr=6.7$ παρόμοιο του νερού, αλλά με πολύ μικρότερη αγωγιμότητα σχετικά με το νερό.



Εικόνα 2.10 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά δεδομένα από την εργασία των Schorr-Gebhart [22]

Η εικόνα Εικόνα 2.10 μας πληροφορεί για το γεγονός ότι η κλίση της θερμοκρασίας με την απόσταση τείνει στην τιμή $3/5$.

2.5.2 Ανασκόπηση κύριων ερευνών [12]

Σε αυτή την ενότητα της εργασίας παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά του θερμοκρασιακού πεδίου γύρω από μια θερμαινόμενη σημειακή πηγή, η οποία στην πλειονότητα των περιπτώσεων συνιστά μια ηλεκτρικά θερμαινόμενη αντίσταση συνήθως κυλινδρικής διατομής. Μελετάται η συμπεριφορά του θερμικού πλουμίου που σχηματίζεται γύρω από την θερμική πηγή, η οποία τίθεται ως βάση για τα πειράματα που επιχειρήθηκαν και θα περιγραφούν στη συνέχεια και αποτελούν το υπόβαθρο για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου και ταυτόχρονα ερέθισμα για επόμενες ερευνητικές εργασίες που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα επιχειρείται μια σύνοψη των κύριων ερευνητικών εργασιών και δημοσιεύσεων που έχουν συντελεσθεί με επίκεντρο τη μελέτη της κίνησης του ρευστού, έχοντας ως κινούσα δύναμη τη φυσική συναγωγή με την απουσία όμως επιβαλλόμενου τυρβώδους πεδίου.

Η ελεύθερη συναγωγή σε στρωτή ροή γύρω από οριζόντια σημειακή πηγή έχει λάβει αυξανούσα προσοχή κατά τη διάρκεια των περασμένων δεκαετιών λόγω της σημασίας της διαδικασίας αυτής που λαμβάνει χώρα σε πολλά μηχανολογικά και φυσικά συστήματα πρακτικού ενδιαφέροντος όπως, ηλεκτρονικές διατάξεις, γεωφυσικά συστήματα και πυρηνικούς αντιδραστήρες. Παρόλο που ένας αριθμός αναλυτικών και πειραματικών εργασιών έχουν αφιερωθεί στα ελεύθερα ανωστικά πλούμια, πολλές πειραματικές εργασίες έχουν διεξαχθεί σε κλειστούς χώρους είτε για να περιοριστούν οι επιδράσεις του περιβάλλοντος είτε για να μελετηθεί η συμπεριφορά των περιορισμένων πλουμίων. Από την άλλη πλευρά, μια βιβλιογραφική έρευνα αποκαλύπτει ότι πολύ λίγη αριθμητική εργασία έχει αφιερωθεί στο ίδιο θέμα. Η αύξηση της πολυπολοκότητας που προκαλείται από την ισχυρή αλληλεπίδραση ανάμεσα στο πλούμιο και στο περιβάλλον του εξαιτίας των περιοριστικών ορίων κι οι συνθήκες του θερμικού οριακού στρώματος, σε συνάρτηση με τη

διακυμαινόμενη συμπεριφορά του, δυσκολεύουν την πραγματοποίηση μιας παραμετρικής μελέτης.

Η επίλυση των πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων για επίπεδα στρωτά πλούμια, έχουν πραγματοποιηθεί αναλυτικά σε κλειστή μορφή μόνο για συγκεκριμένες τιμές του **Prandtl** number, λόγου χάρη για **Pr=5/9** (Crane 1959) και **Pr=2** (Fujii 1963). Πρόσφατα μια συσχέτιση για την θερμοκρασία της κεντρικής γραμμής έχει αναπτυχθεί από τον Lin και Cheng (1992). Η συσχέτιση αυτή ισχύει για όλη την ανωστική περιοχή και για κάθε αριθμό Prandtl. Κατά την ίδια περίοδο, πολλά πειράματα έχουν διεξαχθεί στον αέρα, στο νερό, σε υγρή σιλικόνη, κι αζονέλαιο. Οι Forstrom και Sparrow (1967) ήταν οι πρώτοι που παρατήρησαν μια φυσική παλινδρόμηση του πλουμίου, το οποίο μελετήθηκε ένα μικρό διάστημα αργότερα από τον Schorr και τον Gebhart (1970) μέσω οπτικοποίησης της ροής. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή ενός ελεύθερου ανωστικού πλουμίου μελετήθηκε πειραματικά από τους Forstrom και Sparrow (1967), Bill και Gebhart (1975), Yosinobu (1979) και Noto (1989), και μέσα σε ένα ρευστό που εμφανίζει θερμοκρασιακή αναστροφή από τον Noto (1982). Οι Forstrom και Sparrow (1967) και οι Bill και Gebhart (1975) καθόρισαν την αρχή της μετάβασης να συμβαίνει σε αριθμούς Rayleigh 3.6×10^8 και 8×10^8 αντίστοιχα, ενώ για ένα θερμικό πλούμιο στον αέρα ο Noto (1989) εξήγαγε το αντίστοιχο εύρος σε $7 \times 10^7 < Ra_x < 1.4 \times 10^8$ από ανάλυση του φάσματος μέσω σημάτων θερμοστοιχείου κι αλλαγή στην κλίση της θερμοκρασίας του επιπέδου πάνω από την αντίσταση (επίπεδο συμμετρίας). Ο αριθμός Rayleigh βασιζόταν στην κάθετη απόσταση κατά μήκους του πλουμίου, και στο ρυθμό θέρμανσης της αντίστασης.

Οι Kimura και Bejan (1983) και ο Yang (1992), χρησιμοποιώντας τη θεωρία λυγισμού (buckling theory), απέδειξαν ότι στη μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή, το ανωστικό πλούμιο λαμβάνει ένα ημιτονοειδές σχήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από μη συμμετρική παραμόρφωση. Οι θεωρητικοί τους ισχυρισμοί υποστηρίζονται από πειραματικά δεδομένα (Kimura και Bejan 1983).

Οι Igarashi και Kada (1977) διξήγαγαν πειράματα σε περιορισμένους χώρους προς εξερεύνηση της ταλαντευόμενης κίνησης του αέρα σε περιβάλλον φυσικής συναγωγής που προκαλείται από θερμαινόμενη αντίσταση που τοποθετείται ομόκεντρα κατά μήκος οριζόντιου ισόθερμου κυλίνδρου.

Χρησιμοποιήθηκαν διάμετροι αντίστασης (από 0.29 mm έως 1.0 mm) και εξωτερικών κυλίνδρων (από 100 mm έως 194.5 mm). Τα ίδια αποτελέσματα εμφανίστηκαν ανεξαρτήτως του μεγέθους της αντίστασης. Διεξάγοντας μια διαστατική ανάλυση για να καθοριστεί η σχέση ανάμεσα στη συχνότητα της διακυμαινόμενης ροής, των θερμικών και γεωμετρικών συνθηκών και των ιδιοτήτων του ρευστού, κατέληξαν ότι η συχνότητα βασίζεται μόνο στη διάμετρο του εξωτερικού κυλίνδρου και στην επιβαλλόμενη θερμική παροχή κι όχι στη διάμετρο της αντίστασης ή της θερμοκρασίας της. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του εξωτερικού κυλίνδρου επιλέχθηκε ως η θερμοκρασία αναφοράς για τις ιδιότητες του ρευστού. Επιπλέον, ένας τροποποιημένος αριθμός Rayleigh βασιζόμενος στη θερμική ισχύ και στην ακτίνα του εξωτερικού κυλίνδρου εισήχθη. Η σχέση της αδιάστατης συχνότητας και του τροποποιημένου αριθμού Rayleigh βρέθηκε να είναι $f=C\cdot Ra^{0.4}$. Οι Igarashi και Kada (1977) καθόρισαν επίσης τις αρχικές συνθήκες στην αφετηρία των ταλαντώσεων. Για μια δεδομένη εξωτερική διάμετρο κυλίνδρου, βρήκαν ότι η παλινδρομική κίνηση δεν εμφανίστηκε όταν η παρεχόμενη θερμική ισχύς ξεπέρασε κάποιες κρίσιμες τιμές αλλά αντιθέτως έλαβε χώρα όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της αντίστασης και του ψυχρού κυλίνδρου ξεπέρασε κάποιο όριο. Πρότειναν ότι η εκκίνηση της ταλαντούμενης κίνησης καθορίζεται από την κατάσταση του ρευστού κοντά στην αντίσταση, ενώ η συχνότητα των ταλαντώσεων καθορίζεται από τις εξωτερικές οριακές συνθήκες μακριά από την αντίσταση. Η εργασία τους επεκτάθηκε από τον Igarashi (1978) στην περίπτωση μιας σημειακής θερμικής πηγής που τοποθετείται ομόκεντρα κατά μήκος του άξονα ενός οριζόντιου τετράγωνου θαλάμου. Τα ίδια συμπεράσματα όπως και με την περίπτωση της διαμόρφωσης του κυλίνδρου εξήχθησαν και μια συσχέτιση με τον ίδιο εκθετικό νόμο καθορίστηκε. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της επιπρόσθετης γεωμετρικής παραμέτρου, που αποτελεί το ύψος της διατομής του θαλάμου, ο συντελεστής C είναι συνάρτηση του λόγου επιμήκυνσης (aspect ratio) του θαλάμου εάν ο Rayleigh βασίζεται στο πλάτος. Τρεις διαφορετικές τιμές του C βρέθηκαν που αντιστοιχούσαν σε τρία διαφορετικά σχήματα της ροής, δίνοντας το δρόμο για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων. Ο Igarashi (1978) απέδειξε επίσης την ύπαρξη μια σχέσης ανάμεσα στη συχνότητα και την ταχύτητα της κεντρικής γραμμής αρκετά μακριά από την

αντίσταση προτείνοντας ότι οι διακυμάνσεις του πλουμίου σχετίζονται με το ρυθμό κυκλοφορίας.

Οι Eichhorn και Vedhanayagam (1982) καθόρισαν αναλυτικά μια τιμή εκθέτη **0.3** που σχετίζεται με πειραματικά δεδομένα για ένα τυρβώδες πλούμιο νερού με απόκλιση 10%. Μια τιμή εκθέτη **1/3** βρέθηκε επίσης από τον Urakawa (1983) για μια διακυμαινόμενη συχνότητα πλουμίου αξονέλαιου με ελεύθερη επιφάνεια και από τους Wakitani και Yosinobu (1984) για ένα στρωτό αέριο πλούμιο. Οι Noto και Matsumoto (1986) και ο Noto (1989) βρήκαν μια συχνότητα ταλάντωσης θερμικού πλουμίου αέρα ανάλογη με τον εκθέτη **0.4** ή **1/3** του ρυθμού θέρμανσης για τις περιπτώσεις αντίστοιχα που το πλούμιο φθάνει την οροφή της εγκλειστότητας σε στρωτή ή τυρβώδη ροή.

Μια **οριζόντια** κίνηση παρατηρήθηκε επίσης σε πειράματα περιορισμένων πλουμίων από τον Fujii (1973,1982), Eichorn και Vedhanayagan (1982) και Urakawa (1983). Τα πειράματα που διεξήχθησαν σε μεγάλες παραλληλεπίπεδες εγκλειστότητες όχι μόνο έδειξαν ότι το πλούμιο ταλαντώνεται στη διεύθυνση κάθετα στην αντίσταση αλλά μετακινείται επίσης και στην αξονική διεύθυνση της αντίστασης. Παρόλαυτά πρέπει να σημειωθεί ότι οι φυσικοί μηχανισμοί δεν έχουν αποσαφηνιστεί ακόμη. Ο Eichorn (1974) και οι Incropera και Yaghoubi (1980) σε πειραματικές μελέτες βυθιζόμενων ισόθερμων κυλίνδρων παρατήρησαν επίσης τη μετάβαση από δισδιάστατη σε τρισδιάστατη αστάθεια με αυξανόμενη αξονική συστροφή ή "φούσκωμα". Η μετάβαση αυτή απόδόθηκε στην παράσυρση του ρευστού από τους Incropera και Yaghoubi (1980). Όταν η αξονική κίνηση συνυπάρχει με την εγκάρσια, οι κινήσεις αυτές δεν είναι ανεξάρτητες. Η εγκάρσια κίνηση δεν παρουσιάζει αστάθεια μόνο όταν οι κυματομορφές της αξονικής παρουσιάζουν ταυτόχρονα ευστάθεια. Αυτό ισχύει όταν το μήκος της αντίστασης ισούται με ακέραια πολλαπλάσια του ήμισυ του μήκους κύματος, σε μια αξονική κυματομορφή που προσεγγίζει ημιτονοειδή κυματομορφή (Eichorn και Vedhanayagam 1982, Urakawa 1983). Το ύψος της επιφάνειας του ρευστού, που παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση με το μήκος κύματος της αξονικής κίνησης, και το μήκος της αντίστασης είναι οι κύριες παράμετροι που ελέγχουν το μήκος κύματος. Οι Pera και Gebhart (1971), Nawoj και Hickman (1977), Yosinobu (1979), Noto (1982) και (1989) δεν εντόπισαν την αξονική μετατόπιση στα πειράματά τους. Ο Noto συσχέτισε την αξονική

κίνηση με το πλάτος της εγκλειστότητας φαινομενικά χωρίς περιβαματική απόδειξη (εμφάνιση θα υπήρχε μόνο για μικρά πλάτη). Αξίζει να σημειωθεί ότι αξονικές κινήσεις παρατηρήθηκαν κυρίως σε ρευστά με ελεύθερες επιφάνειες με θερμαινόμενες αντιστάσεις και κυλίνδρους. Ο Fujii (1973) διεξήγαγε πειράματα στον αέρα και σε αζονέλαιο κι οι αξονικές μετατοπίσεις εντοπίστηκαν μόνο στην περίπτωση του υγρού. Μόνο οι Bill και Gebhart (1975) ανέφεραν ταλαντώσεις κατά μήκος της αντίστασης για αέριο πλούμιο με οπτικοποιήσεις συμβολογραφημάτων στη διατομή του πλουμίου.

Οι Lauriat και Destayraud (1994) πραγματοποίησαν αριθμητική ανάλυση προς σύγκριση των συσχετίσεων που αφορούν την συχνότητα της ταλάντωσης στην εγκάρσια διεύθυνση με τις πειραματικές έρευνες. Οι Noto και Matsumoto υπολόγισαν τη συσχέτιση σε $f=0.109 \cdot Ra^{0.4}$ με λόγο επιμήκυνσης του κλειστού χωρίου $A=H/L=1.25$ και με αδιάστατο βάθος της αντίστασης από οροφή $H_s=A \cdot y_s=0.75$. Για τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά η αριθμητική ανάλυση επέδειξε απόκλιση της τάξης του 3%. Για την περίπτωση $H_s=A/2$, όπου ο Igarashi (1978) εξήγαγε τη σχέση $f=0.105 \cdot Ra^{0.4}$ κι αφορά τον τύπο διαπεραστικής συναγωγής (penetrative convection), όλες οι αριθμητικές συχνότητες εμφάνισαν πολύ καλή συμφωνία. Η δεύτερη συσχέτιση που εξήχθη από τον Igarashi κι αφορά χαμηλότερους αριθμούς Rayleigh ($H_s \approx 1$ και $A \approx 2$) είναι $f=0.09 \cdot Ra^{0.4}$. Αναφέρεται στο συνδυασμό "penetrative convection" και Rayleigh-Benard convection. Απόκλιση παρουσιάζει η αριθμητική ανάλυση από την παραπάνω συσχέτιση και πιο συγκεκριμένα φαίνεται ένας τύπος εκθετικού νόμου να μην έχει ισχύ. Σε μεγαλύτερους δε αριθμούς Rayleigh ($A=1$, $H_s=0.75$), όπου ο Igarashi κατέληξε στη σχέση $f=0.226 \cdot Ra^{0.4}$ κι αφορά στην περιοχή φυσικής παλινδρόμησης (natural swaying regime), είναι απαραίτητη η δημιουργία υψηλής διακριτοποίησης του χώρου στο αριθμητικό μοντέλο. Η ύπαρξη πολύ λίγων αριθμητικών σημείων είναι ο λόγος συνεπώς για τις σημαντικές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν.

2.5.3 Ταλάντωση του πλουμίου πάνω από οριζόντια σημειακή πηγή

Το θερμικό πλούμιο δεν εμφανίζει απόλυτα ευθύγραμμη κίνηση πάνω από τη σημειακή πηγή, αλλά ταλαντώνεται. Μια σύντομη ανασκόπηση των κύριων ερευνών πάνω στο φαινόμενο αυτό έχει ως ακολύθως.

Το 1967, οι Forstrom και Sparrow πρώτοι ανακάλυψαν την ταλαντευόμενη κίνηση του πλουμίου πάνω από σημειακή θερμική πηγή. Το 1970, οι Schorr και Gebhart επιβεβαίωσαν την ύπαρξη της κίνησης αυτής μέσω οπτικοποίησης της ροής, όπως παρατήρησε και ο Fujii το 1973 με παρόμοιο τρόπο. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση πραγματοποιήθηκε από τον Urakawa, ο οποίος έδειξε ότι σε αξονέλαιο το πλούμιο όχι μόνο ταλαντώνεται στις δύο διαστάσεις, αλλά επιπλέον μετακινείται και στην αξονική διεύθυνση της αντίστασης. Η μετάβαση από στρωτή στην τυρωβώδη κατάσταση έχει ερευνηθεί από τους Forstrom και Sparrow, Bill και Gebhart και Noto.

Η χαρακτηριστική αυτή κίνηση ενός στρωτού πλουμίου στο εσωτερικού ενός κλειστού χώρου μεγάλου σχετικά με την αντίσταση που χρησιμοποιείται ως πηγή είναι μία από τις περισσότερο έμφυτες κι ουσιαστικές κινήσεις του πλουμίου, επειδή η στρωτή ροή σε αυτή την περίπτωση δεν επηρεάζεται από διαταραχές στην ελεύθερη περιοχή του ρευστού, τα τοιχώματα του περιβλήματος, επιφανειακές τάσεις και θερμοκρασιακή αναστροφή.

Μια χαρακτηριστική μελέτη για το πειραματικό πλαίσιο που μόλις περιγράφηκε αποτελεί αυτή του Noto[14]. Ένα ισόθερμο πλαίσιο ακρυλικής ρητίνης με βάση **800x800 mm²** και ύψος **1000 mm** χρησιμοποιήθηκε. Ως σημειακή πηγή χρησιμοποιήθηκε μια αντίσταση χρωμίου διαμέτρου **0.435 mm** και μήκους **55 cm**. Το εργαζόμενο μέσο αποτελέσε ο ατμοσφαιρικός αέρας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία χρωμίου διαστάσεων διαμέτρου **25.0-100 μm** χρονικής σταθεράς **25 Hz**, η οποία είναι αποτελεσματική με δεδομένο ότι η συχνότητα των θερμοκρασιακών μεταβολών του πλουμίου δεν ξεπερνούσε το **1Hz**. Η μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής λαμβάνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Q = Q_T - Q_r \quad 2-32$$

,όπου

$$Q_t = IV / l \quad 2-33$$

$$Q_r = \varepsilon \sigma_s \pi d (T_w^4 - T_{\infty 1}^4) \quad 2-34$$

Οι φυσικές ιδιότητες του αέρα καθορίστηκαν υπό την ακόλουθη θερμοκρασία αναφοράς:

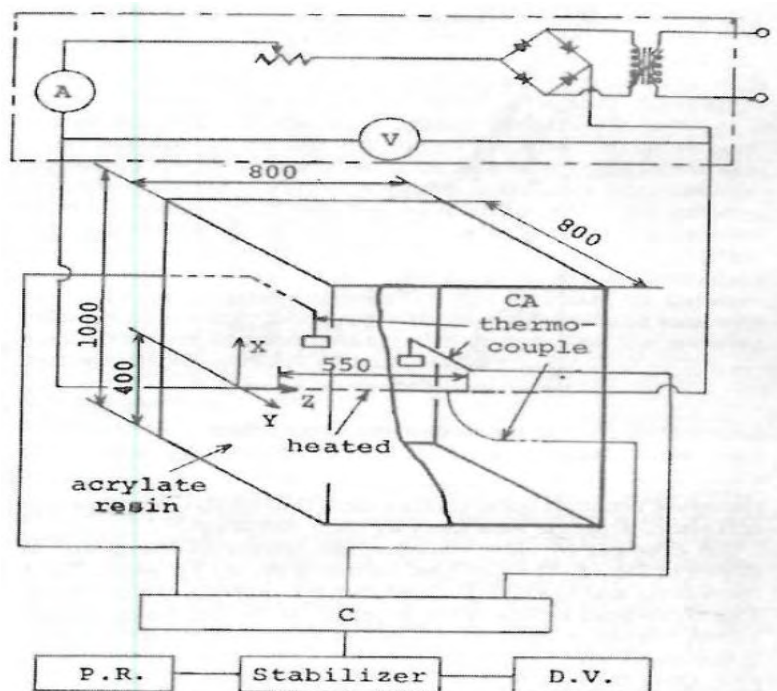
$$T_r = T_{cl} - 0.38(T_{cl} - T_{\infty 2}), \quad 2-35$$

όπου $T_{\infty 1}$ η θερμοκρασία του τοιχώματος, T_{cl} η θερμοκρασία στο κατακόρυφο επίπεδο ακριβώς πάνω από την πηγή που ορίζεται ως $y=0$ και $T_{\infty 2}$ η θερμοκρασία στην περιοχή $y=150-210 \text{ mm}$ για κάθε δεδομένο ύψος όπου διατηρείται περίπου σταθερή.

Ο αριθμός Grashof(z) υπολογιζόταν ως εξής:

$$Gr(z) = \frac{z^3 g \beta Q}{k \text{Pr} \nu^2} \quad 2-36$$

Οπτικοποίηση της ροής επιχειρήθηκε με την εφαρμογή κατακόρυφου επιπέδου μέσω δεσμίδας **laser** και την ταυτόχρονη παρουσία **καπνού**.



2-37 Πειραματική διάταξη για μελέτη θερμικού ανωστικού πλούμιου σε κλειστό θάλαμο του Noto[14]

Η οπτικοποίηση έδειξε ότι το πλούμιο δεν μετακινείται κατά την αξονική διεύθυνση z της πηγής σε αυτό το πείραμα. Κατά συνέπεια η μορφή του είναι δισδιάστατη. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι αν το πλάτος του πλαισίου γίνει

αρκετά μικρότερο τότε εμφανίζεται αξονική μετακίνηση. Οι μετρήσεις που ακολούθησαν επιχειρήθηκαν στο μέσο της αντίστασης.

Τα κυριότερα σημεία που αξίζει να αναφερθούν από τη μελέτη του Noto αναφέρονται ακολούθως.

Το πλούμιο ταλαντώνεται κατά τη διεύθυνση x με περίοδο **15 sec**. Για επιβολή ηλεκτρικής ισχύος **86.3 W/m**, το πλούμιο εμφανίζει το σημείο κάμψης του για **$Gr_x > 1 \times 10^9$** . Με μια αύξηση της επιβαλλομένης ισχύος στην πηγή, το πλούμιο κάμπτεται για μικρότερες τιμές του ύψους **z** .

Με βάση τις μέσες χρονικά τιμές της θερμοκρασίας που λήφθηκαν για $x=0$, η στρωτή περιοχή επικρατεί για **$Gr_z < (1 \sim 2) \times 10^8$** .

Τα κύματα της θερμοκρασιακής διακυμάνσης στα συμμετρικά σημεία του άξονα z για δεδομένο ύψος κάθε φορά δεν παρουσίασαν συσχέτιση.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων συνοψίζονται ως ακολούθως. Το πλάτος των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων του στρωτού πλουμίου αυξάνονται με την αύξηση της επιβαλλόμενης ισχύος. Για **$Gr_z > (1 \sim 2) \times 10^8$** , με αύξηση του αριθμού Grashof, διακυμάνσεις με μικρή περίοδο και μεγάλη συχνότητα λαμβάνουν χώρα. Με περαιτέρω αύξηση του **z** , κύματα υψηλής συχνότητας γίνονται κυρίαρχα. Όσον αφορά το πλάτος των διακυμάνσεων σε σχέση με την εγκάρσια απόσταση x παρατηρούνται τρεις χαρακτηριστικές κατηγορίες.

1) **Mode 1**: Το πλάτος αυξάνεται απόαρχικά και στη συνέχεια μειώνεται

2) **Mode 2**: Το πλάτος παραμένει αρχικά σταθερό και στη συνέχεια μειώνεται.

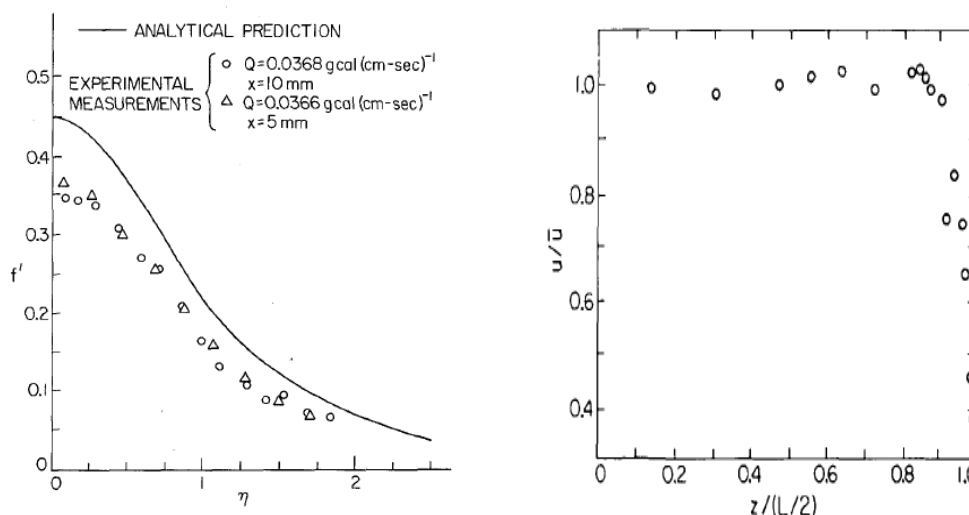
3) **Mode 3**: Το πλάτος μειώνεται κατά την y διεύθυνση.

Με την αύξηση του ύψους **z** , μεταβαίνουμε από το **mode 1** στο **mode 3** διαμέσου του **mode 2**. Με αύξηση της επιβαλλόμενης ισχύος, το ύψος στο οποίο παρουσιάζονται τα **mode 2** και **3** προσεγγίζουν την πηγή.

2.5.4 Ταχύτητα του πλουμίου πάνω από θερμαινόμενη σημειακή πηγή

Μελετη της ταχύτητας ενός θερμικού πλουμίου πάνω από θερμική σημειακή πηγή έχει πραγματοποιηθεί από τον Hickman[16], χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο αποσταγμένο νερό. Η αντίσταση χρωμίου ετοποθετείτο

κοντά στον πυθμένα διαφανούς δεξαμενής της οποίας το επάνω μέρος ήταν ανοιχτό στην ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία όγκου του ρευστού (bulk temperature) εμετράτο μέσω θερμοστοιχείου σε σημείο κάτω από την αντίσταση. Οι μετρήσεις δε της ταχύτητας επραγματοποιούνται με **laser-doppler anemometer**. Μετρήσεις της κατακόρυφης ταχύτητας (άξονας z) u του πλουμίου πραγματοποιήθηκαν κατά την εγκάρσια διεύθυνση x για δύο συγκεκριμένα ύψη πάνω από την αντίσταση. Στα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω παρουσιάζεται η αδιάστατη ταχύτητα ως προς την κεντρική γραμμή με τη μεταβολή της συντεταγμένης x παραθέτοντας μονον το ένα συμμετρικό κομμάτι ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της σημειακής πηγής και η μεταβολή της αδιάστατης μέσης ταχύτητας ως προς την μέση ταχύτητα στο μέσο της αντίστασης κατά την αξονική διεύθυνση y της αντίστασης.



Εικόνα 2.11 α) αδιάστατα εγκάρσια προφίλ της κατακόρυφης συνιστώσας πάνω από σημειακή πηγή β) μεταβλητότητα της ταχύτητας στην κεντρική γραμμή του πλουμίου κατά το ημικπέτασμα της πηγής (Hickman[16])

Είναι εμφανές ότι κατά την αξονική διεύθυνση της αντίστασης δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες μεταβολές στην μέση ταχύτητα, παρα μόνο στο άκρο της αντίστασης όπου παρουσιάζονται τα **edge effects**. Το γεγονός αυτό που επαναλαμβάνεται εδώ σε σχέση με τις προηγούμενες αναφορές, μας οδηγεί στο να θεωρούμε γενικά στα πειράματά μας αμελητέα τα τρισδιάστατα φαινόμενα και να δίνεται η δυνατότητα να προσεγγίζουμε το πλούμιο ως δισδιάστατο κι επιπλέον η μελέτη να δύναται να επικεντρώνεται σε ένα σημείο συνήθως αυτό στο μέσο του κυλινδρικού αγωγού κάθε φορά.

Μελέτη κι οπτικοποίηση του τυρβώδους πεδίου

Πρωταρχικό βήμα στη διαδικασία της μελέτης αποτέλεσε η μελέτη κι αντίστοιχα η εξαγωγή των χαρακτηριστικών του τυρβώδους πεδίου στο οποίο θα οποίο θα διεξάγοντο στη συνέχεια τα πειράματα που αφορούσαν τη μετάδοση θερμότητας.

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε σε αυτό το σημείο ήταν η οπτικοποίηση της ροής. Η οπτικοποίηση συντελέστηκε με την από κοινού χρήση τριών διαφορετικών εργαλείων:

- **Καπνογόνο** το οποίο τοποθετήθηκε κατακόρυφα στο στο γεωμετρικό κέντρο του του κυβικού θαλάμου μελετών.
- **Ψηφιακή βιντεοκάμερα** για την καταγραφή της εικόνας, η οποία εστίαζε στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου των δοκιμών. Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν μοντέλου **Sony** με συχνότητα δειγματοληψίας **25 frames/sec**.
- Για την οπτικοποίηση δε του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε **laser** με κυλινδρικό φακό ή περιστρεφόμενο κάτοπτρο, με σκοπό τη δημιουργία φωτεινού κατακόρυφου επιπέδου πάχους **3 mm**. Τα χαρακτηριστικά του laser ήταν:
 - Ισχύς : $P = 1.277 \text{ W}$
 - Συχνότητα : $F = 10000 \text{ Hz}$
 - Μήκος κύματος : $\lambda = 532 \text{ nm}$.

3.1 Πειραματική μεθοδολογία

Όπως προαναφέρθηκε, για την οπτικοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκε αρχικά ηλεκτρικό καπνογόνο για την παραγωγή τυρβώδους ροής ατμού, τομή της οποίας θα απεικονίζονταν πάνω σε επίπεδο φωτός (**laser light sheet**). Η διάμετρος του ακροφυσίου του ατμοπαραγωγού ήταν **10 mm**. Η τυρβώδης αυτή ροή του ατμού έτεμνε κάθετα το επίπεδο φωτός, και ήταν παράλληλη στην επιφάνεια του δαπέδου. Οι αποστάσεις της κάμερας καθώς και επίπεδο φωτισμού του εργαστηρίου διατηρήθηκαν σταθερά καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Η βιντεοκάμερα ήταν εστιασμένη στο γεωμετρικό κέντρο του

θαλάμου, κι ο φωτισμός κυμάνθηκε σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Η τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel (**pixel intensity**) εξαρτάται από την απόσταση που είναι τοποθετημένος ο φακός της ψηφιακής κάμερας (**βάθος χρώματος-color depth**) και για να διατηρηθούν οι πειραματικές παράμετροι σταθερές πρέπει να διατηρηθούν και οι προαναφερθείσες αποστάσεις σταθερές. Αναφέρεται, ότι σε όλη την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδές σήμα εισόδου. Η παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα. Η ισχύς αναφέρεται στην ισχύ του ενισχυτή ανά κανάλι κι η συχνότητα σε αυτή του ηχητικού σήματος.

Καπνογόνο	
P (W)	F (Hz)
0	
25	40
25	50
25	60
25	80
25	100
25	120
25	140

Πίνακας 3-1 Χαρακτηριστικά ισχύος και συχνότητας μεγαφώνων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή τύρβης

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικά δύο εικόνες του ροικού πεδίου με και χωρίς τη χρήση των μεγαφώνων αντίστοιχα.



Εικόνα 3.1 Ροικό πεδίο με χρήση ηλεκτρικού καπνογόνου χωρίς την χρήση μεγαφώνων



Εικόνα 3.2 Ροικό πεδίο με τη χρήση καπνογόνου υπό την επίδραση συνθετικής ομογενούς κι ισότροπης τύρβης με τη χρήση των μεγαφώνων

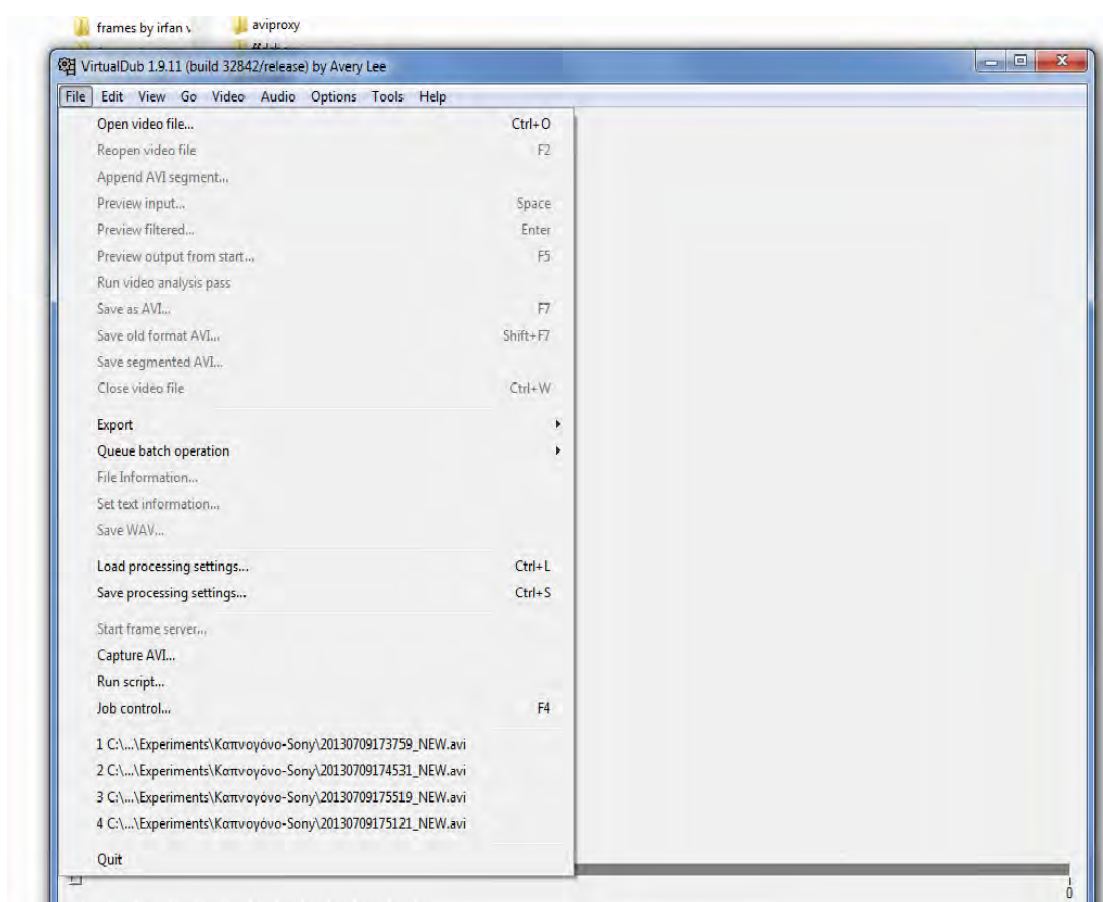
3.2 Επεξεργασία της εικόνας και εξαγωγή των αποτελεσμάτων

Η καταγραφή των εικόνων έγινε αρχικά στον σκληρό δίσκο της **home videocamera** κι ύστερα μεταφέρθηκαν μέσω καλωδίου σύνδεσης usb σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

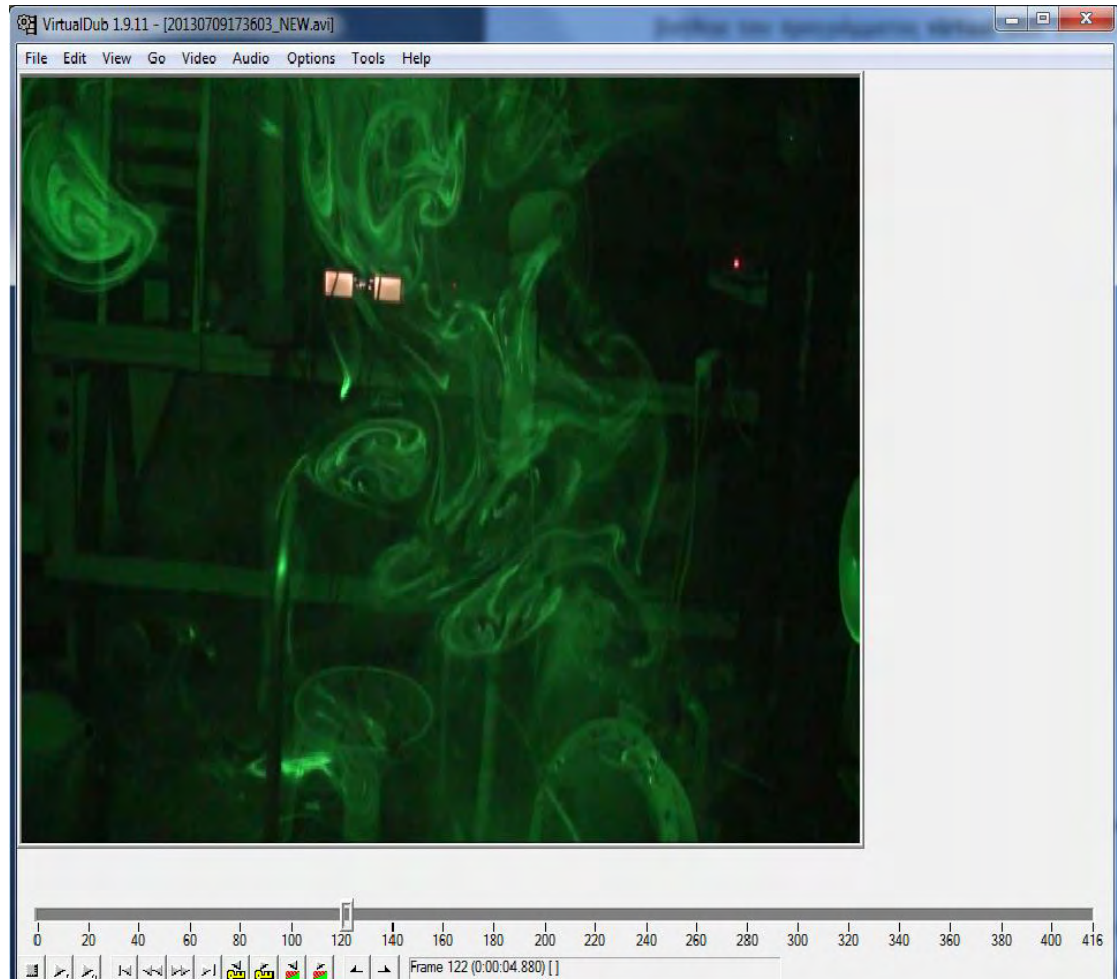
3.2.1 Επεξεργασία της εικόνας

Το εξαγόμενο από τη video camera αποτέλεσμα ήταν video. Για την επεξεργασία στη συνέχεια απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η εξαγωγή των εικόνων σε **καρέ (frames)**, όπου κάθε frame λαμβανόταν κάθε **0.04 sec**, δηλαδή με **frame frequency= 25 frame/sec**. Η επιθυμητή αυτή εξαγωγή έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος **virtual dub**. Ενδεικτικά δίνεται πιο κάτω βηματικά η διαδικασία εξαγωγής από το πρόγραμμα.

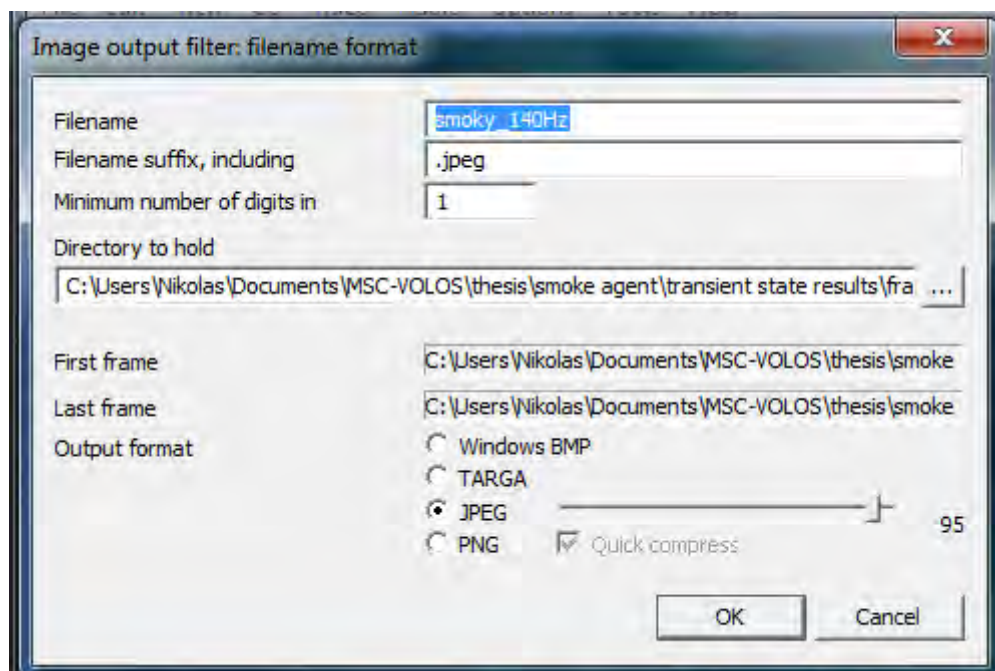
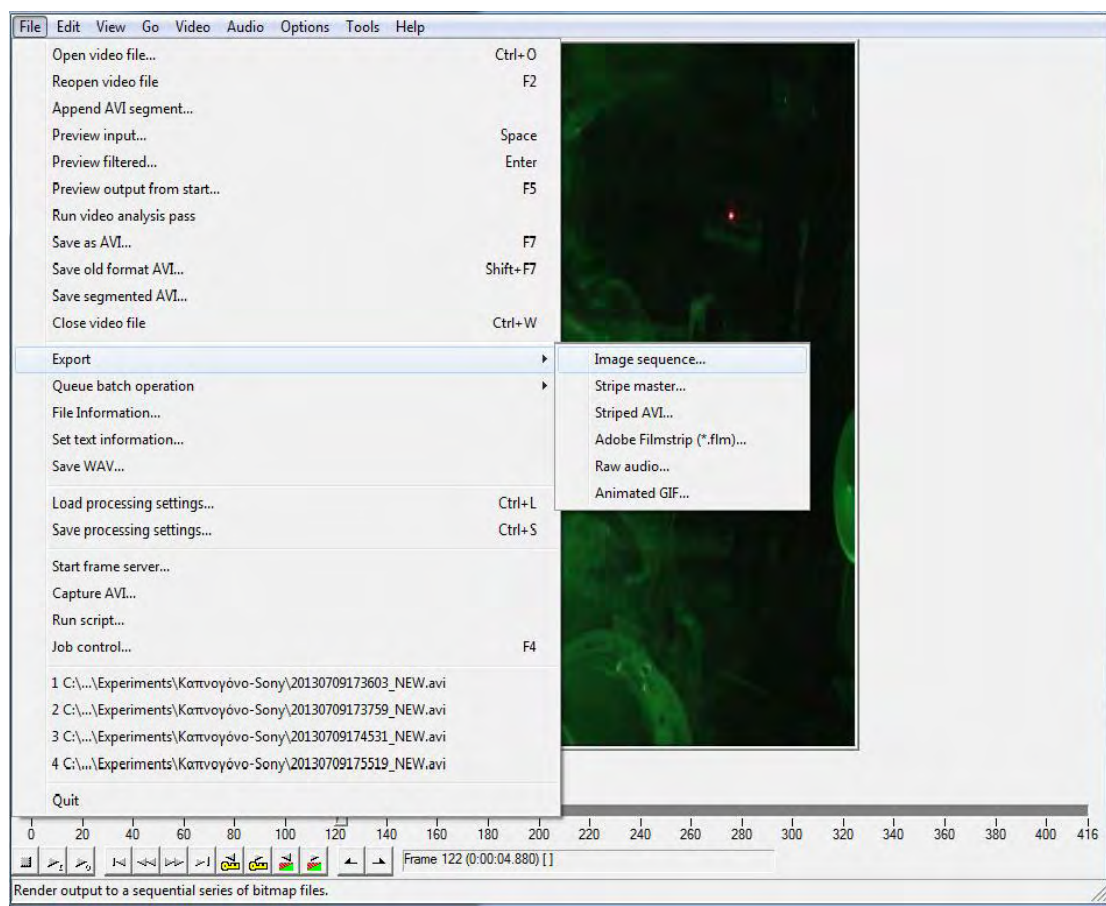
File→ Open video file και βρίσκουμε το video που θέλουμε.



Στη συνέχεια μπορούμε να αναπαράγουμε το video και να επιλέξουμε το μέρος εκείνο των frames που θέλουμε να αντλήσουμε προς επεξεργασία. Η αρίθμηση των frames δίνεται στον οριζόντιο άξονα.

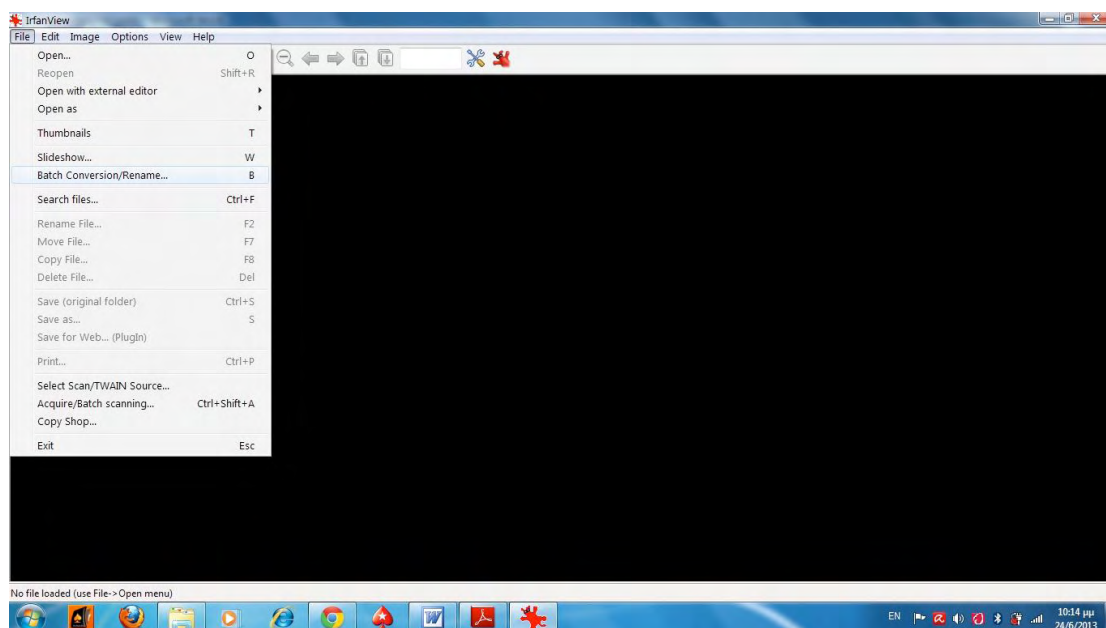


Εν συνεχεία κι αφού έχουμε επιλέξει τα επιθυμητά frames, τα εξαγάγουμε (export) στο φάκελο και στη μορφή αρχείου που επιθυμούμε (για εμάς ήταν 'jpeg')



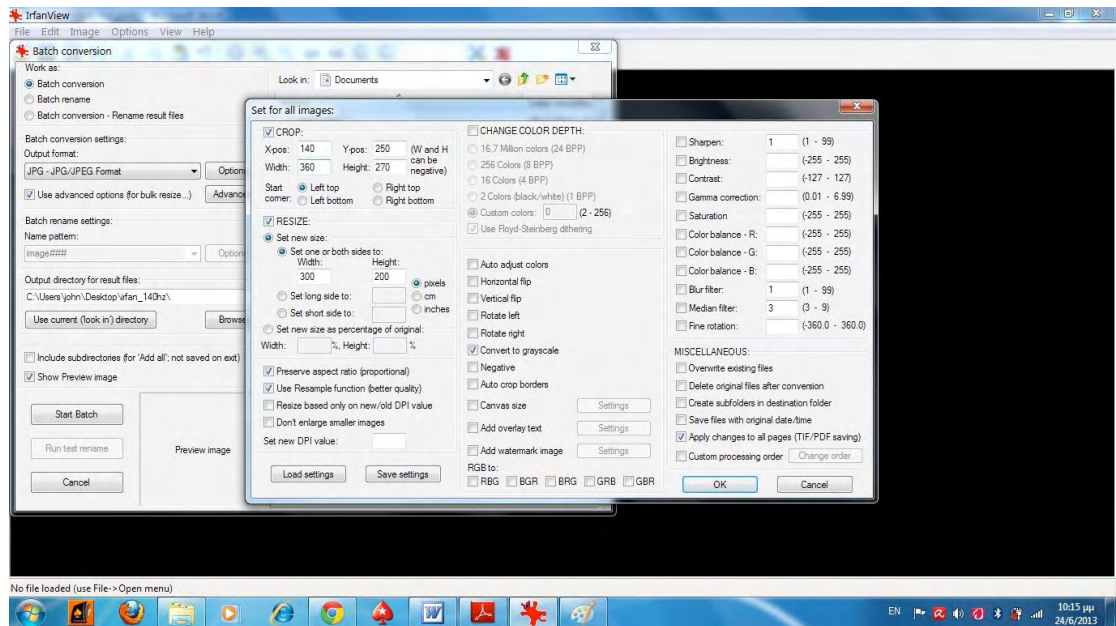
Σε αυτό το σημείο κι ενώ είχαμε το υλικό των εικόνων μας **σε RGB format**, έγχρωμες δηλαδή, επιλέχθηκε να τις μετατρέψουμε σε **grayscale** και να περιορίσουμε τον αριθμό των pixels στον επιθυμητο αριθμό 250·200, για να είναι εφικτή και περισσότερο ταχεία η επεξεργασία των από το λογισμικό **Matlab**. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το λόγο ήταν το **'irfanview'**. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναφέρεται παρακάτω.

Ανοίγουμε το πρόγραμμα και επιλέγουμε: File → Batch conversion/Rename



Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγουμε όπως φαίνεται παρακάτω το φάκελο των αρχείων που θέλουμε να επεξεργαστούμε στην επιλογή 'look in:'. Προσθέτουμε όλα τα αρχεία του φακέλου με την εντολή 'Add all', και πηγαίνουμε στο 'advance' στην κατηγορία 'batch conversion settings'.

Στο νέο παράθυρο επιλέγουμε το μέγεθος της εικόνας, καθώς και την επιλογή 'grayscale'.



3.3 Ψηφιακή ανάλυση των εικόνων με τη χρήση Matlab

Η περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων για τη μελέτη του φαινομένου και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον **Matlab 2009**. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είχε σαν βάση τον κώδικα που χρησιμοποίησαν στη διπλωματική τους εργασία οι προπτυχιακοί φοιτητές **Μπαλοδήμος** και **Ηλίας** [21] και βασιζόταν στη διδακτορική διατριβή της **δρ. Αφροδίτης Ζησιμάτου** [20] και σε εργασία του **δρ. Αθανάσιου Μπάρλα**. Ο κώδικας βελτιώθηκε και προσαρμόστηκε στα δεδομένα της παρούσης εργασίας καθώς κι επεκτάθηκε για τον υπολογισμό του **κέντρου βάρους** του τυρβώδους πεδίου από το καπνογόνο καθώς και στον υπολογισμό του **χρόνου μετάβασης (transient time)** από τη κατάσταση χωρίς την επενέργεια των μεγαφώνων σε αυτή με τη χρήση του ηχητικού σήματος.

Βάση του κώδικα αποτελεί το εξής χαρακτηριστικό. Από το φάκελο στον οποίο έχουμε αποθηκευμένες τις εικόνες μας διαβάζει την κάθε εικόνα ξεχωριστά με την εντολή **imread** και την καταχωρεί σε ένα τρισδιάστατο μητρώο διαστάσεων **(n,m,f)**, όπου **n** είναι η κατακόρυφη διάσταση της εικόνας σε pixels, **m** η οριζόντια διάσταση της εικόνας σε pixels και **f** αντίστοιχα ο αριθμός των εικόνων που έχουν εξαχθεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που εργαστήκαμε: **n=200**, **m=250** κι ο **αριθμός των frames** που εξάγαμε από το

virtual dub. Ταυτόχρονα αποδίδει σε κάθε pixel μία τιμή από το **0** μέχρι το **255** που αφορά στην κλίμακα του grayscale: **0 σημαίνει τελείως μαύρο και 255 τελείως λευκό.** Με βάση το μητρώο αυτό στη συνέχεια ο κώδικας παράγει τα παρακάτω αποτελέσματα:

Average light intensity matrix

Για κάθε ξεχωριστό pixel του πίνακα υπολογίζεται η μέση τιμή τιμή από όλα τα frames κι έτσι εξάγεται ένας πίνακας μέσος όρος για για κάθε μία συχνότητα. Στη συνέχεια ο πίνακας αναπαρίσταται στο επίπεδο όπου κάθε σημείο λαμβάνει ένα διαφορετικό χρωματισμό ανάλογα με την ένταση της φωτεινότητας στην κλίμακα από 0 μέχρι 255. Αποτελεί ουσιαστικά μια χρήσιμη αναπαράσταση της ροής στο χώρο για κάθε μια επιλεγμένη συχνότητα στη μόνιμη κατάσταση.

Light intensity for frame

Η ίδια αναπαράσταση του φαινομένου επιχειρείται και για ένα ξεχωριστό frame αυτή τη φορά, η επιλογή του οποίου παραμένει η ίδια κάθε φορά με σκοπό να αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης για την εξέλιξη του φαινομένου σε κάθε διαφορετική συχνότητα.

Average light intensity for a vertical slice

Σε μια επιλεγμένη οριζόντια θέση υπολογίζεται ο μέσος όρος της έντασης της φωτεινότητας σε κάθε συχνότητα για κάθε pixel στον κατάκόρυφο άξονα και στη συνέχεια αναπαρίσταται σε ένα γράφημα pixel-intensity, που μας δίνει ένα μέτρο της διασποράς στο κατακόρυφο επίπεδο.

Light intensity at frame center

Στο γεωμετρικό κέντρο του χώρου καταγράφεται κι αποτυπώνεται σε γράφημα η εξέλιξη της φωτεινότητας με τα frames.

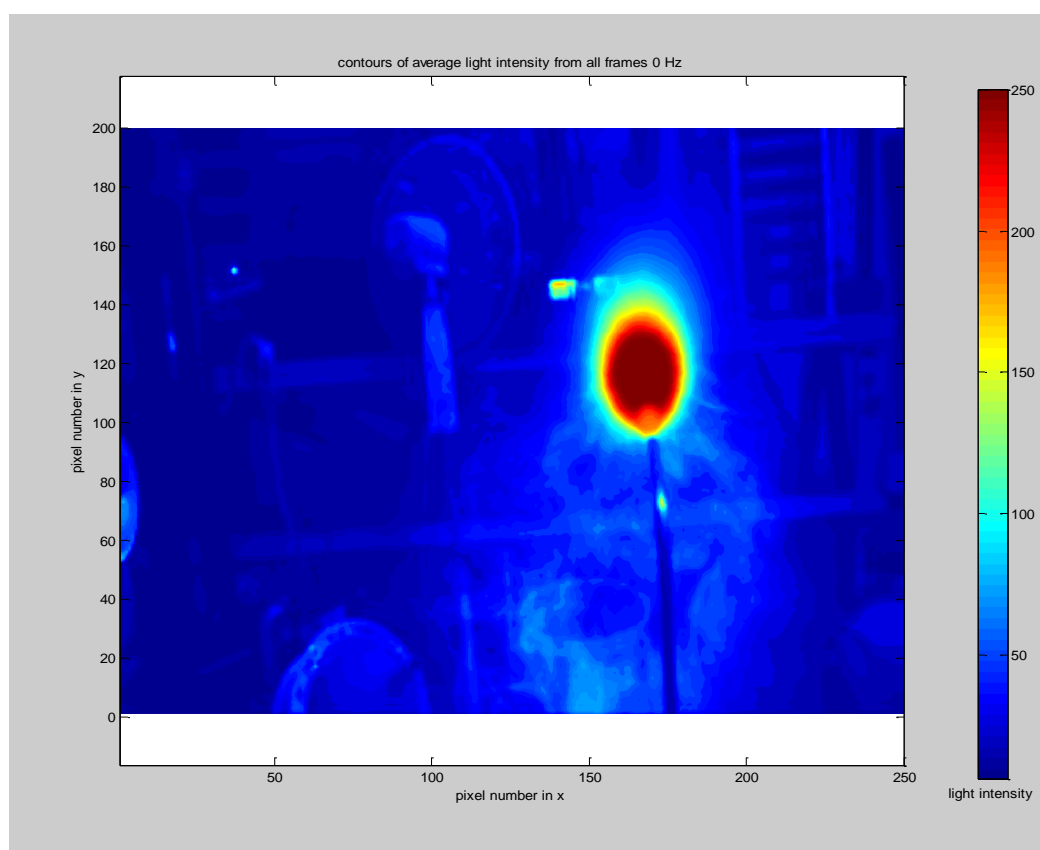
Υδραυλική ακτίνα

Η υδραυλική ακτίνα υπολογίζεται και αναπαρίσταται για κάθε frame καθώς και στο τέλος υπολογίζεται η μέση υδραυλική ακτίνα για κάθε συχνότητα, μέγεθος το οποίο αποτυπώνει τη διασπορά του πεδίου στο χώρο.

3.4 Αποτελέσματα της οπτικοποίησης της ροής

3.4.1 Γραφήματα μέσης τιμής της φωτεινότητας για κάθε συχνότητα

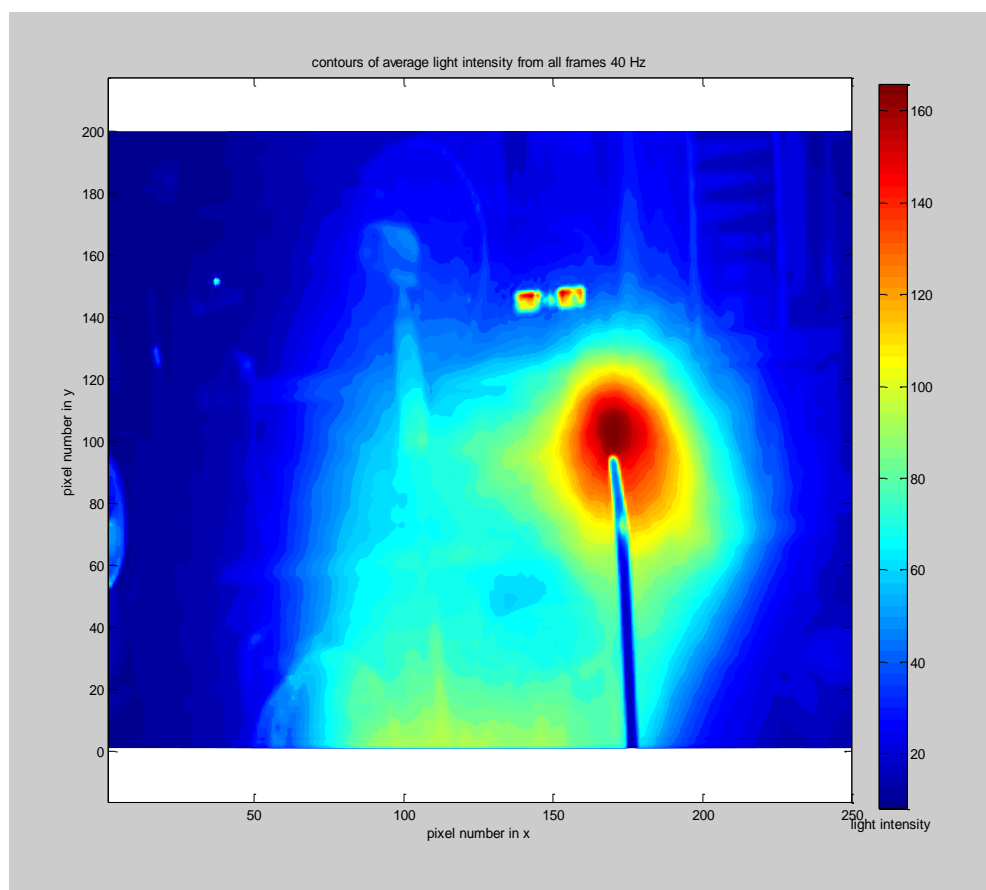
Σε αυτό το σημείο παρατίθεται η ψηφιοποιημένη απεικόνιση του ροϊκού πεδίου μέσω της αντίστοιχης φωτεινότητας έτσι όπως εξήχθη από το Matlab για κάθε συχνότητα.



Εικόνα 3.3 no-power ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέση τιμή των frames

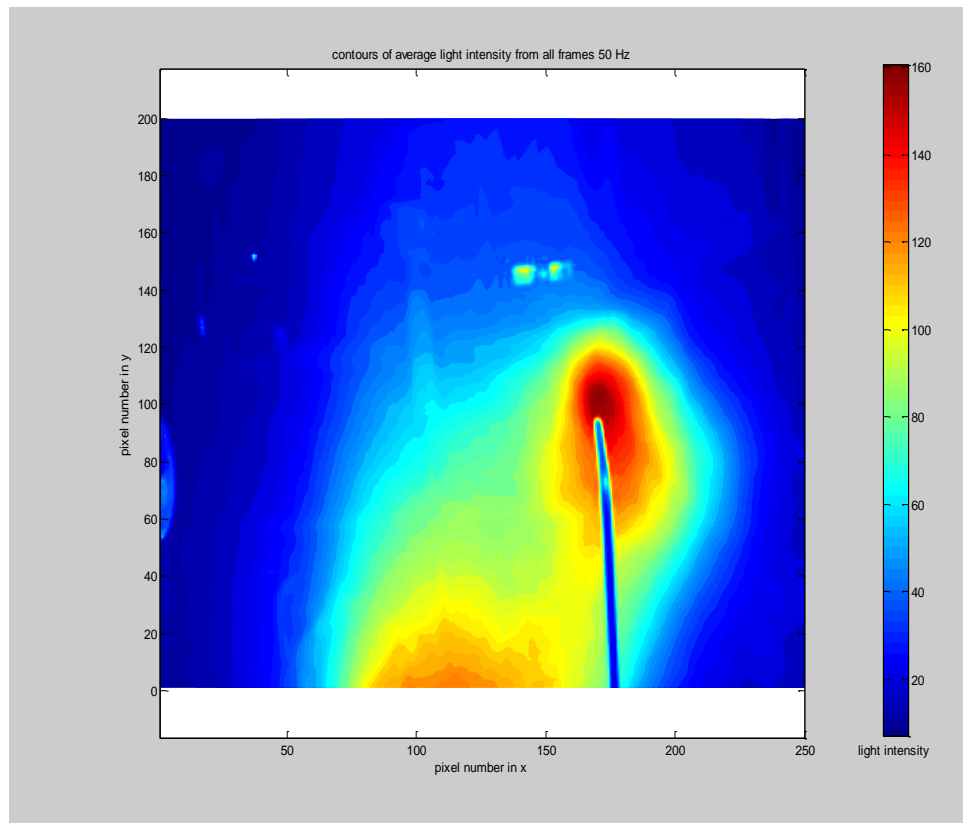
Όπως φαίνεται κι από την παραπάνω εικόνα όλη η ένταση της φωτεινότητας, η οποία χαρακτηρίζεται από το κόκκινο χρώμα κι αντιστοιχεί

στην πολλή πυκνή παρουσία άσπρου καπνού από το καπνογόνο εστιάζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή γύρω από την εξαγωγή του jet, φανερώνοντας έτσι τη μικρή διασπορά του φαινομένου και τα μικρά επίπεδα τύρβης που ενυπάρχουν όμως στο πλούμιο του καπνού, το οποίο είναι τυρβώδες.



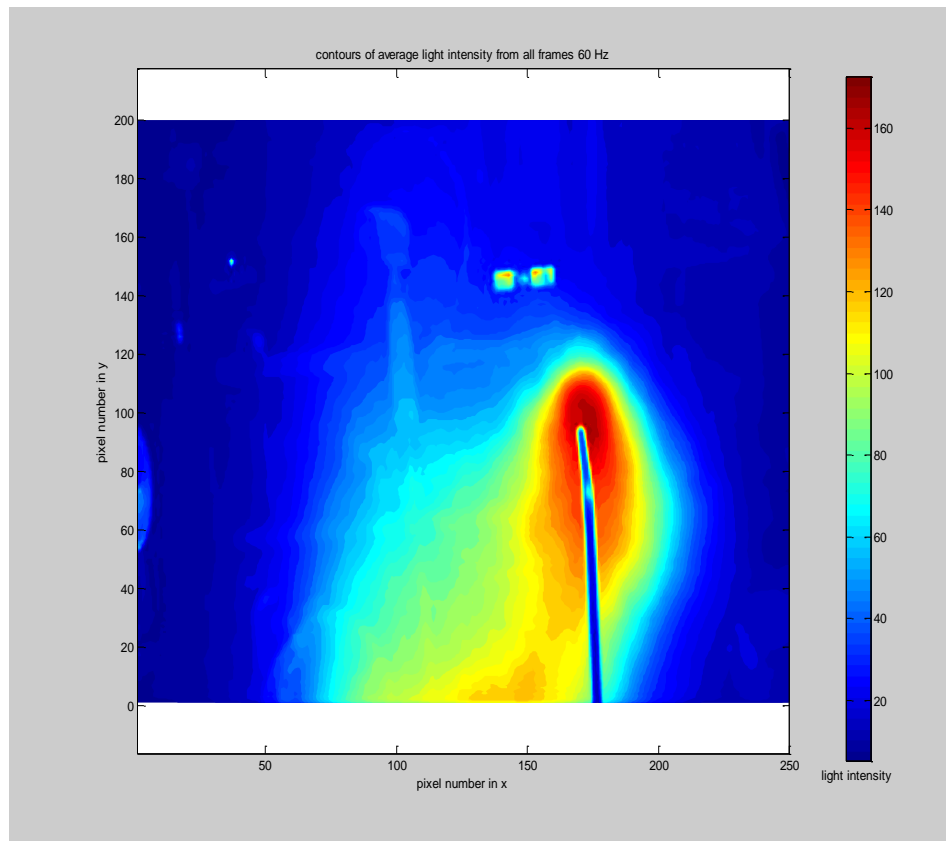
Εικόνα 3.4 40 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέση τιμή των frames

Στα 40 Hz πλέον είναι έντονη η διασπορά του καπνού στη γύρω περιοχή υπό την επιδραση των μεγαφώνων. Διακρίνεται μια οριζόντια μετατόπιση καθώς και μια μετατόπιση προς τα κάτω.



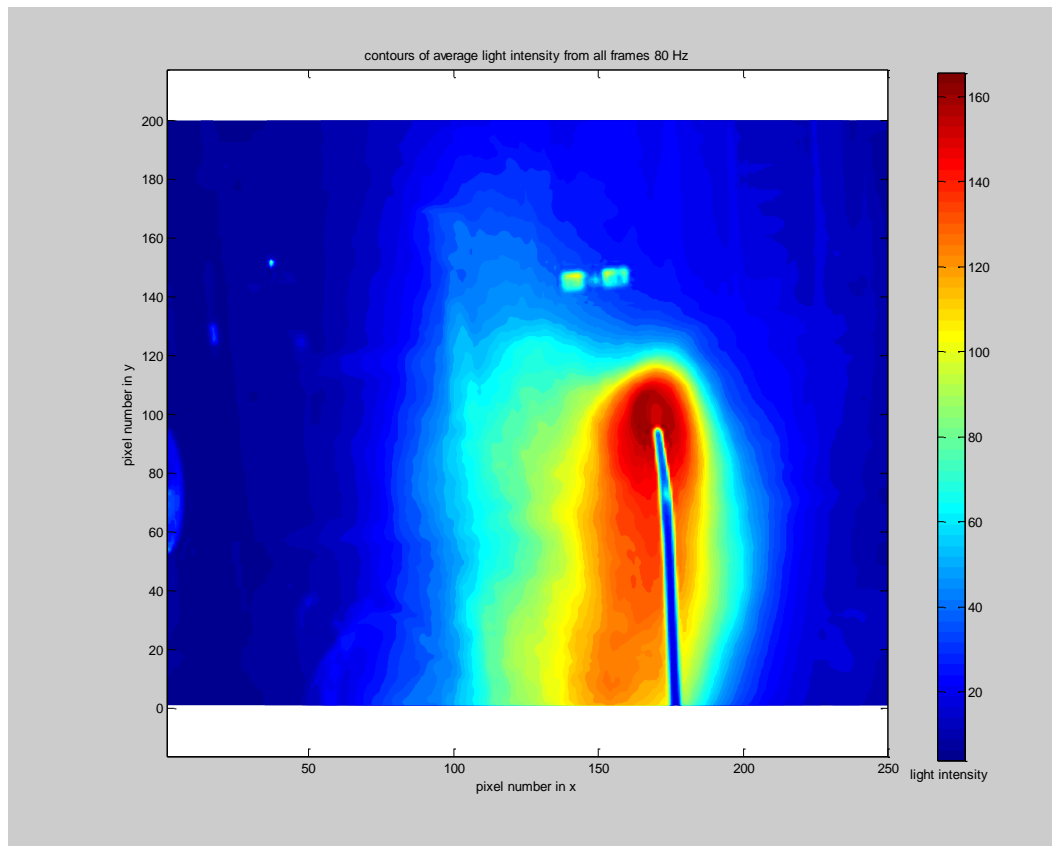
Εικόνα 3.5 50 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέσω τιμή των frames

Στα 50 Hz πλέον παρατηρείται μεγαλύτερη πυκνότητα καπνού να έχει μετατοπιστεί από το κέντρο.



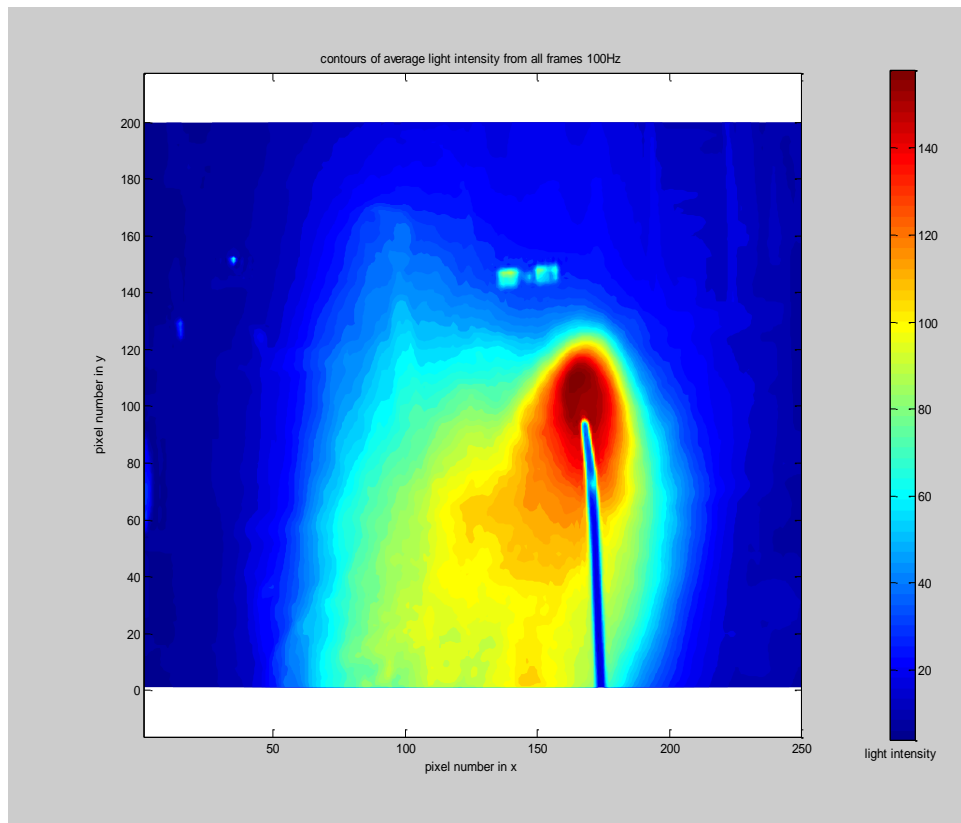
Εικόνα 3.6 60 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέση τιμή των frames

Στα 60 Hz το μοτίβο παραμένει ως είχε στην προηγούμενη συχνότητα.



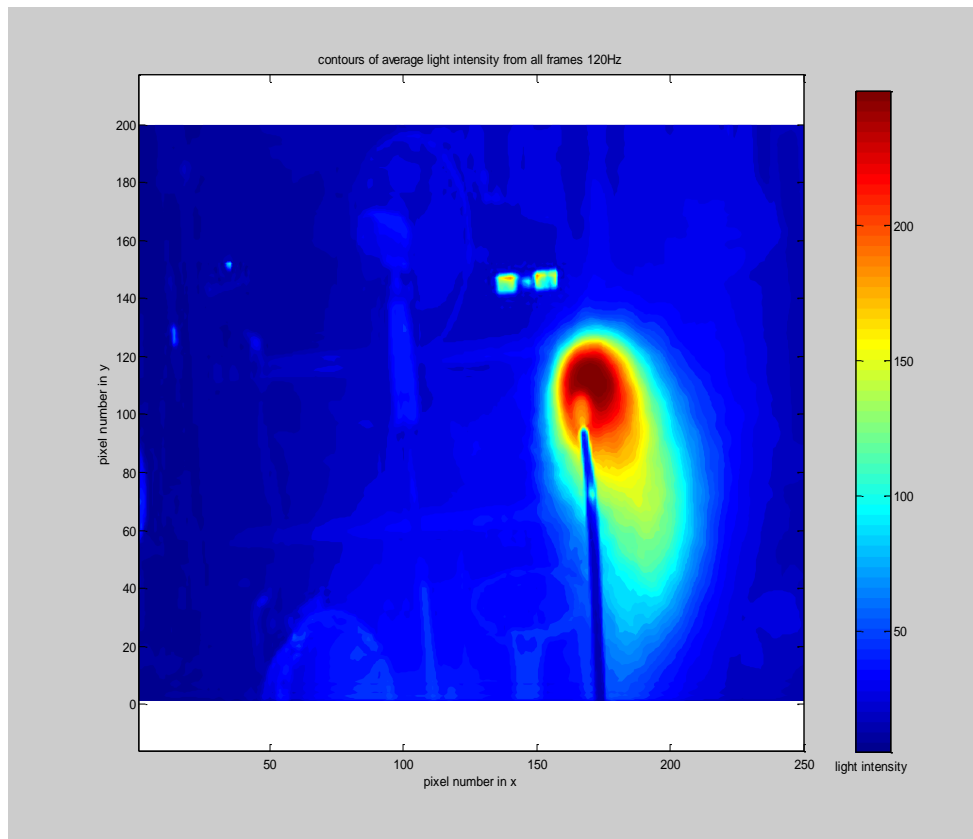
Εικόνα 3.7 80 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέση τιμή των frames

Στα 80 Hz παρατηρείται μια τάση ο καπνός να διατηρεί την κατακόρυφη διασπορά του αλλά όμως να εξαλείφεται η οριζόντια διασπορά.



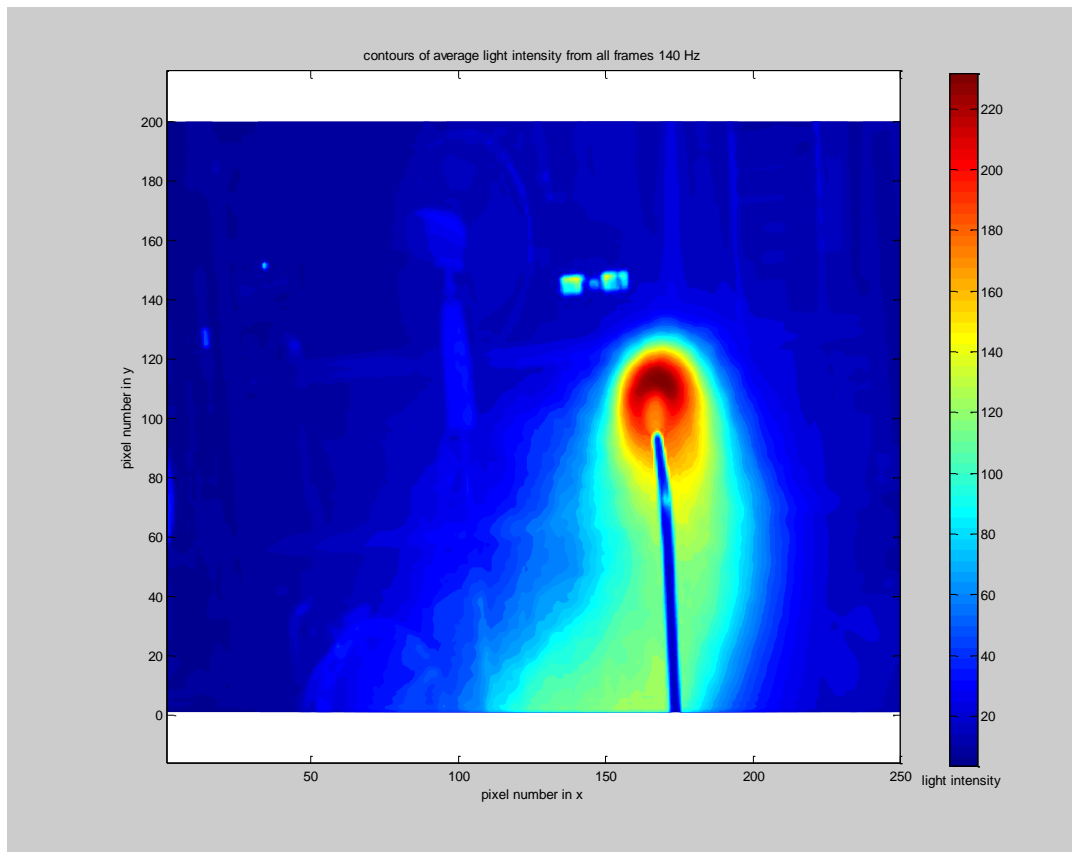
Εικόνα 3.8 100 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέση τιμή των frames

Στα 100 Hz επανερχόμαστε στο μοτίβο που υπήρχε για τα 50 και τα 60 Hz.



Εικόνα 3.9 120 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέσω τιμή των frames

Στα 120 Hz παρατηρείται μια πολύ σημαντική διαφοροποίηση καθώς η οριζόντια μετατόπιση τείνει να αντιστραφεί, αλλά το σημαντικότερο στοιχείο είναι η πολύ περιορισμένη πλέον διασπορά.

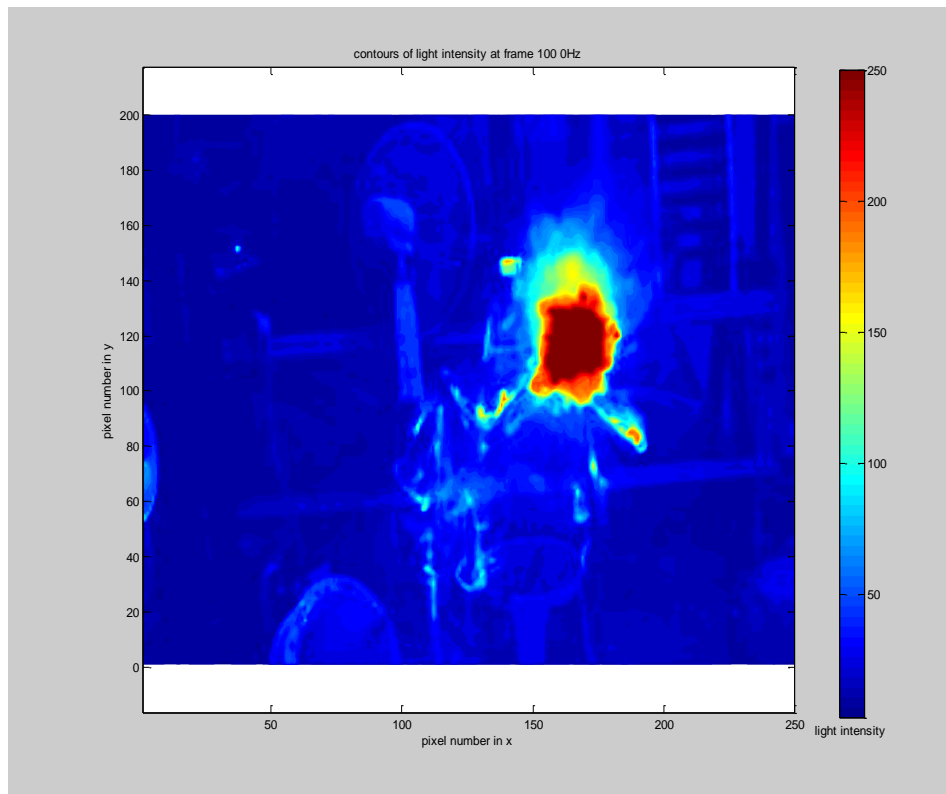


Εικόνα 3.10 140 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μέση τιμή των frames

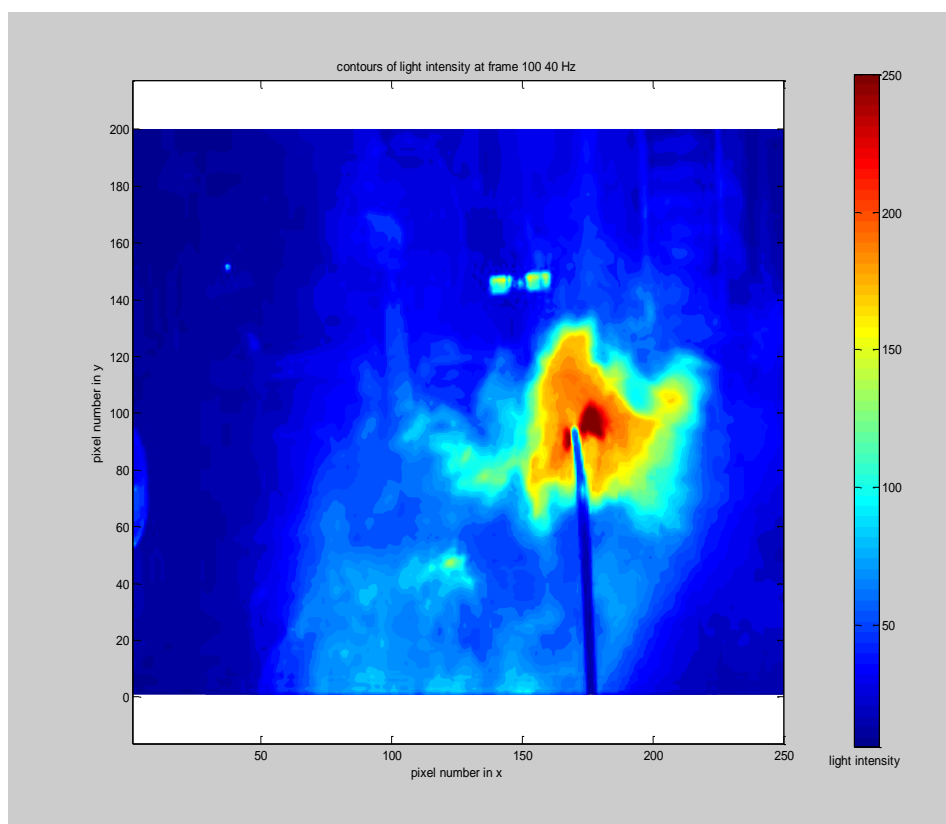
Στα 140 Hz δε παρατηρείται μια τάση να αυξηθεί η κατακόρυφη διασπορά, δίχως όμως μεγάλη πυκνότητα για τον όγκο του καπνού που διασπείρεται κι η οριζόντια διασπορά μοιάζει αμελητέα.

3.4.2 Γραφήματα τιμής φωτεινότητας για κάθε συχνότητα στο 100 frame

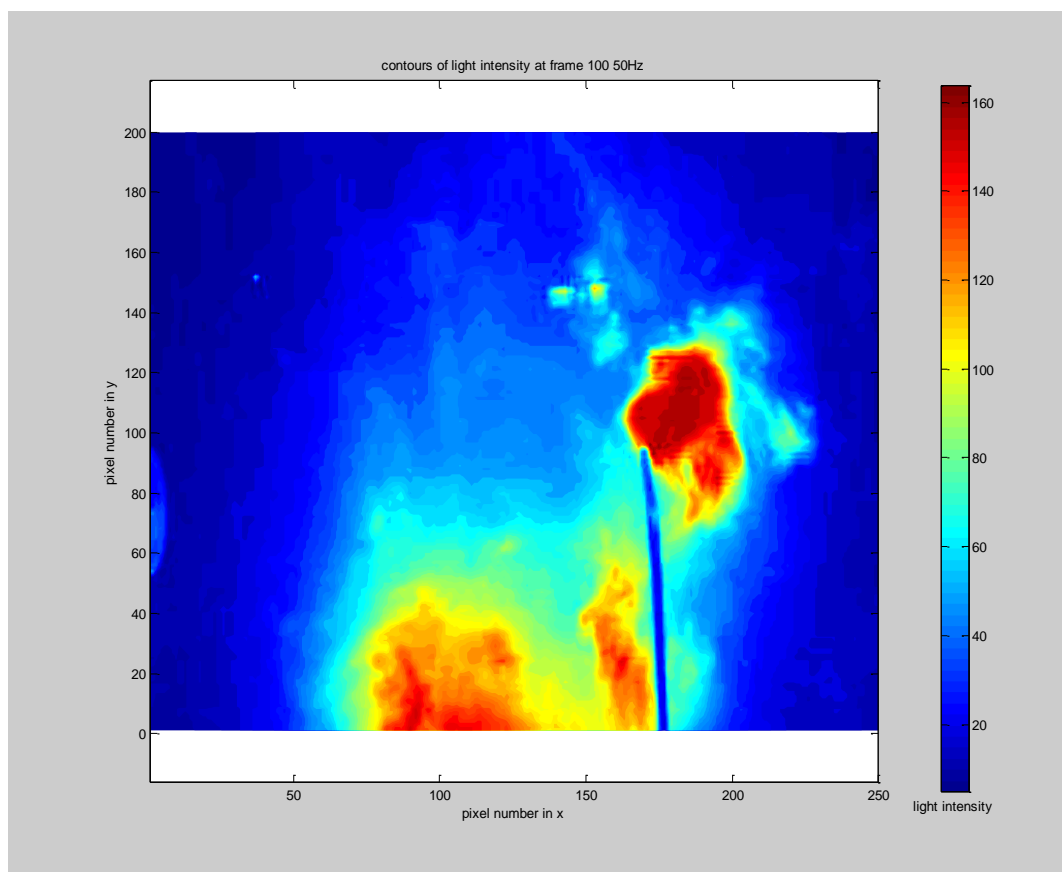
Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε την απεικόνιση του πεδίου δειγματοληπτικά στην **100οστη** εικόνα για κάθε συχνότητα προς σύγκριση-επιβεβαίωση της τάσης που παρατηρηθηκε από τη μέση τιμή.



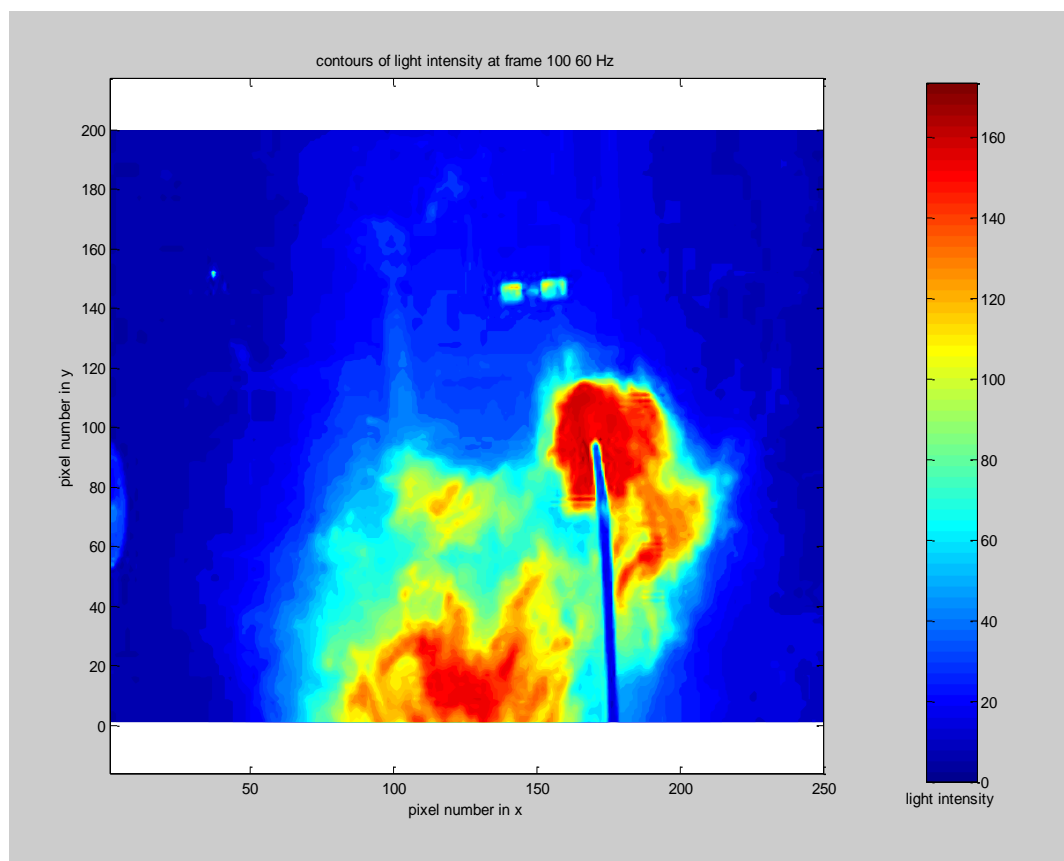
Εικόνα 3.11 no-power ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μεμονωμένο frame



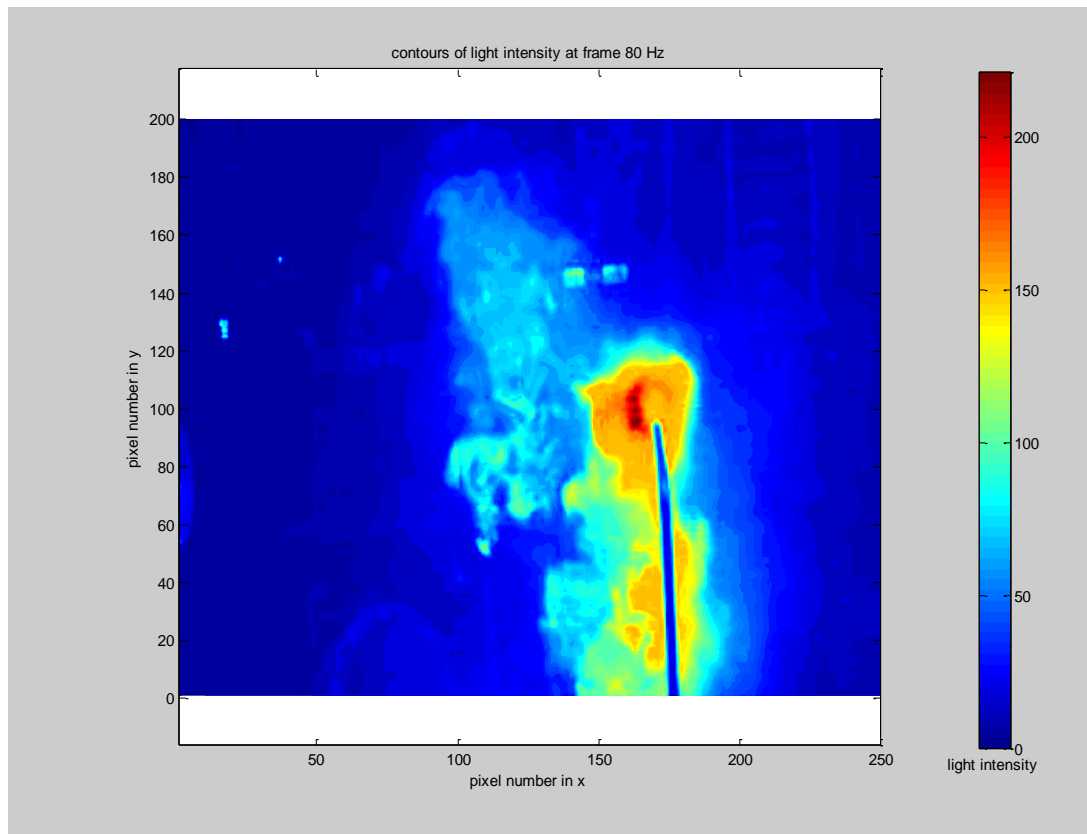
Εικόνα 3.12 40 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μεμονωμένο frame



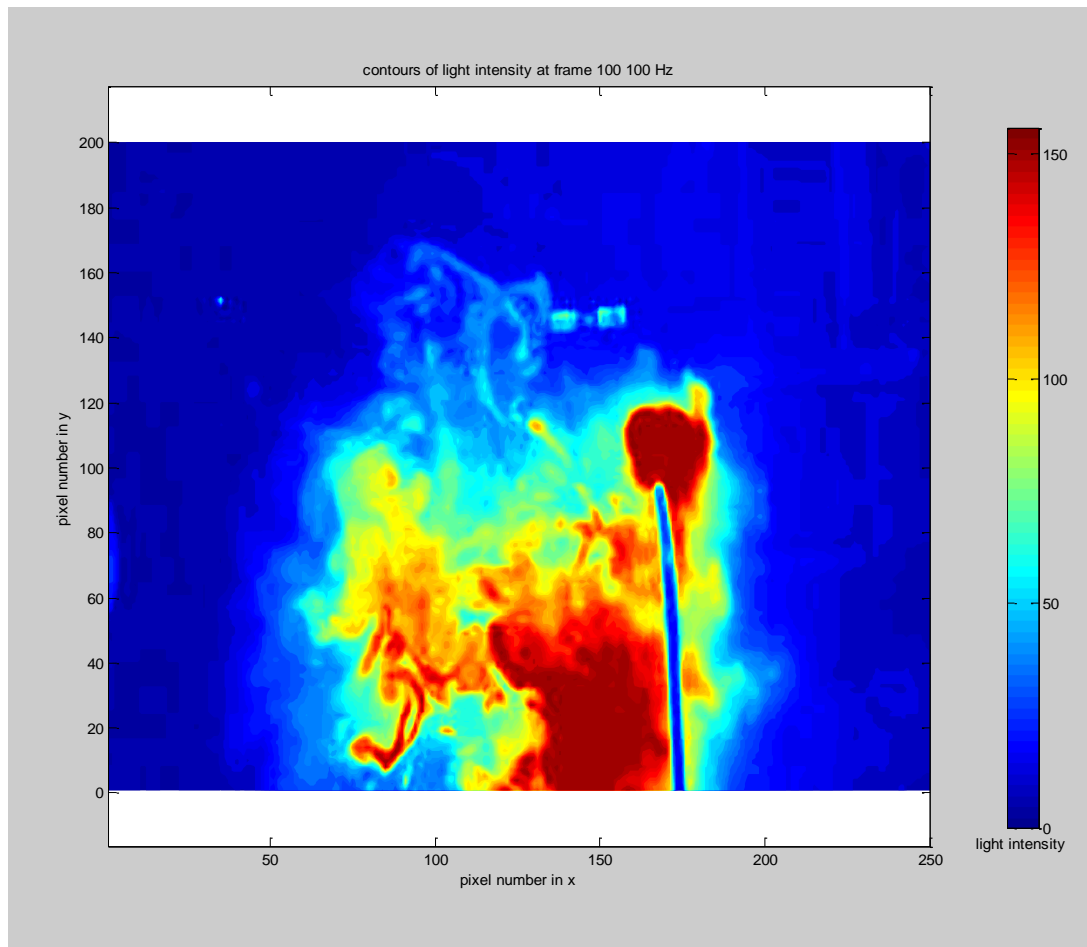
Εικόνα 3.13 50 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συνάρτησε των pixels μεμονωμένο frame



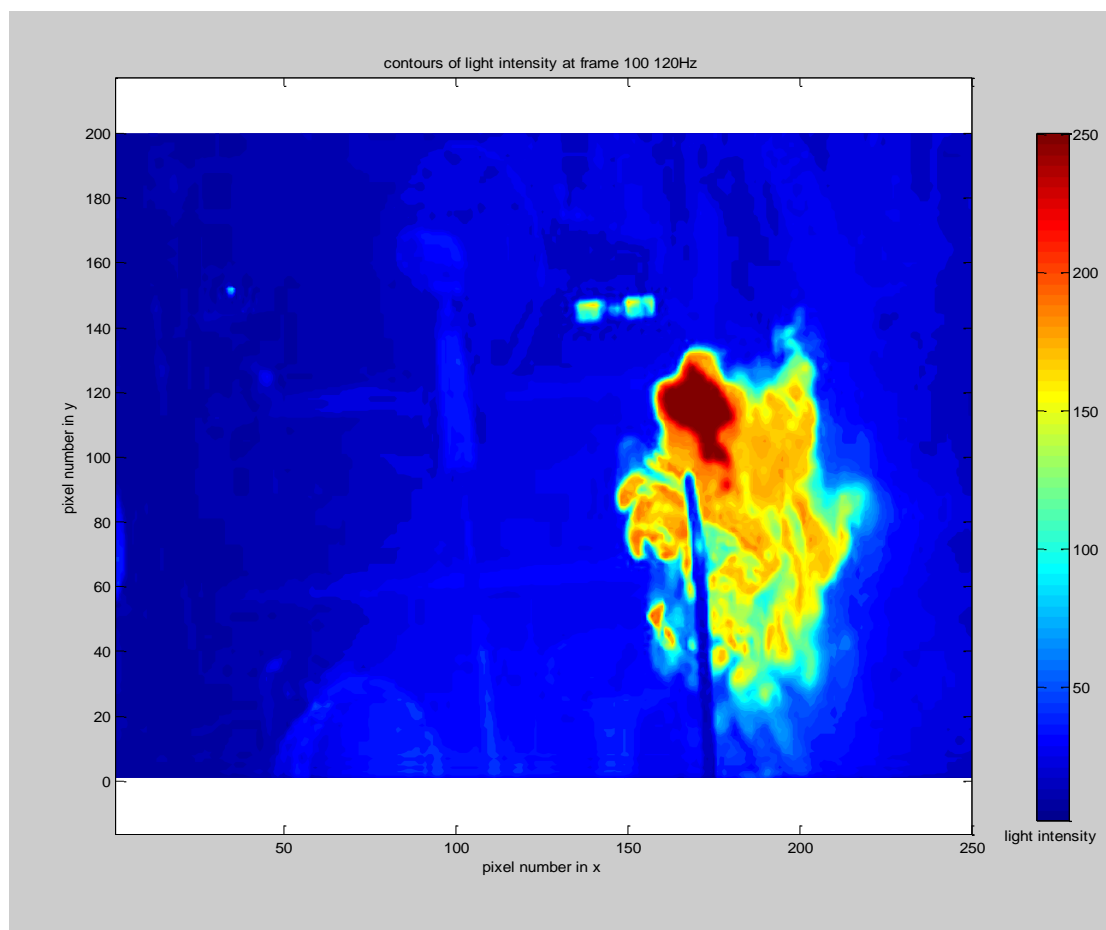
Εικόνα 3.14 60 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μεμονωμένο frame



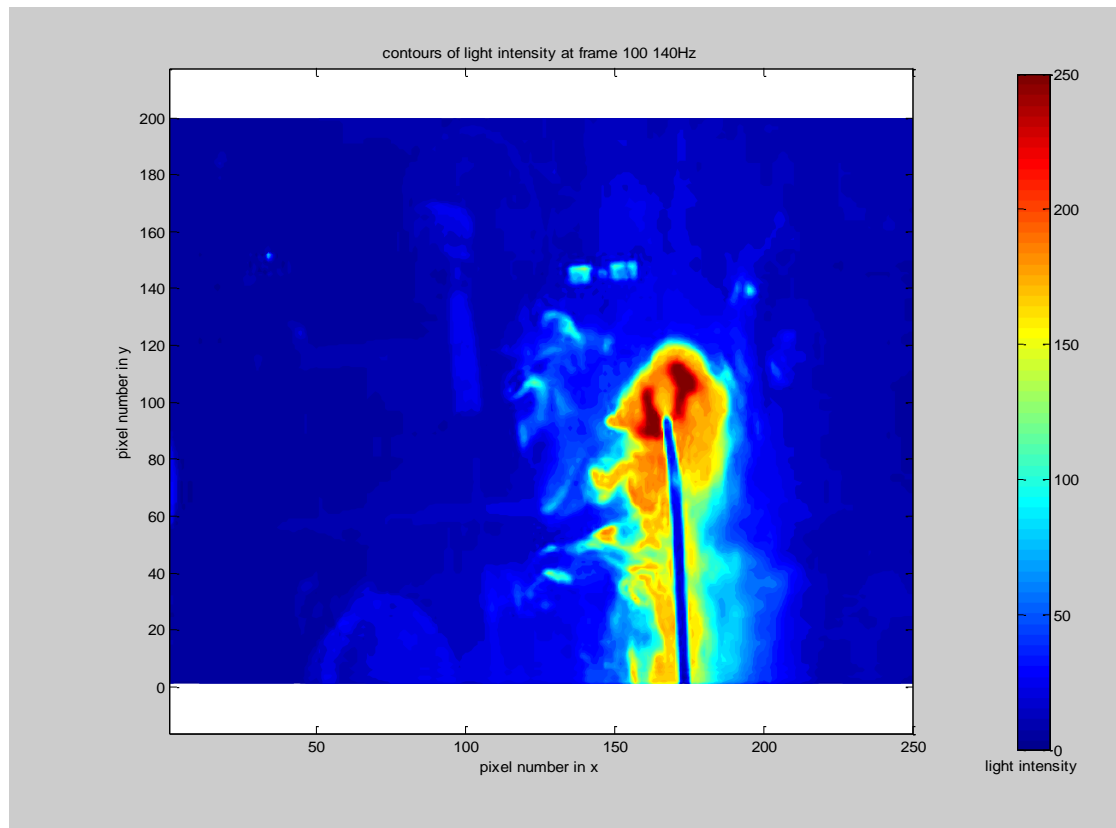
Εικόνα 3.15 80 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μεμονωμένο frame



Εικόνα 3.16 100 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεως των pixels μεμονωμένο frame



Εικόνα 3.17 120 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μεμονωμένο frame

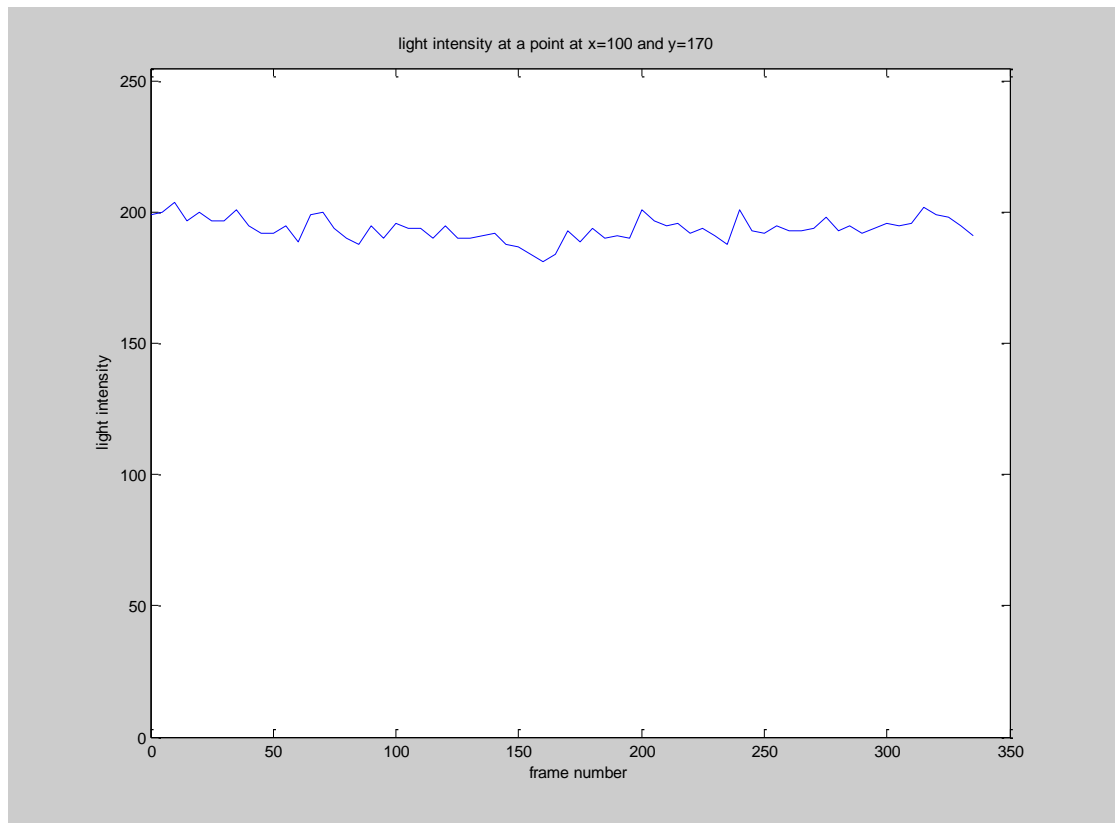


Εικόνα 3.18 140 Hz ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixels μεμονωμένο frame

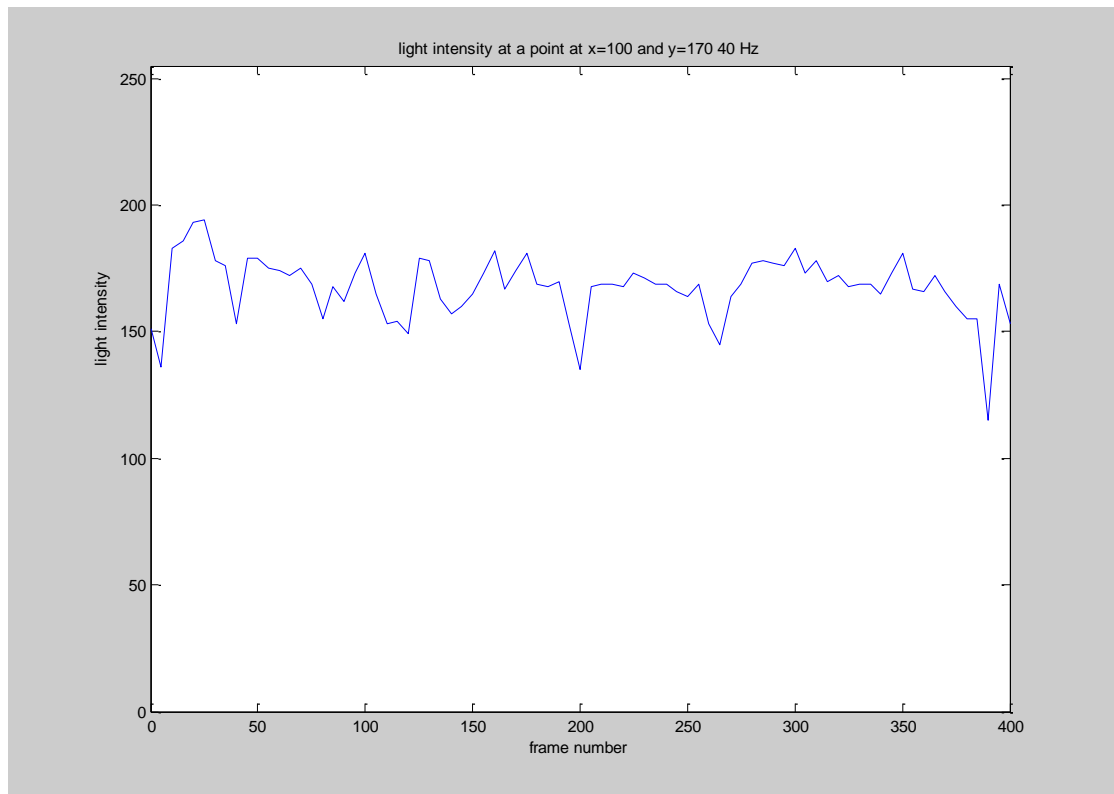
Παρατηρώντας τις εικόνες για το **100οστό frame** αντιλαμβανόμαστε παρόμοια εξέλιξη του φαινομένου όπως και στον υπολογισμό των μέσων τιμών. Αναλυτικότερα, χωρίς την παρουσία των μεγαφώνων η συγκέντρωση του καπνού βρίσκεται κοντά στην περιοχή της εξαγωγής. Με την παρουσία των μεγαφώνων αρχίζει η διασπορά του φαινομένου με την κύρια μετατόπιση πυκνής μάζης να συμβαίνει στα 50 και 60 Hz, στα 80 Hz να υποχωρεί, να επαναλαμβάνεται στα 100 Hz και στις μεγάλες συχνότητες 120 και 140 Hz να εμφανίζεται μεριορισμένη διασπορά του καπνού.

3.4.3 Διακύμανση της φωτεινότητας στο γεωμετρικό κέντρο $x=125$, $y=100$ (pixels) για κάθε συχνότητα

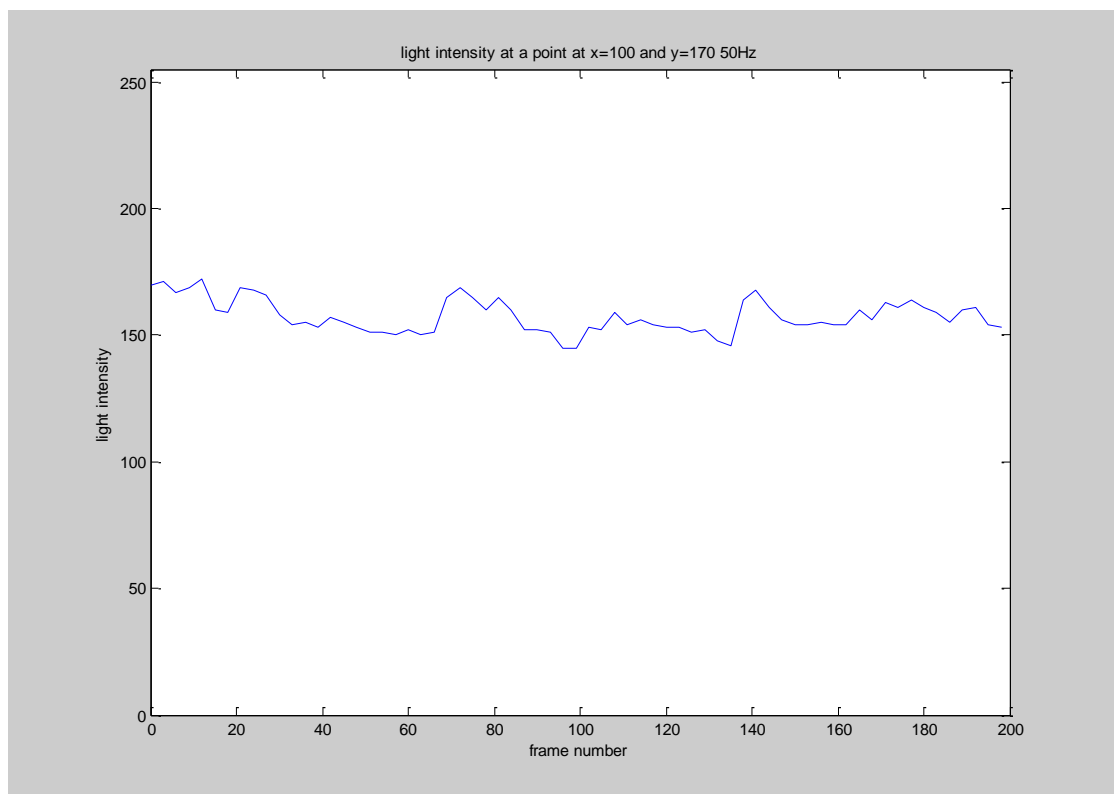
Ένας ακόμη τύπος γραφημάτων που επιλέξαμε να παρατεθεί είναι η διακύμανση της φωτεινότητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο με την διαδοχή των frames



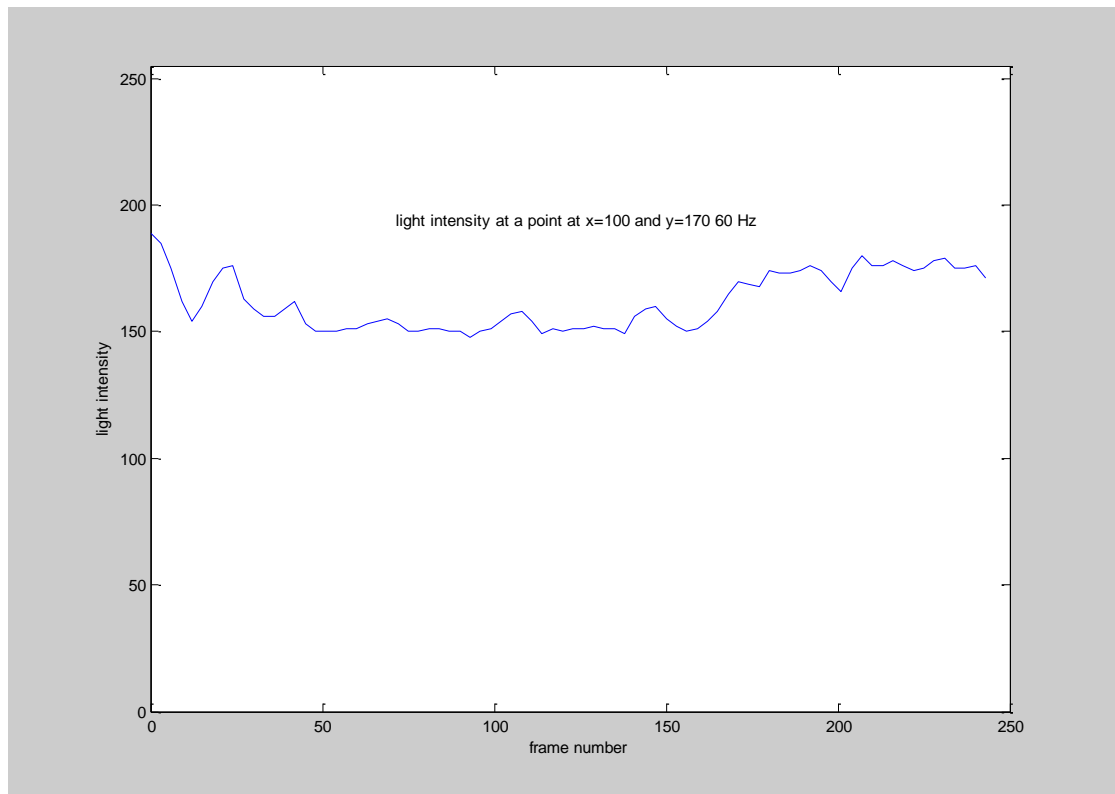
Εικόνα 3.19 no-power ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames



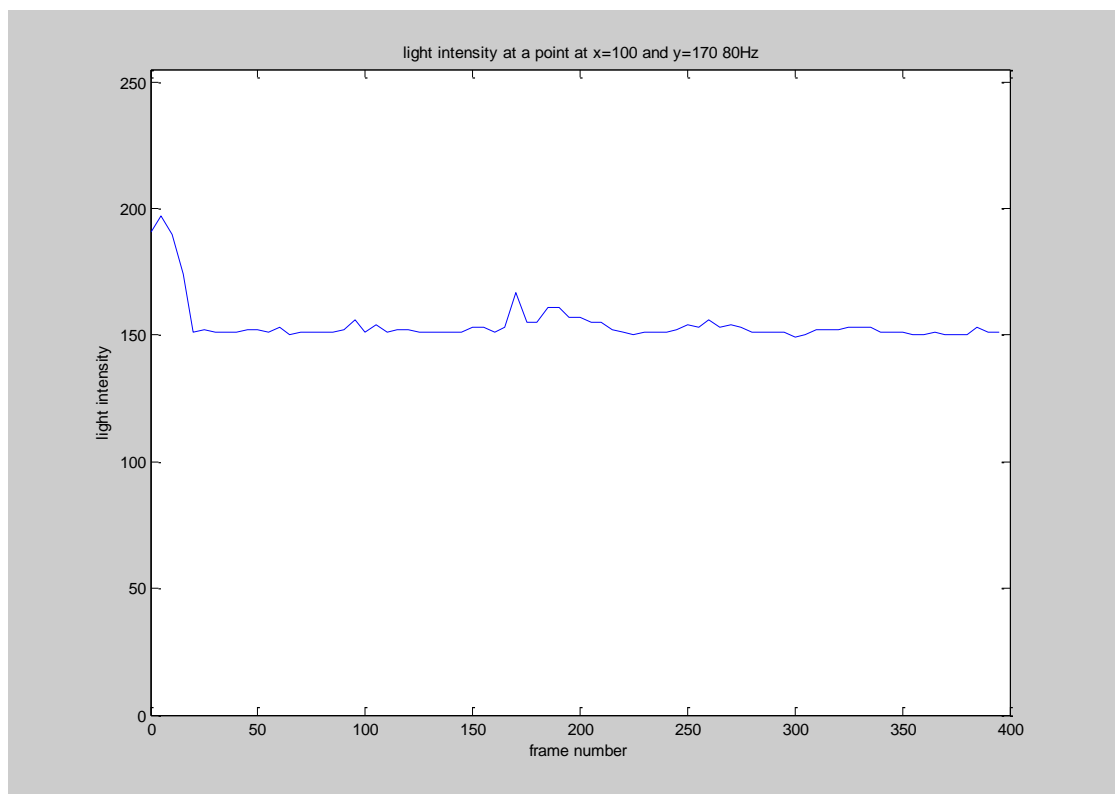
Εικόνα 3.20 40 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames



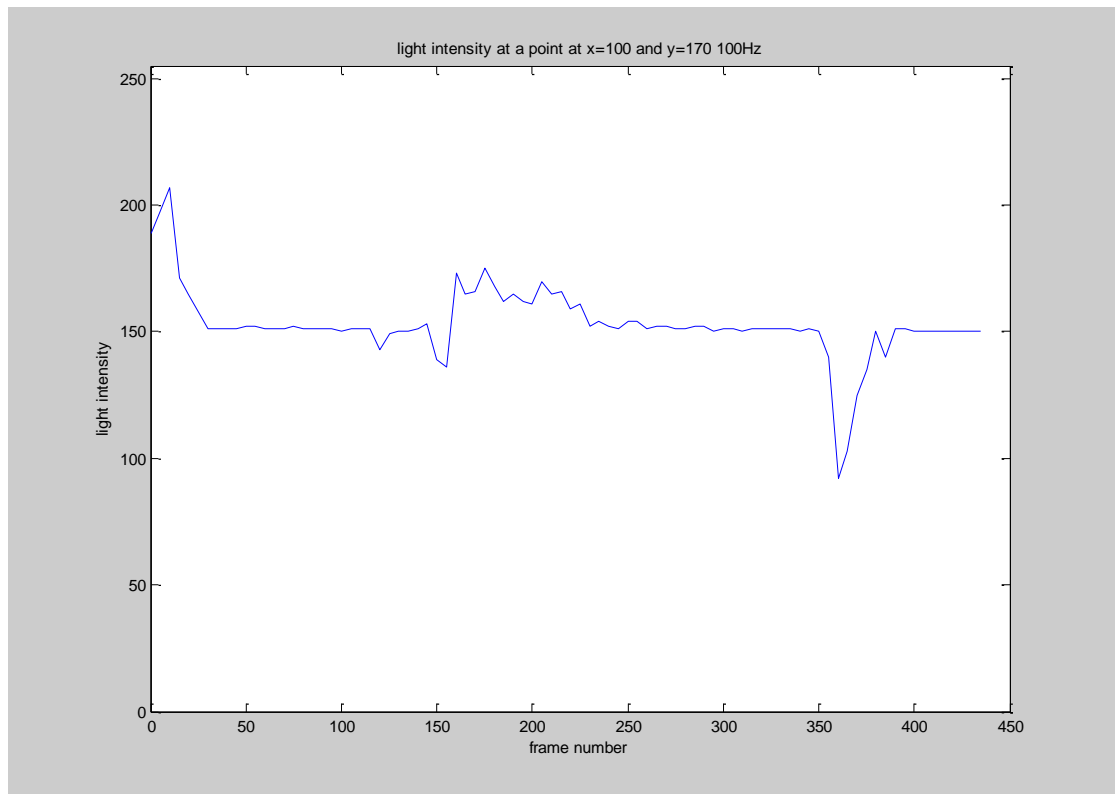
Εικόνα 3.21 50 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames



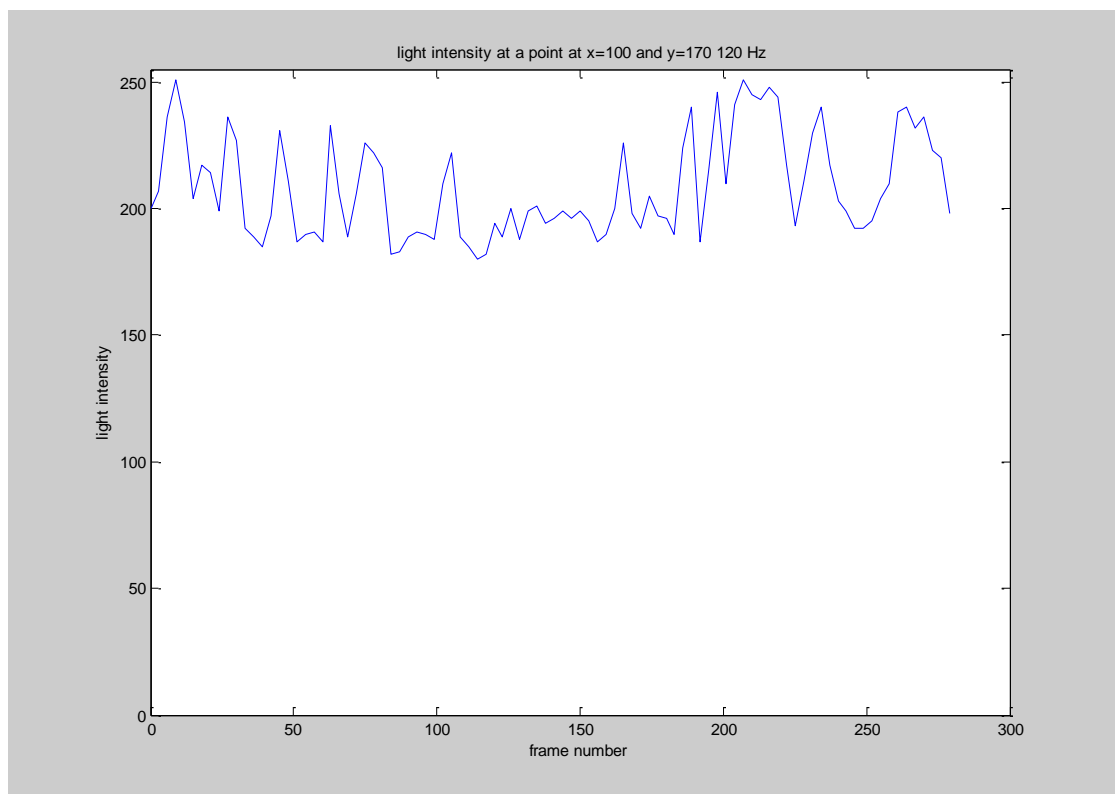
Εικόνα 3.22 60 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames



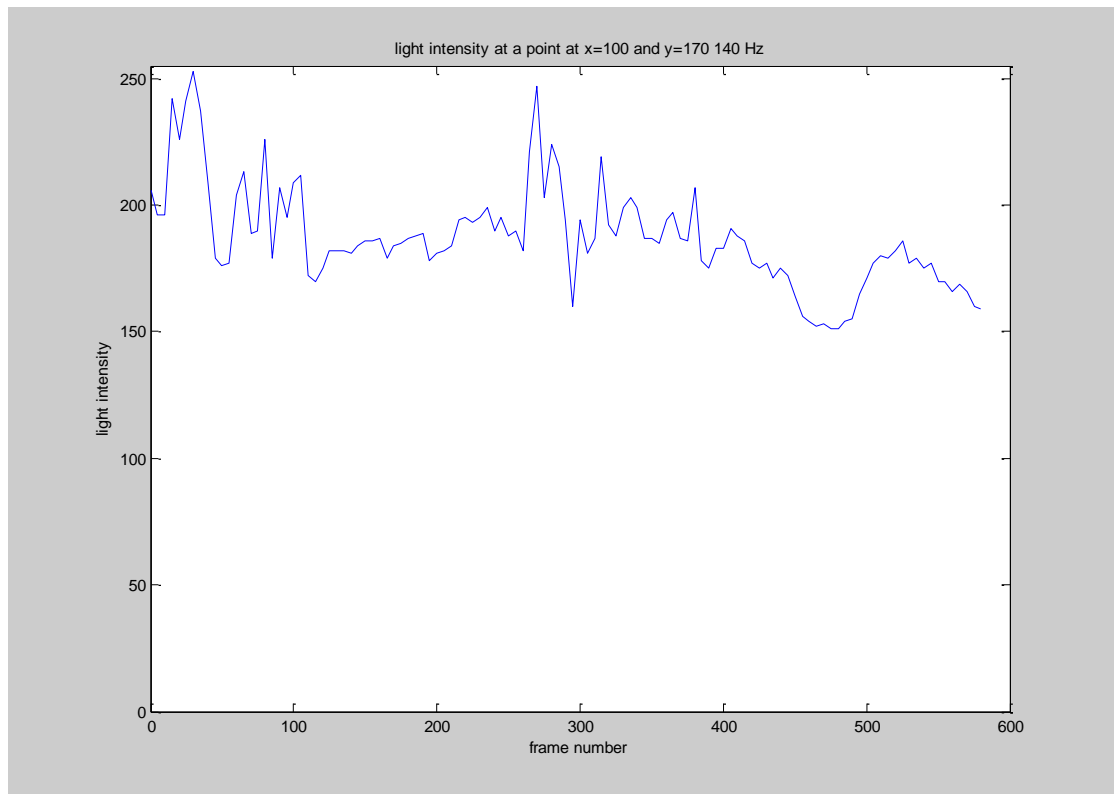
Εικόνα 3.23 80 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames



Εικόνα 3.24 100 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames



Εικόνα 3.25 120 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames

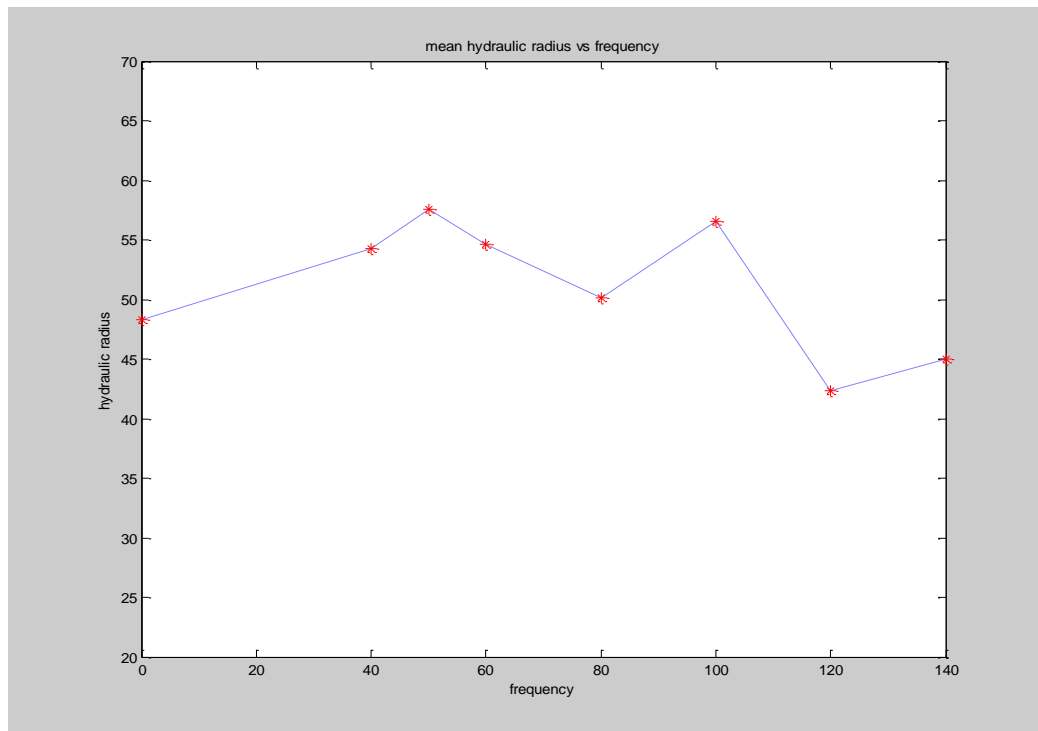


Εικόνα 3.26 140 Hz ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στο γεωμετρικό κέντρο συναρτήσει των frames

Από παραπάνω διαγράμματα το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι η μετακίνηση μάζας καπνού από το σημείο εξαγωγής του ηλεκτρικού καπνογόνου υπό την επίδραση της τύρβης που δημιουργείται από τα μεγάφωνα. Ενώ η ένταση της φωτεινότητας για την περίπτωση χωρίς μεγάφωνα κυμαίνεται γύρω στην τιμή **200**, υπό την επίδραση των μεγαφώνων ελαττώνεται στις τιμές **150-170** έως ότου ξαναγυρίσει στις τιμές 200 για τις μεγάλες συχνότητες των **120-140 Hz**, γεγονός που σηματοδοτεί την εκ νέου συγκέντρωση του καπνού και την αντίστοιχα περιορισμένη διασπορά.

3.4.4 Υδραυλική ακτίνα

Η υδραυλική διάμετρος ή ακτίνα αντίστοιχα μας δίνει το μέγεθος της έκτασης του τυρβώδους πεδίου καπνού που δημιουργήσαμε ποσοτικοποιημένα. Σε αυτό το σημείο επιλέχθηκε να δοθεί μια γραφική απεικόνιση της μέσης υπολογισμένης υδραυλικής ακτίνας για κάθε συχνότητα.



Εικόνα 3.27 Μέση υδραυλική ακτίνα συναρτήσει της συχνότητας των μεγαφώνων

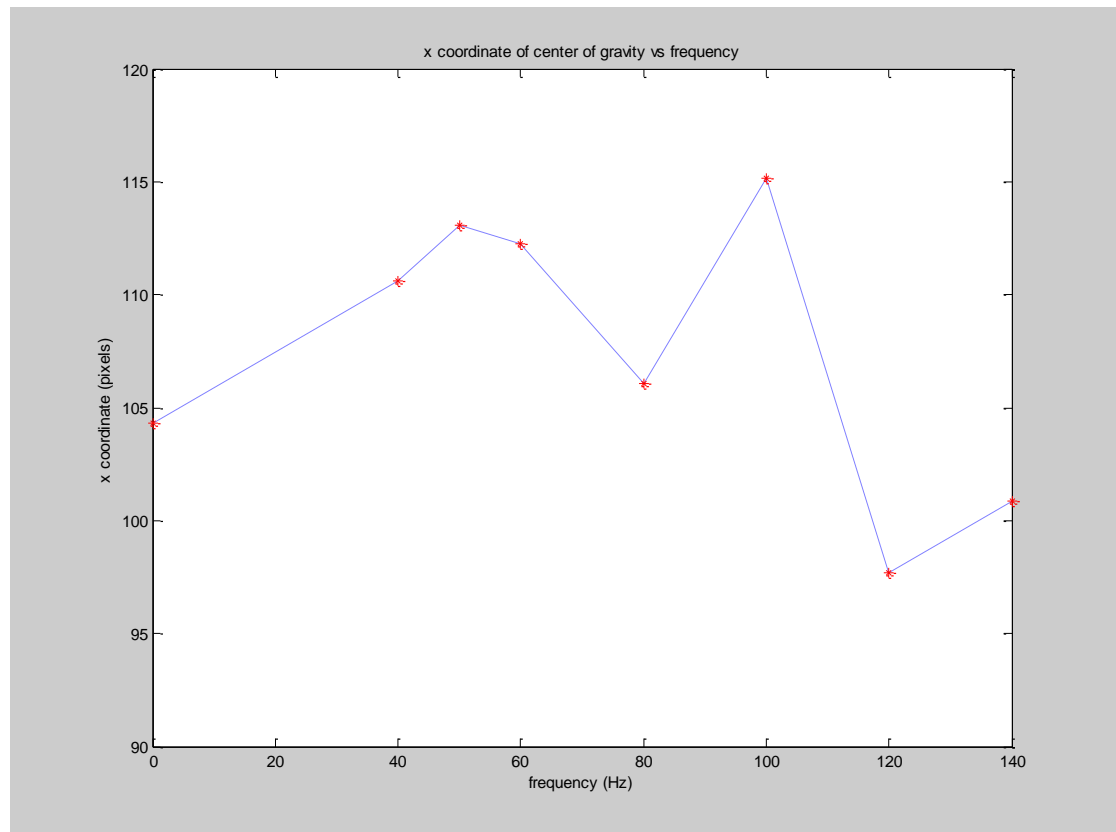
Όπως προκύπτει από το σχήμα την πιο έντονη έκταση τη συναντάμε στα 50 κι 100 Hz, με τις συχνότητες των 40 κι 60 Hz να διακρίνονται από υψηλή τιμή της ακτίνας, τη στιγμή που έχουμε έντονη υποχώρηση στα 120 και 140 Hz.

3.4.5 Κέντρο Βάρους

Μια ποσοτικοποιημένη ένδειξη της θέσης και της μετατόπισης της τυρβώδους μάζας του καπνού είναι το κέντρο βάρους του που υπολογίζεται σε **(x,y)** συντεταγμένες σε μονάδες **pixels**. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι ο υπολογισμός της οριζόντιας μετατόπισης του κέντρου βάρους με τη συχνότητα είναι αντίθετος με τη σχηματική απεικόνιση που εξάγεται από τα γραφήματα που παρατέθηκαν πιο πάνω για την φωτεινή ένταση. Αυτό έγινε διότι το Matlab εισάγοντας τις εικόνες τις αντέστρεφε από πάνω προς τα κάτω. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να περιστραφεί το μητρωό έτσι ώστε ο κατακόρυφος προσανατολισμός να είναι ο αληθής έτσι ώστε να μπορέσουν να συμπεριληφθούν τυχόν ανωστικά φαινόμενα κι η φυσική συναγωγή και να είναι ρεαλιστική η απεικόνισή μας. Ο οριζόντιος προσανατολισμός δεν είχε κάποια ιδιαίτερη φυσική σημασία για το φαινόμενο. Σε αυτό το σημείο όμως δίνονται οι πραγματικές αριθμητικές ποσότητες έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν σαν

αναφορά για τη σύγκριση κατά την οριζόντια μελέτη της θερμαινόμενης αντίστασης υπό το τυρβώδες πεδίο που θα ακολουθήσει στη συνέχεια.

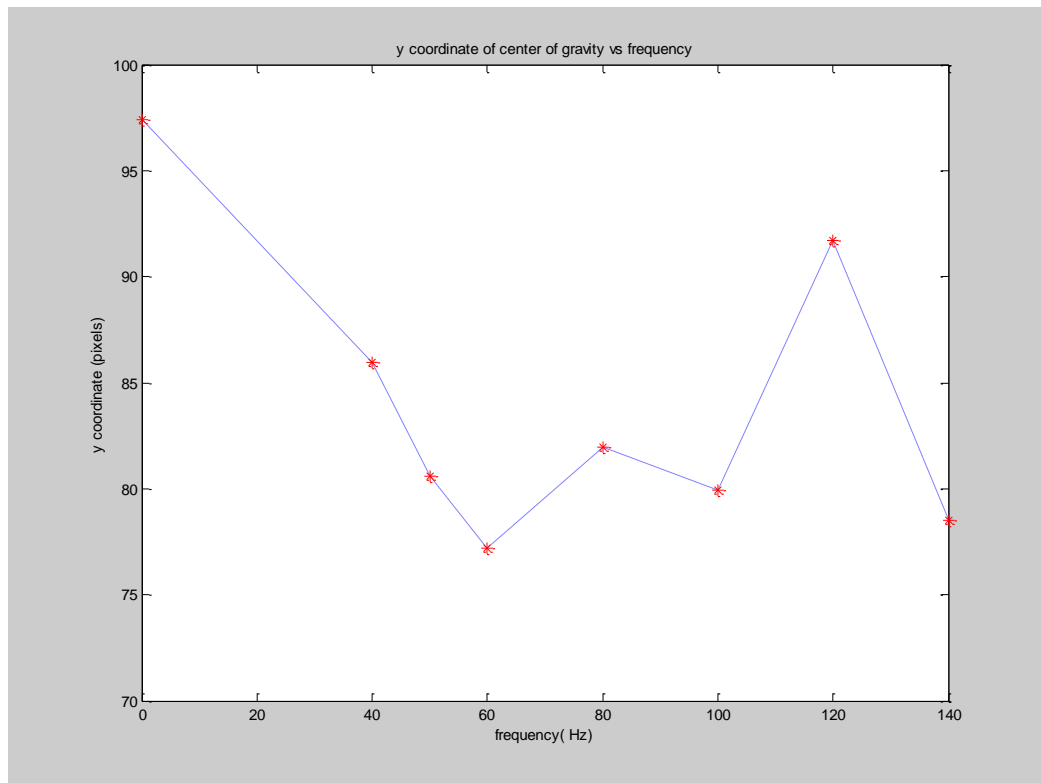
Στη συνέχεια παρατίθεται η γραφική παράσταση της x συντεταγμένης του κέντρου βάρους με τη συχνότητα.



Εικόνα 3.28 οριζόντια συνιστώσα x του κέντρου βάρους συναρτήσει της συχνότητας των μεγαφώνων

Όπως διακρίνεται κι από το σχήμα το πλούμιο μετατοπίζεται προς τα δεξιά υπό την επιδραση των μεγαφώνων και ξαναγυρνάει στην αρχική του θέση στις μεγάλες συχνότητες.

Στη συνέχεια παρατίθεται η γραφική παράσταση της y συντεταγμένης του κέντρου βάρους με τη συχνότητα.

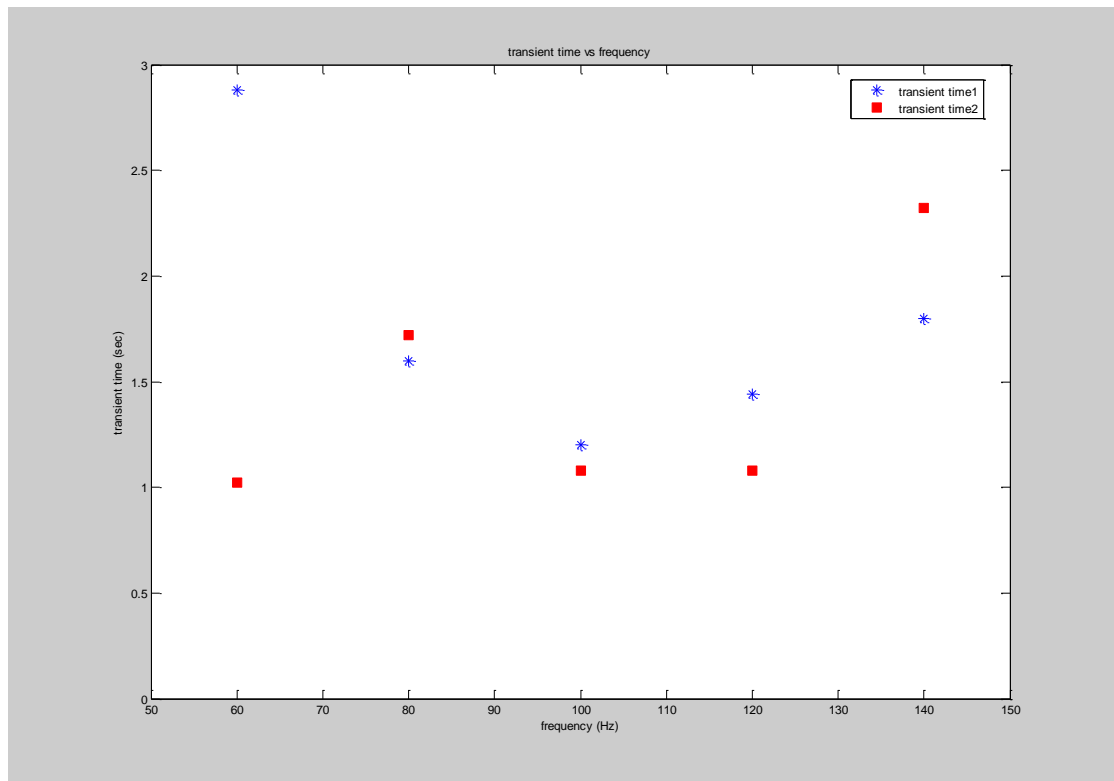


Εικόνα 3.29 κατακόρυφη συνιστώσα y του κέντρου βάρους συναρτήσει της συχνότητας των μεγαφώνων

Από το παραπάνω σχήμα είναι εύκολο να διακρίνει κανείς ότι ο ηχητικός παλμός των μεγαφώνων ωθεί το πλούμιο σε μια καθοδική κίνηση σε σχέση με την "νεκρή κατάσταση".

3.4.6 Χρόνοι μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση (transient times)

Σε αυτό το εδάφιο παρουσιάζεται ο χρόνος μετάβασης (**transient time1**) από την κατάσταση χωρίς την επενέργεια της τύρβης στη μόνιμη κατάσταση με επενέργεια και αντίστροφα ο χρόνος μετάβασης κατά το σβήσιμο των ηχείων (**transient time2**). Το κριτήριο που επιλέχθηκε αποτέλεσε η σύγκλιση της κατακόρυφης συντεταγμένης του κέντρου βάρους στην τιμή στη μόνιμη κατάσταση.



Εικόνα 3.30 Χρόνοι μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση κατά το άνοιγμα και το σβήσιμο των μεγαφώνων συναρτήσει της συχνότητας

Παρατηρείται ότι τόσο ο transient time1 κι ο transient time 2 κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών **[1,3] sec**. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι transient time1 με την αύξηση της συχνότητας μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται ξανά. Παράλληλη πορεία για τις συχνότητες άνω των 80 Hz παρουσιάζει κι ο transient time2.

Μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη αντίσταση-επιφανειακή θερμοκρασία-μεταβατική κατάσταση

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μελέτη της επίδρασης της τύρβης σε θερμαινόμενο κυλινδρικό αγωγό. Συγκεκριμένα εξετάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή σε όλο το μήκος του αγωγού κατά τη φάση της θέρμανσης, της μόνιμης κατάστασης και τέλος της ψύξης.

4.1 Πειραματική διάταξη

Ο αγωγός που χρησιμοποιήθηκε εν προκειμένω ήταν μια αντίσταση σιδήρου, μήκους $l=54 \text{ cm}$ και διαμέτρου $d=6.5 \text{ mm}$. Τοποθετήθηκε σε μια ειδική διάταξη σχήματος **V** που δημιουργήθηκε για την περίπτωση και τοποθετήθηκε με τρόπο ώστε το μέσο του να συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του πλαισίου της επιβαλλόμενης τύρβης. Στους ακροδέκτες της αντίστασης εφαρμόζοταν η τάση η οποία παρήγετο από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων μας η ισχύς παρέμενε σταθερή στην τιμή $P=61 \text{ V} \cdot 0.70 \text{ A}=42.7 \text{ W}$ ή ισοδύναμα $P=42.7/\pi \cdot d^2 \cdot l=596 \text{ kW/m}^3$.



Εικόνα 4.1 α) αντίσταση $d=6.5 \text{ mm}$ β) γεννήτρια συνεχούς ρεύματος

4.2 Υπολογιστική μεθοδολογία - διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων

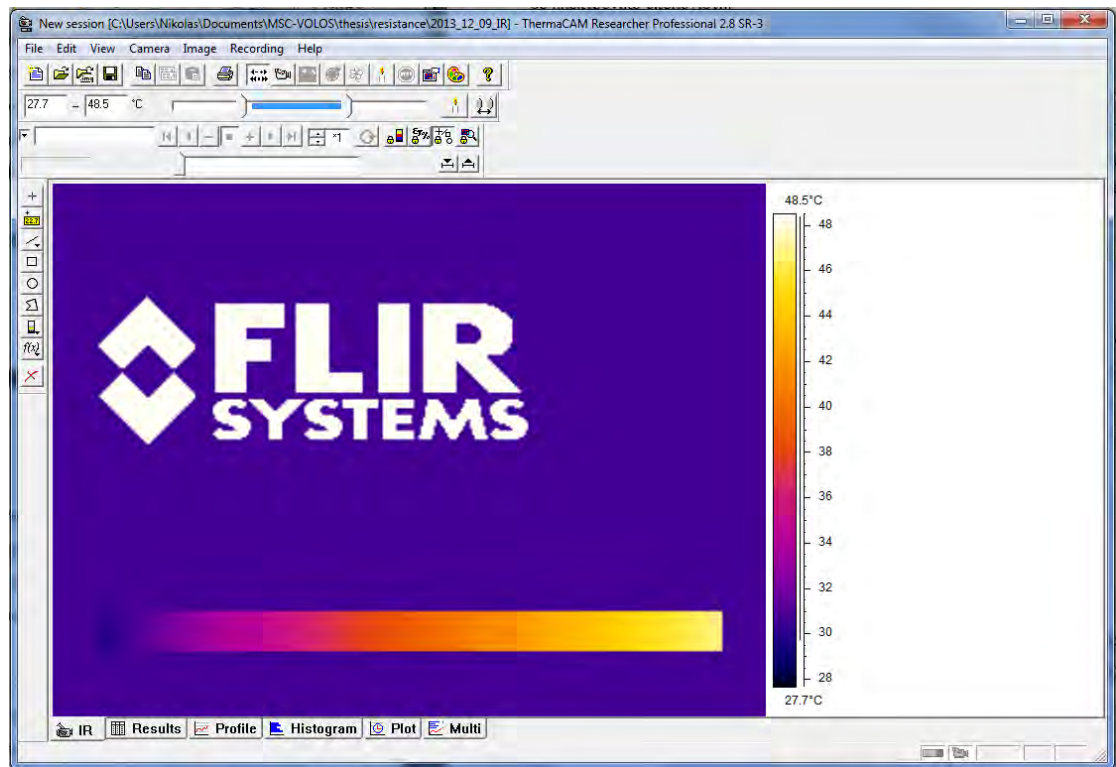
Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων των πειραμάτων βασίστηκε στην καταγραφή της βιντεοσκόπησης της αντίστασης κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης σε αυτή των πειραμάτων από τη θερμοκάμερα και στην επεξεργασία της βιντεοσκόπησης πρωταρχικά με το λογισμικό της θερμοκάμερας. Οι εξαχθείσες μετρήσεις δε από το λογισμικό αναλύθηκαν στη συνέχεια με τη βοήθεια του **Microsoft Excel**, **Matlab** κι **Origin lab**.

4.3 Επεξεργασία με ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR-3

Το λογισμικό **ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR-3** αποτελεί τη διεπιφάνεια (interface) της βιντεοκάμερας με βάση το οποίο έχουμε τη δυνατότητα να καταγράφουμε την εικόνα την οποία λαμβάνει η θερμοκάμερα και στη συνέχεια να την υποβάλλουμε σε περαιτέρω επεξεργασία.

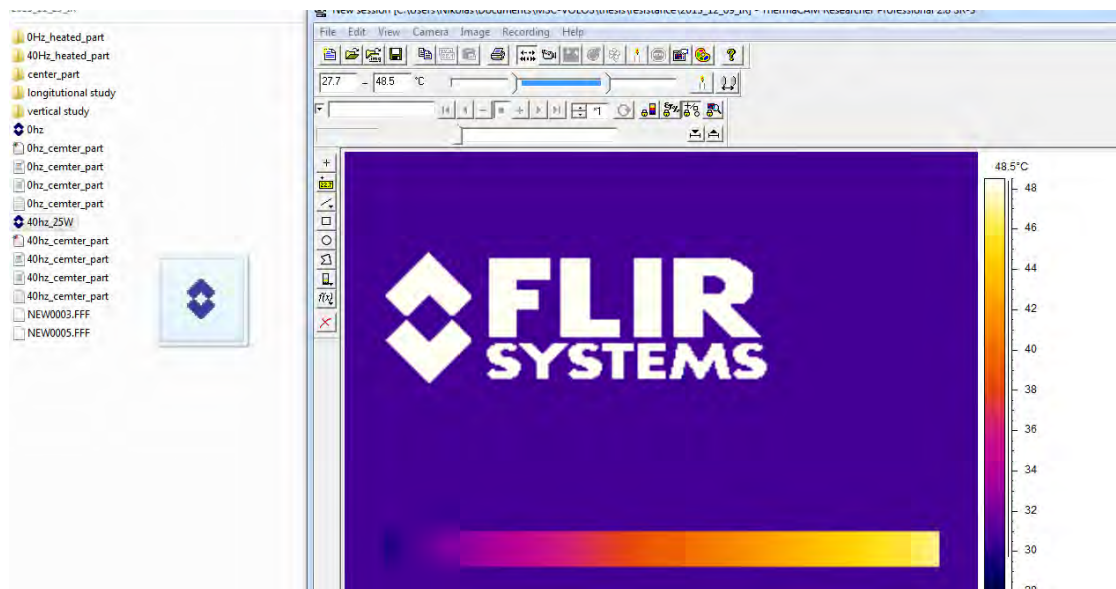
Στη συγκεκριμένη περίπτωση της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε η καταγραφή του βίντεο για κάθε πείραμα ξεχωριστά που επιχειρήθηκε στην αντίσταση. Στην συνέχεια τα βίντεο αποθηκεύτηκαν στην μνήμη του υπολογιστή με σκοπό την επεξεργασία τους στη συνέχεια από το ίδιο λογισμικό. Στο σημείο αυτό, δίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας η οποία ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Αρχικά ανοίγουμε το interface του λογισμικού



Εικόνα 4.2 interface ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR-3

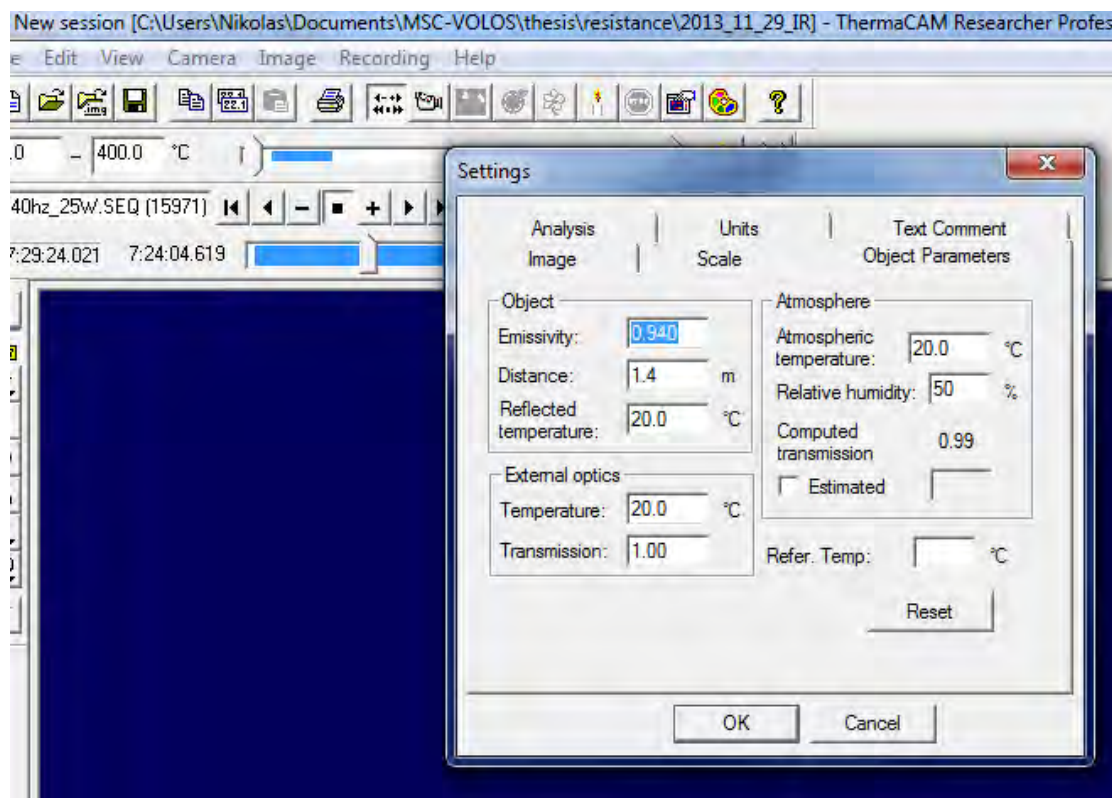
Στη συνέχεια βρίσκουμε το αποθηκευμένο video στον υπολογιστή μας και εισάγουμε(σύρουμε μέσα στη διεπιφάνεια)



Εικόνα 4.3 εισαγωγή IR video στο λογισμικό επεξεργασίας

Αφού έχει εισαχθεί το video μέσα στο λογισμικό, στη συνέχεια ρυθμίζουμε τις παραμέτρους που αφορούν την περίπτωση μας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή **image-settings** και διαλέγουμε από το αναδυόμενο μενού τις ρυθμίσεις που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε. Το σημαντικότερο πεδίο για την εξαγωγή

σωστών αποτελεσμάτων αποτελεί το πεδίο **object parameters**. Στο σημείο αυτό για τη συγκεκριμένη περίπτωση που θα μελετήσουμε στη συνέχεια δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:



Εικόνα 4.4 ρύθμιση των παραμέτρων

emissivity=0.94: αφορά στον συντελεστή εκπομπής της θερμαινόμενης επιφάνειας, όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα μιας στερεής επιφάνειας τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής εκπομπής. Η τιμή που επιλέχθηκε για εμάς αφορά ανεπεξέργαστο χυτό σίδηρο. Τίμες για τους συντελεστές εκπομπής είναι δυνατό να ανευρεθούν από το πεδίο **help→emissivity tables** που παρέχει το ίδιο το λογισμικό για κάθε υλικό κι αν'τιστοιχη κατεργασία.

distance=1.4 m: Αφορά την απόσταση του φακού της θερμοκάμερας από το προς εξέταση στερεό αντικείμενο.

Reflected temperature=20° C: Αφορά τη θερμοκρασία των αντικειμένων που γειτνιάζουν με το προς εξέταση αντικείμενό μας κι επιλέχθηκε να είναι ίση με την ατμοσφαιρική

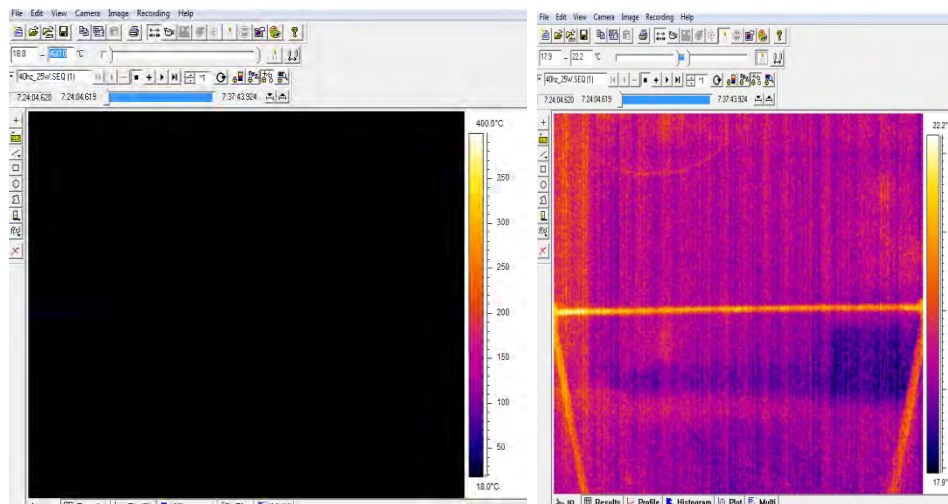
Atmospheric temperature=20°C: η ατμοσφαιρική θερμοκρασία την εποχή εκτέλεσης των πειραμάτων

relative humidity=0.5: η σχετική υγρασία που επικρατούσε στο χώρο τη στιγμή εκτέλεσης των πειραμάτων

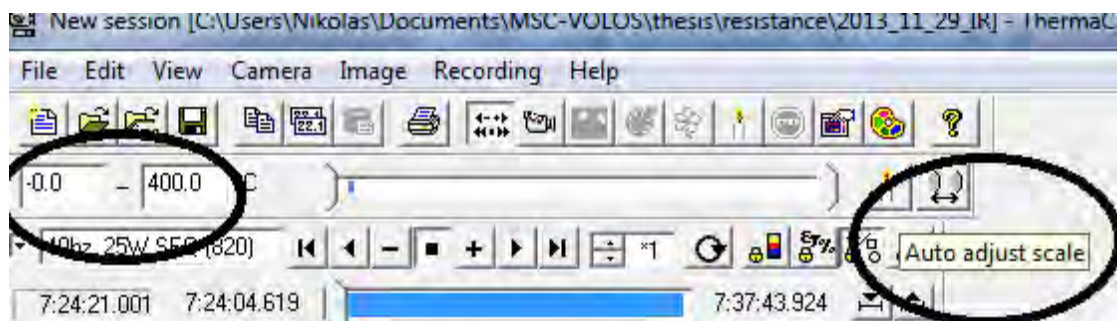
Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η αυστηρότητα που πρέπει να ακολουθηθεί στον καθορισμό των τιμών αυτών διότι επηρεάζονται στον τύπο υπολογισμού της θερμοκρασίας από τη θερμοκάμερα, όπως αυτός δίνεται από το αντίστοιχο κεφάλαιο της διπλωματικής όπου περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της θερμοκάμερας.

Ρύθμιση θερμοκρασιακού εύρους

Γνωρίζοντας εκ των προτέρων τη φύση του προβλήματος που εξετάζει κανείς είναι δυνατό να ρυθμίσει ένα θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο θα κυμανθεί το φαινόμενο και ταυτόχρονα να αντιλαμβάνεται την εξέλιξή του με βάση την εικόνα. Για αυτό το λόγο ρυθμίστηκε το θερμοκρασιακό εύρος στην περίπτωση μας σε **[18,400]° C**. Αρχικά όπου η θερμοκρασία ήταν ομοιόμορφη στους **20°C** η εικόνα με βάση την υπέρυθρη ακτινοβολία ήταν όλη μαύρη με βάση την χρωματική κλίμακα. Στη συνέχεια όμως που η θερμοκρασία της αντίστασης άρχισε να αυξάνει, το χρώμα της άρχισε να μεταβάλλεται προς πιο ανοιχτές αποχρώσεις (μωβ) δίνοντάς μας έτσι την αίσθηση του φαινομένου. Παρόλαυτά για να εντοπιστεί το αντικείμενό μας σε περίπτωση που ακόμα δεν έχει εξελιχθεί το φαινόμενο και δεν υπάρχουν οι απαιτούμενες θερμοκρασιακές διαφορές για τη διάκριση των αντικειμένων σε ένα τόσο μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος υπάρχει η δυνατότητα της αυτόματης ρύθμισης του θερμοκρασιακού εύρους με την εντολή **auto-adjust-scale** που λαμβάνει ως όρια την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία που αντιλαμβάνεται η θερμοκάμερα κι έτσι τα διάφορα αντικείμενα ξεχωρίζουν με βάση τις πολύ μικρές θερμοκρασιακές τους διαφορές που γίνονται αντιληπτές σε αυτό το επίπεδο.



Εικόνα 4.5 α) μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος β)θερμοκρασιακόεύρος με auto adjust scale



Εικόνα 4.6 ρύθμιση θερμοκρασιακού εύρους

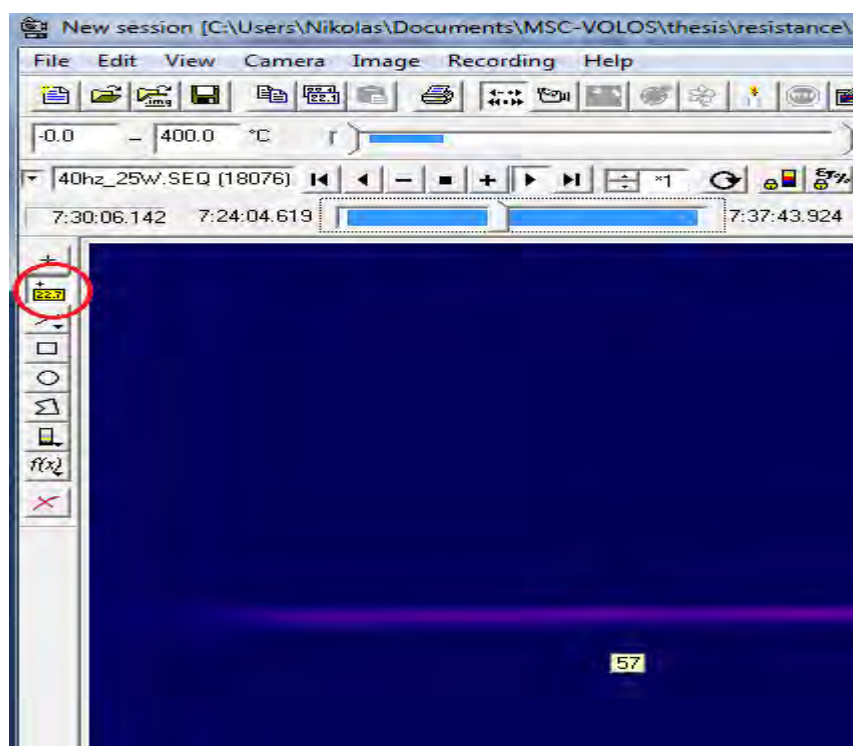
4.3.1 Επιλογή σημείων προς μελέτη

Όσα προηγήθηκαν ως τώρα αφορούσαν την εξοικείωση με το λογισμικό της θερμοκάμερας και το σωστό στήσιμο του προβλήματος. Επόμενο βήμα αποτέλεσε η λήψη των αντιπροσωπευτικών εκείνων τιμών θερμοκρασίας πάνω στην αντίσταση που θα αποτελούσαν τα δεδομένα για προς επεξεργασία για την εξαγωγή των συμπερασμάτων μας.

Η διαδικασία περιελάμβανε την αναπαραγωγή του video και την ταυτόχρονη καταγραφή των επιλεγμένων τιμών κατά τη διάρκειά του.

Η αναπαραγωγή του video επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού δίνοντάς μας την εξέλιξη στο πεδίο του **"IR image"**, παρέχοντάς μας παράλληλα τη δυνατότητα να επιλέξουμε την αρχή και το τέλος καθώς και την ταχύτητα που θέλουμε να επιτύχουμε ρυθμίζοντας το χρονικό βήμα, όπως ένα κοινό **"media**

player" . Συγχρόνως παρέχεται η δυνατότητα να βλέπουμε τη τιμή της θερμοκρασίας σε σημεία ή ολόκληρες περιοχές σημείων. Η συνεχής μετακίνηση μέσα στο IR image γίνεται με το **flying spotmeter**, ενώ υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης σταθερών γεωμετρικών στοιχείων σημείου, γραμμής, ορθογωνίου κύκλου, πολυγώνου (spotmeter, line, box area, circle)



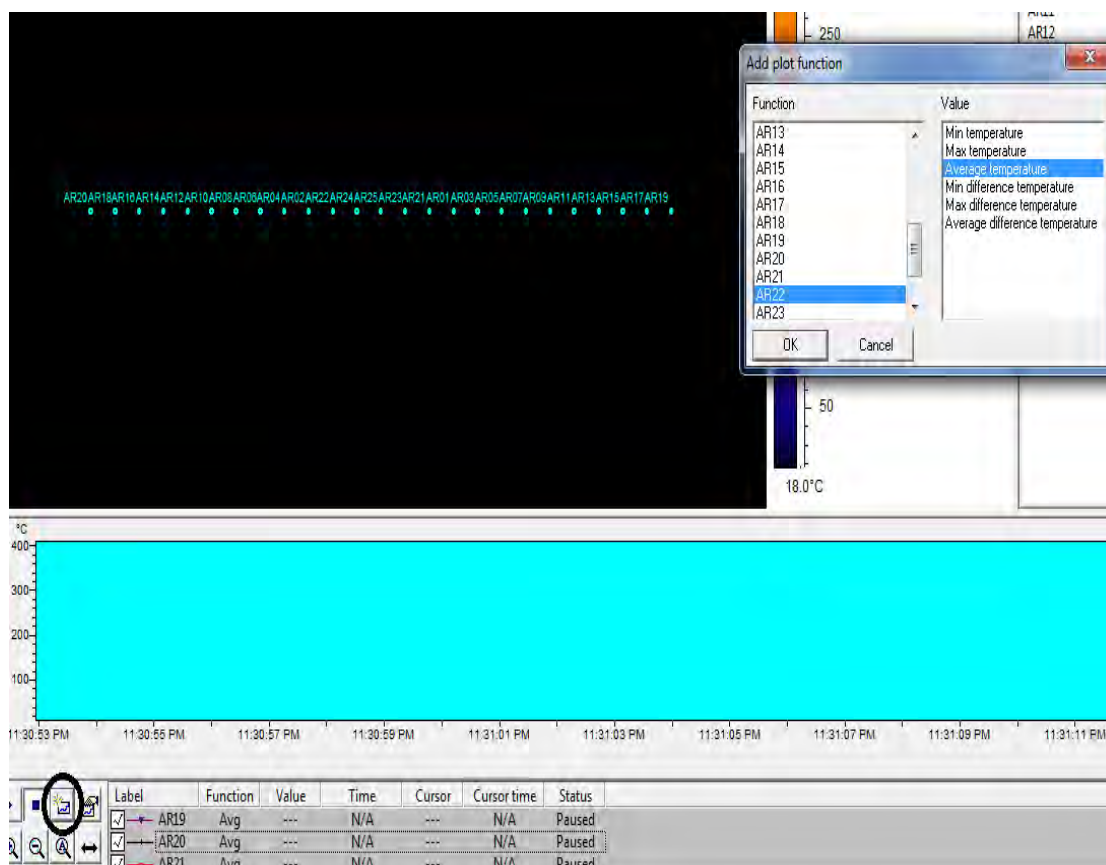
Εικόνα 4.7 ανίχνευση θερμοκρασίας σε μια περιοχή

Στην προκειμένη περίπτωση επιλέξαμε να εργαστούμε όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Κατά το διαμήκη άξονα της αντίστασης τοποθετήσαμε τετράγωνα χωρία στον κεντρικό άξονά της, όπου το καθένα είχε διάσταση **1x1 pixel²** . Γνωρίζοντας ότι η συνολική αντίσταση έχει μήκος **530 mm** κι υπολογίζοντας στην εικόνα ότι το συνολικό μήκος αντιστοιχεί σε **320 pixel**, συνάγεται ότι **1pixel=530mm/320=1.65 mm**. Επιλέχθηκε η ελάχιστη δυνατή διάσταση που μας παρείχε το πρόγραμμα για να υπάρξει στη συνέχεια η δυνατότητα μελέτης της μεταφοράς θερμότητας σε όσο γίνεται απειροστό σημείο. Επιλέχθηκαν προς μελέτη τα σημεία με οριζόντια απόσταση από το κέντρο 0 [0, ±120 pixels]. Τα άκρα της αντίστασης αγνοήθηκαν διότι σε αυτά παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση δεν ελάμβανε την αντίστοιχη θέρμανση και με αυτόν το τρόπο δεν επηρεάστηκαν τα αποτελέσματά μας στην περιοχή ενδιαφέροντος.

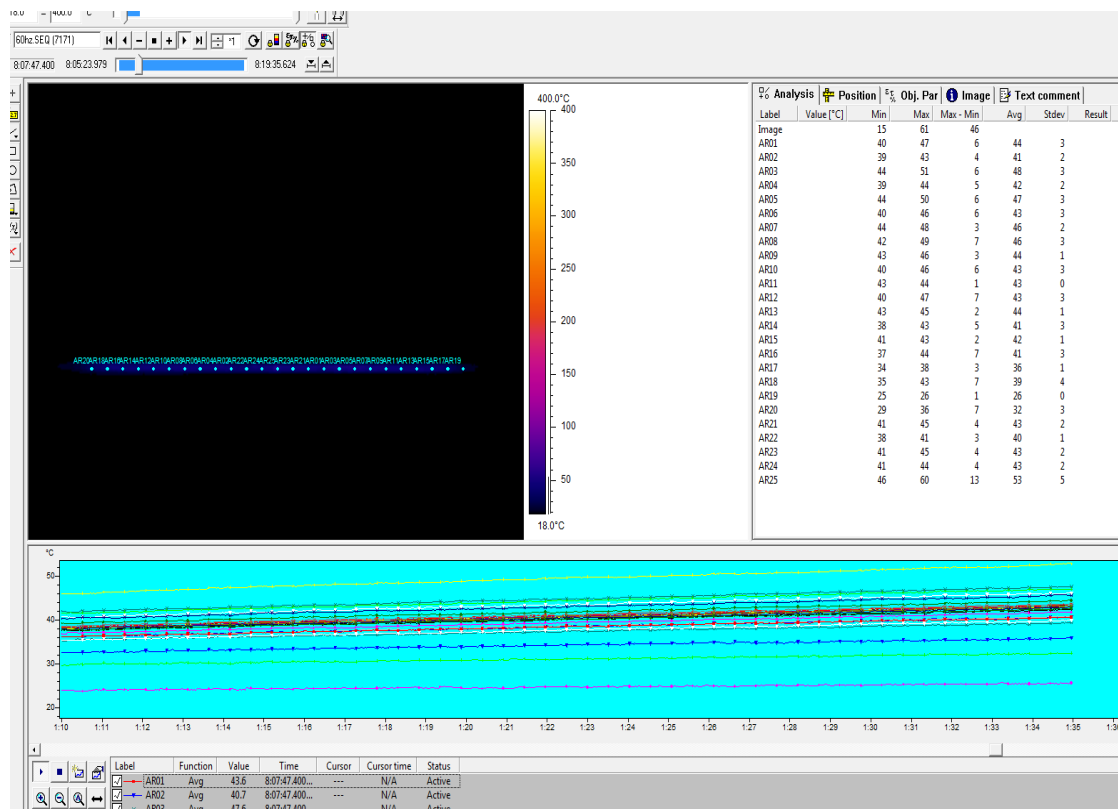
Για την παρακολούθηση του φαινομένου σε αυτά τα σημεία επιλέχθηκε να δημιουργηθεί το **γράφημα (plot)** θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια αναπαραγωγής του video. Το συγκεκριμένο πραγματοποιήθηκε με την εντολή **add plot function** από τη οποία δίνεται να επιλεγεί η **μέγιστη, η ελάχιστη ή ακόμα κι η μέση** θερμοκρασία για το χωρίο το οποίο επιλέγουμε. Το χρονικό βήμα δε της αναπαραγωγής επιλέχθηκε να τεθεί ίσο με την περίοδο λήψης της κάμερας=**0.02 seconds**. Αναλυτικότερα δίνονται τα βήματα με εικόνες:



Εικόνα 4.8 ορισμός περιοχών 1x1 pixel κατά μήκος της αντίστασης προς μελέτη

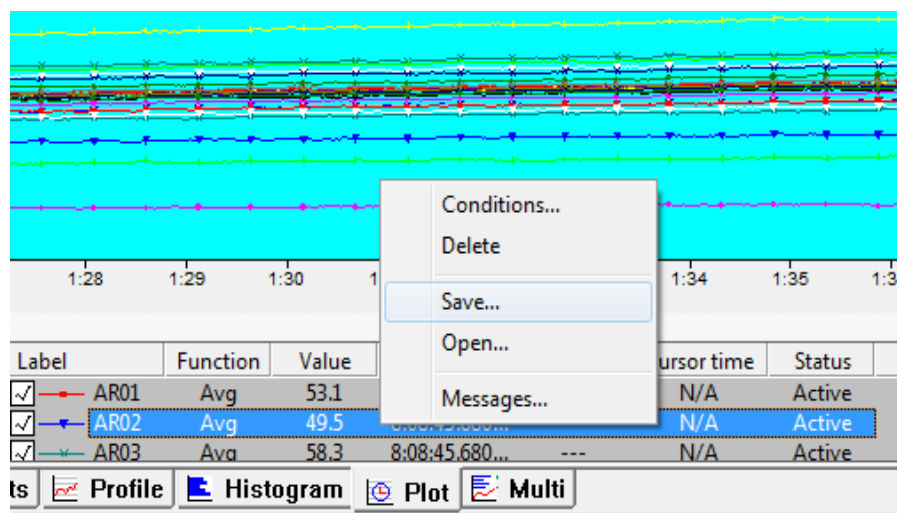


Εικόνα 4.9 ορισμός της μέσης θερμοκρασίας για κάθε επιλεγμένη περιοχή προς καταγραφή και κατασκευή το αντίστοιχον διαγράμματος



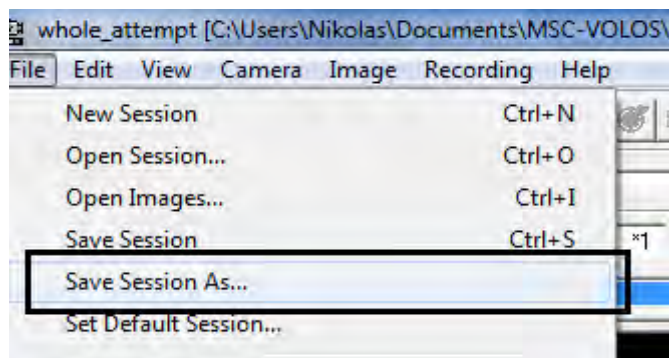
Εικόνα 4.10 κατασκευή των διαγραμμάτων για τις συναρτήσεις που επιλέχθηκαν

Σε τελική φάση αποθηκεύεται το κάθε γράφημα που έχει παραχθεί, όχι όμως σαν εικόνα αλλά σαν χρονοσειρά δεδομένων θερμοκρασίας σε αρχείο **txt**, το οποίο είναι κατάλληλο όμως για επεξεργασία από υπολογιστικά λογισμικά.



Εικόνα 4.11 αποθήκευση της χρονοσειράς των συναρτήσεων που καταγράφηκαν

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι είναι δυνατό να αποθηκευτεί το συγκεκριμένο στήσιμο για το πρόβλημα με σκοπό την επεξεργασία ενός άλλου πειράματος με τις ίδιες επιθυμητές επιλογές.



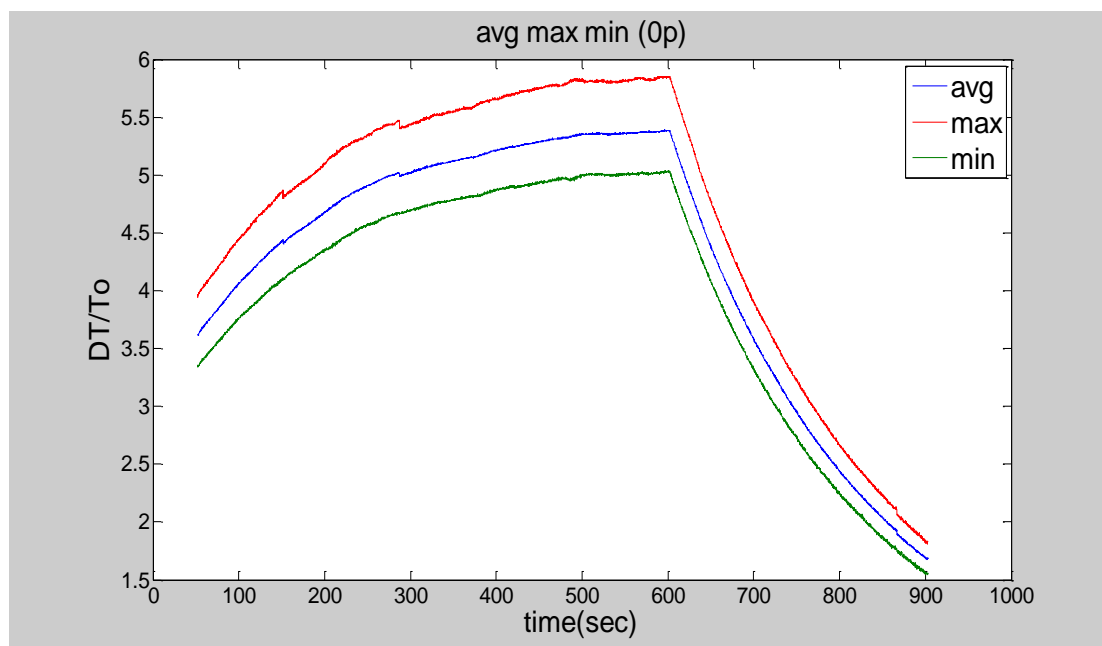
Εικόνα 4.12 αποθήκευση των ρυθμίσεων για τη συγκεκριμένη επεξεργασία προς μελλοντική χρήση για άλλο IR video

4.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

4.4.1 Θερμοκρασιακά εύρη

Σε αυτό το σημείο παρατίθενται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων των μετρούμενων θερμοκρασιών από τη θερμοκάμερα για διαφορετικά σημεία πάνω στην αντίσταση.

Το πρώτο διάγραμμα που παρουσιάζεται είναι αντιπροσωπευτικό της εξέλιξης του φαινομένου κατά τη διάρκεια της επιβολής και κατάργησης της ηλεκτρικής ηλεκτρικής ισχύος στην αντίσταση. Αφορά την περίπτωση που δεν έχουμε την επίδραση του ηχητικού παλμού μέσω των μεγαφώνων δηλαδή με απουσία του τυρβώδους πεδίου. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται ο χρόνος t και στον κάθετο άξονα η εξέλιξη της αδιάστατης θερμοκρασίας $\Delta\theta/\theta_o=(\theta-\theta_o)/\theta_o$, όπου $\theta_o=20^{\circ}\text{C}$ η ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Δίνεται η μέση, η ελάχιστη κι η μέγιστη αδιάστατη θερμοκρασία στο κέντρο της αντίστασης **0 pixels**.

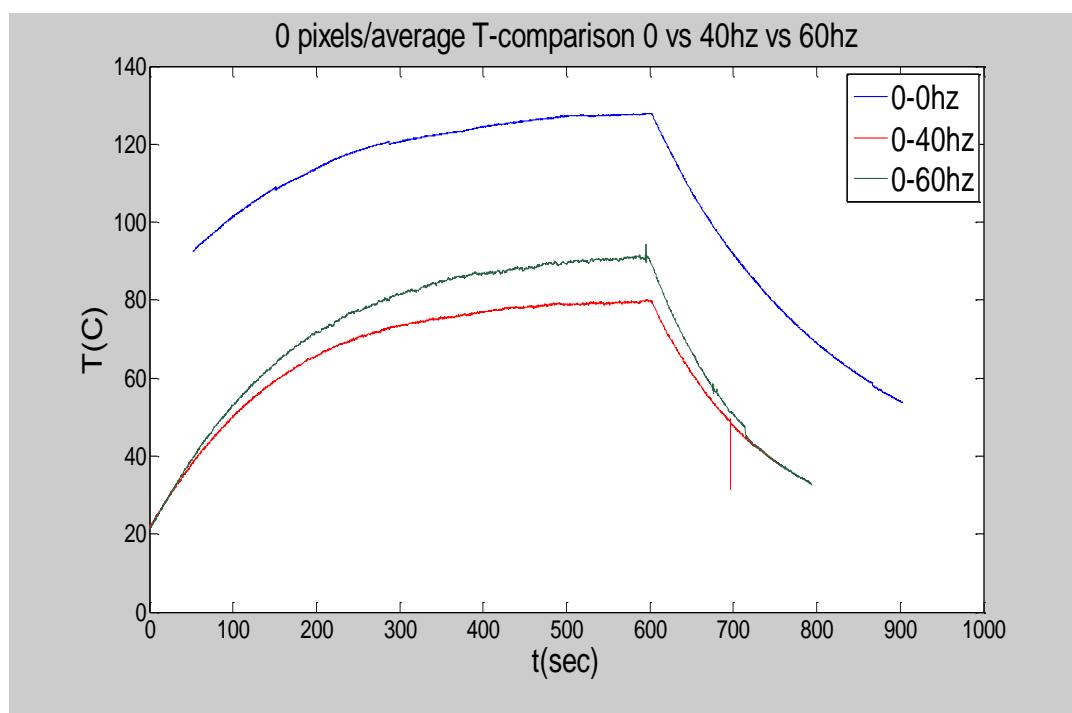


Εικόνα 4.13 no power ελάχιστη -μέση -μέγιστη αδιάστατη θερμοκρασία για το κέντρο της αντίστασης

Από το διάγραμμα παρατηρείται η αρχική αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία τείνει σε μια ασυμπτωτική οριζόντια θέση με την πάροδο του χρόνου που αντιστοιχεί στη μόνιμη κατάσταση. Η μέγιστη αύξηση δε της θερμοκρασίας προσεγγίζει την τιμή $6 \cdot \theta_0$, ενώ η μέση τιμή που θα αποτελεί και τη βάση μας προσεγγίζει μια τιμή $5.3 \cdot \theta_0$. Ο χρόνος στον οποίο επιβάλλεται η ηλεκτρική ισχύς είναι **10 min=600 sec**. Παρατηρείται ότι μέχρι κι αυτό το χρόνο παρόλο που η θερμοκρασία τείνει να προσεγγίσει μια σταθερή τιμή, συνεχίζει να αυξάνεται. Για οικονομία χρόνου και σε συνδυασμό με περιοριστικούς παράγοντες που αφορούσαν την αντοχή των πειραματικών συσκευών μας όπως του ενισχυτή και των μεγαφώνων, επιλέχθηκε ως κοινή βάση για τα πειράματά μας η θέρμανση της αντίστασης για **10 min**. Αντίθετα κατά την απομάκρυνση της ηλεκτρικής ισχύος ο χρόνος που χρειάζεται για να επανέλθει η θερμοκρασία στην αρχική τιμή της είναι πολύ μικρότερος και πιο συγκεκριμένα **περίπου 3 min**. Ο χρόνος ψύξης είναι προφανές ότι εξαρτάται από το υλικό, τη γεωμετρία και τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Αντίθετα ο χρόνος θέρμανσης εξαρτάται κι από το μέγεθος της επιβαλλόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε **W**.

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα στο οποίο παριστάνεται η εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας στο κέντρο ξανά της αντίστασης αυτή τη φορά

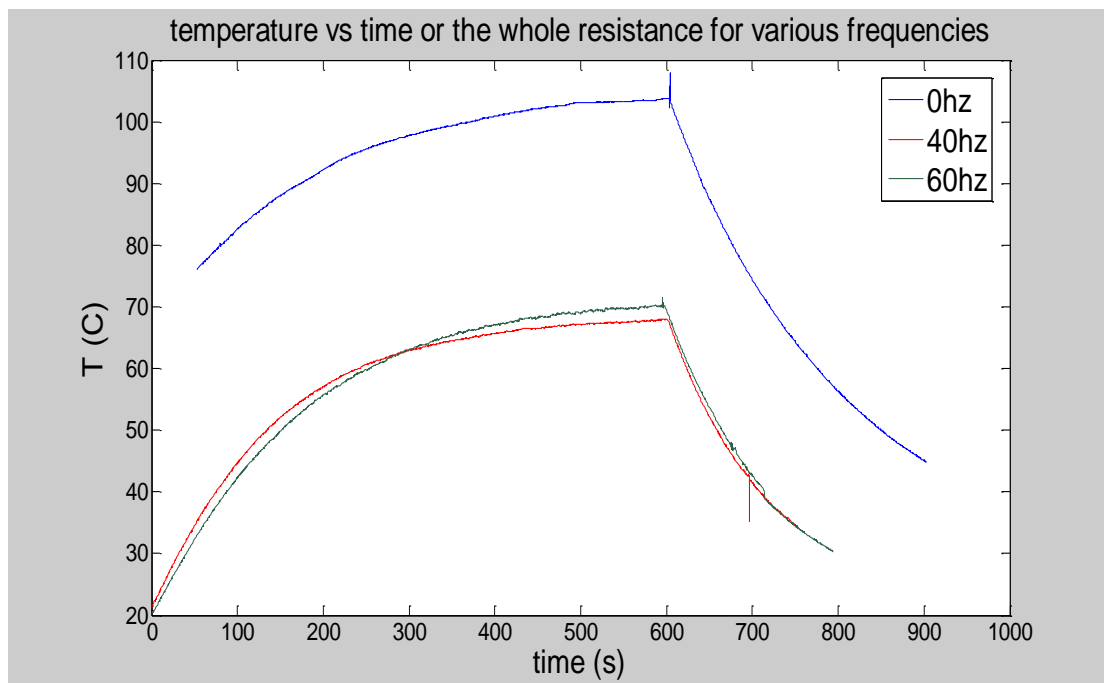
συμπεριλαμβάνοντας και τις περιπτώσεις επίδρασης των μεγαφώνων με συχνότητα **40** και **60 Hz** αντίστοιχα. Σε αυτό το διάγραμμα η θερμοκρασία δεν έχει αδιαστατοποιηθεί με σκοπό να λάβουμε την τάξη μεγέθους της θερμοκρασίας σε βαθμούς C.



Εικόνα 4.14 no power-40-60 Hz μέση απόλυτη θερμοκρασία για το κέντρο της αντίστασης

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι και με την παρουσία του τυρβώδους πεδίου η εξέλιξη της θερμοκρασίας παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά. Το γεγονός που αλλάζει είναι ότι η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στις περιπτώσεις με την παρουσία του τυρβώδους πεδίου είναι χαμηλότερη σε σχέση με την απουσία του. Για την **νεκρή περίπτωση** όπως θα ονομάζουμε από αυτό το σημείο και στη συνέχεια την απουσία των μεγαφώνων η μέγιστη ασυμπτωτική θερμοκρασία είναι **128°C**, για τα 40 Hz **80 °C** και για τα 60 Hz **91 °C**. Σε πρώτη φάση δίνεται η εξήγηση ότι η κίνηση του ρευστού λόγω της επιβολής του συνθετικού jet των μεγαφώνων και των διακυμάνσεων της ταχύτητας που δημιουργούνται απάγει θερμότητα από την αντίσταση μέσω της συναγωγής.

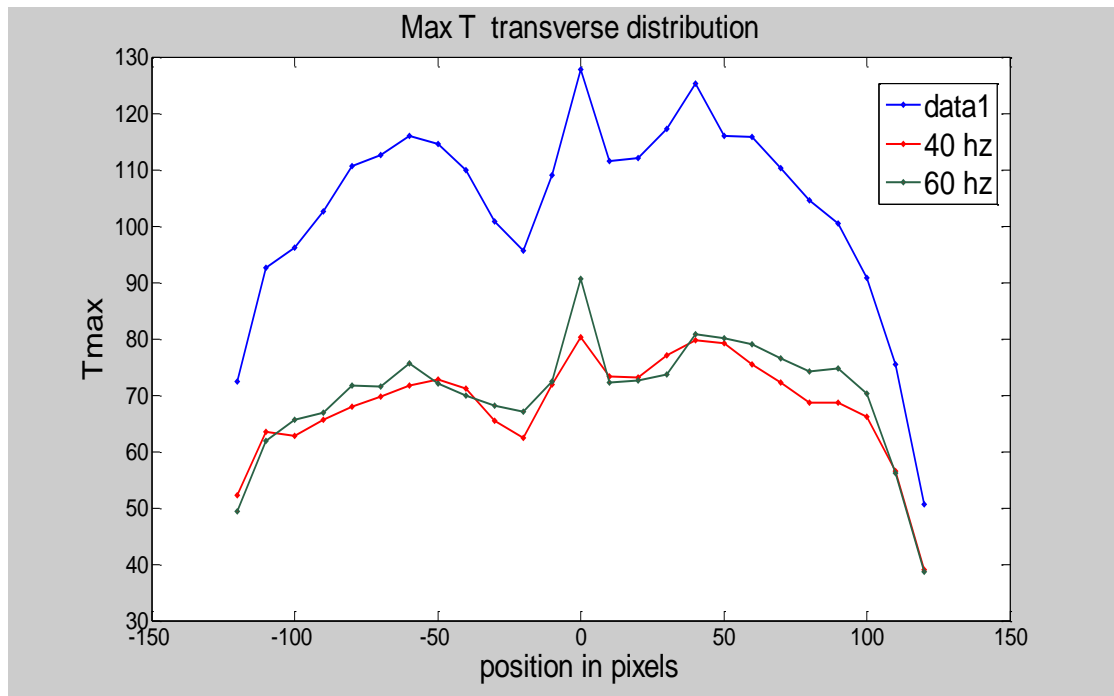
Ενώ μέχρι τώρα εξετάστηκε τι συμβαίνει στο κέντρο της αντίστασης σε αυτό το σημείο δίνεται το διάγραμμα που έχει εξαχθεί με βάση τις μέσες τιμές σε κάθε χρονικό σημείο κι από τα **25** σημεία που τοποθετήθηκαν πάνω στην αντίσταση.



Εικόνα 4.15 no power-40-60 Hz μέση απόλυτη θερμοκρασία μέση τιμή όλων των σημείων πάνω στην αντίσταση

Από το παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η επίδραση του τυρβώδους πεδίου στην μείωση της θερμοκρασίας συνολικά στην αντίσταση, η διαφορά που παρατηρήθηκε όμως στις μεγιστες θερμοκρασίες για **40** και **60 Hz** αντίστοιχα τείνει να μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον παρατηρείται ότι στην περίπτωση των **40 Hz** η ασυμπτωτική τιμή στη μόνιμη κατάσταση προσεγγίζεται πιο γρήγορα, δηλαδή ο χρόνος μετάβασης είναι πιο μικρός. Ο χρόνος παραμονής στη μόνιμη κατάσταση κι η συμπεριφορά της θερμοκρασίας στο διαμήκη άξονα θα εξεταστούν αναλυτικότερα στη συνέχεια.

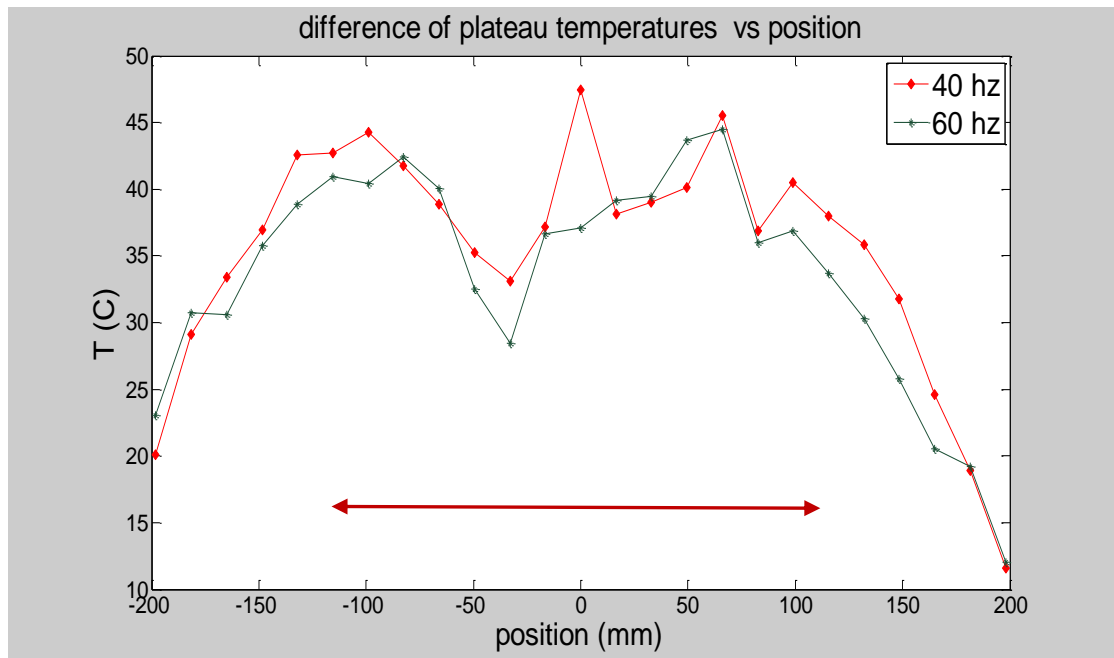
Ως πρώτη προσέγγιση στη διαμήκη συμπεριφορά παρατίθεται το διάγραμμα των ασυμπτωτικών θερμοκρασιών σε συνάρτηση με την διαμήκη θέση για κάθε μία από τις τρεις συχνότητες.



Εικόνα 4.16 no power-40-60 Hz μέγιστη θερμοκρασία στη μονιμη κατάσταση για κάθε διακριτή θέση πάνω στην αντίσταση

Από το διάγραμμα αυτό είναι κανείς εύκολο να αντιληφθεί ότι η μέγιστη θερμοκρασία και για τις τρεις περιπτώσεις δίνεται στο κεντρο της αντίστασης, μειώνεται αμέσως εκατέρωθεν και συμμετρικά παρουσιάζει ξανά ανοδική τάση και μειώνεται ξανά όσο προχωρούμε προς τα άκρα. Παρατηρείται ότι η παρουσία του τυρβώδους πεδίου δεν επηρεάζει την γενική αυτή κατανόμή που υπάρχει και στη νεκρή κατάσταση.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθεται η μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται με την επιβολή του τυρβώδους πεδίου για τις διαφορετικές συχνότητες σε σχέση με τη νεκρή κατάσταση.



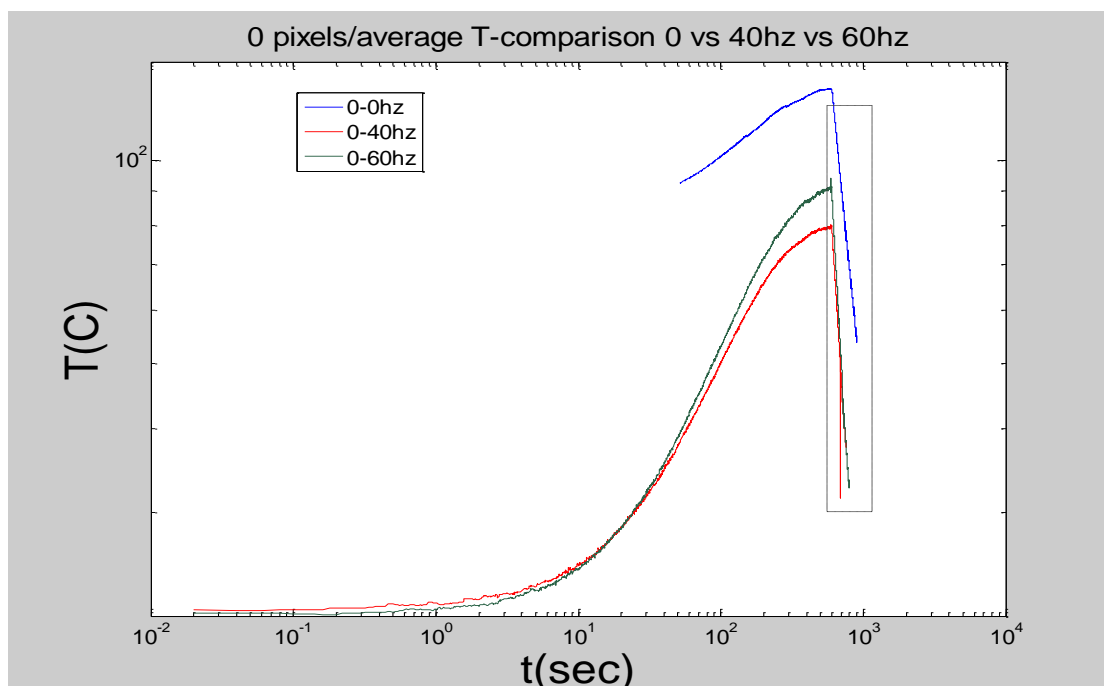
Εικόνα 4.17 40-60 Hz διαφορά των μέγιστων θερμοκρασιών από την περίπτωση χωρίς τύρβη για κάθε διακριτή θέση πάνω στην αντίσταση

Εξάγεται το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση των **40 Hz** (κόκκινη καμπύλη) η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη στο μεγαλύτερο μήκος της αντίστασης. Υπάρχουν σημεία δε στα οποία η επιβολή των **60 Hz** καθιστά επιτυχέστερη την ψύξη. Λόγω της τυχαιότητας που περιγράφει την κίνηση του ρευστού μπορεί να υποθέσει κανείς ότι σε αυτά τα σημεία εμφανίστηκαν μεγαλύτερες διακυμάνσεις και κλίμακες ταχύτητας στην περίπτωση των 60 Hz που να επέφεραν μεγαλύτερη απαγωγή θερμότητας μέσω της συναγωγής. Η μεγαλύτερη διαφορά όμως στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται στο κέντρο της αντίστασης το οποίο υποφέρει από τη μέγιστη θερμοκρασία και σε αυτή την περίπτωση η επιβολή των 40 Hz είναι αυτή που επιφέρει τα θεαματικότερα αποτελέσματα στην μείωση της θερμοκρασίας σε σχέση με τα 60 Hz. Επίσης παρατηρείται ότι το πεδίο δράσης της ομογενούς κι ισότροπης τύρβης εκτείνεται περίπου σε ένα διάστημα **250 mm**.

4.4.2 Ρυθμός ψύξης κατά την κατάργηση της ηλεκτρικής ισχύος

Σε αυτό το εδάφιο της εργασίας μελετάται ο ρυθμός με τον οποίο επανέρχεται η αντίσταση στην αρχική της θερμοκρασία στο διάστημα εκείνο, όπου καταργείται η τροφοδοσία της ηλεκτρικής ισχύος. Όπως περιγράφηκε και

προηγουμένως κατά της παράθεση των διαγραμμάτων θερμοκρασίας-χρόνου ο χρόνος επαναφοράς είναι πολύ πιο σύντομος (3 λεπτά) σε σχέση με το χρόνο μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση για την νεκρή περίπτωση. Μια περισσότερο αντιπροσωπευτική εικόνα λαμβάνει κανείς από το διάγραμμα θερμοκρασίας χρόνου για το κέντρο της αντίστασης σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 4.18 no power-40-60Hz θερμοκρασία σε συνάρτηση με το χρόνοσε λογαριθμική κλίμακα για το κέντρο της αντίστασης

Εξετάζεται η περιοχή του διαγράμματος για κάθε μία από τις πεπριπτώσεις, η οποία βρίσκεται εντός του διαγραμμισμένου πλαισίου στο γράφημα. Η καμπύλη σε αυτή την περιοχή έχει τη μορφή της ευθείας γραμμής σε αυτό το διάστημα. Αποτέλεσμα αυτού είναι να περιγράφεται από μια συναρτησιακή σχέση της μορφής $\log\theta=n\cdot\log t+\log k$, όπου η κλίση n μας προσδίδει το **ρυθμό καθόδου**. Αντίστοιχα η σχέση θερμοκρασία χρόνου θα περιγράφεται από η σχέση:

$$\theta = k \cdot x^n \quad 4-1$$

Στόχος μας συνεπώς αποτέλεσε ο προσδιορισμός των ρυθμών καθόδου n για κάθε σημείο στην αντίσταση και συχνότητα. Ο προσδιορισμός αυτός επιτεύχθηκε με τη βοήθεια του **Matlab**. Αρχικά λογαριθμίστηκαν οι πίνακες στήλες που περιείχαν τα δεδομένα χρόνου-θερμοκρασίας και στη συνέχεια

προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές **n,k** που περιγράφουν τη συναρτησιακή τους σχέση μέσω της εντολής **polyfit**.

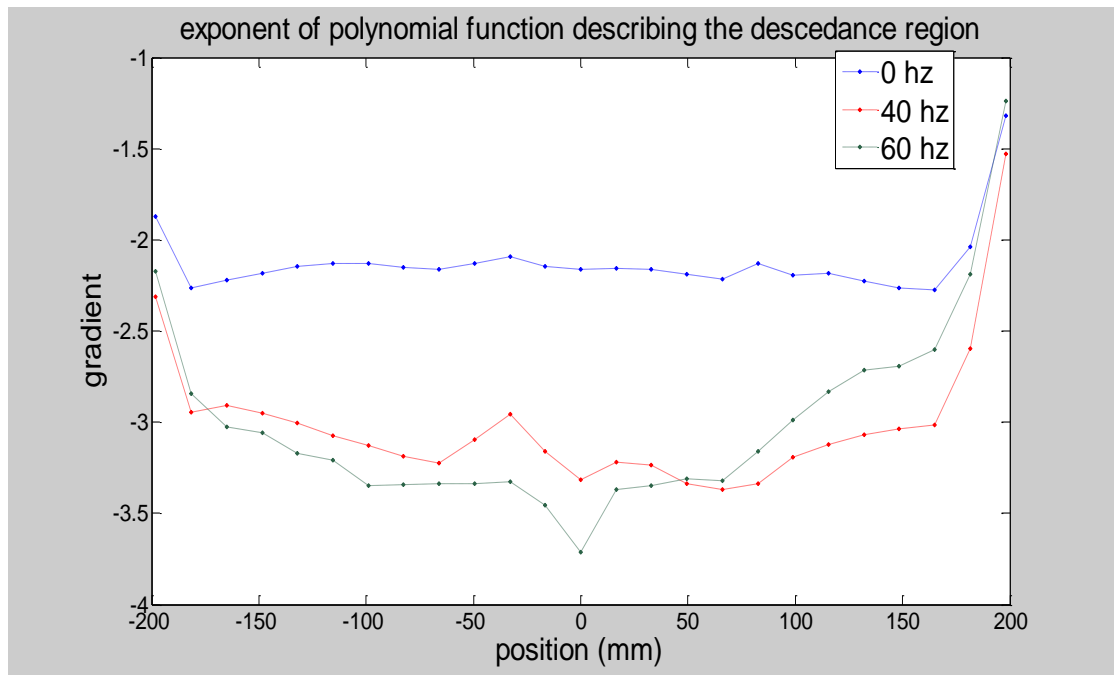
`p=polyfit(log(T),log(t),1)`

, όπου ο αριθμός **1** στο τρίτο όρισμα υποδηλώνει το βαθμό του πολυωνύμου που επιθυμούμε να περιγράψει τα δεδομένα μας και το αποτέλεσμα **p** περιέχει τους συντελεστές του πολυωνύμου που για την περίπτωση μας είναι **n, logk**.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των n, k για τις διαφορετικές περιπτώσεις κατά μήκος της αντίστασης:

position (mm)	0hz		40 Hz		60 Hz	
-199	-1.87	1.13E+07	-2.31	1.28E+08	-2.18	5.22E+07
-181.5	-2.27	1.81E+08	-2.95	9.30E+09	-2.84	4.79E+09
-165	-2.22	1.41E+08	-2.91	7.23E+09	-3.03	1.68E+10
-148.5	-2.18	1.19E+08	-2.95	9.86E+09	-3.06	2.08E+10
-132	-2.14	1.02E+08	-3.00	1.44E+10	-3.17	4.49E+10
-115.5	-2.13	9.46E+07	-3.07	2.32E+10	-3.21	5.74E+10
-99	-2.13	9.54E+07	-3.13	3.42E+10	-3.35	1.45E+11
-82.5	-2.15	1.08E+08	-3.19	5.16E+10	-3.34	1.37E+11
-66	-2.16	1.11E+08	-3.23	6.41E+10	-3.34	1.26E+11
-49.5	-2.13	8.44E+07	-3.09	2.54E+10	-3.34	1.24E+11
-33	-2.09	6.29E+07	-2.95	9.91E+09	-3.33	1.14E+11
-16.5	-2.14	9.85E+07	-3.16	4.28E+10	-3.46	2.79E+11
0	-2.16	1.31E+08	-3.32	1.32E+11	-3.71	1.84E+12
16.5	-2.16	1.10E+08	-3.22	6.35E+10	-3.37	1.64E+11
33	-2.16	1.15E+08	-3.23	7.00E+10	-3.35	1.40E+11
49.5	-2.19	1.41E+08	-3.34	1.42E+11	-3.31	1.13E+11
66	-2.22	1.82E+08	-3.37	1.81E+11	-3.32	1.34E+11
82.5	-2.13	9.54E+07	-3.34	1.44E+11	-3.16	4.79E+10
99	-2.19	1.45E+08	-3.19	5.51E+10	-2.99	1.58E+10
115.5	-2.19	1.31E+08	-3.12	3.34E+10	-2.83	5.56E+09
132	-2.22	1.59E+08	-3.07	2.25E+10	-2.71	2.54E+09
148.5	-2.27	1.99E+08	-3.03	1.82E+10	-2.70	2.26E+09
165	-2.27	1.89E+08	-3.02	1.56E+10	-2.60	1.15E+09
181.5	-2.04	3.41E+07	-2.60	8.77E+08	-2.19	6.46E+07
198	-1.32	2.32E+05	-1.53	6.69E+05	-1.24	1.05E+05

Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνεται παραστατικά η διακύμανση του ρυθμού καθόδου **n** για κάθε περίπτωση σε συνάρτηση με την απόσταση.



Εικόνα 4.19 no power- 40-60 Hz εκθέτης n σε συνάρτηση με τις διακριτές οριζόντιες θέσεις

Όπως αντιλαμβάνεται κανείς ο ρυθμός επαναφοράς n είναι αρκετά πιο έντονος για τις περιπτώσεις όπου έχουμε την επίδραση του τυρβώδους πεδίου. Είναι εμφανές ότι το τυρβώδες πεδίο ενισχύει την απαγωγή θερμότητας μέσω συναγωγής σε σχέση με τον ακίνητο αέρα όπου κυρίαρχη είναι η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής. Πιο συγκεκριμένα μέση τιμή για τη νεκρή κατάσταση υπολογίστηκε σε **-2.1255** ενώ για τα **40** και **60 Hz** **-3.0125** και **-3.0045** αντίστοιχα.

Ο ρυθμός επαναφοράς διατηρείται περίπου σταθερός καθόλο το μήκος της αντίστασης για τη νεκρή κατάσταση. Για την περίπτωση των **40 Hz** ο ρυθμός αυτός παρουσιάζει αυξομειώσεις και παρουσιάζεται να είναι πιο έντονος στη δεξιά περιοχή της αντίστασης. Για την περίπτωση των **60 Hz** ο ρυθμός εμφανίζει μια σχετική συμμετρία όντας πιο έντονος στην αριστερή πλευρά κι εμφανίζει ακρότατο σημείο ακριβώς στο κέντρο της αντίστασης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει μια συσχέτιση με το γεγονός ότι όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο της οπτικοποίησης της ροής οι οι τετμημένες του κέντρου βάρους για **40** κι **60 Hz** αντίστοιχα υπολογίστηκαν **110.5** και **112.25**. Παρόλο δηλαδή που φαίνεται ότι το κέντρο βάρους στην περίπτωση των **60 Hz** είναι περισσότερο μετατοπισμένο προς τα δεξιά σε εκείνη την περιοχή επενεργεί αποτελεσματικότερα το τυρβώδες πεδίο των **40 Hz**. Ενδέχεται να υπάρχει μείωση στο ρυθμό ψύξης

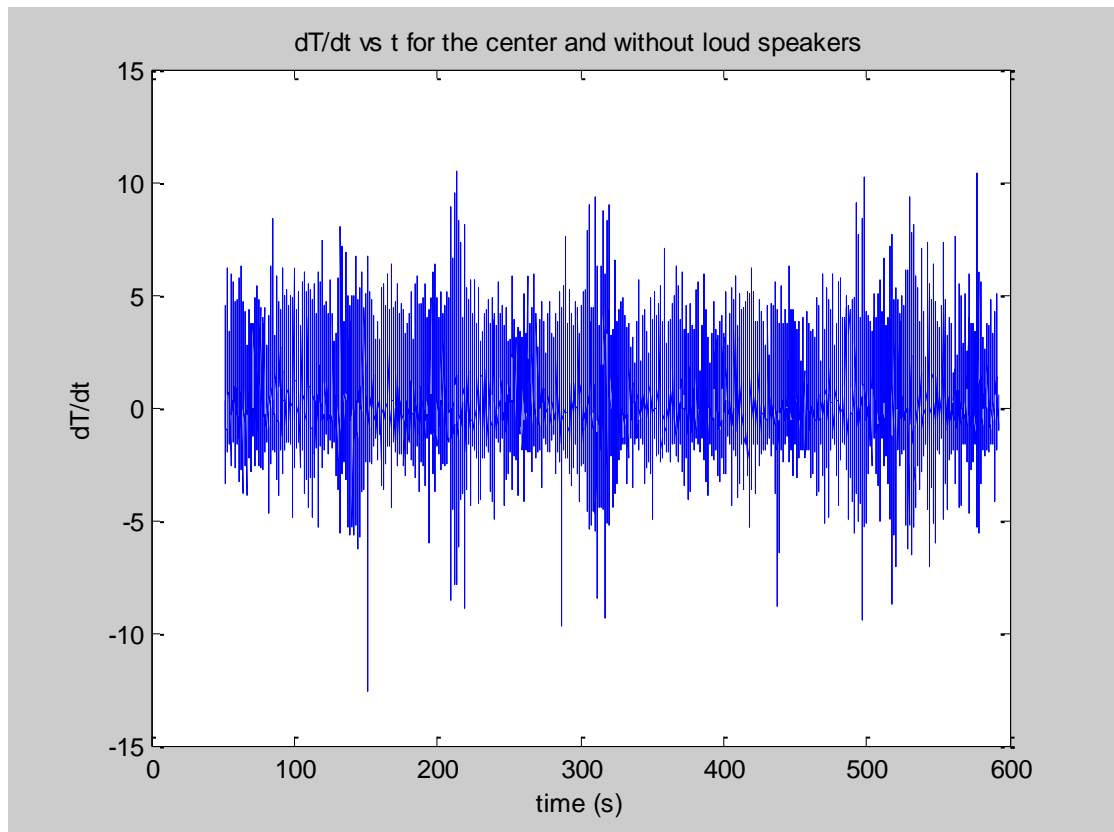
δηλαδή μέσω της εντονότερης παρουσίας της τύρβης σε εκείνη την περιοχή λόγω μετατροπής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας σε θερμότητα.

4.4.3 Χρόνος μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση

Σε αυτό το εδάφιο της εργασίας πραγματοποιείται η εκτίμηση του χρονικού διαστήματος εκείνου που απαιτείται για να αποκτήσει η αντίσταση μια σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της παροχής ηλεκτρικής ισχύος.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή του transient time t περιγράφεται ως εξής:

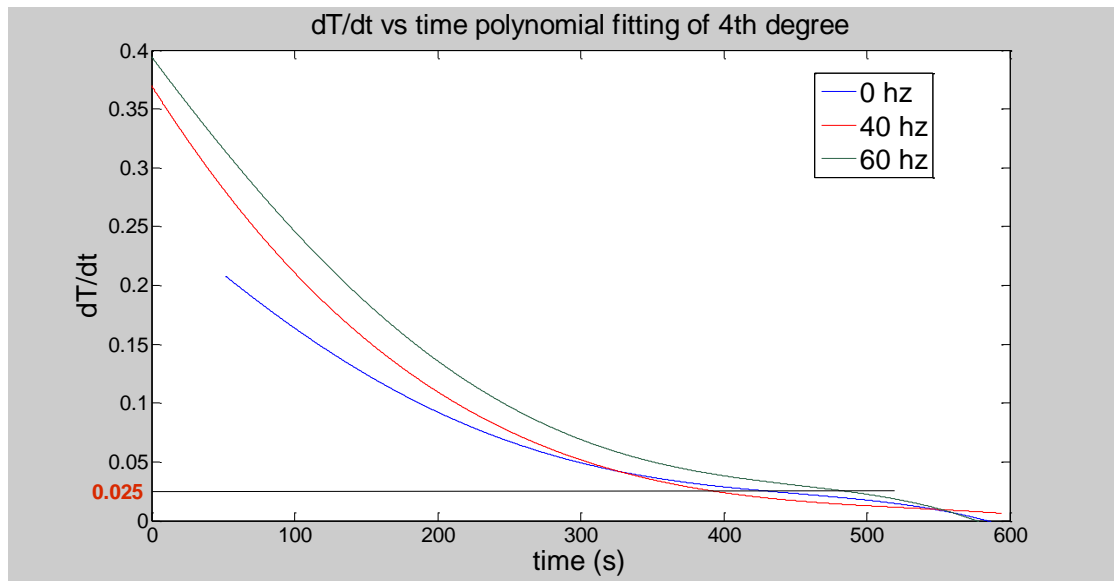
Αρχικά, για κάθε σημείο ενδιαφέροντος και περίπτωση, τέθηκαν προς επεξεργασία τα δεδομένα εκείνα που αφορούν μόνο το κομμάτι στο οποίο υφίσταντο ηλεκτρική ισχύς. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η παράγωγος της θερμοκρασίας ως προς το χρόνο. Η εξαγωγή του χρόνου μετάβασης ορίζεται ως το χρονικό σημείο εκείνο στο οποίο επέρχεται η μόνιμη κατάσταση και κατά συνέπεια η χρονική παράγωγος μηδενίζεται. Λόγω των διακεκριμένων όμως τιμών και της μεγάλης συχνότητας δειγματοληψίας, οι συνεχόμενες εναλλαγές θερμοκρασίας είχαν ως αποτέλεσμα το συνεχή μηδενισμό της παραγώγου όπως φαίνεται και στο γράφημα που ακολουθεί κι αφορά ενδεικτικά την περίπτωση χωρίς μεγάφωνα για το κέντρο της αντίστασης.



Εικόνα 4.20 no power χρονική παράγωγος της θερμοκρασίας για το κέντρο της αντίστασης

Για το λόγο αυτό ενεργήσαμε ως εξής:

Επιλέξαμε να προσαρμόσουμε μια αντιπροσωπευτική καμπύλη-συνάρτηση στα δεδομένα της παραγωγού αντιπροσωπευτική της τάσης που ακολουθεί. Ύστερα από μια σειρά δοκιμών καταλήξαμε στο να προσεγγίσουμε την παράγωγο με ένα πολυώνυμο της τάξεως **4ου βαθμού**. Ενδεικτικά παρατίθεται το γράφημα της παραγωγού για τις διάφορες περιπτώσεις στο κέντρο της αντίστασης με την προσαρμογή του πολυωνύμου.



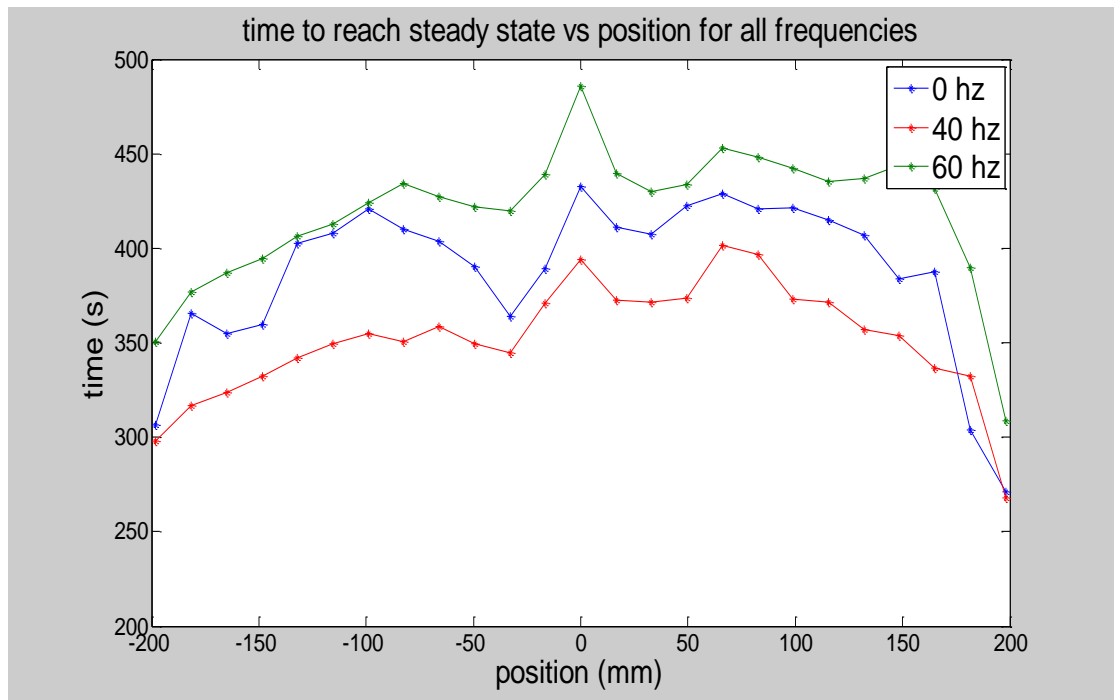
Εικόνα 4.21 no power-40-50 Hz χρονική παράγωγος της θερμοκρασίας ύστερα από την προσαρμογή πολυωνμικής συνάρτησης 4ου βαθμού

Αφού παρήχθη ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός γραφημάτων αυτού του είδους για τα διάφορα σημεία, επιλέχθηκε ως το πλέον αντιπροσωπευτικό κριτήριο για την εξαγωγή του **transient time**, το σημείο που η παράγωγος θα έπαιρνε την τιμή **0.025**.

Η παραπάνω διαδικασία αποτυπώνεται με το παρακάτω κώδικα γραμμένο σε Matlab για έναν πίνακα στήλη θερμοκρασιών μήκους: length.

```
for i=1:length-1
    Der_T(i)=(T(i+1)-T(i))/(time(i+1)-time(i));
end
time_d=time(1:end-1)
p=polyfit(time_d,Der_T,4);
yder=polyval(p,time_d);
in=find(yder<0.025,1,'first');
transient_time=time_d(in)
```

Στη συνέχεια παρατίθεται το γράφημα που αναπαριστά το χρόνο μετάβασης για τα διάφορα σημεία κατά μήκος της αντίστασης και για τις διάφορες συχνότητες.



Εικόνα 4.22 no power-40-60 Hz χρόνος μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση για κάθε διακριτή θέση πάνω στην αντίσταση

4.4.4 Εύρεση συναρτησιακής σχέσης κατά τη θέρμανση

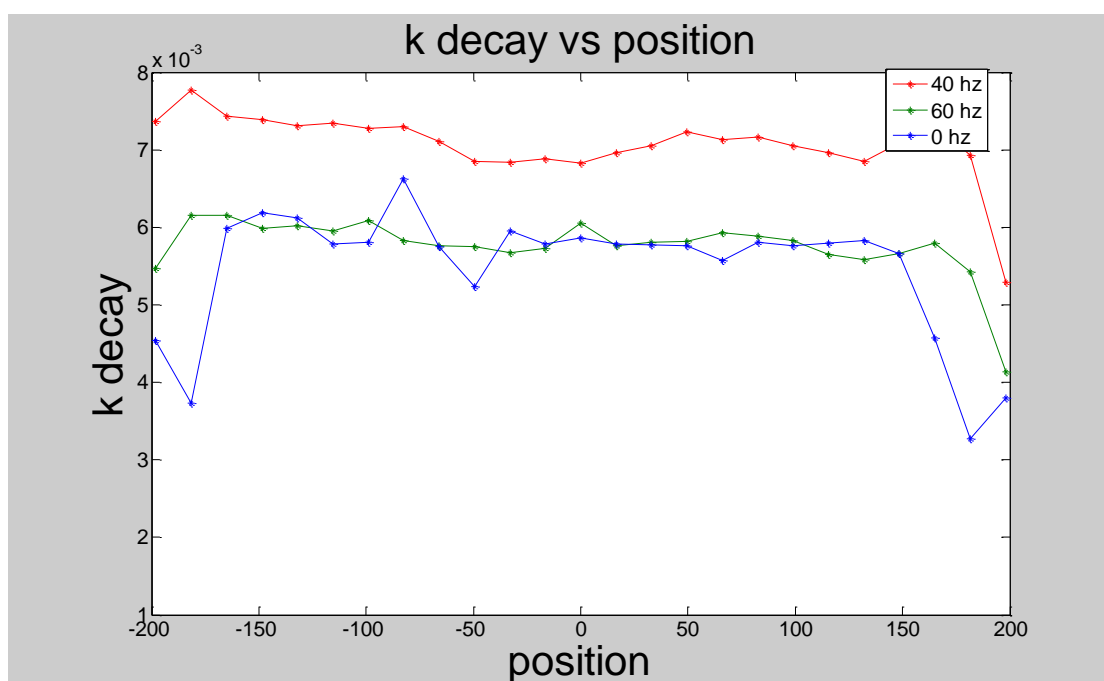
Επόμενος στόχος στη μελέτη του φαινομένου ήταν η εύρεση της συνάρτησης εκείνης που θα περιέγραφε αντιπροσωπευτικά την κατανομή της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο στο κομμάτι εκείνο που η αντίσταση θερμαίνεται.

Με βάση την κατανομή που παρουσιάστηκε στα γραφήματα, προσανατολιστήκαμε σε μια κατανομή εκθετικής μορφής κι επειδή το φαινόμενό μας, αφορά τη μετάδοση θερμότητας μια καλή προσέγγιση θεωρήθηκε πως θα ήταν η συνάρτηση που περιγράφει τη θέρμανση ενός θερμοστοιχείου, η οποία περιγράφεται από τον τύπο:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta(1 - e^{-k(t-t_0)}) = \theta_{\max} - \Delta\theta e^{-k(t-t_0)} \quad 4-2$$

, όπου θ_0 η αρχική θερμοκρασία, θ_{\max} η μέγιστη θερμοκρασία στη μόνιμη κατάσταση, $\Delta\theta = \theta_{\max} - \theta_0$ και t_0 η αρχική χρονική στιγμή των μετρήσεων.

Ο υπολογισμός των παραπάνω σταθερών πραγματοποιήθηκε για κάθε σημείο και περίπτωση με τη βοήθεια του **Originlab**. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι οι τιμές θ_0 , θ_{\max} και $\Delta\theta$ είναι ήδη γνωστές από επεξεργασία που έχει προηγηθεί. Εν τούτοις εκτιμήθηκαν εκ νέου μέσω του Origin και οι αποκλίσεις που παρουσιάστηκαν θεωρούνται αμελητέες. Ενδιαφέρον συνεπώς παρουσιάζει η τιμή της **σταθεράς εξασθένησης (decay constant) k** . Η σταθερά k παρατίθεται στο παρακάτω γράφημα για όλη την αντίσταση και για κάθε περίπτωση.



Εικόνα 4.23 no power-40-60Hz σταθερά k εκθετικού μοντέλου που περιγράφει τη φάση της θερμανσης σε συνάρτηση με την οριζόντια θέση

Από το παραπάνω διάγραμμα επαληθεύεται το γεγονός ότι η επιβολή ισχυρής τύρβης 40 Hz-rms:0.8 m/s συνεπάγεται το μικρότερο χρόνο μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση κάτι που δεν συμβαίνει εάν μειώσουμε την έντασή της στα 60 Hz-rms:0.55 m/s.

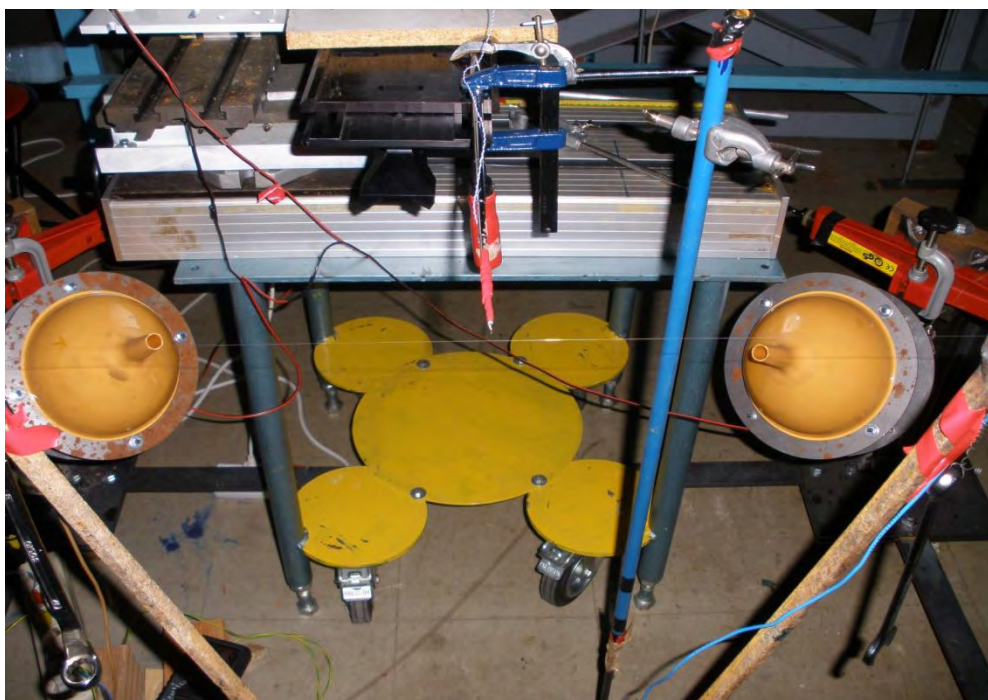
Μελέτη πλουμίου στη μόνιμη κατάσταση γύρω από σημειακή πηγή θερμότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η θερμοκρασιακή κατανομή του πλουμίου που δημιουργείται γύρω από ηλεκτρικά θερμαινόμενη αντίσταση. Σε αντίθεση με τη χρήση της θερμοκάμερας, όπου μετρήθηκε η επιφανειακή θερμοκρασιακή κατανομή σε όλο το μήκος της αντίστασης, σε αυτό το σημείο μελετάται η δισδιάστατη θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από ένα σημείο της αντίστασης, το οποίο επιλέχθηκε να είναι το μέσο της.

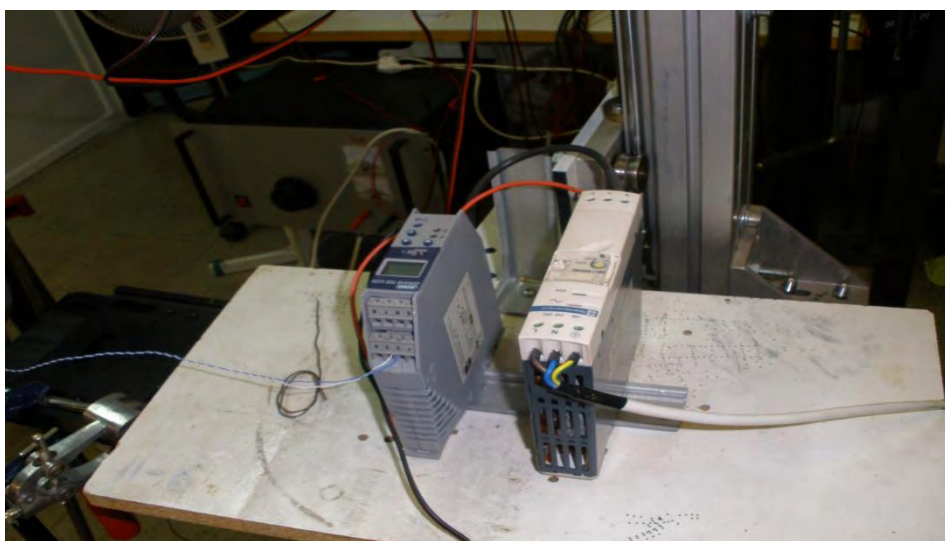
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση θερμοστοιχείου χρωμίου-αλουμινίου (**chrome-alumel**), χαρακτηριστικής διάστασης **0.5 mm** το οποίο μετακινούνταν στο χώρο με τη χρήση βερνιέρου, στην κατακόρυφη διάσταση **z** και στην εγκάρσια διάσταση **x**. Η αρχή λειτουργίας του θερμοστοιχείου είναι γνωστή από παλιά και είναι το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν δύο συρματίδια από διαφορετικά υλικά ενώνονται σε δύο διαφορετικά σημεία (επαφές) έτσι που να σχηματίζεται βρόχος μεταξύ των επαφών · αυτές δε έχουν διαφορετική θερμοκρασία, αναπτύσσεται τάση μεταξύ τους που είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας τους.

Η παραγόμενη τάση μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα για την επεξεργασία κι αποθήκευση στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του μετατροπέα (**jumo dtrans T02 LCD**). Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο περιπτώσεις:

- Αντίσταση σιδήρου διαμέτρου 6.5 mm
- Αντίσταση χρωμονικελίνης διαμέτρου 0.1 mm



Εικόνα 5.1 τοποθέτηση αντίστασης χρωμονικελίνης $d=0.1\text{ mm}$ και θερμοστοιχείο χρωμίου-αλουμινίου $d=0.5\text{ mm}$ προσαρμοσμένο στη διάταξη βερνιέρου



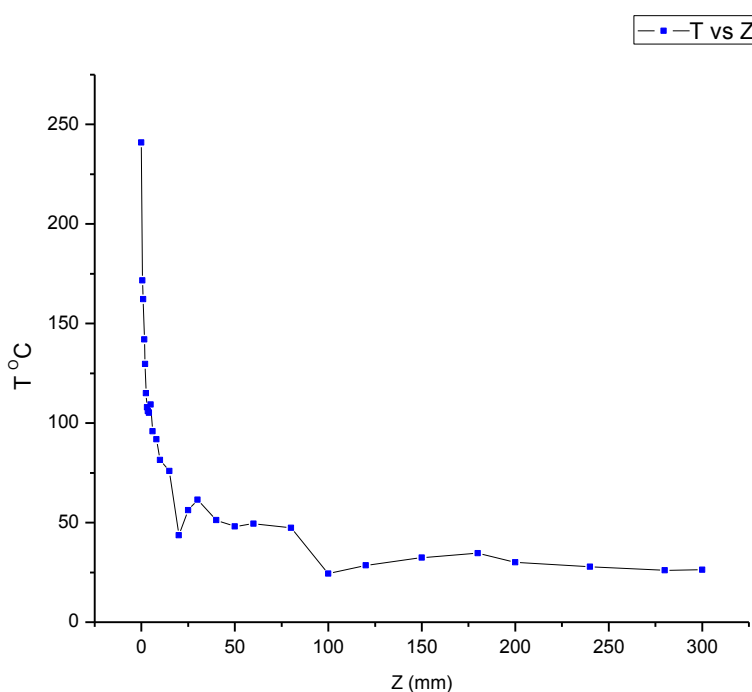
Εικόνα 5.2 μετατροπέας jumo dtrans TO2 LCD

Οι ψηφιακές μετρήσεις εξήχθησαν με τη χρήση του λογισμικού **National Instruments Labview 8** και συγκεκριμένα με την εφαρμογή **Use_Turb_Jan_2013**, η οποία έχει δημιουργηθεί στο **Εργαστήριο Ρευστομηχανικής** με σκοπό της επεξεργασία των ηλεκτρικών σημάτων των μετρήσεων.

5.1 Αντίσταση σιδήρου διαμέτρου 6.5 mm

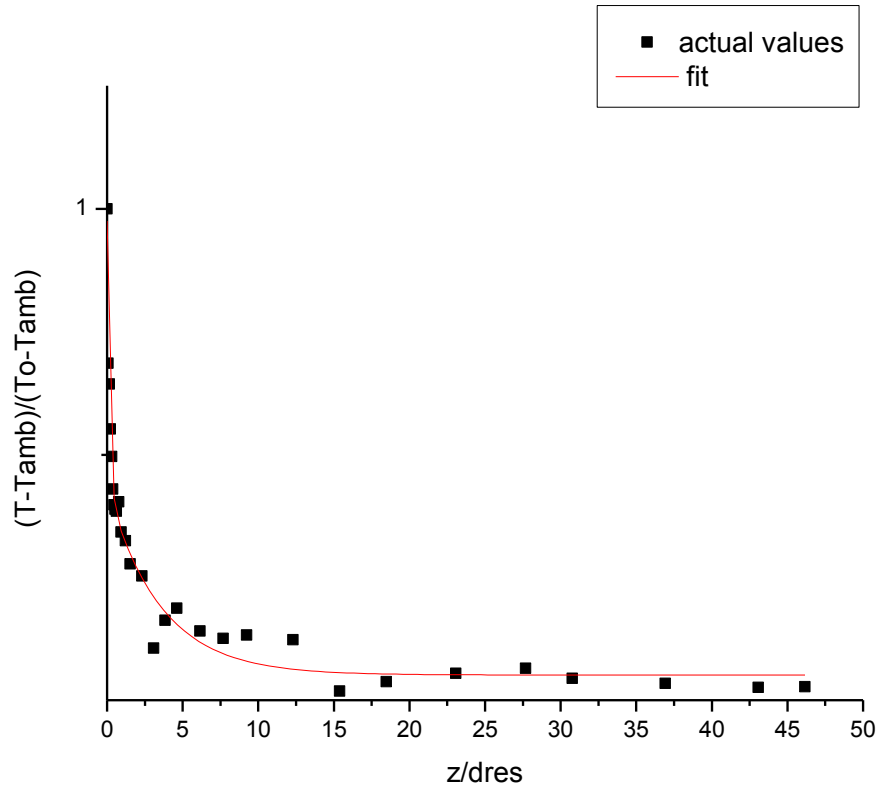
5.1.1 Φυσική συναγωγή κι ανωστικό πλούμιο

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για σταθερή οριζόντια απόσταση $x=0$ και μεταβλητή απόσταση z πάνω από την αντίσταση, στην κεντρική γραμμή δηλαδή του πλουμίου. Η επιβαλλόμενη ισχύς ήταν $P=118V \cdot 1.37A=161.66 \text{ W}$, που ισοδυναμεί με 2.256 MW/m^3 . Η κατανομή παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα



Εικόνα 5.3 Κατανομή θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ύψος $d=6.5 \text{ mm}$, $P=162 \text{ W}$

Η επιφανειακή θερμοκρασία της αντίστασης ανέρχεται στους **240,9 C**. Ακολουθεί το διάγραμμα με την αδιάστατη απόσταση $\eta=z/d_{\text{res}}$ και την αδιάστατη θερμοκρασία $\Theta=(T-T_{\text{amb}})/(T_{\text{wall}}-T_{\text{amb}})$, όπου στην περίπτωση μας η $T_{\text{amb}}=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ κι η T_{wall} ορίζεται ως η θερμοκρασία στη θέση $z=0$ ακριβώς στην επιφάνεια της αντίστασης.



Εικόνα 5.4 αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με το ύψος και προσαρμογή αντίστοιχου εκθετικού μοντέλου

Από ότι παρατηρείται και στο διάγραμμα, είναι δυνατόν να διακριθούν τέσσερις (4) περιοχές όσον αφορά την εξέλιξη της θερμοκρασίας.

α) $0 < z/d_{res} < 2.5$: Στο άμεσο περιβάλλον πάνω από την αντίσταση εμφανίζεται ραγδαία πτώση της θερμοκρασίας

β) $2.5 < z/d_{res} < 15$: Η θερμοκρασία συνεχίζει να υποχωρεί αλλά με μειωμένο ρυθμό αυτή τη φορά

γ) $15 < z/d_{res} < 30$: Η θερμοκρασία προσεγγίζει τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος

δ) $30 < z/d_{res} < +\infty$: Η θερμοκρασία πλέον εξομοιώνεται με αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος.

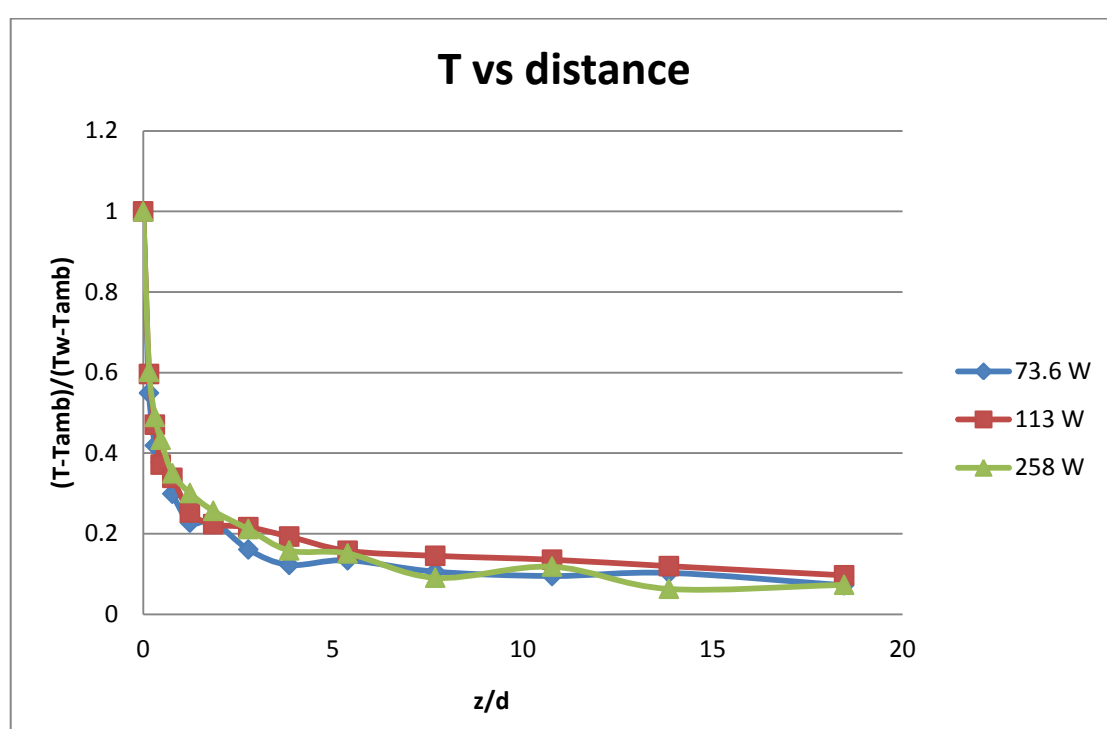
Η καμπύλη που βρέθηκε να προσεγγίζει καλύτερα τα δεδομένα μας είναι εκθετικής μορφής και συγκεκριμένα:

$$\Theta = 0.544e^{-37.45\eta} + 0.379e^{-1.515\eta} + 0.053 \quad 5-1$$

5.1.2 Μελέτη της κυματομορφής του θερμικού πλούμιου

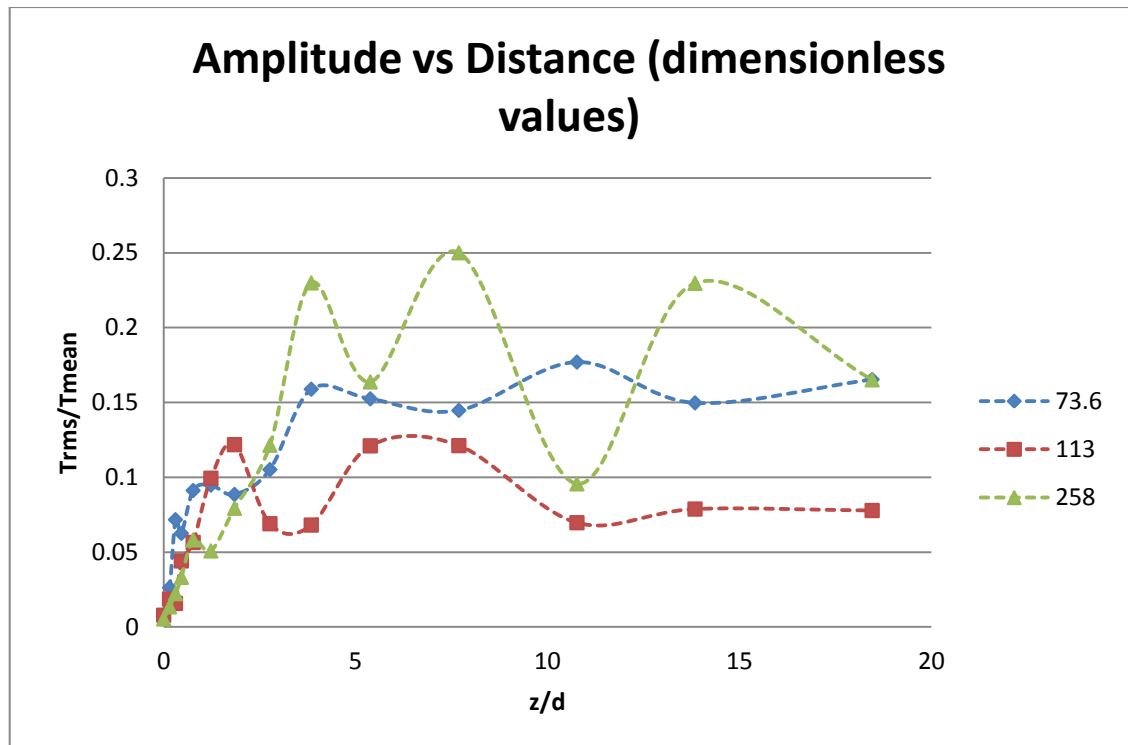
Σε αυτό το εδάφιο της διατριβής παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη μελέτη του εύρους και της συχνότητας των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας που παρουσιάζει το δισδιάστατο θερμικό πλούμιο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για επιβαλλόμενη θερμική παροχή ισχύος στην αντίσταση: **73.6 W**, **113 W** και **258 W**, στο επίπεδο $x=0$.

Αρχικά παρουσιάζεται η αδιάστατη θερμοκρασιακή κατανομή.



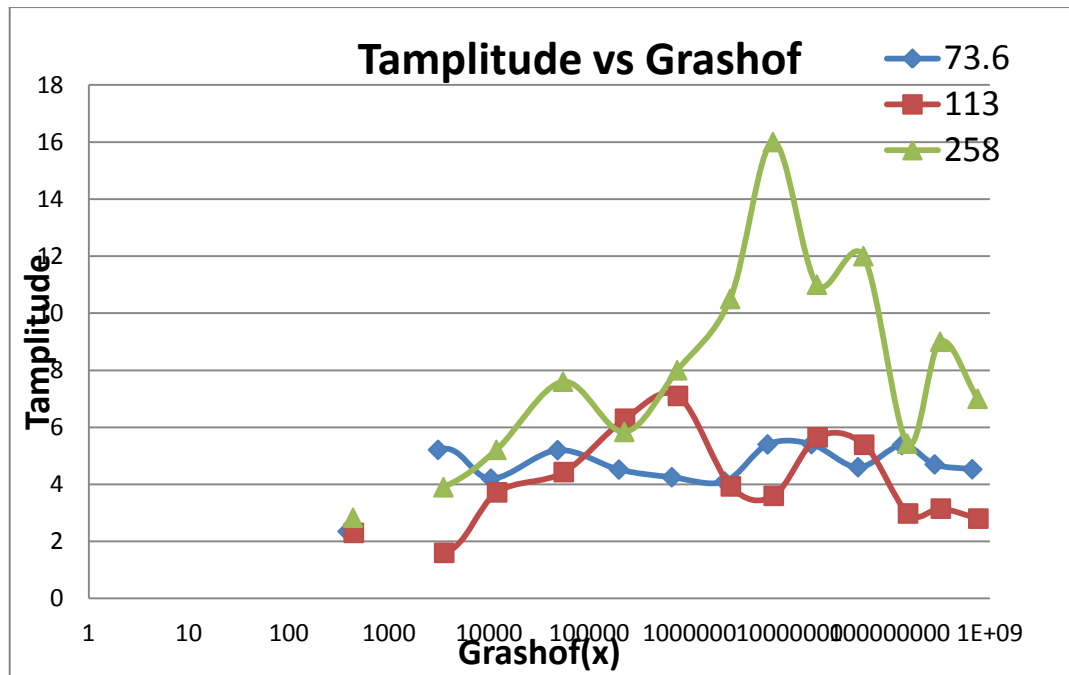
Εικόνα 5.5 $P=73.6, 113, 258$ W αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση μεν το ύψος στην κεντρική γραμμή πάνω από την αντίσταση

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η μεταβολή του πλάτους της θερμοκρασιακής κυματομορφής όπως υπολογίστηκε από το Labview. Αναφέρεται ότι το εύρος αυτό της κυματομορφής δεν είναι σταθερό και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να εκφράζεται μέσω της τιμής της τυπικής απόκλισης από τη μέση τιμή ενός δείγματος (χρονοσειράς θερμοκρασίας). Για να είναι εφικτό να συμπεριληφθούν κι οι μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες του φαινομένου επιλέχθηκε το διάστημα δειγματοληψίας να είναι **180 sec**.



Εικόνα 5.6 $P=73.6, 113, 258 \text{ W}$ σχετική μεταβλητότητα των θερμοκρασιών ως συνάρτηση με το ύψος για την κεντρική γραμμή πάνω από την αντίσταση

Από το παραπάνω σχήμα είναι προφανές ότι με την αύξηση της κατακόρυφης απόστασης από την πηγή αυξάνεται κι η ένταση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων όπως εκφράζεται από το σχετικό εύρος, με τάση δηλαδή προς την εμφάνιση αστάθειας. Η επιβολή δε της μεγαλύτερης ηλεκτρικής ισχύος των **258 W** επιφέρει και τη μεγαλύτερη αυτή αστάθεια. Παρολαυτά όμως, για **113 W** παρουσιάζεται μεγαλύτερο σχετικό εύρος από ότι για **73.6 W**. Για αυτό το λόγο δεν είναι δυνατό να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τη μεταβολή του πλάτους του κύματος σε αυτή την περιοχή θερμικών ισχύων.



Εικόνα 5.7 P=73.6, 113,258 W Πλάτος της κυματομορφής ως συνάρτηση του αριθμού Grashof

Όπως παρουσιάζεται κι από το παραπάνω διάγραμμα, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της απόλυτης τιμής του πλάτους σε συνάρτηση με τον αριθμό Grashof για την περίπτωση των **258 W**, το πλάτος είναι μεγαλύτερο.

Ο αριθμός Grashof υπολογίστηκε όπως και στη μελέτη του Noto:

$$Gr = z^3 g \beta Q / k Pr v^2 \quad 5-2$$

όπου $\beta = 1/T_{sur}$, $Q = I \cdot V / L$ και για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις οι ιδιότητες υπολογίζονται για $T = (T_{WALL} + T_{sur}) / 2$ και δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

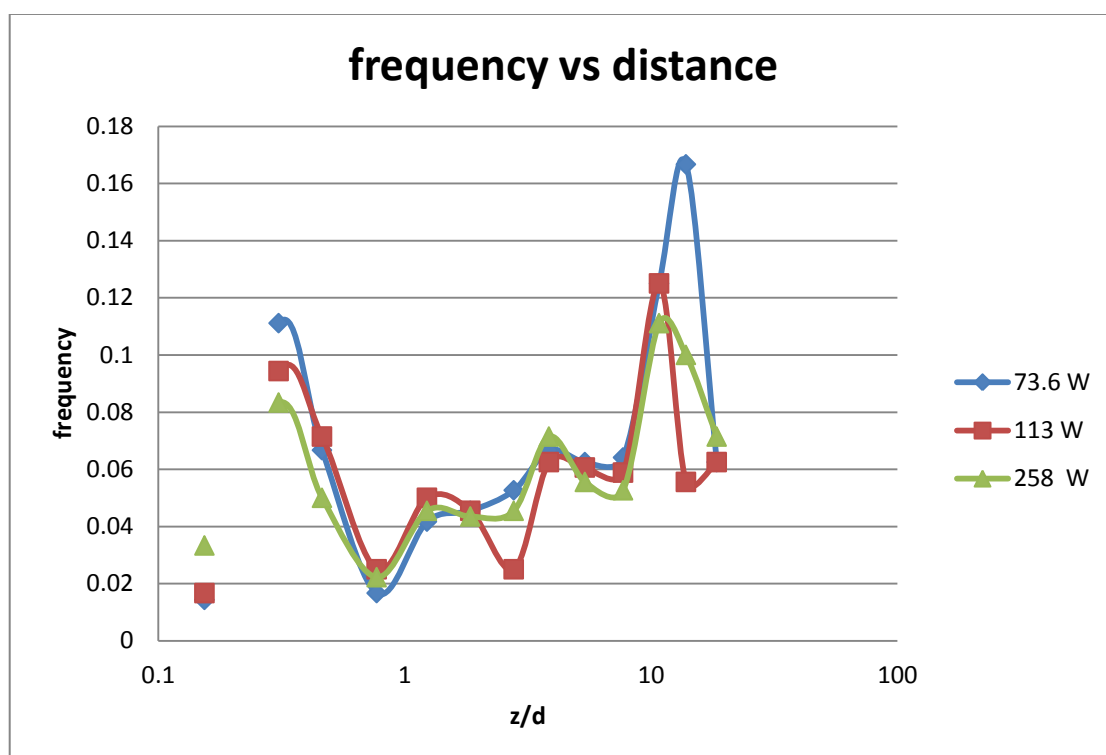
P	73.6	113	258
Tsur	18	19	19
Tproperties	9	9.5	9.5
k	0.02976	0.0314	0.03636
v	2.13E-05	2.374E-05	3.19E-05
Pr	0.7147	0.7098	0.6994

Πίνακας 5-1 Ιδιότητες του αέρα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων

Ο Noto[14] επίσης επεσήμανε την αύξηση του πλάτους των διακυμάνσεων με την αύξηση της ισχύος.

Στη συνέχεια εξετάζεται η μεταβολή που παρουσιάζει η συχνότητα των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των

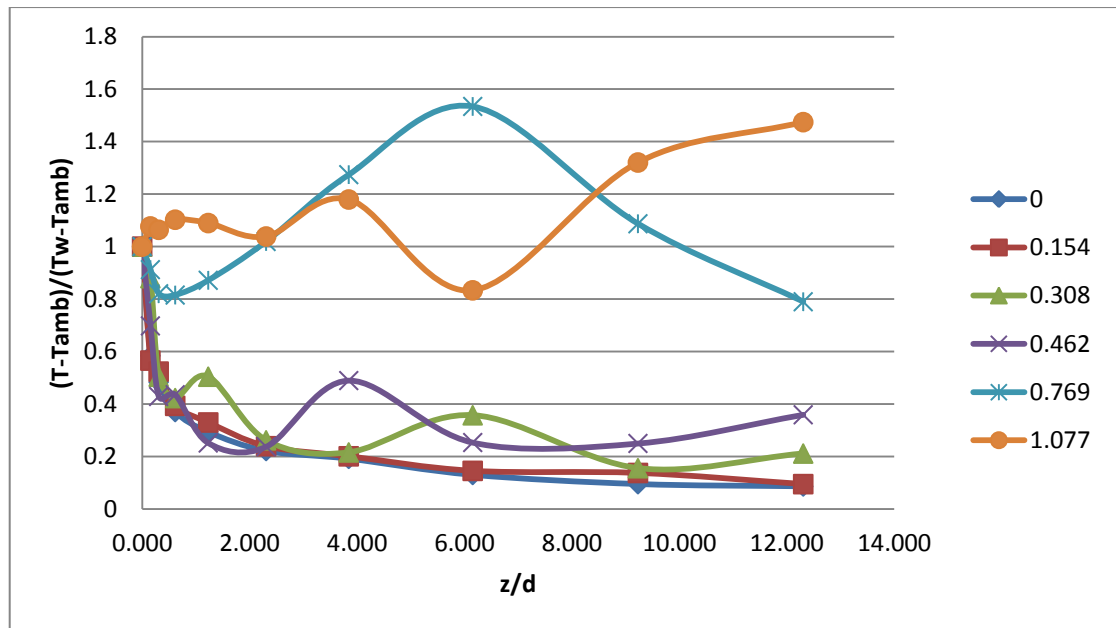
συχνοτήτων εξήχθησαν προσεγγιστικά από τις κυματομορφές του Labview, και αφορά τις μεγάλες θερμοκρασιακές κλίμακες και κινήσεις του ρευστού.



Εικόνα 5.8 $P=73.6, 113, 258 \text{ W}$ συχνότητα μεγάλων θερμοκρασιακών κλιμάκων ως συνάρτηση του ύψους για την κεντρική γραμμή πάνω από την αντίσταση

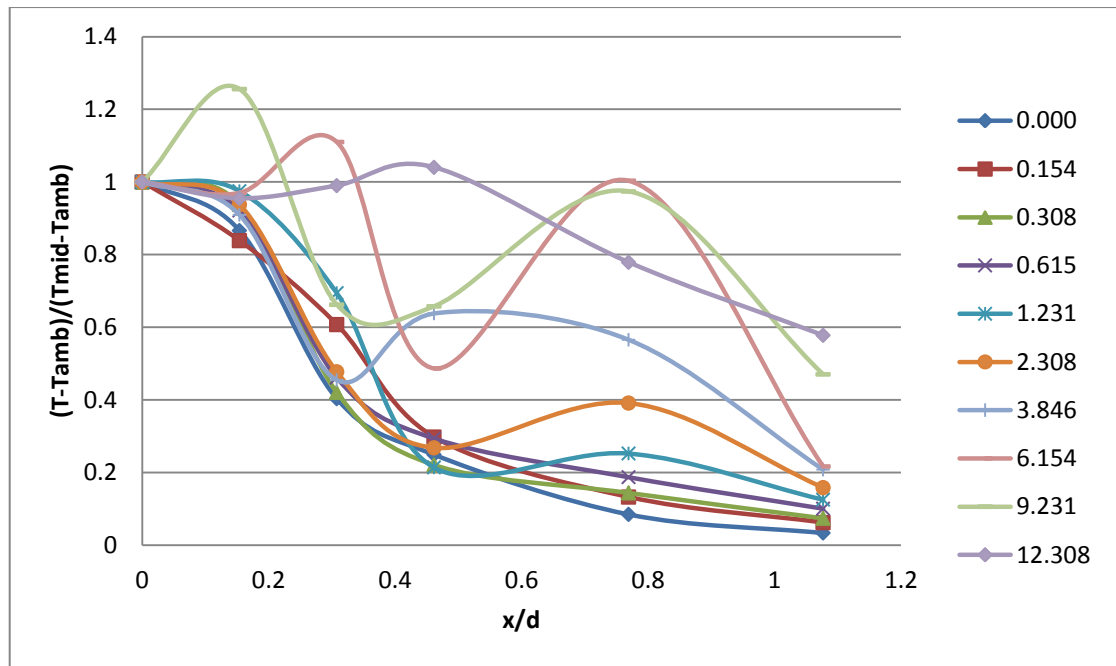
Όπως δεικνύει και το σχήμα, αρχικά η συχνότητα των διακυμάνσεων είναι μεγάλη, υποχωρεί στο ενδιάμεσο στάδιο και στη συνέχεια αυξάνεται ξανά όσο αυξάνουμε την απόσταση.

Στην επόμενη φάση της διατριβής, πέραν της μελέτης του πλουμίου στην κατακόρυφη διάσταση z , πραγματοποιήθηκαν κι αναλυτικές μετρήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση x . Σε αυτή τη φάση του πειράματος η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς παρέμενε σταθερή στα **161.7 W** για όλες τις μετρήσεις.



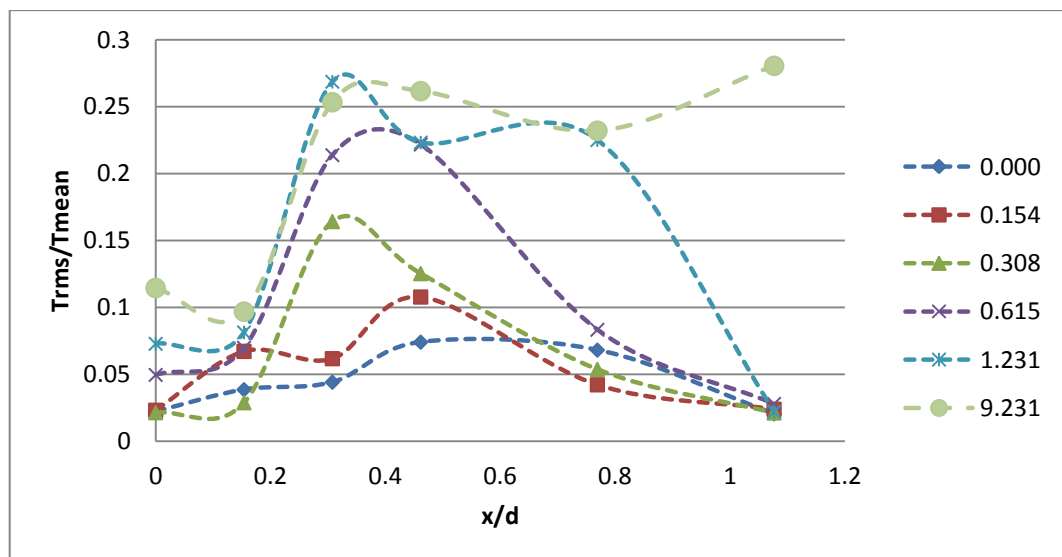
Εικόνα 5.9 $P=162$ W αδιάστατη θερμοκρασία ως συνάρτηση του ύψους για διαφορετικές εγκάρσιες αποστάσεις από την αντίσταση

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη θερμοκρασιακή μετάβολή κατά την κατακόρυφη διεύθυνση για διαφορετικές εγκάρσιες αποστάσεις από την πηγή. Γίνεται εμφανές ότι για απόσταση $x/d > 0.769$ καθόλο το ύψος που μελετήθηκε, η θερμοκρασία έχει αποκτήσει μια ομοιόμορφη κατανομή κοντά στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής.



Εικόνα 5.10 $P=162$ W αδιάστατη θερμοκρασία ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης x για διαφορετικές εγκάρσιες τιμές του ύψους z

Από το διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι η θερμοκρασία αρχίζει να αποκτά μια ομοιόμορφη κατανομή στην εγκάρσια διεύθυνση σε σχετικό ύψος $z/d > 12.308$. Η διασπορά (dispersion) όμως της θερμοκρασίας από την κεντρική κατακόρυφη γραμμή παρουσιάζεται νωρίτερα για $z/d > 3.846$.

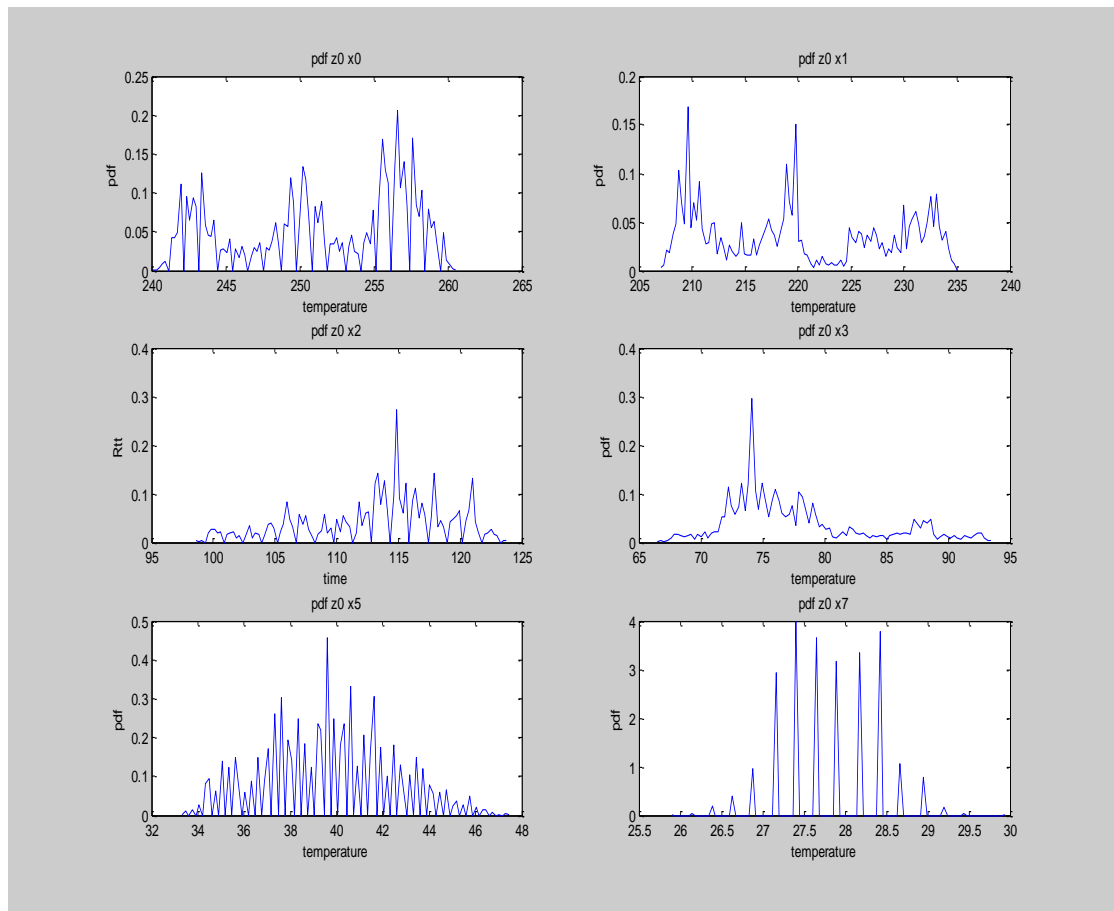


Εικόνα 5.11 $P=162$ W σχετική μεταβλητότητα της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης x για διαφορετικές εγκάρσιες τιμές του ύψους z

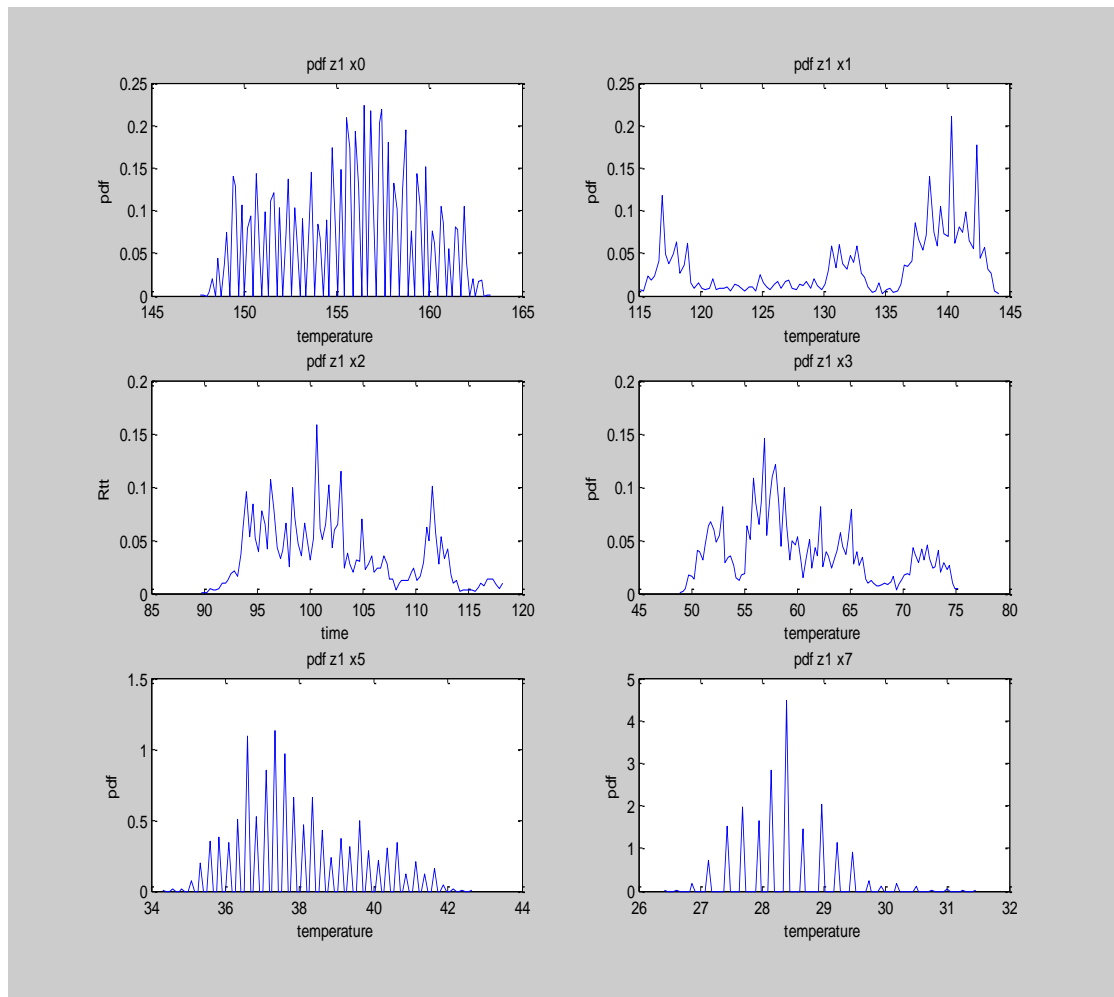
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το σχετικό πλάτος της κυματομορφής της θερμοκρασίας. Για κατακόρυφες αποστάσεις πλησίον της αντίστασης οι διακυμάνεις διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα καθόλη την εγκάρσια απόσταση x . Αυξάνοντας το ύψος z όμως, παρατηρείται αύξηση των διακυμάνσεων καθώς απομακρυνόμαστε εγκάρσια από την αντίσταση, αυξάνοντας την αστάθεια κι οι οποίες μειώνονται ξανά καθώς προσεγγίζεται η ατμοσφαιρική θερμοκρασία, όμοια με το **Mode 1** που παρατήρησε ο Noto[14]. Σε μεγαλύτερο ύψος όμως παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις εντοπίζονται και για μεγαλύτερες αποστάσεις x , δείγμα της διασποράς, της αστάθειας και του ανοίγματος του πλουμίου όσο αυξάνεται το ύψος από την αντίσταση.

5.1.3 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και συντελεστής αυτοσυσχέτισης

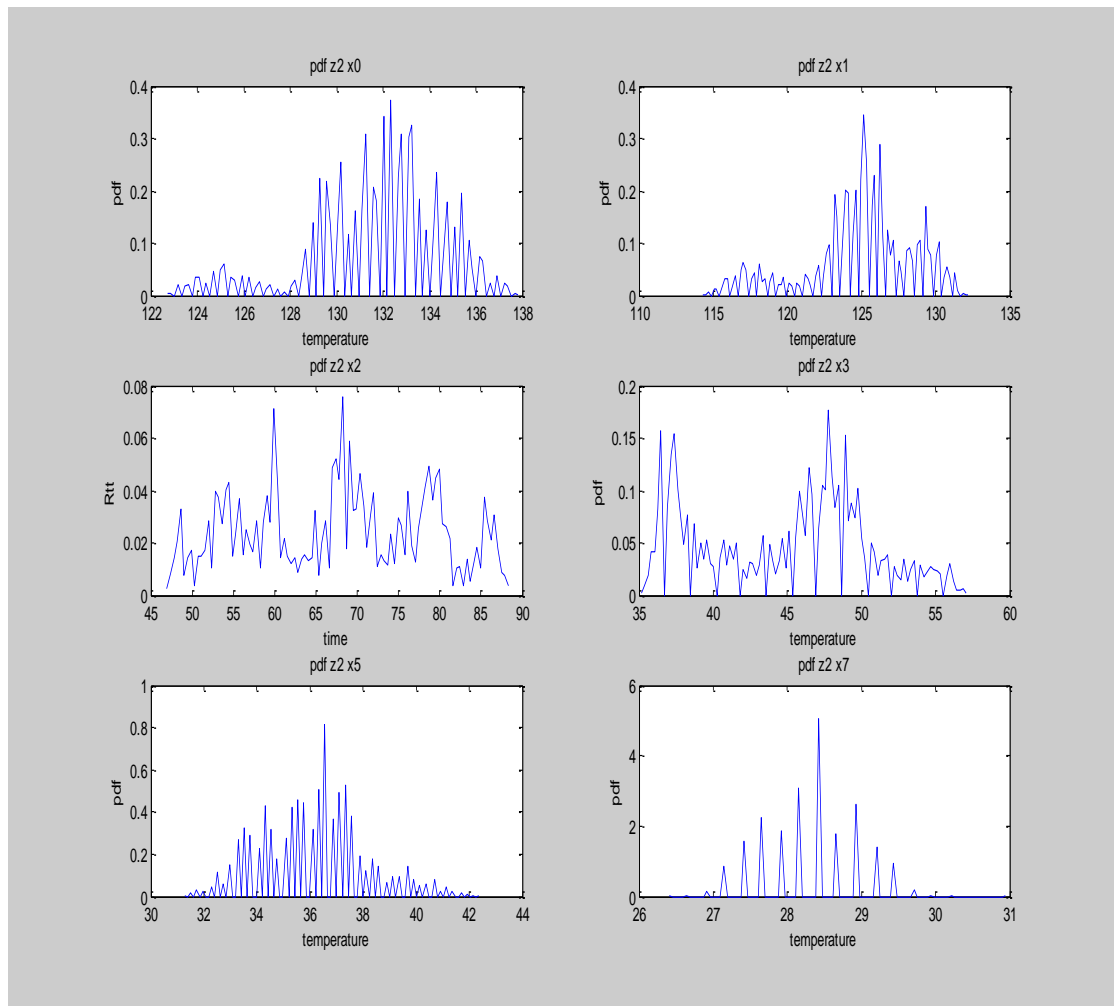
Αρχικά στα διαγράμματα που ακολουθούν δίδεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function-**pdf**) όπως υπολογίστηκε με δημιουργία κώδικα στο Matlab. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για κάθε δεδομένο ύψος z από την αντίσταση όπου περιλαμβάνονται τα διαγράμματα για κάθε εγκάρσια απόσταση x . Η τετμημένη εκφράζει την στιγμιαία απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς C κι η τεταγμένη τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Για την εύρεση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας το θερμοκρασιακό εύρος κάθε χρονοσειράς χωρίστηκε σε **100** κλάσεις και υπολογίστηκε η πιθανότητα (σχετική συχνότητα της κεντρικής τιμής κάθε κλάσης).



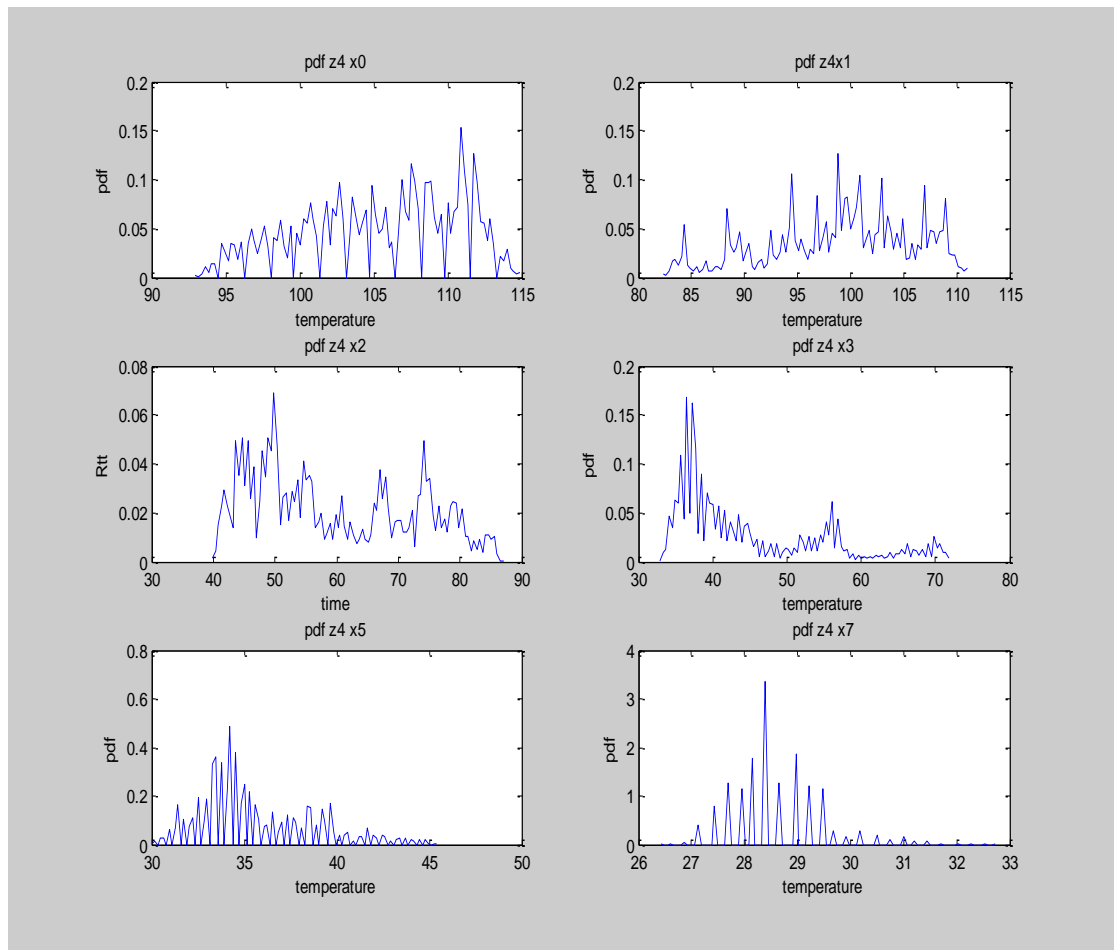
Εικόνα 5.12 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=0$



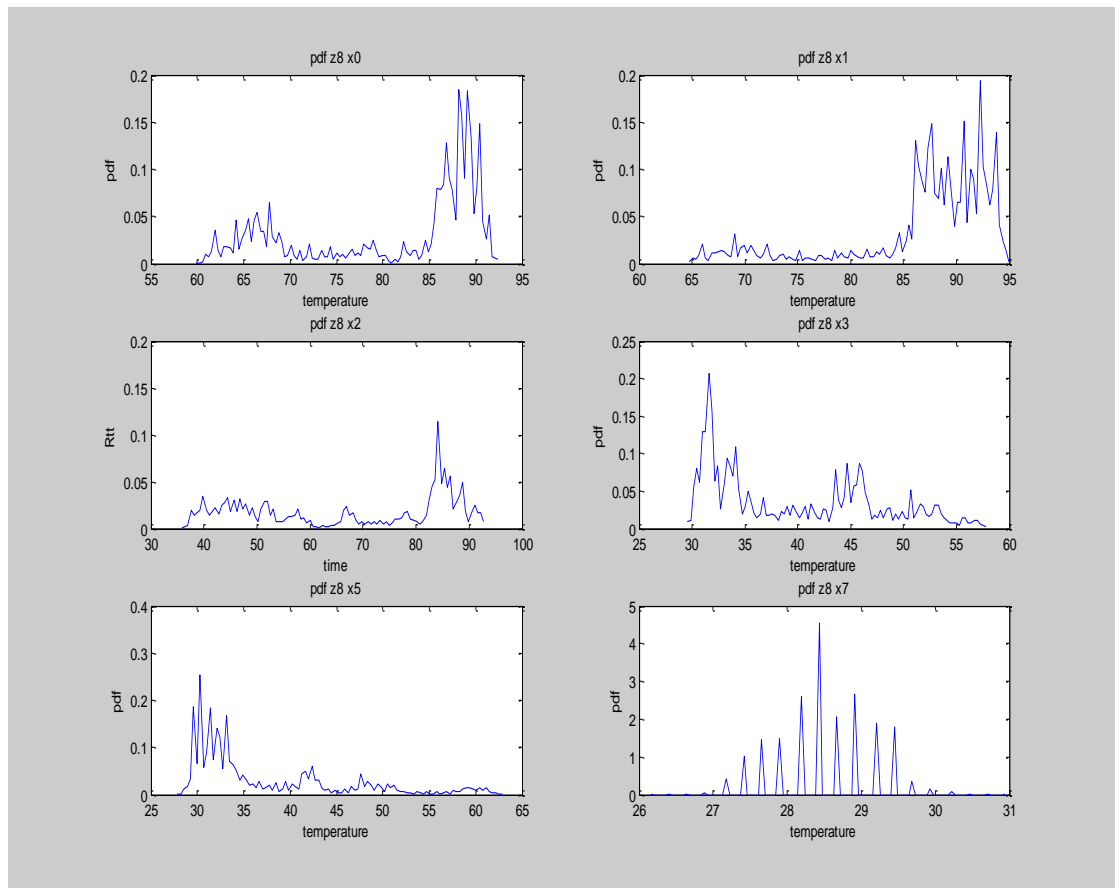
Εικόνα 5.13 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=1$ mm



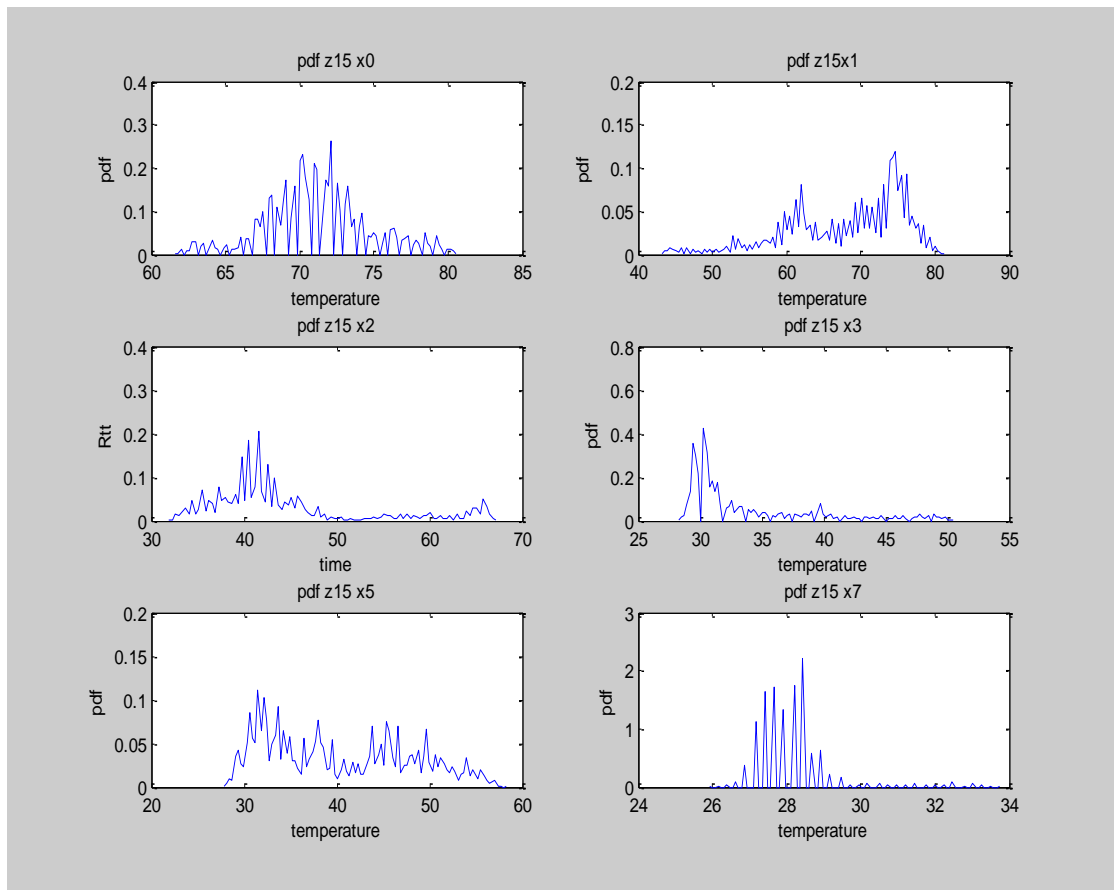
Εικόνα 5.14 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=2$ mm



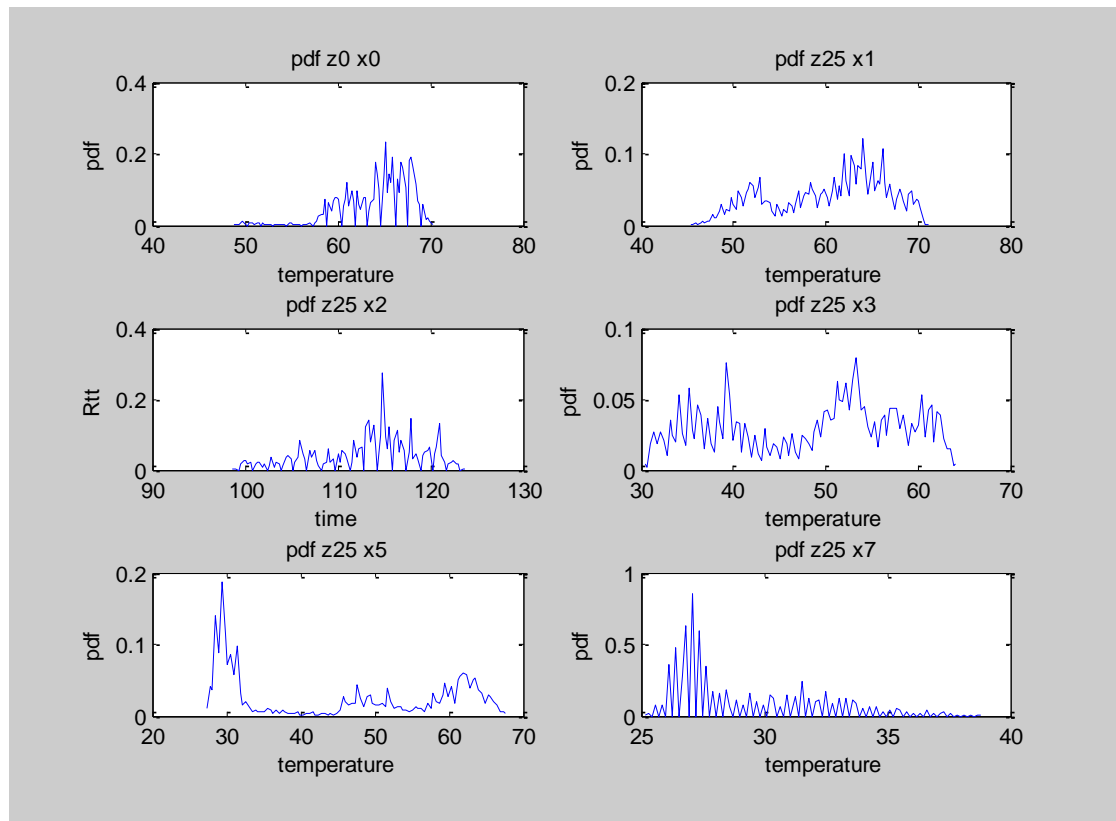
Εικόνα 5.15 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=4$ mm



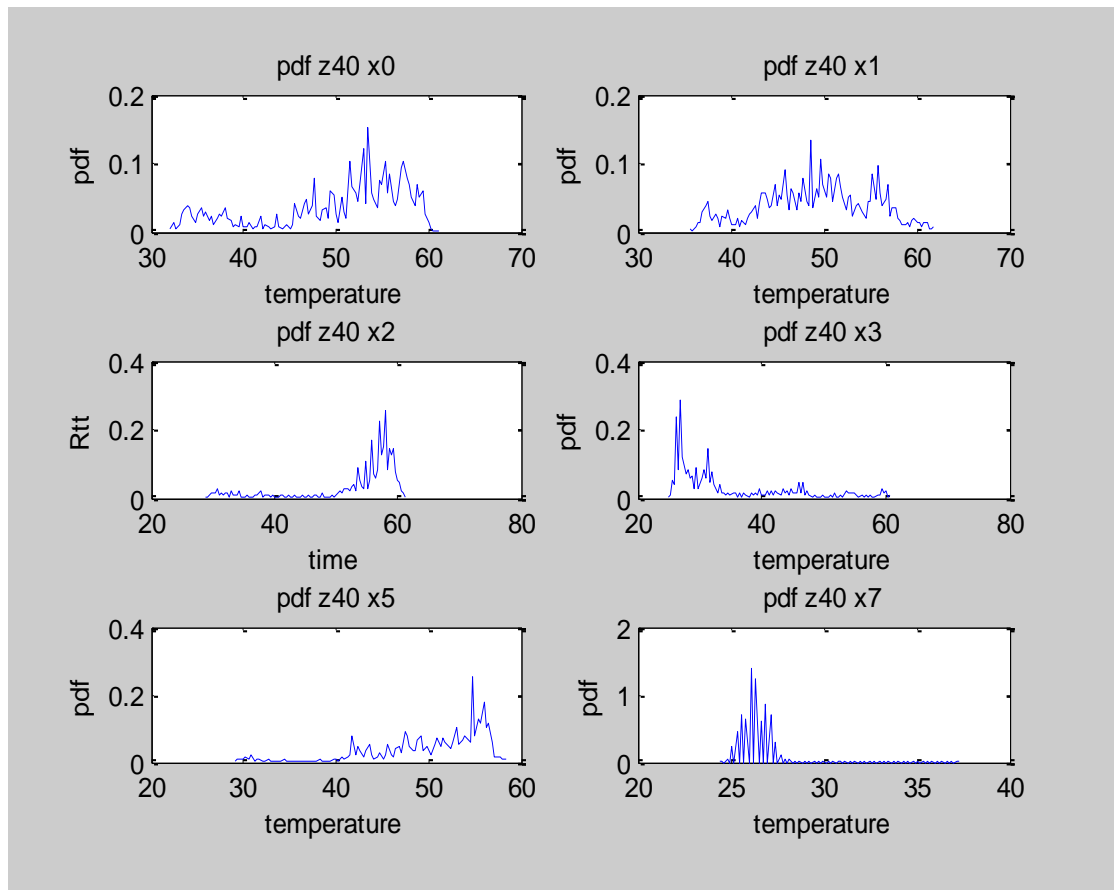
Εικόνα 5.16 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=8$ mm



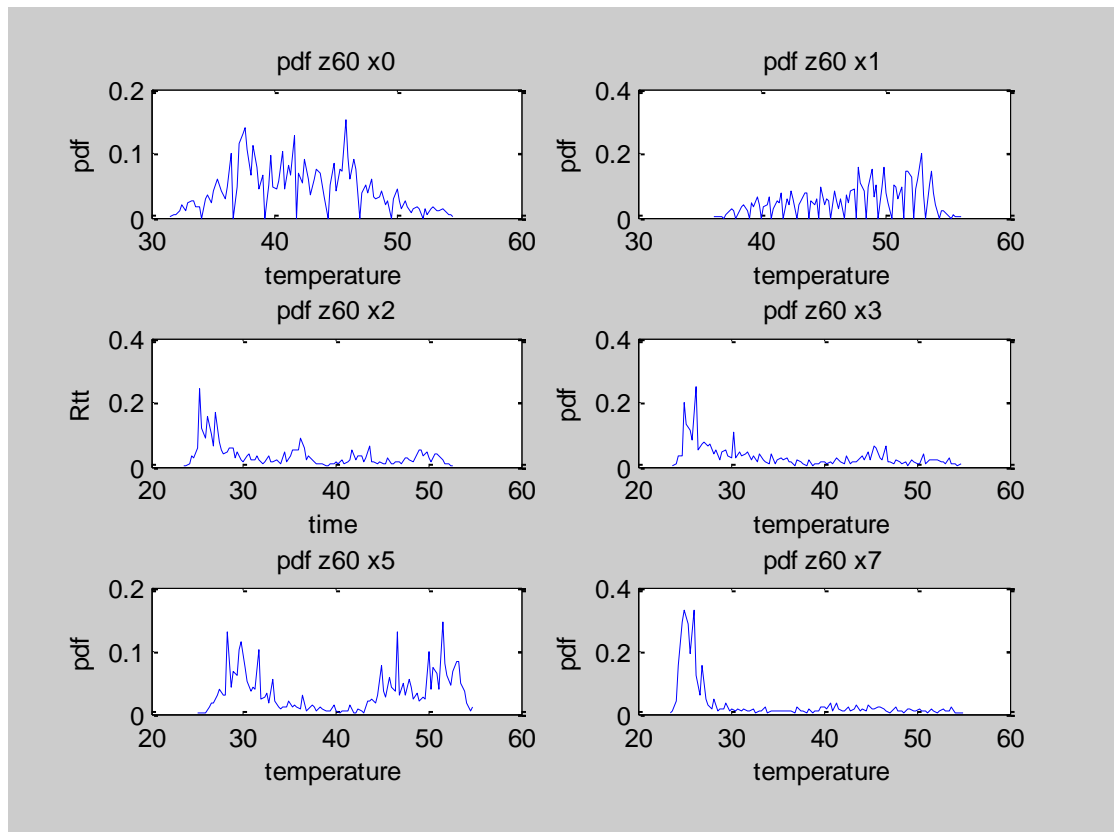
Εικόνα 5.17 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=15$ mm



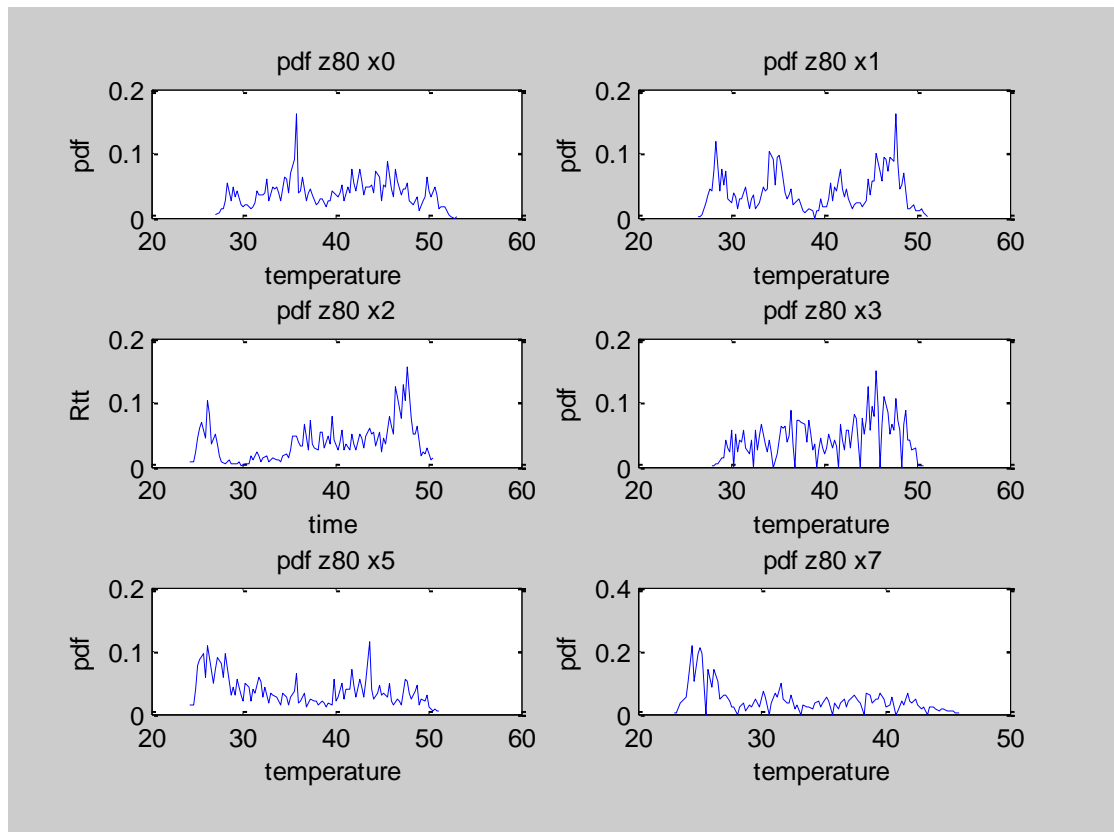
Εικόνα 5.18 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=25$ mm



Εικόνα 5.19 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=40$ mm



Εικόνα 5.20 $P=162$ W συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=60$ mm

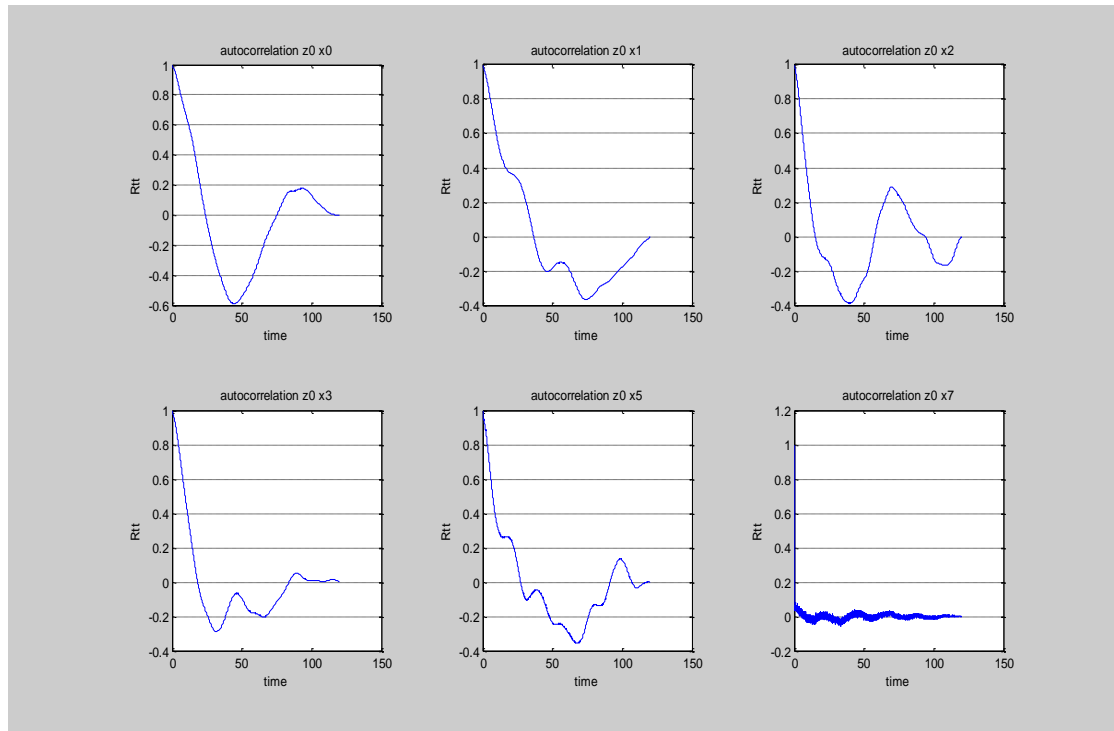


Εικόνα 5.21 $P=162\text{ W}$ συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για ύψος $z=80\text{ mm}$

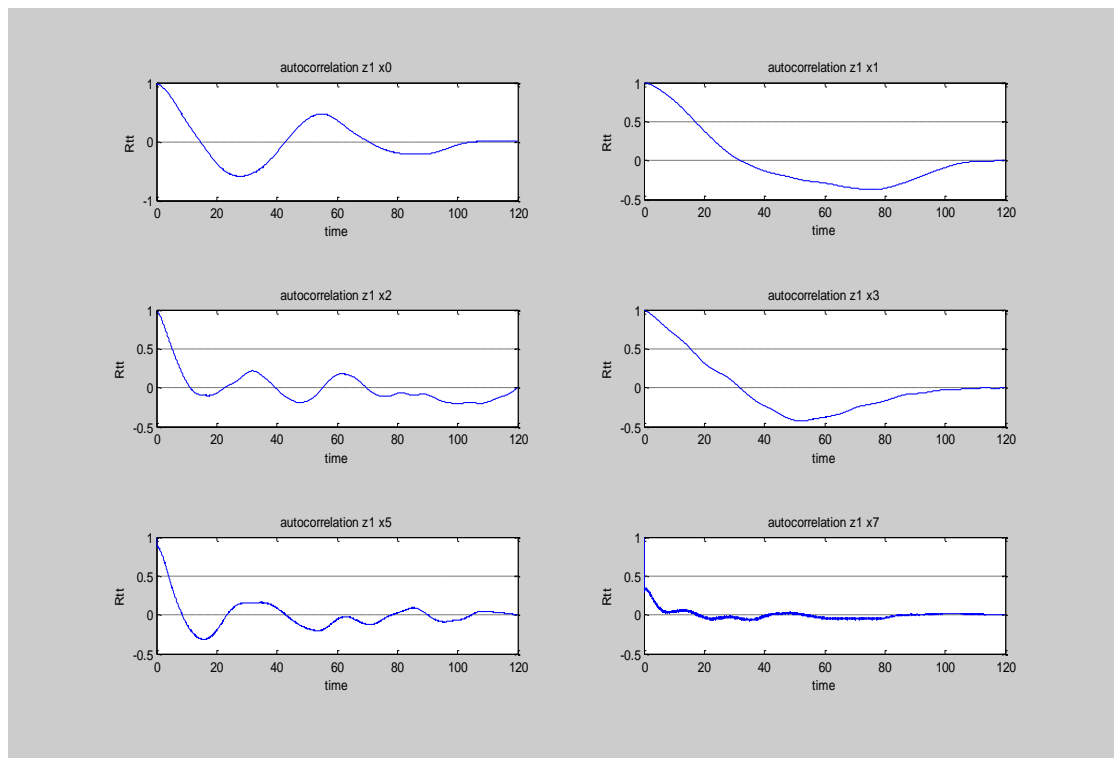
Με την εξέταση των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρείται συμμετρία για τις μεγαλύτερες εγκάρσιες αποστάσεις $x=5\text{ mm}$, και $x=7\text{ mm}$ από την αντίσταση, συμμετρία όμως η οποία εξαλείφεται για ύψος μεγαλύτερο από $z=4\text{ mm}$ από την αντίσταση. Συμμετρία τύπου Gauss δεν παρατηρείται σε καμία άλλη περίπτωση, γεγονός που σηματοδοτείται από την κυματομορφή του πλουμίου η οποία χαρακτηρίζεται ως μια ταλάντωση που εξασθενεί. Για την περιοχή ύψους από $z=4\text{ mm}$ έως 60 mm , διαφαίνεται μία τάση σύμφωνα με την οποία η μέγιστη τιμή της pdf μεταβαίνει από τις μεγαλύτερες σχετικά θερμοκρασίες στις μικρότερες καθώς απομακρυνόμαστε εγκάρσια από την αντίσταση. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με την παρατήρηση του Noto, ο οποίος εξήγαγε το συμπέρασμα ότι στο μέσο επίπεδο $x=0$, όπου διεξήγαγε τους αντίστοιχους υπολογισμούς η μέγιστη τιμή της pdf εμφανίζεται στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης $R_{TT}(t)$, οι οποίοι υπολογίστηκαν έχοντας ως είσοδο (input), τις διακυμάνσεις της

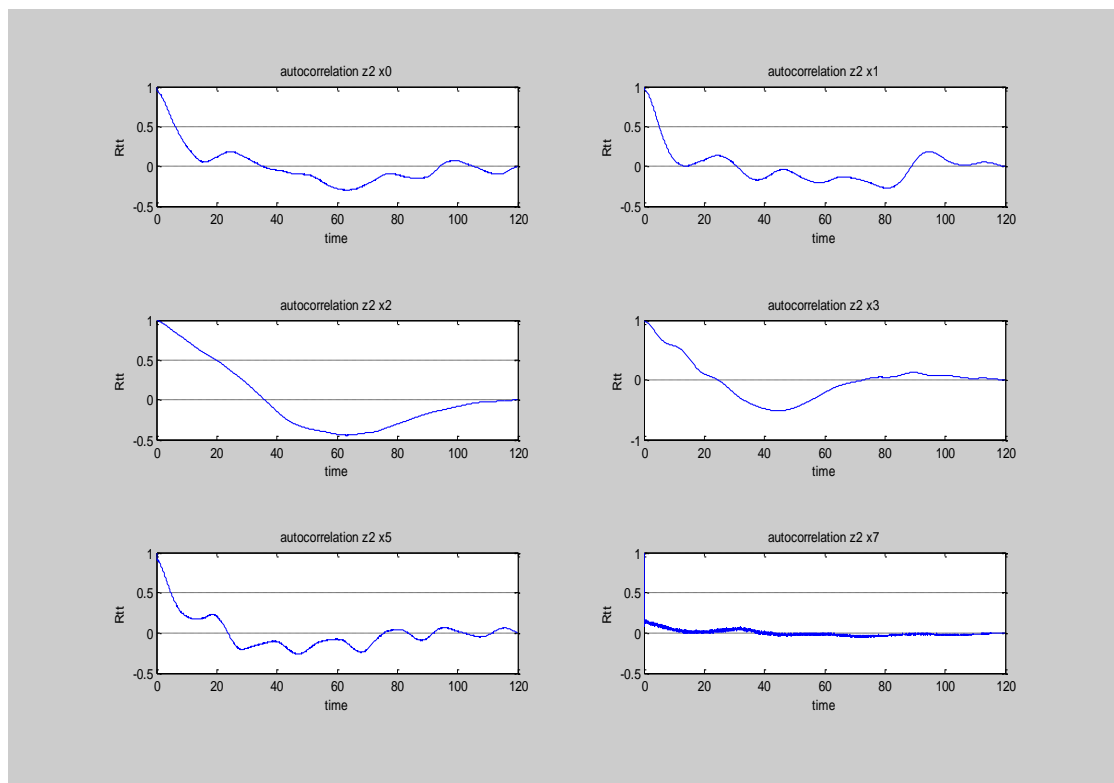
θερμοκρασίας (**fluctuations**), από τη μέση θερμοκρασία (**mean**). Τα σχετικά διαγράμματα παρουσιάζονται σε διάταξη καθομίσωση με την **pdf**.



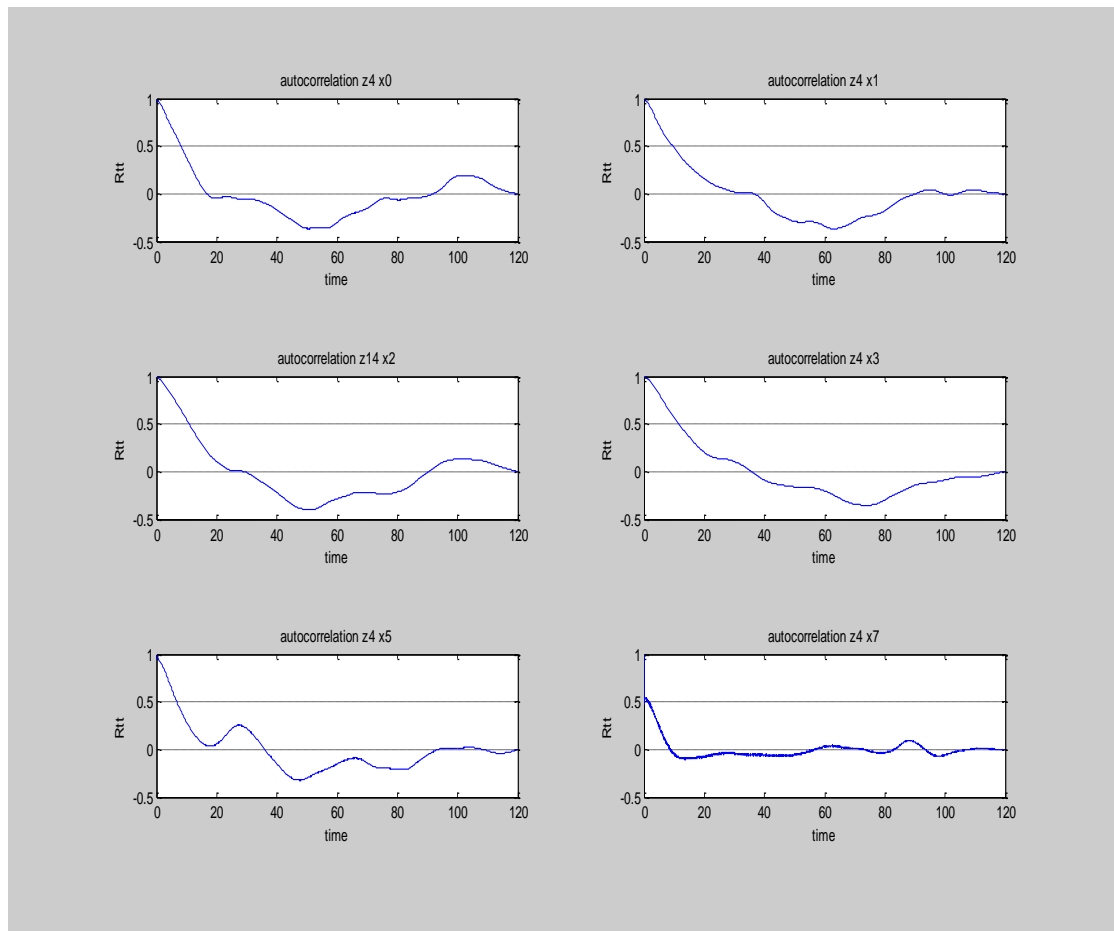
Εικόνα 5.22 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=0$



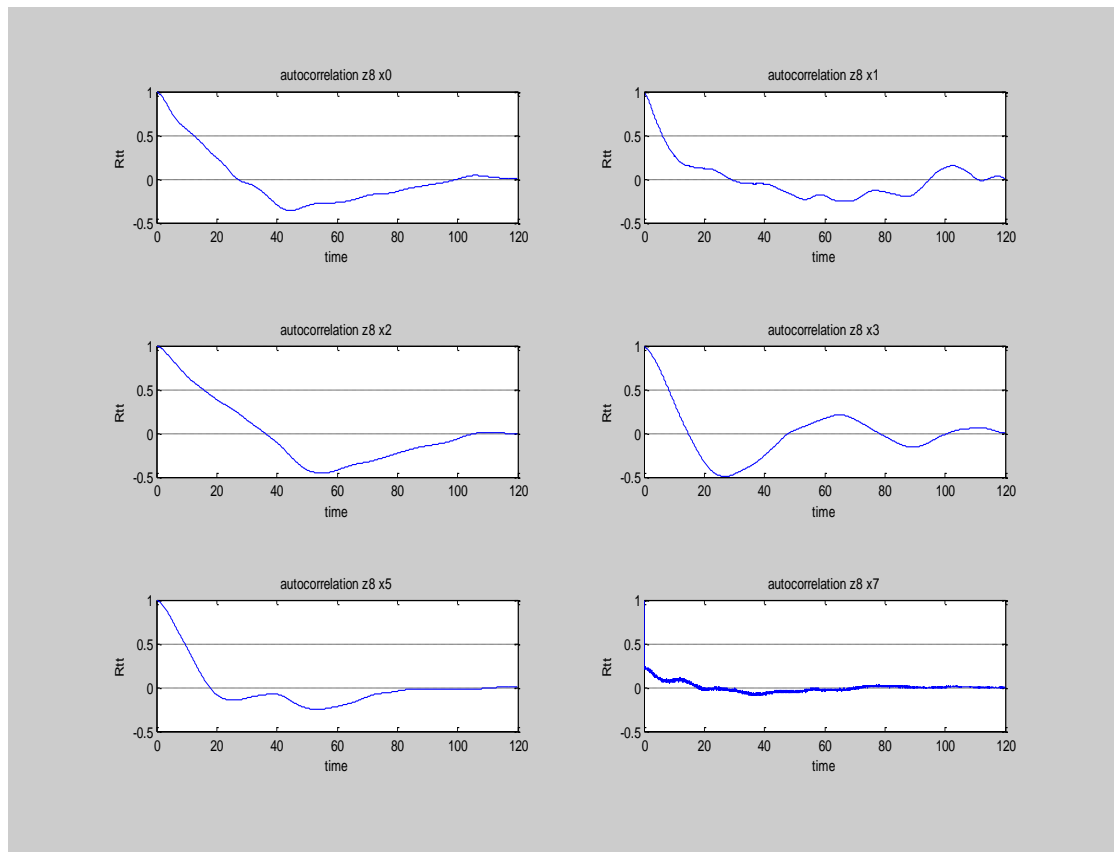
Εικόνα 5.23 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=1$ mm



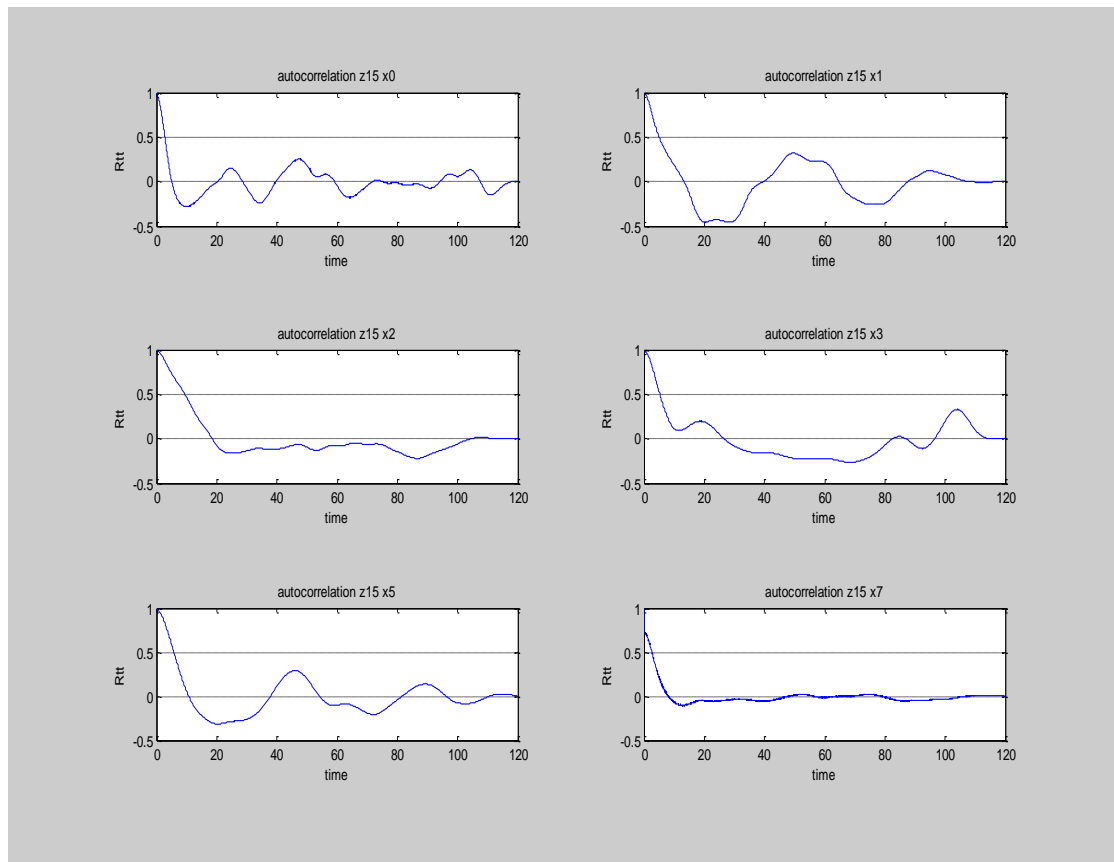
Εικόνα 5.24 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=2$ mm



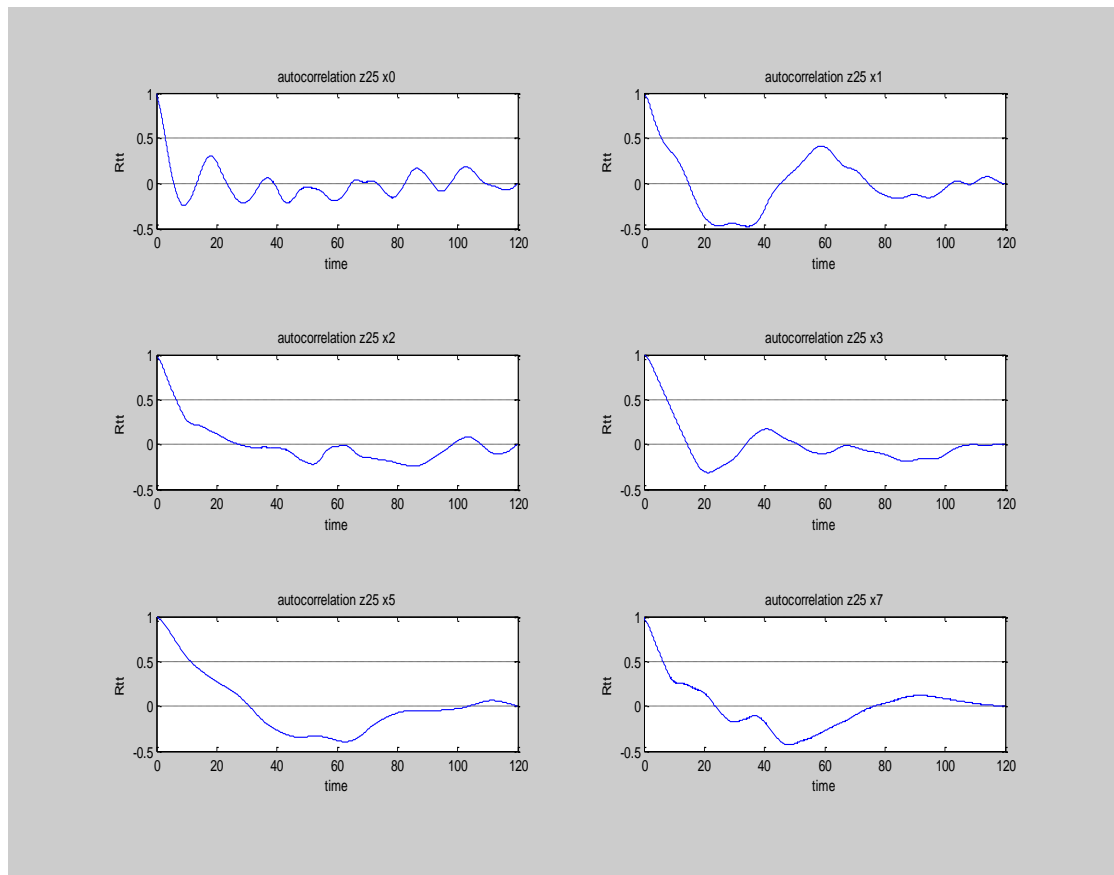
Εικόνα 5.25 $P=162\text{ W}$ Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=4\text{ mm}$



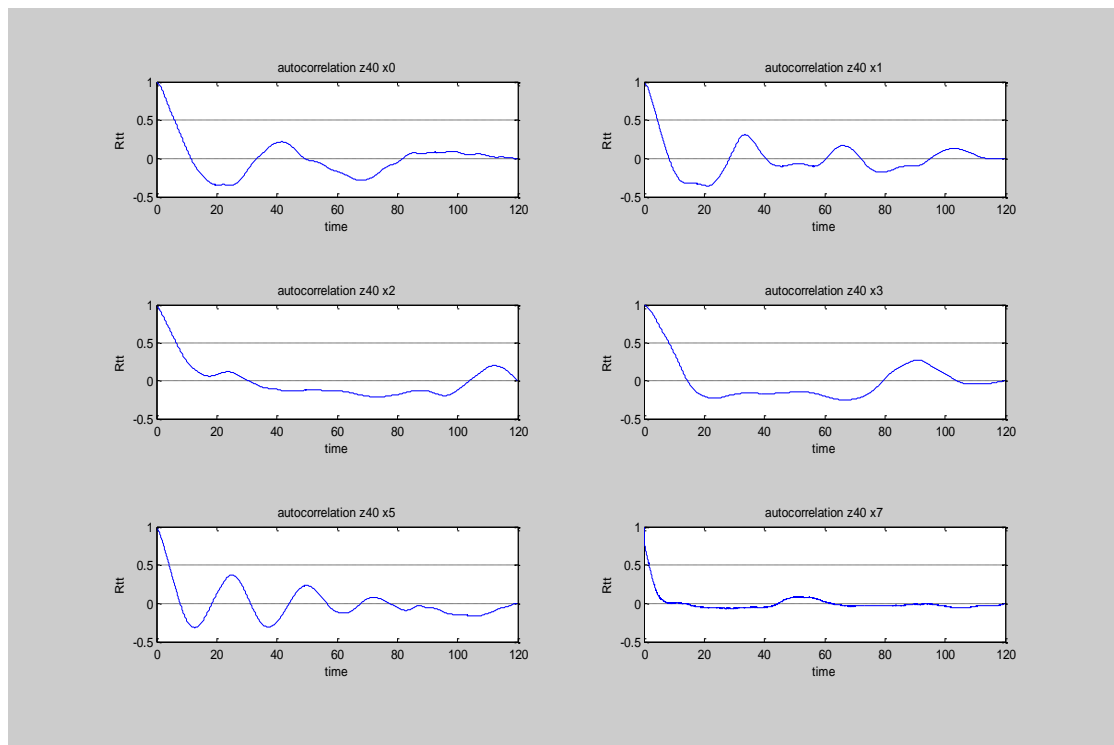
Εικόνα 5.26 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=8$ mm



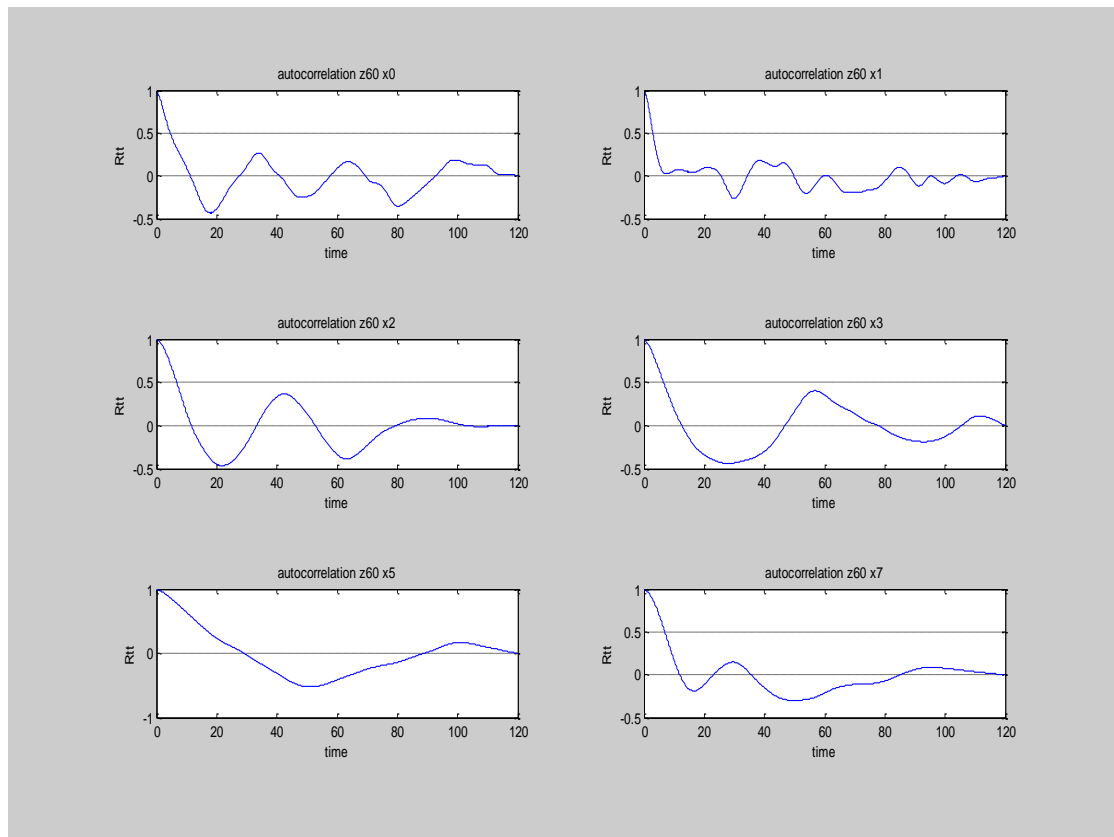
Εικόνα 5.27 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=15$ mm



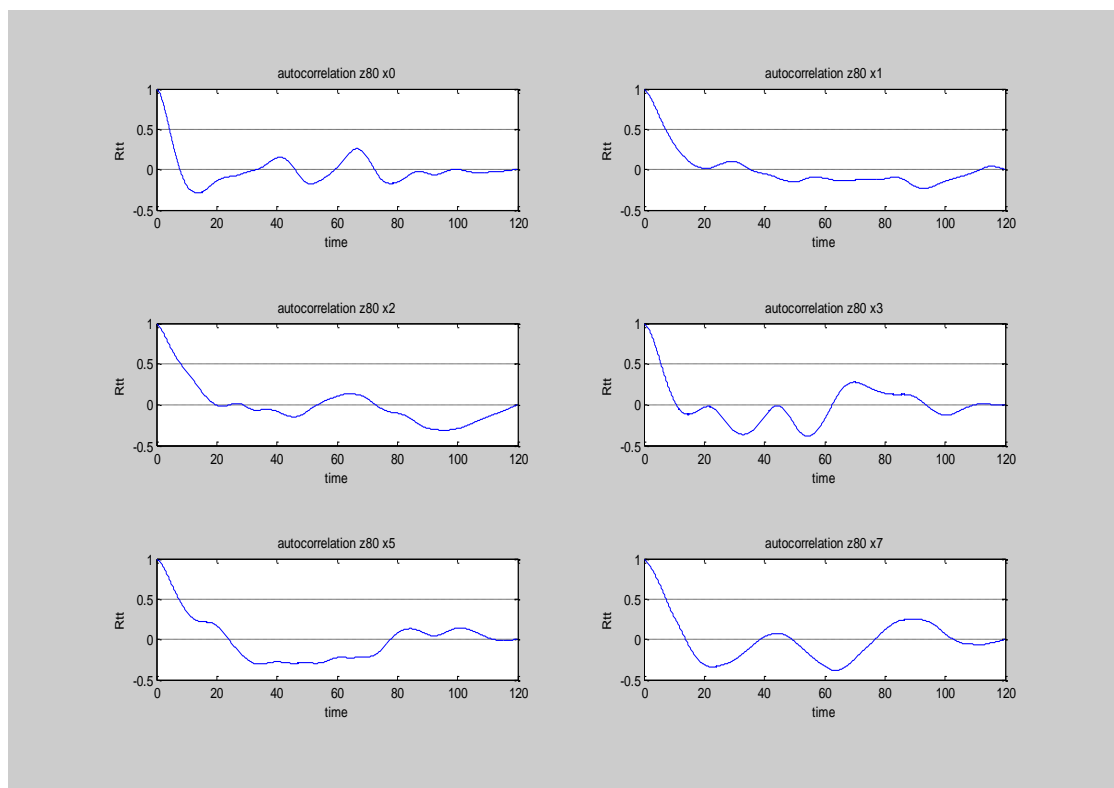
Εικόνα 5.28 $P=162\text{ W}$ Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=25\text{mm}$



Εικόνα 5.29 $P=162\text{ W}$ Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=40\text{ mm}$



Εικόνα 5.30 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=60$ mm

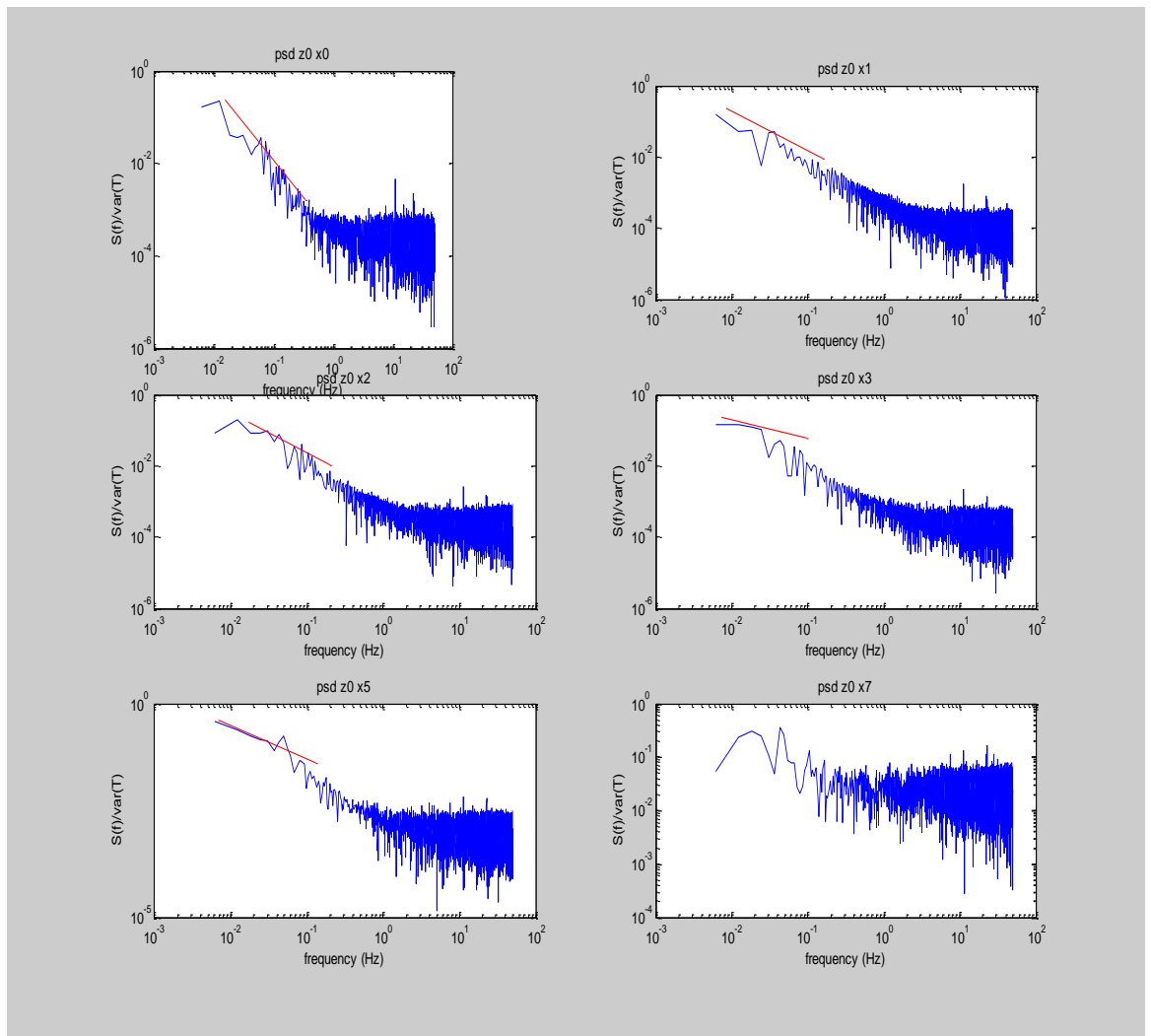


Εικόνα 5.31 $P=162$ W Autocorrelation coefficient $R_{TT}(t)$ για ύψος $z=80$ mm

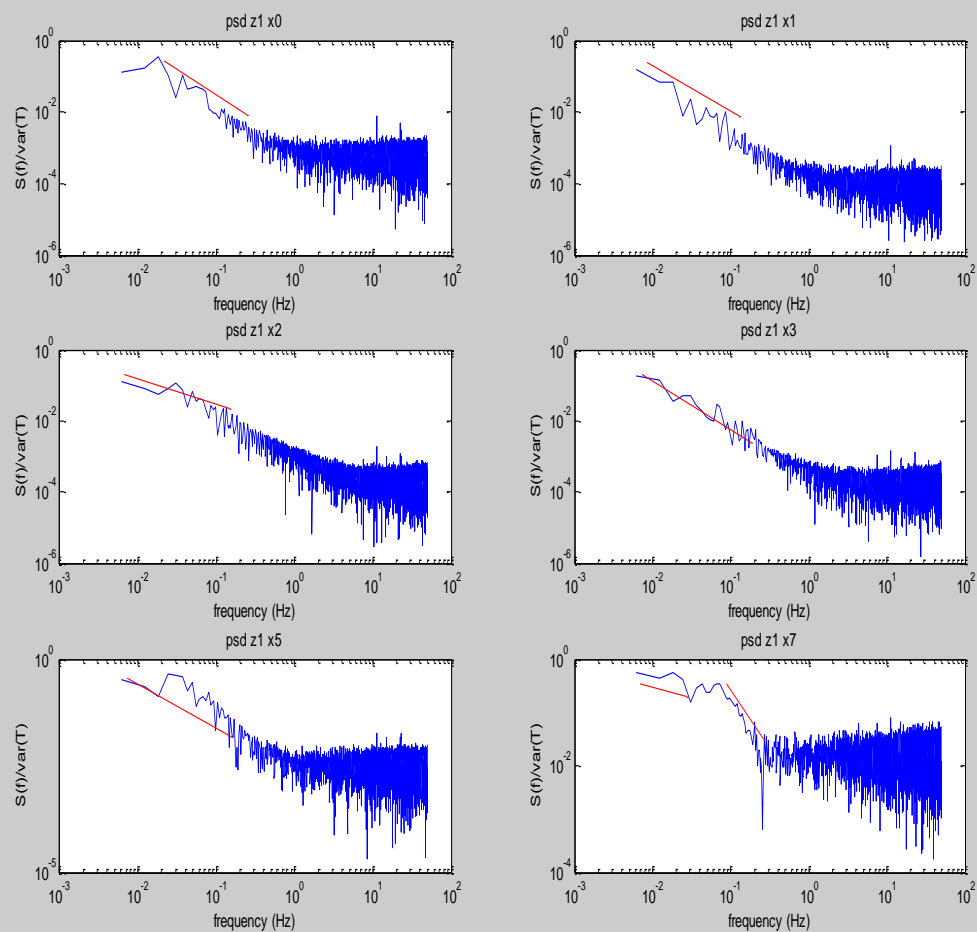
Σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις του Noto[14], έντονη συσχέτιση δεν εμφανίζεται εν γένει, παρά μόνο στις μεγαλύτερες εγκάρσιες αποστάσεις και για τα μικρότερα ύψη. Αντίθετα σε μεγαλύτερα ύψη από την αντίσταση όπου το πλούμιο έχει διασπαρεί ομοιογενώς και στην εγκάρσια διεύθυνση, ο συντελεστής εμφανίζει αδυναμία να συγκλίνει στο μηδέν. Παρατηρεί κανείς ότι τάση σύγκλισης σε μηδενική τιμή, εμφανίζεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων για **t>100 seconds**, τη στιγμή που ο χρόνος δειγματοληψίας που επιλέχθηκε ήταν **120 seconds**. Κατά συνέπεια επιλέχθηκε ένας χρόνος δειγματοληψίας της τάξεως της χρονικής κλίμακας του φαινομένου, επαρκής για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Μεγαλύτερη αξιοπιστία δε, θα προσεδίδοτο εάν είχε επιλεγεί ένα χρονικό διάστημα κάποιων ακέραιων πολλαπλάσιων της χρονικής κλίμακας. Για την περίοδο του συντελεστή αυτοσυσχέτισης δεν εξάγεται κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα.

5.1.4 Φάσμα θερμοκρασίας (Power spectral density)

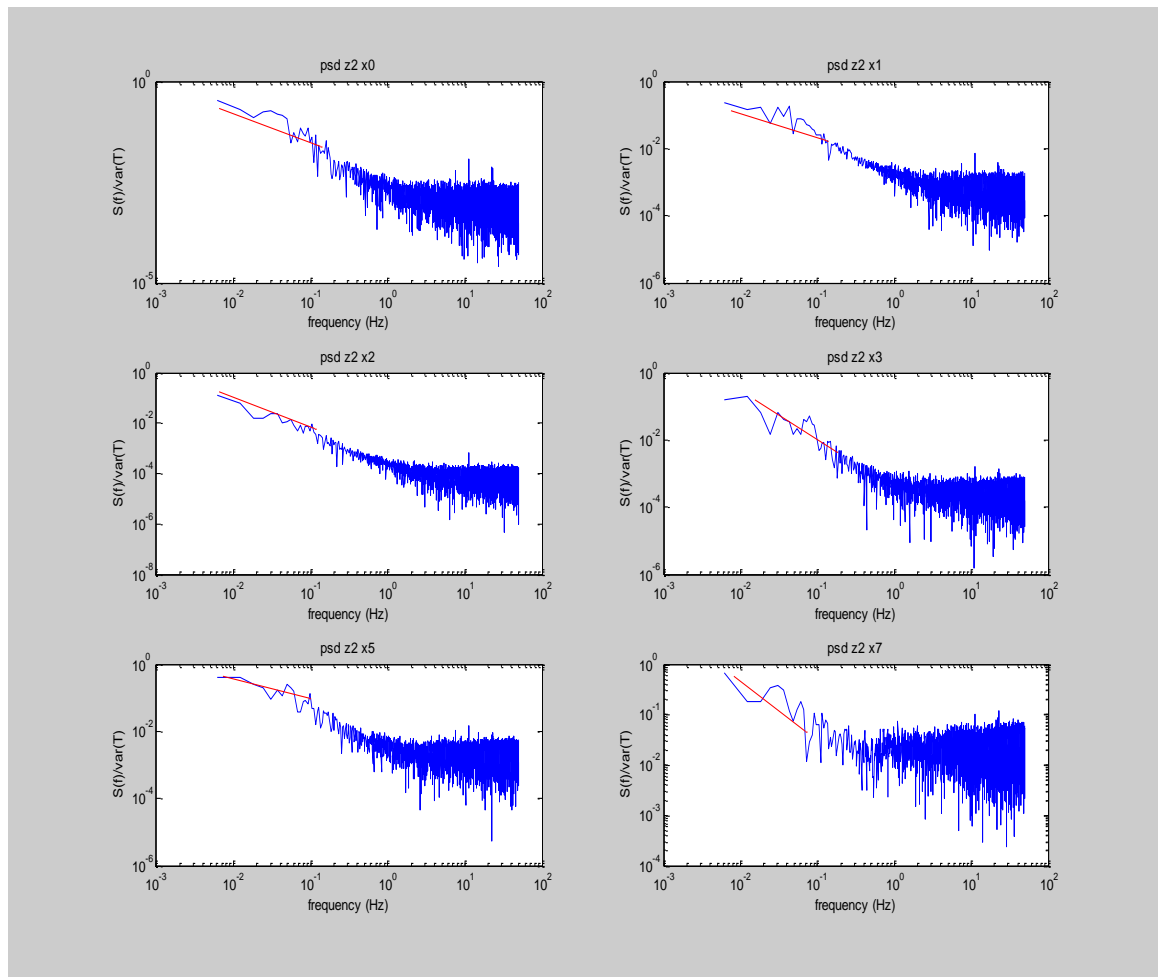
Σε αυτό το εδάφιο της εργασίας παρουσιάζονται τα διαγράμματα του **"power spectral density (psd)"** σε παρόμοια διάταξη με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και το συντελεστή αυτοσυσχέτισης που προηγήθηκαν. Ως τετμημένη ορίζεται η συχνότητα **f** κι ως τεταγμένη ο όρος **psd/var(T)**. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του **Fast Fourier Transform** σε **Matlab** κι είχαν ως είσοδο (**input**) τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε κάθε χρονοσειρά.



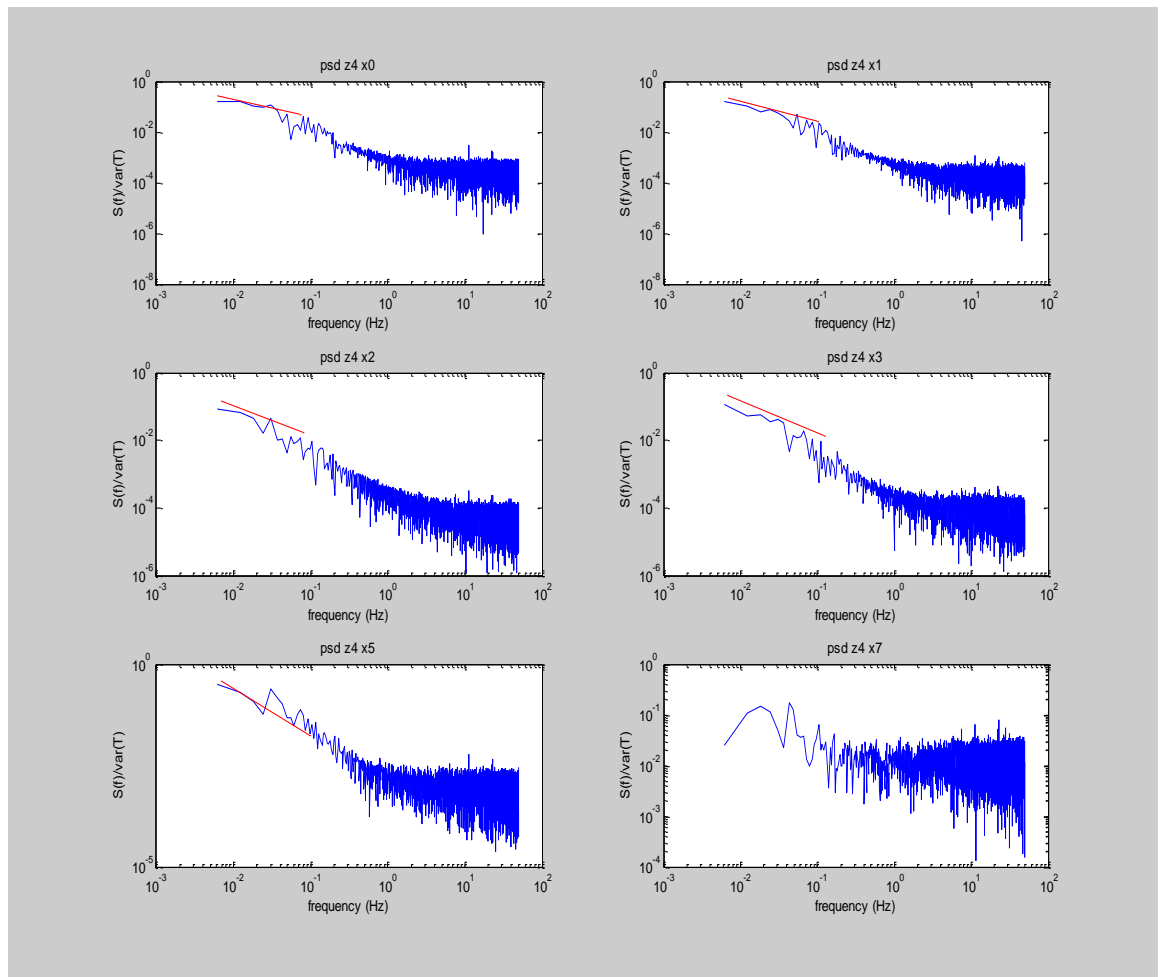
Εικόνα 5.32 $P=162\text{ W}$ power spectral density (psd) για ύψος $z=0$



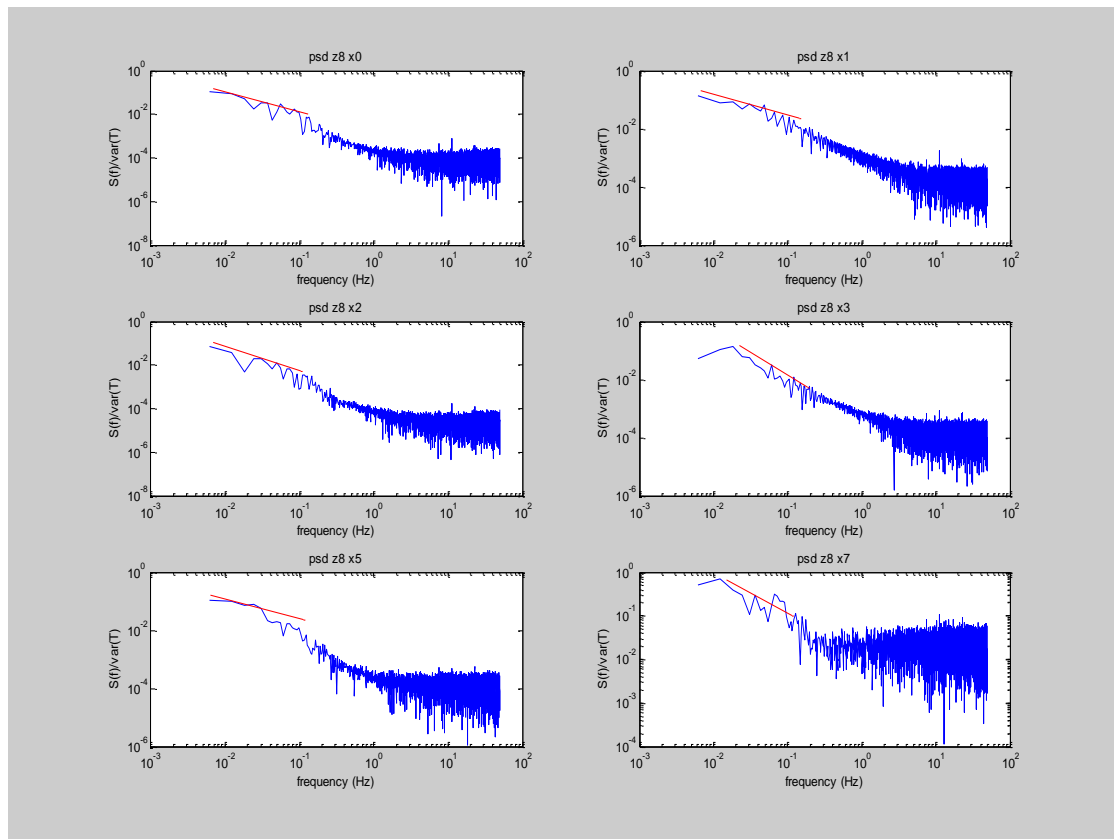
Εικόνα 5.33 $P=162\text{ W}$ power spectral density (psd) για ύψος $z=1\text{ mm}$



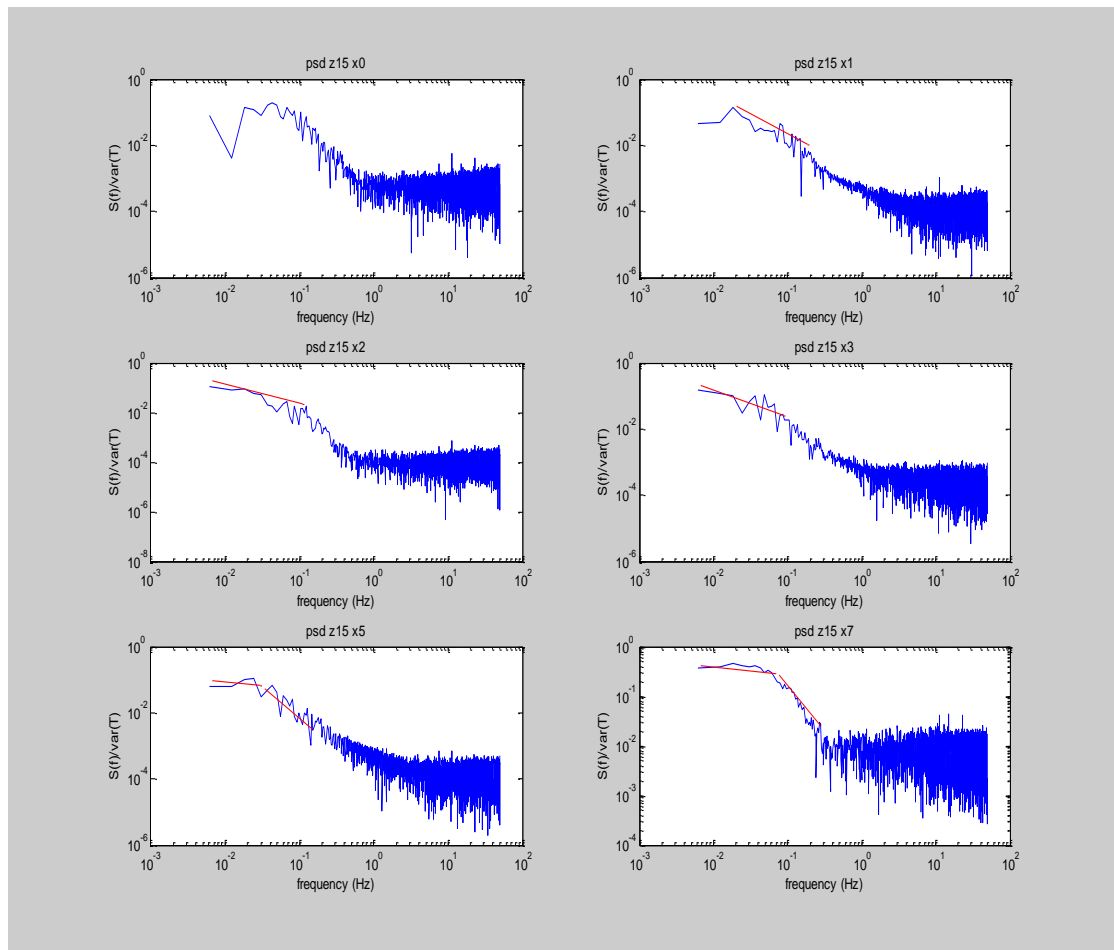
Εικόνα 5.34 $P=162$ W power spectral density (psd) για ύψος $z=2$ mm



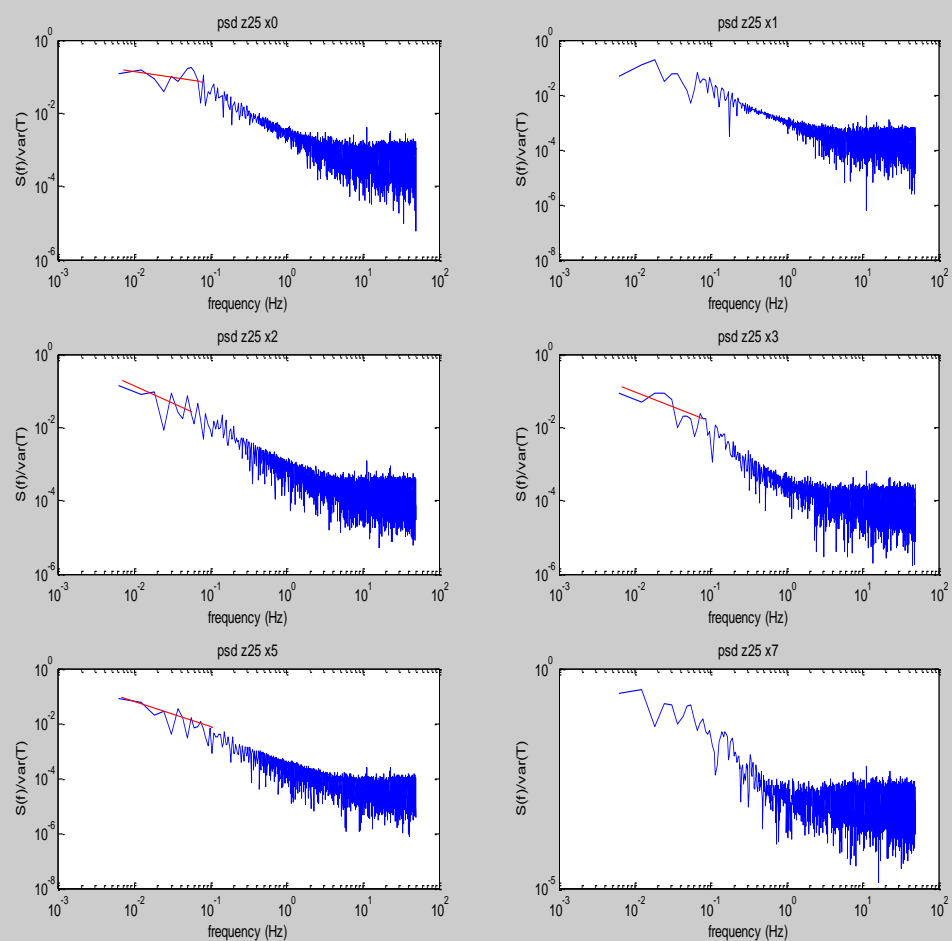
Εικόνα 5.35 $P=162\text{ W}$ power spectral density (psd) για ύψος $z=4\text{ mm}$



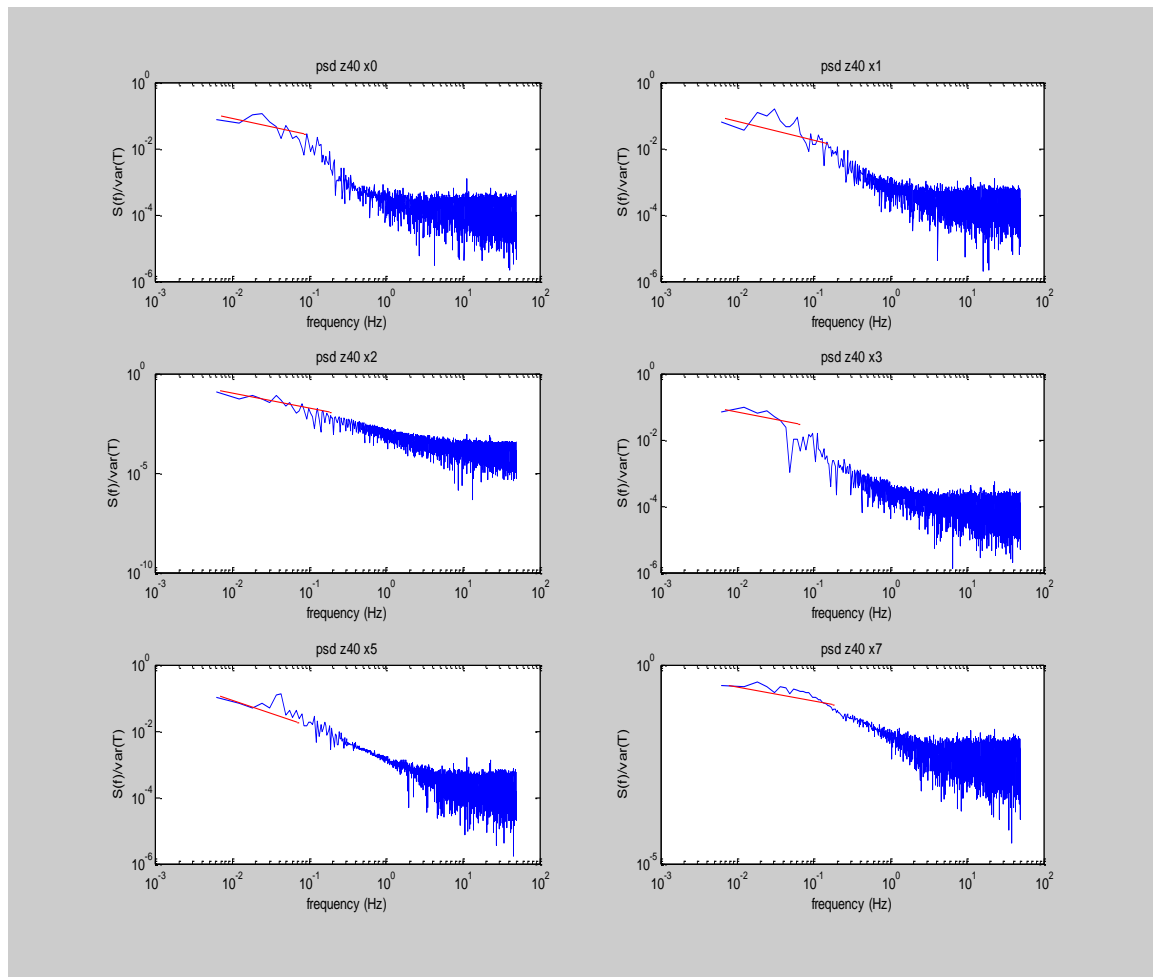
Εικόνα 5.36 $P=162\text{ W}$ power spectral density (psd) για ύψος $z=8\text{ mm}$



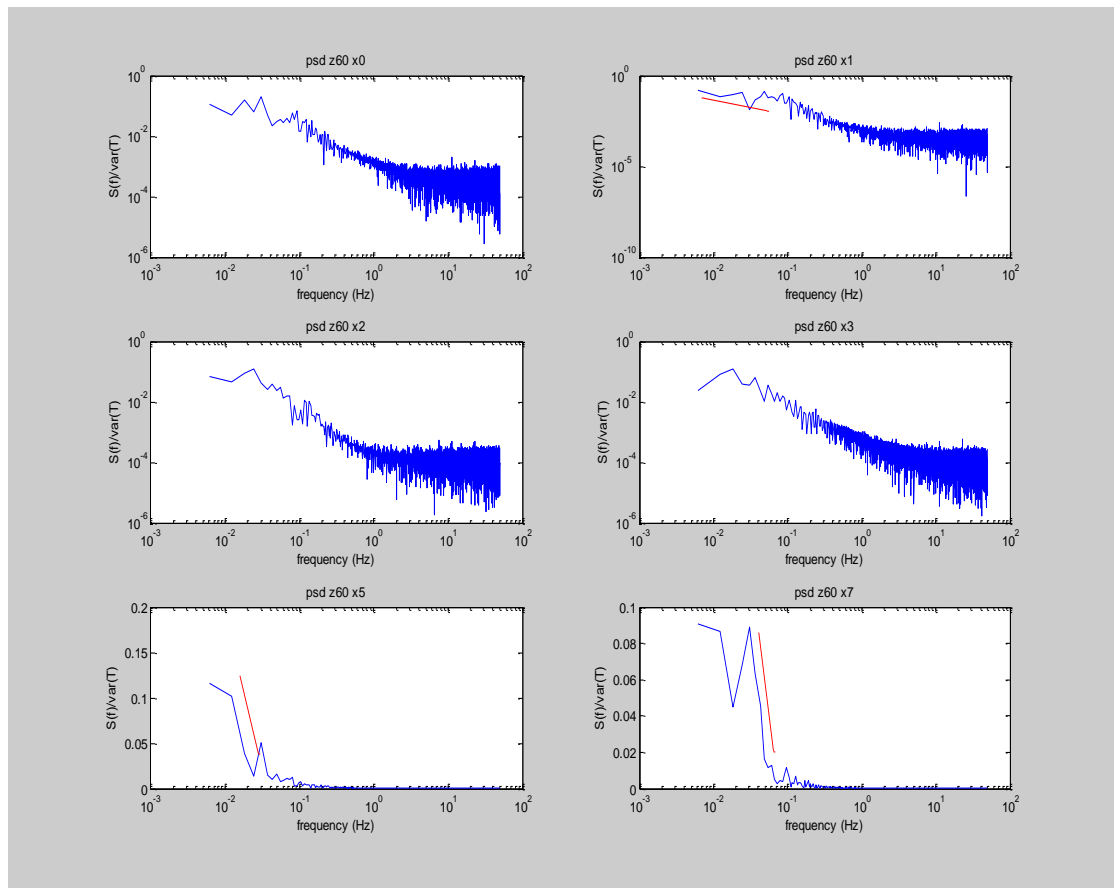
Εικόνα 5.37 $P=162$ W power spectral density (psd) για ύψος $z=15$ mm



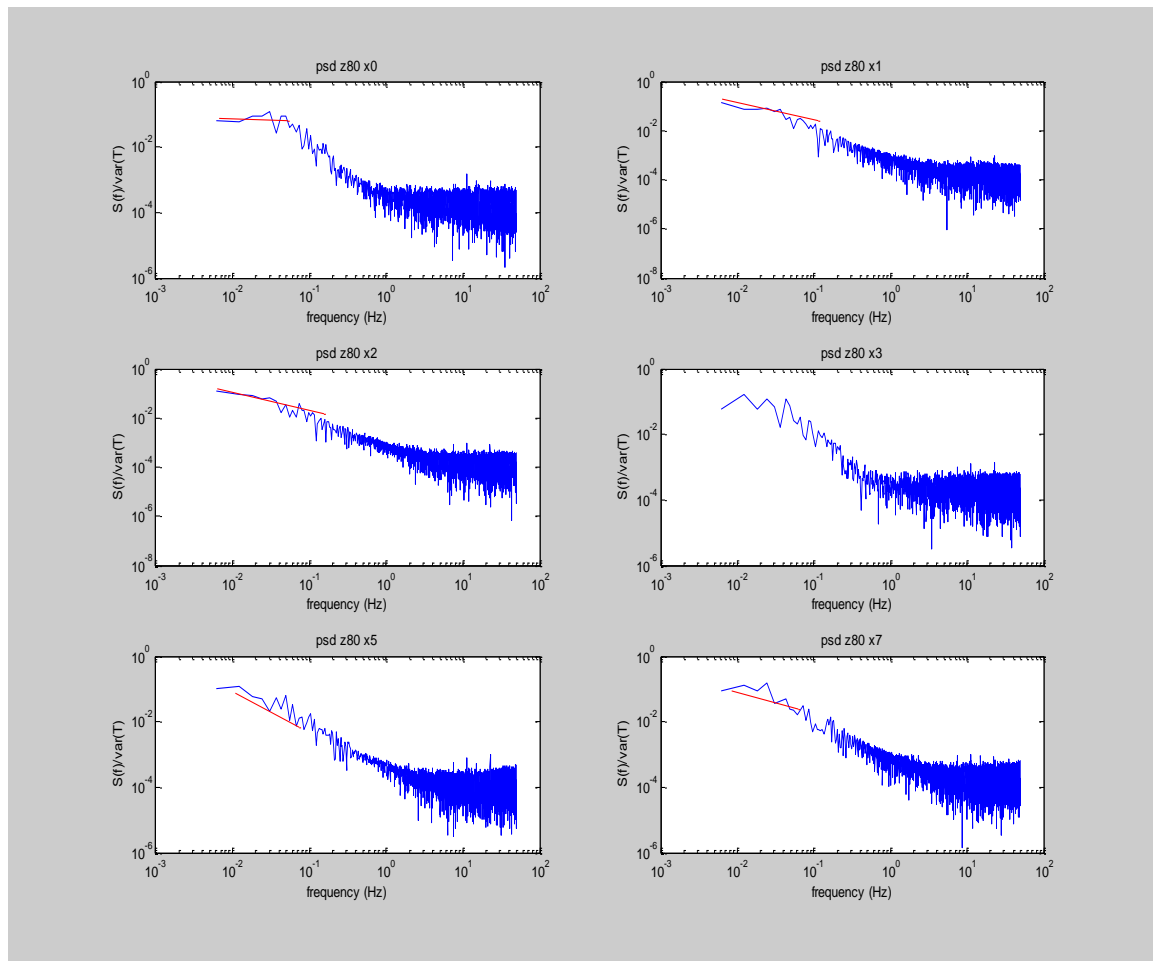
Εικόνα 5.38 $P=162$ W power spectral density (psd) για ύψος $z=25$ mm



Εικόνα 5.39 $P=162\text{ W}$ power spectral density (psd) για ύψος $z=40\text{ mm}$



Εικόνα 5.40 $P=162$ W power spectral density (psd) για ύψος $z=60$ mm



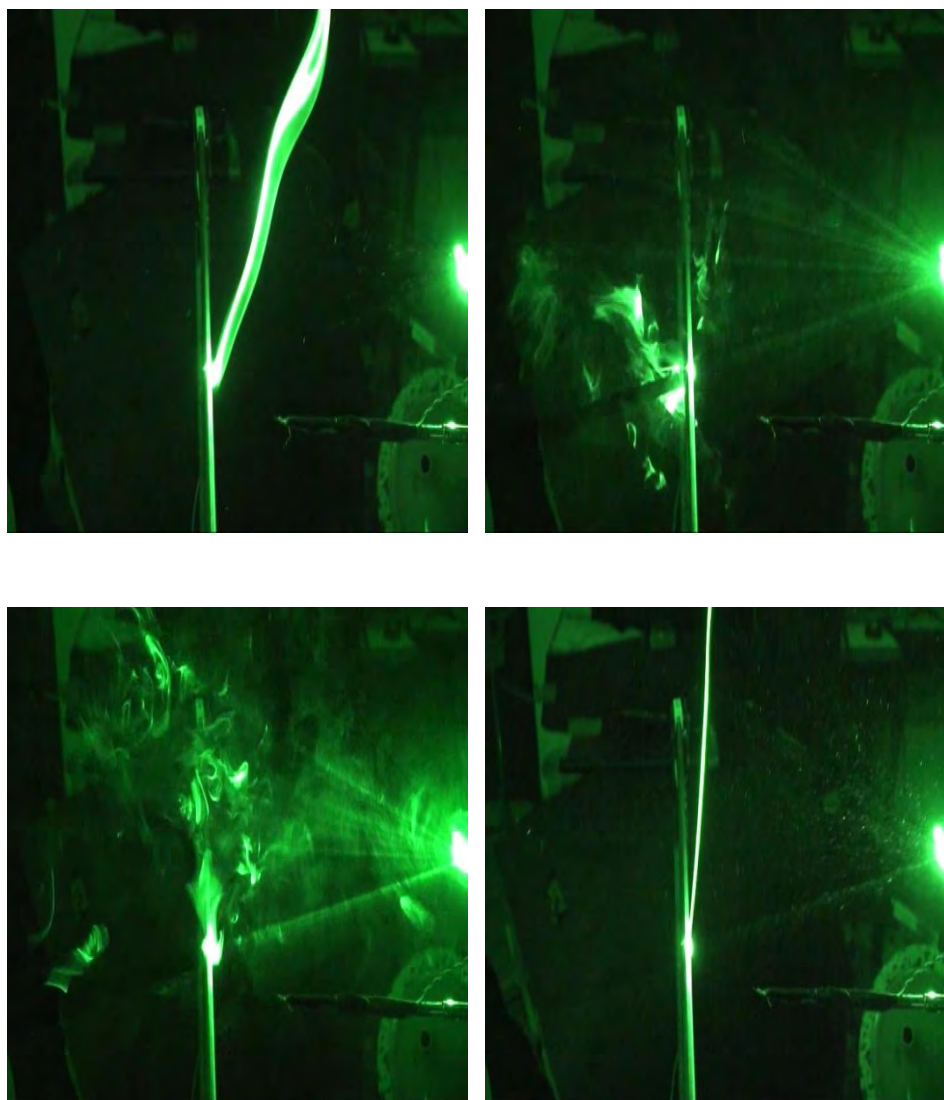
Εικόνα 5.41 $P=162\text{ W}$ power spectral density (psd) για ύψος $z=80\text{ mm}$

Με βάση μια επισκόπηση στα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι στην πλειονότητα των σημείων που λήφθηκαν και στις δύο διαστάσεις παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό τμήμα που αφορά τις συχνότητες της τάξεως $[10^{-2}, 10^{-1}]\text{ Hz}$. Η κλίση (slope) που παρουσιάζεται δε κινείται σε ένα εύρος $[1/2, 1]$. Περισσότερο έντονες κλίσεις σαν κι αυτές που παρατήρησε ο Noto (τιμές **4.5** και **8**), παρουσιάζονται σε μεμονωμένες περιπτώσεις και αφορούν μεγάλες εγκάρσιες αποστάσεις από την αντίσταση.

5.1.5 Οπτικοποίηση της ροής

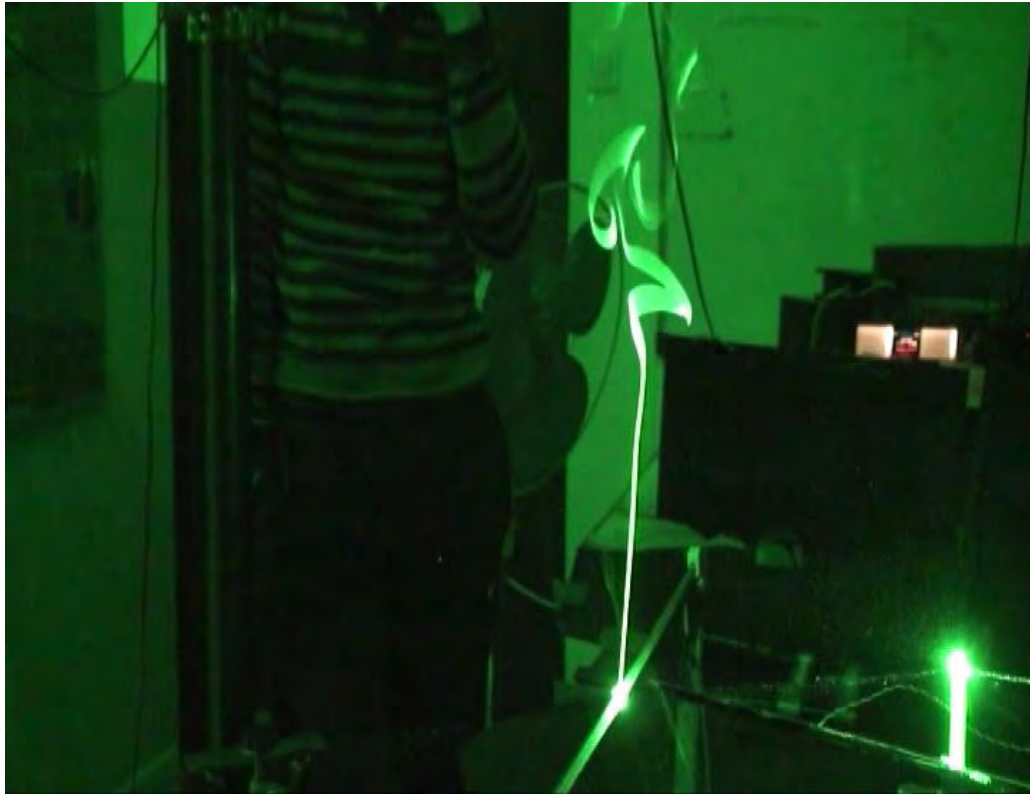
Οπτικοποίηση της ροής πραγματοποιήθηκε με σκοπό την απεικόνιση της κίνησης του δισδιάστατου θερμικού πλουμίου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε κατακόρυφο επίπεδο φωτός (**laser light sheet**) πάνω στο οποίο απεικονίστηκε η κίνηση του πλουμίου με τη βοήθεια ελαιολιπαντικού

κινητήτρα αυτοκινήτου προδιαγραφής **5W40**. Η εικόνα κατεγράφη με τη χρήση home videocamera.



Εικόνα 5.42 α) πλούμιο χωρίς τύρβη β) 40 Hz γ) 100 Hz δ) 300 Hz

Από την Εικόνα 5.42 α) πλούμιο χωρίς τύρβη β) 40 Hz γ) 100 Hz δ) 300 Hz παρατηρείται η μορφή του στρωτού πλουμίου κι εν συνεχεία η απόσβεσή του υπό την επίδραση της ισχυρής τύρβης των 40 Hz. Στα 100 Hz, όπου η τύρβη είναι πιο αδύναμη παρατηρείται μια πιο έντονη διασπορά στο χώρο, η οποία δεν οφείλεται όμως στην ενονότερη διασπορά λόγω της τύρβης, αλλά στην υψηλότερη θερμοκρασία τόσο του πλουμίου αλλά και της T_{wall} της αντίστασης. Με την επιβολή τύρβης συχνότητας μεγαφώνων 300 Hz, η οποία χαρακτηρίζεται ως αδύναμη, παρατηρείται η μηδενική επίδραση στο πλούμιο, το οποίο ανακτά τη στρωτή του μορφή.



Εικόνα 5.43 θερμικό πλούμιο στην αρχή στρωτό και στη συνέχεια ασταθές και τυρβώδες

Η Εικόνα 5.43 παρουσιάζει τη συνολική κατανομή του πλούμιό το οποίο στην αρχή είναι στρωτό αλλά στη συνέχεια λόγω της μεγάλης ανωστικής ορμής εμφανίζει αυξημένους αριθμούς **Re**, γίνεται ασταθές και στη συνέχεια τυρβώδες.

Η φαινομενολογική προσέγγιση για την απόσταση στην οποία το στρωτό πλούμιο μεταπίπτει στην αστάθεια και στην τύρβη συμπίπτει πολύ καλά με τους πειραματικούς υπολογισμούς. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν:

$$Gr_{cr}=10^9 \rightarrow z=24 \text{ cm (36d)}$$

$$\log Ra_{cr} \rightarrow z=15 \text{ cm (23d)}$$

Από την εξίσωση 2-31 προκύπτει **Nu=2.68**

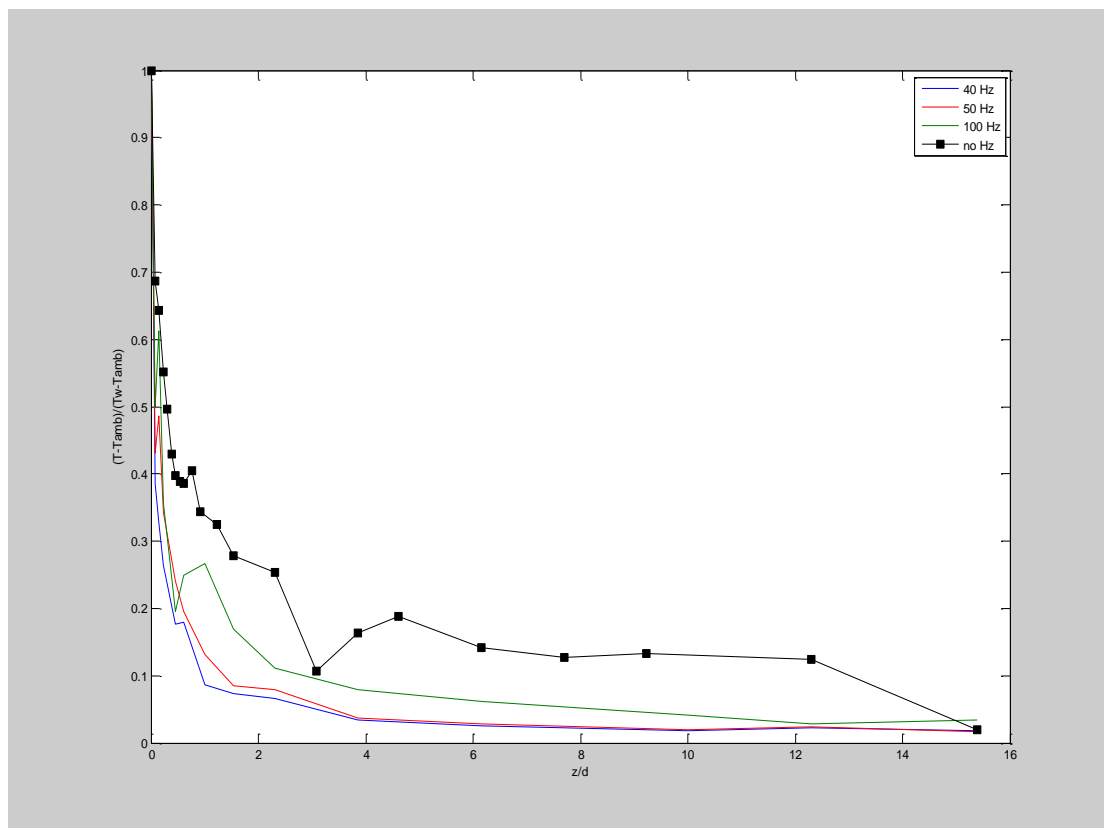
ενώ βασιζόμενοι στον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής **h**:

$$h = \frac{V \cdot I - Q_{RAD}}{(T_{wall} - T_{amb}) \cdot A} \quad 5-3$$

υπολογίζεται **Nu=5.85** μια πολύ καλή σύγκλιση δηλαδή ως προς την τάξη μεγέθους.

5.1.6 Επίδραση της τύρβης στο θερμικό πλούμιο

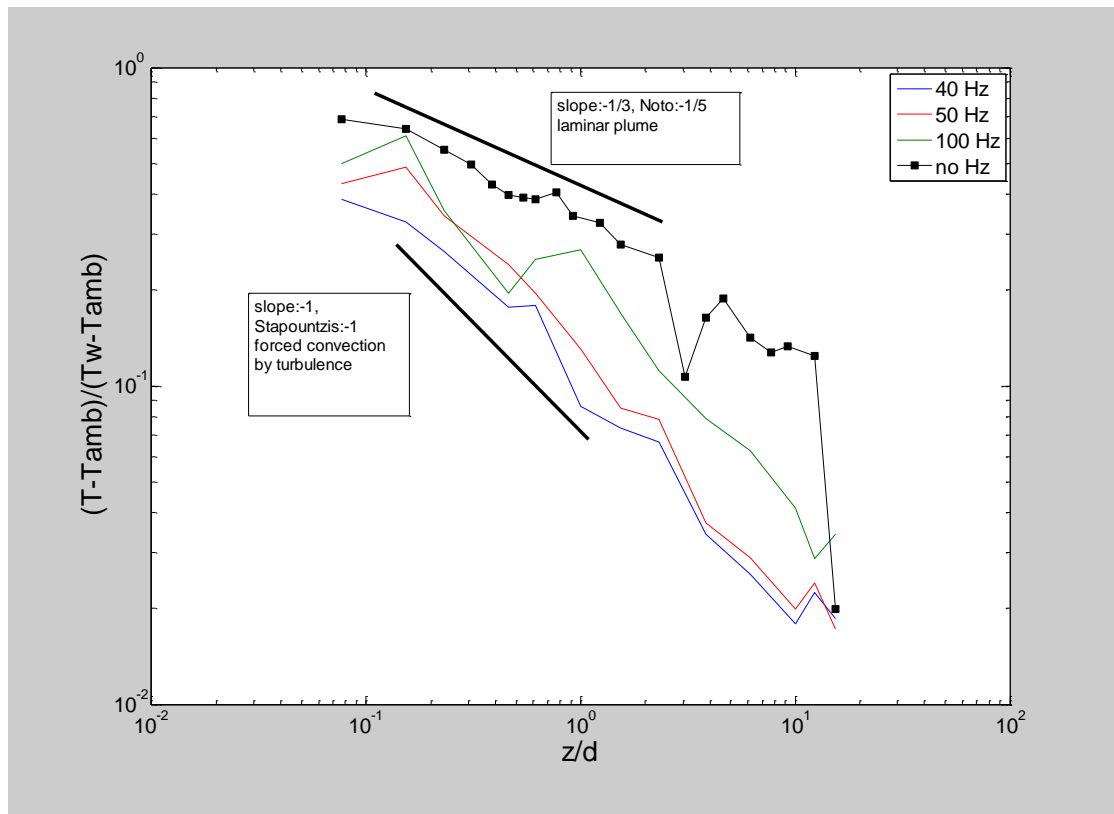
Σε αυτό το στάδιο μελετήθηκε η επίδραση της τύρβης μέσω των μεγαφώνων στην κατανομή του θερμικού πλούμιου. Η παρεχόμενη θερμική ισχύς στην αντίσταση παρέμεινε σταθερή κατά τη διάρκεια των υπολογισμών στα **162 W**.



Εικόνα 5.44 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την κατακόρυφη απόσταση z για όλες τις περιπτώσεις με ή χωρίς την επίδραση τύρβης μεγαφώνων, κεντρική γραμμή, $P=162\text{ W}$

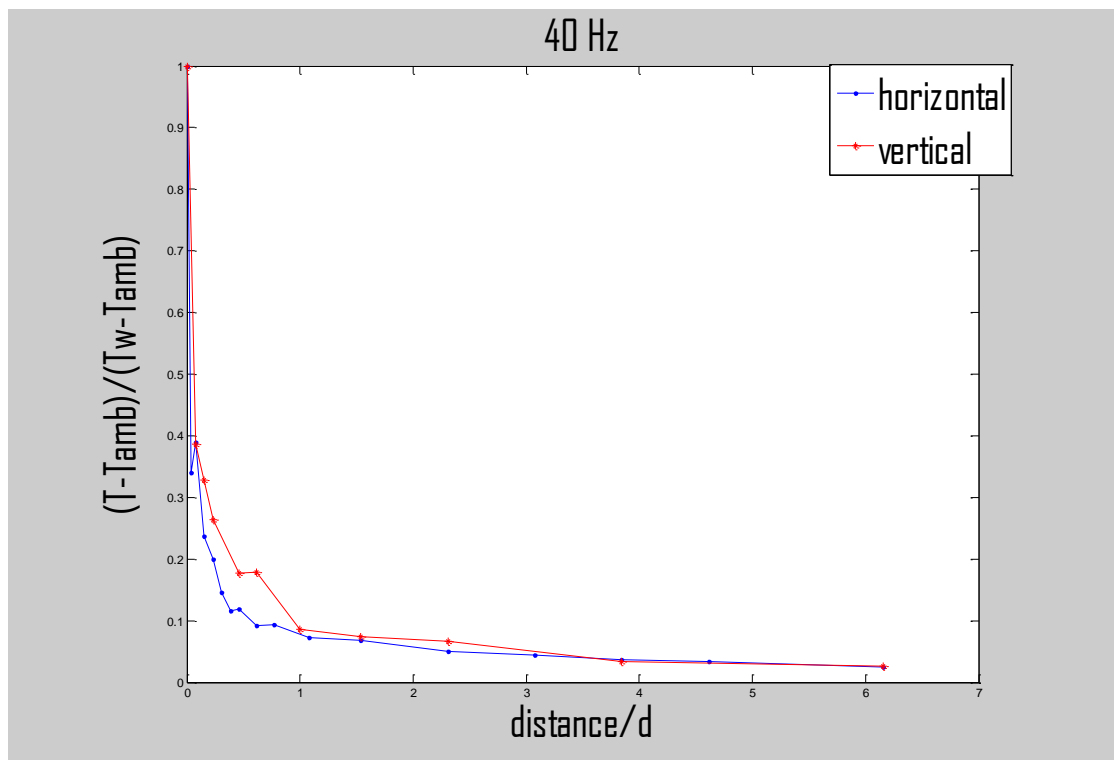
Από την εικόνα 5.44 παρατηρείται ότι η παρουσία της τύρβης επιφέρει απόσβεση του θερμικού πλούμιου και ψύξη της γύρω περιοχής. Ειδικότερα χωρίς την τύρβη το θερμικό πλούμιο τείνει να προσεγγίσει την ατμοσφαιρική θερμοκρασία σε απόσταση τριπλάσια σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου έχουμε την παρουσία της τύρβης. Επιπρόσθετα, όπως είναι φανερό η παρουσία της τύρβης με μεγαλύτερη ένταση στα **40 Hz** περιορίζει την εξάπλωση του θερμικού πλούμιου κυρίως λόγω της πιο έντονης ψύξης που επιβάλλει στο τοίχωμα της αντίστασης. Οι μετρήσεις συνεπώς της θερμοκρασίας έρχονται σε συμφωνία με την οπτικοποίηση που προηγήθηκε.

Σε αυτό το σημείο παρατίθεται το ίδιο διάγραμμα σε λογαριθμική μορφή:



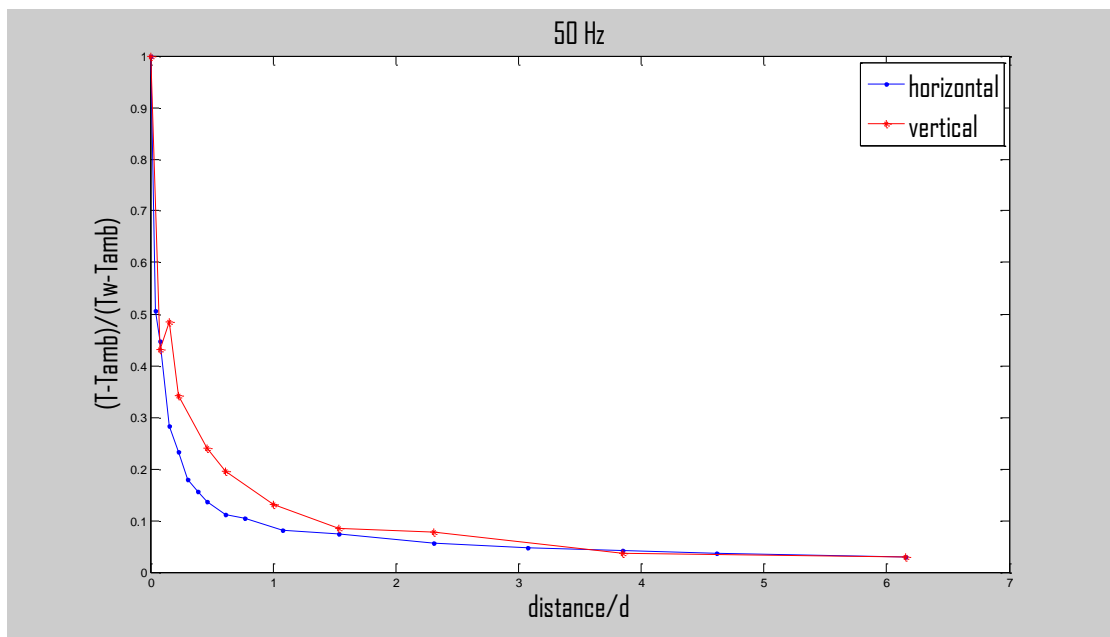
Για την περίπτωση του στρωτού πλουμίου υφίσταται μια διαφοροποίηση ως προς την κλίση της θερμοκρασίας ανάμεσα στην παρούσα εργασία (**-1/3**) και την εργασία του **Noto (-1/5)**. Οι διαφορετικές συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων · παρούσα εργασία κλειστός χώρος, Noto ανοικτός οδηγούν σε αυτή τη διαφορά. Παράλληλα παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση με τα αποτελέσματα της εργασίας του **Σταπουντζή [13]** για την επίδραση της τύρβης σε πλούμιο σημειακής πηγής υπό την επίδραση πλεγματικής τύρβης με μηδενική μέση ταχύτητα στην οριζόντια διεύθυνση.

Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά για την επίδραση της τύρβης στο μέτρο της ομοιογένειας που επιφέρει στη διασπορά του πλουμίου.



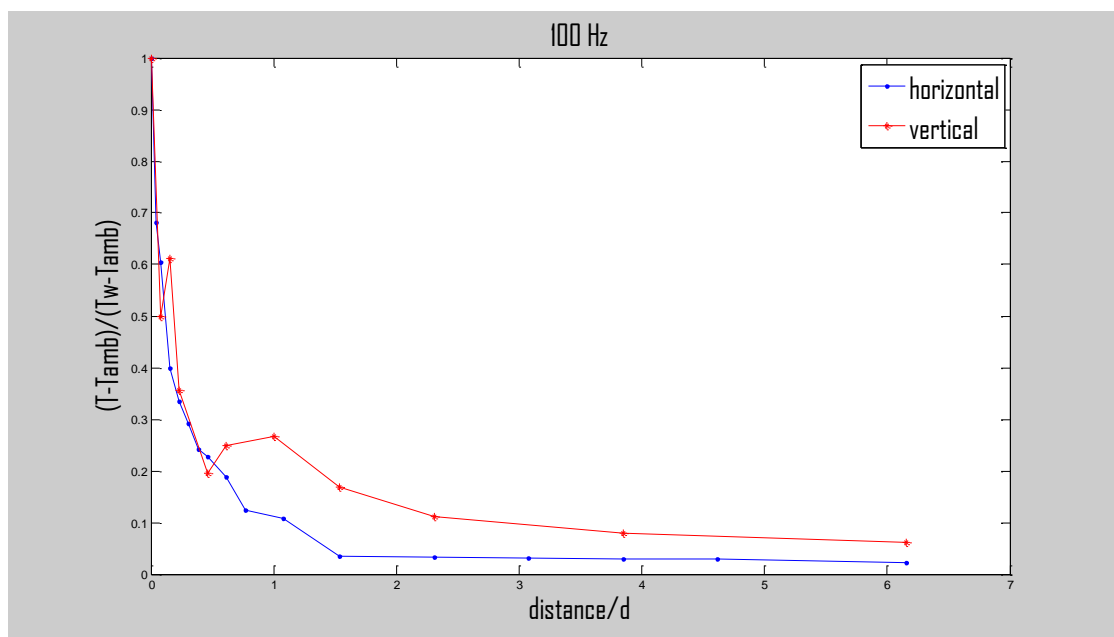
Εικόνα 5.45 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την κατακόρυφη και την οριζόντια απόσταση αντίστοιχα για τύρβη 40 Hz

Η εικόνα 5.45 φανερώνει ότι τύρβη ισχυρής έντασης στα 40 Hz επιφέρει ομοιογένεια στο θερμοκρασιακό πεδίο γύρω από την αντίσταση. Η ισότροπη κι ομογενής τύρβη υπερνικά τις δυνάμεις της φυσική συναγωγής σε αυτά τα επίπεδα. Το γεγονός αυτό επαναλαμβάνεται και στα 50 Hz (Εικόνα 5.46).

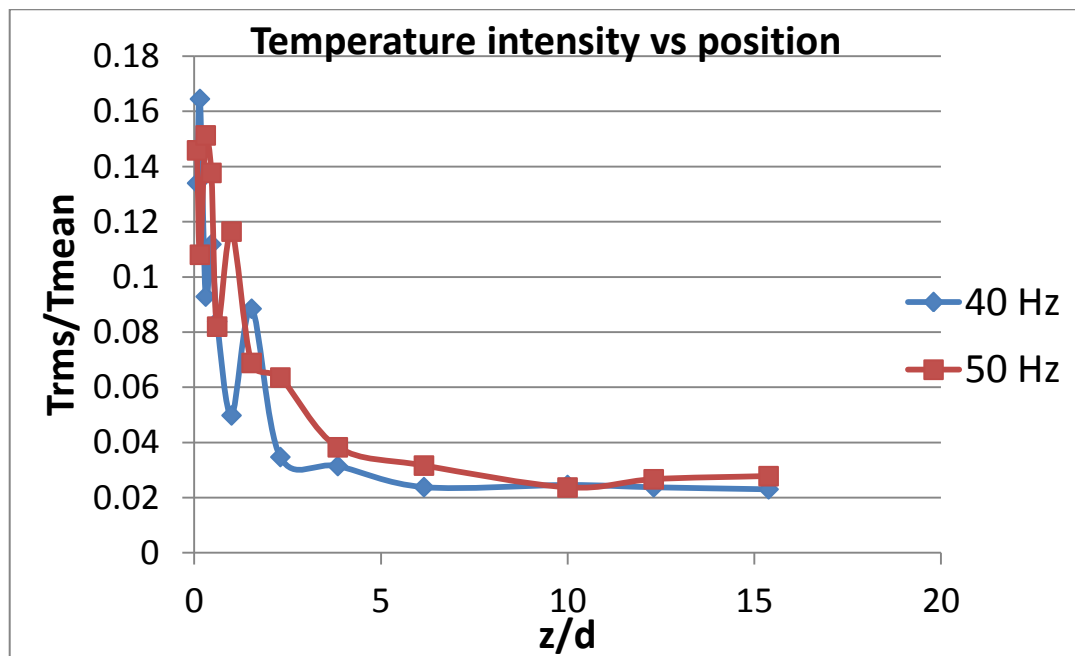


Εικόνα 5.46 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με την κατακόρυφη και την οριζόντια απόσταση αντίστοιχα για τύρβη 50 Hz

Μειώνοντας όμως την ένταση της τύρβης (**100 Hz**) είναι η απόκλιση που αρχίζει να εμφανίζεται μεταξύ οριζόντιας και κατακόρυφης διάστασης. Η φυσική συναγωγή αρχίζει να αυξάνει την επίδρασή της και θα γίνει κυρίαρχη για συχνότητες άνω των **300 Hz** (πλήρως στρωτό πλούμιο) όπως φάνηκε και στην οπτικοποίηση της ροής.



Σε αυτό το σημείο γίνεται μια σύγκριση όσον αφορά τη χωρική μεταβολή των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας μεταξύ της παρουσίας τύρβης $U_{mean}=0$ m/s με την περίπτωση πλεγματικής τύρβης $U_{mean}=4.35$ m/s που μελέτησε ο Σταπουντζής [13]



Εικόνα 5.4740, 50 Hz Ένταση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων ως συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης $U_{mean}=0$ m/s

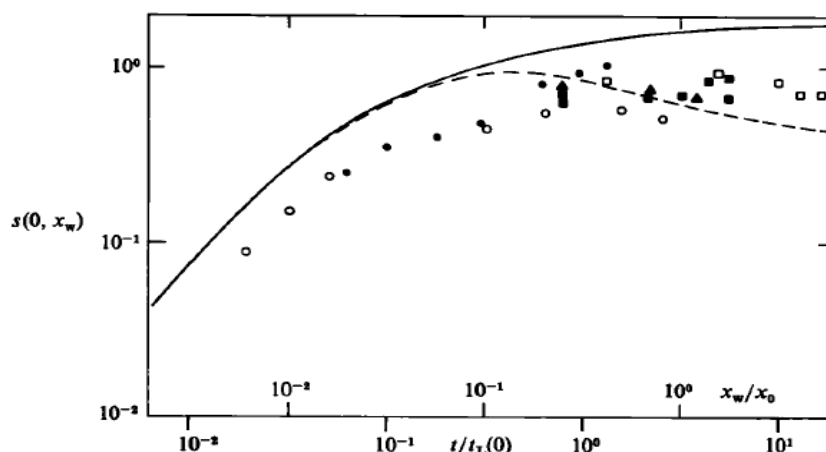


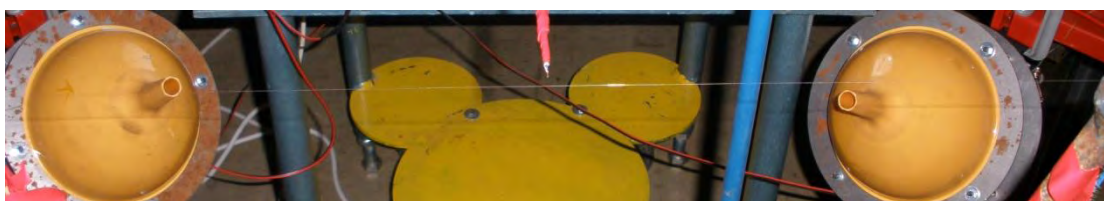
FIGURE 14. Intensity of temperature fluctuation. Experiments: present data, $d_w = 0.152$ mm (\circ); Warhaft (1984), $d_w = 0.127$ mm (\square); $d_w = 0.025$ mm (\bullet); Uberoi & Corrsin (1953), $d_w = 0.203$ mm (\blacksquare); Townsend (1954), $d_w = 0.025$ mm (\blacktriangle). Model results including molecular effects (—); meandering contribution (---).

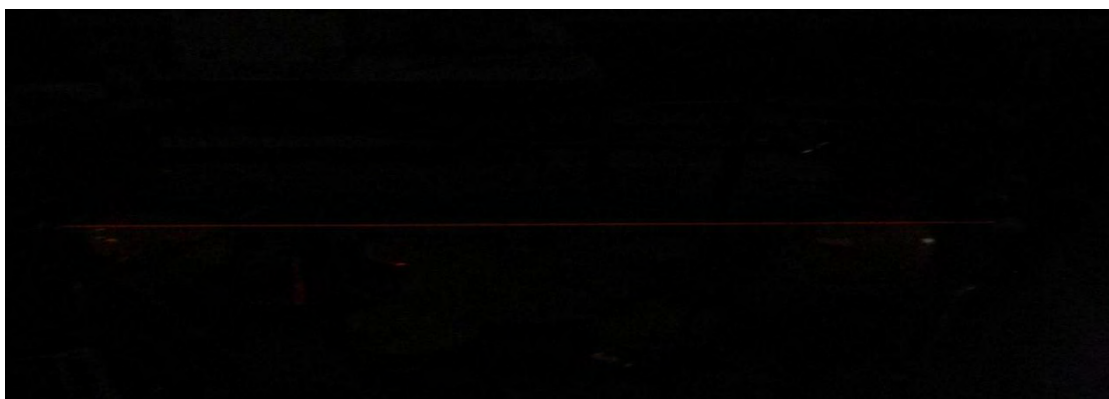
Εικόνα 5.48 Ένταση διακυμάνσεων ως συνάρτηση με την εγκάρσια απόσταση x για πλεγματική τύρβη $U_{mean}=4.35$ m/s Stapountzis [13]

Όσον αφορά τα παρόντα δεδομένα, επιλέχθηκε η κατακόρυφη διάσταση προς μελέτη. Άλλωστε, όπως προαναφέρθηκε, στα επίπεδα των 40, 50 Hz επικρατεί ομοιογένεια κι ισοτροπία όσον αφορά το πλούμιο. Παρατηρώντας τα δύο διαγράμματα αντιλαμβανόμαστε εκ διαμέτρου αντίθετες χωρικές συμπεριφορές της έντασης των διακυμάνσεων. Ως εξήγηση μπορεί να τεθεί το γεγονός της εξασθένησης της τύρβης υπό τη μορφή των διακυμάνσεων της ταχύτητας όσο απομακρυνόμαστε από το γεωμετρικό κέντρο.

5.2 Αντίσταση χρωμονικελίνης $d=0.1\text{ mm}$

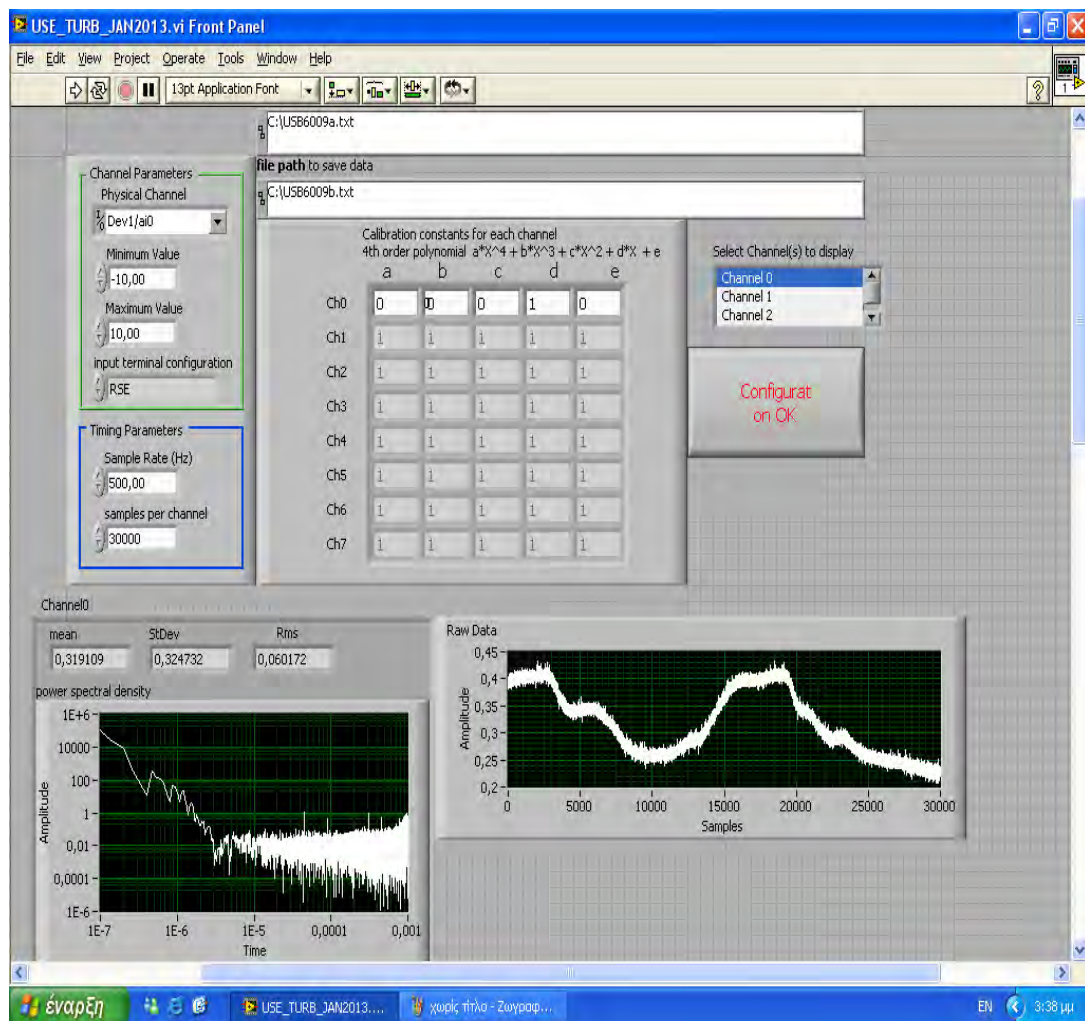
Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε αντίσταση χρωμονικελίνης διαμέτρου $d=0.1\text{ mm}$, η οποία τοποθετήθηκε στην ίδια διάταξη με την αντίσταση του σιδήρου και στερεώθηκε τεντωμένη, έχοντας δύο αντίβαρα στις άκρες της. Η αρχική ισχύς που επιλέχθηκε ήταν $P=55V \cdot 0.6A=33W$. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όμως παρατηρήθηκε ότι καθώς το θερμοστοιχείο απομακρυνόταν από την αντίσταση δεν επέρχετο η αναμενόμενη πτώση της θερμοκρασίας, γεγονός που οφειλόταν στην επίδραση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία από την αντίσταση στο θερμοστοιχείο. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η θέρμανση της αντίστασης με ισχύ $P=35V \cdot 0.4\text{ A}=14\text{ W}$ ή ισοδύναμα 2.154 kW/m .





Εικόνα 5.49 Αντίσταση χρωμονικελίνης $d=0.1mm$ ερυθροπυρωμένη

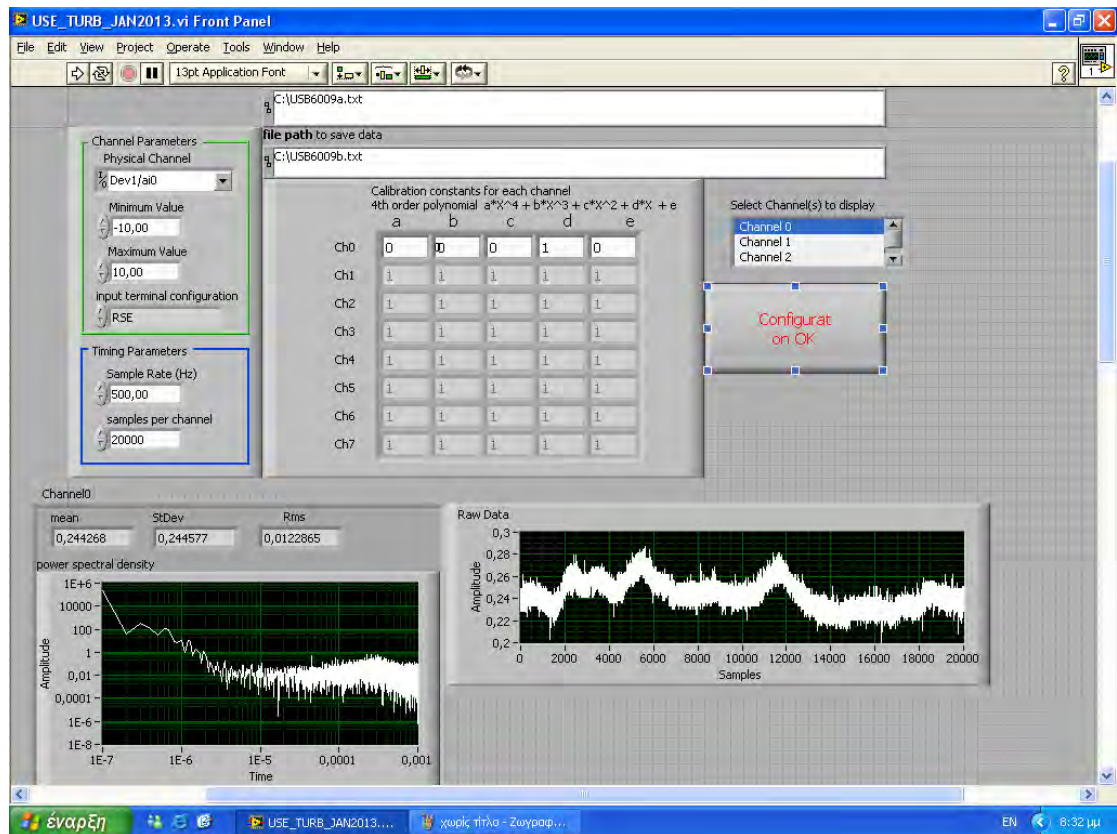
Η παραμικρή διαταραχή ή κίνηση στο χώρο είχε ως αποτέλεσμα την εκτροπή του πλουμίου από την επιθυμητή θέση. Επιπλέον λόγω της ελικοειδούς κίνησης που παρουσιάζει το πλούμιο στην εξέλιξή του έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας του από το θερμοστοιχείο. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η περίοδος δειγματοληψίας προς εξαγωγή της αντιπροσωπευτικής μέσης τιμής για κάθε περίπτωση να είναι **$T_{\text{sampling}} = 60 \text{ seconds}$** , ώστε ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται κι η οικονομία χρόνου κατά τη διξαγωγή των πειραμάτων. Επιπλέον η συχνότητα της δειγματοληψίας ήταν **500 Hz**. Η ελικοειδής (**meandering**) αυτή κίνηση του πλουμίου αποτυπώνεται στις αυξομειώσεις τις θερμοκρασίας κατά τη φορά μετακίνησης του θερμοστοιχείου, οι οποίες παρουσιάζονται στα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν. Επιπλέον διαφαίνεται κι από τις διακυμάνσεις (fluctuations) της θερμοκρασίας κατά την περίοδο δειγματοληψίας στη διεπιφάνεια του λογισμικού.



Εικόνα 5.50 Labview interface $z=0$ mm, $x=3$ mm

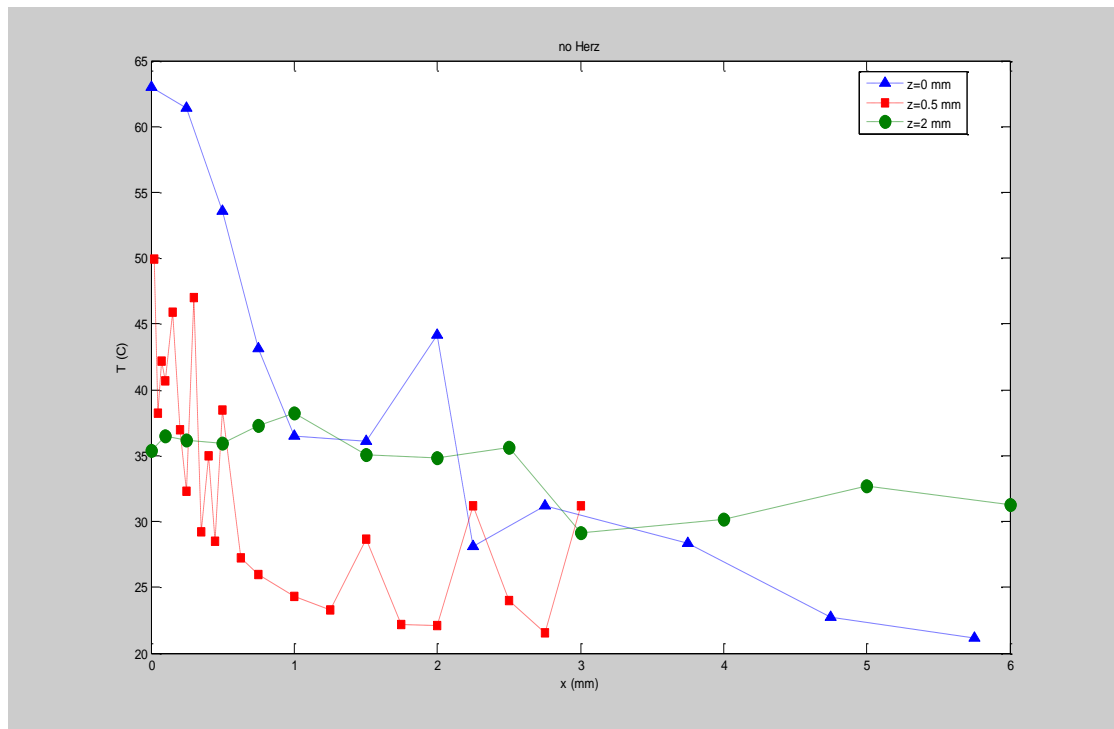
Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται χαρακτηριστικά η μετατροπή του σήματος μέσω της συνάρτησης $y=x$, επιλογή **(30000 δειγμάτων)/500 δείγματα το δευτερόλεπτο=60 sec**. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου $z=0$ mm, $x=3$ mm, παρατηρείται μέση τιμή **31,9 °C** με έντονη όμως παλινρόμηση όπως φαίνεται κι από το γράφημα της τάξεως των **6 °C**, δείγμα της ελικοειδούς κι όχι ευθύγραμμης κίνησης του πλουμίου.

Η διακύμανση αυτή της θερμοκρασίας αποσβένεται με την επιβολή της τύρβης, η οποία όντας ομογενής και ισότροπη επιφέρει αναμειξιμότητα κι θερμοκρασιακή ομοιογένεια. Πιο συγκεκριμένα με την επιβολή **120 Hz**, που συνιστά "**ψηλή**" τύρβη, μικρών δηλαδή χωρικών και χρονικών κλιμάκων, η διακύμανση ανέρχεται στους **1,2 °C** για μέση θερμοκρασία **24.4 °C** όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



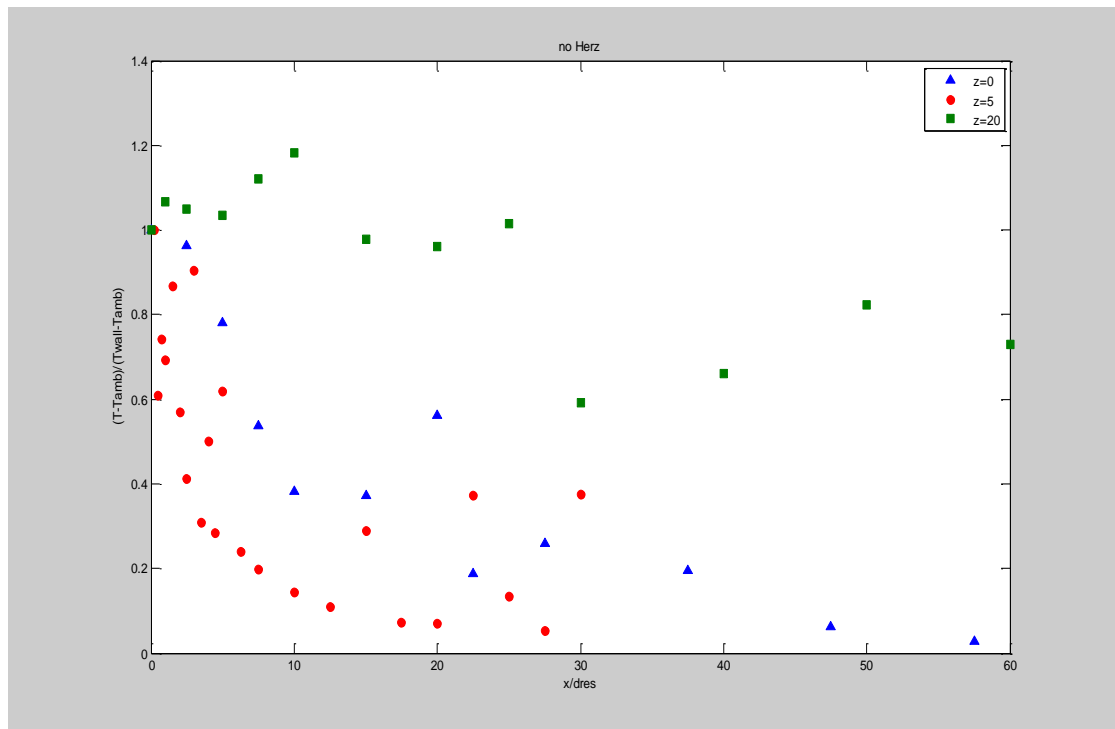
Εικόνα 5.51 Labview interface επιβολή τύρβης 120 Hz

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση x για τρεις κατακόρυφες θέσεις $z=0 \cdot d_{res}$, $z=0.5 \cdot d_{res}$, $z=2 \cdot d_{res}$. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει η παρουσία της τύρβης για τις τρεις κατακόρυφες θέσεις σε απόλυτες τιμές των μεγεθών.

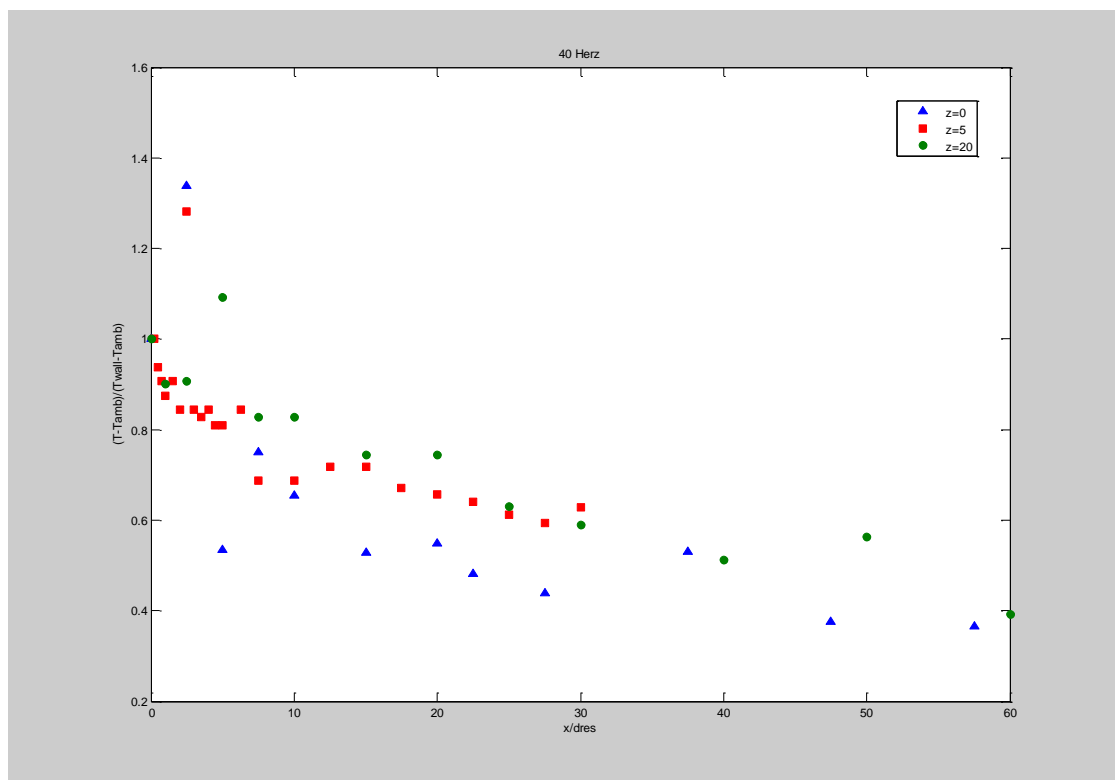


Εικόνα 5.52 no power θερμοκρασία σε συνάρτηση με την εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2$ mm

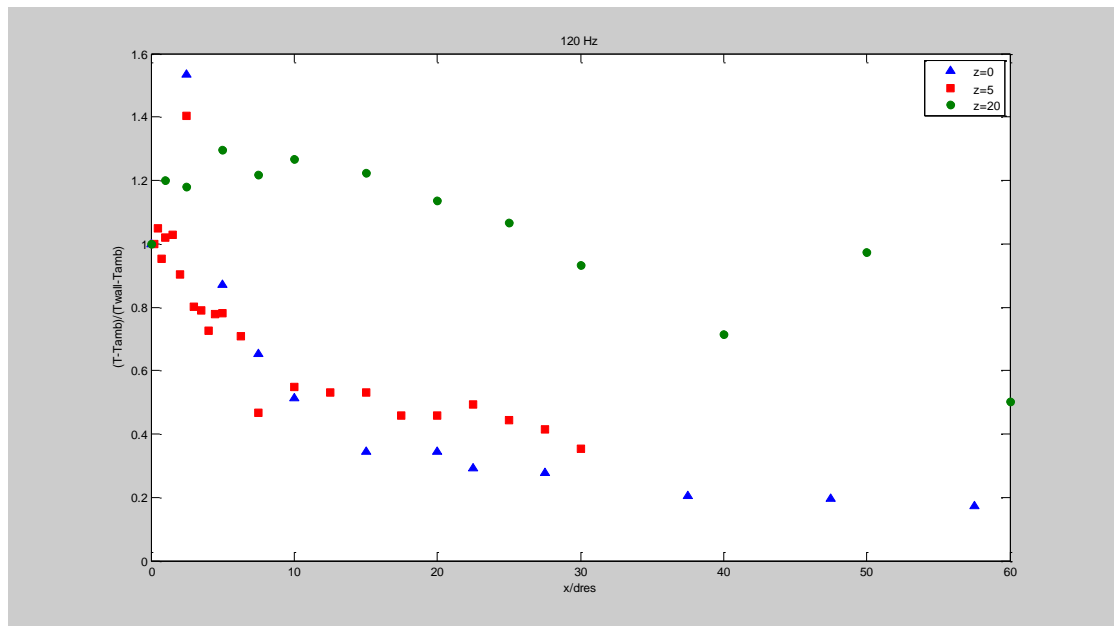
Από το παραπάνω διάγραμμα είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ενώ για τις πολύ μικρές οριζόντιες αποστάσεις η θερμοκρασία για $z=2$ mm είναι όπως αναμένεται μικρότερη από ότι για $z=0$ mm και $z=0.5$ mm όσο αυξάνεται η οριζόντια απόσταση η θερμοκρασία για $z=2$ γίνεται μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι το πλούμιο ανοίγει και διασπείρεται στο χώρο καθώς ανυψώνεται από την αντίσταση. Αυτό επαληθεύεται από την αναπαράσταση των αδιάστατων μεγεθών $\Theta=(T-T_{amb})/(T_{wall}-T_{amb})$, $\eta=x/d_{res}$, όπου η Θ δεικνύει τη σχετική μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου ως προς τη σχετική αύξηση της θερμοκρασίας της αντίστασης.



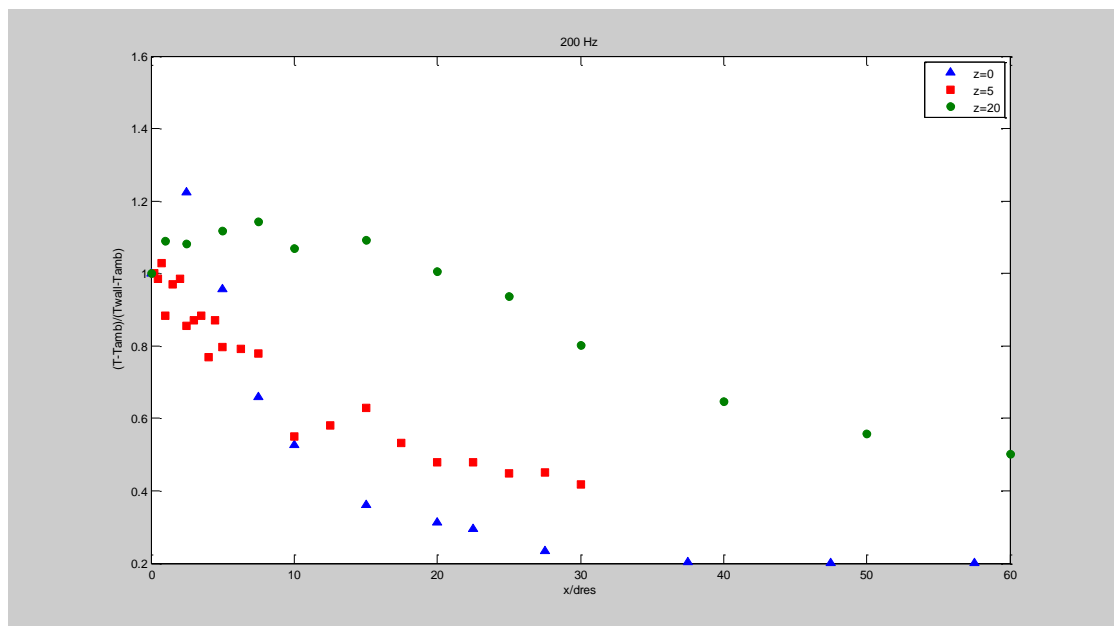
Εικόνα 5.53 no power αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2 \text{ mm}$



Εικόνα 5.54 40 Hz αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2 \text{ mm}$



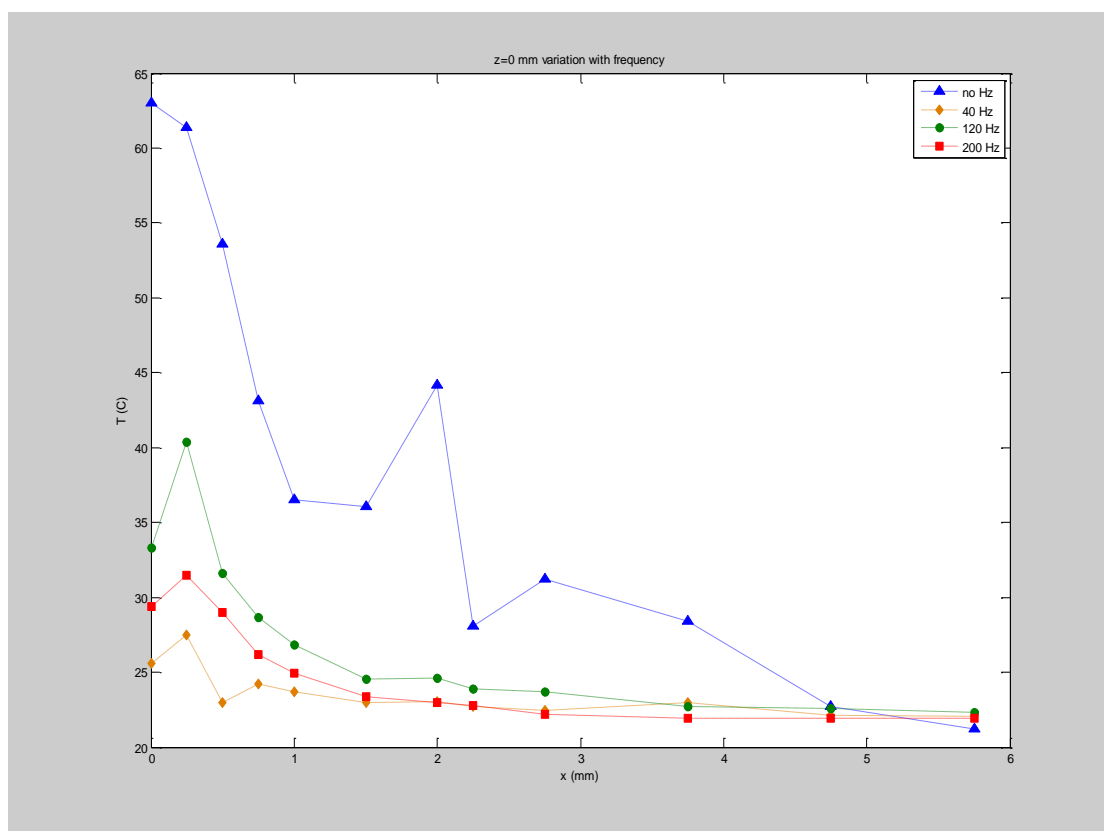
Εικόνα 5.55 120 Hz αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2 \text{ mm}$



Εικόνα 5.56 200 Hz αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια απόσταση x για $z=0, 0.5, 2 \text{ mm}$

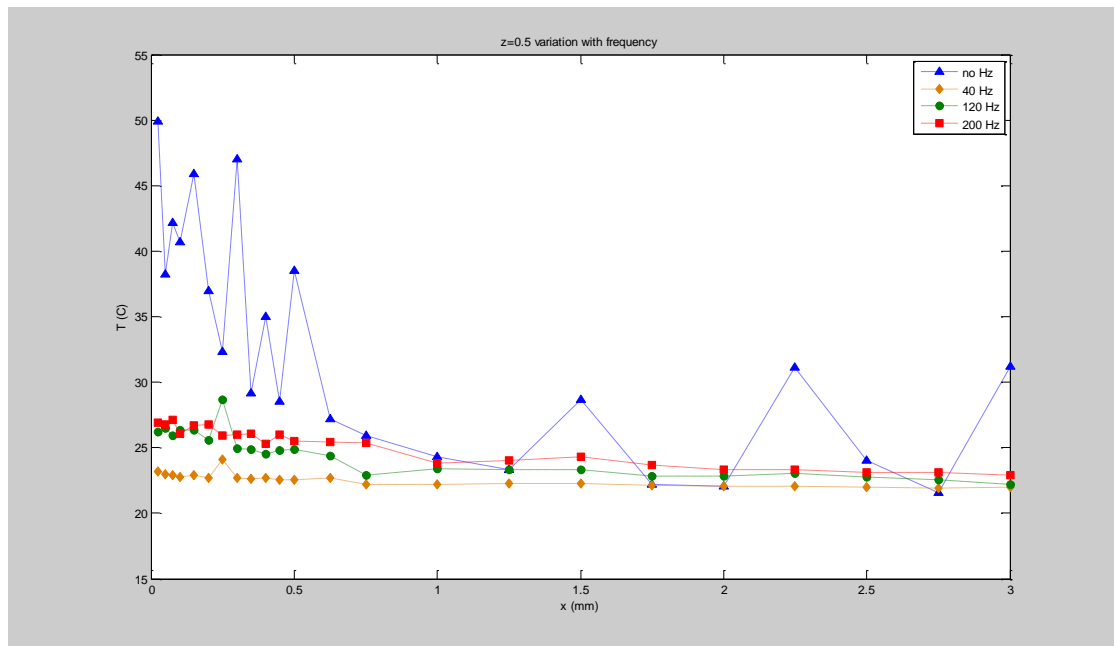
Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα και για τις 4 περιπτώσεις όσο απομακρύνεται το πλούμιο αποκτά όλο και πιο ομογενή υφή πλησιάζοντας την αδιάστατη τιμή $\Theta=1$.

Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας αυτή τη φορά για $z=0$ και την επιβολή τύρβης διαφορετικής συχνότητας μεγαφώνων.

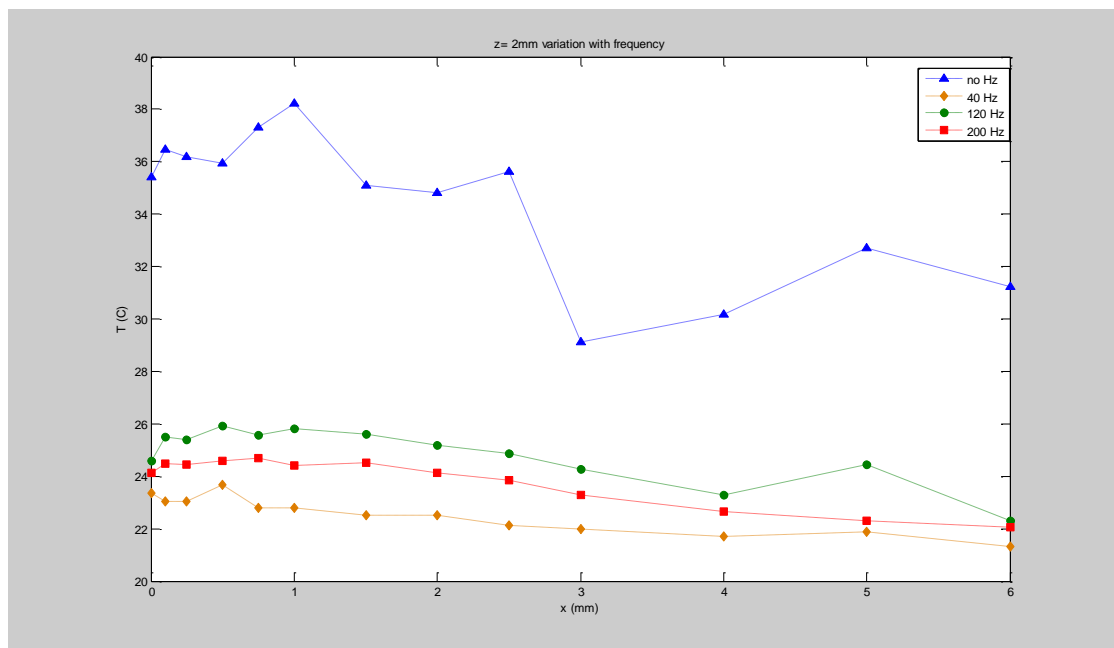


Εικόνα 5.57 $z=0$ θερμοκρασία σε συνάρτηση με την απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz

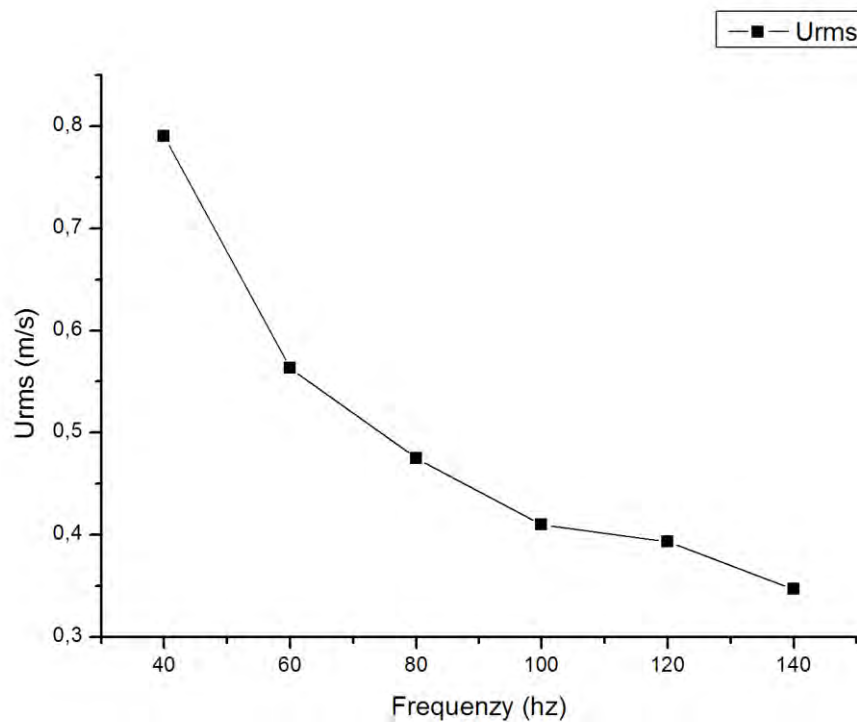
Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η επιβολή της τύρβης επιφέρει τη μείωση της θερμοκρασίας σε όλο το εύρος γύρω από την αντίσταση. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας λαμβάνει χώρα για τη συχνότητα των **40 Hz**. Στα 120 Hz, η τύρβη δείχνει να χάνει την αποτελεσματικότητά της μέρος της οποίας ανακτάται με την αύξηση της συχνότητας στα 200 Hz. Το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ψύξη επιτυγχάνεται στα 40 Hz συμφωνεί με τις μετρήσεις που παραγματοποιήθηκαν μέσω της θερμοκάμερας για την επιφανειακή ψύξη της αντίστασης του σιδήρου στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, η ένταση της τύρβης όπως εκφράζεται μέσω των U_{rms} στη διπλωματική εργασία του Μπαλοδήμου, εμφανίζει τη μεγαλύτερη ένταση για **f=40 Hz**. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται κι από τα διαγράμματα για τις άλλες δύο κατακόρυφες θέσεις.



Εικόνα 5.58 $z=0.5$ mm θερμοκρασία σε συνάρτηση με την απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz

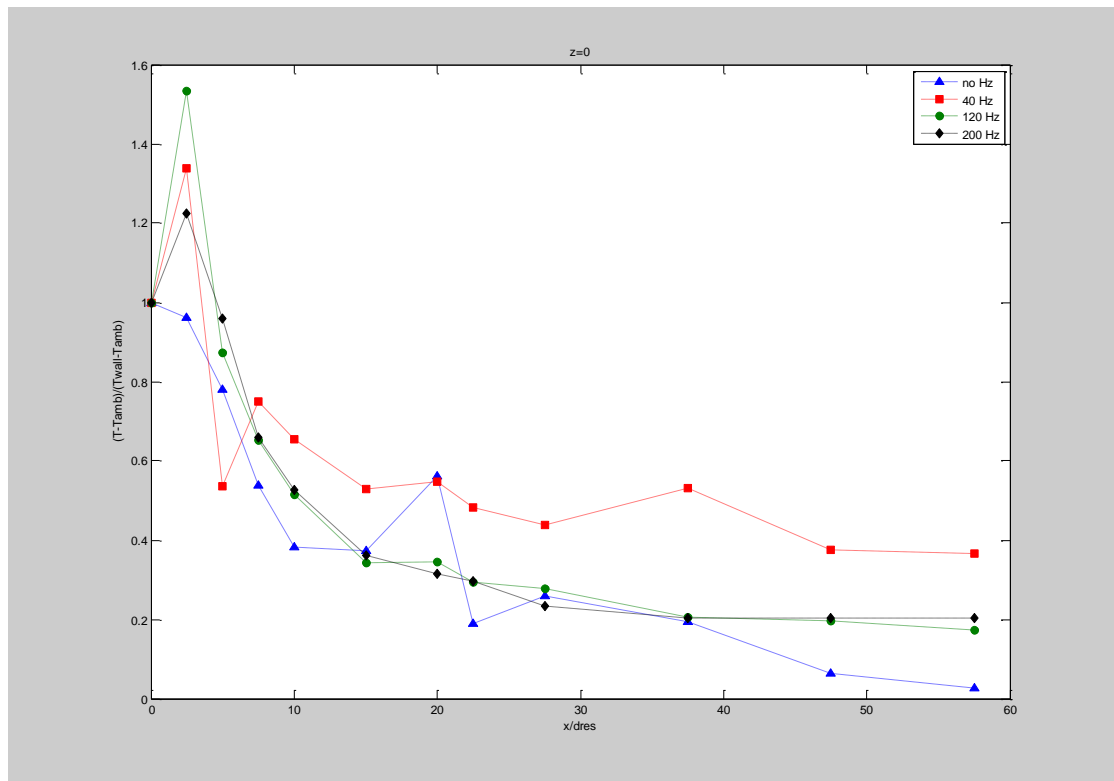


Εικόνα 5.59 $z=2$ mm θερμοκρασία σε συνάρτηση με την απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz

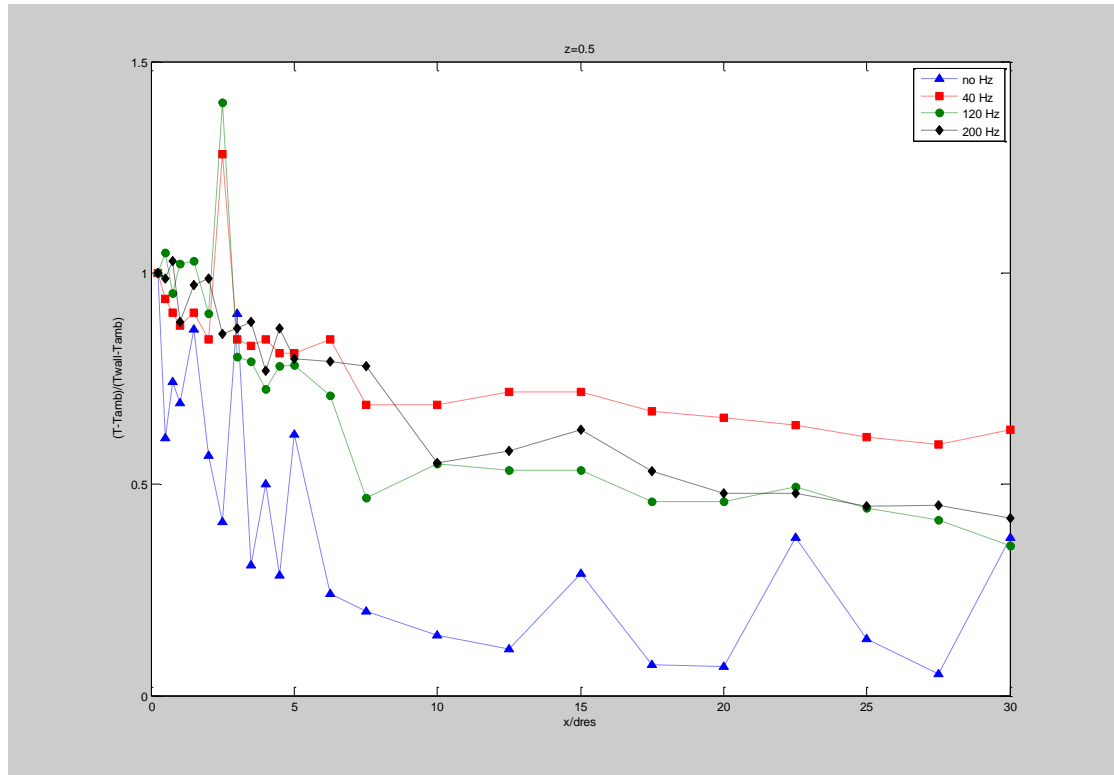


Εικόνα 5.60 Διακυμάνσεις της ταχύτητας στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου δοκιμών όπως μετρήθηκαν στη διπλωματική εργασία του Μπαλοδήμου[21]

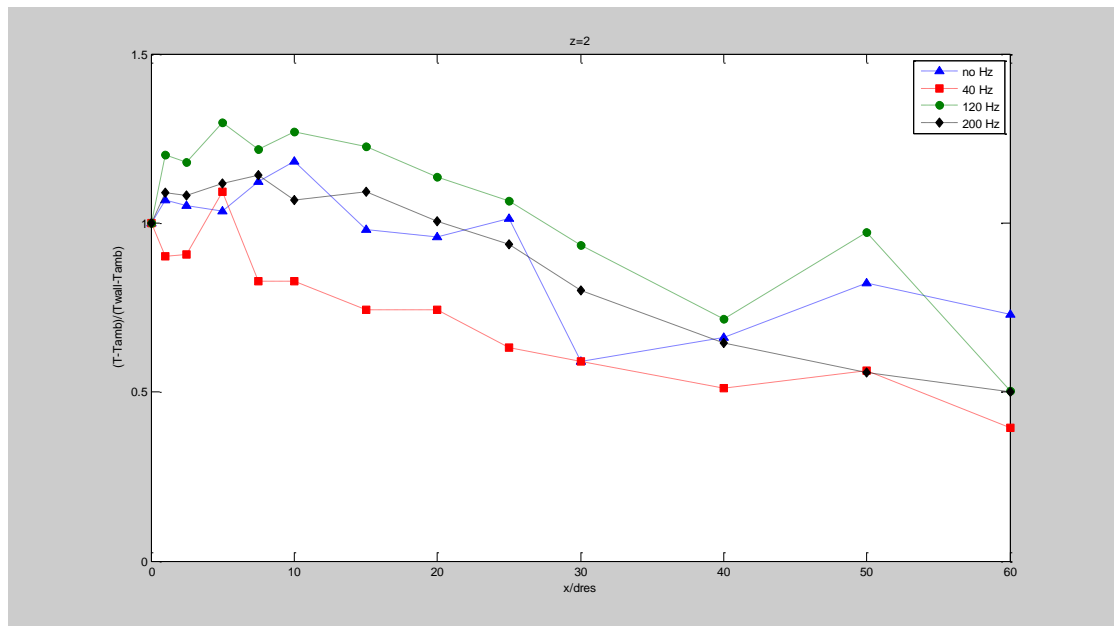
Η αδιάστατη μορφή των διαγραμμάτων θα μας δείξει δε τη διασπορά της θερμοκρασίας στο χώρο που συμβαίνει συγκριτικά για κάθε συχνότητα-ένταση της τύρβης.



Εικόνα 5.61 $z=0$ αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση x για no power-40 - 120-200 Hz



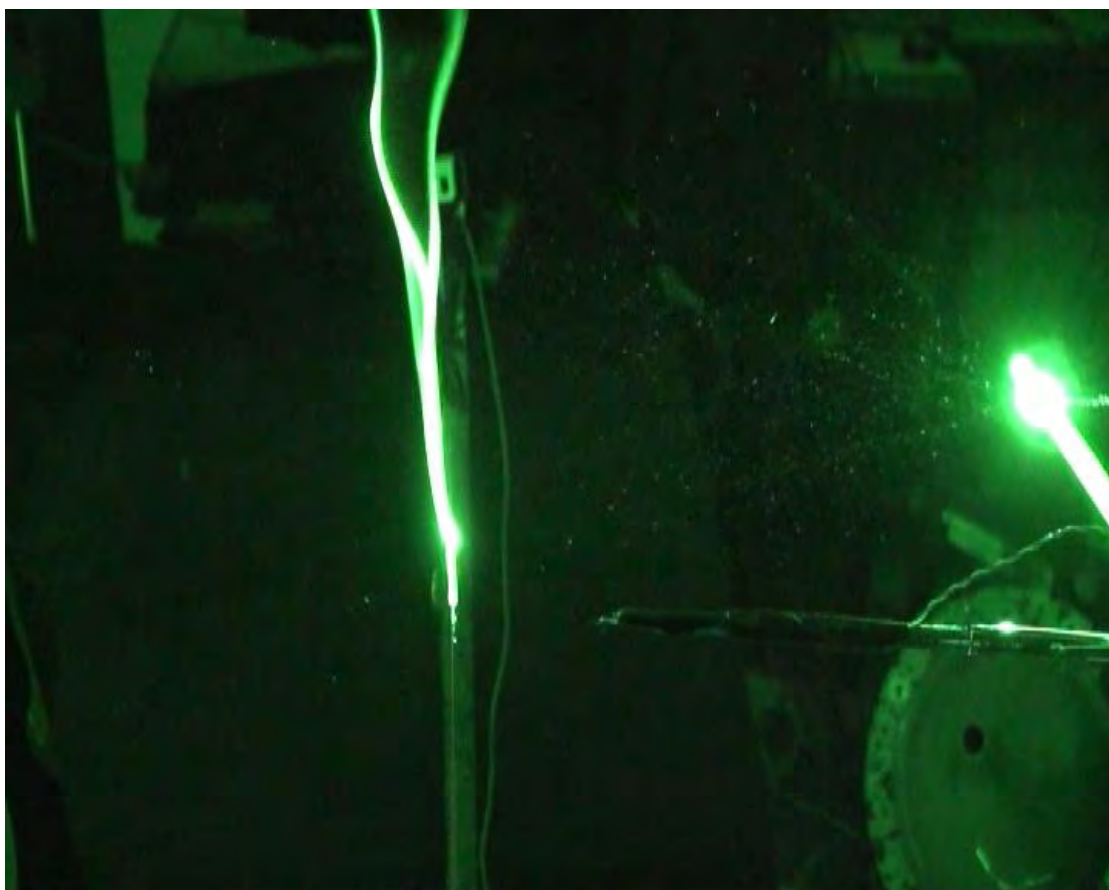
Εικόνα 5.62 $z=0.5$ mm αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz



Εικόνα 5.63 $z=2$ mm αδιάστατη θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση x για no power-40 -120-200 Hz

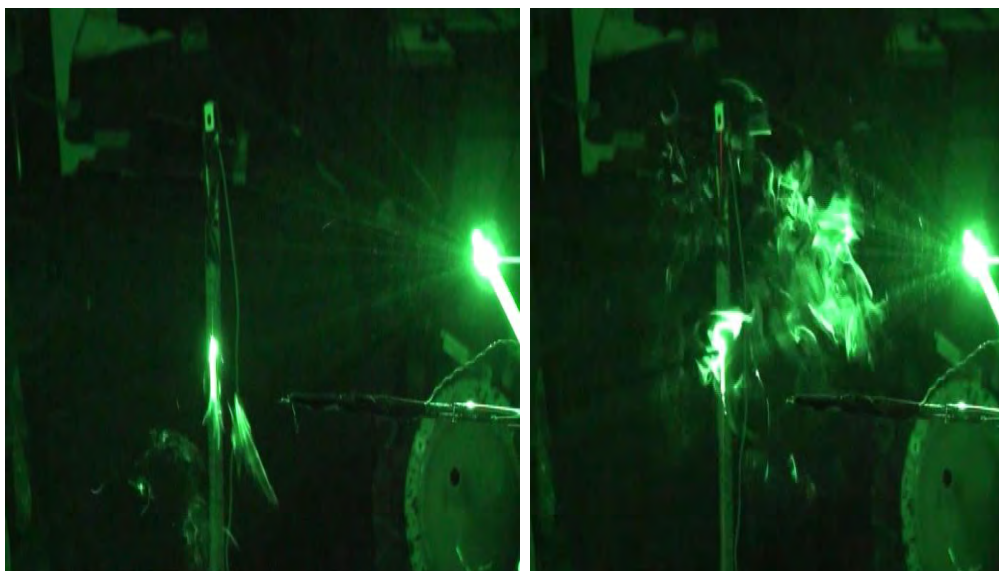
Αξιοσημείωτες είναι οι περιπτώσεις για $z=0$ και $z=5 \cdot dres$, διότι όπως ήδη προαναφέρθηκε για $z=20 \cdot dres$, το πλούμιου εμφανίζει διασπορά και χωρίς την επίδραση της τύρβης. Όπως διαφαίνεται λοιπόν από τα αντίστοιχα διαγράμματα, η μεγαλύτερη διασπορά εμφανίζεται $f=40$ Hz και συμφωνεί με τη μεγαλύτερη ένταση της τύρβης.

5.2.1 Οπτικοποίηση της ροής



Εικόνα 5.64 Θερμικό στρωτό πλούμιο για την αντίσταση της χρωμονικελίνης $d=0.1\text{ mm}$

Από την Εικόνα 5.64 είναι εμφανές το άνοιγμα κι η διασπορά του θερμικού πλουμίου με την αύξηση του ύψους από την αντίσταση.



Εικόνα 5.65 α) επιβολή τύρβης 40 Hz β) επιβολή τύρβης 100 Hz

Η Εικόνα 5.65 επαληθεύει τις παρατηρήσεις που εξήχθησαν για την αντίσταση σιδήρου **d=6.5 mm** αναφορικά με τα αποτελέσματα που επιφέρει η ισχυρότερη τύρβη των **40 Hz** σε σχέση με την τύρβη των **100 Hz**.

Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή επεξέτεινε τη μελέτη των χαρακτηριστικών της τυρβώδους κι ισότροπης τύρβης που δημιουργείται μέσω ακουστικής διέγερσης σε έναν κυβικό θάλαμο. Η οπτικοποίηση της ροής επαλήθευσε το γεγονός ότι η ένταση της τύρβης κι η ικανότητα αναμειξιμότητας είναι ισχυρές στη χρήση χαμηλών συχνοτήτων και δη 40 Hz-urms 0.8 m/s.

Η διερεύνηση της επίδρασής της στο θερμικό πεδίο γύρω από οριζόντια γραμμική πηγή έδειξε ότι επιφέρει ψύξη μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής κι όχι θέρμανση μέσω φθοράς της κινητικής της ενέργειας και μετατροπής της σε θερμότητα (dissipation). Επιπλέον επιτυγχάνονται μειωμένοι χρόνοι μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση κατά τη θέρμανση της πηγής

Όσον αφορά το ανωστικό πλούμιο προκύπτει ότι η μετάβασή του από στρωτό σε τυρβώδες λαμβάνει χώρα σε αδιάστατους αριθμούς Grashof και Rayleigh που συμπίπτουν με θεωρητικές τιμές για θερμαινόμενη κάθετη πλάκα και κύλινδρο αντίστοιχα. Επιπλέον επαληθεύεται η θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του αριθμού Nu για οριζόντιο κύλινδρο ως προς την τάξη μεγέθους. Η συνολική εξέταση καταλήγει στην πλειοψηφία της σε σύγκλισεις με την σημαίνουσα έρευνα του Noto [14]. Η επίδραση δε της ισχυρής τύρβης urms: 0.8 m/s αποσβαίνει τη σημασία του μηχανισμού της φυσικής συναγωγής. Παρατηρείται ότι παρουσία της τύρβης μηδενικής μέσης ταχύτητας η εξέλιξη της θερμοκρασίας στον κατακόρυφη διάσταση εμφανίζει σύγκλιση με την εξέλιξη της θερμοκρασίας στην οριζόντια διεύθυνση υπό την επιδραση πλεγματικής τύρβης με μέση ταχύτητα διάφορη του μηδενός.

6.2 Προτάσεις

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην εργασία αυτή αποτελεί κατά την άποψή μας μία πρώτη φαινομενολογική προσέγγιση του φαινομένου. Λήψη

περισσότερων αξιόπιστων αποτελεσμάτων μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση του θερμοστοιχείου πάνω από την αντίσταση. Σε συνέχεια της συγκεκριμένης εργασίας προτείνεται η θεωρητική ενδοσκόπηση του φαινομένου και η προσπάθεια για εξαγωγή αναλυτικών λύσεων και λύσεων ομοιότητας (similarity solutions) προς σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα που κτήθηκαν, με σκοπό τη εξαγωγή γενικευμένων νόμων που να περιγράφουν το φαινόμενο.

Δεύτερος άξονας στον οποίο θα μπορούσε να κινηθεί ο μελλοντικός ερευνητής είναι η περιοδική πλέον επιβολή φόρτισης σε μεταλλικά στοιχεία προς εξαγωγή χρήσεων συμπερασμάτων στην ανάπτυξη νέων μεθόδων θερμικών κατεργασιών. Η ομογενής κι ισότροπη τύρβη παρέχει το πλεονέκτημα της ομοιόμορφης κατεργασίας.

Παράλληλα η ακουστική διέγερση θα μπορούσε να συνδυαστεί με μια ισχυρή πηγή θερμότητας για να προσομοιάσει τις συνθήκες στην εξαγωγή καυσαερίων θαλάμων καύσης και τη θερμική κόπωση που επιφέρει σε μεταλλικά αντικείμενα που γειτνιάζουν (π.χ πτερύγια στροβίλου πίσω απο θάλαμο καύσης).

Βιβλιογραφία

1. Ερρίκος Σταπουντζής, **Σημειώσεις για το μάθημα Φαινόμενα τύρβης**, 2008
2. Tennekes, H. and Lumley, J.L., **A first course in Turbulence**. MIT Press, Cambridge, MA (1973)
3. Τάσος Σταματέλλος και Ολυμπία Ζώγου, **Βασικές αρχές μετάδοσης θερμότητας με ακτονοβολία-Εκπαιδευτικές σημειώσεις**, 2009
4. Yunus and Cengel, Heat Transfer- a practical approach second edition
5. Deen, **Analysis of Transport Phenomena**
6. Zdrakovitch, **Heat Transfer**
7. Madjid Birouk, Brahim Sahr and Iskender Gokalp, **An Attempt to Realize Experimental Isotropic Turbulence at Low Reynolds Number**, (2003)
8. W. Hwang, J.K. Eaton, **Creating homogenous and isotropic turbulence without mean flow**, (2004)
9. Charles Goepfert, Jean-Louis Marie, Delphin Chareyron, Michel Lance, **Characterization of a system generating a homogenous isotropic turbulence field by free synthetic jets**, (2009)
10. Barton L. Smith and Ari Glezer, **The formation and evolution of synthetic jets**, 1998
11. Herricos Stapountzis, Georgios Charalampous, Dimitrios Tziourtzioumis, Anastasios Stamatelos, **Diffusion in synthetic jet generated turbulence**, 2013
12. Guy Lauriat and Gilles Desrayaud, **Buoyant plane plumes from heated horizontal confined wires and cylinders**, 1994
13. 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**, 1985
14. K.Noto, **Swaying Motion in Thermal Plume above an Horizontal Line Heat Source**, 1986

15. Roland Wilberg, Noam Lior, ***Heat transfer from a cylinder in axial turbulent flows***, 2004
16. H.J. Nawoj, R.S. Hickman, ***An Experimental Investigation of the Plume Velocity Field Above an Horizontal Line Heat Source***
17. Elmar Achenbach, ***Total and Local Heat Transfer from a smooth circular cylinder in cross-flow at high Reynolds Number***, 1974
18. Giovanni Maria Carlomagno and Luigi de Luca, ***Infrared Thermography for Flow visualisation and Heat Transfer Measurements***,
19. Adrian Jansen, ***Natural Convection above an horizontal heat source-Msc thesis***, 1993
20. Αφροδίτη Ζησιμάτου, Πειραματική και Θεωρητική Διερεύνηση Φαινομένων Ανάμειξης σε ρυρβώδη ροϊκά πεδία με στρωματοποίηση και περιστροφή (Διδακτορική διατριβή), 2011
21. Μπαλοδήμος, Ηλίας, ***Δημιουργία τυρβώδους ροϊκού πεδίου μέσω ακουστικής διέγερσης***, 2013
22. Schorr, Gebhart, ***An experimental invenstigation of natural convection wakes above a line heat source***, 1969
23. K. Brodowicz, W.T. Kierkus, ***Experimental investigation of laminar free-convection flow in air above horizontal wire with constant heat flux***, 1965

Παράρτημα

Αναλυτική περιγραφή του κώδικα (flow visualisation)

```
clear all; close all; clc;          % clearing data

%%
% define user input parameters
%%
% Σε αυτό το σημείο από όλη την εικόνα που οι διαστάσεις της δίνονται
από τα pixels επιλέγεται εκείνο το χωρίο της εικόνας που θα τεθεί
αργότερα προς επεξεργασία μέσω των συντεταγμένων (y,x) που σμπίπτουν
αντίστοιχα με τις στήλες και τις γραμμές του πίνακα που δημιουργείται
όταν εισάγεται η εικόνα
xl = 1;                             % ορίζεται ο αριθμός εκείνος της σειράς
του πίνακα από όπου θα ξεκινήσουμε την επεξεργασία
xr = 200;                           % ορίζεται ο αριθμός εκείνος της σειράς
του πίνακα από όπου θα τελειώσουμε την επεξεργασία
yl = 1;                             % ορίζεται ο αριθμός εκείνος της στήλης
του πίνακα από όπου θα ξεκινήσουμε την επεξεργασία
yr = 250;                           % ορίζεται ο αριθμός εκείνος της στήλης
του πίνακα από όπου θα τελειώσουμε την επεξεργασία

frame = 100;                         % επιλογή μιας μεμονωμένης εικόνας προς
επεξεργασία
frame_file = 'jpg';                 % καθορίζεται ο τύπος αρχείου με τον
οποίο έχουμε αποθηκεύσει τις εικόνες μας
contour_nr = 50;                   % δίνεται το επίπεδο ανάλυσης της
απεικόνισης του πεδίου μέσω ισοσταθμικών καμπυλών φωτεινότητας
frame_slice_x = 100;               % δίνεται η οριζόντια συντεταγμένη στην
οποία προτίθεται να γίνει κατακόρυφη μελέτη της φωτεινότητας
step=3                             % ορίζεται το βήμα με το οποίο
επιλέγονται τα frames έτσι ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος
(γίνεται αραιώση δηλαδή του δειγματικού μας χώρου)
frame_range = [0:5:335];           % δημιουργία μονοδιάστατου πίνακα με
τα frames που επιλέγονται προς επεξεργασία
point_x = 100;                     % τεταγμένη του σημείου όπου
τοποθετείται το ενδιαφέρον μας προς μελέτη για εμάς είναι η εξαγωγή
του ηλεκτρικού καπνογόνου
point_y = 170;                     % τετμημένη του σημείου όπου
τοποθετείται το ενδιαφέρον
Fs = 25;                           % συχνότητα δειγματοληψίας της
videocamera (in Hz)
T=frame_range/Fs                   % μετασχηματισμός από πεδίο συχνότητας
σε χρόνο (s)
initial=84                         % frame στο οποίο ανοίγουν τα μεγάφωνα
finish=340                         % frame στο οποίο κλείνουν τα μεγάφωνα
kritierion=4;                      % κριτήριο σύγκλισης για τον υπολογισμό
του χρόνου μετάβασης σε steady state
xksteady=77.2;                     % τεταγμένη του κέντρου βάρους στη
μόνιμη κατάσταση (θα αποτελέσει το μέτρο σύγκρισης για την εξαγωγή
του χρόνου μετάβασης)
f=60                               % συχνότητα των μεγαφώνων (Hz)

%%
% δημιουργία μητρώου της εικόνας για το μεμονωμένο frame
```

```

file = sprintf('smoky_60Hz%0.1i',frame); % δημιουργία μιας
μεταβλητής τύπου "string" (χαρακτήρας), όπου στη συγκεκριμένη
περίπτωση για frame =100 το εξαγόμενο αποτέλεσμα θα είναι:
smoky_60Hz100. Για αυτό το λόγο οι εικόνες θα πρέπει να εξάγονται από
το virtual dub στην αντίστοιχη μορφή.
a = double(imread(file,frame_file)) % στον πίνακα a
διαβάζεται κι αποθηκεύεται η εικόνα ως δισδιάστατο μητρώο
a=rot90(a,2); % περιστροφή του μητρώου για να εμφανιστεί
κανονικά ο κατακόρυφος προσανατολισμός, αντιστρέφοντας όμως τον
οριζόντιο
Is = a(xl:xr,yl:yr); %τελική επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος
κι αποθήκευση σε πίνακα

% δημιουργία μητρώου της εικόνας για όλα τα frames

for i=1:length(frame_range)
    file = sprintf('smoky_60Hz%0.1i',frame_range(i));
    a = double(imread(file,frame_file));
    a=rot90(a,2);
    I = a(xl:xr,yl:yr);
    I_all(:, :, i) = I; % δημιουργία τριών διαστάσεων μητρώου , όπου
    δύο πρώτες διαστάσεις περιλαμβάνουν τον πίνακα έντασης της
    φωτεινότητας κι η τρίτη διάσταση αναφέρεται στο αντίστοιχο frame
end

% υπολογισμός του πίνακα μέσης τιμής της φωτεινότητας για όλα τα
frames
for i=1:size(I_all,1) % η εντολή size έχει σαν ορίσματα τον πίνακα
και την αντίστοιχη διάσταση που με ενδιαφέρει και μου δίνει σαν
αποτέλεσμα το μήκος της επιλεγμένης διάστασης
for j=1:size(I_all,2)
    I_av(i,j)=mean(I_all(i,j,:)); % μέση τιμή όλων των frames για
    κάθε σημείο στον δισδιάστατο χώρο
end
end

% δημιουργία μονοδιάστατου πίνακα που περιέχει τις τιμές της
φωτεινότητας για κάθε frame στο σημείο ενδιαφέροντος
I_x_y = squeeze(I_all(point_x,point_y,:));

% υπολογισμός γρήγορου μετασχηματισμού fourrier στο σημείο
ενδιαφέροντος
L = length(I_x_y);
NFFT = 2^nextpow2(L); % η μικρότερη δύναμη του 2 για την οποία ισχύει
 $2^{NFFT} \geq |L|$  χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τον υπολογισμό του FFT
Y = fft(I_x_y,NFFT)/L; % υπολογισμός fft
f = Fs/(2*step)*linspace(0,1,NFFT/2+1); υπολογισμός πεδίου συχνοτήτων

% απεικόνιση του πεδίου με τη χρήση ισοσταθμικών καμπυλών έντασης
φωτεινότητας για το μεμονωμένο frame
figure(1) %το παράθυρο 'figure' που θα τοποθετηθεί το γράφημα
(αριθμείται έτσι ώστε με την κατασκευή ενός νέο γραφήματος να μην
καταληφεί η θέση του από το καινούργιο και χαθεί)
contourf(Is,contour_nr,'LineStyle','none'); % κατασκευή της
δισδιάστατης αναπαράστασης που είναι το εχάθέν προϊόν μας με
ορίσματα το μητρώο-εικόνα το επίπεδο ανάλυσης και με επιλογή να μην
υπάρχει διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα
φωτεινότητας
xlabel('pixel number in x'); % πρόσδοση οριζόντιου τίτλου
ylabel('pixel number in y'); % πρόσδοση κατακόρυφου τίτλου

```



```

title(['contours of light intensity at frame ',num2str(frame)]); %
πρόσδοση γενικού τίτλου, όπου με την εντολή num2str επιτυγχάνουμε να
μετατρέψουμε μια αριθμητική τιμή σε χαρακτήρα έτσι ώστε να την
συγχωνεύσουμε με το κείμενό μας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση
καθορίζουμε για ποιο frame έχει κατασκευαστεί το γράφημα
colormap(jet); % δίδεται η χρωματική ποικιλία με βάση την οοίασ α
γίνει η αναπαράσταση
colorbar; % εισαγωγή της αντίστοιχης στήλης αντίστοιχα που μας δίνει
να επίπεδα χρωματισμών
h1=colorbar;
xlabel(h1,'light intensity'); % ονομασία της προαναφερθείσας στήλης
axis equal; % αναλογία 1-1 στους άξονες

% % απεικόνιση του πεδίου με τη χρήση ισοσταθμικών καμπυλών έντασης
φωτεινότητας (μέση τιμή όλων των 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;

% κατασκευή γραφήματος για την αναπαράσταση της φωτεινής έντασης σε
μια οριζόντια θέση σαν συνάρτηση της κατάκόρυφης συντεταγμένης για το
μεμονωμένο frame
figure(3)
plot(Is(:,frame_slice_x)); % η οριζόντια θέση μένει σταθερή (στήλη)
και το ύψος κυμαίνεται σε όλες τις κατακόρυφες θέσεις
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)]);

% % κατασκευή γραφήματος για την αναπαράσταση της φωτεινής έντασης σε
μια οριζόντια θέση σαν συνάρτηση της κατάκόρυφης συντεταγμένης (μέση
τιμή των 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']);

% κατασκευή διαγράμματος χρόνου-φωτεινής έντασης για το σημείο
ενδιαφέροντος
figure(5)
plot(T,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)]);

% κατασκευή γραφήματος στο φάσμα των συχνοτήτων για την φωτεινή ένταση
στο σημείο ενδιαφέροντος
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');

```

```

% αποθήκευση όλων των παραπάνω πινάκων που έχουν δημιουργηθεί κι
εξαγωγή τους σε txt files διαχωρισμένα με το πλήκτρο tab ανάμεσά τους
A=[Is];
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_',num2
str(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(fram
e_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');

```

% υπολογισμός κέντρου βάρους και υδραυλικής ακτίνας
 Το κέντρο βάρους για τον πίνακα δίνεται από:

$$x_k = \frac{\sum_i \sum_j x_i I_{ij}}{\sum I_{ij}} \quad y_k = \frac{\sum_i \sum_j y_j I_{ij}}{\sum I_{ij}}$$

```

% για κάθε frame
for j=1:length(frame_range)
% εισαγωγή εικόνας και δημιουργία μητρώου
    file = sprintf('smoky_0Hz%0.1i',frame_range(j));
    a = double(imread(file,frame_file));
    a=rot90(a,2);
    I = a(xl:xr,yl:yr);
% υπολογισμός κέντρου βάρους
    kx=xl:xr;
    lx=kx*I;
    xk(j)=sum(sum(lx))/sum(sum(I));
    ky=(yl:yr)';
    ly=I*ky;
    yk(j)=sum(sum(ly))/sum(sum(I));
% σε αυτό το σημείο δημιουργείται ένας πίνακας (200·250)x2 , όπου
κάθε γραμμή περιέχει όλα τα ζεύγη (τετμημένης-τεταγμένης)
    [x y] = find(I==I);
% σε αυτό το σημείο αλλάζει η αρχή των αξόνων η οοία και μεταφέρεται
στο σημείο εξαγωγής του καπνού
    xf=x-100;
    yf=y-178;
% ο παρακάτω πίνακας περιέχει σε κάθε γραμμή ο νέο ζεύγος
συντεταγμένων και την αντίστοιχη τιμή της φωτεινής έντασης
    matr2 = [xf yf I(:)];
% μετατροπή συντεταγμένων από καρτεσιανές σε πολικές
    r=sqrt(xf.^2+yf.^2); % υπολογισμός ακτίνας (απόστασης κάθε
σημείου από αρχή των αξόνων)
    [a b] = size(matr2); % υπολογισμός των διαστάσεων του πίνακα

```

```

% υπολογισμός της γωνίας ου σχηματίζει κάθε σημείο με τον οριζόντιο
% άξονα
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

% ταξινόμηση της γωνίας κατά αυξαντα αριθμό
[angleb ii] = sort(angle); % η γωνία ταξινομείται στην πρώτη
% στήλη αλλά στη δεύτερη στήλη συγκρατάται η αρχική της θέση
I2 = I(:);
I3 = I2(ii); % αντιστοιχίζεται η φωτεινότητα στη συγκεκριμένη
% θέση
r2 = r(ii); % αντιστοιχίζεται η ακτίνα στη συγκεκριμένη θέση

matr3 = [angle' r I(:)]; % αρχικός πίνακας
matr4 = [angleb' r2 I3]; % πίνακας με τα στοιχεία ταξινομημένα
% κατά αυξουσα τιμή ακτίνας

% παρεμβολή
[angle2,rad2] = meshgrid(0:1:360,0:1:160); % δημιουργία
% δισδιάστατου πεδίου με όλα τα σημεία από μήκος 0 έως 160 pixels
% και γωνία 0 έως 360 μοίρες
[xi,yi]=pol2cart(angle2,rad2); % μετατροπή τους σε καρτεσιανές
[X,Y] = pol2cart(angleb(1:end-1),(r2(1:end-1))'); % μετατροπή εκ
% νέου σε καρτεσιανές του ταξινομημένου κατά γωνία πίνακά μας
Iint = griddata(X,Y,I3(1:end-1),xi,yi); % παρεμβολή

rm(j) = sum(sum(Iint.*rad2))/sum(sum(Iint)); % υπολογισμός
% υδραυλικής ακτίνας
end

% υπολογισμός αποθήκευση κι εμφάνιση μέσης υδραυλικής ακτίνας για
% κάθε συχνότητα
rm_av = mean(rm);
disp(['The average hydraulic radius from all frames is
',num2str(rm_av)]);
save(['average hydraulic radius','.dat'],'rm_av','-ascii', '-tabs');

% γράφημα εξέλιξης υδραυλικής ακτίνας σε κάθε συχνότητα ηχείων
figure(7)
plot(T,rm);
xlabel('frame number');
ylabel('mean hydraulic radius');
title('mean hydraulic radius for every image frame');

```

```

% γράφημα εξέλιξης κέντρου βάρους σε κάθε συχνότητα ηχείων

figure(8)
plot(frame_range,xk);
xlabel('frame number');
ylabel('y coordinate of c.g. position');
title('y coordinate of c.g. position for every image frame');
figure(9)
plot(frame_range,yk)
xlabel('frame number');
ylabel('x coordinate of c.g. position');
title('x coordinate of c.g. position for every image frame');
% υπολογισμός αποθήκευση κι εμφάνιση μέσου κέντρου βάρους για κάθε
συχνότητα
CG=[mean(xk) mean(yk)]
save(['Center of Gravity','.dat'],'CG','-ascii', '-tabs');
disp(['the mean center of gravity from all frames is',CG]);

% υπολογισμός χρόνου μετάβασης από την κατάσταση χωρίς ηχεία στην
κατάσταση με αυτά (ο χρόνος αρχίζει να μετράει από τη στιγμή που
ανοίγουν τα ηχεία κι αντιστοιχεί στο frame initial κι αντίστοιχα για
τα αραιωμένα frames στο μετρητή initial/step έως το τέλος,
διακόπτεται δε όταν η η κατακόρυφη συντεταγμένη πλησιάσει την τιμή που
έχει στην μόνιμη κατάσταση με ηχεία για την αντίστοιχη συχνότητα κι
έχει υπολογιστεί εκ προοιμίου χωρίς να περιλαμβάνεται το συγκεκριμένο
μέρος του κώδικα)
for count1=(initial/step):length(frame_range)
    if abs(xk(count1)-xksteady)<kriterion
        break
    end
end
transient_time=(count1*step-initial)/Fs % η τιμή count1 έχει
συγκρατήσει την τιμή στη στιγμή της σύγκλισης
save('transient time.dat','transient_time','-ascii','-tabs')

% η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον χρόνο μετάβασης κατά το
σβήσιμο των μεγαφώνων, όπου με finish συμβολίζουμε το frame κατά το
σβήσιμο των μεγαφώνων
for count2=(finish/step):length(frame_range)
    if abs(xk(count1)-xksteady)<kriterion
        break
    end
end
transient_time_2=(count2*step-initial)/Fs
save('transient time_2.dat','transient_time_2','-ascii','-tabs')

```

Υπορουτίνα υπολογισμού συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

```

function [ pd ] = prodefun( x,k )
%constructs the pdf function without fitting a certain distribution
n=length(x)
m1=min(x)
m2=max(x)
in=(m2-m1)/k
s=0

```

```

for i=1:n
    if x(i)==m2
        s=s+1
    end
end
low=m1
up=low+in
for j=1:k
    xm(j)=low+in/2
    f(j)=0
    for i=1:n
        if x(i)>=low&x(i)<up
            f(j)=f(j)+1
        end
    end
    low=low+in
    up=up+in
end
f(k)=f(k)+s
pd=f/(n*in)
plot(xm,pd)
end

```